



사업장 미세먼지 배출저감 기술

Technology for reducing fine dust
emissions at workplaces

Long Bag Filter System

저온 SCR 탈질촉매

건식 탈황 다공성 반응제

초발수·초발유 필터

SO₂ 분리·회수 공정

Long Bag Filter System

1. 기술 개요

▶ 연구배경 및 필요성

- 정부의 '미세먼지 관리 종합계획('19.11)' 수립에 따라 강력한 국내 배출량 감축 정책을 시행 : '24년까지 직접 배출 초미세먼지(PM_{2.5}) 19% 이상 감축 추진
- 발전소, 제철소, 시멘트공장 등의 배출 규제 강화에 대응할 수 있는 초미세먼지 집진기술 수요 증가

▶ 기술내용

- 15 m 필터백을 적용한 200,000 m³/hr 규모 실증설비를 제철소 소결공장에 설치하여 105일 동안 안정적 실증운전 실시
- 복합재생 방식의 탈진공정 적용을 통해 15 m 필터백의 탈진 문제 해결 : 먼지 여과 방향과 반대 방향으로 청정기류를 형성한 후 압축공기를 분사함으로써 탈진 과정에서 확장된 여과통로(부착된 먼지가 제거되고 회복된 여과통로)를 통한 미세먼지의 배출을 최소화

▶ 성과의 차별성·우수성

- 세계 최초로 15 m Long Bag Filter System의 실증시험 실시 : 배출농도 0.2 mg/m³ 이하 달성
- 일반 3 m 백필터 집진기 대비 부지면적(본체) 60%, 건설비용(기계공사) 30% 절감 가능

▶ 주요 연구개발 성과

- 200,000 m³/hr 규모 15 m Long Bag Filter System 실증설비의 설계, 제작 및 운전(105일)
- 신기술인증 신청('20.5.22.)

▶ 특기사항(선행연구)

- 6,000 Nm³/hr 규모 Pilot Scale 백필터 복합재생시스템 개발
- 사업명 : 환경산업선진화기술개발사업
- 과제명 : 설치면적 최소화를 위한 보급형 백필터 집진장치 개발
- 주관연구기관 : 한국에너지기술연구원 박현설 박사팀
- 연구기간 : 2014.5.1.-2017.3.31

▶ 연구진

- 주관연구기관 : (주)한빛파워 양창룡 박사팀
- 위탁연구기관 : (주)마이크로원 서명조 연구팀

▶ 정부지원내용

- 과제명 : 저비용 고성능 Long Bag Filter 실규모 실증
- 연구기간 : 2017.9.8.-2020.5.31

2. 정책 현황

▶ 사업장 미세먼지 배출량 현황(2016 CAPSS)

- 에너지산업연소(공공발전시설, 지역난방시설, 석유정제시설, 민간발전시설) : TSP 4,273톤, PM₁₀ 3,951톤, PM_{2.5} 3,253톤
- 제조업연소(연소시설, 공정로, 기타) : TSP 119,533톤, PM₁₀ 69,599톤, PM_{2.5} 35,577톤
- 생산공정(석유제품산업, 제철제강업, 무기화학제품 제조업, 유기화학제품 제조업, 목재·펄프 제조업, 기타 제조업) : TSP 12,056톤, PM₁₀ 6,731톤, PM_{2.5} 5,191톤
- 폐기물처리(폐기물소각) : TSP 406톤, PM₁₀ 295톤, PM_{2.5} 252톤

▶ 사업장 미세먼지 규제 현황

- 대기환경보전법 배출허용기준('20.1.1. 기준)

| | 발전산업 (석탄화력) | 시멘트제조 (소성냉각) | 석유정제업 (가열시설) | 제철업 (소결로) |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 총먼지(mg/Sm ³) | 5~12 | 15 | 15 | 10~20 |
| 황산화물(ppm) | 25~60 | 10~15 | 120 | 45~140 |
| 질소산화물(ppm) | 15~70 | 80~270 | 50~130 | 60~170 |

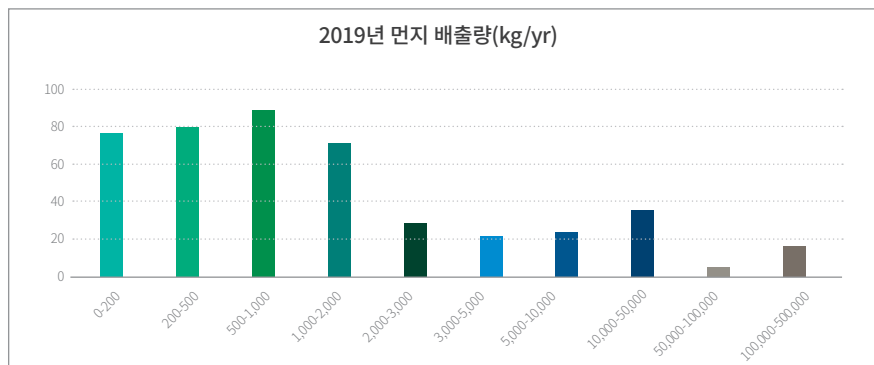
▶ 사업장 미세먼지 감축 정책

- '19년 11월 관계부처 합동으로 '미세먼지 관리 종합계획(2020-2024)'을 수립하여 국내 배출량 감축 정책을 추진

| PM _{2.5} (직접배출) | 구분 | 계 | 산업 | 발전 | 수송 | 생활 |
|-----------------------------|-----------|-------|-----|----|-----|-----|
| | 배출량(백톤/년) | 1,002 | 423 | 32 | 241 | 307 |
| | 삭감량(백톤/년) | 191 | 33 | 20 | 86 | 52 |
| | 삭감률(%) | 19 | 8 | 63 | 36 | 17 |

▶ 사업장 먼지(TSP) 배출량 현황

- 연간 먼지 배출량에 따른 사업장 수 현황(2019년), TMS 관리



3. 기술 현황

▶ 미세먼지 저감 최적가용기법(BAT) 추천 방지시설

- PTFE 등 여과 소재 기술 발전에 따라 제철, 제강, 시멘트 및 산업용 보일러 등 각종 산업체에서 Bag Filter System 기술의 적용 확대 추세
- 500 MW급 대용량 석탄발전소의 경우 팬 동력 문제 등을 고려하여 전기집진기의 고효율화 기술 적용
- 초미세먼지, 2차 생성 먼지 등을 고려하여 기존의 가스처리장치와 복합된 Bag Filter System의 적용 확대 예상

▶ 대표 기술

| 기술명 | 특징 | 적용처 |
|------------------------|--|-------------------------------------|
| 건식 전기집진기 | - 대규모 발생 먼지 제거 - 고 집진효율 및 저 압력손실 - 추타 탈진에 의한 먼지의 재비산 발생 | 대용량 발전설비, 대용량 제철·제강설비, 보일러 |
| 습식 전기집진기 | - 탈진 성능 향상으로 집진효율 증대 - 폐수 및 부식 발생 - 건식 대비 고가의 설치비, 운전비 | 대용량 발전설비, 액상 미스트, 백연 먼지 등의 동시 처리 공정 |
| Bag Filter System | - 운전 부하, 환경 변화에 대한 적응성 우수 - 먼지의 전기저항성에 무관한 성능 유지 - 상대적으로 높은 압력손실 - 주기적인 필터백 교체 - 비교적 넓은 점유부지 | 제철소, 시멘트 제조공장, 중·소규모 발전설비, 일반 산업체 |
| Long Bag Filter System | - 백필터 장점 + 건설비/운영비 절감 - 점유부지 절감 + 배출농도 감소 - 탈진 균일화 및 고내구성 필터 요구 | 제철소, 시멘트 제조공장, 일반 산업체, 소규모 발전설비 |
| 하이브리드 집진기 | - 전기집진기 + 백필터: 백 투과유속 증가, 점유부지 증가 - 사이클론 + 백필터: 제진효율 향상, 장기운전 시 성능 저하 | 중·소규모 발전설비 |
| 세정집진기 | - 제진효율 향상 - 산성 가스 동시 처리 기능 - 미세먼지 집진효율 저하 - 폐수 및 부식 발생 | 일반 산업체, 화학공장, 대용량 공기조화설비 |

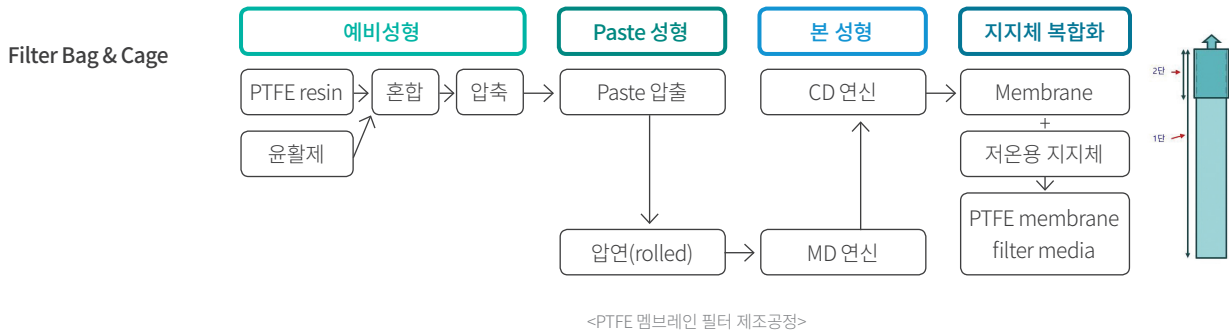
▶ Bag Filter System 기술 비교

| 항목 | 원형 백 | 수평 백 | 주름 백 | 긴 백 |
|---------------|---|------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Filter bag 길이 | 3 m | 1.5 m (최대) | 4.3 m (최대) | 15 m (최대) |
| 탈진 방식 | 고압/저압 방식 (2~3 kg/cm ² , 최대 4 kg/cm ²) | 1:1 펄스 방식 | 저압 펄스 방식 (2~3 kg/cm ²) | 복합재생 방식 |
| 설치면적 | - | 작은 크기의 bag house로 설치면적 감소 | 여과면적이 원형 백 대비 2~3배로 설치면적 감소 | 원형 백 대비 60% 정도 감소 가능 |
| 설치비용 | - | 모듈 방식으로 설치비 절감 | 가격이 원형 백 대비 3배 이상으로 설치비용 증가 | 원형 백 대비 30% 절감 가능 |
| 적용처 | 제철소, 시멘트 공장, 일반 산업체 | 중·소규모 제조공정 | 발전소, 철·비철금속 플랜트, 시멘트 플랜트, 소각로 등 | 제철소, 시멘트 공장 등 |

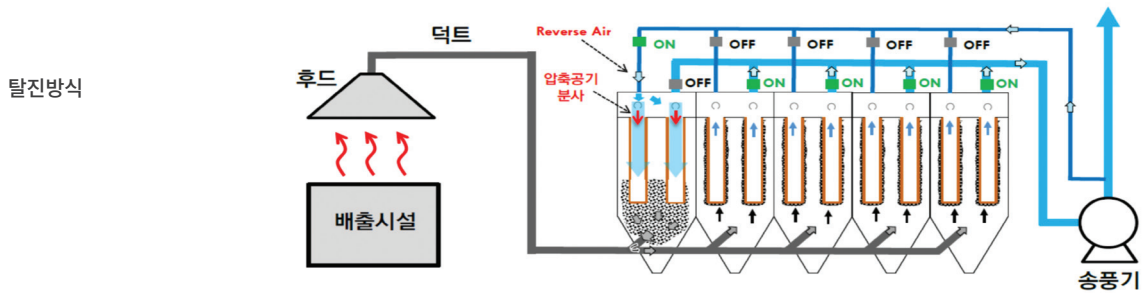
4. 기술개발 내용

| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

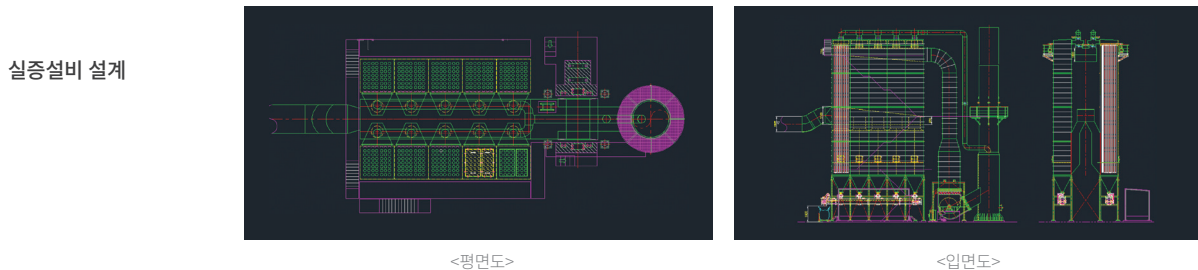
- 15 m Long Bag Filter와 Cage 개발
- 15 m 고통기성 저차압 PTFE 멤브레인 필터 : 5 cc/cm²/s 이상
- 고강도 5 m × 3단 커플러 케이지
- 2단 백 제작
- 구조적 불안정 및 불균일 탈진 문제 해결
- 기존 필터 대비 경제성 확보



- 복합재생방식 탈진 기술
- 역기류(reverse air)와 충격기류(pulse jet)를 복합적으로 적용: 필터 재생 시 댐퍼 작동을 통해 역기류를 여러 방향과 반대로 흐르게 한 상태에서 압축공기를 필터 내부로 분사하여 백을 팽창시켜 필터 외부에 포집된 먼지를 제거



- 주요 사양
- 실증 용량 : 200,000 m³/hr
- 정격 압력 : 110 mmH₂O (~90 mmH₂O)
- 여과 속도 : 0.83 ~ 1.33 m/min (1.03 m/min 기준)
- 최대 정압 : 200 mmH₂O



4. 기술개발 내용

| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

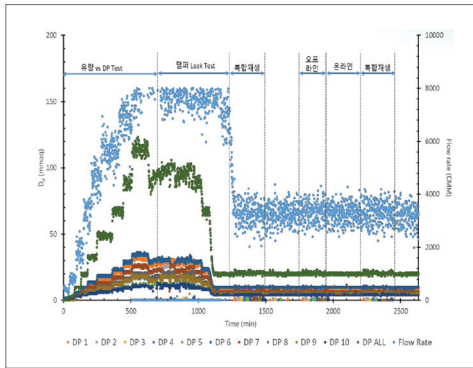
- 실증설비 설치공사: 2019.5~12 (준공 12.16)
- 시운전: 2020.1

실증설비 제작·설치

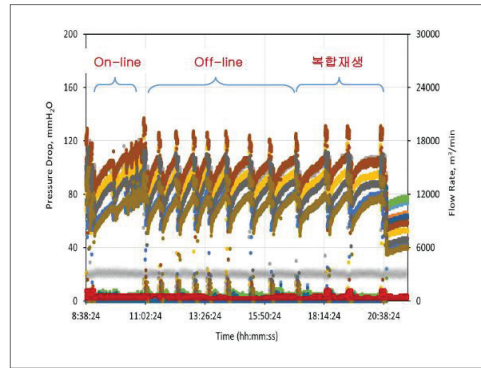


- 시험기간: 2020.2.4. ~ 5.19. (105일간 24시간 연속 상용운전)
- 기존설비 100% 부하(3,000 m³/min)로 기본 운전
- 기존설비 110%, 실증설비 100% 부하(3,300 m³/min)로 실증 운전
- 100% 부하 운전 시 배출먼지 농도 측정: KTL 공인시험 의뢰
- 여과속도 변경(운전 챔버 수 조정 6/8/10개) 운전

실증설비 장기시험



<초기 운전 안정성 시험>



<탈진방식 변경에 따른 운전 안정성 시험>

한국산업기술시험연구원(KTL) 먼지 측정(2020.4.2.)

| | 농도 (mg/Sm ³) | | 제거효율(%) | 배출허용기준 (mg/Sm ³) |
|-------------------|--------------------------|-------|---------|------------------------------|
| | 유입 | 배출 | | |
| 공인기관 인증시험 | | | | |
| 총먼지 | 3010.807 | 0.188 | 99.99 | 5(발전소)/15(시멘트공장)/10(제철소) |
| PM ₁₀ | 254.798 | 0.092 | 99.96 | - |
| PM _{2.5} | 44.335 | 0* | - | - |

* KTL 분석장비로 측정 불가

5. 적용처 및 파급효과

▶ 개발기술의 차별성

3 m 일반 백필터 집진기 대비

- 집진효율 : 배출농도 1/10 이하
- 설치면적 : 60% 정도 감소 가능
- 설치비용 : 30% 절감 가능

▶ 적용 대상 사업장

- 대체 가능한 사업장(설치공간 문제 해결) : 일반 제조업, 철 및 비철금속 주물주조업체
- 신규 적용 가능한 사업장 : 제철산업, 시멘트 공정, 석탄화력발전소, 산업용 보일러, 소각로 배가스 처리시설
- 지역별 먼지 배출 사업장 현황(2019년, TMS 관리)

| 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 |
|----|-------|-----|-------|----|-------|
| 서울 | 6 | 울산 | 33 | 전남 | 47 |
| 부산 | 12 | 경기도 | 95 | 경북 | 40 |
| 대구 | 9 | 강원도 | 20 | 경남 | 40 |
| 인천 | 20 | 충북 | 30 | 제주 | 7 |
| 광주 | 3 | 충남 | 50 | 세종 | 6 |
| 대전 | 5 | 전북 | 32 | | |

▶ 파급효과

- 미세먼지 배출 저감량
기존 제철업 2~4 mg/m³ 배출 대비 1/10 ~ 1/20 (배출허용기준 10 mg/m³ 대비 1/50)
- 시장규모

| 구분 | 2019년 | 2020년 | 2021년 |
|----------|--------|--------|--------|
| 국내(억원) | 72,272 | 75,957 | 79,831 |
| 해외(백만\$) | 78,489 | 82,577 | 86,883 |

* 국내 시장의 89%가 대기오염 통제기기 제조이며, 이 중 80% 정도가 백필터 집진기로 추정

저온 SCR 탈질촉매

1. 기술 개요

▶ 연구배경 및 필요성

- 제철소 소결로에서 발생하는 미세먼지 전구체인 NO_x 배출을 저감시키기 위한 고효율 SCR 탈질촉매가 필요
- 건식 탈황설비 후단의 SCR 탈질촉매는 현재 약 280°C에서 작동되지만, duct burner를 통한 재가열을 최소화하여 탈질촉매를 구동하기 위해서는 220°C에서 작동되는 저온 탈질촉매 기술이 요구
- 제한된 공간에서 질소산화물의 저감효율을 높이기 위해서 단위 촉매당 처리 능력이 우수한 소재의 적용이 필요하며, 탈질촉매의 저온 구동을 위해서는 저온에서 우수한 내황피독 능력이 요구

▶ 기술내용

- 220°C에서 작동하는 고효율, 고내구성 저온 SCR 탈질촉매 개발
- 최적 촉매 합성방법 도출, 촉매 pilot test용 monolith 촉매의 개발 및 평가
- 1,200,000 Am³/hr 규모의 소결로 실증 평가

▶ 성과의 차별성·우수성

- 제철소 소결로에서 발생하는 질소산화물을 처리하고자 우수한 내피독 특성을 나타내며, 초산점 유도 제어 기술을 통해 220°C에서 우수한 촉매 활성을 보이는 저온 탈질촉매를 개발
- 연구실 규모 반응기 외 pilot test를 수행하여 실제 배기가스 조건에서 발생할 수 있는 다양한 변수에 대한 탈질성능을 점검하여 1,200,000 Am³/hr급 대규모 실증설비 평가를 수행

▶ 주요 연구개발 성과

- The role of molybdenum on the enhanced performance and SO₂ resistance of V/Mo-Ti catalysts for NH₃-SCR, Applied Surface Science, 481, 1167-1177, 2019.
- Establishment of surface/bulk-like species functionalization by controlling the sulfation temperature of Sb/V/Ce/Ti for NH₃-SCR, Applied Surface Science, 481, 1503-1514, 2019.
- Study of the phosphorus deactivation effect and resistance of vanadium-based catalysts, Industrial & Engineering Chemistry Research, 58, 18930-18941, 2019.
- Effect of hydrothermal aging on NO_x reduction performance for Sb-V-CeO₂/TiO₂ catalyst, Research on Chemical Intermediates, 44, 6803-6829, 2018.
- 경기대학교 산학협력단, 암모니아를 이용한 질소산화물 제거용 선택적 환원촉매 및 그 제조방법 및 이를 이용한 질소산화물 제거방법, 출원번호 10-2019-0131924, 2019.10.23.
- 상용화 : 제철소 소결로 1기(>20억원)

▶ 특기사항

- 제철소 소결로 청정설비 SCR 탈질촉매 적용 상용화 성공('19년 6월)

▶ 연구진

- 주관연구기관 : 한국과학기술연구원 하헌필 박사팀
- 위탁연구기관 : 경기대학교 홍성창 교수팀
- 참여기업 : 대한광업

▶ 정부지원내용

- 과제명 : 저온 SCR 탈질촉매 기술개발 및 제철소 소결로 실증
- 연구기간 : 2017.9.8.-2020.5.31

2. 정책 현황

▶ 사업장 질소산화물(NO_x) 배출량 현황(2016 CAPSS)

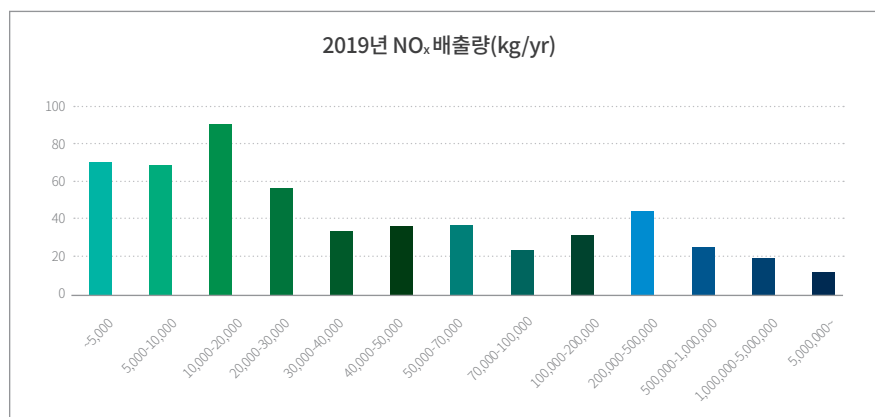
- 에너지산업연소(공공발전시설, 지역난방시설, 석유정제시설, 민간발전시설) : 145,445톤
- 제조업연소(연소시설, 공정로, 기타) : 175,332톤
- 생산공정(석유제품산업, 제철제강업, 무기화학제품 제조업, 유기화학제품 제조업, 기타 제조업) : 55,932톤
- 폐기물처리(폐기물소각) : 13,570톤

▶ 사업장 NO_x 규제 현황

- 2022년까지 미세먼지 국내 배출량 30% 이상 감축을 위한 “미세먼지 관리 종합대책(2017.9)”을 발표함에 따라 환경규제 강화로 기업부담 가중 (질소산화물 배출 1kg 당 2,130원 부과금의 단계별 시행 계획)
- 현재 국내 소결로 시장은 한국철강협회에서 발간한 2019 대한민국 철강산업 지도에 따르면, 포항제철, 현대제철 등의 주요 철강기업 및 중·소규모의 철강기업 등 약 350여 곳이 존재
- 2020년 4월 3일 개정된 대기오염 배출허용기준에 의하면, 소결로의 NO_x 허용기준은 60(15) ppm (2015년 1월 1일 이후 설치), 100(15) ppm (2007년 2월 1일 이후 설치)이며, 지역에 따라 총량규제를 적용(확대)하고 있어 소결로용 설비에 대기오염물질 저감용 청정설비는 확대될 전망

▶ NO_x 배출 사업장 현황

- 연간 NO_x 배출량에 따른 사업장 수 현황(2019년), TMS 관리



3. 기술 현황

▶ 질소산화물 저감 최적가용기법(BAT) 추천 방지시설

- NO_x 저감을 위해 대표적인 방법으로 기술적·경제적으로 유리한 선택적 촉매 환원(selective catalytic reduction, SCR) 방법이 상용화 되어 산업현장에서 사용
- NO_x 관련 규제 준수를 위해 기존 촉매의 기술적 한계가 있으므로, 저온 고효율 촉매 기술 개발과 내피독성이 강한 촉매 개발이 필요

▶ 대표 기술

| 기술명 | 특징 | 적용처 |
|--|---|--|
| 선택적 촉매 환원법 (selective catalytic reduction, SCR) | <ul style="list-style-type: none"> · 운전 온도 : 350°C 정도 · 운영비와 장치비가 고가 · NO_x 제거효율 : >90% · 환원제 : 암모니아 (탈질효율 우수), 탄화수소, 수소 · 촉매 : VO_x/TiO₂ (250~400°C, 높은 탈질효율) | 화력발전소 (중유, 석탄, 가스, 가스복합), 정유산업, 유리산업, 철강산업, 시멘트산업 [‘14년 국내시장 규모 약 2,600억원] |
| 선택적 비촉매 환원법 (selective non-catalytic reduction, SNCR) | <ul style="list-style-type: none"> · 우레아 및 암모니아를 연소로에 직접 주입하여 질소산화물을 제거 · 최적 온도 영역 : 870~980°C · 운영비와 장치비가 저렴 · NO_x 제거효율 : 50% 정도 | 시멘트 소성로, 보일러, 소각시설 등의 고온 배기가스 영역 |
| 저(low)-NO _x 버너 | <ul style="list-style-type: none"> · 연소 시 화염온도 및 산소농도를 낮추어 연소가스의 체류시간 단축 · 일반 버너 대비 질소산화물 발생량을 최대 약 55% 저감 가능 | 시멘트 소성로, 일반보일러, 냉온수기 및 건조시설용 버너 등 |

▶ 저온 SCR 촉매 비교

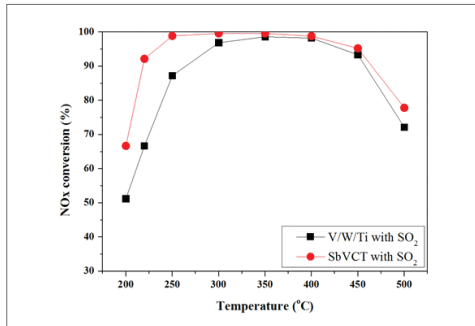
| 항목 | A사 촉매 | B사 촉매 | C사 촉매 | KIST 촉매 |
|-------|-----------|----------------------------|-----------|------------------------|
| 적용 온도 | 220°C | 230~350°C | 250°C | 220°C |
| 재생 온도 | 해당 없음 | 350°C | 380°C | 280°C |
| 촉매 형상 | 허니컴 형상 압출 | 파형 형상 코팅/ 플레이트 형상 코팅 | 허니컴 형상 압출 | 파형 형상 코팅/ 허니컴 형상 압출 |

4. 기술개발 내용

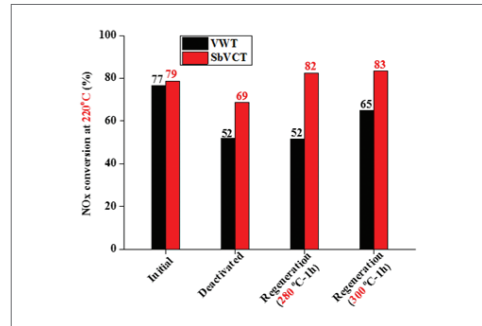
| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

- TiO₂ 담체 기반 220°C급 초산점 구형 탈질촉매 설계
 - Sulfation treatment에 의한 표면개질을 통해 암모니아(NH₃)의 흡착능력 향상 : ceria의 sulfation 처리를 통해 cerium sulfate species를 생성시켜 표면 초산점(acid sites) 증진
- 촉매활성물질 complex 제조방법 도출
 - Active metal 함량에 따른 촉매의 valence state 특성 및 SCR 반응활성과 상관성 도출 : 활성 성분의 valence state에 영향을 줄 수 있는 promoter 함량에 따른 촉매 표면 metal valence state 특성과 반응활성의 상관관계 연구
- 촉매 선택성과 내피독성 분석
 - 이산화황(SO₂) 피독에 따른 SCR 반응활성 및 촉매 특성 연구
 - Alkali metal 및 phosphorus의 피독에 따른 성능변화

탈질촉매
분말 시험



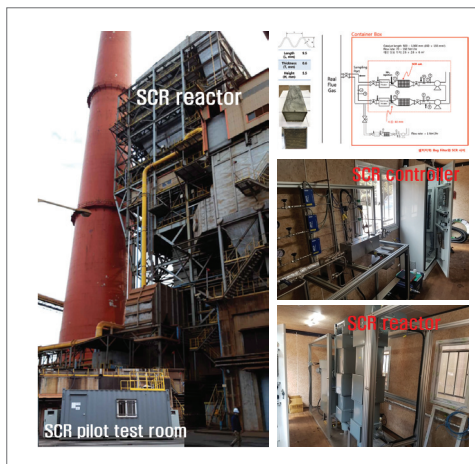
<저온 탈질성능 비교>



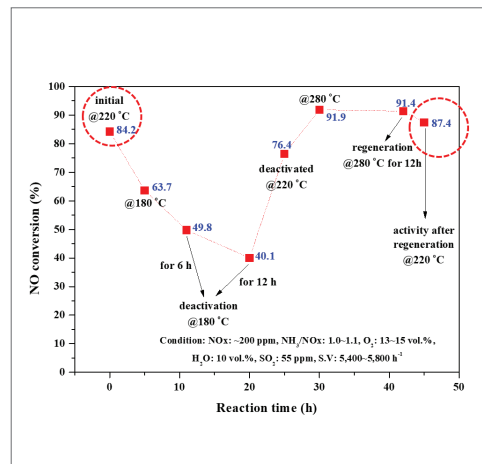
<재생성능 비교>

- 100 Am³/hr 규모 pilot 반응기 제작 및 실제 배기가스를 이용한 저온 SCR 성능평가
 - 현장 적용 가능한 저온 SCR 탈질촉매 모듈 개발 및 적용 후 scale up을 위한 운전 manual 도출 : 제철소 소결로 배기가스의 탈황공정 후단에서 일부 gas를 blower로 흡입하여 pilot test 설비의 반응기로 주입시켜 탈질성능, 재생특성 및 내구성 평가 수행
- 현장 배기가스 조건에 따른 저온 SCR 촉매의 탈질성능 및 내구성 평가
 - 내피독성 원인물질에 따른 고내구성 확보 방안 도출 및 재생 연구
 - 현장 배기가스를 고려한 다양한 운전조건에서 저온 탈질성능 평가 : SO₂, alkali metal 및 phosphorus에 의한 촉매 피독 특성 확인, SO₂ 주입에 의한 활성 저하 및 촉매 특성 변화 확인
 - ; alkali metal 및 phosphorus에 의한 SCR 촉매의 활성 저하의 원인 확인 및 내구성 증진 방안 연구 수행

파일럿 시험



<파일럿 시험 설비>



<탈질촉매 재생특성>

4. 기술개발 내용

| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

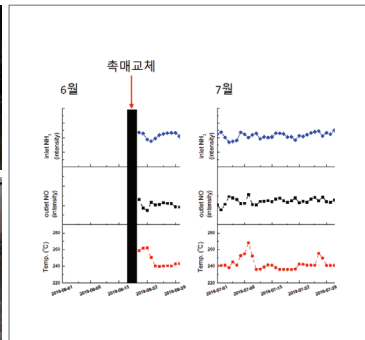
- 1,200,000 Am³/hr 규모의 소결로 실증 평가
- 1,200,000 Am³/hr 평가를 위한 monolith 탈질촉매 생산 및 선택도 향상을 위한 시스템 개선
- 실제 배기가스 조건의 실증연구를 통한 1,200,000 Am³/hr 규모의 저온 탈질성능 확인 및 보완 연구

소결공정
적용 장기시험



<분말촉매 제조 과정>

<Monolith type 코팅 촉매>



<장기 실증시험 데이터>

- 현장 배기가스를 이용한 저온 SCR 촉매 탈질평가 공인인증 시험
- 제철소 소결로(시제품, pilot 설비) 시험을 통해 220°C에서 95% 탈질성능 구현 확인

공인기관
인증시험



5. 적용처 및 파급효과

▶ 개발기술의 차별성

- 제철소 소결로 배기가스의 재가열을 최소화시킬 수 있도록 저온에서 우수한 탈질성능을 나타내고, 저온 SCR 촉매 작동 시 황산암모늄염(ABS) 생성이 적고 생성된 ABS의 재생이 용이
- 비활성화된 촉매를 교체없이 초기성능에 근접하게 site에서 재생이 가능하기 때문에 운영 비용 및 시스템 유지 시 큰 장점

▶ 적용 대상 사업장

- 저온 탈질화 기술은 세계적으로 탈질촉매 시장 적용을 보다 확대시킬 수 있는 기술로, 특히 내피독 특성을 향상시키는 내구성 증대기술은 여러 산업/운송 분야의 적용 가능성을 대폭 확장시킬 만큼 많은 수요가 존재
- 대체 가능한 사업장: 제철소, 발전소, 소각로, 보일러 후단, 디젤 자동차, 선박엔진 후단 등
- 신규 적용 가능한 사업장: 건설장비 및 농기계 디젤 엔진, 기관차, 시멘트 소성로 사업장, 화학공정 후단 청정설비 등
- 지역별 질소산화물 배출 사업장 현황(2019년, TMS 관리)

| 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 |
|----|-------|-----|-------|----|-------|
| 서울 | 24 | 울산 | 39 | 전남 | 51 |
| 부산 | 10 | 경기도 | 144 | 경북 | 35 |
| 대구 | 10 | 강원도 | 20 | 경남 | 33 |
| 인천 | 34 | 충북 | 30 | 제주 | 7 |
| 광주 | 3 | 충남 | 52 | 세종 | 7 |
| 대전 | 6 | 전북 | 32 | | |

▶ 파급효과

- 다양한 사업장에서 배출가스의 온도가 낮아 오염물질을 정화하지 못하거나 인위적으로 버너를 사용하여 배출가스를 가열한 후 정화하는 등 문제점을 가지고 있어 저온·고내구성 촉매는 다양한 산업 현장에서 배출가스 처리를 위한 핵심 기술을 제공
- 저온·고내구성 촉매 개발은 제철소 소결로와 같은 사업장 이외에도 고연비 엔진 자동차 및 선박의 구동을 가능하게 할 뿐만 아니라, 탈질촉매 시장의 기술 확장성 및 환경촉매 시장의 패러다임 자체를 바꿀 것으로 기대
- 배연가스 탈질기술의 선점은 소재시장의 독과점과 직결되는 구조이고 경제규모가 촉매 자체만으로도 수천억원에 이르며, 연관된 다양한 배기가스 처리시장의 선점 및 주도가 가능
- 탈질설비의 세계시장 규모 및 전망

(단위: 백만 달러)

| 2018년 | 2019년 | 2020년 | 2021년 |
|--------|--------|--------|--------|
| 16,009 | 17,018 | 18,090 | 19,230 |

출처: 중소기업 기술 로드맵(2018~2020)

건식 탈황 다공성 반응제

1. 기술 개요

▶ 연구배경 및 필요성

- 미세먼지에 대한 국민적 관심이 증가하면서 미세먼지 전구물질인 SO₂, HCl 등 산성가스의 저감 기술에 대한 요구가 증가
- 제철공장은 SO₂를 배출하는 주요 제조공정으로 현재 수입에 의존하는 중조(NaHCO₃)를 탈황물질로 사용
- 중조의 사용에 의해 수용성 황산나트륨(Na₂SO₄)이 발생하여 매립 시 문제가 발생하고, 단가가 높아 운영비가 부담으로 작용
- 폐자원을 이용한 저가의 탈황물질을 개발하고 실증을 통해 성능을 평가

▶ 기술내용

- 저가 및 고반응성의 SO₂/산성가스 제거를 위한 다공성 반응제 개발
- 수열반응으로 비표면적과 기공 용적을 증대시킨 다공성 반응제는 Ca/Al/Si/Mg/Fe의 복합 산화물(meso porous materials로 물질 내부에 2~50 nm 기공)로 100 m²/g 이상의 비표면적과 0.30 cm³/g 이상의 기공 용적을 갖게 만들어 많은 양의 SO₂/산성가스를 제거할 수 있는 성능을 확보

▶ 성과의 차별성·우수성

- 무기물을 함유한 폐기물을 활용하여 SO₂/산성가스 제거제 제조
- 실험실 평가(100 L/min 규모) → 1차 파일럿 평가(300 Nm³/hr 규모) → 2차 파일럿 평가(50,000 Am³/

hr 규모) → 실증평가(600,000 Am³/hr 규모)로 개발된 탈황제의 성능을 순차적으로 평가하여 성능의 우수성을 확인

- 경제성을 검토하여 대용량 생산체제 구축 시 기존 탈황제의 교체가 가능하다고 판단

▶ 주요 연구개발 성과

- Quick vaporization of sprayed sodium hypochlorite (NaClO(aq)) for simultaneous removal of nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and mercury (Hg⁰), Journal of the Air & Waste Management Association, 69(7), 857-866, 2019.

▶ 특기사항

- 1톤/일 규모의 연구용 다공성 반응제 제조설비 구축

▶ 연구진

- 주관연구기관: (재)포항산업과학연구원 변영철 박사팀
- 위탁연구기관: (주)알엔비즈 김병익 박사팀
- 참여기업: (주)한승케미컬

▶ 정부지원내용

- 과제명: SO₂ 및 산성가스 제거를 위한 건식 다공성 반응제 제조기술 개발 및 제철소 소결공장 실증
- 연구기간: 2017.9.8.-2020.5.31

2. 정책 현황

▶ 사업장 황산화물(SO_x) 배출량 현황(2016 CAPSS)

- 에너지산업연소(공공발전시설, 지역난방시설, 석유정제시설, 민간발전시설) : 91,696톤
- 제조업연소(연소시설, 공정로, 기타) : 86,593톤
- 생산공정(석유제품산업, 제철제강업, 무기화학제품 제조업, 유기화학제품 제조업, 목재·펄프 제조업, 기타 제조업) : 112,734톤
- 폐기물처리(폐기물소각) : 2,161톤

▶ 사업장 SO_x 규제 현황

대기환경보전법 배출허용기준

: 코크스 제조시설은 85 ppm(7)

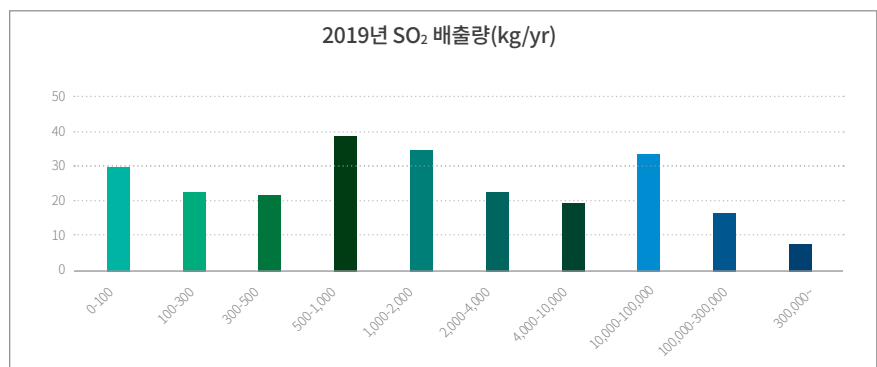
황산화물 배출허용기준(단위 : ppm)

*산소농도

| 배출시설 | 2005년 | 2010년 | 2015년 | 2020년 |
|-------|--------|---------|--------|---------|
| 발전시설 | 150(4) | 70(4) | 50(4) | 20(15*) |
| 일반보일러 | 270(4) | 540(4) | 540(4) | 50(4) |
| 소각시설 | 30(12) | 100(12) | 50(12) | 20(12) |
| 열처리시설 | 300 | 300 | 65 | 45 |

▶ 사업장 SO₂ 배출량 현황

- 연간 SO₂ 배출량에 따른 사업장 수 현황(2019년), TMS 관리



3. 기술 현황

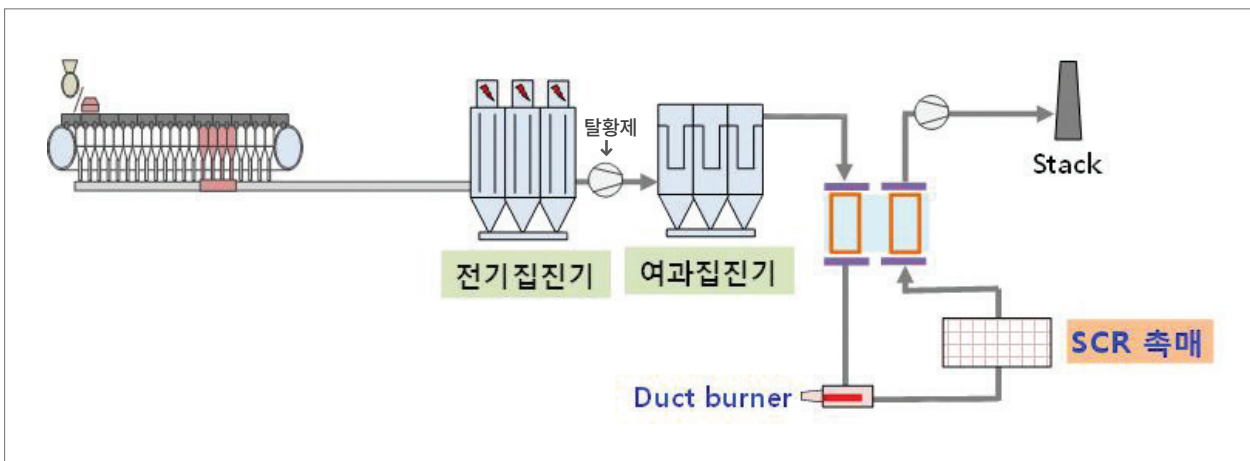
▶ 황산화물 저감 최적가용기법(BAT) 추천 방지시설

- 습식 스크러버(Wet Scrubber) : 배기가스에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 포함한 수용액을 직접 분사하여 SO_2 를 용액에 흡수시킨 후 열 반응에 의해 입자상 물질로 회수하는 기술
- 반건식 반응제 주입(Semi-Dry Powder Injection) : 배기가스에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 나 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 등을 슬러리 상태로 분사하여 물을 기화시킨 후 생성된 분말이 배기가스 중 SO_2 와 반응하여 제거하는 기술이며, 여과포 집진기로 분사된 분말의 회수가 필요
- 건식 반응제 주입(Dry Powder Injection) : NaHCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 같이 분말 형태의 반응제를 배기가스 내에 직접 분사하여 배기가스 중 SO_2 와 반응시켜 제거하는 기술이며, 여과포 집진기로 분사된 분말의 회수가 필요
- 활성탄 흡착탑(Activated Carbon Adsorption Tower) : 괴상 형태의 활성탄을 적층하여 배기가스를 통과시키며 배기가스에 함유된 SO_2 를 흡착시키는 기술이며, 스팀을 이용하여 활성탄에 흡착된 SO_2 를 H_2SO_4 로 회수하여 활성탄을 재생하여 사용 가능

▶ 대표 기술

| 기술명 | 특징 | 적용처 |
|------------|--|-----|
| 습식 스크러버 | - 약품이 첨가된 수용액 분사 - 석고 등 분말 형태로 SO_x 회수 | 발전소 |
| 반건식 반응제 주입 | - 약품을 슬러리 형태로 배기가스에 직접 분사 - 여과포 집진기 등 반응제 회수 설비 필요 | 소각로 |
| 건식 반응제 주입 | - 약품을 분말 형태로 배기가스에 직접 분사 - 여과포 집진기 등 반응제 회수 설비 필요 | 제철소 |
| 활성탄 흡착탑 | - 괴상의 활성탄을 적층하여 SO_2 를 흡착 - 스팀을 이용하여 흡착된 SO_2 를 H_2SO_4 로 회수 가능 | 제철소 |

- 제철소 소결공장의 대기오염 방지시설의 운영 사례 : 전기집진기에서 1차적으로 입자상 물질(미세먼지)을 제거하고, 분말 형태의 중조를 여과집진기 전단에서 주입하여 SO_2 를 제거하고, SCR 촉매를 사용하여 NO_x 를 추가적으로 제거

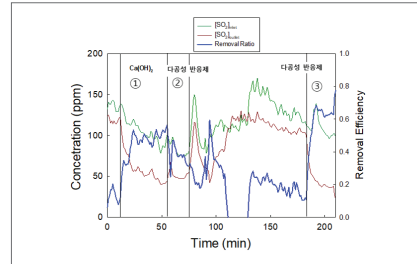


4. 기술개발 내용

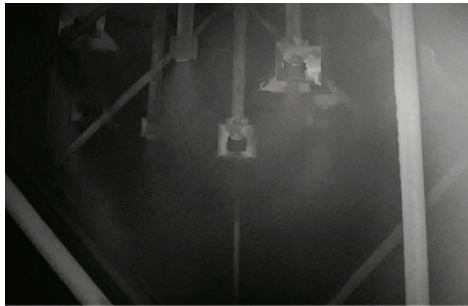
| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

2차 파일럿 시험

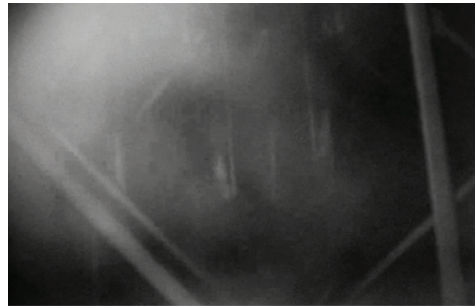
- 60,000 Am³/hr 규모의 반건식 반응기에서 시험
- 슬러리 상태의 다공성 반응제 분사로도 80% SO₂ 제거효율의 달성 가능성을 확인



- 배관 내 탈황제 균일 분사장치 설치: 분사 균일도 향상



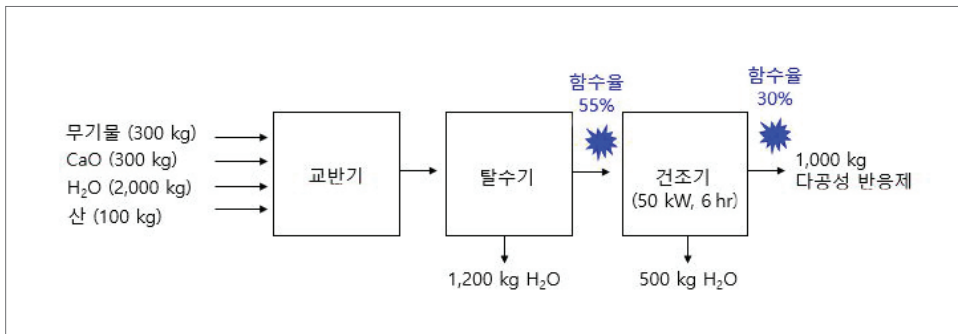
<개선 전>



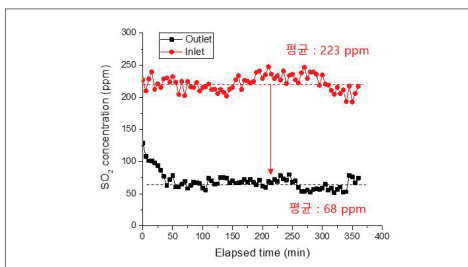
<개선 후>

- 1톤/일 규모의 연구용 다공성 반응제 제조설비 구축: 연료저장 → 수열반응 → 탈수 → 건조 → 파쇄 공정으로 구성

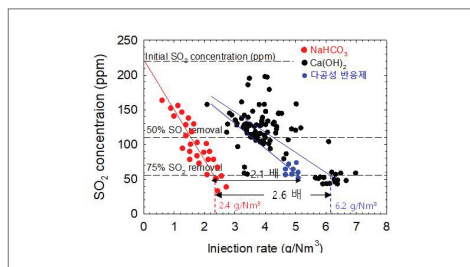
소결공정 적용
실증평가



- 600,000 Am³/hr 규모의 소결공정에서 다공성 반응제를 이용한 실증시험: 5.0 g/Nm³의 탈황제를 6시간 이상 연속 주입하여 SO₂ 제거성능을 확인 → 배출농도 규제치 이하로 제어 가능



<실증시험 시 입·출구 농도 비교>



<탈황제 주입량에 따른 SO2 제거효율 비교>

5. 적용처 및 파급효과

▶ 개발기술의 차별성

- 새로 개발한 다공성 반응제로 90% 이상의 SO₂ 제거효율로 운전이 가능
- 기존 탈황제인 중조(NaHCO₃) 사용 시 제철소 소결공장에서는 폐기물 처리비용을 포함하여 330억원/년(70,000톤/년 기준)이 소요되지만, 100톤/일 규모의 다공성 반응제 생산설비의 구축 시 315억원/년이 소요되어 운영비 절감이 가능

▶ 적용 대상 사업장

- 대체 가능한 사업장 : 건식 또는 반건식 SO₂ 제거설비를 사용하는 소각로
- 신규 적용 가능한 사업장 : SO₂ 제거가 필요한 모든 사업장(여과포 집진기가 설치되어 있다면 설비 투자 없이 노즐 설치만으로 바로 사용 가능)
- 지역별 황산화물 배출 사업장 현황(2019년, TMS 관리)

| 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 |
|----|-------|-----|-------|----|-------|
| 서울 | 2 | 울산 | 19 | 전남 | 32 |
| 부산 | 6 | 경기도 | 61 | 경북 | 22 |
| 대구 | 9 | 강원도 | 8 | 경남 | 23 |
| 인천 | 13 | 충북 | 16 | 제주 | 7 |
| 광주 | 2 | 충남 | 25 | 세종 | 3 |
| 대전 | 3 | 전북 | 18 | | |

▶ 파급효과

- 황산화물 배출 저감량 : 다공성 반응제의 사용으로 절감되는 탈황제 구매 및 처리 비용을 탈황제의 추가 투입으로 환산 시 1,300톤/년의 SO₂ 배출 저감이 가능
- 시장규모 : 제철소 탈황제 시장은 약 400억원/년 정도

초발수·초발유 필터

1. 기술 개요

▶ 연구배경 및 필요성

- 2017년 환경부에 등록된 대기오염물질 배출 사업장은 총 58,932개소이고, 이 중 기초지자체에서 관리하는 연간 대기오염물질 발생량이 2~10톤 범위인 4종 사업장이 19,282개소, 2톤 미만 5종 사업장이 34,012개소로 전체 사업장의 90%를 차지하므로, 소규모 사업장의 맞춤형 관리가 중요(환경통계연감, 2018)
- 중소사업장의 연소시설에서 배출되는 점성이 큰 미세먼지를 여과 백으로 집진한 후 탈진이 용이한 구조의 필터소재가 필요

▶ 기술내용

점성이 큰 미세먼지의 집진 및 탈진 성능이 우수한 필터소재 합성 및 이를 이용한 필터 백 장착 파일럿 스케일 여과집진시스템 제작 및 성능평가

- 배기가스 용량 : 60 Nm³/hr
- 배기가스 시험온도 : 200°C
- 미세먼지(PM₁₀) 집진효율 : 99.9% 이상
- 필터소재 접촉각 : 물 152.9°, CH₂ 120.9°
- 필터소재 공기투과도 : 11.2 cm³/cm²/s @125 Pa

▶ 성과의 차별성·우수성

- 초발수·초발유 기능성 필터소재 개발 및 파일럿 규모 적용 검증 : 200°C 이상 중소사업장 적용 가능성 확인

▶ 주요 연구개발 성과

NH₃-induced removal of NO_x from a flue gas stream by silent discharge ozone generation in a double reactor system, Korean J. Chemical Engineering, 36(8), 1291-1297, 2019.

Direct conversion of NO and SO₂ in flue gas into fertilizer using ammonia and ozone, Journal of Hazardous Materials, 397, 122581-122588, 2020.

한국생산기술연구원, 초발수, 초발유 기능이 부여된 여과체 및 이의 제조장치, 출원번호 10-2018-0135990, 2018.11.7.

한국생산기술연구원, 미세먼지 저감을 위한 황산화물 및 질소산화물 전구물질 입자화 시스템 및 그 방법, 출원번호 10-2019-0096500, 2019.8.8.

한국생산기술연구원, 전기 방사 및 정전 분무 최적화 제조 시스템, 출원번호 10-2019-0134714, 2019.10.28.

한국생산기술연구원, 초발수, 초발유 기능이 부여된 여과체 및 이의 제조장치, PCT 국제출원번호 PCT/KR2019/014251, 2019.10.28.

▶ 특기사항(실증연구로 연계 추진)

사업명 : 제조분야 미세먼지 감축을 위한 공정맞춤형 실용화 기술개발

과제명 : 산업용 초내열 여과필터 기술개발

주관연구기관 : (주)창명산업

연구기간 : 2019.4.1.-2022.12.31.

▶ 연구진

주관연구기관 : 한국생산기술연구원 최석천 박사팀

위탁연구기관 : 서울시립대학교 박영권 교수팀

참여기업 : (주)창명산업, (주)이엠코

▶ 정부지원내용

과제명 : 중소사업장 SO_x, NO_x 입자전환 및 고점도 입자상물질 여과집진시스템 개발

연구기간 : 2017.9.8.-2020.2.7.

2. 정책 현황

중소사업장 미세먼지 배출량 현황(2016 CAPSS)

- 에너지산업연소(공공발전시설, 지역난방시설, 석유정제시설, 민간발전시설) : TSP 4,273톤, PM₁₀ 3,951톤, PM_{2.5} 3,253톤
- 제조업연소(연소시설, 공정로, 기타) : TSP 119,533톤, PM₁₀ 69,599톤, PM_{2.5} 35,577톤
- 생산공정(석유제품산업, 제철제강업, 무기화학제품 제조업, 유기화학제품 제조업, 목재·펄프 제조업, 기타 제조업) : TSP 12,056톤, PM₁₀ 6,731톤, PM_{2.5} 5,191톤
- 폐기물처리(폐기물소각) : TSP 406톤, PM₁₀ 295톤, PM_{2.5} 252톤

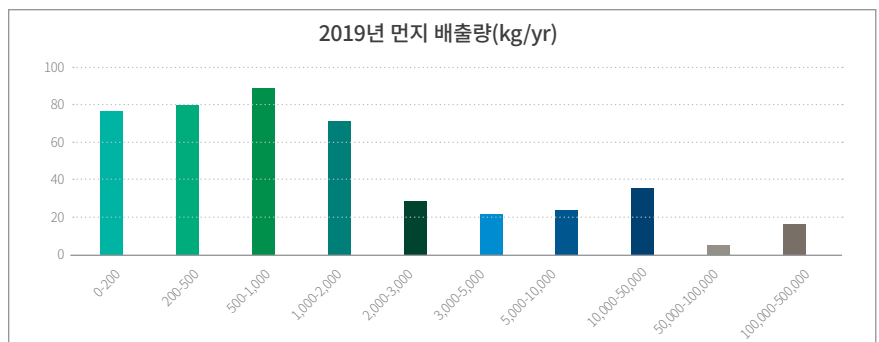
중소사업장 미세먼지 규제 현황

대기환경보전법 먼지 배출허용기준(2020.1.1. 이후 적용)

| 배출시설 | 먼지 농도 (mg/Sm ³) | |
|---|--|----|
| 일반보일러('15.1.1 이후 설치시설) | 10~16 | |
| 폐수·폐기물·폐가스 소각처리시설 및 동물화장시설 ('15.1.1 이후 설치시설) | 시간당 소각용량 : 2톤 이상 | 10 |
| | 시간당 소각용량 : 200kg ~ 2톤 | 15 |
| | 시간당 소각용량 : 200kg 미만 | 15 |
| 1차 금속 제조시설·금속가공제품·기계·기기·운송장비·가구제조시설의 용융·용해시설 또는 열처리시설 ('15.1.1 이후 설치시설) | 전기아크로; 용선로, 용광로, 용선 예비처리시설, 전로, 정련로, 제선로, 용융로, 도가니로 및 전해로; 소결로, 배소로, 환형로; 가열로, 열처리로, 소둔로, 건조로, 열풍로 | 10 |
| | 주물사처리시설, 탈사시설 및 탈청시설 | 15 |
| 코크스 제조시설 및 저장시설 | 15~20 | |
| 아스콘 제조시설 중 가열·건조·선별·혼합시설 | 25 | |
| 석유 정제품 제조시설, 기초유기화합물 제조시설 | 15~30 | |
| 석탄가스화 연료 제조시설 | 15~25 | |
| 유리 및 유리제품 제조시설의 용융·용해시설 | 30 | |
| 도자기·요업제품 제조시설 중 용융·용해시설, 소성시설 및 냉각시설 | 50 | |
| 시멘트·석회·플라스터 및 그 제품 제조시설 | 15~30 | |
| 도장시설 및 부속 건조시설 | 30 | |
| 연마·연삭시설, 고체입자상물질 포장·저장·혼합시설, 탈사시설 및 탈청시설 | 30 | |
| 고형연료제품 제조·사용시설 및 관련 시설 | 10~25 | |
| 화장로시설('10.1.1 이후 설치시설) | 15 | |

사업장 먼지(TSP) 배출량 현황

- 연간 먼지 배출량에 따른 사업장 수 현황(2019년), TMS 관리



3. 기술 현황

▶ 사용 연료에 따른 대기오염방지설비의 비교

| 연료 | 대기오염방지설비 | 주요 배출 오염물질 |
|--------|--|---------------------------------------|
| LNG | 연소보일러 → 굴뚝 | NO _x |
| 등유, 경유 | 연소보일러 → 굴뚝 | NO _x |
| 병커C유 | 연소보일러 → SDR → 알티 사이클론 → 굴뚝 | NO _x , 먼지, SO _x |
| 폐기물 | 연소보일러 → SDR → 여과집진시스템 → 굴뚝 | HCl, 먼지 |
| 유연탄 | 연소보일러 → 열교환기 → 탈질시스템 (300℃) → 전기집진시스템 → 열교환기 → 배연탈황 → 굴뚝 | NO _x , 먼지, SO _x |

▶ 대표 기술

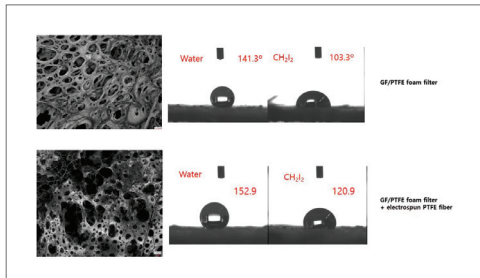
| 기술명 | 특징 | 적용처 |
|-----------|--|---|
| 전기집진기 | - 대규모 발생 먼지 제거 - 고 집진효율 및 저 압력손실 - 추타 탈진에 의한 먼지의 재비산 발생 | 대용량 발전설비, 대용량 제철· 제강설비, 보일러 |
| 여과집진기 | - 운전 부하, 환경 변화에 대한 적응성 우수 - 먼지의 전기저항성에 무관한 성능 유지 - 상대적으로 높은 압력손실 - 주기적인 필터백 교체 - 비교적 넓은 점유부지 | 제철소, 시멘트 제조공장, 중·소 규모 발전설비, 일반 산업체 |
| 하이브리드 집진기 | - 전기집진기 + 백필터: 백 투과유속 증가, 점유부지 증가 - 사이클론 + 백필터: 제진효율 향상, 장기운전 시 성능 저하 | 중·소규모 발전설비 |
| 세정집진기 | - 제진효율 향상 - 산성 가스 동시 처리 가능 - 미세먼지 집진효율 저하 - 폐수 및 부식 발생 | 일반 산업체, 화학 공장, 대용량 공기 조화설비 |

4. 기술개발 내용

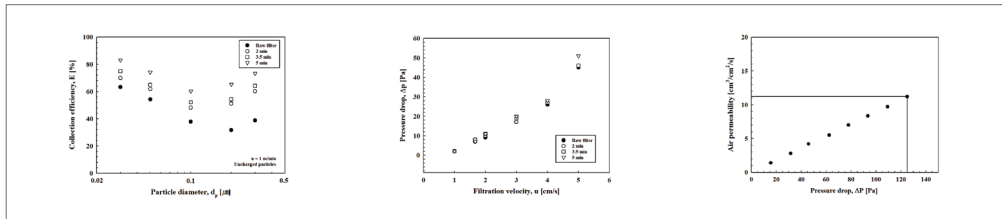
| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

- 전기방사에 의한 PTFE/PVA 필터소재 제조 : 폭 60 cm, 길이 150 cm
- 초발수 · 초발유 성능평가
 - 필터소재 제조조건 : PTFE : PVA = 5 : 1, 소결온도 315°C, 소결시간 8분
 - 최대 접촉각 : 152.9° (water), 120.9° (oil, CH₂l₂)

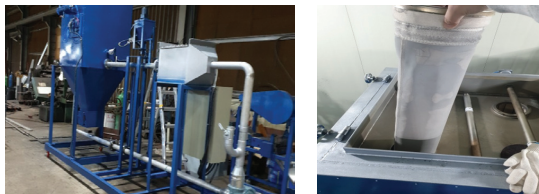
파일럿 스케일
PTFE/PVA 전기방사
필터소재 제조



- 집진 성능평가
 - 집진효율 : 40% 이상 @ 0.1 μm
 - 압력손실 : 15 Pa @ 3 cm/sec
 - 필터 성능지수 : 0.1 Pa⁻¹ 이상 @ 0.1 μm
 - 공기투과도 : 11.2 cm³/cm²/s @ 125 Pa

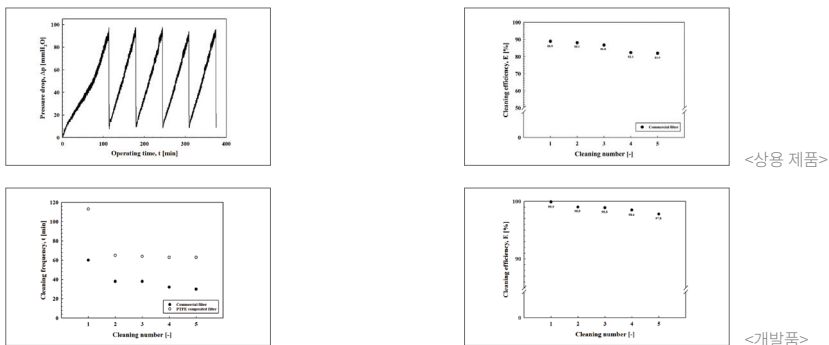


· 파일럿 집진시스템 제작



- 탈진 성능평가
 - 시험조건 : 먼지농도 10 g/m³, 여과속도 3 m/min
 - 탈진효율 : 98% 이상(상용 대비 향상)
 - 탈진주기 : 상용 대비 향상

파일럿 설비 시험



5. 적용처 및 파급효과

▶ 개발기술의 차별성

점착성 미세먼지의 탈진성능(탈진주기, 탈진효율)이 우수한 여과 백(filter bag) 제조기술을 확보

- 접촉각 : 152.9° (water), 120.9° (oil)
- 공기투과도 : 11.2 cm³/cm²/s @125 Pa

▶ 적용 대상 사업장

대체 가능한 사업장 : 미세먼지 다량 배출 중소 사업장(시멘트 공장, 소각장, 제철소)

신규 적용 가능한 사업장 : 숯가마, 염색공정, 고무제조시설, 유리 용해로 시설 등의 중소형 연소시설

- 지역별 먼지 배출 사업장 현황(2019년, TMS 관리)

| 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 |
|----|-------|-----|-------|----|-------|
| 서울 | 6 | 울산 | 33 | 전남 | 47 |
| 부산 | 12 | 경기도 | 95 | 경북 | 40 |
| 대구 | 9 | 강원도 | 20 | 경남 | 40 |
| 인천 | 20 | 충북 | 30 | 제주 | 7 |
| 광주 | 3 | 충남 | 50 | 세종 | 6 |
| 대전 | 5 | 전북 | 32 | | |

▶ 파급효과

- 시장규모

| 구분 | 2019년 | 2020년 | 2021년 |
|----------|--------|--------|--------|
| 국내(억원) | 72,272 | 75,957 | 79,831 |
| 해외(백만\$) | 78,489 | 82,577 | 86,883 |

* 국내 시장의 89%가 대기오염 통제기기 제조이며, 이 중 80% 정도가 백필터 집진기로 추정

SO₂ 분리·회수 공정

1. 기술 개요

▶ 연구배경 및 필요성

- 미세먼지로 인한 대기오염 증가로 환경규제가 강화됨에 따라 고효율 저감기술의 필요성이 증가
- 기존 탈황기술인 습식 석회석-석고법의 이산화황(SO₂) 제거효율의 한계 및 물때와 막힘 현상의 해결이 필요
- SO₂는 황산제조의 전구물질, 식품보존제, 와인양조 등에 활용할 수 있으므로, SO₂ 회수 공정을 통해 오염물질의 자원화 기술을 확보

▶ 기술내용

디아민계 흡수제를 기반으로 가역 SO₂ 흡수제 개발

- 가역 흡수 성능 : > 0.7 mol SO₂/mol 흡수제 (30°C 흡수, 100°C 탈거 기준)
- 열적 안정성 : > 180°C

SO₂ 분리·회수 공정 개발

- 1 m³/hr 규모 연속 순환장치 설치, 운전 및 최적화
- 500시간 연속 운전을 통한 흡수제의 성능 검증
- SO₂ 제거효율 : > 98% (SO₂ 농도 : 입구 약 1,000 ppm, 출구 약 12 ppm; 30°C 흡수, >115°C 탈거 기준)

▶ 성과의 차별성·우수성

- 액체 흡수제를 활용한 SO₂ 제거효율 향상
- 오염물질 배출 저감 및 오염물질 자원화에 따른 자원 순환 체계 구축 가능성 증진
- 이산화탄소 포집공정과 연계하여 국내 CCS 및 기후 변화 대응 기술 확보

▶ 주요 연구개발 성과

Reversible absorption of SO₂ with alkyl-anilines: The effects of alkyl group on aniline and water, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 69, 338-344, 2019.

An experimental based optimization of a novel water lean amine solvent for post combustion CO₂ capture process, Applied Energy, 248, 174-184, 2019.

한국과학기술연구원, 수산화 그룹을 갖는 아민 기반 이산화황 및 아황산 흡수제 및 이의 제조방법, 출원번호 10-2018-0143845, 2018.11.20.

한국과학기술연구원, 흡수탑과 탈거탑이 하나의 탑으로 구성된 가스 포집장치 및 이를 이용한 가스 포집방법, 출원번호 10-2019-0014401, 2019.2.7.

한국과학기술연구원, Hydroxyl group-containing amine-based sulfur dioxide and sulfurous acid absorbent, and method for preparing the same, US Patent Application No. 16/454,566, 2019.6.27.

▶ 연구진

- 주관연구기관 : 한국과학기술연구원 이현주 박사팀

▶ 정부지원내용

- 과제명 : 미세먼지 저감을 위한 선택적 SO₂ 분리 공정 기술 개발
- 연구기간 : 2017.9.8.-2020.7.31

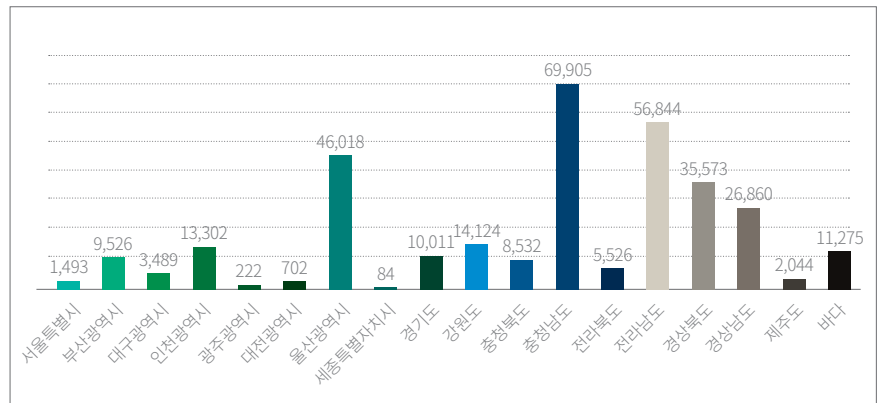
2. 정책 현황

▶ 사업장 황산화물(SO_x) 배출량 현황

사업장 배출량 현황(2016 CAPSS)

- 에너지산업연소(공공발전시설, 지역난방시설, 석유정제시설, 민간발전시설) : 91,696톤
- 제조업연소(연소시설, 공정로, 기타) : 86,593톤
- 생산공정(석유제품산업, 제철제강업, 무기화학제품 제조업, 유기화학제품 제조업, 목재·펄프 제조업, 기타 제조업) : 112,734톤
- 폐기물처리(폐기물소각) : 2,161톤

시도별 SO₂ 배출량 분포(2017년)



▶ 사업장 SO_x 규제 현황

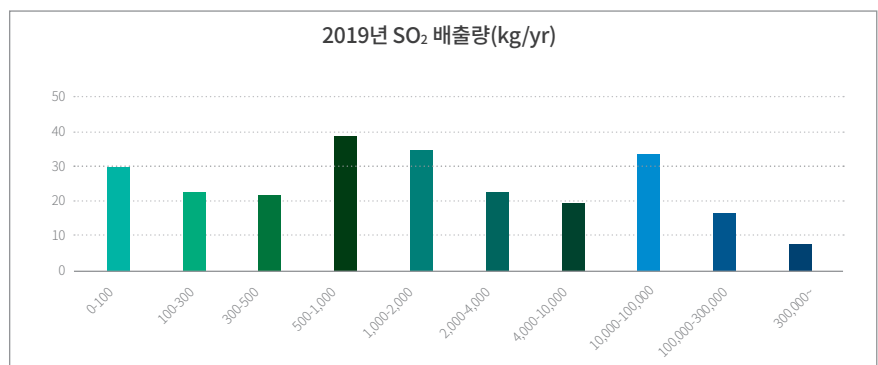
대기환경보전법 황산화물 배출허용기준(단위 : ppm)

| 배출시설 | 2005년 | 2010년 | 2015년 | 2020년 |
|-------|--------|---------|--------|---------|
| 발전시설 | 150(4) | 70(4) | 50(4) | 20(15*) |
| 일반보일러 | 270(4) | 540(4) | 540(4) | 50(4) |
| 소각시설 | 30(12) | 100(12) | 50(12) | 20(12) |
| 열처리시설 | 300 | 300 | 65 | 45 |

*산소농도

▶ SO₂ 배출 사업장 현황

- 연간 SO₂ 배출량에 따른 사업장 수 현황(2019년), TMS 관리



3. 기술 현황

▶ 사업장 황산화물 저감 최적가용기법(BAT) 추천 방지시설

- 습식 스크러버(Wet Scrubber) : 배기가스에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 포함한 수용액을 직접 분사하여 SO_2 를 용액에 흡수시킨 후 염 반응에 의해 입자상 물질로 회수하는 기술
- 반건식 반응제 주입(Semi-Dry Powder Injection) : 배기가스에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 나 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 등을 슬러리 상태로 분사하여 물을 기화시킨 후 생성된 분말이 배기가스 중 SO_2 와 반응하여 제거하는 기술이며, 여과포 집진기로 분사된 분말의 회수가 필요
- 건식 반응제 주입(Dry Powder Injection) : NaHCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 같이 분말 형태의 반응제를 배기가스 내에 직접 분사하여 배기가스 중 SO_2 와 반응시켜 제거하는 기술이며, 여과포 집진기로 분사된 분말의 회수가 필요
- 활성탄 흡착탑(Activated Carbon Adsorption Tower) : 괴상 형태의 활성탄을 적층하여 배기가스를 통과시키며 배기가스에 함유된 SO_2 를 흡착시키는 기술이며, 스팀을 이용하여 활성탄에 흡착된 SO_2 를 H_2SO_4 로 회수하여 활성탄을 재생하여 사용 가능

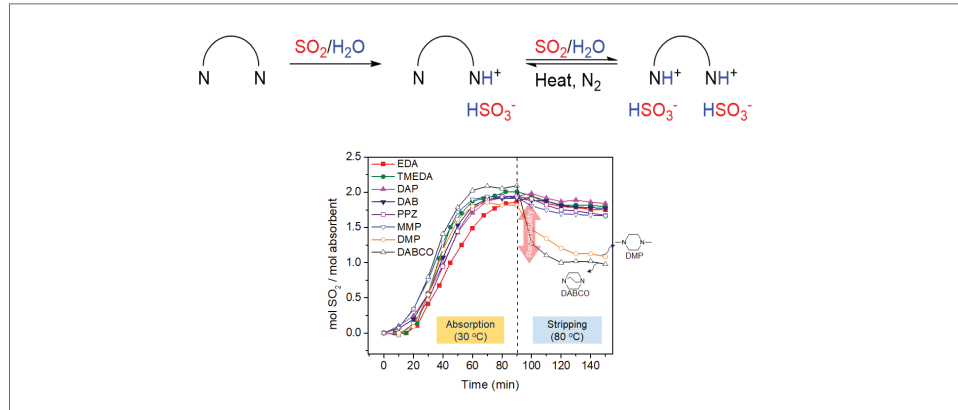
▶ 대표 기술

| 기술명 | 특징 | 적용처 |
|---------------------|--|--------------------|
| 습식석회공정 | <ul style="list-style-type: none"> - Ca 화합물을 물에 분산시켜 SO_2 흡수제로 활용하여 석고 전구체가 생성 - 탈황효율이 높고(95%), 신뢰도가 높아 가장 많이 적용된 탈황장치 - 시설 투자비가 많이 들고, 다량의 부산물로 인하여 부지가 많이 필요하며, 폐수 방출로 2차 오염이 발생 | 세계 석탄발전소의 84%가 사용 |
| Spray Dryer process | <ul style="list-style-type: none"> - Ca 화합물을 가루 형태로 분사시켜 SO_2 함유 가스와 반응시켜 SO_2를 제거 - 건조 상태이므로 폐수가 발생되지 않으나 습식에 비하여 효율이 낮음(70~90%) - 막힘 현상(plugging)의 우려가 있고, 운전 조업비가 많음 | 세계 석탄발전소의 1.6%가 사용 |
| Sea Water process | <ul style="list-style-type: none"> - 바닷물을 이용하여 SO_2를 제거하여 부산물 및 폐기물이 생성되지 않고, 제거효율이 높음(98%) - 바닷물의 pH를 낮춤으로 인해 COD 및 바다 생태계에 영향을 미칠 우려 | 1990년대부터 적용 시작 |
| Walther process | <ul style="list-style-type: none"> - 암모니아를 이용한 SO_2 흡수 공정 - 생성물인 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$를 분리한 후 재결정시켜 비료로 사용 - 암모늄염의 배출로 인해 에어로졸이 발생될 위험 | 독일 발전소 등에 적용 |
| ReACT process | <ul style="list-style-type: none"> - Activated carbon/coke를 이용한 SO_2 제거 및 회수 공정 제거반응: $\text{C} + \text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}(\text{H}_2\text{SO}_4)$ 회수반응: $\text{C}(\text{H}_2\text{SO}_4) + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ - NO, Hg 등 배기가스 중 타 성분도 함께 제거 | 일본과 독일의 발전소에 다수 적용 |

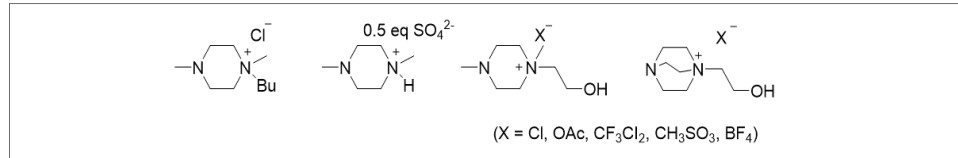
4. 기술개발 내용

| | |
|----|-------|
| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|

· 다양한 아민계 흡수제의 스크리닝 테스트를 통한 최적 SO₂ 가역 흡수제 선정



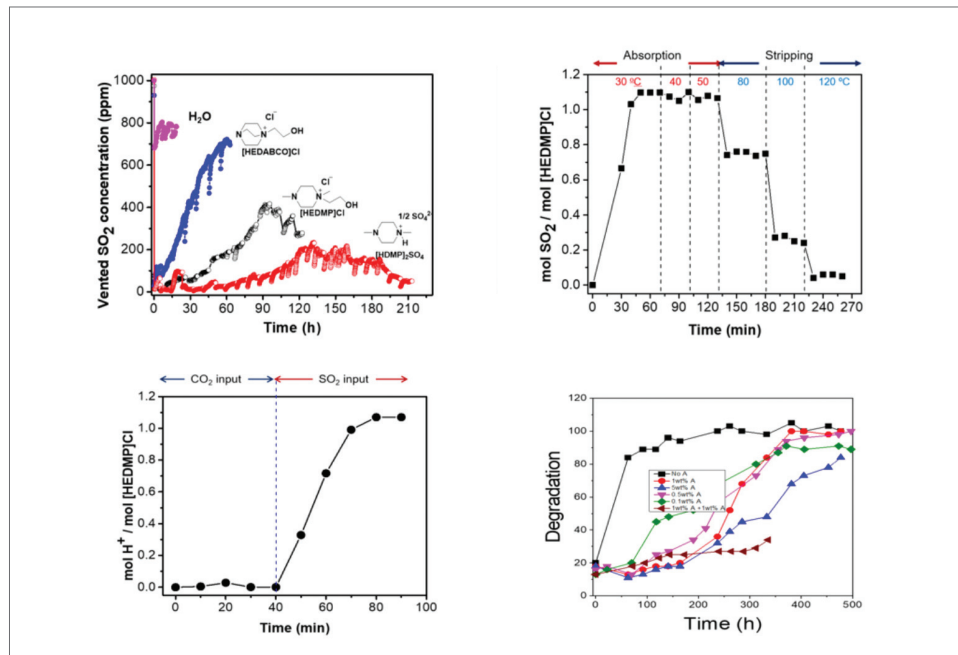
- 대표 흡수제 : DMP 및 DABCO 계열 이온염 흡수제



이산화황(SO₂)
가역 흡수제 합성
및 성능평가

- 가역 흡수 성능 : > 0.7 mol SO₂/mol 흡수제(30°C 흡수, 100°C 탈거 기준)
- 흡수제 열적 안정성 : > 180°C

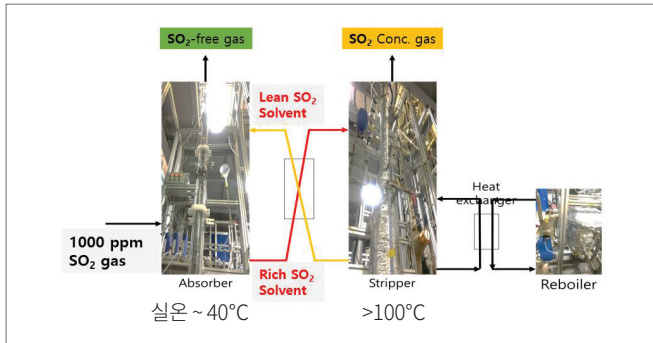
· 다양한 조건(SO₂ 농도, 온도, feed gas 조성)에 따른 SO₂ 흡수실험을 통해 DMP계 이온염이 흡수능과 선택도 면에서 우수한 흡수제임을 확인하고, 흡수제의 열화 방지제를 개발



4. 기술개발 내용

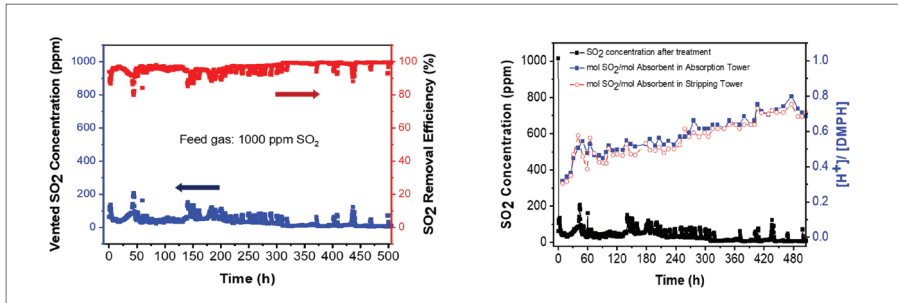
| 구분 | 주요 내용 |
|----|-------|
|----|-------|

· 연속순환장치 설계, 설치 및 운전: 1 m³/h 규모, 500시간 연속운전



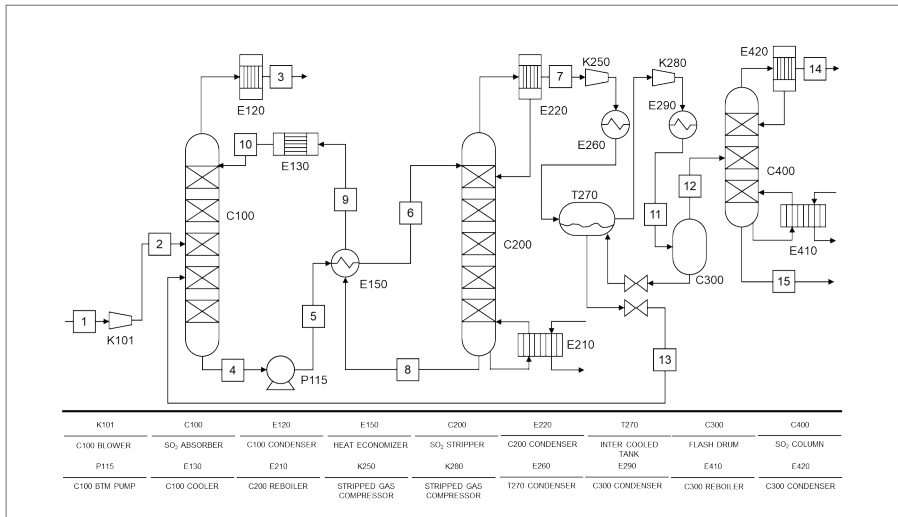
미니 파일럿 장기시험

- 흡수용액: 10 wt% DMP계
- 모사가스: 80.6% N₂, 4.2% O₂, 15% CO₂, 0.2% Ar, 1000 ppm SO₂
- L/G = 6.25 L/M³
- SO₂ 제거효율: > 98% (30°C 흡수, > 115°C 탈거 기준)
- mol SO₂/mol absorbent : > 0.6 mol/mol



· 배기가스 탈황장치 개념설계: 1,000 Nm³/h 규모

SO₂ 분리·회수
시스템 개념설계



5. 적용처 및 파급효과

▶ 개발기술의 차별성

- 현재 국내 SO₂ 처리 기술은 CaO 혹은 CaCO₃를 이용하여 SO₂를 처리하고, 생성된 CaSO₃를 추가로 처리하여 석고로 전환하는 기술이 대부분
- 본 기술은 흡수제를 이용하여 SO₂를 혼합가스로부터 분리한 후 회수할 수 있는 기술로, 액체상의 흡수제를 활용하여 보다 빠르고 효과적으로 SO₂의 분리가 가능하고, 분리된 SO₂를 고농축화 가능하므로 이를 황산이나 기타 화학제품의 원료로 사용이 가능

▶ 적용 대상 사업장

기존 탈황시설이 없거나 노후된 탈황시설을 교체하기 위한 SO₂ 배출 시설(석탄화력발전소, 황산 제조시설, 제철소, 제련소)

- 지역별 황산화물 배출 사업장 현황(2019년, TMS 관리)

| 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 | 지역 | 사업장 수 |
|----|-------|-----|-------|----|-------|
| 서울 | 2 | 울산 | 19 | 전남 | 32 |
| 부산 | 6 | 경기도 | 61 | 경북 | 22 |
| 대구 | 9 | 강원도 | 8 | 경남 | 23 |
| 인천 | 13 | 충북 | 16 | 제주 | 7 |
| 광주 | 2 | 충남 | 25 | 세종 | 3 |
| 대전 | 3 | 전북 | 18 | | |

▶ 파급효과

- 오염물질 배출 저감 및 자원화를 통한 자원순환 체계 구축
- 이산화탄소 및 NO_x 포집공정과 연계하여 국내 기후변화 및 대기환경 대응 기술 확보
- 국내 사업장의 황산 수급 안정에 기여
- 발전소 배출 미세먼지의 원인물질 저감에 따른 대기질 개선

사업장 미세먼지 배출저감 기술

Technology for reducing fine dust emissions at workplaces

| 기술단계 | 기술명/연구기관 | 특징 | 대표 그림/사진 |
|-------|---|--|---|
| 실증기술 | Long Bag Filter System (주)한빛파워 | - 먼지(총먼지/미세먼지) 배출농도를 일반 백필터 집진기 대비 1/10 이하로 저감 |  |
| | 저온 SCR 탈질촉매 한국과학기술연구원 | - 220°C의 우수한 저온 탈질성능 및 내구성 (제철소 소결로 배기가스 재가열의 최소화 가능) - 비활성화된 촉매의 교체없이 초기성능에 근접하게 현장에서 재생 가능 : 운영비용 절감 및 시스템 유지 |  |
| | 건식 탈황 다공성 반응제 (재)포항산업과학연구원 | - 높은 표면적의 무기물로 형성된 다공성 반응제 - 반건식과 건식의 다공성 반응제를 배기가스에 주입하여 SO ₂ 제거 - 90% 이상의 SO ₂ 제거효율 가능 |  |
| 실용화기술 | 초발수·초발유 필터 한국생산기술연구원 | - GF/PTFE foam filter에 electrospun PTFE fiber를 방사하여 제조 - 접촉각 : 물 152.9°, CH ₂ l ₂ 120.9° - 공기투과도 : 11.2 cm ³ /cm ² /s @125 Pa |  |
| 원천기술 | SO ₂ 분리·회수 공정 한국과학기술연구원 | - 배기가스 중 SO ₂ 를 제거하는 동시에 분리하여 농축 - 아민을 이용한 가역적 SO ₂ 흡수-탈거 - 흡수 시스템 및 공정 개발 : 1,000 ppm SO ₂ 를 98% 이상 저감 |  |