



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

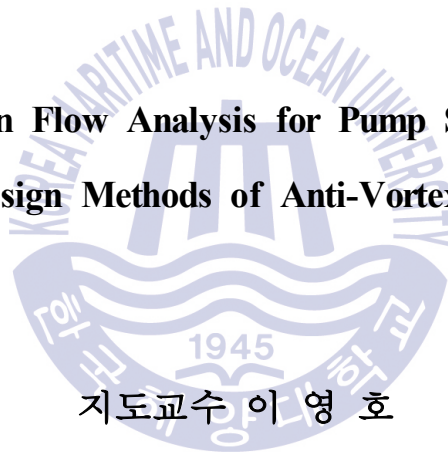
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

흡수정 모델의 유동해석과
와류제거장치(AVD) 설계에 관한 연구

**A Study on Flow Analysis for Pump Sump Model
and Design Methods of Anti-Vortex Device**



지도교수 이영호






2013년 7월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

김창구

본 논문을 김창구의 공학박사 학위논문으로 인준함.

| | | |
|-----|-------|---|
| 위원장 | 정 재 현 |  |
| 위원 | 정 형 호 |  |
| 위원 | 박 권 하 |  |
| 위원 | 최 중 응 |  |
| 위원 | 이 영 호 |  |

2013년 7월 26일

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|-----------------------|------|
| List of Tables | iv |
| List of Figures | vi |
| Abstract | x |
| Nomenclature | xiii |

1. 서 론

| | |
|----------------|---|
| 1.1 연구배경 | 1 |
| 1.2 연구동향 | 3 |
| 1.3 연구목적 | 4 |

2. 흡수정 모델 시험을 통한 AVD 설계

| | |
|---------------------------------|----|
| 2.1 와류제거장치(AVD) 개요 | 5 |
| 2.2 흡수정 시험 방법 | 8 |
| 2.2.1 상사조건 | 8 |
| 2.2.2 측정 및 운전장치 | 10 |
| 2.2.3 보텍스 구분 및 판정기준 | 12 |
| 2.3 흡수정 시험 | 16 |
| 2.3.1 냉각탑 유형 | 16 |
| 2.3.2 좁은 입구 유형 | 38 |
| 2.3.3 넓은 입구 유형 | 62 |
| 2.4 와류제거장치의 설계 | 84 |
| 2.4.1 와류제거장치의 설계 요인 | 84 |
| 2.4.2 형상에 따른 와류제거장치 설계 요소 | 85 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 3. 흡수정 모형실험 | |
| 3.1 실험장치 | 88 |
| 3.1.1 흡수정 모형설계 | 88 |
| 3.1.2 흡입관 | 91 |
| 3.1.3 순환펌프와 인버터 | 92 |
| 3.1.4 흡수정 모형 실험장치 | 93 |
| 3.2 실험조건 및 측정방법 | 94 |
| 3.2.1 보텍스 브레이커 설치 유무 | 94 |
| 3.2.2 스월메타 종류 | 95 |
| 3.2.3 스월메타 설치 위치 | 97 |
| 3.2.4 흐름분배기 | 99 |
| 3.2.5 와류제거장치 부착 | 100 |
| 3.2.6 실험 케이스 정리 | 102 |
| 3.3 흡수정 실험 결과 및 고찰 | 103 |
| 3.3.1 보텍스 브레이커 설치 유무에 따른 스월각 비교 | 103 |
| 3.3.2 스월메타 타입에 따른 스월각 비교 | 104 |
| 3.3.3 스월메타 설치 위치에 따른 스월각 비교 | 107 |
| 4. 흡수정 PIV 유동계측과 수치해석 | |
| 4.1 PIV 유동가시화 | 109 |
| 4.1.1 PIV 개요 | 109 |
| 4.1.2 PIV 실험장치의 구성 | 111 |
| 4.1.3 조명 및 추적입자 | 112 |
| 4.1.4 영상입력 및 저장장치 | 113 |
| 4.1.5 동일입자 추적 | 114 |
| 4.2 수치해석 개요 | 115 |
| 4.2.1 지배방정식 | 115 |
| 4.2.2 이산화방법 | 117 |
| 4.2.3 난류모델 | 124 |

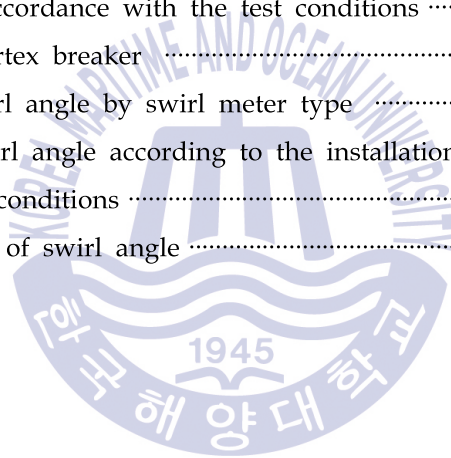
| | |
|-------------------------------------|-----|
| 4.3 PIV 계측 | 129 |
| 4.3.1 흐름분배기 유동특성 | 129 |
| 4.3.2 흡입관 주위의 유동특성 | 133 |
| 4.3.3 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-1) | 136 |
| 4.3.4 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-2) | 141 |
| 4.3.5 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-3) | 145 |
| 4.3.6 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-4) | 148 |
| 4.4 수치해석 | 149 |
| 4.4.1 3D 형상과 격자생성 | 149 |
| 4.4.2 경계조건과 계산조건 | 151 |
| 4.4.3 수치해석 결과 | 152 |
| | |
| 5. 결론 | 169 |
| | |
| 감사의 글 | 171 |
| | |
| 참고문헌 | 172 |



List of Tables

| | |
|---|----|
| Table 2.1 Relationship between Model and Prototype | 9 |
| Table 2.2 Result of test case 1 | 16 |
| Table 2.3 Result of test case 2 | 18 |
| Table 2.4 Result of test case 3 | 20 |
| Table 2.5 Result of test case 4 | 23 |
| Table 2.6 Result of test case 5 | 25 |
| Table 2.7 Result of test case 6 | 27 |
| Table 2.8 Result of test case 7 | 30 |
| Table 2.9 Result of test case 8 | 32 |
| Table 2.10 Result of test case 9 | 34 |
| Table 2.11 Result of test case 10 | 36 |
| Table 2.12 Result of test case 11 | 38 |
| Table 2.13 Result of test case 12 | 41 |
| Table 2.14 Result of test case 13 | 43 |
| Table 2.15 Result of test case 14 | 45 |
| Table 2.16 Result of test case 15 | 47 |
| Table 2.17 Result of test case 16 | 49 |
| Table 2.18 Result of test case 17 | 51 |
| Table 2.19 Result of test case 18 | 54 |
| Table 2.20 Result of test case 19 | 57 |
| Table 2.21 Result of test case 20 | 59 |
| Table 2.22 Result of test case 21 | 62 |
| Table 2.23 Result of test case 22 | 64 |
| Table 2.24 Result of test case 23 | 67 |
| Table 2.25 Result of test case 24 | 69 |
| Table 2.26 Result of test case 25 | 71 |
| Table 2.27 Result of test case 26 | 73 |
| Table 2.28 Result of test case 27 | 75 |

| | |
|---|-----|
| Table 2.29 Result of test case 28 | 77 |
| Table 2.30 Result of test case 29 | 79 |
| Table 2.31 Result of test case 30 | 82 |
| Table 2.32 Bottom anti-vortex device design factors | 84 |
| Table 2.33 Isosceles trapezoid type AVD design value of design elements | 85 |
| Table 2.34 Right-angled triangle type AVD design value of design elements | 86 |
| Table 2.35 Sharp right-angled triangle type AVD design value of design elements | 87 |
| Table 3.1 Flowrate of sump model test | 92 |
| Table 3.2 Swirl angle | 95 |
| Table 3.3 Initials in accordance with the test conditions | 102 |
| Table 3.4 Effect of vortex breaker | 103 |
| Table 3.5 Data of swirl angle by swirl meter type | 104 |
| Table. 3.6 Data of swirl angle according to the installation point | 107 |
| Table 4.1 Calculation conditions | 151 |
| Table 4.2 Comparison of swirl angle | 165 |



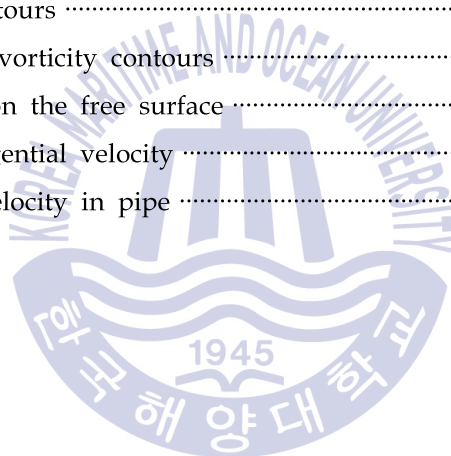
List of Figures

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1 Anti-vortex device | 2 |
| Fig. 2.1 AVD design of JSME Standard S004-1984 | 6 |
| Fig. 2.2 AVD design of ANSI/HI 9.8 | 7 |
| Fig. 2.3 Measuring & operating instruments | 11 |
| Fig. 2.4 Classification of free-surface vortex and submerged vortex (ANSI/HI 9.8) | 14 |
| Fig. 2.5 Swirl meter (ANSI/HI 9.8) | 15 |
| Fig. 2.6 Image of case 1 | 17 |
| Fig. 2.7 Image of case 2 | 19 |
| Fig. 2.8 Image of case 3 | 21 |
| Fig. 2.9 AVD design of case 3 | 22 |
| Fig. 2.10 Image of case 4 | 24 |
| Fig. 2.11 Image of case 5 | 26 |
| Fig. 2.12 Image of case 6 | 28 |
| Fig. 2.13 AVD design of case 6 | 29 |
| Fig. 2.14 Image of case 7 | 31 |
| Fig. 2.15 Image of case 8 | 33 |
| Fig. 2.16 Image of case 9 | 35 |
| Fig. 2.17 Image of case 10 | 37 |
| Fig. 2.18 Image of case 11 | 39 |
| Fig. 2.19 AVD design of case 11 | 40 |
| Fig. 2.20 Image of case 12 | 42 |
| Fig. 2.21 Image of case 13 | 44 |
| Fig. 2.22 Image of case 14 | 46 |
| Fig. 2.23 Image of case 15 | 48 |
| Fig. 2.24 Image of case 16 | 50 |
| Fig. 2.25 Image of case 17 | 52 |
| Fig. 2.26 AVD design of case 17 | 53 |

| | |
|--|----|
| Fig. 2.27 Image of case 18 | 55 |
| Fig. 2.28 AVD design of case 18 | 56 |
| Fig. 2.29 Image of case 19 | 58 |
| Fig. 2.30 Image of case 20 | 60 |
| Fig. 2.31 AVD design of Case 20 | 61 |
| Fig. 2.32 Image of case 21 | 63 |
| Fig. 2.33 Image of case 22 | 65 |
| Fig. 2.34 AVD design of case 22 | 66 |
| Fig. 2.35 Image of case 23 | 68 |
| Fig. 2.36 Image of case 24 | 70 |
| Fig. 2.37 Image of case 25 | 72 |
| Fig. 2.38 Image of case 26 | 74 |
| Fig. 2.39 Image of case 27 | 76 |
| Fig. 2.40 Image of case 28 | 78 |
| Fig. 2.41 Image of case 29 | 80 |
| Fig. 2.42 AVD design of case 29 | 81 |
| Fig. 2.43 Image of case 30 | 83 |
| Fig. 2.44 AVD design factors | 84 |
| Fig. 2.45 Isosceles trapezoid type AVD design elements | 85 |
| Fig. 2.46 Sharp right-angled triangle type AVD design elements | 86 |
| Fig. 2.47 Right-angled triangle type AVD design elements | 87 |
| Fig. 3.1 Sump model design | 89 |
| Fig. 3.2 Schematic diagram of model test apparatus | 90 |
| Fig. 3.3 Photo of bell-mouth model | 91 |
| Fig. 3.4 Photo of pump & inverter | 92 |
| Fig. 3.5 Image of sump model test arrangement | 93 |
| Fig. 3.6 Bell mouth image according to the presence or absence of the vortex breaker | 94 |
| Fig. 3.7 Sample of swirl meter | 96 |
| Fig. 3.8 Different type swirl meter(thickness, material, weight) | 96 |
| Fig. 3.9 Dimensions of Swirl meter | 97 |
| Fig. 3.10 Photos of swirl meter location | 98 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 3.11 Different type flow distributor | 99 |
| Fig. 3.12 Photos of Anti-Vortex Devices | 100 |
| Fig. 3.13 Drawing of AVD | 101 |
| Fig. 3.14 Test case naming | 102 |
| Fig. 3.15 Swirl angle by swirl meter type | 105 |
| Fig. 3.16 Three types of swirl meter | 106 |
| Fig. 3.17 Swirl angle according to the installation point | 108 |
| Fig. 4.1 Arrangement of PIV experiment | 111 |
| Fig. 4.2 Grey level cross correlation method | 114 |
| Fig. 4.3 General process of computational fluid dynamic | 117 |
| Fig. 4.4 Multigrid method process | 120 |
| Fig. 4.5 Mesh arrangement and terminology for dual mesh | 121 |
| Fig. 4.6 Downstream velocity profile of flow distributor(F1) | 130 |
| Fig. 4.7 Downstream velocity profile of flow distributor(F2) | 131 |
| Fig. 4.8 Downstream velocity profile of flow distributor(F3) | 132 |
| Fig. 4.9 Velocity vector without AVD | 134 |
| Fig. 4.10 Flow characteristics for bottom of AVD-1 | 137 |
| Fig. 4.11 Flow characteristics for center of AVD-1 | 137 |
| Fig. 4.12 Flow characteristics for center of AVD-1 | 138 |
| Fig. 4.13 Flow characteristics for back wall of AVD-1 | 139 |
| Fig. 4.14 Flow characteristics for side wall of AVD-1 | 140 |
| Fig. 4.15 Flow characteristics for center of AVD-2 (side view) | 141 |
| Fig. 4.16 Flow characteristics for back wall of AVD-2 | 142 |
| Fig. 4.17 Flow characteristics for side wall of AVD-2 | 143 |
| Fig. 4.18 Flow characteristics for center of AVD-1(back view) | 144 |
| Fig. 4.19 Average velocity vector with the AVD | 146 |
| Fig. 4.20 Average velocity vector with the AVD (square bar) | 148 |
| Fig. 4.21 Three types of flow distributors | 149 |
| Fig. 4.22 Four types of AVDs | 149 |
| Fig. 4.23 Intake sump mesh | 150 |
| Fig. 4.24 Boundary condition | 151 |
| Fig. 4.25 Vortex core of case 1 | 152 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4.26 Velocity profile of case 1 | 152 |
| Fig. 4.27 Velocity vector of case 1 | 153 |
| Fig. 4.28 Bottom vorticity contour of case 1 | 154 |
| Fig. 4.29 Velocity contour on free surface of case 1 | 155 |
| Fig. 4.30 Streamline on the free surface of case 1 | 155 |
| Fig. 4.31 Free surface vorticity of case 1 | 156 |
| Fig. 4.32 Velocity vector (1) | 156 |
| Fig. 4.33 Velocity vector (2) | 157 |
| Fig. 4.34 Velocity vector (3) | 158 |
| Fig. 4.35 Velocity vector (4) | 159 |
| Fig. 4.36 Velocity vector (5) | 160 |
| Fig. 4.37 Velocity vector (6) | 161 |
| Fig. 4.38 Vorticity contours | 162 |
| Fig. 4.39 Free surface vorticity contours | 163 |
| Fig. 4.40 Streamlines on the free surface | 164 |
| Fig. 4.41 Average tangential velocity | 166 |
| Fig. 4.42 Tangential velocity in pipe | 168 |



A Study on Flow Analysis for the Pump Sump Model and Design Methods of Anti-Vortex Device(AVD)

KIM, Chang Goo

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Worldwide, an increasing demand of electricity leads to a many number of constructions of power plant. In power plant producing huge amount of electricity, a large-scale pump with high flow rate is installed.

Although a performance of the large-scale pump is determined by the stage of design and manufacture, the Pump intake design is the most significant consideration for pump performance and life.

As a crucial part of the pumping station, sump is designed to provide uniform. To attain the uniform flow in the sump needs a civil construction of large scale. By contrast, compact design of pumping station is main concern for global construction companies. However, the compact pump intake design without sump model test can result in undesired flow conditions. For instance, a flow passing through an insufficient length of sump arrives at pump entrance as non-uniform

flow, and it causes deleterious effects on pump such as vibration and noise. In addition, a vortex due to inappropriate design of sump can leads to cavitation nearby the intake pipe which not only impacts on the impeller but also generates vibration. The decline of pump performance and high maintenance can be acquired due to these undesired flow behavior. Thus, to predict the flow behavior the model test of sump is conducted.

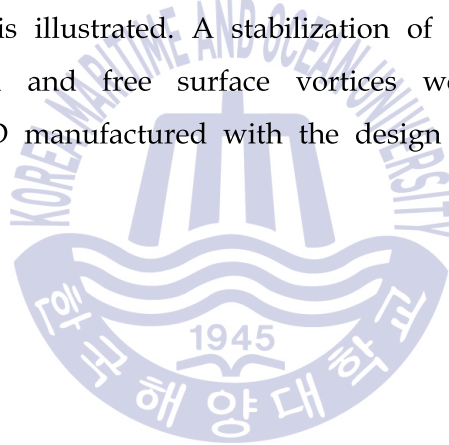
The sump model test is commonly processed during the new or the period of pump replacement. Through the model test an optimized AVD (Anti-Vortex Device) for sump was investigated and designed, and its performance was assessed. Currently, numerous needs of sump model test has been requested due to the rapid increase of pump demands globally, and to fulfill the demands the development of AVD technology is emphasized.

In this study, the comparative analysis of flow behavior around intake entrance by PIV method, which visualizing the fluid field, and ANSYS CFD tool was conducted. A swirl angle of swirl meter for the sump model test was investigated at different types and locations. Design parameters of AVD were determined based on various types of sump, and it was verified through the 30 cases of sump model tests with different geometries. In addition, the combination of sump model and AVD is suggested.

A swirl angle varies by 10% with the amount of flow rate of sump, and the averaged range of swirl angle by ANSI/HI 9.8 standard guideline is dictated from 0.5 to 5 degree. The maximum error of swirl angle was 8% according to materials, thickness and weight of swirl meter, and the range of 0.4 to 5 degree is the averaged range of swirl angle by ANSI/HI 9.8. In constant flow rate, the swirl angle according to

different locations of swirl meter at $4d$ was 5% lower than at $0.5d$, and it has an error by 0.25 degree at the averaged 5 degrees of swirl angle. From numerical analysis of sump by ANSYS CFD the maximum gap of swirl angle was 3.5% compared to experimental result. When eliminating submerged vortices and with bottom AVD the result of swirl angle was decreased as 0 ~10%, and also the angle was decreased as 20% when surface vortices were removed. The reduction of swirl inside the intake pipe was obtained by the installation of AVD.

The relation formula according to design parameters of AVD such as diameter and cross-sectional area of sump, distance between intake entrance and the bottom, and distance between the center of intake pipe and the back wall is illustrated. A stabilization of the flow was verified by that submerged and free surface vortices were removed by the combination of AVD manufactured with the design method, Curtain wall and distributors.



Nomenclature

| | | |
|-------|--|---------------------|
| B | : distance from the back wall to the pump inlet bell-mouth centerline | [mm] |
| C | : distance from the inlet bell to floor | [mm] |
| D | : bell-mouth diameter | [mm] |
| d | : diameter of pipe of the swirl meter | [mm] |
| F | : free surface vortex | [-] |
| g | : acceleration of gravity | [m/s ²] |
| HWL | : high water level | [mm] |
| LWL | : low water level | [mm] |
| L_r | : reference length ratio ($= L_m/L_p$) | [-] |
| L_m | : model length | [m] |
| L_p | : prototype length | [m] |
| M | : runout flowrate | [m ³ /h] |
| NV | : no vortex | [-] |
| n | : number of revolution per minute | [-] |
| Q_r | : flow rate ratio ($= Q_m/Q_p$) | [-] |
| Q_m | : model flow rate | [m ³ /s] |
| Q_p | : prototype flow rate | [m ³ /s] |

| | | |
|------------|---|----------------------|
| q | : flow rate | [m ³ /s] |
| S | : submerged vortex | [-] |
| T_r | : time ratio (= T_m/T_p) | [-] |
| T_m | : model time | [s] |
| T_p | : prototype time | [s] |
| V_r | : velocity ratio (= V_m/V_p) | [-] |
| V_m | : model velocity | [m/s] |
| V_p | : prototype velocity | [m/s] |
| V_θ | : flow rotational speed at swirl meter | [m/s] |
| V_Z | : average axial velocity at swirl meter | [m/s] |
| v | : local velocity | [m/s] |
| \bar{v} | : average local velocity | [m/s] |
| W | : pump bay entrance width | [mm] |
| ρ | : liquid density | [kg/m ³] |
| σ | : surface tension | [N/m] |

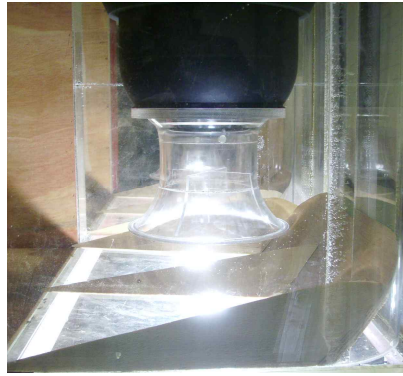
제 1 장 서 론

1.1 연구배경

전 세계적인 전기 사용량 급증은 발전소 건설로 이어지고 있다. 많은 전기를 생산하는 발전소 일수록 높은 유량의 대형 펌프가 설치되어진다. 대형 펌프의 성능은 설계와 제작도 중요하지만 그 펌프가 설치되어지는 흡수정의 설치환경에 지대한 영향을 받는다.

흡수정의 안정된 유동을 얻기 위해서는 무엇보다 대형 펌프의 유량에 맞는 큰 규모의 토목공사가 수반되어 저야 한다. 효율적인 설계에 의한 건설비 절감은 글로벌 건설사들의 관심 일 것이다. 하지만 흡수정 모델 시험 없이 축소된 설계는 나쁜 유동의 결과를 가져올 수도 있다. 예를 들어, 길이가 충분하지 못한 흡수정은 유체의 유동이 안정화되기 전에 펌프 입구단에 도달하게 되고, 불균일한 유동은 펌프 임펠러에 나쁜 영향을 끼쳐 펌프의 성능 저하와 함께 많은 유지 보수비를 필요로 한다. 또한 잘못된 흡수정의 설계에 의해 물속에 강한 와가 존재한다면, 이것은 흡입관 주위에서 캐비테이션을 유발시키며 펌프 효율을 떨어뜨리고 임펠러의 파손, 진동과 소음의 원인이 된다. 이러한 유동을 미리 예측하기 위해 흡수정 모델 시험을 진행한다.

모델 시험은 흡수정 설계가 완료되어 토목공사 중이거나 펌프 교환 주기에 수행되어 진다. 모델 시험을 통해 각 흡수정에 최적화된 와류 제거 장치(AVD)를 설계하고 성능을 평가하게 된다. 최근 국내 대형 펌프 회사의 국내외 펌프 수요의 증가로 흡수정 모델 시험의 수요는 증가 추세에 있으며 이를 위해 와류 제거 장치의 설계 기법 또한 필요로 하게 되었다. Fig. 1.1은 흡수정 모델 시험의 바닥, 벽면, 자유표면에서 발생하는 와를 제거하는 장치들이다.



(a) HI-recommended combined type AVD for submerged vortex



(b) Trapezoid type AVD for submerged vortex & square bar



(c) KMU Lee recommended combined type AVD for submerged vortex

Fig. 1.1 Anti-vortex device

1.2 연구동향

흡수정 유동해석은 1979년 Tullis^[1]가 흡수정 설계 모델링을 연구하고 Arboleda^[2]에 의하여 흡수정 설계에 있어서 흐름 조건의 영향에 대한 연구가 진행되고, 1982년 Sweeney^[3]가 흡수정의 설계 개요를 제시하였다. 1984년에는 Padmanabhan와 Hecker^[4]가 축척비율인 스케일효과에 의한 보텍스의 형태를 정의하고 분류하였다. 1999년 Gamal Abozeid^[5]에 의하여 흡입관으로 들어오는 와류의 형성에 영향을 미치는 요인을 규명하였다. 2000년 Shibata^[6] 등은 흡입관 주위에서 발생하는 캐비테이션 예측을 수치해석 기법으로 연구 진행하였으며, 흡수정내의 수중 보텍스, 자유표면 보텍스를 가시화연구와 펌프 흡입구에서 발생하는 캐비테이션이 펌프 임펠라에 미치는 영향을 수치해석으로 연구 등 많은 연구자들^{[7]~[27]}에 의하여 흡수정 보텍스 저감하기 위한 부가 장치의 연구가 진행되었다. 한편 국내에서는, 2002년 Choi^{[28]~[30]} 등은 흡수정내의 자유표면과 자유표면 아래에서 발생하는 보텍스를 PIV 기법을 적용하여 가시화 하였으며, 2004년 이영호^[31]는 실험을 통하여 펌프 흡입관에 대한 설계 기준을 제시하였다. 2005년 유체기계공학회 펌프분과와 한국수자원공사^{[33]~[35]}에 의하여 흡수정에서 발생하는 보텍스에 대한 저감방법에 대한 실험과 흡수정 설계에 대한 국내 기준을 마련하기 위한 활발한 연구가 진행되었다. 이후 여러 연구자들^{[36]~[43]}에 의한 연구가 있었으며, 2011년 최종웅^[44]은 CFD를 이용하여 AVD를 설치한 흡수정에서의 사류펌프의 성능해석에 관한 연구를 하였다. 2012년 Kim^[45] 등은 실험과 CFD에 의한 선프 모델에서의 AVD 효과를 연구하였다.

1.3 연구목적

국내 흡수정 모델 시험은 ANSI/HI 9.8^[46]을 적용하고 있다. 이 규정에 의거 시험 장치를 제작할 때 상세히 그 규격을 정하지 않거나 다른 규정과의 차이에 의해 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차의 범위를 구하기 위해 단일 흡수정 모델을 제작하여 다중 흡수정에서 발생할 수 있는 유동장의 흐름을 만들고 다양한 와류제거장치(AVD)의 부착에 의한 유동장 변화를 스윙각의 관찰, PIV 기법과 수치해석을 통해 유동장을 분석하고자 한다. 또한, 몇 년간의 여러 흡수정 모델 시험을 통해 그 성능이 확인된 AVD의 디자인에 대해 정량적, 정성적으로 연구하고자 한다. 각 흡수정 모델의 AVD는 벨마우스 직경(D), 높이(C), 뒷벽으로부터 중심거리(B) 그리고 흡수정 폭(W)에 의해 디자인 되었다. 이러한 흡수정의 요인들에 의해 와류 제거 장치의 디자인 요소를 정하고 정량화 하며 여러 흡수정 시험에서 검증된 AVD를 설계하고 조합하여 설계 파라미터를 관계식으로 나타내고자 한다.



제 2 장 흡수정 모델 시험을 통한 AVD 설계

흡수정 모델 시험(sump model test)은 흡수정 운용 중 발생 가능한 수중보텍스 및 자유표면 보텍스의 유무를 확인하고 제거를 하는 것이다. 흡수정의 조건에 따라 발생하는 보텍스를 제거하기 위한 와류방지장치(AVD)를 설치함으로써 토목구조의 최소화, 펌프의 성능 향상과 수명연장의 효과를 가져 온다.

2.1 와류제거장치(AVD)의 개요

입지조건과 기기배치 등에 따라 생기는 보텍스나 선회류를 방지하기 위하여 AVD를 설치하는 것이 좋다. 흡입수조내에 있어서 보텍스 발생은 흡입관에 접근하는 흐름의 와도 및 선회류 성분에 기인한다. 흡입관의 근방에 있어서 이런 와도와 선회류성분의 회전축이 주로 흡입관과 평행으로 수면가까이까지 도달할 경우에는 공기흡입보텍스의 발생으로 이어진다. 그리고 회전축이 흡입관과 평행하지 않는 경우라든가, 흡입관과 평행하여도 벨마우스 주위에만 존재하는 경우에는 수중보텍스가 발생된다. 흡입관 근방에 존재하는 와도는 수조내에 있는 기기장치 표면으로부터의 박리흐름나 불균일한 흐름에 의한 속도 전단층에 의한 것과, 수면가까이의 흐름이 흡입관 표면에 형성하는 경계층의 박리에 의한 것이다. 특히 후자는 강한 공기흡입보텍스의 원인이 되는 때가 많다. 선회류성분은 흡입수조보다 상류측에서 유입되는 것과 흡입수조 자체의 형상에 의해 생긴다.

와류제거장치의 구분은 다음과 같다.

- (1) 수중 보텍스 제거 장치
- (2) 자유표면 보텍스 제거 장치
- (3) 흐름 분배 장치

(4) 착수정의 흐름 정류 장치

Fig. 2.1과 2.2는 일본의 JSME Standard S004-1984^[47]와 미국의 ANSI/HI 9.8에 나와 있는 와류제거방법이다.

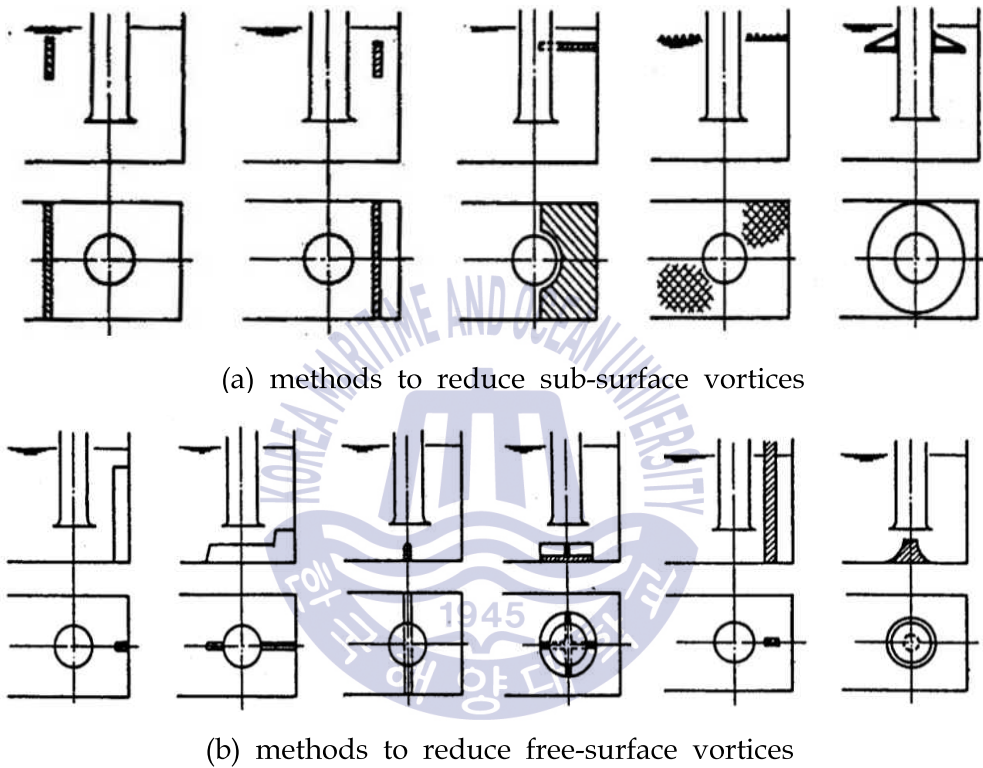


Fig. 2.1 AVD design of JSME Standard S004-1984

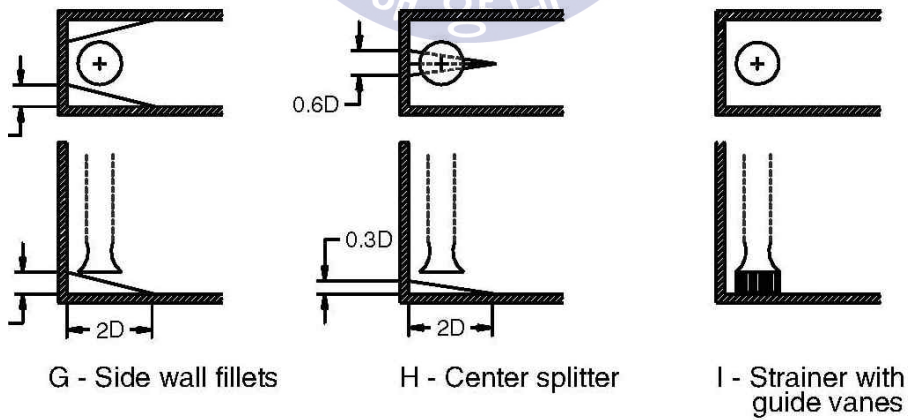
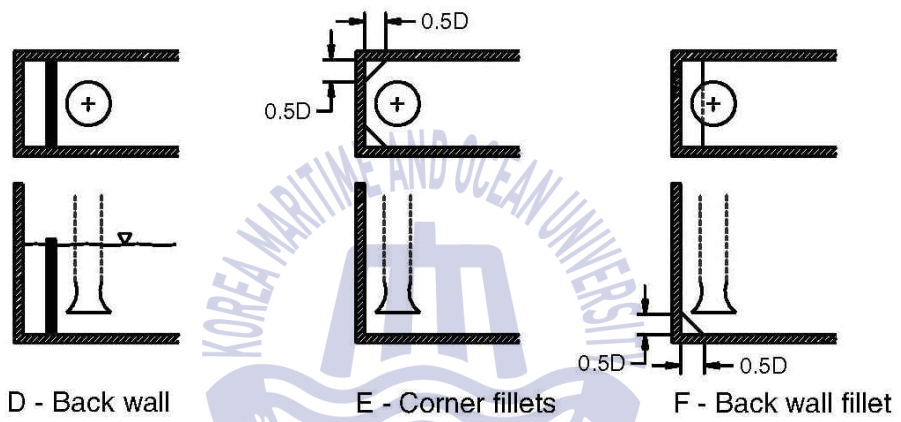
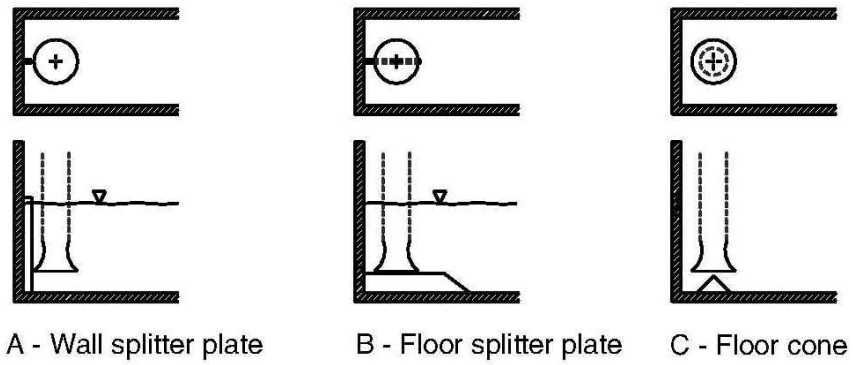


Fig. 2.2 AVD design of ANSI/HI 9.8

2.2 흡수정 시험 방법

흡수정 모델은 실제 펌프장을 축소하여 제작하므로 그에 따른 모델 길이, 속도, 유량, 시간의 상사관계는 프루드수(Fr)에 따른다. 또한, 축소모델의 Re 수(>60,000)와 We 수(>240) 대한 검토가 필요하다.

본 시험은 ANSI/HI 9.8 규격을 기준으로 진행하였다.

2.2.1 상사조건

모델과 실물사이의 상사관계는 다음과 같이 결정된다.

$$V_r = V_m / V_p = L_r^{0.5} \quad (2.1)$$

$$Q_r = Q_m / Q_p = L_r^2 V_r = L_r^{2.5} \quad (2.2)$$

$$T_r = T_m / T_p = L_r / V_r = L_r^{0.5} \quad (2.3)$$

여기에서, L_r =대표 길이비

V_r =속도비, V_m =모델의 유속, V_p =실물의 유속

Q_r =유량비, Q_m =모델의 유량, Q_p =실물의 유량

T_r =시간비, T_m =모델의 시간, T_p =실물의 시간

위 식을 아래와 같이 정리하면 다음과 같다.

$$V_m = V_p \cdot L_r^{0.5} \quad (2.4)$$

$$Q_m = Q_p \cdot L_r^{2.5} \quad (2.5)$$

$$T_m = T_p \cdot L_r^{0.5} \quad (2.6)$$

식 2.1~2.6은 프루드수 일치이며 자유표면 보텍스와 수중보텍스 관찰을 위한 유량을 정한다.

식 2.7~2.9는 자유표면 보텍스는 스케일효과를 확인하기 위해 프루드수 1.5

배 시험을 추가로 시행하기 위한 상사식이다.

$$V_m = 1.5 \cdot V_p \cdot L_r^{0.5} \quad (2.7)$$

$$Q_m = 1.5 \cdot Q_p \cdot L_r^{2.5} \quad (2.8)$$

$$T_m = 1.5 \cdot T_p \cdot L_r^{0.5} \quad (2.9)$$

Table 2.1은 축소비에 따른 모델 펌프의 속도비, 유량비, 시간비를 나타낸다.

Table 2.1 Relationship between Model and Prototype

| | Length | 1:2 | 1:3 | 1:4 | 1:5 | 1:6 | 1:7 | 1:8 | 1:9 | 1:10 |
|-------------------------------|-----------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Same Froude No. | Velocity | 1.41 | 1.73 | 2.00 | 2.24 | 2.45 | 2.65 | 2.83 | 3.00 | 3.16 |
| | Flow rate | 5.66 | 15.59 | 32.00 | 55.90 | 88.18 | 129.64 | 181.02 | 243.00 | 316.23 |
| | Time | 1.41 | 1.73 | 2.00 | 2.24 | 2.45 | 2.65 | 2.83 | 3.00 | 3.16 |
| 1.5 Times Froude No. | Velocity | 0.94 | 1.15 | 1.33 | 1.49 | 1.63 | 1.76 | 1.89 | 2.00 | 2.11 |
| | Flow rate | 3.77 | 10.39 | 21.33 | 37.27 | 58.79 | 86.43 | 120.68 | 162.00 | 210.82 |
| | Time | 0.94 | 1.15 | 1.33 | 1.49 | 1.63 | 1.76 | 1.89 | 2.00 | 2.11 |

| | Length | 1:12 | 1:13 | 1:14 | 1:15 | 1:16 | 1:17 | 1:18 | 1:19 | 1:20 |
|-------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Same Froude No. | Velocity | 3.46 | 3.61 | 3.74 | 3.87 | 4.00 | 4.12 | 4.24 | 4.36 | 4.47 |
| | Flow rate | 498.83 | 609.34 | 733.36 | 871.42 | 1024.00 | 1191.58 | 1374.62 | 1573.56 | 1788.85 |
| | Time | 3.46 | 3.61 | 3.74 | 3.87 | 4.00 | 4.12 | 4.24 | 4.36 | 4.47 |
| 1.5 Times Froude No. | Velocity | 2.31 | 2.40 | 2.49 | 2.58 | 2.67 | 2.75 | 2.83 | 2.91 | 2.98 |
| | Flow rate | 332.55 | 406.23 | 488.91 | 580.95 | 682.67 | 794.39 | 916.41 | 1049.04 | 1192.57 |
| | Time | 2.31 | 2.40 | 2.49 | 2.58 | 2.67 | 2.75 | 2.83 | 2.91 | 2.98 |

2.2.2 측정 및 운전장치

(1) 유량계

전자식(electro-magnetic) 유량계로서 직경 150A, 계측범위 0.3m/s~10m/s, 온도범위 -10~+60℃, 정확도 F.S± 0.5% 이며 측정 유체는 물이다.

(2) 순환펌프 및 인버터

총 유량 900m³/h, 양정 8m, 출력 55kW 펌프 1대 또는 2대를 사용하였다. 순환펌프의 구동하고 유량 조절을 위해 인버터를 사용하였다.

(3) 벨마우스

각 시험에 사용한 벨마우스는 각 실제 흡수정에 사용된 펌프를 각 흡수정 시험의 축소비로 재설계하여 아크릴을 소재로 NC가공을 하였다.

(4) 스웰메터

벨마우스의 관 안쪽에 설치되어지고 재질은 스테인리스강이며 회전마찰을 최소화하기 위해 볼베어링이 축에 부착되어 있다.

(5) 속도측정

벨마우스의 관 안쪽 유속측정을 위한 장치로 피토크관을 이용하며 측정하며 차압계 측정범위는 0~20000Pa이다. 측정된 데이터의 저장을 위해 데이터로그를 사용하였으며, 이러한 장치의 조합으로 유속0.3~7m/s를 측정 할 수 있다.

(6) 수위측정

아크릴 수조의 벽에 부착하여 ± 0.5mm 오차범위로 측정하였다.

(7) 온도계

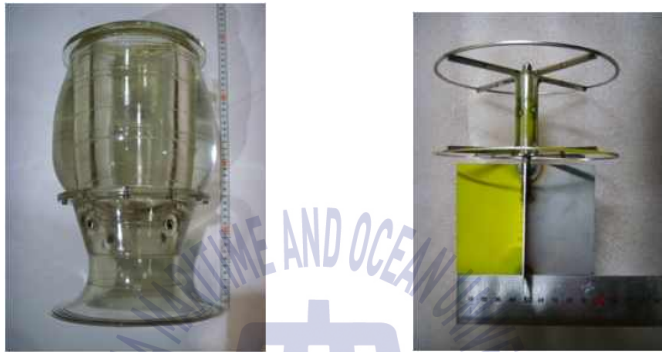
디지털 온도계를 이용 온도범위 -10~50℃ 측정가능하며 정확도는 ± 0.1℃ 이다.

Fig. 2.3은 측정 및 운전 장치 사진이다.



(1) Flow meter

(2) Pump & inverter



(3) Ex. bell-mouth

(4) Ex. swirl meter



(5) Data logger & Different pressure sensor

Fig. 2.3 Measuring & operating instruments

2.2.3 보텍스 구분 및 판정기준

(1) 수중 보텍스와 자유표면 보텍스

ANSI/HI 9.8 규격에 의거 수중보텍스와 자유표면 보텍스는 Fig. 2.4에 나와 있는 다이코어 보텍스 부터 허용하지 않는다. 하지만 다이코어 보텍스의 발생 시간이 관찰시간의 10% 미만이면 허용한다.

(2) 스윙각도

흡입관의 내부유동의 회전 크기이며 ANSI/HI 9.8 규격에서는 5도까지이다.

스윙메타는 크기는 벨마우스를 후단의 관 내부지름 d 에 의해 정해지며 가로 $0.75d$, 세로 $0.6d$ 이며 설치위치는 벨마우스 입구로부터 $4d$ 에 설치된다.

Fig. 2.5는 스윙메타를 나타낸 그림이다.

스윙각도는 다음 공식으로 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_{\theta}}{V_Z} \quad (2.10)$$

$$V_{\theta} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} (m/s) \quad (2.11)$$

$$V_Z = q / \frac{\pi \cdot d^2}{4} (m/s) \quad (2.12)$$

여기에서, $\theta(\text{radian}) = \text{스윙각도}$

$d = \text{스윙메타 설치 관 직경}$

$q = \text{유량}(m^3/s)$

스윙각도 θ 는 라디안이므로 도($^{\circ}$)로 단위변환한다.

(3) 속도

Fig. 2.5에 표시된 벨마우스의 목부분 8점의 공간평균속도(식2.13)가 10% 미만이면 허용하고 시간변동 속도값은 표준편차(식2.14)에 각 지점의 평균속도를 나눈값(식2.15)이 10%미만 일 때 허용한다.

$$Variation(\%) = \frac{|V - V_a|}{V_a} \times 100 \quad (2.13)$$

$$Standard\ deviation = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (2.14)$$

$$Variation(\%) = (Standard\ deviation / \bar{x}) \times 100 \quad (2.15)$$

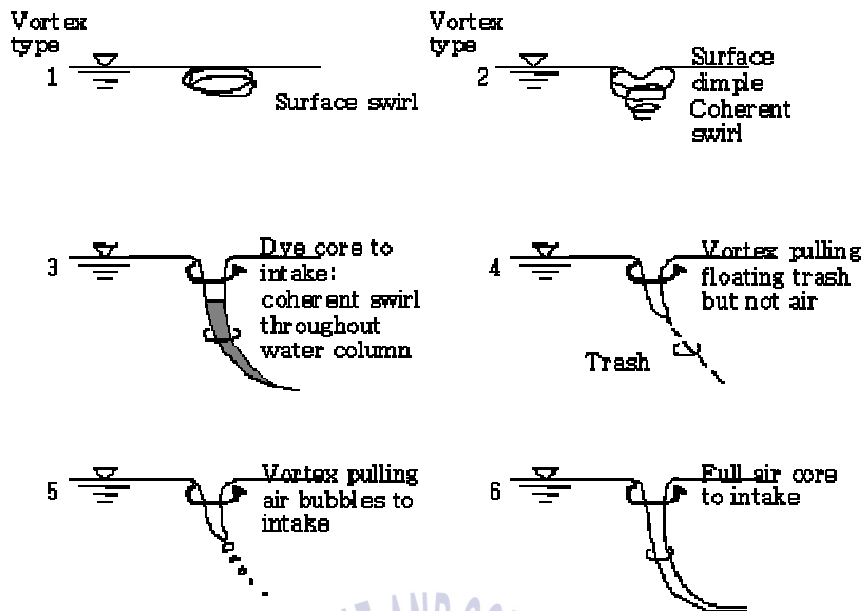
여기에서, V =한점평균유체속도

V_a =공간평균유체속도

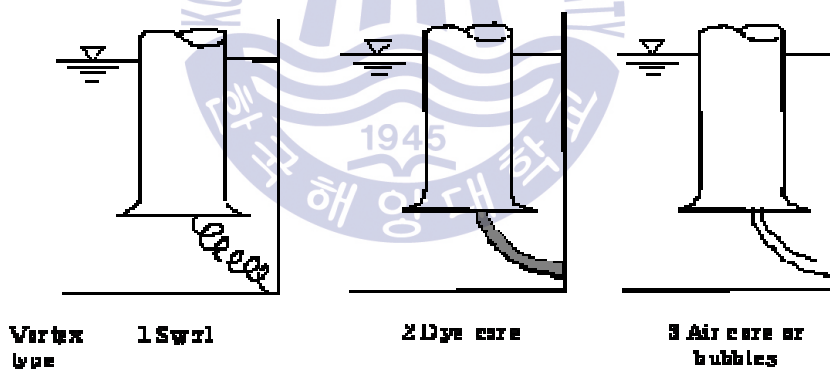
x =한점유체속도

\bar{x} =한점평균유체속도





(a) Free surface vortices



(b) Submerged vortices

Fig.2.4 Classification of free-surface vortex and submerged vortex (ANSI/HI 9.8)

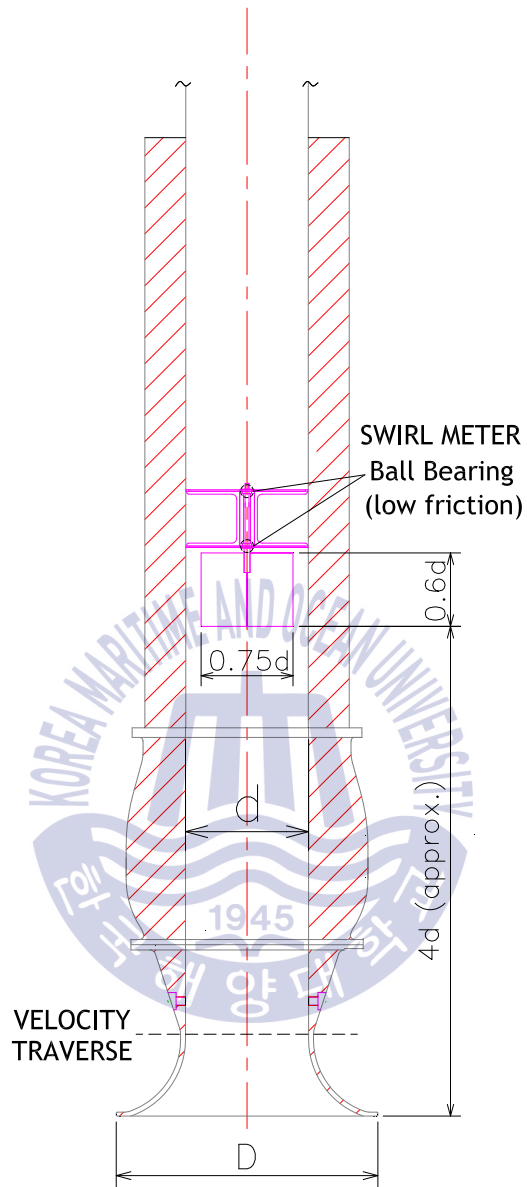


Fig.2.5 Swirl meter (ANSI/HI 9.8)

2.3 흡수정 시험

흡수정 시험을 유체 유입구 형상에 따라 분류하였다.

2.3.1 냉각탑 유형(Cooling tower type)

냉각탑에서 흘러내린 유체가 흡수정으로 유입된다.

2.3.1.1 Case 1

(1) 축소비 1:12 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 4가지 타입 펌프 #1#2 1.53m/s, #3~#11 1.89m/s, #12~#14 1.23m/s, #15~#17 1.17m/s이며, 모델에서는 각각 0.44m/s, 0.55m/s, 0.36m/s, 0.34m/s이다. Fig. 2.6에 개략도, 장치와 설치 AVD 사진이 나타나 있다.

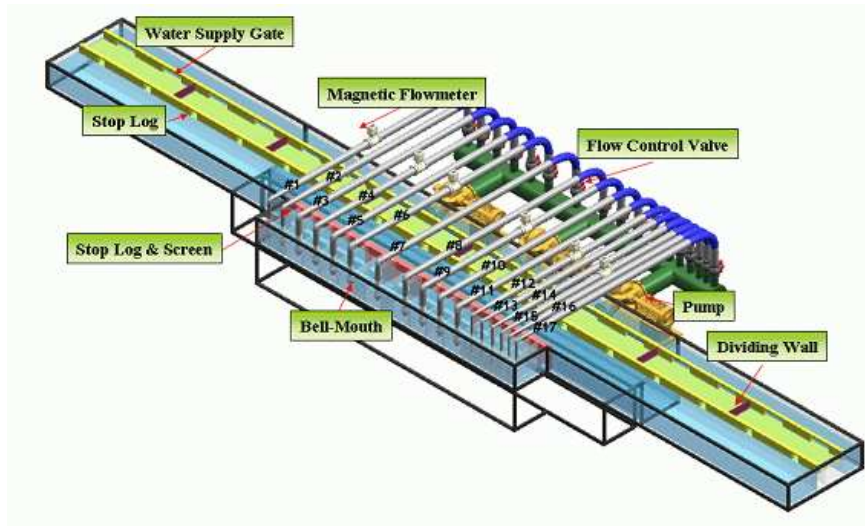
(2) 시험 결과

Table 2.2은 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무를 나타내고 있다. cross-L형 AVD 설치 후 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.2 Result of test case 1

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | NV | O | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | • | • | • | • |
| Max. area-varying V. | • | • | • | • |
| Max. time-varying V. | • | • | • | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.6 Image of case 1

2.3.1.2 Case 2

(1) 축소비 1:12 이며, 벨마우스 입구 유속은 정격유량에서 0.67m/s이며, 모델에서는 0.19m/s이다. Fig. 2.7에 개략도, 장치와 설치 AVD 사진이 나타나 있다.

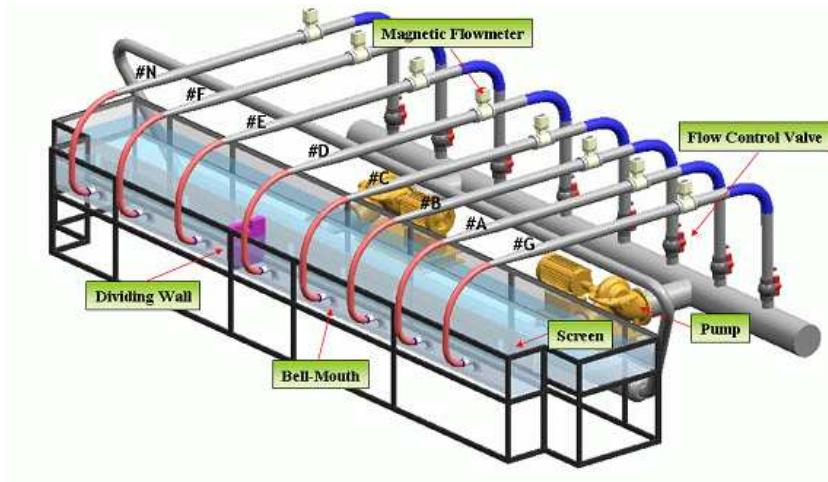
(2) 시험 결과

Table 2.3은 흡수정 시험 case 2의 결과인 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각 등을 나타내고 있다. 등변 사다리꼴 타입의 AVD 설치후 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.3 Result of test case 2

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | NV | O | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | • | • |
| Max. time-varying V. | • | • | • | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.7 Image of case 2

2.3.1.3 Case 3

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.47m/s이며, 모델에서 0.78m/s이다. Fig. 2.8에 개략도, 장치와 설치 AVD 사진이 나타나 있다.

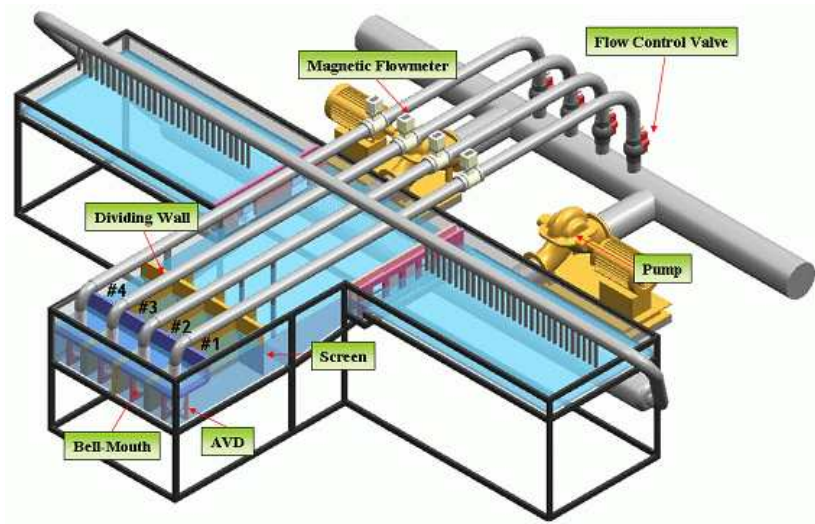
(2) 시험 결과

Table 2.4은 흡수정 시험 case 3의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.9는 AVD의 설계조합으로 수중보텍스 제거를 위한 cross L형 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 curtain wall이다. AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

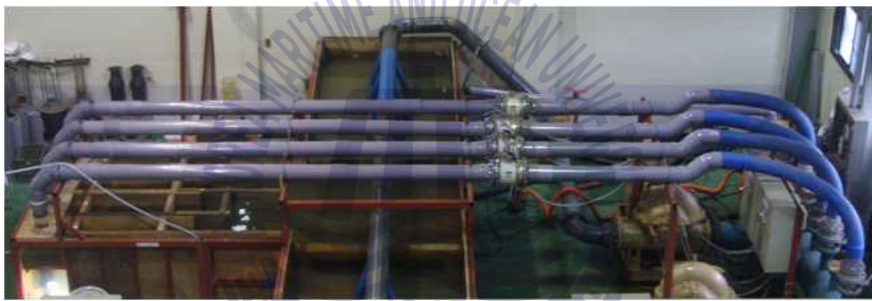
Table 2.4 Result of test case 3

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | • | • |
| Max. time-varying V. | • | • | • | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.8 Image of case 3

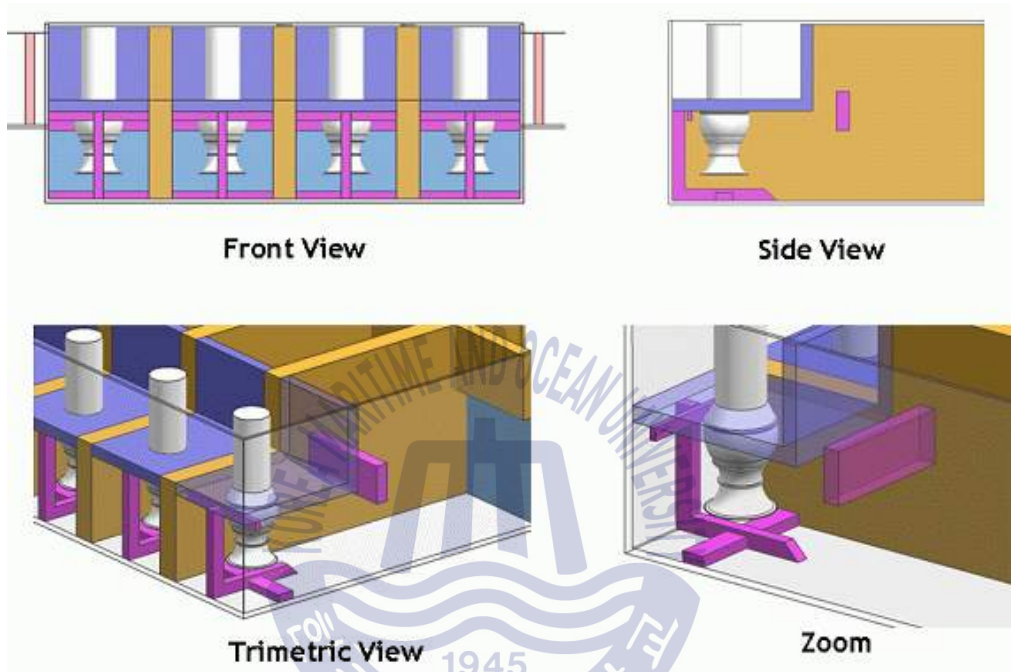


Fig.2.9 AVD design of case 3

2.3.1.4 Case 4

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.21m/s이며, 모델에서 0.38m/s이다. Fig. 2.10에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

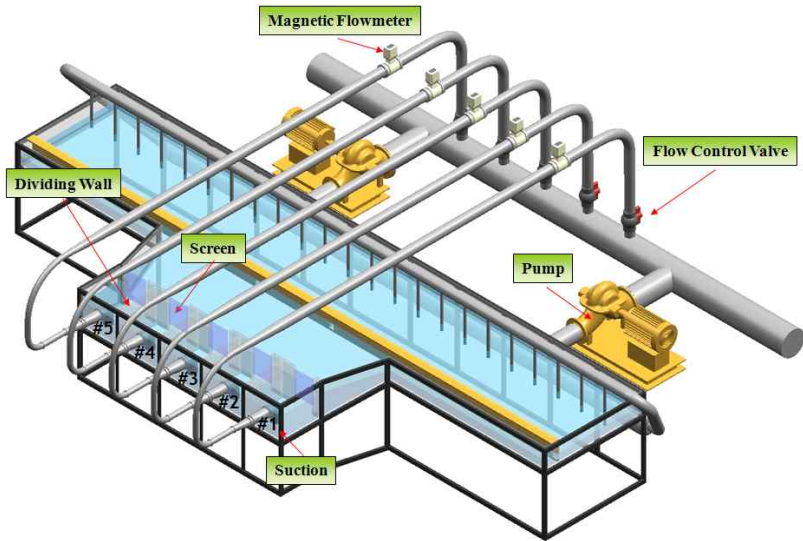
(2) 시험 결과

Table 2.5는 흡수정 시험 case 4의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. 수중 보텍스는 발생하지 않았으며, 자유표면 보텍스는 사각바 설치 후 제거되었다.

Table 2.5 Result of test case 4

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | NV | O | NV | O |
| Max. swirl angle | 0.3° | O | 0.4° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 3.9% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 8.0% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.10 Image of case 4

2.3.1.5 Case 5

(1) 축소비 1:5 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.23m/s이며, 모델에서 0.55m/s이다. Fig. 2.11에 개략도, 장치와 설치 AVD 사진이 나타나 있다.

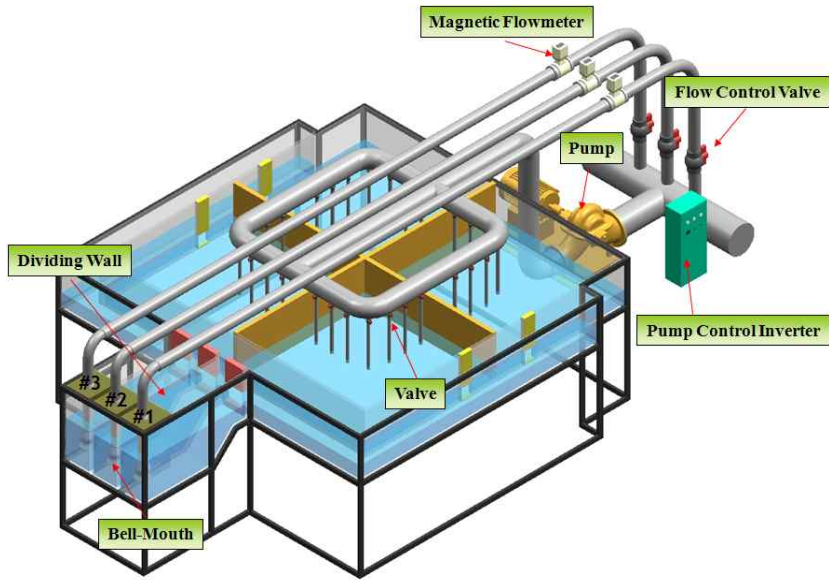
(2) 시험 결과

Table 2.6은 흡수정 시험 case 5의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위한 등변 사다리꼴형 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 curtain wall과 cross bar 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.6 Result of test case 5

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S1 | O | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | 4.1% | O | 1.6% | O |
| Max. time-varying V. | 6.9% | O | 2.2% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.11 Image of case 5

2.3.1.6 Case 6

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 MCWP 1.50m/s, ACWP 0.84m/s이며, 모델에서 각각 0.48m/s, 0.27m/s이다. Fig. 2.12에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

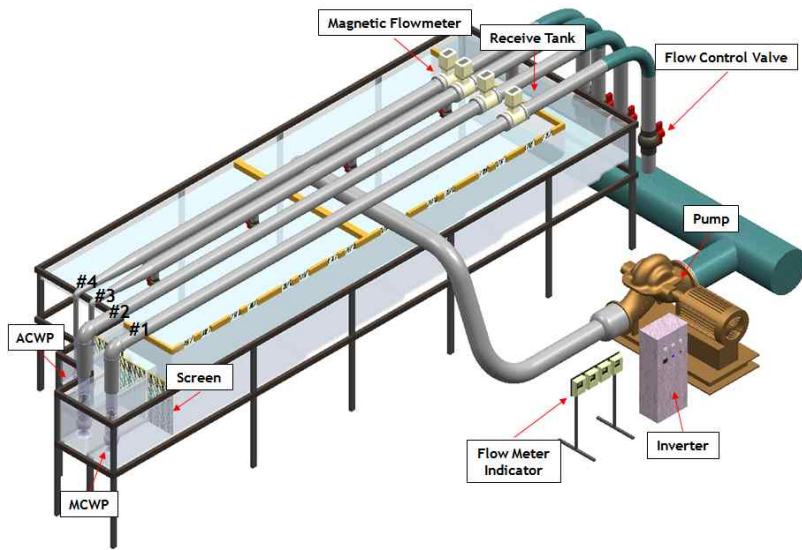
(2) 시험 결과

Table 2.7은 흡수정 시험 case 6의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.13은 AVD 형상을 나타내고 있으며 AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되고 스월각이 최대 2.7도 이하로 낮아졌다.

Table 2.7 Result of test case 6

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 16.8° | X | 2.7° | O |
| Max. area-varying V. | 2.5% | O | 3.9% | O |
| Max. time-varying V. | 5.1% | O | 3.3% | O |

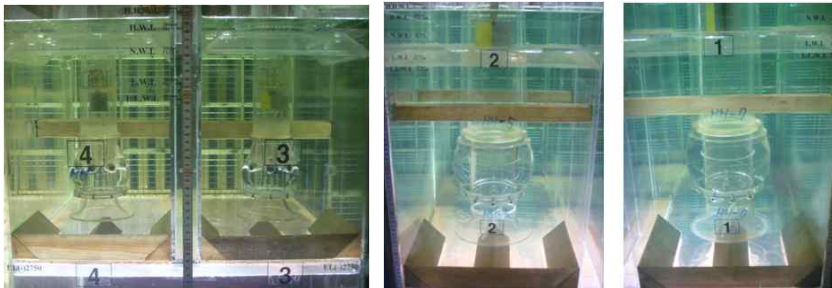
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.12 Image of case 6

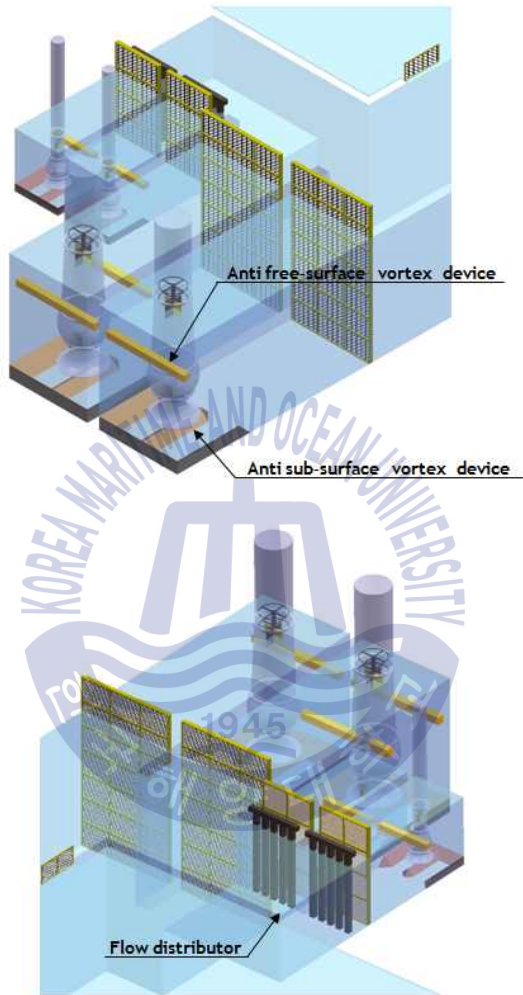


Fig. 2.13 AVD model design of case 6

2.3.1.7 Case 7

(1) 축소비 1:8 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.23m/s이며, 모델에서 0.79m/s이다. Fig. 2.14에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

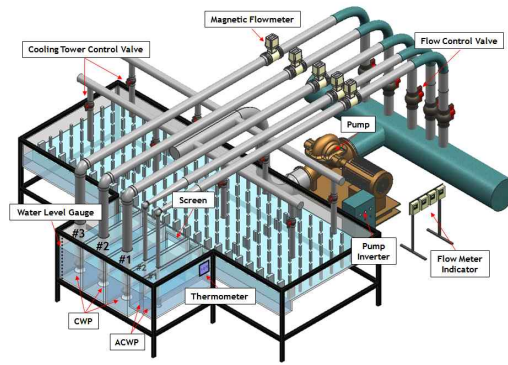
(2) 시험 결과

Table 2.8은 흡수정 시험 case 7의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.8 Result of test case 7

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 13.1° | X | 2.3° | O |
| Max. area-varying V. | 3.5% | O | 1.5% | O |
| Max. time-varying V. | 5.9% | O | 1.25% | O |

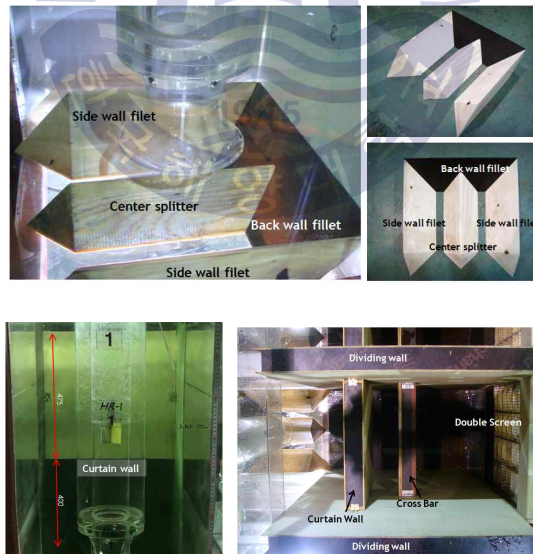
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.14 Image of case 7

2.3.1.8 Case 8

(1) 축소비 1:4(ACWP),1:2.5(RWLP)이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 ACWP 1.07m/s, RWLP 0.99m/s며, 모델에서 각각 0.54m/s, 0.63m/s이다. Fig. 2.15에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

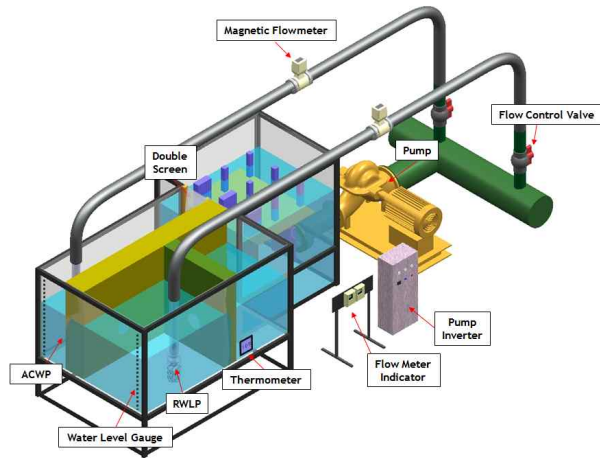
(2) 시험 결과

Table 2.23은 흡수정 시험 case 8(ACWP측)결과를 나타내며, 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. RWLP측은 보텍스가 발생하지 않고 스윙각이 최대 2.8도로 나와 AVD를 설치하지 않았다. 바닥 AVD와 curtain wall 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.9 Result of test case 8

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 2.8° | O | 0.4° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 1.1% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 1.2% | O |

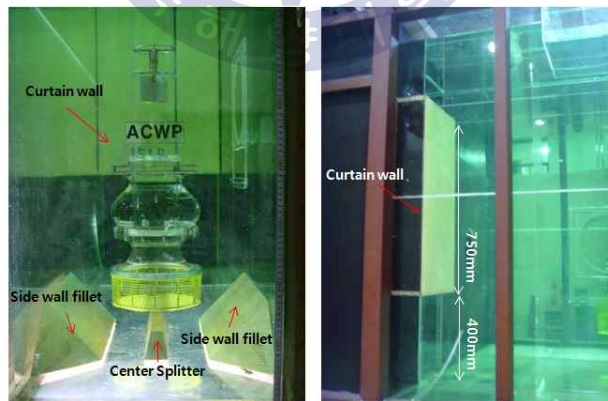
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.15 Image of case 8

2.3.1.9 Case 9

(1) 축소비 1:8 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 3.06m/s이며, 모델에서 1.08m/s이다. Fig. 2.16에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

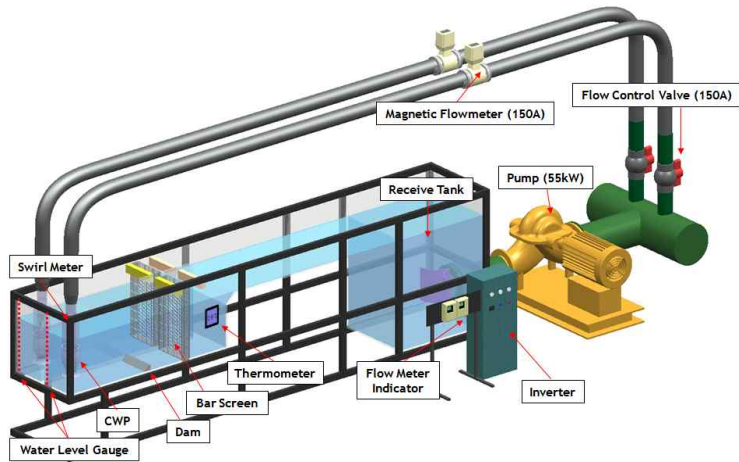
(2) 시험 결과

Table 2.10은 흡수정 시험 case 9의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위해 바닥에 직각삼각형 타입 AVD이고, 자유표면 보텍스 제거를 위한 Curtain Wall, 그리고 스월각을 줄이기 위해 이중 구조의 흐름분배기가 부착 AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되고 스월각이 낮아졌다.

Table 2.10 Result of test case 9

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 12.4° | X | 2.6° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 2.0% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 1.6% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.16 Image of case 9

2.3.1.10 Case 10

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 CWP 1.50m/s, ACWP 1.49m/s이며, 모델에서 각각 0.47m/s, 0.47m/s이다. Fig. 2.17에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

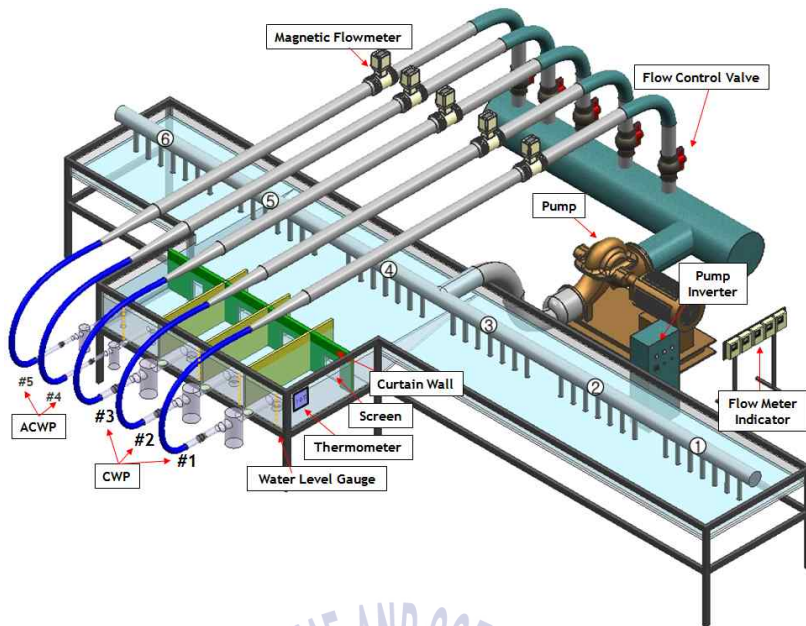
(2) 시험 결과

Table 2.11은 흡수정 시험 case 10의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. AVD 설치 후 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.11 Result of test case 10

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | NV | ○ | NV | ○ |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | ○ |
| Max. swirl angle | 2.3° | ○ | 2.1° | ○ |
| Max. area-varying V. | • | • | 7.5 | ○ |
| Max. time-varying V. | • | • | 2.1 | ○ |

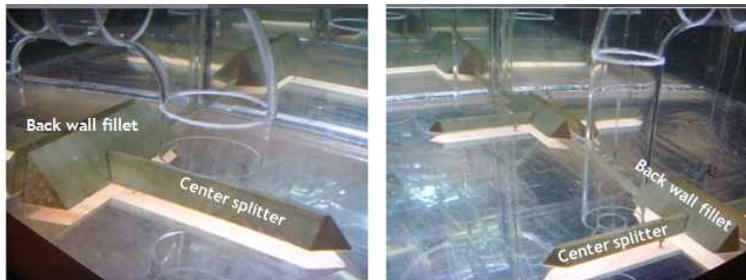
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.17 Image of case 10

2.3.2 좁은 입구 유형 (Narrow inlet type)

직경이 작은 관이나 사각 채널로부터 들어오는 유동은 착수정(forebay) 내에서 정류하지 못하면 불균일한 흐름이 펌프 채널까지 이어져 스월각이 크다. 이런 흡수정의 경우 착수정에 사각 기둥을 설치하거나 스크린 후단에 흐름분배기(flow distributor)를 설치하여 흐름을 정류하였다.

2.3.2.1 Case 11

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.02m/s이며, 모델에서 0.64m/s이다. Fig. 2.18에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

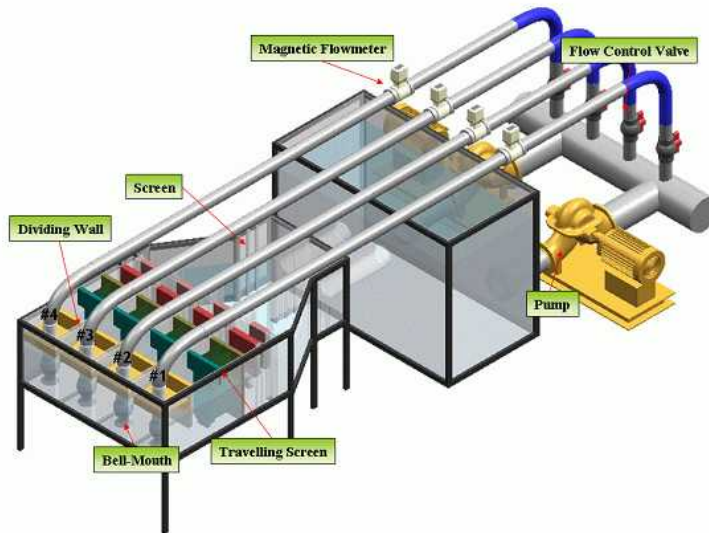
(2) 시험 결과

Table 2.12는 흡수정 시험 case 11의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.19 설계 AVD형상을 나타내며 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.12 Result of test case 11

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | 7.1% | O | 6.2% | O |
| Max. time-varying V. | 3.6% | O | 3.0% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.18 Image of case 11

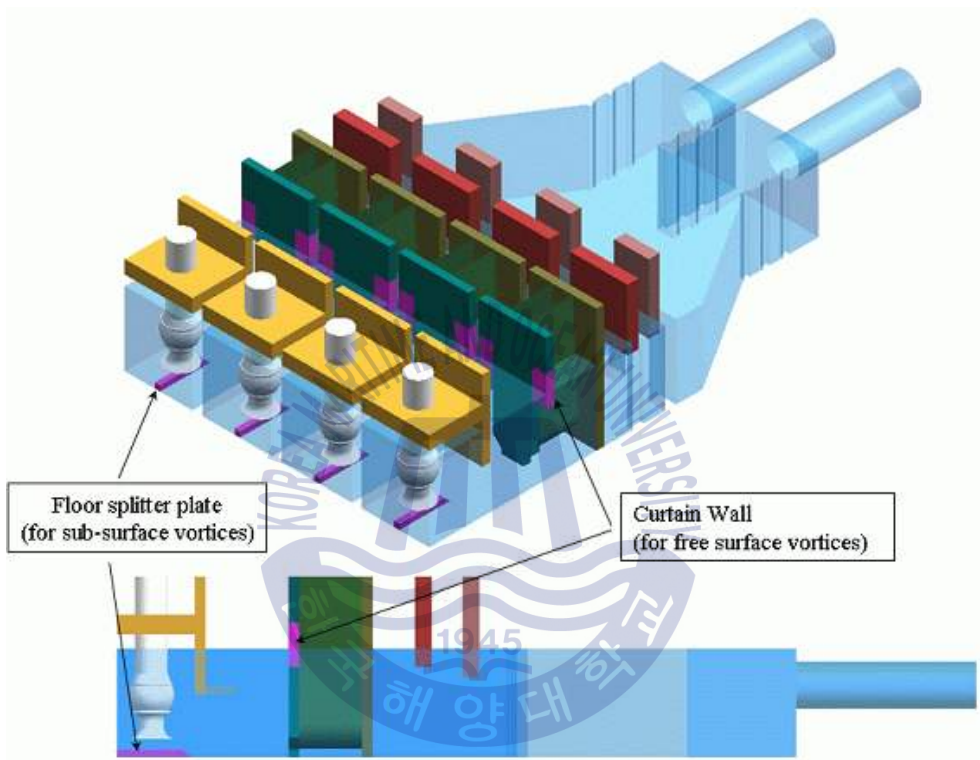


Fig. 2.19 AVD model design of case 11

2.3.2.2 Case 12

(1) 축소비 1:8 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.96m/s, 모델에서 0.69m/s이다. Fig. 2.20에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

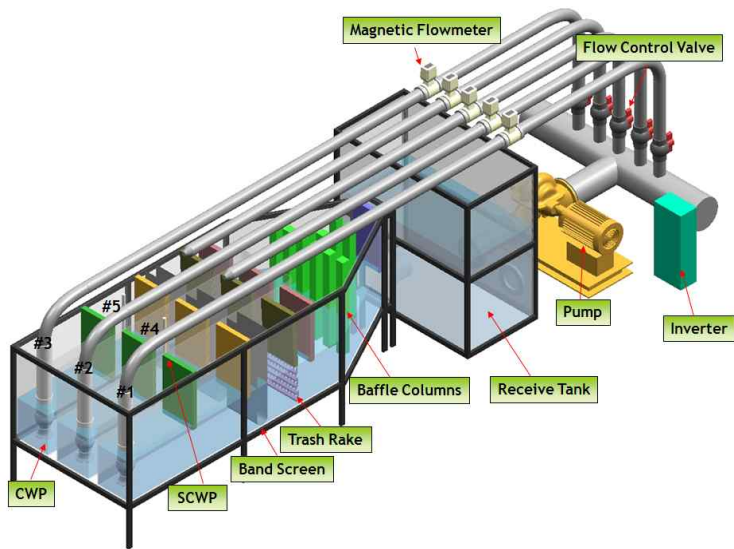
(2) 시험 결과

Table 2.13은 흡수정 시험 case 12의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. 등변사다리꼴형 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 Cross bar 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.13 Result of test case 12

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | 3.0% | O | 3.6% | O |
| Max. time-varying V. | 1.7% | O | 0.9% | O |

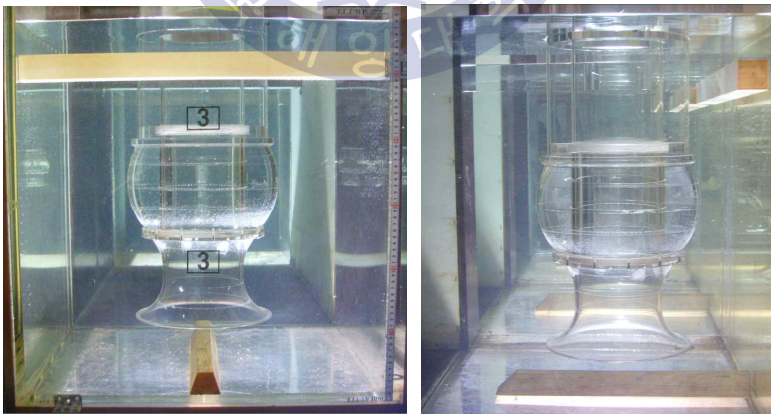
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.20 Image of case 12

2.3.2.3 Case 13

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.09m/s이며, 모델에서 0.66m/s이다. Fig. 2.21에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

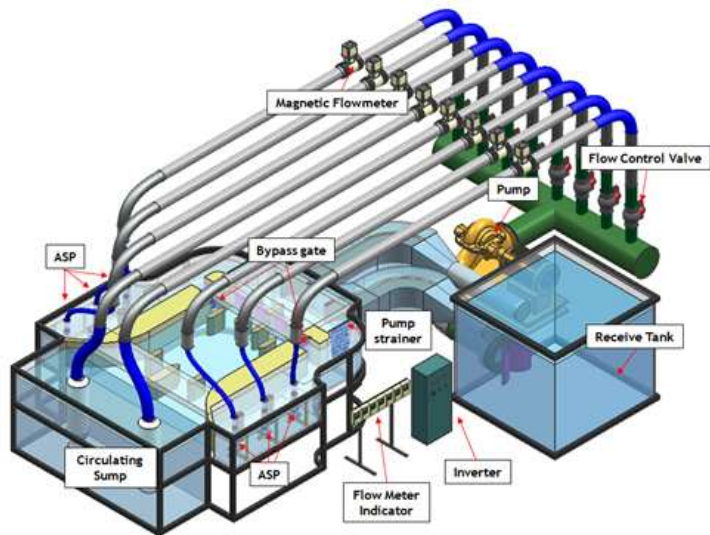
(2) 시험 결과

Table 2.14는 흡수정 시험 case 13의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위한 Cross L형 AVD와 스월각도를 줄이기 위한 baffle 설치 후 스월각이 낮아졌다.

Table 2.14 Result of test case 13

| Item | with AVD | | Revised with AVD | |
|-----------------------|----------|------------|------------------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | NV | O | NV | O |
| Submerged vortices | NV | O | NV | O |
| Max. swirl angle | 9.1° | X | 4.0° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 1.2% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 1.9% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.21 Image of case 13

2.3.2.4 Case 14

(1) 축소비 1:5 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.58m/s이며, 모델에서 0.7m/s이다. Fig. 2.22에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

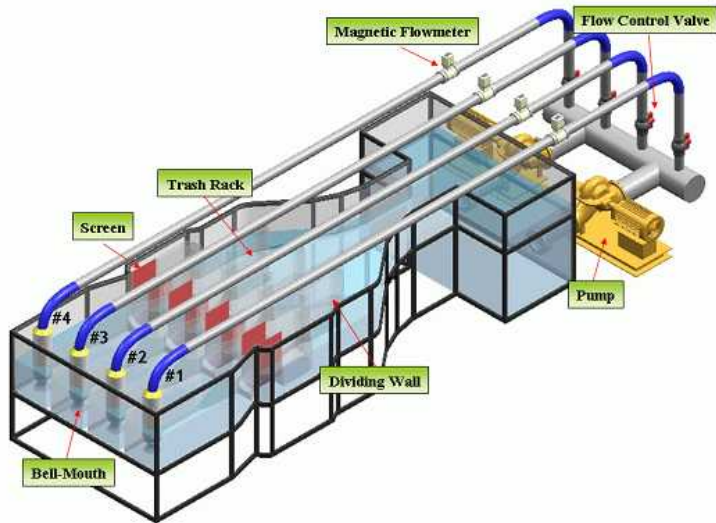
(2) 시험 결과

Table 2.15는 흡수정 시험 case 14의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각도를 나타내고 있다. cross-L형 AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다. 본 모델 시험은 case 17에서 모델을 다시 제작 후 HWL 수위 까지 재시험 하였다. 그 결과 curtain wall 및 AVD 형상이 다시 디자인 되었다.

Table 2.15 Result of test case 14

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | • | • |
| Max. time-varying V. | • | • | • | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig.2.22 Image of case 14

2.3.2.5 Case 15

(1) 축소비 1:7 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.34m/s이며, 모델에서 0.88m/s이다. Fig. 2.23에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

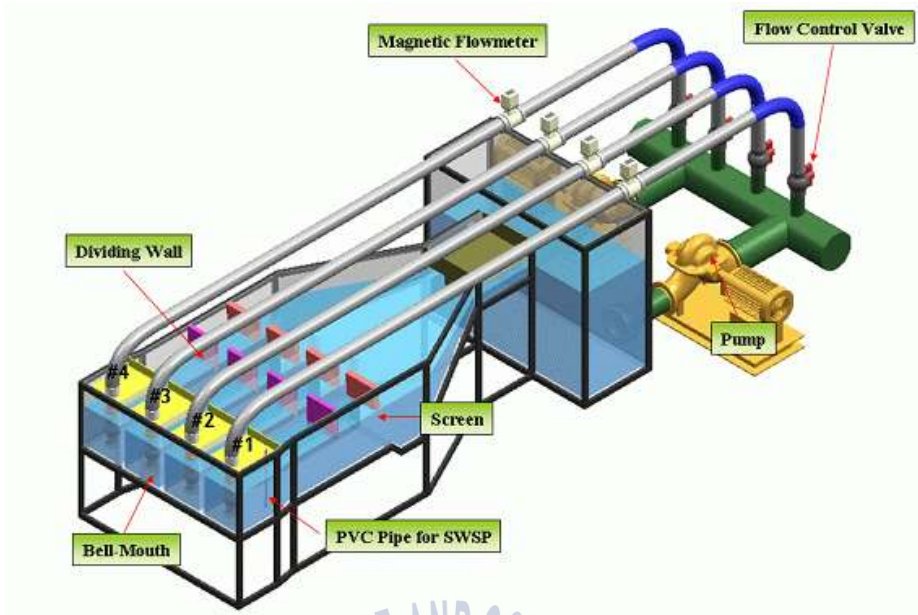
(2) 시험 결과

Table 2.16는 흡수정 시험 case 15의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무를 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위한 등면 사다리꼴 타입과 자유표면 보텍스 제거를 위한 Curtain wall 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

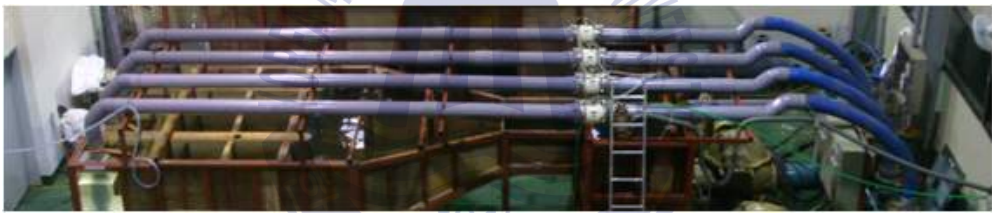
Table 2.16 Result of test case 15

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | • | • |
| Max. time-varying V. | • | • | • | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.23 Image of case 15

2.3.2.6 Case 16

(1) 축소비 1:12 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 #1#2 2.55m/s, #3#4 2.47m/s이며, 모델에서 각각 0.74m/s, 0.71m/s이다. Fig. 2.24에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

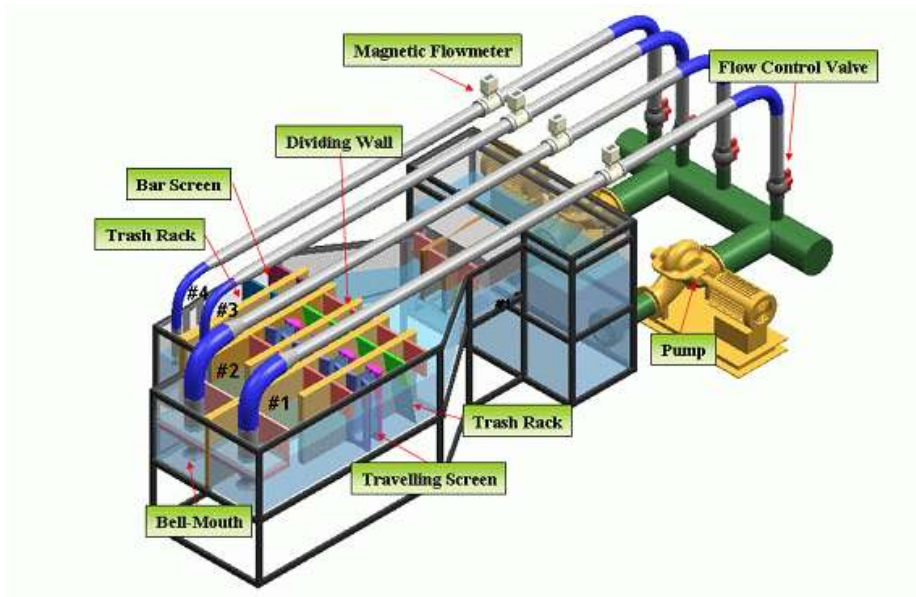
(2) 시험 결과

Table 2.17은 흡수정 시험 case 16의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위해 메인펌프에는 등변 사다리꼴형, 보조 펌프는 바닥을 높이고 뿔족한 직각삼각형 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 Curtain Wall을 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.17 Result of test case 16

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F2 | O | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0.2° | O | 0.3° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 5.4% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 3.1% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.24 Image of case 16

2.3.2.7 Case 17

(1) 축소비 1:5 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.58m/s이며, 모델에서 0.70m/s이다. Fig. 2.25에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

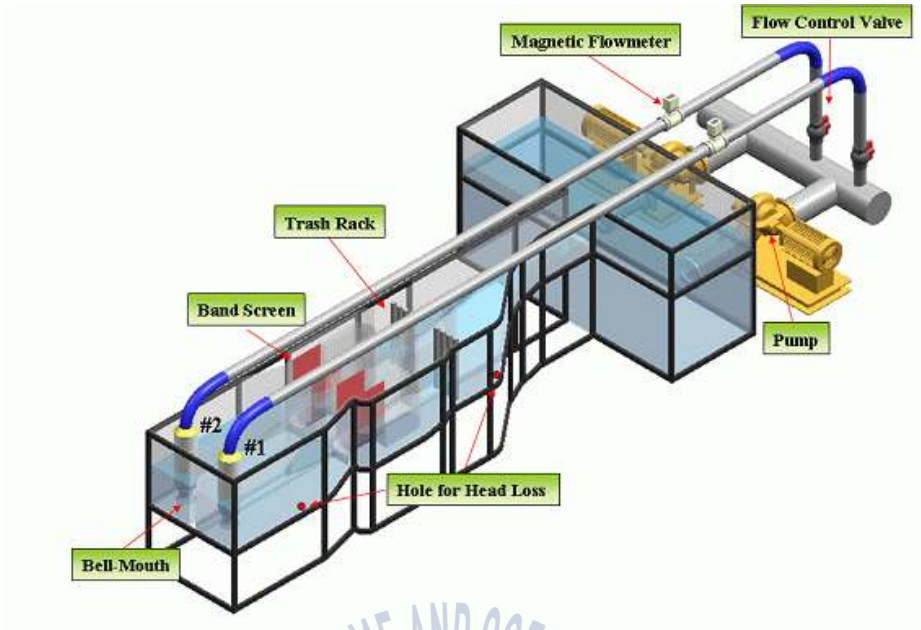
(2) 시험 결과

Table 2.18은 흡수정 시험 case 17의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.26은 AVD 설계형상 이며, 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되고 스월각이 낮아졌다.

Table 2.18 Result of test case 17

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | 6.1% | O | 3.7% | O |
| Max. time-varying V. | 28.3% | X | 2.8% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.25 Image of case 17

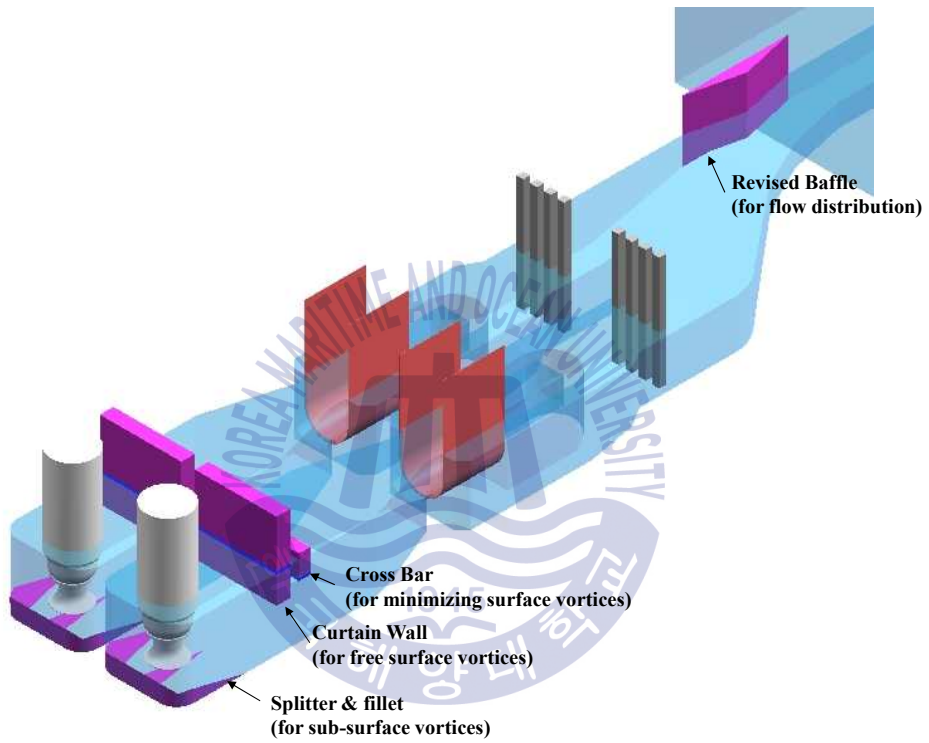


Fig. 2.26 AVD model design of case 17

2.3.2.8 Case 18

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.36m/s이며, 모델에서 0.43m/s이다. Fig. 2.27에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

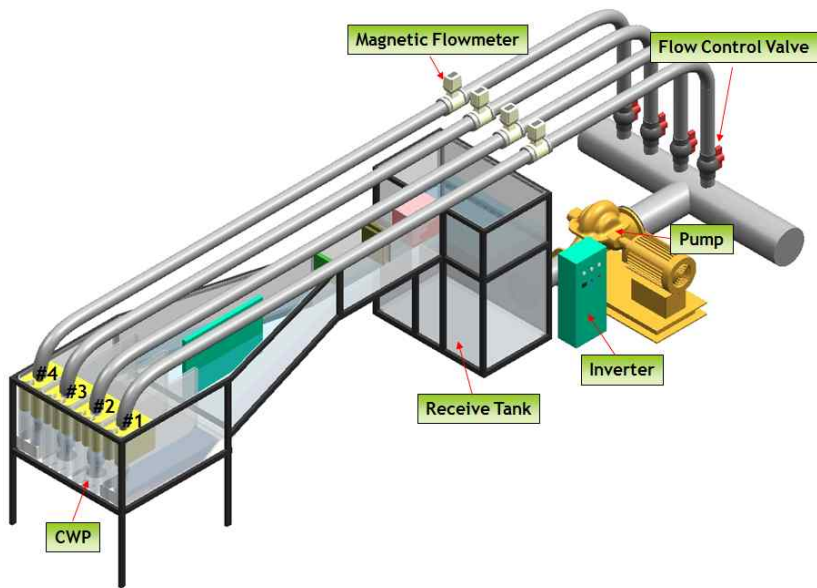
(2) 시험 결과

Table 2.19는 흡수정 시험 case 18의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.28은 직각삼각형 타입 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 Cross bar 조합의 AVD를 나타내며, 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.19 Result of test case 18

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | • 1945 • | • | 3.6% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 2.5% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.27 Image of case 18

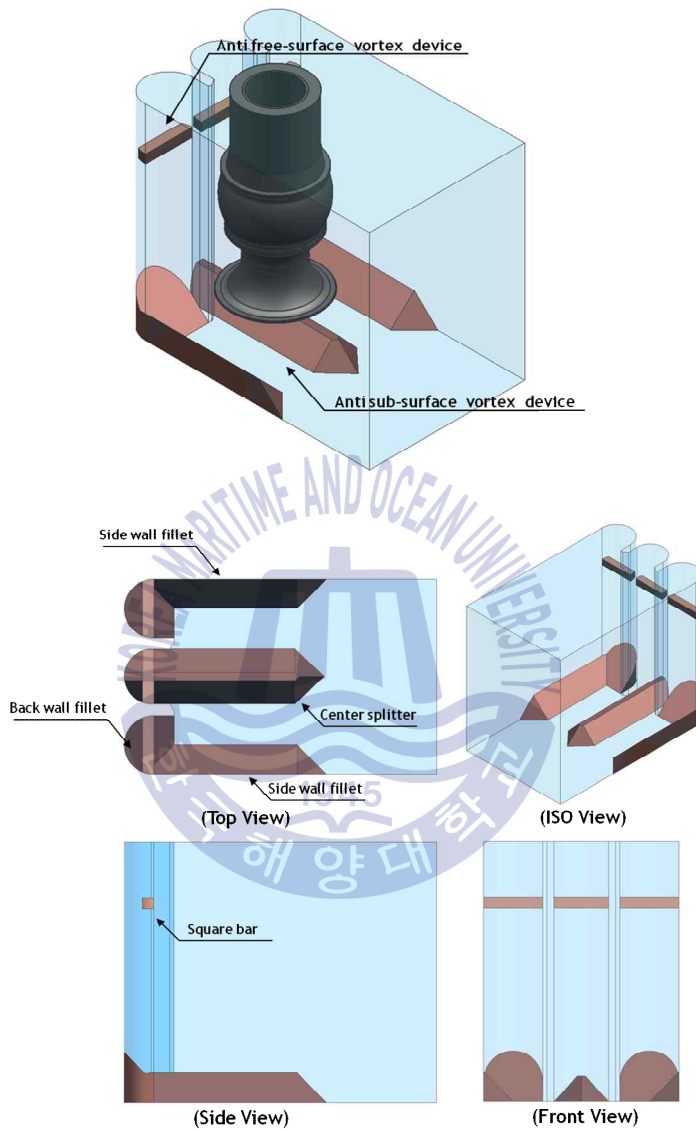


Fig. 2.28 AVD model design of case 18

2.3.2.9 Case 19

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.59m/s이며, 모델에서 0.82m/s이다. Fig. 2.29에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

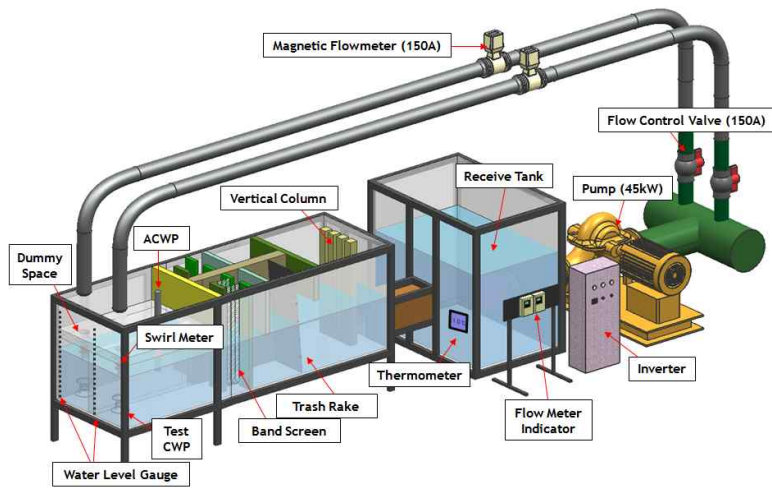
(2) 시험 결과

Table 2.20은 흡수정 시험 case 19의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. 설계 AVD는 수중보텍스 제거를 위한 바닥 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 curtain wall, 그리고 높은 스월각을 줄이기 위한 흐름분배기이다.

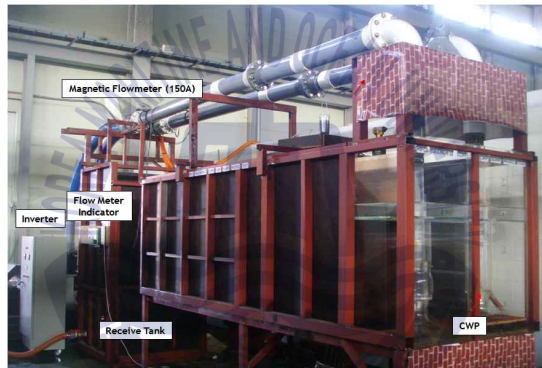
Table 2.20 Result of test case 19

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 12.5° | X | 2.3° | O |
| Max. area-varying V. | • 1945 • | • | 1.9% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 1.5% | O |

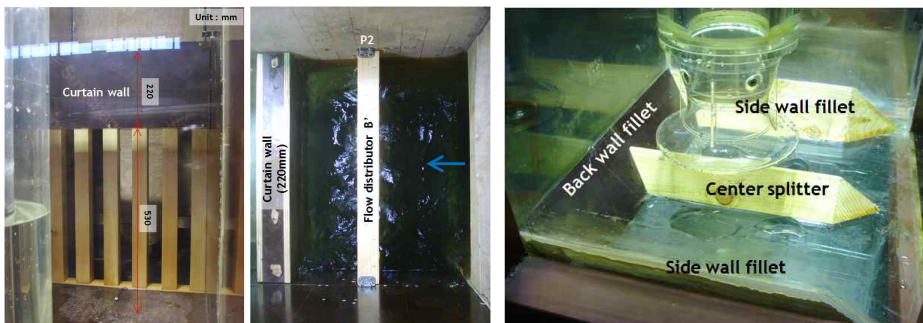
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.29 Image of case 19

2.3.2.10 Case 20

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.66m/s이며, 모델에서 0.52m/s이다. Fig. 2.30에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

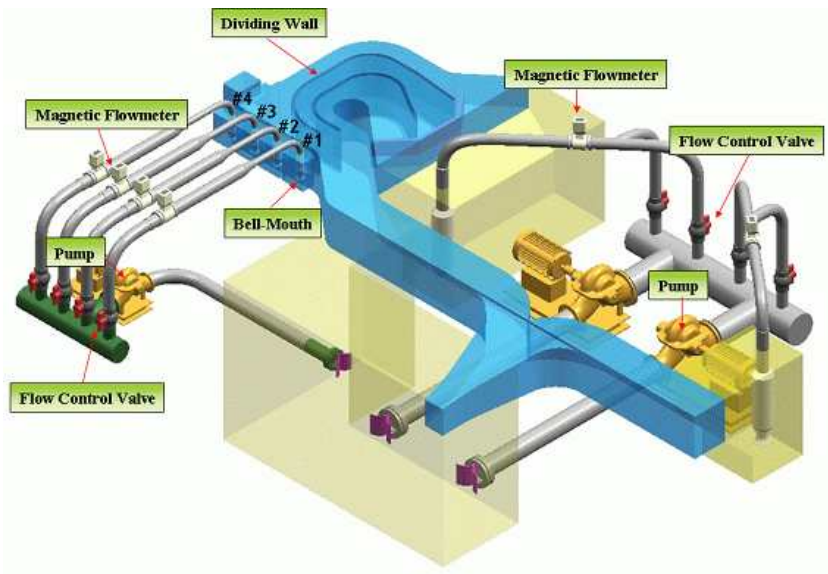
(2) 시험 결과

Table 2.21은 흡수정 시험 case 20의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. Fig. 2.30은 cross L형 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위해 사각바를 부착한 AVD 설계 형상을 나타내며, 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.21 Result of test case 20

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 3.0° | O | 0.3° | O |
| Max. area-varying V. | 40.9% | X | 8.2% | O |
| Max. time-varying V. | 20.4% | X | 2.2% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.30 Image of case 20



Fig. 2.31 AVD model design of Case 20

2.3.2 넓은 입구 유형 (Wide inlet type)

넓은 유로의 흡수정 경우 스크린의 종류와 형상에 따라 흡수정 유동장에 큰 영향을 주었다.

2.3.3.1 Case 21

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.21m/s이며, 모델에서 0.70m/s이다. Fig. 2.32에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

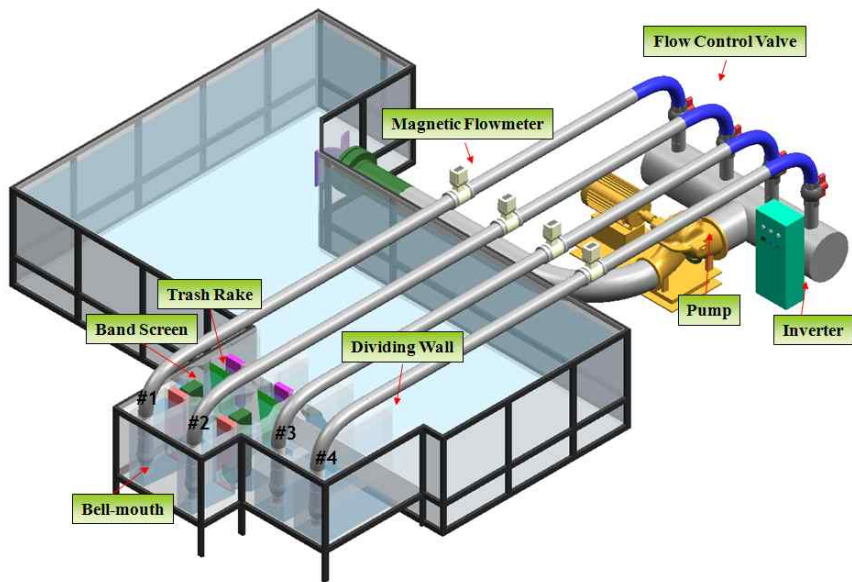
(2) 시험 결과

Table 2.22는 흡수정 시험 case 21의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

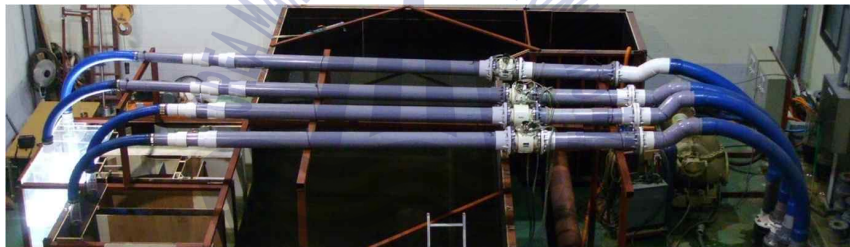
Table 2.22 Result of test case 21

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 0° | O | 0° | O |
| Max. area-varying V. | 3.6% | O | 1.6% | O |
| Max. time-varying V. | 5.1% | O | 2.9% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.32 Image of case 21

2.3.3.2 Case 22

(1) 축소비 1:7 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 #33~#36 1.82m/s 이며, 모델에서 각각 0.69m/s이다. Fig. 2.33에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

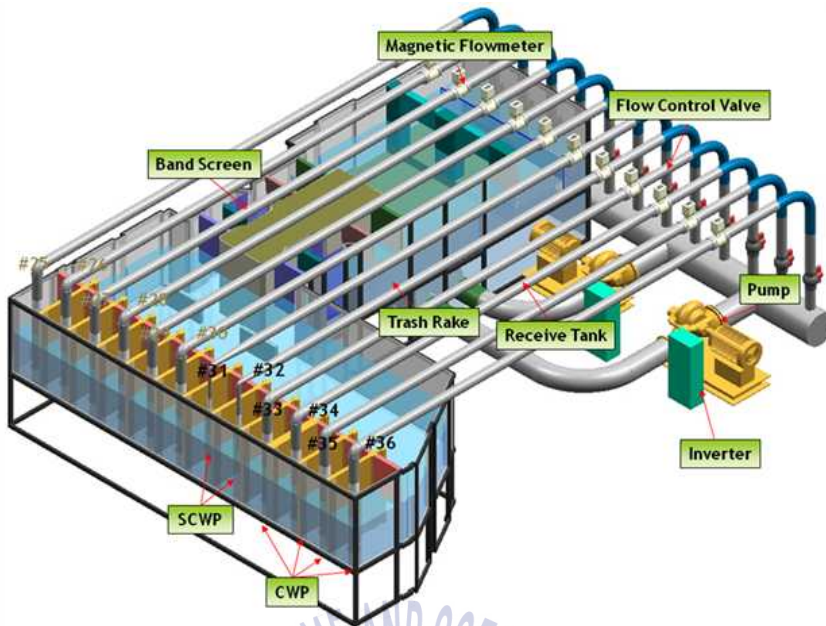
(2) 시험 결과

Table 2.23은 흡수정 시험 case 22의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.34은 수중보텍스 제거를 위한 직각삼각형 타입 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 사각바 AVD 설계형상을 나타내며, 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.23 Result of test case 22

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 1.0° | O | 3.3° | O |
| Max. area-varying V. | 1.2% | O | 1.2% | O |
| Max. time-varying V. | 1.1% | O | 1.3% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.33 Image of case 22

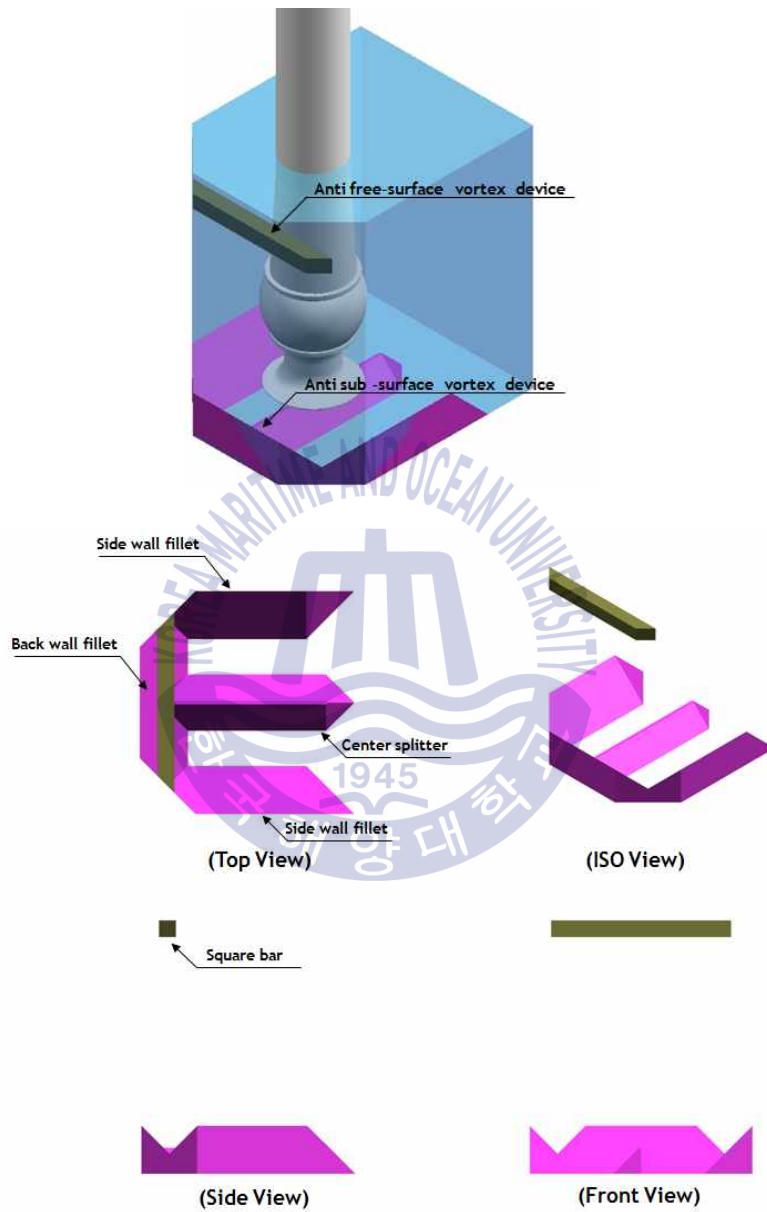


Fig. 2.34 AVD model design of case 22

2.3.3.3 Case 23

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 CWP 2.65m/s, SWP 1.64m/s이며, 모델에서 각각 0.84m/s, 0.52m/s이다. Fig. 2.35에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

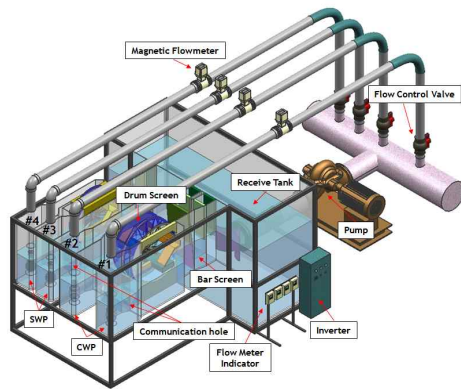
(2) 시험 결과

Table 2.24는 흡수정 시험 case 23의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위한 직각삼각형 타입 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 사각바 그리고 스윙각을 줄이기 위한 흐름분배기를 설치하였다.

Table 2.24 Result of test case 23

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 15.6° | X | 1.0° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 2.2% | • |
| Max. time-varying V. | • | • | 1.0% | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.35 Image of case 23

2.3.3.4 Case 24

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.66m/s이며, 모델에서 0.84m/s이다. Fig. 2.36에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

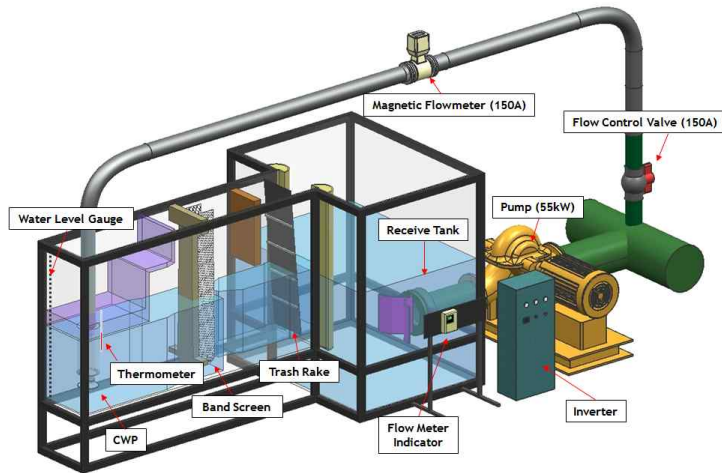
(2) 시험 결과

Table 2.25는 흡수정 시험 case 24의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위한 직각삼각형 타입 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 Curtain Wall 설치하였다.

Table 2.25 Result of test case 24

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F3 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 10.0° | X | 3.5° | O |
| Max. area-varying V. | 1.8% | O | 1.6% | O |
| Max. time-varying V. | 3.3% | O | 3.8% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.36 Image of case 24

2.3.3.5 Case 25

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 CWP 1.79m/s, SCWP 1.27m/s이며, 모델에서 각각 0.57m/s, 0.40m/s이다. Fig. 2.37에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

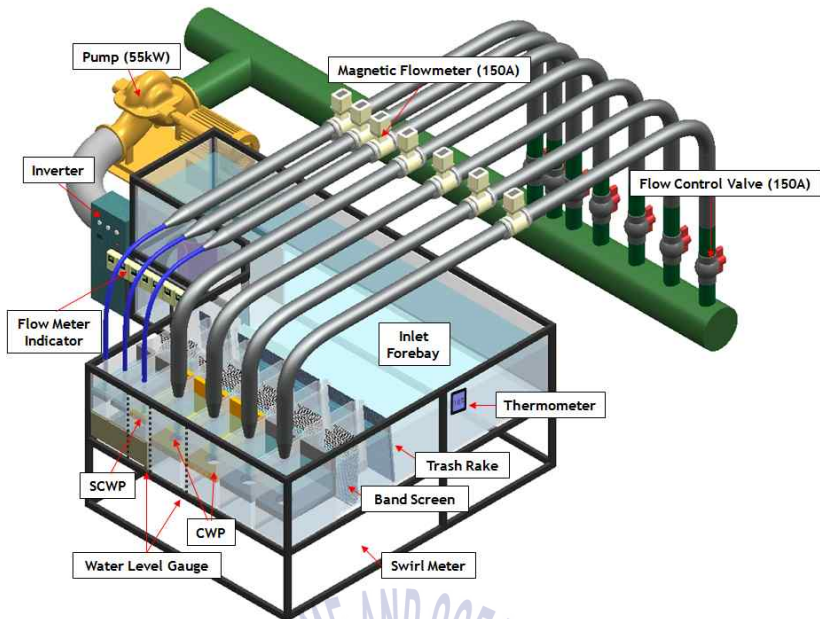
(2) 시험 결과

Table 2.26은 흡수정 시험 case 25의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. 수중보텍스 제거를 위해 CWP에는 L형 AVD, SCWP에는 직각삼각형 타입 AVD 설치하였다.

Table 2.26 Result of test case 25

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | NV | O | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 3.1° | O | 2.1° | O |
| Max. area-varying V. | 0.5% | O | 2.4% | O |
| Max. time-varying V. | 0.6% | O | 0.7% | O |

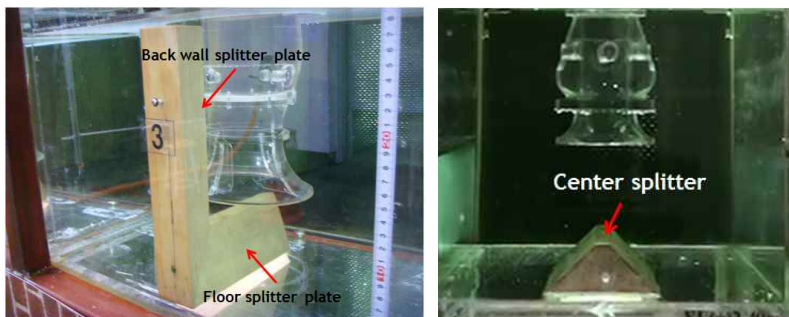
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.37 Image of case 25

2.3.3.6 Case 26

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.10m/s이며, 모델에서 0.66m/s이다. Fig. 2.38에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

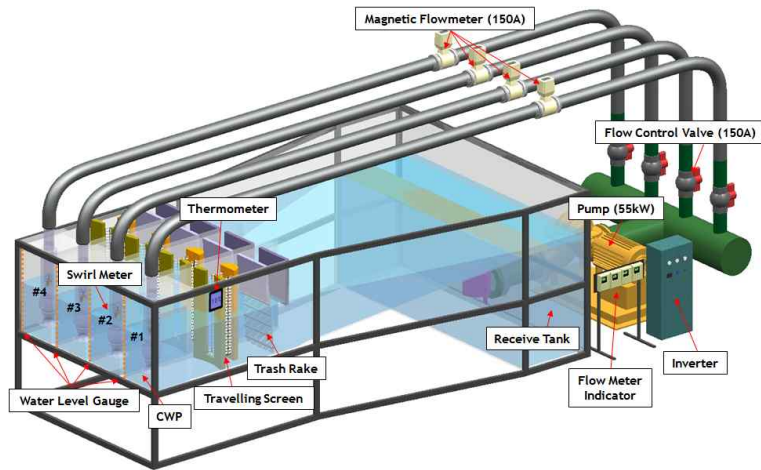
(2) 시험 결과

Table 2.27은 흡수정 시험 case 26의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. AVD의 설계조합은 수중보텍스 제거를 위한 직각삼각형 타입 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 Curtain Wall이다.

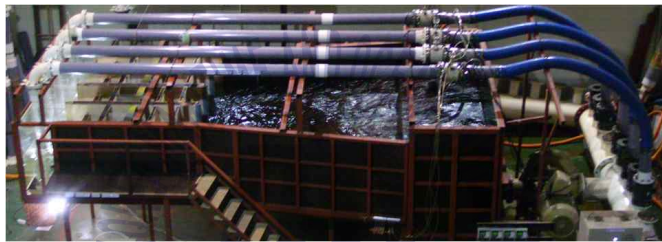
Table 2.27 Result of test case 26

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 13.8° | X | 3.5° | O |
| Max. area-varying V. | 1.6% | O | 2.4% | • |
| Max. time-varying V. | 15.9% | X | 2.5% | • |

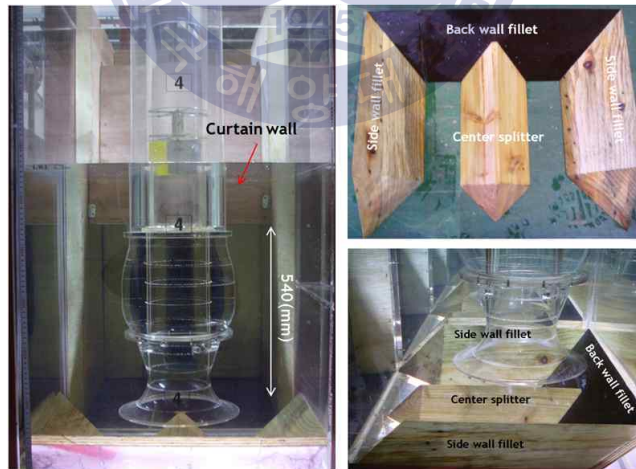
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig.2.38 Image of case 26

2.3.3.7 Case 27

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 2.68m/s이며, 모델에서 0.85m/s이다. Fig. 2.39에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

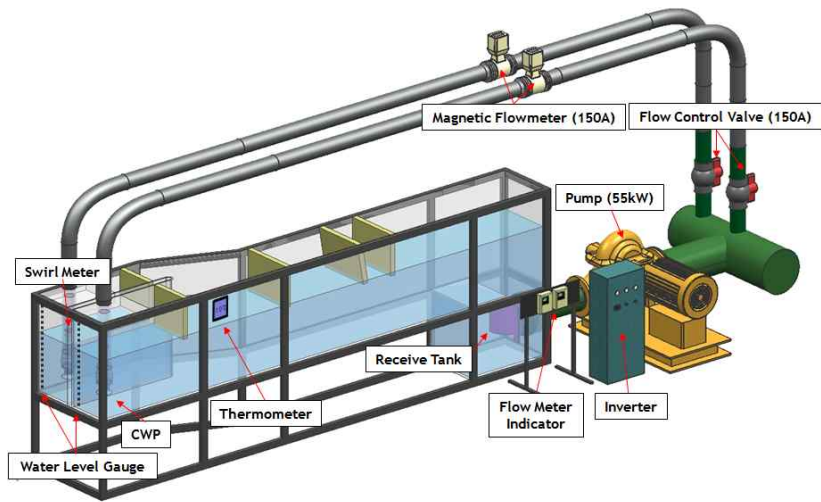
(2) 시험 결과

Table 2.28은 흡수정 시험 case 27의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. AVD의 설계조합은 수중보텍스 제거를 위해 바닥에 등변 사다리꼴형 AVD와 벽면에 뾰족한 직각삼각형 타입 필렛을 부착하였다.

Table 2.28 Result of test case 27

| Item | without AVD | | Proposed with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|-------------------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | NV | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 1.9° | O | 0.2° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 1.6% | • |
| Max. time-varying V. | • | • | 0.8% | • |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) Photos of AVD model

Fig. 2.39 Image of case 27

2.3.3.8 Case 28

(1) 축소비 1:10 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.70m/s이며, 모델에서 0.54m/s이다. Fig. 2.40에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

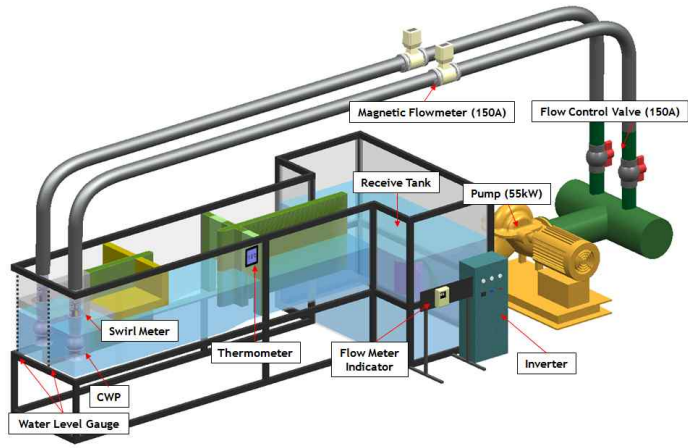
(2) 시험 결과

Table 2.29은 흡수정 시험 case 28 시험의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스윙각을 나타내고 있다. AVD의 설계조합은 수중보텍스 제거를 위한 직각삼각형 타입 AVD와 자유표면 보텍스 제거를 위한 Curtain Wall, 그리고 스윙각을 줄이기 위한 흐름분배기이다. AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되고 스윙각이 줄어들어 안정된 흐름이 만들어 졌다.

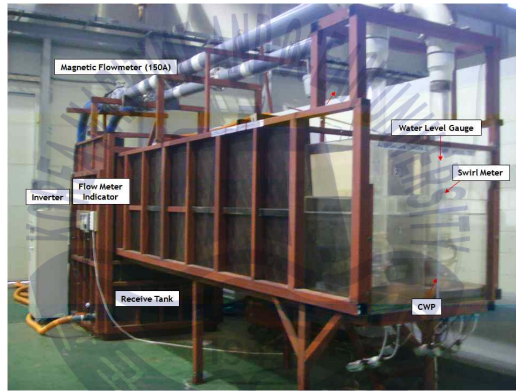
Table 2.29 Result of test case 28

| Item | without AVD | | with AVD | |
|-----------------------|-------------|------------|----------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S3 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 17.2° | X | 2.9° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 1.8% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 1.3% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.40 Image of case 28

2.3.3.9 Case 29

(1) 축소비 1:9 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.83m/s이며, 모델에서 0.61m/s이다. Fig. 2.41에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

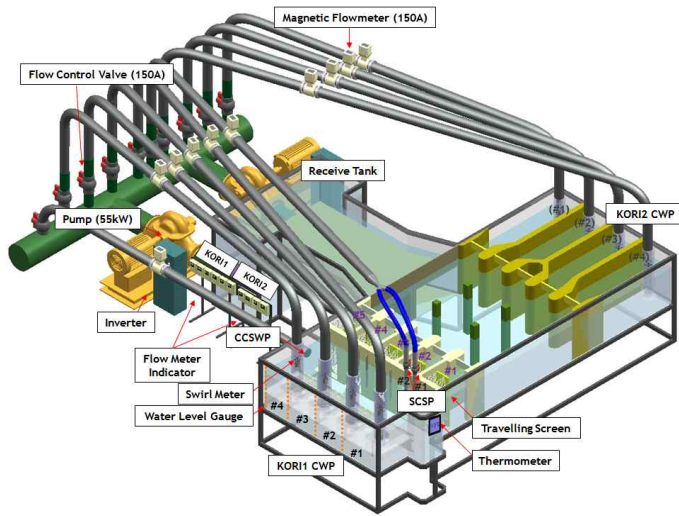
(2) 시험 결과

Table 2.30은 흡수정 시험 case 29의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. Fig. 2.42는 AVD의 설계조합으로 기존 설치된 AVD의 보강을 위해 뾰족한 직각삼각형 타입의 필렛을 부착하고, 자유표면 보텍스 제거를 위해 펌프에 링을 부착한 것이다. 수정된 AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.30 Result of test case 29

| Item | Existing AVD | | Revised with AVD | |
|-----------------------|--------------|------------|------------------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F4 | X | F1 | O |
| Submerged vortices | S3 | X | S1 | O |
| Max. swirl angle | 3.9° | O | 1.8° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 3.4% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 2.8% | O |

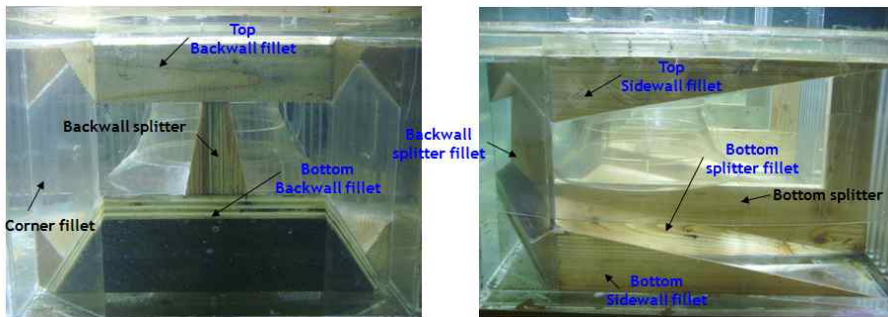
* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.41 Image of case 29

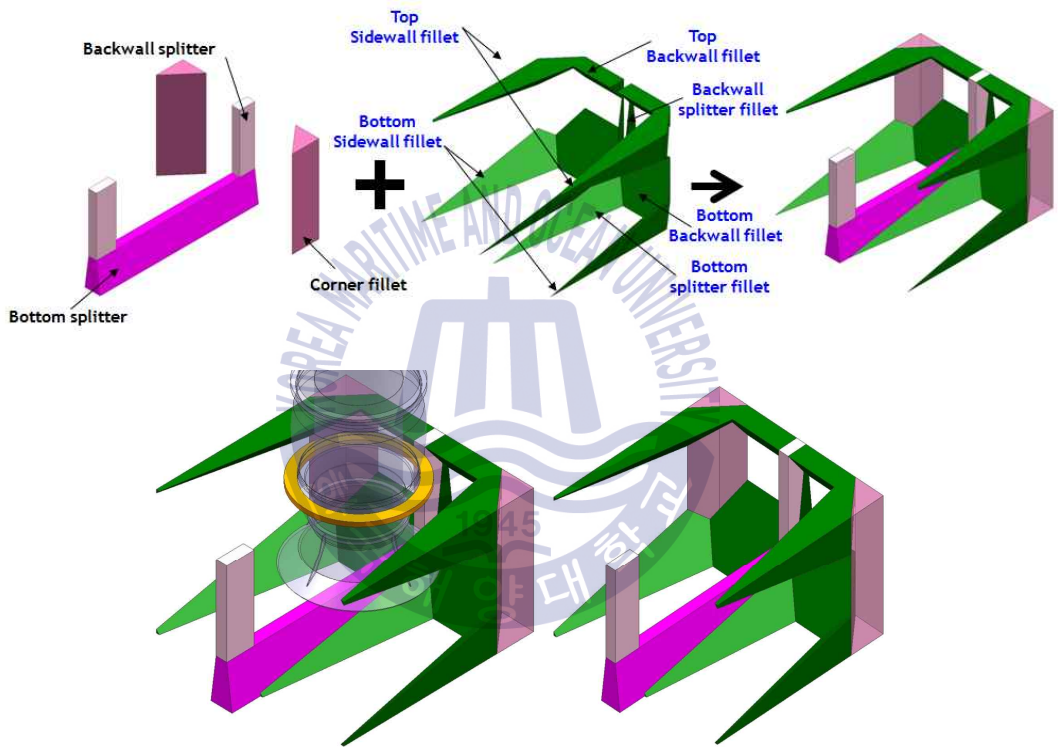


Fig. 2.42 AVD model design of case 29

2.3.3.10 Case 30

(1) 축소비 1:7 이며, 벨마우스 유입 유속은 정격유량에서 1.73m/s이며, 모델에서 0.65m/s이다. Fig. 2.43에 개략도, 장치와 AVD 사진이 나타나 있다.

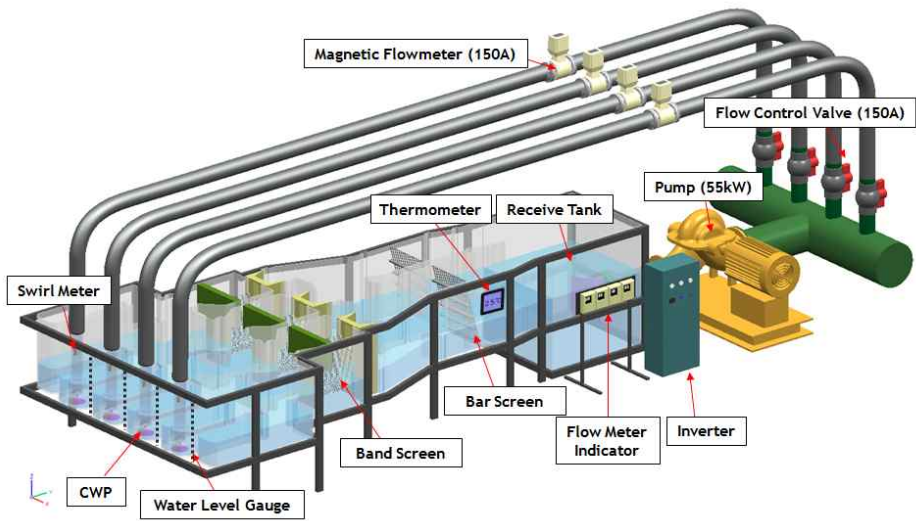
(2) 시험 결과

Table 2.31은 흡수정 시험 Case 30의 자유표면 보텍스의 유무, 수중보텍스의 유무와 스월각을 나타내고 있다. AVD 설치 후 자유표면 보텍스와 수중보텍스가 제거되었다.

Table 2.31 Result of test case 30

| Item | Existing AVD | | Revised with AVD | |
|-----------------------|--------------|------------|------------------|------------|
| | Result | Acceptance | Result | Acceptance |
| Free surface vortices | F5 | X | NV | O |
| Submerged vortices | S2 | X | NV | O |
| Max. swirl angle | 2.5° | O | 1.1° | O |
| Max. area-varying V. | • | • | 2.9% | O |
| Max. time-varying V. | • | • | 2.2% | O |

* F:Free surface vortex, S:Submerged vortex, NV:No vortex, V.:Velocity



(a) Schematic diagram of model test apparatus



(b) Sump model test apparatus



(c) AVD model

Fig. 2.43 Image of case 30

2.4 와류 제거 장치의 설계

유입 방식과 스크린의 종류에 따라 흡수정의 유동장은 크게 달라졌다. 쿨링 타워 방식의 경우 타워 바닥과 펌프 바닥의 높이 차에 의해 유동이 불안정해졌고, 좁은 유로 방식은 빠른 유입 속도와 갑자기 넓어지는 유로에 의해 유동이 불안정하고 보텍스가 발생하였다. 넓은 유입 방식은 유입 속도는 느리나 밴드 스크린이 있는 경우 스크린 후단의 불균일한 속도로 펌프 주위의 유동장이 불균일 하였다. 이에 따라 바닥 AVD 뿐만 아니라 커튼월이나 흐름 분배기를 이용하여 자유표면 보텍스를 제거하고 스월각을 줄여야 한다.

2.4.1 와류 제거 장치의 설계 요인

Table 2.32는 와류 제거 장치의 주요 설계요인이며 Fig. 2.127은 그 요인을 도면에 표시한 것이다.

Table 2.32 Bottom anti-vortex device design factors

| Design factors | |
|----------------|---|
| W | pump bay entrance width |
| D | bell-mouth diameter |
| B | distance from the back wall to the pump inlet bell-mouth centerline |
| C | distance between the inlet bell and floor |

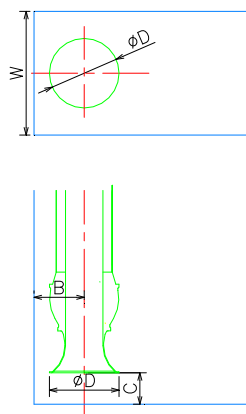


Fig. 2.44 AVD design factors shown in the drawing

2.4.2 형상에 따른 와류 제거 장치 설계 요소

형상이 다른 30가지의 흡수정 모델 시험을 통하여 검정된 와류 제거 장치의 설계 요소를 아래와 같이 정리하였다. 모델 도면의 경우 치수 끝 단위를 1mm, 토목 도면의 경우는 10mm 단위가 되도록 한다.

2.4.2.1 등변 사다리꼴 타입 (isosceles trapezoid type)

Table 2.33은 등변 사다리꼴 타입의 AVD의 설계값이며 Fig. 2.128은 설계요소이다.

Table 2.33 Isosceles trapezoid type AVD design value of design elements

| Design elements | Design values |
|-----------------|---------------------|
| a | b-c |
| b | $B+(0.5 \cdot D)+C$ |
| c | $0.425 \cdot C$ |
| d | $0.2 \cdot D$ |
| e | $0.1 \cdot D$ |
| f | 45° |

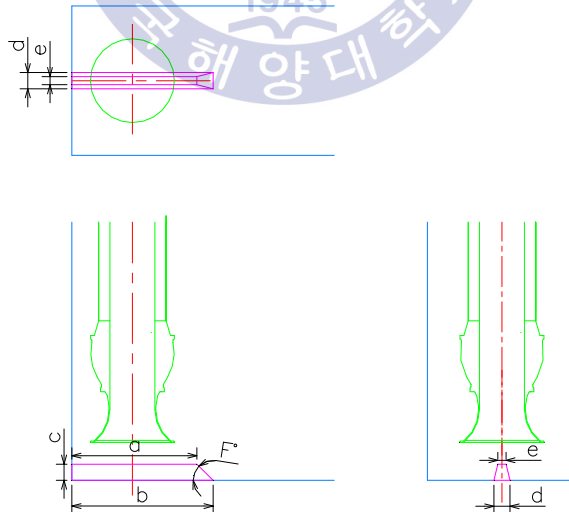


Fig. 2.45 Isosceles trapezoid type AVD design elements

2.4.2.2 직각삼각형 타입 (right-angled triangle type)

Table 2.35는 직각삼각형 타입의 AVD의 설계값이며 Fig. 2.47은 설계요인이다. 본 타입은 대부분의 시험에서 바닥과 벽면 보텍스가 제거되고 시공이 용이한 장점이 있다. 본 타입으로 벽면 보텍스가 제거 되지 않는 경우에는 2.4.2.3 뿔족한 직각삼각형 타입이 대안이 된다.

Table 2.34 Right-angled triangle type AVD design value of design elements

| Design elements | Design values |
|-----------------|---|
| a | $B+(0.5 \cdot D)+(C/\tan 39^\circ)$ |
| b | $a-(c/\tan 39^\circ)+(d/\tan 39^\circ)$ |
| c | $0.55 \cdot C$ |
| d | $0.8 \cdot C$ |
| e | W |
| f | 90° |
| g | 39° |

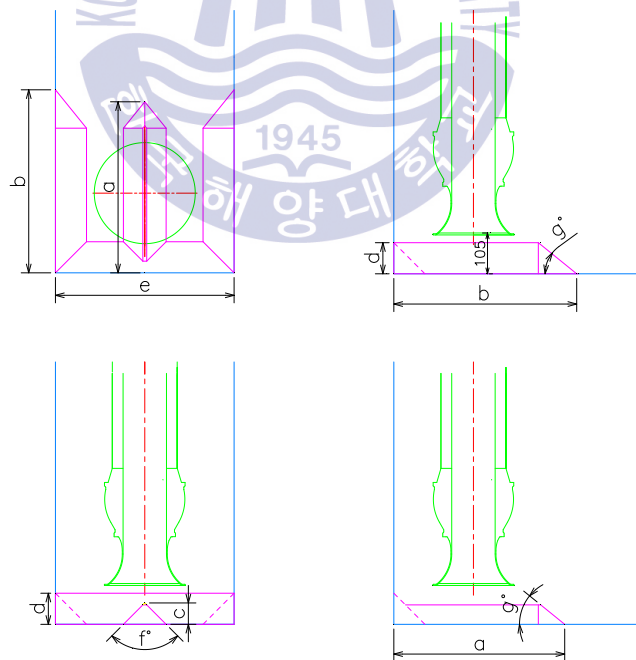


Fig. 2.47 Right-angled triangle type AVD design elements

2.4.2.3 뾰족한 직각삼각형 타입 (Sharp right-angled triangle type)

뾰족한 직각삼각형 타입으로 ANSI/HI 9.8에 제시되어 있으나 D에 대한 비율로만 나와 있어, 실제 섬프장의 설계 비율을 고려한 AVD 설계값이 필요하였다. Table 2.34는 AVD의 설계값이며 Fig. 2.129는 설계요소이다. 하지만, 펌프의 벨마우스 설치 지점이 바닥으로부터 0.5D 이상일 경우 성능이 저하되어 뒷 벽면에서 보텍스가 발생할 수 있다. 벨마우스가 0.5D 지점에 설치가 되어 있더라도 뒷 벽면에서 Center splitter를 지나는 횡흐름으로 벽면 보텍스가 발생될 수 있으며 이는 직각삼각형 타입의 Center splitter로 교체하면 제거가 가능하다.

Table 2.35 Sharp right-angled triangle type AVD design value of design elements

| Design elements | Design values |
|-----------------|---------------------------------|
| a | $B+(0.7 \cdot D)+C$ |
| b | $B+(0.7 \cdot D)+C$ |
| c | $0.75 \cdot C$ |
| d | $1.0 \cdot C \sim 1.25 \cdot C$ |
| e | W |
| f | 90° |

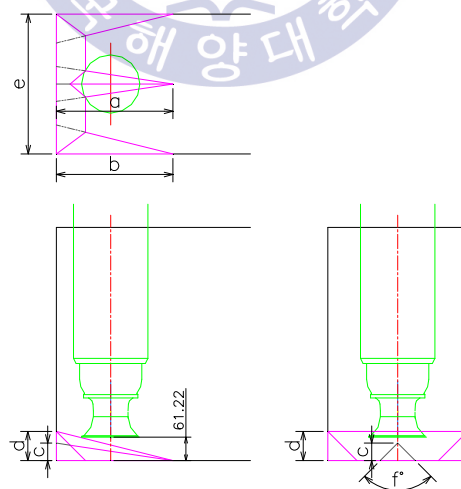


Fig. 2.46 Sharp right-angled triangle type AVD design elements

제 3 장 흡수정 모형실험

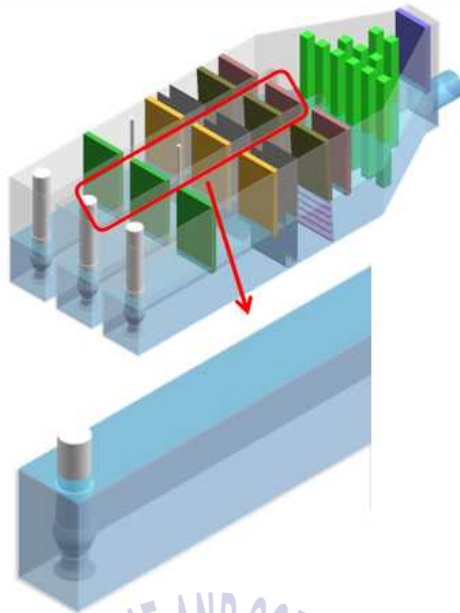
흡수정에 발생 가능한 수중보텍스 및 자유표면 보텍스의 억제를 위한 와류 제거장치(AVD) 형상에 따른 유동장을 PIV계측을 통해 유동 패턴을 관찰하고 흡수정 모델 시험에 있어 필요한 스윙메타(swirl meter)의 위치, 두께, 재질 그리고 무게에 따른 스윙각을 비교하기 위한 실험을 수행하였다.

3.1 실험장치

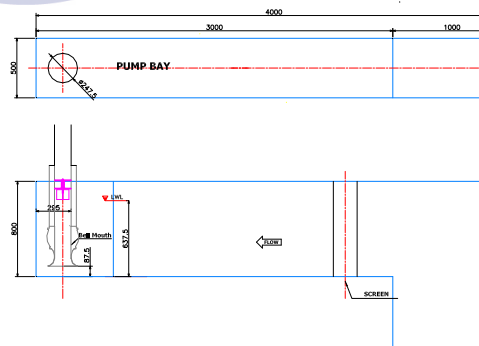
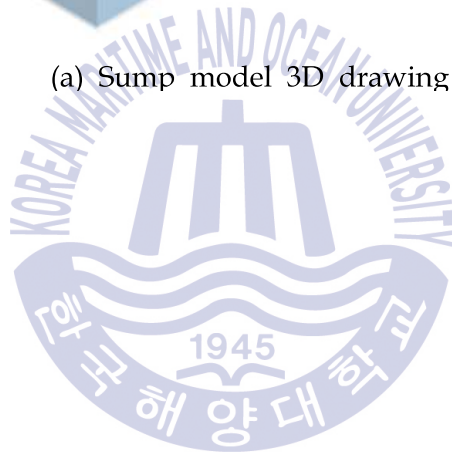
3.1.1 흡수정 모형설계

Fig. 3.1은 PIV를 이용한 흡수정 유동해석을 위한 흡수정 모델 도면이다. Fig. 3.1(a)는 3개의 채널을 가지고 있는 흡수정의 3D 개략도이며, Fig. 3.1(b)이중 한 채널만 1:8로 축소한 단일 흡수정의 치수를 나타내고 있다. 3개의 흡수정 중 중간 위치의 흡수정에 대하여 유동해석 영역으로 설정하였다. 흡수정 모델은 길이 4,000 mm, 폭 500 mm, 높이 800 mm로 제작 되어 졌다. 흡입관은 그 중심이 후벽으로부터 295 mm, 입구는 바닥으로부터 87.5 mm 에 위치 하고 있다. 흡입관을 입구 외경은 247.5 mm 이며 목 부분의 내경은 140 mm 이다.

Fig. 3.2는 흡수정 모델 실험장치 이다. 전체 수조와 벨마우스는 유동 가시화를 위해 아크릴로 제작되어졌다. 물 순환위해 55kW의 펌프가 설치되어 졌으며 유량 조절을 위해 인버터와 밸브가 달려있다.

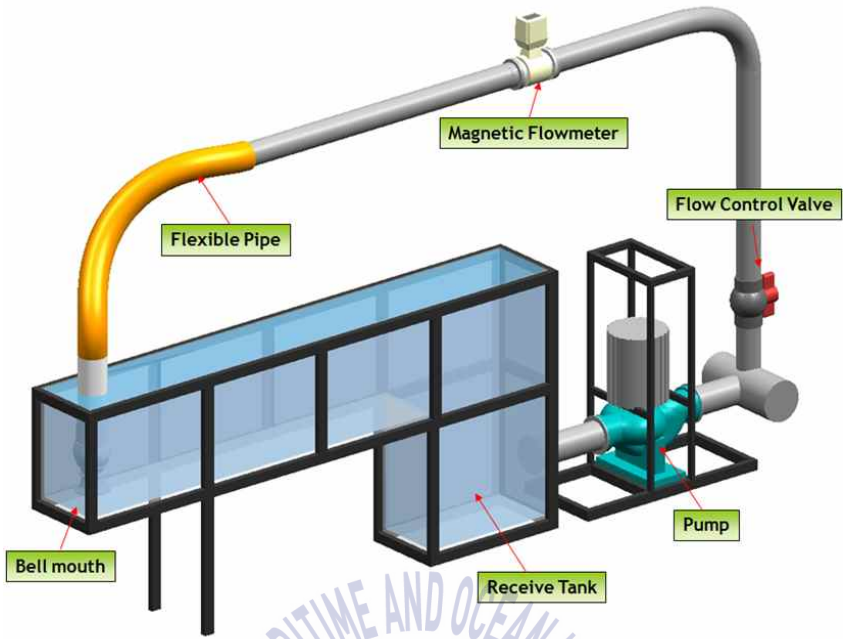


(a) Sump model 3D drawing

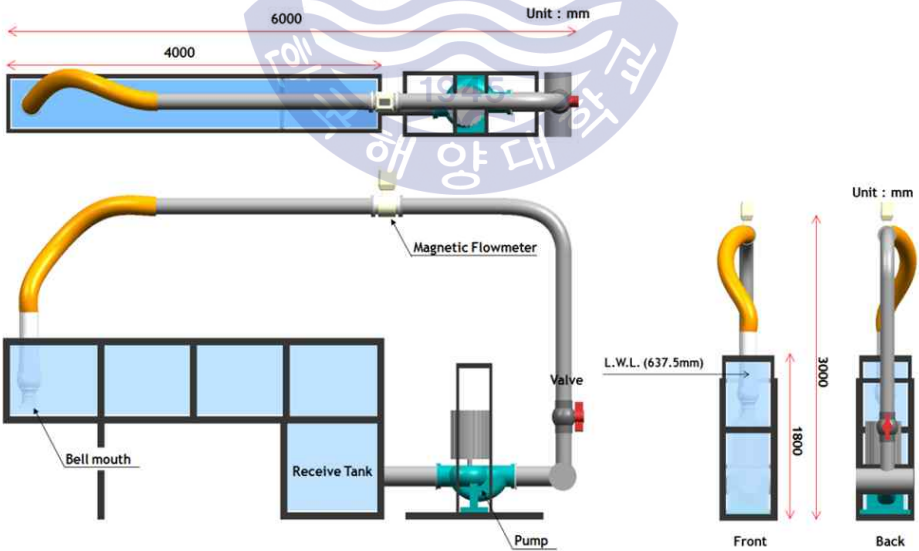


(b) Sump model 2D drawing

Fig. 3.1 Sump model design



(a) Components & instrument



(b) Sump model 3D drawing

Fig. 3.2 Schematic diagram of model test apparatus

3.1.2 흡입관

모델 스케일은 1:8 이며 외형 형상은 실제 제작되어 지는 펌프의 형상을 그대로 축소 아크릴을 NC로 가공하였다. 벨마우스의 직경은 247.5 mm 이이고 파이프 안쪽에 설치되어 지는 스웰메타의 교환 용이를 위해 파이프는 플렌지 연결을 하고 파이프와 벨마우스는 나사형식으로 조립, 펌프 바디와 벨마우스는 5mm 나사를 이용해 조립하였다. Fig. 3.3은 제작된 흡입관 아크릴 모형이다.



Fig. 3.3 Photo of bell-mouth model

3.1.3 순환펌프와 인버터

Fig. 3.4는 실험장치의 물을 순환하기 위해 설치되어진 55kW급 펌프와 인버터이다. 사용되어진 순환 펌프는 양흡입 볼류트 펌프로 양정 8m, 유량 900 m³/hr이다.

Table 3.1은 실제 펌프의 운전 유량과 모델 테스트 유량을 나타낸 것이다. 유량비는 1:181이다.

Table 3.1 Flowrate of sump model test

| ITEM | Rated flowrate (m ³ /h) | Runout flowrate (m ³ /h) |
|-------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Proto | 21,700 | 27,780 |
| Model | 120.0 | 153.5 |



Fig. 3.4 Photo of pump & inverter

3.1.4 흡수정 모형 실험 장치

Fig. 3.5는 완성된 흡수정 모형 실험 장치이다. 순환펌프의 운전을 위해 인버터의 정밀 저항 볼륨을 조절함으로써 운전은 시작된다. 펌프 내부의 임펠러가 제거된 모형의 입구단으로부터 흡입된 유체는 파이프를 통해 유량계를 지나가고 다시 순환 펌프로 유입된다. 전체 아크릴로 채널을 제작하여 PIV 계측을 통해 유통패턴을 관찰할 수 있다.

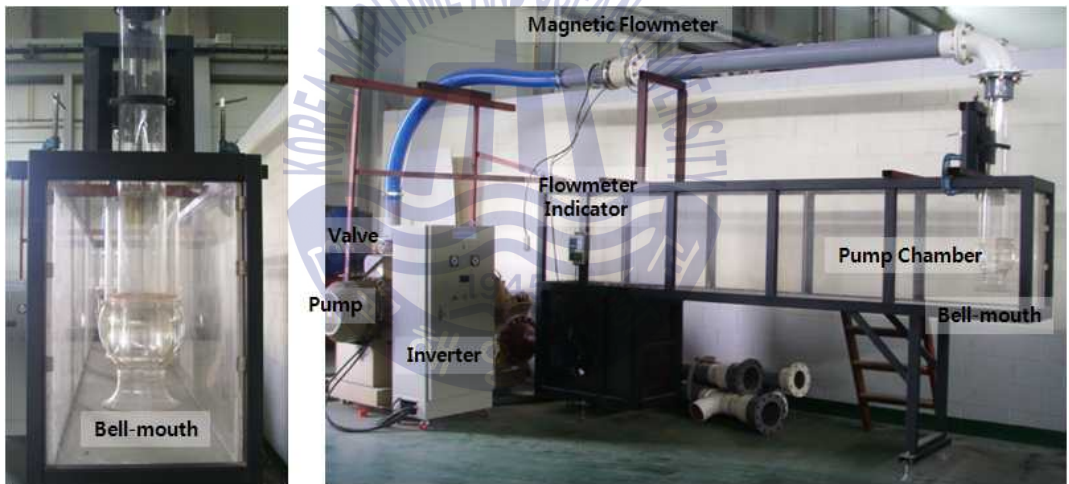


Fig. 3.5 Image of sump model test arrangement

3.2 실험조건 및 계측방법

3.2.1 보텍스 브레이커 설치 유무

Fig. 3.6은 보텍스 브레이커의 설치 유무에 따른 벨마우스 형상이다. 임펠러가 설치되는 지점 앞단에 부착되어 흐름을 정류하는 것으로 십자모양이며 모델 실험에서 이것의 유무에 따른 스웰메타의 회전수를 기록한다.



(a) Without vortex breaker



(b) Vortex breaker installation

Fig. 3.6 Bell mouth image according to the presence or absence of the vortex breaker

3.2.2 스윙메타 종류

Fig. 3.7은 스윙메타로 흡입관 내부에 부착되어져 챔버의 흐름에 따른 와의 강도를 측정하기 위한 계측기이다. 스윙메타의 치수는 흡입관 목부분의 치수 (d)에 의해 정해진다. 본 실험에서는 스윙메타의 부착되어지는 지점을 흡입관 목부분과 흡입관 입구로부터 4d 지점 2가지 변화를 주었다. 또한, 제작되어지는 스윙메타의 재질, 두께 그리고 무게에 따른 회전수를 측정하였다. Fig. 3.8 (a) SM1은 두께 1.2 mm, 재질 stainless steel이다. (b) SM2는 두께 2.4 mm, 재질 stainless steel이다. (c) SM3는 두께 2.4 mm 재질은 acryl이다.

Table 3.2은 유량과 회전수에 따른 스윙각을 나타낸 것이다. 스윙각의 정의는 2.1.3에 나타나있다.

Table 3.2 Swirl angle

| Flowrate (m ³ /hr) | rpm | V_{θ} | V_z | °(deg) | Flowrate (m ³ /hr) | rpm | V_{θ} | V_z | °(deg) |
|----------------------------------|-----|--------------|--------|--------|----------------------------------|-----|--------------|--------|--------|
| 120.0 | 1 | 0.0076 | 2.1654 | 0.19 | 153.5 | 1 | 0.0073 | 2.7699 | 0.15 |
| | 2 | 0.0147 | 2.1654 | 0.39 | | 2 | 0.0147 | 2.7699 | 0.30 |
| | 3 | 0.0220 | 2.1654 | 0.58 | | 5 | 0.0367 | 2.7699 | 0.76 |
| | 5 | 0.0367 | 2.1654 | 0.97 | | 8 | 0.0586 | 2.7699 | 1.21 |
| | 8 | 0.0586 | 2.1654 | 1.55 | | 10 | 0.0733 | 2.7699 | 1.52 |
| | 10 | 0.0733 | 2.1654 | 1.94 | | 15 | 0.1100 | 2.7699 | 2.27 |
| | 15 | 0.1100 | 2.1654 | 2.91 | | 20 | 0.1466 | 2.7699 | 3.03 |
| | 20 | 0.1466 | 2.1654 | 3.87 | | 25 | 0.1833 | 2.7699 | 3.79 |
| | 25 | 0.1833 | 2.1654 | 4.84 | | 30 | 0.2199 | 2.7699 | 4.54 |
| | 30 | 0.2199 | 2.1654 | 5.80 | | 35 | 0.2566 | 2.7699 | 5.29 |

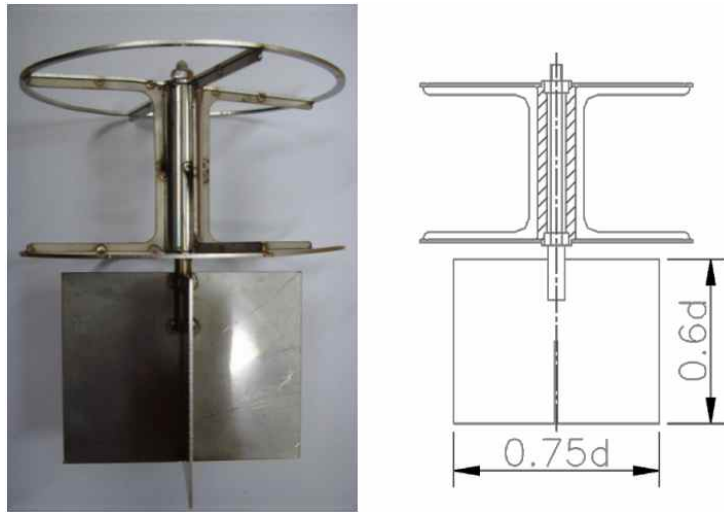


Fig. 3.7 Sample of swirl meter



(a) SM1:normal (b) SM2:double weight (c) SM3:acryl

Fig. 3.8 Different swirl meter(thickness, material, weight)

3.2.3 스웰메타 설치 위치

Fig. 3.9 (a)는 ANSI/HI 9.8의 스웰메타 제원과 설치 위치를 나타내고 있다. Fig. 3.9 (b)는 흡수정 시험 시 펌프 메이커에 따라 스웰메타의 설치 지점을 벨 마우스 목 부분을 요구하기도 한다. 이 시험은 스웰메타의 설치 위치에 따른 회전수를 비교한다.

Fig. 3.10은 스웰메타 설치 지점을 달리한 장치 사진이다.

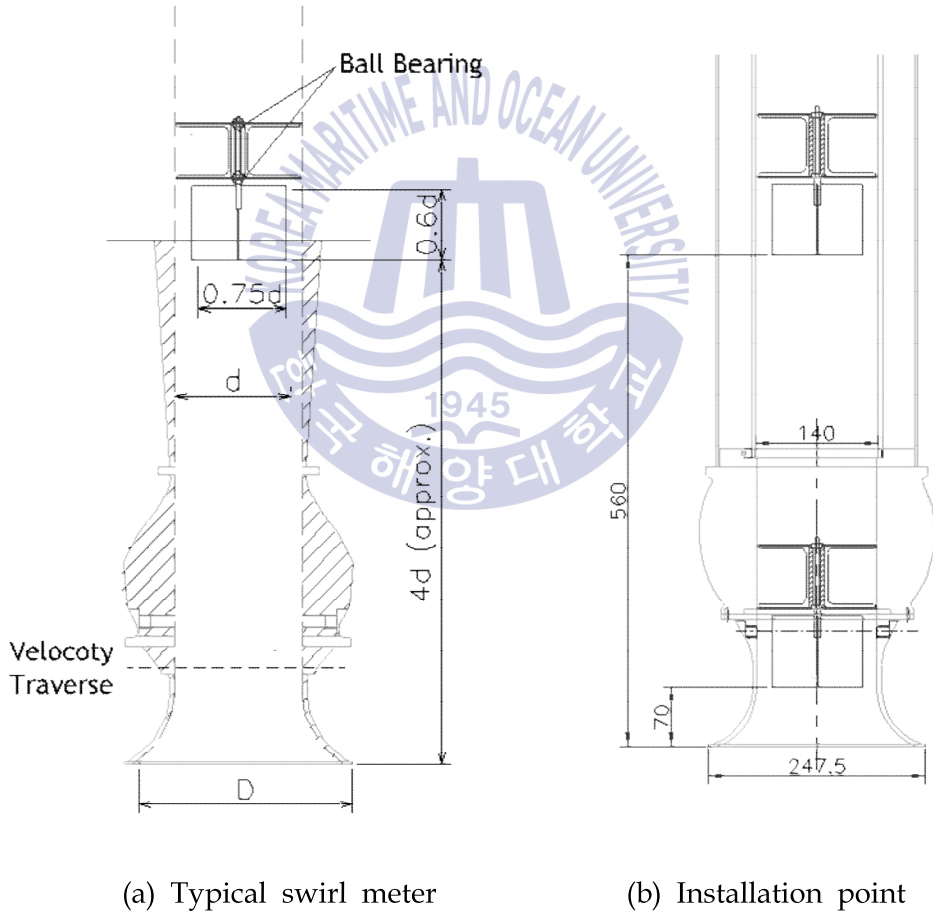


Fig. 3.9 Dimensions of swirl meter



(a) 4d



(b) 0.5d

Fig.3.10 Photos of swirl meter location

3.2.4 흐름분배기

본 실험에 제작된 단일 흡수정은 충분한 길이와 폭을 유지하고 있어 안정된 유동을 가진다. 하지만, 실제 흡수정은 여러 채널로 구성되어 균일한 흐름을 가지지 못한다. 이러한 흐름을 관찰하기 위해 Fig. 3.9와 같은 흐름 분배기를 사용하여 다 채널 흡수정의 효과를 나타내었다. Fig. 3.11 (a) 균일한 흐름, (b)는 중심부에 집중된 흐름, (c)는 한쪽으로 유량이 치우친 흐름 등 흡수정에서 나타날 수 있는 대표적인 흐름이다..

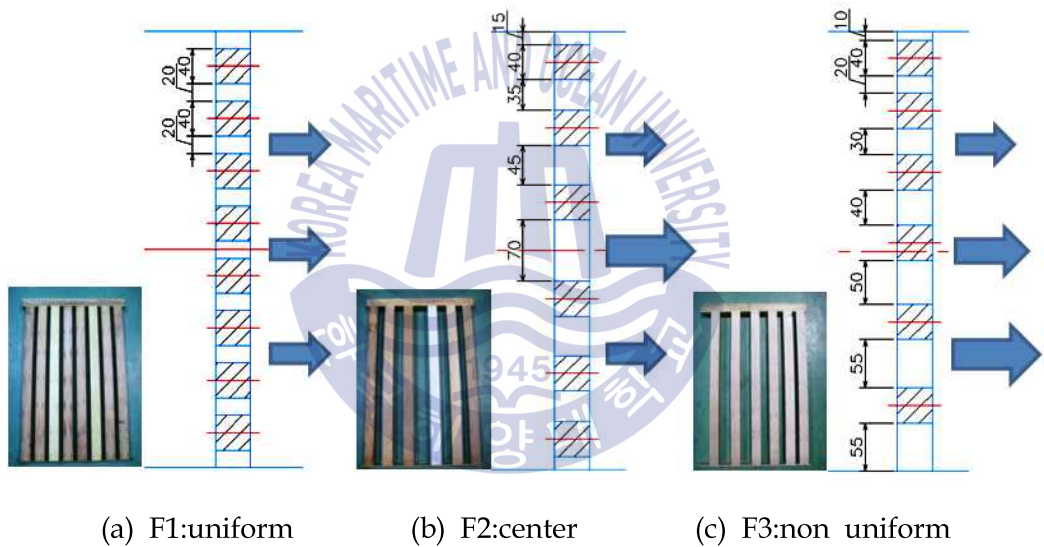


Fig. 3.11 Flow distributor

3.2.5 와류제거장치(Anti-Vortex Device) 부착

Fig. 3.12 (a)는 흡입관 바닥에서 발생하는 와를 제거 AVD로 기존 사각형에서 좀더 부드럽게 유동될 수 있도록 사다리꼴 형태로 제작하였다. (b)는 (a) 보다 더욱 안정된 유입유동을 만들도록 45도의 각도로 제작되었다. (c)는 흡입관 상부의 자유표면에서 발생하는 와를 제거하기 위한 장치이다.

Fig. 3.13은 시험 AVD의 치수도면이다.

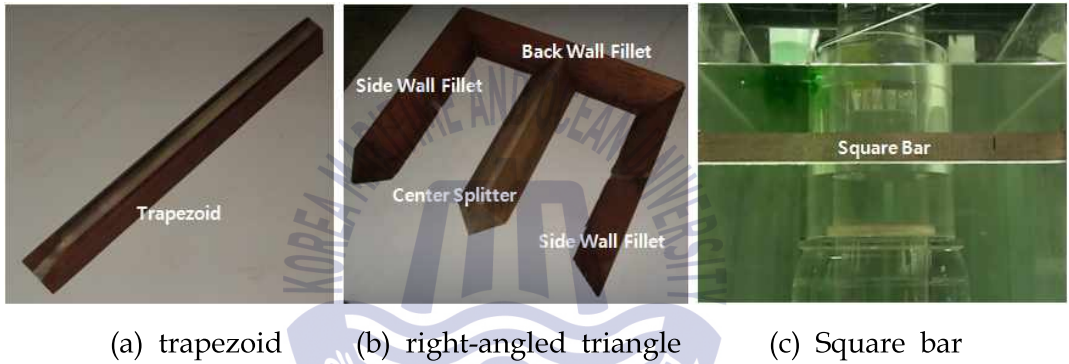
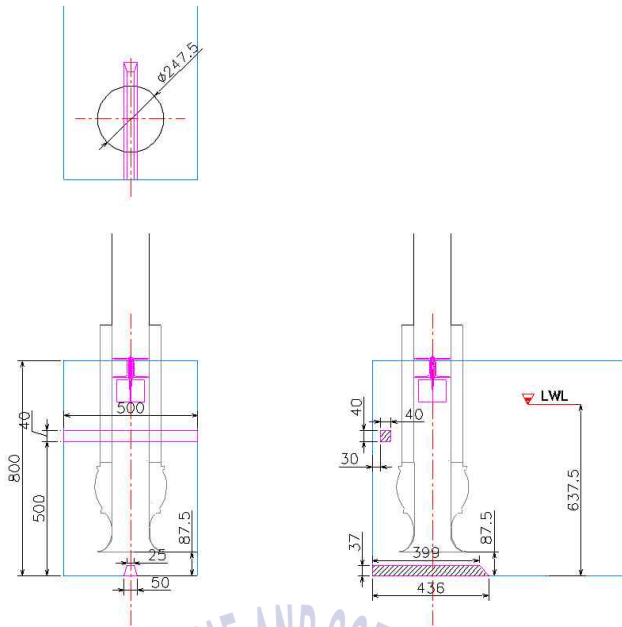
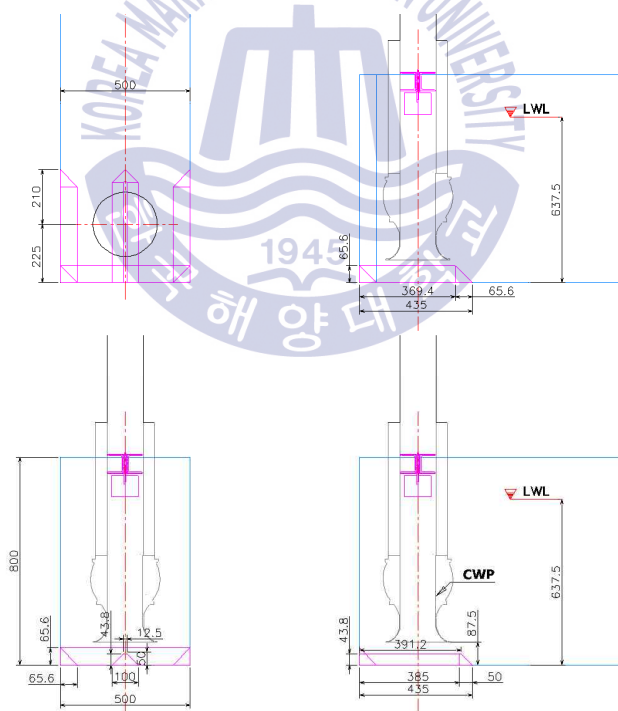


Fig. 3.12 Photos of Anti-Vortex Devices



(a) Trapezoid & square bar



(b) Combination

Fig. 3.13 Drawing of AVDs

3.2.6 실험 케이스 정리

Table 3.3은 각 시험 조건에 따른 약자를 정리한 것이다. 이 약자의 조합으로 시험 조건을 간략하게 정리할 수 있다. Fig. 3.14는 실험케이스의 이름을 설명한 것이다.

Table 3.3 Initials in accordance with the test conditions

| | Conditions | Initial |
|--------------------------------|---|---------|
| Flowrate | rated flowrate(120.0 m ³ /hr) | R |
| | runout flowrate(153.5 m ³ /hr) | M |
| Flow distributor | equivalent flow | F1 |
| | center flow | F2 |
| | one side flow | F3 |
| Vortex breaker | none | NVB |
| | installed | VB |
| Swirl meter | normal (steel) | SM1 |
| | thickness x2, weight x2 (steel) | SM2 |
| | thickness x2, weight x2 (steel) | SM3 |
| Swirl meter installation Point | 4d (560 mm from suction inlet) | 4d |
| | 0.5d (70mm from suction inlet) | 0.5d |
| Anti-vortex device | none | N |
| | trapezoid | T |
| | center splitter | C |
| | side wall fillet | S |
| | back wall fillet | B |
| | square bar | F |

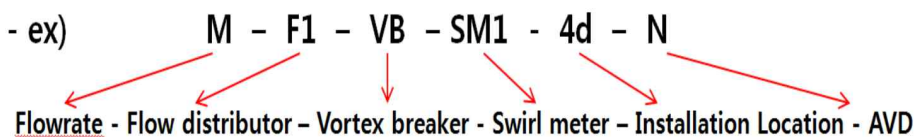


Fig. 3.14 Test case naming

3.3 흡수정 실험결과 및 고찰

3.3.1 보텍스 브레이커 설치 유무에 따른 스월각 비교

Table 3.4는 보텍스 브레이커의 유무에 따른 실험 결과이다. 흐름분배기(F3)를 이용하여 한 쪽으로 치우친 흐름을 강제로 만들어 보텍스 브레이커가 없는 경우 스월각이 18도가 나왔으며, 벨마우스에 보텍스 브레이커를 설치한 후 스월각은 0.9도로 그 결과가 현격이 다르다. 보텍스 브레이커가 설치될 경우 불안정한 유동패턴에서도 스월각이 1도 이하로 나오는데 이는 스월메타를 이용한 흡수정 내의 유동을 파악하는데 영향을 미친다. 보텍스 브레이커가 흡입관 내의 유동을 안정되게 만드는 효과는 있지만 이로 인하여 흡수정의 유동안정을 간가하고 넘어갈 수 있기 때문이다.

Table 3.4 Effect of vortex breaker

| No | Test case | Pump operation (m3/hr) | Flow distributor | Bell mouth | Swirl meter | Anti-vortex device | Vortex type | Swirl meter | |
|----|-----------------------|------------------------|------------------|------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | | | | | rpm (C-CC) | degree(°) |
| 1 | M-F3-VB SM1-4d-N | 153.5 | F3 | VB | SM1-4d | N | FV3 SV2 | 6 (C) | 0.9 |
| 2 | M-F3-NVB -SM1-4d-N | 153.5 | F3 | NVB | SM1-4d | N | FV3 SV3 | 125 (C) | 18.0 |

3.3.2 스웰메타 타입에 따른 스웰각 비교

Table 3.5는 스웰메타 재질, 두께, 무게에 따른 회전수 결과이다. 흐름 분배기(F3)를 이용 스웰각도가 18도가 나오는 상황에서 유량을 20%씩 줄여 그 각도를 관찰하였다. 그 결과를 Fig. 3.15에 그래프로 나타내었다. 유량을 줄였으나 100% 대비 최소인 20%에서 스웰각은 약 10% 줄었다. 스웰각은 유량의 영향에 크게 받지 않았다. 또한, 회전수가 높은 유량대 보다 와 낮은 유량대에 타입에 따라 최대 8%의 오차를 보이고 있다. 이는 미국의 ANSI/HI 9.8에서는 평균 스웰각을 5도 이하로 규정하고 있는데 여기에 스웰메타의 타입에 따른 오차 8%인 0.4도의 오차를 빼 내부 판정 기준을 최대 4.6도 이하로 하면 될 것이다. Fig 3.16은 세 종류의 스웰메타가 흡입관에 부착된 사진이다.

Table 3.5 Data of swirl angle by swirl meter type

| No | Test case | Pump operation (m3/hr) | Flow distributor | Bell mouth | Swirl meter | Anti-vortex device | Vortex type | Swirl meter | |
|----|----------------------------|------------------------|------------------|------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
| | | | | | | | | rpm (C-CC) | Degree(°) |
| 1 | M100-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 125 | 18.3 |
| 2 | M80-F3-NVB -SM1-0.5d- | 153.5 x 0.8 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 103 | 18.8 |
| 3 | M60-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.6 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 74 | 18.1 |
| 4 | M40-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.4 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 47 | 17.3 |
| 5 | M20-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.2 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 22 | 16.2 |
| 6 | M100-F3-NVB -SM2-0.5d-N | 153.5 | F3 | NVB | SM2-0.5d | N | • | 124 | 18.2 |
| 7 | M80-F3-NVB -SM2-0.5d-N | 153.5 x 0.8 | F3 | NVB | SM2-0.5d | N | • | 102 | 18.7 |
| 8 | M60-F3-NVB -SM2-0.5d-N | 153.5 x 0.6 | F3 | NVB | SM2-0.5d | N | • | 72 | 17.6 |
| 9 | M40-F3-NVB -SM2-0.5d-N | 153.5 x 0.4 | F3 | NVB | SM2-0.5d | N | • | 48 | 17.6 |
| 10 | M20-F3-NVB -SM2-0.5d-N | 153.5 x 0.2 | F3 | NVB | SM2-0.5d | N | • | 25 | 18.3 |
| 11 | M100-F3-NVB -SM3-0.5d-N | 153.5 | F3 | NVB | SM3-0.5d | N | • | 128 | 18.7 |
| 12 | M80-F3-NVB -SM3-0.5d-N | 153.5 x 0.8 | F3 | NVB | SM3-0.5d | N | • | 100 | 18.3 |
| 13 | M60-F3-NVB -SM3-0.5d-N | 153.5 x 0.6 | F3 | NVB | SM3-0.5d | N | • | 75 | 18.3 |
| 14 | M40-F3-NVB -SM3-0.5d-N | 153.5 x 0.4 | F3 | NVB | SM3-0.5d | N | • | 44 | 16.2 |
| 15 | M20-F3-NVB -SM3-0.5d-N | 153.5 x 0.2 | F3 | NVB | SM3-0.5d | N | • | 23 | 16.9 |

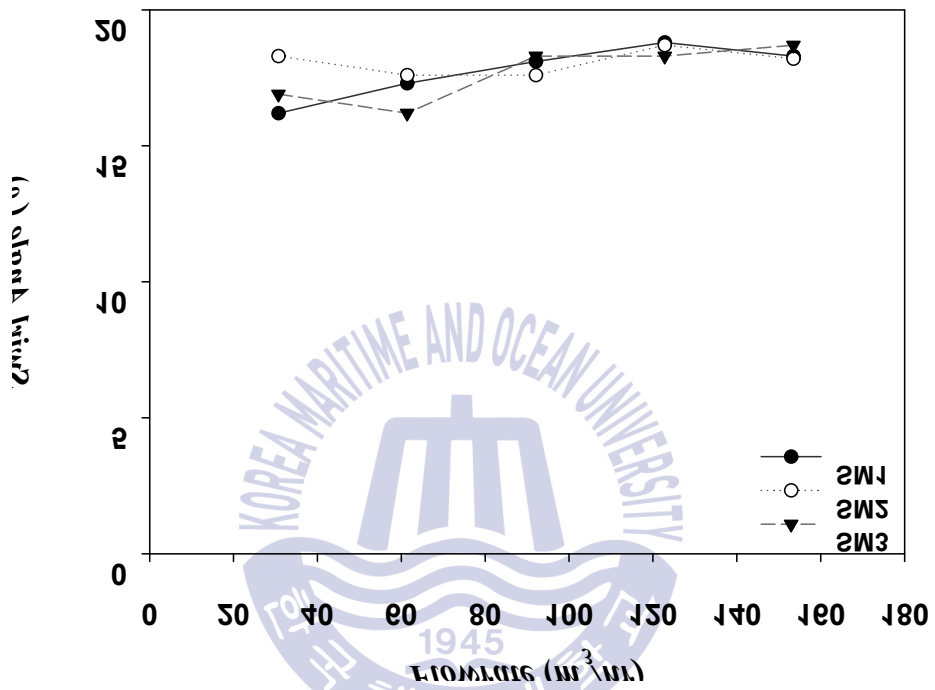
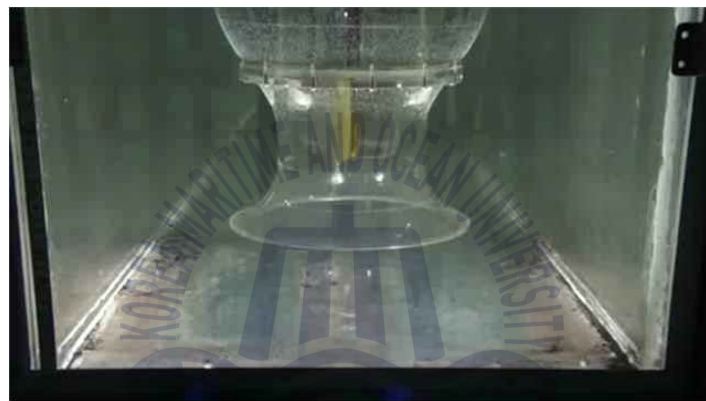


Fig. 3.15 Swirl angle by swirl meter type



(a) SM1



(b) SM2



(c) SM3

Fig. 3.16 Three types of swirl meter

3.3.3 스윙메타 설치 위치에 따른 스윙각 비교

Table. 3.6은 스윙메타 설치에 위치와 유량에 따른 스윙각도 데이터이다. 모든 유량대에서 4d 위치 스윙각이 0.3~1.4도 낮게 나온다. 이 값을 0.5d 위치의 스윙각 회전수에 대해 약 2%~8%의 차이를 보이며 평균 5%이다. 이것은 회전각 기준 5도에 대해 0.25도 오차를 가진다.

Fig. 3.17은 스윙메타의 유량변화에 따른 0.5d와 4d 설치 지점 간의 회전수 그래프이다.

Table. 3.6 Data of swirl angle according to the installation point

| No | Test case | Pump operation (m3/hr) | Flow distributor | Bell mouth | Swirl meter | Anti-vortex device | Vortex type | Swirl meter | |
|----|----------------------------|------------------------|------------------|------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
| | | | | | | | | rpm (C-CC) | degree(°) |
| 1 | M100-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 125 | 18.3 |
| 2 | M80-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.8 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 103 | 18.8 |
| 3 | M60-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.6 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 74 | 18.1 |
| 4 | M40-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.4 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 47 | 17.3 |
| 5 | M20-F3-NVB -SM1-0.5d-N | 153.5 x 0.2 | F3 | NVB | SM1-0.5d | N | • | 22 | 16.2 |
| 6 | M100-F3-NVB -SM1-4d-N | 153.5 | F3 | NVB | SM1- 4d | N | • | 123 | 18.0 |
| 7 | M80-F3-NVB -SM1-4d-N | 153.5 x 0.8 | F3 | NVB | SM1- 4d | N | • | 99 | 18.1 |
| 8 | M60-F3-NVB -SM1-4d-N | 153.5 x 0.6 | F3 | NVB | SM1- 4d | N | • | 70 | 17.2 |
| 9 | M40-F3-NVB -SM1-4d-N | 153.5 x 0.4 | F3 | NVB | SM1- 4d | N | • | 43 | 15.9 |
| 10 | M20-F3-NVB -SM1-4d-N | 153.5 x 0.2 | F3 | NVB | SM1- 4d | N | • | 21 | 15.5 |

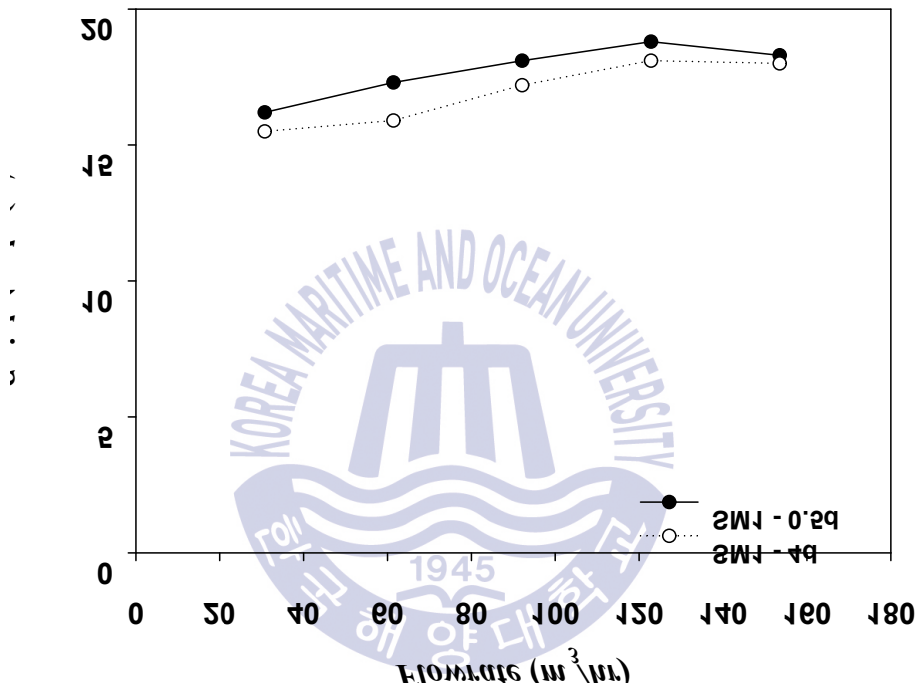


Fig. 3.17 Swirl angle according to the installation point

제 4 장 흡수정 PIV 유동계측과 수치해석

4.1 PIV 유동가시화

4.1.1 PIV 개요

흐르는 유체의 속도 및 압력과 같은 유동특성을 파악하는 것은 유체공학 관련 분야의 제반문제를 해결하기 위하여 필요 불가결한 요소이다. 전통적인 유동가시화(flow visualization)기법은 적절한 조명장치와 추적입자 그리고 이를 기록할 수 있는 카메라를 이용하여 직관적으로 이해하기 쉬운 영상을 제공할 수 있음으로서 어떠한 복잡한 유동장도 쉽게 이해 될 수 있는 장점이 있다. 그러나 정량적인 유동정보, 예를 들어, 시간에 따라 변화하는 전체유동장의 속도벡터 값과 같은 데이터의 제공이 원리적으로 불가능으로서 유체역학적인 엄밀한 해석이 어렵다. 따라서, 실용적인 측면에서도 물리적인 유동정보에 대한 계측이 필요하게 된다. 지금까지 유체계측에 있어서 속도를 얻기 위하여 열선유속계(hot-wire anemometer) 또는 LDV(laser doppler velocimetry)가 사용되어 왔다. 이러한 점계측(pointwise) 속도측정기법은 신뢰성과 정도면에서 우수한 성능이 입증되었으나 시간평균의 값만을 제공하며, 트레이싱에 필요한 과도한 계측시간 등의 문제점 때문에 유동현상의 기본특성인 비정상(unsteady)의 동시다점계측(instantaneous & simultaneous)이 원리적으로 불가능하다.

이러한 배경에서 종래의 정성적인 가시화기법과 디지털 영상처리기술을 새로이 접목한 PIV(particle image velocimetry)가 속도계측의 새로운 실험기법으로서 1980년대 초반부터 본격적으로 소개가 되었으며 최근에는 전산유체역학(CFD)의 장점을 능가하는 유동장의 대표적인 계측기법으로서 크게 각광을 받고 있다.

PIV의 기본원리는 다음과 같다. 즉, 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 미소추적입자가 미소시간동안 이동한 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 쉽게 구할 수 있다. 유동장에 유체와 동일한 비중을 갖는 추적입자(tracer particle)을 분포시키고 이들 입자의 순간분포를 미소시간차를 가진 두 영상에서 공간대응 시키는 방법(예를 들어, 상호상관기법)에 의하여 속도벡터를 동시다점으로 구할 수 있다. 따라서 원리적으로는 2차원뿐만 아니라 3차원으로도 용이하게 확장이 가능하며, 최근에는 Stereoscopic PIV, Volume 3차원PIV 등의 3차원 속도장 측정방법이 개발되어 유동해석 연구에 널리 활용되고 있다. 따라서 PIV기법은 LDV 등이 갖는 점계측의 한계를 근본적으로 해결할 수 있으며, 고성능 PC 및 고해상도 CCD카메라, 고속도카메라와 같은 영상입력장치와 신뢰성있는 데이터처리 소프트웨어의 발전에 힘입어 속도계측장비로서 독보적인 지위를 유지하고 있다. 현재에는 dynamic PIV로 알려진 시간해상도(time-resolved) PIV가 널리 이용되고 있으며, 이 경우에는 고해상도(1K x1K), 고속도카메라(500-2000 fps at full frame)가 사용되고 있다. Dynamic PIV에서는 post-processing기법으로서 속도벡터 분포와 같은 기본정보뿐만 아니라 유동정보의 애니메이션까지 용이하게 제작할 수 있는 전용 소프트웨어의 지원이 필수적이다.

4.1.2 PIV 실험장치의 구성

Fig. 4.1은 본 흡수정 PIV실험의 장치 사진을 나타내고 있다. 수조는 내부의 유동장을 가시화하기에 적합한 투명아크릴로 제작되었다. AVD 등 계측대상이 되는 부품은 레이저 시트가 통과 할수 있게 부분 아크릴로 만들어 졌다.

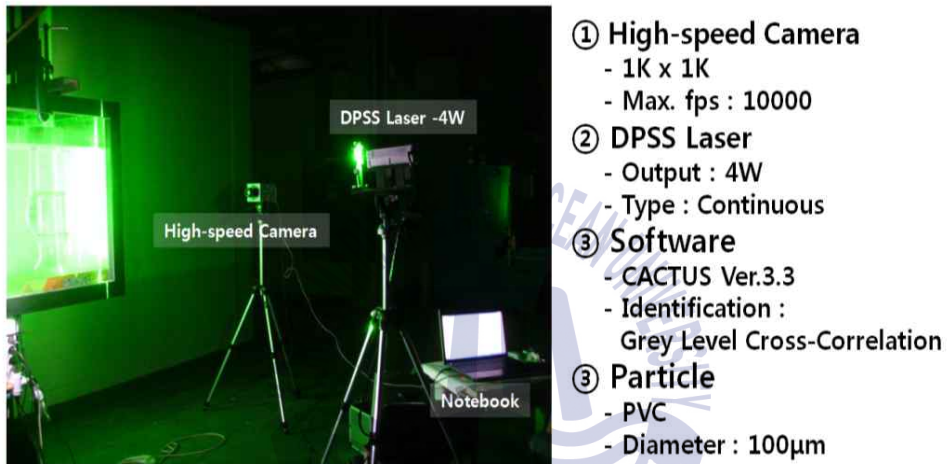


Fig. 4.1 Arrangement of PIV experiment

4.1.3 조명 및 추적입자

영상 처리를 하기 위해서는 측정하고자 하는 계측단면에 대하여 적절한 조명의 공급이 절대적으로 필요하다. 이러한 조명은 유동장에 투입된 추적입자의 표면 산란광 영상이 주위의 배경영상보다 높은 계조치(gray level)을 갖게 하여 명암대비가 뚜렷하고 잡음이 없는 영상을 획득하는데 크게 기여한다. 특히 고속 유동장에서 깨끗한 영상을 획득하기 위해서는 일반적으로 높은 출력의 광원이 필요하게 된다. 본 실험에서는 이를 위하여 최대 4W출력의 DPSS레이저를 이용하며 녹색광을 발생시킨다. 레이저에서 발생하는 광선은 보통 지름 2mm의 원형 직진광이며 실린드리컬 렌즈를 통해 두께 2mm정도의 2차원 시트라이트(sheet light)가 만들어진다.

PIV는 유동장에 골고루 분포된 추적입자가 미소시간동안 이동한 입자영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터 데이터를 얻는 방법이므로 사용되는 입자의 선정이 계측정도에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 추적입자는 표면에서의 산란성이 좋아야 하고 입자와 작동유체와의 밀도차가 될 수 있으면 작아서 추종성(traceability)이 우수하여야 한다. 입자의 직경은 유체의 유동에 잘 추종하기 위해서 작을수록 좋으나, 산란에 의한 입자 영상을 카메라에서 잘 취득할 수 있도록 어느 정도 이상의 크기를 가져야 한다. 보통 공기에서는 수 μm ~수십 μm 의 크기가 보통이다. 물과 같은 액체에서는 크기의 제약이 덜하여 수십 μm ~수백 μm 의 입자가 사용된다. 본 과제에서는 물과 비중이 비슷하며(평균비중 1.02) 평균직경이 100 μm 인 구형의 PVC 입자를 추적입자로 사용하였다.

4.1.4 영상입력 및 저장장치

영상입력장치로 1024(H)× 1024(V)의 고해상도를 가지는 디지털고속도카메라 (Photron Fastcam SA3)를 사용하였다. 일반적인 CCD카메라나 가정용 캠코더 등은 frame rate가 30장/초로 고정되어 있어 이와 같은 입력장비로는 보통 0.5m/sec이상의 속도계측이 어렵고 유동장의 비정상(unsteady) 특성을 확보할 수 있는 연속촬영이 곤란하여 시계열적인 유동현상 해석이 문제가 된다. 이를 해결하기 위하여 고속도카메라가 널리 이용된다. 1000fps 정도의 카메라를 사용하면 십수m/s 정도의 유동장을 연속적으로 저장할 수 있다. 다수의 연속영상을 고속 촬영할 수 있으므로 dynamic PIV 적용 및 animation제작에 적합하다. 최대 초당 7,500frame 을 기록할 수 있고 이때 부분해상도(segment frame)가 256x256pixel 정도이다. 이 같은 영상은 유동장의 극히 일부분만을 계측할 수밖에 없으므로 일반적인 유동장 해석용으로는 부적합하다. 본 카메라는 full frame에서 1000fps 이다.



4.1.5 동일입자 추적

PIV 해석을 위해서는 먼저 입자가 주입된 유동장을 레이저조명을 이용하여 가시화한다. 다음, 이들 개별 입자 또는 입자군의 이동이 직선적으로 이루어질 수 있는 미소시간 간격을 하드웨어(보통 고속도카메라의 초당 영상 프레임 저장 옵션에서 미리 설정하고 카메라를 이용하여 연속적으로 메모리에 기록한다. 그리고, 동일한 시간간격을 갖는 두장의 영상을 1조로 하여 시간적인 순서로 입자의 이동변위를 소프트웨어상에서 자동적으로 추적함으로써 속도벡터를 구한다.

최근에는 이와 같은 광학적 PIV 기법은 거의 이용되지 않고 있으며, 획득된 영상의 밝기정보(계조치)를 디지털화한 후 조사면적에 대한 상관계수를 직접 컴퓨터상에서 연산함으로써 속도장을 구하는 방식이 PIV 기법의 주류를 이루고 있으며 본 실험에서도 이를 이용한다.

Fig. 4.2는 계조치 상호상관법의 원리를 설명하기 위한 것이다. 입자의 계조치의 분포특성을 비교하여 벡터의 종점을 구하는 방법으로 미소시간동안 유동장의 입자영상의 계조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하면 제1프레임에서의 상관영역내의 계조치분포와 미소시간 후의 제2프레임에서의 계조치분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수값을 구하여 비교하면 그중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로 간주할 수 있게 된다. 컴퓨터상에서 이와 같은 계산을 빠른 속도로 행할 수 있다.

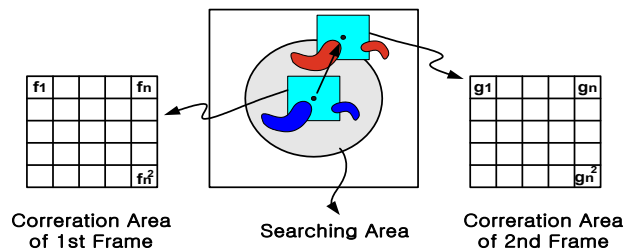


Fig. 4.2 Grey level cross correlation method

4.2 수치해석 개요

본 연구에서는 범용 상용 코드인 ANSYS CFX 13^[48]을 사용하였다. 일반적으로 범용의 상용코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLER, Rhie and Chow 방법과 같은 압력에 기초한 방정식으로부터 만들어져 있다. 이들 압력에 기초한 코드들은 다양한 물리적 모델들과 경계조건을 제공하고 다른 CAE 도구들과 연동을 포함하는 복잡한 "multi-physics" 문제 등에 적용될 수 있다. ANSYS CFX는 압력기반 유한 체적법(finite volume method)을 완전 내재적(fully implicit)로 이산화하여 얻어지는 방정식을 대수다중격자법(algebraic multigrid coupled solver)를 이용하여 해석한다. SIMPLE등과 같은 분리 접근방법에 비해 내재적 연결방법(implicit coupling)은 수렴을 가속시키고, 압축성 유동에 있어서 수렴성의 난점을 피할 수 있다. 또한 높은 종횡비의 격자를 다룰 수 있기 때문에 필수적인 기법이다.

4.2.1 지배방정식

일반적인 유동에서 다루는 운동방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이며, 식 4.1, 식 4.2, 식 4.3과 같이 표현된다.⁴⁵

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

여기서, $V_x, V_y, V_z = x, y, z$ 방향의 속도벡터요소, ρ =밀도, t =시간을 나타낸다.

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4.2)$$

여기서, τ_{ij} =응력텐서, u_i =직교속도, μ =점성계수, λ =체적점성계수를 나타

낸다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z C_p T_o) \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T_o}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T_o}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) + W^v + E^k + Q_v + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

여기서, C_p = 비열, T_o = 전온도, K = 열전도율, W^v = 점성일항,

E^k = 운동에너지, Q_v = 체적열원, Φ = 점성발열항을 나타낸다.

난류유동은 와점성(eddy viscosity)이 추가되고 방정식은 레이놀즈 평균 물리량에 대해 쓴다. 방정식의 일반적인 형태는 동일하다.



4.2.2 이산화방법

그림 4.3에 나타낸 순서도는 일반적인 해석순서를 나타낸다. 순서도에 나타난 각 방정식의 해는 수치적으로 두 가지의 지배적인 다음의 과정을 통해 구해진다.

1. 비선형 방정식의 선형화와 행렬 구성
2. 대수다중격자법을 이용한 선형방정식의 풀이

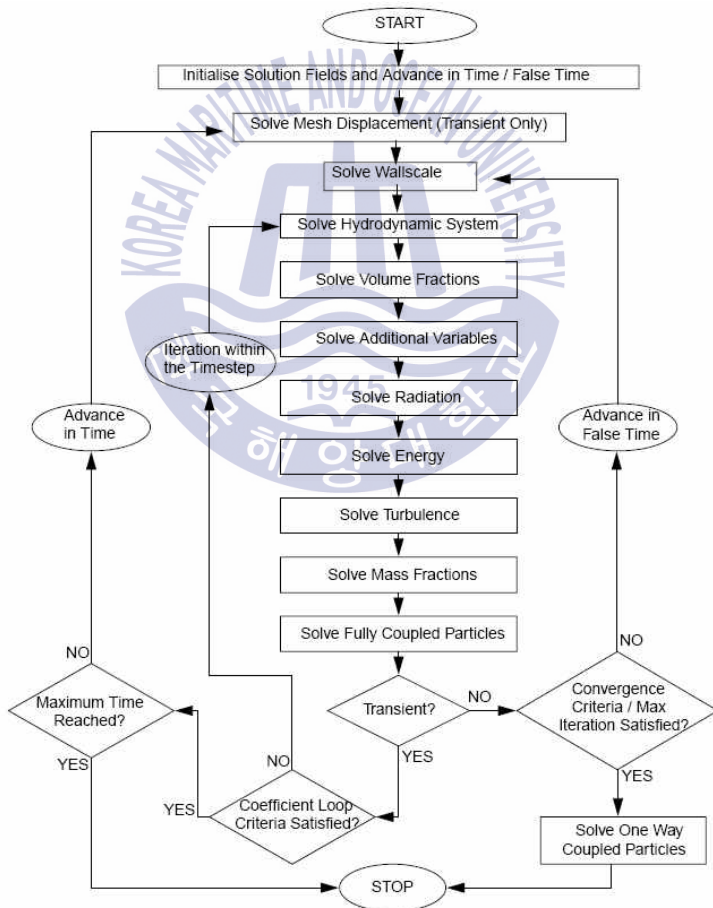


Fig. 4.3 General process of computational fluid dynamic

CFX는 이산화된 선형 방정식 시스템을 풀기 위해 multigrid accelerated Incomplete Lower Upper (ILU) 분해 기술을 사용한다. 이 방법은 반복계산 방법으로써 일련의 반복계산을 통해 정확한 해에 도달하는 방법이다. 이산화된 방정식의 선형화된 시스템은 일반적으로 식 4.4와 같이 행렬의 형태로 표현할 수 있다.

$$[A][\phi] = [b] \quad (4.4)$$

여기서 $[A]$ 는 계수 행렬, $[\phi]$ 는 해 벡터, $[b]$ 는 우변항을 나타낸다.

위 방정식은 근사해 $f(n)$ 에서 시작하여, $f(n)$ 을 이용한 수정과정을 통해 더 나은 해인 $f(n+1)$ 를 구하는 일련의 반복과정을 통해 풀 수 있다.

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \quad (4.5)$$

여기서 $f(n)$ 은 다음 식으로부터 구해진다.

$$A\phi' = r^n \quad (4.6)$$

여기서 r^n 은 오차값이며, 식 4.7과 같이 정의된다.

$$r^n = b - A\phi^n \quad (4.7)$$

이와 같은 과정을 반복적으로 적용하면 원하는 정확도의 해를 구할 수 있다. 근본적으로, ILU와 같은 반복 해법은 격자수의 증가와 중형비의 증가에 따라 성능이 감소하는 경향이 있다. 그러나, 다중격자(multigrid) 기법을 적용함으로써 이 기법의 성능을 상당히 향상시킬 수 있다. 많은 반전도치법의 수렴성은 다중격자기법을 사용함으로써 향상시킬 수 있다. 다중격자기법은 조밀격자(fine mesh)에서 초기계산을 수행하고 점진적으로 가상의 성긴격자(coarse mesh)에서 반복계산을 수행한 후, 최종결과를 원래의 조밀격자로 전달하는 방법이다. 수치해석적 관점에서 볼 때, 다중격자기법은 상당한 장점이 있다. 주어진 격자 크기에 대해서, 반복계산법은 단지 격자 간격 order의 파장길이를 갖는 오차를 감소시켜주는 데 있어서만 효율적이다. 따라서, 보다 짧은 파장 오차는 아주 빠르게 감소하는 반면에, 해석영역크기의 차수를 갖는 오차를 사라지게 하기 위해서는 상당히 긴 시간이 필요하다. 다중격자기법은 이 문제를 격자 간격보

다 더 긴 파장 오차가 보다 짧은 파장길이처럼 나타나도록 일련의 성긴격자들을 사용함으로써 우회적으로 해결한다. 서로 다른 격자 간격을 사용하여 격자를 생성할 필요를 없애기 위해, CFX-5는 대수 다중격자기법을 사용한다. 대수 다중격자(Algebraic multigrid)는 조밀격자 방정식의 합을 이용해 성긴격자에서의 이산화방정식을 구성한다. 따라서, 반복계산과정 동안 격자간격의 가상 조대화(virtual coarsening)과 정확한 해를 얻기 위한 격자 재개선(mesh re-refining)이 일어난다. 이 기법은 수렴성을 현저하게 향상시켜 주며, 비선형 방정식의 이산화가 단지 가장 조밀한 격자에 대해 한번만 수행되기 때문에 다른 다중격자기법보다 경제적이라는 장점이 있다. CFX는 부가 교정(additive correction)이라고 불리는 다중격자의 독특한 방법을 사용한다. 이 방법은 이산화 방정식이 제어 체적에 걸친 보존량의 균형을 나타낸다는 장점을 가지고 있으므로, CFX-Solver와 이상적으로 결합된다. 성긴격자 방정식은 아래에 보여진 것처럼 더 큰 제어체적에서 원래의 제어체적을 합침으로써 만들 수 있다. 그림 4.2는 일정한 크기의 성긴격자가 합쳐지는 것을 나타내고 있지만 일반적으로, 그 모양은 매우 불규칙하다. 따라서, 성긴격자 방정식들은 큰 체적에 대해 보존 요건들을 부과합니다. 그럼으로써 긴파장의 오차 성분을 줄일 수 있다.

CFX는 내재 압력 기반(implicit pressure based) 방법을 사용하며, 여기서 사용되는 주요 독립변수들은 (P, u_i, H) 이다. 일반적으로 범용 상용코드는 위의 변수에 대해 해석을 수행하며, 이는 현장에서 일반적으로 부딪히는 비압축성 유동의 해석이 용이하기 때문이다.

Fig. 4.4에서 실선으로 나타난 것은 일반적으로 알려져 있는 격자이다. 실선으로 나타난 격자를 다시 나누어 점선으로 표현된 하위요소(sub-element)를 구성하며 제어체적은 음영으로 나타난 부분과 같이 노드(node)를 둘러싼 하위요소들로 구성되며, hexa, tetra, wedge, pyrimd 등 모든 요소(element) 형태에 대하여 동일하게 적용된다. 모든 변수 값과 유체의 물성치는 이 노드에 저장된다.

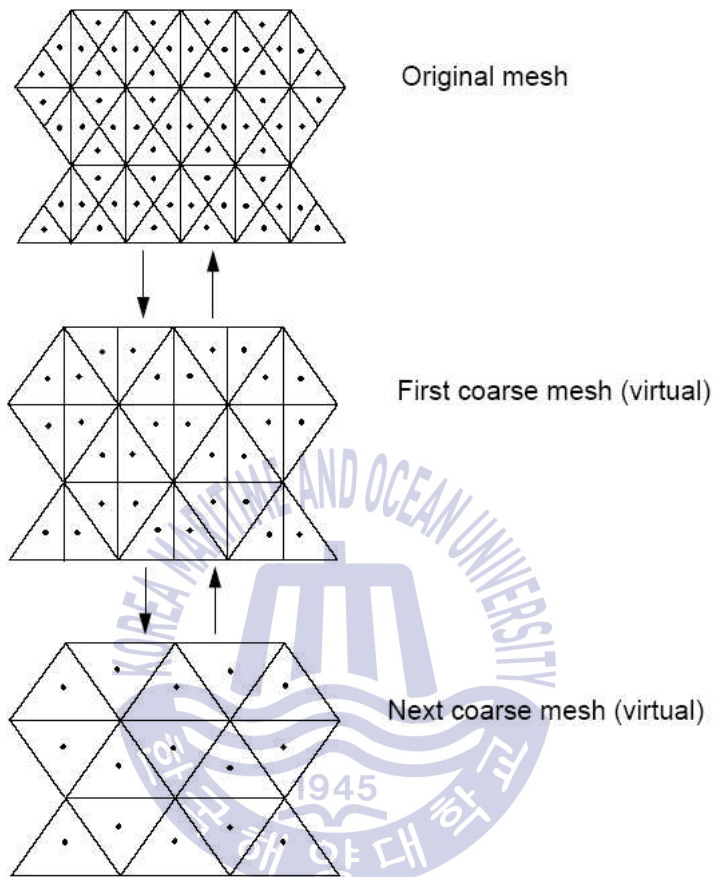


Fig. 4.4 Multigrid method process

수치해석의 정확도는 노드 값으로 표현되는 적분점(IP)들에서의 표면적분(fluxes) 값들의 정확도에 의해 결정된다. 계산을 통해 얻어진 해는 격자 노드에 저장되지만, 방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등의 다양한 항들은 적분점에서의 해나 해의 구배 값을 필요로 하며 따라서, 요소 내부에서의 해의 변화를 계산하기 위해 유한요소형상함수(finite element shape function)가 사용된다. 이러한 방식을 FEM based FVM 혹은 element based FVM이라 한다. Fig. 4.5과 같이 제어 체적면에서의 적분점의 개수가 2차원인 경우 일반적인 FVM의 4개에 비해 8개로 2배가 많은 것을 알 수 있다. 3D 육면체 격자의 경우 6개에서 24개로, 사면체의 경우 4개에서 평균 60개로 적분 점이 많아지므로 비교적 성긴 격자에 대해서도 해의 정확도가 뛰어난 장점이 있다.

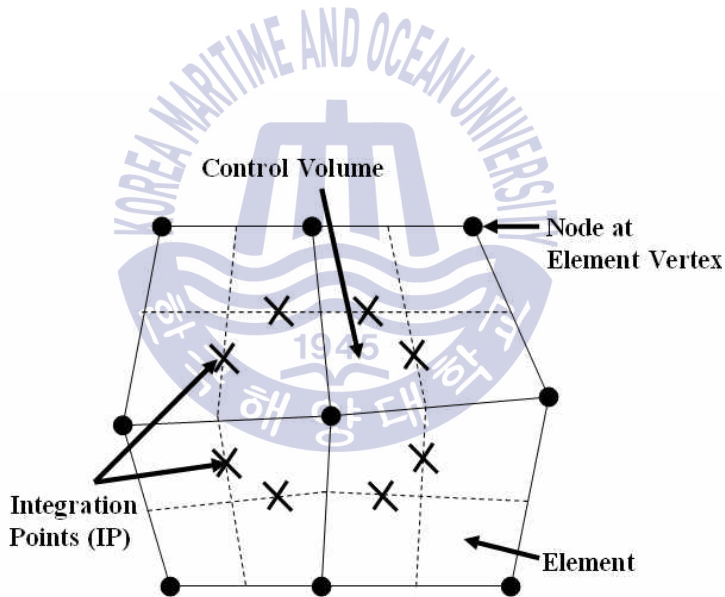


Fig. 4.5 Mesh arrangement and terminology for dual mesh

식 4.1, 식 4.2, 식 4.3의 방정식들을 제어체적에 걸쳐 적분함으로써 질량, 운동량, 그리고 에너지 방정식에 대한 이산화 적분식은 식 4.8, 식 4.9, 식 4.10과 같다.

$$\rho V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (4.8)$$

$$\rho V \left(\frac{U_i - U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} (\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_u} V \quad (4.9)$$

$$\rho V \left(\frac{(H - P/\rho) - (H^0 - P^0/\rho)}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} H_{ip} = \sum_{ip} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_\phi} V \quad (4.10)$$

여기서, $(\Delta n_j)_{ip}$ 는 적분점 위치에서 국부 표면 벡터이다. 그리고, 제한체적의 적분점 표면을 통과하는 m_{ip} 는 질량유동이다. 모든 방정식들은 시간간격의 제한을 피하기 위하여 implicit하게 다루어지며, 비정상 항에는 1차와 2차 backward Euler 방정식이 사용된다. 확산항은 요소형상함수(element shape function)의 미분형태로 각 적분점의 위치에서 구배계수를 계산함으로써 결정된다. 대류항은 Upwind, Quick 등 몇몇 기법에 의해 평가될 수 있으나, 기본 설정된 기법인 고해상도(high-resolution) 기법을 사용한다. 고해상도 기법은 대류항에 대한 2차 정확도의 upwind biased approach에 기초한 기법이며 Barth와 Jespersen에 의해 기술된 방법과 유사하다.

$$\phi_{ip} = \phi_P + \underline{\beta(\Delta \phi)_{ip}} \overline{\Delta r_{ip}} \quad (4.11)$$

식 4.12와 같이 divergence 형태에서 모든 항들에 대해 질량 divergence 항은 표면적분의 형태로 변환된다.

$$m_{ip} = \rho_{ip} u_{j,ip} \Delta n_{j,ip} \quad (4.12)$$

밀도는 다른 대류 항처럼 표준 고해상도 기술을 적용하여 식 4.13과 같이

계산된다.

$$\rho_{ip} = \rho_P + \beta(\Delta\rho)_{ip} \Delta \overline{r_{ip}} \quad (4.13)$$

이 upwind biased 평가는 운동량과 에너지 방정식의 다른 대류량과 마찬가지로 유동이 상당히 압축성이어도 안정적이며, 2차의 정확도를 가진다. Implicit 방법에서 중요한 것은 ρu 의 선형화이다. 먼저 ρu 는 Newton-Raphson 선형화에 의해 확정된다.

$$(\rho u) \approx \rho^n u^0 + \rho^0 u^n - \rho^0 u^0 \quad (4.14)$$

여기서 위첨자 n 은 새로운 값 (implicit)을 의미하고 0은 예전 (지연된 값) 시간레벨이다. 이러한 선형화는 전 영역에 걸친 마하수의 신뢰성 있는 수렴을 보장한다.

마지막으로, 식 4.15와 같이 밀도에 대한 상태방정식은 압력의 향으로 구성된 ρ^n 의 implicit 표현을 얻기 위하여 차분되며 앞서 제공된 상태방정식에서 미분항 $\frac{\partial \rho}{\partial P}$ 를 계산한다.

$$\rho^n = \rho^0 + \frac{\partial \rho}{\partial P} (P^n - P^0) \quad (4.15)$$

4.2.3 난류모델

난류 모델은 평균성분과 변동성분을 도입하여 수정된 수송 방정식 (transport equation)의 해를 구하기 위한 수단이다. 예를 들어, 속도 U 는 평균 성분 \bar{U} 와 시간에 따른 변동성분 u 로 나눌 수 있다.

$$U = \bar{U} + u \quad (4.16)$$

$$\text{여기서, } \bar{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U dt \quad (4.17)$$

Δt 는 난류의 변동 scale보다 상대적으로 큰 시간 scale이지만, 방정식을 푸는 전체 시간보다는 작은 시간 scale이다. 원래의 수송방정식에 시간 평균된 물리량을 대입하면 식 4.18, 식 4.19, 식 4.20과 같은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot (\tau - \overline{\rho u \otimes u}) + S_M \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot (I \nabla \phi - \overline{\rho u \phi}) + S_E \quad (4.20)$$

여기서 τ 는 분자 응력 텐서 (molecular stress tensor)이다.

연속방정식은 변화가 없으나, 운동량과 스칼라 수송방정식은 레이놀즈 응력 항인 $\overline{\rho u \otimes u}$, 그리고 레이놀즈 유속, $\overline{\rho u \phi}$ 등, 분자 확산 유속에 난류 유속항을 더한 항을 포함하고 있다. 이들 항은 비 평균화 방정식의 비선형 대류항으로부터 나타난다. 이 항들은 turbulent velocity fluctuation에 의한 대류는 molecular level에서의 thermal fluctuation에 의해 야기되는 혼합보다 더 크다는 사실을 나타낸다. 고 레이놀즈수에서, turbulent velocity fluctuation은 thermal fluctuation의 평균자유경로 (mean free path)보다 훨씬 큰 길이 스케일을 갖는다. 따라서, 난류 유속은 분자 유속보다 훨씬 크게 된다. Reynolds

Averaged Energy 방정식은 식 4.21과 같다.

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot} + \overline{\rho u h} - \lambda \nabla T) = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4.21)$$

여기서 평균된 전체 엔탈피는 식 4.22와 같이 주어진다.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \quad (4.22)$$

전엔탈피(total enthalpy)는 평균운동에너지 (mean kinetic energy)와 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)를 포함한다. 여기서 난류운동에너지는 식 4.23과 같이 정의된다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u^2} \quad (4.23)$$

k 는 난류 운동 에너지이고 속도 변동의 분산으로 정의되고, 차원은 ($L^2 T^{-2}$)이며, 단위는 m^2/s^2 이다. ε 은 난류 소산율(turbulence eddy dissipation)이고 단위시간당 k 의 차원을 갖는다. 즉, ($L^2 T^{-3}$), m^2/s^3 이다. $k-\varepsilon$ 모델은 기본 방정식에 2개의 변수가 추가된다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4.24)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla \rho' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (4.25)$$

여기서 B 는 body force의 합이고, μ_{eff} 는 난류를 고려한 유효 점성이다. 그리고, p' 은 식 4.26과 같이 표현되는 수정된 압력항이다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (4.26)$$

Zero-방정식 모델과 같이, $k-\epsilon$ 모델은 와점성 개념에 기초한다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4.27)$$

여기서 μ_t 는 난류 점성이다. $k-\epsilon$ 모델은 난류 점성을 난류 운동에너지와 소산율을 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.28)$$

여기서 C_μ 는 상수이다.

k 와 ϵ 은 난류 운동에너지와 난류 소산율에 대한 식 4.29, 식 4.30의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (4.30)$$

여기서 $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k 는 모델상수이다. P_k 는 점성과 부력에 따른 난류생성항이며, 식 4.31과 같이 표현된다.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \Delta U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_k \quad (4.31)$$

비압축성 유동에 대해, $\nabla \cdot U$ 는 작고 오른쪽 두 번째항은 생성에 크게 기여하지 않는다. 압축성 유동의 경우 $\nabla \cdot U$ 는 shock이 발생하는 구역에서만 큰 값을 갖는다. $3\mu_t$ 항은 "frozen stress"가정에 기초한다. 이 값은 k 와 ϵ 값이 shock을 지나면서 매우 크게 변하는 현상을 막아준다.

수중 보텍스 수치해석을 위한 난류모델은 Menter[56]의 $k-\omega$ SST 난류 모델을 적용하였다. 일반적으로 Wilcox model의 단점으로 자유유선에 민감한 결과를 보이는 것을 들 수 있는데 CFX에서는 이러한 단점을 보완하여 벽면근처

에서는 $k-\omega$ 모델을 사용하고 바깥쪽은 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하는 BSL(Baseline Model)과 SST(Shear Stress Transport) 모델을 지원한다. ω 모델의 또 다른 장점은 쉽게 자동처리 벽 처리법(automatic wall treatment)로 확장이 가능하다는 것이다. 이는 가능한 격자의 y^+ 에 무관하게 해의 정확성을 확보하기 위한 것이다. 표준 viscous sub-layer model 들이 벽면 전단응력을 정확히 해석하기 위해 $y^+ \approx 1$ 의 수준을 요구하는 반면자동벽면처리 기법은 성긴 벽면 격자를 처리 할 수 있는 장점이 있다. $k-\omega$ SST 모델은 난류전단응력의 수송(transport)을 계산하기 때문에 역 압력구배에 의해 발생하는 유동박리 크기와 발생 시점을 정확히 예측할 수 있다. Wilcox 모델과 $k-\varepsilon$ 모델의 장점만을 취해 BSL 모델이 개발되었으나, 매끄러운 표면에 발생하는 유동박리 시점 및 크기에 대한 정확한 예측에 실패하였다. 이러한 원인에 대한 상세한 내용은 Menter의 연구결과에 상세히 기술되어 있다. 가장 주된 원인으로서는 이전의 난류모델들은 모두 난류전단응력의 수송에 대한 고려를 하지 않았기 때문이며, 그 결과 eddy-viscosity에 대한 과다 예측을 하였다. 수송항은 식 4.32와 같이 eddy-viscosity 형태의 방정식에 대한 제한으로 얻어질 수 있다.

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (4.32)$$

여기서, $v_t = \mu_t / \rho$, F_2 =blending function, S=strain rate

Blending function은 난류모델의 성공을 위해 매우 중요한 요소이다. 이 방정식의 형태는 표면과의 가장 가까운 거리와 유동변수를 기반으로 한다.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (4.33)$$

$$\arg_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{kw} \sigma_{\omega 2} y^2} \right) \quad (4.34)$$

여기서, y 는 벽면으로부터 가장 가까운 곳까지의 거리를 의미한다. ν 는 동점성계수이다.

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}\omega}\nabla k\nabla\omega, 1.0\times 10^{-10}\right) \quad (4.35)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (4.36)$$

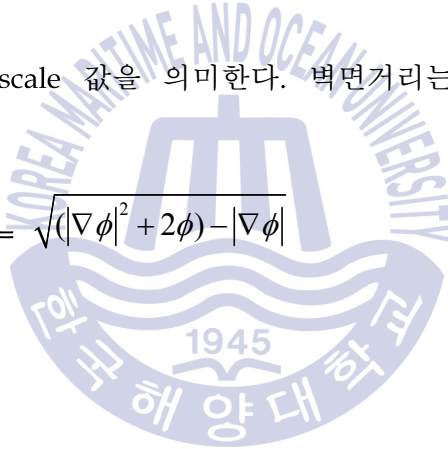
$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta'\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \quad (4.37)$$

SST 모델이나 BSL 모델은 $k-\varepsilon$ 과 $k-\omega$ 사이의 blending을 위해 벽면과 가장 가까운 거리에 위치한 노드의 거리정보를 필요로 한다. Wall scale 방정식은 식 4.38과 같은 단순한 형태의 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\nabla^2\phi = -1 \quad (4.38)$$

여기서, ϕ 는 wall scale 값을 의미한다. 벽면거리는 식 4.39에 의해 wall scale로부터 계산된다.

$$\text{Wall Distance} = \sqrt{(|\nabla\phi|^2 + 2\phi) - |\nabla\phi|} \quad (4.39)$$



4.3 PIV 계측

4.3.1 흐름분배기 유동특성

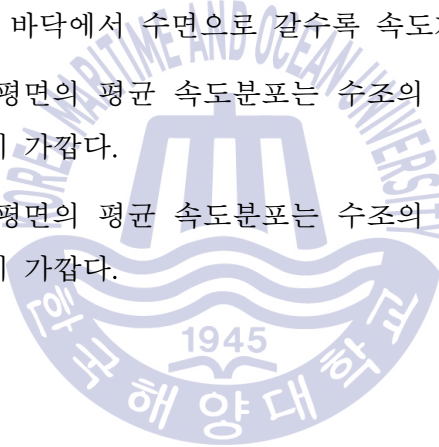
실제 펌프장은 여러 개로 구성 되고, 여러 조합으로 운전한다. 조합에 따라 각 펌프장의 유동특성은 달라진다. 본 연구에 사용된 펌프장은 단일 채널로 길이 길게 제작되어 안정적인 유동패턴을 가짐에 따라 흐름분배기(F3)에 의해 비대칭 흐름을 가지게 하였다.

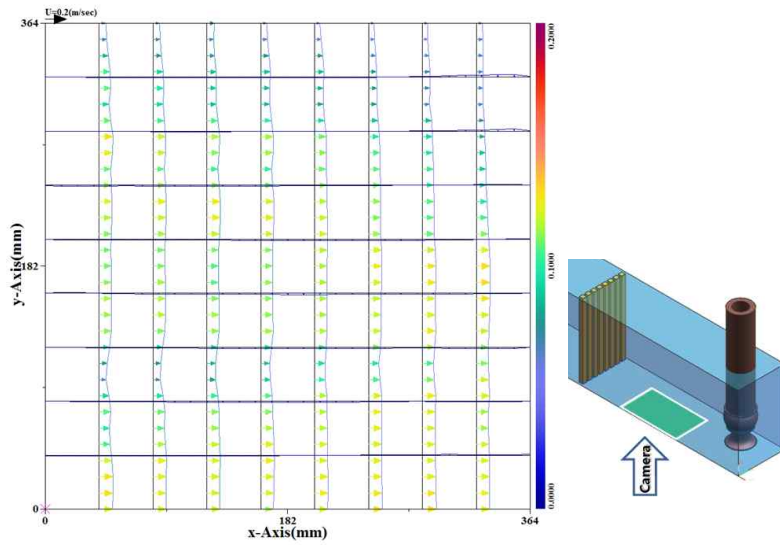
Fig. 4.6, Fig. 4.7, Fig. 4.8은 각 흐름분배기 후단의 수평면과 수직면의 속도 벡터이다.

흐름분배기 F1은 수평면의 평균 속도분포는 0.1 m/s이고, 수직면의 평균 속도분포는 0.1 m/s이며 바닥에서 수면으로 갈수록 속도가 줄어든다.

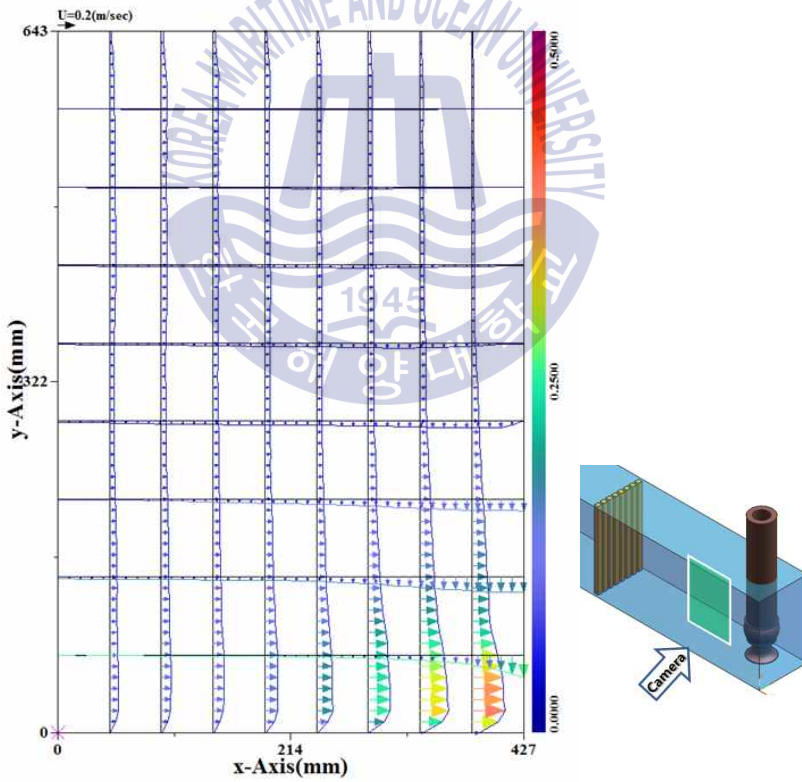
흐름분배기 F2은 수평면의 평균 속도분포는 수조의 한쪽은 최대 0.2 m/s이고, 다른 쪽은 0 m/s에 가깝다.

흐름분배기 F3은 수평면의 평균 속도분포는 수조의 한쪽은 최대 0.2 m/s이고, 다른 쪽은 0 m/s에 가깝다.



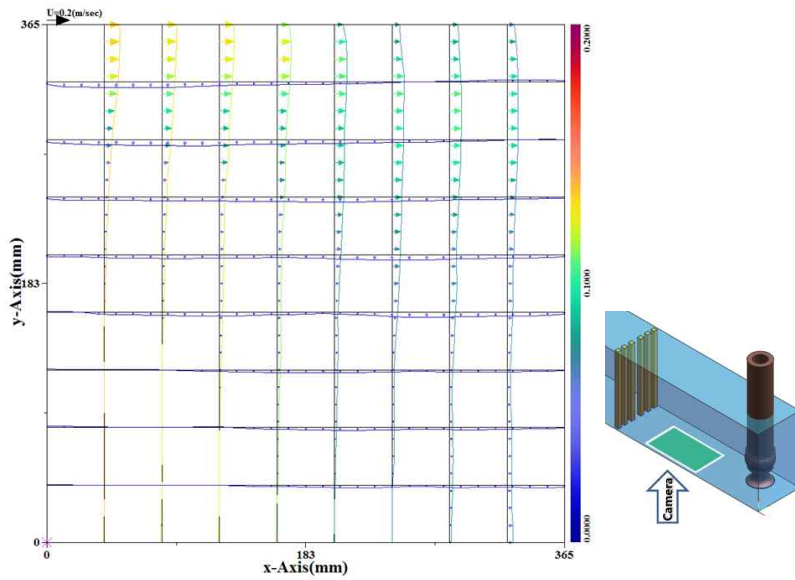


(a) Horizontal plane (max.:0.12m/s, min.:0.08m/s)

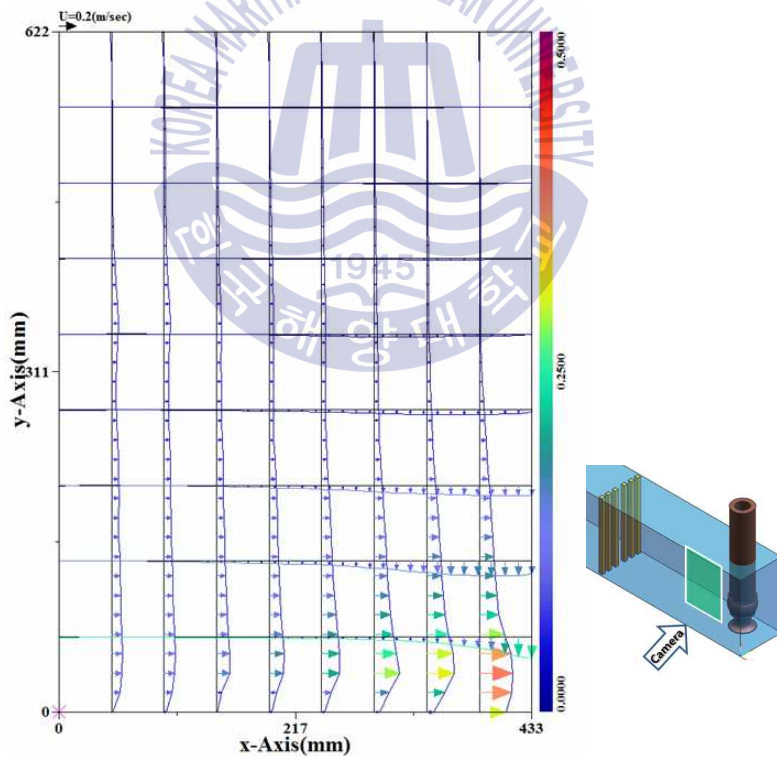


(b) Vertical plane (max.:0.5m/s, min.:0m/s)

Fig. 4.6 Downstream velocity profile of flow distributor(F1)

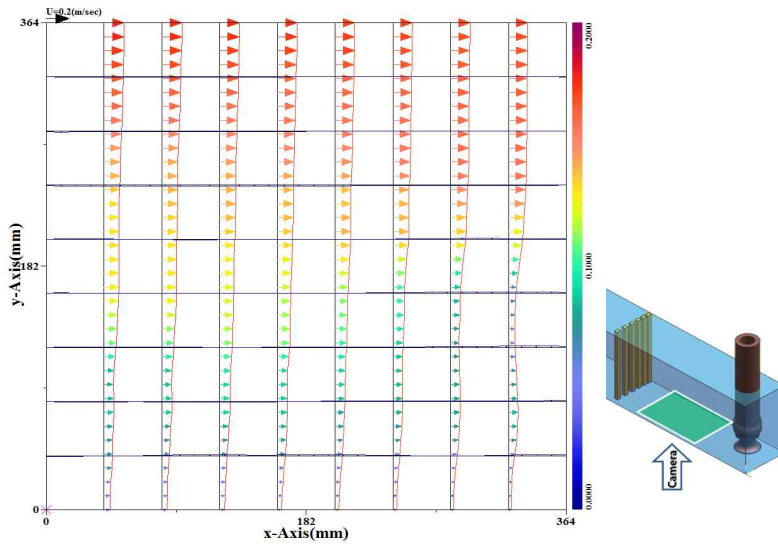


(a) Horizontal plane (max.:0.2m/s, min.:0m/s)

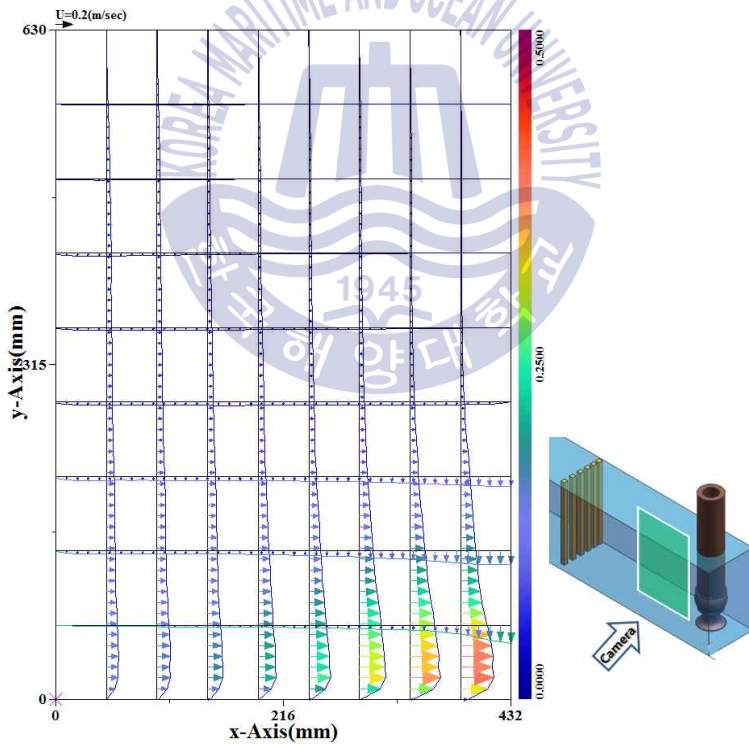


(b) Vertical plane (max.:0.5m/s, min.:0m/s)

Fig. 4.7 Downstream velocity profile of flow distributor(F2)



(a) Horizontal plane (max.:0.2m/s, min.:0m/s)



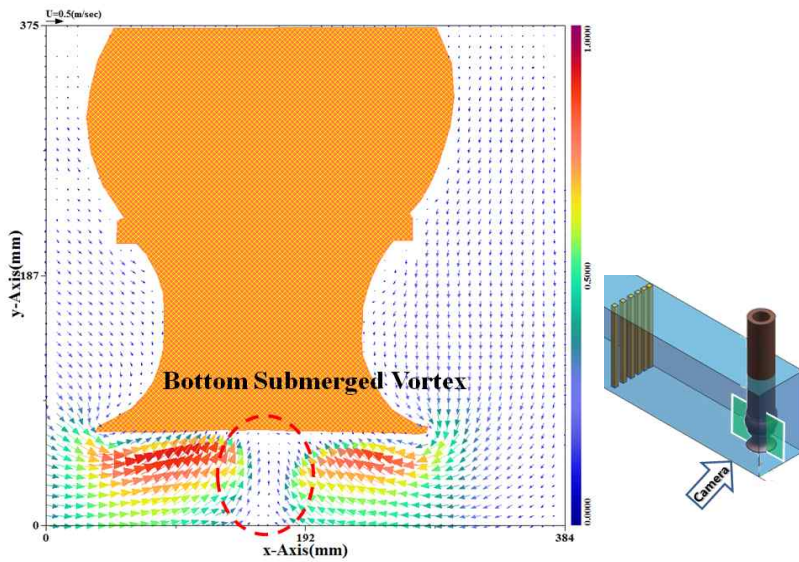
(b) Vertical plane (max.:0.5m/s, min.:0m/s)

Fig. 4.8 Downstream velocity profile of flow distributor(F3)

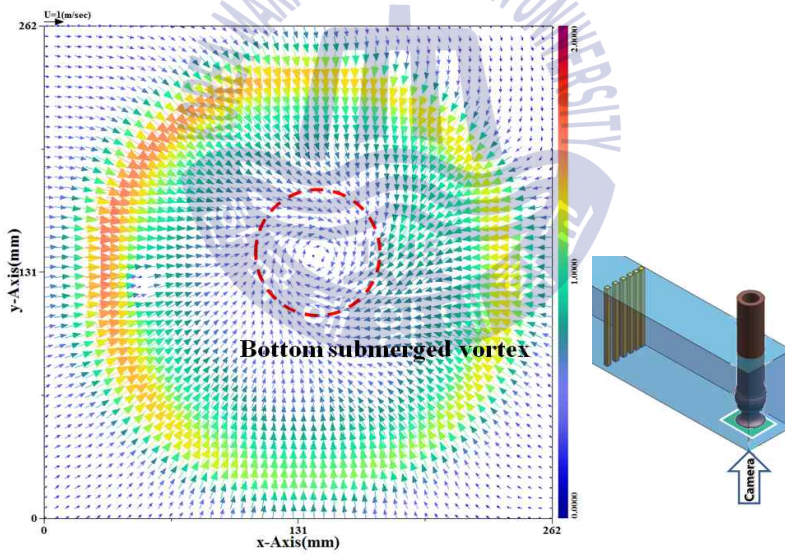
4.3.2 흡입관 주위의 유동특성

Fig. 4.9는 각 단면의 평균 속도벡터로 흡입관의 바닥 중앙과 옆 벽에서 수중 보텍스가 발생하고 있다. 흡입관 주위의 유체 흡입속도는 뒤쪽 벽에서 흡입되는 유체가 앞쪽 보다 약 0.25 m/s 느린 것을 알 수 있다. 흡입관 둘레를 지나면서 빨라진 유속이 흡입관 뒤쪽에서 느려지면서 불안정해지고 이것이 자유표면 보텍스를 발달시키는 것으로 판단된다.



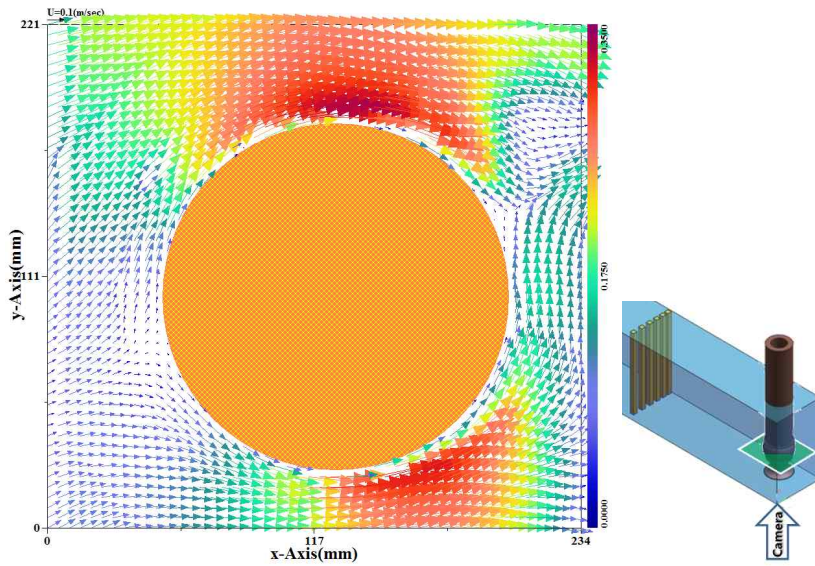


(a) Center side

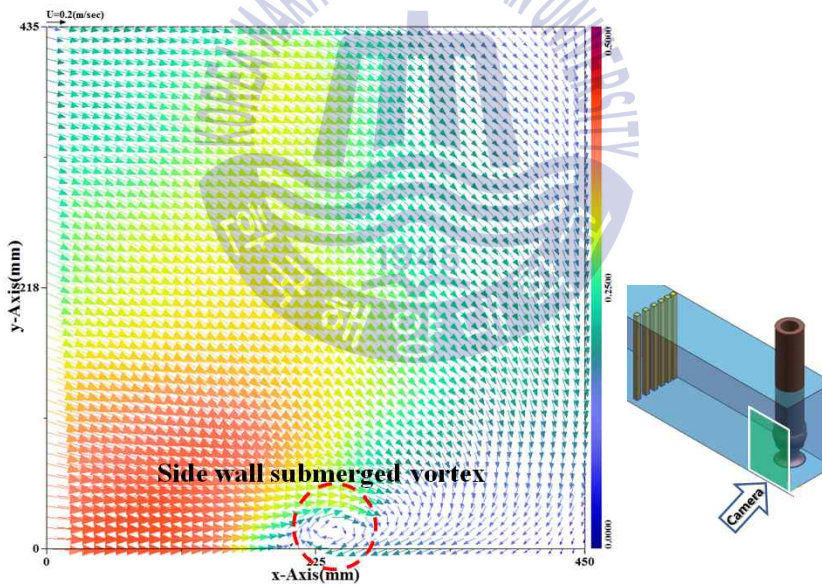


(b) bottom

Fig. 4.9 Velocity vector without AVD (continued)



(c) Bell mouth Body

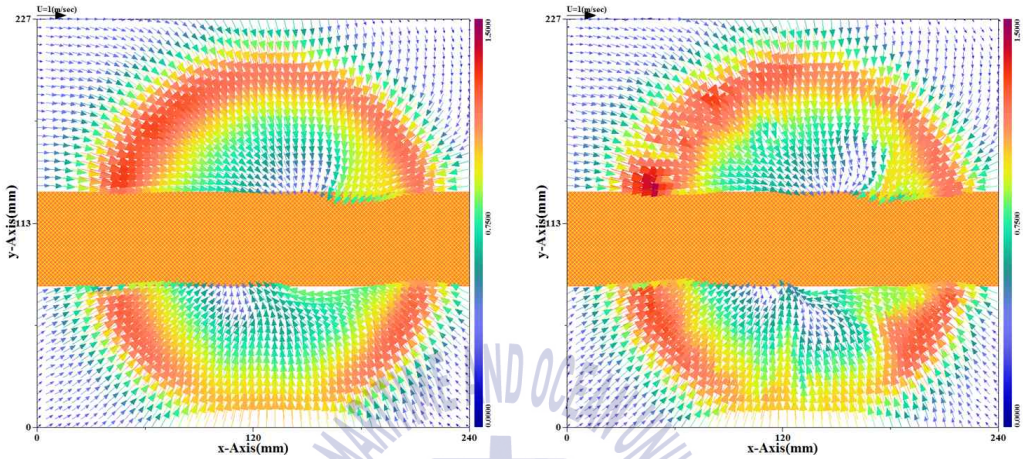


(d) Side wall

Fig. 4.9 Velocity vector without AVD

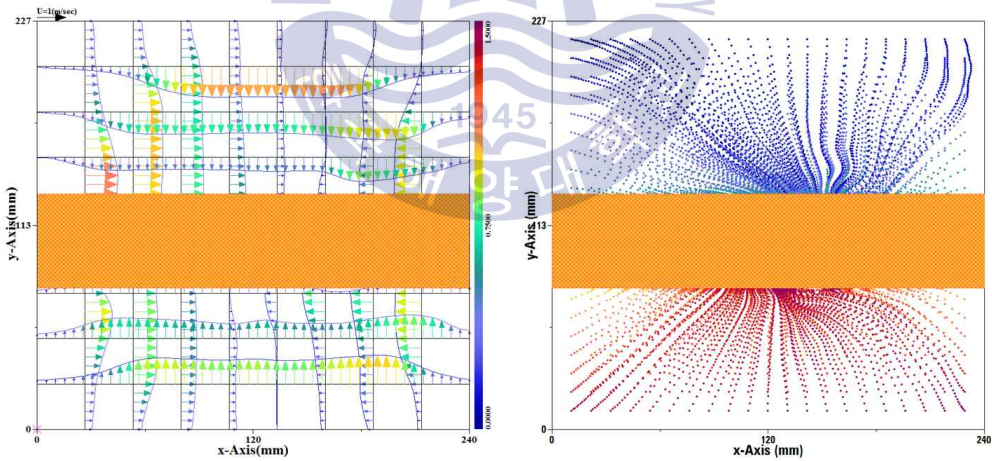
4.3.3 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-1)

- Trapezoid



(a) Average velocity vector

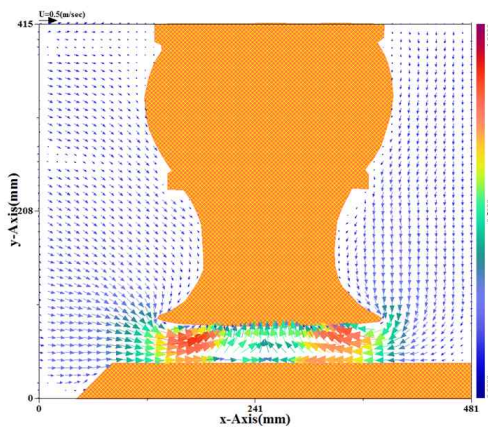
(b) Instantaneous velocity vector



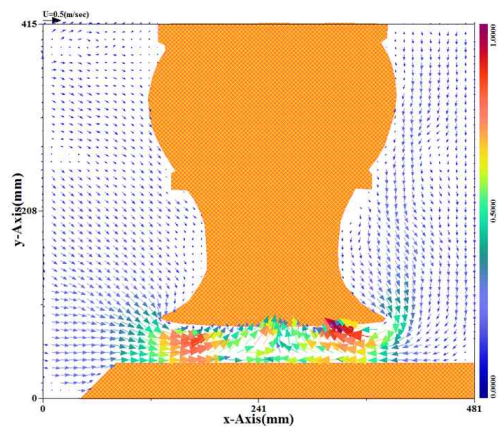
(c) Velocity profile

(d) Pathline

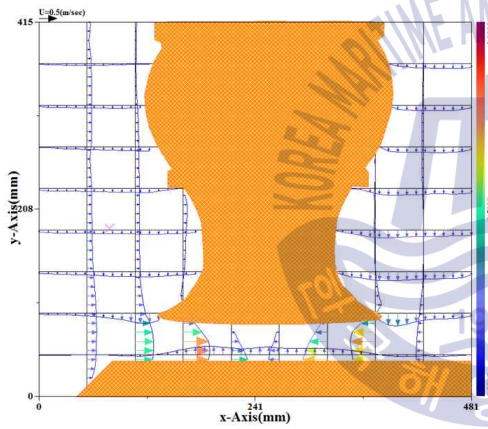
Fig. 4.10 Flow characteristics for bottom of AVD-1



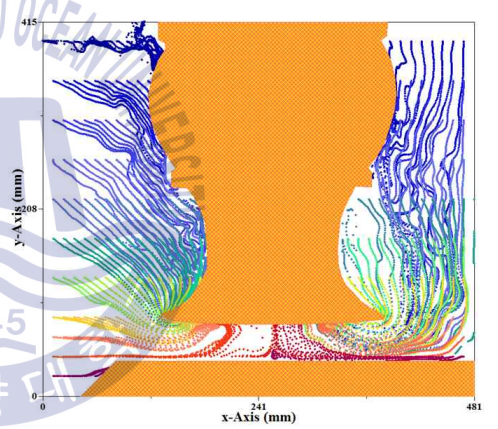
(a) Average velocity vector



(b) Instantaneous velocity vector

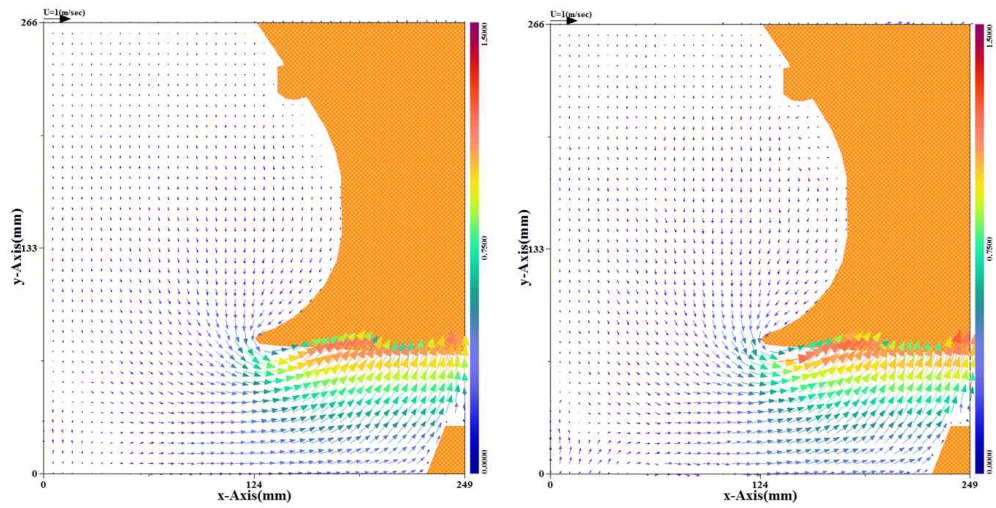


(c) Velocity profile



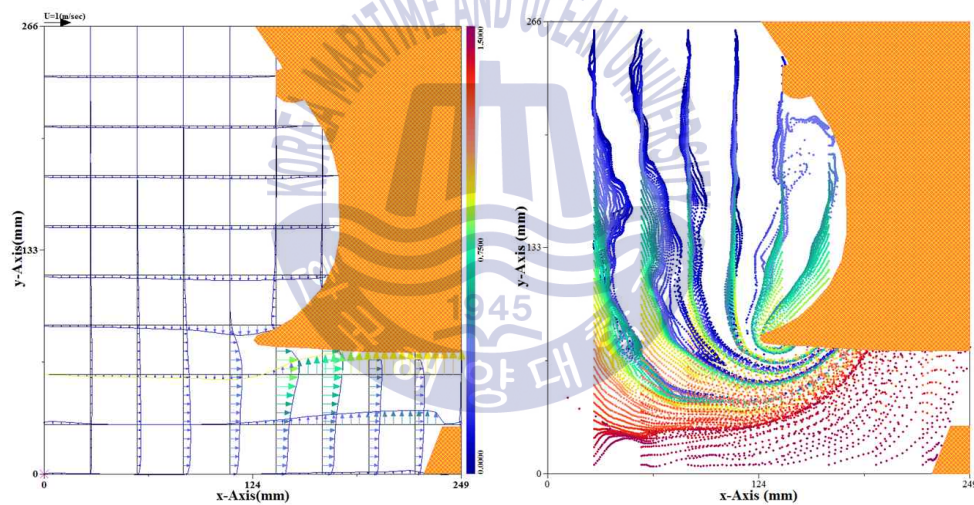
(d) Pathline

Fig. 4.11 Flow characteristics for center of AVD-1



(a) Average velocity vector

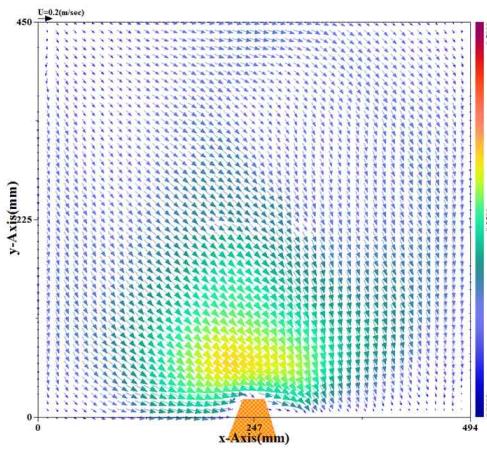
(b) Instantaneous velocity vector



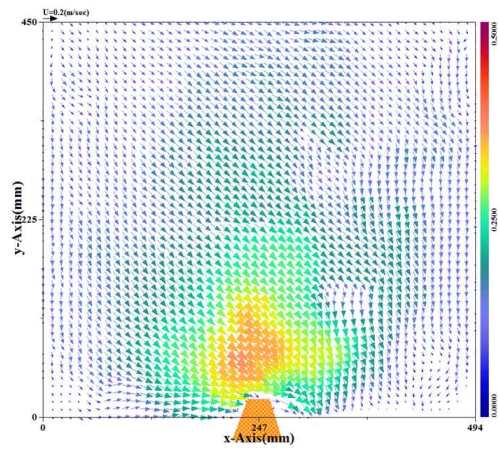
(c) Velocity profile

(d) Pathline

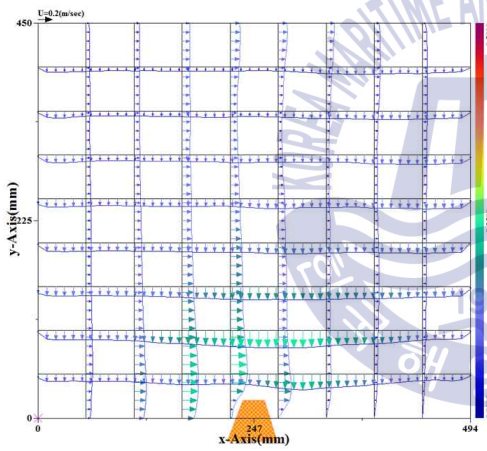
Fig. 4.12 Flow characteristics for center of AVD-1



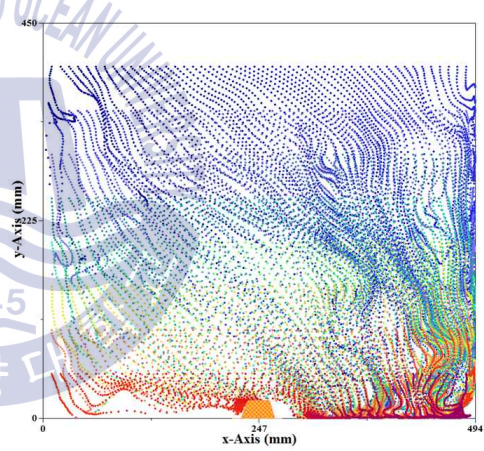
(a) Average velocity vector



(b) Instantaneous velocity vector

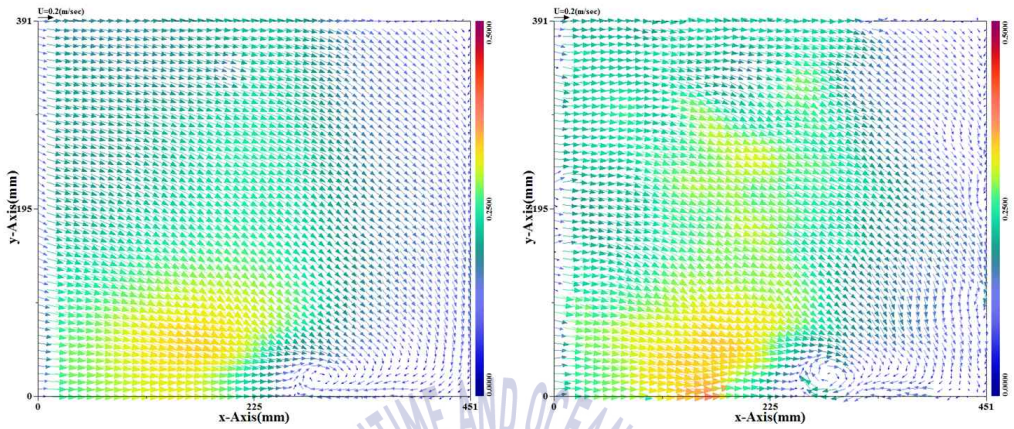


(c) Velocity profile



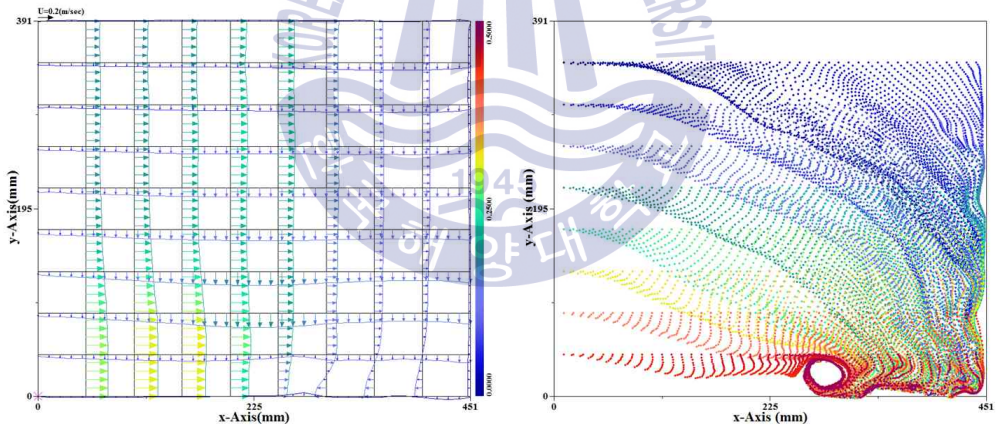
(d) Pathline

Fig. 4.13 Flow characteristics for back wall of AVD-1



(a) Average velocity vector

(b) Instantaneous velocity vector



(c) Velocity profile

(d) Pathline

Fig. 4.14 Flow characteristics for side wall of AVD-1

4.3.4 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-2)

- Center splitter

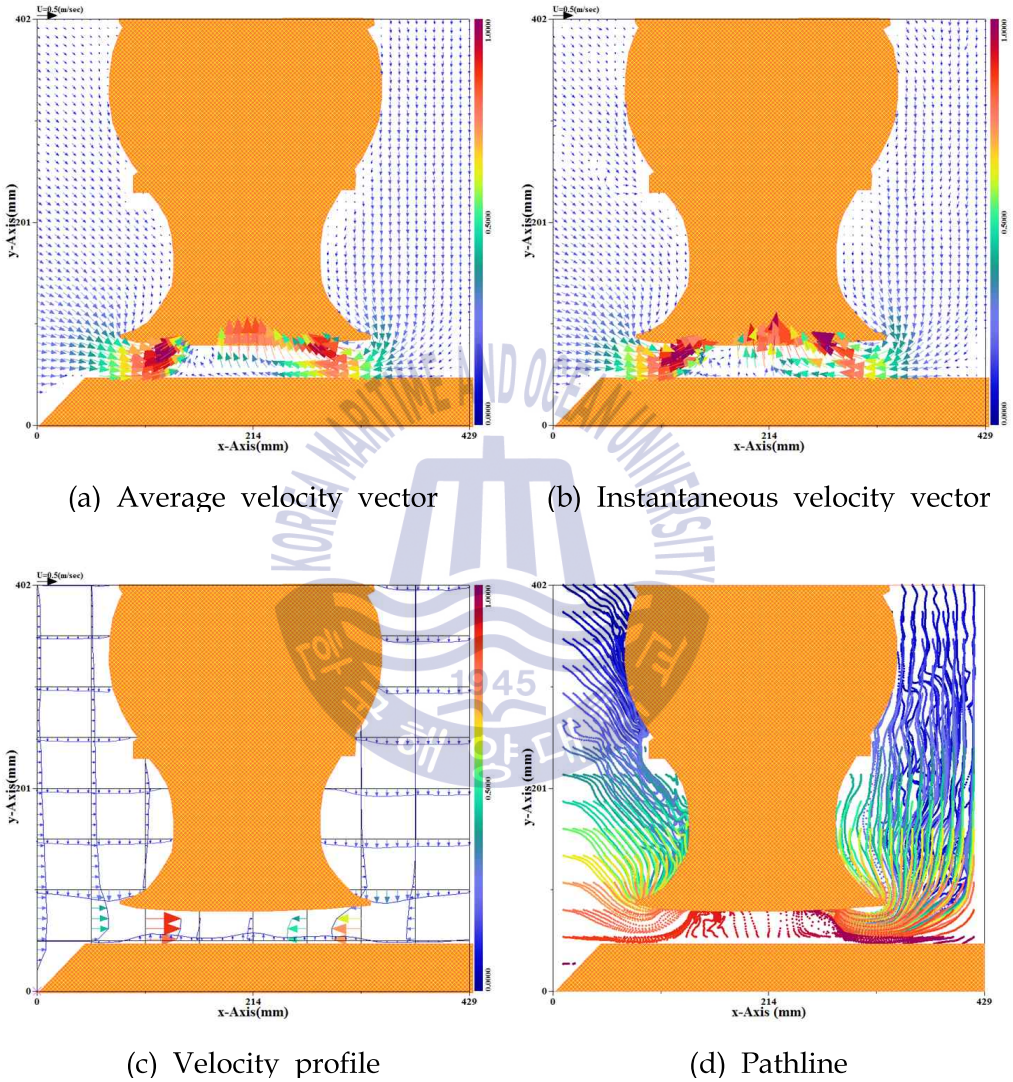
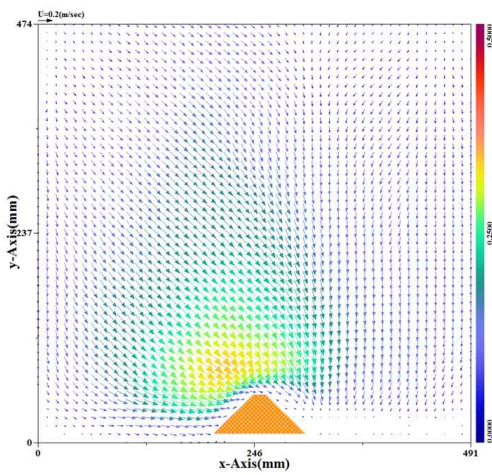
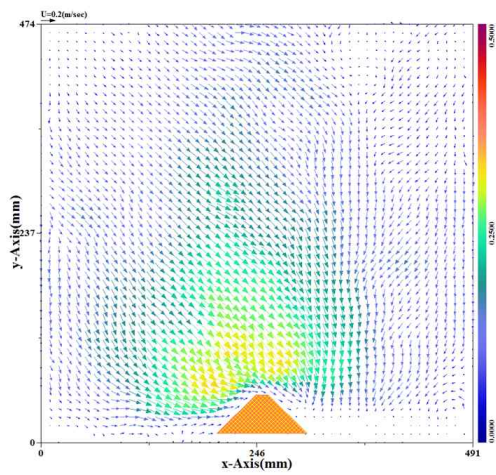


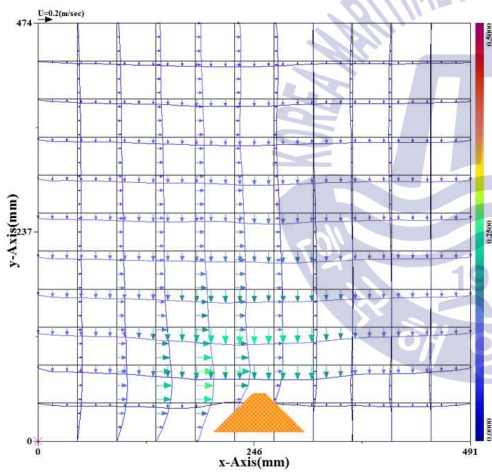
Fig. 4.15 Flow characteristics for center of AVD-2 (side view)



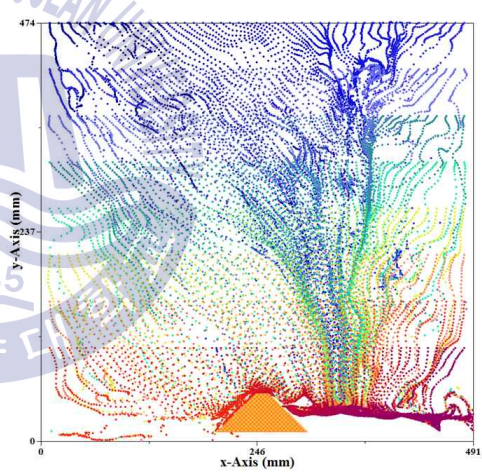
(a) Average velocity vector



(b) Instantaneous velocity vector

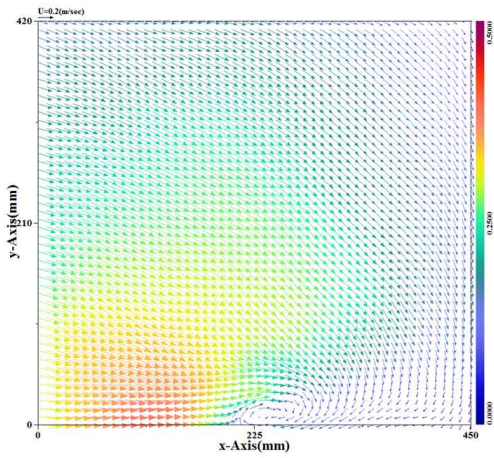


(c) Velocity profile

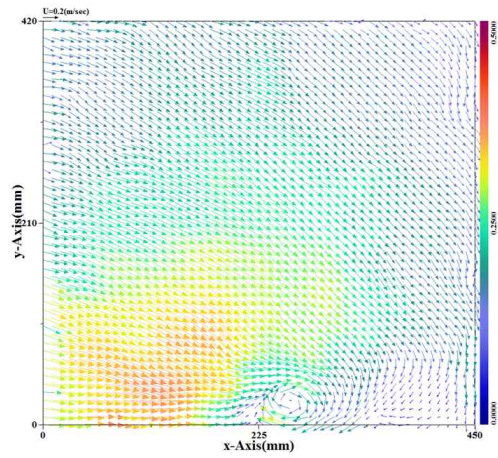


(d) Pathline

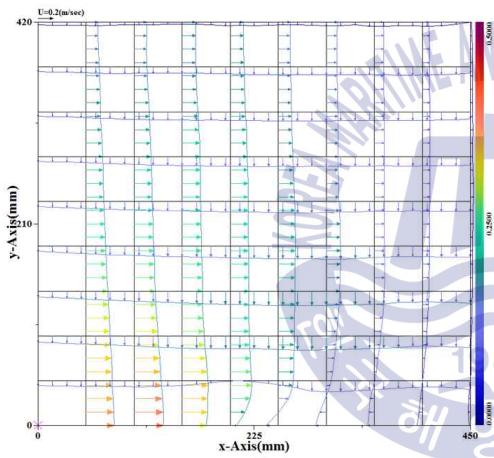
Fig. 4.16 Flow characteristics for back wall of AVD-2



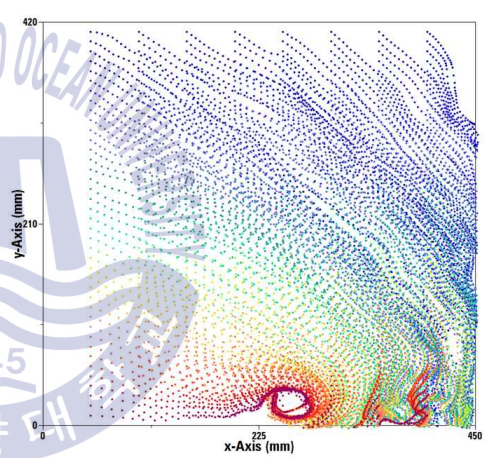
(a) Average velocity vector



(b) Instantaneous velocity vector

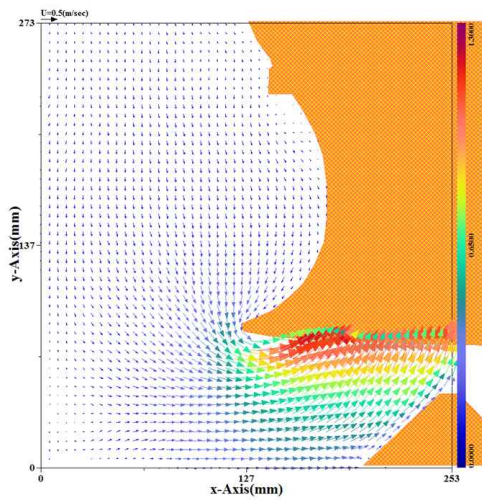


(c) Velocity profile

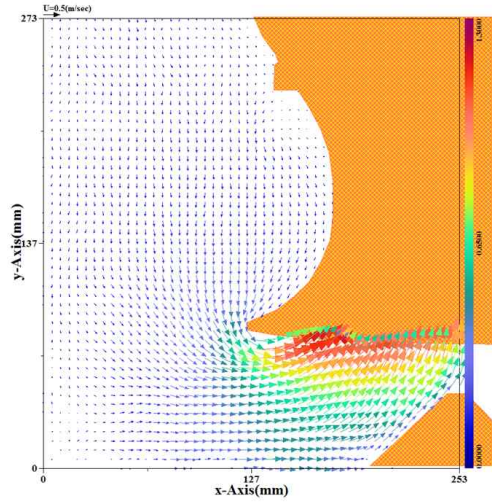


(d) Pathline

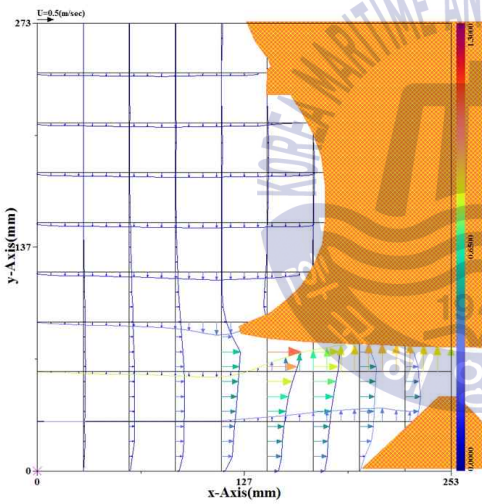
Fig. 4.17 Flow characteristics for side wall of AVD-2



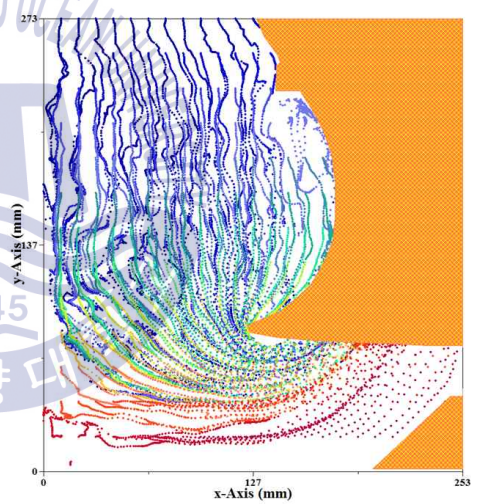
(a) Average velocity vector



(b) Instantaneous velocity vector



(c) Velocity profile



(d) Pathline

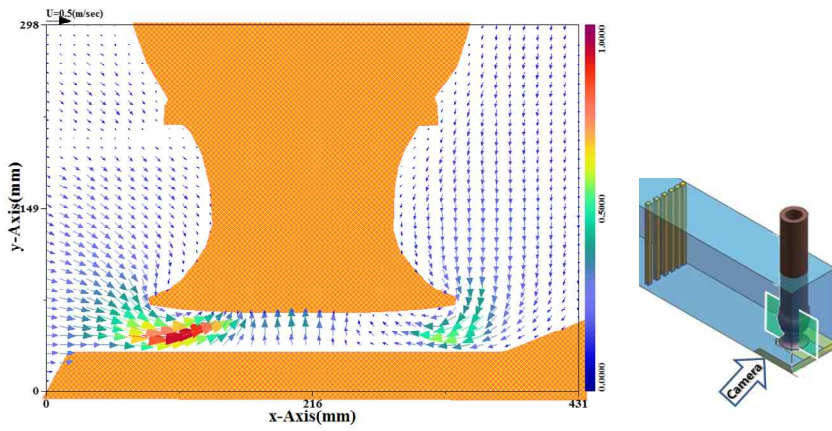
Fig. 4.18 Flow characteristics for center of AVD-1(back view)

4.3.5 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-3)

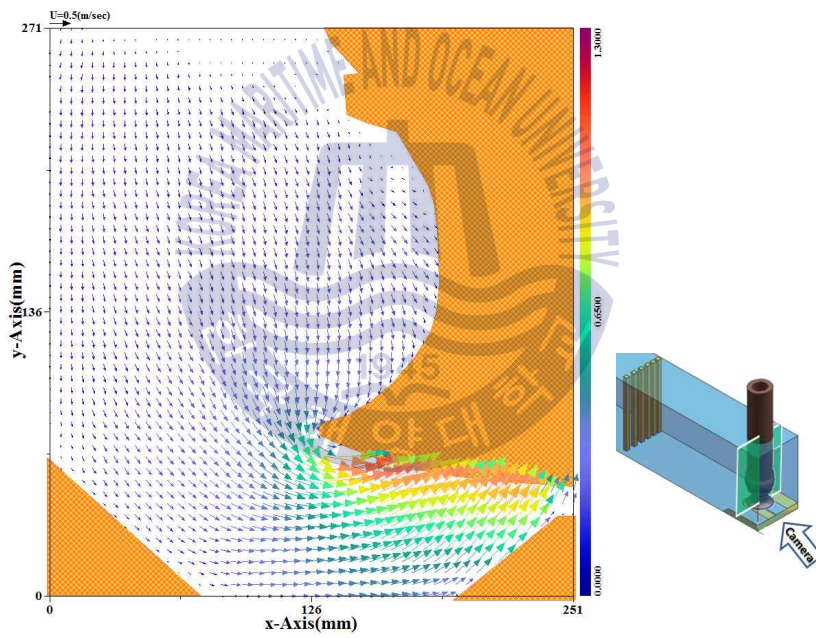
- Center splitter, Side fillet, Back fillet

Fig. 4.8은 AVD-3 설치 후의 유동장 평균 속도 벡터이다. 흡입관 중앙에 설치된 삼각형 모양의 Center splitter은 흡입관 바닥에서 발생하는 수중보텍스를 제거하며, 옆 벽면에 설치된 side wall fillet는 벽면 수중보텍스를 제거한다. 설치된 AVD로 인하여 흡입관 주위의 유동장은 보텍스가 사라져 안정적인 흐름을 보인다.

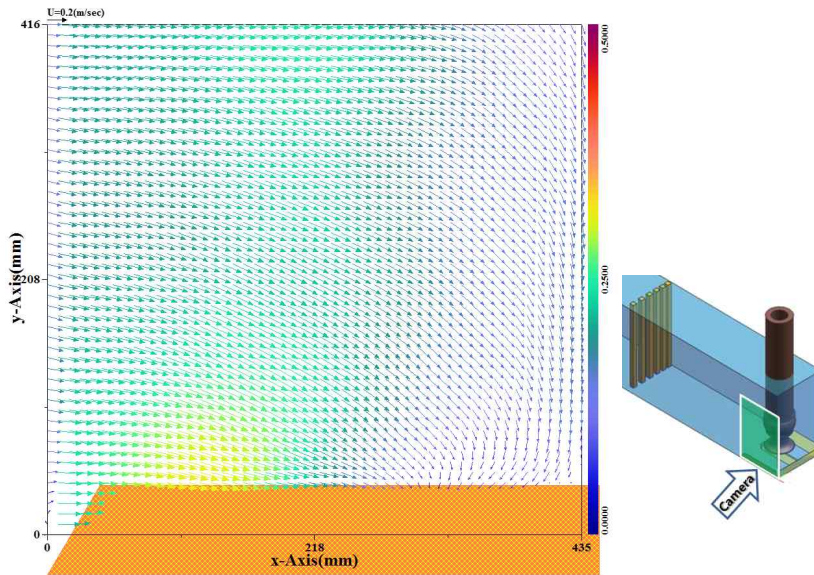




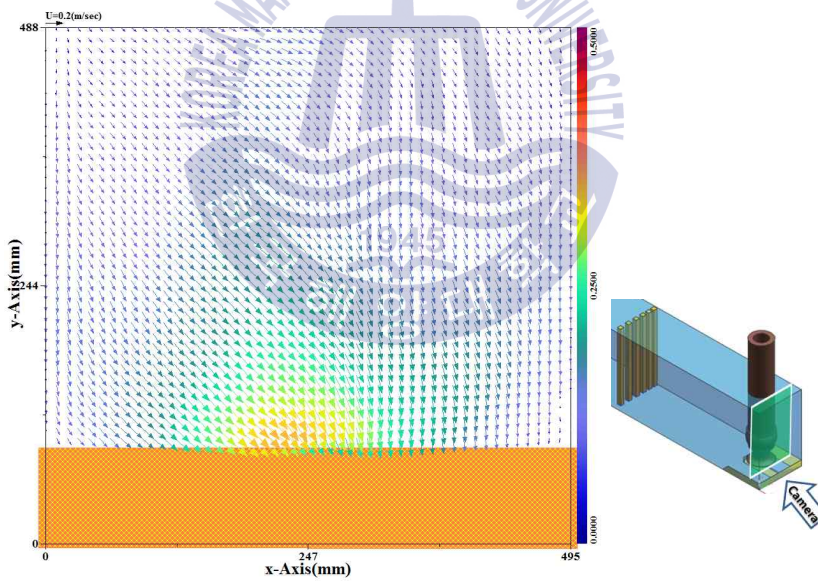
(a) Center side



(b) Center back



(c) Side wall



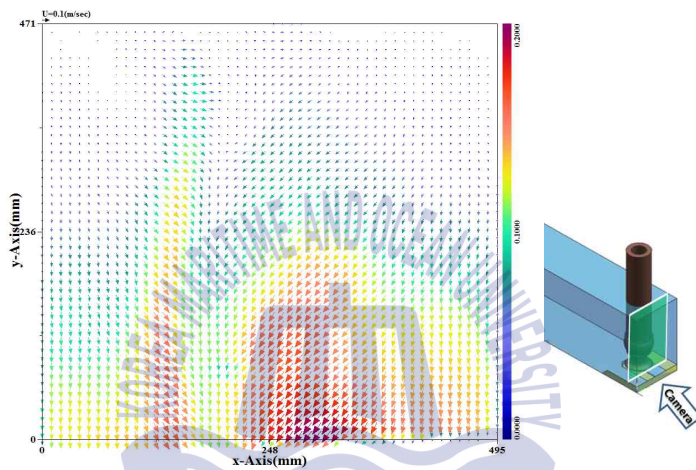
(d) Back wall

Fig. 4.19 Average velocity vector with the AVD

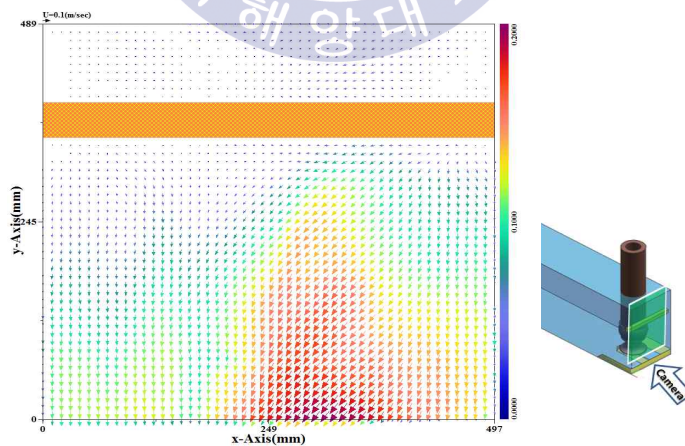
4.3.6 와류제거장치 주위의 유동특성 (AVD-4)

- Square bar

Fig. 4.20 (a)은 자유표면 보텍스가 발생할 때의 평균 속도 벡터이다. 자유표면에서 발생한 보텍스가 상부에서 천천히 회전하지만 흡입관 주위에서는 회전 유속이 약2배가 빨라지며 발달하여 흡입되고 있다. Fig.4.9 (b)는 자유표면 아래쪽에 사각바를 설치하여 자유표면을 제거한 것이다.



(a) Without AVD



(b) With AVD(square bar)

Fig. 4.20 Average velocity vector with the AVD(square bar)

4.4 수치해석

4.4.1 3D 형상과 격자

Fig. 4.21 과 Fig. 4.22는 PIV 시험을 수행한 실험들을 3D 형상화하였다. F3 흐름분배기를 4가지 형상의 AVD에 적용하여 수치해석을 하였다. 본 수치해석의 결과는 PIV 유동해석과 스윙각을 비교하여 흡수정 수치해석에 필요한 데이터를 구하고자 하는 것이다.

Fig. 4.23은 흡수정 수치해석에 사용된 격자를 나타내고 있다. 계산격자는 3차원 정렬 격자생성 프로그램인 ICEM CFD를 사용하여, hexa hexadral 형태의 격자를 생성하였고, 격자수는 약 165만 노드로 구성되어있다.

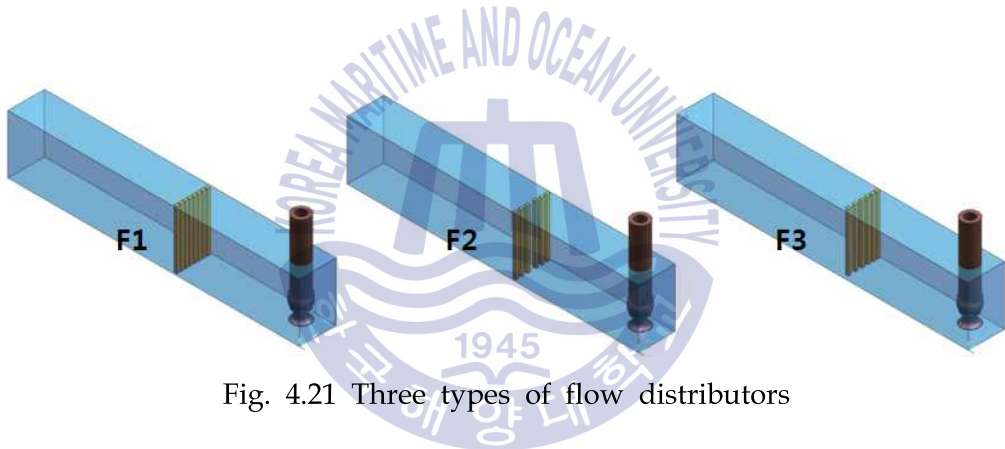


Fig. 4.21 Three types of flow distributors

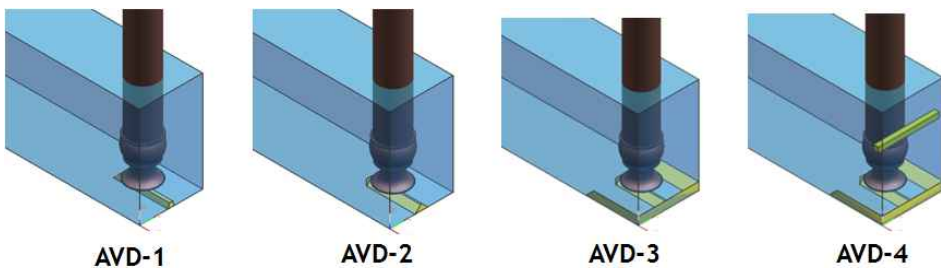
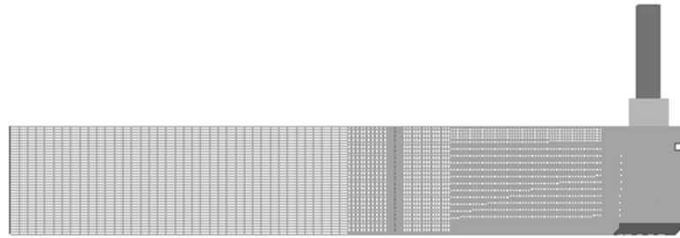
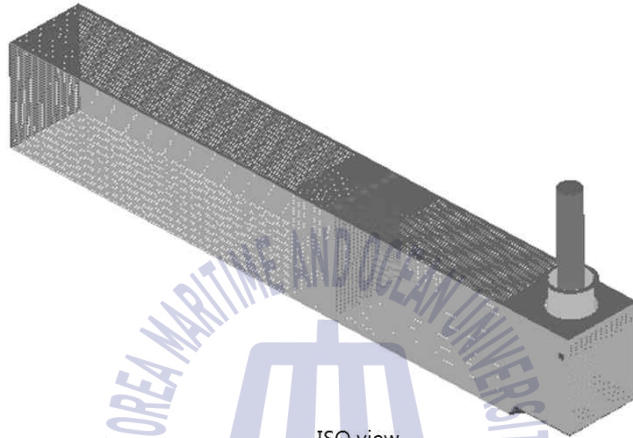


Fig. 4.22 Four types of AVDs



Side view



ISO view



Fig. 4.23 Intake sump mesh

4.4.2 경계조건과 계산조건

Fig. 4.24는 수치 해석을 위한 경계조건을 나타내고 있다. 입구는 압력, 출구는 속도로 설정하였으며 벽면은 no-free slip 벽면 조건, 자유표면은 free-slip 벽면 조건을 적용하였다. 작동유체로는 25℃의 물을 사용하였으며, 정상상태 계산을 수행하였다.

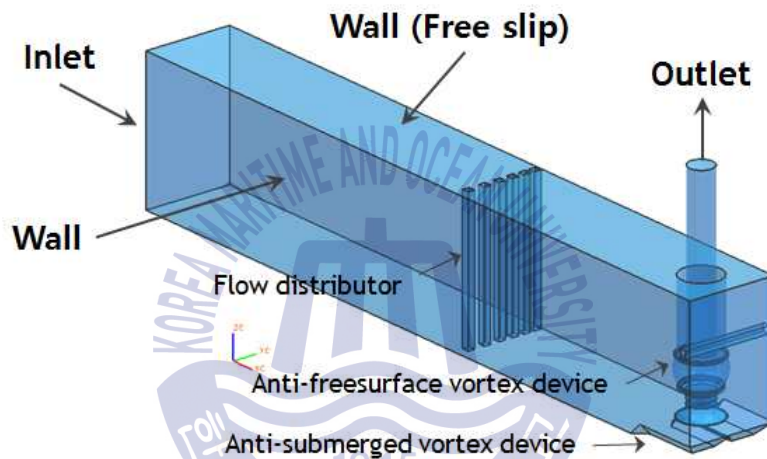


Fig. 4.24 Boundary condition

Table 4.1 Calculation conditions

| No | Test Case | Pump Operation (m ³ /hr) | Flow Distributor | Bell Mouth | Anti-Vortex device | Experiment of Same condition |
|----|-----------|-------------------------------------|------------------|------------|--------------------|------------------------------|
| 1 | Case 1 | 153.5 | F3 | NVB | N | M-F3-NVB -SM1-0.5d-N |
| 2 | Case 2 | 153.5 | F3 | NVB | AVD-1 | M-F3-NVB -SM1-0.5d-T |
| 3 | Case 3 | 153.5 | F3 | NVB | AVD-2 | M-F3-NVB -SM1-0.5d-C |
| 4 | Case 4 | 153.5 | F3 | NVB | AVD-3 | M-F3-NVB -SM1-0.5d-CSB |
| 5 | Case 5 | 153.5 | F3 | NVB | AVD-4 | M-F3-NVB -SM1-0.5d-CSBF |

4.4.3 수치해석 결과

4.4.3.1 흡수정의 유동특성

Fig. 4.25는 Case 1의 Swirling Strength을 iso-surface로 나타낸 것이다. 바닥 보텍스와 벽면 보텍스가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.26은 Case 1의 속도 프로파일을 나타낸 것이다. 흐름분배기(F3)를 지나 한 쪽에 속도가 빠른 유동장이 만들어 지고 있다.



Fig. 4.25 Vortex core of case 1

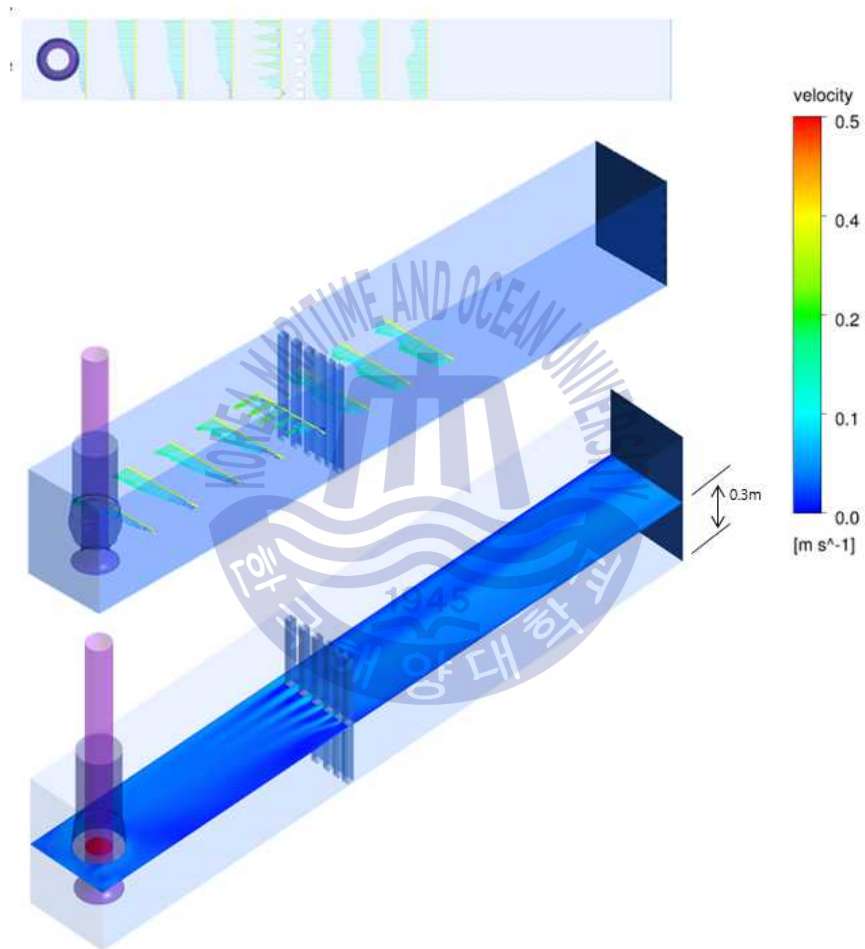


Fig 4.26 Velocity profile of case 1

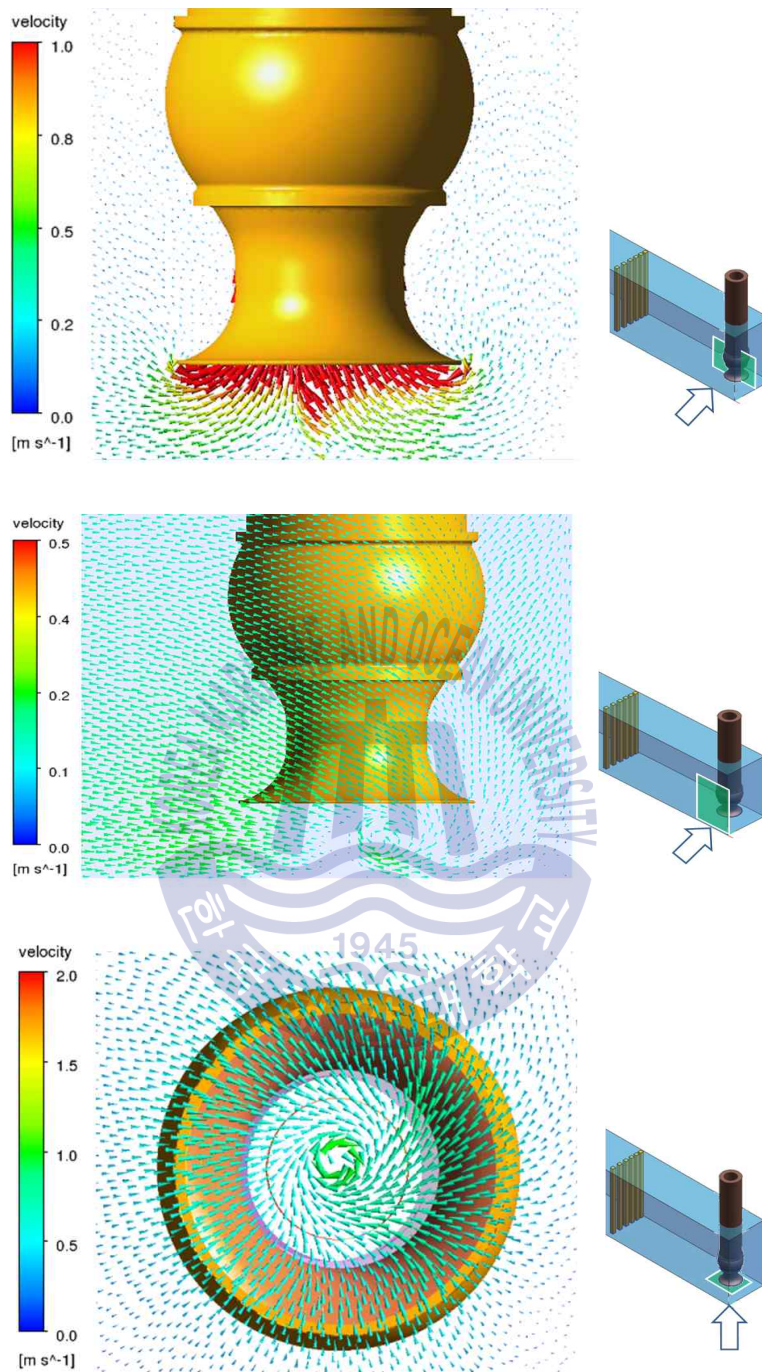


Fig. 4.27 Velocity vector of case 1

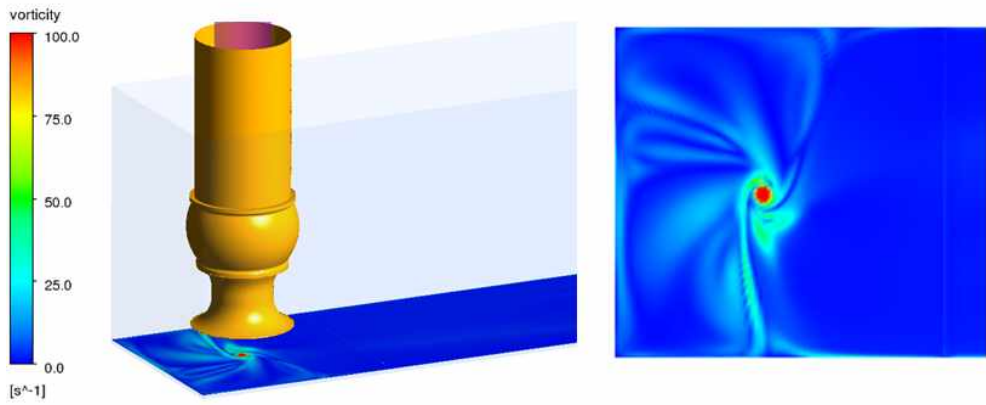


Fig. 4.28 Bottom vorticity contour of case 1

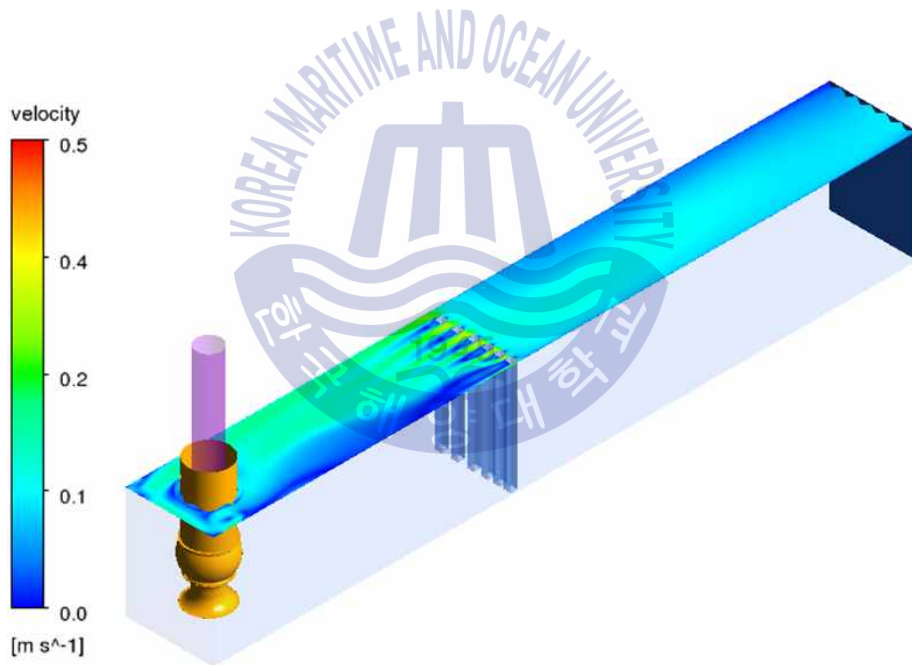


Fig. 4.29 Velocity contour on free surface of case 1

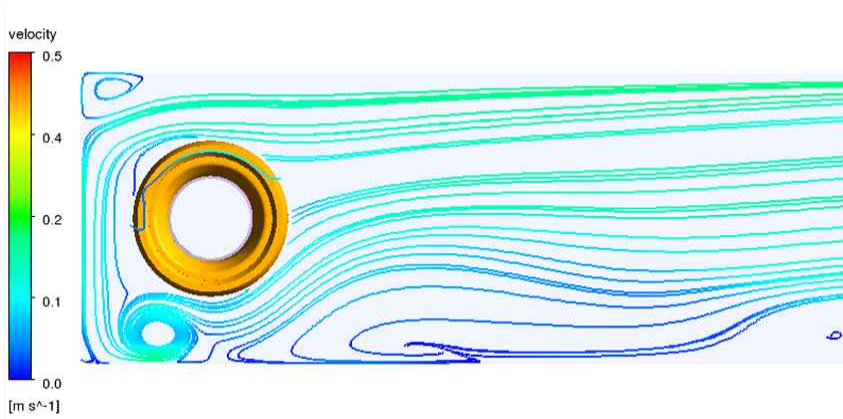


Fig. 4.30 Streamline on the free surface of case 1

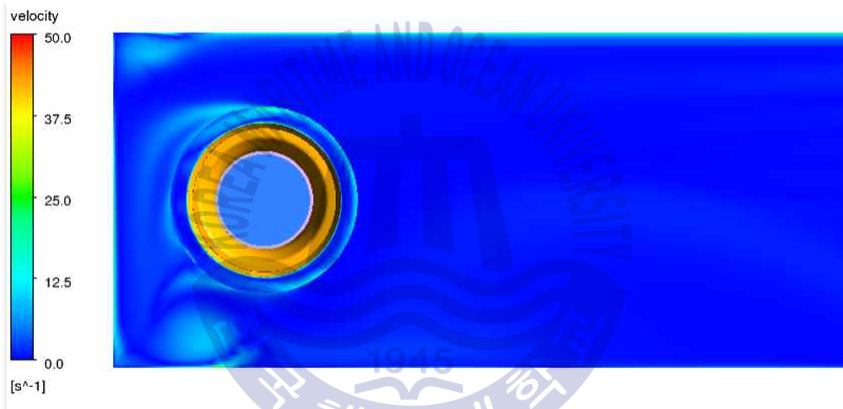
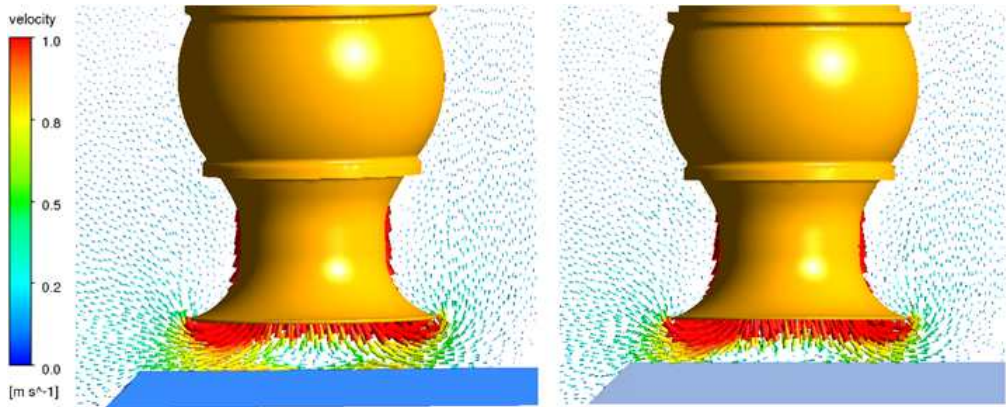
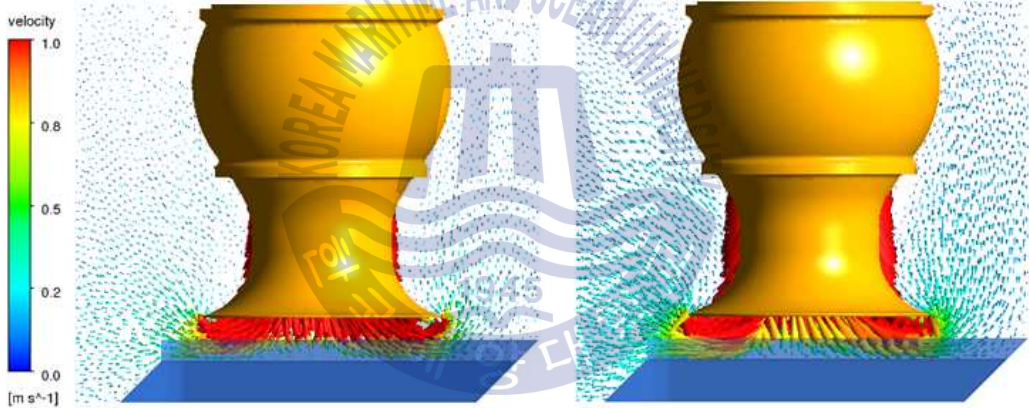


Fig. 4.31 Free surface vorticity of case 1



(a) Case 2

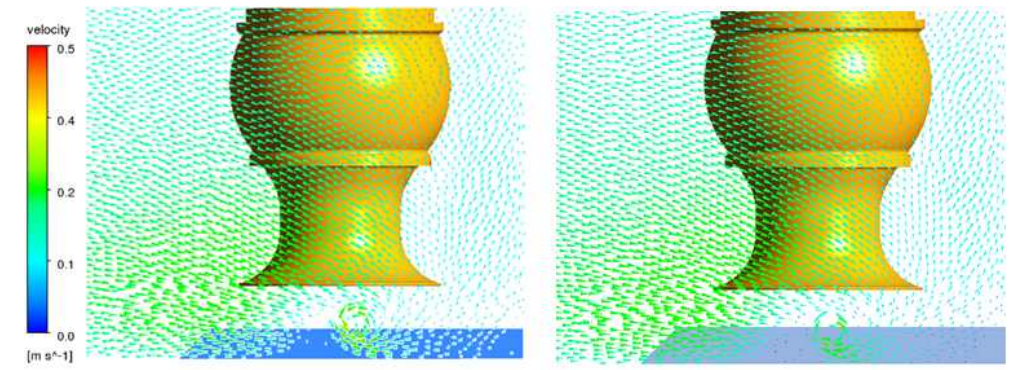
(b) Case 3



(c) Case 4

(d) Case 5

Fig. 4.32 Velocity vector (1)



(a) Case 2

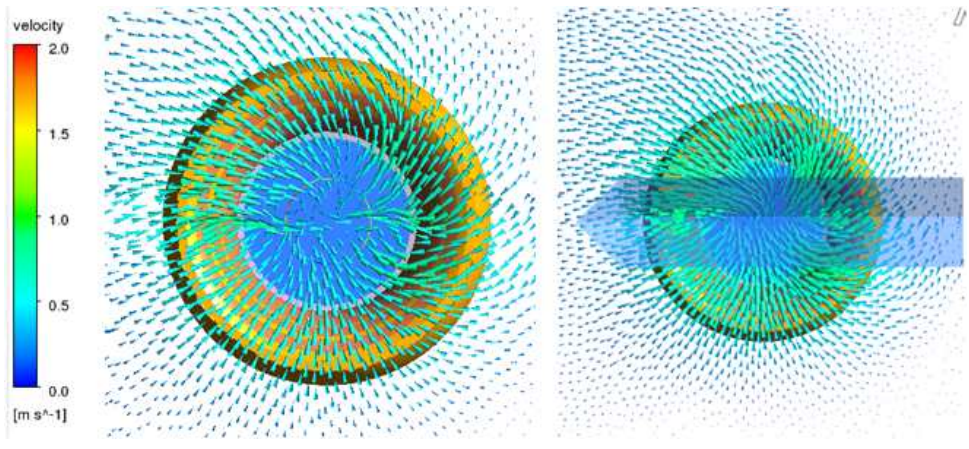
(b) Case 3



(c) Case 4

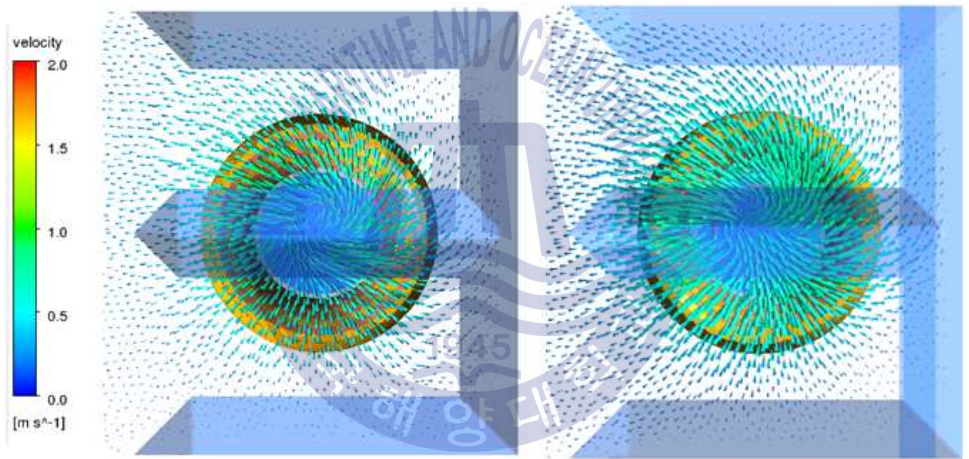
(d) Case 5

Fig. 4.33 Velocity vector (2)



(a) Case 2

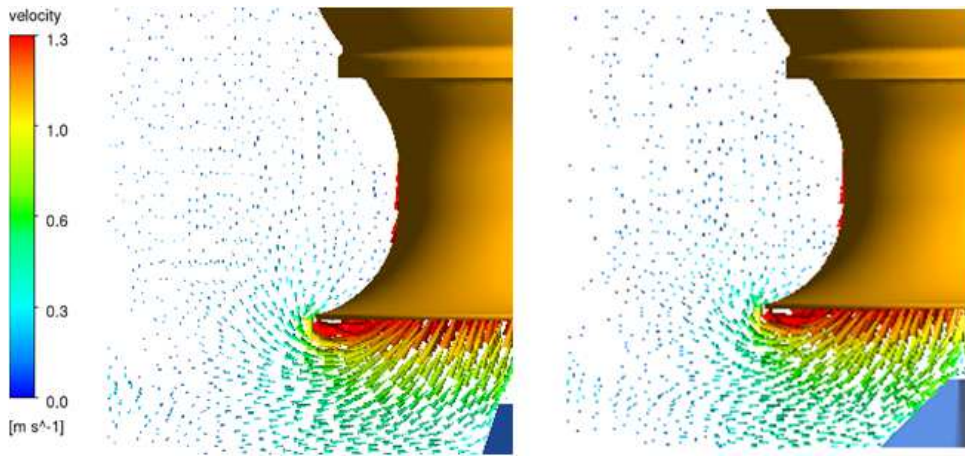
(b) Case 3



(c) Case 4

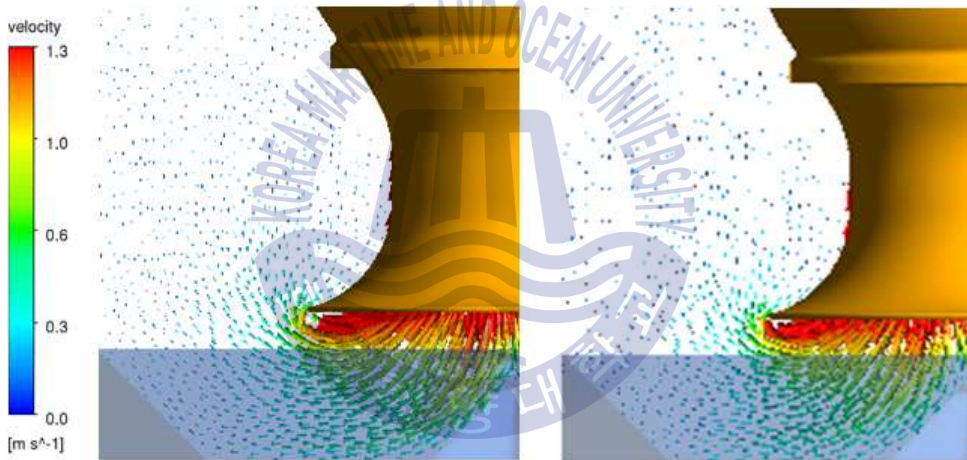
(d) Case 5

Fig. 4.34 Velocity vector (3)



(a) Case 2

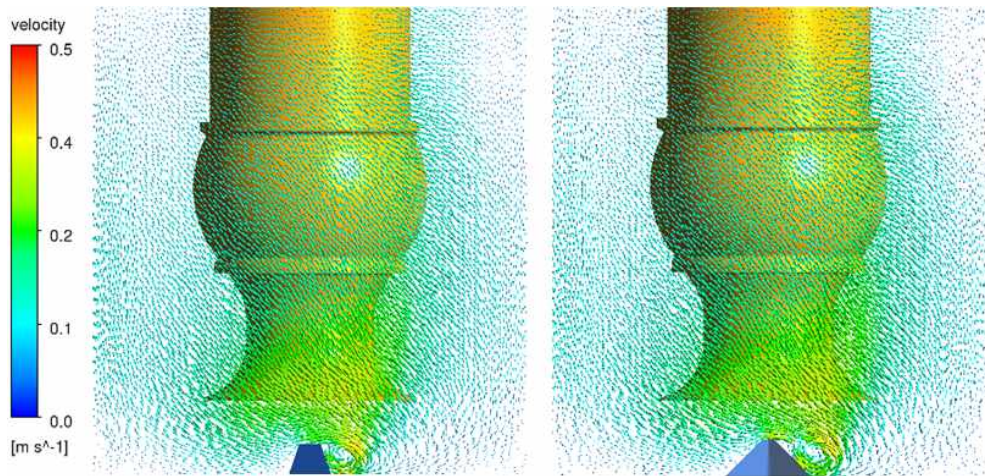
(b) Case 3



(c) Case 4

(d) Case 5

Fig. 4.35 Velocity vector (4)



(a) Case 2

(b) Case 3



(c) Case 4

(d) Case 5

Fig. 4.36 Velocity vector (5)

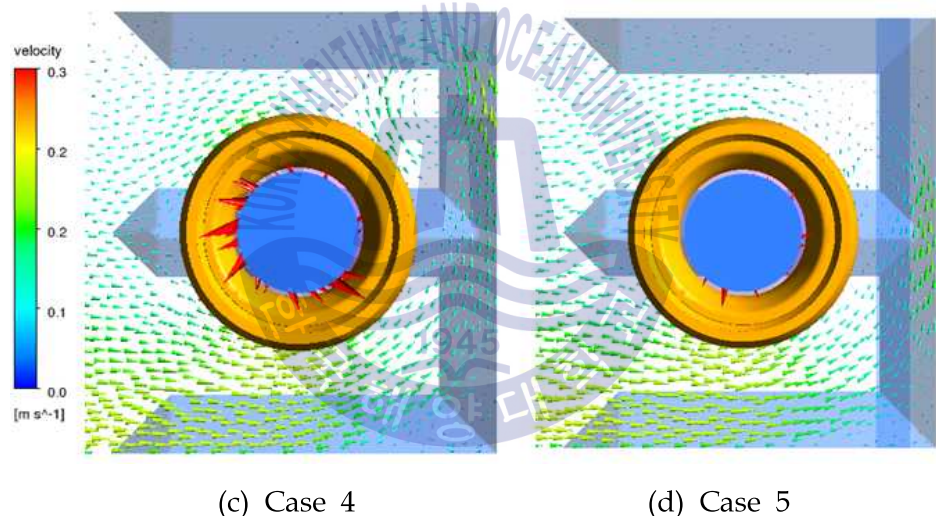
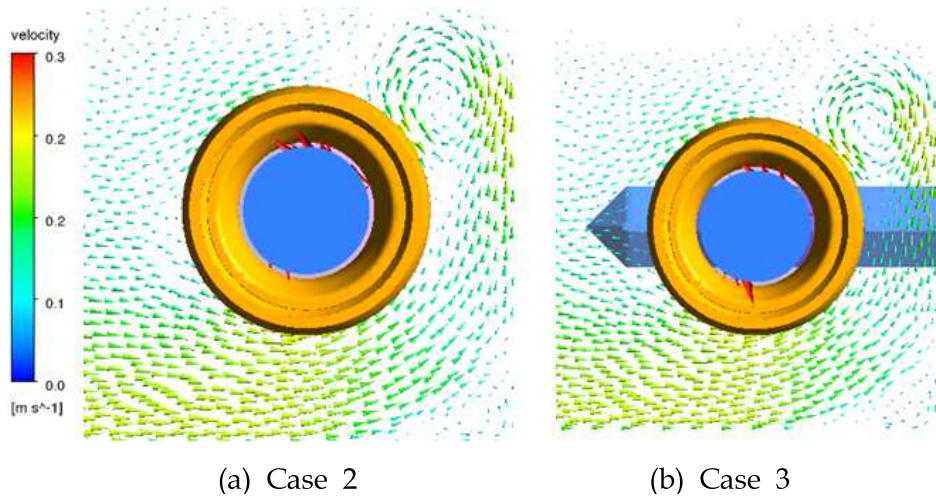
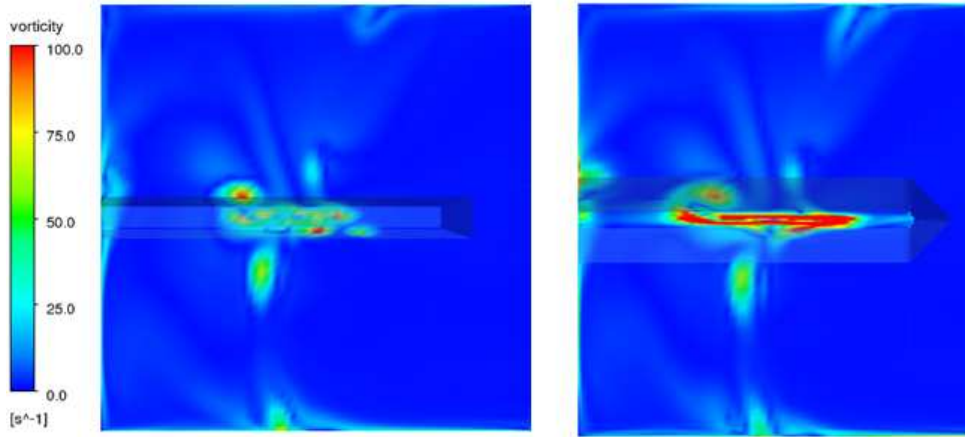
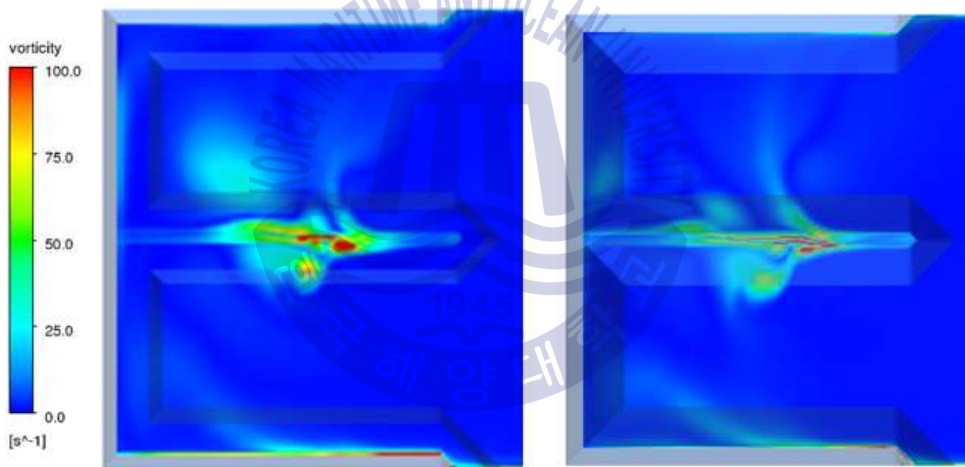


Fig. 4.37 Velocity vector (6)



(a) Case 2

(b) Case 3



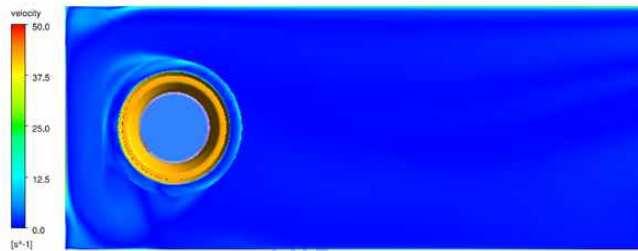
(c) Case 4

(d) Case 5

Fig. 4.38 Vorticity contours

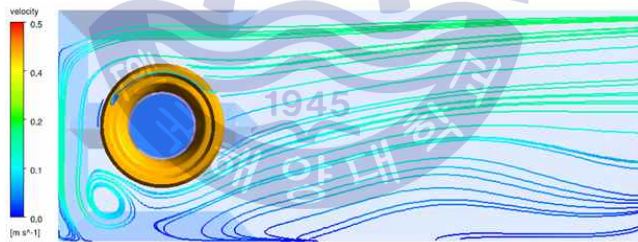


(a) Case 4

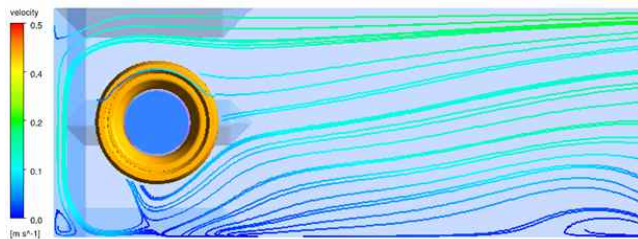


(b) Case 5

Fig. 4.39 Free surface vorticity contours



(c) Case 4



(d) Case 5

Fig. 4.40 Streamlines on the free surface

4.4.3.2 흡수정의 스월각

CFD해석을 통한 스월각의 계산은 각 Case 의 흡입관 입구부터 4D 지점의 관직경(d) 0.25d, 0.5d, 0.75d의 접선 속도를 구하여 이를 pipe 내경 d의 접선 속도로 보정을 하여 평균 스월 각도를 구하였다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_{\theta}}{V_Z} \quad (4.40)$$

$$V_{\theta} = \frac{(\sum_0^n V_{0.25} / n) + (\sum_0^n V_{0.5} / n) + (\sum_0^n V_{0.75} / n)}{3} \times 2(m/s) \quad (4.41)$$

$$V_Z = q / \frac{\pi \cdot d^2}{4} (m/s) \quad (4.42)$$

여기에서, $\theta(\text{radian})$ =스월각도

d =스월메타 설치 관 직경

q =유량(m^3/s)

Table 4.2는 CFD와 실험의 스월각을 비교 한것이다. CFD의 스월각은 실험 치에 대해 최대 3.5% 오차를 보였다.

바닥 보텍스 제거 장치만 설치할 경우 스월각의 변화는 실험과 CFD 모두 같거나 약10%정도 감소를 보였으며 자유표면 보텍스 제거 장치를 설치할 경우 약20% 감소를 보였다.

Fig. 4.41은 각 케이스의 평균 접속 속도를 나타낸 것이고, Fig. 4.42는 각 케이스 의 위치에 따른 접선 속도를 나타낸 것이다.

Table 4.2 Comparison of swirl angle

| Case | 0.5d (m/s) | 0.6d (m/s) | 0.75d (m/s) | Average (m/s) | CFD Swirl angle ($^{\circ}$) | Experiment Swirl angle ($^{\circ}$) | Error (%) |
|------|---------------|---------------|----------------|------------------|--------------------------------------|---|--------------|
| 1 | 0.53 | 0.46 | 0.25 | 0.41 | 16.5 | 16.2 | 1.6 |
| 2 | 0.42 | 0.40 | 0.26 | 0.36 | 14.6 | 14.1 | 3.5 |
| 3 | 0.43 | 0.41 | 0.27 | 0.37 | 15.0 | 14.8 | 1.4 |
| 4 | 0.56 | 0.46 | 0.23 | 0.42 | 16.5 | 16.2 | 1.9 |
| 5 | 0.42 | 0.33 | 0.16 | 0.30 | 12.2 | 12.4 | 1.6 |

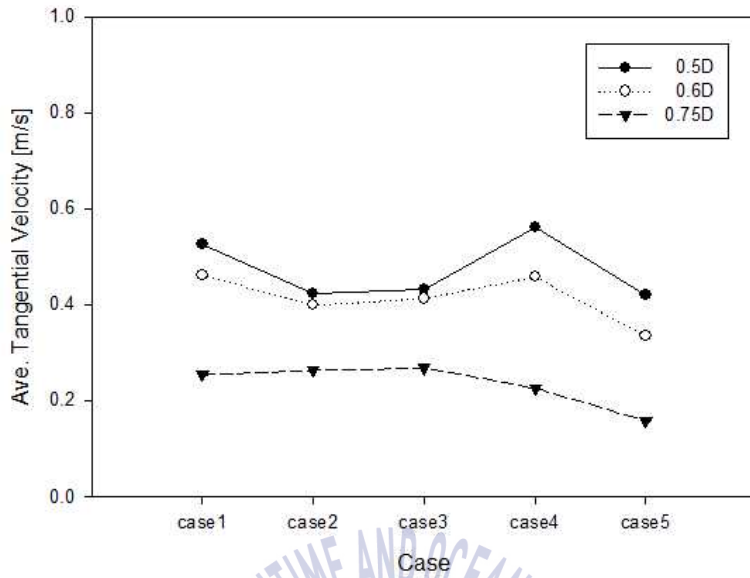
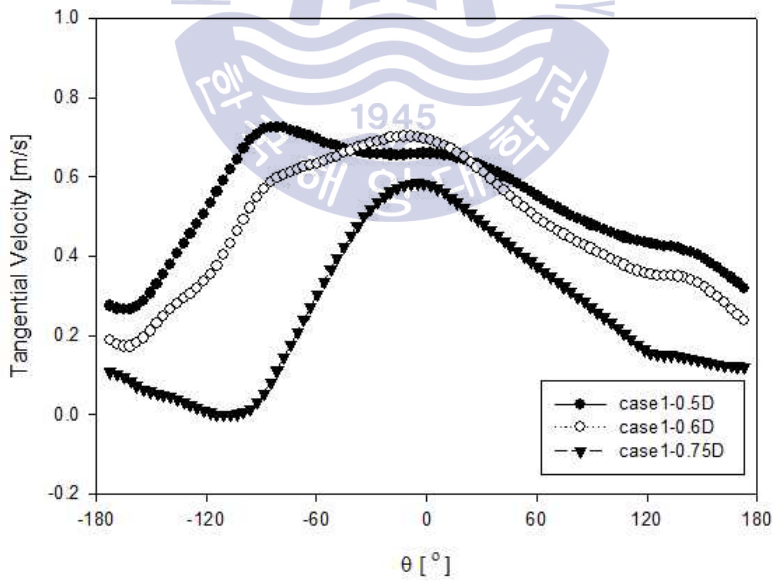
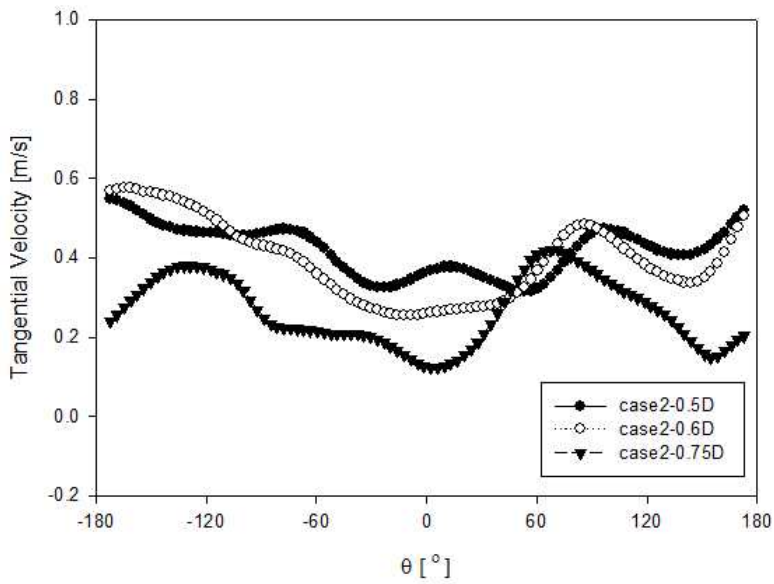


Fig. 4.41 Average tangential velocity

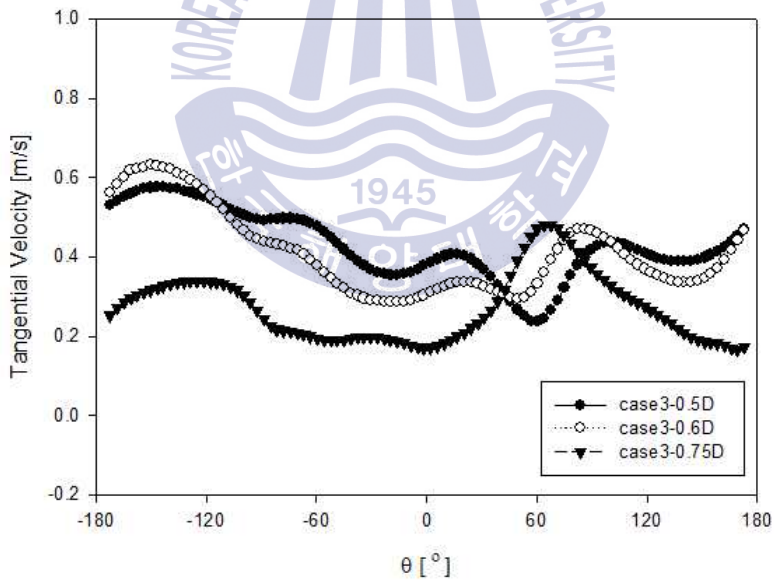


(a) Case 1

Fig. 4.42 Tangential velocity in pipe (continued)

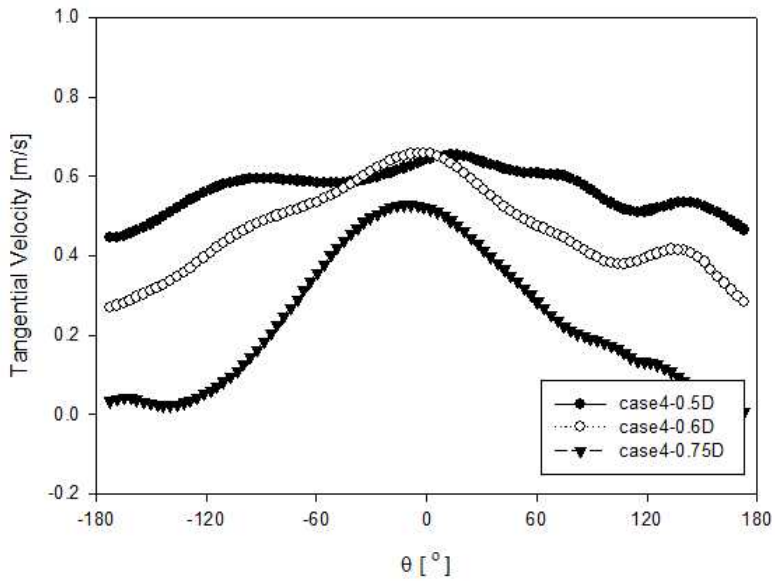


(b) Case 2

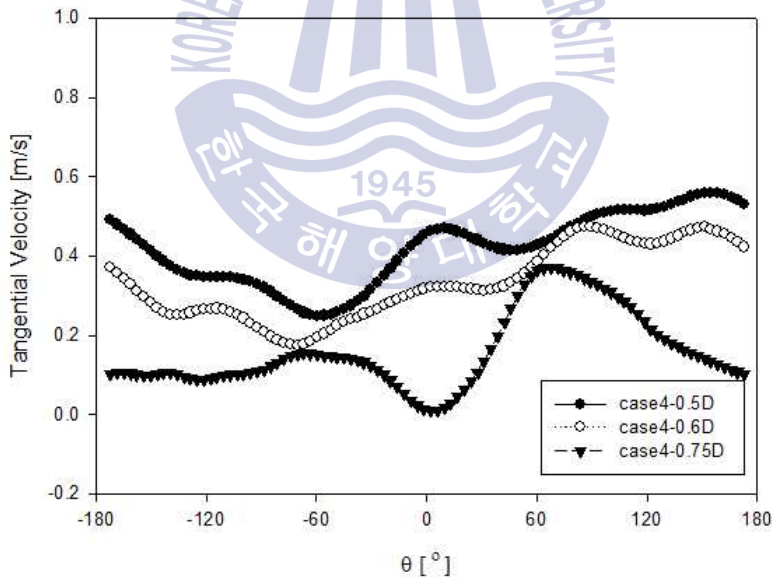


(c) Case 3

Fig. 4.42 Tangential velocity in pipe (continued)



(d) Case 4



(e) Case 5

Fig. 4.42 Tangential velocity in pipe

제 5 장 결론

본 연구는 AVD 형상에 따른 단일 흡수정의 흡입구 주위 유동장을 PIV 기법을 통해 가시화 하고, 상용코드인 ANSYS CFX를 사용하여 비교하였으며, 흡수정 시험에 쓰이는 스윙메타의 종류와 위치에 따른 스윙각을 비교 분석하였다. 흡수정 요인에 따른 와류 제거 장치의 설계수치를 정하여 설계 형상이 각각 다른 흡수정 시험(30회)을 통하여 검증하였고, 또한 흡수정 형상에 따른 AVD 조합을 제시하였다.

다음과 같은 결론으로 요약 정리 할 수 있다.

1. 스윙각은 흡수정의 유량에 따른 영향은 약 10% 정도이며 ANSI/HI 9.8에서 제시하는 평균스윙각 5도에서 0.5도 정도이다. 스윙메타의 재질, 두께, 무게 따라 스윙각은 최대 8%의 오차를 보였으며 ANSI/HI 9.8에서 제시하는 평균스윙각 5도에서 0.4도 정도이다.
2. 스윙메타 설치 위치에 따른 스윙각은 같은 유량에서는 4d가 0.5d 보다 평균 5% 낮게 측정되고, 이것은 평균 스윙각 5도에서 0.25도 오차를 가진다.
3. 흡수정 수치해석(정상상태계산)에서 CFD의 스윙각은 실험치에 대해 최대 3.5% 오차를 보였으며, CFD와 실험 모두에서 수중 보텍스 제거(보텍스 제거 장치)에 따라 약 0~10% 낮아지며, 자유표면 보텍스 제거(커튼월 설치)에 의해 약 20% 낮아졌다. AVD의 설치의해 일정 부분 흡입관 내부 스윙 저감에 효과를 가진다.

4. 와류 제거 장치(AVD)의 설계 요인을 흡입관 직경, 흡수정 넓이, 흡입관과 바닥의 간격 그리고 흡입관 중심부와 뒷벽과의 거리로 정하여 형상에 따른 설계 요소를 관계식으로 정리하였다.

5. 본 설계 기법에 의해 제작되어진 AVD가 커튼월(curtain wall), 흐름분배기(flow distributor) 등과 조합되어 각기 다른 흡수정 시험에서 발생하는 수중보텍스와 자유표면 보텍스를 제거하여 흐름 안정화를 검증하였다.



감사의 글

본 논문이 완성되기 까지 세심한 지도와 조언을 아끼지 않으시고 학문의 길을 열어 주신 이영호 지도 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 또한 심사과정을 통해 부족한 논문을 세심하게 다듬어 주신 정재현 교수님, 정형호 교수님, 박권하 교수님께 감사를 드립니다. 아울러 많은 샘플 실험 데이터를 축적하도록 도움을 주신 현대중공업(주)와 효성굿스프링스(주) 관계자분들께 감사를 드립니다.

학부 때부터 많은 도움을 주신 김유택 교수님, 최영도 교수님, 조선기자재센터의 김정환 본부장님, 김범석 박사님, 최종웅 박사님께 감사를 드리며, 박사학위과정 동안 실험실에서 동고동락한 현준, 문오, 낙중, 지훈, 인철, 병하 등 후배님들에게도 감사합니다. 수많은 샘플 시험 장치를 만드시느라 고생하신 전진산업 사장님과 선경아크릴 사장님, (주)신한정공 황영철 부장님께 감사를 드립니다.

끝으로 항상 저에게 사랑과 정성으로 모든 것을 주시는 부모님께 이 논문을 바치며, 언제나 힘이 되어준 누나, 사랑하는 효진, 저에게 힘이 되어준 모든 분들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Tullis J. P., 1979, Modeling in Design of Pumping Pits, *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 105(9), pp.1053-1063.
- [2] Arboleda G. and El-Fadel M., 1979, Effects of Approach Flow Conditions on Pump Sump Design, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 122(9), pp.489-494.
- [3] Sweeney C.E., Elder R.A. and Hay D., 1982, Pump Sump Design Experience: Summary, *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 108(3), pp.361-377.
- [4] Padmanabhan M. and Hecker G.E., 1984, Scale Effects in Pump Models, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 110(11), pp.1540-1556.
- [5] Gamal Abozeid, 1999, Factors Affecting the Formation of Air-Entrainment Vortices at Pump Intakes in Open Channel Flow, *Fourth International Water Technology Conference IWTC99*, Alexandria, Egypt, pp . 287~301.
- [6] Shibata T., Iwano R., Nagahara T. and Okamura T., 2000, A Numerical Method for Predicting the Cavitation Inception of a Submerged Vortex in Pump Sumps, *The Hydraulic Machinery and Systems 20th IAHR Symposium*, CFD-G03.
- [7] Lee T.S., 2001, Visualization of Submerged and Attached Surface Vortices in Pump Sump, *Asian Symposium on Visualization, ASV*, pp.97-99.
- [8] Nagahara T., Sato T. and Okamura T., 2001, "Effect of the Submerged Vortex Caviation Occurred in Pump Suction Intake on Hydraulic

Forces of Mixed Flow Pump Impeller", CAV2001: sessionB8.006.

- [9] Ansar M., Nakato T., 2002, Numerical Simulations of Inviscid Three-dimensional Flows at Single- and Dual-pump Intakes, *Journal of Hydraulic Research* Vol. 40(4), pp. 461~470.
- [10] Nagahara T., Sato T. and Okamura T., 2003, Measurement of the Flow around the Submerged Vortex Cavitation in a Pump Intake by Means of PIV, *Fifth International Symposium on Cavitation*, Cav03-OS-6-011.
- [11] Okamura T., Kamemoto K., 2005, "CFD Simulation of Flow in Model Pump Sumps for Detection of Vortices", *8th Asian International Fluid Machinery Conference*, October 12-15.
- [12] Isbasoiu E.C., Safta C.A., Muntenan T. and Stanescu P., 2005, "Swirling Flows in the Suction Sumps of Vertical Pumps". *Theoretical Approach, Workshop on Vortex Dominated Flows-Achievements and Open Problems Timisoara*, Romania, June 10-11.
- [13] Tokyay T., Constantinescu G., 2006, Investigation of Coherent Structures in Pump Intake Flows by Large Eddy Simulation Model, *International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 2006.
- [14] Songheng L., Silva J.M., Weber L.J. and Pater V.C., 2006, Three-dimensional Simulation of Flows in Practical Water-pump Intakes, *Journal of Hydroinformatics*, doi:10.2166, pp. 111~124.
- [15] Akihiro Wada, 2006, Flow Structure around the Intake of a Vertical Pump, *Journal of Thermal Science*, Vol. 15(2), pp. 121~125.
- [16] Tomayoshi O., Kyoji K. and Jun M., 2007, CFD Prediction and Model Experiment on Suction Vortices in Pump Sump, *The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery*, October 16-19.
- [17] Chen H.X., Guo J.H., 2007, Numerical Simulation of 3-D Turbulent

- Flow in the Multi-intakes Sump of the Pump Station, *Journal of Hydrodynamics* Ser.B, 19(1), pp. 42~47.
- [18] Chen Y.L., Wu C., Ye M. and Ju X.M., 2007, Hydraulic Characteristics of Vertical Vortex at Hydraulic Intakes", *Journal of Hydrodynamics* Ser.B Vol. 19(2), pp. 143~149.
- [19] Shukla S.N., Kshirsagar J.T., 2008, Numerical Prediction of Air Entrainment in Pump Intakes, *Proceedings of the twenty-fourth international Pump Users Symposium*, pp. 29~33.
- [20] Li H.F., Chen H.X., 2008, "Experimental and Numerical Investigation of Free Surface Vortex", *Journal of Hydrodynamics* Vol. 20(4), pp. 485~491.
- [21] Inagaki K., Funaki J. and Hirata K., 2009, Experimental Study on Occurrence-Time Ration Measurements of Air Entrainment in a Suction Sump, *The 6th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows*.
- [22] Bayeul-Laine A.C., Bois G. and Issa A., 2010, Numerical Simulation of Flow Field in Water-pump Sump and Inlet Suction Pipe, *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, 2010.
- [23] Kirst K., Hellmann D.H., Kothe B. and Springer P., 2010, Physical Model Investigation of a Compact Waste Water Pumping Station, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 3(4), pp. 285~291.
- [24] Skerlavaj A., Lipej A., Ravnik J. and Skerget L., 2010, Turbulence Model Comparison for a Surface Vortex Simulation, *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*.
- [25] Shazy A. Shabayek, 2010, Improving Approach Flow Hydraulics at Pump Intakes, *International Journal of Civil & Environmental*

Engineering IJCEE-IJENS Vol. 10(06), pp. 23~31, 2010.

- [26] Chuang W.L., Hsiao S.C., 2011, Three-dimensional Numerical Simulation of Intake Model with Cross Flow, *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, Vol. 23(3), pp. 314~324.
- [27] Lu W., Zhu H., Zhane R. and Yao L., 2011, Hydraulic Performance Analysis and Model Test of a Sump Shared by Two Pumps in a Column, *Seventh International Conference on Natural Computation*, pp. 2108~2111.
- [28] 최종웅, 김정환, 남청도, 김유택, 이영호, 2011, PIV에 의한 흡입수조내 흡입관 주위의 유동특성에 관한 연구, *대한기계학회, 2011년도 추계학술대회 논문집*, B(2011), pp. 563~569.
- [29] Choi J.W., Choi M.S., Kim Y.T. and Lee Y.H., 2001, Flow Patterns of Intakes within a Sump of a Pump Station Model by PIV, *International Conference on Marine Engineering*, pp. 369~375.
- [30] 최종웅, 김정환, 김경엽, 김유택, 이영호, 2002, PIV에 의한 흡입수조내 흡입관 주위의 유동특성에 관한 연구, *유체기계공업학회 유체기계저널*, 제5권 제3호, pp. 33~39.
- [31] Lee Y.H., 2004, Establishment of Design Guideline for the Pump Intake Shape using the Result of Model Test, R&D Report, K-water, 2004.
- [32] 김진영, 정경남, 김휴곤, 김영학, 2005, 펌프 흡입수조 모형시험에서의 수중와에 대한 유동해석, *유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp. 593~597.
- [33] 유체기계공업학회 펌프분과, 한국수자원공사, 2005, Sump 관련 국내 및 국제 규격, *유체기계저널*, 제 8권 제 2호, pp.53~56.
- [34] 유체기계공업학회 펌프분과, 한국수자원공사, 2005, "흡수정에서 발생하는 보텍스현상", *유체기계저널*, 제 8권 제 2호, pp. 49~52.
- [35] 유체기계공업학회 펌프분과, 한국수자원공사, 2005, Anti-vortex device가

설치된 수리모형 시험과 PIV 실험 결과, *유체기계저널*, 제 8권 제 2호, pp. 68~71.

- [36] Lee Y.H., 2006, Vortex Behavior in Pump Intakes at Sump Station and PIV Model Test, *The Japan-Korea Joint Seminar on Particle Image Velocimetry*, pp. 140~154.
- [37] 박상언, 노형운, 2007, 펌프 흡수정내 발생된 보텍스에 대한 CFD 예측, *유체기계저널*, 제 10권 제 4호, pp. 39~46.
- [38] 한국수자원공사, 2007, 펌프장설계, *홍릉과학출판사*.
- [39] 최종웅, 김창구, 임우섭, 최영도, 이영호, 2008, CFD에 의한 펌프장의 다중 흡입관 주위의 유동해석, *유체기계공업학회 2008 유체기계 연구개발 발표회*, pp. 581~586.
- [40] 최종웅, 최영도, 임우섭, 이영호, 2009, 다중 흡수정을 갖는 펌프장 모델의 유동균일성 해석, *유체기계공업학회 유체기계저널*, 제 12권 제 4호, pp. 14~22.
- [41] Choi J.W., Choi Y.D., Kim C.G. and Lee Y.H., 2010, Flow Uniformity in a Multi-intake Pump Sump Model, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(7), pp. 1389~1400
- [42] Kang W.T., Shin B.R., 2011, An Investigation of Surface Vortices Behavior in Pump Sump, *한국전산유체공학회 2011년도 춘계학술대회*, pp. 592~595, 2011.
- [43] 최윤환, 박영규, 이규명, 이연원, 2011 다상유동을 적용한 섬프장 주위 보텍스 거동에 대한 연구, *대한기계학회 2011년도 춘계학술대회 논문집*, pp. 148~150.
- [44] 최종웅, 2012, *와류방지장치(AVD)를 설치한 펌프장 흡수정의 유동특성 및 사류펌프의 성능해석에 관한 연구*, 박사학위논문. 부산;한국해양대학교.
- [45] Kim C.G., Choi Y.D., Choi J.W., and Lee Y.H., 2012, A study on the

effectiveness of an anti vortex device in the sump model by experiment and CFD, *26th IAHR Symposium*

- [46] ANSI/HI 9.8, 2012, *American National Standard for Pump Intake Design*, Hydraulic Institute, Parsippany, New Jersey.
- [47] JSME Standard S004-1984, 1984, Standard Method for Model Testing the Performance of a Pump Sump", *The Japan Society of Mechanical Engineers*
- [48] ANSYS-CFX13 Manual, 2010, ANSYS

