



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

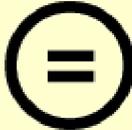
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



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](#)

공학전문석사 학위 연구보고서

**전산유체해석을 이용한 국내 500MW
화력발전소 선택적촉매환원장치
유동균일화 연구**

**A CFD study on flow uniformity of SCR System
in 500MW Coal-Fired Power Plants**

2022년 02월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
백 두 현

전산유체해석을 이용한 국내 500MW
화력발전소 선택적촉매환원장치
유동균일화 연구

A CFD study on flow uniformity of SCR System
in 500MW Coal-Fired Power Plants

지도교수 황 원 태

지도교수 박 창 우

이 프로젝트 연구보고서를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2022년 02월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
백 두 현

백두현의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
2022년 02월

위원장 김 국 현

위 원 황 원 태

위 원 박 창 우

초 록

2015년 파리기후협약(Paris Climate Change Accord) 이후 세계 온실 가스 배출량 감축의 요구가 계속되고 있으며, 정부는 선제적 에너지 전환 및 탄소중립 정책을 추진하여 보령화력 1,2호기를 계획보다 2년 앞당겨 2019년 12월에 폐쇄하는 조치를 취했다. 이를 시작으로 석탄화력 미세먼지 배출량을 지속적으로 감축하기 위한 탈석탄 에너지전환 정책으로 환경급전, 계절관리제 등으로 석탄화력 발전기 Shut Down이 지속적으로 진행되고 있다. 특히 국내에는 석탄화력발전 58기가 운영중에 있고, 석탄화력발전소 대체 방안인 가스터빈 복합발전 또한 질소산화물(NOx) 제거를 위한 설비의 개발 요구가 계속되고 있다.

한편 10년 이상 수명이 남은 발전소는 약40기 이상으로 발전소 현장에서 석탄화력발전소의 운영을 위해 배기오염물질 배출기준 준수를 목표로 환경설비 성능개선 대책으로 설비용량 증대의 노력을 하고 있다. 하지만 한 호기당 최소 천억에서 많게는 삼천억의 과대한 비용이 소요된다. 이는 정부 탄소중립 정책을 충족하고, 전력시장 변화에 대응하기 위한 당연한 조치로 보이지만 기업측면에서 볼때 설비증설을 위한 투자, 부지 확보 등 경제성 측면을 무시한 방법이다.

석탄화력발전소 환경설비로는 선택적 촉매환원제(SCR), 전기집진기, 탈황설비 등이 있으며 이 설비들은 화학적, 전기적 반응을 통하여 NOx, Dust, SOx 환원 및 제거하는 반응법이다. 이 반응효율을 높이는 방법은 반응 면적을 넓히거나, 정해진 면적에 적절한 양의 가스를 최적의 속도로 통과시켜 반응시간을 최대화하는 방법이 있다. 이를 위해 반응체에 최적 양의 가스가 통과할 수 있도록 안내깃(Guide Vane), 암모니아가스 혼합기

(Mixing Pipe)의 조정 등을 통해 효율향상을 이룰 수 있다. 즉 가스편류를 최소화하여 유동을 균일화하는 방법만으로 반응 효율을 높일 수 있다. 이에 대한 선행 연구에서는 전기집진기 효율향상을 위해 환경설비(전기 집진기)내 실제 속도를 측정하여 RMS을 값을 구하고 이를 균일하게 할 수 있도록 가스 분포판 조정하여 효율을 향상 할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 국내 500MW급 석탄화력발전소 중 7,8호기시리즈의 보일러의 SCR(선택적촉매환원법)설비를 기반으로 3D모델링을 진행하고 전산유체역학해석(CFD)을 이용하여 배기가스의 유동 특성을 확인해 보고, 개선인자(Guide Vane, Mixing Pipe, Catalyst)의 변화를 통해 가스 유동이 균일화 될 수 있음을 증명 하였다. 또한 이 연구를 통해 조정 가능한(adjustable: 모터동력 등) 가이드 베인 모델을 제안하여 본 연구의 의미를 확보할 수 있었으며, 향후 화력발전소 환경설비 개선 확대와 관련 분야 연구에 있어 유동해석의 새로운 기술 패러다임으로 자리 잡을 수 있을 것으로 예상된다.

주요어 : 전산유체역학 해석(CFD), SCR(선택적 촉매환원법), 석탄화력 발전소, Guid Vane, Mixing Pipe

학번 : 2020-26224

목 차

| | |
|---------------------------------|-----------|
| I. 서론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 | 1 |
| 1.2 연구 내용 | 4 |
| 1.2.1 연구 목적 | 4 |
| 1.2.2 연구 필요성 | 6 |
| 1.3 이론적 배경 | 8 |
| 1.3.1 SCR(선택적 촉매환원법) | 8 |
| 1.3.2 전산유체역학해석 | 11 |
| 1.4 연구 방법 | 12 |
| 1.5 연구 동향 | 13 |
| II. 전산해석 | 16 |
| 2.1 실험 모델 | 16 |
| 2.2 격자 작업 | 17 |
| 2.3 해석 기법 | 20 |
| 2.3.1 경계조건 | 20 |
| 2.3.2 Porous Media 해석 | 21 |
| 2.3.3 설계판단기준 | 24 |
| III. 해석결과 | 28 |
| 3.1 레퍼런스 해석 | 28 |
| 3.2 개선안 해석 | 32 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.2.1 | Additional Guide Vane Cases | 32 |
| 3.2.2 | Mixing pipe | 45 |
| 3.2.3 | Additional Vanes + Mixing Pipe | 49 |
| 3.2.4 | Additional Vanes + Mixing Pipe + Catalyst | 53 |
| IV. | 결론 | 56 |
| 4.1 | 요약 | 56 |
| 4.2 | 후속연구 | 59 |
| | 참고 문헌 | 60 |
| | Abstract | 62 |

그림 목 차

| | | |
|----------|---|----|
| 그림 1-1. | 국가별 이산화탄소 배출량 | 1 |
| 그림 1-2. | 우리나라 분야별 온실가스 비중 | 2 |
| 그림 1-3. | 우리나라 에너지분야 온실가스 비중 | 2 |
| 그림 1-4. | 우리나라 에너지원 비중 | 3 |
| 그림 1-5. | 복합화력발전소 SCR 구성 | 9 |
| 그림 1-6. | 질소산화물 치환 과정 | 9 |
| 그림 1-7. | 전산유체해석 절차 | 12 |
| 그림 2-1. | SCR 3차원 Design | 17 |
| 그림 2-2. | SCR Inlet Guide Vane | 18 |
| 그림 2-3. | SCR 전체 격자 구성 | 19 |
| 그림 2-4. | SCR Guided Vanes 격자 구성 | 19 |
| 그림 2-5. | SCR 경계조건 | 21 |
| 그림 2-6. | Porous Media 설정 영역 및 명칭 | 23 |
| 그림 2-7. | Mixing Pipe를 Porous Media로 변환한 형상 | 23 |
| 그림 2-8. | Catalyst layer를 Porous Media로 설계한 형상 | 24 |
| 그림 2-9. | 설계변수①: Additional 안내깃(Guide Vane) | 26 |
| 그림 2-10. | 설계변수②: Mixing Pipe | 26 |
| 그림 2-11. | 유속 균일도 측정위치 | 27 |
| 그림 3-1. | Reference Design의 ZX면의 유동 | 30 |
| 그림 3-2. | Reference Design의 XY면의 유동 | 31 |
| 그림 3-3. | Reference Design과 Additional Vane(90 Degree)의 유동 비교 | 32 |

| | |
|---|----|
| 그림 3-4. Additional Vane(90 Degree)의 XY면의 유동 | 33 |
| 그림 3-5. Additional Vane(1st~6th) ZX면의 유동 | 36 |
| 그림 3-6. Additional Vane(7th~12th) ZX면의 유동 | 37 |
| 그림 3-7. Additional Vane(13th~18th) ZX면의 유동 | 38 |
| 그림 3-8. Add. Vane(90Degree)와 Add. Vane(15th) ZX면의 유 동 비교 | 40 |
| 그림 3-9. Additional Vane(15th Degree Change)의 XY면의 유동 | 40 |
| 그림 3-10. Reference와 Additional Vane(3th Degree Change) 유 동 비교 | 41 |
| 그림 3-11. Reference, Additional Vane(90 Degree, 15th, 3rd) 비교 | 42 |
| 그림 3-12. Additional Vane(3th Degree Change)의 XY면의 유동 . | 43 |
| 그림 3-13. Additional Vane(15th Degree Change)과 Additional Vane(3th Degree Change) 유동 비교 | 44 |
| 그림 3-14. Reference Design과 M.P(300mm, 600mm) ZX면 유 동 비교 | 45 |
| 그림 3-15. Mixing Pipe 300mm 600mm XY면의 유동과 RMS 값 비교 | 46 |
| 그림 3-16. Mixing Pipe Blocking 3% 13% XY면의 유동과 RMS 값 비교 | 47 |
| 그림 3-17. Add.Vane(15th)과 Add.Vane(15th)+M.P(300mm) ZX 면의 유동 비교 | 49 |
| 그림 3-18. Add.Vane(15th)과 Add.Vane(15th)+M.P(300mm) XY 면의 유동과 RMS값 비교 | 50 |

| | |
|---|----|
| 그림 3-19. Additional Vane(3th Degree Change)과 Additional Vane(3th Degree Change)+Mixing Pipe(300mm) ZX면의 유동 비교 | 51 |
| 그림 3-20. Additional Vane(3th)과 Additional Vane(3th)+M.P(300mm) XY면의 유동과 RMS값 비교 | 52 |
| 그림 3-21. Additional Vane(3th Degree Change)+Mixing Pipe(300mm) + 3단, 4단 Catalyst의 ZX면의 유동 비교 | 54 |
| 그림 3-22. Additional Vane(3th Degree Change)+Mixing Pipe(300mm)+ 3단, 4단 Catalyst의 XY면의 유동과 RMS값 비교 | 54 |
| 그림 4-1. 각 유동해석 모델의 Layer4 RMS값 비교 | 58 |
| 그림 4-2. 각 유동해석 모델의 Layer3 RMS값 비교 | 58 |

표 목 차

| | | |
|---------|--|----|
| 표 1-1. | 석탄 화력발전소 온실가스 배출기준 | 6 |
| 표 2-1. | 사용된 Ideal Gas Mixture | 21 |
| 표 2-2. | 적용된 Porosity 및 손실계수 | 24 |
| 표 3-1. | 평가 위치별 유속균일도 및 압력강하 | 28 |
| 표 3-2. | Reference Design과 Add. Vane(90 Degree)의 (RMS) 비교 | 34 |
| 표 3-3. | Additional Vane Radius Degree | 35 |
| 표 3-4. | 각도 변화에 따른 (RMS) | 39 |
| 표 3-5. | Reference Design과 15th Additional Vane 유동불균일 도 비교 | 41 |
| 표 3-6. | Reference Design과 3rd Additional Vane 유동불균일도 (RMS) 비교 | 43 |
| 표 3-7. | Additional Vane 3th와 15th Degree Change (RMS) 비교 | 44 |
| 표 3-8. | M.P(300mm)과 M.P(600mm)의 유동균일도(RMS) 비교 | 46 |
| 표 3-9. | M.P(Bloking 3%)과 M.P (Bloking 13%)과 유동불균일 도비교 | 48 |
| 표 3-10. | Add.Vane(15th Degree Change)과 Add. Vane(15th De- gree Change)+M.P(300mm) 비교 | 50 |
| 표 3-11. | Add.Vane(3th)과 Add.Vane(3th)+M.P(300mm) 비교 . . | 52 |
| 표 3-12. | Add. Vane(3rd) + M.P(300mm)+3단축매층과 Add. Vane(3rd) +M.P(300mm)+4단축매층 유동불균일도 비교 | 55 |
| 표 4-1. | 주요 실험 모델 유동불균일도 비교 | 57 |

제 1 장

서론

1.1 연구 배경

지난 2015년 12월 파리기후협약(Paris Climate Change Accord) 이후 세계 온실가스 배출량 감축의 요구에 따라 국가별로 탄소배출 감축목표를 설정하였으며, 우리나라는 세계 8위의 탄소배출국(570Mt/년, 2020)으로 2030년 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 27% 저감을 감축 목표로 설정하였다. 하지만, 아직도 약2.8%의(2017년 대비)의 이산화탄소 배출 증가세를 보이고 있다.

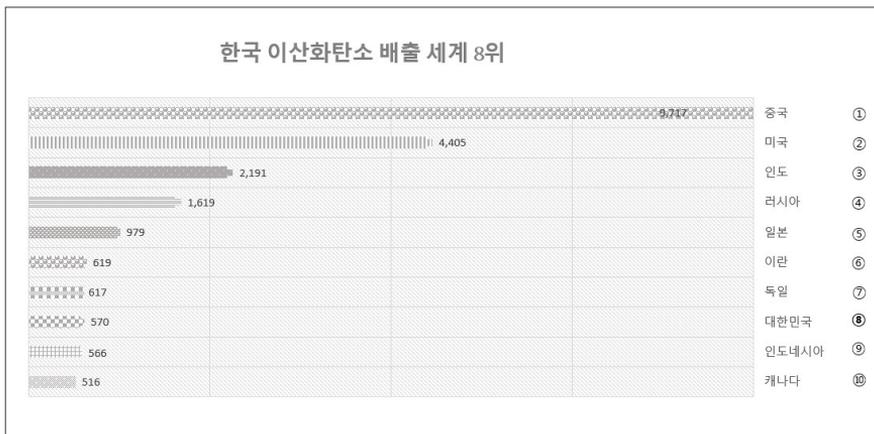


그림 1-1: 국가별 이산화탄소 배출량

특히 국내 온실가스 배출량 부문별 비중을 살펴보면 에너지분야가 89%로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 이 중 열 및 전기를 생산하는

에너지산업(발전, 열병합)이 45%로 가장 많다.

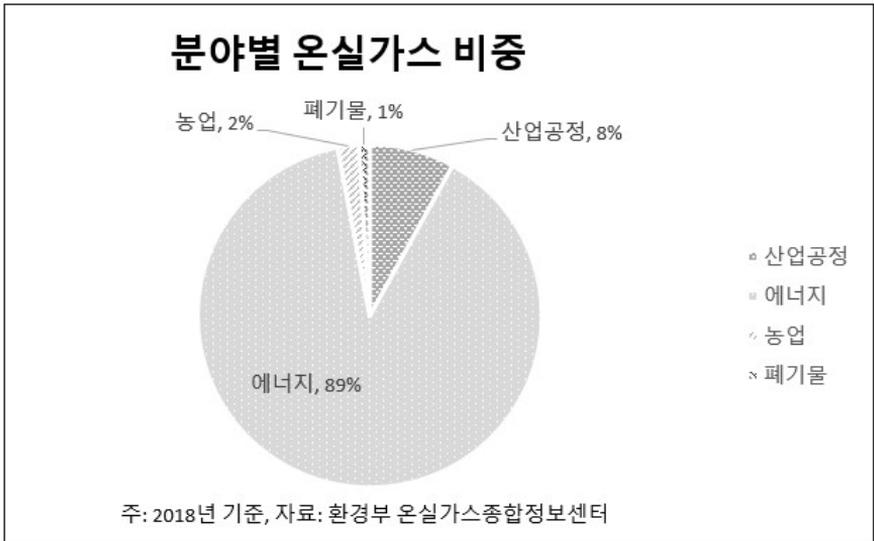


그림 1-2: 우리나라 분야별 온실가스 비중

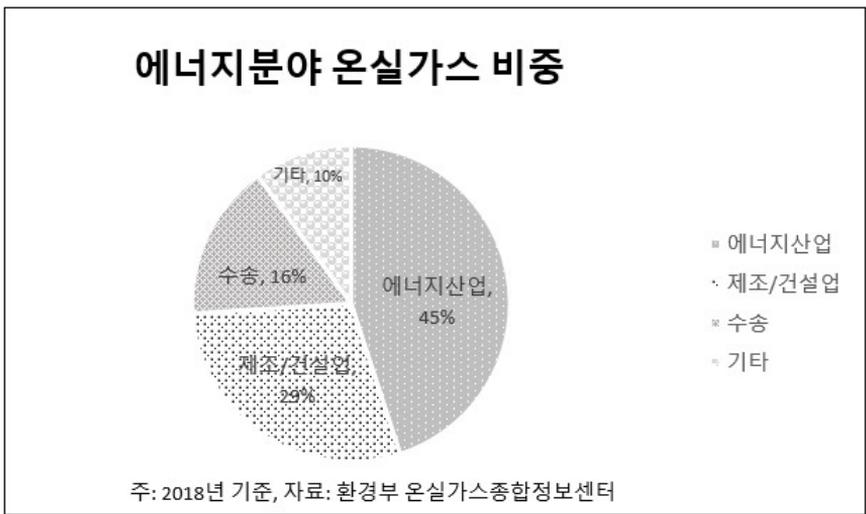


그림 1-3: 우리나라 에너지분야 온실가스 비중

특히 에너지산업의 가장 많은 비중을 차지하는 전력생산(발전)의 주 에너지원은 석탄으로 온실가스의 주범으로 계속된 배출가스 저감의 노력이 요구되고 있다[1].

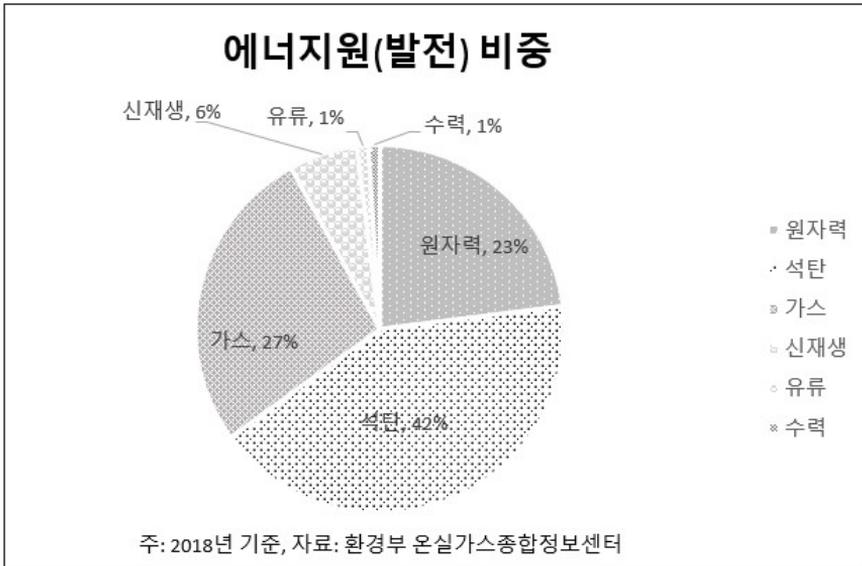


그림 1-4: 우리나라 에너지원 비중

이처럼 정부는 선제적 에너지 전환 및 탄소중립 정책을 추진하여 보령 석탄화력발전소 1,2호기를 계획보다 2년 앞당겨 2019년 12월에 조기 폐쇄하는 조치를 취했다. 이를 시작으로 석탄화력 온실가스(미세먼지) 배출량을 지속 감소하기 위한 탈석탄 에너지전환 정책으로 환경급전, 계절관리제 등으로 석탄화력 발전기 Shut Down을 지속적으로 진행되고 있다. 특히 국내에는 석탄화력발전 58기가 운영중에 있고, 석탄화력발전소 대체 방안인 가스터빈 복합발전 또한 질소산화물(N2) 제거를 위한 설비 개선 요구가 계속되고 있다[2].

한편 10년 이상 수명이 남은 석탄화력발전소는 약40기 이상으로 발

전소 현장에서는 석탄화력발전소의 운영을 위해 배기가스 배출기준 준수를 목표로 환경설비 성능개선을 위해 설비용량증대의 노력을 하고 있다. 하지만 한 호기당 최소 천억에서 많게는 삼천억의 과대한 비용이 소요된다. 이는 국내 탄소중립 정책에 충족하고, 전력시장의 변화에 대응하기 위한 당연한 조치로 보이지만 기업측면에서 볼때 설비증설을 위한 투자, 부지확보 등 경제성 측면을 무시한 방법일 수 있다.

석탄화력발전소에는 환경설비로 선택적촉매환원법(SCR), 전기집진기, 탈황설비 등이 설치되어있다. 이 설비는 화학적, 전기적 반응을 통하여 Nox, Dust, Sox 분리 및 포집하는 반응제거법이다. 이 반응효율을 높이는 방법은 반응 면적을 넓히거나, 정해진 면적에 적절한 양의 가스를 최적의 속도로 통과시켜 반응시간을 최대화하는 방법이 있다. 이를 위해 반응체에 최적양의 가스가 통과할 수 있도록 안내깃(Guide Vane), 암모니아/가스 혼합기(Gas Distributor)의 조정 등을 통해 효율향상을 이룰 수 있다. 즉 가스편류를 최소화하여 유동을 균일화하는 방법만으로도 반응 효율을 높일 수 있다.

1.2 연구 내용

1.2.1 연구 목적

본 연구는 국내 500MW급 석탄화력발전소를 기준으로 설계된 SCR 반응기를 대상으로 다양한 조건 상태의 가스유동을 분석하고 안내 깃의 조정으로 촉매단 유동균일화를 통해 반응효율을 높이는 것이 목표이다. 현재 국내 화력발전소에는 연료(화석연료) 연소 후 배출되는 질소산화물을 제거하기 위한 기술 중, 선택적촉매환원(SCR: Selective Catalytic Reduction) 설비들이 설치되어 있다. 이 방법은 배기가스에 환원제(암모니

아)를 주입하 후 촉매를 통과시켜 NO_x를 N₂와 H₂O로 치환하는 환원 기술로 높은 탈질율과 안정된 방법으로 널리 사용되고 있다. SCR(선택적촉매환법)의 성능은(촉매의 성능이 균일할 경우) 촉매층으로 유입되는 가스유동의 균일도에 따라 달라지는데 SCR 설계시 탈질성능 보증을 위해 촉매층 전단의 속도분포와 전후단차압, 가스온도, 가스유동의 입사각, 암모니아 농도 등을 고려한다. 배기가스에 편류가 발생할 경우 가스 유동이나 암모니아의 분포가 일정하지 않기 때문에 촉매층에서 균일한 화학반응이 어렵다. 따라서 탈질 성능이 저하 될 뿐만아니라, 한쪽으로 유동이 편향되는 국부현상으로 인하여 촉매의 사용주기가 짧아지는 현상이 발생한다. 또한 미반응한 암모니아가 누설되는 슬립(Slip) 현상으로 보일러 열교환기(Gas Air Heater) 열소자를 막는 막힘현상을 유발하여 보일러 운전에 영향을 주는 문제가 발생한다. 그러므로 촉매층 전단에서의 유동 균일화를 보장하기 위해서는 안내 깃(Guide Vane), 암모니아/가스 혼합기(Gas Distributor)와 같은 유로 변경장치의 설치는 필수적이다. 유동은 안내 깃(Guide Vane)과, 촉매층과 같은 다공성(Porosity) 층(layer) 전 후에서 가장 많은 변화가 발생함으로 안내깃의 각도 및 촉매층의 변화에 따른 유동해석이 필연적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 국내 석탄화력 발전소에서 일반적으로 사용되고 있는 탈질설비인 선택적촉매환원장치(SCR)를 전산유체역학 해석을 활용하여 안내깃, 암모니아/가스 혼합기, 촉매에 따른 유동변화를 확인하고 가스유동 균일화를 위한 최적의 안내 깃(Guide Vane), Mixing Pipe 모델을 찾는 것을 목적으로 하였다. 또한 이 연구는 향후 NO_x 배출량 피드백제어를 통해 유동을 제어할 수 있는 가변형 가이드베인 개발을 위한 선행연구로 활용할 계획이다.

| Sox(ppm) | NOx(ppm) | Dust(mg/Sm2) | 비고 |
|----------|----------|--------------|----------------|
| 60 | 70 | 12 | '19년~ |
| 25 | 15 | 5 | 충남도 조례기준('26~) |
| 15 | 10 | 3 | 수도권 운영기준 |

표 1-1: 석탄 화력발전소 온실가스 배출기준

1.2.2 연구 필요성

최근 대두되고 있는 화력발전소 온실가스 배출과 관련하여 전력거래 시장의 변화가 일기 시작했다. 현재까지는 연료비에 따라 전기판매단가가 정해지고, 발전효율에 따라 급전순위가 정해졌지만, 지금은 환경비용을 반영한 환경급전이 시행되고 있다. 2026년에는 현재보다 미세먼지 배출량을 약 60%을 목표로 설비를 개선 또는 전기생산량을 감축해야한다.

이를 위해서 환경설비의 용량을 증가시켜 온실가스량을 감축하는 방법이 있다. 하지만 약 천억의 이상의 자재, 공사비 뿐만아니라 부지도 필요하다. 특히 실제로 담당하고 있던 태안화력 5,6호기의 경우 환경설비 개선을 위해서는 최소 1,500억 이상의 공사비가 투자되어야 함을 확인하였다. 또한 환경유해물질 배출량의 기준에 대한 설계마진이 매우 작아 설비용량을 증가시키는 것과 동시에 설비의 효율향상이 동시에 이루어져야한다.

본 연구에서는 환경설비 중 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction ,SCR)으로 한정하여 탈질효율 향상에 대한 연구를 시행하였다. SCR은 배기가스의 온도조건, 유동안전성, 설치장소의 제한 등에 따라 배기가스 Stream 중간에 설치하는데 국내 석탄화력 발전소의 대부분은 탈질반응 온도특성상(300°C~400°C) Economizer와 Gas Air Pe-heater 사이 위치한다(가스터빈복합발전소의 경우는 급수관과 절탄기 사이에 위치) SCR은 탈질효율이 높고, 안정적인 성능을 유지할수 있으며, 보일러 운전 에 크게 영향을 주지 않는 장점을 장점을 가지고 있어 모든 화력 발전소에

N₂를 제거하기위해 필수적으로 설치되고 있다.

특히 기계공학적 측면에서 볼 때 SCR 내부의 유동구조는 탈질 효율에 영향을 미치며, 촉매 단면에서의 속도, 유동의 입사각에 의해 영향을 받는다. 배기가스 흐름이 균일하지 못할 경우 촉매 막힘 현상 먼지(Ash) 성분 또는 황(Sulfates)에 의해 촉매활성 표면이 덮히는 현상으로 암모니아와 NO_x의 충분한 반응을 방해하며 생성물인 N₂와 H₂O의 전달물질(Mass Transfer)를 방해하며, 촉매막힘현상 등을 야기하게 되어 반응기 전체를 통한 압력강하가 증가하게 된다. 이들 현상을 최소한으로 줄이기 위해서는 배기가스 흐름을 균일하게 하여 반응기 안에서 Ash 등의 고체 침적을 막고, 촉매의 부식을 억제할 수 있다.

배기가스를 균일하게 하는 설비로는 안내 깃, 암모니아/가스 혼합기가 설치되어 있는데 이러한 설비들의 최적화를 위해서는 SCR내에서 유속 분포를 전산유체역학해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)이 필요하다. 현재 석탄화력 발전소는 경제적인 이유로 인해 설계 기준보다 발열량이 낮은 석탄을 사용하고, 그동안 추가된 각종 설비들로 인하여 보일러 내부에서 골뚝으로 연소가스가 배출되는 전 과정이 설계 당시와 달라져 운전조건 및 연소가스의 내부 유동이 계속 변화하고 있다. 따라서 변화한 환경 규제에 대응하고 온실가스 감축을 위해서는 연소가스 유동에 관련된 종합적인 연구와 검토가 필요하다.

또한 환경설비 성능개선 대안으로 석탄화력발전소에서는 촉매층을 추가 설치하고있다. 이에 따른 배기가스 유동 변화에 대해 전산유체역학 해석을 이용하여 가스유동 균일화를 위한 최적의 안내 깃(Guide Vane), 암모니아/가스 혼합기(Mixing Pipe) 모델을 찾고, 향후 가변형 안내 깃(Guide Vane) 개발을 위한 선행연구로서의 필요성을 갖는다.

1.3 이론적 배경

1.3.1 SCR(선택적 촉매환원법)

1.3.1.1 화력발전소 SCR 개요

화력발전소에서 전기생산을 위한 가장 중요한 과정 중 하나는 보일러에서 물을 과열증기로 바꾸기 위한 연소반응이다. 석탄 또는 천연가스 등을 탈물질(연료)로 하여, 연소용 공기량, 보일러 내 압력조건 등을 제어하여 원하는 온도의 증기를 만든다. 특히 연소 후에는 수증기(물) 이외에도 질소산화물, 황산화물, 먼지 등이 생성되는데 선택적 촉매환원법으로 불리는 SCR은 이중 질소산화물을 제거 하기위한 설비이다. [그림2-1]은 복합화력발전소의 수평형 HRSG에 설치된 SCR의 모습이며, 가스터빈 연소 후 생성된 질소산화물(NO_x)가 SCR을 통과한 후 질소(N_2)와 수증기로 치환되는 과정은 [그림2-2]를 통해 자세히 확인 할 수 있다. 이 시스템은 연소 후 생성된 배기가스에 환원제(암모니아)를 주입하 후 촉매를 통과시켜 NO_x 를 N_2 와 H_2O 로 환원시키는 선택적 촉매 환원법으로 배기가스 중 O_2 의해 방해받지 않고 NO_x 를 선택적으로 환원시킬 수 있는 촉매가 개발되면서 상용화된 기술로 현재도 화력발전소에 가장 많이 쓰이는 질소산화물 제거법이다.

선택적 촉매 환원법은 질소산화물 제거율이 80~95%로 매우 우수하며, 촉매 최적 운전온도는 배기가스 온도 300~400°C로 발전소 초기 부하에서는 환원 성능이 저조하지만 전력생산이 이루어지는 부하에서는 질소산화물 제거율이 높을 뿐만아니라 SNCR 선택적 비촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction)은 850~1000°C의 높은 온도에서 암모니아 또는 요소수(Urea)를 분사하여 NO_x 를 제거하는 기술 (비촉매환원방식)와

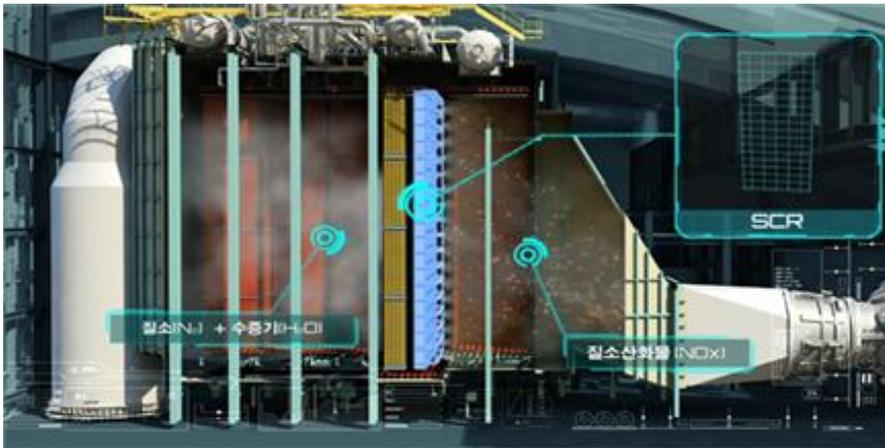


그림 1-5: 복합화력발전소 SCR 구성

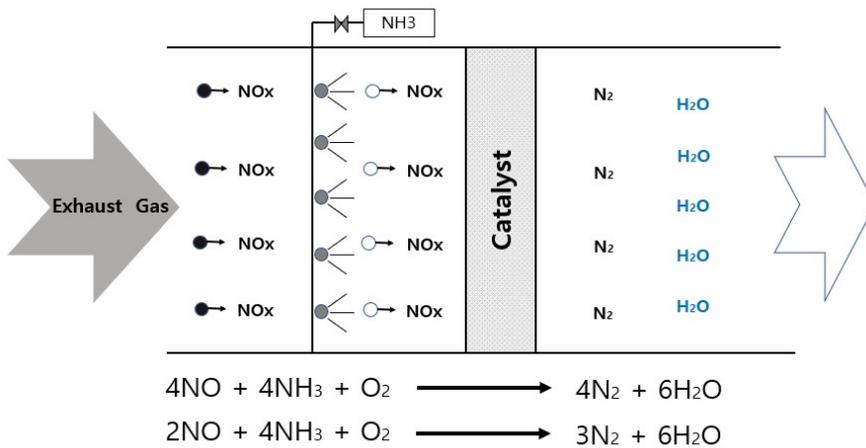


그림 1-6: 질소산화물 치환 과정

비교해볼때 상대적으로 제어가 쉽고 안정적이라는 장점이 있다. 하지만 초기투자비용이 높고, 촉매가 연소가스 내 화합물에 의해 쉽게 오염될 수 있어 촉매 교체 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이를 최소화하기 위해 서는 촉매에 균등하게 배기가스가 통과할 수 있게 하는 설비 또는 구조

물 안내깃의 역할이 중요하며, 이는 질소산화물 제거율과도 직접적으로 관련되어 설치 및 보수정비시 배기가스 흐름에 대한 유동해석이 반드시 요구된다[3].

1.3.1.2 화력발전소 SCR 주요구성품

1.3.1.2.1 Injection Grid(암모니아 주입장치)

암모니아를 덕트내에 분사하는 장치로서 배기가스의 온도가 촉매의 적정 반응온도에 도달하면 정해진 NH_3/NO_x (암모니아가 공급되기 전 질소산화물의 농도, 온도 및 산소 농도 측정) 비율이 암모니아 주입 그리드를 통하여 주입된다.

1.3.1.2.2. Mixing Pipe(암모니아/가스 혼합기)

석탄화력보일러의 SCR에는 암모니아 주입 그리드에서 주입된 암모니아와 배기가스의 흐름을 균일하게 유지하기 위해 암모니아/가스 혼합기(Static Mixture)가 설치된다. 이 설비는 보통 Catalyst 전단 Duct의 Amonia Injection 후단에 설치되는데 Mixing plate 또는 Mixing Pipe라는 명칭을 가지고 있다. 본 논문에서는 Mixing Pipe라고 표기하였다.

1.3.1.2.3. 안내깃(Guide Vane)

덕트의 직경부분 통로에 동일형의 날개(곡률을 가진 날개)를 부착하여 직각부분의 속도 변화에 의한 난류의 발생을 방지하고, 유체의 저항 손실을 작게 하는 목적으로 쓰인다

1.3.1.2.4. Catalyst(SCR 촉매)

SCR촉매로는 Alumina, Titania, Silica 등(활성금속) 표면적이 큰 물질(담

체)에 균일하게 부착시킨 촉매 또는 활성금속과 담체물질(Carrier)을 혼합 성형한 촉매가 일반적으로 사용되며 구조에 따라 Honeycomb Type, Plate Type 등이 있다. SCR 촉매 선정 기준은 높은 반응성, 낮은 차압, 촉매 교체 용이성 등이 있으며, 연료 종류, 황 등의 불순물 농도, 배기가스 설계 온도/속도/조성/암모니아/NOx몰비 등에 따라 형식과 성분이 달라진다[4].

1.3.2 전산유체역학해석

전산유체역학해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)은 주어진 제한된 계에서 수치 알고리즘을 이용하여 유체역학 지배방정식의 근사해를 구하고 제한된 구역에 존재하는 유체의 움직임을 묘사하는 방법이다. 여기서 지배방정식(유체의 움직임을 수학적으로 표현하는 방정식)은 유체 현상을 기술한 비선형계 편미분방정식인 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes Equations)을 유한차분법 (Finite Difference Method), 유한요소법 (Finite Element Method), 유한체적법(Finite Volume Method) 등의 방법들을 사용하여 이산화하여 대수 방정식으로 변환하고, 이를 수치 기법(Numerical methods)의 알고리즘을 사용하여 유체 유동 문제를 풀고 해석하는 것이다. 이를 바탕으로 전산유체역학해석(CFD)을 활용하여 공학적인 여러 현상들을(유동, 구조, 열, 전자기 등) 시뮬레이션을 통해 결과를 얻을 수 있다[4],[5].

일반적으로 적용 모델을 실제와 가깝게 모델링 한다고 해도 근사해만을 얻을 수 있으며, 실험을 통해 얻은 정량적, 정성적 데이터와 비교하며 모델을 수정해야 한다. 정량적 정성적 실험 데이터와 100% 일치하지는 않지만 전산유체역학해석(CFD)을 통해 실제 실험결과 값과 유사한 값을 도출하는 모델을 구현할 수 있다면 공학적으로 발생하는 여러 문제에 대해 최소의 시간과 비용을 들여 문제를 해결할 수 있다. 현재 발전소 현장뿐만

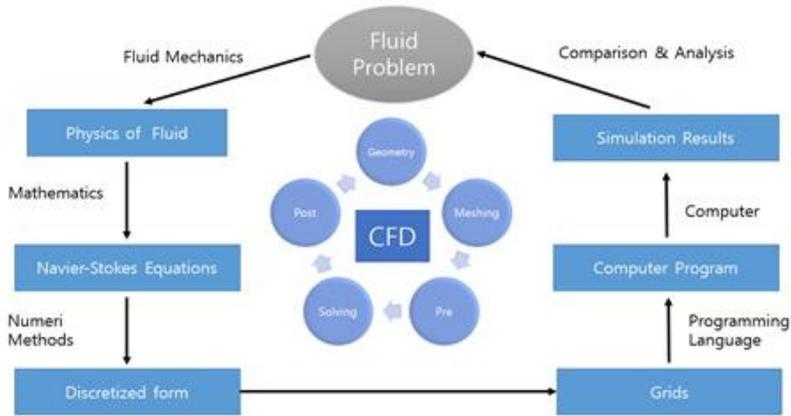


그림 1-7: 전산유체해석 절차

아니라 많은 기업 현장에서 발생하는 유체적, 물리적 문제에 대해 전산 유체해석 시뮬레이션을 통해 문제를 해결하고 있다[6].

1.4 연구 방법

태안발전본부 7,8호기의 보일러의 선택적축매환장치(SCR)을 기반으로 SpaceClame 2019 디자인툴을 활용해 모델링하였으며, 압력강하 없이 각 축매층의 유동특성을 확인하기 위해 Mixing Pipe(암모니아/가스 혼합기) 및 축매는 구현하지 않고 안내깃(Inlet Guide Vane)만을 반영한 모델을 레퍼런스로 전산유체역학 해석을 시행하였다. 전산유체역학 프로그램은 Ansys 19.2 CFX를 사용하였으며 배기가스는 25°C Air로 가정하고 해석을 진행하였다. 해석의 순서는 레퍼런스 모델을 시작으로 SCR 전단의 8개의 안내깃(Guide Vane)을 추가로 설치하여 Vane의 각도를 도에서 $\pm 10^\circ$, $\pm 5^\circ$, $\pm 2.5^\circ$, $\pm 1.5^\circ$ 줄여가며 총 18번의 전산유체역학 해석을 시행하였다. 또한 Duct에 위치하고 있는 Mixing Pipe(암모니아/가스 혼합기)

의 길이(300mm→900mm)변화, Volume Porosity(97%→57%)변화에 따른 유동변화의 전산유체해석을 시행하였다. 해석 결과를 토대로 Additional Vane, Mixing Pipe를 조합한 최적 모델을 선정하여 전산유체해석으로 각 촉매층의 가스유동을 확인하였다. 마지막으로 촉매층을 Porous Media로 구현하여 촉매층이 3단, 4단일 경우의 순서로 유동균일화를 확인할 수 있었다. Workbench의 Automesh Program을 사용하여 탈질설비 내부의 구조 격자를 구성하였으며, 복잡한 형상을 지니고있는 Vane의 경우 Sizing, Inflation 설정을 하고 Sweep Method 사용하여 Mesh를 구성하였다. Mesh의 품질은 모든 모델에 대하여 Orthogonality가 0.1이상으로 Accept 가능한 수준으로 진행하였다. CFD(computational fluid dynamics) 전산해석은 상용 코드 CFX를 이용하였으며, 해석 모델은 수렴성이 우수한 Standard K-ε 모델을 사용하였다. Mixing Pipe와 촉매층은 Porous Media로 가정하였으며 제작사에서 제시한 Volume Porosity 값을 기준으로 Kper, Kloss를 계산하여 Kloss 모델을 적용하였다. 연구결과에 대한 상세한 내용은 제 3장과 제 4장에 기술하였다.

1.5 연구 동향

석탄화력발전소 뿐만아니라 LNG를 연료로 사용하는 천연가스발전소, 열병합발전소에서도 탈질 효율향상에 대한 연구는 매우 중요하다. 특히 안내깃(Guide Vane), 암모니아/가스 혼합기(Mixing Plate, Mixing Pipe) 형상, 혼합특성에 관한 연구 등을 정리하였다. 화력발전소는 유량이 많고, 배기가스의 유속이 빨라 유동균일화가 어렵고 탈질설비 전단부의 형상이 복잡하기 때문에 편류를 최소화하여 탈질 촉매층에 균일하게 가스를 분포시키는 것은 탈질효율 향상뿐만아니라 촉의 수명연장 측면에서도 매우

중요하다. 이인영 외 3명은 500MW 유연탄 발전소 기준으로 개념설계된 SCR 반응기를 대상으로 균일한 유동을 갖는 설계자료 확보와 신뢰성을 검증하기 위해 Fluent를 활용한 전산유체역학 해석과 1/20 크기의 축소모형장치를 활용하여 유동특성을 시험하였다[7]. 박영빈 외 2명은 열병합 보일러용 SCR의 질소산화물 환원효율을 향상시키기 위하여, SCR 상류 단면에서의 환원제인 무수암모니아(NH_3) 농도분포를 포함하여 유입가스 속도분포와 유입각도를 각각 목적함수로 하여 반응면기법을 이용한 수치 최적화를 수행하였다[8]. 이창식 외 3명은 SCR 촉매층으로 전단의 덕트 형상을 기존 플랜트에서 운영되고 있는 2가지 유형과 유동의 굴절과 확산이 순차적으로 작용하는 형상 등 총 3가지 유형을 채택하여 탈질 성능을 공력학적 관점에서 비교분석 하였다 [9]. 정명희 외 2명은 전산유체역학해석(Fluent 13.0)을 활용하여 가이드베인 형상에 따른 SCR 반응기 내부의 열유동 해석을 하였으며 반응기 내부의 온도분포 및 Ammonium Cbamate의 분해온도 이상인 지역의 분포확인을 통해 Ammonium 승화가 잘 이루어지는 최적의 형상을 제시하였다[10]. 정유진 외 4명은 전산유체역학해석(Fluent)를 활용하여 SCR 반응기 상부 측면에서의 유동 특성을 3차원 수치 해석 기법을 이용하여 모사 및 기류 균일도 여부를 확인하고, SCR 내의 유동 균일도를 최적화시키기 위한 목적으로 가이드 베인과 배플, 다공판 설치에 따른 유동 특성을 해석하여 기류 균일도에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다[11]. 배영환은 화력발전소 SCR 반응기의 Mixer의 개수와 거리를 조절하여 촉매층 전단에서 최적 열유동 균일도를 갖는 구조를 선정하고 댐퍼에 믹서를 추가한 모델링(Modeling)을 진행한 후 열유동 해석을 통해 유동의 균일화를 통해 촉매층 전단에서의 유속 및 온도편차를 최소화에 대한 연구를 수행하였다 [12]. 하지수 외 1명은 화력발전소용 탈질 설비를 실제 크기의 1/16 모델을 제작하여 유동의 균일화를

위한 가이드 베인 최적화와 암모니아 혼합장치의 효과 파악을 위해 촉매층 전단에서 유동 속도와 농도를 측정하여 최적의 가이드 베인 형상과 혼합장치의 효과를 분석하였다[13].

제 2 장

전산해석

2.1 실험 모델

실제 국내 석탄화력발전소(태안, 보령, 하동, 당진) 7,8호기 모델의 보일러 후단에 설치된 SCR(선택적 촉매환원제) 모델을 기초로 실제 형상에 대한 개략도를 표시하였다.

[그림 3-1]은 SCR 3차원 형상을 나타낸 것으로 촉매반응기(Catalyst Reactor)가 있는 부분을 기준으로 $11.8 \times 17.45 \times 11\text{m}$ (L×H×W)의 크기를 가지며, 해당영역의 복잡한 부분인 Mixing Pipe, Reactor layer(4set)는 Porous 모델을 적용할 수 있도록 빈 공간으로 단순화하여 모델링을 수행하였다. [그림 3-2]는 본 연구의 유동 균일화 설계 대상인 SCR과 내부에 설치된 입구안내깃(Inlet Guide Vane)의 형상을 나타낸 것으로 좌측 7자 코너 부분을 yz 평면의 중심점(0,0)으로 치수를 정의하였다. 이때 형상 설계 변수는 x,y(수평), z(높이) 방향과 vane의 각도이다. 사용된 모델링 툴은 ANSYS Space Clame ver. 19.2 프로그램을 활용하였다.

베인의 각은 90 Degree 로 총 4개로 구성되어 있으며 보일러 연소 후 생성된 배기가스가 초기에 이 가이드 베인각을 통해 유동의 흐름이 바뀐다.

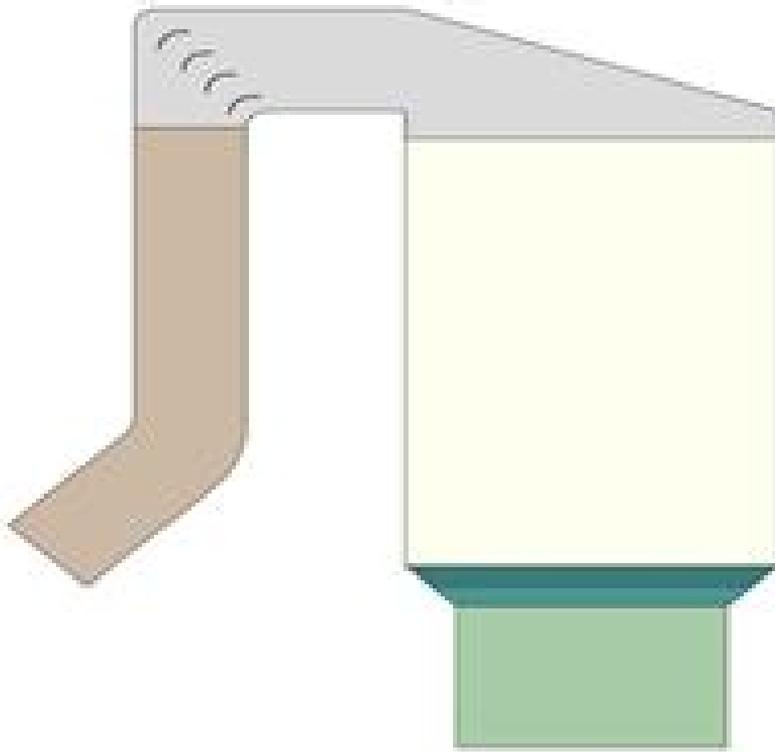


그림 2-1: SCR 3차원 Design

2.2 격자 작업

해석하고자 하는 대상 영역에 대해 지배방정식을 푸는 경우, 해당 공간을 계산해야하는 경우의 수는 무한하기 때문에 유한하게 제한할 필요가 있다. 따라서 CFD에서 유한하게 제한하기 위해 공간을 Control Volume 형태로 나누는데 (FVM = Finite Volume Method) 이것이 바로 격자 작업이다. 일반적으로 공간을 나누기 위한 기하학적인 형태로는 정렬 격자인 Hexahedral type(육면체)과 비정렬 격자인 Tetra-Prism(사면체와 프리즘) type mesh가 사용된다. 그리고 격자 형태에 따라 특성이 나뉘지는데, 정

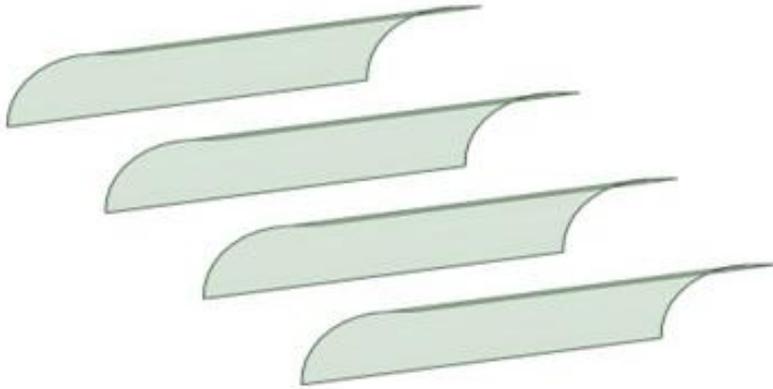


그림 2-2: SCR Inlet Guide Vane

렬격자의 경우 형태적인 특성상 격자 구성에 있어 제한점이 있으나(대부분의 형상은 자유 곡면을 갖고 있고 복잡하기 때문에 육면체의 기하학적 특성상 격자 구성에 어려움이 있음) 격자 구성만 잘 이루어진다면 대체적으로 비정렬 격자 타입에 비해 격자수를 줄일 수 있고 수렴성도 우수하다. 반대로 비정렬 격자의 경우 격자 구성이 용이한 반면 정렬 격자에 비해 대체적으로 격자수가 증가하는 경향이 있다. 기하학적인 형상의 복잡성과 특성을 고려하여 정렬격자와 비정렬 격자를 적절히 선택하였으며 전체 격자수를 줄일 수 있도록 두 격자를 혼합한 Hybrid type으로 격자를 생성하였다. 격자 생성에 사용된 프로그램은 ANSYS사의 격자 전용 툴인 ANSYS Meshing을 사용하였다. 그림 3-3, 3-4와 같이 최종 격자를 구성한 모습이며 이때 생성된 총 격자수는 약 2000만 노드(약 2500만 2800만 셀)이다. 특히 안내깃(Guide Vane)은 그림8과 같이 Sizing과 Inflation 하여 날개에서 일어나는 유동 변화를 자세히 볼 수 있도록 격자처리를 하였다.



그림 2-3: SCR 전체 격자 구성



그림 2-4: SCR Guided Vanes 격자 구성

2.3 해석 기법

2.3.1 경계조건

경계 조건 [그림3-5]는 경계 조건을 나타낸 그림으로 100% 출력 시 조건으로 347°C 연소가스가 시간당 715ton씩 SCR로 들어가고 해석영역에 작동하는 절대압력은 100.374 kPa(Reference pressure)가 되도록 설정하였다. 또한 난류모델은 k- ϵ 난류 모델을 사용하였다. 연소 가스는 이상기체 상태방정식을 통해 계산하는 Ideal mixture를 사용하였으며, 여기서 연소가스 조성비는 [표3-1]에 정리하였다. 물성은 각 component의 조성비 및 절대압력에 의해 전체 밀도, 점성 등의 물성이 결정되도록 Mixture 모델을 사용하였다. 이때 실제 연소가스의 경우 고형의 Ash가 포함되어 있지만 입자가 작아 연소가스와 같이 움직인다고 가정하고 계산 시간 단축을 위해 해석에서 제외하였다.

[그림 3-5]의 초록색으로 표시된 영역은 Porous Media 도메인 영역으로 적용된 공극률 및 손실계수는 다음 장에 자세히 기술하였다

| Material | Mass Fraction |
|----------|---------------|
| CO2 | 0.141 |
| H2O | 0.085 |
| N2 | 0.742 |
| O2 | 0.032 |

표 2-1: 사용된 Ideal Gas Mixture

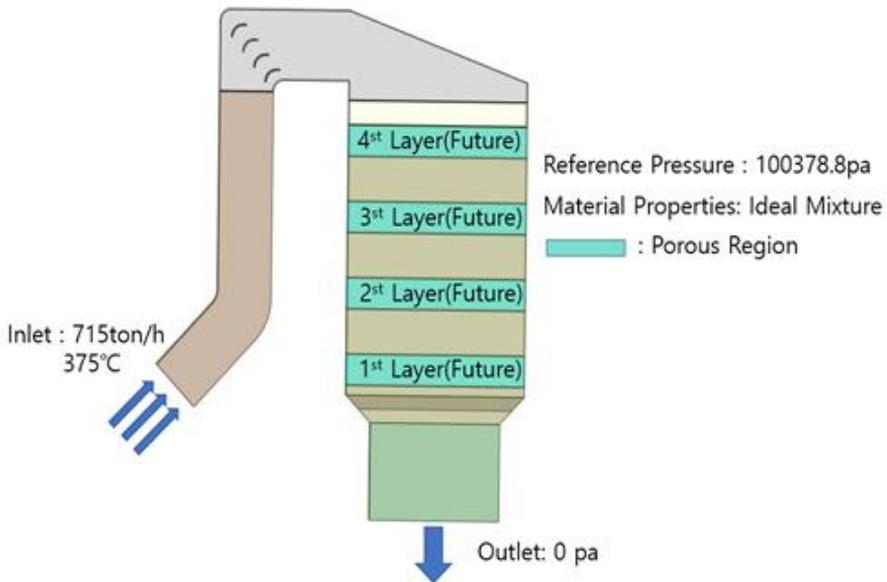


그림 2-5: SCR 경계조건

2.3.2 Porous Media 해석

Porous 모델은 복잡한 형상을 단순화하여 계산량을 줄이기 위한 모델로 단순화에 따른 압력 차이를 식3.1, 식3.2과 같이 보정을 통해 실제 계산에 적용한다. 이때 Kper 또는 Kloss 중 어느 것을 사용하여도 무방하며 목표 차압을 만족하면서 수렴성이 좋은 것을 선택하면 된다. 여기서

Kper는 단면적당 손실로 표현한 것이며 Kloss는 길이당 손실로 계산하는 것이다. 일반적인 경우엔 Kloss를 많이 사용하며 여과막과 같이 주 유동 방향의 Porous Media 영역이 짧은 경우 단위 면적당 손실로 표현하는 것이 유리하다. 본 계산에서는 Kloss를 적용하였으며 이때 Kloss $\rho/2$ 를 하나의 계수 C2로 표현하는 quadratic resistance coefficient 형태를 사용하였다. 이것의 장점은 본 계산과 같이 밀도가 주어진 조건에 따라 계산되는 이상 기체 방정식($P=\rho RT$)을 사용하는 경우 압력과 밀도가 서로 Coupling 되어 있어 수렴성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 하나의 계수로 처리하여 수렴성을 높이고자 하였다.

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\mu}{K_{per}} Ux - K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| Ux \quad (2.1)$$

$$\Delta P = \frac{150(1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} \mu U_\infty + \frac{1.75(1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} \rho U_\infty^2 \quad (2.2)$$

[그림 3-6]은 SCR에서 Ammonia와 배기가스가 섞이는 Mixing Pipe와 공간이 조밀한 소자 형태로 구성된 Catalyst(촉매층)를 Porous Media로 적용한 위치를 표시 하였다. 각 위치별로 Mixing Pipe는 [그림3-7], Catalyst layer는 [그림3-8]와 같이 샘플링 후 계산하여 모델에 적용하였다. [표 3-2]는 적용 결과를 나타낸 것으로 공극률, 실제 형상, Kp(Permeability)값, Kloss(Loss coefficient) 등을 자세히 기술하였다.

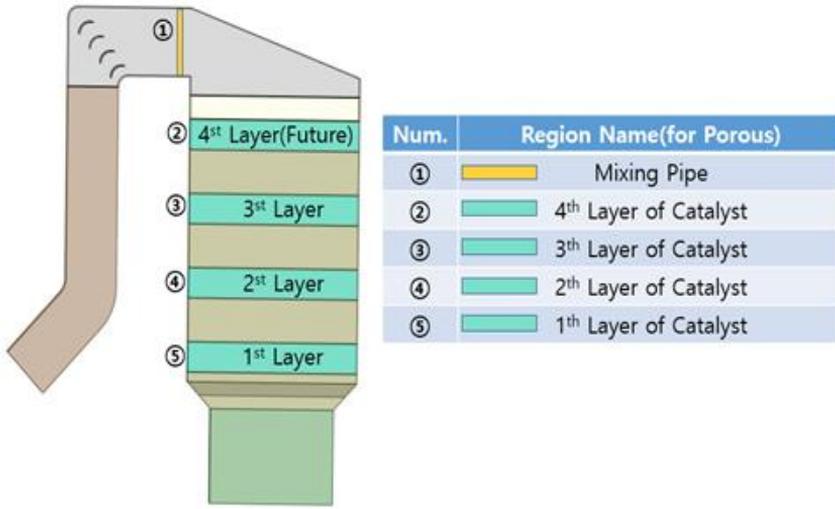


그림 2-6: Porous Media 설정 영역 및 명칭

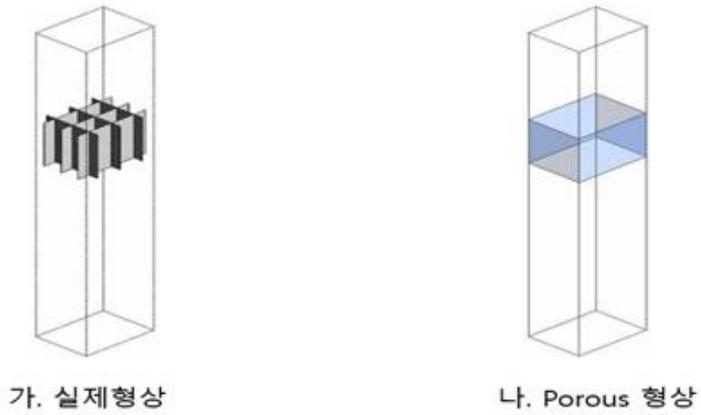


그림 2-7: Mixing Pipe를 Porous Media로 변환한 형상

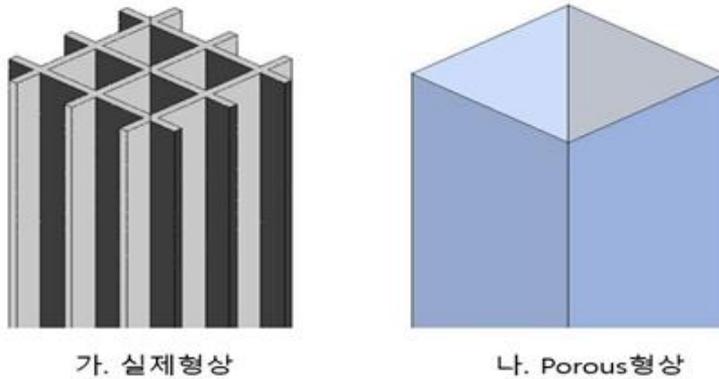


그림 2-8: Catalyst layer를 Porous Media로 설계한 형상

표 2-2: 적용된 Porosity 및 손실계수

| 구분 | Pitch[mm x mm] | Permeability | Loss Coefficient[kg m ⁻¹] |
|----------------|----------------|--------------|---------------------------------------|
| Mixing Pipe | 240 x 180 | 0.29 | 0.28 |
| Catalyst layer | 6 x 6 | 0.000004 | 95.22 |

2.3.3 설계판단기준

탈질에서 가장 중요한 요인은 연소가스가 Catalyst Layer에 얼마나 균등하게 유량이 분포되는지이다. 따라서 본 연구에서도 각 Catalyst Layer 면의 속도분포를 RMS값으로 환산하여 Flue Gas 균일도를 확인하였다.

Catalyst layer에 대한 유동 균일화를 위해 Additional Guide Vane를 설계하여 각도를 조절하고, Mixing Pipe의 크기와 Volume Porosity를 변화시키면서 Reference Model과 비교하였다. Additional Vane Case는 총 18번의 실험중 3개의 최종 Model만 결과에 상세 기술하였고, Mixing Pipe Model은 각 시뮬레이션을 비교할 수 있도록 기술하였다. 이때 유동의 균일도를 정량적으로 평가하기 위한 기준은 ICAC(Institute of Clean Air Company)

에서 규정한 EP-7을 적용 속도편차 실효치 비율[RMS(%)]을 구하였다. 이 기준에 따르면 속도 편차 실효치 비율이 15% 이내일 경우 유속이 균일하다고 평가하고 있지만 본 연구에서는 U,V,W 방향 모두의 유동이 모두 반응에 영향을 미칠 수 있기에 모든 컴퍼너트 값을 적용하며 실효치 비율에 대해서는 기준을 두지 않기로 하였다. 해당 수식은 다음과 같다.

$$RMS(\%) = \frac{100}{V} X \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Vi - V)^2}{N - 1}} \quad (2.3)$$

V : 유동방향의 속도

Vi : 유동방향의 국소 속도

그러나 CFD의 해석의 경우 각 격자 셀이 갖고 있는 면적이 다르기 때문에 식 (2)를 바로 적용하게 되면 가중치 문제로 정확한 속도 편차를 구할 수 없다. 따라서 실제 CFD 유동 균일도는 다음과 같은 식으로 바꿔 평가하였다. RMS(%)

$$RMS(\%) = \frac{100}{V} X \sqrt{\frac{\int_{area} (Vi - V)^2}{Area}} \quad (2.4)$$

V : 유동방향의 속도

Vi : 유동방향의 국소 속도

area : 각 셀의 면적

Area : 평면의 전체 면적

위 수식을 이용하여 Flue Gas가 통과하는 층의 목표 균일도가 25% 이내에 들어가도록 최종 형상을 결정하였으며 Additional 안내깃(Guide

Vane)과 Mixing Pipe 형상을 추가적으로 적용하여 총 18번의 전산유체역학 해석을 시행하였다. [그림 3-9]은 첫 번째 설계변수인 Additional 안내깃 (Guide Vane)이며, [그림 3-10]은 Porous Media로 구현한 두 번째 설계변수 Mixing Pipe이다. 마지막으로 [그림 3-11]은 유속 균일도를 평가하기 위한 위치를 표시한 것으로 각 layer 시작면에서 평가하였으며, 특히 실제 반응이 시작되는 New 4th layer(Future layer)의 균일도를 평가 기준으로 삼았다.

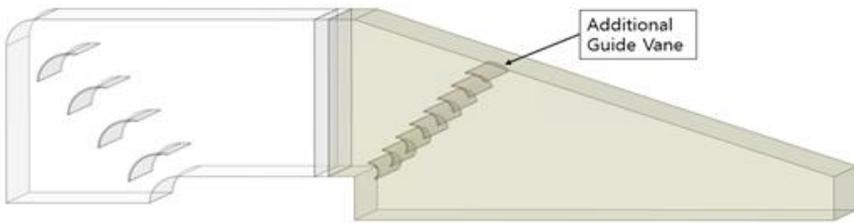


그림 2-9: 설계변수①: Additional 안내깃(Guide Vane)

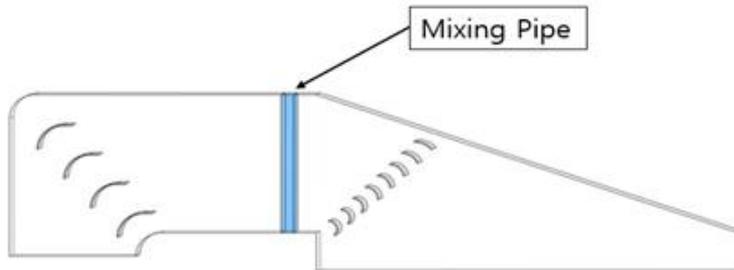


그림 2-10: 설계변수②: Mixing Pipe

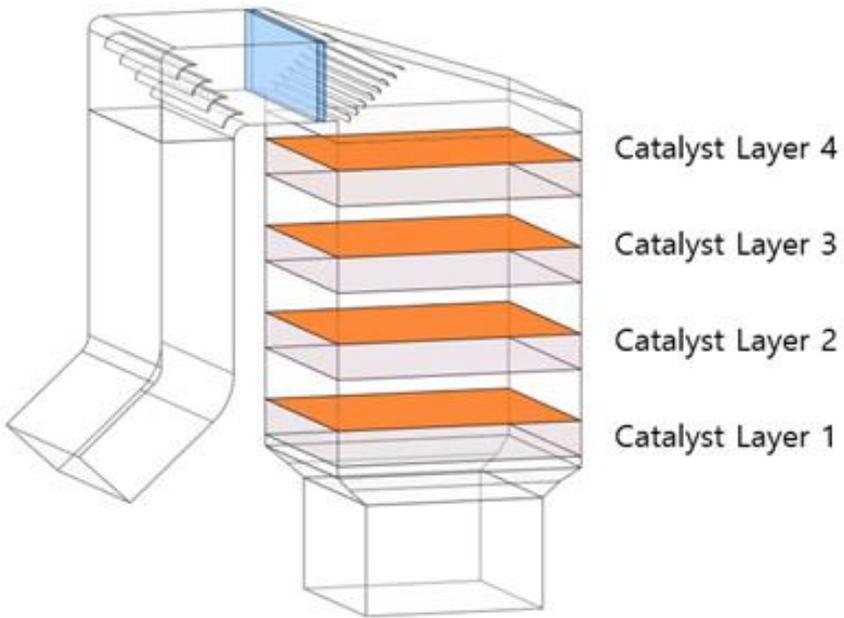


그림 2-11: 유속 균일도 측정위치

제 3 장

해석결과

3.1 레퍼런스 해석

본 연구에서는 후단 베인이 없을 때의 유동을 레퍼런스 값으로 정하기 위해 Inlet 가이드 베인 4개만을 모델링하여 유동해석을 실행하였다. [표 4-1]은 평가 위치별 유속균일도 및 압력강하를 나타낸 것이다. 유속 불균일도는 46%~63%까지 매우 나쁘게 나타남을 알 수 있다. 상세한 결과를 [그림4-1]에서 살펴보면 안내깃에서 분배된 연소가스가 Passing 후 수평 덕트부까지는 일정한 속도로 유동이 흘러감을 확인할 수 있다. 하지만 안내깃에서 압력강하가 일어난 후에는 덕트면을 따라 급격하게 편류가 형성되어 오른쪽으로 치우침을 확인할 수 있다. 많은 유량이 한꺼번에 작은 덕트에서 디퓨저 형태로 분사되는 구조임을 알 수 있다.

Reference Design에서는 Mixing Pipe 및 Layer를 구현하지 않았기 때문에 유속 압력강하가 약 8.35Pa로 낮게 나타나고 있다. [그림4-2]에는 Reference Design의 Catalyst Layer(촉매층) XY면 유속분포를 그래픽으로

표 3-1: 평가 위치별 유속균일도 및 압력강하

| 구분 | 유속균일도(%) | 비고 |
|------------------|----------|-----------------|
| Catalyst Layer 4 | 63% | RMS |
| Catalyst Layer 3 | 59% | |
| Catalyst Layer 2 | 52% | |
| Catalyst Layer 1 | 46% | |
| Pressure Drop | 8.35 pa | Guide Vane 전/후단 |

나타내고 유속균일도(RMS)를 나타내었다. 유속불균일이 가장 크게 나타나는 Catalyst Layer는 4번째 구간으로 63%의 매우 나쁜 균일도를 보이고 있다. 나머지 구간도 40%이상의 유속불균일도를 확인할 수 있다.

본 Reference Design에서 볼 수 있듯이 Mixing Pipe 및 안내깃은 배기가스의 유동 균일화를 이루기 위해 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있고 배기가스가 디퓨저되는 구간에 Additionl Guide Vanes 설치 및 Mixing Pipe(암모니아/가스 혼합기)의 개선이 필요해 보인다.

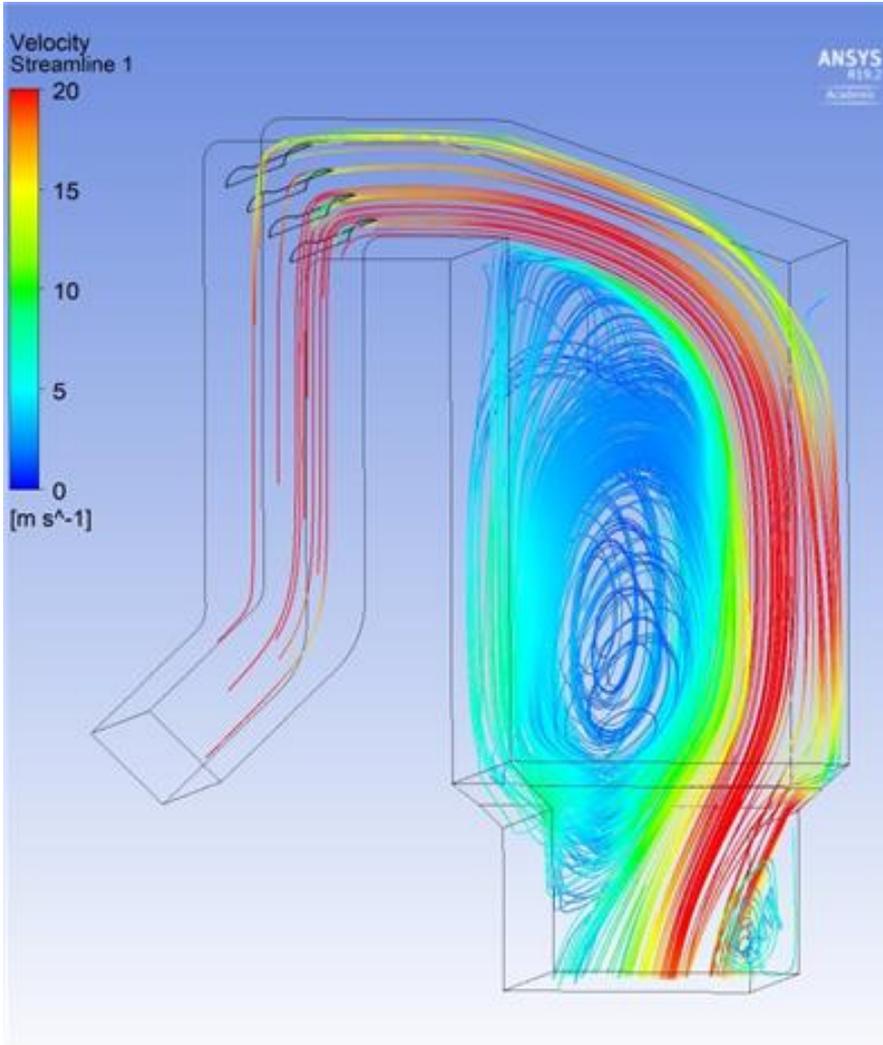


그림 3-1: Reference Design의 ZX면의 유동

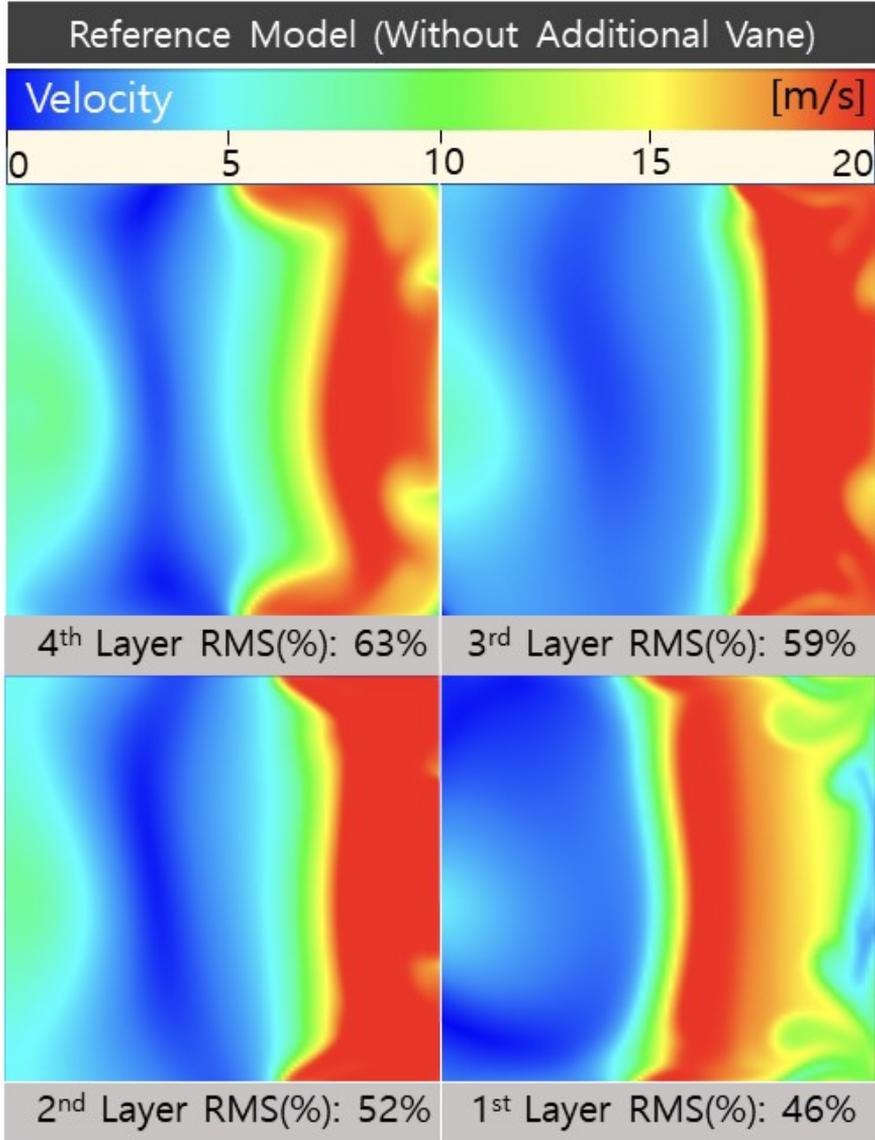


그림 3-2: Reference Design의 XY면의 유동

3.2 개선안 해석

3.2.1 Additional Guide Vane Cases

Catalyst Layer(촉매층) 전단에 Additional(추가) Vane이 있는 경우의 유동 변화를 확인하기 위해 8개의 베인을 그림과 같이 디자인 한 후 각도 변화에 따른 유동변화를 확인하였다. Vane의 각도를 90도에서 ± 10 도, ± 5 도, ± 2.5 도, ± 1.5 도 줄여가며 총 18번의 전산유체역학 해석을 시행하였다.

첫 번째 실험에서는 8개 모든 베인의 각도를 90도로 디자인한 뒤 전산 유체역학 해석을 시행하였다. [그림 4-3]에서 볼수 있듯이 Additional Vane이 없는 Reference Design의 전산해석결과와 Additional Vane(90 Degree) 모델의 전산유체역학 해석 결과는 확연히 변화하는 다음과 같이 확인할 수 있다. 특히 Vane의 설치로 유동의 흐름이 좌우로 반대됨을 볼 수 있다. 따라서 Vane할이 유체 흐름을 변화시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

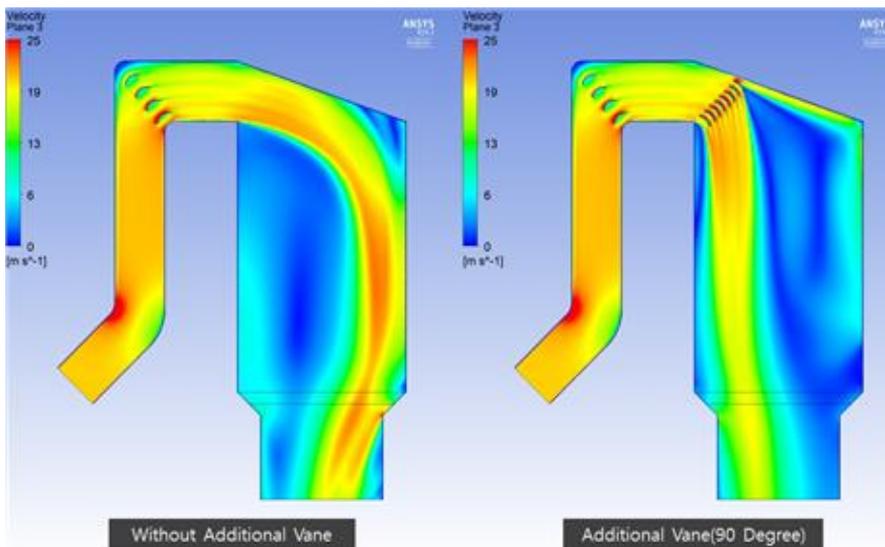


그림 3-3: Reference Design과 Additional Vane(90 Degree)의 유동 비교

[그림4-4]에는 Additional Vane(90 Degree) Model의 Catalyst Layer(촉매층) XY면 유속분포 그래픽으로 나타내고 [표4-2]에는 유속불균일도(RMS)를 Reference Design과 비교하였다. Reference Design과 유속균일도를 비교해 볼 때 오히려 Additional Guide Vane 설치후 급격하게 바뀐 유동으로 인하여 유속불균일도가 더 나타남을 볼 수 있다. 유속불균일도는 Catalyst Layer는 4번째~1번째 구간모두 85%의 이상으로 매우 나쁜 균일도를 보이고 있다.

이 Case에서 나타난 결과에서는 Additional Vane은 유동의 유로변경과 압력강하의 결과를 만들 수 있지만 유속균일도 측면에서 볼 때 상당히 예민하기 때문에 적절한 Vane의 각도를 찾는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

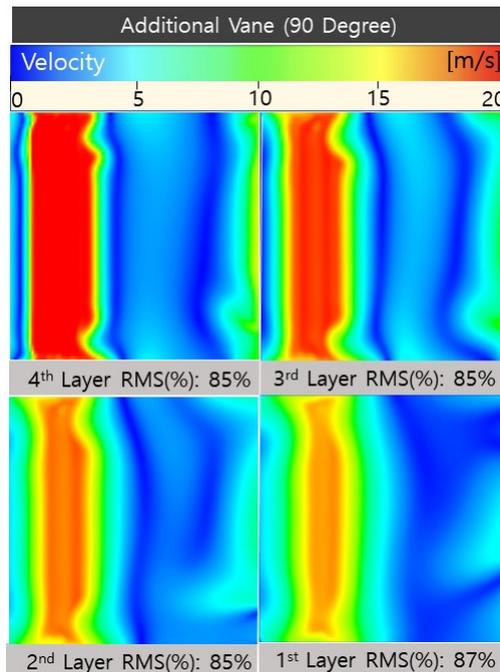


그림 3-4: Additional Vane(90 Degree)의 XY면의 유동

표 3-2: Reference Design과 Add. Vane(90 Degree)의 (RMS) 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Reference Design | 74% | 89% | 94% | 82% |
| Additional Vane | 87% | 85% | 85% | 85% |

Additional Vane 8개를 Vane의 길이는 고정하면서 각도를 ± 10 도, ± 5 도, ± 2.5 도, ± 1.5 도 바꿔가며 총 18번의 전산유체역학 해석을 시행하였으면 유동 및 유속균일도(RMS)의 값들을 데이터 할 수 있었다. 유량이 715ton/hr로 매우 많은 편이라 유속도 빠르고 Vane에서 많은 박리로 인해 Additional Vane을 설계하기가 쉽지 않았지만 18번의 시뮬레이션 중 최적의 유속균일도를 가진 모델을 선정 할 수 있었다. [표 4-3]는 총 18번의 전산유체역학 해석을 위해 설계한 Additional Vane의 1번부터 8번까지 반지름과 각도이며, [그림 4-5]는 1st~6th의 Additional Vane 각도변화에 대한 XY면의 유동, [그림 4-6]는 7st~12th의 Additional Vane 각도변화에 대한 XY면의 유동, [그림 4-7]는 13st~18th의 Additional Vane 각도변화에 대한 XY면의 유동 해석이며, [표 4-4]는 각도 변화에 따른 (RMS) 결과이다.

표 3-3: Additional Vane Radius Degree

| Additional Vane Degree Change (1st) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| 반지름 | 610 | 610 | 610 | 610 | 610 | 610 | 610 | 610 |
| Additional Vane Degree Change (2nd) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 120 | 110 | 100 | 90 | 90 | 80 | 70 | 60 |
| 반지름 | 457 | 499 | 549 | 610 | 610 | 686 | 784 | 915 |
| Additional Vane Degree Change (3rd) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 120 | 110 | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 |
| 반지름 | 457 | 499 | 549 | 610 | 686 | 784 | 915 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (4th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 120 | 110 | 100 | 90 | 85 | 75 | 60 | 50 |
| 반지름 | 457 | 499 | 549 | 610 | 645 | 732 | 915 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (5th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 130 | 120 | 110 | 90 | 85 | 75 | 65 | 50 |
| 반지름 | 422 | 457 | 499 | 610 | 645 | 732 | 844 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (6th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 130 | 115 | 105 | 90 | 87.5 | 77.5 | 65 | 50 |
| 반지름 | 422 | 477 | 522 | 610 | 627 | 708 | 844 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (7th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 120 | 100 | 90 | 75 | 60 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 457 | 549 | 610 | 732 | 915 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (8th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 120 | 95 | 87.5 | 80 | 60 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 457 | 577 | 627 | 686 | 915 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (9th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 120 | 97.5 | 92.5 | 75 | 60 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 457 | 563 | 593 | 732 | 915 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (10th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 117.5 | 95 | 97.5 | 80 | 65 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 467 | 577 | 563 | 686 | 844 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (11th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 117.5 | 95 | 97.5 | 80 | 65 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 467 | 577 | 563 | 686 | 844 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (12th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 122.5 | 95 | 94 | 80 | 65 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 448 | 577 | 584 | 686 | 844 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (13th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 129 | 121 | 93 | 93 | 82.5 | 67.5 | 50 |
| 반지름 | 392 | 425 | 453 | 590 | 590 | 665 | 813 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (14th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 121.5 | 94 | 93 | 84 | 70 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 451 | 584 | 590 | 653 | 784 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (15th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 122 | 94.5 | 93 | 84 | 72 | 52 |
| 반지름 | 392 | 422 | 450 | 580 | 590 | 653 | 732 | 1055 |
| Additional Vane Degree Change (16th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 121.5 | 94 | 92.5 | 83.5 | 70 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 451 | 584 | 593 | 657 | 784 | 4098 |
| Additional Vane Degree Change (17th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 121.5 | 94.5 | 92.5 | 83.5 | 70 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 451 | 584 | 593 | 657 | 784 | 1098 |
| Additional Vane Degree Change (18th) | | | | | | | | |
| 구분 | Vane 1 | Vane 2 | Vane 3 | Vane 4 | Vane 5 | Vane 6 | Vane 7 | Vane 8 |
| 각도 | 140 | 130 | 121.5 | 94 | 92.5 | 83.5 | 72 | 50 |
| 반지름 | 392 | 422 | 451 | 584 | 593 | 657 | 784 | 1098 |

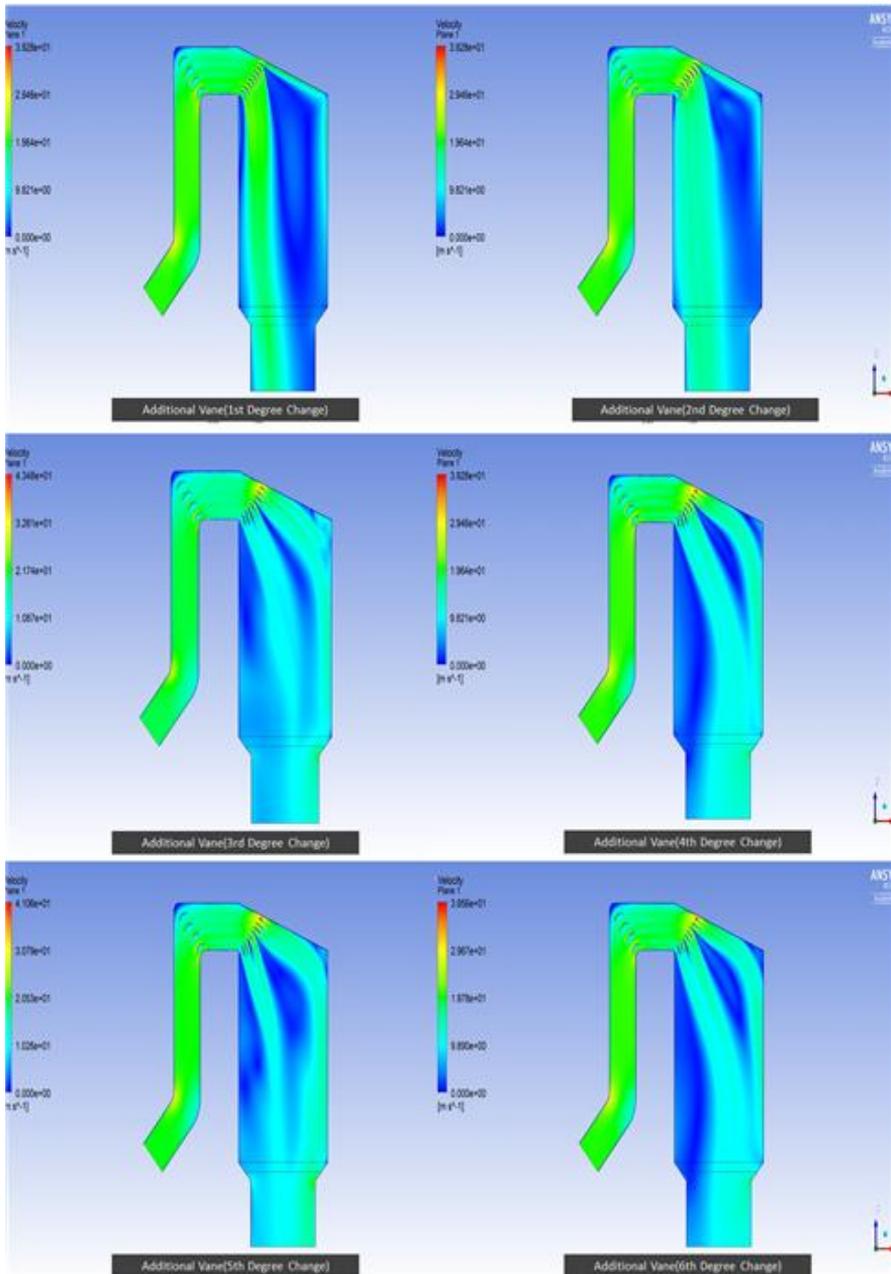


그림 3-5: Additional Vane(1st~6th) ZX면의 유동

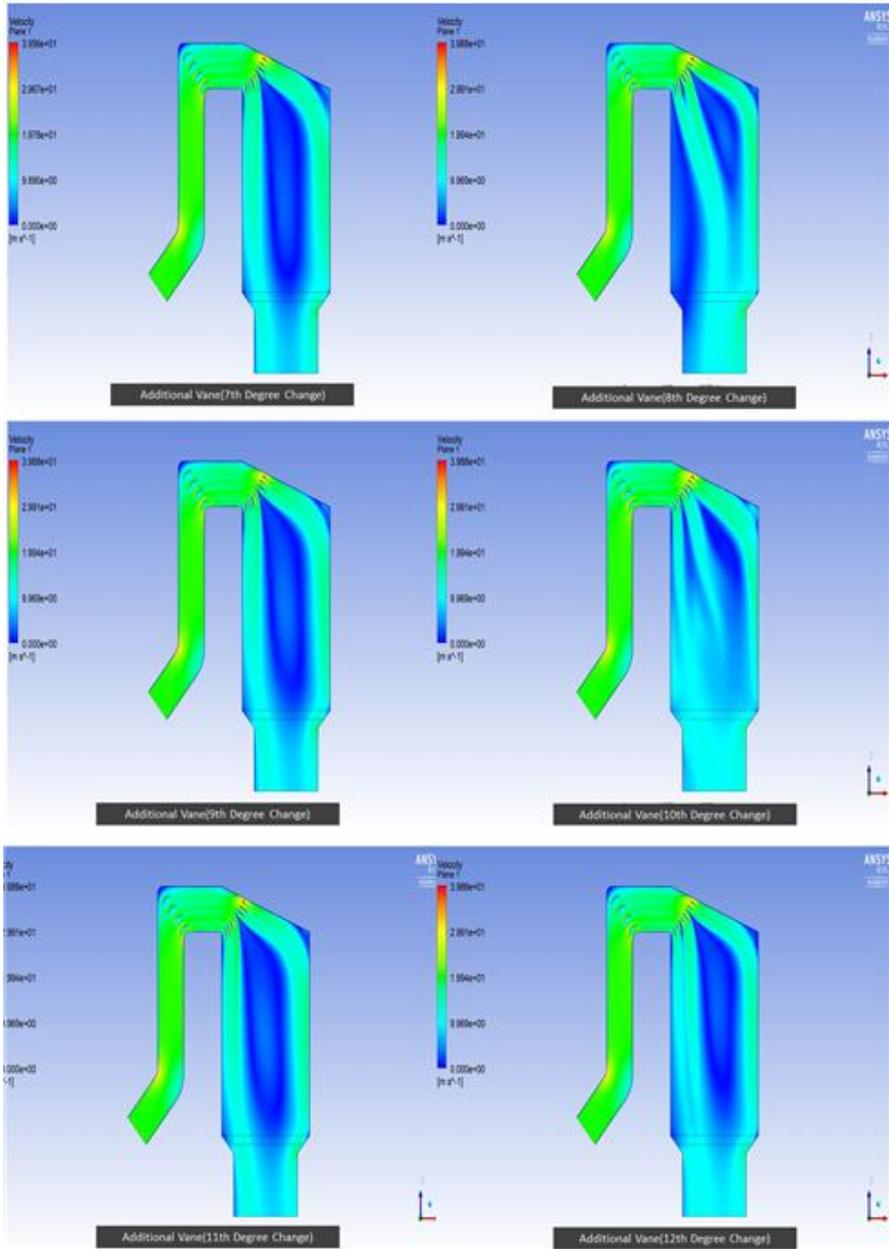


그림 3-6: Additional Vane(7th~12th) ZX면의 유동

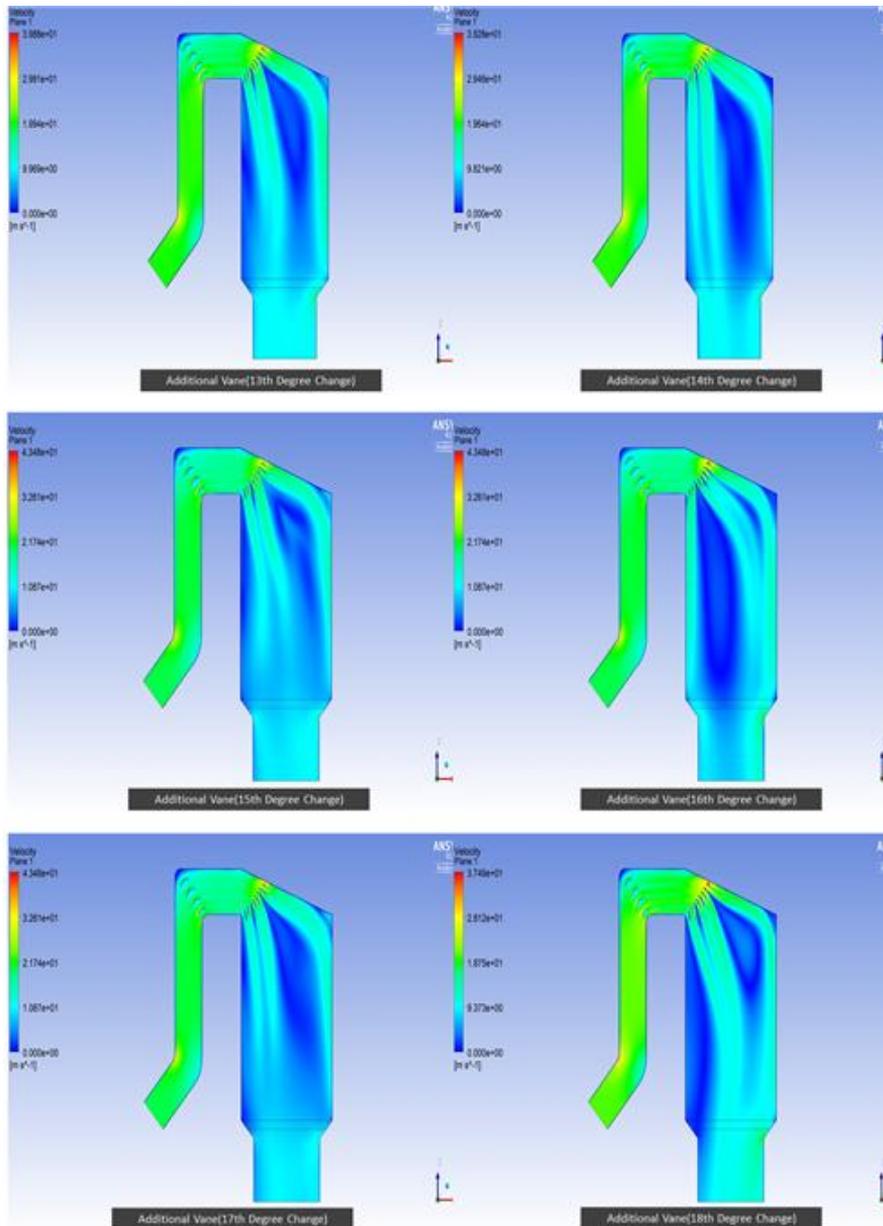


그림 3-7: Additional Vane(13th~18th) ZX면의 유동

표 3-4: 각도 변화에 따른 (RMS)

| 구분 | 유동불균일도(RMS[%]) | | | |
|-------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| 1st | 87 | 85 | 85 | 85 |
| 2nd | 63 | 66 | 68 | 71 |
| 3rd | 41 | 47 | 42 | 44 |
| 4th | 52 | 61 | 64 | 66 |
| 5th | 42 | 51 | 50 | 56 |
| 6th | 50 | 59 | 61 | 64 |
| 7th | 63 | 71 | 76 | 74 |
| 8th | 50 | 59 | 61 | 64 |
| 9th | 59 | 69 | 74 | 74 |
| 10th | 34 | 44 | 54 | 56 |
| 11th | 61 | 69 | 75 | 77 |
| 12th | 44 | 62 | 66 | 71 |
| 13th | 45 | 58 | 67 | 67 |
| 14th | 38 | 59 | 64 | 64 |
| 15th | 31 | 34 | 41 | 48 |
| 16th | 60 | 68 | 70 | 61 |
| 17th | 39 | 51 | 62 | 60 |
| 18th | 46 | 52 | 59 | 63 |

[표4-4]에서 볼수 있듯이 18번의 전산유체역학 해석 중 3rd와 15th의 전산유체해석에서 가장 우수한 결과값을 얻을 수 있었다. 세번째로(3rd) 설계한 Additional Guide Vane의 경우 Catalyst 4번의 가 18번의 해석 중 가장 좋은 결과값은 얻을 수 있었으며, 열다섯 번째(15th)로 설계한 Additional Guide Vane은 전체적으로 우수한 결과를 얻을 수 있었다. [그림 4-8]은 Additional Vane을 설계한 후 첫 번째로 해석한 90 Degree 각도의 결과값과 열다섯 번째(15th)로 설계한 Additional Guide Vane의 ZX면의 유동변화를 비교한 그림이다. 완벽하게 균일한 유동을 보이지는 않지만 90 Degree의 해석결과와 비교해 볼 때 안내 깃 후단의 균일한 확산을 확인 할 수 있었다. [그림 4-8]은 15th additional vane degree change의 XY

면의 유동으로 Reference Design Case 대비 향상된 것을 확인할 수 있다. [표 4-5]는 Reference Design과 비교하여 유동균일도가 얼마나 향상되었는지 비교값을 나타내었다. 전체적으로 유동균일도가 좋아졌지만 가장 중요한 Catalyst Layer 4 층에서는 약 27%의 절감율만을 보였다.

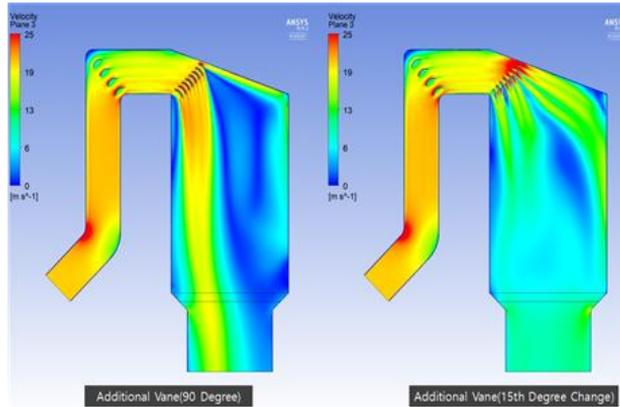


그림 3-8: Add. Vane(90Degree)와 Add. Vane(15th) ZX면의 유동 비교

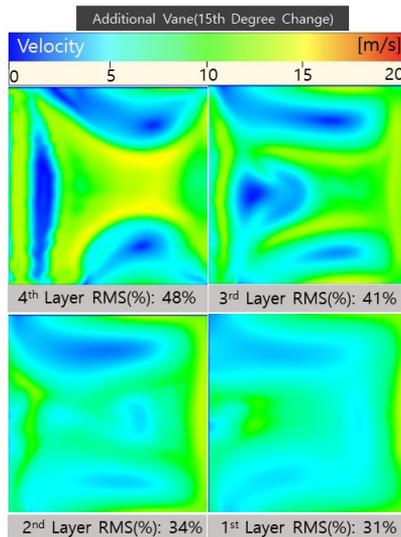


그림 3-9: Additional Vane(15th Degree Change)의 XY면의 유동

표 3-5: Reference Design과 15th Additional Vane 유동불균일도 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Reference Design | 74% | 89% | 94% | 82% |
| 15th Additional Vane Degree Change | 31% | 34% | 41% | 48% |
| 비교 | 43%↓ | 55%↓ | 53%↓ | 34%↓ |

[그림 4-10]은 3th Additional vane degree change의 ZX면의 유동을 Reference 와 비교한 유동이다. 확연히 배기가스 유동이 Additional Vane 을 지나면서 균등해지는 것을 확인할 수 있다. [그림 4-11]은 Reference 와 90도, 15번째, 3번째로 설계한 Additional Guide Vane의 ZX면의 유동 변화를 나타낸 그림으로 XY면의 경우 3번째로 설계한 Vane을 통과하는 배기가스 유동이 가장 우수하다는 것을 알 수 있다. [그림 4-12] XY면의

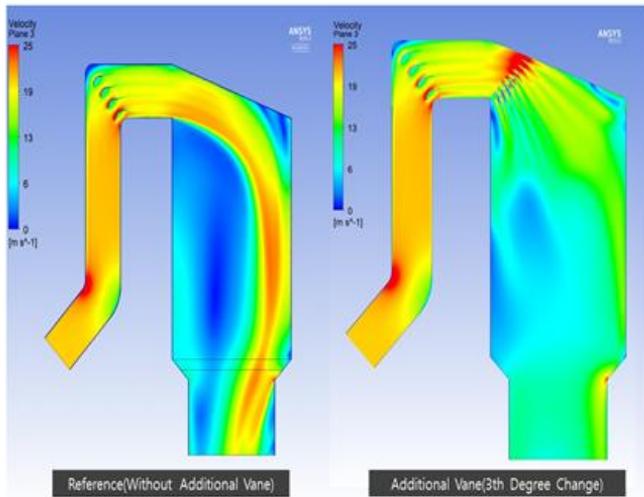


그림 3-10: Reference와 Additional Vane(3th Degree Change) 유동 비교

유동해석 결과이다. 결과값을 분석해 보면 Additional Vane 후에도 유동이 한 쪽으로 치지는 현상을 볼 수 있다. 하지만 [표 4-6]에서와 같이 (RMS) 값을 확인해 볼 때 Reference Design Case와 비교해 Catalyst Layer 4th에 서는 약38%의 절감율을 보임을 알 수 있다.

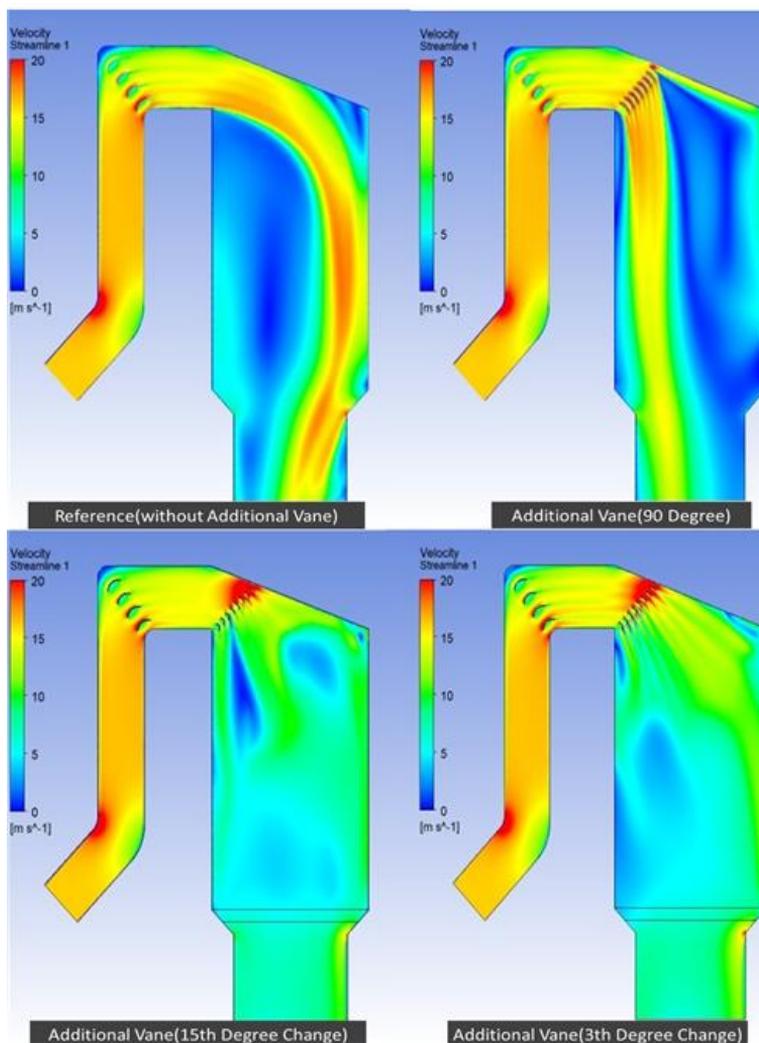


그림 3-11: Reference, Additional Vane(90 Degree, 15th, 3rd) 비교

표 3-6: Reference Design과 3rd Additional Vane 유동불균일도(RMS) 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Reference Design | 74% | 89% | 94% | 82% |
| 3th Additional Vane Degree Change | 41% | 37% | 42% | 44% |
| 비교 | 33%↓ | 42%↓ | 52%↓ | 38%↑ |

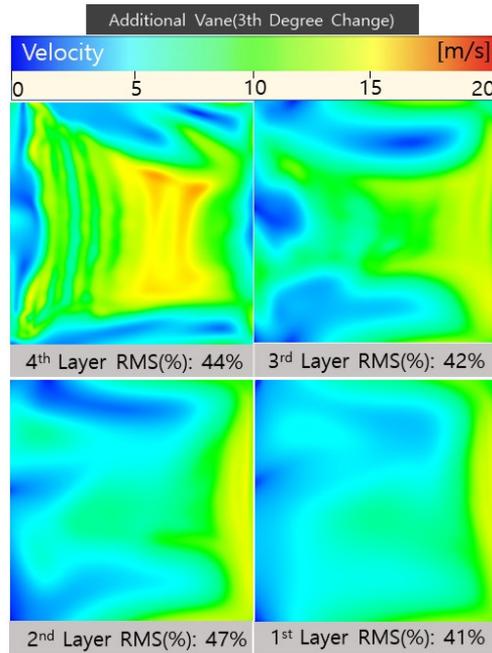


그림 3-12: Additional Vane(3th Degree Change)의 XY면의 유동

3th Additional vane degree change과 15th Additional vane degree change에 대한 를 비교해 볼 때 촉매층 제일 상단에 위치한 4 Layer는 3th Additional vane degree change이 RMS값이 우수한 반면 1,2,3 Layer는 15th Additional vane degree change의 RMS값이 더 좋다는 것을 알 수 있다. [표 4-7]은 두 베인설계에 따른 결과를 비교표이다.

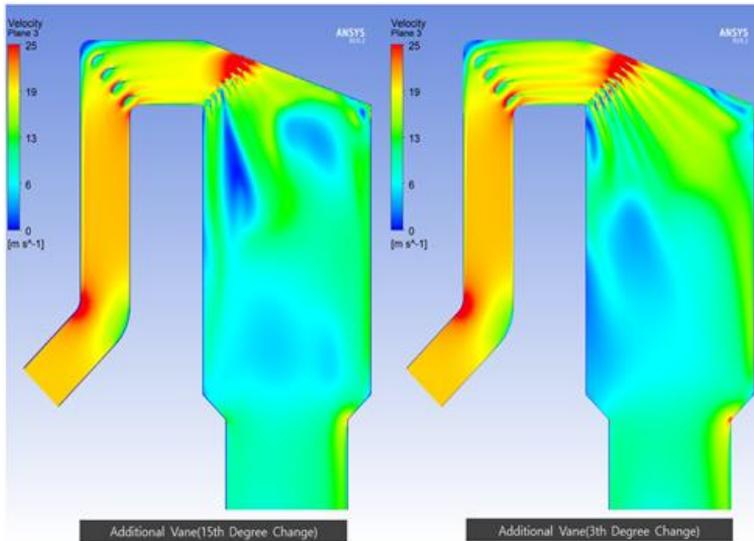


그림 3-13: Additional Vane(15th Degree Change)과 Additional Vane(3th Degree Change) 유동 비교

표 3-7: Additional Vane 3th와 15th Degree Change (RMS) 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| 3th Additional Vane Degree Change | 41% | 47% | 42% | 44% |
| 15th Additional Vane Degree Change | 31% | 34% | 41% | 48% |
| 비교 | 10%↓ | 13%↓ | 1%↓ | 4%↑ |

3.2.2 Mixing pipe

암모니아 주입 그리드에서 주입된 암모니아와 배기가스의 흐름을 균일하게 유지하기 위해 암모니아/가스 혼합기(Static Mixer)가 설치된다. 이 설비는 보통는데 Mixing plate 또는 Mixing Pipe라는 명칭을 가지고 있다. 본 논문에서는 Mixing Pipe라고 표기하였다. Catalyst 전단, Amonia Inljection 후단에 설치된 Mixing Pipe(암모니아/가스 혼합기)를 지나는 배기가스의 흐름을 전산유체역학 해석을 통해 모사해 보았다. 이 과정에서는 Mixing 파이프의 크기(덕트에서 차지하는 포션)를 변화시켜보며 유동에 어떤 영향을 주는지 알수 있었다.

3.2.2.1 Mixing Pipe의 길이변화에 따른 유동 비교

[그림4-14]는 Reference Design과 Mixing Pipe(300mm, 600mm) 크기변화에 ZX면의 유동 비교이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Mixing Pipe의 크기 변화에 따른 유동변화는 보이지 않고 단순히 압력강하만 진행됨을 알 수 있다. 또한 Mixing Pipe의 길이가 커진다고 해서 유동균일성이 좋아 지지는 않는 다는 것을 [그림 4-15]에서 확인할 수 있다.

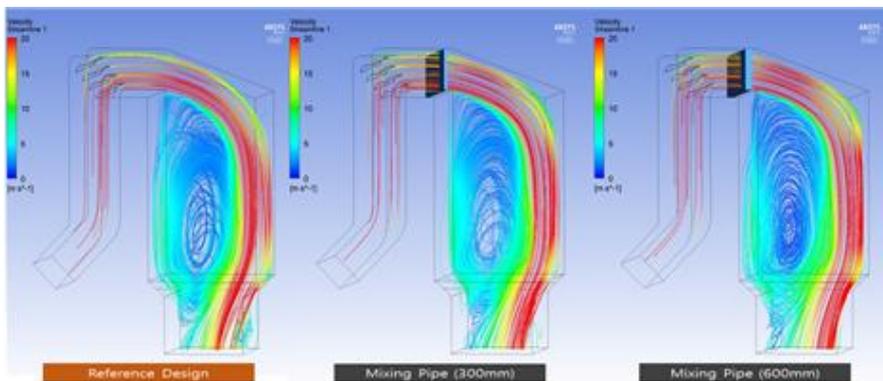


그림 3-14: Reference Design과 M.P(300mm, 600mm) ZX면 유동 비교

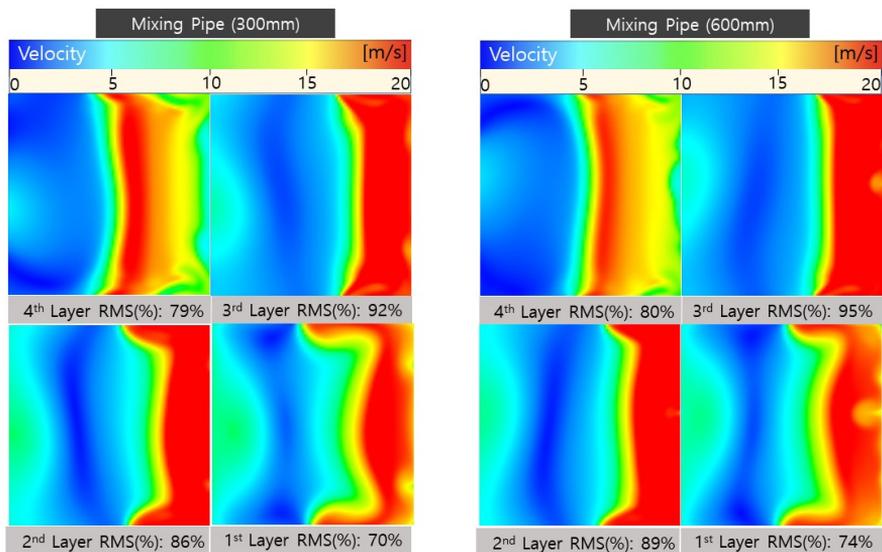


그림 3-15: Mixing Pipe 300mm 600mm XY면의 유동과 RMS 값 비교

표 3-8: M.P(300mm)과 M.P(600mm)의 유동균일도(RMS) 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|---------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Mixing Pipe (300mm) | 70% | 86% | 92% | 79% |
| Mixing Pipe (600mm) | 74% | 89% | 95% | 80% |
| 비교 | 4%↑ | 3% | 3%↑ | 1% |

3.2.2.2 Mixing Pipe의 공극률 변화에 따른 배기가스 유동 비교

경계조건을 설정할 당시 Mixing Pipe를 Porous Media로 변환한 형상으로 가정하였고 이때의 Mixing Pipe Volume Porosity는 97%로 덕트의 3%정도의 Blocking 형상의 구조를 가지고 있다고 해석할 수 있다. 따라서 이 Blocking을 증가시킬 경우 즉 Volume Porosity 변화에 따른 유동변화를 확인하기 위해 덕트면의 13%를 Blocking 한 값으로 Mixing Pipe를 Porous Model로 가정하여 해석을 시행하였다. [그림4-13]에서 확인할 수 있듯이 해석결과 Blocking 10%증가에 따른 유동 및 (RMS)의 변화는 미미하였으며 Mixing Pipe(300mm, 600mm) 크기변화와 동일한 거의 동일한 값을 얻을 수 있었다. Mixing Pipe의 길이방향 증가와, Blocking 증가율은 Porous Media로 가정했을 경우 배기가스 통과하는데 있어 단순히 압력강하의 차이로만 해석할 수 있었다.

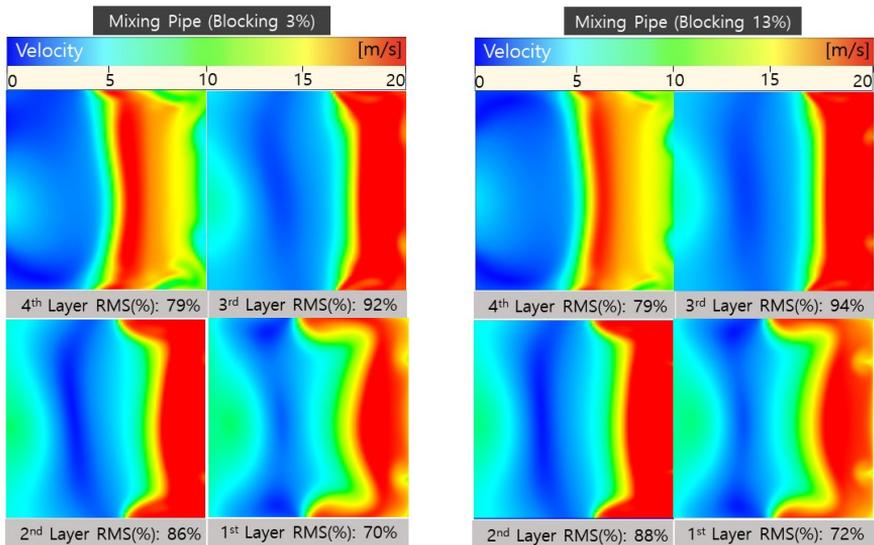


그림 3-16: Mixing Pipe Blocking 3% 13% XY면의 유동과 RMS 값 비교

표 3-9: M.P(Bloking 3%)과 M.P (Bloking 13%)과 유동불균일도비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|-------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Mixing Pipe (Blocking 3%) | 70% | 86% | 92% | 79% |
| Mixing Pipe (Blocking 13%) | 72% | 88% | 94% | 79% |
| 비교 | 2%↑ | 2% | 2%↑ | 0% |

-

3.2.3 Additional Vanes + Mixing Pipe

전장에서 해석한 2가지 Cases(Additional Vane 변화, Mixing Pipe 변화)를 조합하여 최적의 Mixing Pipe+Additional Vane의 모델을 찾기위한 전산유체역학 해석을 시행하였으며 그 ZX면의 유동해석 결과는 [그림 4-15]에서 확인할 수 있다. [그림 4-15]의 유동변화를 비교해보면 Additional Vane(15th Degree Change)와 Mixing Pipe(300mm)을 조합한 유동이 Additional Vane(15th Degree Change)와 비교하여 3번,4번 Vane에서 박리현상이 덜 일어나 유동이 확산이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 탈질에서 가장 중요한 4번째, 3번째 Catalyst Layer(촉매층) 상부층의 균일도가 같거나또는 소폭 감소하는 경향을 나타냈다. XY면의 유동 및 의 비교는 [그림 4-16], [표 4-5]에 나타내었다.

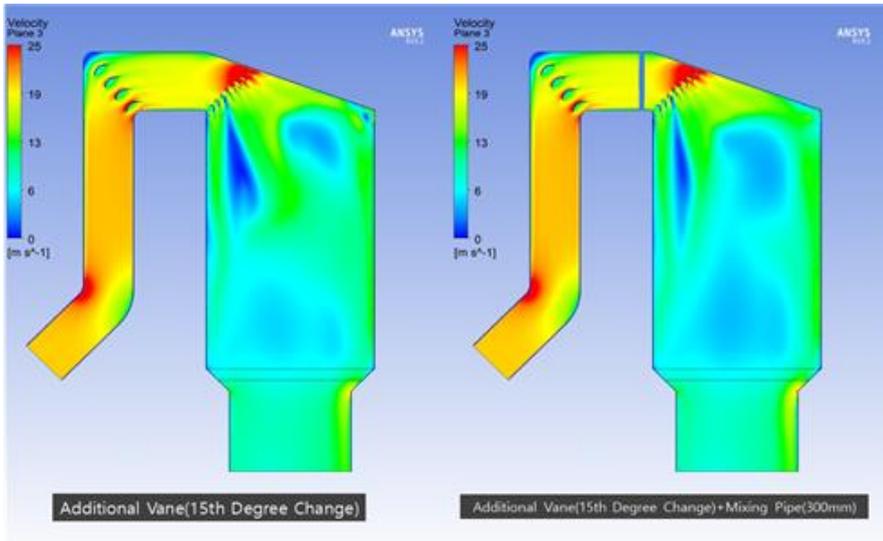


그림 3-17: Add.Vane(15th)과 Add.Vane(15th)+M.P(300mm) ZX면의 유동 비교

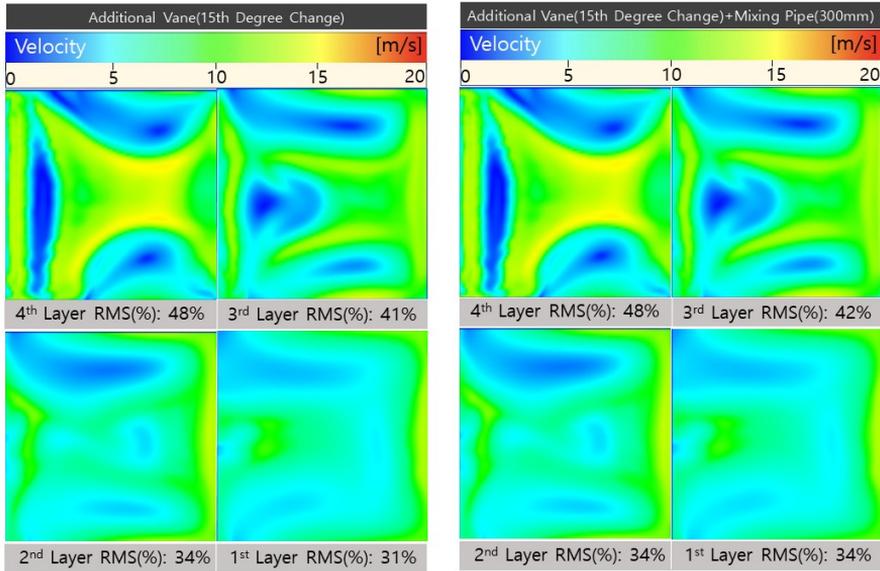


그림 3-18: Add.Vane(15th)과 Add.Vane(15th)+M.P(300mm) XY면의 유동과 RMS값 비교

표 3-10: Add.Vane(15th Degree Change)과 Add. Vane(15th Degree Change)+M.P(300mm) 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|--|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Additional Vane (15th Degree Change) | 31% | 34% | 41% | 48% |
| Additional Vane (15th Degree Change) +Mixing Pipe(300mm) | 34% | 34% | 42% | 48% |
| 비교 | 3%↑ | 0% | 1%↑ | 0% |

[그림 4-17]의 유동변화를 비교해보면 Additional Vane(13th Degree Change)와 Mixing Pipe(300mm)을 조합한 유동이 Additional Vane(13th Degree Change)와 비교하여 Vane 후단이 완전히 발달을 못하고 왼쪽으로 치우치는 유동변화가 일어남을 볼 수 있다. [그림 4-18]의 XY를 비교해 볼 때 압력강화로 인한 불균일이 발생하였다. 하지만 (RMS)를 확인해보면 Layer 4는 약 1%, Layer 3에서는 약2% 향상되었으며 나머지 구간도 3~4%향상되었음을 볼 때 Mixing Pipe도 유동균일화에 향상에 도움을 줄 수 있다고 예측할수 있다. XY면의 유동 및 의 비교는 [표 4-8]에 나타내었다.

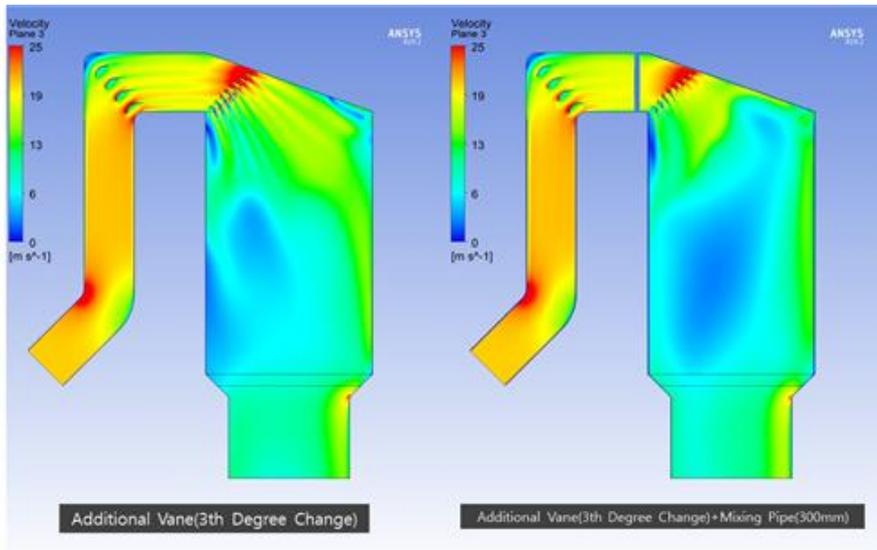


그림 3-19: Additional Vane(3th Degree Change)과 Additional Vane(3th Degree Change)+Mixing Pipe(300mm) ZX면의 유동 비교

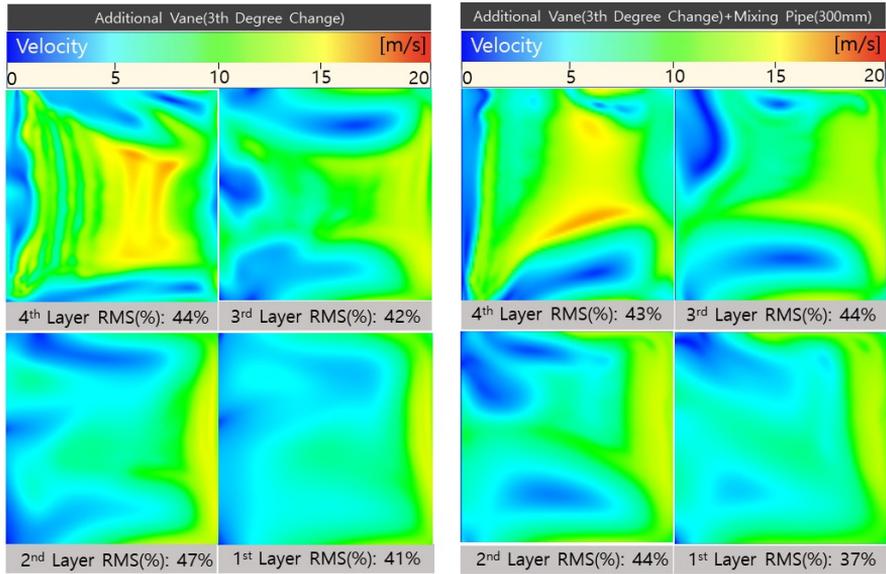


그림 3-20: Additional Vane(3th)과 Additional Vane(3th)+M.P(300mm) XY 면의 유동과 RMS값 비교

표 3-11: Add.Vane(3th)과 Add.Vane(3th)+M.P(300mm) 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|---|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Additional Vane (3th Degree Change) | 41% | 47% | 42% | 44% |
| Additional Vane (3th Degree Change) +Mixing Pipe(300mm) | 37% | 44% | 44% | 43% |
| 비교 | 4%↓ | 3%↓ | 2%↑ | 1%↓ |

3.2.4 Additional Vanes + Mixing Pipe + Catalyst

앞에서 시행한 전산유체역학 해석 중 layer 4의 가 가장 우수하게 측정된 Additional Vane(3th Degree Change) + Mixing Pipe(300mm) 모델을 기준으로 Catalyst(촉매층)가 설치되어 있는 경우 또 향후 설치될 Layer4(Future Layer)시에 는 유동이 어떻게 변화하는지를 확인할 수 있었다. 이번 해석에서 Catalyst는 Mixing Pipe와 동일한 방법인 Prou Loss Model을 이용한 해석을 시행하였다. 3단까지 Catalyst가 설치되어 있는 경우의 유동변화를 [그림 4-19]에서 확인할 수 있다. Mixing Pipe와 Additional Guide Vane이 Layer 4층까지 균일하게 전달되지 못하는 반면 4단 모두 Catalyst가 설치되어 있는 경우에는 4번째 Catalyst 층에 의해서 압력변화가 생겨 속도균일도가 좋아졌다. [그림 4-20]에서 볼 수 있듯이 4단의 Catalyst가 설치한 Layer 4에서의 유동이 3단의 Catalyst가 있는 모델보다 훨씬더 유동이 균일해지는 것을 볼 수 있다. 또한 Catalyst를 지난 가스유동은 큰 압력강하로 인하여 속도 낙차가 발생하여 유속이 느리고 일정하게 해석되었음을 알 수 있다. [표4-9]는 Catalyst 3단, 4단 있을 때의 각 Layer의 RMS값을 비교한 표이다. 따라서 위 두 모델의 전산해석을 볼 때 촉매층이 변화에 따라 유동에 영향을 줄 수 있어 발전소 환경설비 성능 향상을 위해 촉매층(Future Layer) 추가 설치시에도 반드시 베인의 각도조절이 필요하다는 것을 단면적으로 알 수 있었다.

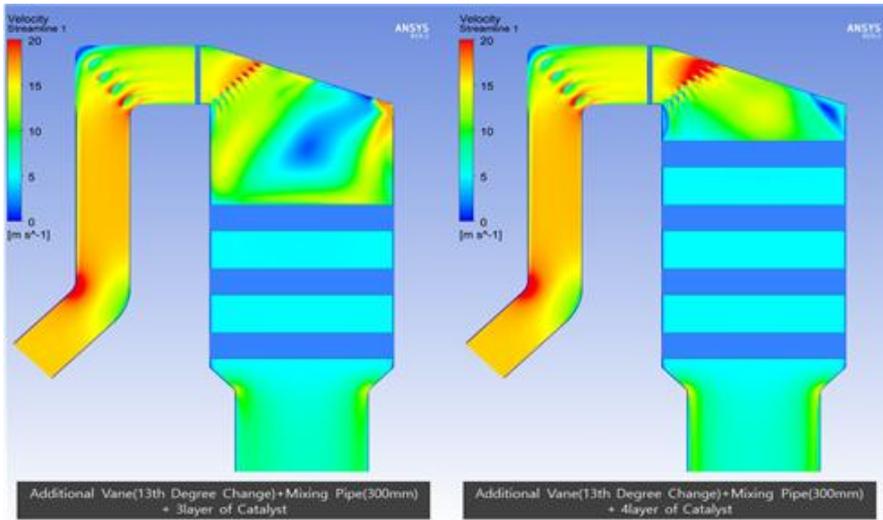


그림 3-21: Additional Vane(3th Degree Change)+Mixing Pipe(300mm) + 3단, 4단 Catalyst의 ZX면의 유동 비교

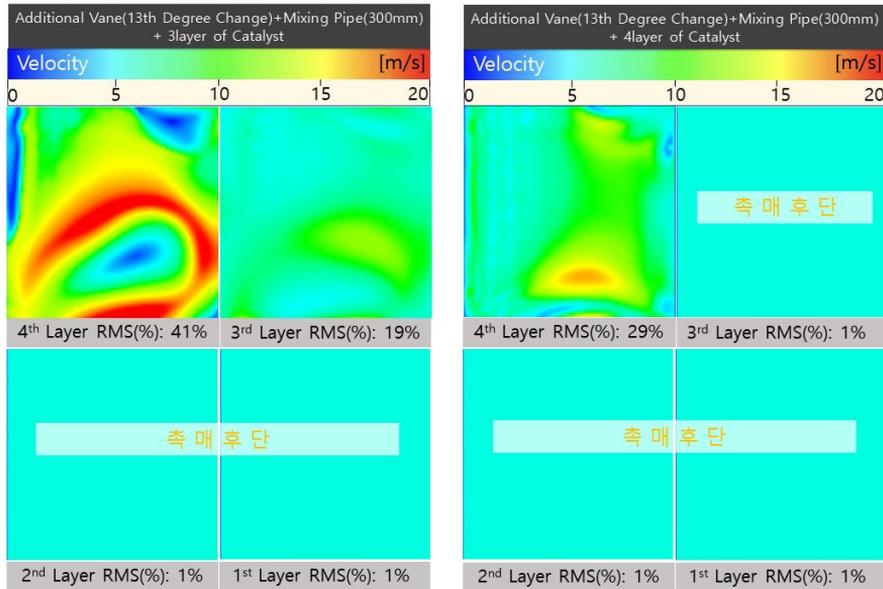


그림 3-22: Additional Vane(3th Degree Change)+Mixing Pipe(300mm)+ 3단, 4단 Catalyst의 XY면의 유동과 RMS값 비교

표 3-12: Add. Vane(3rd) + M.P(300mm)+3단촉매층과 Add. Vane(3rd)
+M.P(300mm)+4단촉매층 유동불균일도 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | |
|--|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer |
| Additional Vane (3th Degree Change) +Mixing Pipe(300mm) +3layer of Catalyst | 1% | 1% | 19% | 41% |
| Additional Vane (3th Degree Change) +Mixing Pipe(300mm) +4layer of Catalyst | 1% | 1% | 1% | 29% |
| 비교 | 0%↓ | 0%↓ | 18%↓ | 12%↓ |

-

제 4 장

결론

4.1 요약

본 연구에서는 500MW급 석탄화력발전소 탈질설비인 선택적촉매환원장치(SCR)의 유동 구조를 분석하기 위해 전산유체역학 해석을 활용하여 안내깃(Guide Vane), 암모니아/가스 혼합기(Mixing Pipe), 촉매(Catalyst) 따른 유동변화를 확인하고 가스유동 균일화를 위한 최적의 안내깃(Guide Vane), Mixing Pipe 모델을 선정하였다. Inlet Guide Vane인 만 있을때의 구조를 Reference Design으로 설정하여 전산유체역학 해석을 시행하여 ZX면, XY면의 유동 특성과 를 구하여 개선안 모델과 비교하였다. 개선안 모델로는 첫 번째 촉매 층 전단에 8개의 Additional Vane을 설계하여 각도를 바꾸어 가며 유동 균일도가 가장 우수한 모델을 선정하였다. 두 번째 변수는 Duct 내부의 Mixing Pipe(암모니아/가스 혼합기)의 크기와 Block율(Volume Porosity)를 증가시켜 변화하는 유동값을 확인하였다. 세 번째는 Additional Vane인과 Mixing Pipe를 조합하여 만든 모델의 유동 특성을 확인하였다. Reference Design부터 각 개선안 모델의 유동특성에 대해 [표 5-1]과 그래프[그림 5-1, 5-2]로 정리하였다.

해석결과 첫 번째 Additional Guide Vane 설치로 유로의 형상을 바꾸고 유동균일화를 유도할 수 있었다. 두 번째 변수로 시험했던 Mixing Pipe는 배기가스의 압력강하의 결과를 얻을 수 있지만 Catalyst Layer 면의 향 상에는 큰 영향이 없고 오히려 유동 불균일을 유발할 수 있어 Guide Vane

표 4-1: 주요 실험 모델 유동불균일도 비교

| 구분 | 유동불균일도(RMS) | | | | |
|----|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 1st layer | 2nd layer | 3rd layer | 4th layer | |
| 1 | Reference Design | 74% | 89% | 94% | 82% |
| 2 | Additional Vane (15th Degree Change) | 31% | 34% | 41% | 48% |
| 3 | Additional Vane (3th Degree Change) | 41% | 47% | 42% | 44% |
| 4 | Mixing Pipe (300mm) | 70% | 86% | 92% | 79% |
| 5 | Additional Vane(15th) + Mixing Pipe(300mm) | 34% | 34% | 42% | 48% |
| 6 | Additional Vane(3th) + Mixing Pipe(300mm) | 37% | 44% | 44% | 43% |
| 7 | Add. Vane(3th)+M.P(300mm) + 3layer of Catalyst | 1% | 1% | 19% | 41% |
| 8 | Add. Vane(3th)+M.P(300mm) + 4layer of Catalyst | 1% | 1% | 1% | 29% |

과의 조합이 반드시 필요함을 알 수 있었다. 즉 발전소 현장에서 유동의 유속을 줄이기 위해 Mixing Pipe의 Blocking율을 조정하는 시도는 오히려 정상유동에 악영향을 줄수 있다는 것을 알수 있었다. 또한 Catalyst 후단에는 (RMS)가 급격하게 상승함을 볼 수 있는데 이는 큰 압력강하에 따른 변화로 해석된다.

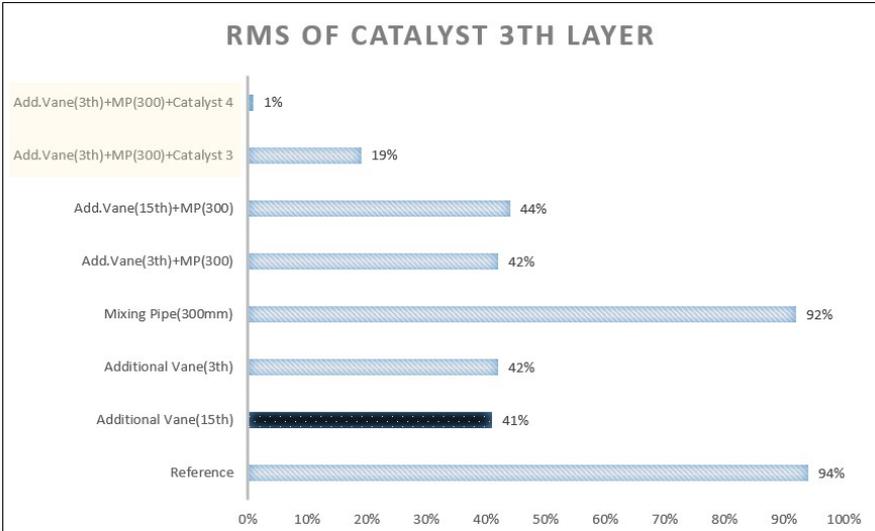


그림 4-1: 각 유동해석 모델의 Layer4 RMS값 비교

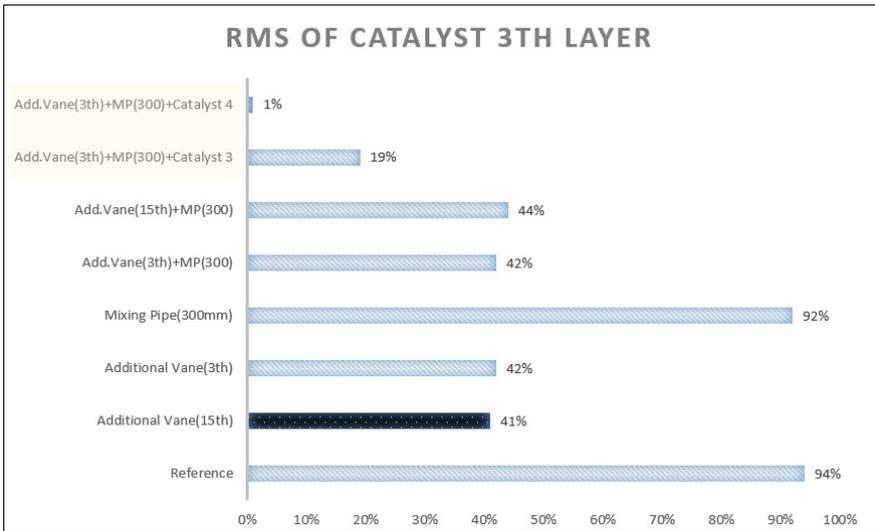


그림 4-2: 각 유동해석 모델의 Layer3 RMS값 비교

4.2 후속연구

이 연구를 통해 안내깃, 암모니아/가스 혼합기, 촉매의 개선을 통해 를 향상모델을 얻을 수 있었다. 하지만 전산유체역학 해석만으로 시간당 500MW의 전기를 생하는 발전소의 설비를 개선시키기에는 신빙성이 부족하다. 따라서 이 모델을 기반으로 실제 SCR설비를 구현한 Down Scale의 실험모형을 제작하여 유동해석을 할 수 있는 실험을 병행해야 한다. 균일/불균일 유동 입구조건이 SCR 내부 유동 균일성 및 압력 강하에 미치는 효과를MRV(Magnetic Resonance Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry) 등을 활용하여 측정하고 입구 편류 제거를 위한 다양한 형상의 안내 깃, 다공판격자 등의 유동 혼합 및 압력 강하 성능 비교하여 최적의 모델을 찾을 필요가 있다. 현재 우리 정부와 2050 탄소중립 추진전략의 중요한 역할을 석탄화력발전소에서 찾고 있다. 따라서 SCR, 전기집진기와 같은 화학적 전기적 반응을 통해 탈질, 집진하는 설비의 효율의 지대한 영향을 미치는 유동균일화 연구는 필수적이며 최적모델을 찾는 다양한 방안에 대한 연구 수행은 반드시 계속되어야 한다고 생각한다.

참고 문헌

- [1] “세계에너지통계,” <https://yearbook.enerdata.co.kr>.
- [2] 환경부, “대기환경보존법,” 2019.
- [3] “환경대기실무,” 한국발전인재개발원, pp. 87–136, 2021.
- [4] 이재호, *CFD 를 활용한 고분자 합성의 Scale-up 에 대한 연구*. PhD thesis, 서울대학교 대학원, 2018.
- [5] “Ansys cfx introduction,” ANSYS Inc. Release 14.0, p. 1, 2021.
- [6] “Ansys cfx introduction,” ANSYS CFX Tutorial, 2011.
- [7] I. Lee, D. Kim, J. Lee, and K. Yoo, “Reduced scale model experiments and numerical simulation for flow uniformity in de-nox scr reactor, j,” *KOSAE*, vol. 17, no. 4, pp. 347–354, 2001.
- [8] C. Lee, M. Kim, and H. Chung, “Numerical study on the aerodynamic characteristics inside curved-diffusing parts of denox facilities in coal-fired power plant,” *J. Compt. Fluids Eng*, vol. 25, no. 1, pp. 13–19, 2020.
- [9] Y.-J. Jung, S.-G. Hong, G.-W. Lee, and B.-H. Shon, “Numerical study for flow uniformity in selective catalytic reduction (scr),” in *Proceedings of the KAIS Fall Conference*, pp. 151–154, The Korea Academia-Industrial cooperation Society, 2011.
- [10] 정명희, 김만영, and 박윤범, “가이드 베인 형상에 따른 solid scr 반응기 내부의 열유동에 관한 연구,” *대한기계학회 춘추학술대회*, pp. 281–282, 2014.
- [11] 정유진, 홍성길, 김민철, 이재정, 이강우, and 손병현, “Scr 공정에서 반응기 내부의 유동 균일화를 위한 수치적 연구,” *한국산화기술학회 논문지*, vol. 12, no. 10, pp. 4666–4672, 2011.

- [12] 배영환, *화력발전소 탈질설비의 열유동 균일화에 관한 연구*. PhD thesis, 계명대학교, 2020.
- [13] J. S. Ha and T. K. Kim, "A study on the flow and concentration uniformity before the catalyst layer of a scr de-nox system," *Journal of Nakdonggang environmental research institute*, vol. 15, no. 1, pp. 262–270, 2011.

Abstract

A CFD study on flow uniformity of SCR System in 500MW Coal-Fired Power Plants

Doohyun BAEK

Graduate School of Practical Engineering

Seoul National University

Since the Paris Climate Change Accord in 2015, the demand to reduce global greenhouse gas emissions has continued. It was closed in December. Starting with this, the coal-fired power generators are continuously shutting down as a policy of de-coal energy conversion to continuously reduce fine dust emissions from coal-fired power plants, such as environmental power supply and seasonal management system. In particular, 58 coal-fired power plants are in operation in Korea, and the gas turbine combined cycle power plant, which is an alternative to coal-fired power plants, is also required to develop facilities for nitrogen oxide (NO_x) removal.

On the other hand, there are 40 power plants with more than 10 years of life remaining, and efforts are being made to increase facility capacity to improve the performance of environmental facilities with the goal of complying with exhaust gas emission standards for the operation of coal-fired power plants.

However, each unit costs a minimum of 100 billion won to a maximum of 300 billion won. Although this seems like a natural measure to satisfy the domestic carbon-neutral policy and respond to changes in the electric power market, it is a method that ignores economic aspects such as investment for facility expansion and securing of land from a company's point of view. Environmental facilities for coal-fired power plants include selective catalytic reducing system (SCR), electrostatic precipitators, and desulfurization facilities. These facilities are reaction methods that remove Nox, Dust, and Sox through chemical and electrical reactions. A method of increasing the reaction efficiency includes a method of increasing the reaction area or maximizing the reaction time by passing an appropriate amount of gas through a predetermined area at an optimum speed. For this, efficiency can be improved by adjusting the guide vane and gas distributor so that the optimal amount of gas can pass through the reactant. That is, the reaction efficiency can be increased only by a method of uniform flow by minimizing gas drift. In a previous study on this, the efficiency could be improved by measuring the actual speed in the environmental equipment (electric dust collector) to improve the efficiency of the electrostatic precipitator, and then adjusting the gas distribution plate to obtain the RMS(Root Mean Square) value and make it uniform early.

Therefore, in this study, 3D model modeling was carried out based on the Selective Catalytic Reduction (SCR) facility of the 7th and 8th Serise boilers among 500MW class coal-fired power plants in Korea, and the flow characteristics of exhaust gas were evaluated using computational fluid analysis (CFD). It was verified and proved that the gas flow can be uniformed

through the improvement factors (Guide Vane, Mixing Pipe). In addition, through this study, an adjustable (motor power, etc.) guide vane model was proposed to secure the meaning of this study.

In the future, it is expected that it will be able to establish itself as a new technological paradigm for flow analysis in the expansion of thermal power plant environmental facility improvement and research in related fields.

Keywords : CFD, SCR, Guide Vane, Flow Uniformity

Student Number : 2020-26224

감사의 글

설레이는 마음으로 서울대 공학전문대학원에 입학한지도 엇그제 된 것 같은데 벌써 졸업논문제출과 졸업을 앞둔 이 시점에 지난날의 기억들이 주마등처럼 지나갑니다. 초기 코로나로 인해 비대면과 대면수업을 병행하며 힘든날들도 보냈지만 가족, 교수님, 동료분들의 격려와 지원을 받으며 성공적으로 연구보고서를 완료할 수 있었습니다. 이에 감사의 글을 남기고자 합니다.

먼저 맞벌이하며, 주말부부로 생활하는 힘든 상황에서도 서연이, 서진이 혼자 키우며 남편의 공부를 위해 열열히 지지해준 사랑하는 나의 아내 은아에게 고맙다는 말을 먼저 하고 싶습니다. 평소 말수가 적어 고생한다, 고맙다는 말도 잘 못하고, 일과 공부에만 매진했던 지난날들을 생각하면 항상 미안하고 고맙습니다. 고생해준 아내 덕분에 별 탈없이 일과 학업 두마리 토끼를 다 잡을 수 있었습니다. 앞으로 더 멋진고, 좋은 아빠 믿음직스러운 남편이 되겠다는 다짐과 감사하다는 말을 이글을 통해 남깁니다.

그리고 항상 옆에서 큰 사람과 관심으로 응원해주시고 또 매일 서연이, 서진이 돌보시느라 고생하시는 아버지, 어머니께도 감사드리고, 항상 아껴주시고 자랑스럽게 생각해주는 장인,장모님께도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

김포열병합, 구미천연가스 발전소 프로젝트를 수행하는 바쁜 일정에서도 연구를 할 수 있도록 지원해주신 우리 건설처 기계부 김성태 처장님, 박정훈, 김태형 차장님, 주현민 대리님께도 감사하다고 말을 꼭 전하고 싶습니다. 또한 연구논문을 위해서 전산유체역학 해석을 이해하고, 활용할

수 있도록 여건을 만들어 주신 황원태 교수님, 이성광, 박한준 연구원, 고민이 있을때마다 항상 관심과 용기를 주신 박창우교수님께도 감사의 말씀들을 드립니다.

지금까지 공부하고 배운 것을 토대로 회사에 꼭 필요한 인재가 되도록 노력하고, 항상 주어진 소임에 책임을 다하는 성실한 아빠이자 남편이자 가족의 일원이 되도록 노력하겠습니다. 정말 감사합니다