



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](#)

공학석사 학위논문

해저지반 열전도율 산정 및 다층지반의
열전도율을 고려한 해저배관의
총괄열전달계수 식 제안

Experimental and Numerical Method for Thermal Conductivity
of Offshore Sediment and Proposed OHTC Formula for Offshore
Pipelines Taking Multi-layered Sediment



지도교수 서영교

2018년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

박동수

본 논문을 박동수의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 하 승 현 (인)

위원 공학박사 최 경 식 (인)

위원 공학박사 서 영 교 (인)

2017년 00월 00일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
초록	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	2
1.2.1 해저지반 열전도율 산정	2
1.2.2 다층지반을 고려한 총괄열전달계수식 제안	3
제 2 장 해저지반 열전도율 산정 실내모형실험	5
2.1 실내모형실험 방법	5
2.1.1 실내모형실험 장치	5
2.1.2 실내모형실험 측정 장비	7
2.1.3 실내모형실험 방법	8
2.1.4 실내모형실험 시료	10
2.2 실내모형실험 결과	12
2.2.1 혼합시료 열전도율 결과	12
2.2.2 보링시료 열전도율 결과	18
제 3 장 해저지반 열전도율 산정 유한요소해석 수행결과 및 분석	20
3.1 유한요소해석 타당성 검토	20
3.2 유한요소해석 방법	22
3.2.1 모델링 및 격자생성	23
3.2.2 유한요소해석 지배방정식	24
3.2.3 유한요소해석 초기조건 및 경계조건	25
3.2.4 유한요소해석 항목 및 재료 물성치	25

3.3	실내모형실험 및 유한요소해석 결과비교 및 분석	26
3.3.1	유한요소해석 및 실내모형실험 결과	26
3.3.2	유한요소해석 및 실내모형실험 결과 비교	27
제 4 장	다층지반의 열전도율을 고려한 총괄열전달계수식 제안	30
4.1	총괄열전달계수 이론식 검토	30
4.1.1	총괄열전달계수 개념	30
4.1.2	매립된 해저배관의 총괄열전달계수 이론식	30
4.2	다층지반 열전도율 적용 이론 및 식 제안	36
4.2.1	Fourier의 열전도법칙	36
4.2.2	해저지반 등가 열전도율 산정	38
4.2.3	다층지반을 고려한 총괄열전달계수 계산식	39
제 5 장	유한요소해석을 통한 제안 식 검증	42
5.1	유한요소해석 방법	42
5.1.1	유한요소해석 방법	42
5.1.2	유한요소해석 지배방정식	44
5.1.3	유한요소해석 초기조건 및 경계조건	46
5.1.4	수치해석 결과를 이용한 총괄열전달계수 계산 이론	48
5.2	유한요소해석 케이스	49
5.2.1	해석케이스 1 : High Biot number	50
5.2.2	해석케이스 2 : Intermediate Biot number	51
5.2.3	해석케이스 3 : Low Biot number	52
제 6 장	유한요소해석 수행결과 및 분석	53
6.1	유한요소해석 타당성 검토	53
6.2	유한요소해석 결과 및 제안 식 계산결과 비교분석	55
6.2.1	해석케이스 1 : High Biot Number	55
6.2.2	해석케이스 2 : Intermediate Biot Number	58
6.2.3	해석케이스 3 : Low Biot Number	61

제 7 장 결 론 64

Nomenclature 66

참고문헌 68



List of Tables

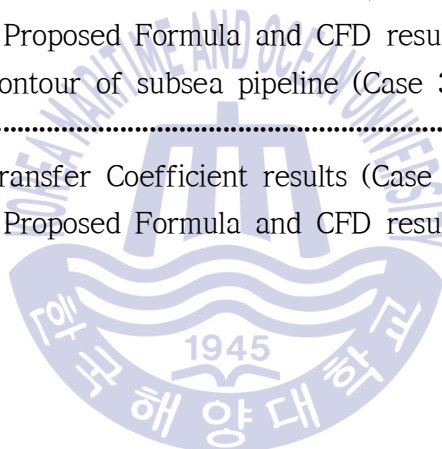
Table 1	Density and thermal conductivity of pipe	7
Table 2	The specifications of thermal imaging camera (T335/FLIR)	7
Table 3	Classification of mixed samples	11
Table 4	Classification of samples obtained by boring	12
Table 5	Specific heat Classification of samples	25
Table 6	Overall Heat Transfer Coefficient Formulas	32
Table 7	Coefficients of turbulent model	45
Table 8	Typical Biot number and OHTC by Type of pipeline	49
Table 9	Properties of pipe and soil layers for case 1	50
Table 10	Properties of pipe and soil layers for case 2	51
Table 11	Properties of pipe and soil layers for case 3	52



List of Figures

Fig. 1 Hazards of Flow assurance for subsea pipeline(wax and hydrate)	1
Fig. 2 Thermal measurement equipments(needle probe, guarded hot plate method)	3
Fig. 3 Research trend of OHTC Formulas	4
Fig. 4 Plane view of test box(y-z plane, x-y plane)	6
Fig. 5 Feature of Thermal imaging camera (T335/FLIR)	8
Fig. 6 Point of 'r' and variables in equation of 'Q'	9
Fig. 7 Particle size distribution curve of boring samples	10
Fig. 8 Feature of Picture and Thermal image of 'A' Samples	13
Fig. 9 Feature of Picture and Thermal image of 'B' Samples	14
Fig. 10 Feature of Picture and Thermal image of 'C' Samples	15
Fig. 11 Temperature distribution of Sample A and B	16
Fig. 12 Temperature distribution of Sample C and Boring sample	17
Fig. 13 Feature of Picture and Thermal image of Boring Samples	18
Fig. 14 Thermal Conductivity of Samples	19
Fig. 15 Result of A40 Sample; Compared with Model Test with Numerical analysis	20
Fig. 16 Result of A50 Sample; Compared with Model Test with Numerical analysis	21
Fig. 17 Result of A60 Sample; Compared with Model Test with Numerical analysis	21
Fig. 18 Boundary conditions of numerical model	22
Fig. 19 Mesh for numerical analysis	23
Fig. 20 Mesh for numerical analysis	26
Fig. 21 Steady state temperature at 'r'	26
Fig. 22 Temperature distribution of Sample A and B	28
Fig. 23 Temperature distribution of Sample C and Boring samples	29
Fig. 24 Thermal resistances of a subsea pipeline	31
Fig. 25 Angle(exposed surface) of a subsea pipeline	31
Fig. 26 Feature of heat transfer through a multi-layered plate	37
Fig. 27 Equivalent thermal conductivity of multi-layered plate	37

Fig. 28	Characteristic of numerical model	42
Fig. 29	Grid for numerical analysis	43
Fig. 30	Boundary conditions of numerical model	46
Fig. 31	Organization of multi-layered soil & Burial depth	47
Fig. 32	Comparison between Proposed Formula and CFD results	53
Fig. 33	Error between Proposed Formula and CFD results by Burial depth ..	54
Fig. 34	Temperature Contour of subsea pipeline(Case 1 : High Biot Number)	55
Fig. 35	Overall Heat Transfer Coefficient results (Case 1)	56
Fig. 36	Error between Proposed Formula and CFD results (Case 1)	57
Fig. 37	Temperature Contour of subsea pipeline(Case 2 : Intermediate Biot Number)	58
Fig. 38	Overall Heat Transfer Coefficient results (Case 2)	59
Fig. 39	Error between Proposed Formula and CFD results (Case 2)	60
Fig. 40	Temperature Contour of subsea pipeline (Case 3 : Low Biot Number)	61
Fig. 41	Overall Heat Transfer Coefficient results (Case 3)	62
Fig. 42	Error between Proposed Formula and CFD results (Case 3)	63



Experimental and Numerical Method for Thermal Conductivity of Offshore Sediment and a Study of OHTC for Offshore Pipelines Taking Thermal Conductivities of Multi-layered Sediment into Consideration

Dong Su Park

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Subsea pipelines are designed to transport mixtures of oil, gas and their associated impurities from the wellhead that can be in excess of approximately as high as 100°C temperature, while the external temperature maybe in the range of 5°C . Heat can be lost from the subsea pipeline which contains high temperature fluid to the surrounding environment. It is important that the pipeline must be designed to ensure that the heat loss is small enough to maintain flow assurance, unwanted deposition of hydrate and wax, which occurs at a critical temperature of about 40°C . Therefore it is essential to know heat loss of subsea pipeline in various circumstance. This paper presents thermal conductivity of offshore sediments using laboratory model test and numerical analysis for

various soil samples. After calculate thermal conductivities, this paper propose a OHTC(Overall heat transfer coefficient) formula considering multi-layered soil using calculated thermal conductivity of soil samples for more precise OHTC estimation.

KEY WORDS: Thermal conductivity 열전도율; Thermal imaging 열화상 카메라; Heat loss 열손실; Multi-layered soil 다층지반; OHTC(Overall Heat Transfer Coefficient) 총괄열전달계수; Heat transfer analysis 열전달해석.



해저지반 열전도율 산정 및 다층지반의 열전도율을 고려한 해저배관의 총괄열전달계수 식 제안

박 동 수

한국해양대학교 해양공학과

초 록

해저배관은 오일, 가스 그리고 불순물의 혼합물을 유정에서 운송할 수 있도록 고안되었으며, 100°C 전후의 높은 온도의 유체를 수송한다. 하지만 높은 온도의 수송유류와 반대로 해저배관을 둘러싸고 있는 주변 환경의 온도는 5°C 정도의 낮은 온도를 유지하고 있으며 이로 인해 해저배관은 열손실이 발생한다. 따라서 해저배관의 열손실을 최소화 하는 것 즉, 수송유류가 왁스(Wax)나 고상염(Hydrate) 같은 침전물이 생성되는 온도인 40°C 이하로 떨어지는 것을 방지해 유동안정성을 확보하는 것은 해저배관 설계에 있어 가장 중요한 부분이다. 그러므로 해저배관 주변 환경 즉 해수, 해저지반의 영향에 의한 해저배관의 열손실의 정도를 나타내는 총괄열전달계수를 계산하여 설계에 반영하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 실내모형실험 및 CFD해석의 검토를 통해 해저지반의 열전도율을 여러 가지 샘플을 통해 산정하였으며,

산정된 열전도율을 토대로 다층지반을 구성하여 다층지반의 다양한 열전도율을 고려한 해저배관의 총괄열전달계수(OHTC)식을 제안하였다.

KEY WORDS: Thermal conductivity 열전도율; Thermal imaging 열화상 카메라; Heat loss 열손실; Multi-layered soil 다층지반; OHTC(Overall Heat Transfer Coefficient) 총괄열전달계수; Heat transfer analysis 열전달해석.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

해양플랜트의 성장과 심해저 자원의 채굴기술의 향상으로 심해저의 석유 및 천연가스 수송을 위한 해저배관의 수요가 증가하며 이에 따라 수송 시 열운용(Thermal management) 및 유동안정성(Flow assurance) 문제가 연구 주제로 부상하고 있다. 해저배관의 경우 100℃ 전후의 석유 및 천연가스를 운송하게 되는데 5℃ 전후 낮은 온도의 해수 및 해저지반이 해저배관의 열손실을 가져온다. 해저배관은 가동 중 온도가 40℃(극한온도) 이하로 떨어지게 되면 Fig. 1과 같은 고상염(Hydrate) 및 왁스(Wax) 등으로 운용을 일시적으로 중지하는 섯다운(shut down)을 실시하며 이는 엄청난 경제적 손실을 가져온다(Xu et al., 2010).

열손실에 의한 고상염 및 왁스생성을 예방하기 위해서는 해저배관의 총괄열 전달 계수를 토대로 해저배관의 단열설계를 실시해야 한다. 단열설계방법으로는 배관 외벽에 Solid polypropylene, polypropylene foam 그리고 polyurethane을 다층으로 제작하는 PIP(Pipe-in-pipe) System, 배관에 열선을 설치해 직접적으로 열을 가하는 DEH(Direct Electric Heating) System 등 여러 가지 단열방법이 연구 및 개발되고 있다(Bai & Bai, 2005).

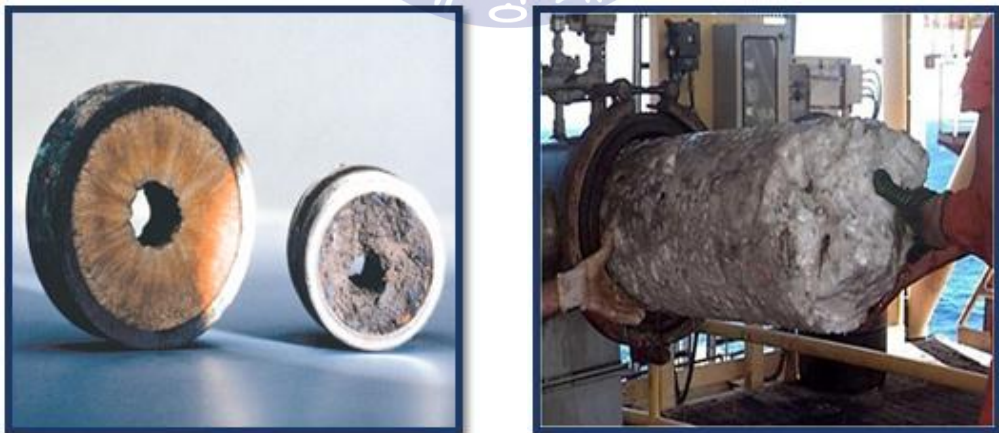


Fig. 1 Hazards of Flow assurance for subsea pipeline(wax and hydrate)

그러나 경제적이며 보편적인 단열방법은 Trenching & Backfilling 방법으로, 해저지반을 굴착하여 배관을 놓은 후 그 위를 뒤채움 흙(Backfill)으로 덮는 것이다. 따라서 매립된 해저배관의 열손실 즉 배관의 총괄열전달계수 계산에서는 해저배관이 매립된 해저지반의 열전도율을 파악하는 것이 중요하며, 해저지반은 다른 열전도율로 구성된 다층지반으로 구성되어 있으므로 다층지반의 열전도율을 적용한 총괄열전달계수 계산이 필요하다.

1.2 연구 동향

1.2.1 해저지반 열전도율 산정

해저배관의 경우 육상배관과 달리 기존 매립지역 흙을 뒤채움 흙으로 사용하는 경우가 많으므로 해저지반 특성에 맞는 시료의 열전도율을 정확히 추정하는 것이 중요하다. 흙의 열전도율 산정 연구로 차장환등 (2008)은 국내 16개 기상 관측소에서 채취한 토양 시료에 대한 물성 실험을 통하여 토양의 공극률 및 함수비가 열전도도에 미치는 영향을 검토하였으며, 김유성 (2011)은 지중송전관로 뒤채움 흙의 열 저항 특성을 연구하였다. 또한 김학승과 이장근 (2011)는 포화된 카올리나이트를 압밀에 따라 연속적으로 측정하여 건조밀도와 함수비 변화에 따른 열전도계수의 관계를 연구하였다. 하지만 위 연구들은 육상 시료에 국한되어있으며 해저지반은 함수비특성 및 여러 조건이 육상지반과 다르기 때문에 해저지반의 열전도율 추정에 어려움이 있다.

열전도율 측정방법도 다양하게 발전되어왔다. Fig. 2와 같이 열전도율 측정방법에는 탐침법, Shannon and Wells법, Rhometer법, 보호열판법등이 있으며(김유성, 2011) 이들 중 가장 보편적인 측정방법은 탐침법이다(Mitchell & Kao, 1978). 하지만 탐침법은 토양의 균열, 수분함량 변화 등의 영향으로 인한 한계가 있지만 열화상 카메라를 이용하는 방법은 이와 같은 문제를 보완하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다(Thusyanthan, 2011). 따라서 본 논문에서는 열화상 카메라를 사용한 모형실험을 통해 다양한 시료의 열전도율을 측정하였으며 측정된 열전도율을 토대로 해저배관의 총괄열전달계수 계산에 사용하였다.



Fig. 2 Thermal measurement equipments(needle probe, guarded hot plate method)

1.2.2 다층지반을 고려한 총괄열전달계수식 제안

경제적이며 보편적인 단열방법인 Trenching & Backfilling 방법을 적용한 해저 배관의 열손실에 관한 연구는 지속적으로 진행되어 왔으며 연구에는 수치해석을 통한 매립된 해저배관의 환경에 따른 온도분포에 대한 연구(Bai and Niedzwecki, 2014)가 있다. 또한 Fig. 3과 같이 매립된 해저배관의 총괄열전도율 이론식 관한 연구가 진행되어왔다. 이론식들에는 해수와 해저지반의 경계면 및 해저배관의 외벽 면이 등온의 조건 즉 디리클레(Dirichlet) 경계조건을 가정한 Carslaw & Jaeger 이론식(Carslaw & Jaeger, 1959)과 해수와 해저지반의 경계면은 Carslaw & Jaeger 이론식과 같이 디리클레 경계조건을 가정하지만 해저배관 외벽은 혼합(Mixed) 경계조건을 가정하는 Morud & Simonsen 이론식(Morud & Simonsen, 2007)이 있다. 또한 해수 및 해저지반의 경계면과 해저배관 외벽면의 경계조건을 모두 혼합 경계조건으로 가정한 Ovuworie 이론식(Ovuworie, 2010)과 Ovuworie 이론식을 일부 수정한 Zakarian 이론식(Zakarian et al., 2012)이 있다. 최근 연구로는 실내모형실험(Oh et al., 2014)에 의해 Zakarian 이론식이 검증되었다.

지금까지 제안되었던 이론식들은 총괄열전달계수 계산을 위한 지반을 열전도율이 일정한 단일지반으로 간주하였다. 하지만 실제 해저지반은 다층지반으로 구성되어있으며 해저면 에서부터 아래로 깊이가 증가함에 따라 함수비등 여러 가지 요인으로 인하여 열전도율이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 실제 해저지반과 같은 각 지반 층의 열전도율이 다른 다층지반에 해저배관이 매립되었을 때의 총괄열전달계수를 Zakarian 이론식(Zakarian et al., 2012)을 변형하여 다층지반을 고려 할 수 있게 제안하고자 하며 선행연구로 도출된 열전도율을 토대로 다층지반을 구성하여 다층지반에 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 제안식의 계산결과 및 유한요소해석 결과를 비교하여 검증하였다.

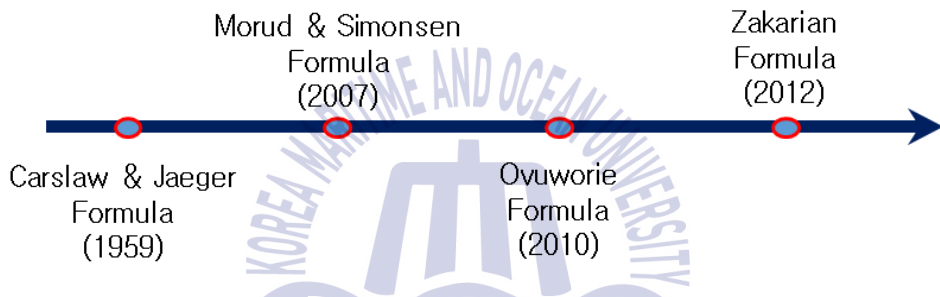


Fig. 3 Research trend of OHTC formulas

제 2 장 해저지반 열전도율 산정 실내모형실험

2.1 실내모형실험 방법

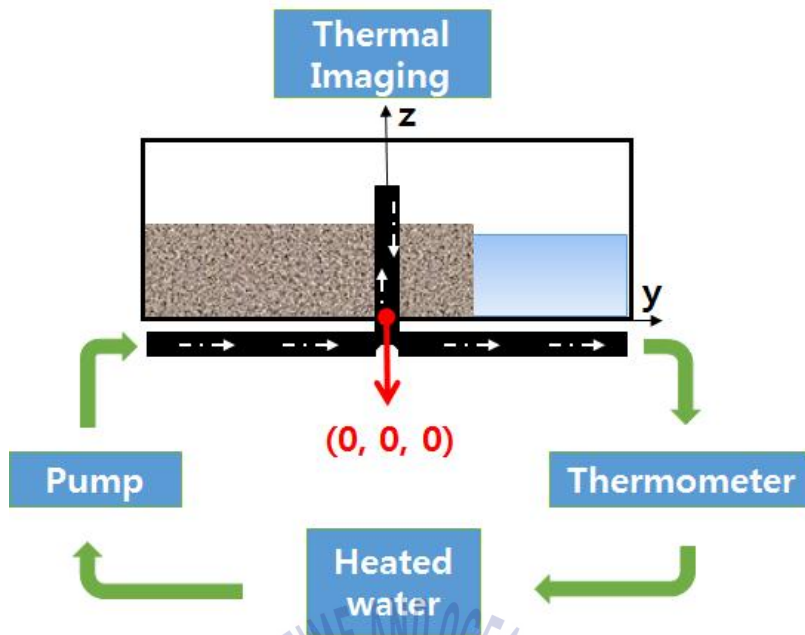
해저배관 뒤채움 흙의 열전도율을 실험적으로 구하기 위하여 모형수조에 해저지반, 해저배관, 뒤채움 흙 그리고 해수를 배치시킨 후 해저배관 내 40°C 물을 순환시켜 모델의 온도분포가 정상상태일 때 열화상 카메라를 사용해 열화상 이미지를 촬영하여 이미지의 온도분포 결과를 토대로 열전도율을 구하였다.

2.1.1 실내모형실험 장치

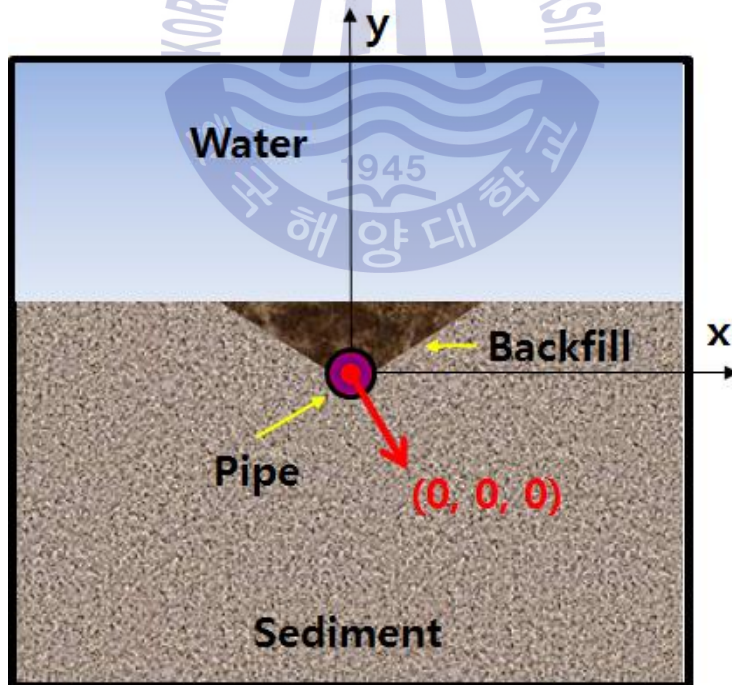
뒤채움 흙의 열전도율을 실험적으로 구하기 위하여 Trenching & Backfilling 시공이 끝난 해저배관 단면을 관찰할 수 있게 매립된 해저배관의 단면을 형상화한 실험 장치를 Fig. 4와 같이 구축하였다. 이때 장치는 해수를 형상화한 Water, 해저지반을 묘사한 Sediment, 뒤채움 흙을 Backfill 그리고 해저배관은 Pipe로 나타내었고, 사용한 해저배관의 물성치는 Table 1과 같다.

가로 0.5m 및 세로 길이 0.5m의 아크릴 수조 정 중앙에 해저배관을 위치시켰다. 이는 모형실험에서 뒤채움 흙이 아크릴판의 영향을 받지 않는 최소거리를 확보하기 위함이다. 뒤채움 흙의 높이는 0.03m, 해수의 높이는 0.02m로 설정하였다. 또한 해수의 가로 및 세로의 길이는 각각 0.5m, 0.16m이며 뒤채움 흙의 가로길이는 0.25m로 삼각형 모형으로 배치하였다. 실험을 위한 해저배관의 위치는 해저배관이 200% 매립된 경우를 가정하여 설정하였으며 매립정도는 식 (1)로 산정하였다(Zakarian et al., 2012).

$$\text{Burial depth (\%)} = \left(\frac{H}{D_0} + \frac{1}{2} \right) \times 100 \quad (1)$$



(a) Apparatus of model test



(b) Top view of the test box

Fig. 4 Plane view of test box(y-z plane, x-y plane)

Table 1 Density and thermal conductivity of pipe

Material	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/mK)
Steel	7860	60

2.1.2 실내모형실험 측정 장비

뒤채움 흡의 온도를 측정하기 위한 장비로는 FLIR 사의 제품으로 T335 모델을 사용하였다. 모델의 형상은 Fig. 5와 같으며 모델의 특성은 Table 2와 같다. 본 실험에서는 열화상 카메라를 시료로부터 수직으로 1.1m 위에서 촬영하였으며 이때 수평계를 이용하여 수평을 유지함과 동시에 열화상 카메라의 레이저 기준점을 이용하여 Fig. 4에서 해저배관 중심좌표를 $(x, y, z) = (0m, 0m, 0m)$ 이라고 한다면, 기준점을 $(0m, 0.03m, 0.03m)$ 로 통일하여 정확도를 높였다.

Table 2 The specifications of thermal imaging camera (T335/FLIR)

Classification	Detail of specification
Field of view(FOV) / Minimum focus	$25^\circ \times 19^\circ$ /0.4m
Thermal sensitivity / NETD	50 mK @ +30°C
Focal Plane Array (FPA)	Uncooled microbolometer
IR resolution	320×240 pixels
Spectral range	7.5 to 12 μ m
Object temperature	-20°C ~ +650°C
Accuracy	$\pm 2^\circ$ C or $\pm 2\%$ of reading
Measurement analysis	5 spotmeters, 5box area, Auto hot or cold spotmeter markers within area



T335 

Fig. 5 Feature of Thermal imaging camera (T335/FLIR)

2.1.3 실내모형실험 방법

해저지반은 카울리나이트 점토로 통일하였으며 해저배관에 40°C의 일정한 온도의 물을 80l/min의 유량으로 펌프를 이용하여 순환시켰다. 이때 해수의 온도는 얼음을 가장자리에 배치해 0°C에 가까운 온도로 유지했다. 여기서 0°C의 온도는 얼음에 의해 일정한 온도를 유지하기 적합하므로 설정하였으며 가장자리 배치는 뒤채움 흡이 받는 얼음에 의한 영향(결빙 등)을 최소화시키기 위함이다. 또한 0°C 물과 5°C 물의 밀도차인 0.0002g/cm³로 그 차이가 미미하므로 밀도차이의 영향은 배제할 수 있다고 판단하였다. 해저배관에 40°C 물을 순환시킨 후 뒤채움 흡의 온도가 변하지 않고 유지되는 정상상태일 때 열화상 카메라를 이용하여 뒤채움 흡의 온도분포를 측정하였다.

열전도율을 측정하기 위해서 첫 번째로 해저배관 입 출구의 온도구배를 식 (2)에 대입해 열 전달율(Q)를 구한다.

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 해저배관 안 유체의 질량유량(mass flow rate), C_p 는 해저배관 안쪽의 물의 비열을 나타낸다. 다음으로 식 (3)에 식 (2)로부터 구한 열 전달율과 열화상이미지로 구한 r , T 를 대입하여 열전도율 k 를 구한다.

$$Q = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3)$$

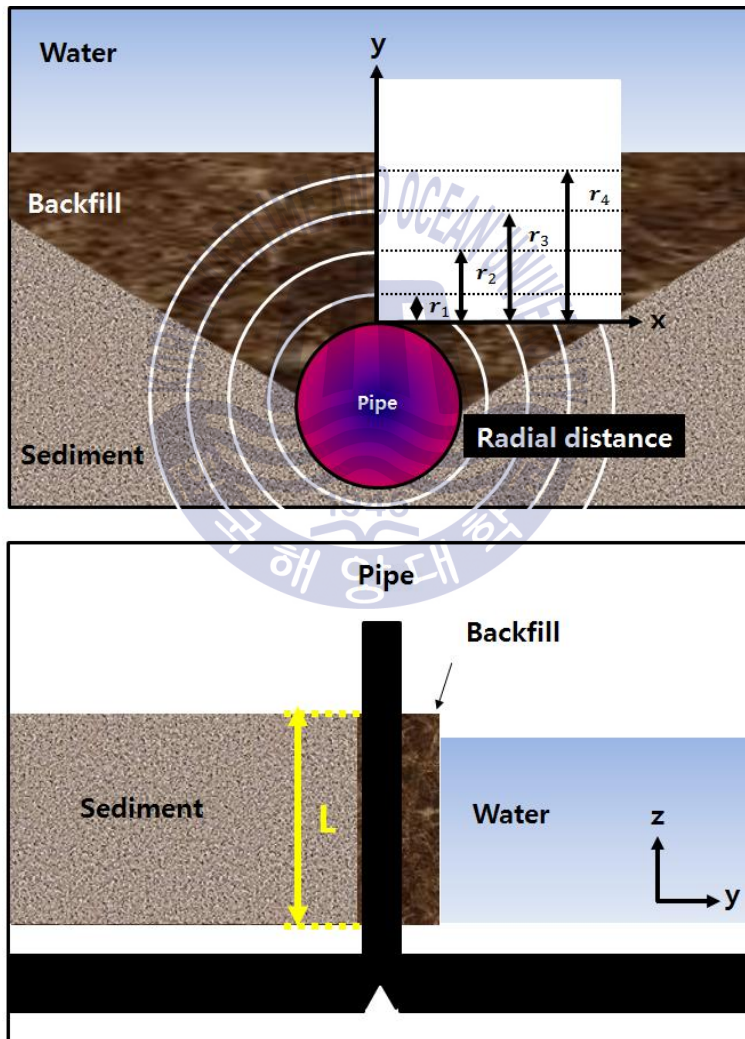


Fig. 6 Point of 'r' and variables in equation of 'Q'

식 (3)에서 r 및 L 은 Fig. 6와 같이 나타난다. 여기서 L 은 해저배관의 길이를 나타내며 r_1, r_2 는 해저배관표면에서부터 해수와 뒤채움 흙의 표면까지의 수직 선상 반경거리를 의미하며 T_2 는 반경거리 r_2 지점의 온도, T_1 은 반경거리 r_1 지점의 온도를 의미한다. 본 연구에서는 총 4곳의 반경거리 즉 $0.001m, 0.1435m, 0.02870m, 0.04305m$ 지점의 온도를 구하여 각 지점의 온도구배를 통해 구한 열전도율을 평균하였다.

2.1.4 실내모형실험 시료

뒤채움 흙을 묘사하기 위하여 카올리나이트와 주문진 표준사를 3가지 종류로 혼합하여 조합 시료에 대한 실험을 수행하였다. 이때 사용된 카올리나이트는 #200체 통과율이 100%였으며, 비중은(G_s) 2.6, 액성한계(LL) 및 소성지수(II)는 각각 80.1%, 48.3%이며, 주문진 표준사의 비중은 2.63, 유효경(D_{10}) $0.3mm$, 균등계수(C_u) 1.93 그리고 곡률계수는(C_c) 1.09이다.

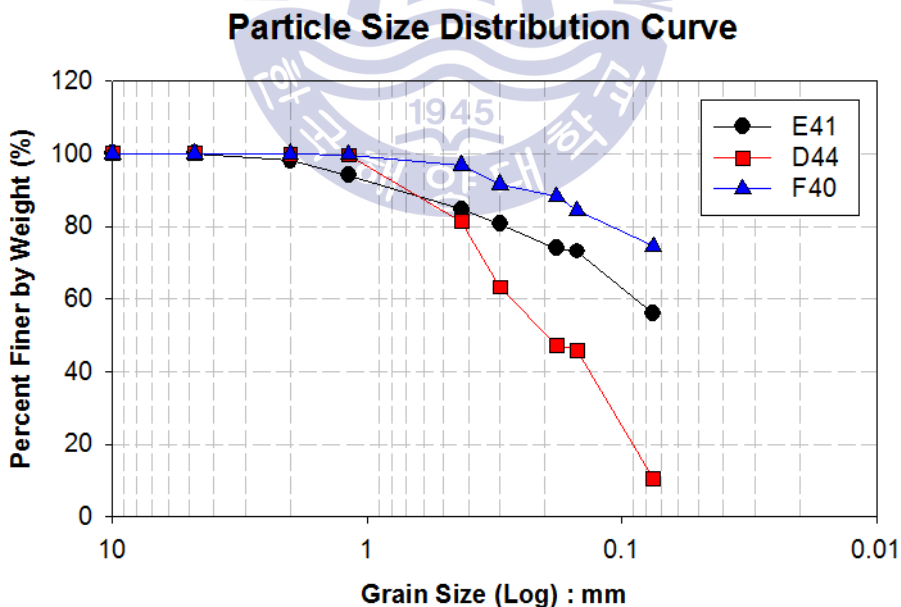


Fig. 7 Particle size distribution curve of boring samples

각 시료들은 함수비 40%, 50% 그리고 60%일 때로 분류하였으며(Table 3), 흙의 전단강도를 실내 베인 테스트 하였을 때 샘플 A40, A50, A60에서 각각 5.9 kPa , 4.2 kPa , 0.9 kPa 을 B40, B50, B60에서 각각 4.4 kPa , 1.2 kPa , 0 kPa 을 그리고 C40에서 1.3 kPa , C50, C60에서 0 kPa 으로 나타났다.

조합 시료와 함께 실제 해저지반에서 채취된 시료를 이용해 실험을 수행 하였으며 시료는 새만금(D44), 시화호(E41), 마산만(F40)의 보링시료를 뒤채움 흙으로 이용하였다. 입도분포곡선은 Fig. 7과 같으며, 통일분류법으로 흙 입자를 점토&실트 및 모래의 함량으로 구분하면 Table 4와 같으며, 분석결과 함수비는 40% 근처의 값을 나타냈고 비중(G_s)은 2.6초반으로 나타났다. 전단강도는 마산만의 경우 4.4 kPa 을 보였으며 나머지 두 시료에서는 0 kPa 에 가까운 수치를 보였다.

Table 3 Classification of mixed samples

Sample	Kaolinite (%)	Standard sand (%)	Water content (%)
A40	100	0	40
A50	100	0	50
A60	100	0	60
B40	80	20	40
B50	80	20	50
B60	80	20	60
C40	60	40	40
C50	60	40	50
C60	60	40	60

Table 4 Classification of samples obtained by boring

Sample	Clay & Silt (%)	Sand (%)	Water content (%)
D44	11	89	44
E41	56	44	41
F40	74	26	40

2.2 실내모형실험 결과

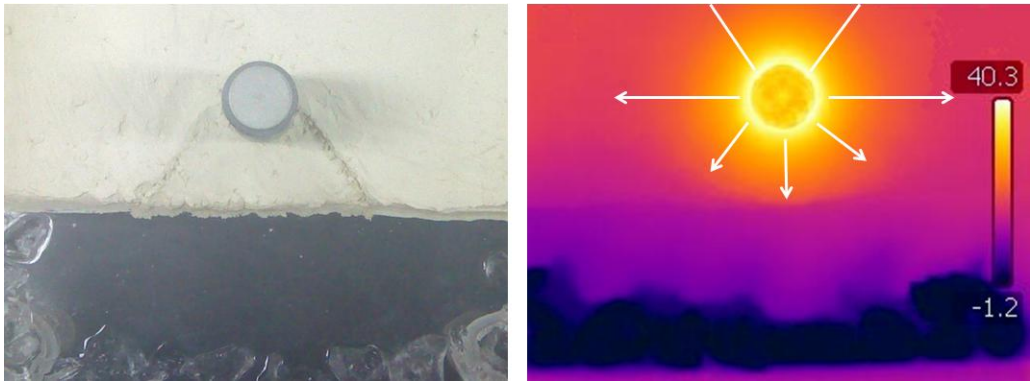
2.2.1 혼합시료 열전도율 결과

모형실험은 대기온도 20℃에서 수행되었으며 배관에 40℃의 물을 20분 동안 순환시켜 모델의 온도가 변하지 않는 정상상태에 이르렀을 때 열화상 카메라를 이용하여 온도분포 사진을 촬영하였다. 실험 도중 공기의 대류에 의한 영향을 최소화하기 위해 실험 시 외부 공기 유입을 차단하였다.

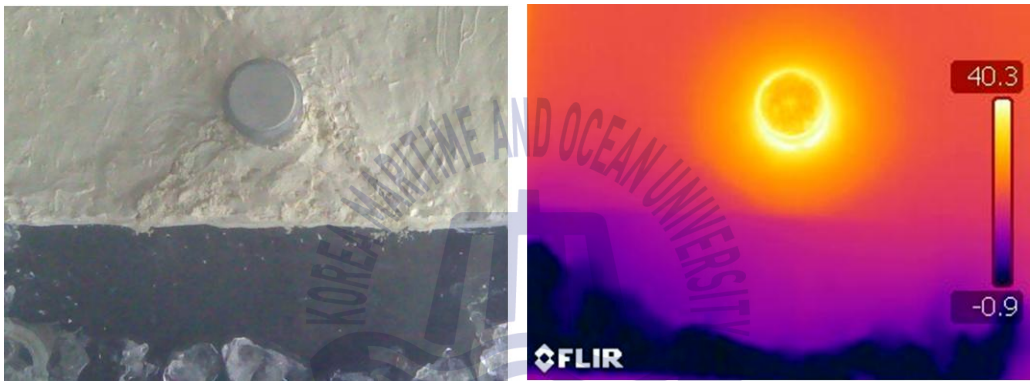
Fig. 8은 A40, A50, A60 시료로 100% 카올리나이트로 구성된 시료에 대한 사진 및 열화상 이미지이다. 여기서 A40은 A그룹의 함수비 40%인 시료를 뜻하며 Fig. 8의 (a)는 화살표와 같이 열이 전도하여 정상상태에 있다는 것을 보여준다.

Fig. 9는 B40, B50, B60 시료에 대한 사진 및 열화상 이미지이며 카올리나이트 80%, 주문진 표준사 20%로 혼합된 시료로 구성되어있다. Fig. 10은 카올리나이트 60%와 주문진 표준사 40%로 혼합된 시료로 구성된 C40, C50, C60에 대한 사진 및 열화상 이미지이다.

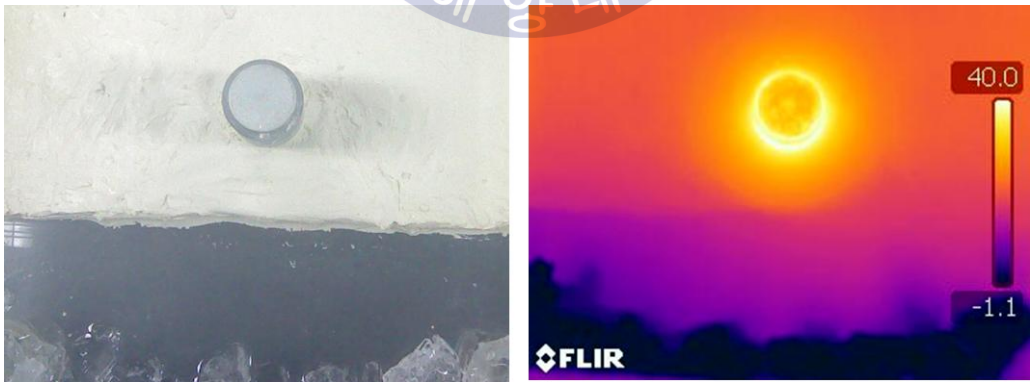
Fig. 11 및 Fig. 12 (a)는 시료 A, B, C에 대한 온도분포 결과를 나타내었으며 이는 각 시료에 대해 세 번의 실험을 통해 나온 온도를 평균한 값이다. 각 시료에 대한 온도결과는 아주 미세한 차이를 나타내었으며 열전도율 계산 시 온도 결과의 10⁻²℃까지 반영하여 나타내었다.



(a) Picture & Thermal image of 'A40'

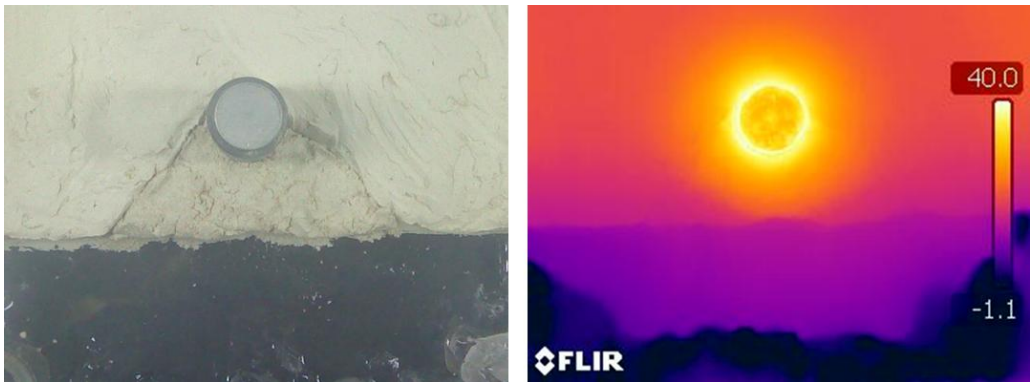


(b) Picture & Thermal image of 'A50'

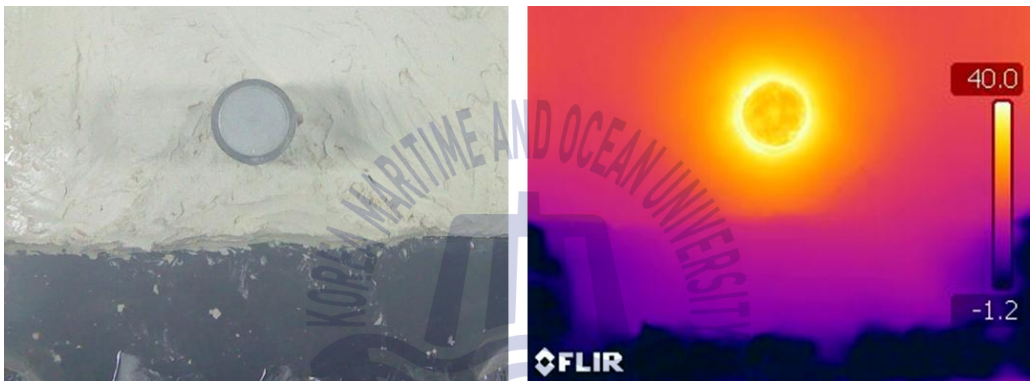


(c) Picture & Thermal image of 'A60'

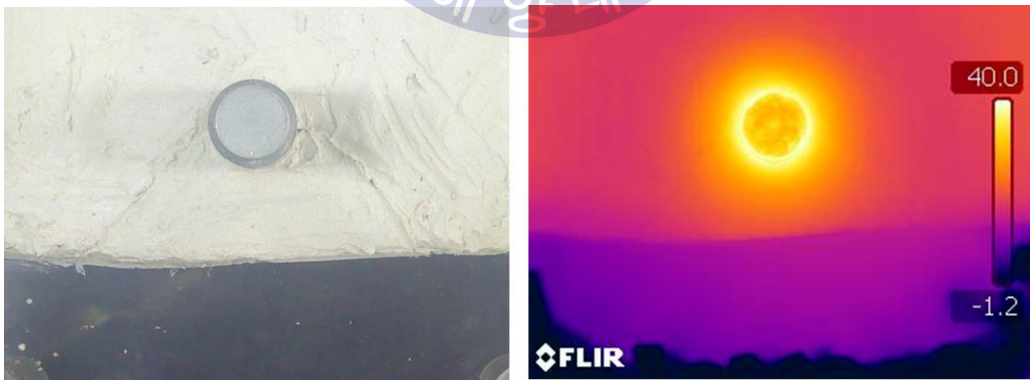
Fig. 8 Feature of Picture and Thermal image of 'A' Samples



(a) Picture & Thermal image of 'B40'

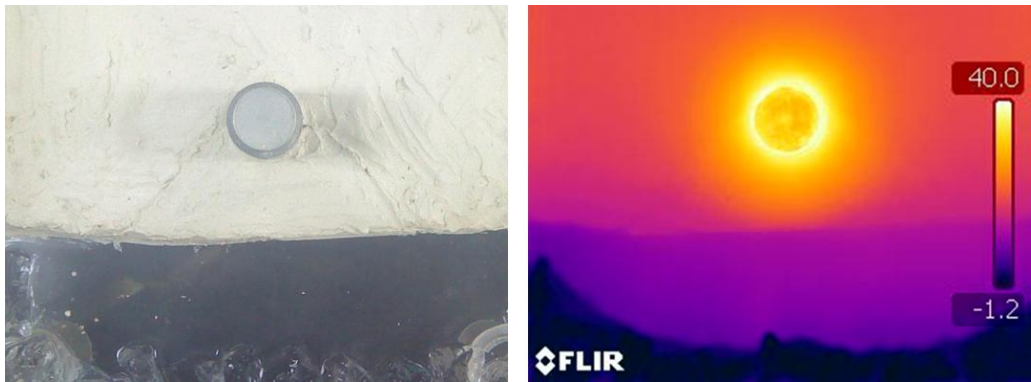


(b) Picture & Thermal image of 'B50'

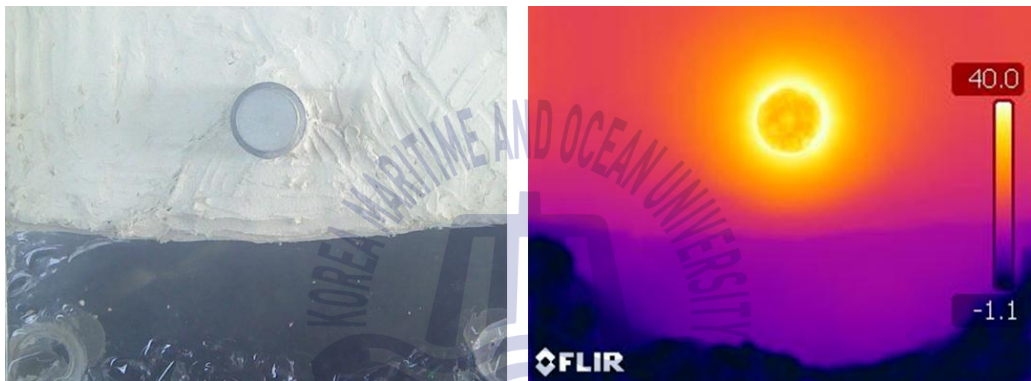


(c) Picture & Thermal image of 'B60'

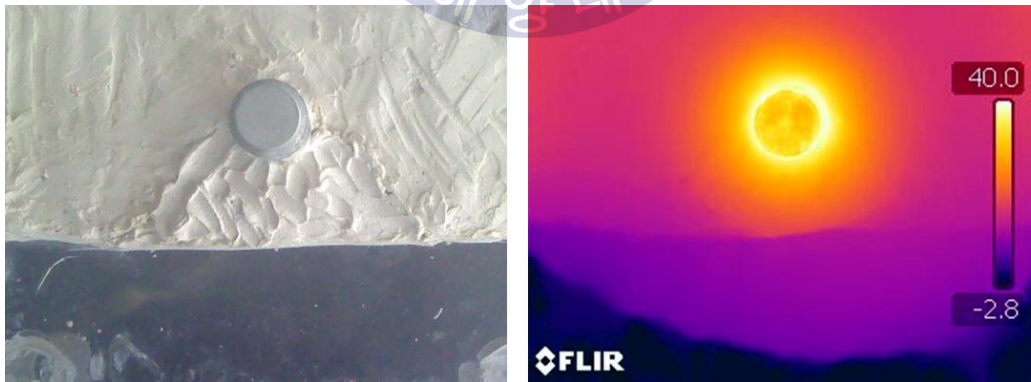
Fig. 9 Feature of Picture and Thermal image of 'B' Samples



(a) Picture & Thermal image of 'C40'

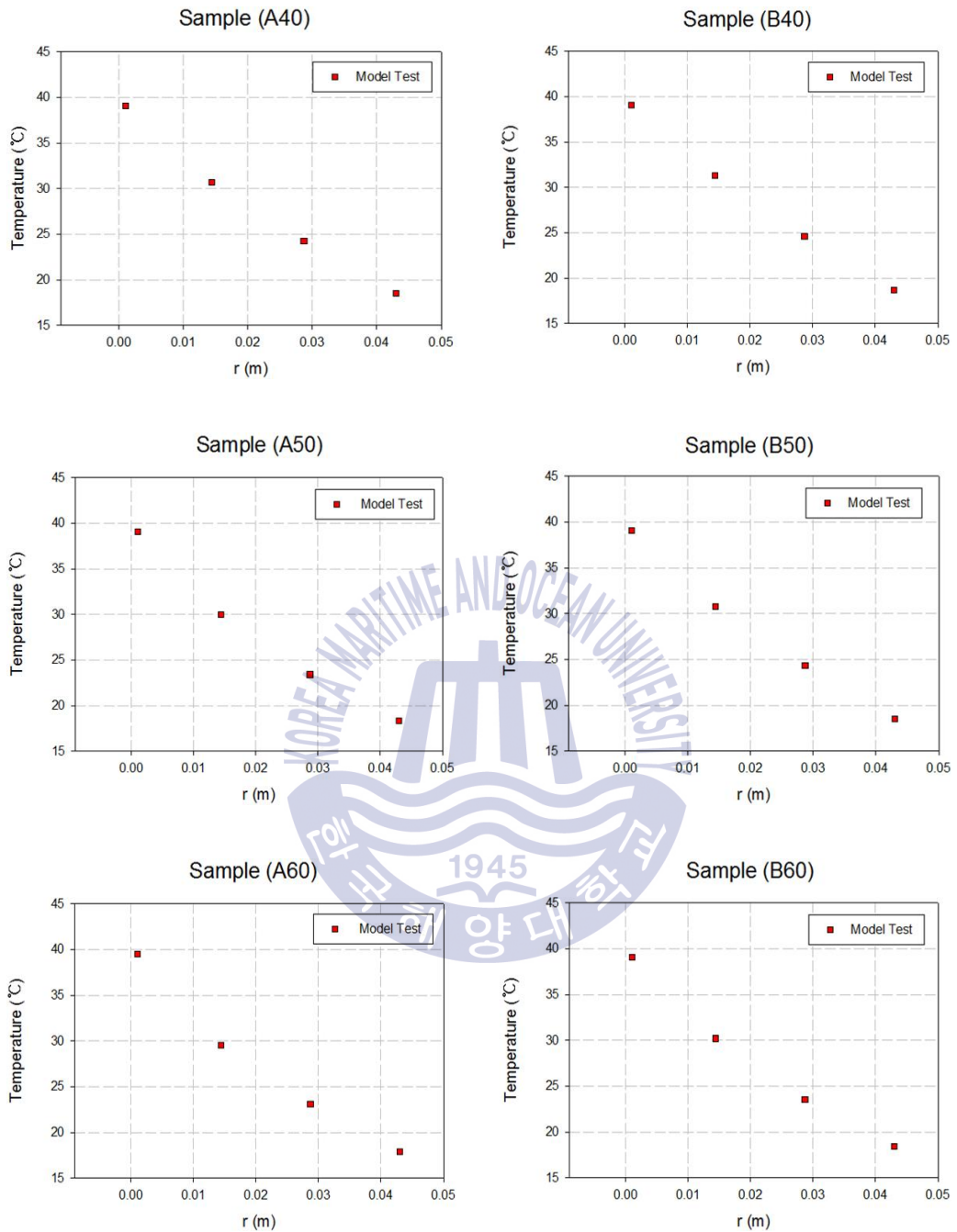


(b) Picture & Thermal image of 'C50'



(c) Picture & Thermal image of 'C60'

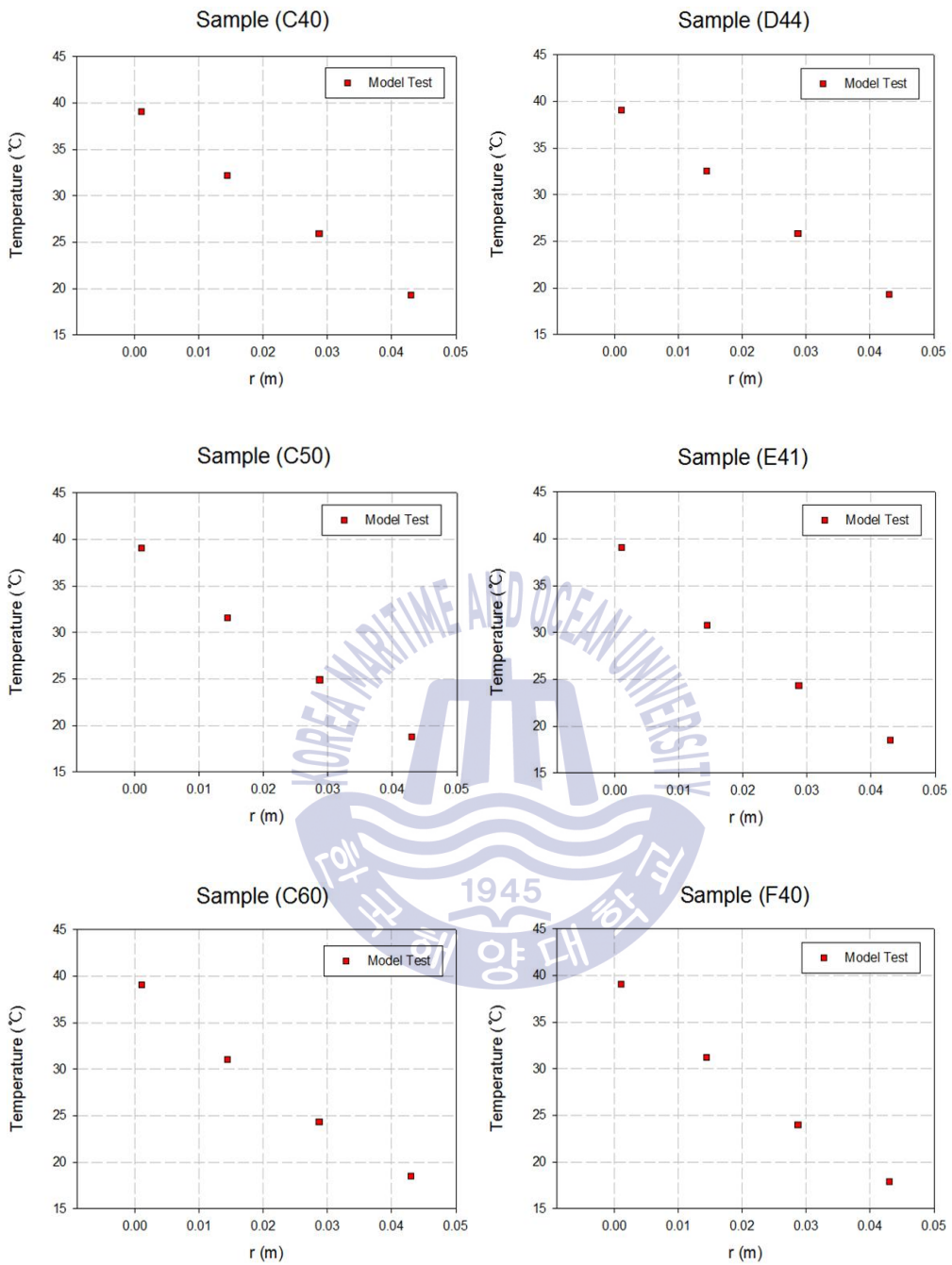
Fig. 10 Feature of Picture and Thermal image of 'C' Samples



(a) Result of Sample A

(b) Result of Sample B

Fig. 11 Temperature distribution of Sample A and B



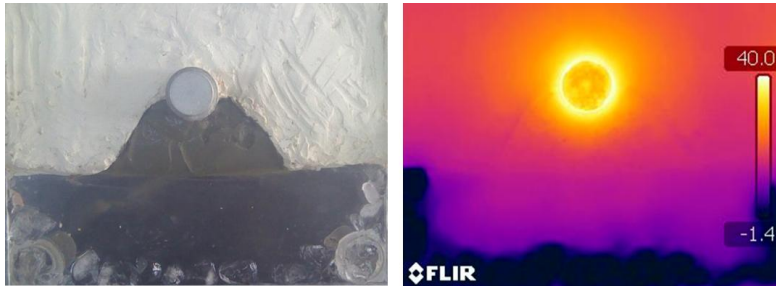
(a) Result of Sample C

(b) Result of Boring Sample

Fig. 12 Temperature distribution of Sample C and Boring sample

2.2.2 보링시료 열전도율 결과

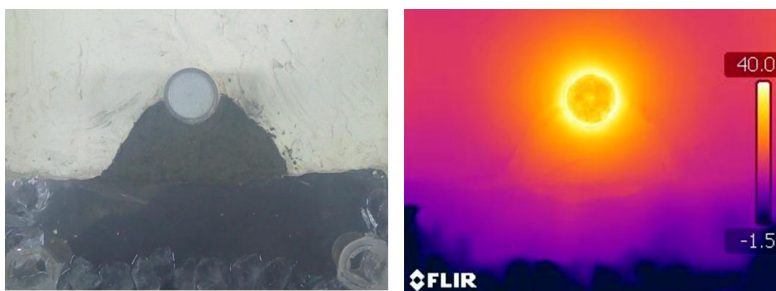
보링시료에 대한 사진 및 열화상 이미지는 Fig. 13와 같다. 혼합시료와는 달리 열전도율 차이에 의해 Sediment로 구성된 카올리나이트와 Backfill로 구성된 보링시료의 경계선을 사진 및 열화상 이미지로 확인 할 수 있다.



(a) Picture & Thermal image of 'D44'



(a) Picture & Thermal image of 'E41'



(a) Picture & Thermal image of 'F40'

Fig. 13 Feature of Picture and Thermal image of Boring Samples

보링시료에 대한 온도분포 결과는 Fig. 12 (b)에 나타내었으며, 혼합시료 및 보링시료의 온도를 이용하여 산정한 열전도율은 Fig. 14으로 알 수 있다. 열전도율은 표준사의 함량이 높아질수록 증가하는 경향을 보였으며, 함수비가 높아질수록 작아지는 경향을 보였다. 보링시료의 경우 함수비가 40%근처인 시료를 대상으로 실험을 수행하였으며 새만금 시료인 D44가 가장 높은 열전도율을 가지는 것으로 확인되었다. 이는 각 시료들이 비슷한 함수비를 가지며 시료를 통일분류법상으로 분류했을 때 모래의 함량이 다른 보링시료에 비하여 큰 이유로 추정된다. 각 샘플들의 모래의 함량은 D44샘플이 89%, E41샘플이 55%, F40샘플이 25%이다.

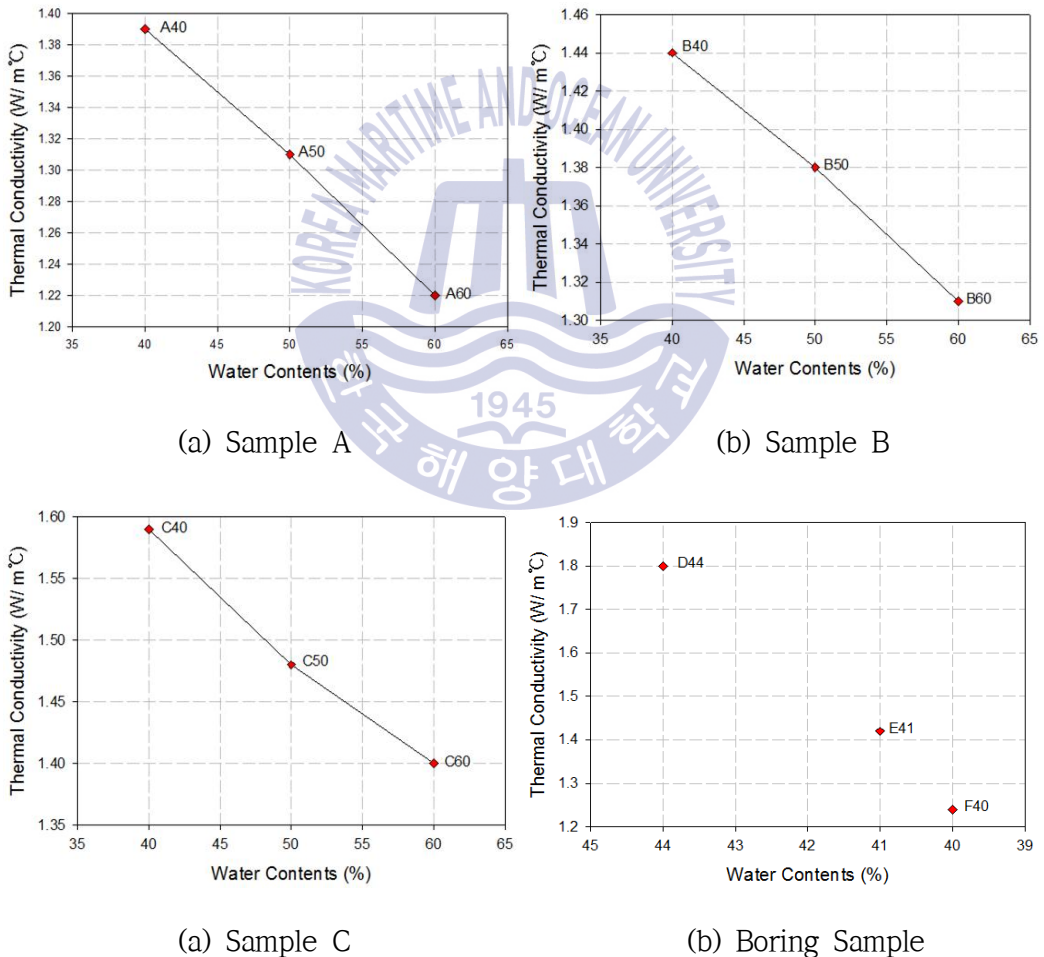


Fig. 14 Thermal Conductivity of Samples

제 3 장 해저지반 열전도율 산정 유한요소해석 수행결과 및 분석

3.1 유한요소해석 타당성 검토

유한요소해석의 타당성을 검토하기 위해 실내모형실험의 시료 A에 대한 온도분포 결과를 토대로 타당성 검토를 실시하였다. 시료 A는 카올리나이트 100%로 구성된 시료이며 함수비 40%, 50% 60%에 대한 경우이다. Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17은 실내모형실험으로 도출된 온도분포 결과와 실내모형실험으로 도출된 열전도율을 사용한 유한요소 해석으로 산출된 온도분포 결과를 비교한 그래프이다. 결과의 오차율은 최대 4%로 나타났다. 결과 중 A50, A60에서 최대오차가 발견되었는데 이는 유한요소 해석에 있어 공극과 같은 변수에 대한 설정이 어렵기 때문이다. 하지만 전체적인 오차는 1.5% 미만으로 신뢰성이 있다고 판단하였다.

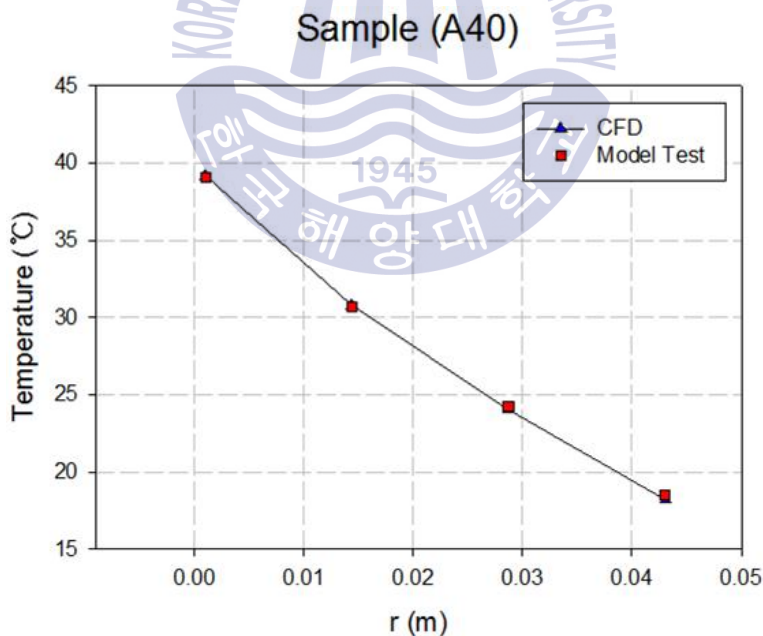


Fig. 15 Result of A40 Sample; Compared with Model Test with Numerical analysis

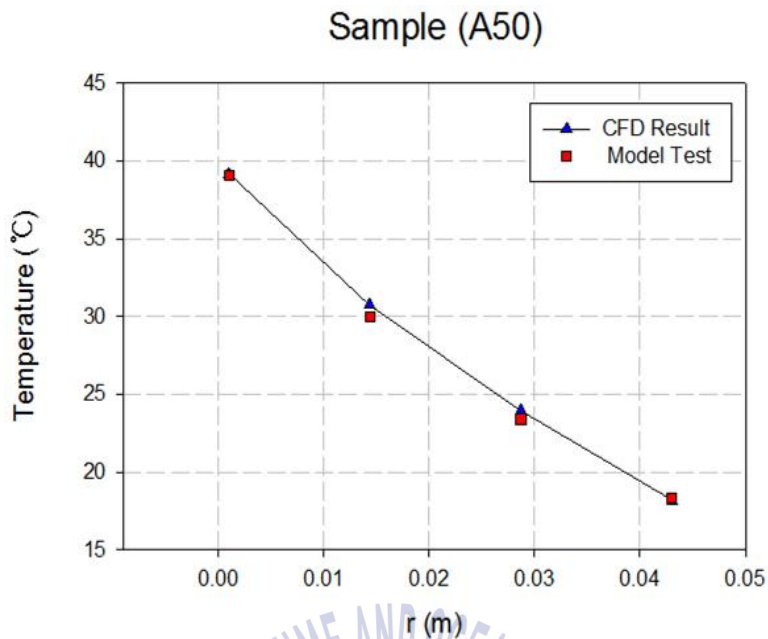


Fig. 16 Result of A50 Sample; Compared with Model Test with Numerical analysis

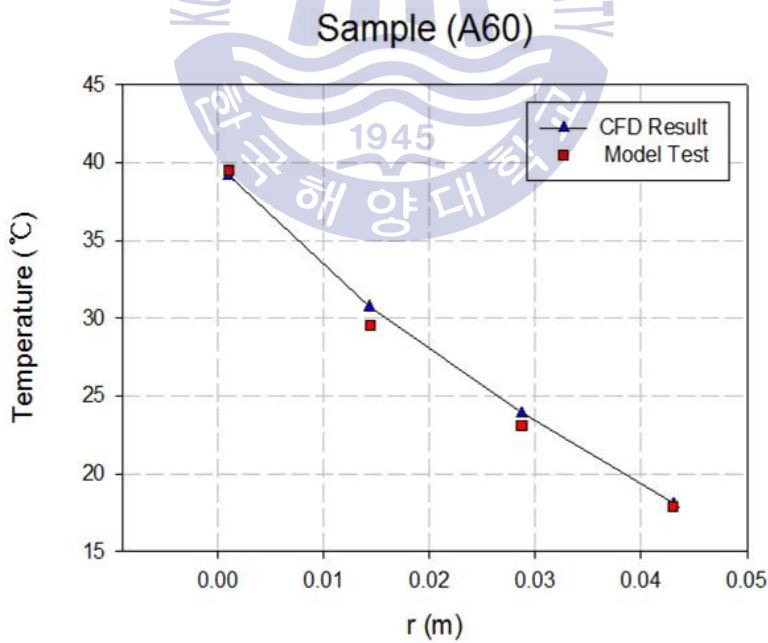


Fig. 17 Result of A60 Sample; Compared with Model Test with Numerical analysis

3.2 유한요소해석 방법

본 모형실험은 열화상 이미지의 온도분포를 이용하여 열전도율을 측정하였다. 온도분포는 측정된 열전도율의 신뢰성 확보의 기준이 되며, 모형실험 결과의 오차 유무를 확인하기 위해 온도분포의 검증이 필요하다.

상용수치해석 프로그램은 측정된 열전도율 사용한 수치해석을 통해 온도분포를 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상용수치해석 프로그램으로 계산된 온도분포와 열화상 이미지로 측정된 온도분포를 비교해 열전도율의 신뢰성을 확보하였다. 상용수치해석 프로그램은 Ansys CFX v13.0을 사용하였으며, 뒤채움 홀의 온도분포가 정상상태에 이르렀을 때의 온도분포를 비교를 하였다.

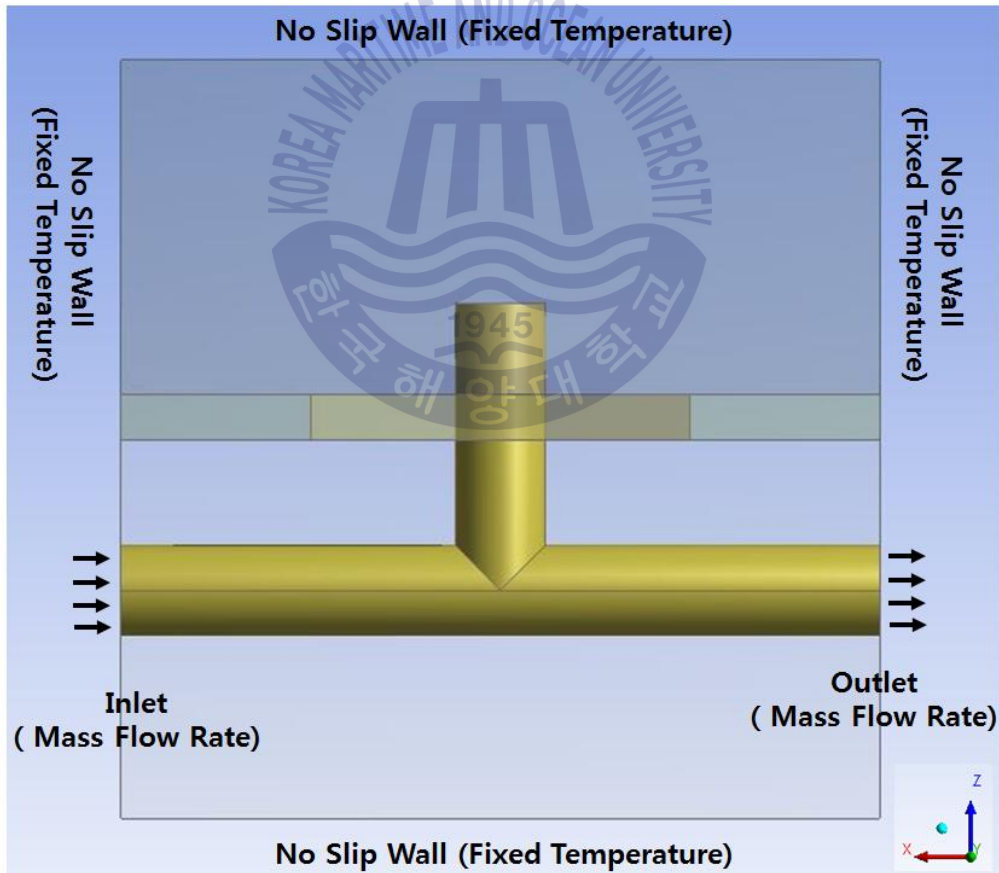


Fig. 18 Boundary conditions of numerical model

3.2.1 모델링 및 격자생성

본 수치해석에서는 Fig. 18과 같이 모형실험결과와 비교를 위해 모형실험과 동일한 크기의 도메인으로 모델링 하였으며, Fig. 19과 같이 격자의 수는 온도 분포의 정확도를 높이기 위해 뒤채움 홀 및 주변 격자를 조밀하게 주었다.

격자에 대한 영향을 평가하기 위해 각기 다른 격자수에 대하여 수치해석을 수행하였으며 약 70만개의 격자수에서 격자의존성이 사라진다고 판단하였다. 따라서 약 70만 개의 격자를 Fig. 19과 같이 생성하였으며, 생성된 격자를 바탕으로 상용수치해석 프로그램인 Ansys CFX v13.0을 사용하여 초기 및 경계조건을 설정하고 수치해석을 수행하였다.

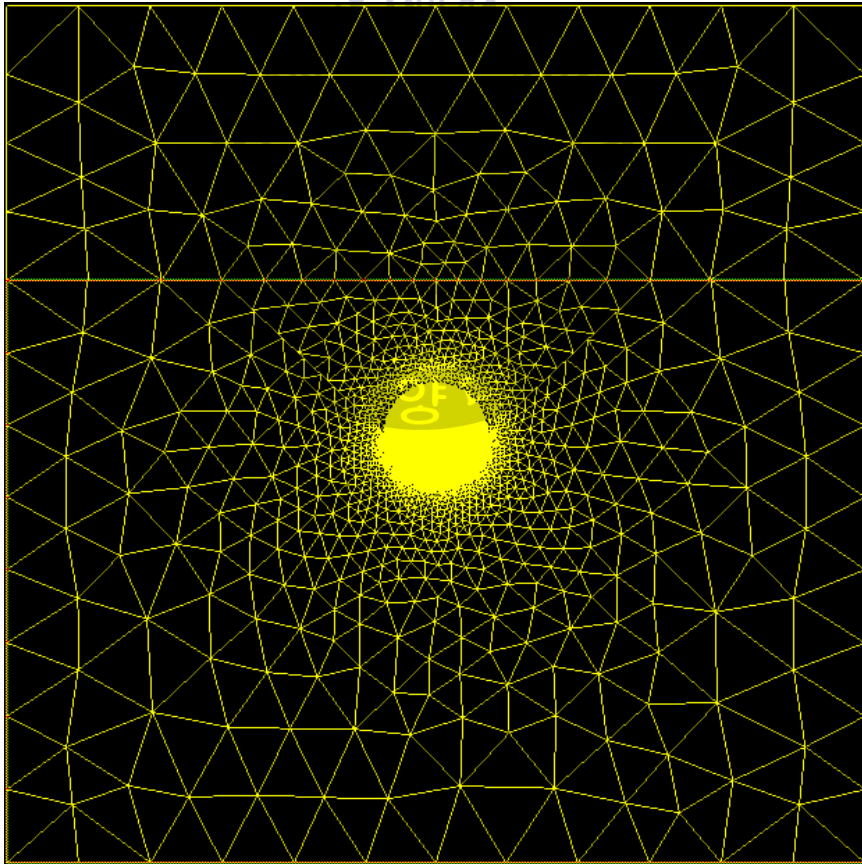


Fig. 19 Mesh for numerical analysis

3.2.2 유한요소해석 지배방정식

정상상태, 비압축성 난류유동으로 지배방정식은 식 (4) 그리고 식 (5)와 같다 (Ansys Inc., 2010a).

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i' u_j'}) \quad (5)$$

운동방정식인 식 (5)의 $\overline{u_i' u_j'}$ 항은 다음과 같이 식 (6)으로 정의한다.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} K \quad (6)$$

식 (6)의 μ_t 는 난류점성계수이고 높은 레이놀즈수 유동에 대한 무 차원 해석에 의해 추론될 수 있다. 난류에너지의 생성 및 소멸률이 거의 평형을 이룬다고 가정할 경우 μ_t 는 다음과 같이 식 (7)과 같다.

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \quad (7)$$

식 (7)의 f_μ 는 난류모델에 의해 정해지는 계수이며 본 논문에서는 k-omega 모델을 사용하였다.

3.2.3 유한요소해석 초기조건 및 경계조건

수치해석을 위한 초기 조건 및 경계조건으로 해저지반, 뒤택음 흡, 해저 배관의 온도를 모형실험 당시의 초기온도인 20°C로 설정하였고 해수의 초기온도는 0°C로 설정하였다. 또한, 해수의 옆면들은 wall로 0°C의 온도를 주어 모형실험에서 얼음을 배치해 온도를 0°C로 유한 것처럼 온도를 일정하게 유지했다. 이는 얼음이 뒤택음 흡과 일정 거리를 두어 결빙과 같은 영향을 받지 않아 그 영향이 작기 때문에 얼음의 모델링 유무가 해석에 영향을 거의 미치지 않기 때문이다.

해저배관 내 유량을 모형실험과 동일하게 80l/min으로 고정했고 40°C 물을 순환시켜 뒤택음 흡의 온도가 정상상태가 될 때까지 해석을 수행하였다. 모형실험에서 모델을 둘러싼 공기의 흐름을 최대한 차단하였으며 이와 같이 수치해석에서 공기의 흐름을 층류조건으로 가정하여 해석을 수행하였다.

3.2.4 유한요소해석 항목 및 재료 물성치

본 연구는 실내모형실험으로 산정한 다양한 시료의 열전도율을 역으로 유한요소해석에 사용하여 모델의 온도분포가 변하지 않는 정상상태의 온도분포 결과를 실내모형실험의 온도분포 이미지와 비교 분석하였으며 유한요소해석에 사용한 시료들의 열전도율은 Fig. 14에 나타내었다. 각 시료에 대한 비열은 Table 5에 나타내었으며 박동수와 서영교(2016)를 참고하였다.

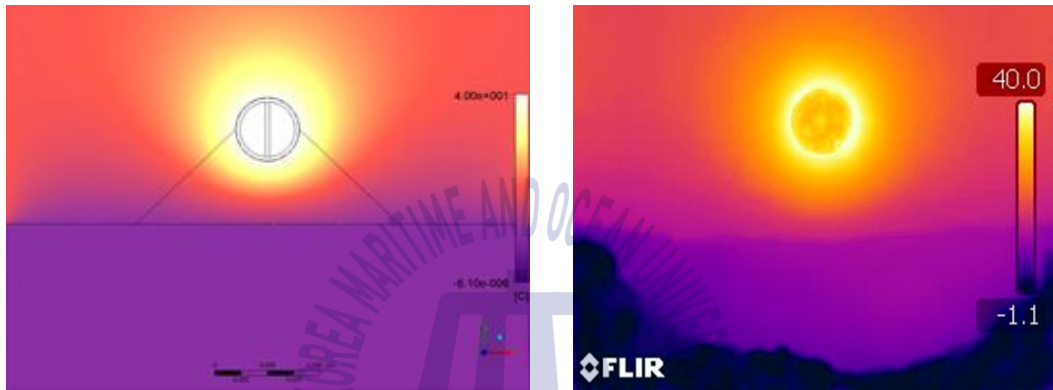
Table 5 Specific heat Classification of samples

Sample	Specific heat ($J/kg^{\circ}C$)	Sample	Specific heat ($J/kg^{\circ}C$)
A40	1621.25	C40	1273.8
A50	1664.51	C50	1317.31
A60	1791.08	C60	1443.88
B40	1447.21	D44	1635.18
B50	1490.91	E41	1052.98
B60	1617.48	F40	982.65

3.3 실내모형실험 및 유한요소해석 결과비교 및 분석

3.3.1 유한요소해석 및 실내모형실험 결과

수치해석 결과의 온도분포 이미지는 Fig. 20(a)와 같다. 정상상태에서 해수, 해저배관, 뒤택음 흙, 해저지반 그리고 그 경계의 온도분포가 실내모형실험과 유사한 형상을 보이는 것을 알 수 있다.



(a) Numerical result (b) Model test result

Fig. 20 Mesh for numerical analysis

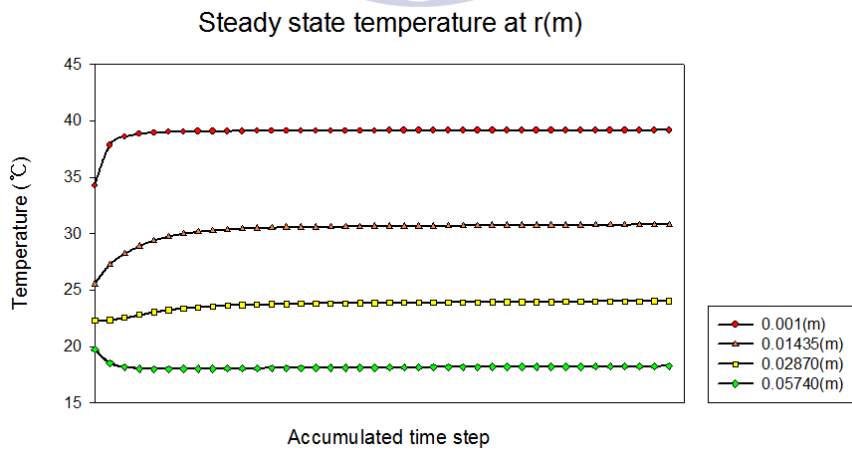


Fig. 21 Steady state temperature at 'r'

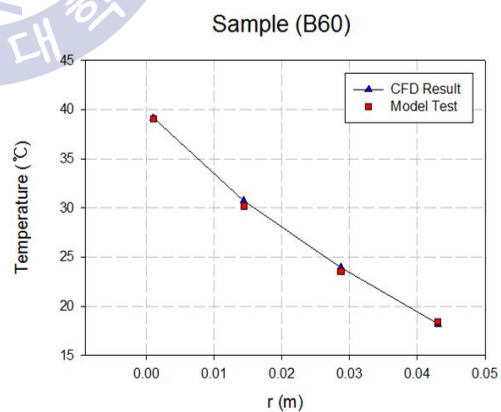
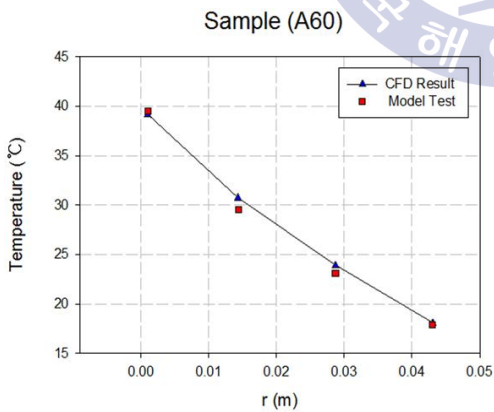
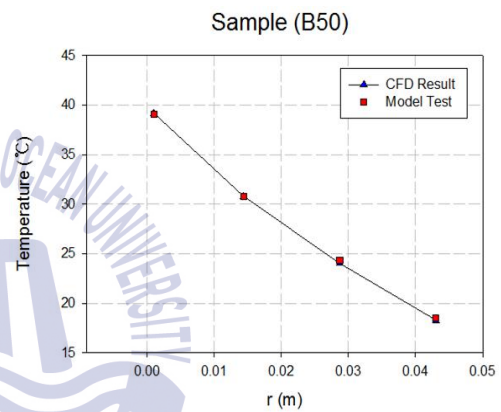
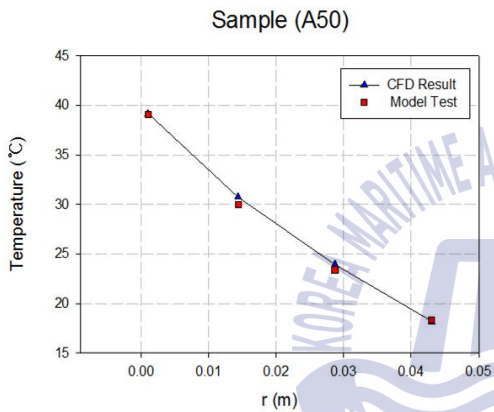
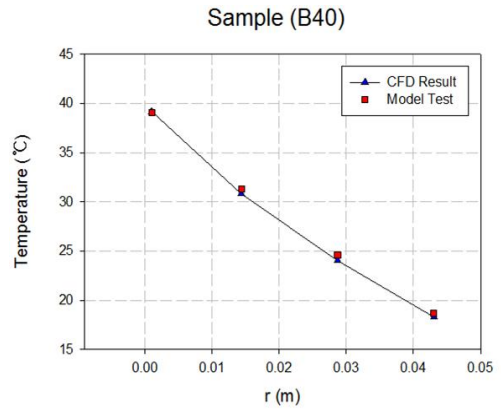
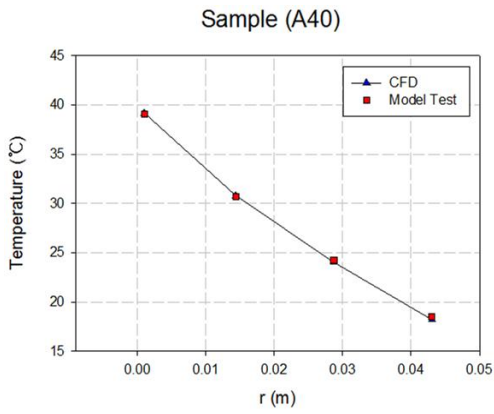
Fig. 21은 모형실험에서 얻은 열화상 이미지와 같이 낮은 온도의 해수와 높은 온도를 가지는 해저배관의 상호 조정에 의해 r1, r2, r3, r4에서의 온도가 정상 상태에 도달함을 보여주고 있다.

3.3.2 유한요소해석 및 실내모형실험 결과 비교

모형실험에서 열화상 카메라로 도출된 온도분포와 모형실험으로 구한 열전도율을 수치해석에 사용하여 재구현한 온도분포의 비교는 Fig. 22 및 Fig. 23와 같다. Fig. 22 그리고 Fig 23(a)는 카올리나이트 및 주문진 표준사로 구성된 시료인 A40, A50, A60, B40, B50, B60, C40, C50, C60에 대한 온도분포 결과비교 그래프이다.

Fig. 23(b)는 실제 보링시료인 D44, E41 그리고 F40의 결과비교 그래프이다. 여기서 가로축인 $r(m)$ 은 해저배관에서 해수방향의 반경거리이며 세로축인 Temperature($^{\circ}C$)는 $0.001m$, $0.01435m$, $0.0287m$, $0.04305m$ 에서의 온도이다.

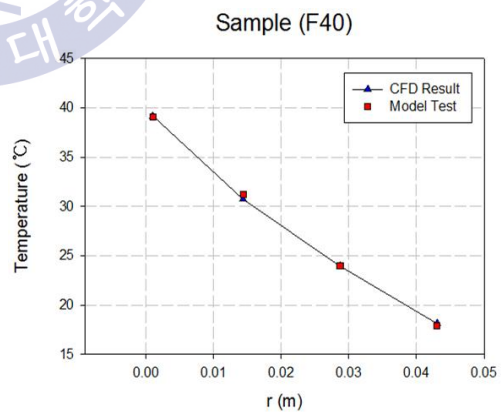
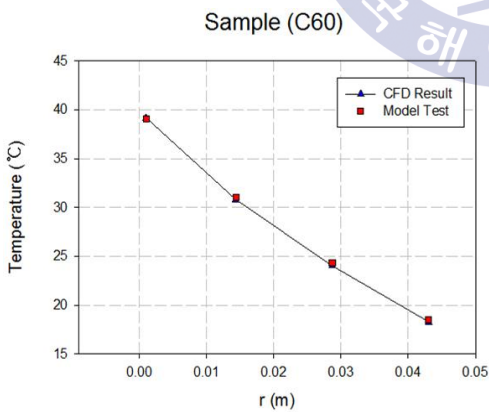
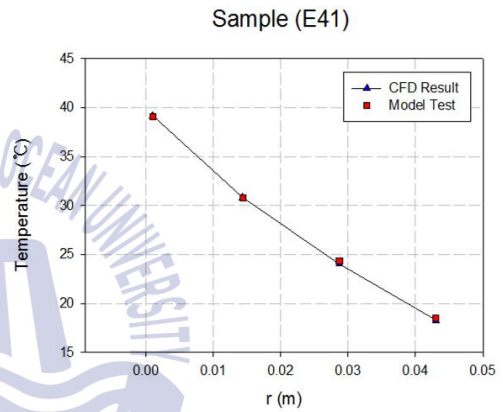
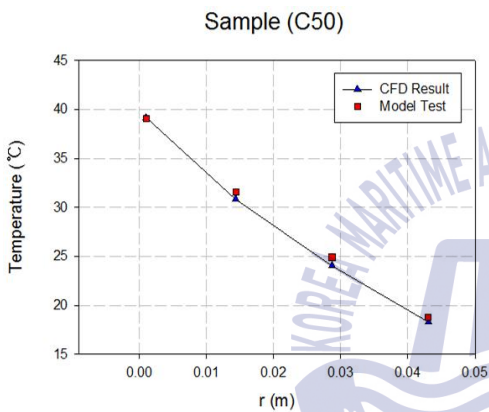
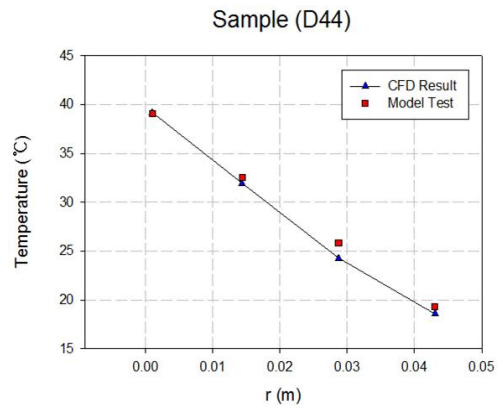
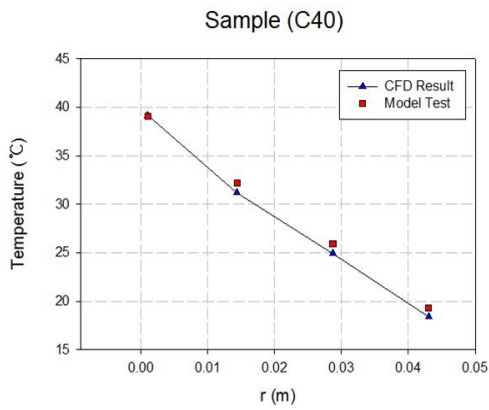
수치해석으로 재 구현된 지점의 온도와 열화상 이미지의 온도분포 결과를 비교하였을 때 오차는 최저 0.15%, 최대 3.97%를 보였다. 오차는 셔터를 누를 때의 카메라의 흔들림으로 인한 관측점의 이동과 실험 시 예기치 못한 공기의 대류현상에 의한 것으로 보이며 실제 시료의 교란의 정도, 공극의 영향을 수치해석적으로 반영하기 힘든 부분이 있었으나 실험 전체의 오차의 정도가 1.5% 정도로 신뢰성이 크다고 판단된다. 그러나 관측자적 오차 및 외부환경 조건같이 보정이 가능한 오차에 대해서는 추후 연구 시 보완하여 더욱 정확한 측정을 해야 할 것으로 사료된다.



(a) Result of Sample A

(b) Result of Sample B

Fig. 22 Temperature distribution of Sample A and B



(a) Result of Sample C

(b) Result of Boring sample

Fig. 23 Temperature distribution of Sample C and Boring samples

제 4 장 다층지반의 열전도율을 고려한 총괄열전달계수식 제안

4.1 총괄열전달계수 이론식 검토

4.1.1 총괄열전달계수 개념

총괄열전달계수는 고체 벽을 두고 고온유체에서 저온유체로 열이 전하는 경우의 모든 전열저항을 고려한 총괄적인 열전달 계수이다. Fig. 24과 같이 매립되지 않은 해저배관의 총괄열전달계수($U_{unburied}$)는 해저배관 내벽에서 관내 유동의 대류에 의한 열저항 R_{int} , 배관내벽에서 배관외벽으로 전도에 의한 열저항 R_{wall} , 배관 외벽에서 유동의 대류에 의한 열저항 R_{ext} 의 영향을 고려해 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{unburied} = \frac{1}{D_{ref}(R_{int} + R_{wall} + R_{ext})} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{D_{ref}}{D_{ext}h_{ext}} \right)^{-1} \quad (8)$$

4.1.2 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 이론식

부분적으로 매립되었거나, 완전히 매립된 해저배관의 총괄열전달계수(U)는 식(9)와 같으며 여기서 해저배관이 해수에 노출된 정도를 나타내는 θ_b 는 Fig. 25와 같다(Bai & Bai, 2005).

$$U = \begin{cases} \frac{\theta_b}{\pi} U_{unburied} + \left(1 - \frac{\theta_b}{\pi}\right) U_{ground} & \text{if } -\frac{D_{ext}}{2} \leq H < \frac{D_{ext}}{2} \\ U_{buried} & \text{if } \frac{D_{ext}}{2} \leq H \end{cases} \quad (9)$$

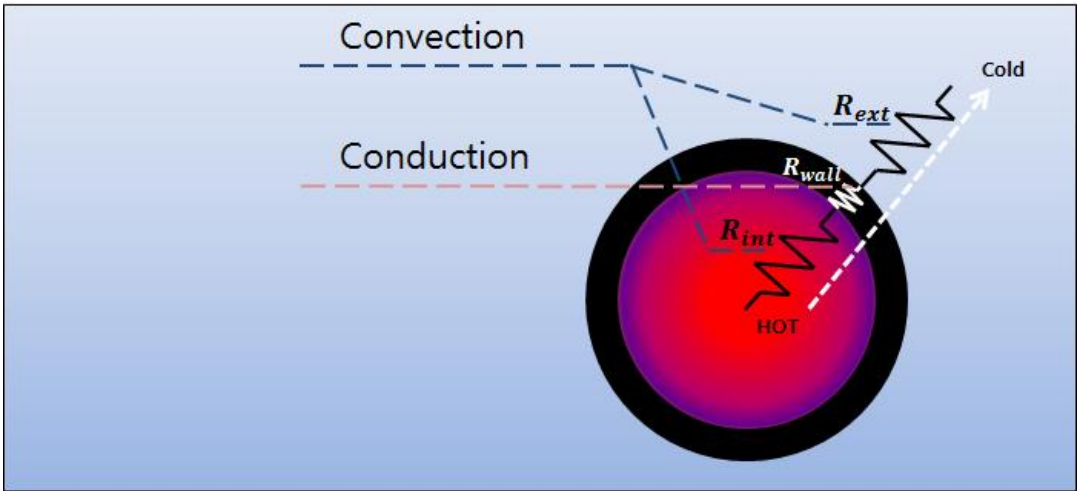
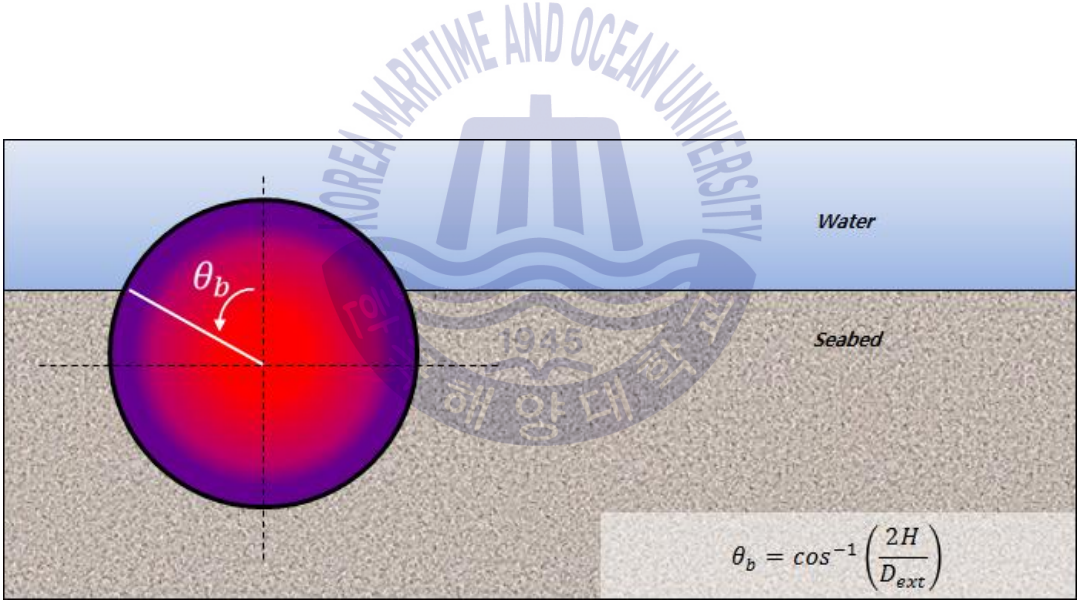


Fig. 24 Thermal resistances of a subsea pipeline



$$\theta_b = \cos^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)$$

Fig. 25 Angle(exposed surface) of a subsea pipeline

기존 해저배관의 총괄열전달계수 이론식들은 식(9)에서 해저배관이 부분적으로 매립되었을 때의 U_{ground} , 완전히 매립되었을 때의 U_{buried} 을 정의하였다.

대표적인 이론식에는 Carslaw & Jaeger 이론식(Carslaw & Jaeger, 1959), Morud & Simonsen 이론식(Morud & Simonsen, 2007), Ovuworie 이론식(Ovuworie, 2010) 그리고 Zakarian 이론식(Zakarian et al., 2012)이 있으며 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Overall Heat Transfer Coefficient Formulas

Formula	Overall Heat Transfer Coefficient Formula
	$U_{ground} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{soil+amb}^*} \right)^{-1}$
	$U_{buried} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{soil+amb}^*} \right)^{-1}$
	$h_{soil+amb}^* = \frac{k_{soil}}{\frac{D_{ref}}{2} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{2e^*}{D_{ext}} \right)}$
Carslaw & Jaeger's Formula	$e^* = \frac{D_{ext}}{2} \left[\exp \left(\frac{2k_{soil}}{D_{ext}h_{ext}} \right) - 1 \right]$
	$h_{soil+amb} = \frac{k_{soil}}{\frac{D_{ext}}{2} \cosh^{-1} \left(\frac{2(H+e)}{D_{ext}} \right)}$
	$e = \frac{D_{soil}}{2} \left[\exp \left(\frac{2k_{soil}}{D_{soil}h_{amb}} \right) - 1 \right]$
	$D_{soil} = \frac{2k_{soil}}{D_{ext}\alpha_0}$
	$\alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right) \quad h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{soil}} h_{ext}$

$$U_{ground} = \left(\frac{1}{h_{ground}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad U_{buried} = \left(\frac{1}{h_{buried}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$$

$$h_{ground} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \begin{cases} \text{(if } C_2 > 1) \\ \frac{2}{\theta_b(\pi - \theta_b)} \frac{C_1}{\sqrt{C_2^2 - 1}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{C_2 + 1}{C_2 - 1}} \tan \left(\frac{\theta_b}{2} \right) \right) \right] \\ \text{(if } C_2 < 1) \\ \frac{1}{\theta_b(\pi - \theta_b)} \frac{C_1}{\sqrt{1 - C_2^2}} \left[\frac{\tan \left(\frac{\theta_b}{2} \right) + \sqrt{\frac{1 - C_2}{1 + C_2}}}{\tan \left(\frac{\theta_b}{2} \right) - \sqrt{\frac{1 - C_2}{1 + C_2}}} \right] \end{cases}$$

Morud
&
Simonsen
Formula

$$h_{buried} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{Bi_p}{\left[1 + Bi_p^2 \alpha_0^2 + 2Bi_p \alpha_0 \coth(\alpha_0) \right]^{1/2}}$$

$$Bi_p = \frac{U_{int+wall} D_{ref}}{2k_{soil}}$$

$$C_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)^2}$$

$$C_2 = \frac{2H}{D_{ext}} + \frac{C_1}{\theta_b Bi_p}$$

$$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int} h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel} U_{wall}} \right)^{-1}$$

$$h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext}$$

$$U_{ground} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{ground}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$$

$$U_{buried} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} + \frac{1}{h_{buried}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$$

Ovuworie
Formula

$$h_{ground} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{1}{\pi \left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)} \begin{cases} \text{(if } -1 < A_{par} < 1) \\ \frac{2Bi_p \sin(\beta_o) \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{1-A_{par}}{1+A_{par}}} \right)}{\sqrt{1-A_{par}^2}} \\ \text{(if } A_{par} = 1) \\ Bi_p \sin(\beta_o) \\ \text{(if } A_{par} > 1) \\ \frac{2Bi_p \sin(\beta_o) \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A_{par}-1}{A_{par}+1}} \right)}{\sqrt{A_{par}^2-1}} \end{cases}$$

$$h_{buried} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{Bi_p \sinh(\alpha_0)}{\left[\left(\cosh(\alpha_0) + Bi_p \alpha_0 \sinh(\alpha_0) + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 - \left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

$$Bi_p = \frac{U_{int+wall} D_{ext}}{2k_{soil}} \quad Bi_g = \frac{h_{amb} D_{ext}}{2k_{soil}} \quad \alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)$$

$$A_{par} = \left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^{-1} \left[\cos(\beta_o) + Bi_p (\pi - \beta_o) \sin(\beta_o) - \frac{Bi_p}{Bi_g} \right]$$

$$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int}h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel}U_{wall}} \right)^{-1} \quad h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext}$$

$$U_{ground} = \left(\frac{1}{h_{ground}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad U_{buried} = \left(\frac{1}{h_{buried}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1}$$

$$h_{ground} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{Bi_p}{\left[\left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right) (1 + 2Bi_p) \right]^{1/2}}$$

Zakarian
Formula

$$h_{buried} = \frac{2k_{soil}}{D_{ref}} \frac{Bi_p \sinh(\alpha_0)}{\left[\left(\cosh(\alpha_0) + Bi_p \alpha_0 \sinh(\alpha_0) + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 - \left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

$$Bi_p = \frac{U_{int+wall} D_{ref}}{2k_{soil}}$$

$$Bi_g = \frac{h_{amb} D_{ref}}{2k_{soil}}$$

$$\alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right)$$

$$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int} h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel} U_{wall}} \right)^{-1}$$

$$h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext}$$

Table 6과 같이 기존 이론식들은 지반을 단일지반 즉 하나의 열전도율(k_{soil})을 가진다고 가정하였다. 본 연구에서는 다층지반의 각각 다른 열전도율을($k_1, k_2, k_3 \dots$)가지는 다층지반을 하나의 등가 열전도율(k_{equiv})로 치환하는 방법을 적용하여 기존 이론식 중 수치해석 및 실내모형실험으로 그 정확도가 검증된 Zakarian 이론식을 변형하여 총괄열전달계수 식을 제안하고자 한다.

4.2 다층지반 열전도율 적용 이론 및 식 제안

다층지반의 각각 다른 열전도율을 등가 열전도율로 치환하기 위하여 Fourier의 열전도법칙을 적용하여 Fig. 26과 같은 각 지반 층의 다른 열전도율을 Fig. 27와 같은 등가열전도율로 치환한다.

4.2.1 Fourier의 열전도법칙

물체에 온도구배가 존재한다면 높은 온도에서 낮은 온도로 에너지가 이동하게 된다. 여기서 온도구배에 의한 열 전달율(Heat transfer rate)은 식(10)과 같이 나타내며 이를 Fourier의 열전도 법칙이라 한다(Holman, 2009).

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

식(10)을 토대로 Fig. 26과같이 다른 열전도율을 가지는 지반 층의 단위면적당($A = 1m^2$) 열 전달율을 고려하여 열저항과의 관계식을 도출하면 식(11)과 같으며 이때 다층판에 작용하는 열 전달율은 Q 로 동일하다.

$$Q = \frac{T_2 - T_1}{R_1} = \frac{T_3 - T_2}{R_2} = \frac{T_4 - T_3}{R_3} \quad (11)$$

또한 식(11)은 식(12)와같이 정의할 수 있다.

$$Q = -k_1 \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_1} = -k_2 \frac{T_3 - T_2}{\Delta x_2} = -k_3 \frac{T_4 - T_3}{\Delta x_3} \quad (12)$$

식(12)의 세 식의 관계를 고려한 열 전달율은 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{T_4 - T_1}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3}} \quad (13)$$

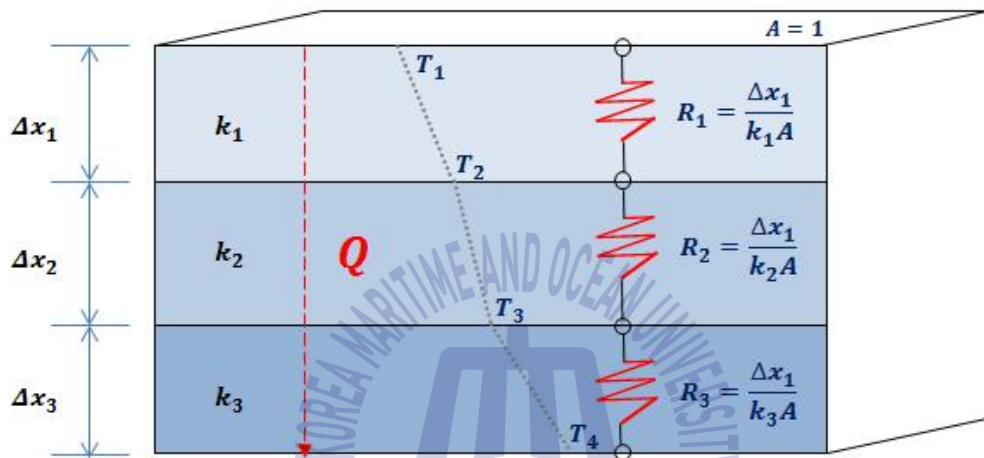


Fig. 26 Feature of heat transfer through a multi-layered plate

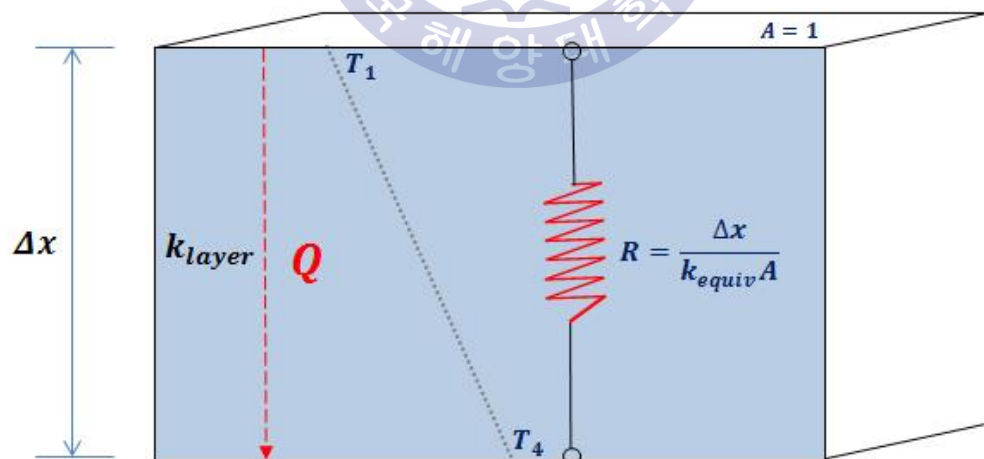


Fig. 27 Equivalent thermal conductivity of multi-layered plate

4.2.2 해저지반 등가 열전도율 산정

Fig. 26과 같이 각각 다른 열전도율을 가지는 다층으로 구성된 해저지반의 열전도율을 Fig. 27와 같이 하나의 열전도율로 나타내기 위해 열 전달율을 식(14)과 같이 정의하였다.

$$Q = \frac{T_4 - T_1}{R} = -k_{equiv} \frac{T_4 - T_1}{\Delta x} \quad (14)$$

등가열전도율은 식(13)과 식(14)의 관계에 의해 다음과 같이 식(15)로 정의할 수 있다.

$$k_{equiv} = \frac{\Delta x}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \frac{\Delta x_3}{k_3}} \quad (15)$$

위에서 정의한 내용을 바탕으로 2개 이상의 해저 층이 존재할 때 열전도율은 다음과 같이 정의하였다.

$$k_{equiv} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{k_i}} \quad (16)$$

4.2.3 다층지반을 고려한 총괄열전달계수 계산식

등가열전도율이 적용된 다층지반을 고려한 총괄열전달계수는 Zakarian 이론식을 토대로 수정하여 제안하였으며, 본 연구에서는 Proposed Formula로 명명하였다. 해저배관이 부분적으로 매립되었을 때의 U_{ground} 는 식(17), 완전히 매립되었을 때의 U_{buried} 는 식(18)과 같다.

$$U_{ground} = \left(\frac{1}{h_{layer}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad (17)$$

$$U_{buried} = \left(\frac{1}{h_{blayer}} + \frac{1}{h_{amb}} \right)^{-1} \quad (18)$$

식(17), 식(18)에서 배관내부 경막계수, 파이프 벽의 열전달계수 그리고 다층지반의 열전달계수를 결합한 h_{layer} 와 h_{blayer} 은 다음과 같이 각각 식(19), 식(20)과 같다.

$$h_{layer} = \frac{2k_{equiv}}{D_{ref}} \frac{Bi_p}{\left[\left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right) (1 + 2Bi_p) \right]^{1/2}} \quad (19)$$

$$h_{blayer} = \frac{2k_{equiv}}{D_{ref}} \frac{Bi_p \sinh(\alpha_0)}{\left[\left(\cosh(\alpha_0) + Bi_p \alpha_0 \sinh(\alpha_0) + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 - \left(1 + \frac{Bi_p}{Bi_g} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (20)$$

식(19), 식(20)의 Bi_p , Bi_g 는 각각 해저배관과 해저지반의 비오투 수(Biot number)이며, 식 (21), 식(22)와 같다.

$$Bi_p = \frac{U_{int+wall} D_{ref}}{2k_{equiv}} \quad (21)$$

$$Bi_g = \frac{h_{amb} D_{ref}}{2k_{equiv}} \quad (22)$$

식(23)의 α_0 는 배관의 매립깊이에 따라 달라지는 보조 기하학적인 양이며, 식(24)은 배관 내부의 경막계수 그리고 해저배관 벽의 열전달계수를 혼합한 열전달계수이다.

$$\alpha_0 = \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D_{ext}} \right) \quad (23)$$

$$U_{int+wall} = \left(\frac{D_{ref}}{D_{int} h_{int}} + \frac{D_{ref}}{D_{steel} U_{wall}} \right)^{-1} \quad (24)$$

또한 배관 외부의 경막계수는 식(25)와 같다.

$$h_{amb} = \frac{D_{ext}}{D_{ref}} h_{ext} \quad (25)$$

식(26)는 다양한 열전도율을 가지는 다층지반의 등가 열전도율이며 등가 열전도율을 적용할 다층지반의 범위는 식(27)과 같다.

$$k_{equiv} = \frac{\Delta x}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{k_i}} \quad \left(\because \Delta x = \sum_{i=1}^n \Delta x_i \right) \quad (26)$$

$$\Delta x \begin{cases} \text{When, } H \leq \frac{D_{ext}}{2} \\ \rightarrow 0 \leq \Delta x \leq D_{ext} + H \\ \\ \text{When, } H > \frac{D_{ext}}{2} \text{ and } H \leq \frac{2\alpha_0 + 1.3D_{ext}}{2} \\ \rightarrow 0 \leq \Delta x \leq \frac{2H + 1.3D_{ext} + 2\alpha_0}{2} \\ \\ \text{When, } H > \frac{D_{ext}}{2} \text{ and } H > \frac{2\alpha_0 + 1.3D_{ext}}{2} \\ \rightarrow \frac{2H - 1.3D_{ext} - 2\alpha_0}{2} \leq \Delta x \leq \frac{2H + 1.3D_{ext} + 2\alpha_0}{2} \end{cases} \quad (27)$$

제 5 장 유한요소해석을 통한 제안 식 검증

다층지반을 고려한 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 제안 식을 검토하기 위해 수치 해석적 실험을 하였다. 본 연구에서는 상용수치해석 프로그램인 Ansys CFX v13.0을 사용하였으며, 해저배관에 일정온도의 물을 유입시켜 모델 전체의 온도가 정상상태에 이르렀을 때 배관의 출구, 입구, 배관 표면 온도를 이용하여 총괄열전달을 계산, 제안식과 비교 분석하였다.

5.1 유한요소해석 방법

5.1.1 유한요소해석 모델링 및 격자생성

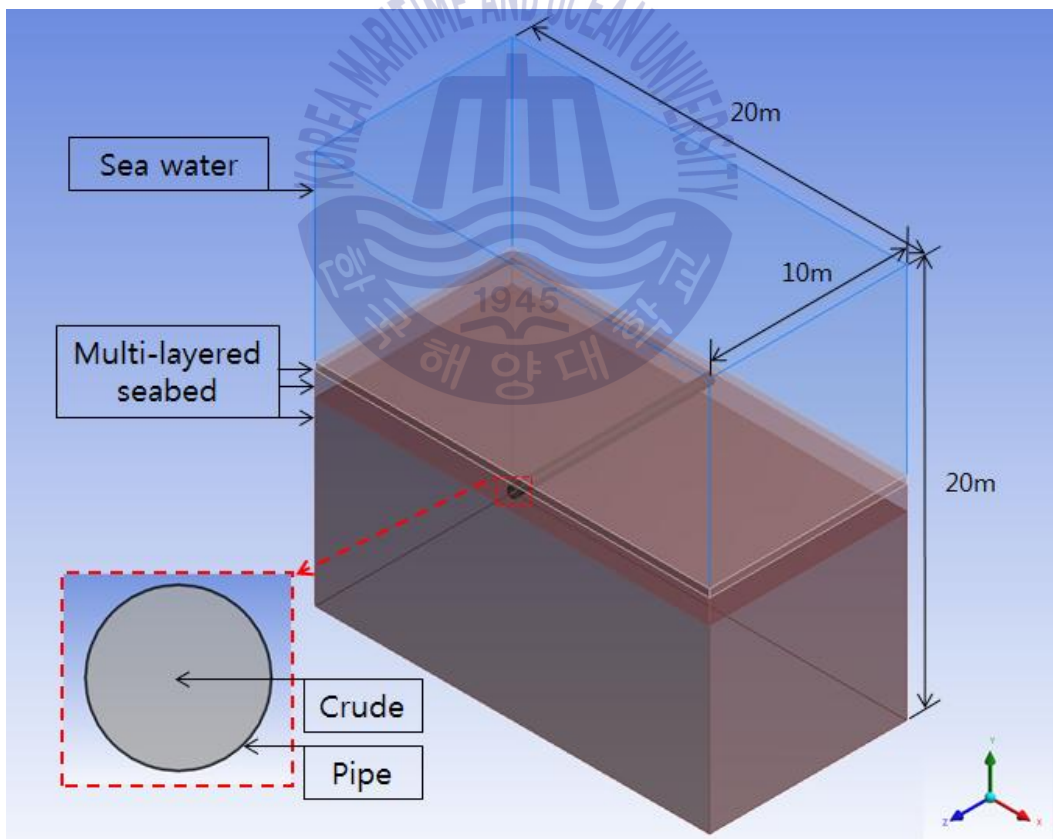


Fig. 28 Characteristic of numerical model

수치해석을 위해 해석영역은 Fig. 28와 같이 모델링 하였다. 본 해석에서는 3차원 모델을 사용하였으며, 격자는 Fig. 29과 같이 해석의 정확도를 높이기 위해 해저배관 주변 격자를 조밀하게 구성하였다. 격자에 대한 영향을 평가하기 위해 격자 의존성 검사를 수행하였고 온도분포가 정상상태에 이르렀을 때 약 15만개의 노드 수에서 격자 의존성이 사라진다고 판단하였다.

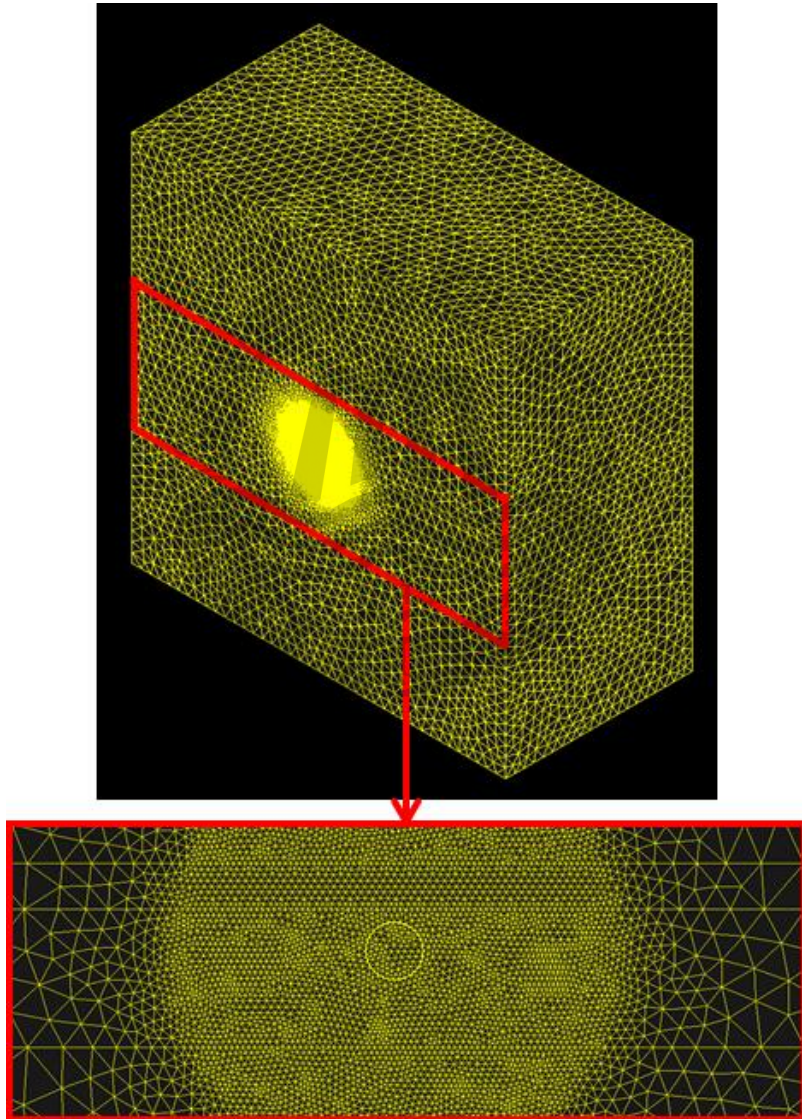


Fig. 29 Grid for numerical analysis

5.1.2 유한요소해석 지배방정식

정상상태, 비압축성 난류유동으로 지배방정식은 연속방정식인 식 (28) 그리고 운동량 방정식인 식 (29)와 같다(Ansys Inc., 2010a).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = & \quad (29) \\ -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] - \rho \overline{(u'_i u'_j)} \end{aligned}$$

위 식처럼 시간 평균화된 Navier-Stokes 방정식은 Reynolds 응력 즉, $-\rho \overline{(u'_i u'_j)}$ 항이 추가적으로 포함된다. 경계층 근처의 결과를 확인하기 위해서는 $k-\omega$ 모델이 적합하지만 벽면에서 멀어질수록 수렴성이 떨어진다는 단점이 있고 벽면에서 충분히 떨어진 자유유동에는 $k-\epsilon$ 모델이 적합하지만 벽면 부근의 예측은 부정확하다.

따라서 본 연구에서 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점을 결합한 $k-\omega$ SST(Shear stress transport) 모델을 적용하였다. $k-\omega$ SST 모델은 혼성함수인 F_1 을 이용하여 $k-\omega$ 모델과 F_1 을 곱하고, $k-\epsilon$ 모델에는 $(1-F_1)$ 을 곱하여 $k-\omega$ 형태로 다시 쓰면 식 (23), 식 (24)와 같다.

여기서 벽면 근처에서는 $F_1=0$ 로 $k-\omega$ 모델, 자유유동에서는 $F_1=1$ 로 $k-\epsilon$ 모델이 된다(Ansys Inc., 2010).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_j)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta' \rho \omega k \quad (30)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (31)$$

각 난류 상수들을 F_1 에 의한 식으로 표현하면 식 (32)와 같으며 Φ_1 은 $k-\epsilon$ 모델, Φ_2 은 $k-\omega$ 모델이며 식 내 상수는 Table 7와 같다(Ansys Inc., 2010a).

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (32)$$

Table 7 Coefficients of turbulent model

	β'	β_1	β_2	σ_k	σ_ω	α
Φ_1	0.009	0.075	-	0.5	0.5	$\frac{5}{9}$
Φ_2	0.009	-	0.0828	1	0.865	$\frac{\beta}{\beta'} - \frac{\sigma_{\omega^2} k^2}{\sqrt{\beta'}}$

5.1.3 유한요소해석 초기조건 및 경계조건

본 연구의 수치해석은 유한체적법(Finite Volume Method)을 통해 해석을 수행하며, 고해상도기법(High resolution scheme)을 사용하는 Ansys CFX v13.0을 이용하여 초기조건 및 경계조건을 설정하였으며 모델의 온도분포가 변하지 않는 정상상태의 해석을 수행하였다(Ansys Inc., 2010b).

수치해석을 위한 초기조건 및 경계조건은 Fig. 7과 같으며, 모델의 초기온도는 4°C 로 설정하였다. 해수(Sea water)의 벽면은 점착 조건(No slip wall)로 4°C 의 고정온도를 부여하였으며 입구(Inlet), 출구(Outlet)의 유속은 0.05m/s 을 유지시켰다.

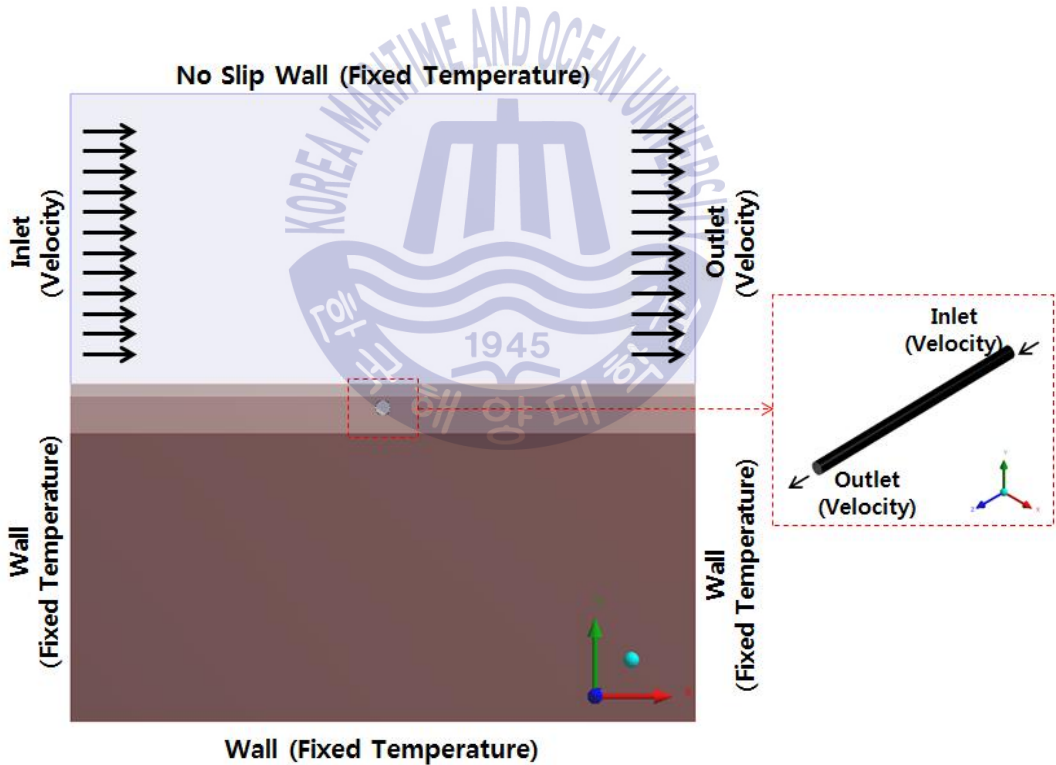


Fig. 30 Boundary conditions of numerical model

원유(Crude)는 API 37.5도의 브렌트유(Brent oil)의 밀도, 점성계수, 비열 그리고 열전도율을 사용하였으며 입, 출구는 Velocity inlet, Velocity outlet 조건으로 유속 2.5m/s로 설정하였고 원유의 입구온도는 70℃로 설정하였다.

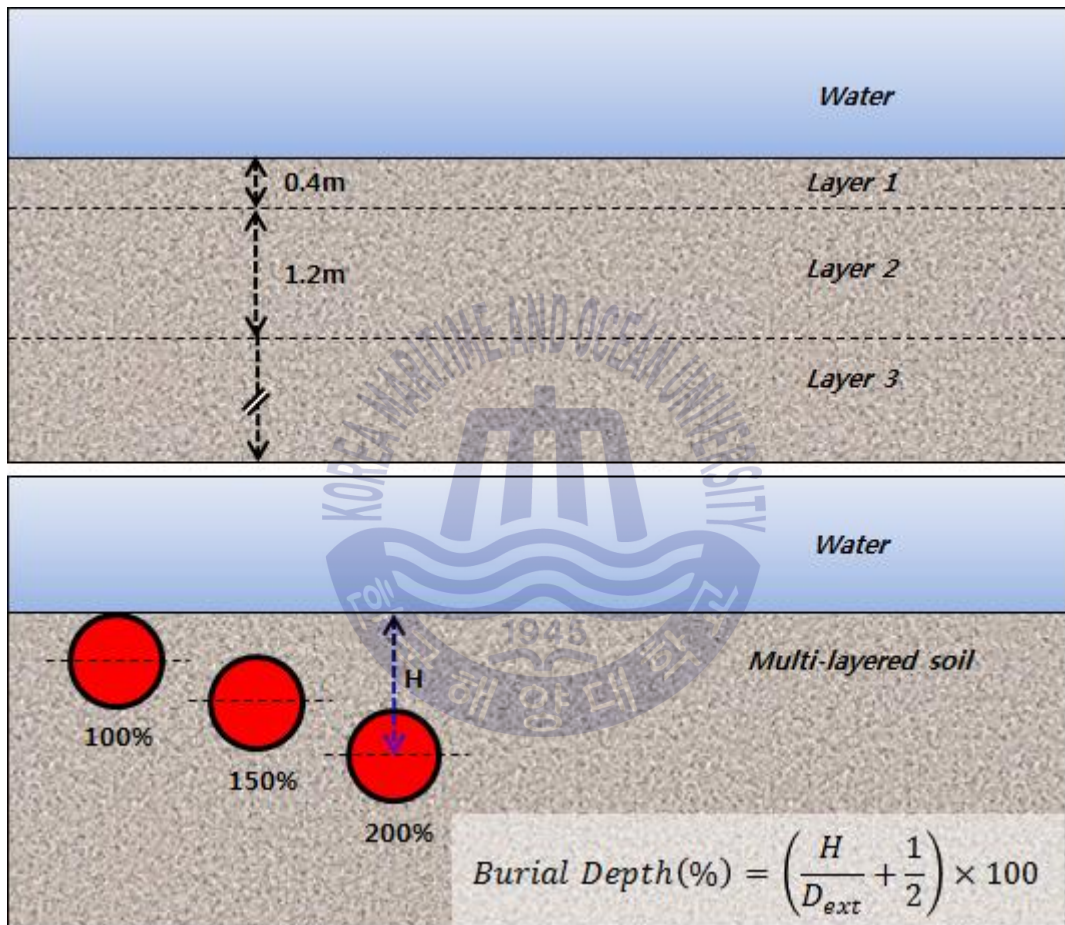


Fig. 31 Organization of multi-layered soil & Burial depth

해저배관의 규격은 API(American petroleum institute)의 석유 수송용 강재인 API 5L X52 PSL 2의 규격을 적용하였다. 지반은 Fig. 8와 같은 3개의 층(Layer)로 모델링 하였으며 각 층의 벽면은 점착조건을 부여하였고, 각 층의 열전도율은 선행 연구인 실내모형실험 및 수치해석으로 검증된 열전도율 결과를 참고하여 설정하였다.

5.1.4 수치해석 결과를 이용한 총괄열전달계수 계산 이론

식 (33)과같이 해저배관의 입구의 온도 T_{inlet} 과 출구의 온도 T_{outlet} 의 구배를 이용해 열 전달율(Q)을 구하였다.

$$Q = \dot{m}C_p \Delta T = \dot{m}C_p (T_{inlet} - T_{outlet}) \quad (33)$$

식(33)에서 구한 열전달율과 내부 유체의 평균온도(T_{crude_m}) 및 배관 표면의 평균온도($T_{pipewall_m}$)를 이용해 식 (34)에 대입하여 열전달계수 h_{ext} 와 h_{int} 를 계산하였다.

$$h = \frac{q}{A(T_{crude_m} - T_{pipewall_m})} \quad (34)$$

여기서 계산된 열전달계수 h_{ext} , h_{int} 를 식(8)에 대입하여 총괄열전달계수를 계산하였다.

5.2 유한요소해석 케이스

다층지반을 고려한 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 제안 식을 검토하기 위해 해저배관 벽의 열전달계수 및 해저지반의 열전도율에 의해 결정되는 비오투 수를 기준으로 세 가지 케이스에 대한 해석을 실시하여 다양한 환경에 대한 Proposed Formula의 적용가능성을 검증하였다. 비오투 수는 식(35)로 정의되며 해저배관과 총괄열전달계수 그리고 비오투 수의 관계는 Table 8와 같다 (Zakarian et al., 2012).

$$Bi_p = \frac{U_{wall} D_{ref}}{2k_{layer}} \quad (35)$$

Table 8 Typical Biot number and OHTC by Type of pipeline

Type of Subsea Pipeline	Typical OHTC (W/m^2K)	Typical Biot number
● PIP system	0.5 - 15	$Bi_p \leq 4$
● Insulated pipeline		(Low)
● Insulated pipe	15 - 50	$4 < Bi_p \leq 50$
● Concrete weight coated pipeline		(Intermediate)
● Uninsulated pipeline	50 - 1500	$50 < Bi_p$ (High)

5.2.1 해석케이스 1 : High Biot number

해석 케이스 1은 단열재가 없는 해저배관을 토대로 제안 식 계산 및 수치해석을 실시하였으며 본 케이스는 비오투 수가 약 146인 경우이다.

해저배관과 단열재의 외경의 크기는 $0.508m$, 내경의 크기는 $0.4826m$ 해저지반은 3층의 다층지반으로 구성하였고 $0 \sim 0.4m$ 까지 layer 1, $0.4 \sim 1.6m$ 까지 layer 2 그리고 그 아래는 layer 3으로 구성하였다.

Table 9와같이 배관의 열전도율은 $51 W/mK$, 해저지반의 경우 Layer 1은 $1.31 W/mK$, Layer 2는 $1.4 W/mK$ 그리고 layer 3은 $1.6 W/mK$ 으로 구성하였다.

Table 9 Properties of pipe and soil layers for case 1

Subsea pipe and Multi-layered soil	Subsea pipe Diameter (m)	Depth of layer (m)	Thermal conductivity (W/mK)
Pipe inner diameter	0.4826	-	51
Pipe outer diameter	0.508	-	
Soil layer 1	-	$0 \sim 0.4$	1.31
Soil layer 2	-	$0.4 \sim 1.6$	1.4
Soil layer 3	-	$1.6 \sim \infty$	1.6

5.2.2 해석케이스 2 : Intermediate Biot number

해석 케이스 2는 아스팔트 및 콘크리트를 단열재로 사용하는 CWC(Concrete weight coated)배관에 대한 계산 및 수치해석을 실시하였다.

본 케이스의 비오투 수는 약 9의 경우이며 해저배관과 단열재의 외경의 크기는 $0.508m$, 내경의 크기는 $0.4826m$, 아스팔트 단열재의 외경은 $0.515m$, 콘크리트 단열재의 외경은 $0.615m$ 이며 해저지반은 $0\sim 0.4m$ 까지 layer 1, $0.4 \sim 1.6m$ 까지 layer 2 그리고 그 아래는 layer 3으로 구성하였다.

배관의 열전도율은 $51 W/mK$, 아스팔트는 $0.74 W/mK$, 콘크리트는 $2.9 W/mK$ 그리고 해저지반은 1층부터 순서대로 $1.31 W/mK$, $1.4 W/mK$, $1.6 W/mK$ 이며 Table 10에 나타내었다.

Table 10 Properties of pipe and soil layers for case 2

Subsea pipe and Multi-layered soil	Subsea pipe Diameter (m)	Depth of layer (m)	Thermal conductivity (W/mK)
Pipe inner diameter	0.4826	-	51
Pipe outer diameter	0.508	-	
Asphalt	0.515	-	0.74
Concrete	0.615	-	2.9
Soil layer 1	-	0 ~ 0.4	1.31
Soil layer 2	-	0.4 ~ 1.6	1.4
Soil layer 3	-	1.6 ~ ∞	1.6

5.2.3 해석케이스 3 : Law Biot number

낮은 비오투 수에 대한 해석을 위해 폴리프로필렌으로 단열된 배관에 대한 제안 식 계산 및 수치해석을 수행하였다. 여기서 Biot number은 1.99이다.

낮은 비오투 수 케이스에서 사용한 해저배관과 단열재의 외경의 크기는 0.508m, 내경의 크기는 0.4826m이며 단열재로 쓰인 폴리프로필렌의 외경은 0.552m이다. 해저지반은 케이스 1, 케이스 2와같이 세층으로 구성하였으며 두께 또한 동일하게 구성하였다.

배관의 열전도율은 51 W/mK, 폴리프로필렌의 열전도율은 0.22 W/mK 이며 해저지반은 1층부터 순서대로 1.31 W/mK, 1.4 W/mK, 1.6 W/mK이며 Table 11에 나타내었다.

Table 11 Properties of pipe and soil layers for case 3

Subsea pipe and Multi-layered soil	Subsea pipe Diameter (m)	Depth of layer (m)	Thermal conductivity (W/mK)
Pipe inner diameter	0.4826	-	51
Pipe outer diameter	0.508	-	
polypropylene	0.552	-	0.22
Soil layer 1	-	0 ~ 0.4	1.31
Soil layer 2	-	0.4 ~ 1.6	1.4
Soil layer 3	-	1.6 ~ ∞	1.6

제 6 장 유한요소해석 수행결과 및 분석

6.1 유한요소해석 타당성 검토

유한요소해석의 타당성을 검토하기 위해 높은 비오투 수에 해당하는 케이스 1을 토대로 타당성 검토를 실시하였다. 케이스 1은 비오투 수가 약 146인 단열재가 없는 배관이다.

유한요소 해석의 타당성 검토는 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에 해당하는 배관의 총괄열전달계수를 계산하여 제안 식 계산결과와 비교하였다.

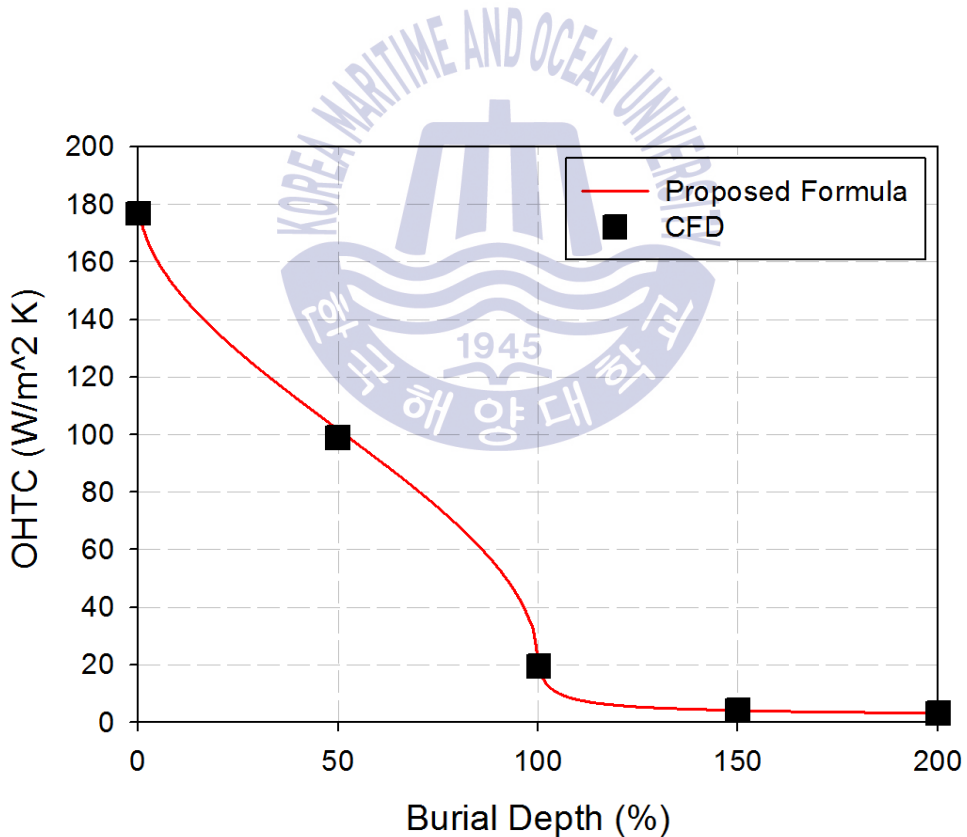


Fig. 32 Comparison between Proposed Formula and CFD results

Fig. 32는 제안 식의 계산결과와 유한요소해석을 통한 총괄열전달계수 결과 비교 그래프이다.

그래프는 100% 매립 될 때까지 급격한 감소를 보이며 특히 100% 근처에서 그 변화가 큰 걸 알 수 있다. 반대로 매립된 후는 완만한 감소의 경향을 보인다. 제안 식 및 유한요소해석 결과의 오차는 Fig. 33과 같으며 매립깊이에 따른 오차는 최대 4% 미만으로 신뢰성이 있다고 판단하여 해석을 수행하였다.

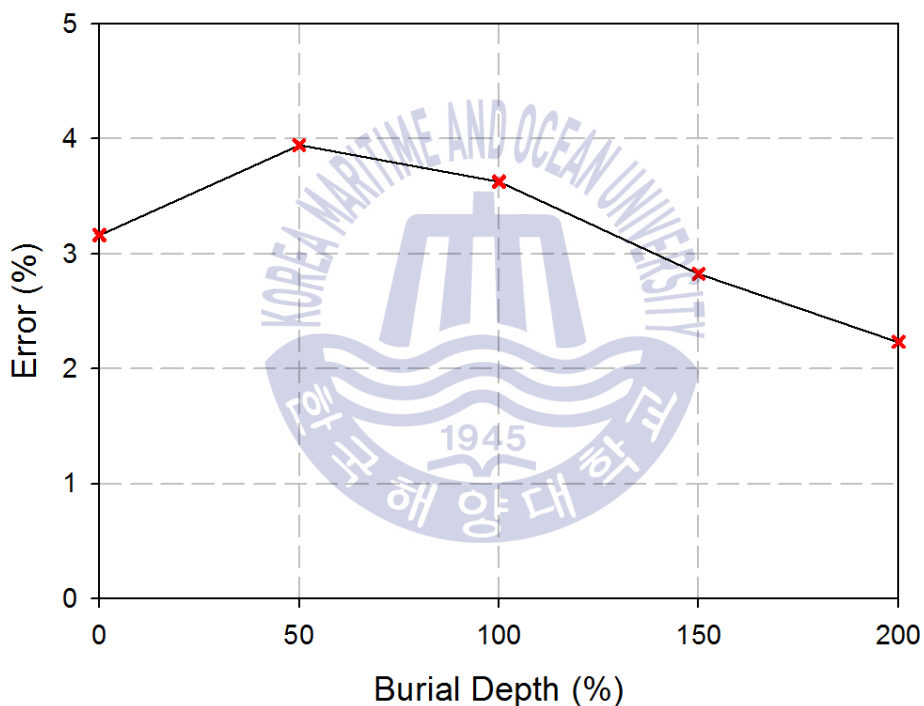
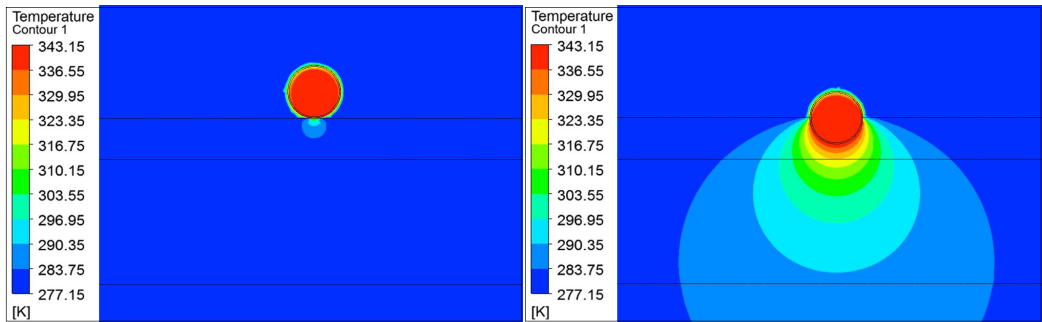


Fig. 33 Error between Proposed Formula and CFD results by Burial depth

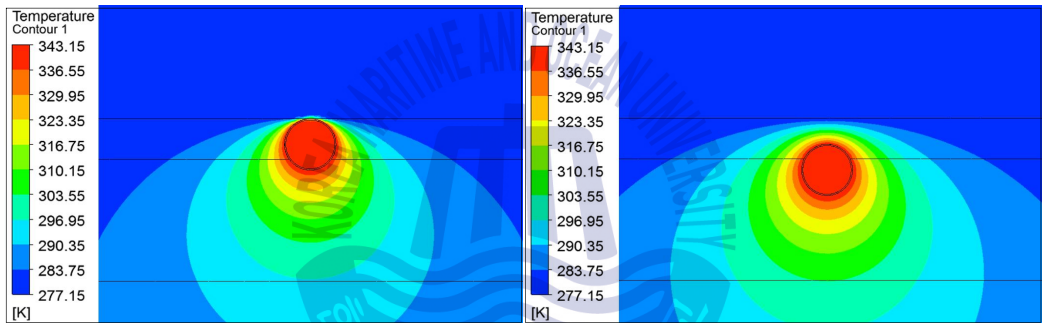
6.2 유한요소해석 결과 및 제안 식 계산결과 비교분석

6.2.1 해석케이스 1 : High Biot Number



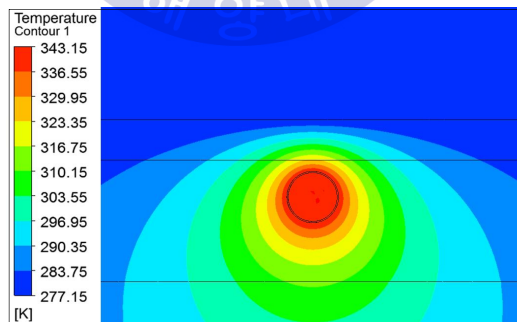
(a) Burial depth = 0%

(b) Burial depth = 50%



(c) Burial depth = 100%

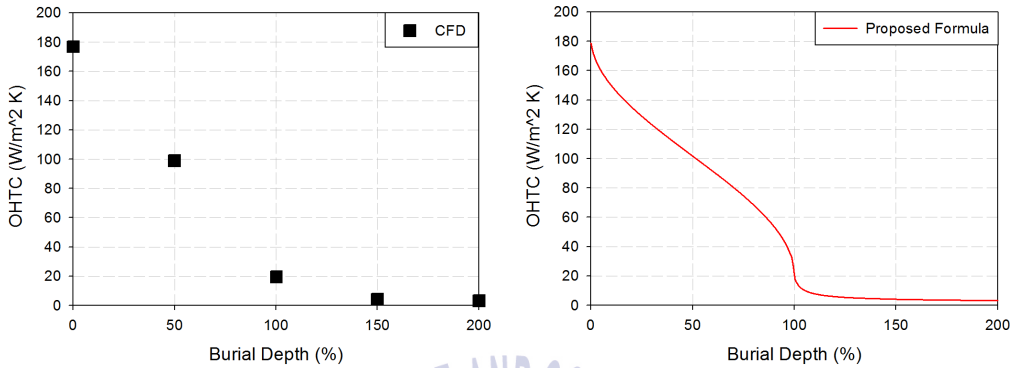
(d) Burial depth = 150%



(e) Burial depth = 200%

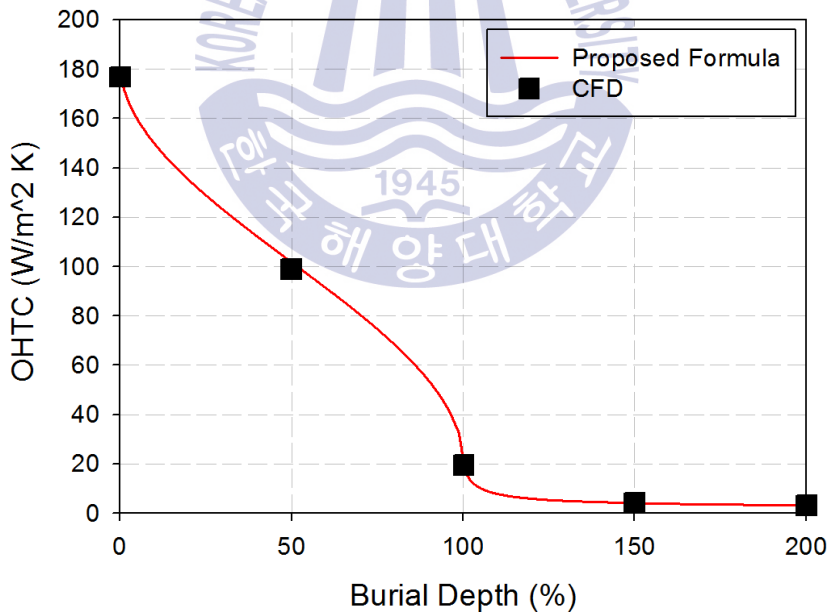
Fig. 34 Temperature Contour of subsea pipeline
(Case 1 : High Biot Number)

유한요소 해석결과 정상상태 온도에서의 매립깊이에 따른 배관의 단면 온도 분포결과는 Fig. 34과 같다. 배관 내부 온도분포 결과를 보면 일부 매립된 경우 즉 0%에서부터 완전 매립된 200%까지 해저배관 내부 유체의 온도 및 해저배관 단면의 등온선 변화가 점점 70°C에 근접하여 단열의 상태를 확인 할 수 있다.



(a) Result of Numerical analysis

(b) Result of Proposed Formula



(a) Results Comparison between CFD and Proposed Formula

Fig. 35 Overall Heat Transfer Coefficient results (Case 1)

총괄열전달계수 계산 및 해석결과는 Fig. 35와 같다. 매립깊이 0%, 즉 해수에 완전 노출된 해저배관의 총괄열전달계수는 약 $180 W/m^2K$ 을 나타내었고 매립깊이 200%일 때 약 $3 W/m^2K$ 결과를 확인 할 수 있었다. 제안 식 계산 결과 및 수치해석 결과의 오차는 Fig. 36과 같이 약 4%를 나타내었다.

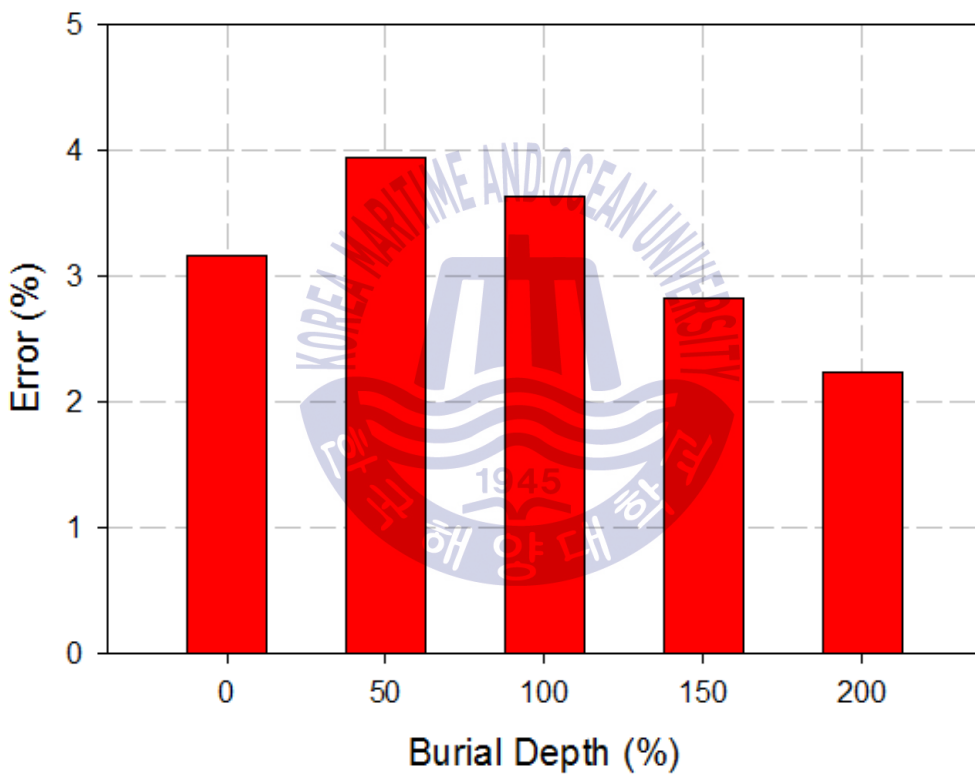
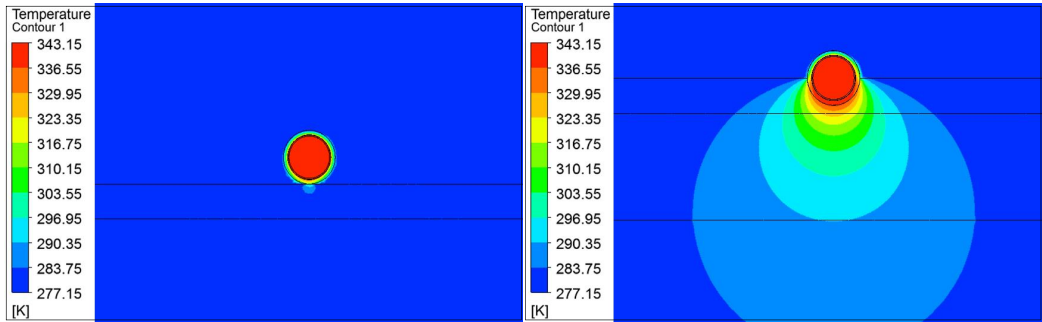


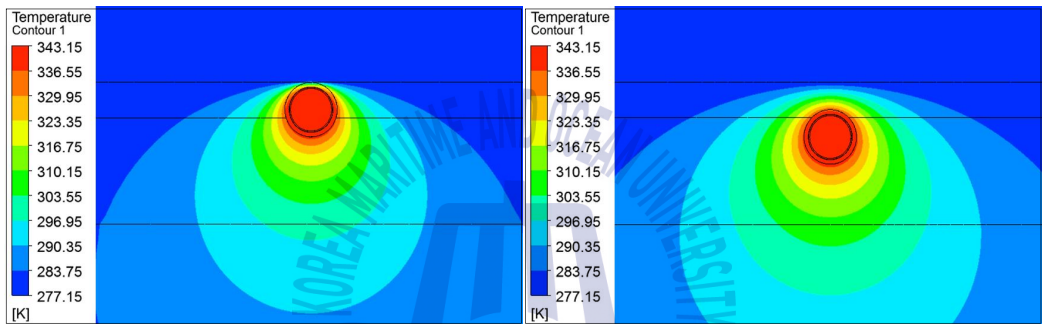
Fig. 36 Error between Proposed Formula and CFD results (Case 1)

6.2.2 해석케이스 2 : Intermediate Biot Number



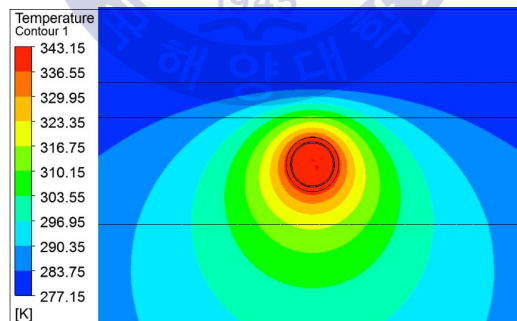
(a) Burial depth = 0%

(b) Burial depth = 50%



(c) Burial depth = 100%

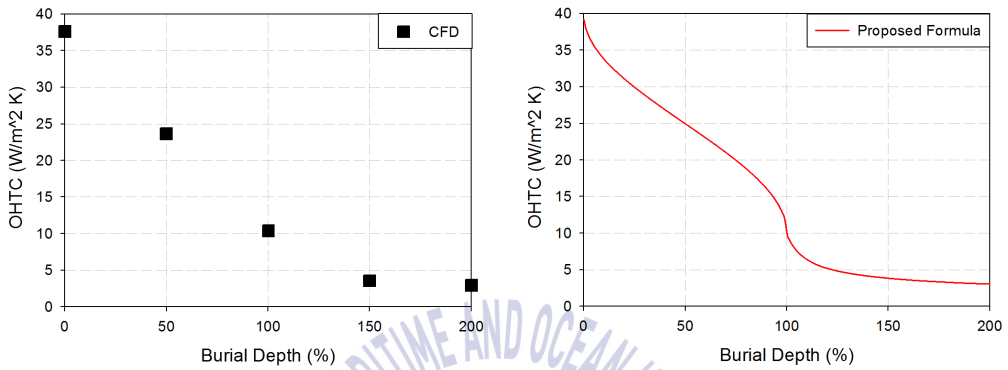
(d) Burial depth = 150%



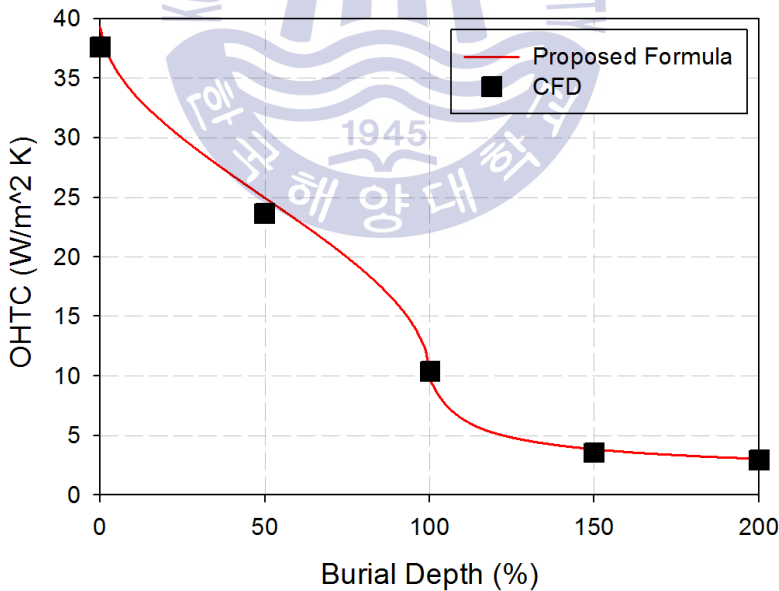
(e) Burial depth = 200%

Fig. 37 Temperature Contour of subsea pipeline
(Case 2 : Intermediate Biot Number)

유한요소 해석결과 정상상태 온도에서의 매립깊이에 따른 배관의 단면 온도 분포결과는 Fig. 37과 같다. Fig. 36(a) 즉 매립깊이 0%의 등온선 결과를 보면 Fig. 34(a)와 비교해서 해저지반에 열이 전도된 정도가 작은 것을 알 수 있다. 이는 단열재의 영향에 의한 것으로 열손실의 유무를 가시적으로 확인 할 수 있는 결과이다.



(a) Result of Numerical analysis (b) Result of Proposed Formula



(a) Results Comparison between CFD and Proposed Formula

Fig. 38 Overall Heat Transfer Coefficient results (Case 2)

총괄열전달계수 계산 및 수치해석 결과는 Fig. 38과 같이 매립깊이 0%일 때 약 $40 W/m^2K$, 매립깊이 200%에서 약 $3 W/m^2K$ 로 나타났다. 제안 식 계산결과 및 수치해석 결과를 비교하였을 때 Fig. 39와같이 최대 7%의 오차를 나타내었으며 전체 평균 오차는 약 5%정도로 나타났다.

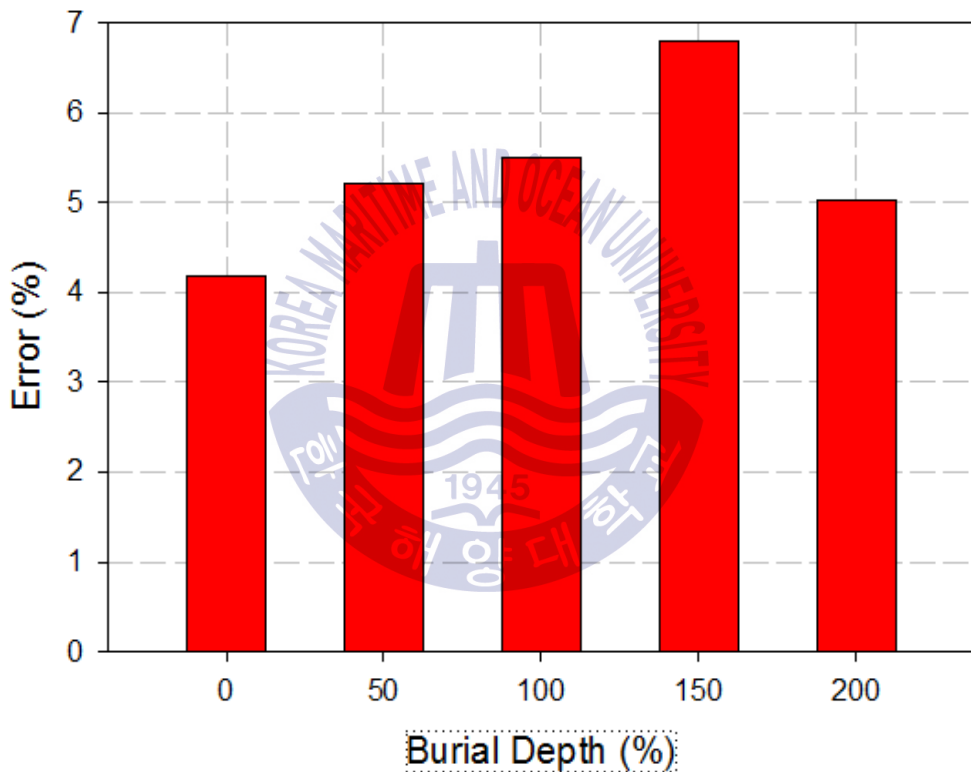
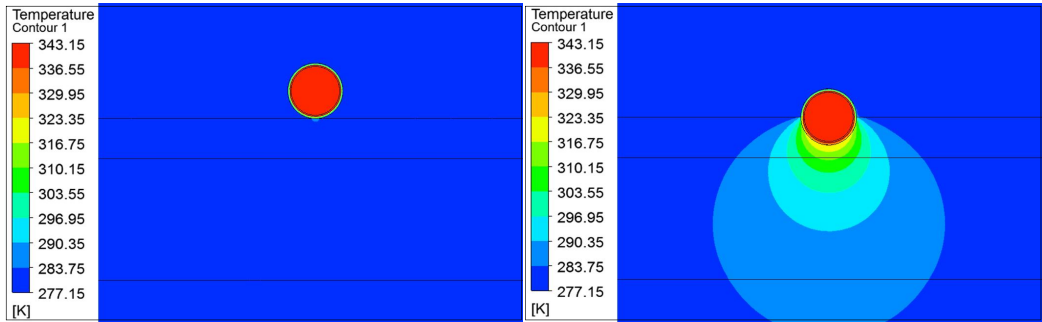


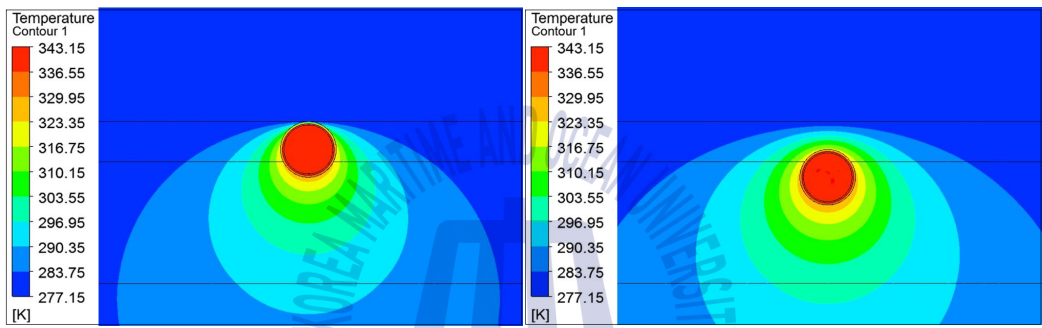
Fig. 39 Error between Proposed Formula and CFD results (Case 2)

6.2.3 해석케이스 3 : Law Biot Number



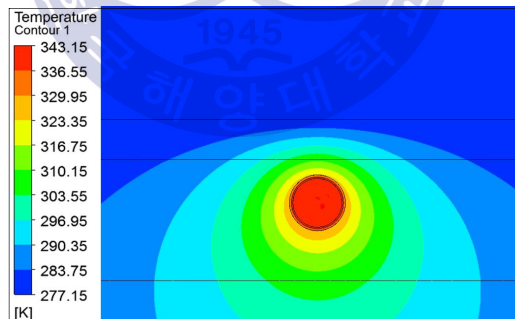
(a) Burial depth = 0%

(b) Burial depth = 50%



(c) Burial depth = 100%

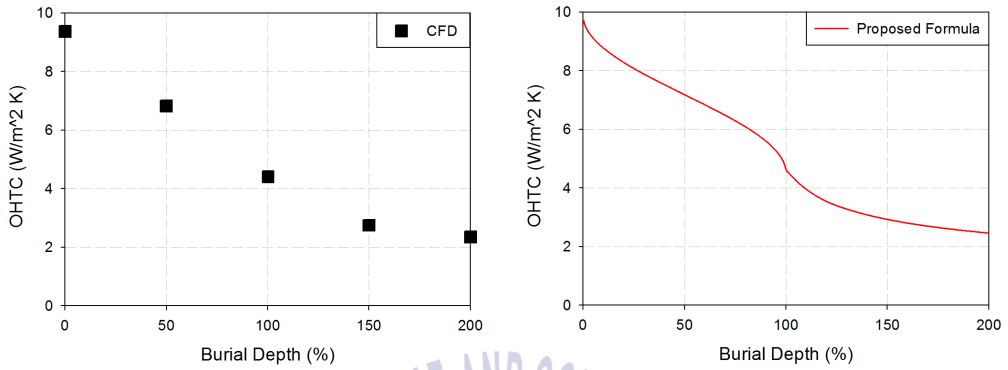
(d) Burial depth = 150%



(e) Burial depth = 200%

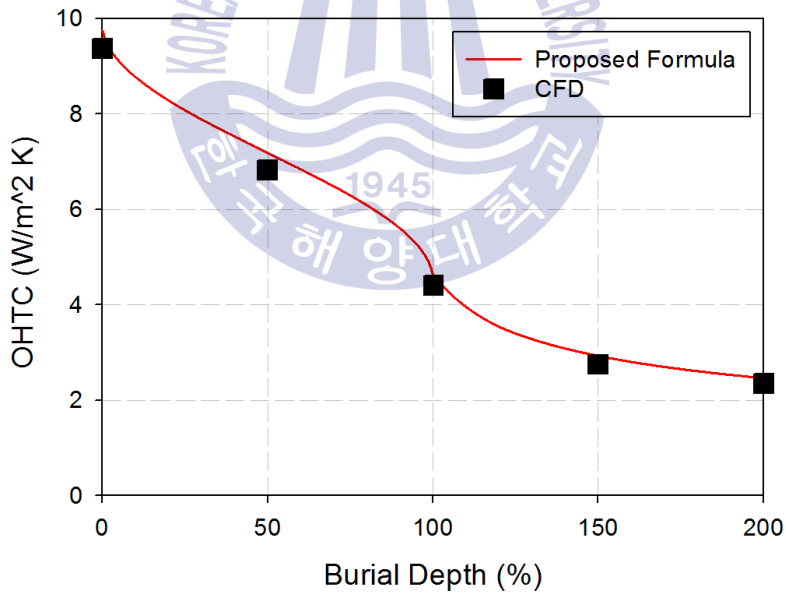
Fig. 40 Temperature Contour of subsea pipeline
(Case 3 : Law Biot Number)

유한요소 해석결과 정상상태 온도에서의 매립깊이에 따른 배관의 단면 온도 분포결과는 Fig. 40과 같다. 케이스 1, 케이스 2와 비교해서 매립깊이 0%일 때 해저 배관 내부 유체의 등온선이 70℃에 가까운 결과로 단열성이 높은 것을 확인할 수 있다.



(a) Result of Numerical analysis

(b) Result of Proposed Formula



(a) Results Comparison between CFD and Proposed Formula

Fig. 41 Overall Heat Transfer Coefficient results (Case 3)

본 케이스의 결과는 Fig. 41과 같다. 매립되지 않았을 때의 총괄열전달계수는 약 $10 W/m^2K$ 이며 200%매립 되었을 때 약 $2.4 W/m^2K$ 의 총괄열전달계수 결과를 확인 할 수 있었다. 제안 식 계산 결과와 수치해석 결과의 차이는 7%를 초과하지 않았으며 오차그래프는 Fig. 42와 같다.

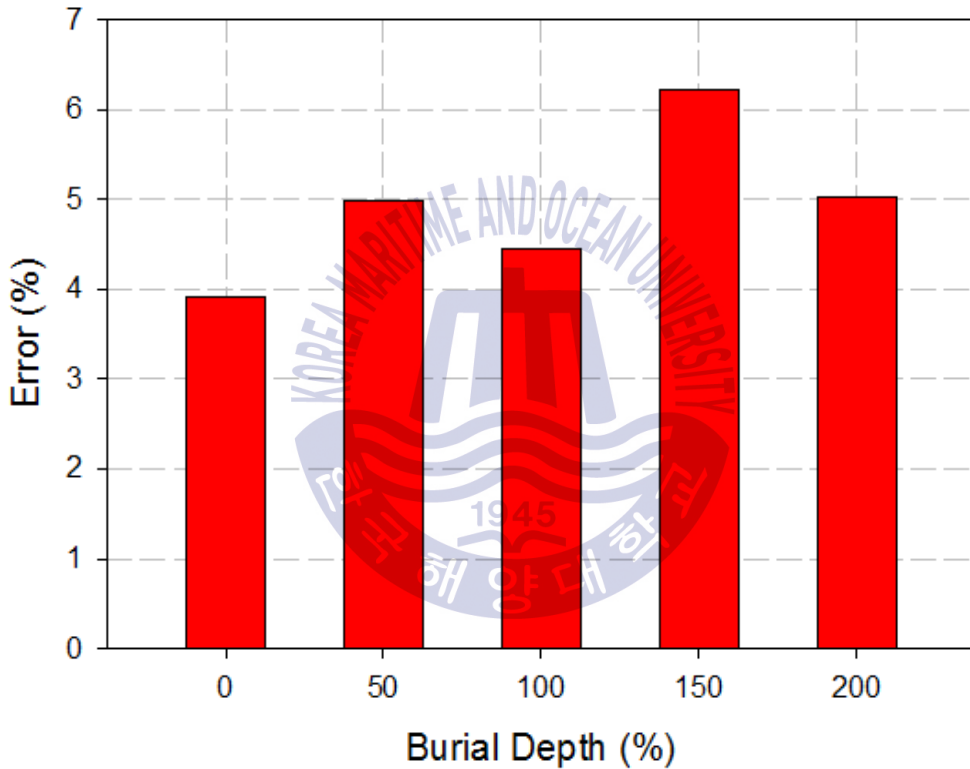


Fig. 42 Error between Proposed Formula and CFD results (Case 3)

제 7 장 결 론

본 연구는 해저배관이 매설될 지반의 열전도율을 산정하기 위해 다양한 시료와 실제 보링시료에 대한 실제모형실험 및 수치 해석적으로 연구를 하였고 산정된 열전도율을 토대로 다층지반에 매설된 해저배관의 총괄열전달계수 식을 제안하였다.

열전도율 산정 실험을 위해 해저배관의 매설단면을 표현할 수 있는 모형구조를 제작, 카울리나이트 및 주문진 표준사를 배합한 시료와 실제 보링 샘플을 대상으로 열화상 카메라를 이용하여 온도분포 및 열전도율을 구하였다. 모형실험으로 도출된 열전도율의 정확도를 검증하기 위하여 도출된 열전도율을 상용 수치해석 프로그램인 Ansys CFX v13.0을 이용하여 온도분포를 재 구현 하였으며, 수치해석의 온도분포 결과와 열화상 카메라의 온도분포 결과를 비교, 검증 하였다. 본 연구에서는 해저배관 뒤채움 흙을 카울리나이트와 주문진 표준사를 이용하여 묘사하였으며, 함수비 40%, 50%, 60% 의 열전도율을 구하였다. 이때 열전도율을 구하기 위하여 열화상 카메라를 사용하였으며, 시료의 교란을 야기할 수 있는 탐침법을 대신할 수 있는 방법이다. 포화되지 않은 흙은 함수비가 증가할수록 열전도율이 증가한다. 이는 흙 안 간극에 공기와 간극수가 같이 있기 때문인데, 공기의 열전도율이 물의 열전도율보다 더 크기 때문이다. 하지만 해저지반의 경우 포화도가 대부분이며 포화토의 경우 흙 입자와 간극수 두 가지로 구성되어 있기 때문에 함수비가 증가할수록 열전도율이 작아지는 경향을 보인다. 실험 결과는 함수비가 증가 할수록 열전도율이 작아지는 경향을 보였으며 함수비 40%~ 60% 시료의 열전도율은 약 1.2~ 1.6 W/mK 로 나타났다.

또한 1~2m사이의 실제 보링 샘플을 이용하여 열전도율을 구하였다. 함수비 측정결과 시료는 함수비 40% 근처를 나타냈으며, 체분석결과 새만금과 시화호 샘플의 경우 모래질 점토로 나타났고, 마산만의 경우 점토 및 실트가 주를 이루었다. 모래가 가장 많이 함유되어있는 새만금 시료의 경우 열전도율이 높게 나타났으며 이와 반대로 점토 및 실트가 주를 이루는 마산만 샘플의 경우 보링 시료 중 가장 낮은 열전도율을 보였다. 열전도율을 구하기 위해 열화상 카메라를 이용하여 모델이 정상상태에 이르렀을 때의 온도분포를 이용하였다.

온도분포에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 상용수치해석 프로그램인 Ansys CFX v13.0을 이용하여 모델링을 하고 초기조건 및 경계조건을 부여하여 수치 해석을 수행하였다. 이때 모형실험에서 사용한 모델의 규격 및 해석조건들을 일치시켜 결과의 정확도를 높였으며 정상상태에 이른 온도분포를 열화상 카메라의 결과와 비교하였을 때 오차는 최대 6.5%로 거의 유사한 경향을 보였다.

산정된 다양한 혼합시료 및 보링시료의 열전도율을 다층지반을 고려한 총괄 열전달계수 제안 식 계산 케이스에 적용시켰다. 본 연구에서는 기존 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 이론식을 검토하였고, 실제 해저지반이 다층지반 즉, 다양한 열전도율을 가지는 층으로 구성된 점에 착안하여 기존 해저배관 총괄열전달계수 이론식 중 Zakarian이론식(Zakarian et al., 2012)을 토대로 변형한 식을 제안하였다. 다층 지반의 열전도율은 Fourier의 열전도법칙을 적용하여 각각의 다른 열전도율을 가지는 다층지반을 하나의 등가열전도율로 환산하였다.

제안 식을 검토하기 위해 수치 해석적 실험을 수행하였으며 상용수치해석 프로그램인 CFX v13.0을 사용하였다. 결과는 모델의 온도분포가 정상상태의 일정한 온도를 유지하는 상태일 때 배관의 입구, 출구, 배관표면 등의 온도를 측정하여 총괄열전달계수를 산정하였다.

제안된 식은 세 가지 해석케이스에 대해 계산 및 해석을 수행하였다. 각 케이스는 해저배관 벽의 열전달계수 및 해저지반의 열전도율에 의해 결정되는 비오투 수를 기준으로 분류되었으며 해석 케이스 1은 높은 비오투 수($50 < Bi_p$)에 해당하는 해저배관으로 케이스 1에서 해저배관의 비오투 수는 약 146인 경우에 해당한다. 해석케이스 2는 중간정도의 비오투 수($4 < Bi_p \leq 50$)에 해당하는 해저배관으로 해석케이스 2의 비오투 수는 약 9인 경우이다. 마지막으로 해석케이스 3은 낮은 비오투 수($Bi_p \leq 4$)에 해당하는 해저배관으로 해석케이스 3의 비오투 수는 약 1.99인 경우에 해당한다.

제안 식 계산결과 및 수치 해석적 실험 결과를 비교하였을 때 각 케이스의 매립깊이 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에서 평균 5%이내의 오차를 가지는 것으로 나타났으며 케이스1 즉, 높은 비오투 수의 경우 각 케이스 중 가장 낮은 오차를 보였다.

Nomenclature

α_0 = 배관의 매립깊이에 따라 달라지는 보조 기하학적인 양 [-]

A = 해저지반 단위면적 [m^2]

A_{par} = 열에 관한 보조의 기하학적인 양 [-]

Bi_g = 지반의 비오투 수 [-]

Bi_p = 배관의 비오투 수 [-]

Δx_i = 다층지반에서 지반층의 두께 [m]

D_{ext} = 단일배관 및 단열재로 보강된 배관의 최 외경 [m]

D_{int} = 배관 내경 [m]

D_{ref} = 총괄열전달계수 산정을 위한 참조 직경 [m]

D_{soil} = ' h_{soil} ' 과 동등한 열 저항을 주기위한 흙의 영향반경 [m]

D_{steel} = 단열재를 제외한 배관의 외경 [m]

e = ' h_{amb} ' 와 동등한 열저항을 주기위한 흙의 두께 [m]

H = 해저지반으로부터 매립된 해저배관 중심까지의 깊이 [m]

h_{amb} = 매립정도에 따른 외부유체의 임의의 경막계수 [W/m^2K]

h_{buried} , h_{ground} = 해저배관의 내부경막계수, 배관벽의 열전달계수, 해저지반의 열전달계수를 혼합한 열전달계수 [W/m^2K]

h_{ext} = 배관 외부의 열전달계수 [W/m^2K]

h_{int} = 배관 내부의 열전달계수 [W/m^2K]

h_{layer} , h_{blayer} = 해저배관의 내부경막계수, 배관벽의 열전달계수, 다층지반의 열전달계수를 혼합한 열전달계수 [W/m^2K]

h_{soil} = 해저지반의 열전달계수 [W/m^2K]

k_{amb} = 외부유체의 열전도율 [W/mK]

k_f = 배관내부유체의 열전도율 [W/mK]

k_i = 다층지반에서 해당 층의 열전도율 [W/mK]

k_{equiv} = 다층지반을 고려한 등가 열전도율 [W/mK]

k_{soil} = 단일 해저지반의 열전도율 [W/mK]

\dot{m} =해저배관 내부 질량 흐름율 [kg/s]

Q =열 전달율 [W]

R_{int} =해저배관 내벽에 관내 유동의 대류에 의한 열 저항 [m^2K/W]

R_{wall} =해저배관 내벽에서 배관외벽으로 전도에 의한 열 저항 [m^2K/W]

R_{ext} =해저배관 외벽에서 유동의 대류에 의한 열 저항 [m^2K/W]

T =다층지반 층별 경계면에서의 온도 [K]

U =총괄열전달계수 [W/m^2K]

U_{buried} =완전히 매립된 해저배관의 총괄열전달계수 [W/m^2K]

$U_{unburied}$ =매립되지 않은 해저배관의 총괄열전달계수 [W/m^2K]

U_{ground} =해저지반과 부분 매립된 해저배관의 열전달계수 [W/m^2K]

U_{wall} =단일 해저배관 벽 및 단열재로 보강된 해저배관 벽의 열전달계수 [W/m^2K]

$U_{int+wall}$ =해저배관 내벽의 경막계수 및 열전달계수로 이루어진 열전달계수 [W/m^2K]



참고문헌

- 김민준, 윤석, 고규현, 강한별, 이승래, 2013. 다층지반 열전도도 해석해 검증, *대한토목학회 학술대회*.
- 김유성, 2011. 열저항 특성을 고려한 지중송전관로 되메움재의 최적화(I). *한국토목섬유학회논문집*, 10(4), pp.113-121.
- 김학승, 이장근, 2011. 포화된 카올리나이트의 압밀에 따른 열전도계수에 관한 연구, *대한지질공학회지*, 21(2), pp.157-162.
- 박동수, 서영교, 2016. 뒤채움 흙의 열전도율 및 매설깊이에 따른 해저파이프의 열손실에 관한 비교연구. *한국해양공학회 창립 30주년 기념 학술대회 (2016년도 추계학술대회)*.
- 박동수, 서영교, 2017. 해저배관 뒤채움 흙의 열전도율 산정에 관한 실험 및 수치 해석적 연구. *한국해양공학회논문집*, 31(2), pp.103-110.
- 차장환, 안선준, 구민호, 2008. 토양의 공극률 및 함수비가 열전도도에 미치는 영향. *한국지하수토양환경학회지*, 13(3), pp.27-36
- ANSYS Inc., 2010a. *ANSYS CFX Theory Guide*. ANSYS v130: Canonsburg.
- ANSYS Inc., 2010b. *ANSYS CFX Tutorials*. ANSYS v130: Canonsburg.
- Bai, Y., & Bai, Q., 2005. *Subsea Pipelines and Riser*. 1st ed. Elsevier Ltd.: Oxford.
- Bai, Y., & Niedzwecki, J.M., 2014. *Modeling deepwater seabed steady-state thermal fields around buried pipeline including trenching and backfill effect*, *Computers and Geotechnics*, 61, pp.221-229.
- Bau, H.H., & Sadhal, S.S., 1982. *Heat losses from a fluid flowing in a buried pipe*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 25, pp.1621-1629.
- Carslaw, H.A., & Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solides*. 2nd ed. Clarendon Press:Oxford
- Holman, J.P., 2009. *Heat Transfer*. 10th ed. McGraw-Hill:New York
- Mitchell, J.K., & Kao, T.C., 1978. *Measurement of soil thermal resistivity*,

- ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 104(5), pp.1907–1320.
- Morud, J.C., & Simonsen, A., 2007. Heat Transfer from partially buried pipes. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Gold Coast, Australia
- Oh, D.-W., Park, J.M., Lee, K.H., Zakarian, E., & Lee, J., 2014. *Effect of buried depth on steady-state heat-transfer characteristics for pipeline-flow assurance*, SPE Journal, 19(06), pp.1,162–1,168.
- Ovuworie, C., 2010. Steady-State Heat Transfer Models for Fully and Partially Buried Pipelines. *CPS/SPE International Oil&Gas Conference and Exhibition*, Beijing, China.
- Thusyanthan, N.I., 2011. Thermal imaging, thermal conductivity of soil and heat loss from buried pipelines, *The Offshore Pipeline Technology Conference*, Amsterdam.
- Xu, C., Yu, B., Zhang, Z.W., Zhang, J.J., Wei, J.J., & Sun, S.Y., 2010. *Numerical simulation of a buried hot crude oil pipeline during shutdown*, Pet Sci, pp.73–82
- Zakarian, E., Holbeach, J., & Morgan, J., 2012. A Holistic Approach to Steady-State Heat Transfer From Partially and Fully Buried Pipelines. *Offshore Technology Conference*, Huston.