

최종보고서(일반과제용)										보안등급		
										일반[✓], 보안[]		
중정기관양행명	국토교통부				사업명	국토교통기술촉진연구사업						
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명	국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)						
공고번호	공고-제05호				연구개발과제번호	21CTAP-C157328-02						
국가과학기술 표준분류	EI0499		50%	EI9999		30%	EI1299		20%			
연구주제	(대분류) 친환경 생활공간 조성 기술 개발				(중분류) 온실가스·미세먼지 제로 인프라				(소분류) CO ₂ -미세먼지 흡착·제거 건설재료			
연구개발과제명	국문		미세먼지 저감 de NOx 다공성 콘크리트 필터 및 모듈 개발									
	영문		Development of de NOx porous concrete filter and module for reducing fine dust									
주관연구기관	기관명	한국건설기술연구원				사업자등록번호	229-82-01135					
	주소	(우) 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283				법인등록번호	111241-0002284					
주관연구책임자	성명	박정준				직위	연구위원					
	연락처	직장전화	031-910-0105				휴대전화	010-9371-9699				
		전자우편	jjpark@kict.re.kr				국가연구자번호	1064-4066				
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)										
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (9개월)										
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)										
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
총계	370,000	12,340	111,060	-	-	-	-	382,340	111,060	493,400	-	
1년차	160,000	5,340	48,060	-	-	-	-	165,340	48,060	213,400	-	
2년차	210,000	7,000	63,000	-	-	-	-	217,000	63,000	280,000	-	
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고				
								역할		기관유형		
공동연구기관	(주)벤텍프린티어	박희주	이사	010-7678-5109		point1014@daum.net		모듈 개발		중소기업		
위탁연구기관	충남대학교 산학협력단	이광복	교수	010-5597-4006		cosy32@cnu.ac.kr		매개체 CO ₂ 개발		대학		
연구개발담당자	성명	박기준				직위	전임연구원					
실무담당자	연락처	직장전화	031-910-0595				휴대전화	010-7180-7767				
		전자우편	joon7767@kict.re.kr				국가연구자번호	1122-7605				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 03월 17일

주관연구책임자 : 박 정 준



주관연구개발기관의 장 : 한국건설기술연구원

김 병 석



공동연구개발기관의 장 : (주)벤텍프린티어

기 윤 중



위탁연구개발기관의 장 : 충남대학교 산학협력단 정 종 을



국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		21CTAP-C157328-02	
내역사업명		국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류		EI0499	50%	EI9999	30%	EI1299	20%
연구주제		(대분류) 친환경 생활공간 조성 기술 개발		(중분류) 온실가스·미세먼지 제로 인프라		(소분류) CO ₂ ·미세먼지 흡착·제거 건설재료	
연구개발과제명		미세먼지 저감 de NOx 다공성 콘크리트 필터 및 모듈 개발					
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)					
총 연구개발비		총 493,400천원 (정부지원연구개발비 : 370,000천원, 기관부담연구개발비 : 123,400천원)					
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[☒] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도		착수시점 기준(2) 종료시점 목표(6)	
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [☒]					
연구개발과제 특성		기반연구					
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		○ 미세먼지 저감을 위한 NOx 저감용 다공성 콘크리트 필터 및 이를 활용한 필터 모듈 개발 - TiO ₂ -매개담체 적용 de NOx 다공성 콘크리트의 NO 제거량 5 μmol/50cm ² ·5hr 이상 (ISO 22197-1) - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품의 NOx 저감율 30% 이상				
	전체 내용		○ 매개담체를 이용한 TiO ₂ 제조 기술 개발 - sol-gel 기반 TiO ₂ -매개담체(Mayenite) 제법 개발 - TiO ₂ -매개담체 활용 광촉매 분산성 향상 기술 개발 ○ TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 개발 - 연속공극을 갖는 다공성 경량기포콘크리트 제조 기술 개발 - TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 배합 및 제조 기술 개발 - TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 NO 제거 성능 평가 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 개발 및 시험평가 - 필터 모듈내 광촉매 활성 광원 및 세척처리 기술 개발 - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 제작기술 개발 - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 NOx 저감 성능평가				
	1년차	목표	1. 주관연구기관(KICT): TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 제조 기술 개발 ○ 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 제조 기술 개발 및 물성 평가 ○ TiO ₂ -매개담체 활용에 따른 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성 향상 방안 개발 2. 공동연구기관((주)벤티프린티어): de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈의 NOx 저감 평가 방안 정립 3. 위탁기관(충남대학교): 매개담체를 이용한 TiO ₂ 복합소재 제조 기술 개발 ○ sol-gel 기반 고분산 TiO ₂ - 매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 제조 기술 개발				
		내용	1. 주관연구기관(KICT): TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 제조 기술 개발 ○ 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 제조 기술 개발 및 물성 평가 - 다공성 콘크리트 필터 기본재료 구성 - 기포제에 따른 연속공극 조성 및 기본물성 평가 ○ TiO ₂ -매개담체 활용에 따른 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성 향상 방안 개발 - TiO ₂ -매개담체 사용에 따른 다공성 콘크리트내 미세구조 분석 - TiO ₂ -매개담체 사용에 따른 광활성화 평가를 통한 분산성 검토 및 보완점 도출				

			2. 공동연구기관(㈜벤텍프런티어): de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발 - 광활성 필터 모듈 기본 설계 - 광활성 향상을 위한 UV 광원 및 모듈내 필터 세척 방안 선정 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈의 NOx 저감 평가 방안 정립 - 광활성 필터 모듈의 NOx 저감 평가방법 확립 3. 위탁연구기관(충남대학교 산학협력단): 매개담체를 이용한 TiO₂ 복합소재 제조 기술 개발 ○ sol-gel 기반 고분산 TiO₂-매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 제조 기술 개발 - 매개담체상에서 sol-gel법으로 TiO₂ 나노입자를 합성과 동시에 분산하는 광촉매 복합소재 합성 - 마이크로파 조사 함침기술을 이용한 TiO₂-Mayenite 광촉매 복합소재 합성 - TiO₂-Mayenite 광촉매 복합소재 물성평가
2년차	목표	1. 주관연구기관(KICT): TiO₂-매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 제조 기술 개발 ○ 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 최적 배합 개발 ○ TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 제조 및 성능평가 2. 공동연구기관(㈜벤텍프런티어): de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 개발 및 시험 평가 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 필터 모듈 시작품 개발 ○ de NOx 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품의 유사환경 NOx 저감 시험평가 3. 위탁연구기관(충남대학교 산학협력단): 매개담체를 이용한 TiO₂ 복합소재 제조 기술 개발 ○ sol-gel 기반 고분산 TiO₂-매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 최적 제법 정립	1. 주관연구기관(KICT): TiO₂-매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 제조 기술 개발 ○ 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 최적 배합 개발 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 최적배합 개발 및 물성 평가 ○ TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 제조 및 성능평가 - TiO₂-매개담체 활용에 따른 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성 향상 최적 제조 방안 정립 - TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 최적단면 설정 - TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 시작품 제작 - TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 세척 전후에 따른 NO 제거 성능 평가 2. 공동연구기관(㈜벤텍프런티어): de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 개발 및 시험 평가 ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 필터 모듈 시작품 개발 - 광활성 필터 모듈내 UV 광원 및 모듈내 필터 세척시스템 구축 및 시작품 개발 ○ de NOx 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품의 유사환경 NOx 저감 시험평가 - 유사환경 모사 필터 모듈의 NOx 저감 성능평가 및 결과분석 - de NOx 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품 개선사항 도출 및 보완 3. 위탁연구기관(충남대학교 산학협력단): 매개담체를 이용한 TiO₂ 복합소재 제조 기술 개발 ○ sol-gel 기반 고분산 TiO₂-매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 최적 제법 정립 - TiO₂-Mayenite 광촉매 복합소재 최적 제법 확립 및 시작품 제작 - 최적비율 TiO₂-Mayenite-콘크리트 결합 및 물성 평가 - TiO₂-Mayenite 양산 방안 제시
	연구개발성과	○ 매개담체를 이용한 TiO₂ 시작품 - Sol-gel 기반 TiO₂-매개담체 제법 최적 배합 - Sol-gel 기반 TiO₂-매개담체 시작품 ○ TiO₂-매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 시작품 - 연속공극을 갖는 다공성 경량기포콘크리트 최적 배합 - de NOx 다공성 콘크리트 필터 최적 배합 개발 - de NOx 다공성 콘크리트 필터 시작품 (공극율 35% 이상, NO 제거량 5μmol/50cm²·5hr(ISO 22197-1)) ○ de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 - 필터 모듈내 광촉매 활성 광원 및 세척 시스템 - NOx의 제거 다공성 콘크리트 광활성 모듈 시작품 - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 시험평가 및 검증 (NOx 30% 저감)	

연구개발성과 활용방안 및 기대효과	1. 연구개발성과의 활용방안 - 공기정화장치에서 가스상태의 NOx 저감 후처리 필터에 적용 - 도심지 지하 터널의 대형 공기정화를 위한 장치 내 NOx 저감 필터로 적용 - 내구성이 향상된 도심지 hot-spot 공기정화타워 내 NOx 저감 필터로 활용 2. 연구개발성과의 기대성과 및 파급효과 ○ 기술적 측면 - 기포제를 이용하여 연속공극을 형성시킨 경량기포 콘크리트에 TiO₂-매개담체를 사용하여 NOx를 제거하기 위한 필터 및 모듈을 개발하는 기술은 국내외적으로 없는 기술로 원천기술 확보가 가능하고 대기정화 시장에 고부가가치 창출이 가능 - 최근 개발되는 공기정화용 광촉매 필터는 세라믹 또는 섬유계열의 필터에 광촉매를 코팅하거나 TiO₂ 분말을 가공처리하여 제작된 필터로 탈취와 같은 VOCc 저감 효과에 한정됨 - de NOx 다공성 콘크리트 필터 모듈을 이용한 가스형태의 미세먼지 제거기술은 집진장치, 헤파필터를 통한 입자형태의 미세먼지 제거하던 기존 공기정화장치의 한계점을 극복함 - 시멘트계 재료에 광촉매를 활용하기 위해 TiO₂-매개담체 기술을 적용하여 광촉매의 분산성 기술을 개발함 ○ 경제적·산업적 측면 - 세계 환경산업 중 대기분야의 시장규모는 528억 달러 이고 연평균 16% 이상 성장할 것으로 예상되는 상당한 시장의 규모임 - 국내의 경우 2016년 14조원 이상으로 예측한 대기관리 분야의 시장규모는 최근 들어 미세먼지 관련 시장이 중점적으로 성장할 것으로 예상되는 가운데 NOx 저감 관련 기능성 제품수요가 있을 것으로 기대함 - 국내 대부분 터널의 공기정화는 환기의 위주이고 장대터널을 중심으로 집진시설이 설치가 되고 있으나 차량에서 배출되는 NOx 처리시설은 전무함 - 개발 기술은 기존 공기정화장치나 터널내 환기시설내 NOx 저감을 위한 후처리 필터로 활용될 수 있음 - 이에 기존제품의 단점을 극복하는 기술을 제공하여 신규시장 진입장벽이 낮을 것으로 예상되고 관련 산업과의 연계를 통해 대기분야 건설자재의 신시장을 창출할 것으로 기대됨 ○ 사회적 측면 - 자동차의 지속적인 증가로 국내의 경우 2011년 기준 1,465개소의 터널이 건설되었고, 1km 이상의 장대터널은 17%인 254개소임 - 앞으로 도심지 교통량 해소를 위한 대심도 터널 등 지하교통시설 추진계획 및 건설이 확대터널 건설이 증가할 것으로 예상됨 - 그러나 터널 내 차량운행에 따른 NOx 등의 오염물질이 터널출구로 집중 배출되어 주변지역이 국지적 고농도 오염에 의한 피해사례가 빈번히 발생하고 있음 - 이에 장대터널 및 도심지 터널내 미세먼지 농도를 저감시키기 위한 핵심기술로 활용되어 터널 내 대기환경 개선에 기여할 것임 - 향후 도심내 청정한 대기질 확보와 미세먼지 저감 정책 수립에 기여할 것으로 기대함																	
	연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음																
연구개발성과의 등록· 기탁 건수	논문	특허	보고 서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	인력 양성	생명자원		화합 물	학술 발표	포상	신품종				
	SCI 1건 비SCI 1건	출원 2건 등록 1건	-	-	-	-	-	석사 2건	-	-	-	국내 5건	1건	-	-			
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관		연구시설· 장비명		규격 (모델명)		수량		구입 연월일		구입가격 (천원)		구입처 (전화)		비고 (설치장 소)		ZEUS 등록번호	
	-		-		-		-		-		-		-		-		-	
국문핵심어 (5개 이내)	미세먼지			질소산화물			매개담체 광촉매			연속공극			광활성 필터 모듈					
영문핵심어 (5개 이내)	Fine dust			NOx			TiO ₂ -Mayenite			Continuous voids			Photoactive filter module					

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	21
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	62
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	68
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	69
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	70
7. 참고 문헌	71

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

“미세먼지 저감 de NOx 다공성 콘크리트 필터 및 모듈 개발”

초미세먼지의 대표적인 원인물질인 NOx를 제거할 수 있는 TiO₂-매개담체를 사용한 다공성 콘크리트 필터 및 이를 활용하기 위한 필터 모듈을 개발

: TiO₂-매개담체* 활용 광촉매 분산성 향상, 연속공극을 갖는 경량기포 콘크리트에 TiO₂-매개담체 활용하여 de NOx 다공질 콘크리트 필터 및 이를 모듈화하여 미세먼지 원인 가스물질(NOx)을 흡착제거하는 기술 포함

*매개담체 : 촉매 미립자를 지탱하는 물질로 촉매를 보다 넓은 면적에 분포시키기 위해 사용되는 물질을 일컫는 화학용어

[핵심기술]

TiO₂-매개담체 / TiO₂-매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 / de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈

- **[정의]** NOx를 흡착제거하기 위해 TiO₂-매개담체를 활용한 다공성 콘크리트 필터 제조 및 모듈 제작 기술
 - 기존의 공기정화장치가 입자형태의 미세먼지를 제거하는 것과 달리 가스형태의 물질인 NOx 등과 같은 초미세먼지(PM_{2.5}) 원인물질을 흡착제거하는 후처리 필터기능을 제공하여 효율적인 미세먼지 저감을 구현하는 기술
- **[개발내용]** 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성을 향상을 위한 TiO₂-매개담체 개발 /TiO₂-매개담체를 활용한 de NOx 다공성 콘크리트 필터 / 광활성 시스템을 갖춘 필터 모듈
 - Sol-gel 기반 TiO₂-매개 담체(Mayenite) 제법을 활용한 콘크리트 필터내 광촉매의 분산성 향상기술
 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트에 TiO₂-매개담체 활용한 de NOx 다공성 콘크리트 필터 개발
 - 광활성 시스템을 갖춘 de NOx 다공성 콘크리트 필터 모듈 개발
- **[적용분야]** 도로 및 공원 NOx 저감용 대용량 공기정화시설, 지하철 공기순환 배출구 및 도심지하 터널 공기정화장치



그림 1. 연구개발 개요

1) 연구개발과제의 배경 및 필요성

가. 연구개발의 배경

- 대기 환경오염으로 인한 공기 중 미세먼지 증가와 이로 인한 국민건강의 위험성 증가
 - 최근 미세먼지의 피해를 줄이기 위한 정부의 노력에도 불구하고 미세먼지(PM₁₀)의 국내배출량은 지속적인 감소를 보이나 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도는 여전히 다른 선진국에 비해 높은 수준이고 획기적으로 개선하기 어려운 상황임
 - 특히 겨울철을 중심으로 미세먼지 고농도 사례도 빈번히 발생하고 미세먼지 ‘나쁨’ 일수가 ’15년 72일에서 ’17년에는 92일로 증가하여 국민이 체감하는 대기개선효과는 미미한 수준임
- 18년 3월을 기준으로 초미세먼지(PM_{2.5}) 환경기준이 선진국 수준인 1일 평균 50 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 에서 35 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 으로 강화됨에 따라 ‘나쁨’ 일수는 더욱 증가될 것으로 예상됨



그림 2. 연구 배경

- 서울의 대기환경은 OECD 국가의 주요도시와 비교하면 열악한 수준이며, 특히 미세먼지와 이산화질소의 경우 세계 주요 도시보다 1.2~3.5배 높은 수준
- 미세먼지에 대한 피해를 산정한 결과 미세먼지의 사회적 비용을 1kg당 약 45만원으로 추정할 경우 사회적 비용이 연간 11조 8천억원이 소요되는 것으로 파악됨(TV 조선, 2017.04.03.)
- 미국에서도 대기오염으로 인한 조기 사망자수는 교통사고 사망자수의 3배에 이르는 것으로 조사됨(US EPA, 1997)
- WHO는 미세먼지로 인해 세계적으로 연간 최대 600만명이 사망하며 우리나라도 인구 100,000명당 21~40명이 사망하는 고준위 국가에 속함
- 인체에 가장 심각한 피해를 주는 초미세먼지(PM_{2.5})의 주요원인은 차량 등에서 배출되는 질소화합물, 황산화물, 휘발성 유기화합물질 등의 전구물질이 대기중에서 화학반응하여 2차로 생성된 것으로 이들 원인물질에 대한 관리가 중요
- 이러한 원인물질의 대기중으로 유입하는 주요 배출원으로는 자동차, 발전, 난방 및 산업시설 등이 있으며 그 중 차량의 급격한 증가로 인하여 자동차로부터 배출량이 가장 많은 것으로 조사되고 있고 서울시의 경우 40% 이상을 차지
- 대기 중 미세먼지 저감을 위한 정부 규제 정책을 강화하고 있으나, 현재 정부의 대응은 미세먼지 예보 및 경보에 중점을 두고 있으며 미세먼지를 포함한 대기오염 제거·저감 기술개발이 아직 부족한 실정임
- 서울시 등 지자체에서는 도로변의 미세먼지를 저감하기 위해 도로 기계 청소 확대, 가로수 및 수림대 관리방법 개선, 지하철역 배수를 이용한 도로 물청소 등이 있으나 유지관리비용 및 지속성의 문제가 제기됨

- 미세먼지 저감을 위해 공기정화장치가 많이 활용되지만 전기적 집진, 필터방식의 여과집진, 원심력 집진 등 미세먼지 입자를 제거하는 방식으로 입자형태의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 제거는 효과가 있으나 NOx 등과 같은 기체상태의 원인물질을 제거하기 어려운 구조임
- 이에 초미세먼지(PM_{2.5})의 대표적 원인물질인 NOx 등을 제거/분해 할 수 있는 광촉매 소재를 사용한 건설자재 개발을 통해 가스상의 물질을 추가적으로 제거할 수 있는 공기정화 장치의 후처리 필터를 개발하여 사용하면 도심지 미세먼지 저감에 효과적인 대안이 될 수 있음
- 따라서 이 연구에서는 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성을 향상을 위해 TiO₂-매개담체를 활용한 de NOx 다공성 콘크리트 필터 및 광활성 시스템을 갖춘 모듈을 개발하여 대형 공기정화장치의 NOx 저감 후처리 필터에 적용하기 위한 기술을 개발하여 고부가가치 시장창출이 가능한 건설자재 개발 및 국내 미세먼지 저감대책 수립에 기여하고자 함

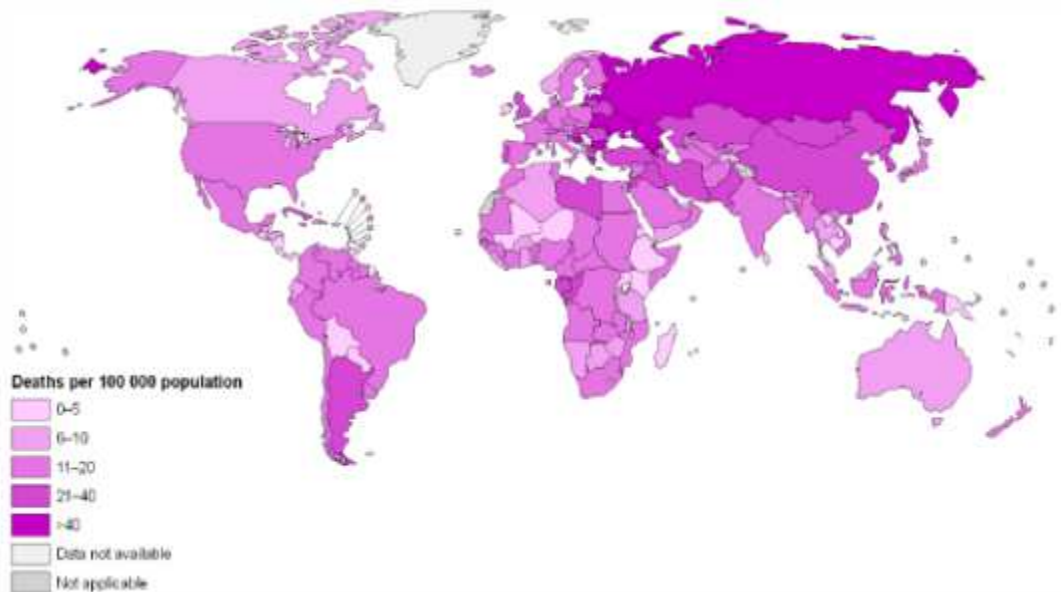


그림 3. 대륙별 대기오염에 따른 사망자 지도(WHO Map Production, 2011. 9. 26)

나. 연구개발의 중요성

- 환경적 측면
 - 최근 우리나라의 대기 환경은 대기 중 미세먼지 농도가 증가하여 급속히 악화되고 있으며, 이에 대한 미세먼지 저감 기술에 대한 개발 국민적 요구가 언론 등을 통하여 사회적으로 표출되고 있음
 - 일산화탄소, 이산화황, 총먼지 같은 1차 오염물질은 배출원의 배출량감소에 정비례로 감소하므로 관리가 수월하지만 미세먼지, 오존, 질소산화물(NOx)과 같은 2차 대기오염 원인물질 즉 초미세먼지(PM_{2.5})를 일으키는 전구물질들은 가능한 발생지에서 집중 저감시키는 것이 중요함
 - 도로변의 미세먼지를 저감하기 위한 서울시 등 지자체의 대책으로는 도로 기계 청소 확대, 가로수 및 수림대 관리 방법 개선, 지하철역 배수를 이용한 도로 물청소 등이 있으나 유지관리 비용 및 지속성의 문제가 제기됨
 - 광촉매는 빛과 반응하여 미세먼지 원인물질을 흡착/제거 하고 있고 장기간 이용할 수 있으므로 광촉매를 이용하여 미세먼지를 저감하기 위한 소재를 활용한 건설자재를 개발할 경우 도심지 미세먼지 저감에 중요한 역할을 함
 - 한편 도심지 터널이나 장대터널의 경우 미세먼지의 농도 감소를 위해 환기시설을 이용하거나 입자상 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 등은 포집 및 집진장치 등의 공기정화 시설로 처리하고 있음
 - 그러나 기존 정화장치는 전기집진, 헤파필터 등을 사용하여 입자상의 미세먼지는 제거하지만 가스형태의 물질인 NOx 등의 초미세먼지(PM_{2.5}) 원인물질은 제거되지 못하고 공기중으로 재배출시킴으로 이러한 전구물질을 제거/분해 할 수 있는 광촉매를 적용한 건설자재 개발이 매우 중요함
- 기술적 측면
 - 광촉매는 빛과 반응하는 광촉매는 반응이 일어날 수 있기 때문에 표면에 존재하는 유기물이 바로 산화되어 이산화탄소와 물로 변하기 때문에 대기정화, 수질정화, 자가세정(self-cleaning), 항균 등 다양한 분야에 적용되고 있음

- 대기정화에서 특히 NOx, SOx의 경우 광촉매와의 광활성 반응에 의한 제거보다는 Ca와 성분과 결합된 광촉매가 광원을 받을 경우 광촉매와 반응한 Ca성분이 표면에 이온결합으로 흡착·고정되어 있다가 물에 씻겨 제거될 경우 가장 효율적인 제거 메커니즘을 갖게 됨
- 시멘트에는 풍부한 Ca 성분이 있기 때문에 광촉매를 고정함에 있어 시멘트를 바인더로 사용하면 경제적이면서도 효과적이기 때문에 NOx 제거를 위해 시멘트계 건설자재를 활용하기 위한 연구들이 진행 중에 있음
- 유럽에서는 보도블록에 광촉매를 적용하는 기술이 우선 적용되고 있으나 점차적으로 건설자재 전반으로 활용되는 기술로 확대될 것으로 예상되며 오염도가 높은 도심에서부터 공기질을 개선하기 위한 광촉매 활용기술 적용과 동시에 경제성을 고려한 광촉매 적용 기술 확보 노력이 있을 것으로 판단됨
- 미세먼지의 입자를 포집·제거하는 방식의 공기정화장치에 NOx 저감을 위한 필터가 부착되어질 필요가 있으며 촉매를 적용한 시멘트계 소재의 필터기술 개발을 한다면 보다 효과적인 미세먼지 관리가 될 것으로 판단됨

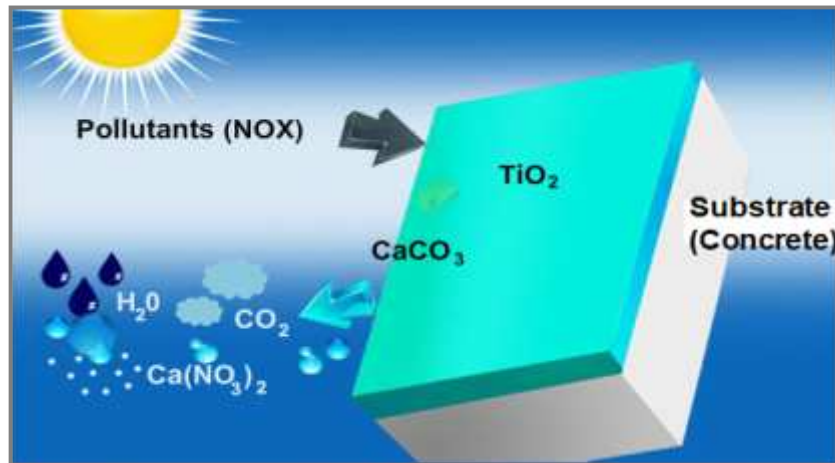


그림 4. 광촉매의 광활성화 반응을 통한 NOx 제거 원리

○ 경제·산업적 측면

■ 국내

- 국내에서는 최근 미세먼지의 저감이 사회적으로 매우 관심이 높은 이슈가 됨 미세먼지 저감을 위한 정부의 정책은 Negative 정책이 위주로 이 경우 관련 산업과 시장의 위축이 우려됨
- 소득수준의 향상에 따라 환경의식 제고로 향후 10~15년간 세계 환경시장이 급성장 할 것으로 전망됨 특히 세계 10대 환경선진국이 평균 GDP 대비 환경산업시장규모는 2.45%인데 비하여 우리나라는 1.18%에 불과해 향후 환경산업시장 성장에 따라 국내 광촉매 사업 역시 크게 활성화 될 것으로 예상됨
- 국내의 경우 현재 대기관리 분야의 시장규모는 4조억원 수준이며 2016년 이후 14조원의 시장으로 성장할 것으로 예상되고 미세먼지 감축기술관련 시장은 향후 급격히 증대할 것으로 판단되며 으로 보이며 다양한 기능성 제품이 주력을 이룰 것으로 보임

■ 국외

- 전 세계적으로 친환경 건설재료 시장은 친환경 구조물에 대한 수요 증가와 함께 꾸준히 증가할 것으로 예상되며, 새로운 친환경 기능을 지니는 환경 유해물질 제거형 광촉매 콘크리트 시장 개척이 강화될 것으로 전망됨
- 현재 세계 환경산업 중 대기분야의 시장규모는 528억 달러이며, 연평균 16% 이상 성장 할 것(환경부, 환경기술동향 보고서)으로 예상되는 큰 규모의 시장임
- 유럽의회를 중심으로 질소산화물 감소를 포함한 공기질 개선 관련 2008/50/EC Directive(훈령)가 채택하는 등 기본적으로는 Euro Standard(자동차 배출가스 규제등급)를 통하여 자동차의 질소산화물 방출량의 저감을 강력하게 유도하고 이미 방출된 질소산화물을 줄이기 위한 수단으로 광촉매 기술 시장이 주목받고 있음

○ 사회적 측면

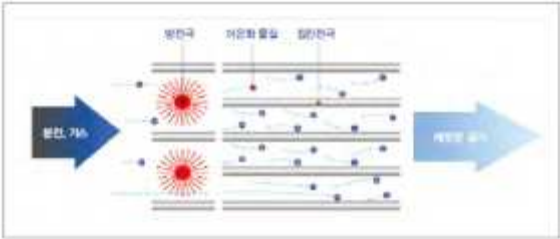
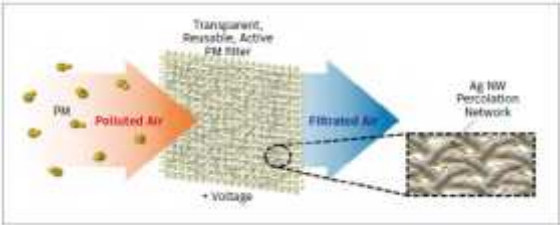
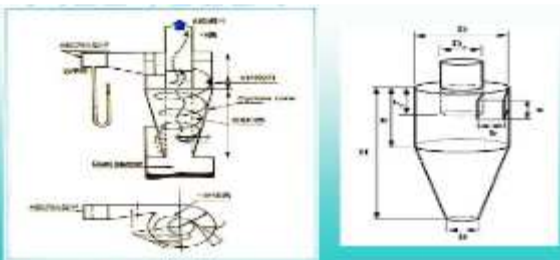
- 도심지 대기환경 개선, 국민의 미세먼지에 대한 공포 해소 및 삶의 질 개선에 기여할 연구가 필요
- 미세먼지 발생원의 문제에 집중하여 해결하기 위한 미세먼지 저감 기술개발을 통한 선제적 대응이 필요

다. 연구개발 및 기술현황

■ 국내 현황

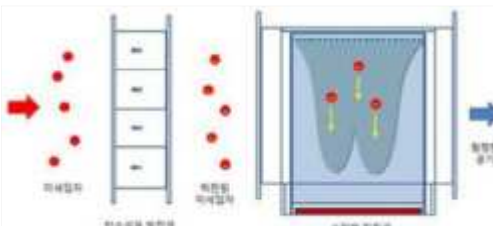
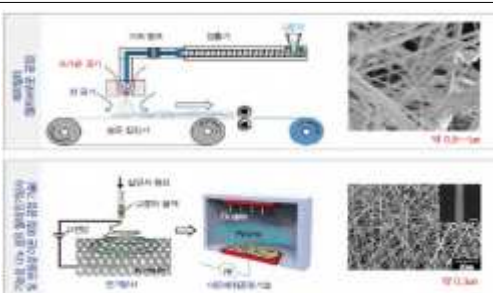
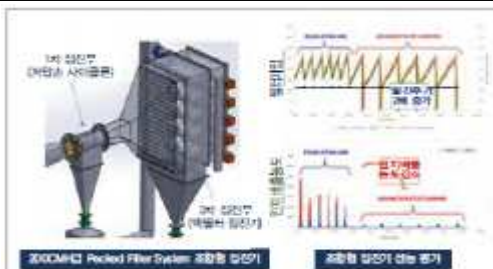
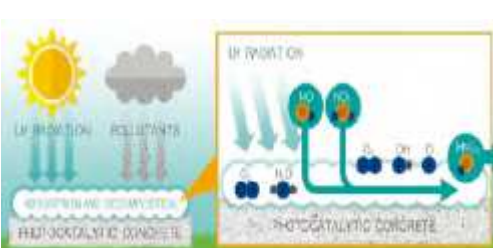
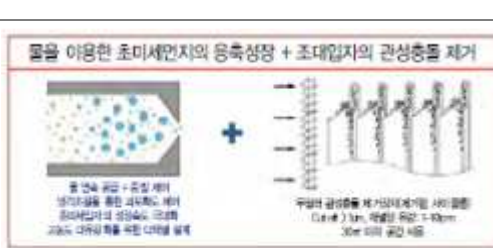
- 실외에서 적용 가능한 정화소재/장치 개발 등의 공기정화 기술은 현재 관심도가 높아지면서 다양한 연구개발이 이루어지고 있으나 실내 공기정화기술에 비해서는 부족한 실정임
- 국내 미세먼지 규제가 강화되면서 미세먼지 저감을 위한 다양한 설비 개발이 이루어지고 있으며 습식 전기집진기, 정전 응집기 등 대부분 산업 설비의 배기 후 처리 장치 개발에만 집중되어 있으나 대기오염 문제가 심각해지면서 도심지의 미세먼지 저감 기술로는 확장될 것으로 예상됨
- 최근 미세먼지 대표적인 처리기법으로는 정전기력을 이용한 전기적 집진, 필터방식의 여과집진, 원심력 집진, 습식집진 등이 있으며 미세먼지 입자를 제거하기 위한 장치임
- 초미세먼지 원인물질인 NOx, SOx, NH₃, VOCc 등을 제거하기 위한 방법으로 촉매반응을 활용하는 방법이 있음
- 그러나 광촉매 활용 필터는 세라믹 또는 섬유계열의 필터에 광촉매를 코팅하거나 TiO₂ 분말을 가공한 필터로 탈취와 같은 VOCc 저감 효과에 한정됨
- 국내 미세먼지 문제를 하기 위해 미세먼지 집진 후 정화된 공기를 배출하는 과정에서 초미세먼지 원인 물질 인 NOx를 제거하기 위한 광촉매 활용 콘크리트 필터 관련 시도는 현재 없음
- 상용되는 광촉매 분말을 직접 시멘트에 바인더로 혼합하여 사용할 경우 나노크기의 영향으로 시멘트 매트릭스내에서 재응집을 하여 분산력이 떨어져 사용량에 따라서는 강도 및 작업성이 크게 저하하는 경향을 나타냄
 - 최근에는 광촉매를 건설재료에 효과적으로 활용하기 위하여 적절한 고체 지지체 상에 직접 물리적으로 코팅하는 sputtering법 등이 일본 등 선진국에서 시도되고 있음
 - 이에 광촉매 성능발현을 극대화하고 무기바인더인 시멘트에 적용하기 쉽도록 sol-gel법을 이용하여 지지체에 TiO₂ 코팅하는 방법을 통해 광촉매의 시멘트내 분산기술을 개발할 필요가 있음
- 다공성 콘크리트는 구조용 재료로만 생각해오던 시멘트 콘크리트를 도시 미관과 경관을 조화시키기 위해 식생콘크리트, 투수블록, 방음벽 소재 등 환경친화적인 콘크리트 제조에 적용하였을 뿐 미세먼지를 감소시키기 위한 필터개념의 건설소재 적용을 위한 시도는 국내외적으로 전혀 없음
 - 식생콘크리트의 경우 배수를 위한 연속공극을 형성하기 위해 골재입자의 크기를 한정시킨 굵은 골재를 시멘트 모르타르나 페이스트로 결합시킨 다공질 콘크리트 또는 포러스 콘크리트를 통해 제조함
 - 대개 포러스의 공극률은 5-35%를 형성하며 투수콘크리트, 흡음콘크리트, 식생콘크리트가 대표적인

표 1. 미세먼지 처리기법 원리

구분	처리기법	처리기법 특징	처리기법 개요
미세먼지 처리기법 원리	전기적 집진	- 정전기력을 이용하여 먼지 및 미스트(mist) 등의 입자들을 코로나 방전에 의해 하전(荷電)시킨 후 집진전극 표면으로 이동시켜 포집하는 원리 이용 - 작은 입자 제거에 효과적	
	여과 집진 (필터)	- 기상(氣相)이나 액상 중의 작은 고형물을 제거하기 위한 여과체로, 미세먼지 제어를 위해 사용하는 섬유필터는 연소가스로부터 입자상 오염물질을 분리하는 데 매우 효과적 - 타 집진방식에 비해 저렴	
	원심력 집진	- 먼지를 함유한 공기를 원통 내에서 회전시켜, 그 원심력으로 먼지를 외측으로 분리시켜 집진하는 원리 이용 - 미립자를 포집하기 위해서는 소형 사이클론을 필요한 수만큼 병렬로 설치 - 운전 시 압력손실이 높아 에너지 소비가 많고 마모성 분진에 취약	
	촉매반응	- 촉매는 반응속도 변화 및 반응 개시 등의 역할을 수행하며, 배기가스의 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 처리 시 산화환원 반응에 주로 활용 - 빛을 흡수해서 촉매반응을 일으켜 각종 세균과 오염물질을 분해시키는 반도체 물질로 광촉매가 활용	
	습식집진	- 물에 의해 분진을 세정·분리하는 방식으로 관련 장치로는 세정탑, 분무조, 스크레이퍼 등이 있으며, 친수성 분진 및 폼(fume) 외에 미스트나 가용성 가스, 증기 등을 제거 - 세정액의 처리 및 세정액에 의한 장치 부식의 우려	

※ 출처 : 경대승, 미세먼지 처리기법 원리 및 기술 개발 동향, 국토 제452호, 2019.6

표 2. 미세먼지 저감 기술 개발 동향

기술명	기술개발 특징	기술개발 개요	연구기관	비고
극미세 마이크로 탄소섬유를 이용한 습식 공기정화 기술	- 필터 없이 물과 정전기만으로 초미세먼지(PM_{2.5})를 제거할 수 있는 기술로 마이크로 탄소섬유 방전극을 이용해 미세먼지를 하전 시킨 뒤, 고강도의 전기장이 형성된 집진패널로 포집 - 하전된 미세먼지 입자는 물이 흘러 내리도록 설계하여 제거	 미세먼지 방전극, 하전된 미세먼지, 수직물 집진기	한국기계연구원 (2015)	미세먼지 집진
기능성 나노섬유 기반 초미세먼지 필터	- 미세먼지 해파필터는 미세먼지 포집 효율이 좋아 가장 널리 사용 - 하지만 압력손실이 많아 전력 소모량이 크고 소음과 진동이 발생 - 반응성 이온 에칭 공정 기술을 전기방사된 고분자 나노섬유 소재에 적용하여, 섬유의 두께를 현저히 줄였으며, 주입된 산소 가스를 통해 화학적 표면 처리를 하여 집진효율 극대화	 미세먼지 집진기, 나노섬유 필터, 반응성 이온 에칭 공정, 전기방사된 고분자 나노섬유 소재	생명과학연구원 (2018)	미세먼지 집진
고성능 저비용 조합형 집진시스템	- 이중벽 구조의 저압송 사이클론과 새로운 방식의 필터 재생시스템을 결합하여 초미세먼지를 90% 이상 제거할 수 있는 기술 - 1차 집진부인 저압송 사이클론에서 유입된 먼지가 70% 이상 제거된 후 나머지 먼지가 2차 집진부인 백필터 집진기로 유입되어 여과 필터의 부하량을 감소시키는 원리를 이용	 1차 집진부 (저압송 사이클론), 2차 집진부 (백필터), 300MHz Packed Filter System, 조합형 집진기 성능 평가	미래에너지플랜트융합연구단 (2018)	미세먼지 집진
버스정류장 공간분리형 미세먼지 저감 기술	- 버스정류장에 사물인터넷(IoT)을 기반으로 한 미세먼지 집진모듈을 적용하여 정류장 내부의 미세먼지 농도를 외부 농도 대비 50% 이상 저감하는 것을 목표로 연구 수행 중	 버스정류장, 미세먼지 집진모듈, IoT	한국철도기술연구원 (2018)	미세먼지 집진
저비용 고성능 광촉매를 활용한 미세먼지 저감 건설 기술	- 광촉매 재료 분말도 10μm 이하, 산화질소 제거율 50%를 만족하고, 기존 제품 대비 가격이 50% 저렴한 저비용 고성능 광촉매 생산 기술 개발 중 - 대기 중 미세먼지 전구물질(NOx, SOx) 100kg/km²을 제거할 수 있는 광촉매 기반의 도로 및 다중이용 시설물용 건설자재 및 적용 기술 개발 중	 광촉매 재료, 산화질소 제거율, 대기 중 미세먼지 전구물질, photocatalytic concrete	한국건설기술연구원 (2018)	초미세먼지 원인물질 제거
무필터 초미세먼지 정화장치	- 응축성장형 무필터 초미세먼지 정화장치는 물을 이용한 초미세먼지의 고속 응축 성장을 통해 조대화(粗大化)된 입자를 제거하는 원리를 이용 - 단열 팽창에 의한 냉각 효과를 얻기 위해 사용된 멀티 노즐이 팬 부하의 상승을 가져와 활용범위가 제한적	 물을 이용한 초미세먼지의 응축성장 + 조대입자의 관성충돌 제거, 응축성장형 무필터 초미세먼지 정화장치, 멀티 노즐, 팬 부하	초미세먼지 피해저감사업단 (2015)	미세먼지 집진

※ 출처 : 경대승, 미세먼지 처리기법 원리 및 기술 개발 동향, 국토 제452호, 2019.6

■ 국외 현황

- 미국과 일본을 중심으로 산업용 필터, 공기청정필터, 자동차용 필터여재 등 소재기술이 개발되고 있으나, 주로 공기 청정기, 차량용, 산업용으로 대기 환경에서의 미세먼지 저감 기술은 현재 개발 중에 있음
- 대기오염 저감장치 분야에서 최근 유럽, 중국에서는 직접 대기 중의 공기를 흡입하여 정화하는 스모그 프리 타워 프로젝트가 추진되고 있음
 - 네덜란드의 ‘스모그 프리타워(공기정화탑)’ 아이디어는 2015년에 발표됐고 2016년 9월 중국 베이징에 설치된 타워의 높이는 약 7m로 공기정화기로 매 시간 3,000m³ 정화하면서 유해독성 입자를 75% 이상 저감이 가능하다고 발표
 - 중국과학원 지구환경연구소(Institute of Earth Environment, China Academy of Science)가 중국 서부 산시성 수도 시안시에 ‘추마이타’ (일명 스모그 제거탑)를 건설하였고 최근 시험 가동을 실시함
 - 스모그 제거탑의 높이는 약 100m로 주변의 오염된 공기가 타워 주변의 유리 온실 안으로 빨려 들어가게 되며 온실 주변의 태양광 패널로 오염된 공기를 가열하여 뜨거운 공기가 탑을 통해 상승하면서 필터를 통과해 정화되는 구조
 - 타워의 주변 12곳의 공기 질 측정소에서 효과를 살핀 결과 10km² 지역에 매일 1,000만m³의 깨끗한 공기가 생산되었으며, 특히 대기 오염이 심각한 날 초미세먼지(PM_{2.5}) 평균 농도가 15% 감소함
- 국외도 마찬가지로 미세먼지 집집 후 정화된 공기를 배출하는 과정에서 초미세먼지 원인 물질 인 NOx를 제거하기 위한 광촉매 활용 콘크리트 필터 관련 시도는 현재 없음



그림 5. 네덜란드의 ‘Smog Free Tower’



그림 6. 중국 시안시의 초대형 공기정화용 타워

라. 국내의 특허 동향 분석

■ 국가 연도별 출원 동향 및 기술성장 단계

- 국가별 특허출원 동향에서 일본 특허(JP0)의 경우, 1990년대 중반에 타국들에 비하여 가장 먼저 광촉매 관련 특허출원이 급격히 증가하는 경향을 띄기 시작하였음(그림 7 참조)
- 이후 2000년대 중반까지 10여년간 광촉매 제조 및 활용 기술에 대한 다양한 연구개발이 활발하게 진행되어 왔던 것으로 사료되나, 2000년대 중반 이후에는 특허출원이 감소세에 들어선 것으로 파악됨
- 일본이 광촉매 활용기술 분야의 기술개발을 주도하여 왔기에 일본의 특허출원이 전체 대비 상당한 점유율을 차지하고 있어, 전체 연도별 특허동향은 이러한 일본의 연도별 특허동향과 거의 유사한 추세를 보임
- 이러한 최근의 특허출원 감소 추세는, 광촉매가 적용되는 애플리케이션에 대한 연구개발이 10년 이상에 걸쳐 다양하게 진행되어 왔기에 성숙기에 접어들어선 것으로 분석됨
- 전체 출원 중 과거 1989년부터 최근 2013년까지의 출원을 1구간(1989년~1993년), 2구간(1994년~1998년), 3구간(1999년~2003년), 4구간(2004년~2008년), 5구간(2009년~2013년)으로 나누고 각 구간별로 특허 출원인수에 대한 출원건수의 관계를 표시하고 시계열적으로 연결하여 국가별 기술 성장단계를 살펴보면, 해당 분야의 현재 기술 위치를 파악하여 볼 수 있음(그림 8 참조)

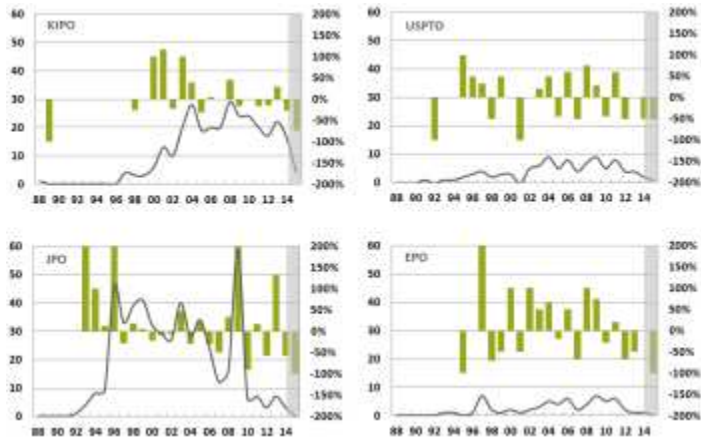


그림 7. 각 국가 연도별 출원 동향 (출원인 개인, 법인 모두 포함시)

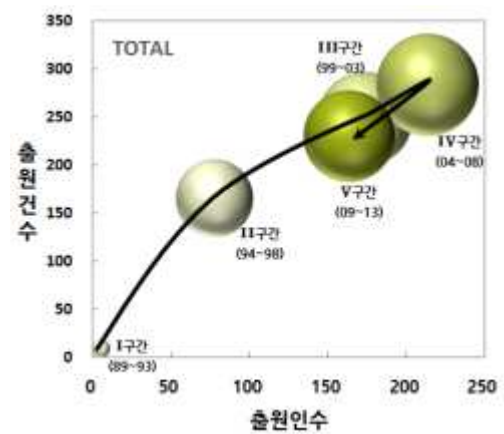


그림 8. 통합 기술 성장단계 (전체)

- 위 그래프(그림 9)에서는 1구간에서 3구간(1989년~2003년)은 기술개발이 급격하게 성장한 성장 단계를 나타내며, 3구간(1999년~2003년)에서 4구간(2004년~2008년)도 출원건수와 출원인수가 계속 증가하는 성장기이나, 그 성장 속도가 점차 느려지면서 성숙기에 접어들기 시작하는 구간이고, 4구간(2004년~2008년)에서 5구간(2009년~2013년)은 성숙기 이후 연구개발이 다소 정체되기 시작한 쇠퇴기에 들어선 것으로 파악됨
- 주요 국가별로 기술성장 단계를 나타낸 경우(그림 10), 일본(JPO)의 기술위치는 1구간(1989년~1993년)부터 3구간(1999년~2003년)까지 출원 건수와 출원인의 수가 모두 매우 빠른 속도로 증가하는 급격한 성장기의 단계에 있었지만, 4구간(2004년~2008년)부터 성숙기 및 쇠퇴기에 들어선 것으로 보이며, 최근의 5구간(2009년~2013년)에서도 회복기에 진입한 모습이 보여주지 못하고 있는 것으로 파악됨
- 미국(USPTO)과 유럽(EPO)의 기술위치는 1구간(1989년~1993년)부터 4구간(2004년~2008년)까지의 성장기를 지나 5구간(2009년~2013년)에서는 성숙기 내지 쇠퇴기에 접어든 것으로 파악됨
- 한국(KIPO)의 기술위치는 2구간(1994년~1998년)부터 4구간(2004년~2008년)까지의 급격한 성장기를 지나 5구간(2009년~2013년)에서는 성숙기에 접어든 것으로 파악됨

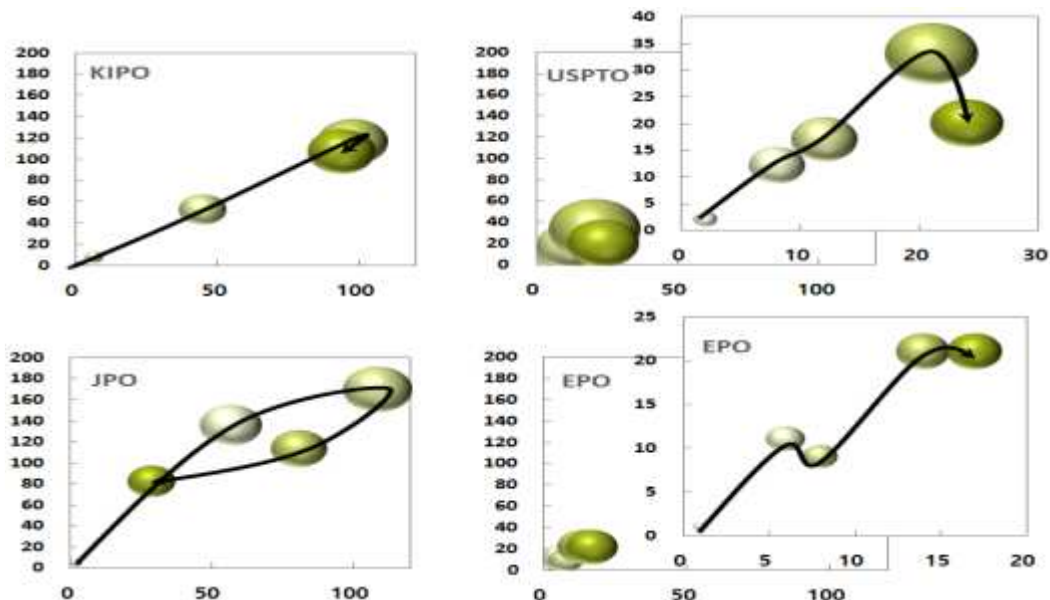


그림 9. 국가별 기술 성장단계

■ 주요 업체별 특허 분석

○ TOTO LTD(일본)

- 전 세계에서 특허 출원이 가장 많은 업체로, 1996년에 광촉매 적용제품에 대한 본격적인 상용화를 시작하면서, 도로 표지 반사판, 투수성 포장재, 도로거울, 건물외벽용 건재 등 다양한 제품군들에 대하여 기술아이디어 내지 유사한 다수의 특허출원을 일거에 진행하였고 이후 2000년대 초반까지 특허등록 및 관련제품 다수 확보함

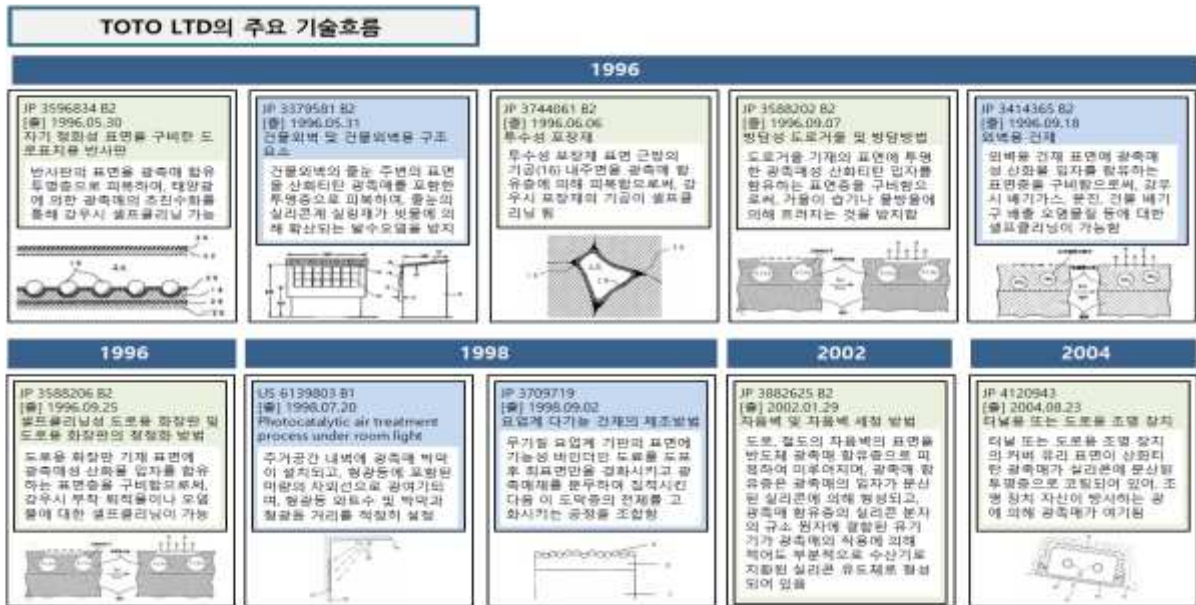


그림 10. TOTO LTD의 IP History

○ ITALCEMENTI S.p.A.(유럽)

- 1990년대 중후반부터 포장 부문, 건축용 콘크리트 부문, 프리캐스트 시멘트 제품 부문, 시멘트 재료(바인더) 부문 등 광촉매를 포함하는 시멘트/콘크리트 재료적인 측면의 광촉매 관련 기술개발 및 특허출원을 지속적으로 진행



그림 11. ITALCEMENTI S.p.A의 IP History

■ 분석결과

- 일본과 유럽의 주요출원인들은 광촉매를 활용한 애플리케이션 제품에 대한 특허출원을 도로시설물 적용 분야 및 생활환경시설물 적용 분야 전반에 걸쳐 이미 다수 진행하여 온 것으로 파악되고 국내에서도 이 추세를 따라가고 있음
- 대기환경 문제가 대두되면서 도심지를 중심으로 한 토목건축 시설물과 관련한 광촉매 애플리케이션 시장 영역이 확대할 것으로 판단되며 광촉매를 활용한 도로시설물 및 생활환경시설물 제품 분야가 회복기 및 재생장기로 발돋움할 수 있다고 판단됨
- 차량이동이 많은 도심지 터널 공간 및 외부 대기의 미세먼지 저감을 통한 공기질 개선을 위해 오염 원인물질 NOx, SOx를 분해하는 광촉매 건설재료의 적용기술 개발이 시급함

바. 시장 및 산업 현황

■ 국내 현황

- 대기산업에서는 실외 대기오염, 미세먼지, 악취 등을 관리하기 위해 배연탈황시설, 집진시설, 방지시설 등을 개발, 활용하고 있음
- '12년 기준 국내 환경부문 매출액은 82조 2,185억원으로 추정되며, 그 중 기후대기 관리분야 매출액은 4조 5,232억원 규모로 전체 환경시장의 약 5.5%를 차지하고 있음
 - 기후·대기 관리 분야는 크게 대기오염통제 기기 제조업, 대기오염통제 관련 서비스업, 분석·자료수집 및 평가관련 서비스업으로 구분된다. 그 중 대기오염 통제기기 제조업의 매출 규모가 가장 크며, '12년에는 4조 3,720억원 규모로 기후·대기 관리분야 전체의 약 97%를 차지하고 있음
- 국내 대기산업체는 9%의 중견·대기업이 78%의 매출 점유를 하고 있는 실정인데 중소기업의 비중이 91%에 달하며, 업체당 평균 매출액에 30억원에 불과하여 전반적으로 영세한 수준임
- 국내 대기시장 규모는 지속적으로 성장하여 '20년에는 3조 7000억원에 이를 것으로 전망하고 있음(한국환경산업기술원, 국내외 대기산업 현황과 전망, 2014)

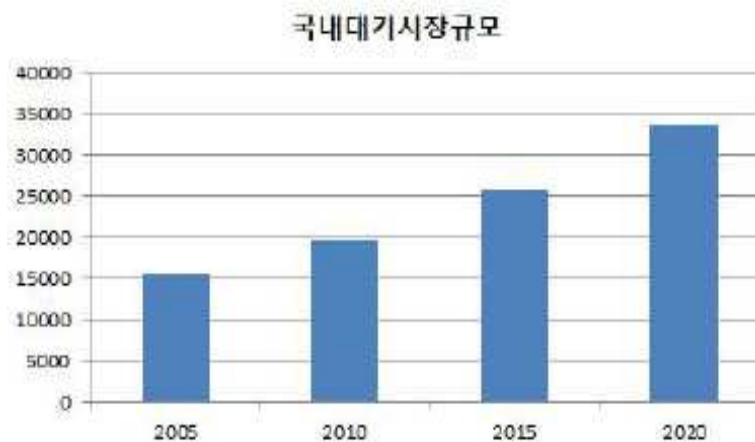


그림 12. 국내 대기시장 전망(억원)
(환경부, 환경기술 기술동향 보고서, 2011)

- 광촉매 시장 구조는 TiO_2 분체 등의 1차 원료시장, 코팅제 등의 2차 원료시장, 그리고 1·2차 원료를 이용한 제품 시장으로 구성되며, 광촉매 원료를 이용한 광촉매의 응용 범위가 매우 광범위함
 - 광촉매 원료는 내외장재, 도로자재, 정화기기용 산업에서 응용 사용되어 관련 시장규모가 증가할 것으로 예상됨
 - 광촉매 소재시장은 응용제품 시장보다 상대적으로 규모가 작으나, 실내외 코팅 시장에 적용되는 광촉매 코팅용액의 경우 광촉매 소재 시장보다 시장규모가 확대될 것으로 예측됨
 - 광촉매 적용가능 산업분야는 크게 원료분야, 대기환경, 건축자재, 수질정화, 일반소비재, 기타 등이며 시장규모가 2007년 664억원으로 추정되고 연평균 약 12%로 성장 중에 있음(KISTI 산업정보분석실 보고서, 2007)

■ 국외 현황

- 세계 환경산업 규모는 '13년 기준 9,240억 달러에 이르며, 그 중 대기분야는 528억 달러로 전체의 5.7%를 차지함
 - 환경분야 장치분야는 다른 산업에 비해 성장 증가폭이 크며, '04부터 '14년까지 연평균 16.6%의 성장률을 보임
- 대기환경산업은 규제를 통해 시장이 성장하는 산업으로 경제성장을 요구하는 개발도상국의 관련시설 건설과 깨끗한 공기 속에서 살기 원하는 세계적인 규제움직임 속에서 지속 성장할 것임
 - 최근 중국은 질소산화물을 총량제어 지표에 공식적으로 포함시켜 '15년까지 질소산화물 배출량을 '10년보다 10% 감소시키겠다는 계획을 발표



그림 13. 이탈시멘티 광촉매 프리캐스트 패널 공법
(좌: 로마 다비스 성당, 우: 프랑스 국립드라마 극장,
<http://www.italcementigroup.com>)

사. 기존연구와의 차별성

- 미세먼지를 제거하기 위하여 적용되는 기존 실외 공기정화 시스템은 주로 입자형태의 물질만을 제거하지만 이 연구는 가스형태의 물질을 제거하는 기능을 가지고 있음
- 최근 개발되고 있는 광촉매를 활용한 필터의 경우, 광촉매가 코팅된 세라믹 또는 섬유계열의 필터로 자외선과 광촉매 반응을 통한 탈취와 같은 유기물 분해 효과에 한정됨
- 기술적으로 가스형태의 NO_x 를 제거하기 위해서는 광촉매가 Ca 성분을 갖는 바인더와 결합된 형태로 광원(자외선)에 노출되어 이온결합하여 표면에 흡착된 후 물로 세척하여 제거할 수 있음
- 따라서 기포제를 이용하여 연속공극을 형성시킨 경량기포 콘크리트에 TiO_2 -매개담체를 사용하여 NO_x 를 제거하는 콘크리트 건설자재를 필터로 적용하는 기술은 국내외적으로 없는 새로운 기술로 이 연구에서 처음 시도되는 것임
- 광촉매 분말은 나노입자의 재응집 현상으로 분산성 감소가 단점으로 지적되었는데 이 연구에서 TiO_2 -매개담체를 기술을 통한 광촉매의 분산성 문제를 해결함
- 기존연구에서 가스상태 물질을 제거하기 위하여 내부구조가 매우 촘촘한 직물형태의 흡착 필터를 활용할 경우 유지관리의 어려움이 있어 외부 환경에 적용하기 어려운 한계가 있으나 이 연구에서 모듈내부에 세척시스템을 갖춰 가스형태의 물질을 제거하기 때문에 외부환경에서도 필터의 유지관리의 용이성을 극복한 기술임

표 3. 관련(유사)과제와의 차별성 분석

구분	관련(유사)과제 (수행기간)	연구내용	신청과제의 차별성	지원 부처
1	고성능 나노 TiO ₂ 담체 및 도로환경 정화용 토목재료의 적용시스템 개발 (2015. 11. 01 ~ 2018. 10. 31)	기존 시멘트 재료가 아닌 친환경 지오폐리머 사용고온 코팅 방법으로 자재표면에 TiO₂를 코팅하여 안정성을 확보하면서 역학적 성능 향상 및 코팅 손상 최소화	- 본 과제는 시멘트를 사용한 경량기포 콘크리트를 연속공극으로 만들어 필터로 사용함에 차별성 있음 - TiO₂-매개담체의 개념은 sol-gel법은 유사하나 합성시에 담체를 용액안에 포함시켜 TiO₂ 단독의 분말이 아닌 TiO₂-매개담체 gel형태로 소재를 만들어 콘크리트에 사용함에 고도화 및 차별성 있음	교육부
2	도로터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리장치 사업화 (2015. 4. 27 ~ 2017. 4. 26)	- 터널내 미세먼지 및 유해가스(벤젠)를 동시에 처리할 수 있는 시스템 및 장치 개발 - 유해가스 흡착제로 제올라이트 사용	본 과제는 TiO₂-매개담체를 활용한 다공성 콘크리트 필터 및 모듈을 개발하여 NOx를 제거하기 위한 연구임에 차별성 있음	국토 교통부
3	고분자 탄화장치로부터 발생되는 고유황 배가스 내 미세먼지 및 유해성분 저감을 위한 고효율 후처리 시스템 개발 (2016. 09. 01 ~ 2017. 07. 31)	탄화장치내 고온의 배기가스 내 유해성분 제거를 위한 촉매 및 흡착재 개발 기술임	본 과제는 TiO₂-매개담체를 활용한 다공성 콘크리트 필터 및 모듈을 개발하여 터널 및 도심 hot-spot 지역내 공기정화장치 후처리 필터로 NOx를 제거하기 위한 연구임에 차별성 있음	중소 기업청
4	저비용 고성능 광촉매를 활용한 미세먼지 저감 건설기술 개발 (2018. 6. 1 ~ 2023. 2. 28)	- 슬러지에서 제조하여 기존 상용 광촉매 가격대비 50% 및 동등성능을 갖는 저비용 광촉매 개발 및 생산 - 저비용 광촉매 적용 도로시설물 및 다중이용시설 건설자재 개발 - 광촉매 재료 및 광촉매 적용자재 성능평가 표준화 및 인증시스템 - 슬러지에서 제조한 TiO₂ 분말을 가공처리한 광촉매 필터로 탈취 등 VOCc 저감에 효과가 있음 - NOx를 저감할 수 있는 도로 및 다중이용 시설 건설자재를 개발하기 위해 광촉매 분말을 콘크리트에 혼입한 하거나 코팅액을 건설자재에 도포함	- 관련 과제는 TiO₂ 분말을 가공처리하여 제작된 광촉매 만으로 필터를 만들어 VOCc 저감 효과에 한정되나 본 과제는 다공성 콘크리트 필터를 통한 NOx 흡착/제거됨에 차별화 - 본 과제는 광촉매를 TiO₂-매개담체로 개발 하여 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 필터 및 모듈을 기반으로 NOx 제거용 정화장치내 후처리 필터 및 모듈 적용 개발하는 목적에 차별성 있음 - 본 과제는 광촉매 분말이 나노입자의 재응집이 되는 단점을 극복하기 위해 TiO₂-매개담체를 활용하여 광촉매 분산력을 향상시키는 것에 고도화와 차별성 있음	국토 교통부

2) 연구개발과제의 최종 목표

가. 연구 개발의 최종 목표 및 최종성과물

구 분	내용 및 설정근거
최종 목표	미세먼지 저감을 위한 NOx 저감용 다공성 콘크리트 필터 및 이를 활용한 모듈 시작품 개발
세부 목표	- 다공성 콘크리트 필터내 광촉매의 분산성 향상을 위한 TiO_2-매개담체 기술 개발 - 연속공극을 갖는 NOx 저감 다공성 콘크리트 필터 제조 기술 개발 - NOx의 지속적인 제거성능 유지를 위한 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 제조 기술 개발

○ [최종성과물] de NOx 저감 다공성 광활성 콘크리트 필터 모듈 시작품

- TiO_2 -매개담체 적용 de NOx 다공성 콘크리트의 NO 제거량 $5 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$ (ISO 22197-1)
- de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품의 NOx 30% 저감



그림 14. 연구 최종 목표 및 핵심기술 내용

나. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

구 분		연구착수	연구종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☒	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

최종성과물	기술성숙도 (TRL)		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
de NOx 저감 다공성 광활성 콘크리트 필터 모듈 시작품	TRL 2	TRL 6	(연구시작시) 콘크리트를 이용한 NOx 저감용 콘크리트 기술은 없음. NOx 저감을 위해 광분해 반응을 활용하기 위한 광촉매 소재를 적용해보는 <u>기술적 개념정립 단계</u>임 (연구종료시) TiO₂-매개담체 광촉매 기술과 연속공극을 갖는 경량 기포콘크리트 기술을 접목하여 다공성 광활성 콘크리트 필터 제조기술을 확립하고 NOx 제거를 위한 광활성 시스템이 적용된 <u>필터 모듈 시작품 제작하여 유사환경 검증실험을 실시함</u>

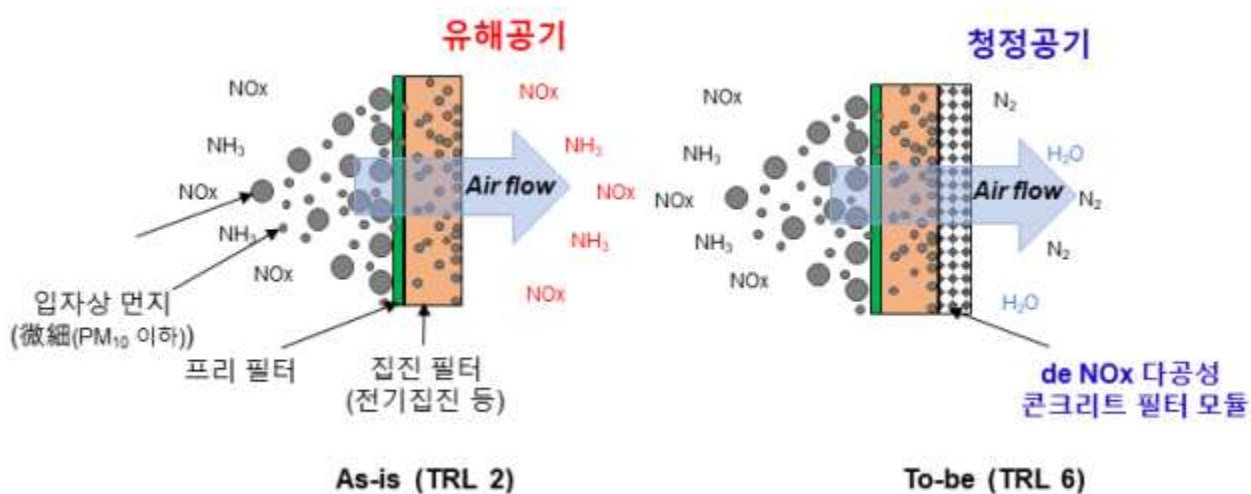


그림 15. 최종성과물의 기술적 성숙도

3) 연구개발과제의 연차별 목표

가. 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(KICT): TiO_2 -매개담체 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 제조 기술 개발
 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 제조 기술 개발 및 물성 평가
 - TiO_2 -매개담체 활용에 따른 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성 향상 방안 개발

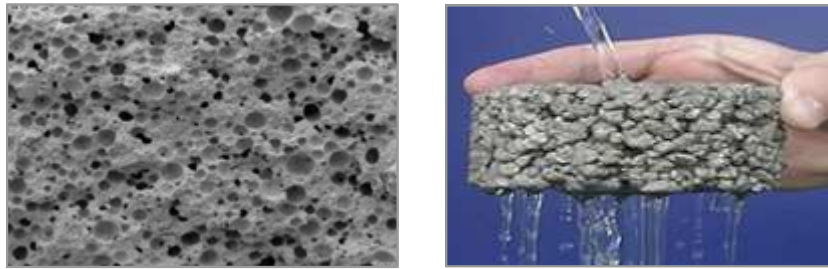


그림 16. 다공성 콘크리트의 연속공극 형성 예

- 공동연구기관((주)벤텍프론티어): de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈의 NO_x 저감 평가 방안 정립
- 위탁기관(충남대학교): 매개담체를 이용한 TiO_2 복합소재 제조 기술 개발
 - sol-gel 기반 고분산 TiO_2 -매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 제조 기술 개발

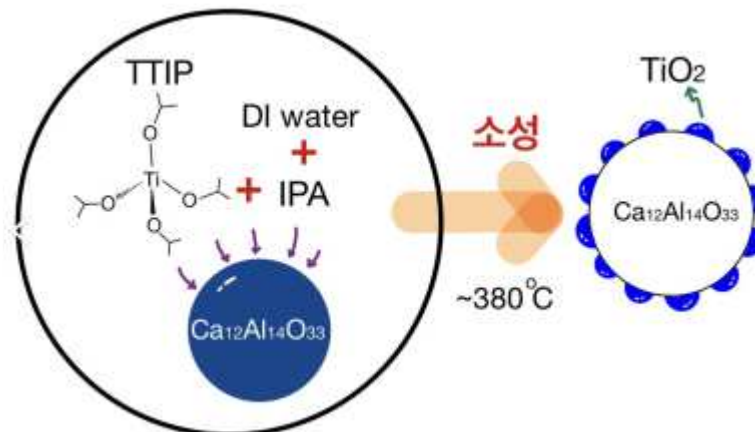


그림 17. sol-gel 기반 고분산 TiO_2 -매개담체 제조 방법 개요도

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(KICT): TiO_2 -매개담체 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 제조 기술 개발
 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 제조 기술 개발
 - 다공성 콘크리트 필터 기본재료 구성
 - 기포제에 따른 연속공극 조성 및 기본물성 평가

- TiO_2 -매개담체 활용에 따른 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성 향상 방안 개발
 - TiO_2 -매개담체 사용에 따른 다공성 콘크리트내 미세구조 분석
 - TiO_2 -매개담체 사용에 따른 광활성화 평가를 통한 분산성 검토 및 보완점 도출
- 공동연구기관((주)벤티프론티어): de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 기본 설계 및 구성요소 개발
 - 광활성 필터 모듈 기본 설계
 - 광활성 향상을 위한 UV 광원 및 모듈내 필터 세척 방안 선정

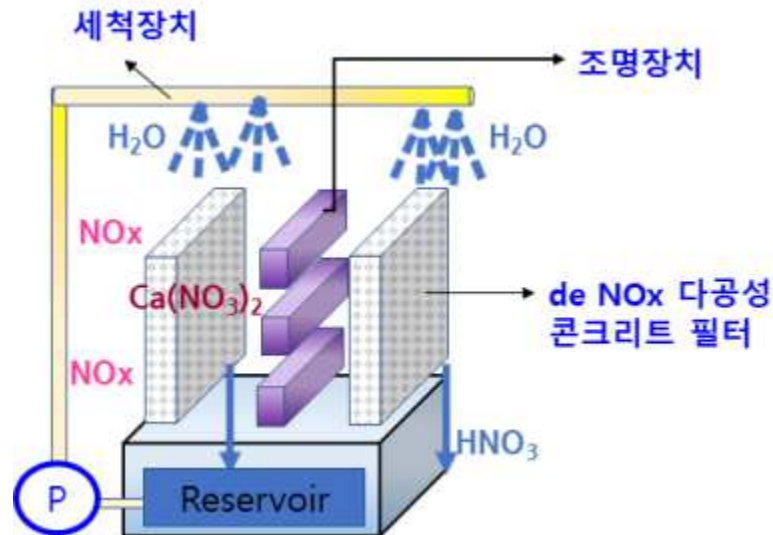


그림 18. de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 구현 예시

- de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈의 NO_x 저감 평가 방안 정립
 - 광활성 필터 모듈의 NO_x 저감 평가방법 확립
- 위탁기관(충남대학교): 매개담체를 이용한 TiO_2 복합소재 제조 기술 개발
 - sol-gel 기반 고분산 TiO_2 -매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 제조 기술 개발
 - 매개담체상에서 sol-gel법으로 TiO_2 나노입자를 합성과 동시에 분산하는 광촉매 복합소재 합성
 - 마이크로파 조사 함침기술을 이용한 TiO_2 -Mayenite 광촉매 복합소재 합성
 - TiO_2 -Mayenite 광촉매 복합소재 물성평가

나. 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(KICT): TiO_2 -매개담체 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 필터 제조 기술 개발
 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 최적 배합 개발
 - TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 제조 및 성능평가
- 공동연구기관((주)벤티프론티어): de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 개발 및 시험 평가
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 개발
 - de NO_x 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품의 유사환경 NO_x 저감 시험평가

- 위탁기관(충남대학교): 매개담체를 이용한 TiO_2 복합소재 제조 기술 개발
 - sol-gel 기반 고분산 TiO_2 -매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 제조 기술 개발

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(KICT): TiO_2 -매개담체 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 제조 기술 개발
 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 최적 배합 개발
 - 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 최적배합 개발 및 물성 평가
 - TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 시제품 개발 및 성능평가
 - TiO_2 -매개담체 활용에 따른 다공성 콘크리트내 광촉매 분산성 향상 최적 제조 방안 정립
 - TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 최적단면 설정
 - TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 시제품 제작
 - TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 세척 전후에 따른 NO 제거 성능 평가

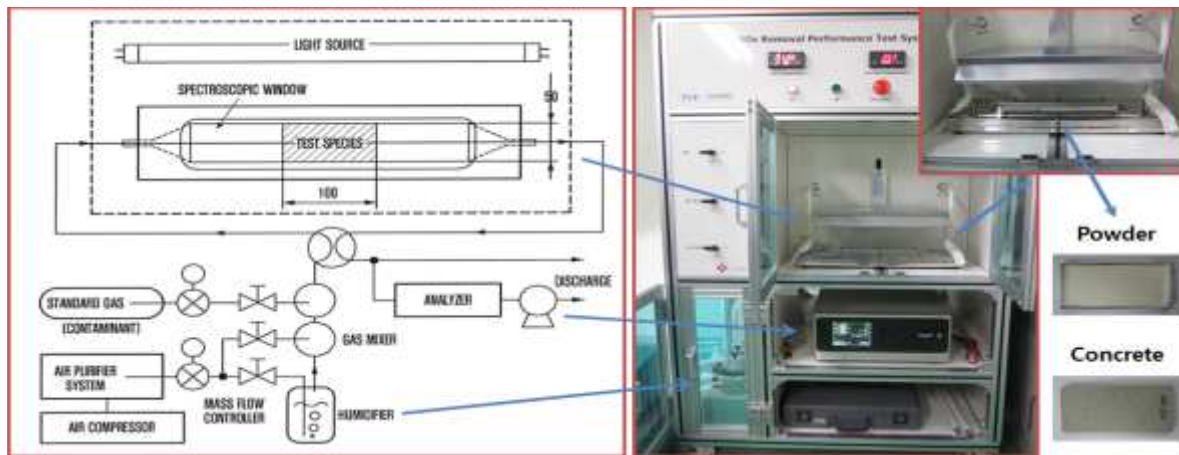


그림 19. 질소산화물 제거 성능평가 시험

- 공동연구기관((주)벤텍프론티어): de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시제품 개발 및 시험 평가
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시제품 개발
 - 광활성 필터 모듈내 UV 광원 및 모듈내 필터 세척시스템 구축 및 시제품 개발
 - de NO_x 다공성 콘크리트 필터 모듈 시제품의 유사환경 NO_x 저감 시험평가
 - 유사환경 모사 필터 모듈의 NO_x 저감 성능평가 및 결과분석
 - de NO_x 다공성 콘크리트 필터 모듈 시제품 개선사항 도출 및 보완



그림 20. de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품의 NOx 저감 평가 예

- 위탁기관(충남대학교): 매개담체를 이용한 TiO_2 복합소재 제조 기술 최적화
 - sol-gel 기반 고분산 TiO_2 - 매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 최적 제법 정립
 - TiO_2 -Mayenite 광촉매 복합소재 최적 제법 확립 및 시작품 제작
 - 최적비율 TiO_2 -Mayenite-콘크리트 결합 및 물성 평가
 - TiO_2 -Mayenite 양산 방안 제시

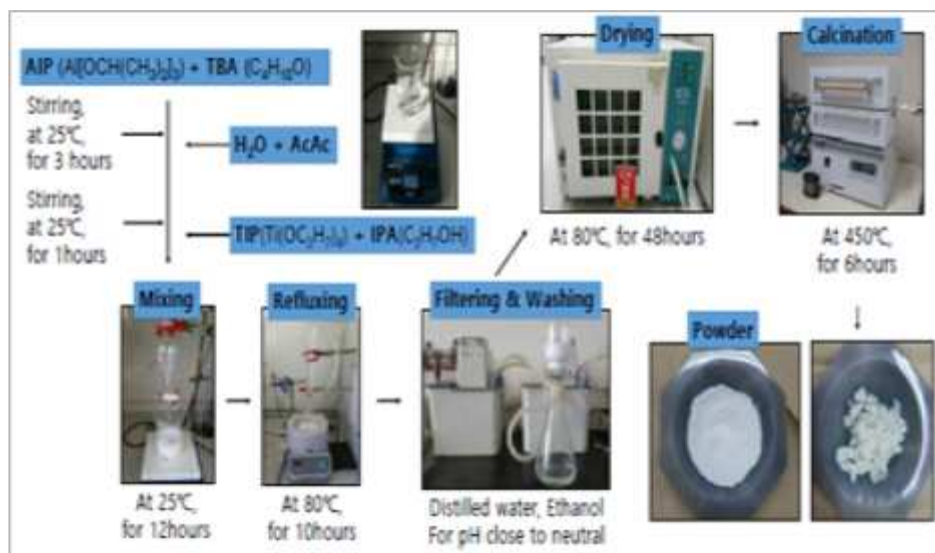


그림 21. 매개담체를 이용한 TiO_2 복합소재 제조 기술 최적화 예시

○ 정량적 연구성과 목표

구분		1차년도	2차년도	계
		목표	목표	목표
국외논문 게재	SCI	-	1	1
	비SCI	-	-	-
	계	-	1	1
국내논문 게재	SCI	-	-	-
	비SCI	1	1	2
	계	1	1	2
특허출원	국내	1	1	2
	국외	-	-	-
	계	1	1	2
특허등록	국내	-	1	1
	국외	-	-	-
	계	-	1	1
인력양성	석사	1	1	2
	박사	-	-	-
	계	1	1	2
기술이전	계약건수	-	1 (과제종료후 6개월 이내)	1 (과제종료후 6개월 이내)
	계약액	-	-	-
	징수액	-	-	-
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	-	-	-
	연구시설·장비	-	-	-
	기술요약정보	-	-	-
	생명 자원	생명정보	-	-
		생물자원	-	-
		신품종	-	-
	소프트웨어	-	-	-
기타	시작품	-	3	3
	성과 홍보	-	-	-
	일자리 창출	-	-	-
	국내외학술발표	-	-	-
합계		3	9	12

○ 질적 성과 지표

구분	성과목표	세계 최고 수준	연구전 국내 수준	목표치	가중치 (%)	평가기준	달성치
최종목표 (2021년)	TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 NO 제거량	-	-	5 μmol/50cm ² ·5hr	50	ISO 22197-1	5.28 μmol/50 cm ² ·5hr
	de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 NOx 제거율	-	-	30% 제거	40	질소산화물 챔버 테스트(1ppm)	36%
	de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 내구성	-	-	90% 이상 (초기 성능 대비)	10	질소산화물 챔버 테스트 반복 (1ppm, 10회후 재시험 조건)	93.4%
1차년도 (2020년)	TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 NO 제거량	-	-	3 μmol/50cm ² ·5hr	100	ISO 22197-1	6.07 μmol/50 cm ² ·5hr
2차년도 (2021년)	다공성 콘크리트 필터 NO 제거량	-	-	5 μmol/50cm ² ·5hr	50	ISO 22197-1	5.28 μmol/50 cm ² ·5hr
	다공성 콘크리트 필터 필터 모듈 NOx 제거율	-	-	30% 제거	40	ISO 22197-1 준용, 챔버식	36%
	다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 내구성	-	-	90% 이상 (초기 성능 대비)	10	질소산화물 챔버 테스트 반복 (1ppm, 10회후 재시험 조건)	93.4%

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2-1 TiO₂-매개담체 활용 de Nox 다공성 콘크리트 필터 개발

가. 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 제조 기술 개발 및 물성 평가

- ① 기포제 종류 및 주입량에 따른 최적 기포발생 조건 도출
- 선기포 제작방식을 위한 기포발생 장비 시작품 제작
 - 기포 발생을 위해 기포발생 장비 시작품을 제작하여 사용하였음



그림 22. 기포 발생장치 (KICT 시작품)

- 기포제 발생장치 내부에서 물, 기포제, 공기의 적절한 혼합을 통해 기포를 생성하는 원리임



그림 23. 기포 발생 원리

- 최적 기포발생을 위한 기포제 선정 및 희석비율 도출 실험
 - 기포제 종류(합성 A, 합성 B, 합성 C)와 기포제 주입률(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)에 따른 최적의 기포 발생 조건을 도출 실험 진행

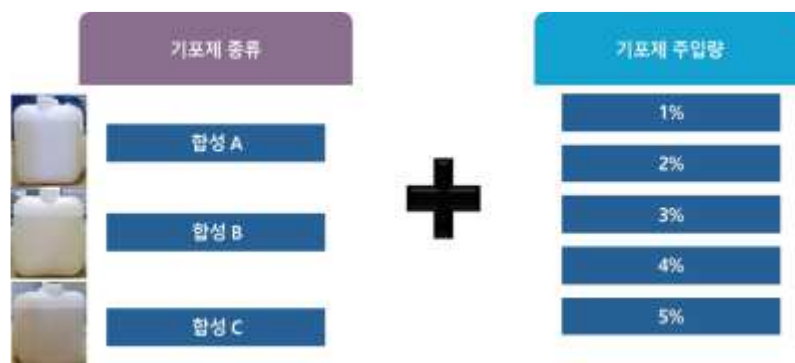


그림 24. 기포제 종류 및 주입량에 따른 변수 설정

- 실험조건은 기포제 종류(합성 A, B, C) 3가지와 기포제 주입량 (1 ~ 5%)로 설정하여 15회의 실험 설계를 실시하였음



그림 25. 실험조건에 따른 실험 설계

- 최적의 기포제 발생조건 도출 실험은 각 실험조건에 따른 기포를 생성하고 1,000mL 비커에 동일한 부피만큼 기포를 주입하고 시간 흐름에 따른 기포 부피 변화 및 무게를 시간별로 측정하여 비교분석 하였음(모든 실험은 3회 반복 실시하여 발생 가능한 오차를 최소화 하였음)



그림 26. 기포 발생 조건 도출 실험

- 기포제 종류와 희석비율에 따라 비이커에 생성된 기포를 주입하고 5시간 경과 후 기포의 부피와 무게변화 실험결과를 아래 표와 그래프에 나타내었음. 그림 아래 각 수치는 기포 생성직후부터 5시간 경과 후 변화된 기포의 높이변화와 무게변화의 값을 정리한 것임

표 4. 기포의 부피 및 무게변화 실험결과

구분	합성 A	합성 B	합성 C
5%			
	생성 직후 5시간 후	생성 직후 5시간 후	생성 직후 5시간 후
	6.5 cm 감소 0.7 g 감소	5.9 cm 감소 0.75 g 감소	1.3 cm 감소 0.87 g 감소
4%			
	생성 직후 5시간 후	생성 직후 5시간 후	생성 직후 5시간 후
	7.7 cm 감소 0.63 g 감소	5.6 cm 감소 0.63 g 감소	0.8 cm 감소 0.72 g 감소

구분	합성 A	합성 B	합성 C
3%	 생성 직후 5시간 후	 생성 직후 5시간 후	 생성 직후 5시간 후
	8.0 cm 감소 0.91 g 감소	5.9 cm 감소 0.9 g 감소	1.4 cm 감소 0.89 g 감소
2%	 생성 직후 5시간 후	 생성 직후 5시간 후	 생성 직후 5시간 후
	8.1 cm 감소 0.85 g 감소	6.0 cm 감소 1.01 g 감소	1.6 cm 감소 1.14 g 감소
1%	 생성 직후 5시간 후	 생성 직후 5시간 후	 생성 직후 5시간 후
	7.7 cm 감소 0.99 g 감소	6.9 cm 감소 1.22 g 감소	1.6 cm 감소 0.92 g 감소

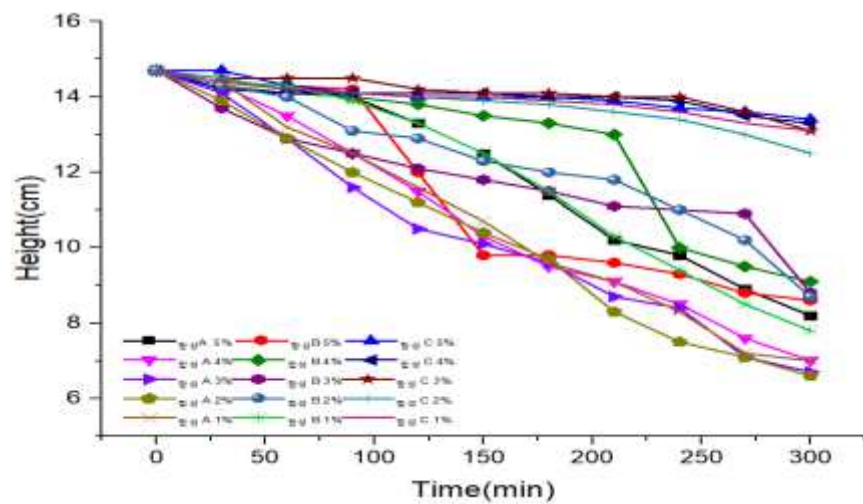


그림 27. 조건에 따른 시간별 높이 변화 그래프

- 전체적으로 혼합 A의 경우 기포의 높이가 많이 감소하였고, 혼합 C가 가장 적게 감소된 것으로 관찰되었음
- 그러나 혼합 C의 경우 표면 관찰 시 기포의 밀도가 조밀하지 못해 큰 기포들이 형성되어 높이는 크게 유지하고 있지만, 속이 비어 품질이 좋지 않은 기포로 판단됨
- 혼합 B가 기포의 형태를 적당히 유지하고 기포의 조밀도가 높아 좋은 기포로 판단 됨
- 혼합 C를 제외하고 나머지 기포들을 살펴보게 되면 초록색(합성 B 4%)가 가장 높이를 유지하고 있는 것으로 도출됨

표 5. 실험 전 · 후의 실험 조건 별 높이 변화

단위 : cm

구분	혼합 A			혼합 B			혼합 C		
	실험 전 높이	실험 후 높이	감소 높이	실험 전 높이	실험 후 높이	감소 높이	실험 전 높이	실험 후 높이	감소 높이
5%	14.7	8.2	6.5	14.7	8.6	6.1	14.7	13.4	0.8
4%	14.7	7	7.7	14.7	9.1	5.6	14.7	13.3	0.8
3%	14.7	6.7	8	14.7	8.8	5.9	14.7	13.1	1.4
2%	14.7	6.6	8.1	14.7	8.7	6	14.7	12.5	1.6
1%	14.7	7	7.7	14.7	7.8	6.9	14.7	13.1	1.6

- 실험 전 · 후의 높이 감소 변화를 살펴보게 되면 기포제의 모든 종류가 주입률이 4%에서 가장 적게 감소됨
- 주입률 5%의 경우 기포제가 4%에 대비하여 많이 들어가 그만큼 물이 적게 들어가 4%에 비해 좋은 기포가 형성되지 못한 것으로 판단됨
- 3% 이하의 경우 기포제가 적게 들어가 물이 많이 들어가 좋지 못한 품질의 기포가 형성되어 기포의 높이가 많이 감소된 것으로 보이며 이에 가장 최적의 조건은 4%로 판단 됨
- 혼합 C는 감소 높이는 크지 않은 것으로 보이지만 기포의 조밀도가 높지 않아 크기가 큰 기포들이 형성되어 있어 속이 비어있는 기포들로 품질이 좋지 않은 기포로 보이며 높이 변화에 따른 최적의 기포제는 혼합 B의 4%가 가장 좋은 것으로 판단됨

표 6. 실험 전 · 후의 실험 조건 별 무게 변화

단위 : g

구분	혼합 A			혼합 B			혼합 C		
	실험 전 무게	실험 후 무게	감소 무게	실험 전 무게	실험 후 무게	감소 무게	실험 전 무게	실험 후 무게	감소 무게
5%	43.42	40.44	2.98	47.15	46.06	1.09	35.41	34.87	0.57
4%	49.81	49.16	0.65	51.27	50.64	0.63	48.44	47.72	0.72
3%	44.14	43.23	0.91	46.53	46.63	0.9	46.13	44.24	0.89
2%	65.35	64.5	0.85	75.07	74.06	1.01	77.5	76.36	1.14
1%	94.11	93.12	0.99	101.92	100.7	1.22	113.97	113.05	0.92

- 무게로 살펴보게 되면 기포제 주입률이 5% 보다는 4%에서 무게가 높아진 것으로 보아 적절한 기포가 형성되었으므로 판단되며 4%와 3%를 비교하면 무게가 감소함에 따라 기포를 형성에 비해 소포에 의해 무게가 감소한 것으로 판단됨
- 2%와 1%는 기포를 형성하기 위해 물이 많이 주입되어 무게가 많이 형성된 것으로 보이며, 높이 감소가 더 많이 이루어졌기 때문에 좋은 기포로 보기에는 어려움
- 기포제 종류에 따른 무게를 살펴보게 되면 혼합 A와 C 보다는 B의 무게가 전체적으로 무겁게 형성된 것을 볼 수 있어 무게 조건에서는 혼합 B의 4%의 조건이 가장 좋은 기포로 볼 수 있음

○ 최적 기포발생을 위한 기포제 선정 및 희석비율 도출 결과

- 기포제 종류 및 주입률에 따른 최적의 기포 발생 조건 실험의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있음
- 높이 및 무게 변화 실험 결과 높이 실험 결과에서는 기포제 종류에서는 혼합 B가 가장 적은 감소를 보이고 있으며 주입률에서는 4%가 가장 적은 변화를 보이고 있음
- 무게 실험 결과에서는 기포제 주입률이 낮아질수록 물의 주입률이 높아져서 무게가 높아져 좋은 품질의 기포가 아닌 것으로 판단 됨

- 따라서, 무게 비교 실험에서는 주입률 4%가 물, 기포제, 공기가 적절히 주입된 가장 좋은 품질의 기포가 형성된 것으로 판단됨
- 기포제 종류에 따라 살펴보면 혼합 B가 가장 많은 무게를 띄고 있어 최적의 기포제를 생성할 수 있는 기포제로 판단됨
- 혼합 C는 기포의 밀도가 좋지 못해 사이 빈 공간이 많이 형성되어 좋지 않은 품질의 기포라고 판단됨
- 기포제 발생 조건 실험 결과 무게 및 높이 실험 결과 최적의 기포 발생 조건은 4%의 기포제 주입률에서 혼합 B를 통해 생성하는 것이 최적의 조건으로 판단됨

② 기포 사용에 따른 다공성 콘크리트 연속공극 조성 및 특성 평가

○ 기포제 사용에 따른 다공성 콘크리트 제조

표 7. 배합구성 및 방법

구분	W/C	기포 첨가량 (C*%)	광촉매 혼입량 (C*%)	비고
F5-P0	0.3	5	0	-
F7-P0		7	0	-
F7-P25-3%		7	3	P25
F7-NP600-3%		7	3	NP600
F7-P25-5%		7	5	P25
F7-NP600-5%		7	5	NP600
F7-NP600-10%		7	10	NP600
F9-P0		9	0	-

- 여기서 사용된 광촉매는 시판되는 P25, NP600을 사용함
- W/C = 0.3으로 구성된 시멘트페이스트에 광촉매를 혼입하여 건비빔을 5분 실시한 후 물과 감수제, 증점제, 수축저감제를 사용하여 슬러리상태에서 슬럼프 플로 값이 240~260mm의 범위에 도달하도록 배합함
- 기포는 최적 조건으로 도출된 합성기포제를 사용하였고 희석율 4%로 조절하여 기포발생장치를 사용하였으며, 배합전에 미리 기포를 제조하여 배합량에 맞게 계량하여 혼입함
- 다량의 기포를 사용함에 대해 수화진행이 늦어지게 되면 시험체에 소포가 발생하므로 이를 방지하기 위해 급결제를 사용함
- 급결제는 시멘트 매트릭스의 수화를 촉진시켜 혼입된 다량의 기포가 연속공극을 형성할 수 있도록 함 (특허등록, 성과 점검증빙자료 참조)
- 이에 각 제조된 시험체의 경우 경화가 될 때 까지 침하가 발생하지 않았음

○ 기포제 사용에 따른 다공성 콘크리트 특성 평가

- 상기 배합구성 및 방법으로 제작된 시험체에 대해 재령 28일에 맞춰 압축강도, 공극율, 겉보기 밀도를 측정하였음
- 먼저 다공성 콘크리트에 선기포방식으로 제작된 기포를 시멘트 질량의 5, 7, 9%로 혼입한 경우에 대한 압축강도와 공극율의 측정 결과를 아래 그림에 나타냄
- 기포혼입율 5%인 경우 압축강도가 26.5 MPa, 공극율 19.6%로 측정된 반면 기포혼입율 7%에서는 압축강도가 7.6 MPa, 공극율 31.4%로 나타나 기포혼입율이 증가할수록 다공성 콘크리트 내 많은 공극을 형성하였음을 보여줌
- 기포혼입율 9%인 경우 압축강도가 6.65MPa로 감소하고 공극율이 36.9%로 다소 증가하였으나, 충분한 연속공극을 형성하기에는 다소 부족한 것으로 판단됨
- 겉보기 밀도 측정결과에서 나타나듯이 보다 다량의 기포를 혼입하게 되면 밀도를 낮추게 되어 연속공극을 충분히 형성할 수 있는 가능성을 나타냄
- 이에 2차년도에서는 기본으로 구성된 재료에서 선기포로 제작된 기포를 보호하기 위한 검토 및 연속공극이 형성되어도 필터모듈로서 충분한 강도를 확보할 수 있는 연구가 필요함

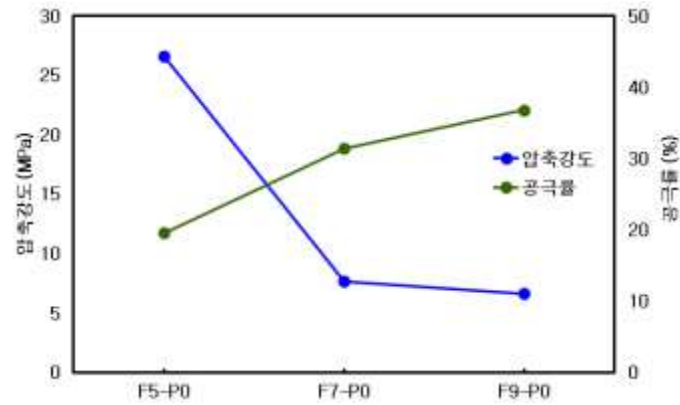


그림 28. 기포첨가량에 따른 압축강도 및 공극률

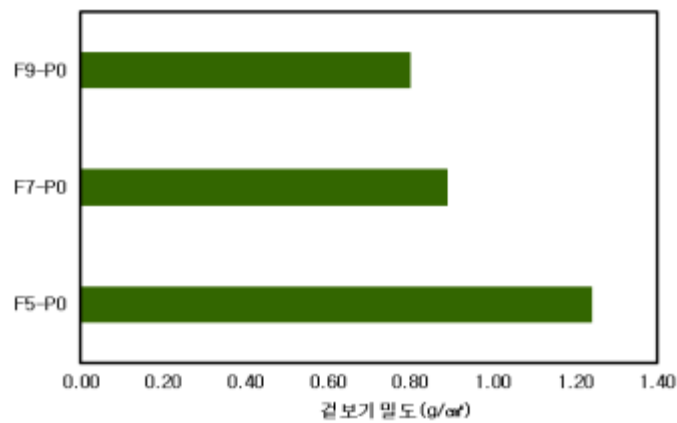


그림 29. 기포첨가량에 따른 겉보기 밀도

- 기포량을 7% 혼입한 다공성 콘크리트에서 광축매 종류 및 혼입율에 따른 압축강도 및 공극율을 측정한 결과 광축매를 사용한 경우 각각 P25-5%, NP600-10%의 시험체가 그 이하의 혼입율 조건에 비해 압축강도는 증가하고 공극율은 감소하는 결과를 나타냄
- 광축매 종류 및 혼입율에 따른 겉보기 밀도의 경우에도 혼입율 증가에 따른 겉보기 밀도의 증가를 나타냄

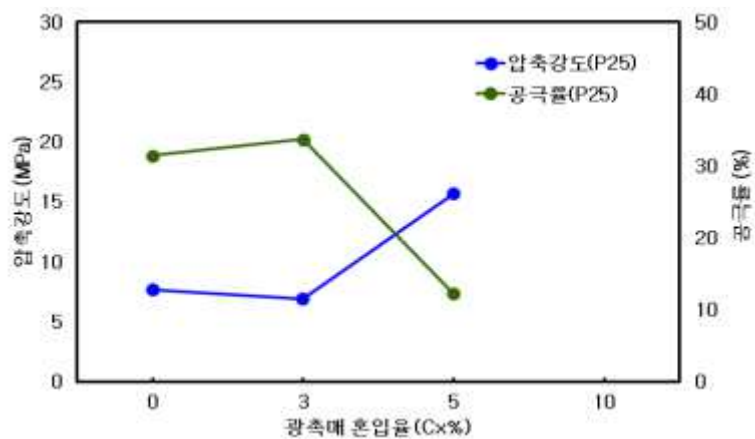


그림 30. P25 혼입율에 따른 압축강도 및 공극률

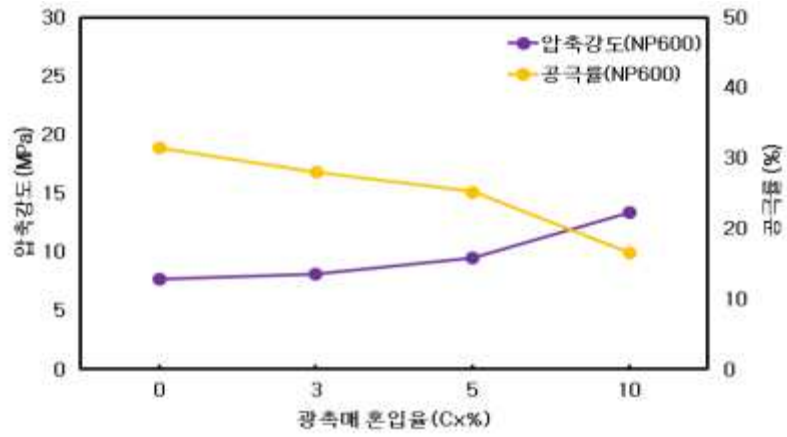


그림 31. NP600 혼입율에 따른 압축강도 및 공극률

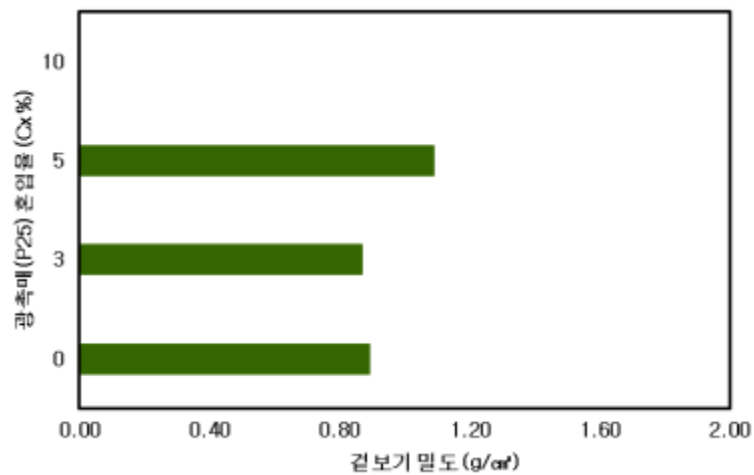


그림 32. 광촉매(P25) 혼입율에 따른 겉보기 밀도

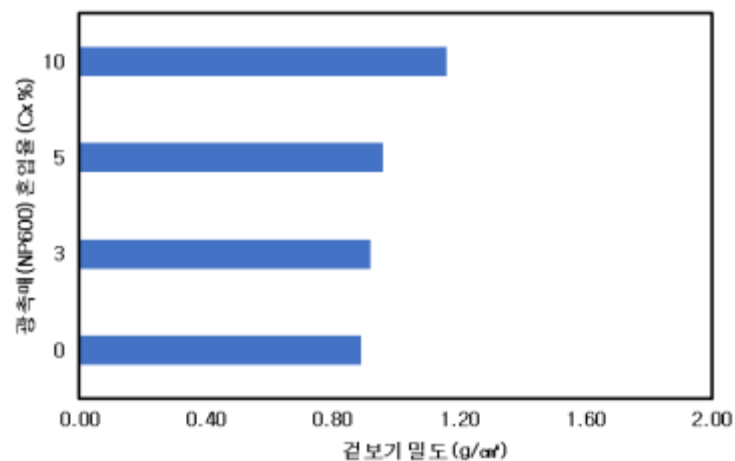


그림 33. 광촉매(NP600) 혼입율에 따른 겉보기 밀도

- 이는 광촉매의 매우 미세한 입자가 일정량 이상에서는 오히려 다공성 콘크리트를 형성하는데 필요한 기포를 깨뜨려 연속 공극형성에 저해되는 요인으로 나타났음
- 따라서 연속공극을 갖는 기포콘크리트를 통해 다공성 콘크리트를 제조함에 있어 광촉매는 입자의 형상 및 크기의 영향이 매우 중요한 요소임을 확인하였음
- 본 연구에서 개발적용하는 TiO_2 -매개담체의 경우 다공성 콘크리트에 분말 혼입 시 기존 상용 광촉매와 같이 기포를 깨뜨리는지에 대한 영향 검토가 필요하며 소포가 발생하는 경우에는 코팅의 방법으로 TiO_2 -매개담체 광촉매를 적용할 필요가 있음

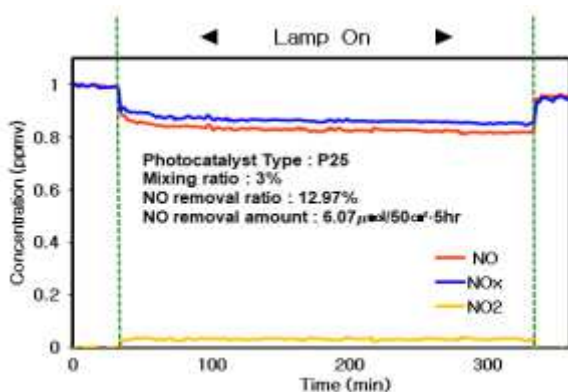
○ 다공성 콘크리트 필터 기본 재료 구성(안)

- 초미세먼지 전구물질인 NOx를 저감하기 위한 다공성 콘크리트 필터를 제작하기 위해서는 우선 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트와 광촉매 사용을 기본으로 함
- 광촉매는 최종적으로는 2차년도에 개발될 매개담체 광촉매를 사용하는 것을 우선으로 하고 1차년도 검토된 광촉매의 경우 P25와 NP 600을 사용할 수 있으며 한계사용량은 각각 3%, 5%로 하여 사용되는 기포를 깨뜨리지 않는 범위에서 사용함
- 시멘트 슬러리의 구성은 시멘트, 물로 구성된 시멘트 페이스트에 수축저감제, 감수제, 증점제를 기본재료로 구성하여 플로우 240 ~ 260mm를 확보하도록 배합비를 구성함(W/C=0.3)
- 합성기포제를 기포발생장치를 이용하여 미리 제조하고 배합된 시멘트 슬러리에 기포를 첨가하는 선기포방식으로 제작함
- 다공성 콘크리트에 연속공극을 형성하기 위해서는 소정의 강도를 확보하는 범위에서 한하여 다량의 기포를 투입하고 투입된 기포가 응결경화과정에서 소포되지 않기 위하여 급결성분의 혼화제를 이용하여 연속공극을 형성하도록 배합을 구성함(특허등록 내용)

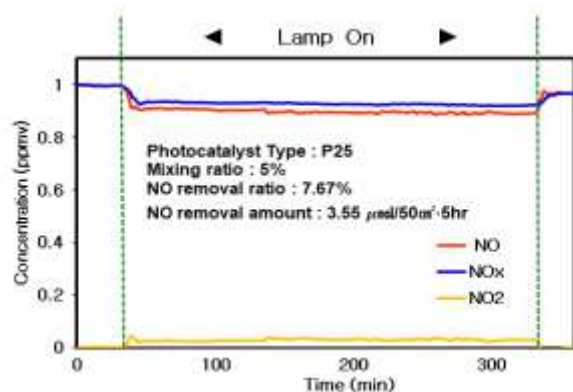
③ 다공성 콘크리트의 de NOx 필터 적용성 검토

○ TiO₂ 사용에 따른 다공성 콘크리트의 광활성화 평가를 통한 필터의 NO 제거 성능 검토

- 기포제 혼입율 7% 조건을 갖는 다공성 콘크리트에 광촉매 종류에 따른 일산화질소(Nitric oxide, NO) 제거율을 측정
- 시험은 ISO 22197-1에 의거하여 50×100×10 mm를 갖는 시험체를 시험장비 챔버 내에 위치시킨 후 10W의 UV-A 광량을 5시간 조사하여 NO가 광활성 반응에 의해 제거되는 양을 측정함
- NO가 제거된 결과를 통해 다공성 콘크리트내 혼입된 광촉매의 분산성과 이에 따른 광활성 효과를 간접적으로 평가할 수 있음
- 광촉매는 UV-A 광원에서만 반응하기 때문에 NO제거율이 높을수록 혼입된 광촉매의 분산성이 양호하며, 다공성 콘크리트 시험체 표면에 분포된 광촉매량이 많아 광활성이 크게 나타난다고 판단할 수 있음
- 광촉매 사용량은 시멘트 중량비로 P25는 3%, 5%를 적용하였고 NP600은 3%, 5%, 10%를 각각 사용하였음
- 측정결과 P25를 3% 사용한 경우 가장 높은 NO 제거량을 나타냈으며 그 값은 6.07 $\mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$ 로 1차년도 목표값인 3 $\mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$ 달성함
- ※ 1차년도 NO 제거량 : 3 $\mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$ 달성
- 참고로 일본 광촉매 협회에서는 NO 제거량이 0.5 $\mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$ 이상일 경우 광촉매에 의한 광활성 반응을 하는 제품으로 인증하고 있음
- 따라서 본 실험에서 측정된 NO 제거량은 해당기준의 4~12배 이상으로 상당히 우수한 값을 나타내는 것임
- 한편, 아래에는 ISO 22197-1에 의거하여 10W의 UV-A 광량을 5시간 조사하여 측정된 NO 및 NOx 등에 대해 측정된 값을 그래프에 나타내었음



(a) P25 - 3%



(b) P25 - 5%

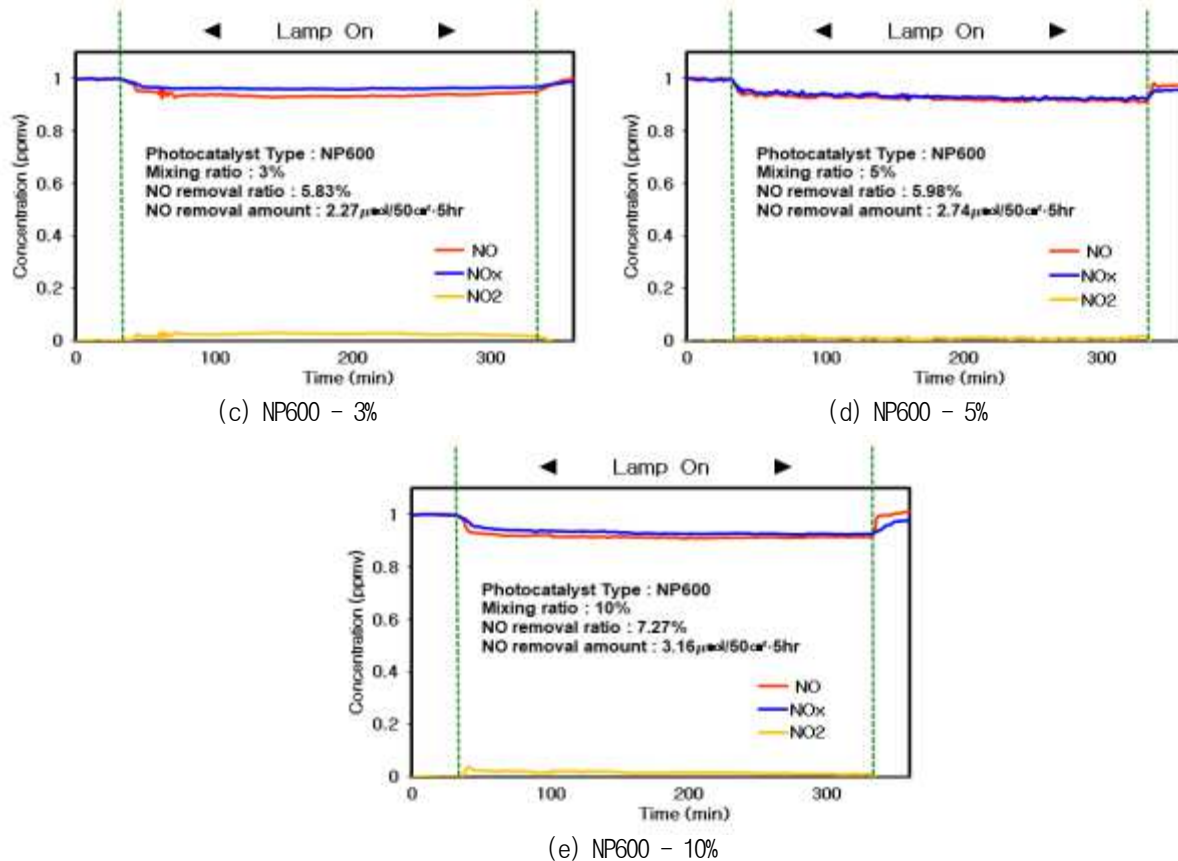


그림 34. TiO_2 적용 다공성 콘크리트 필터의 NO 시험결과 (ISO-22197-1)

○ TiO_2 사용에 따른 다공성 콘크리트 내 미세구조 분석

- 기포량을 시멘트 질량대비 7%를 사용한 조건에서 P25, NP600 광촉매를 각각 3%, 5% 사용한 경우 전자현미경(SEM)으로 단면을 측정하여 아래 그림에 나타내었음
- 저배율(X100)의 조건에서 광촉매를 사용하지 않은 다공콘크리트(F7-P0)에서는 기포로 형성된 공극내에 또 다른 작은 구멍이 보이고 있으며 이것은 공극과 공극이 연결된 연속공극 형태를 형성한 것을 나타내고 있음
- P25, NP600 광촉매를 각각 3% 사용한 P7-P25-3%, P7-NP600-3%의 경우 저배율(X100)에서 F7-P0과 유사한 형태를 나타내고 있으나 P25, NP600 광촉매를 각각 5% 사용한 P7-P25-5%, P7-NP600-5%의 경우는 단일공극형태를 나타내고 있어 광촉매 혼입에 따라 기포를 깨뜨려 연속공극 형성을 저해하는 요인임을 확인할 수 있었음
- 특히 P25는 NP600에 비해 동일 체적대비 질량이 작기 때문에 NP600과 동일 혼입율이라 하더라도 사용량이 NP600에 비해 크게 됨. 이러한 특징으로 F7-NP600-5%에 비해 F7-P25-5% 조건이 기포로 제조한 다공성 콘크리트 내부의 공극형성이 크게 저해되고 있음을 확인하였음
- 광촉매 사용이 없는 경우(F7-P0)는 공극내 시멘트 수화물 형상으로 보이는 물질이 분포하고 있음을 확연히 보이고 있음
- 광촉매 혼입율이 적은 경우(3%) 다공성 콘크리트내 혼입된 광촉매 주위로 시멘트 수화물이 분포하고 있으며 광촉매 혼입율이 증가하면(5%) 다공성 콘크리트내 공극형성이 줄어들고 광촉매 주위로 수화물질 더욱 많이 분포하게 되어 공극이 메어지고 결정질 형태의 단면을 보이게 된 것으로 판단됨
- NO제거량 실험결과와 비교할 때 P7-P25-3%는 P7-P25-5%에 비해 NO제거량이 크게 나왔는데 이는 적정의 광촉매 혼입을 하여 연속공극이 형성될 경우 다공성 콘크리트에 혼입된 광촉매가 콘크리트 표면위로 보다 많이 노출되어 광활성 반응이 보다 크게 일어날 수 있는 조건을 만드는 것으로 판단됨
- 상기 결과는 P7-NP600-3%와 P7-NP600-5%에서도 유사한 결과를 나타내고 있어 광촉매 분말 혼입과 다공성콘크리트의 연속 공극 형성과는 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있음

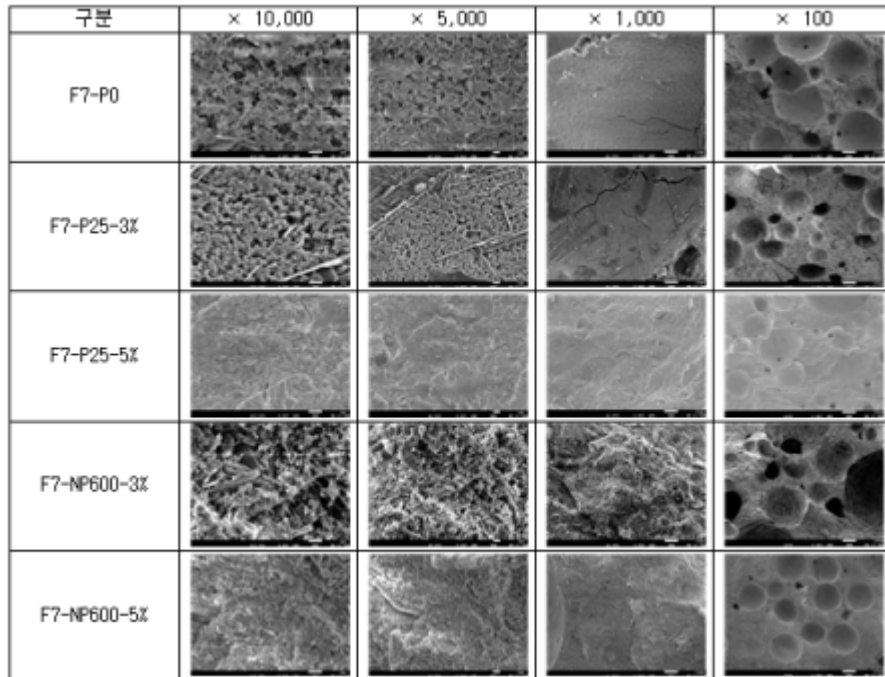


그림 35. TiO_2 사용에 따른 다공성 콘크리트 미세구조

○ TiO_2 사용에 따른 다공성 콘크리트의 광활성화 증가를 위한 연속공극 형성의 필요성 분석

- P25를 3% 사용한 경우는 P25를 5% 사용한 경우($3.55 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$)에 비해서 혼입량이 적지만 NO 제거량이 크게 증가하였음
- 이 결과는 다공성 콘크리트의 표면에 크고 작은 공극이 형성되어 시험체의 비표면적이 크게 증가한 것과 광촉매가 적절히 분산됨에 의한 결과로 판단됨
- 광촉매 NP600을 사용한 경우는 NO 제거량이 P25에 비해 낮게 나타났음
- NP 600이 P25에 비해 비표면적이 크고 동일 부피대비 질량이 크기 때문에 동일 혼입을 대비 사용량이 적은 것도 원인 중 하나임
- P25, NP600과 같은 기존의 상용의 광촉매를 다량의 기포를 사용하여 제조하는 다공성 콘크리트에 혼입하는 경우 배합과정에서 기포를 깨뜨리는 경향을 나타냄
- 이에 광촉매 P25의 경우는 3%이하 NP600의 경우 5% 이하가 한계점으로 판단됨
- 다공성 콘크리트 제조시 광촉매 혼입에 따른 기포를 보호할 수 있는 부분과 분산성을 증가할 수 있는 부분에 대한 보강 실험이 필요함
- 광촉매를 혼입하는 경우 광촉매의 미세한 입자가 다공성 콘크리트 내 기포를 소포시켜 연속공극 형성을 저해하는 요인이 될 수 있으므로 다공성 콘크리트의 연속공극 형성이 de NO_x 다공성 필터 제조에 중요한 요소임

나. TiO_2 -매개담체 사용한 de NO_x 다공성 콘크리트 필터 개발

① 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트의 다공성 콘크리트 최적 배합 개발

○ TiO_2 -매개담체 사용에 따른 다공성 콘크리트의 물리적 특성 평가

- TiO_2 -매개담체는 분말의 NO 제거 실험결과 가장 우수하게 나타난 10 wt% TiO_2/M 을 선정하여 다공성 콘크리트 제조시 아래 조건으로 혼입하여 압축강도와 공극율을 측정하였음
- TiO_2 -매개담체 혼입결과 혼입율이 증가함에 따라 강도가 저하하였고 공극율도 목표값을 달성하지 못하였는데 이것은 매개담체 분말혼입이 기존 상용광촉매 혼입시와 같이 미세한 광촉매 입자가 기포를 소포시켜 공극형성을 저해시켰고 광촉매 분말의 증가에 따라 다공체 콘크리트의 강도발현에 저해하는 결과를 나타냄
- 다공성 콘크리트의 NO 제거 성능을 갖기 위해서는 기본적으로 연속공극을 갖는 공극형성이 필요하나 TiO_2 -매개담체 광촉매 분말을 혼입하여서는 연속공극을 형성하기 어려워 광촉매 혼입이 없는 다공성 콘크리트 구체를 만들고 TiO_2 -매개담체 광촉매 용액을 코팅하여 다공성 콘크리트 필터를 제작하는 것으로 하였음

표 8. 배합구성 및 방법

구분		W/C	기포 첨가량 (C*)	TiO ₂ -매개담체 혼입량 (C*)	TiO ₂ 혼입량
1	OPC-매개-5%-B 11%	0.35	11	5	매개담체 10 wt%
2	OPC-매개-10%-B 11%		11	10	TiO ₂ -매개담체 10 wt%
3	OPC-매개-15%-B 11%		11	15	TiO ₂ -매개담체 10 wt%
4	6000-매개-5%-B 11%		11	5	TiO ₂ -매개담체 10 wt%
5	6000-매개-10%-B 11%		11	10	TiO ₂ -매개담체 10 wt%
6	6000-매개-15%-B 11%		11	15	TiO ₂ -매개담체 10 wt%

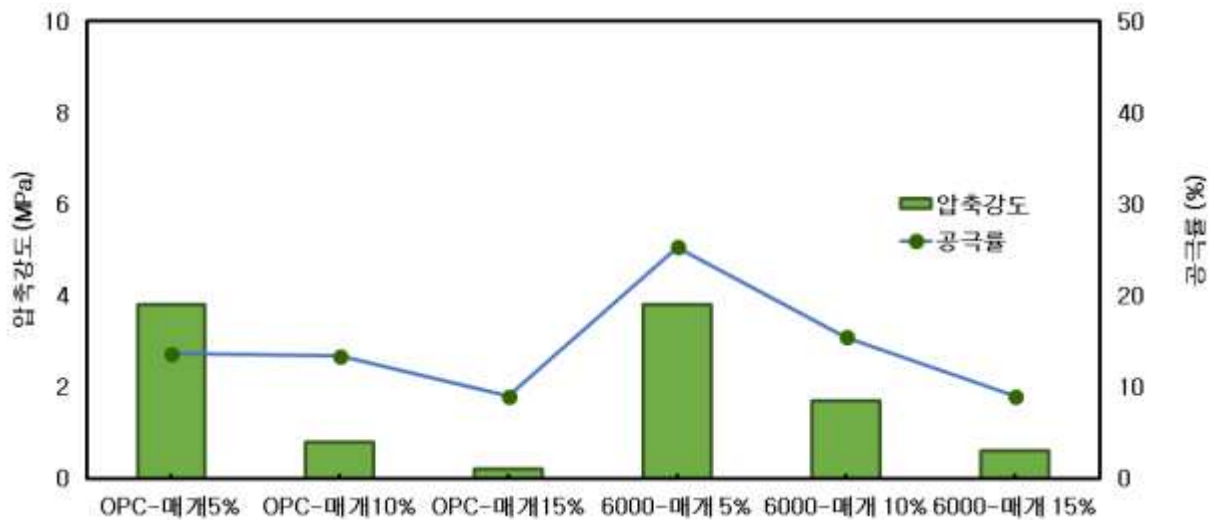


그림 36. TiO₂-매개담체 혼입에 따른 다공성 콘크리트 압축강도 및 공극률

○ 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트의 다공성 콘크리트 최적 배합 개발

표 9. 배합구성 및 방법

구분		W/C	기포 첨가량 (C*)	광촉매 혼입량 (C*)	비고
1	OPC-B 9%	0.35	9	0	
2	OPC-B 11%		11	0	
3	6000-B 9%		9	0	
4	6000-B 11%		11	0	
5	6000-B 13%		13	0	

- 매개담체를 혼입하지 않은 조건에서 OPC의 경우와 강도보완을 위해 분말도가 높은 시멘트 사용을 위해 시멘트 분말도 6000을 사용한 결과 11%의 기포량을 혼입한 경우 압축강도 1.78MPa, 공극률 47.2%의 값을 나타냄. 참고로 OPC의 경우 기포량 11%, 분말도 6000의 경우 기포량 13%에서는 기포량의 사용량이 과다하여 다공성 콘크리트 제조후 경화과정에서 소포에 의한 약간의 침하가 발생하여 공극률이 감소한 것으로 판단됨
- 분말도 6000의 경우 기포량의 증가한 경우 OPC에 비해 미세입자에 의한 압축강도 발현이 증가한 것으로 판단되어 연속 공극형성을 위해 기포량 증가에 따른 다공성콘크리트의 강도저하의 단점을 보완할 수 있는 것으로 판단되며 해당 조건이 최적의 배합 조건으로 선정함
- 따라서 최적배합 조건은 분말도 6000의 시멘트를 사용하고, W/C=35%의 조건의 시멘트 페이스트에 합성기포제를 선기포 방식으로 제조한 기포를 시멘트 대비 중량비로 11%를 혼입하여 제조한 배합조건이며, 급결제(시멘트의 4%)를 사용하여 다공성 콘크리트 타설 후 경화과정에서 기포의 소포가 일어나지 않고 신속히 형상을 갖추도록 하는 배합임

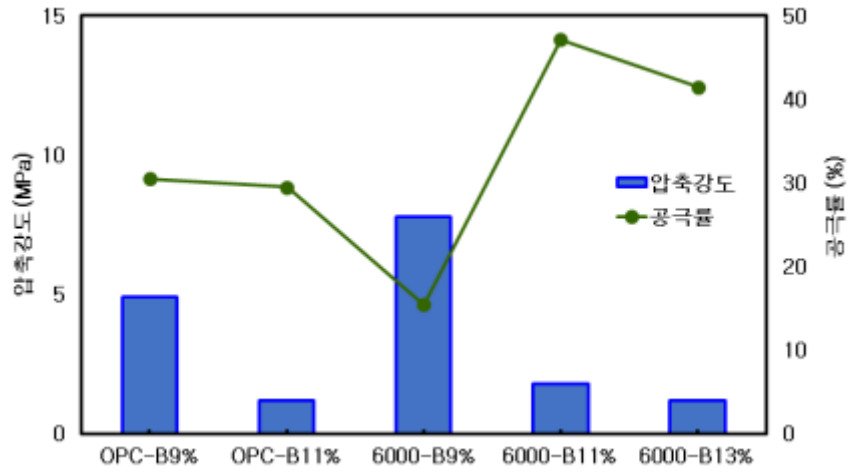


그림 37. 기포첨가량에 따른 압축강도 및 공극률



(a) 압축강도 측정



(b) 공극률 측정

그림 38. 압축강도 및 공극률 측정

- 한편, 본 연구에서 검토한 다공성 콘크리트에 대한 최적배합 조건에 대해 연속공극 형성 여부를 검토하기 위하여 공인기관을 통해 투수계수 실험을 실시하였고 다음과 같은 시험결과를 얻음
- 본 연구에서 제조한 다공성 콘크리트에 소정의 시험방법에 따라 물이 통과하게 하여 얻어지는 투수계수를 확보한다는 것은 연속공극을 형성하고 있다는 것을 증명하는 것이며 다량의 기포를 사용하여 연속공극을 형성하는 다공성 콘크리트 제조 기술 확보는 콘크리트 필터를 제작하는 데 있어 매우 중요하고 우수한 기술을 확보한 것임

표 10. 투수계수 시험결과(KS F 4419)

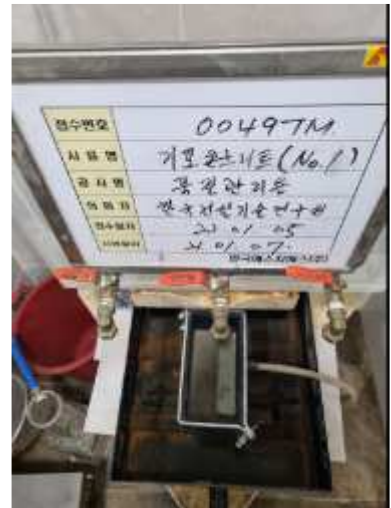
연번	시험체명	배합명	단위	시험방법	시험 결과	비고
1	기포콘크리트 1	6000-B 11%	mm/ sec	KS F 4419	0.101	
2	기포콘크리트 2				0.118	
3	기포콘크리트 3				0.107	
평균		투수계수			0.108	> 1.0×10 ⁻² (목표값)



시험 전



시험 중



시험 후

그림 39. 연속공극 형성 확인을 위한 다공성 콘크리트 투수계수 시험

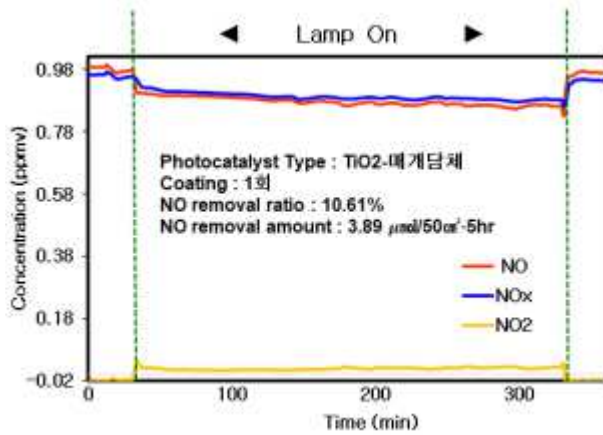
② TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터 제조 및 성능평가

○ TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트의 NO 제거 성능 평가

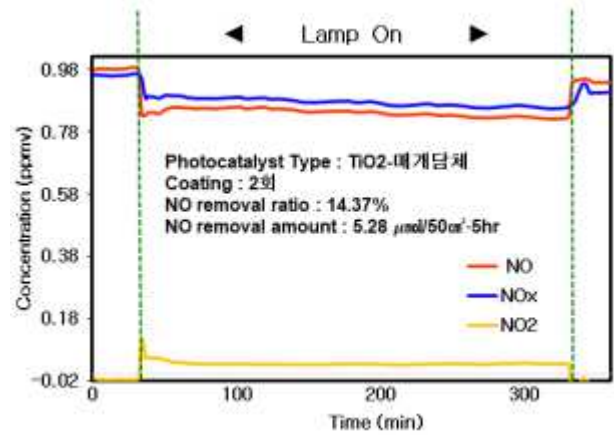
- TiO_2 -매개담체를 다공성 콘크리트에 코팅하여 다공성 콘크리트의 NO 제거성능을 검토하였음
- TiO_2 -매개담체 코팅조건은 NO 제거 실험결과 가장 우수하게 나타난 10 wt% TiO_2/M 을 선정하여 코팅액을 제조하고 소정의 크기를 갖는 다공성 콘크리트 시편(NO 제거 성능 시험체 $50 \times 100 \times 10 \text{ mm}$)에 1, 2, 3회 코팅 후 열처리를 하여 TiO_2 -매개담체를 다공성 콘크리트 적용하였고 이에 대한 NO 제거성능 5시간 측정결과(ISO 22197-1)를 아래 표와 그림에 나타냄
- NO 제거량 실험결과 1회 코팅에서는 $3.89 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$, 2회 코팅에서는 $5.28 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$, 3회 코팅에서는 $6.19 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$ 의 값을 나타내어 2회 코팅에서 목표포한 $5.0 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$ 값을 확보하였고 이를 최적의 방법으로 선정하였음. 코팅의 횟수가 증가함에 따라 NO 제거량이 증가하였으나 3회 코팅의 경우 NO 제거량은 매우 우수하게 나타나지만 코팅된 TiO_2 -매개담체의 탈리의 우려와 경제적인 면을 고려하여 당초 목표값 수준을 갖는 2회 코팅을 최적조건으로 선정하였음
- 한편 2회 코팅한 시험편의 NO 제거 실험을 한 후 증류수로 세척을 한 후 NO 제거 실험을 실시하였고 측정결과 $4.93 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$ 의 측정값을 나타내어 목표값($4.5 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$)을 확보하였고 세척후에도 TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터의 우수한 광활성 반응을 나타내는 것을 확인하였음

표 11. TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터의 NO 제거량 실험 결과 요약(ISO 22197-1)

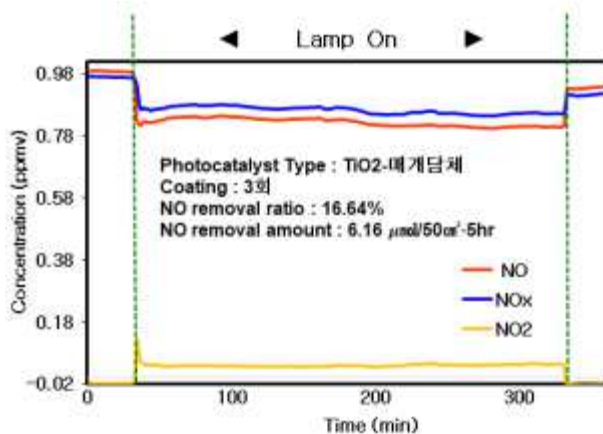
연번	시험체명	배합명	시험결과 (단위: $\mu\text{mol}/50\text{cm}^2\cdot 5\text{hr}$)	비고
1	TiO_2 -매개담체 1회 코팅	6000-B 11%	3.89	
2	TiO_2 -매개담체 2회 코팅		5.28	> 5.0 (목표값)
3	TiO_2 -매개담체 3회 코팅		6.16	
4	TiO_2 -매개담체 2회 코팅 세척 후		4.93	> 4.5 (목표값)



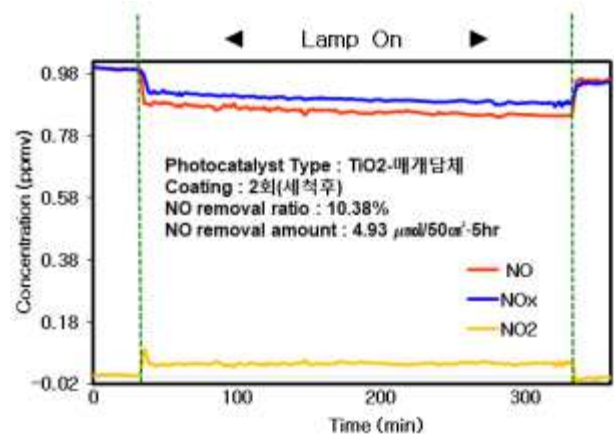
(a) TiO₂-매개담체 1회 코팅 NO 제거량 결과
(제거량 : 3.89 μmol/50cm²·5hr)



(b) TiO₂-매개담체 2회 코팅 NO 제거량 결과
(제거량 : 5.28 μmol/50cm²·5hr)



(c) TiO₂-매개담체 3회 코팅 NO 제거량 결과
(제거량 : 6.16 μmol/50cm²·5hr)



(d) TiO₂-매개담체 2회 코팅 세척 후 NO 제거량 결과
(제거량 : 4.93 μmol/50cm²·5hr)

그림 40. TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 필터의 NO 제거량 실험 결과

○ TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 de NOx 필터 시작품 제작

- 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트에 TiO₂-매개담체를 2회 코팅하여 다공성 콘크리트 de NOx 필터 시작품을 제작함
- 200×200×25 mm 로 제작한 시험편을 1개당 약 25×200×25 mm로 절단하고 TiO₂-매개담체를 다공성 콘크리트에 코팅하여 제작한 것을 de NOx 필터 모듈에 장착하여 챔버내에서 NOx 저감 실험을 공동연구기관(벤텍프론티어)을 통해 검토함
- 본 연구에서 개발된 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 필터는 경량이면서 소정의 강도를 확보하기 때문에 광촉매에 의한 광활성 기능을 부여하여 기존 공기정화장치의 후처리 필터로 사용할 경우 NO 제거에 매우 효과적으로 적용될 것으로 판단됨



그림 41. 다공성 콘크리트 de NOx 필터 시작품 제작

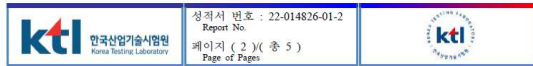
○ de NOx 필터로 활용된 TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트의 질소산화물 제거 성능 평가 시험성적서

- 시험기관 : 한국산업기술시험원(KTL)

- 시험방법 : ISO 22197-1

- 시편 구분

· TiO₂-매개담체 활용 다공성 콘크리트 시편 (2회 코팅, 세척 전) : PPC-A (NO 제거량 : 19.78 μmol/50cm²5hr)



시험결과 (Test Results)

1. 시험품명 및 시험항목

1.1 시험품 구분

시험품명	모델명	Lot No.	시험품 수
PPC-B	-	-	1 종

1.2 시험품 사진

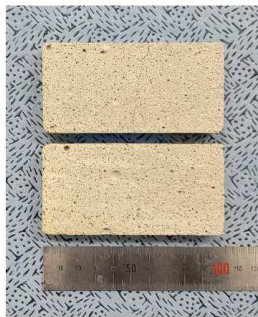
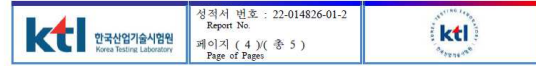


그림 1 - 시험품

1.3 시험 항목 : 질소산화물(NOx) 제거 성능

2. 시험 규격/방법

2.1 시험규격 : ISO 22197-1(2016) 참조



3. 시험결과

3.1 NO 및 NOx 제거율

NO 주입량(μmol)	NO 제거율(%)	NOx 제거율(%)
37.40	51.2	37.5

3.2 NO 및 NOx 제거량

NOx 흡착량	NO ₂ 생성량	NOx 탈착량	NO 제거량	NOx 제거량
0.00	4.13	0.01	19.78	15.65

(단위 : μmol)

* 비교 1 - 위 결과는 2개 시험품 측정 결과의 평균치임.

* 비교 2 - NO 주입량 : 5시간 동안 반응기에 유입된 NO의 총량

NO(NOx) 제거율 : 마지막 1시간 동안의 시험품에서 제거된 NO(NOx)의 평균 값

NOx 흡착량 : UV 측정 전 30분간 시험품에 흡착된 NOx의 총량

NO₂ 생성량 : 5시간 동안 시험품에서 생성된 NO₂의 총량

NOx 탈착량 : UV 측정 후 30분간 시험품에서 탈착된 NOx의 총량

NO(NOx) 제거량 : 5시간 동안 시험품에서 제거된 NO(NOx)의 총량

4. 시험환경

4.1 온도 : (25 ± 10) °C

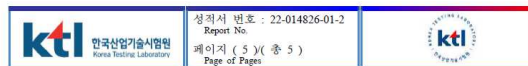
4.2 습도 : (45 ± 10) % R.H.

5. 시험장비

장비명	제조사	모델
Photocatalytic NO removal efficiency tester	KNT	-
UV meter	HAMAMATSU PHOTONICS K. K.	H9958-01
UV lamp	SANKYO DENKI	F10T8BLB
NOx Analyzer	T-API	T200

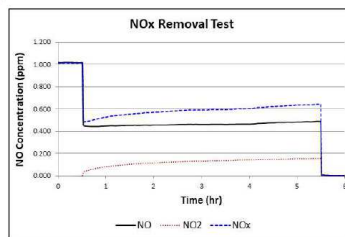
FP104-06-00

FP104-06-00

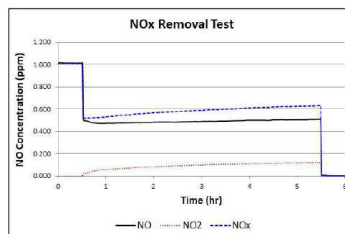


6. 부록

6.1 시험 그래프



(a) 1st test



(b) 2nd test

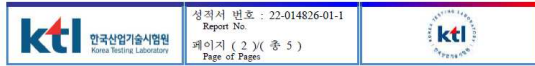
그림 2 - NO, NO₂ 및 NOx 농도 변화

이 상 표.

FP104-06-00

<TiO₂-매개담체 2회 코팅된 다공성 콘크리트의 ISO-22197 시험 평가 결과>

· TiO_2 -매개담체 활용 다공성 콘크리트 시편 (2회 코팅, 세척 후) : PPC-B (NO 제거량 : $17.48 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2\text{5hr}$)



시험결과 (Test Results)

1. 시험품명 및 시험항목

1.1 시험품 구분

시험품명	모델명	Lot No.	시험품 수
PPC-A	-	-	1 종

1.2 시험품 사진

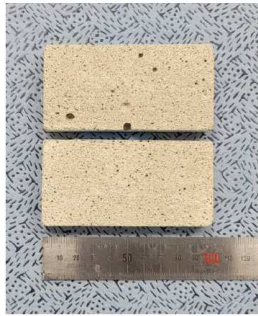
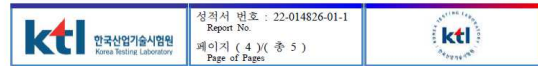


그림 1 - 시험품

1.3 시험 항목 : 질소산화물(NOx) 제거 성능

2. 시험 규격/방법

2.1 시험규격 : ISO 22197-1(2016) 참조



3. 시험결과

3.1 NO 및 NOx 제거율

NO 주입량(μmol)	NO 제거율(%)	NOx 제거율(%)
37.29	45.5	32.3

3.2 NO 및 NOx 제거량

(단위 : μmol)

NOx 흡착량	NO_2 생성량	NOx 탈착량	NO 제거량	NOx 제거량
0.01	4.17	0.00	17.48	13.29

* 비교 1 - 위 결과는 2개 시험품 측정 결과의 평균치임.

* 비교 2 - NO 주입량 : 5시간 동안 반응기에 유입된 NO 의 총량

$\text{NO}(\text{NOx})$ 제거율 : 마지막 1시간 동안의 시험품에서 제거된 $\text{NO}(\text{NOx})$ 의 평균 값

NOx 흡착량 : UV 램프 켜 30분간 시험품에 흡착된 NOx 의 총량

NO_2 생성량 : 5시간 동안 시험품에서 생성된 NO_2 의 총량

NOx 탈착량 : UV 소등 후 30분간 시험품에서 탈착된 NOx 의 총량

$\text{NO}(\text{NOx})$ 제거량 : 5시간 동안 시험품에서 제거된 $\text{NO}(\text{NOx})$ 의 총량

4. 시험환경

4.1 온도 : $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$

4.2 습도 : $(45 \pm 10) \% \text{ R.H.}$

5. 시험장비

장비명	제조사	모델
Photocatalytic NO removal efficiency tester	KNT	-
UV meter	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.	H9958-01
UV lamp	SANKYO DENKI	F10T8BLB
NOx Analyzer	T-API	T200

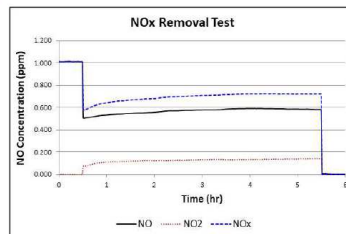
FP104-06-00

FP104-06-00

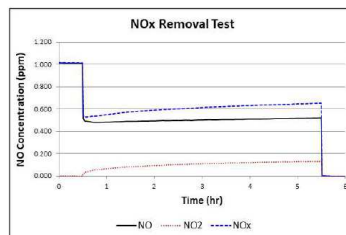


6. 부록

6.1 시험 그래프



(a) 1st test



(b) 2nd test

그림 2 - NO , NO_2 및 NOx 농도 변화

이 상 표.

FP104-06-00

< TiO_2 -매개담체 2회 코팅 및 세척 후 다공성 콘크리트의 ISO-22197 시험 평가 결과>

2-2 매개담체를 활용한 TiO₂ 제조 기술 개발

가. Sol-gel 기반 TiO₂-매개담체(Mayenite) 광촉매 복합소재 제조기술 개발

① sol-gel법의 TiO₂ 나노입자 합성의 제법 확립

○ Sol-gel TiO₂ 합성

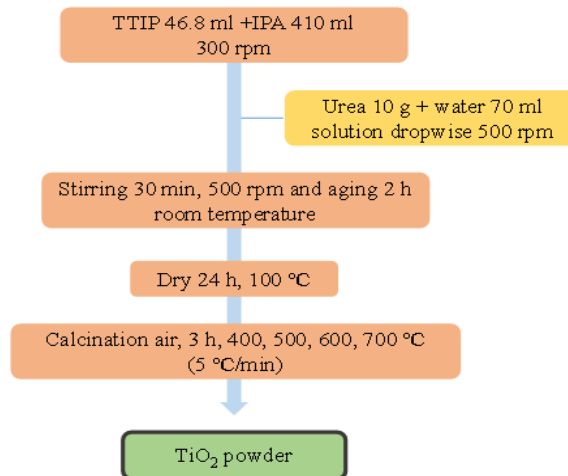


그림 48. sol-gel TiO₂ 합성

- TiO₂를 합성하기 위하여 다양한 방법을 시도하였으며, TTIP와 Urea를 1:1의 비율로 합성한 sol-gel 방법을 결정하였음

표 12. sol-gel TiO₂의 BET 결과

	BET Surface Area (m ² /g)	Total Pore Volume (m ³ /g)	Average Pore Size Å
Sol-gel 2(Urea)	175.9	0.163	37
Sol-gel 2(Urea)-400	66.8	0.159	98
Sol-gel 2(Urea)-500	37.8	0.124	131
Sol-gel 2(Urea)-600	15.7	0.072	183
Sol-gel 2(Urea)-700	5.4	0.034	255

- 열처리 온도에 따른 BET 분석을 하였으며, 열처리 온도가 증가함에 따라 비표면적, 기공부피가 감소하였으며, 평균기공 크기가 증가하는 경향을 나타냄

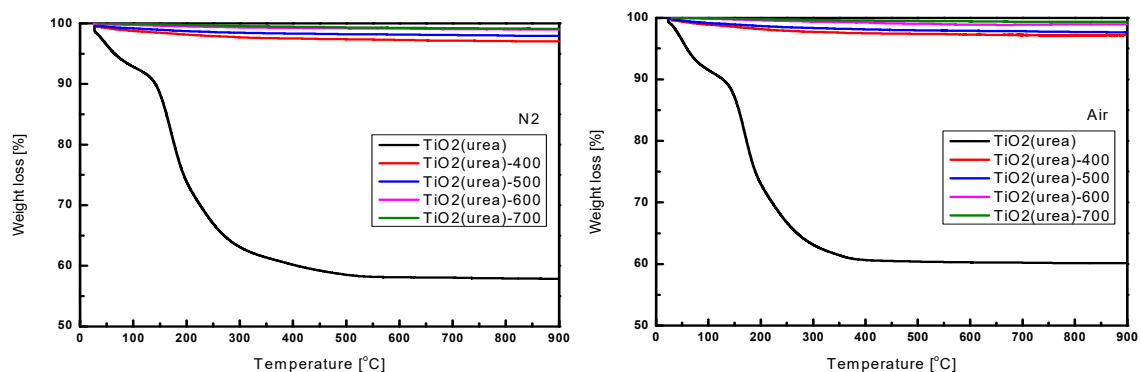


그림 49. sol-gel TiO₂의 TGA 결과

- TGA 분석결과, 100도 부근에서 수분이 증발되는 1차 곡선이 나타나며, 100도 이상에서 urea가 분해되는 2차 곡선을 나타내었음

- urea를 제거하기 위하여 적어도 400도 이상의 열처리가 필요하며, Air와 N₂ 분위기에서 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아 urea는 열로도 제거가 됨을 확인할 수 있음

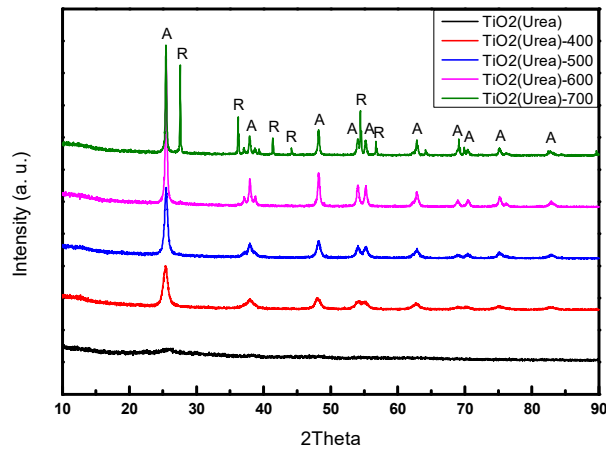


그림 50. sol-gel TiO_2 의 XRD 결과

- 400~600도까지 열처리된 TiO_2 는 anatase 단일상의 결정구조를 가지며, 700부터 rutile의 결정구조가 함께 존재하는 것을 확인할 수 있었음
- 따라서, anatase 단일상을 가지는 400~600도 사이의 입자들이 높은 질소산화물 제거 성능을 나타낼 것으로 예상됨
- 또한 당해연도 MB 분해능 목표는 40% 이상이며, 자체 시험 결과 1시간 기준으로 분해성능 60% 이상을 나타내었음

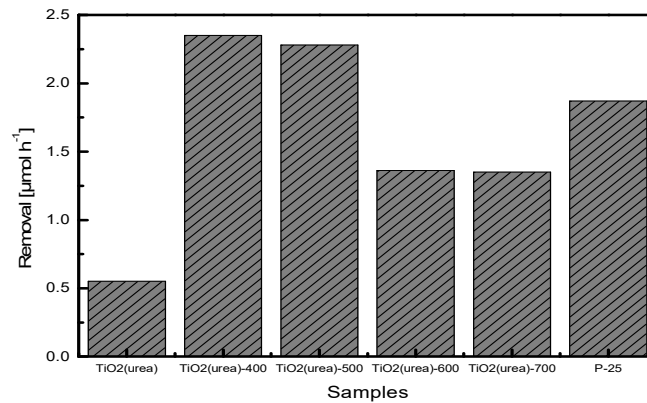


그림 51. sol-gel TiO_2 의 질소산화물 제거 결과

- $\text{TiO}_2(\text{urea})$ -400 입자가 $2.35 \mu\text{mol/h}^{-1}$ 의 가장 높은 질소산화물 제거율을 나타내었으며 상용 TiO_2 인 P-25보다 높은 제거율을 나타내었음
- 따라서 TiO_2 -매개담체 제조 시 열처리 온도를 400도와 500로 결정하였음

② TiO_2 -Mayenite 광촉매 복합소재 합성 및 평가

○ Mayenite 제법 확립

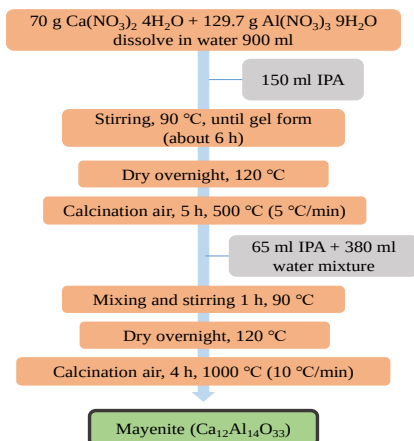


그림 52. Mayenite의 제법 확립

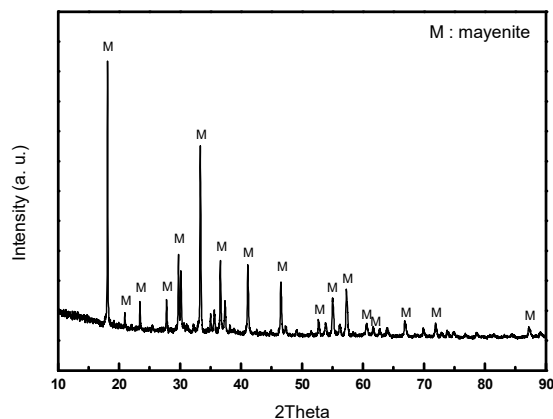


그림 53. Mayenite의 XRD 분석

- Mayenite의 합성을 다양한 방법으로 시도하여 XRD 결정구조 분석을 통해 위와 같은 mayenite 제법을 확립하였음

표 13. Mayenite의 BET 분석

Sample	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Diameter (Å)
mayenite	1.5	-	129

- Mayenite의 BET 분석결과, 1000도 이상의 고온의 소성으로 비표면적이 거의 없으며, 기공 부피가 측정되지 않고 129Å의 평균기공크기를 나타내었음

방법 1

- 제조한 TiO₂ 입자를 물에 분산시킨 후 스프레이 통에 넣어 mayenite 분말에 뿌려주는 방법
- 400, 500도에서 열처리 → (s, s)로 명명

방법 2

- TiO₂ sol-gel 상태를 스프레이 통에 넣어 mayenite 분말에 뿌려주는 방법
- 400, 500도에서 열처리 → (g, s)로 명명

그림 54. TiO₂-mayenite의 제법

- 방법 1과 방법 2의 두가지 방법으로 TiO₂-매개담체(Mayenite)의 합성을 시도하였음
- 두 입자 모두 앞선 결과를 통해 400과 500도에서 열처리를 진행하였으며, 질소산화물 제거 성능평가를 진행함

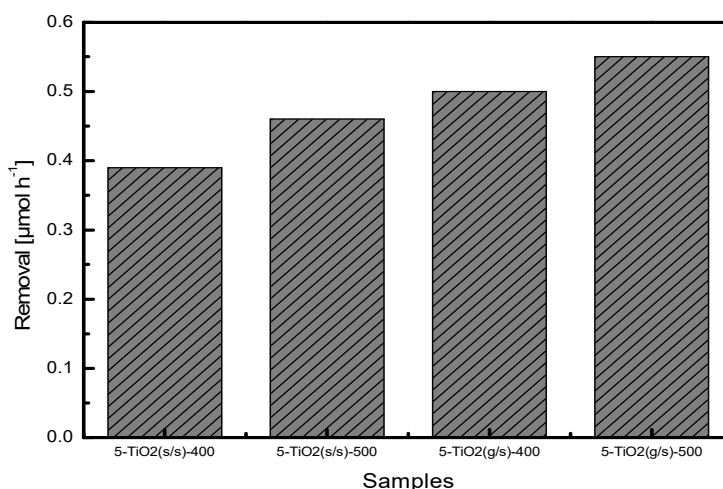


그림 55. TiO₂-mayenite의 질소산화물 제거 결과

- 방법 2의 sol-gel 상태의 TiO₂를 사용하여 매개담체에 합성한 시료가 전반적으로 높은 질소산화물 제거율을 나타내었으며, 5-TiO₂(g/s)-500 입자에서 0.55 μmol/h⁻¹의 제거율을 나타냄

나. TiO₂-매개담체의 개발

① TiO₂-매개담체의 개발

○ 매개담체와 TiO₂를 결합하기 위하여 최적의 TiO₂ 양 결정

- 아래의 그림과 매개담체와 TiO₂를 결합하기 위하여 최적의 TiO₂ 양을 결정하고자 결합되는 TiO₂의 양을 1에서 20 wt%까지 조절하여 제조를 시도하였음
- TiO₂의 양이 감소하면 용매인 IPA의 양도 함께 감소하기 때문에 10 wt% 미만에서는 매개담체와의 혼합을 위해 물을 소량 첨가해 주었음

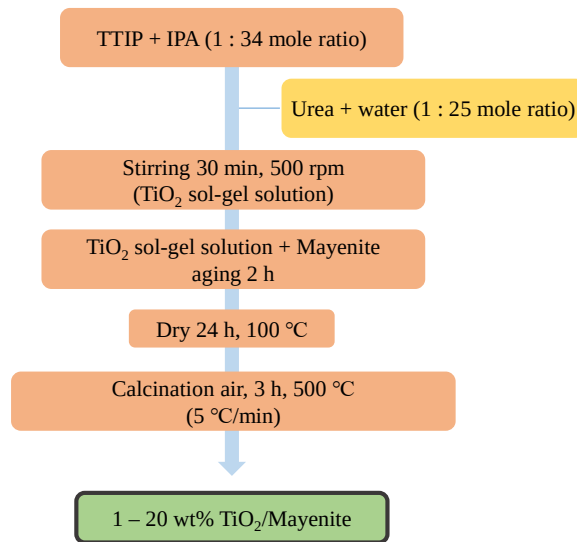
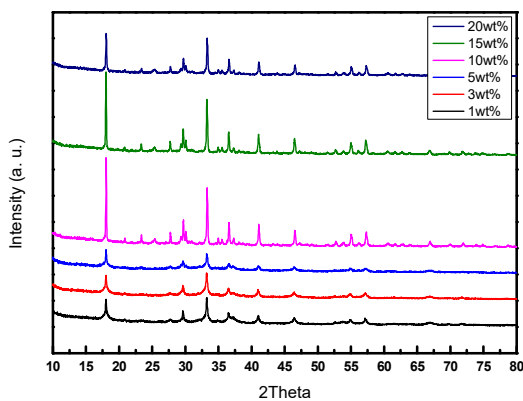


그림 56. TiO₂ 함량에 따른 TiO₂-mayenite 제법 (용매인 IPA 양을 비율에 따라 조절한 조건)

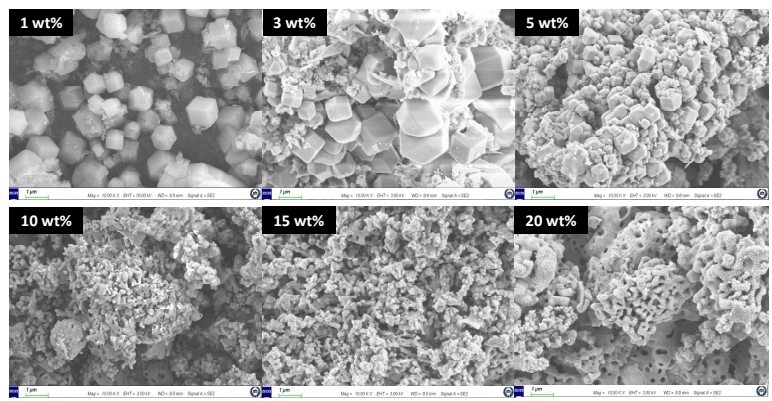
- TiO₂의 함량에 따른 시료를 제조하여 BET, XRD, SEM 분석을 실시하였음
- BET 및 XRD 분석을 통하여 시료는 매개담체와의 혼합을 위해 물이 첨가된 시료와 첨가되지 않은 시료로 경향이 나뉘는 것을 확인하였음
- 혼합을 위해 물이 첨가된 1, 3, 5 wt% TiO₂/M은 비표면적이 증가하였으나, XRD에서 IPA만 존재하는 10, 15, 20 wt% TiO₂/M 보다 매우 낮은 피크를 나타내어 결정성이 사라지는 것을 알 수 있음

표 14. TiO₂ 함량에 따라 제조된 TiO₂/M의 비표면적, 기공부피 및 기공크기 분석결과

Sample	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Diameter (Å)
1 wt% TiO ₂ /M	82.7	0.21	103
3 wt% TiO ₂ /M	73.3	0.17	93
5 wt% TiO ₂ /M	104.4	0.17	67
10 wt% TiO ₂ /M	26.5	0.11	169
15 wt% TiO ₂ /M	30.7	0.12	154
20 wt% TiO ₂ /M	38.2	0.15	161



(a)



(b)

그림 57. TiO₂ 함량에 따라 제조된 TiO₂/M의 (a) XRD, (b) SEM 분석 결과

- SEM의 경우 TiO_2 의 함량에 증가함에 따라 TiO_2 가 매개담체 표면에 분산되는 것을 확인할 수 있으며, 모두 동일 배율에서 측정한 결과로 10 wt%를 포함한 10 wt% TiO_2/M 에서 TiO_2 입자가 가장 작은 것을 확인할 수 있으며 그 이상 증가하는 경우 TiO_2 입자의 양이 너무 많아 서로 뭉치는 것을 확인할 수 있음
- 따라서, BET, XRD, SEM의 특성분석 결과를 통하여 물이 첨가되지 않은 10 wt% 이상의 시료에서 높은 질소산화물 제거 특성을 나타낼 것으로 예측되었으며, 10 wt% TiO_2/M 에서 높은 성능을 나타낼 것으로 예측되었음

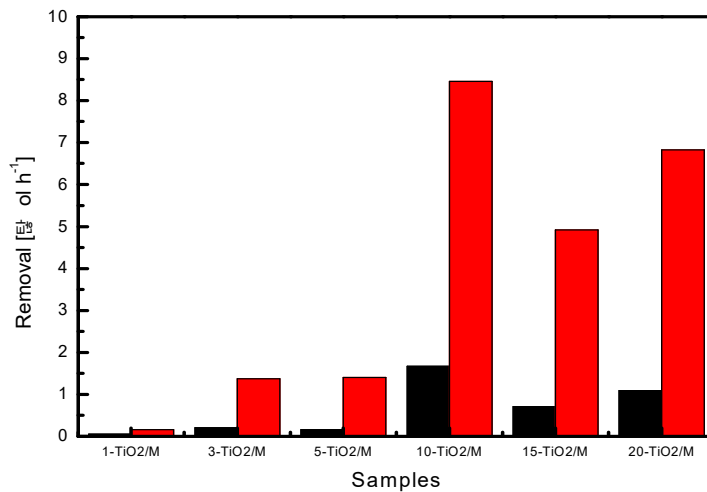


그림 58. TiO_2 함량에 따라 제조된 TiO_2/M 의 질소산화물 제거성능 평가 결과 (IPA 양을 비율에 따라 조절한 조건)

- TiO_2 의 함량에 따른 시료의 질소산화물 제거 성능평가 결과를 위의 그림에 나타내었음
- 예측한 결과와 마찬가지로 물이 첨가된 1, 3, 5 wt% TiO_2/M 의 시료에서는 매우 낮은 제거율을 나타내었으며, 10 wt% TiO_2/M 에서 60분에 $1.67 \mu\text{mol/h}$, 300분에 $8.46 \mu\text{mol/h}$ 로 가장 높은 제거율을 나타내었음
- 용매로 물이 첨가되지 않아야 하는 것으로 파악되며, TiO_2 와 매개담체를 적절히, 충분히 혼합할 필요가 있음을 파악하고 제법 확립을 위해 IPA의 양을 증가시켜 재합성을 시도하고자 하였음

② TiO_2 -매개담체의 분산성 향상 기술 개발

○ TiO_2 -매개담체의 분산성 향상 기술 개발 및 제법 확립

- 앞선 연구결과를 통해 TiO_2 와 매개담체를 혼합할 때 물이 첨가되지 않아야 함을 파악하여 제법확립을 위해 IPA의 양을 고정시키고 TiO_2 의 함량을 1 - 20 wt%로 조절하여 합성을 시도하였음
- 원활한 혼합을 위하여 IPA의 양을 늘리고 모든 조건에서 고정하였으며 아래 그림과 같은 실험방법을 통해 시료를 제조하였음

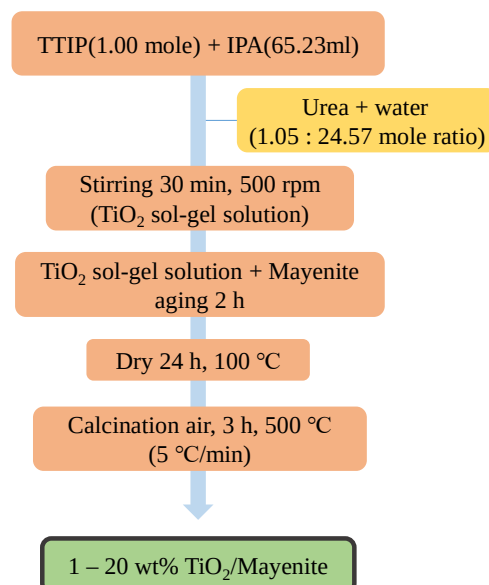


그림 59. TiO_2 함량에 따른 TiO_2 -mayenite 제법 (용매인 IPA 양을 일정하게 고정한 조건)

- 제조된 시료의 특성분석을 위하여 XRD와 SEM, BET 분석을 실시하였음
- XRD 분석결과, 물이 포함되었던 결과와는 다르게 1, 3, 5 wt%에서도 높은 결정성을 유지하였으며, SEM 분석에서도 TiO_2 가 매개담체에 더욱 고르게 분산되고 결합된 것을 확인할 수 있었음
- 또한, 동일한 배율에서 10 wt% TiO_2 /M이 TiO_2 의 입자가 가장 작고 고르게 분산된 것을 확인할 수 있었으며, 이에 따라 질소산화물제거 성능이 높게 나타날 것으로 예측되었음
- BET 분석결과를 통하여 TiO_2 의 함량이 증가함에 따라 비표면적, 기공부피 및 기공크기가 증가하는 경향을 나타내었음

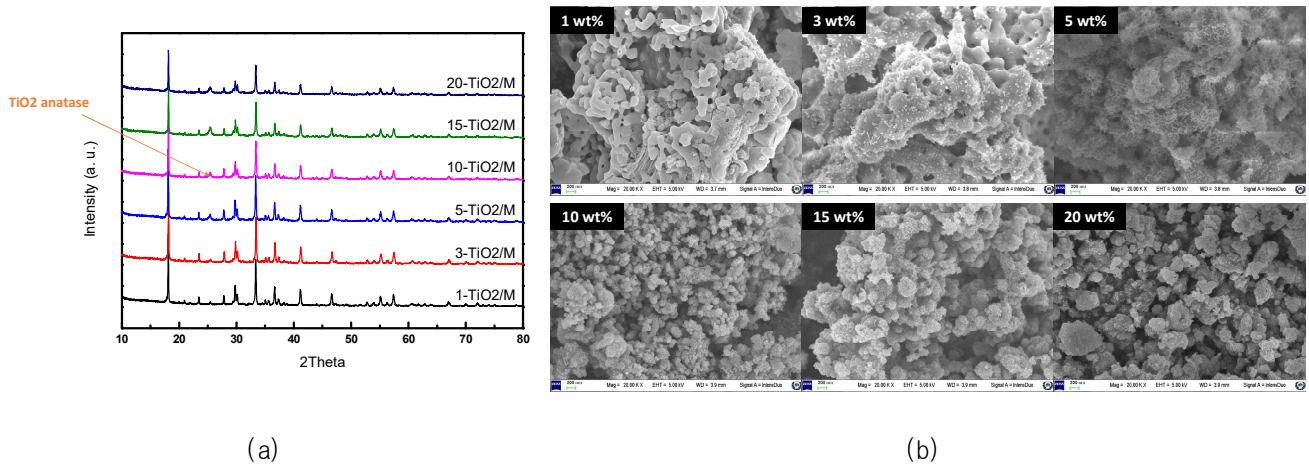


그림 60. TiO_2 함량에 따라 제조된 TiO_2 /M의 (a) XRD, (b) SEM 분석 결과

표 15. TiO_2 함량에 따라 제조된 TiO_2 /M의 비표면적, 기공부피 및 기공크기 분석결과

Sample	Surface Area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Pore Diameter (nm)
1 wt% TiO_2 /M	6.8	0.05	29.1
3 wt% TiO_2 /M	2.3	0.06	109.2
5 wt% TiO_2 /M	10.4	0.09	34.7
10 wt% TiO_2 /M	14.3	0.13	37.1
15 wt% TiO_2 /M	27.0	0.13	19.6
20 wt% TiO_2 /M	42.6	0.19	18.0
$TiO_2(500)$	20.0	0.14	29.2

- TiO_2 의 함량에 따른 시료의 질소산화물 제거 성능평가 결과를 위의 그림에 나타내었음
- IPA의 양을 TiO_2 의 함량에 따라 달리하고 물이 첨가되었던 앞선 연구결과와는 다르게 이번 연구에서는 물이 혼합되지 않으면서 질소산화물제거율이 크게 증가하였음
- 또한 예상한 결과와 같이 10 wt% TiO_2 /M에서 60분에 $2.12 \mu mol/h$, 300분에 $8.72 \mu mol/h$ 의 제거능을 나타내었으며 동일온도에서 열처리 된 $TiO_2(500)$ 에 비해 광촉매인 TiO_2 의 함량이 1/10로 감소하였음에도 불구하고 높은 질소산화물 제거 성능을 나타내었음
- 따라서, TiO_2 -매개담체를 기포콘크리트에 혼합하기 위하여 주관기관인 한국건설기술연구원과 공동연구기관인 벤텍프린티어에 연구결과를 공유하고 10 wt% TiO_2 /M을 대량으로 합성하여 제공하기로 하였음
- 또한 매개담체인 mayenite를 Lab scale로 합성하는 제법 대신 대량으로 합성이 가능한 다른 제조법에 관한 연구가 필요한 것으로 사료되었음

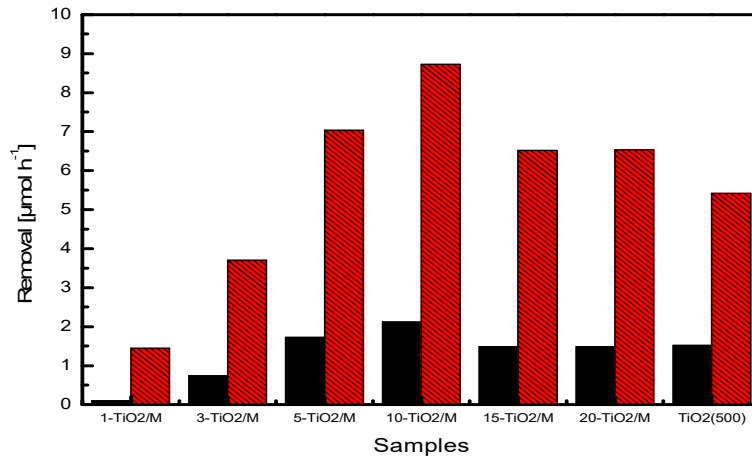


그림 62. TiO_2 함량에 따라 제조된 TiO_2/M 의 질소산화물 제거성능 평가 결과 (IPA 양을 일정하게 고정한 조건)

③ Mayenite의 대량합성 제법 확립

○ Mayenite의 대량합성 제법 확립 및 소성 온도에 따른 결정특성 분석

- TiO_2 -매개담체의 대량합성을 위하여 매개담체인 mayenite를 대량으로 합성하기 위하여 기존의 합성법이 아닌 대량으로 합성할 수 있는 제법에 관해 연구하였음.
- Mayenite의 주 성분인 칼슘과 알루미늄을 CaCO_3 형태와 Al_2O_3 의 형태를 mayenite의 몰 비와 일치하도록 알루미나 볼 밀에 장입하고 볼과 함께 24시간 반응시켜 주었음.
- 이를 건조하고, mayenite가 형성되는 온도를 확인하기 위하여 소성온도를 900 °C에서 1200 °C까지 100 °C 간격으로 변화를 주어 열처리를 시도하였음.
- 자세한 mayenite의 대량합성 방법을 아래의 그림 (a)에 나타냄.

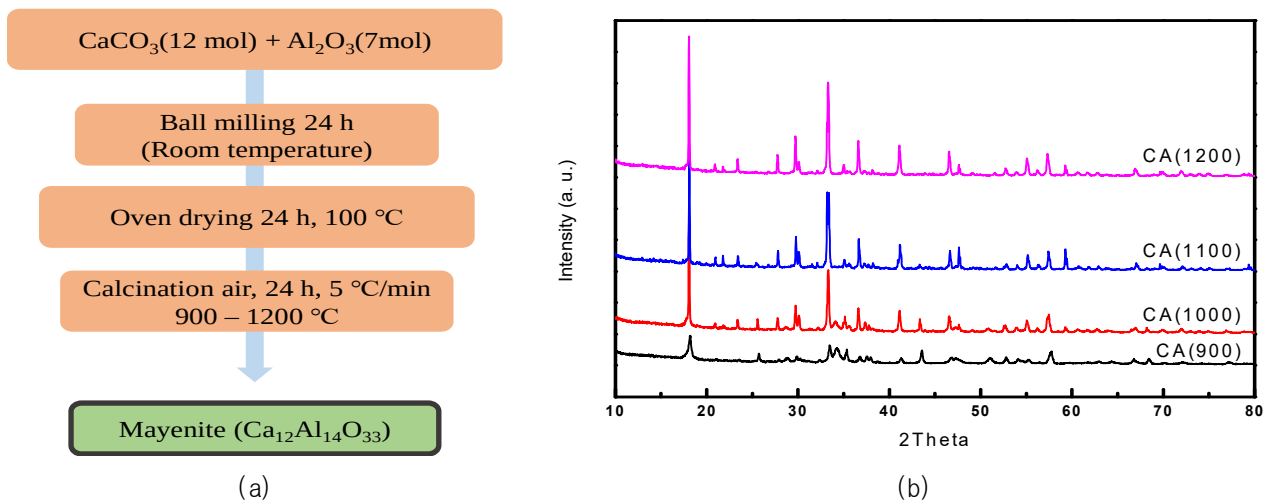


그림 64. (a) Mayenite의 대량합성 제법 및 (b) mayenite의 소성온도에 따른 XRD 패턴

- 소성온도에 따라 합성된 mayenite (mayenite로 합성되지 않은 시료도 존재하기 때문에 CA로 명명)를 XRD와 BET 분석을 실시함
- XRD 분석을 통하여 소성온도가 낮은 900 °C 시료인 CA(900)은 산화칼슘, 산화알루미늄의 형태로 각각 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 소성온도가 증가함에 따라 칼슘과 알루미늄이 결합되면서 1100도 이상에서 mayenite 피크가 나타나는 것을 확인하였으며, 1200 °C에서 mayenite 피크만이 확인되었음
- 따라서 1200 °C에서 열처리가 이루어져야 mayenite가 합성됨을 확인하였으며, 1200 °C에서 소성된 입자를 사용하여 TiO_2 를 결합시켜 주관 및 공동연구 기관에 제공하기로 결정하였고, 보다 깊은 연구를 위하여 소성온도별로 합성된 시료에 TiO_2 를 결합시켜 상세한 분석을 실시하기로 함
- BET 분석결과, 높은 열처리 온도로 모든 시료에서 낮은 비표면적을 나타내었으며, 기공은 20 nm 이상의 메조포러스한 구조를 나타내는 것을 확인하였음

표 16. Mayenite의 비표면적, 기공부피 및 기공크기 분석결과

Sample	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Diameter (nm)
10 wt% TiO ₂ /M(900)	18.2	0.09	21.4
10 wt% TiO ₂ /M(1000)	16.2	0.09	22.7
10 wt% TiO ₂ /M(1100)	19.2	0.10	22.8
10 wt% TiO ₂ /M(1200)	17.3	0.11	27.1

- 소성온도에 따라 mayenite를 합성하였으며, mayenite를 TiO₂와 결합하였음
- TiO₂ 졸-겔 용액을 우선적으로 합성하였으며, 겔 상태의 TiO₂ 용액에 매개담체를 첨가하여 제조하였음. 이때 TiO₂의 함량은 앞선 연구 결과를 바탕으로 가장 높은 질소산화물 제거 성능을 나타내었던 함량인 전체 무게의 10 wt%가 되도록 고정하였음
- 질소산화물 제거성능 평가 결과, mayenite가 존재하는 TiO₂/M(1200) 시료에서 가장 높은 성능을 나타내어 60분에 1.32 µmol/h, 300분에 5.54 µmol/h를 나타내었음
- Lab-scale로 제조할 경우보다 다소 감소하였으나 높은 질소산화물 제거 성능을 유지하고 경향성 있는 결과를 얻을 수 있었음

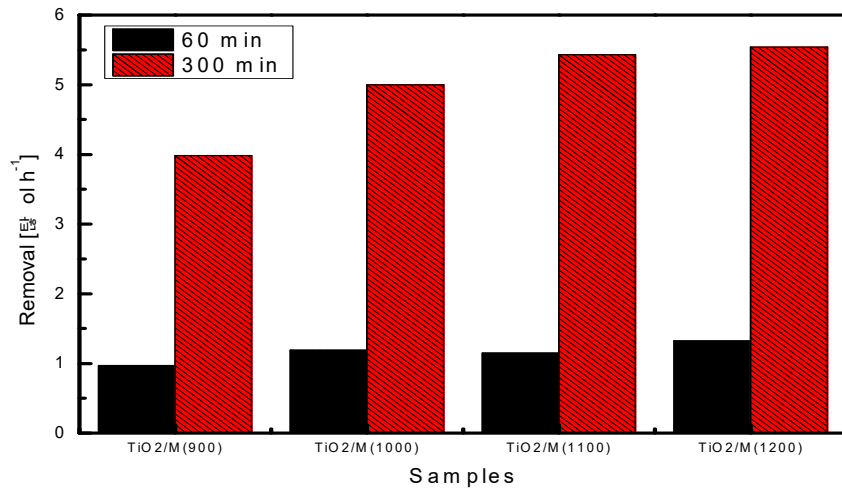


그림 65. Mayenite의 소성온도에 따른 TiO₂/M 시료들의 질소산화물 제거성능 평가 결과

○ 메틸렌블루 시험성능평가 의뢰 및 시험성적서 발급



그림 66. 메틸렌블루 시험성능평가 결과지

- 소성온도에 따른 TiO_2 -매개담체의 4개의 시료를 한국건설생활환경시험연구원에 메틸렌블루 실험 시험성적서 발급을 요청하였으며, 이에 따른 결과를 제시하였음
- 메틸렌블루 용액 내에서 높은 성능을 나타내지는 못하였으나 소성온도가 증가함에 따라 성능이 증가하는 경향을 보였고 자세한 내용은 시험성적서에 명시되어 있으며 증빙자료로 이를 제출함

○ 다공성 콘크리트 필터 시험체 TiO_2 -매개담체 코팅처리

- 연구결과를 종합하여 볼 때 최적의 샘플은 1200도에서 소성된 mayenite에 10 wt%의 TiO_2 가 결합된 10 wt% $TiO_2/M(1200)$ 샘플로 물리화화적인 특성과 높은 질소산화물 제거 성능을 나타내어 최적의 시료로 사료되었음
- 이에 따라 이 샘플을 준비하여 기포 콘크리트에 코팅하는 방식으로 결합하여 질소산화물 제거 성능을 파악하였음
- 아래의 그림과 같이 제법이 확립된 TiO_2 졸-겔 용액을 준비하고, TiO_2 함량이 10 wt%가 되도록 mayenite를 준비하였고 1회, 2회, 3회의 TiO_2 -매개담체 광촉매 코팅, 각각 시험체에 진행하여 비교 및 분석함(주관/공동기관 실시)
- 3회의 코팅 방법은 1회 코팅 후 약 30분간 오븐에서 건조하고 2회 코팅을 수행, 30분 건조 후 3회 코팅을 진행하는 방식으로 진행하였음.
- 건조가 완료된 시편은 반응소성로에 넣고 5 °C/min으로 500 °C까지 온도를 올려 3시간 동안 유지하여 열처리를 진행함
- 열처리 후 상온으로 온도를 낮추었으며, 회수하여 주관/공동 연구기관에 전달
- 소성 후 시편은 모두 안정적으로 형태를 유지하는 것을 확인
- 최적의 코팅 양이 있을 것으로 여겨지며 주관/공동 연구기관에서 질소산화물 제거성능을 평가하여 분석함



그림 67. 제법이 확립된 TiO_2 -매개담체의 기포콘크리트 표면 코팅에 관한 과정의 이미지

2-3 de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 개발

가. 광촉매 재료 및 필터 모듈 NO 제거 성능평가

① 광촉매 재료 및 필터 모듈 성능평가 방법 확립

○ 광촉매 재료 및 필터 모듈 성능평가 방법 확립

- 본 과제에서는 개발 과정에서 여러 가지 형태의 성능평가 대상물이 생성되며, 이 대상물에 대한 광촉매 활성평가를 진행하여야 함
- 개발과정에서 광촉매 활성의 평가가 필요한 대상물은 광촉매 분말, 광촉매를 적용한 다공성 콘크리트, 광촉매 다공성 콘크리트 블록, 광촉매 콘크리트 블록이 적용된 다공성 콘크리트 필터 모듈임
- 각각의 대상물은 크기, 형태 등에 차이가 있어 이에 대한 광촉매 활성을 평가하기 위해서는 적절한 평가 방법의 확립이 필요함

- 본 과제에서는 기존의 공인된 평가 방법을 우선적으로 검토하여 적용하고 공인된 평가방법이 없는 경우에는 평가 방법을 새롭게 확립한 후 규정된 평가 방법에 의하여 성능을 평가하도록 계획함
- 광촉매의 성능평가를 크게 두 가지로 구분 할 수 있음. 원재료와 부품에 관한 것과 시작품 즉 모듈이나 장치에 관한 것임. 부품으로 구분하는 것은 분말과 다공성 콘크리트 시편이며, 블록도 시편형태로 가공하여 시험하는 것으로 정리 할 수 있음. 시작품은 가공하지 않은 다공성 콘크리트 블록과 다공성 콘크리트 블록을 적용한 필터 모듈 및 모듈이 적용된 공조 장치임
- 크게 2종으로 구분한 평가 대상물에 대하여 구분하여 광촉매 성능평가 방법을 모색하였으며, 모색된 방법의 적용 방법까지를 확립하는 것을 목표로 함

○ 광촉매 부품(분말, 시편) 평가 방법 확립

- 광촉매 부품으로 구분한 광촉매 분말과 다공성 콘크리트 시편의 테스트 평가 방법을 확립함. 본 과제에서 제거 대상으로 선정한 물질은 질소산화물이며, 광촉매 질소산화물 제거 성능을 평가하는 공인시험 방법 중 시편의 평가에 활용도가 높은 방법은 ISO 22197-1에 해당됨
- 아래의 내용은 ISO 22197-1을 본 과제에서 진행하는 부품의 시험법으로 적합한지에 대한 검토하는 과정에 대하여 기술함

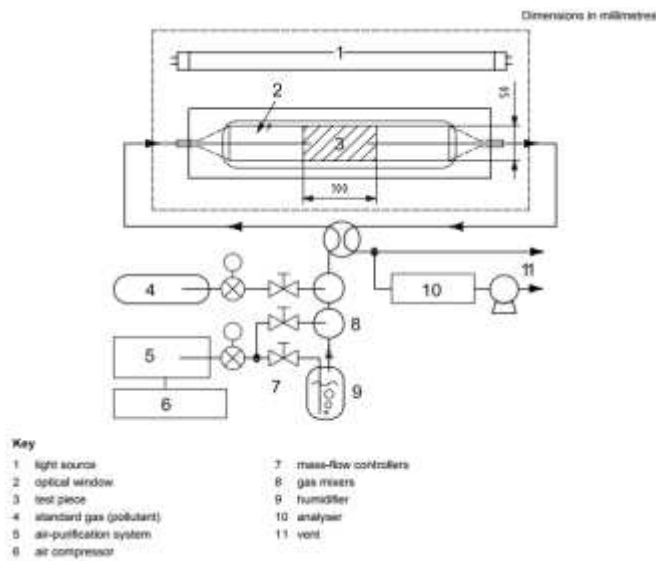


그림 68. ISO 22197-1 개요도

- 위의 그림은 ISO 22197-1 의 개요도를 보여주는 것임. 이 평가방법의 정식 명칭은 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials- Part 1: Removal of nitric oxide 임. 즉 세라믹 재료에 대하여 광촉매의 질소산화물 제거 활성을 평가하는 방법으로 규정하고 있음
- 위의 방법은 광촉매의 질소산화물 제거 성능을 평가하는데 정량적인 분석 방법으로 가장 일반적으로 활용하는 방법이며, 광촉매가 적용된 시편 형태의 시료에 대해서 광촉매 활성을 확인할 수 있음
- 본 과제에서는 광촉매가 적용된 다공성 콘크리트 시편의 광촉매 활성평가에 적용 가능한 것으로 판단함
- 위의 개요도에 근거하여 NO 가스를 공급할 수 있는 공급 시스템을 준비하였으며, ISO 22197-1에서 규정한 반응기를 기준으로 평가 장비를 구성함
- 다음은 ISO 22197-1에서 규정한 반응기 개요도와 이를 근거로 제작된 시험 장치의 사진임

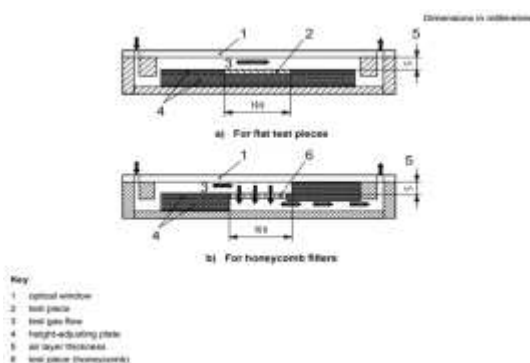


그림 69. ISO 22197-1 반응기



그림 70. 광촉매 평가 반응장치

- 광촉매 원재료로 생성되는 분말에 대한 평가는 ISO 22197-1에서 시험방법을 규정하지 않고 있다. 따라서 분말 형태의 광촉매 활성 평가는 별도의 시험 방법의 확립이 필요함
- 본 과제에서는 다양한 예비 테스트 결과를 기초로 하여 다음과 같은 ISO 22197-1을 준용하여 광촉매 분말을 평가 조건을 확립함
- ISO 22197-1 방법은 시편의 크기를 규정하고 있음. 광촉매 반응은 표면 반응이므로 광원 조사되는 대상물의 단면적이 중요하기 때문이며, 분말의 경우에 이를 유지하기 위하여 분말을 충전하는 용기를 시편의 크기와 동일하게 제작하여 사용하기로 함
- 분말의 경우에는 시편과 같이 동일한 부피를 유지하기 어려움. 또한 분말의 겉보기 밀도에 따라서 충전되는 양에 차이가 발생할 수 있음. 따라서 분말의 양을 제어하는 방법은 부피로 제어하는 방법과 무게로 제어하는 방법이 있음
- 본 실험에서는 무게로 제어하는 방법을 적용하였으며, 실험에 사용하는 분말의 무게는 3g 선정함. 무게를 확정하여 사용하는 경우에 부피의 차이가 발생할 수 있으며 이러한 부피차이는 용기의 하단에 패드를 넣어서 동일한 높이를 조정하는 방법을 적용함
- 아래의 사진은 위의 확립된 규정에 따라 준비된 분말 시료를 보여주는 것임



그림 71. 광촉매 분말 시료

- 본 과제에서 확립된 분말의 시험 방법은 개발된 광촉매 분말에 적용하기 전에 우선적으로 기존의 광촉매 분말에 적용하여 광촉매 분말의 적정성을 확인하는 작업을 진행하였으며, 개발되는 광촉매 분말의 활성과의 비교 데이터를 확보함
- 시험 시료로 활용된 제품은 다양한 선행 연구결과를 가지고 있는 P-25 제품과 국내에서 광촉매 용도로 활용도가 높은 NP-600 제품에 대하여 실험을 진행함
- 실험 실시 결과 광촉매가 적용된 시편과 다른 분말 측정의 특성을 확인함. ISO 22197-1에서 시편의 테스트에서 규정하고 있는 5시간의 광촉매 활성 시험은 분말의 경우 단시간에 피복되어 분말의 특성을 확인하는데 적합하지 않는 것으로 확인됨
- ISO 22197-1은 시편의 전처리를 위하여 세척을 진행하는데 분말의 경우 세척이 용이하지 않으며, 따라서 동일한 시료에 대하여 반복 실험을 진행하기 어려운 것으로 확인함. 이를 해결하기 위하여 분말의 광촉매 활성 실험은 동일한 조건에서 생산된 시료 분말을 분배하여 반복 실험을 진행하는 형태로 진행하기로 결정함
- 분말에 적용 가능하도록 ISO 22197-1을 준용하여 확립된 시험 방법으로 기존 광촉매에 대한 측정을 진행하였다. 다음은 측정 결과를 보여주는 것임

표 17. 기존 광촉매 광촉매 활성 평가

제조사	국가	제품명	성능(분말 3g) ($\mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot \text{h}$)	제거율 (%)
에보닉	독일	P-25	1.87	26.63
벤티크 프런티어	한국	NP-600	2.08	29.76

- 위의 측정 결과를 보면 P-25가 $1.87 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ 의 성능을 나타내는 것으로 확인되었으며, NP-600도 이와 유사한 $2.08 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ 성능을 보여주는 것으로 확인됨
- 일본에서 광촉매 제품의 최소 기준을 $0.5 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{h}$ 설정하고 있는 수준에 비하면 1시간동안에 5시간 결과 보다 높은 제거량을 확인한 것으로 매우 높은 수치를 보이는 것으로 판단됨. 본 과제에서 개발된 광촉매 분말에 대한 평가는 위의 평가 방법을 활용하여 진행하였음

② 광활성 필터 모듈의 NOx 저감 평가방법 확립

○ 광촉매 필터 모듈 시제품 평가 방법 확립

- 광촉매 필터 모듈의 평가 방법은 앞서 확립된 광촉매 부품의 평가 방법과 동일하거나 유사한 방법을 적용하는 것이 좋으나 ISO 22197-1의 반응기는 투입되는 시편의 사이즈가 100mm×50mm×10mm로 한정되어 있으며, 판형 제품만 시험이 가능한 구조로 이루어져 있음
- 따라서 광촉매 필터의 모듈 평가를 위해서 전체적인 반응기의 구조를 변경해야 함
- 광촉매 필터 모듈의 평가에는 부품의 평가와 동일한 방법의 적용이 어렵다고 판단하고 별도의 평가 방법을 모색함
- 유럽에서 사용하는 광촉매의 질소산화물의 제거 성능 평가 방법은 UNI 11247에서 규정하고 있음. 이 방법도 ISO 22197-1과 동일하게 유통식으로 평가하는 방법이며, 공급되는 가스의 농도와 조건은 차이를 보이는 것으로 조사됨
- 아래의 그림은 UNI 11247의 실험 개요도를 보여주는 것임

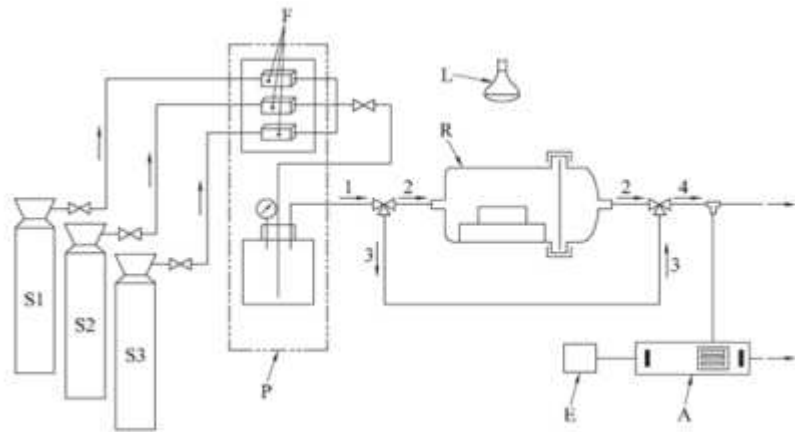


그림 72. UNI 11247 개요도

- UNI 11247과 ISO 22197-1의 가장 큰 차이점은 반응기 형태로 아래의 그림은 UNI 11247에서 규정하고 있는 반응기의 형태만을 확대하여 보여주는 것임
- 1번: 광원 (자연광 모사)
- 2번: 반응기
- 3번: 시료 (크기: $64 \pm 6 \text{ cm}^2$, 형태: 제한 없음)

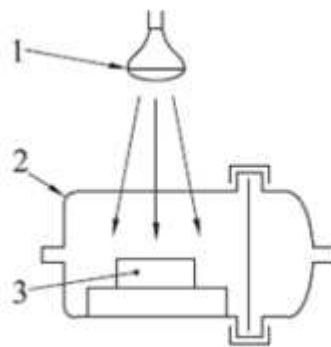
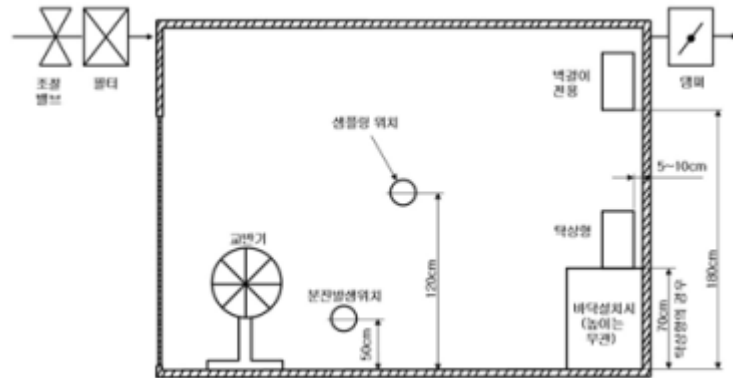


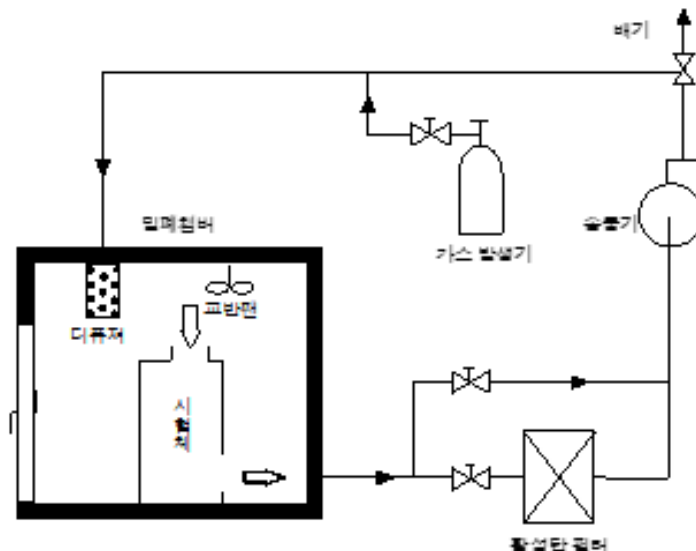
그림 73. UNI 11247 반응기

- UNI 11247의 특징을 살펴보면 광원은 자연광을 모사하는 광원을 활용하고 있음을 확인할 수 있음. ISO 22197-1에서는 UV Lamp를 사용하는 것과 차이를 보이는 것으로 확인되었고 ISO 22197-1과의 가장 큰 차이는 분석에 사용하는 시료의 형태에 관한 것임
- ISO 22197-1는 원 제품의 형태가 어떠하던지 판형의 시편으로 가공하여 실험을 진행하는 것을 특징으로 하고 UNI 11247은 최대한 원재료의 모양을 반영하기 위하여 시료의 모양에 대한 제한이 없으며, 외부 단면적만 일정하게 유지되면 시험이 가능하도록 규정됨
- UNI 11247의 평가 특징을 고려하여 광촉매 필터 모듈의 평가에 적용하여 검토함
- UNI 11247 방법은 광원이 외부에 설치되고 내부에 시료를 고정하는 형태로 구성되는데 본 과제에서 도출되는 광촉매 모듈

- 유통식 방법은 흡착 성능 등의 외부 요인을 배제하고 광촉매의 활성만을 분리하여 평가할 수 있는 장점이 있으나 반응기의 구성에 한계를 가지고 있음. 따라서 광원을 일체화하여 구비된 모듈의 평가에는 유통식 평가 방법보다 챔버식 평가 방법이 적합할 것으로 사료됨
- 본 과제는 미세먼지를 저감하기 위한 기술 개발에 관한 것이므로 우선 검토된 챔버 시험 방법은 분진 시험방법임
- 아래의 개요도는 분진시험을 진행하는 챔버의 개요도임



- 위의 장치를 보면 분진 발생장치를 내부에 장착하고 분진의 자유 낙하를 방지하고 균일한 분진의 분포를 유도하기 위하여 교반기를 설치하는 형태로 구성되어 있음. 분진 발생장치에서 대각선 거리에 모듈 또는 장비를 설치하고 공기를 챔버의 중앙에서 샘플링하여 측정하는 방법으로 파악됨
- 분진 시험 방법은 입자상 물질의 제거량을 측정하기 위한 방법이나 본 과제에서 제거하고자 하는 것으로 생성된 미세먼지의 집진 효율을 평가하기에 적합한 것으로 판단됨
- 그러나 최종적으로 미세먼지 저감 성능을 하더라도 생성된 미세먼지에 대한 것을 확인하여 광촉매 성능을 확인하는 것이 아니라 미세먼지 전구물질인 질소산화물의 제거를 측정해야 함으로 분진 시험 챔버 방법은 적합하지 않은 것으로 판단하였음
- 미세먼지는 입자상으로 구분되나 미세먼지 전구물질인 질소산화물은 가스상이기 때문이며, 이에 따라서 입자와 가스의 거동 차이가 발생할 것으로 판단됨. 또한 평가에 적용되는 평가 장비가 적합하지 않은 것으로 판단함



- 가스상 챔버 시험 규격은 공기청정기 평가 규격 중 탈취 시험규격이 이에 해당하는 것으로 조사됨. 위의 그림은 CA 규격 중에서 탈취 시험에 활용하는 챔버를 표시한 것임
- 위의 개요도에서 보는 것과 같이 외부에서 가스를 주입하고 시험체를 챔버 내부에 위치한 후에 내부의 공기를 샘플링하여 분석하는 형태임. 이 탈취 챔버에서 유해가스 운용하는 가스 중에는 질소산화물을 포함되지 않은 것으로 확인됨
- 위의 탈취 시험의 분석에 사용되는 측정 장비는 FTIR의 활용도가 높은 것으로 조사됨. FTIR은 질소산화물의 분석이 가능하며, 이를 활용하면 관측매 필터 모듈의 평가가 용이할 것으로 판단됨

-
- 아래의 사진은 위의 탈취 시험 챔버의 기준을 참고하여 제작한 실험 챔버의 모습을 보여주는 것임



그림 76. 시작품 시험 챔버

- 전체적인 챔버의 크기는 8m³으로 하였으며, 챔버 내부의 균일한 가스의 분포를 위하여 내부 교반 팬을 설치함. 개발되는 시작품을 외부에서 조작하기 위하여 챔버의 측면에 글로브를 설치하여 실험 조건에 맞춰 내부에 설치된 장치의 조작이 가능하도록 구성함
- 가스의 인입을 위한 라인과 분석을 위한 샘플링 라인 및 잔유 가스를 제거하기 위한 배기 라인을 구비하였으며, 인입 가스는 N₂를 주입하는 방식으로 설정하였고, 주입되는 농도 및 실험 시간은 예비 실험을 통하여 결정함
- 분석장비는 FTIR(Model: ABB MB3000)을 활용하고자 하며, 아래의 사진은 적용된 분석기의 모습을 보여주는 것임



그림 77. FTIR 분석기

- 위의 장비를 활용하여 예비 실험을 진행함
- 우선적으로 N₂의 투입농도가 정상적으로 측정되는지 검토를 진행함. 챔버 내에 N₂ 1ppm을 투입하여 측정한 결과 챔버 내의 유동에 따라서 결과 값이 흔들리며, 편차가 최대 0.5ppm에 이르는 것으로 확인됨
- 1ppm 농도 조건에서 측정을 진행하게 되면 오차범위가 크게 나타날 수 있는 것으로 판단되었음. 따라서 초기 투입 농도를 높여서 측정을 진행하는 방안을 수립하고 투입농도를 5ppm으로 조정함
- 광촉매가 질소산화물을 제거하는 원리에서 공기 중의 수분량이 상당히 중요한 변수로 작용함. 따라서 재현성이 있는 실험을 진행하기 위해서는 일정한 수분 조건을 확립하여야 함. ISO 22197-1의 경우 이러한 특성을 반영하여 상대습도 50% 조건에서 실험을 진행하고 있음
- 챔버 실험도 ISO 22197-1 실험과 동일하게 습도 조건은 50%로 진행하는 것이 안정적인 것으로 판단하고 수분 공급을 진행하였음
- 수분을 공급하여 N₂의 농도를 측정한 결과 수분을 포함하기 전과 농도 차이가 발생함을 확인할 수 있었음. 이는 FTIR의 N₂ 측정 피크가 수분 피크와 일부가 겹치는 부분이 발생하는데 수분이 공급됨에 따라서 영향을 받는 것으로 확인됨
- 수분의 영향을 줄이기 위하여 FTIR로 인입되는 샘플 가스 라인에 수분 트랩을 설치하여 샘플링 가스가 수분의 영향을 받지 않도록 조치하였으나 이렇게 측정한 값도 수분에 영향이 지속적으로 나타남을 확인함
- 아래의 그래프는 예비 테스트를 진행한 결과를 보여주는 것임
- 일정 농도를 주입하고 측정을 진행하는 경우 안정화 되지 않고 매우 큰 폭으로 진동하는 형태를 보여주는 것을 확인함

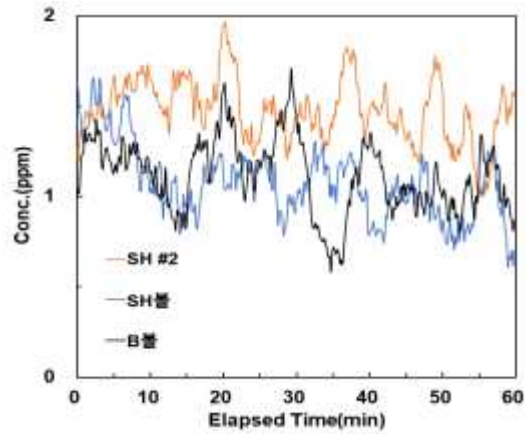


그림 78. 예비 테스트 (수분영향)

- NO의 측정은 FTIR로 진행하기 어려운 것으로 판단하고 NOx 전용 장비를 활용하는 방법으로 분석기를 교체함. 아래의 사진은 분석에 활용된 NOx 측정 장비를 보여주는 것임
- 광촉매 다공성 필터 모듈 제작 전에 평가 방법을 확립하기 위하여 기존에 광촉매를 활용하는 공기청정기 제품에 대한 예비 실험을 실시함. 챔버 내에 5ppm의 농도를 충전하고 자연적으로 감소하는 농도를 5시간 동안 측정하였으며, 이러한 실험은 4회 반복 확인함. 아래의 표에 밀폐 테스트 결과를 나타냄.



그림 79. NOx 측정 장비

표 18. 밀폐 테스트

구분	1회	2회	3회	4회	평균
감소농도(ppm)	0.016 ppm	0.011 ppm	0.009 ppm	0.005 ppm	0.01 ppm

- 위의 결과에서 보는 것과 같이 5ppm을 충전하면 5시간 동안 약 0.01 ppm의 자연 감소가 발생함을 확인할 수 있으며, 이는 전체량의 약 0.2%에 해당하는 양으로 자연 감소에 의한 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단함
- 실험 시간을 조정하기 위하여 기존에 활성이 매우 높은 필터가 다량 충전된 공기정화기 제품(A)과 활성이 낮은 소량(B)의 필터가 충전된 제품을 투입하여 예비실험을 진행함. 다음의 표는 A 제품과 B 제품의 측정 결과를 나타냄

표 19. 예비 테스트

구분	1시간	2시간	3시간	4시간	5시간
A 제품 제거율 (%)	31	52	72	100	100
B 제품 제거율 (%)	4	8	12	15	20

- 위의 예비 실험 결과를 분석해 보면 ISO 22197-1과 같이 5시간을 기준으로 평가하게 되면 활성이 높은 제품은 4시간 경과 후부터 100%에 도달하여 다른 제품과의 변별력을 확보하기 어려운 것으로 나타났으며, 낮은 활성을 나타내는 제품의 경우에는 2시간 경과 후에도 10%에 미치지 못하는 효과가 확인됨
- 실험 편의성을 위하여 실험시간은 최소로 하고 제품의 품질에 변별력은 높이기 위하여 기존의 5시간 평가를 3시간으로 단축하여 진행하는 것으로 챔버 실험 조건을 확립함
- 다음은 최종 확정된 챔버 실험 조건에 대한 것임
 - 분석챔버: 8 m³, 대상가스: NO, 가스농도: 5 ppm $\pm$ 0.5 ppm, 습도: 50% $\pm$ 5%, 온도: 25℃ $\pm$ 5℃,
 - 측정시간: 5시간 이내 (단, 3 시간 이내에 목표값 달성 시에는 3시간으로 설정함)

③ 광활성 필터 모듈 기본 설계

○ 광촉매 필터 모듈 시작품 설치 위치 도출

- 광촉매 필터 모듈의 형태 및 구조를 결정하기 위해서는 광촉매 필터 모듈을 설치하는 공간에 대한 정보가 필수적으로 필요함
- 따라서 광촉매 필터 모듈 시작품을 우선적으로 적용할 공간을 선정하는 작업을 진행함
- 대기 중에 배출되는 질소산화물은 많은 부분이 차량에서 배출되므로 질소산화물의 농도가 차량이 운행되는 도로변의 농도가 높음. 광촉매 필터 모듈은 기본 적으로 광원의 점등과 팬의 구동이 필요하며, 이를 위하여 전원의 공급이 필요함



그림 80. 장치 설치 방안

- 질소산화물의 농도가 높고 전원의 공급이 용이한 장소는 위의 그림에서 보여주고 있는 가로등에 설치하는 방안과 버스 정류장에 설치하는 방안을 도출함
- 예시 1안은 가로등에 공기정화기를 설치하는 방안으로 가로등이 도로변에 일정한 간격으로 설치되어 있으며, 별도의 전기 시설이 없이도 전원의 확보가 용이한 장점이 있으며, 가로등의 위치와 가로등의 지지력을 감안할 때 소형 장치의 설치가 필요한 것으로 판단됨. 따라서 설치 관리 측면에서는 효율적이지 못한 것으로 사료됨
- 예시 2안은 버스정류장에 장치를 설치하는 방안으로 가로등과 동일하게 별도의 전원 공급을 위한 기반작업이 필요하지 않으며, 비교적 큰 중형 설비의 설치가 가능할 것으로 판단됨. 또한 광촉매 필터 모듈을 설치함에 따라서 대기중의 질소산화물 제거 효과를 버스 정류장에 대기하는 인원들에게 바로 전달할 수 있는 장점이 있음
- 단 버스 정류장의 경우에는 사이의 공간이 상당히 떨어져 있어서 다수의 광촉매 필터 모듈의 설치에 어려울 것으로 판단됨
- 본 과제에서는 우선적으로 버스 정류장에 설치 형태를 개발안으로 선정하고 사업이 완료되어 응용되는 기술로 가로등처럼 확대할 수 있는 방안을 모색하기로 함

○ 광촉매 광원 실험 및 선정

- 촉매의 정의는 자신이 변화하지 않고 반응속도나 반응의 시작을 용이하게 하는 물질을 뜻하며, 광촉매는 빛을 에너지원으로 하여 촉매 반응이 나타나는 반도체 물질을 의미함
- 광촉매는 밴드갭 이상의 에너지를 주어야 하며, 이 에너지는 광원에 의하여 주어짐
- 아래의 그림에 광촉매 매커니즘을 나타냄



그림 81. 광촉매 활성화 원리

- 이산화티탄의 밴드 갭 에너지는 3.2eV 이며, 이 에너지를 주기 위한 파장대는 380nm에 해당함. 따라서 광촉매의 활성화에 필요한 광원은 380nm 이하 파장대의 빛 즉 자외선 대역의 광원이 필요함
- 태양광에는 광촉매 활성화에 필요한 파장대가 다량 포함되어 있으나 상시적으로 운영이 필요한 광촉매 필터 모듈의 특성상 인공 광원의 적용이 반드시 필요함
- 인공광으로 광촉매 활성화할 수 있는 파장대를 조사 가능한 종류들은 메탈램프, 수은램프, UV 형광 램프, UV LED 등이 있음. 메탈램프와 수은 램프는 태양광과 유사한 파장대를 나타내는 것으로 적외선, 가시광, 자외선을 모두 포함하며, 높은 출력으로 강한 광 조사가 가능함
- 이 램프들은 매우 고가이며, 높은 열을 발생하여 별도의 발열 장치의 구성이 필요함
- 버스 정류장에 설치되는 크기의 광촉매 필터 모듈의 구성에는 UV 형광램프나 UV LED의 사용이 적합한 것으로 판단됨
- UV Lamp는 저렴하게 구매가 가능하며, 광원의 조사 방향이 360° 로 매우 넓은 면적으로 광이 조사되는 장점이 있음
- UV lamp의 수명은 약 6,000시간에서 8,000시간 정도로 알려져 있으며, 광량을 높이기 위해서는 Lamp의 크기가 커져야 하는 단점을 가지고 있음
- UV LED는 약 20,000시간에서 50,000시간의 수명을 갖는 것으로 알려져 있으며, 광을 집적화하여 크기의 변화가 거의 없이 광량을 높일 수 있음. 단 UV LED의 가격이 상대적으로 고가이며, 광의 직진성이 높아 조사 면적이 매우 좁게 형성됨. 또한 발열 문제가 해결되지 않으면 수명이 급격히 단축되는 것으로 확인됨
- 광원을 선정하기에 앞서서 광촉매의 활성화 광원 조건을 확인하기 위하여 예비 실험을 실시함
- 우선적으로 실시한 실험은 광촉매 활성화에 필요한 광량조건을 확인하기 위한 것으로 동일한 광촉매 시료를 대상으로 광량을 변화하면서 광량에 따른 광활성의 변화를 관찰함
- 아래의 그래프는 광량별 테스트 결과를 보여주는 것임
- 이 실험에 사용한 광원은 UV BLB 10W Lamp를 사용하였으며, 광량의 조정은 광원과의 거리를 조절하여 시료에 도달하는 광량의 변화를 확인함
- 광활성 평가의 대상가스로는 아세트알데히드를 활용하였으며, 평가 방법은 ISO 22197-2를 준용하여 시험함

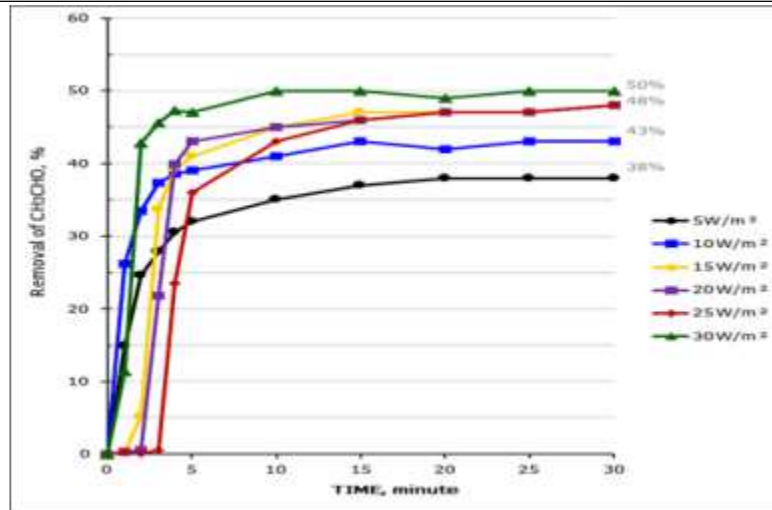


그림 82. 광량 변화 실험

- 위의 실험 결과를 분석해 보면 UV 광량이 증가하면 광활성도 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 증가율이 광량의 증가량에 비례하지는 않음. 낮은 광량에서의 변화율은 큰 반면에 높은 광량에서의 변화율은 낮아지며 최소 5W/m² 광량에서 광촉매가 활성화 되는 것으로 확인함
- 본 과제에서 광원으로 활용이 가능한 것은 LED와 Lamp로 확인되며, 최근에는 LED를 적용하는 것이 일반적인 것으로 조사되었고 LED에 대한 광원 적정성을 검토함
- 광원 검토에 사용된 UV LED는 385nm 파장대의 1W 스펙을 가진 것으로 현재 국내에서 사용량이 많은 종류를 선정하여 실험을 진행함. 다음은 유기물 제거 실험 결과임
- 실험 결과를 보면 동일한 스펙을 갖는 UV LED의 경우에도 제조사의 차이에 따라서 활성의 차이가 발생함을 확인할 수 있으며, 같은 제조사의 경우에도 구별되는 랭크가 있어서 파장차이가 발생하는 것으로 조사됨
- 광촉매 활성화 광원으로 UV LED를 적용하려면 보다 세분화된 실험이 필요하며, 이를 통하여 확정된 스펙은 정확한 범위를 정하는 것이 좋을 것으로 판단되며 기초 실험을 통하여 UV LED와 UV Lamp 모두 사용이 가능한 광원인 것으로 판단함

표 20. 제조사에 따른 UV LED의 유기물 제거 실험 결과

회사명	국적	아세트알데히드 제거율 (%)
H	중국	12.06
S	한국	17.30
L	대만	18.0

○ 광촉매 필터 모듈 기본 구성안 확정

- 광촉매 필터 모듈의 기본적인 구성안은 본 과제의 계획서에서 제시한 아래의 개요도를 기본으로 함
- 광촉매가 적용된 다공성 콘크리트 블록을 구비하고 이 블록에 광촉매 활성을 위하여 UV 광원을 조사하며, 광촉매의 작용에 의하여 질산염이 누적되면 다공성 콘크리트 블록의 재생을 위하여 물을 분사하는 세척 장치를 구비하는 구조임

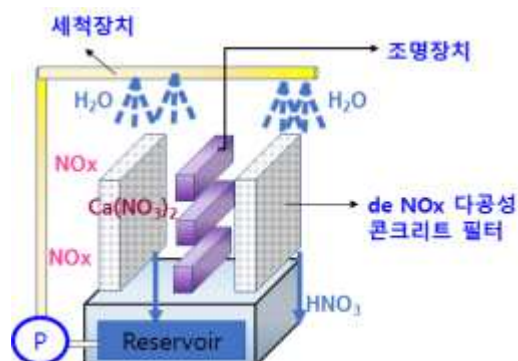


그림 83. 필터 모듈 개요도

- 위의 개요도를 구체화하여 광촉매 필터 모듈의 구성안을 구체화하는 작업을 진행함. 우선적으로 광촉매가 적용된 다공성 콘크리트의 필터화가 필요하며 필터화가 가능한 형태를 모색함. 아래의 형태는 일반적으로 필터로 많이 활용되는 허니컴 필터 형태를 보여주는 것임



그림 84. 허니컴 형상 예시

- 우선적으로 검토할 수 있는 방법은 다공성 콘크리트를 위의 그림과 같은 허니컴 구조로 만드는 방법과 일정 크기의 칩을 만들어 필터 케이싱에 적층하는 방법을 모색할 수 있음. 다공성 콘크리트 필터의 형태를 구성하는데 가장 중요한 변수는 공극을 유지한 상태에서 형태의 유지나 제작이 가능한지에 관한 것임
- 본 과제에서 제작하는 광촉매 필터 모듈 시작품은 여러 가지 형상의 다공성 콘크리트 필터의 적용이 가능한 구조를 반영하여 설계를 진행함이 적합한 것으로 판단하였으며, 최종 확정된 안을 기준으로 양산 구조는 별도로 구성하는 것이 적합한 것으로 사료됨
- 아래의 개요도는 광촉매 필터 모듈의 내부 구조를 보여주기 위한 것임. 다공성 콘크리트는 장치 내부에 충전하고 충전된 다공성 콘크리트 사이에 광원을 설치하고 하단에 물 탱크를 구비하여 상부에서 세척수를 분무하면 탱크에 다시 모일 수 있도록 구성함
- 출구 쪽에는 외부로 다량의 수분이 분출되는 것을 막기 위하여 수분 제거기를 설치하는 안을 검토하였으며, 출구쪽에 브로워를 설치하는 방안은 확정함
- 실험을 통하여 세척을 위한 수분의 분무 후에 외부로 다량의 수분이 분출 되는 경우에 활용이 필요한 것으로 판단됨
- 도출된 개요도에 의하여 실제적인 광촉매 필터 모듈 시작품을 제작하기 위해서는 확정되지 않은 광촉매의 필터의 형태, 광촉매 광원의 종류, 광원의 설치 위치, 광원의 수량, 필터의 적용 위치 등의 규격을 확정이 필요함

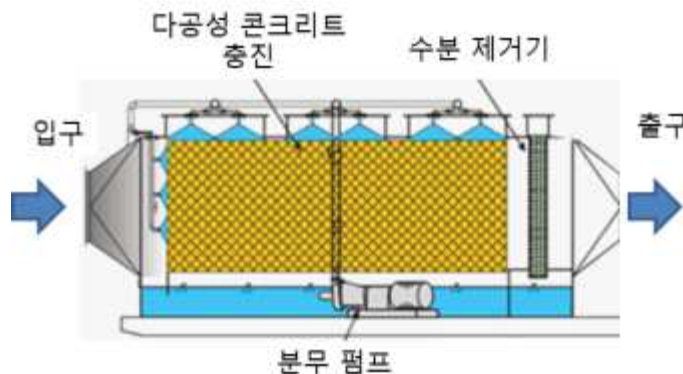


그림 85. 광촉매 필터 내부 개요도

나. de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 NOx 저감 성능 평가

① de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 제작 기술 개발

○ 광촉매 필터 모듈 시제품 설계 및 제작

- 다양한 형태의 다공성 콘크리트 필터와 광원의 종류의 교체 및 세척 방법의 검토등을 위하여 내부 구조를 최대한 자유롭게 구성할 수 있도록 광촉매 필터 모듈 케이싱을 설계함
- 다음의 그림은 1차 설계된 광촉매 필터 모듈 케이싱 도면을 보여주는 것임

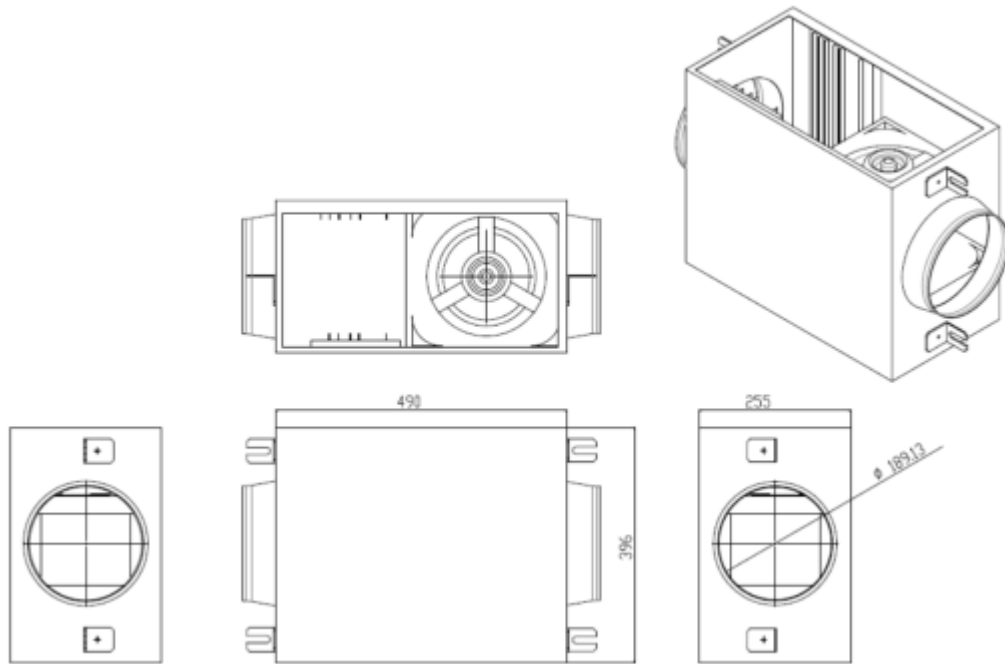


그림 86. 광촉매 필터 모듈 케이싱 도면

- 위의 도면에서 보는 것과 같이 광촉매 필터 모듈 케이싱은 가장 단순한 형태의 송풍기 구조로 설계함
- 위의 도면의 우측 부분에 토출부에 브로워를 설치하여 공기를 배출할 수 있도록 구성하였으며, 필터의 전단부에 공간을 확보하여 광원과 다공성 콘크리트 필터를 장착할 수 있도록 하였음. 또한 세척 모듈도 삽입이 가능하도록 최소한의 브리켓만을 배치함
- 다음은 설계에 따라 제작된 광촉매 필터 모듈 케이싱을 보여주는 것임



그림 87. 광촉매 필터 모듈 케이싱

○ 광촉매 필터 모듈 케이싱 구성 사양

- 설계된 광촉매 모듈 케이싱은 제작하고 내부 구성을 위하여 세부적인 사양을 정리함
- 광촉매 필터 모듈 시작품에 사용할 광원을 확정하는 작업을 진행함
- 앞서 광원 검토에서 확인하였듯이 UV LED를 우선 검토함
- 광원이 사용하는 조건이 광촉매 필터의 동일선상에 배치되어야 함으로 광촉매 필터를 세척하는 세척수가 광원으로 분무 될 가능성이 높음
- 따라서 설치되는 광원은 물의 분무에 안전하도록 방수처리가 되어야 하며 광원을 광촉매 필터에 조사하면서 방수처리하는 방법은 자외선 투과가 가능한 석영 튜브에 광원을 넣는 방법이 가장 적합한 것으로 판단함
- 석영 튜브를 사용하게 되면 UV LED의 방수는 가능하나 UV LED에서 발생하는 열의 방출이 어렵게 되며, 이로 인하여 UV LED의 성능이 저하되는 현상이 발생하여 UV LED를 활용하여 위해서는 별도의 방열 대책이 필요한 것으로 판단됨
- 검토결과 UV LED의 방열 대책을 마련하는 방안이 쉽지 않으며, 상당한 비용이 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 과제에서 적용되는 광촉매 필터 모듈은 UV Lamp를 적용하는 것으로 결정함
- 광촉매가 적용된 다공성 콘크리트 필터는 제조상 작은 칩으로 제작이 어려우며, 허니컴 형태로도 구조를 도출하기 어려운 것으로 확인됨
- 이는 다공성 콘크리트의 특성상 내부에 형성된 다공성 공극들이 콘크리트의 강도를 저하시켜 적은 형태를 구성할 때에 부서짐이 크게 나타남
- 본 과제의 광촉매 필터 모듈 시작품에 적용한 다공성 콘크리트는 블록 형태로 적용하기로 함
- 세척방법은 앞서 개요도에서 구성한 안과 동일하게 하단에 수조를 마련하고 수조 내에 수중 펌프를 장착하여 광촉매 필터의 상부에서 분무가 가능하도록 함
- 또한 분무된 물은 다시 수조로 인입되는 구조를 확보하였다. 펌프는 제어기를 통하여 일정 시간 경과 후에 일정 시간동안만 구동하도록 제어할 수 있는 타이머를 부착함
- 다음의 개요도는 광촉매 모듈 시작품 제작을 위하여 시작품 구성도를 작성한 것임

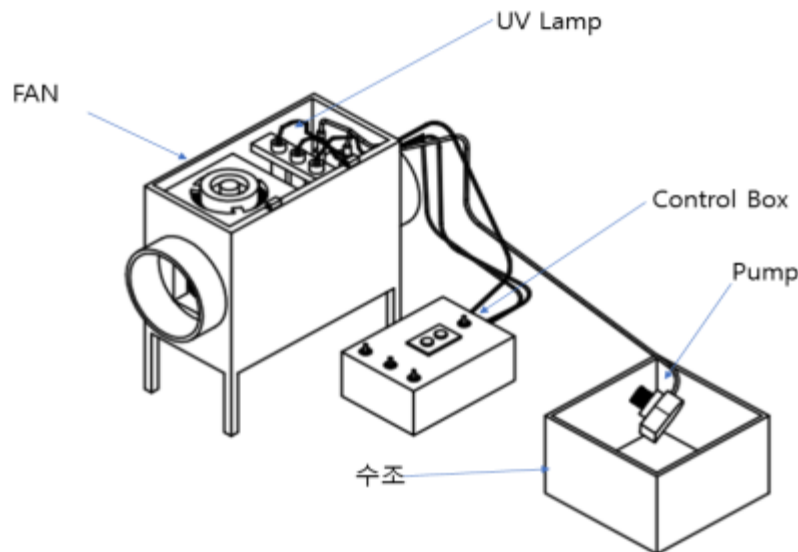


그림 88. 광촉매 필터 모듈 시작품 개요도

② de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 성능평가

○ 광촉매(P-25)를 혼입하여 제작한 다공성 콘크리트 필터 모듈 테스트

- 앞서 확립한 광촉매 필터 모듈 시작품 테스트를 위한 챔버 테스트 조건에 준하여 제작된 시작품 테스트를 진행함
- 아래의 사진은 광촉매 필터 모듈 챔버 테스트를 수행하는 모습을 보여주는 것임



그림 89. 광촉매 필터 모듈 시작품의 챔버 테스트

- 첫 번째 다공성 콘크리트 실험은 상용 광촉매(P-25)를 혼입하여 제작한 다공성 콘크리트 필터에 대하여 실시함
- 다공성 콘크리트 블록 3개를 1셋트로 구성하여 실험을 진행하였으며, 흡입 유로에서 광원 이후에 필터를 장착하는 형태로 구성하여 실험함
- 광원이 조사되는 방향이 활성화가 진행되므로 활성화된 면에 공기가 접촉하는 것이 유리할 것으로 판단함
- 다공성 콘크리트 블록을 고정하기 위하여 사출 허니컴을 활용하였으며, 다공성 콘크리트 블록을 설치하지 않은 공간은 개방하여 공기의 흐름이 원활하게 진행하도록 함
- 다음은 실험에 사용한 필터 셋트와 필터 셋트를 시작품에 장착한 모습을 보여주는 것임. 실험에 사용한 다공성 콘크리트 블록은 사용전에 세척하여 건조한 상태에서 적용함



그림 90. 다공성 필터(블록 3개)



그림 91. 시작품 내 다공성 콘크리트 필터 장착

- 위의 필터 구성으로 챔버 테스트를 진행한 결과 180분 경과 후 질소산화물 13.3%가 제거되는 것으로 확인됨
- 필터의 수량에 따른 측정치를 확인하기 위하여 다공성블록을 5개 구성, 7개 구성으로 실험을 진행함
- 아래의 그림은 5개 구성, 7개 구성의 필터 제작 모습을 보여주는 것임



그림 92. 다공성 필터 (블록 5개)



그림 93. 다공성 필터 (블록 7개)

- 제작된 다공성 콘크리트 블록의 사이즈를 감안할 때 한 면에 최대 구성 개수는 7개가 한계인 것으로 판단됨
- 5개 구성의 경우 질소산화물 제거율이 14.6%로 약간 증가하는 것으로 나타났으며, 7개로 블록의 장착을 늘리면 15.6%로 약 1%정도의 증가 되는 것을 확인함
- 효과를 높이기 위하여 단방향으로 설치되는 필터를 양방향으로 확대 구성을 진행한 후 동일한 시험을 진행하였음
- 아래 사진은 양방향으로 필터를 설치한 모습을 보여주는 것이다.

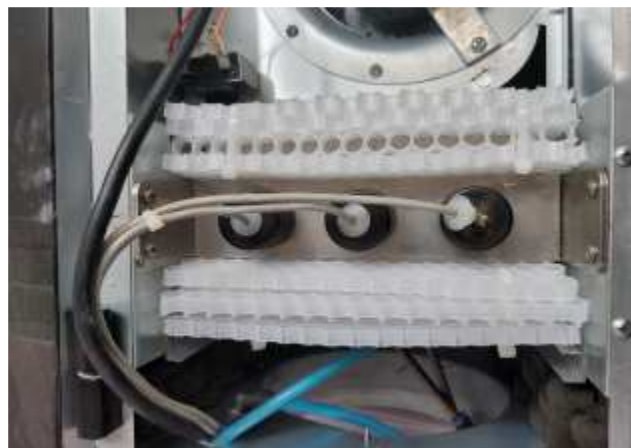


그림 94. 양방향 필터 장착 (14개)

- 위의 조건으로 측정한 결과 질소산화물 제거율 12.9%로 단방향으로 5개를 구성한 조건보다 제거율이 더 낮게 측정되는 것으로 확인됨
- 이는 광원의 앞쪽에 구성된 다공성 콘크리트 블록의 활성화된 면이 광촉매 반응에 참여하지 못하는 것으로 판단되며, 콘크리트 블록이 많아짐에 따라서 공기의 흐름이 저항을 받아서 5개 장착한 결과보다 낮은 측정치를 나타낸 것으로 사료됨
- 위의 결과를 통하여 위와 같은 다공성 콘크리트 블록은 단방향으로 7개 정도를 장착하는 것이 적합한 것으로 판단함
- 아래의 표는 광촉매를 혼입한 다공성 콘크리트 블록에 대하여 평가한 결과를 정리한 것이다.

표 21. 광촉매 혼입 다공성 콘크리트 필터 성능평가

구분	3개	5개	7개	
	단방향	단방향	단방향	양방향
질소산화물 제거율 (%)	13.3	14.6	15.6	12.9

○ TiO_2 -매개담체 광촉매 코팅 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품 성능 시험

- 다음 실험은 다공성 콘크리트에 TiO_2 -매개담체 광촉매를 2회 코팅하여 제작한 시료에 관한 것으로 앞서 실험 결과를 반영하여 단방향으로 7개를 기본 구성으로 실험을 진행함
- 초기 테스트를 실시한 결과 180분 경과 후 질소산화물 제거 효율 35.6%를 나타냄을 확인함
- 위의 필터 조건을 기준으로 내구성 평가를 실시하였다. 내구성 시험 방법은 시작품 테스트 방법과 동일하게 진행하며, 3시간 경과 후 초기 조건으로 질소산화물 농도를 재조정하여 실험을 반복함

표 22. 광촉매 도포 다공성 콘크리트 성능평가

횟수/시간		60분	120분	180분	비고
질소산화물 제거율 (%)	1회	14.8	26.2	35.6	
	2회	10.2	23.3	34.3	
	3회	9.8	21.7	31.3	
	4회	9.6	20.1	28.1	
	5회	7.9	16.0	23.3	
	6회	9.8	18.1	26.4	
	7회	7.4	15.3	21.5	
	8회	7.8	15.9	24.2	
	9회	8.7	17.3	23.5	
	10회	6.4	13.3	20.0	

- 위의 실험 결과를 분석해 보면 광촉매 도포 다공성 콘크리트 필터는 횟수를 반복하여 실험을 진행할수록 제거율이 낮아지는 것으로 확인되었으며, 이는 질산염이 다공성 콘크리트 표면에 누적되어 나타나는 결과로 판단됨
- 질산염이 누적되면 초기 활성부터 전반적으로 활성이 낮아지는 것으로 분석되며, 10회 반복 시험 결과 10%이상의 제거율 저감이 나타나는 것으로 확인됨
- 위의 실험 결과는 대기중의 질소산화물 농도보다 월등히 높은 고농도에서 진행된 것으로 대기중의 농도를 반영하여 질소산화물 제거율 저감 결과는 표시하는 것이 적합한 것으로 판단됨

○ TiO_2 -매개담체 광촉매 코팅 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품 세척 후 성능 시험

- 현장에서 질산염이 누적된 상태에서 세척을 진행하는 경우 광촉매 활성이 회복되는지를 평가하기 위하여 세척 후에 위와 동일한 방법으로 반복 실험을 진행하였다. 다음 표는 광촉매를 도포한 다공성 콘크리트 시료를 10회 반복 실험 한 후 세척을 진행하고 재측정을 진행한 결과를 보여주는 것이다.

표 23. 광촉매 도포 다공성 콘크리트 성능평가 (세척후)

횟수/시간		60분	120분	180분	비고
질소산화물 제거율 (%)	1회	14.5	26.4	35.3	
	2회	10.1	21.7	33.7	
	3회	10.1	21.5	31.4	
	4회	9.9	19.2	28.6	
	5회	7.9	15.6	22.3	

-
- 세척 후의 결과를 보면 20%까지 낮아졌던 질소산화물 제거율이 35.3%까지 회복됨을 확인 할 수 있으며, 반복 실험 결과 도 세척 전 실험결과와 큰 차이 없이 나타남을 확인할 수 있음
 - TiO_2 -매개담체 광촉매 코팅 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품 용량 분석
 - 광촉매 필터 모듈 시작품의 테스트 결과를 통하여 세척 전까지 제거한 질소산화물의 총량을 계산하면 약 26.8g의 질소산화물의 제거한 것이다. 이 수치는 세척 전에 광촉매 필터가 가지고 있는 능력치로 추산할 수 있음
 - 시간대별로 차이는 있으나 일반도로에서 평균 통행량은 5,400대 정도로 보고되고 있으며, 이 중에서 트럭의 통행량은 1,600대 정도로 확인됨(전국 도로망의 시간대별 교통량 분포 분석: 한국교통연구원 자료)
 - 본 과제에서 개발한 광촉매 필터 모듈이 영향을 미칠 것으로 기대되는 50m 이내에 영향을 미친다고 가정하고 이 구간에서 배출되는 경유자동차의 질소산화물 배출량은 약 0.0175g에 해당함(2009년 이후 경유화물차 배출허용기준: 0.35g/km 적용)
 - 평균 트럭의 운행 대수에 배출되는 질소산화물 양을 계산하면 하루에 광촉매 필터 모듈이 위치한 공간에 배출되는 질소산화물의 양은 약 28g/day에 해당함. 이 중 30% 저감을 목표로 산정하면 8.4g/day를 목표량으로 산정할 수 있음
 - 질소산화물 제거율이 20% 이하로 감소하는 시점에서 세척을 진행한다고 가정하면 약 3일에 세척을 진행하면 되는 것으로 계산되었으며, 30%이상으로 제거율을 유지하기 위해서는 약 1일에 한번 세척을 진행하면 될 것으로 판단됨
 - 질소산화물 제거 목표량을 8.4g/day로 산정하여 장비를 운용하는 경우 연간 3,066g의 질소산화물의 제거가 가능한 것으로 추산되며, 이는 나무를 85 그루를 나무를 심는 효과와 동일한 것으로 조사됨(나무의 미세먼지 흡수량:35.7g/year(국립산림과학원, 2016))
-

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 매개담체를 이용한 TiO_2 시작품
 - Sol-gel 기반 TiO_2 -매개담체 제법 최적 배합
 - Sol-gel 기반 TiO_2 -매개담체 시작품
- TiO_2 -매개담체 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 필터 시작품
 - 연속공극을 갖는 다공성 경량기포콘크리트 제조기술 및 최적배합
 - de NO_x 다공성 콘크리트 필터 최적 배합 개발
 - de NO_x 다공성 콘크리트 필터 시작품
(공극율 40% 이상, NO 제거량 $5\mu mol/50cm^2 \cdot 5hr$ (ISO 22197-1)이상 확보)
- de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품
 - 필터 모듈내 광촉매 활성 광원 및 세척 시스템 장착
 - NO_x 의 제거 다공성 콘크리트 광활성 모듈 시작품
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품 시험평가 및 검증 (3시간 이내 NO_x 30% 저감)
 - de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 내구성 90% 이상 확보(1ppm, 10회 후 세척 조건)

(2) 정량적 연구개발성과

구분		1차년도		2차년도		계	
		목표	달성	목표	달성	목표	달성
국외논문 게재	SCI	-	-	1	2	1	2 (1건 심사중)
	비SCI	-	-	-	-	-	-
	계	-	-	1	2	1	2
국내논문 게재	SCI	-	-	-	-	-	-
	비SCI	1	1	1	-	2	1
	계	1	1	1	-	2	1
특허출원	국내	1	1	1	1	2	2
	국외	-	-	-	-	-	-
	계	1	1	1	1	2	2
특허등록	국내	-	-	1	1	1	1
	국외	-	-	-	-	-	-
	계	-	-	1	1	1	1
인력양성	석사	1	1	1	1	2	2
	박사	-	-	-	-	-	-
	계	1	1	1	1	2	2
기술이전	계약건수	-	-	1 (종료후 6개월 이내)	1 (22년 4월 초 계약 예정)	1 (종료후 6개월 이내)	1 (22년 4월 초 계약 예정)
	계약액	-	-	-	-	-	-
	징수액	-	-	-	-	-	-
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	-	-	-	-	-	-
	연구시설·장비	-	-	-	-	-	-
	기술요약정보	-	-	-	-	-	-
	생명 자원	생명정보	-	-	-	-	-
		생물자원	-	-	-	-	-
		신품종	-	-	-	-	-
	소프트웨어	-	-	-	-	-	-
	화학물	-	-	-	-	-	-
기타	시작품	-	1	3	3	3	4
	성과 홍보	-	-	-	-	-	-
	일자리 창출	-	-	-	-	-	-
	국내외학술발표	-	2	-	3	-	5
	포상	-	-	-	1	-	1
	Pilot T/B	-	-	1	1	1	1
합계		3	6	10	14	13	20

※ 기술이전 : 당초 22년 1월 예정이었으나 계약 조건 협의 및 담당자의 코로나 확진 등으로 인해 지연됨

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	질소산화물 제거를 위한 TiO ₂ -mayenite 제조 방법에 관한 연구	Clean Technology	박지혜	26 (4)	대한민국	한국청정기술학회	비SCIE	2020.12	1598-9712	100%
2	Production and Evaluation of porous Photocatalyst Concrete Filter (de NO _x PCF) for NO _x Reduction	Advances in Civil Engineering	박정준	2022	대한민국	Hindawi	SCIE	2022.01.11	1687-8094	100%
3	Enhanced photocatalytic activities of TiO ₂ /Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ in NO removal	Applied Environmental Chemistry	박지혜	-	대한민국	한국공업화학회	SCIE	2022.02.24 (제출일)	1226-086X	100%

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국건설순환자원학회 2020 가을 학술대회	광촉매(TiO ₂)를 사용한 경량기포 콘크리트의 질소산화물(NOx) 저감 평가	박기준, 김성욱, 박종원, 박정준	2020.11.27	소노캄 제주	대한민국
2	한국에너지기후변화학회 2020 추계학술대회	미세먼지 저감을 위한 de NO _x TiO ₂ 광촉매의 특성 및 시험성능평가	박지혜, 조광희, 박정준, 박희주, 이광복	2020.11.26	한국에너지기술연구원 제주글로벌연구센터	대한민국
3	Advances in Functional Materials 2021 International Conference	A study on the preparation method of TiO ₂ -mayenite for NO _x removal	박지혜, 조광희, 이광복	2021.02.16	소노벨 제주	대한민국
4	한국청정기술학회 2021년 e컨퍼런스	미세먼지 저감을 위한 TiO ₂ -mayenite의 물성특성 및 de NO _x 시험성능평가	박지혜, 조광희, 홍민우, 이광복	2021.03.25	온라인	대한민국
5	한국화학공학학회 2021년도 가을 총회 및 국제 학술대회	매개담체의 소성온도에 따른 TiO ₂ -매개담체 광촉매의 특성 및 시험성능평가	박지혜, 이광복, 홍민우	2021.10.28	광주 김대중컨벤션센터	대한민국

☐ 기술 요약 정보 : 해당사항 없음

☐ 보고서 원문 : 해당사항 없음

☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 : 해당사항 없음

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	질소산화물 저감용 다공성 콘크리트 구조체와 그 제조방법, 및 이를 구비한 다공성 콘크리트 필터모듈	대한민국	한국건설 기술연구원	2020.10.15	10-2020-0133450	한국건설 기술연구원	2021.06.09	10-2265450	100%	○
2	특허	초미세기포와 매크로기포를 이용한 질소산화물 흡착용 다공성 콘크리트 구조체 및 그 제조방법	대한민국	한국건설 기술연구원	2021.12.21	10-2021-0184300	-	-	-	100%	○

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1	-	-	-	√	-	-	-	-	-	√	-

- ☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등) : 해당사항 없음
- ☐ 신기술 지정 : 해당사항 없음
- ☐ 기술 및 제품 인증 : 해당사항 없음
- ☐ 표준화 : 해당사항 없음

[경제적 성과]

☐ 시작품 제작

번호	시작품명	제작일	제작업체명	설치장소	구성	특징	이용분야
1	다공성 콘크리트용 기포발생장치 시작품	2020.07.22	(주)에스비이앤이	한국건설기술연구원(일산)	펌프 및 컴프레서, 유량제어부, 배관 부품, 기타자재	다공성 콘크리트용 기포발생 장치 시작품은 물공급 제어 모듈, 공기공급제어 모듈, 정량공급 모듈, 제어부로 구성됨. 압축공기의 압력을 조절하여 안정적으로 공기를 제어하고, 안정된 물의 공급과 발포 혼합액의 혼합을 통해 기포를 발생시킴	미세먼지 저감 de NOx 다공성 콘크리트 제작을 위한 기포 생성
2	다공성 콘크리트 적용 TiO ₂ -매개담체 시작품	2021.07.15	충남대학교 산학협력단	충남대학교 산학협력단 (대전)	TiO ₂ -mayenite 분말	다공성 콘크리트에 적용하기 위한 광촉매로 TiO ₂ 를 매개담체에 고분산화시킨 제품으로써 TiO ₂ 만 적용되었을 때와 비교하여 분말상태에서 더 우수한 질소산화물 제거 성능을 나타냄	미세먼지 저감 de NOx 다공성 콘크리트에 광촉매 특성 부여
3	TiO ₂ -매개담체 활용 de NOx 다공성 콘크리트 시작품	2021.12.13	한국건설기술연구원	한국건설기술연구원(일산)	TiO ₂ -매개담체, 다공성 콘크리트	초미세먼지(PM _{2.5}) 원인물질인 NOx를 저감시키기 위해 광촉매를 사용한 연속공급을 갖는 다공성 콘크리트	de NOx 다공성 콘크리트 필터로 활용
4	de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 시작품	2021.12.21	(주)벡텍프런티어	(주)벡텍프런티어 (광주)	송풍기, 세척 노즐, 펌프, 수조, UV lamp	de NOx 다공성 콘크리트 필터의 지속적인 NOx 저감성능을 유지하기 위한 광활성화 시스템이 적용된 필터 모듈 시작품	지자체 및 건설사 등을 통해 대기정화장치 사용

- ☐ 시제품 제작 : 해당사항 없음
- ☐ 현장적용 : 해당사항 없음
- ☐ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1	통상실시	질소산화물 저감용 다공성 콘크리트 구조체와 그 제조방법, 및 이를 구비한 다공성 콘크리트 필터 모듈	(주)벡텍프런티어	진행 중 (22년 4월 예정)	2022	10,000

별저 18. 기술실시계약서 표준서식

기술 실시 계약서

- 과제번호 : 20220114
- 예산연도 : 2020년~2021년
- 연구개발과제명 : [물리아이비] 미래건축용 de NOx 다공성 콘크리트 필터 개발
- 연구개발비 : 100,000,000원 (연구유연금 : 100,000,000원, 기밀유지금 : 0원)
- 기술실시 계약명 : 질소산화물 저감용 다공성 콘크리트 구조체와 그 제조방법, 및 이를 구비한 다공성 콘크리트 필터모듈
- 실시권리 종류 : 통상실시
- 기술료 : 계약가액의 10,000,000원 (부가세 별도)
- 기술료 : 계약가액의 2% (부가세 별도)
- 계약기간 : 2년 (2022.03.31. ~ 2024.3.30)
- 계약당사자
- 연구개발결과물 소유기관 : 한국건설기술연구원 (원 장 : 김 병 역)
- 실시기관 : (주)벡텍프런티어 (대표이사 : 기 준 종)

연구개발결과물 소유기관과 실시기관(주)벡텍프런티어)은, 연구개발결과물 소유기관이 국토교통부 "국토교통기술혁신연구사업"으로 개발한 기술을 실시기관이 실시함에 있어 다음과 같이 계약을 체결한다.

제1조 (정의) 본 계약서에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

- "기술"이라 함은 연구개발결과물 획득한 "질소산화물 저감용 다공성 콘크리트 구조체와 그 제조방법, 및 이를 구비한 다공성 콘크리트 필터모듈"(이하 출원번호 10-2020-013495) 등록특허 10-220490) 등의 명칭과 출원등록번호 없이를 말한다.
- "실시"라 함은 1)제1항 기술이 출원에 관한 것일 경우, 그 출원을 생산·사용함으로써 또는 수입하거나 그 출원의 양도 또는 대리의 창작·양도 또는 대리를 위한 전 시를 포함한다. 이와 동일(하)을 하는 행위, 2) 계약 기술이 발명에 관한 것일 경우, 그 발명을 사용하는 행위 또는 그 발명의 사용을 창작하는 행위, 3) 계약 기술이 출원을 생산하는 방법에 관한 것일 경우, 그 발명의 사용 또는 그 발명의 사용을 창작하는 행위 및 그 발명에 의하여 생산된 출원을 사용·양도·대리 또는 수입하거나 그 출원의 양도 또는 대리의 창작을 하는 행위를 말한다.

관련법령을 성실히 준수하여야 한다.

제12조 (계약 기술의 속성)

- 연구개발결과물 소유기관이 실시기관에게 허락한 실시권이 전용실시권인 경우, 실시기관은 계약 기술에 관한 특허 등의 등록 및 유지에 필요한 비용을 부담한다.
- 연구개발결과물 소유기관이 실시기관에게 허락한 실시권이 통상실시권인 경우, 연구개발결과물 소유기관은 계약 기술에 관한 특허 등의 등록 및 유지에 필요한 비용을 부담한다.

제13조 (계약)

- 본 계약에 정지되지 아니하거나 본 계약상의 책임상 이의가 있는 사항에 대하여는 쌍방의 합의에 의하여 결정한다.
- 본 계약서는 2통을 작성하여 서명·날인하고, 연구개발결과물 소유기관과 실시기관이 각각 1통씩 보관한다.

2022년 3월 31일

(연구개발결과물 소유기관)

법인명 : 한국건설기술연구원 (111241-000238) 법인명 : (주)벡텍프런티어 (200111-002805)
주 소 : 경기도 고양시 일산서구 교정대로 283(대우동) 주 소 : 광주 북구 용봉로 77, 54역1224호, 54역213호(용봉동, 전남대학교광주대(학5도원))

원 장 : 김 병 역

대표이사 : 기 준 종

☐ 사업화 투자실적 : 해당사항 없음

☐ 사업화 현황 : 해당사항 없음

☐ 매출 실적(누적) : 해당사항 없음

☐ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과			-		
사업화 계획	사업화 소요기간(년)		3		
	소요예산(천원)		1,500,000		
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
			-	10,000,000	20,000,000
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내	-	10	20
		국외	-	-	-
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		도로변에 설치 가능한 공기정화 시스템으로 제작. 개발완료 시점에 초도 제품을 생산 가능하도록 준비하고 개발된 형태를 응용한 제품의 출시가 가능하도록 준비함. 응용제품의 출시는 개발 완료 후 1년 이내에 진행 예정			
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
		-	-	-	
	수 출	-	-	-	

☐ 고용 창출 : 해당사항 없음

☐ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	1
		생산인력	-
	개발 후	연구인력	-
		생산인력	-

☐ 비용 절감(누적) : 해당사항 없음

☐ 경제적 파급 효과 : 해당사항 없음

☐ 산업 지원(기술지도) : 해당사항 없음

☐ 기술 무역 : 해당사항 없음

[사회적 성과]

☐ 법령 반영 : 해당사항 없음

☐ 정책활용 내용 : 해당사항 없음

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영 : 해당사항 없음

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
1	(주)벤티프런티어	2020.01.01	2020.04.13 ~ 2021.12.31	1	-

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
1	충남대학교 산학협력단	2020	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
				1			1					1	
2	충남대학교 산학협력단	2021	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
				1			1					1	

☐ 산업 기술 인력 양성 : 해당사항 없음

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용 : 해당사항 없음

☐ 국제화 협력성과 : 해당사항 없음

☐ 홍보 실적 : 해당사항 없음

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	연구논문	논문 발표 우수상	미세먼지 저감을 위한 TiO ₂ -mayenite의 물성특성 및 de NO _x 시험평가	박지혜, 조광희, 홍민우, 이광복	2021.03.25	한국청정기술학회

[인프라 성과]

☐ 연구시설·장비 : 해당사항 없음

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 미세먼지 저감을 위한 NOx 저감용 다공성 콘크리트 필터 및 이를 활용한 필터 모듈 개발 - TiO₂-매개담체 적용 de NOx 다공성 콘크리트 NO 제거량 5 μmol/50cm²5hr (ISO 22197-1) - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 NOx 제거율 30% 제거(ISO 22197-1 준용) - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 내구성 초기 성능 대비 90% 이상	○ 미세먼지 저감을 위한 NOx 저감용 다공성 콘크리트 필터 및 이를 활용한 필터 모듈 개발 완료 - TiO₂-매개담체 적용 de NOx 다공성 콘크리트 NO 제거량 5.28 μmol/50cm²5hr 달성 (ISO 22197-1) - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 NOx 제거율 30% 제거(ISO 22197-1 준용) (목표 5시간 이내, 달성 3시간 이내) - de NOx 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 내구성 초기 성능 대비 90% 이상(1ppm 10회 후 세척 조건)	100%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 논문 1편(비SCI) 심사중

- 당초 목표한 논문편수는 SCI 1편, 비SCI 2편이었으나 본 연구에서는 SCI 1건 비SCI 1건, 국내외 학술발표논문 5건, 논문발표상 1건을 달성하였음
 - 한편 비SCI 1건을 작성하지 못한 사유는 해당 논문주제에 대한 실험결과 도출과정(TiO_2 -매개담체 합성 및 성능평가)이 늦어져(2차년도 하반기) 데이터 확보가 늦어졌음
 - 그러나 실험결과 값이 우수하여 당초 계획한 비SCI가 아닌 SCI로 논문제출을 하고 심사중(1건)에 있음
-

2) 자체 보완활동

○ 논문 1편(SCI) 심사중

- 당초 계획한 비SCI 논문을 성과확산을 위해 SCI급으로 논문을 작성하여 심사중에 있음
 - 이외에 당초계획하지 않은 국내외 학술발표 5건을 추가 게재하였고 이중에 학술발표논문상 1건을 수상한 바 있음
-

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 연속공극 형성을 위한 다공성 콘크리트 개발과정의 성실성

- 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 제조기술 개발과 TiO_2 -매개담체 광촉매 분말을 혼입하여 de NO_x 다공성 콘크리트 다공성 필터를 개발을 동시에 진행하고자 하였으나 광촉매 분말이 다공성 콘크리트 연속공극을 얻기 위해 사용되는 기포를 소포시켜 연속공극을 얻기 어려웠음
- 이에 수많은 반복실험 끝에 연속공극을 얻는 다공성 콘크리트 제조기술을 광촉매 혼입없이 개발하고 여기에 TiO_2 -매개담체를 코팅하는 방법으로 NO 제거성능을 확보하는 de NO_x 다공성 콘크리트 다공성 필터 개발 성과를 도출함. 이는 선기포 방식을 이용하여 연속공극을 갖는 다공성 콘크리트 매우 어려운 제조기술을 획득함

○ TiO_2 -매개담체의 합성기술의 우수한 성능 발현

- 본 연구에서 개발된 TiO_2 -매개담체의 NO 제거 성능이 기존 상용제품 중 가장 우수하다고 알려진 광촉매(P-25)와 동등 이상의 성능을 발현하였고 이에 실험결과를 정리하여 당초 계획한 비SCI 논문에서 SCI로 논문 제출을 준비하고 있음
 - 그러나 논문성과는 당초 계획하지 않은 국내외 학술발표 5건을 추가 달성하였음
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 기술적 측면

- 기포제를 이용하여 연속공극을 형성시킨 경량기포 콘크리트에 TiO_2 -매개담체를 사용하여 NO_x 를 제거하도록 콘크리트 건설자재를 필터로 적용하는 기술은 국내외적으로 없는 새로운 원천기술로 대기정화 시장에 고부가가치 창출이 가능함
- 최근 개발되는 공기정화용 광촉매 필터는 세라믹 또는 섬유계열의 필터에 광촉매를 코팅하거나 TiO_2 분말을 가공처리하여 제작된 필터로 탈취와 같은 VOCs 저감 효과에 한정됨
- 광촉매 분말이 나노입자의 재응집 현상으로 분산성 감소되는 문제를 TiO_2 -매개담체 제조기술을 통한 광촉매의 분산성 향상
- de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈을 이용한 가스형태의 미세먼지 제거기술은 집진장치, 헤파필터를 통한 입자형태의 미세먼지 제거하던 기존 공기정화장치의 한계점을 극복함

○ 경제적·산업적 측면

- 세계 환경산업 중 대기분야의 시장규모는 528억 달러 이고 연평균 16% 이상 성장할 것으로 예상되는 상당한 시장의 규모임
- 국내의 경우 2016년 이후 대기관리 분야의 시장규모를 14조원으로 예상하고 이중 미세먼지 감축시장은 향후 급격히 증가하고 다양한 기능성 위주의 제품이 등장할 것으로 예상됨에 따라 NO_x 저감용 필터 모듈에 대한 제품수요가 클 것으로 기대됨
- 국내 대부분 터널의 공기정화는 환기의 위주이고 장대터널을 중심으로 집진시설이 설치되어 차량에서 배출되는 가스형태의 미세먼지 원인 물질을 처리하는 시설은 전무함
- 이에 기존 공기정화장치나 터널내 환기시설내 NO_x 저감을 위한 후처리 필터 형태로 활용될 수 있기 때문에 신규시장 진출에 진입장벽이 낮을 것으로 예상되고 관련 산업의 시장 확대를 통한 대기분야 건설자재의 신시장을 창출할 것으로 기대됨

○ 사회적 측면

- 자동차의 지속적인 증가로 국내의 경우 2011년 기준 1,465개소의 터널이 건설되었고, 1km 이상의 장대터널은 17%인 254개소로 향후 터널 건설이 증가할 것으로 예상됨
- 도로 터널 내 차량운행에 따른 NO_x 등의 오염물질이 터널출구를 통하여 집중 배출되어 터널 출구 주변 지역을 중심으로 국지적인 고농도 오염에 의한 피해사례가 발생하고 있음
- 이에 장대터널 및 도심지 터널내 미세먼지 농도를 저감시키기 위한 핵심기술로 활용되어 터널에 대한 대국민 부정적 인식을 개선하고 대기환경에 안전한 공간으로 인식
- 향후 도심지 교통량 해소를 위한 도심도 터널 등 지하교통시설 추진계획 및 건설이 확대될 것으로 예상되며 이에 도심주거지를 중심으로 청정한 대기질 확보를 위한 민원발생을 최소화하고 미세먼지 저감 정책 수립에 기여

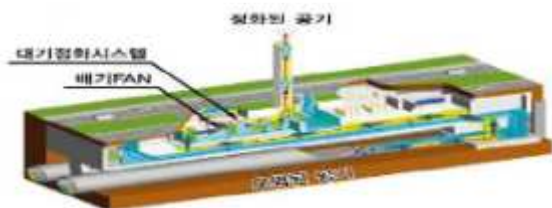
6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

가. 연구성과의 실용성 검증 방안

- TiO_2 -매개담체 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 시작품의 성능 검증
 - de NO_x 다공성 콘크리트 필터로서의 기능 검증
 - ISO 22197-1 규격에 의한 방법으로 NO 제거량 $5 \mu\text{mol}/50\text{cm}^2 \cdot 5\text{hr}$ (ISO 22197-1) 확보여부 성능 검증
- de NO_x 다공성 콘크리트 광활성 필터 모듈 개발 및 시험평가
 - 모듈내 de NO_x 다공성 콘크리트 필터의 광활성 반응을 위한 UV-LED 광원 및 조명시스템 적용 및 시작품 제작
 - 다공성 광촉매 콘크리트 필터 크기·형상 설정 및 de NO_x 다공성 콘크리트 필터 모듈 시작품의 NO_x 30% 저감 성능 검증
 - TRL 6에 준하는 유사환경을 모사하는 시작품 단계 검증 시험 실시
 - 개발된 모듈은 대기 환경을 고려하여 NO 1ppm 환경에서 효과를 검증하여 차별화
- 현장적용시 예상되는 문제점 도출 및 해결방안 검토
 - TRL 6에 준하는 유사환경을 모사하는 시작품 단계 검증 시험 실시단계에서 현장적용을 고려한 문제점 도출
 - 광촉매의 de NO_x 성능유지 상태 및 다공성 콘크리트의 먼지입자 등에 의한 공극유지 성능 검토
 - NO_x 제거성능 유지 상태를 10회 이상 반복 실험하여 적용 모듈의 재현성 및 내구성을 검증
 - 경년변화에 따른 성능저하 요인 지속적 검토 및 교체주기 등 해결방안 검토
- 향후 보완 연구
 - 사업화 추진 시 매개담체 TiO_2 광촉매 및 상용 TiO_2 적용과의 성능평가 등의 향후연구를 통해 경제성 있는 제조 방법 검토 필요
 - 광촉매는 사용에 따른 인체·환경 유해영향이 평가, 패널의 품질관리 방안 등의 추가 검토 필요

나. 연구성과의 사업화 추진 계획

- 연구 핵심기술에 대한 지적재산권 획득 및 참여기업과의 기술이전 실시(과제종료후 6개월 이내)
 - 광촉매 활용 de NO_x 다공성 콘크리트 필터 및 광활성 필터모듈 핵심기술에 대한 지적재산권
 - 연구개발과정에서 목표성능에 대한 공인성적서 획득으로 신뢰성 확보
 - 과제종료 후 6개월 이내 참여기업((주)벤텍프린티어)과의 기술실시계약 1건 이상 추진
- 사업화 추진을 위한 기술 검증(기술계약 실시 후 12개월 이내)
 - 참여기업과의 기술계약 실시 후 6개월 이내 TRL 7(실제환경 시작품 데모)~TRL 8(시제품 설치 및 성능시험) 단계 해당하는 de NO_x 저감 다공성 콘크리트 필터 모듈 성능 검증 추진
 - 대형 NO_x 공기정화장치 후처리용 필터로 Test-Bed를 통한 현장적용 추진 및 미비점 보완
 - 현장요구사항 반영한 시제품 생산 추진
- 사업화를 위한 전략 수립
 - 대기환경 관련 분야 요구 기술 및 시장분석
 - 1차 제품 제작과 업그레이드 제품 출시 계획을 병행하여 진행함.
 - 1차 제품의 경우 광원을 UV Lamp로 적용하고 사용 타이머를 장착하여 유지관리가 가능하도록 구성함. 2차 제품은 UV LED 적용 검토
 - 세척수의 관리는 6개월 관리 기준으로 관리하고 세척된 폐수를 하수로 처리 (수질 영향 없음)
 - 국내외 예상 수요처 분석 및 판로 개척을 통한 사업화 및 양산체제 구축방안 수립
 - 사업화 대상 업체 마케팅 및 시범사업 참여(도로터널 및 지하공간 시설내 공기정화장치 신규사업 참여)



지하도로 인근 대기환경 오염 저감 설비



터널내 대기환경 오염 저감 설비

그림 97. 연구성과 활용 방안

7. 참고 문헌

1. 경대승, “미세먼지 처리기법 원리 및 기술 개발 동향,” 국토연구원, 국토 제452호, pp.34-41, 2019.
2. 김광련, 이동범, 김화중, “이산화티탄(TiO_2 anatase) 분말을 광촉매로 사용한 노출 콘크리트의 VOCs(Benzene, Toluene)와 질소산화물(NO_x) 제거 특성 연구,” 한국콘크리트학회, 학술대회 논문집, pp.588-591, 2004.
3. 김순태, 김옥길, 김병욱, 김현철, “충남지역 대형 점오염원이 주변지역 초미세먼지 농도에 미치는 영향,” 한국 대기환경학회, 한국대기환경학회지, 제33권, 제2호, pp.159-173, 2017.
4. 김영규, 홍성재, 이경배, 이승우, “도로구조물 적용을 위한 광촉매 콘크리트의 질소산화물(NO_x) 제거효율 평가,” 한국도로학회, 한국도로학회지, 제16권, 제5호, pp.49-58, 2014
5. 김종호, “친환경 광촉매 기술개발 동향 및 시장전망”, 세라믹 코리아, Ceramics Korea, 제286호, pp.66-73, 2012.
6. 김태관, “광촉매 기술의 응용제품 및 광촉매 시장 현황”, 한국공기청정협회, 공기청정기술, 제18권, 제2호, pp.9-20, 2005.
7. 박기준, 박정준, 곽종원, 김성욱, “광촉매 종류 및 혼입률에 따른 효율적 광촉매 콘크리트의 제조 방법에 관한 연구,” 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제23권, 제4호, pp.69-77, 2019.
8. 서형준, 이형석, “대기오염물질이 환경성 질환에 미치는 영향: 수도권지역의 자치구 및 시군을 중심으로,” 서울 연구원, 서울도시연구, 제20권, 제3호, pp.39-59, 2019.
9. 양진, 하상욱, 이종열, “광촉매를 이용한 건축, 토목 재료의 개발현황,” 한국콘크리트학회, 콘크리트학회지, 제13권, 제2호, pp.46-50, 2001.
10. 윤영식, 박동규, 구재희, 박영수, 서용칠, “5톤/일 규모 SRF 전용 연소보일러에서의 질소산화물의 생성과저감에 대한 연구,” 한국폐기물자원순환학회, 한국폐기물자원순환학회지, 제35권, 제7호, pp.647-652, 2018.
11. 윤용상, 서신석, 조성현, 김판석, 김태균, “광촉매 플라스터의 질소산화물 제거에 관한 실증적 평가”, 한국콘크리트학회, 학술대회 논문집, 제25권, 제2호, pp.305-306, 2013.
12. 이원암, 양진, 유재상, 이종열, “광촉매 콘크리트의 특성에 관한 연구,” 한국콘크리트학회, 학술대회 논문집, pp. 575-580, 2002.
13. 이종탁, 정진성, 윤태관, 배재영, “서로 다른 구조 및 형태를 가지는 TiO_2 나노입자의 광촉매 활성,” 한국공업화학회, 학술대회 논문집, 제14권, 제1호, pp.21-24, 2010.
14. 장안수, “미세먼지가 건강에 미치는 영향,” 대한의사협회, 대한의사협회지, 제57권, 제9호, pp.763-768, 2014.
15. 홍정호, 고유경, “대기오염의 건강위해성 연구 - $\text{PM}_{2.5}$ 를 중심으로,” 한국자원경제학회, 자원·환경경제연구, 제12권, 제3호, pp.469-485, 2003.
16. 황문진, 응웬탄빈, 류광선, “아나타제/루틸 TiO_2 결정 구조에 의한 메틸렌 블루 광분해 특성 연구,” 한국공업화학회, 공업화학, 제23권, 제2호, pp.148-152, 2012
17. A. Folli, C. Pade, T. B. Hansen, T. De Marco, and D. E. Macphee, “ TiO_2 photocatalysis in cementitious systems: insights into self-cleaning and depollution chemistry,” Cement and Concrete Research, vol.42, No.3, pp.539-548, 2012.
18. C. Cárdenas, J. I. Tobón, C. García, J. Vila, “Functionalized Building Materials: Photocatalytic Abatement of NO_x by Cement Pastes Blended with TiO_2 Nanoparticles,” Construction Building Materials, Vol.36, pp. 820-825, 2012.

-
19. D. S. Kim, S. J. Han, S. Y. Kwak, "Synthesis and Photocatalytic Activity of Mesoporous TiO₂ with the Surface Area, Crystallite Size, and Pore Size," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.316, No.1, pp.85-91, 2007
 20. D. Seo, T. S. Yun, "NO_x Removal Rate of Photocatalytic Cementitious Materials with TiO₂ in Wet Condition," *Building and Environment*, Vol.112, pp.233-240, 2017.
 21. E. Boonen and A. Beeldens, "Photocatalytic roads: from lab tests to real scale applications," *European Transport Research Review*, Vol.5, No.2, pp.79-89, 2013.
 22. E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Air-void characterisation of foam concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.2, pp.221-230, 2007.
 23. G. L. Guerrini, "Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO_x monitoring results," *Construction and Building Materials*, Vol.27, No.1, pp.165-175, 2012.
 24. G. L. Guerrini and E. Peccati, "Photocatalytic cementitious roads for depollution," in *Proceedings of the International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials*, Vol.1, pp.179-186, Florence, Italy, October 2007.
 25. ISO, "Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics)-Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials-Part 1: Removal of nitric oxide," ISO, pp.22197-22201, 2016.
 26. J. H. Seinfeld and S. H. Pandis, "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change," John Wiley & Sons, New Jersey, Hoboken, 3rd edition, 2016.
 27. J. Huang, C. Zhou, X. Lee et al., "The effects of rapid urbanization on the levels in tropospheric nitrogen dioxide and ozone over East China," *Atmospheric Environment*, Vol.77, pp.558-567, 2013.
 28. J. Lasek, Y.-H. Yu, and J. C. S. Wu, "Removal of NO_x by photocatalytic processes," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Vol.14, pp.29-52, 2013.
 29. J. N. Kim, C. H. Ko, K. B. Yi, "Sorption Enhanced Hydrogen Production Using one-body CaO-Ca₁₂Al₁₄O₃₃-Ni Composite as Catalytic Absorbent," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.38, No.14, pp.6072-6078, 2013.
 30. J. O. Anderson, J. G. Thundiyil, A. Stolbach, "Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on HUMAN Health," *Journal of Medical Toxicology*, Vol.8, No.2, pp.166-175, 2012.
 31. L. Palacios, A. G. De La Torre, S. Bruque, J. L. García-Muñoz, S. García-Granda, D. Sheptyakov, M. A. Aranda, "Crystal Structures and in-Situ Formation Study of Mayenite Electrides," *Inorganic Chemistry*, Vol.46, No.10, pp.4167-4176, 2007.
 32. M. Horgnies, I. Dubois-Brugger, N. J. Krou, I. Batonneau-Gener, T. Belin, and S. Mignard, "Reactivity of NO₂ and CO₂ with hardened cement paste containing activated carbon," *The European Physical Journal - Special Topics*, Vol.224, No.9, pp.1985-1994, 2015.
 33. M. M. Ballari, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, "Experimental study of the NO and NO₂ degradation by photocatalytically active concrete," *Catalysis Today*, Vol.161, No.1, pp.175-180, 2011.
 34. M. Pérez-Nicolás, J. Balbuena, M. Cruz-Yusta, L. Sánchez, I. Navarro-Blasco, J. M. Fernández, J. I. Alvarez, "Photocatalytic NO_x abatement by calcium aluminate cements modified with TiO₂: Improved NO₂ conversion," *Cement and Concrete Research*, Vol.70, pp.67-76, 2015.
-

-
35. P. M. Schaber, J. Colson, S. Higgins, D. Thielen, B. Anspach, J. Brauer, "Thermal Decomposition (pyrolysis) of Urea in an Open Reaction Vessel," *Thermochimica Acta*, Vol.424, No.1-2, pp.131-142, 2004.
 36. R. Cucciniello, A. Intiso, S. Castiglione, A. Genga, A. Proto, F. Rossi, "Total Oxidation of Trichloroethylene over Mayenite ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) catalyst," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol.204, pp.167-172, 2017.
 37. R. Cucciniello, A. Proto, F. Rossi, O. Motta, "Mayenite based Supports for Atmospheric NO_x Sampling," *Atmospheric Environment*, Vol.79, pp.666-671, 2013.
 38. R. Sugrañez, J. I. Álvarez, M. Cruz-Yusta, I. Mármol, J. Morales, J. Vila, L. Sánchez, "Enhanced Photocatalytic Degradation of NO_x Gases by Regulating the Microstructure of Mortar Cement Modified with Titanium Dioxide," *Building and Environment*, Vol.69, pp.55-63, 2013.
 39. S. F. Wu, T. H. Beum, J. I. Yang, J. N. Kim, "Properties of Ca-base CO_2 Sorbent Using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as Precursor," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.46, NO.24, pp.7896-7899, 2007.
 40. S. Lim, T. D. Nguyen-Phan, and E. W. Shin, "Effect of heat treatment temperatures on photocatalytic degradation of methylene blue by mesoporous titania," *Appl. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 61-66, 2011.
 41. W. Brack, B. Heine, F. Birkhold, M. Kruse, G. Schoch, S. Tischer, O. Deutschmann, "Kinetic Modeling of Urea Decomposition Based on Systematic Thermogravimetric Analyses of Urea and its Most Important by-Products," *Chemical Engineering Science*, Vol.106, pp.1-8, 2014.
-

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.