

최종보고서(일반과제용)										보안등급			
										일반[✓], 보안[]			
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업					
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)					
공고번호	공고-제2호				연구개발과제번호		21CTAP-C157556-02						
국가과학기술 표준분류	EH1301		70%		EB0202		30%				%		
연구주제	(대분류) 환경				(중분류) 측정분석장비 장치			(소분류) 고정밀 센서기술					
연구개발과제명	국문	철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서 개발											
	영문	Dual Sensor System to Inspect and Evaluate Service Life of Reinforced Concrete via Real-time Monitoring of Stress and Deterioration Factor											
주관연구기관	기관명	연세대학교 산학협력단				사업자등록번호		110-82-10500					
	주소	(우) 03722 서울시 서대문구 연세로 50				법인등록번호		274171-0006247					
주관연구책임자	성명	KIM JI WON				직위		부교수					
	연락처	직장전화	032-749-3602				휴대전화		010-5468-9525				
		전자우편	jiwon.kim@yonsei.ac.kr				국가연구자번호		1149-0231				
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 지방자치단체 기타()				합계			연구개발비 외 지원금		
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계			
	총계	370,000	-	-	-	-	-	-	370,000	-		370,000	-
	1년차	160,000	-	-	-	-	-	-	160,000	-		160,000	-
2년차	210,000	-	-	-	-	-	-	210,000	-	210,000	-		
공동연구기관 등	기관명	책임자		직위		휴대전화		전자우편		비고			
										역할 기관유형			
공동연구기관	신라대학교 산학협력단	심영석		조교수		010-7378-3618		ysshim@silla.ac.kr		공동 대학			
	한국세라믹기술원	조형규		선임연구원		010-8200-5850		hkcho@kicet.re.kr		공동 정부출연연			
위탁연구기관													
연구기관 외 기관													
연구개발담당자 실무담당자	성명	오서예				직위		박사과정					
	연락처	직장전화	032-749-3602				휴대전화		010-9392-2475				
		전자우편	5_calligraphy@yonsei.ac.kr				국가연구자번호		1170-4226				

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

2022 년 03 월 18 일

연구책임자 :

KIM JI WON



주관연구개발기관의 장 : 연세대학교 산학협력단

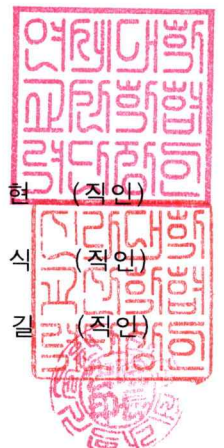
김 지 현 (직인)

공동연구개발기관의 장 : 신라대학교 산학협력단

손 창 식 (직인)

공동연구개발기관의 장 : 한국세라믹기술원

정 연 길 (직인)



국토교통과학기술진흥원장 귀하

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

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

사업명	국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		21CTAP-C157556-02	
내역사업명	국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류	EH1301	70%	EB0202	30%		
연구주제	(대분류) 환경		(중분류) 측정분석장비 장치		(소분류) 고정밀 센서기술	
연구개발과제명	철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서 개발					
전체 연구개발기간	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)					
총 연구개발비	총 370,000 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)					
연구개발단계	기초[☒] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도		착수시점 기준(1단계) 종료시점 목표(4단계)	
연구개발과제 유형	지정공모 [] 자유공모 [☒]					
연구개발과제 특성	기반연구					
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서 개발				
	전체 내용	본 연구는 콘크리트 내 하중 변화를 감지하는 광반응성 복합소재 기반 MEMS 정전식 센서와 열화인자 및 부식발생가스 감지용 반도체식 가스 센서의 개발을 기반으로 하여, 미세전자기계시스템 기반 광화학 감응성 이중 센서 제작을 통한 콘크리트 진단 및 센서 내구수명 평가를 목표로 함. [연세대학교(주관연구기관)] 미세전자기계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가 AzoPDMS*/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가 ① 광반응성 MEMS 정전식 센서 제작 ② 다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화 ③ 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가 AzoPDMS* : azobenzene-incorporated polydimethylsiloxane [신라대학교(공동연구기관)] 철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발 ① 다중 단일 센서의 집적화 기술개발을 통한 반도체식 가스 센서 어레이 개발 ② 열화인자 및 부식발생 가스에 대한 감지특성의 최적화 ③ 가스 센서 어레이의 내장형 동작을 위한 패키징기술 개발 ④ 실험적 RC* 구조물 내장환경에서 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가 RC* : reinforced concrete				

			[한국세라믹기술원(공동연구기관2)] 철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가 ① 콘크리트관련 전문가 자문회의 및 사례분석을 통한 센서의 효율적 매립 위치 및 평가 방법 분석 ② 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가 ③ 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가 ④ 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가												
	1년차	목표	미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가												
		내용	- AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석 - 열화인자 및 부식발생가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발 - 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가												
	2년차	목표	미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 제작을 통한 콘크리트 진단 및 센서 내구수명 평가												
내용		- AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가 - 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발 - 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가													
연구개발성과			1. AzoPDMS/금속 이중층 기반 광반응성 복합소재의 개발 및 안정성 검증을 통한 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계 2. 열화인자 및 부식발생가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발 3. 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가 4. 광반응성 MEMS 정전식 센서를 제작 및 최적화를 진행하고 이를 기반으로 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 기술을 개발 5. 열화인자 및 부식발생가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발 6. 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가												
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			<활용계획> 1. 국가/정책적 측면 : 건설구조물 안전관리 및 ICT 복합 기술 첨단화 2. 산업/기술적 측면 : 건설구조물 비파괴적 안전진단 및 내구수명 평가 3. 환경/경제적 측면 : 안전 주거환경 보장 및 고부가가치 첨단 모니터링 기술 육성 <기대효과> - 건설구조물 비파괴적 진단 및 내구수명 평가 기술을 통한 건축물 전과정 모니터링·관리 시스템 구축												
연구개발성과의 비공여부 및 사유			해당없음												
연구개발성과의 등록·기탁 건수			논문	특허		보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화학물	신 품 종	
			SCI 6건 비SCI 2건	출원 8건		-	-	-	-	-	-	생명 정보		생물 자원	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황			구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)		ZEUS 등록번호			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-		-		
국문핵심어 (5개 이내)			이중 센서		광반응성		가스 센서 어레이		콘크리트 진단		내구수명 평가				
영문핵심어 (5개 이내)			Dual Sensor		Photo-responsive		Gas Sensor Array		Concrete Inspection		Service Life Evaluation				

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
1) 연구개발과제의 최종 목표	1
2) 연구개발과제의 연차별 목표	2
3) 핵심 연구개발성과	14
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	20
1) 연구수행내용 및 성과	20
(1) 주관연구기관(연세대학교)	20
(2) 공동연구기관1(신라대학교)	28
(3) 공동연구기관2(한국세라믹기술원)	41
2) 연구개발 추진전략	55
(1) 연구개발 추진전략 및 방법	55
(2) 연구개발 추진체계	56
(3) 연구개발 추진 일정	57
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	59
1) 연구수행 결과	59
(1) 정성적 연구개발성과	59
(2) 정량적 연구개발성과	77
(3) 세부 정량적 연구개발성과	82
(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)	84
2) 목표 달성 수준	85
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	88
1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용	88
2) 자체 보완활동	88
3) 연구개발 과정의 성실성	90
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	91
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	92
1) 연구개발성과의 활용 방안	92
2) 연구개발성과의 기대 효과	94
7. 참고 문헌	95

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용		
최종 목표	본 연구는 콘크리트 내 하중 변화를 감지하는 광반응성 복합소재 기반 MEMS 정전식 센서와 열화인자 및 부식발생가스 감지용 반도체식 가스 센서의 개발을 기반으로 하여, <u>미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 제작을 통한 콘크리트 진단 및 센서 내구수명 평가</u> 를 목표로 함.		
연차별 목표	1차년도	철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서 개발	미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서의 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가
	2차년도		미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 제작을 통한 콘크리트 진단 및 센서 내구수명 평가
연구개발 범위	본 연구과제에서는 <u>MEMS 기반 정전식 이중 감응 센서</u> 적용을 위한 소자 개발 및 최적화를 진행하고, 콘크리트 구조물 내 센서 적용을 위한 기술 수립과 평가를 통한 검증을 통하여 최종적으로 <u>철근 콘크리트 구조물의 내구수명 평가</u> 의 실시를 연구개발 범위로 함.		
주요 연구 내용	연세대학교 (주관)	미세전자기계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가	
		AzoPDMS*/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가 ① 광반응성 MEMS 정전식 센서 제작 ② 다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화 ③ 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가	
	신라대학교 (공동)	철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발	
		열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발 ① 다중 단일 센서의 집적화 기술개발을 통한 반도체식 가스 센서 어레이 개발 ② 열화인자 및 부식발생 가스에 대한 감지특성의 최적화 ③ 가스 센서 어레이의 내장형 동작을 위한 패키징기술 개발 ④ 실험적 RC* 구조물 내장환경에서 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가	
최종성과물	한국세라믹 기술원 (공동)	철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가	
		광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가 ① 콘크리트관련 전문가 자문회의 및 사례분석을 통한 센서의 효율적 매립 위치 및 평가 방법 분석 ② 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가 ③ 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가 ④ 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가	
		[1] AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석	
		[2] 철근콘크리트(RC) 구조물의 하중 변화 감지를 위한 MEMS 정전식 감응 센서 개발	
최종성과물		[3] RC 구조물의 콘크리트 열화인자 감지용 반도체식 가스 센서 개발	
		[4] RC 구조물의 내구성 진단을 위한 내장형 실시간 모니터링용 가스 센서 어레이 개발	
		[5] 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가	
		[6] 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가	

AzoPDMS* : azobenzene-incorporated polydimethylsiloxane

RC* : reinforced concrete

2) 연구개발과제의 연차별 목표

**철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한
콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서 개발**

철근 콘크리트 응력 거동/열화인자
감지 이중 복합 센서 어레이

<열화인자 감지 센서>
하중
하중
<광반응성 응력 감지 센서>

[연세대학교] 미세전자기계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가
[신라대학교] 철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발
[한국세라믹기술원] 철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가

연차별 연구 개발 목표 및 내용		
(미세전자기계시스템(Microelectromechanical systems: MEMS) 기반 광감응성 이중 센서 어레이 개발을 통한 철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가 및 내구수명 평가 요식도)		
1차년도 연구목표 (2020. 04. 13-2020. 12. 31)	미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가	TRL 1단계 → TRL 3단계
주관	연세대학교	AzoPDMS*/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석
공동	신라대학교	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발
공동	한국세라믹기술원	콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 래벨 간이 성능평가
2차년도 연구목표 (2021. 01. 01-2021. 12. 31)	미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 제작을 통한 콘크리트 진단 및 센서 내구수명 평가	TRL 3단계 → TRL 4단계
주관	연세대학교	AzoPDMS*/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능평가
공동	신라대학교	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발
공동	한국세라믹기술원	광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가

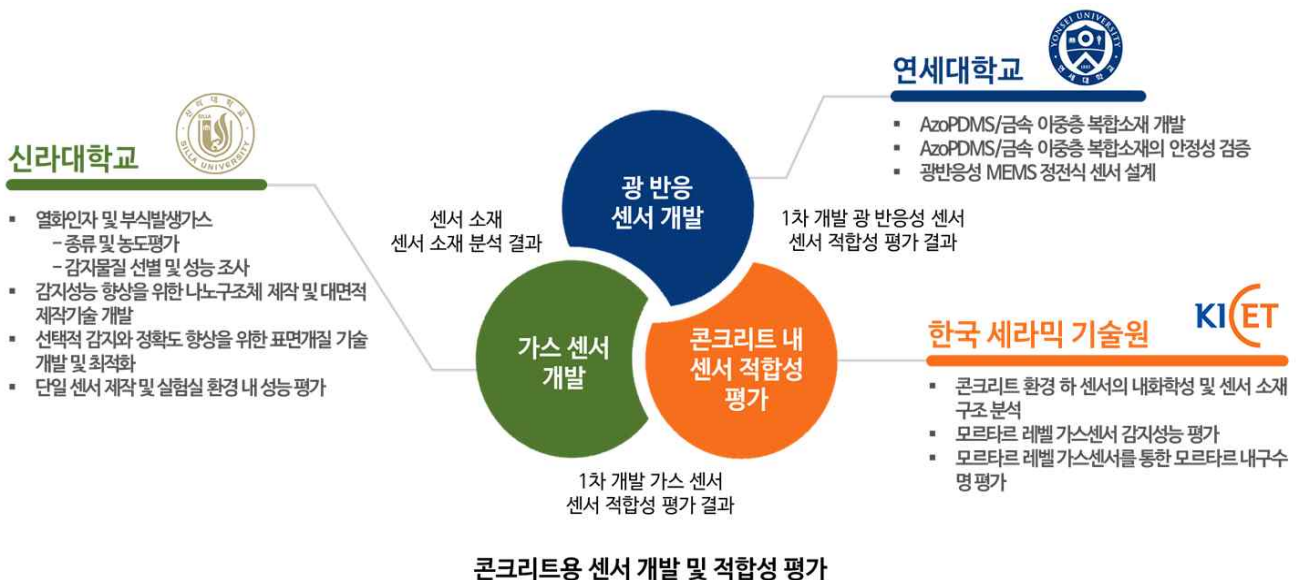
AzoPDMS*: Azobenzene-incorporated polydimethylsiloxane

(1) 1차년도

가. 개발 목표

1차년도 연구목표		미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가	TRL 1단계 → TRL 3단계
주관	연세대학교	AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석	
공동	신라대학교	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발	
공동	한국세라믹기술원	콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가	

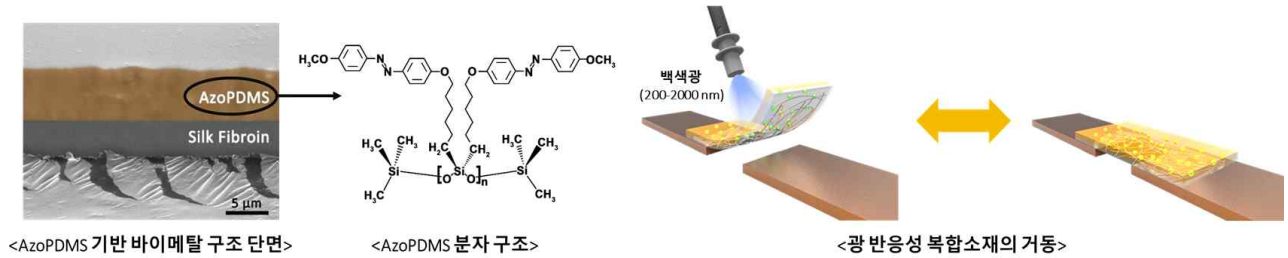
- 주관연구기관(연세대학교): AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석
 - AzoPDMS/금속 이중층 복합소재 개발
 - AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 안정성 검증
 - 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계
- 공동연구기관1(신라대학교): 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발
 - 열화인자 및 부식발생 가스 종류 및 농도평가
 - 열화인자 및 부식발생 가스 감지물질 선별 및 성능 조사
 - 감지성능 향상을 위한 나노구조체 제작 및 대면적 제작기술 개발
 - 선택적 감지와 정확도 향상을 위한 표면개질 기술 개발 및 최적화
 - 단일 센서 제작 및 실험실 환경에서의 성능 평가
- 공동연구기관2(한국세라믹기술원): 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가
 - 콘크리트 환경 하 센서의 내화학성 및 센서 소재 구조 분석
 - 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가
 - 모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가



나. 개발 내용 및 범위

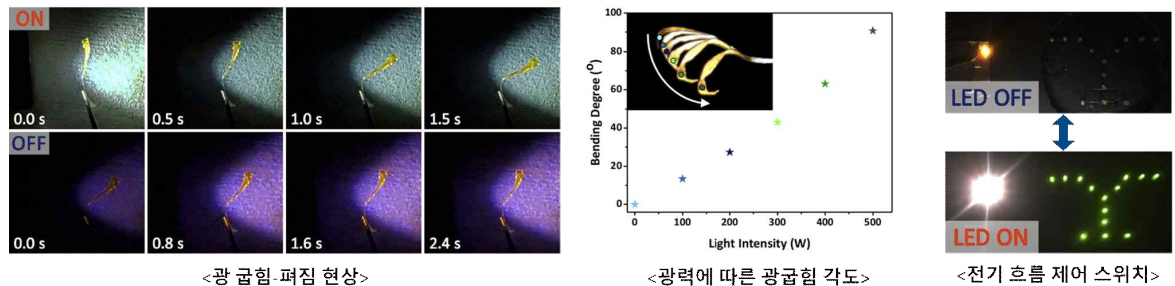
	주요 연구활동	내용 및 범위
주관 [연세대학교 산학협력단]	세부 연구목표 : AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석	
	■ AzoPDMS/금속 이중층 복합소재 개발	- MEMS 정전식 감응 센서의 캔틸레버로의 사용을 위해 광반응성 고분자 (AzoPDMS)와 금속 박막의 이중층 복합소재를 개발 - 금속 박막 물질은 광급힘의 구현과 안정성을 위해 은으로 선정, 또한 물질 간 계면 적합성 및 공정 조건을 고려하여 은과 고분자 사이에 얇은(~5 nm) 티타늄 층을 추가
	■ AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 안정성 검증	- AzoPDMS/금속 박막 복합소재를 콘크리트 환경에 센서로 적용하기 위해, 콘크리트 양생 조건에 해당되는 극한 환경에서의 소재 안정성을 실험 - 강염기(pH 12.5), 고온(80°C), 고압(~200 MPa)에서 흡광 특성을 분석하여 안정성을 확인함. 또한 강염기 조건에 대해 센서 캐리어 내부와 비슷한 환경을 구현하여 안정성을 확인함.
	■ 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계	- AzoPDMS/금속 전극 박막을 캔틸레버로 하는 MEMS 정전식 센서의 구조 설계 및 제작 공정 설계
공동 [신라대학교 산학협력단]	세부 연구목표 : 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발	
	■ 열화인자 및 부식발생 가스 종류 및 농도평가	- 콘크리트 열화환경 및 철근 부식환경의 발생 가스의 종류와 농도를 분석하여 4종 이상의 가스 인자 도출
	■ 열화인자 및 부식발생 가스 감지물질 선별 및 성능 조사	- 열화인자(CO ₂ , O ₂ , H ₂ O, Cl ₂) 및 철근 부식환경에서의 가스(H ₂)를 감지하기 위해, 가스와의 흡·탈착에 따라 전기적 특성변화를 보이는 산화물 소재(WO ₃ , SnO ₂ , TiO ₂ , In ₂ O ₃ , MoO ₃ , ZnO, NiO)를 선정
	■ 감지성능 향상을 위한 나노구조체 제작 및 대면적 제작기술 개발	- 나노막대, 나노구, 나노튜브 등의 산화물 구조체를 제작하여 가스와 반응할 수 있는 높은 비표면적을 형성하고 미세 환경 변화를 감지하는 기술 개발 - 높은 제작 재현성과 대면적화가 가능한 공정을 설계
	■ 선택적 감지와 정확도 향상을 위한 표면개질 기술 개발 및 최적화	- 산화물 표면에 기능화된 작용기 형성 및 금속 촉매를 이용하여 특정 가스와의 높은 반응성을 구현 - 감지 최적화를 통해 센서 구동에 필요한 소비전력을 최소화함
	■ 단일 센서 제작 및 실험실 환경에서의 성능 평가	- 개발된 기술을 활용하여 제작된 센서 특성에 대한 외부 시험기관 평가 및 공인시험성적서 발급 - 다양한 환경의 가스 제공 및 반복측정을 통해 단일 가스 센서의 신뢰성 향상
공동 [한국세라믹 기술원]	세부 연구목표 : 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가	
	■ 콘크리트 환경 하 센서의 내화학성 및 센서 소재 구조 분석	- 콘크리트 환경 하에서의 복합소재 및 가스 센서의 안정성 및 적용가능성 검증 - 소재 및 센서의 내구성, 내화학성, 미세구조 평가 및 조건별 성능 평가
	■ 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가	- 모르타르 내 복합소재 및 센서의 매립 방법 검토 - 다양한 양생 및 열화 조건별 센서 매립 실험체 제작 및 성능 평가
	■ 모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가	- 가스 센서를 활용하여 모르타르 조건별 열화인자 측정 및 데이터베이스 구축 - 다양한 콘크리트 환경 하 열화 조건에서의 센서 내구성능 평가

○ 주관연구기관(연세대학교): AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석



■ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 구조·구성 분석

- 콘크리트 열화환경을 조성을 통해, 구조물 구조 변형 정도를 분석하기 위해서 MEMS 정전식 감응 센서의 캔틸레버 물질로 광반응성 분자인 아조벤젠(azobenzene)이 결합된 폴리디메틸사일록센(azobenzene incorporated poly(dimethylsiloxane); AzoPDMS)를 이용할 계획임.
- 광굽힘 현상을 통한 전기 흐름 제어 스위치 연구를 바탕으로 AzoPDMS를 합성하고, AzoPDMS와 바이메탈 구조를 형성 광 자극에 대해 전체 구조체에 굽힘성을 부여하고 정전 용량 변화를 유도, 복합소재 사용 환경에 따른 안정성, 영률(Young's modulus) 및 추후 공정 조건에 따라 적합한 물질을 선택할 계획임.



■ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 광반응성 거동 분석

- AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재가 MEMS 정전식 감응 센서의 캔틸레버로 이용되려면, 일반적인 광섬유 기반 하중 센서들과 유사하게 광섬유에서 나오는 수 mW의 빛에 반응하여 굽어져야 하며 이에 따라 정전 용량 변화 측정이 필요함.
- 상기 예측과 바이메탈 구조체의 열팽창에 따른 곡률 반지름 공식의 변형식을 결합하여, AzoPDMS/금속 전극 박막 복합 소재의 곡률 반지름을 계산하고 이를 실험적 결과와 비교하여 최적화된 굽힘을 도출함.

$$\rho \propto \frac{t \cdot \left[3 \cdot (1+m)^2 + (1+m \cdot n) \cdot \left(m^2 + \frac{1}{m \cdot n} \right) \right]}{(1+m)^2}$$

(ρ = 곡률 반지름, t = 이중층의 전체 두께, m = 각 층의 두께 비, n = 각 층의 영률 비)

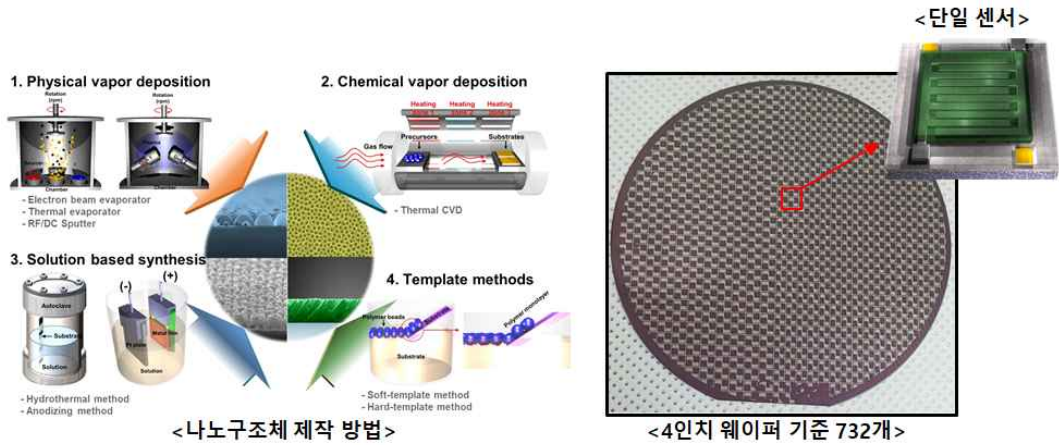
식 1. 바이메탈 구조체의 열팽창에 따른 곡률 반지름 공식의 변형식

■ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 실험실 환경에서 성능 평가

- 건축 구조물의 구조적 변형을 측정하기 위해서 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재가 MEMS 정전식 감응 센서의 캔틸레버로 활용, 콘크리트 열화 조건에 따른 센서가 가지는 민감도 특성을 평가 분석함.

○ 공동연구기관1(신라대학교): 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 개발

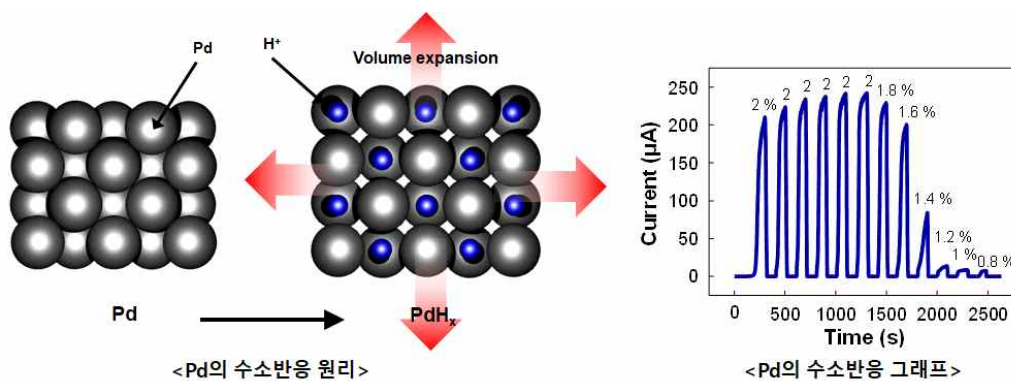
■ 열화인자 및 부식발생 가스 종류 및 농도평가



- 인위적인 콘크리트 열화환경 및 철근 부식환경 조성을 통해, 발생 가스의 종류와 농도를 가스 크로마토그래피를 이용하여 분석하고자 함.
- 4종 이상의 열화 및 부식발생 가스 인자 도출.

■ 열화인자 및 부식발생 가스 감지물질 선별 및 성능 조사

- CO₂, O₂, H₂O 및 Cl₂ 가스는 대표적인 콘크리트의 열화인자로 알려져 있으며, H₂는 철근 부식환경에서 발생하는 가스임.
- 보편적으로 WO₃, SnO₂, TiO₂, In₂O₃, MoO₃, ZnO, NiO 등의 산화물 소재는 대기 중의 가스와의 흡착과 탈착으로 인한 전기적 특성변화를 통해 가스를 감지하고 분별하며, O₂, H₂O, Cl₂ 가스에 대해 높은 반응성을 나타내는 것으로 알려져 있음. 열화인자를 선택적으로 분별할 수 있는 다양한 종류의 산화물 소재를 선정하고자 함.
- 4종 이상의 산화물 감지소재 선정.
- 수 nm 두께의 귀금속 팔라듐(Pd)은 H₂에 높은 선택성을 나타내며, Pd이 H₂와 반응하였을 때, PdH_x를 형성하며 부피가 3% 팽창하는 것으로 보고되고 있음. 또한, Pd의 간격과 두께를 조절함으로써, 극미세농도(part-per-million, ppm)부터 수 %까지 광범위한 H₂ 농도를 측정이 가능함. 따라서 다양한 두께의 Pd 센서를 제작하여 철근 부식에서 발생하는 H₂ 가스 감지를 통해 Pd의 수축/팽창에 따른 전기적 특성 변화를 확인함.
- 소비전력 10 mW 이하의 철근부식 감지센서 개발.



■ 감지성능 향상을 위한 나노구조체 제작 및 대면적 제작기술 개발

- 나노막대기, 나노구, 나노튜브, 나노 꽃, 나노 반구 등 gas와 반응할 수 있는 높은 비표면적을 갖는 산화물 구조체를 제작하여, 미세한 내부환경 변화를 감지할 수 있는 고성능의 센서 물질을 개발.
- Electron beam evaporator, RF Sputter 등 반도체 공정 기반 공정을 이용하여, 선정된 나노구조체의 높은 제작 재현성과 대면적화가 가능한 공정을 설계함.
- 리소공정을 이용하여 4인치 웨이퍼 범위에서 500개 이상의 나노구조 기반의 센서를 제작함으로써 가격 경쟁력을 확보함.

· 1 mm² 이하의 초소형 개별 센서소자 제작.

· 4종 이상의 산화물로 이루어진 고감도 개별 가스 센서를 개발함.

■ 선택적 감지와 정확도 향상을 위한 표면개질 기술개발 및 최적화

· 금속 촉매의 경우, 산화물의 표면에서 전자적·화학적 작용을 통하여 활성화 에너지를 낮춰줌으로써 선택성과 감지성능을 향상시킴. 또한, 표면에 기능화된 OH⁻기는 CO₂와 높은 반응성을 나타내는 것으로 알려져 있음.

· Self-agglomeration을 이용한 금속 촉매의 균일성과 대면적화 코팅기술 개발

· 산화물 표면에 기능화 된 OH⁻기는 CO₂와 높은 반응성을 나타내는 것으로 알려져 있음.

· SnO₂의 경우, 수분 환경에서 표면 OH⁻기를 쉽게 형성함으로써 상온에서도 높은 가스 감지성능을 나타내는 것으로 보고되고 있으며, 산화물 표면에 형성되는 이온전도 원리를 이용하여 CO₂ 감지를 통한 침투깊이를 측정함.

· 소비전력 20 mW 이하의 산화물 기반 반도체식 가스 센서 개발

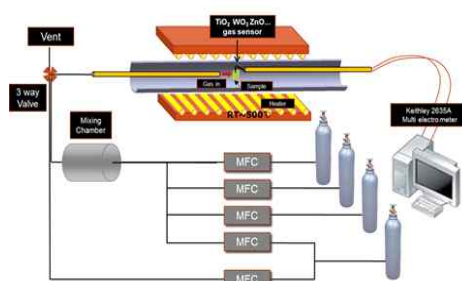
■ 다중 단일 센서 제작 및 실험실 환경에서의 성능 평가

· 열화인자(O₂, H₂O, Cl₂, CO₂)와 부식발생 가스(H₂) 감지를 위한 다종의 단일 가스 센서 제작 및 특성평가를 통해 가스 센서 어레이에 구성될 감지물질과 표면개질 기술을 선정함.

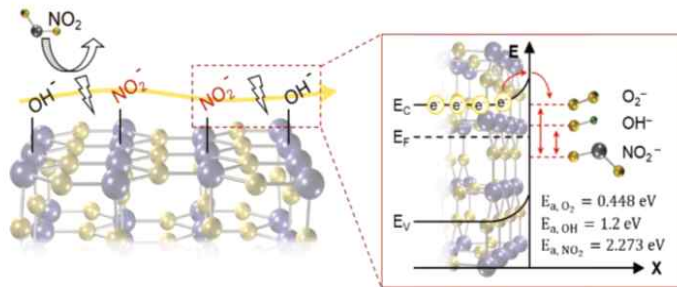
· MFC를 이용하여, 농도변화, 혼합 가스 등 다양한 환경을 제공함으로써 단일 가스 센서의 신뢰성을 향상시킴.

· 열화인자(O₂, H₂O, Cl₂, CO₂)와 부식발생 가스(H₂) 감지 결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 반복측정 및 장기 안정성 평가를 진행함.

· 개발된 센서 특성에 대한 외부 시험기관 평가 및 공인시험성적서 발급



<단일센서 측정 시스템>



<수분 환경에서의 SnO₂ 센서의 상온 동작원리>

○ 공동연구기관2(한국세라믹기술원): 콘크리트 내 센서 적용가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가

■ 콘크리트 환경 하 센서의 내화학적 및 센서 소재 미세구조 분석

· 콘크리트 환경(강알칼리 약 pH 12.5 수준, 컴팩트한 밀실구조, 건조수축에 의한 압축 응력 등)에서 개발된 센서의 적용가능성을 파악하기 위한 센서 소재 내구성 평가

· 모르타르 배합 및 매립 조건에 따른 재령별 센서 내화학적 평가

· 모르타르 배합 및 매립 조건에 따른 재령별 센서 소재 미세구조 평가

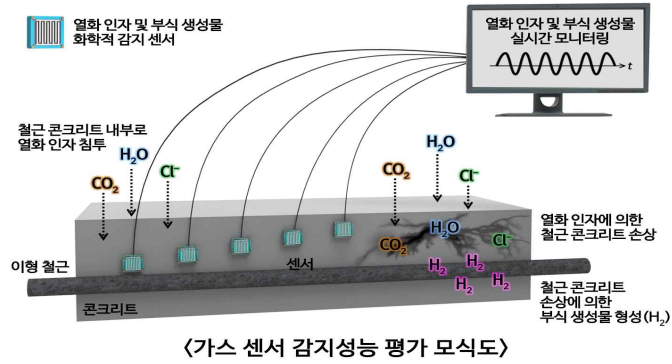
· 각 조건별 콘크리트 환경 하 센서 적용가능성 평가 결과 피드백

■ 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가

· 가스 센서 모르타르 내 매립 방법 검토

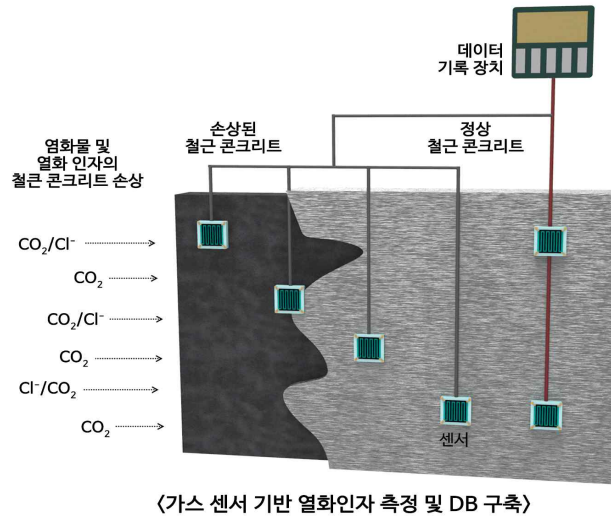
· 배합, 양생 등 다양한 모르타르 조건별 CO₂, O₂, H₂O, Cl₂ 가스 센서 매립 실험체 제작

· 표면개질 여부, 사이즈 등 가스 센서 종류별 모르타르 내 감지성능 평가 및 피드백



■ 모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가

- 가스 센서를 통한 다양한 모르타르 조건별 열화인자 측정 DB 구축
- 가스 센서를 통한 다양한 환경조건(양생방법 및 조건, 열화 촉진 환경 등)별 열화인자 측정 DB 구축
- 가스 센서 기반 모르타르 다양한 열화(탄산화, 염해 등) 내구성능 평가



(2) 2차년도

가. 개발 목표

2차년도 연구목표		미세전자기계시스템 기반 광·화학 감응성 이중 센서 제작을 통한 콘크리트 진단 및 센서 내구수명 평가	TRL 3단계 → TRL 4단계
주관	연세대학교	AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가	
공동	신라대학교	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발	
공동	한국세라믹기술원	광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가	

○ 주관연구기관(연세대학교): AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가

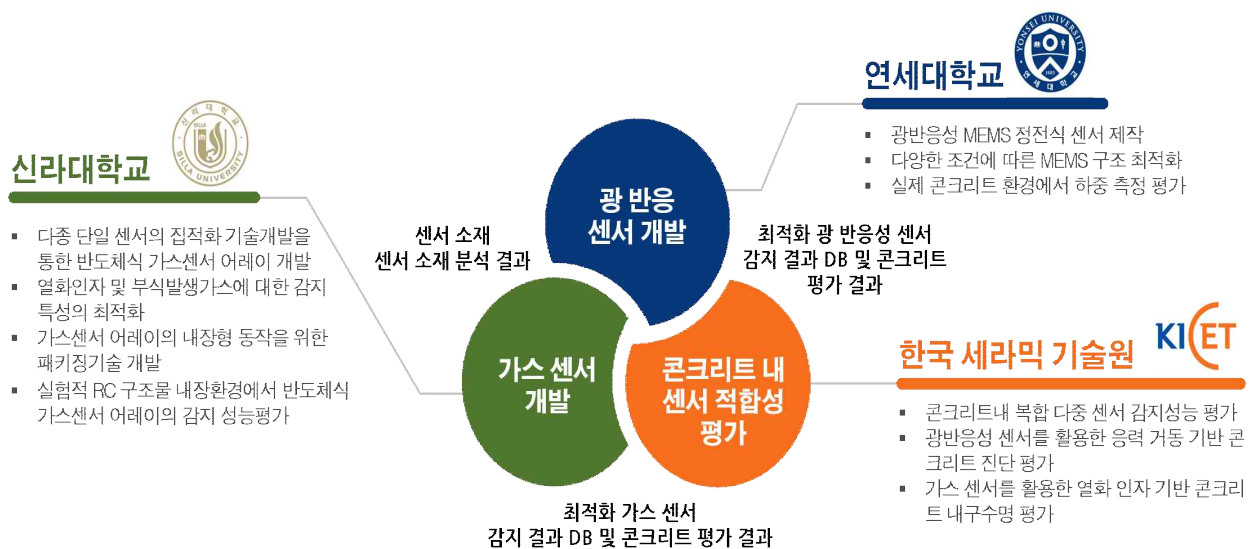
- 광반응성 MEMS 정전식 센서 제작
- 다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화
- 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가

○ 공동연구기관1(신라대학교): 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발

- 다중 단일 센서의 집적화 기술개발을 통한 반도체식 가스 센서 어레이 개발
- 열화인자 및 부식발생 가스에 대한 감지특성의 최적화
- 가스 센서 어레이의 내장형 동작을 위한 패키징기술 개발
- 실험적 RC 구조물 내장환경에서 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가

○ 공동연구기관2(한국세라믹기술원): 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가

- 콘크리트관련 전문가 자문회의 및 사례분석을 통한 센서의 효율적 매립 위치 및 평가 방법 분석
- 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가
- 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가
- 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가



이중 센서 기반 콘크리트 진단 및 내구수명 평가

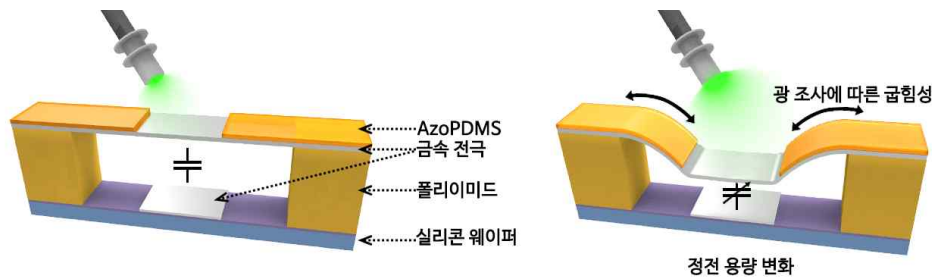
나. 개발 내용 및 범위

	주요 연구활동	내용 및 범위
주관 [연세대학교 산학협력단]	세부 연구목표 : 미세전자기계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가	
	■ 광반응성 MEMS 정전식 센서 제작	- AzoPDMS/금속 전극 박막을 제외한 기본 MEMS 구조 설계 - 이는 일반적인 MEMS 구조체와 유사
	■ 다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화	- 1차년도 실험 결과 및 변형된 바이메탈 곡률 반지름 방정식(식 1)을 통해 확정 길이, 두께에 해당하는 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 캔틸레버가 구현된 MEMS 정전식 감응 센서 구축 - MEMS 정전식 감응 센서에 수 mW 범위로 빛의 세기를 변화시키며 정전 용량 변화 측정
공동 [신라대학교 산학협력단]	■ 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가	- 광섬유 기반 하중 센서와 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서를 결합한 콘크리트 하중 변화 감지 시스템을 구축, 테스트 베드 내에서 하중변화에 따른 정전 용량 변화 측정 - 콘크리트 테스트 베드는 광원-콘크리트에 매립된 광섬유-광반응성 MEMS 정전식 감응 센서를 포함하는 광 검출기 등으로 구성 - 테스트 베드 콘크리트의 하중이 변하면 광섬유 빛 세기 변화가 유도되어 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서의 정전 용량 변화가 발생하고 하중 변화를 감지
	세부 연구목표 : 철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발	
	■ 다중 단일 센서의 집적화 기술개발을 통한 반도체식 가스 센서 어레이 개발	- 반도체식 공정으로 단일 센서의 감지물질을 한 기판에 증착하여 집적 - 4종 이상의 가스 센서 어레이 제작
공동 [한국세라믹 기술원]	■ 열화인자 및 부식발생 가스에 대한 감지특성의 최적화	- 가스 감지 특성은 패턴인식을 통하여 가시화하며, 열화 및 부식반응에서 초래되는 RC 구조물 내부의 환경변화를 분석함
	■ 가스 센서 어레이의 내장형 동작을 위한 패키징기술 개발	- 가스의 통과가 가능하며, 감지물질의 표면오염을 방지할 수 있는 패키징기술을 개발 - 반도체식 가스 센서 어레이는 반도체식 공정으로 인하여 소형화가 가능
	■ 실험적 RC 구조물 내장환경에서 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가	- 실험적 단위의 실제 구조물을 형성하여, 열화인자의 침투 깊이 및 철근 부식 가스 발생으로 인하여 변화되는 RC 구조물의 내부 환경변화를 분석 및 부식 전의 RC 구조물과 부식이 진행되는 환경에서의 RC 구조물에 각각의 센서 어레이를 매립하여 비교 - 반복 실험을 통해 반도체식 가스 센서 어레이의 장기안정성, 신뢰성 확보 · 100회 이상의 반복실험과 2개월 이상의 안정성 평가 - 가스 센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술 개발 · 감지 결과를 주성분 분석(principal component analysis)으로 특징 추출 · 이를 기반으로 열화인자의 농도와 종류를 인식
공동 [한국세라믹 기술원]	세부 연구목표 : 철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가	
	■ 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가	- 복합 이중 센서를 매립한 다양한 조건의 철근콘크리트 실험체 제작 - 콘크리트 환경(강알칼리 pH 12.5 수준, 컴팩트한 밀실구조, 건조수축에 의한 압축 응력 등)에서 개발된 물리화학적 복합 이중 센서의 감지성능 평가 - 센서 감지성능 평가 결과 분석 및 피드백
	■ 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가	- 광반응성 센서 매립 철근콘크리트 부재 제작 - 광반응성 센서 기반 철근콘크리트 응력 거동 감지 및 DB화 - 광반응성 센서 감지 결과 기반 철근콘크리트 진단 평가
	■ 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가	- 가스 센서 매립 철근콘크리트 실험체 제작 및 다양한 조건별 열화 촉진 환경 양생 - 가스 센서 기반 철근콘크리트 내 열화인자 감지 및 DB 구축 - 가스 센서 감지 결과 기반 철근콘크리트 내구수명(탄산화, 염해, 철근부식 등) 평가

○ 주관연구기관(연세대학교): AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가

■ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 MEMS 구축 및 정전 용량 변화 최적화

- AzoPDMS/금속 전극 박막을 제외한 기본 MEMS 구조를 설계하며, 이는 일반적인 MEMS 구조체와 유사함.
- 1차년도 실험 결과 및 변형된 바이메탈 곡률 반지름 방정식(식 1)을 통해 확정된 길이, 두께에 해당하는 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 캔틸레버가 구현된 MEMS 정전식 감응 센서를 구축함.

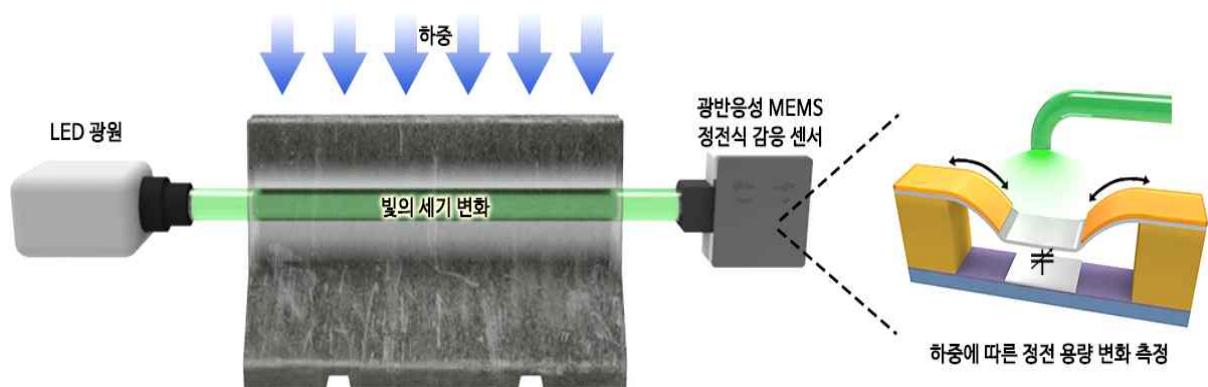


〈AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 캔틸레버를 포함한 MEMS 정전식 감응 센서 모식도〉

- MEMS 정전식 감응 센서에 수 mW 범위로 빛의 세기를 변화시키며 정전 용량 변화를 측정함.
- 그 변화폭이 충분하지 않거나(캔틸레버 높이 변화가 너무 작아 정전 용량 값의 변화가 작음) 빠르게 포화(높이 변화가 너무 커서 추후 정전 용량의 변화가 반영되지 않음)될 시, 본 실험 결과와 변형된 바이메탈 곡률 반지름 방정식(식 1)을 결합하여 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재의 길이, 총 두께 및 AzoPDMS와 전극 각각의 두께를 조절하여 최적화된 정전 용량 값의 변화를 도출함.

■ 실제 콘크리트 환경에서 광섬유 기반 하중 센서 성능 평가

- 광섬유 기반 하중 센서와 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서를 결합하여 전체 하중 변화 감지 시스템을 구축하고 실제 환경과 유사한 콘크리트 테스트 베드를 구축하여 하중에 따른 광섬유 내 빛 세기 변화에 따른 정전 용량 변화를 측정함.



〈광섬유 기반 콘크리트 하중 센서 모식도〉

○ 공동연구기관1(신라대학교): 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 개발

■ 다중 단일 센서의 집적화 기술 개발

- 반도체식 공정을 통하여, 단일 센서의 감지물질을 한 기판에 증착하여 집적화시킴.

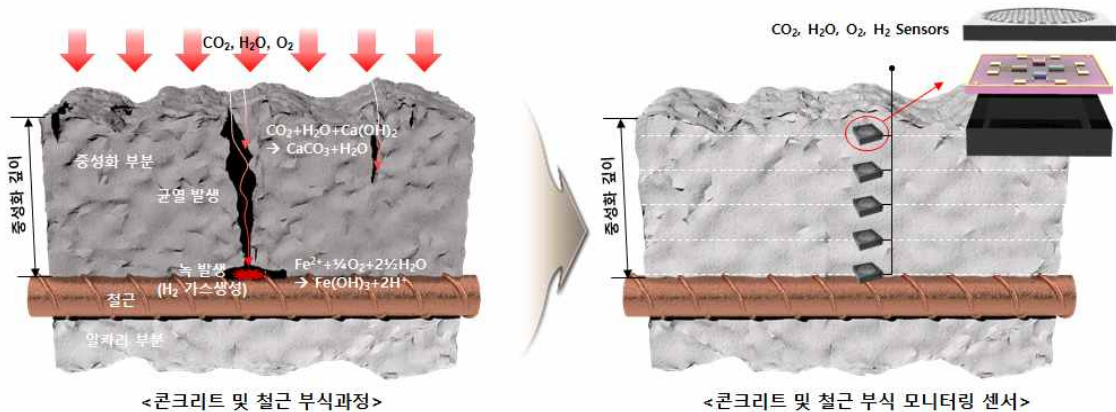
- 4종 이상의 가스 센서 어레이 제작.

■ 열화인자 및 부식발생 가스에 대한 감지특성의 최적화

- 가스 감지 특성은 패턴인식을 통하여 가시화하며, 열화 및 부식반응에서 초래되는 RC 구조물 내부의 환경변화를 분석함.

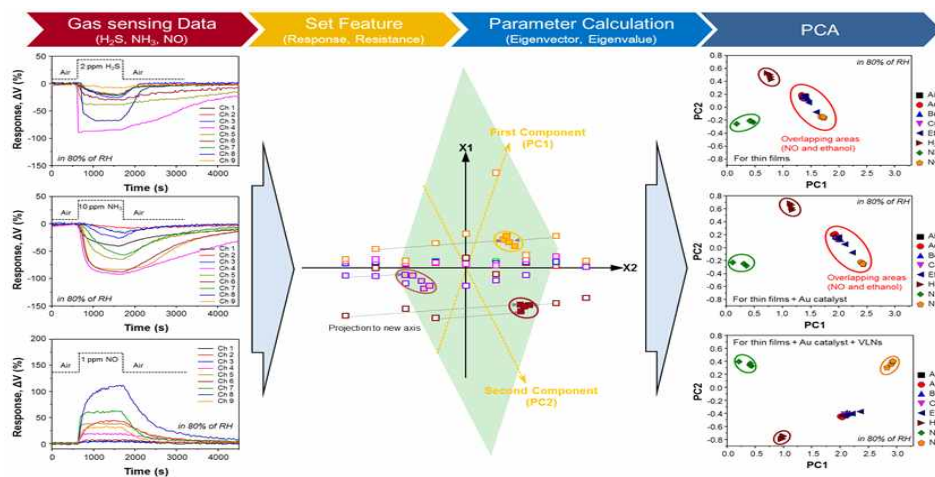
■ 가스 센서 어레이의 매립형 동작을 위한 패키징기술 개발

- 가스의 통과가 가능하며, 감지물질의 표면오염을 방지할 수 있는 패키징기술을 개발함.
- 반도체식 가스 센서 어레이는 반도체식 공정으로 인하여 소형화가 가능함.



■ 실험적 RC 구조물 매립환경에서 가스 센서 어레이의 감지 성능평가

- 실험적 단위의 실제 구조물을 형성하여, 열화인자의 침투 깊이 및 철근 부식 가스 발생으로 인하여 변화되는 RC 구조물의 내부 환경변화를 분석함.
- 반복 실험을 통하여, 반도체식 가스 센서 어레이의 장기안정성과 신뢰성을 확보함.
- 가스 센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술 개발



<가스센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술 개발>

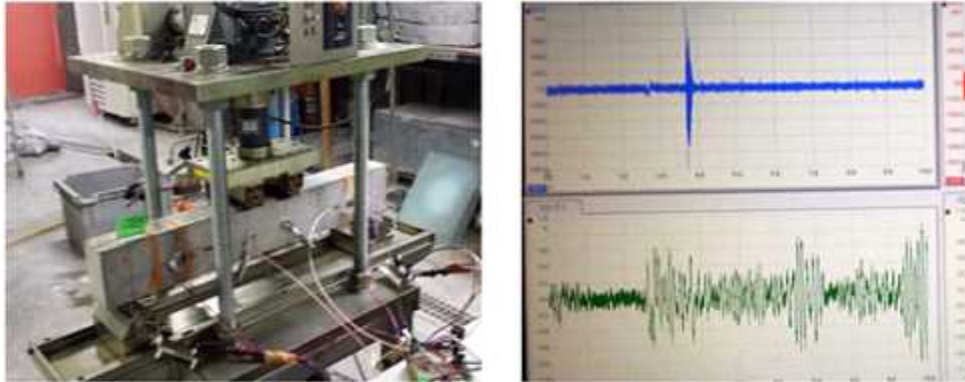
○ 공동연구기관2(한국세라믹기술원): 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가

■ 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가

- 건축용 센서 활용 사례조사를 통한 물리화학 센서의 효율적 매립 위치 및 개수 제시
- 복합 이중 센서를 매립한 다양한 조건의 철근콘크리트 실험체 제작
- 콘크리트 환경(강알칼리 약 pH 12.5 수준, 컴팩트한 밀실구조, 건조수축에 의한 압축 응력 등)에서 개발된 물리화학적 복합 이중 센서의 감지성능 평가
- 센서 감지성능 평가 결과 분석 및 피드백

■ 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가

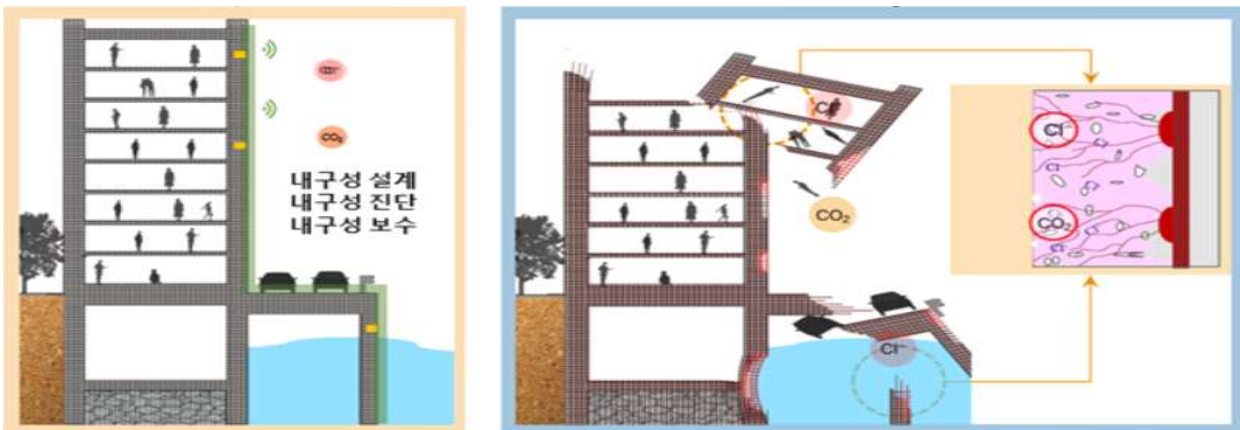
- 광반응성 센서 매립 철근콘크리트 부재 제작
- 광반응성 센서 기반 철근콘크리트 응력 거동 감지 및 DB화
- 광반응성 센서 감지 결과 기반 철근콘크리트 진단 평가



<광반응성 센서 기반 철근콘크리트 응력 거동 감지>

■ 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가

- 전문가 자문회의를 통한 센서 활용 콘크리트 염해, 탄산화 내구수명 평가 방법 사례 조사
- 가스 센서 매립 철근콘크리트 실험체 제작 및 다양한 조건별 열화 촉진 환경 양생
- 가스 센서 기반 철근콘크리트 내 열화인자 감지 및 DB 구축
- 가스 센서 감지 결과 기반 철근콘크리트 내구수명(탄산화, 염해, 철근부식 등) 평가



<가스 센서 기반 열화인자 측정을 통한 철근콘크리트 구조물 내구수명 평가 필요성>

3) 핵심 연구개발성과

(1) 핵심 연구성과 개요

연 번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	광반응성 복합 소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서 설계	AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 빛 세기에 의한 굽힘 거동을 구체적으로 예측하 여 해당 복합소재 캔틸레버에 기반한 MEMS 정전식 감응 센서를 설계	재료 · 자재	연세 대학교	1	1, 2
2	AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 MEMS 정전식 감응 센서 구현	AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서의 빛 세기에 따른 성능 평가 및 변형된 바이메탈 곡률 반지름 방정식에 따라 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재의 길이, 총 두께 및 AzoPDMS와 전극 각각의 두께를 조절하여 최적화 된 정전 용량 값의 변화를 도출	장비 · 장치	연세 대학교	1, 2	3
3	실제 콘크리트 환경에서 광섬유 기반 센서 성능 평가	콘크리트 하중 센서 내 광 검출기로서의 성능 평가(하중에 의한 광섬유 빛의 세기에 따른 정전 용량 변화 감지, 광 검출기 소비 전력 저감 효과 도출)	시스템	연세 대학교	2	4
4	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발	- 열화인자 및 부식발생 가스의 종류와 농도 를 분석하여, 이를 감지할 수 있는 최적화된 나노소재를 설계 - 선정된 나노소재의 대면적화 제작 공정을 개발하고, 개별 센서를 제작하여 열화인자 및 부식발생 가스 분위기에서의 반응특성을 분석 - 선택성과 정확도를 향상시키기 위하여 나노 소재의 표면개질 및 열화인자 및 부식발생 가 스를 감지할 수 있는 고성능 가스 센서를 제 작	장비 · 장치	신라 대학교	1	3
5	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발	- 열화인자 및 부식발생 가스를 감지할 수 있 는 개별 센서를 집적화함으로써 다중센서로 이루어진 가스 센서 어레이를 설계 - 열화인자와 부식발생 가스 분위기에서 가스 센서의 출력 신호를 분석 - 가스 센서 어레이의 패키징을 통하여, 실제 철근콘크리트에 매립하여 열화인자의 침투깊 이 및 철근부식 정도를 평가	장비 · 장치	신라 대학교	2	4
6	콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가	- 콘크리트 환경 하 센서의 내화학적성 및 센서 소재 미세구조변화 분석 - 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가 - 모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가	시스템	한국 세라믹 기술원	1	3
7	광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가	- 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가 - 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘 크리트 진단 평가 - 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리 트 내구수명 평가	시스템	한국 세라믹 기술원	2	4

(2) 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	광반응성 복합 소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서 설계	
정의	빛 세기에 따라 굽힘 거동을 보이는 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서 설계	
목적	AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 휘어짐, 곡률반지름, 캔틸레버 높이 변화, 정전 용량 변화 및 안정성을 예측 및 구현하고 MEMS 정전식 감응 센서 설계의 타당성 여부 판단 및 설계를 진행함.	
성능목표	(기존기술 수준) 기존 광섬유를 활용한 하중 센서는 하중에 의한 빛의 세기/굴절률/간섭/편광 등을 광다이오드(phototransistor)나 광검출기(photodetector)로 측정함. 기존 MEMS 기반 정전식 감응 센서는 직접적인 압력/하중에 의해 캔틸레버 부분이 변형되어 정전용량의 변화를 일으키며, 압력에 따른 캔틸레버의 변형이 비선형적이기 때문에 추가적인 회로 등이 필요함. (개발기술 수준) [광굽힘 성능 및 안정성]: AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 굽힘 거동 범위($0.85\ \mu\text{m}$)와 환경(강염기-pH12.5, 고온-80°C, 고압-$\sim 200\ \text{MPa}$) 안정성과 같은 정량적 수치를 목표로 진행 및 달성하였음. [광반응성 MEMS 정전식 센서 설계]: 빛의 세기를 측정할 수 있는 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서의 구현을 목표로 함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	KIM JI WON(연세대학교)	
소요기간	'20.04 ~ '20.09(0년6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	자체 실험결과(보고서) 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건 (환산편수: 1.5건)
	논문	SCI(E) : 1편(심사중) (환산편수: 0.33편)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2	AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 MEMS 정전식 감응 센서 구현	
정의	빛 세기에 따라 굽힘 거동을 보이는 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서 구현 및 최적화	
목적	앞서 설계된 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서의 시제품을 제작하고 민감도, 소비전력 및 오차율을 최적화함.	
성능목표	(기존기술 수준) 빛의 세기를 측정할 수 있는 MEMS 정전식 센서는 개발된 바 없음. (개발기술 수준) [MEMS 정전식 감응 센서] 광반응성 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서의 시제품을 제작하고 낮은 소비전력, 빠른 반응시간 및 높은 민감도를 목표로 최적화를 진행함. [정전 용량 변화] 핵심성과 1의 설계 바탕으로 MEMS 정전식 감응 센서를 구현하였으며, 빛 조사에 따라 정전용량 10 pF와 13 pF의 개별 값으로 감지 가능하였음.	
성과달성 책임자 (소속기관)	KIM JI WON(연세대학교)	
소요기간	'20.10 ~ '21.12(1년3개월, 1·2년차)	
성과달성 확인방법	자체 실험결과(보고서, 학술논문) 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건 (환산편수: 1건)
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3	실제 콘크리트 환경에서 광섬유 기반 센서 성능 평가	
정의	AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서를 통해 광섬유 기반 콘크리트 하중 센서 구현	
목적	앞서 제작한 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 기반 MEMS 정전식 감응 센서를 사용하여 실제 콘크리트 환경에서의 광섬유 기반 하중 센서 시스템을 구현하고 성능을 평가함.	
성능목표	(기존기술 수준) 기존 광섬유를 활용한 하중 센서는 하중에 의한 빛의 세기/굴절률/간섭/편광 등을 광 다이오드(phototransistor)나 광검출기(photodetector)로 측정함. (개발기술 수준) [광섬유 기반 콘크리트 하중 센서] 실제 콘크리트 환경에서 내부에 함입된 광섬유를 통해 하중의 변화를 빛의 세기 변화로 유도함. [광 세기 측정 민감도] 하중에 따른 정전용량 변화를 계산하였을 시 민감도는 평균 2.47×10^{-6} dB/N, 최대 1.51×10^{-5} dB/N 으로 계산됨 [소비전력] 광반응성 MEMS 정전식 센서의 경우 이론적으로 소비전력이 0이며, 실제 센서에 인가되는 전압(V_b) 및 등가회로에서 등가직렬저항(R_s) 및 등가병렬저항(R_p)을 통해 소비전력을 계산하였을 시 약 222.4 pW로 계산됨. [검측 정확도 오차율] 같은 세기의 광이 조사되었을 시 정확도 오차율은 0.24%로 계산됨.	
성과달성 책임자 (소속기관)	KIM JI WON(연세대학교)	
소요기간	'21.01 ~ '21.12(1년, 2년차)	
성과달성 확인방법	자체 실험결과(보고서, 학술논문, 공인성적서) 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등) 공인시험성적서 (KTR, KTL 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원: 1건 (환산편수: 1건)
	논문	SCI(E) : 1편(작성중) (환산편수: 0.5편)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 4	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발	
정의	열화인자 및 부식발생 가스 감지를 위한 초고감도·고선택성 감지물질 설계 및 개발	
목적	극소량의 열화인자 및 부식발생 가스 감지를 위한 나노구조체 및 표면개질 기술개발을 통하여 철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 초고감도·고선택성 가스 센서의 원천기술을 확보하고자 함. 또한, 나노구조체의 대면적화 제작 기술, 저소비전력 구동 센서 개발을 통해 저가·보급형 열화인자 및 부식발생 가스센서를 개발하고자 함.	
성능목표	(기존기술 수준) [감지가스]: 철근콘크리트 열화인자 감지를 위한 가스센서 기술 및 연구는 보고된 바가 없음. [소비전력]: 세계적인 센서업체(일본, Figaro)에서 제작된 15 mW, 24 mW 구동하는 반도체식 가스센서. [대면적화 기술]: 대면적화 된 나노구조체를 이용한 반도체식 가스센서 개발은 전무함. [감지물질의 반응도]: 현재까지 논문에서 보고된 산화물 기반의 반도체식 가스센서(무히터)의 최대 반응도는 1000% 이하. (개발기술 수준) [소비전력]: 800 μW에서 동작하며, UV, 가시광 영역에서 동작하는 무히터 반도체식 가스센서 개발. [센서소자의 수]: 열화인자에 대해 선택적으로 반응할 수 있는 센서 TiO_2, SnO_2, SnO_2+Au, NiO, $\text{NiO}+\text{Au}$, WO_3, WO_3+Au, WO_3+CeO_2을 기반으로 하는 4종 이상의 가스센서 제작. [대면적화 기술]: 1차원적, 3차원적 나노구조체 대면적 제작 기술 개발. [감지물질의 반응도]: 빛을 이용한 정렬 다공성 나노구조체 기반의 가스센서(소비전력:800 μW)를 개발하여, 세계 최고 성능의 반응도 기록(반응도:12000%).	
성과달성 책임자 (소속기관)	심영석(신라대학교)	
소요기간	' 20.04 ~ ' 20.12(0년9개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	- 자체 실험결과(보고서 및 논문) - 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등) - 공인시험성적서 (KTR, KTL 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건 (환산편수: 0.5건)
	논문	SCI(E) : 6편(4편 심사중) (환산편수: 3.2편(2.83편 심사중))
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 5	열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발	
정의	열화인자 및 부식발생 가스의 선택적 감지 및 정확도 향상을 위한 다중가스센서 개발 및 집적화를 통하여 고성능의 반도체식 가스센서 어레이를 제작하고 및 열화인자에 대한 주성분 분석 및 패턴인식 평가.	
목적	앞서 제작된 NiO, WO ₃ , SnO ₂ , TiO ₂ 등 다양한 산화물 기반의 나노구조체에 대한 열화인자 반응특성 분석을 통한 다중 센서 집적화를 통하여, 고성능의 반도체식 가스센서 어레이를 제작하고 및 열화인자에 대한 주성분 분석 및 분별 기술을 개발하고자 함.	
성능목표	(기존기술 수준) [감지가스]: 철근콘크리트 열화인자 감지를 위한 가스센서 기술 및 연구는 보고된 바가 없음. [센서소자 수]: 세계적인 센서업체(스위스, Sensirion)에서 개발된 4개의 선세로 구성된 반도체식 2중 가스감지 센서. [감지한계농도]: 미국의 Metalbomx사가 20 ppb 감지한계농도를 보유. (개발기술 수준) [집적화된 센서소자의 수]: 본 연구개발에서는 8개(2X4), 9개(3X3)의 다중센서로 이루어진 반도체식 가스센서 어레이를 제작함. [감지한계농도]: WO₃ 나노구조체를 이용하여 CO₂ 가스에 대하여 21.4 ppb, Cl₂ 가스에 대하여 1.52 ppb의 감지한계농도를 달성하였음. [검출감도]: WO₃ 나노구조체를 이용하여 1 ppm Cl₂ 가스에 대하여 630.1%, 1 ppm CO₂ 가스에 대하여 362.8%의 검출감도를 달성하였음.	
성과달성 책임자 (소속기관)	심영석(신라대학교)	
소요기간	' 20.04 ~ ' 21.12(1년0개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 자체 실험결과(보고서 및 논문) - 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등) - 공인시험성적서 (KTR, KTL 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건(명세서 작성중) (환산편수: 1건)
	논문	SCI(E) : 1편 (환산편수: 0.33편)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 6	콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가	
정의	이중 센서의 콘크리트 내 적용가능성 평가 및 간이 성능 평가	
목적	본 연구에서 개발된 물리센서 및 화학센서 콘크리트 내 매립 시 내구성 확인, 센서 감지 성능 이상 유무 평가 및 성능 평가.	
성능목표	(기존기술 수준) [콘크리트 환경 하 센서 적용가능성 평가]: 샘플 채취 또는 신뢰성 낮은 비파괴 기법 활용. (개발기술 수준) [콘크리트 환경 하 센서 적용가능성 평가]: 콘크리트 환경 하 센서의 내화학적 및 센서 소재 미세구조변화 분석을 위해, 열화 인자(Cl^- , CO_2 , H_2O 등)를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 센서 소재 개발 및 이를 콘크리트 내 적용 가능성 확인함.	
성과달성 책임자 (소속기관)	조형규(한국세라믹기술원)	
소요기간	'20.04 ~ '20.09(0년6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	자체 실험결과(보고서 및 논문) 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 2건 (환산편수: 1건)
	논문	SCI(E) : 1편 (환산편수: 1편) KCI : 1편 (환산편수: 1편)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 7	광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가	
정의	콘크리트 내 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 진단 및 가스 센서를 활용한 열화 인자 내구수명 평가	
목적	이중 센서 및 가스 센서를 활용하여 콘크리트에 가해지는 하중을 통해 응력 거동 진단 및 감지 성능을 통한 열화인자 측정	
성능목표	(기존기술 수준) [콘크리트 환경 하 센서 적용가능성 평가]: 샘플 채취 또는 신뢰성 낮은 비파괴 기법 활용. (개발기술 수준) [센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가]: 콘크리트 내 센서 감지를 기반으로 한 광반응성 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 가스 센서를 활용한 열화 인자 CO_2 기반 콘크리트 내구수명 평가	
성과달성 책임자 (소속기관)	조형규(한국세라믹기술원)	
소요기간	'20.04 ~ '21.12(1년9개월, 1, 2년차)	
성과달성 확인방법	자체 실험결과(보고서 및 논문) 미디어 자료 (SEM, TEM micrograph, 결과 사진 등)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건 (환산편수: 0.5건)
	논문	SCI(E) : 1편 (환산편수: 1편) KCI : 2편(1편 작성중) (환산편수: 1편(0.5편 작성중))
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

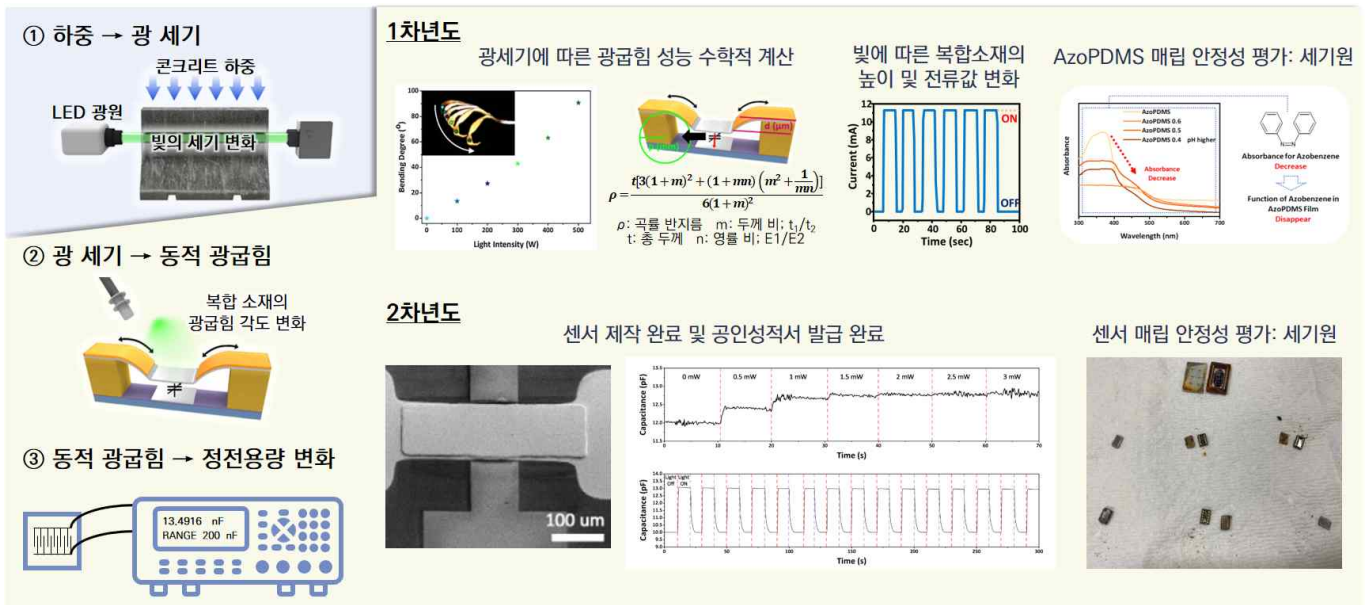
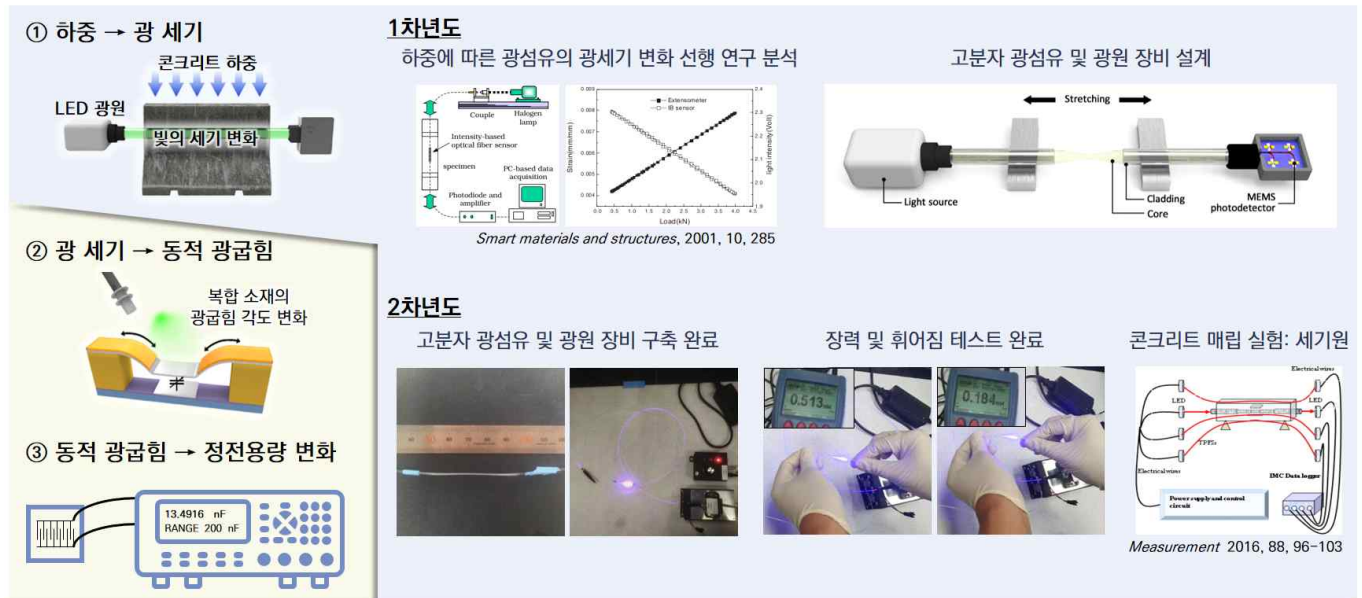
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구수행내용 및 성과

(1) 주관연구기관(연세대학교)

가. 개요

“미세전자기계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가”



나. 연구 수행 내용

○ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 합성 및 광반응성 거동 분석

■ AzoPDMS/금속 이중층 복합소재 개발 및 안정성 검증

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재 개발

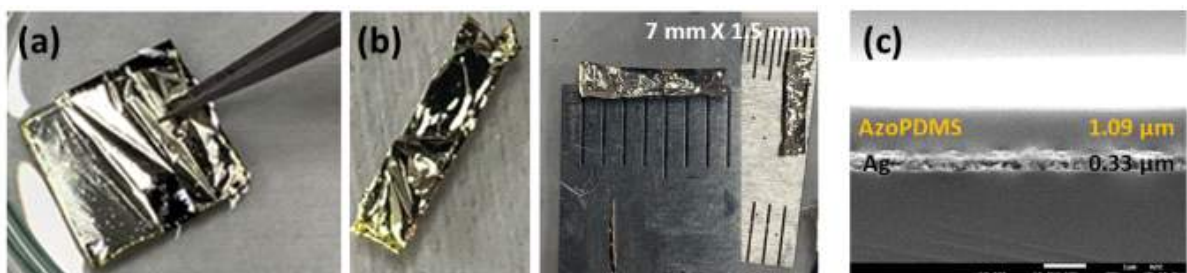


그림 1. 광반응성고분자/금속 박막 이중층 복합소재의 (a) 합성 및 필름 사진, (b) 필름의 크기, (c) 주사전자현미경(SEM) 단면도.

- 광반응성고분자(azobenzene incorporated polydimethylsiloxane; AzoPDMS)/금속 전극으로 구성된 광반응성 이중층 복합소재를 개발하였음. 금속으로 은(Ag)을 사용함.
- 개발한 복합소재는 은(300 nm)과 AzoPDMS(1 μ m)의 이중층으로 구성되어있으며, 필름을 7 mm X 1.5 mm 의 직사각형으로 잘라 광급힘 성능 시험을 진행함 (그림 1).

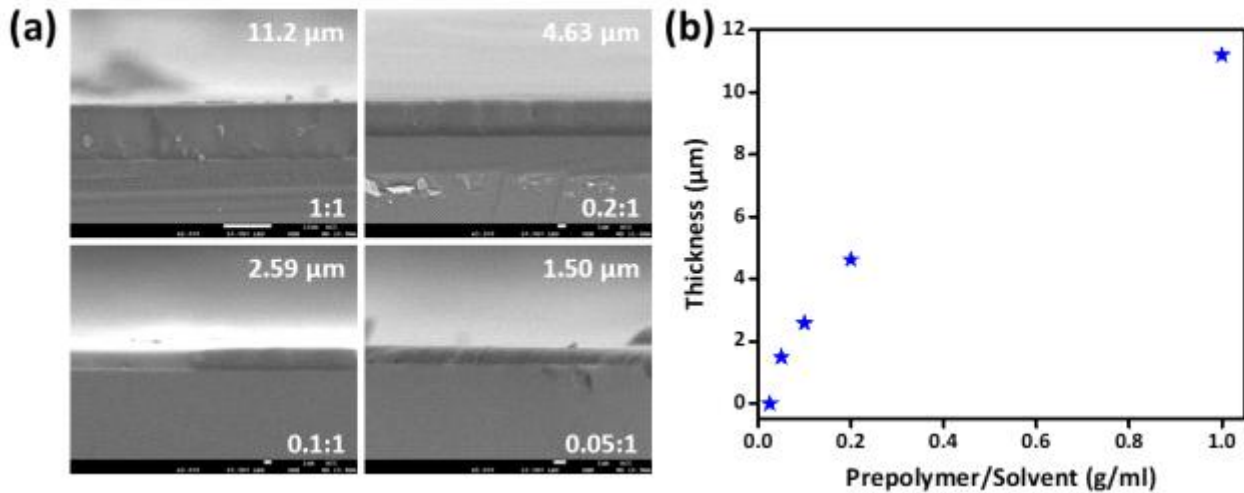


그림 2. (a) AzoPDMS 층의 두께 최적화 과정과 (b) AzoPDMS 프리폴리머:노말헥세인 비율(g:ml)에 따른 두께공정 최적화.

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재는 금속 전극을 열 증착기(thermal evaporator)로 증착한 후, 그 위에 AzoPDMS 고분자를 스핀코팅(spincoating)하여 합성함.
- 두께에 따른 공정이 잘 알려진 금속 전극과 달리, AzoPDMS는 새로 개발된 광반응성 소재이며, 스핀코팅 공정은 고분자의 점성에 따라 두께 조절 조건이 달라져 최적화가 필요함.
- 따라서 AzoPDMS의 스핀코팅 공정에서 프리폴리머를 노말헥세인(*n*-hexane) 용매에 비율(1(g):1(ml), 0.2:1, 0.1:1, 0.05:1)에 따라 희석해 농도를 조절함으로써 AzoPDMS 층의 두께공정을 최적화함 (그림 2).



그림 3. AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 광급힘 성능.

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재에 빛을 가하여 복합소재의 광급힘을 유도하였음. 광급힘 성능은 450 W의 200~2000 nm 파장의 광원을 사용하였고, 분석 결과 약 30 μ m 의 높이 변화를 얻음 (그림 3).
- 이를 MEMS 정전식 센서에서의 캔틸레버 길이인 200 μ m로 변환하면 0.85 μ m로, 기존의 목표였던 1 μ m 이하의 높이 변화를 달성하였으며, MEMS 정전식 센서 구성 시 이중층 복합소재 이중층을 MEMS 상부에 형성할 때 정전용량의 변화를 충분히 이끌어 낼 수 있는 의미있는 수치임.

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 안정성(강염기, 고온, 고압) 검증 - pH 안정성(pH 12.5).

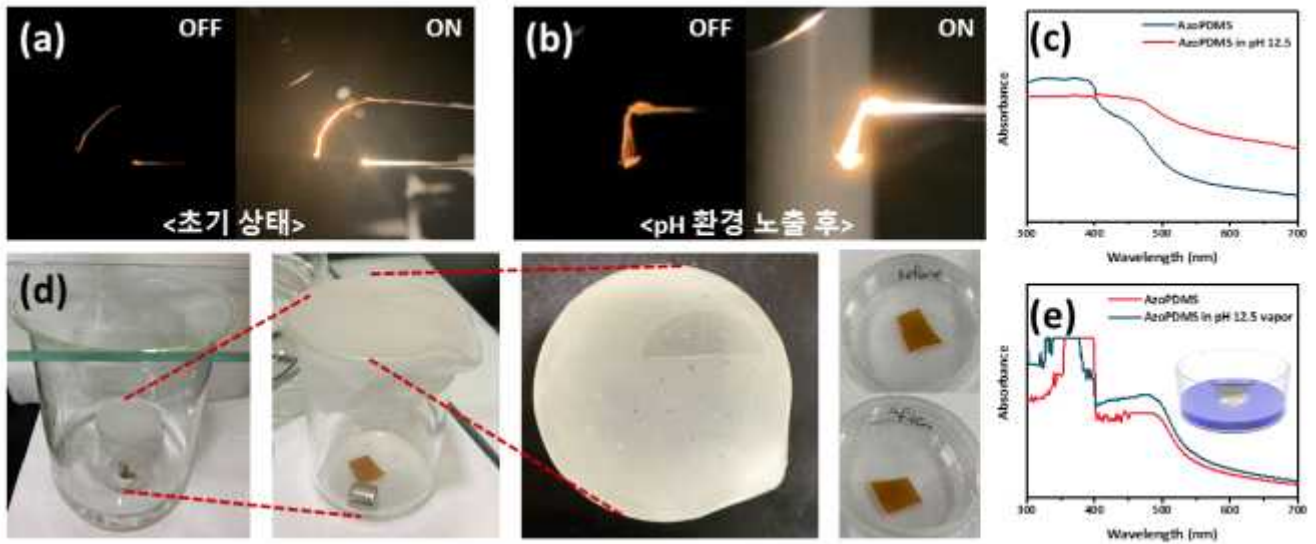


그림 4. pH 12.5 KOH 수용액 환경 하에서 (a) 노출 전, (b) 1주일 노출 후 광급힘 성능 비교. (c) 노출 전후의 자외선-가시광선 분광기(UV-Vis spectrometer)로 측정한 흡광 그래프 비교. (d) pH 12.5 KOH 수용액 환경 하에서 보호막이 추가된 pH 안정성 실험 구현. (e) 1주일 노출 전후의 흡광 그래프 비교.

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 pH, 온도, 압력 안정성을 광급힘 성능 및 빛 흡광도 등으로 검증함.
- 콘크리트 내부는 pH 12.5 의 강염기 환경임. 따라서 강염기 조건에서의 복합소재의 적용가능성 검증이 요구됨.
- pH 12.5의 KOH 수용액에 복합소재를 담가 광급힘 성능 및 UV-Vis 흡광 변화를 관찰함.
- pH 12.5 환경 하에서 일주일 노출 시, 필름의 광급힘 성능이 유지되었으나 UV-Vis 상에서 손상이 관찰됨. 이는 콘크리트 내에서 센서를 보호해줄 칩 캐리어의 필요성을 보임.
- 칩 캐리어 내부의 구조와 유사하게 설계하여(pH 12.5 KOH 수용액 내부에 공기가 순환할 수 있는 보호막을 추가하여, KOH의 증기에 필름이 노출된 환경) pH 안정성의 재검증을 수행하였을 때, UV-Vis 상 흡광도 그래프의 주요 피크(peak)가 사라지지 않음 (그림 4).

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 안정성(강염기, 고온, 고압) 검증 - 고온 안정성(80°C).

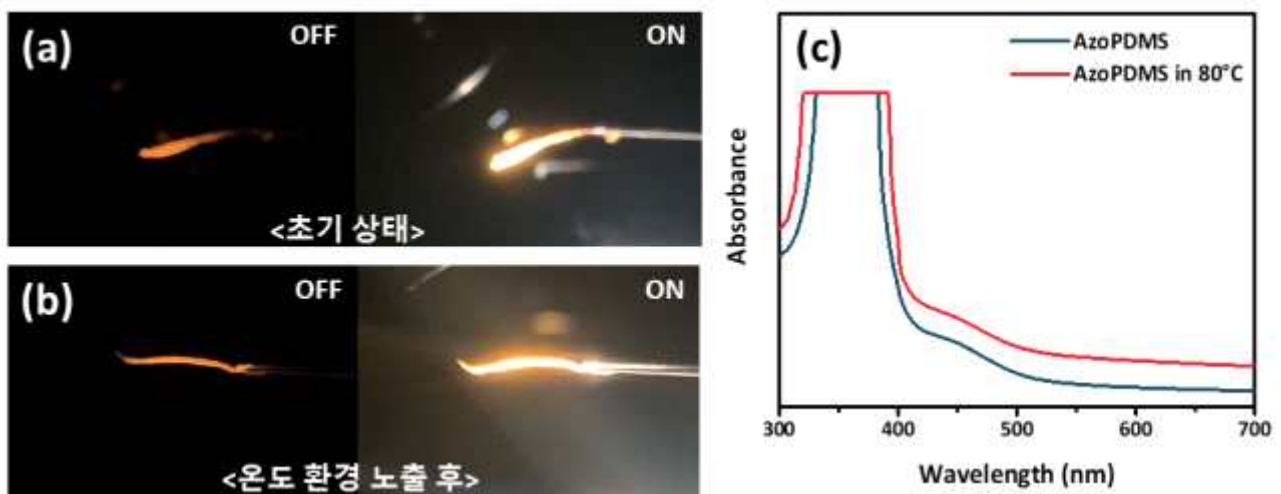


그림 5. 고온(80°C) 환경 하에서 (a) 노출 전, (b) 1주일 노출 후 광급힘 성능 비교. (c) 노출 전후의 자외선-가시광선 분광기(UV-Vis spectrometer)로 측정한 흡광 그래프 비교.

- 콘크리트에 매립해야하는 센서의 특성상 콘크리트의 양생 조건에서의 안정성 검증이 필수불가결함. 따라서 콘크리트 양생 조건 중 고온 양생과 고압증기 양생에 해당하는 극한 환경에서 복합소재의 안정성을 검증하였다.
- 고온 양생의 경우 온도가 높을수록 오히려 콘크리트의 강도가 저하되며 주로 최고 온도 80°C의 환경에서 양생이 진행되기 때문에 본 실험에서는 80°C 오븐에서 적용성 검증 실험을 진행함.
- 고온(80°C) 환경 하에서 일주일 노출 후 광급힘 성능을 비교하였으며, 광급힘 성능과 흡광 모두 변화 없이 성질이 유지됨 (그림 5).
- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 안정성(강열기, 고온, 고압) 검증 - 고압 안정성(~200 MPa).

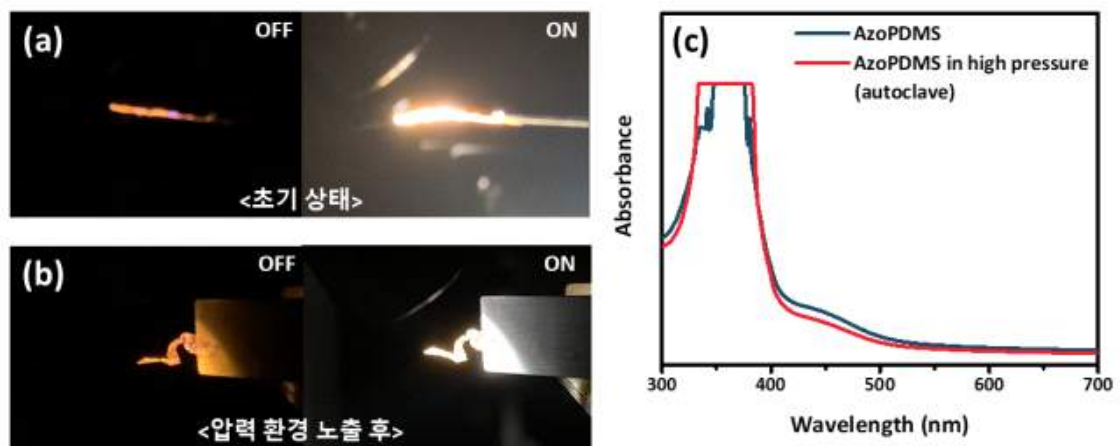


그림 6. 고압(~200 MPa) 환경 하에서 (a) 노출 전, (b) 1주일 노출 후 광급힘 성능 비교. (c) 노출 전후의 자외선-가시광선 분광기(UV-Vis spectrometer)로 측정한 흡광 그래프 비교.

- 고강도 콘크리트(~200 MPa) 형성 시 고압증기 양생이 필수적임. 고압증기 양생의 경우 오토클레이브를 사용하여 고온·고압의 증기 환경에서 양생이 진행됨. 따라서 이를 위해 오토클레이브 환경에서 복합소재의 성능 및 안정성 실험을 진행함.
- 오토클레이브(120°C, 2.2기압) 환경 하에서 30분의 온도상승시간, 3시간의 정온도시간, 30분의 온도하강시간을 거쳤으며, 이후 광급힘 성능과 UV-Vis 흡광 그래프를 비교함.
- 오토클레이브 환경 하에서 광급힘 성능과 흡광 모두 변화 없이 성질이 유지됨 (그림 6).

■ 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계

- 빛의 세기에 따른 정전 용량 변화 측정 (정전 용량)

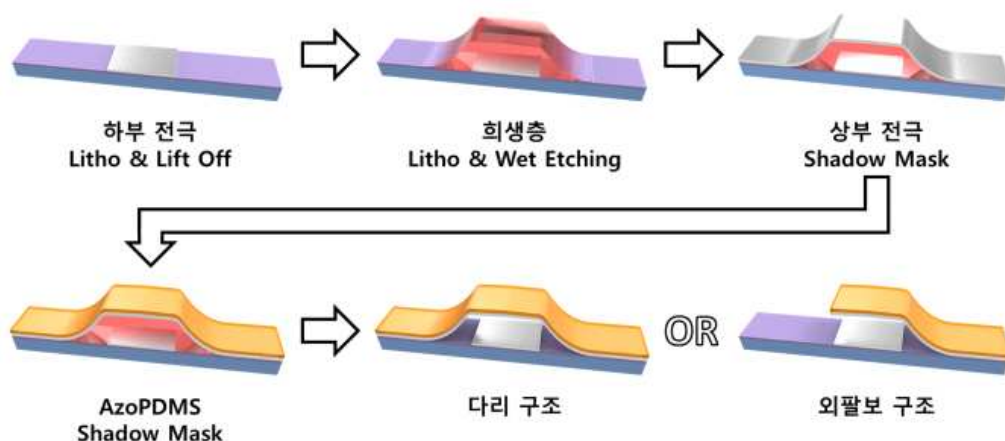


그림 7. AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 MEMS 정전식 감응 센서 설계 및 제작 공정.

- 1차년도 실험 결과와 변형된 바이메탈 곡률 반지름 방정식을 통해 확정된 길이, 두께에 해당하는 광반응성고분자(azobenzene incorporated polydimethylsiloxane; AzoPDMS)/금속 박막 이중층 기반 미세전자기계시스템(microelectromechanical systems; MEMS) 정전식 감응 센서를 설계함 (그림 7).

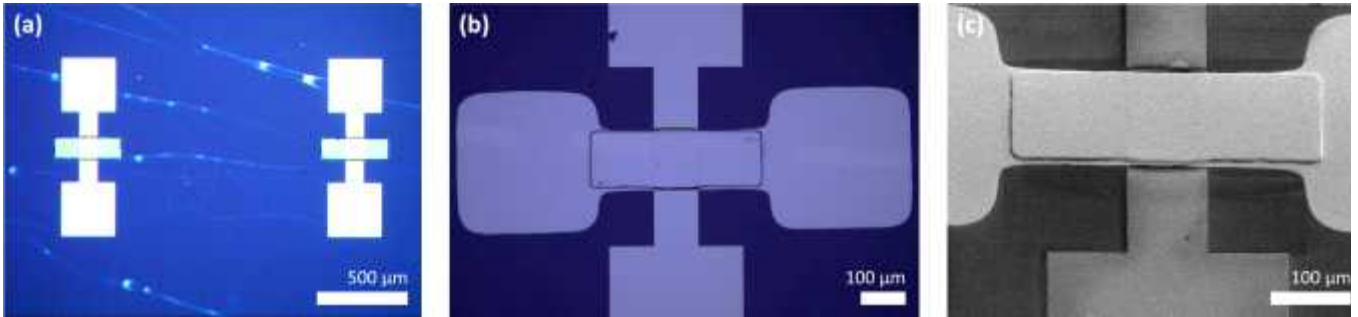


그림 8. (a) 하부 전극 및 희생층을 증착한 기판의 광학현미경 사진.

하부 전극, 희생층 및 상부 전극을 증착한 기판의 (b) 광학 현미경 사진 및 (c) SEM microscope 사진.

- MEMS 정전식 감응 센서 시제품을 제작하며 구조를 분석하고 및 피드백을 통해 제작 공정을 수정함.
- 상부 전극과 기판 사이의 유전층을 제거하고 아치형 다리 혹은 외팔보 형태로 구조를 수정함. 이중층을 형성하기 위한 상부 전극상에 AzoPDMS의 패터닝은 유사한 선행연구 결과가 존재하지 않으며, 식각을 통한 패터닝이 불가능하여 새도마스크(shadow mask) 공정으로 진행함 (그림 8).

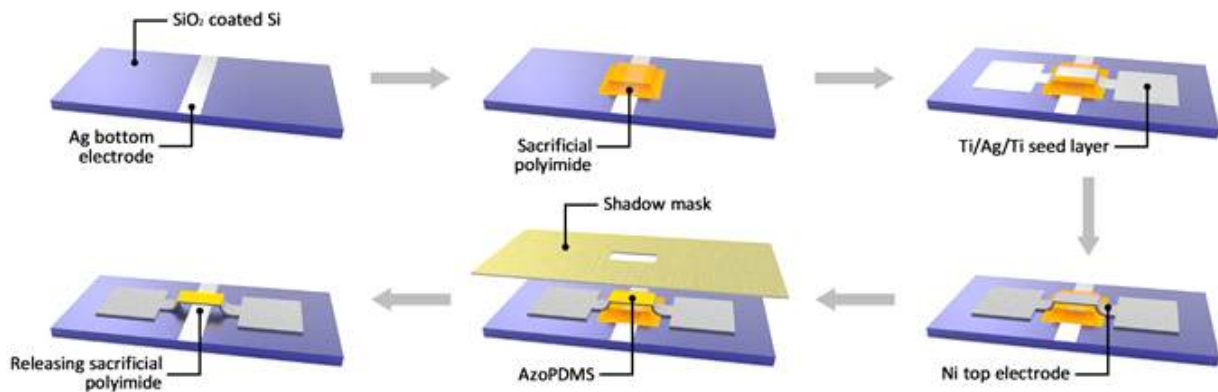


그림 9. 수정된 AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 MEMS 정전식 감응 센서의 제작 공정도

- MEMS 정전식 감응 센서 시제품을 제작하며 구조를 분석하고 및 피드백을 통해 제작 공정을 수정함 (그림 9).
- 상부 전극의 안정성을 향상시키기 위해 기존에 이베퍼레이터를 사용해 Ag를 증착하는 방식에서 전기증착을 통해 Ni를 성장시키는 방식으로 수정함. 또한 전극간 간격을 늘리기 위해 폴리이미드 희생층의 두께를 두껍게 변화시켰으며 상부 전극의 면적 또한 확대함.

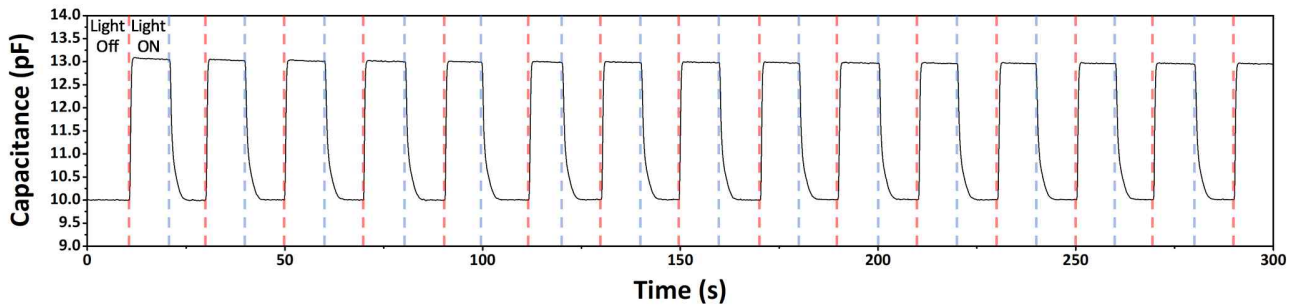


그림 10. 광 조사에 따른 MEMS 정전식 감응 센서의 실시간 정전용량 변화 그래프.

- MEMS 정전식 감응 센서의 시제품 제작을 완료하고 광 조사에 따른 정전용량 변화에 대한 연구를 진행함.
- 550 nm에서 3.28 mW의 출력을 가지는 백색광원을 10초마다 ON/OFF 상태를 전환했을 때 정전용량이 10.0 pF에서 ~13.0 pF으로 변화하는 것을 확인함 (그림 10). 광원을 조사하면 정전용량이 0.5초 내로 13.0 pF에 도달하고, 광원을 제거했을 때에는 10.0 pF에 도달하는데 약 4초가 소요됨. 이는 AzoPDMS의 광이성질체가 원래 상태로 돌아오는데 시간이 소요되기 때문임 (*Sens. and Actuators B: Chem.*, 2018, 266). 이 정전용량의 변화는 총 300초 동안 30번의 ON/OFF 상태 변화에도 지속적으로 성능을 유지하였음. 평균 반응시간은 광 조사시 각각 0.5초와 4초로 측정됨. 정확도 오차율은 약 0.24%로 계산됨.

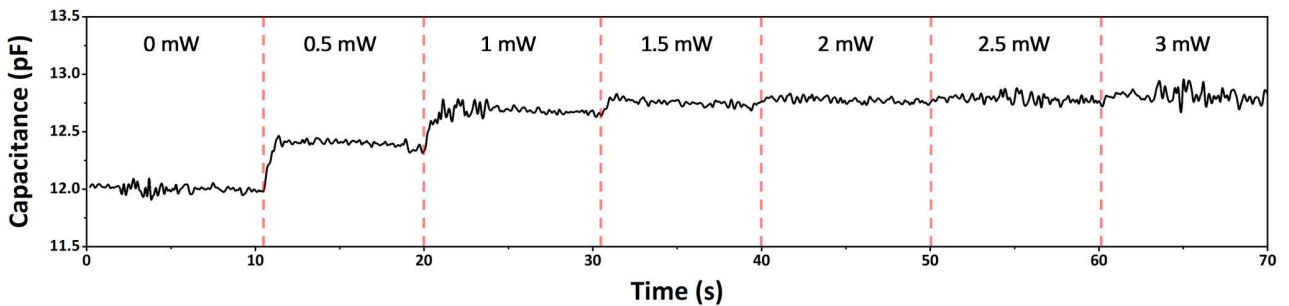


그림 11. 광 세기에 따른 MEMS 정전식 감응 센서의 실시간 정전용량 변화 그래프.

- 광 세기가 선형적으로 증가함에 따른 정전용량 변화를 측정함 (그림 11). 정전 용량은 전극 사이 거리에 반비례하기 때문에 선형적으로 증가하지 않음. 광도가 2 mW 이상이면 AzoPDMS에서 Azobenzene 그룹의 대부분이 cis에서 trans형태로 광이성질화되기 때문에 정전 용량이 수렴함.

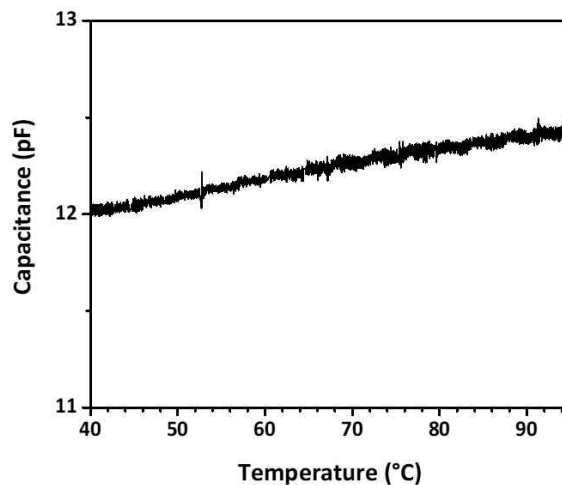


그림 12. 온도에 따른 센서의 안정성 평가

- 콘크리트에 매립해야하는 센서의 특성상 콘크리트의 양생 조건에서의 안정성 검증이 필수불가결함. 따라서 콘크리트 양생 조건 중 고온 양생에 해당하는 조건을 만족시키기 위해 실험실 환경에서 양생 조건 이상의 고온($\sim 95^{\circ}\text{C}$)까지 온도를 상승시키면서 안정성을 평가함.
- 고온 환경 하에서 개발된 센서는 온도 상승에 따라 비가역적인 변화를 보이지 않았으며, 정전 용량이 선형적으로 3.83 % 상승하였음 (그림 12). 매립 후 센서의 일반적인 동작 온도($\sim 40^{\circ}\text{C}$)에서는 유의미한 변화값을 보이지 않으며, 그 성질을 유지함.

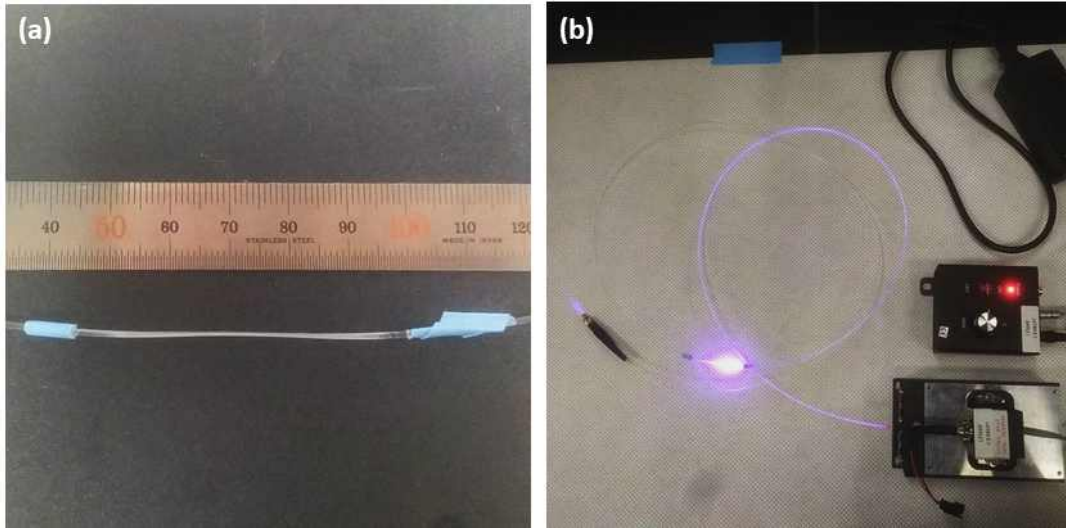


그림 13. (a) 일부를 가늘게 만든 고분자 광섬유. (b) 405 nm LED 광원 및 연결된 광섬유

- 철근콘크리트 하중에 따라 광 세기 변화를 유도하기 위해 일부를 가늘게 만든 고분자 광섬유를 제작함. 이를 405 nm LED 광원과 연결하여 고분자 광섬유 기반 하중 센싱 시스템을 구성함 (그림 13).

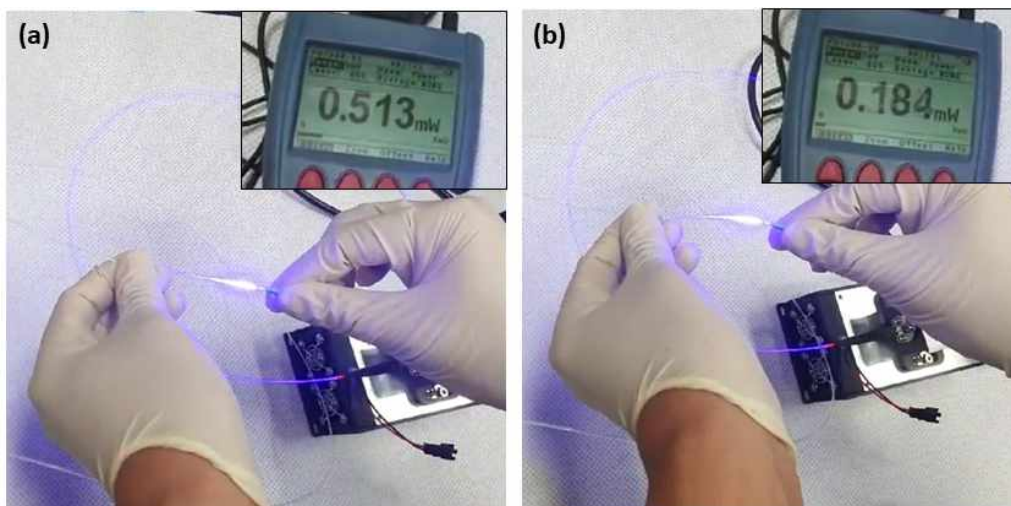


그림 14. 제작한 고분자 광섬유가 (a) 직선일 때와 (b) 구부러졌을 때의 광 세기 변화

- 제작한 고분자 광섬유가 직선일 때와 구부러졌을 때의 광 세기 변화를 확인함 (그림 14).

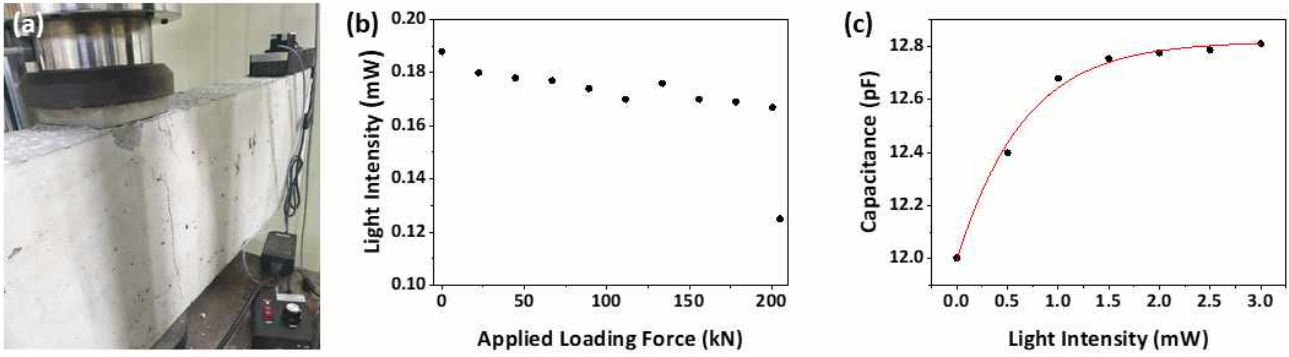


그림 15. (a) 고분자 광섬유가 내장된 콘크리트 제작 및 이를 사용한 하중 시험 사진. (b) 콘크리트에 인가되는 하중에 따른 광 세기 변화. (c) 광 세기에 따른 MEMS 센서의 정전용량 변화.

- 콘크리트 내부에 제작한 고분자 광섬유를 내장하고 양생을 진행함. 제작한 콘크리트에 하중을 인가하며 광섬유를 통과하는 광 세기를 측정함. 광 세기에 따른 정전용량 변화를 계산하여 0.13 pF의 정전용량 변화 및 평균 2.47×10^{-6} dB/N, 최대 1.51×10^{-5} dB/N의 민감도를 얻음 (그림 15).

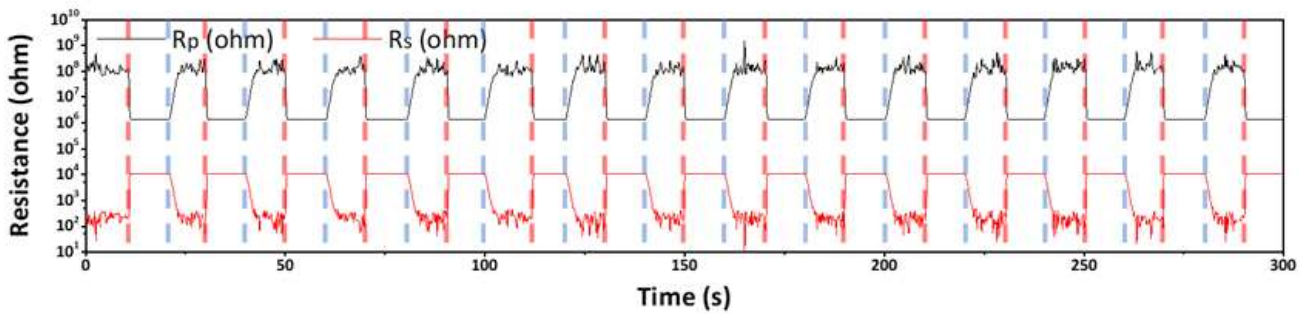


그림 16. 센서 작동에 따른 저항 및 소비전력 계산

- 광반응성 MEMS 정전식 센서의 경우 이론적으로 소비전력이 0이지만, 실제 측정 환경에서의 센서의 등가회로에는 내부 등가직렬저항(R_s) 및 등가병렬저항(R_p)이 존재함.
- 인가되는 전압(V_b): 0.1 V, Osc Level(V_o): 0.033 V 및 광 조사에 의한 센서 동작중에 등가회로에서 등가직렬저항(R_s) 및 등가병렬저항(R_p)을 측정하여 소비전력을 산출함.
- 평균 등가저항(R_e)는 4.74×10^7 옴으로 측정되었으며 이를 통해 산출시 222.4 pW의 소비전력 값을 얻음 (그림 16).

(2) 공동연구기관1(신라대학교)

가. 개요

“철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발”



나. 연구 수행 내용

○ 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발

■ 열화인자 및 부식발생 가스 종류 및 농도평가

- 가스 감지물질 선별 및 성능 조사
- 열화인자: O₂(산화성 가스), CO₂(환원성 가스), H₂(환원성 가스), Cl₂(환원성 가스), H₂O
- 열화인자 감지 소재로서 SnO₂, WO₃, NiO, TiO₂ 를 선정함.
 - SnO₂: 환원성 (CO₂) 가스 및 수분에 대한 높은 민감도.
 - WO₃: 산화성 가스(O₂, NO₂)에 대하여 높은 민감도 보유.
 - NiO: 산화·환원성 가스를 분별할 수 있는 기준 소재로 사용 가능.
 - TiO₂ : 산화·환원성 가스에 대한 높은 민감도를 보유하며, 빛에 의하여 구동이 가능함. 저소비전력 가스센서 구현 가능.

■ 나노구조체 제작 및 대면적 제작 기술 개발

- 표면개질 기술 개발 및 최적화

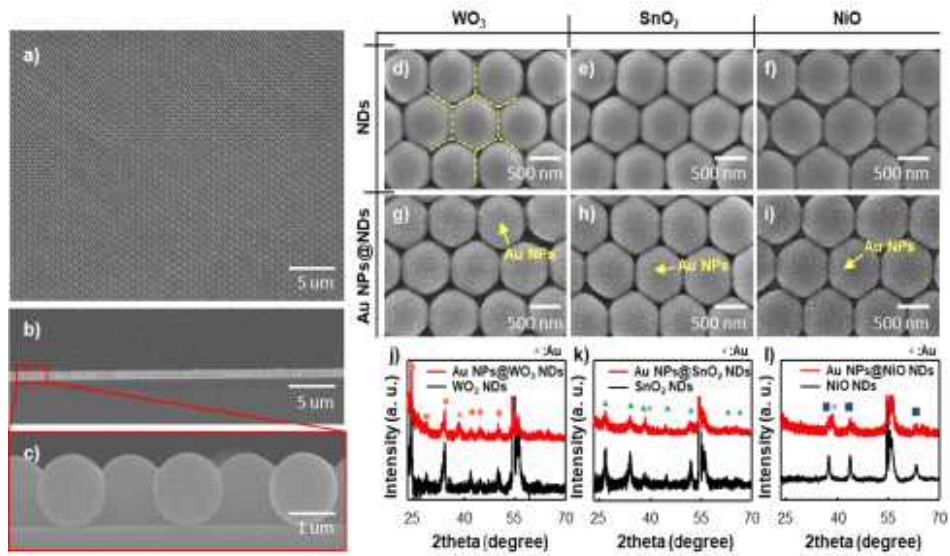


그림 17. Soft-templating법을 이용하여 제작된 WO_3 , SnO_2 , NiO 나노구조체와 Au 촉매가 부착된 WO_3 , SnO_2 , NiO 나노구조체의 SEM 및 XRD 결과.

- Polystyrene beads 기반의 템플레이트 법을 적용하여, WO_3 , SnO_2 , NiO 나노구조체를 형성함.
- 나노구조체의 대면화를 위하여 Langmuir-Blodgett method을 적용하여 4인치 웨이퍼 위에 균일한 형상의 산화물 나노구조체를 제작함.
- 전자빔 증착법을 이용하여 Au 촉매를 증착하였으며, 열처리 온도를 조절하여 금속 촉매의 크기를 최적화하였음.
- 그림 17을 통하여 Langmuir-Blodgett method 기반, 성공적으로 형성된 Polystyrene beads 단일층의 표면과 단면의 SEM 사진, 그리고 WO_3 , SnO_2 , NiO 감지막이 증착된 SEM 사진, WO_3 , SnO_2 , NiO 감지막 표면에 Au 촉매가 형성된 SEM 사진을 보여주고 있음. XRD를 통하여 형성된 감지소재와 금속 촉매를 검증함.

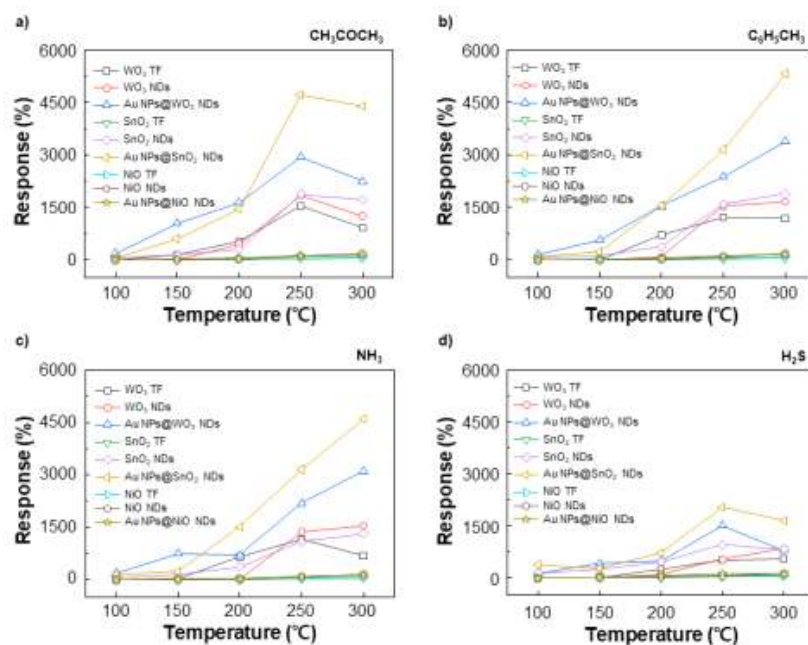
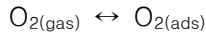


그림 18. WO_3 , SnO_2 , NiO 나노구조체와 Au 촉매가 부착된 WO_3 , SnO_2 , NiO 나노구조체의 동작 온도에 따른 환원성 가스의 흡착량 변화 및 산화성 가스에 대한 반응성 분석. (a) $\text{CH}_3\text{COCH}_3/\text{O}_2/\text{N}_2$, (b) $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}/\text{O}_2/\text{N}_2$, (c) $\text{NH}_3/\text{O}_2/\text{N}_2$, (d) $\text{H}_2\text{S}/\text{O}_2/\text{N}_2$.

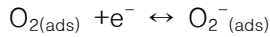
■ 단일 센서 제작 및 실험실 환경에서의 성능 평가

- 가스센서의 구동온도에 따른 감지 물질 표면에서의 O₂ 흡착량에 대한 연구 진행

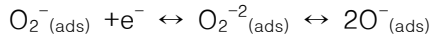
- 구동 온도 100 °C 이하에서의 O₂ 흡착 반응



- 구동 온도 100~250 °C 에서의 O₂ 흡착 반응



- 구동 온도 250 °C 이상에서의 O₂ 흡착 반응



- 구동온도가 상승함에 따라, O₂의 흡착량은 증가하고, 환원성 가스는 증가된 O₂ 흡착량에 비례하여 반응성이 향상하는 것을 확인함 (그림 18).

- WO₃, SnO₂, NiO 나노구조체는 박막보다 높은 반응성을 나타내었으며, 각 감지소재의 내재된 촉매효과로 인하여 선택적 반응을 나타내었으며, Au가 부착된 나노구조체는 이와 같은 선택성과 반응성을 모두 극대화 하였음.

- 각 감지소재의 구동온도에 따른 반응성 변화를 기반으로 주성분 분석을 수행하였으며, 그림 18에서 온도가 증가함에 따라 선택적 감지 능력이 향상되는 것을 확인하였음. 또한, 구동온도에 따른 반응성 변화를 Arrhenius equation를 사용하여 활성화 에너지 변화를 분석하였음.

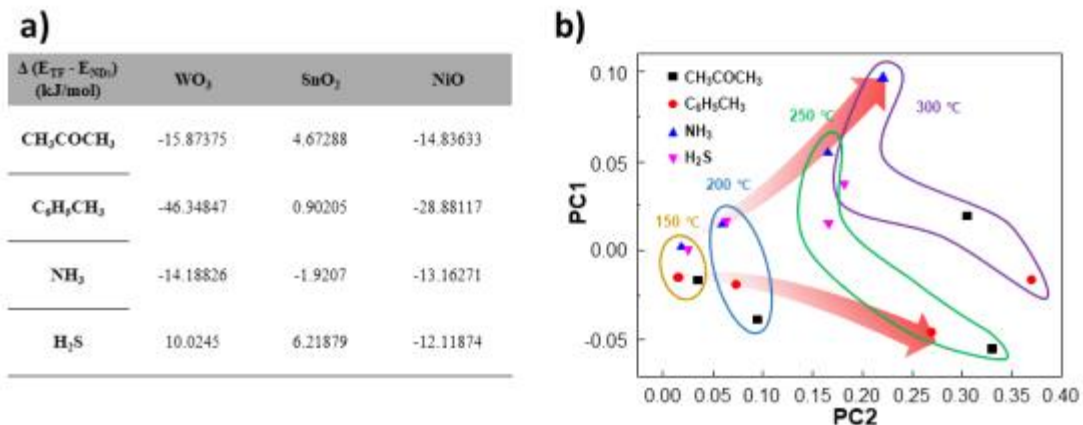


그림 19. WO₃, SnO₂, NiO 나노구조체와 Au 촉매를 부착한 WO₃, SnO₂, NiO 나노구조체의 (a) 활성화 에너지 차이를 나타내는 표와 (b) 주성분 분석을 통한 환원성 가스의 선택적 감지 특성 그래프.

- Graphene quantum dots 코팅을 통한 SnO₂ 나노구조체의 표면개질 기술 및 H₂O 반응 분석

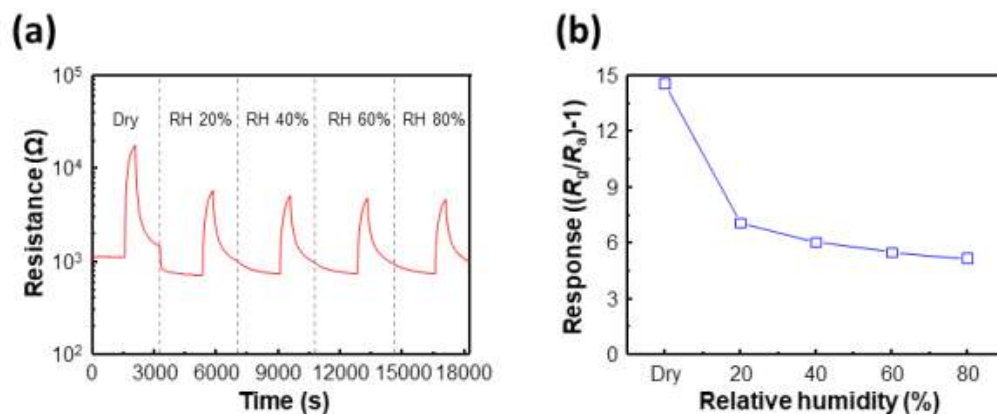


그림 20. H₂O 농도에 따른 graphene quantum dot이 코팅된 SnO₂ 나노구조체의 (a) 실시간 반응 그래프와 (b) H₂O 반응도.

- SnO₂ 나노구조체의 표면개질을 통한 선택성 향상을 위하여, 10 nm 크기 이하의 graphene quantum dot 을 부착함.
- H₂O에 대한 반응성을 확인하여, 노출된 상대습도에 따른 반응성을 분석하였으며 그림 20에서 보여주고 있음.
- 상대습도가 증가할수록 반응성이 감소하는 것을 확인하였으며, 상대습도의 양이 변하더라도 감지소재의 기저 저항값은 안정적인 것을 확인할 수 있음.
- 기본적으로 SnO₂ 나노구조체는 H₂O와 반응할 수 있는 면적이 향상되며, 10nm 크기 이하의 graphene quantum dot 은 수많은 edge site을 보유하고 있고, 이러한 edge site에서 H₂O와 강하게 반응하는 것으로 나타남 (그림 21).
- 이와 같은 결과는 graphene quantum dot 이 코팅된 SnO₂ 나노구조체를 이용하여 H₂O를 효과적으로 감지할 수 있다는 것을 보여주는 것임.

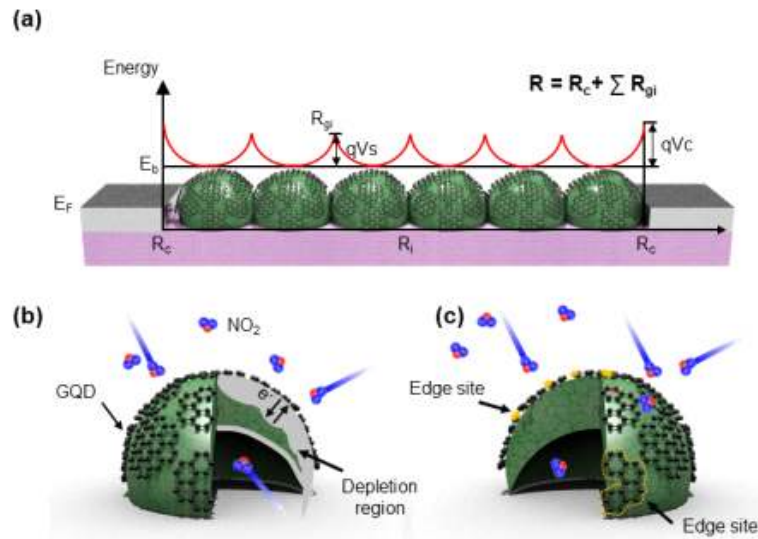


그림 21. Graphene quantum dot이 코팅된 SnO₂ 나노구조체의 (a) 저항 변화 및 (b) graphene quantum dot의 H₂O 감지향상 원리.

- Excimer laser annealing을 통한 표면개질 및 가스 반응성 향상 기술 개발

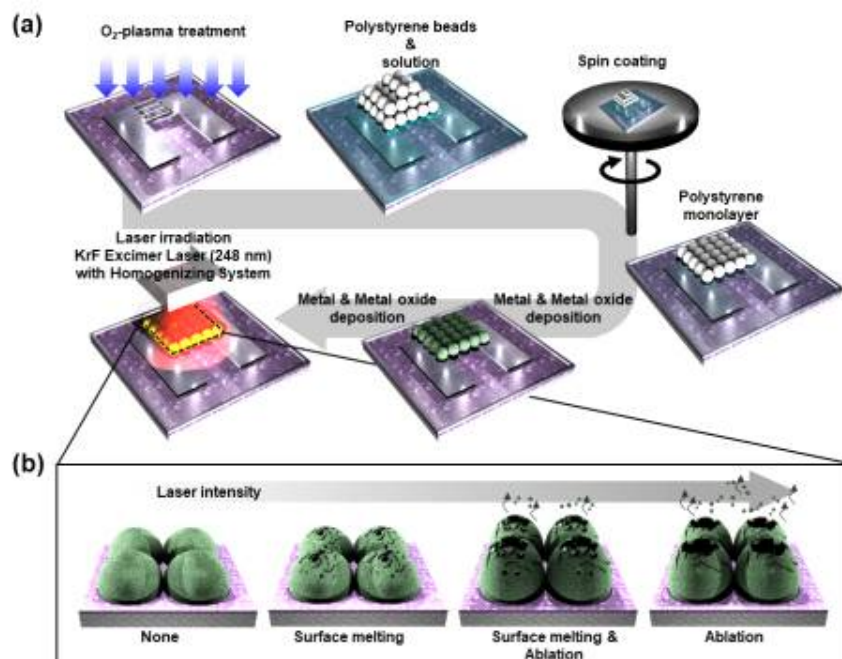


그림 22. Excimer laser annealing을 통한 표면 개질 공정 및 형상 변화 그림.

- 템플레이트 공정을 통하여 제작된 나노구조체의 표면에 국부적인 excimer laser annealing을 진행함으로써 개방형 나노구조체로 변화시킴.
- 표면이 개방되면, 가스와 반응할 수 있는 면적이 증가하게 되며, 반응속도가 극대화 됨.
- 그림 22은 개방형 나노구조체 형성을 위한 공정을 보여주고 있음.

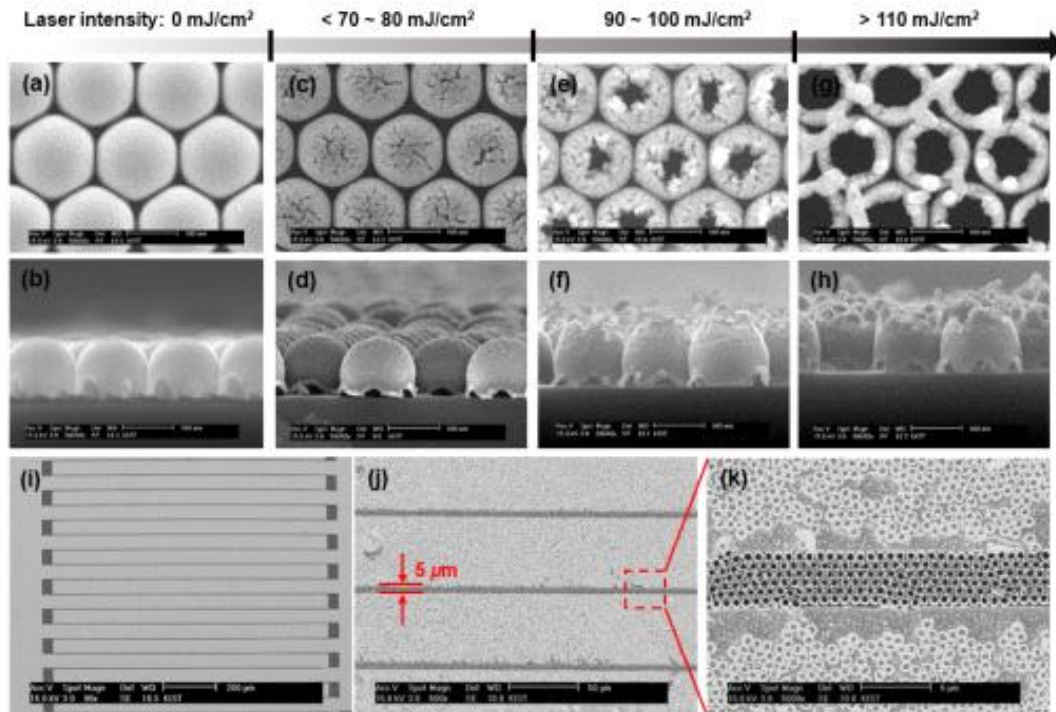


그림 23. 노출된 excimer laser의 세기에 따른 형상 변화와 센서 전극위에 형성된 개방형 나노구조체의 SEM 사진.

- Excimer laser의 세기가 증가할수록, 산화물 나노구조체의 표면의 녹기 시작하며 90 mJ/cm² 이상에서는 증발하기 시작함. 110 mJ/cm²에서는 모두 증발하여 오픈 구조형으로 변화됨 (그림 23).
- Pt 전극위에서도 똑같은 모양의 오픈형 나노구조체가 형성되며, 이러한 결과는 Excimer laser annealing 공정은 기판의 영향을 주지 않는 공정이라는 것을 나타냄.

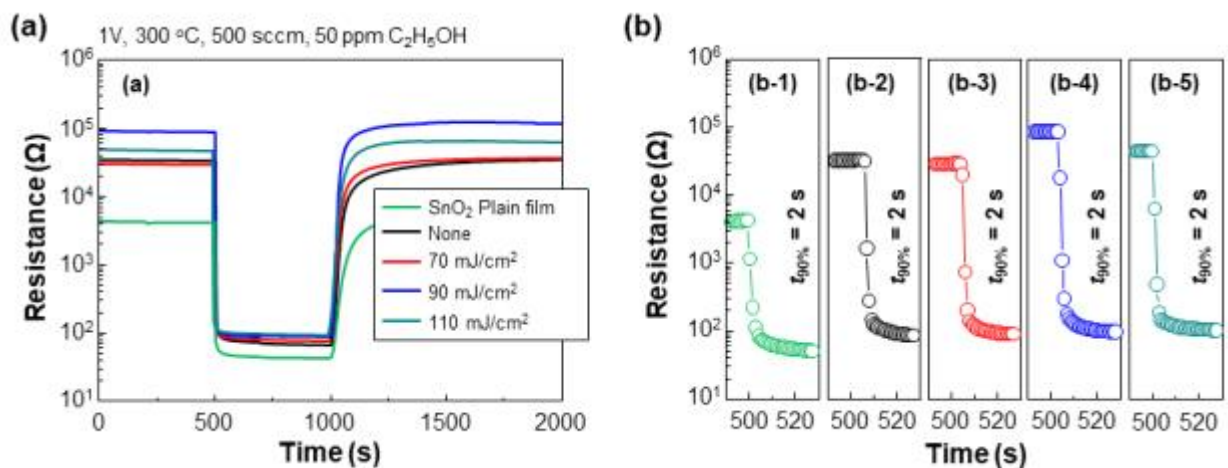


그림 24. 환원성 가스에 대한 SnO₂ 기반의 개방형 나노구조체의 (a) 실시간 반응 그래프와 (b) 반응속도.

- SnO₂ 기반의 개방형 나노구조체의 반응 커브를 그림 24에서 보여주고 있으며, 2초의 반응속도를 나타내었음.

- 이와 같은 결과는 excimer laser 세기가 증가함에 따라 가스와 반응할 수 있는 면적이 증가하지만, 반응속도는 변화가 없이 유지된다는 것을 확인함.
- 근접장 나노패터닝법을 이용한 소비전력 1 mW 이하의 상온 가스센서 제작 기술 개발

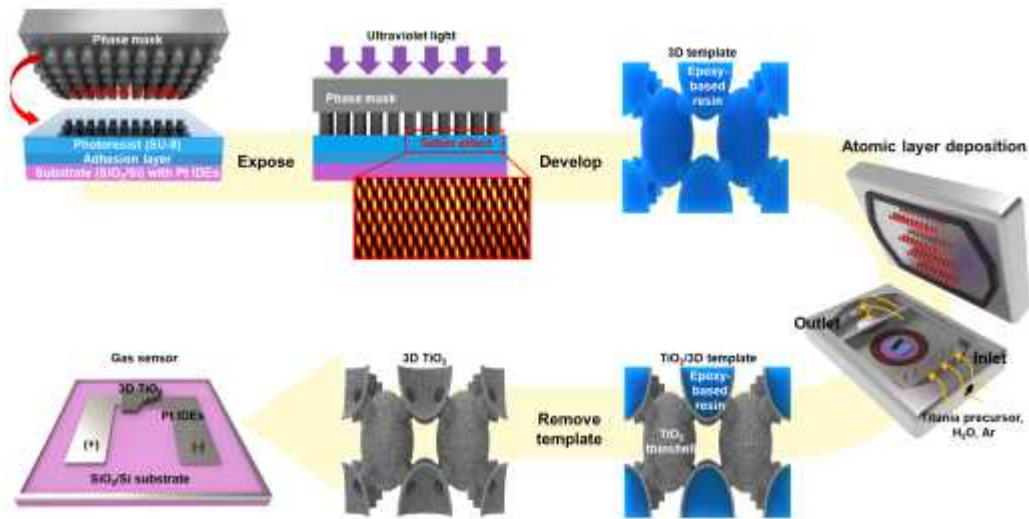


그림 25. 저소비전력 가스센서의 제작 공정.

- 근접장 나노패터닝은 위상 마스크에 투과되는 빛의 간섭 현상으로부터 발생하는 주기적인 3차원 분포를 이용한 고분자 물질 가공기술임. 나노패터닝으로 정렬된 다공성의 고분자 물질(SU-8)에 원자층 증착법을 이용하여 TiO_2 박막을 형성시켰으며, 이후 열처리를 통하여 고분자 물질을 제거하고 정렬 다공성의 TiO_2 나노구조체를 제작하여 가스센서에 적용함 (그림 25).

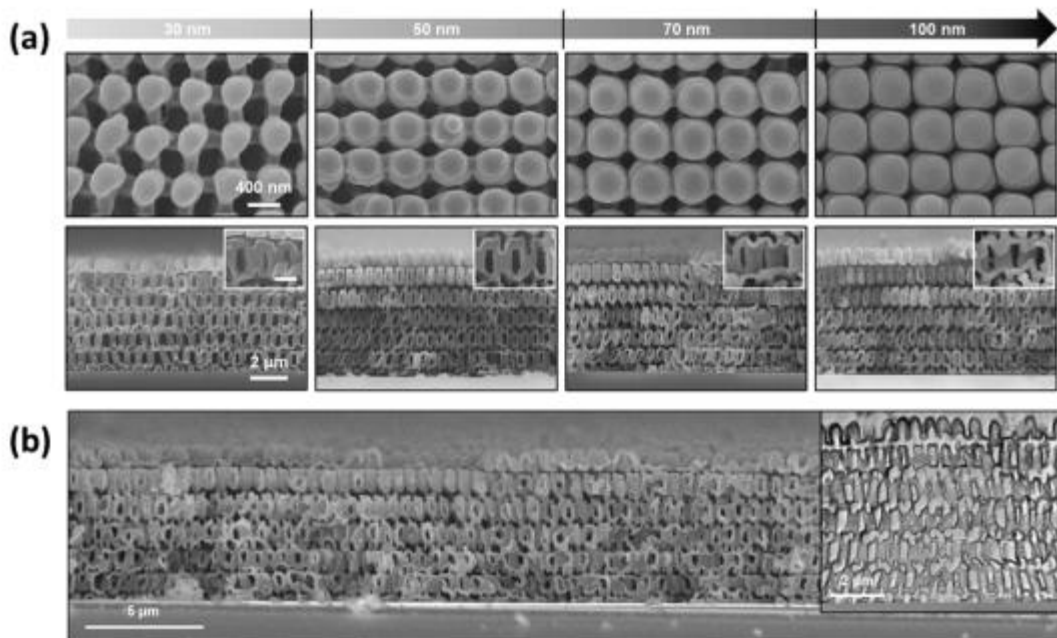


그림 26. (a) 다공성 고분자 물질에 증착된 TiO_2 박막 두께에 따른 형상과 (b) TEM 사진.

- TiO_2 를 감지소재로 한 정렬 다공성 나노구조체를 제작하였으며, TiO_2 의 증착 두께에 따라 기공율이 변화하는 것을 확인함(그림 26).
- 제작된 센서를 구동하기 위하여 발열체가 아닌 UV LED를 사용함 (소비전력 800 uW).
- 30 nm 두께의 TiO_2 , 6 μm 의 나노구조체 두께에서 가장 높은 가스 반응성을 나타냈으며, finite-difference time-domain (FDTD) simulation을 통하여 분석을 진행함.

- 그림 27는 산화성 가스에 노출시켰을 때의 반응성을 보여주고 있으며, ppb 단위에서도 100%이상의 반응성을 나타내는 것을 확인.
- 여러가지 환원성 가스와는 반응하지 않으며, 산화성 가스에만 높은 반응성을 나타냄. 이러한 결과는 열화인자 감지를 위한 가스센서 어레이에서 산화성 열화인자에만 효율적으로 반응할 수 있다는 것을 나타냄.
- 본 연구에서 개발된 센서의 소비전력 대비 감지 특성은 세계 최고 기록(검출감도 12000%)을 갱신함.

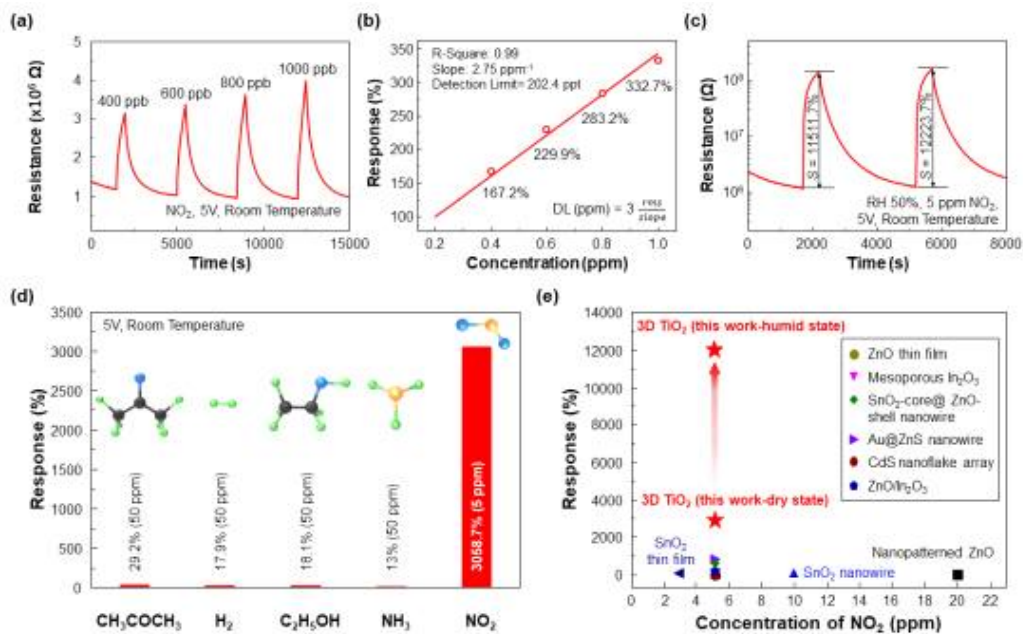


그림 27. (a) 산화성 가스에 대한 정렬 다공성 TiO_2 센서의 실시간 반응 그래프와 (b) 반응도, (c) 수분 환경에서의 실시간 반응 그래프, (d) 다양한 산화환원성 가스에 대한 반응도, (e) 보고된 문헌과의 가스 감지 성능 비교.

· 상용화 가스센서 플랫폼을 이용한 시작품 제작



그림 28. 감지 소재가 형성된 4인치 웨이퍼 사진과 상용화 플랫폼, 상용화 플랫폼에 제작된 산화물 나노구조체 기반의 가스센서 사진.



그림 29. 기존 실험실 환경에서의 측정 장비(왼쪽), 철근콘크리트 매립환경에서의 특성 분석을 위한 가스센서 임베디드 시스템(가운데, 오른쪽) 사진.

- 콘크리트 환경 하 가스 센서 특성 분석을 위한 패키징 기술을 개발함 (그림 28).
- 4인치 웨이퍼 내에 732개의 센서를 집적할 수 있었음.
- 콘크리트 환경 하 가스 센서 특성 분석을 위한 휴대용 가스센서 임베디드 시스템 개발 및 제작하였음 (그림 29).
- 콘크리트 환경 하 감지 특성에 대한 비교분석할 예정임.

■ 산화물 나노구조체의 가스 반응성 효율 평가

- 다공성 나노구조체 기반 가스센서의 가스 반응 효율에 대한 연구를 진행함.
- 정렬 다공성의 TiO_2 나노구조체를 두께별로 제작하여, 가스 확산에 따른 충돌회수 시뮬레이션을 수행함 (그림 30).
- TiO_2 의 증착두께는 30, 50, 70, 100 nm로 증착하였으며, 동작온도 400도에서 환원성 가스에 대한 반응성을 측정함.
- 증착 두께가 증가할수록 반응성은 향상되었으며, 75 nm 두께에서 가장 높은 반응성을 나타내었음. 100 nm에서는 반응성이 감소하였으며, 이러한 결과는 증착된 TiO_2 film이 너무 두꺼우면, 가스의 확산을 방해하는 것으로 분석.
- 정렬 다공성의 TiO_2 의 나노구조체의 가스 반응성은 TiO_2 박막에 비해 169배가 향상되는 것을 확인함.
- 최적화된 온도를 찾기 위해서 동작온도를 200, 250, 300, 350, 400, 450도에서 가스 반응성을 측정하였고, 400도에서 가장 높은 반응성을 나타내었음. 이러한 결과는 가스의 흡착 및 탈착에 필요한 에너지가 400도에서 가장 활발하게 일어난다는 것을 보여주는 결과임.

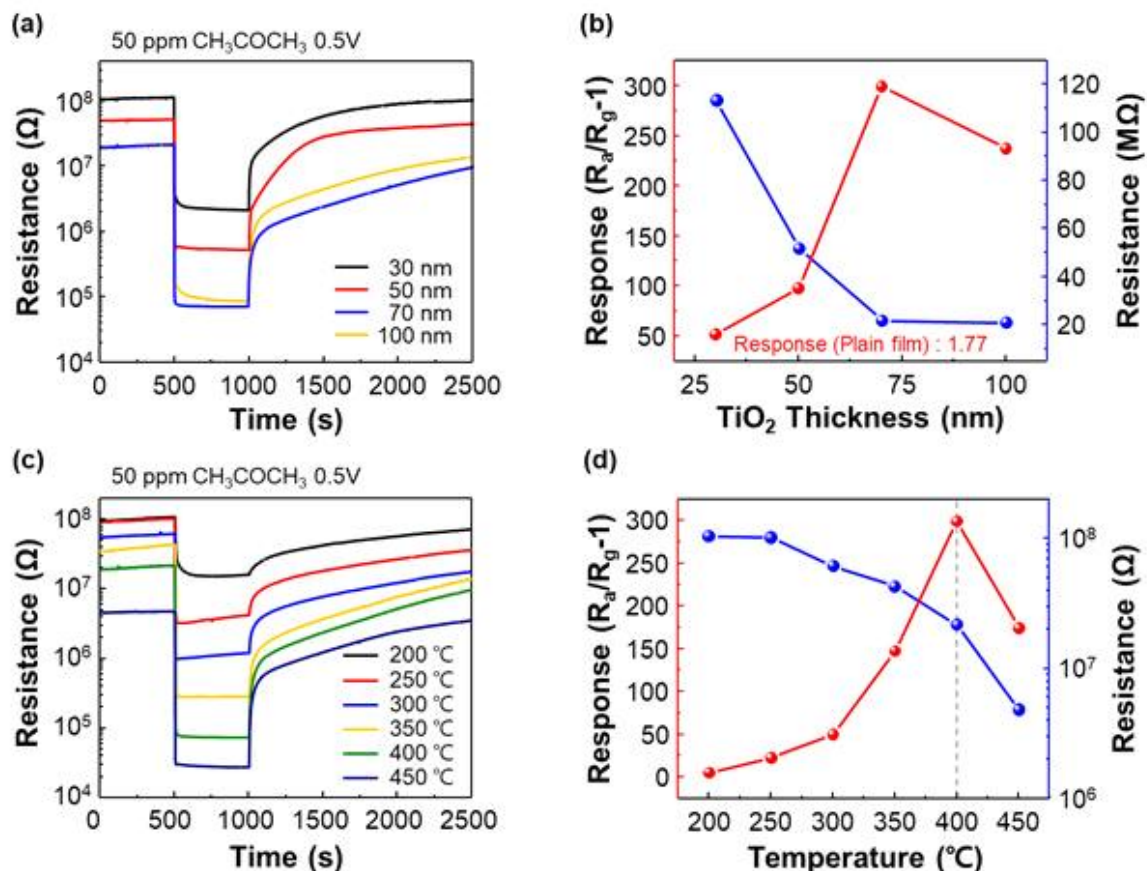


그림 30. 환원성 가스에 대한 정렬 다공성 구조 TiO_2 기반의 가스센서의 (a) 두께에 조건에 따른 반응 그래프와 (b) 반응도. (c) 동작온도에 따른 반응 그래프와 (d) 반응도.

최적화된 정렬 다공성 TiO_2 나노구조체의 가스 확산 및 반응효율을 분석하기 위하여, 유한요소법(Finite element method, FEM)를 이용하여 가스 분자의 충돌 횟수 및 확산 속도에 대한 시뮬레이션을 진행함 (그림 31).

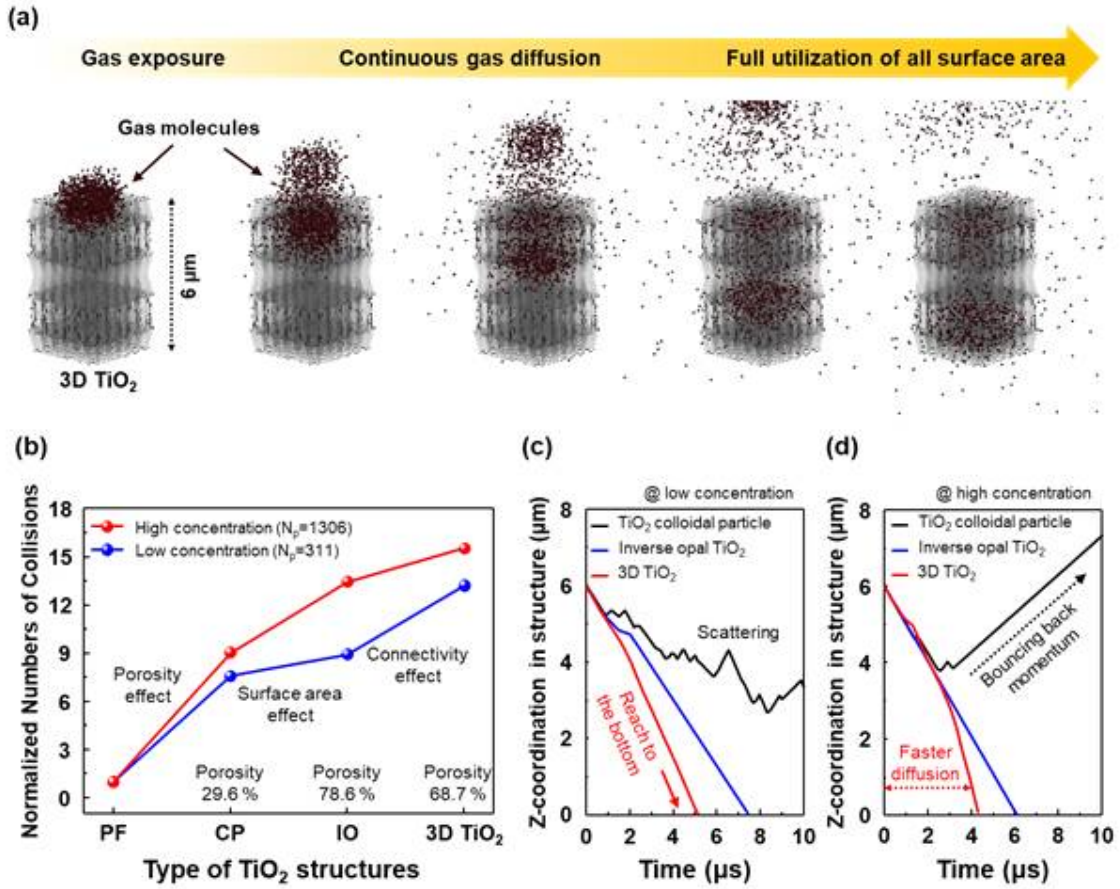


그림 31. (a) 정렬 다공성 TiO_2 나노구조체에 대한 유한요소법을 기반의 가스분자 충돌횟수 및 확산 시뮬레이션. (b) 다양한 형태의 TiO_2 나노구조체에 대한 충돌횟수. (c) 저 농도일 때와 (d) 고 농도일 때의 가스 확산 속도.

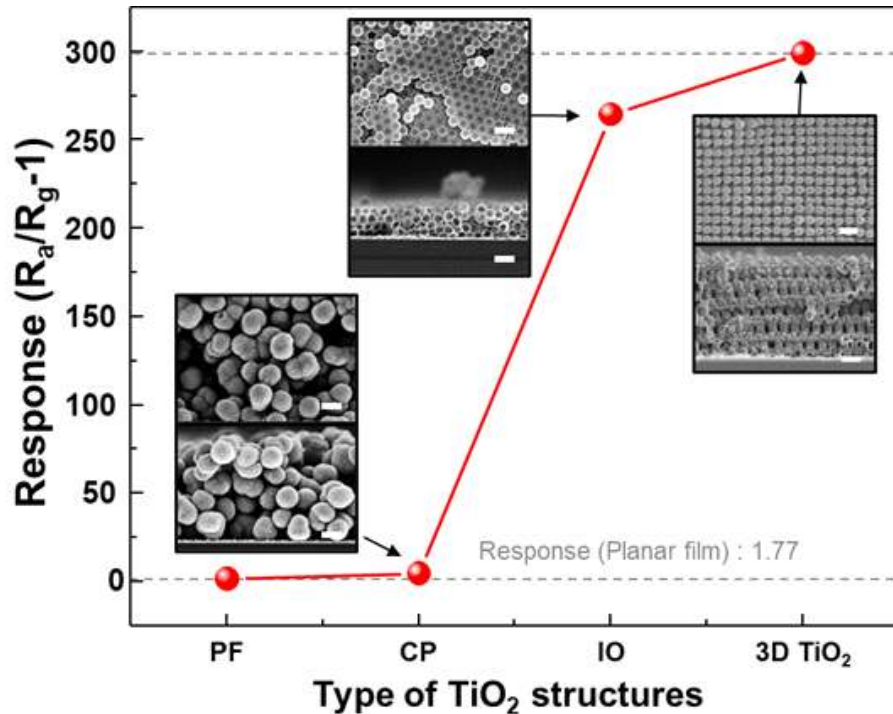


그림 32. 환원성 가스에 대한 다양한 형태의 TiO_2 나노구조체의 반응성.

- 명확한 비교를 위해서, TiO_2 박막, colloidal particle, inverse opal 형태와 함께 진행하였으며, 기공도는 0%(박막), 29%(colloidal particle), 78.6%(inverse opal), 68.7%(정렬 다공성 나노구조체)를 각각 나타내었으며, 본 사업에서 제작된 TiO_2 나노구조체가 inverse opal 형태의 구조체보다 기공도가 낮음에도 불구하고, 정렬 다공성의 TiO_2 나노구조체가 비표면적이 크면서 연결이 잘 되어 있기 때문에 가스 분자들의 확산이 용이하여, 총돌수가 1306회로 가장 높게 나타내는 것을 확인함. 또한, 저 농도에서도 나노구조의 가장 밑바닥까지 가장 빠르게 도달하는 것을 확인함. 이러한 결과는 다른 나노구조체의 경우, 연결성이 낮아서 역압으로 인하여 가스분자의 확산을 저해하는 것으로 사료됨.
- 앞선 결과가 가스 반응에 미치는 영향을 확인하기 위해서, 정렬 다공성의 TiO_2 나노구조체를 TiO_2 박막, colloidal particle, inverse opal 형태와 함께 동작온도 400도에서 환원성 가스에 대한 반응을 진행하였으며, 시뮬레이션의 결과와 유사하게 정렬 다공성의 TiO_2 나노구조체가 가장 높은 가스 반응성을 나타내는 것을 확인함 (그림 32).

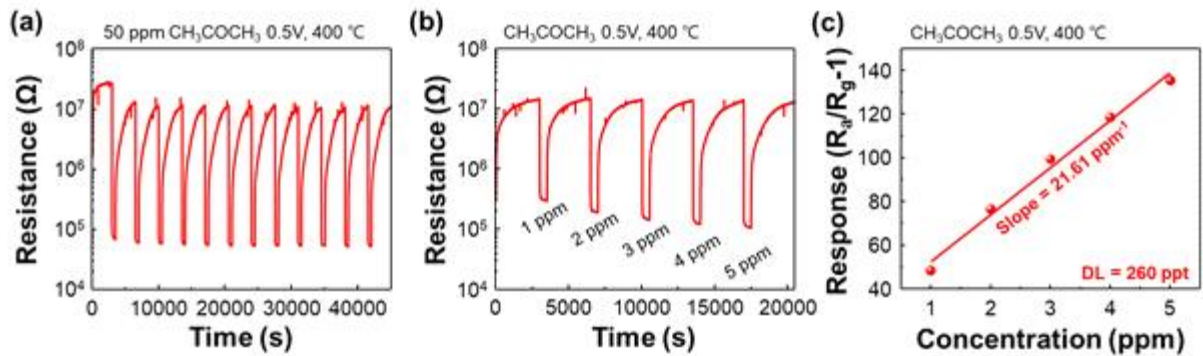


그림 33. 환원성 가스에 대한 정렬 다공성 구조 TiO_2 기반의 가스센서의 (a) 반복특성 그래프, (b)농도에 따른 반응 그래프 및 (c) 반응도 그래프

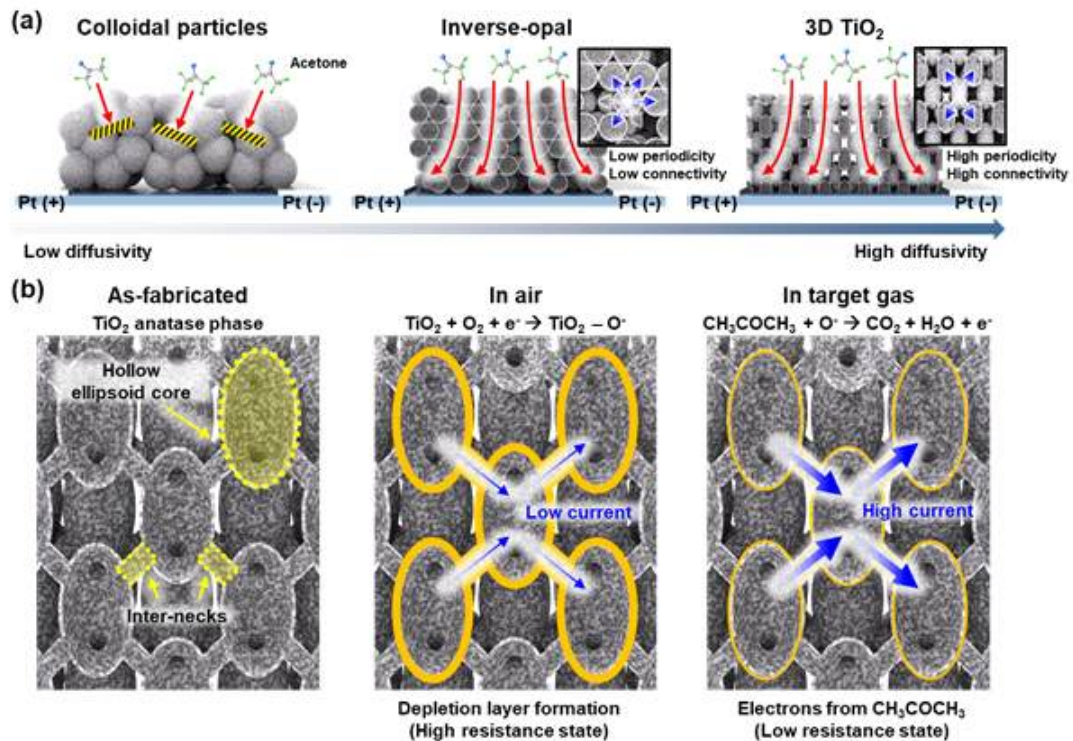


그림 34. 다양한 형태의 TiO_2 나노구조체에 대한 (a) 가스분자 확산 모식도와 (b) 정렬 다공성 TiO_2 나노구조체의 가스 반응 메커니즘을 나타내는 모식도.

- 정렬 다공성의 TiO_2 나노구조체의 장기안정성 및 감지한계성능을 평가하기 위해서 환원성 가스에 대하여 10회 이상의 반복측정을 수행하였으며, 심각한 저하없이 안정한 반응을 나타내었으며,

이론적 감지한계값은 260 ppt를 달성함 (그림 33).

- 우수한 가스 반응 효율을 나타내는 정렬 다공성 TiO_2 나노구조체는 기하학적으로 중공형의 타원체 코어형태의 구조와 상호연결로 인하여, 가스의 확산이 용이하고, 가스분자가 흡착 및 탈착 할 때, 전류의 변화를 효율적 일어나는 것으로 분석됨 (그림 34).
- 열화인자 반응특성 평가
 - WO_3 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 열화인자(CO_2 , Cl_2 , H_2) 감지특성 평가를 진행함.
 - 동작온도 최적화를 위하여, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400도에서 CO_2 , Cl_2 , H_2 에 500초 동안 노출하였으며, 150도 이하의 낮은 온도에서는 가스의 반응이 일어나지 않았으며, 200도 이상에서는 온도가 증가할수록 반응성도 함께 증가하였으며, 반응 후에 다시 회복되는 것을 확인함 (그림 35).
 - 열화인자 반응성은 CO_2 , Cl_2 , H_2 에 최대값 819.6, 901.8, 872.7%를 각각 나타내었으며, CO_2 , Cl_2 에 대한 가스감지한계는 21.4 ppb, 1.52 ppb를 각각 달성함.

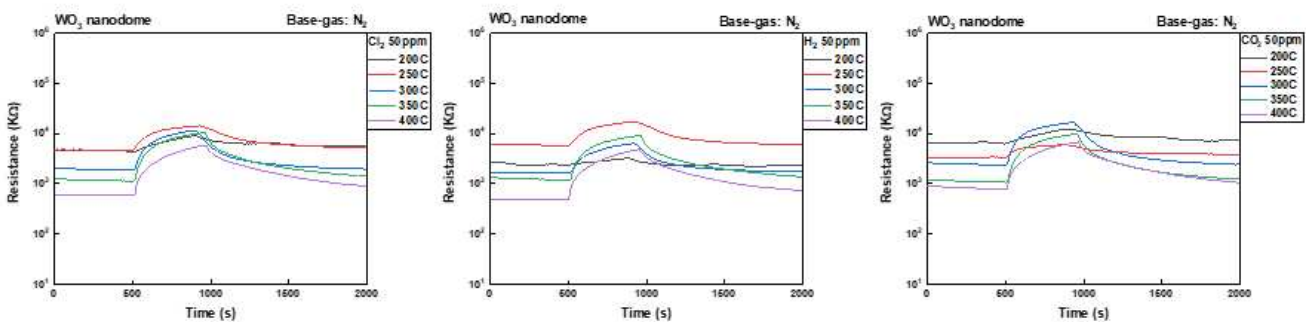


그림 35. 열화인자에 대한 WO_3 나노구조체의 동작 온도에 따른 반응 그래프.
(a) 50 ppm Cl_2 , (b) 50 ppm H_2 , (c) 50 ppm CO_2 .

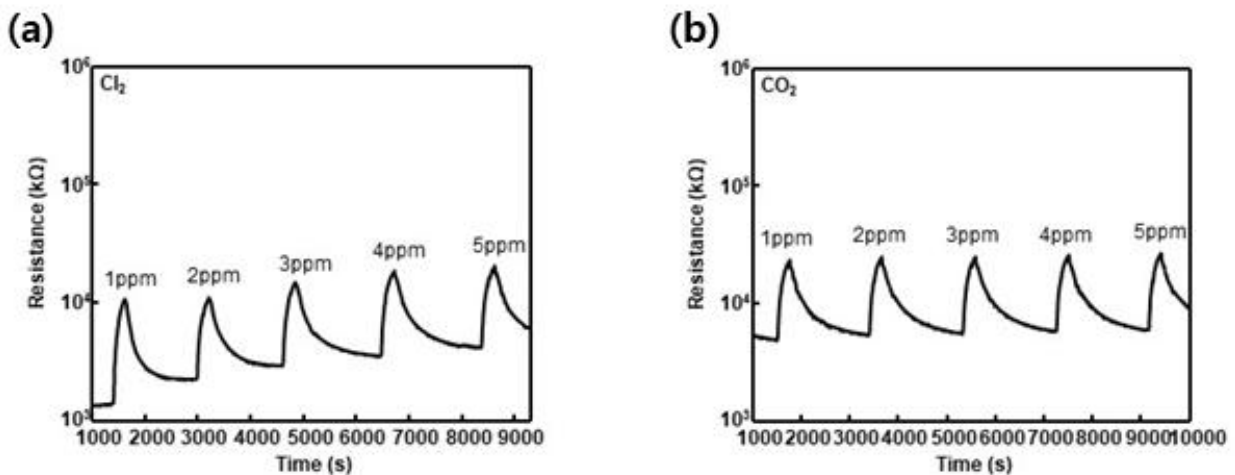


그림 36. 열화인자에 농도에 따른 WO_3 나노구조체의 반응 그래프. (a) Cl_2 , (b) CO_2 .

- WO_3 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 선택성 향상을 위하여, CeO_2 를 3nm 증착하여 동작온도에 따른 반응성 변화를 진행함 (그림 36).
- CeO_2 가 코팅된 WO_3 나노구조체는 250도 이하에서 열화인자와 반응을 하지 않음. 300도 이상에서는 온도가 증가함에 따라, 반응성도 증가하는 경향을 나타냄. 이러한 결과는 CeO_2 로 인하여, 가스의 흡착에너지가 바뀐 것을 의미하며, 온도를 조절함으로써 CO_2 , Cl_2 , H_2 에 대한 선택성과 정확도를 향상이 가능하다는 것을 의미함.

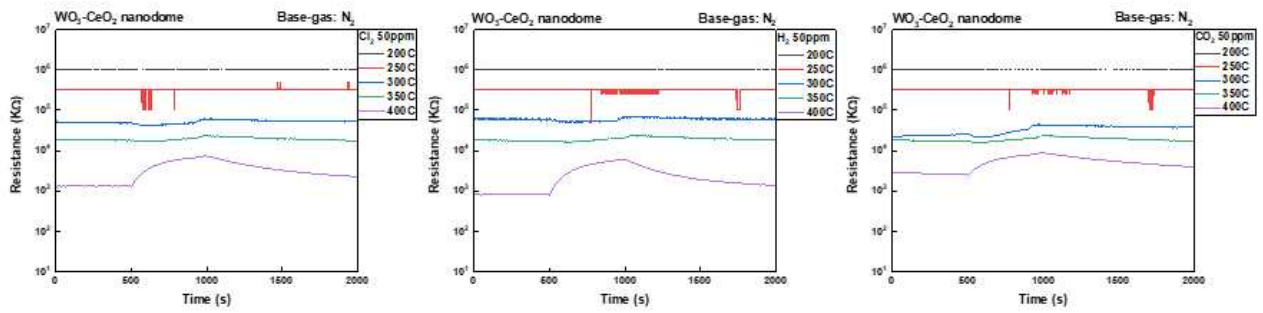


그림 37. 열화인자에 대한 CeO_2 가 코팅된 WO_3 나노구조체의 동작 온도에 따른 반응 그래프. (a) 50 ppm Cl_2 , (b) 50 ppm H_2 , (c) 50 ppm CO_2 .

- SnO_2 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 열화인자(CO_2) 감지특성 평가를 진행함.
- 명확한 성능 비교를 위해서, 상용화된 가스센서와의 특성을 동시에 비교함.

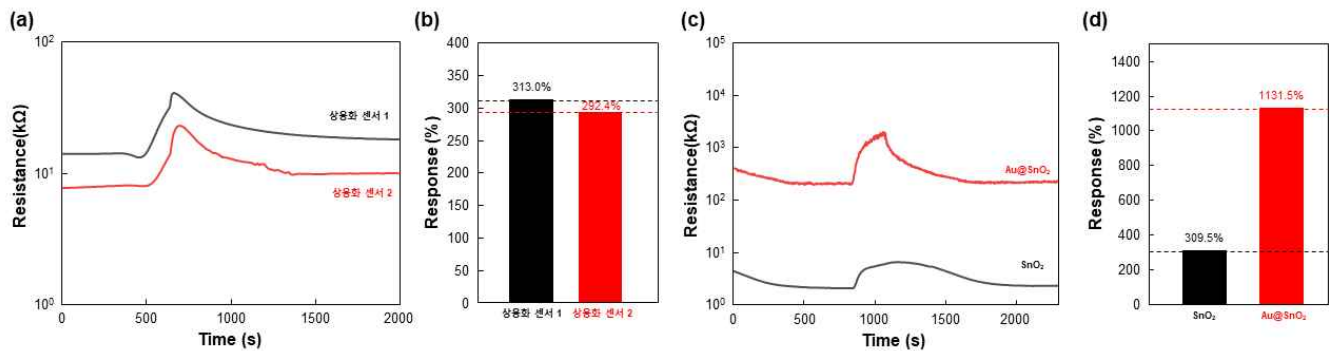


그림 38. 열화인자에 대한 상용화 센서의 (a) 실시간 반응 그래프와 (b) 반응도 그래프. 본 연구개발을 통해 제작된 SnO_2 와 Au 촉매가 코팅된 SnO_2 의 (c) 실시간 반응 그래프와 (d) 반응도 그래프.

■ 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발

- 다중센서 집적화 및 대면적화 기술 개발
- 단일 센서의 반응성을 유지하기 위하여, 단일 센서에 사용되었던 전극 디자인을 유지하면서 센서 어레이 전극을 디자인 하였으며, 다중센서 집적화를 수행함.
- 가스센서 어레이 대면적화를 위한 반도체식 공정 기반의 증착 기술을 적용함.
- 콘크리트 매립 실험을 위한 패키징은 상용화된 센서의 칩케리어를 참고하여 제작함.
- 기존의 단일 센서에서 열화인자의 대한 감지 특성을 확인하였으며, 가스센서 어레이는 이와 유사한 반응도를 나타낼 것으로 판단됨.
- 콘크리트 매립 환경 하에서 최적화된 가스센서 어레이 패키징을 위한 연구가 진행 중.

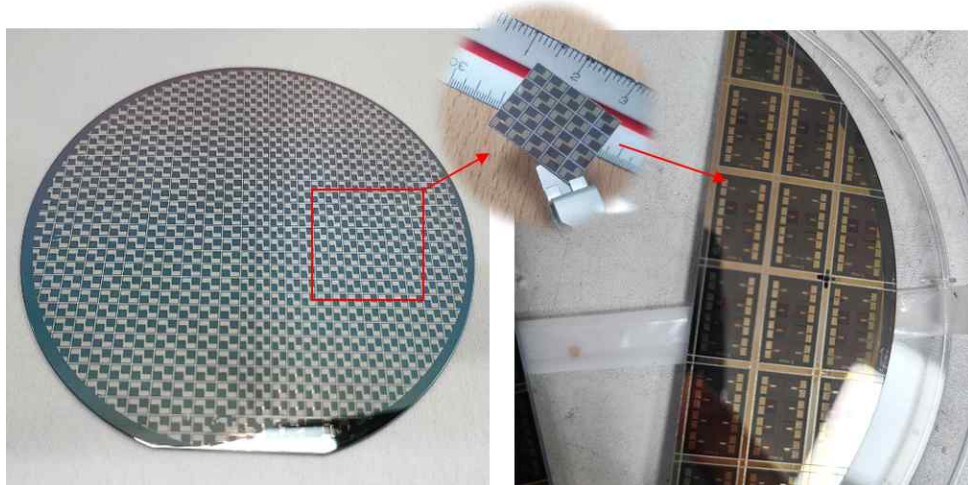


그림 39. 초소형 단일 센서(왼쪽)와 이를 기반으로 한 2x4 가스센서 어레이(오른쪽)

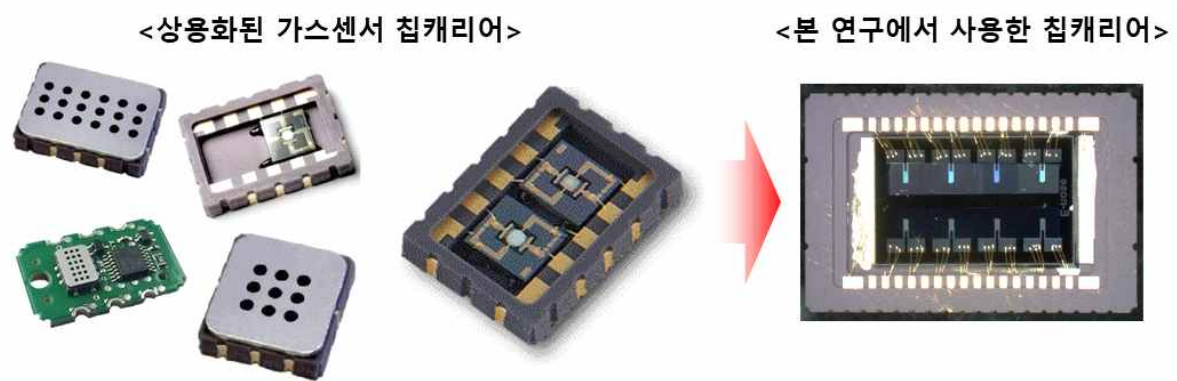


그림 40. (a) 상용화된 가스센서 어레이의 칩캐리어 사진. (b) 본 연구에서 사용한 칩캐리어 사진

(3) 공동연구기관2(한국세라믹기술원)

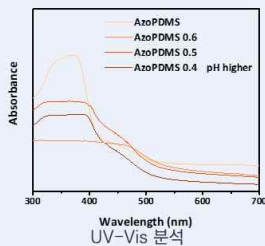
가. 개요

“철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가”

: 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가 (1차년도)

1차년도

실험 1. Azo Film 시멘트 페이스트 내 매립 및 UV-Vis 분석: 연세대



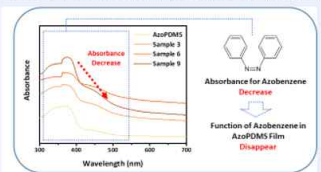
실험 2. Azo Film 시멘트 페이스트 내 매립 후 열화 환경 양생 및 UV-Vis 분석: 연세대



염해 환경 양생 (해수 염화물 농도의 약 2배)



탄산화 환경 양생 (대기 중 CO₂ 농도의 약 2500배)

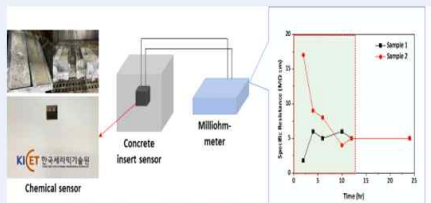


UV-Vis 분석

실험 3. 모르타르 내 화학센서 매립 및 저장 측정을 통한 콘크리트 내 매립적용성 평가: 신라대



모르타르 내 화학센서 매립



시멘트 페이스트 내 매립된 화학센서의 저장 측정

: 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가 (2차년도)

2차년도

실험 1. 시멘트 페이스트 내 센서 및 센서 캐리어 매립 실험: 연세대, 신라대



Sensor 내장된 Specimen 양생

실험 2. 열화 환경 하 콘크리트 내 매립 실험 : 연세대, 신라대



습윤(온도 20℃, 습도 90%) 양생



염해 환경(온도 20℃, 습도 60%) 양생
해수 염화물 농도의 약 2배

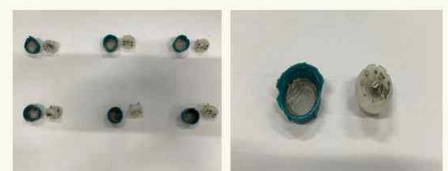


탄산화 환경(CO₂ 농도 100%) 양생
대기 중 CO₂ 농도의 약 2500배

실험 3. 매립 센서 채취 후 표면 분석: 연세대, 신라대



양생 후 Gas Sensor 채취 및 분석



양생 후 Sensor Carrier 채취 및 분석

이후 실험 계획

광섬유 매립 실험-하중에 따른 진단 가능성 평가: 연세대
가스센서 매립 후 열화인자 측정-콘크리트의 내구수명 평가: 신라대

나. 연구 수행 내용

○ 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가

■ 콘크리트 환경 하 센서의 내화학성 및 센서 소재 미세구조 변화 분석

- 시멘트 페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 실험 및 평가
- 본 연구에서 개발한 AzoPDMS 복합소재의 콘크리트 환경 하 변화를 평가하기 위하여 시멘트 페이스트 실험체를 제작함.
- 경화 전 내부에 AzoPDMS 복합소재를 매립하여 소재 변화 및 반응성 등을 평가함.
- 시멘트 페이스트 실험체 배합은 표 1과 같으며 물시멘트비를 0.4, 0.5, 0.6 세가지 수준으로 실험체를 제작 후 그림 40과 같이 AzoPDMS 복합소재를 각각 1/2씩 매립함.
- 20℃, 습도 60%의 항온항습기에 24시간 양생 한 후 탈형하여 27일간 20℃에서 수중양생 시켜 실험체가 충분히 양생될 수 있도록 함.

· 양생 후 실험체 내 AzoPDMS 복합소재를 채취하여 변화를 분석함.

표 1. 시멘트 페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 실험 배합표.

실험체명	W/C	AzoPDMS 복합소재 (name)	단위 중량(g/125 mL)	
			물	시멘트
Plain 0.4	0.4	1	82	205
실험체명	W/C	AzoPDMS 복합소재 (name)	단위 중량(g/125 mL)	
			물	시멘트
Plain 0.5	0.5	1	90	180
실험체명	W/C	AzoPDMS 복합소재 (name)	단위 중량(g/125 mL)	
			물	시멘트
Plain 0.6	0.6	1	96	160



<실험체 중앙부 AzoPDMS 복합소재 매립>



<탈형 및 수중양생>

그림 40. 시멘트페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 및 양생.

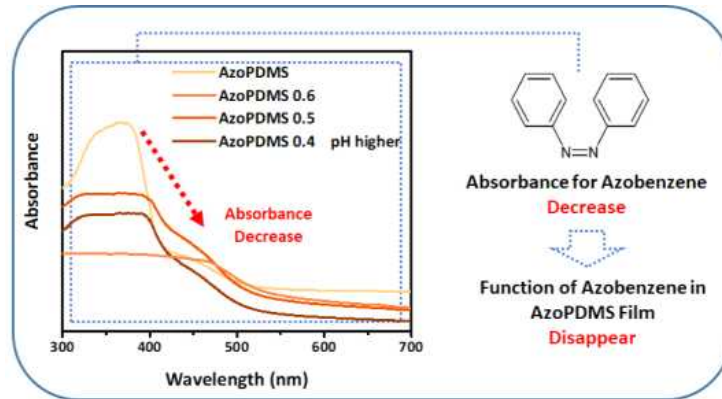


그림 41. UV-Vis 평가를 통한 콘크리트 환경 하 AzoPDMS 복합소재의 구조 변화 결과.

- AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 물시멘트비별 시멘트 페이스트 내 매립 시 변화를 평가하기 위해 UV-Vis 흡광 분석을 실시함. 분석 결과, 기존 350 nm에서 보인 흡광 피크(peak)가 시멘트 페이스트 내에서 시간이 지난 후에 감소하는 경향을 나타냄 (그림 41).
- AzoPDMS 복합소재에서 소재가 변화되는 것으로 판단함. 추후 센서 제작 시 AzoPDMS 복합소재를 보호할 수 있는 추가적인 보호가 필요할 것으로 판단됨.
- 열화 환경의 시멘트 페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 실험 및 평가
 - 본 연구에서 개발한 AzoPDMS 복합소재의 열화 환경의 콘크리트 내 변화를 평가하기 위하여 시멘트 페이스트 실험체를 제작하고 경화 전 내부에 AzoPDMS 복합소재를 매립하여 소재 변화 및 반응성 등을 평가함.
 - 시멘트 페이스트는 KS L 5109에 의거하여 제작하였으며, 실험체 사이즈는 5 x 5 x 5 cm 큐빅 몰드를 사용함.
 - 혼합 방법은 시멘트에 물을 혼입한 후 30초 동안 저속으로 혼합하고, 혼합기를 정지하여 15초 동안 벽면에 묻어있는 페이스트를 긁어내고 고속으로 60초 동안 혼합하여 마무리 함.
 - 배합은 표 2와 같으며 실험체의 제작은 물시멘트비 0.4, 0.5, 0.6으로 하였으며, 1일간 20℃, 습도 60%의 항온항습기에 습윤양생 후 그림 42과 같이 27일 간 20℃에서 수중양생 후 탈형함.
 - 실험체는 그림 43과 같이 각각의 물시멘트비 변수 별로 기건 양생, 염해 환경 및 탄산화 환경에서 실험체 양생을 실시하였으며 기건 양생 그룹은 실험이 진행된 실험실에서 온도 20±2℃, 습도 60% 대기 중에 양생을 실시함.
 - 염해 환경은 해수 농도의 2배 기준치로 설정하여 1M의 NaCl 수용액 속에 침지시킴.
 - 탄산화 환경은 자체 제작한 고농도 CO₂ 챔버를 사용하여 CO₂ 농도 약 100%의 환경에서 양생을 실시하였으며, 약 2주간 양생 후 각 그룹의 실험체에서 매립된 AzoPDMS 복합소재를 추출하여 UV-Vis 흡광도 분석을 실시함.

표 2. 열화 환경의 시멘트페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 실험 배합표.

실험체명	W/B	AzoPDMS 복합소재 (name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
Plain 0.4	0.4	1, 2, 3	246	615
실험체명	W/B	AzoPDMS 복합소재 (name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
Plain 0.5	0.5	4, 5, 6	270	540
실험체명	W/B	AzoPDMS 복합소재 (name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
Plain 0.6	0.6	7, 8, 9	288	480



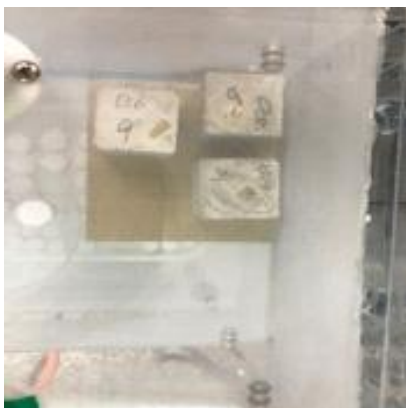
그림 42. 열화 환경 양생 전 시멘트페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 및 양생.



<기건(온도 20°C, 습도 60%) 양생>

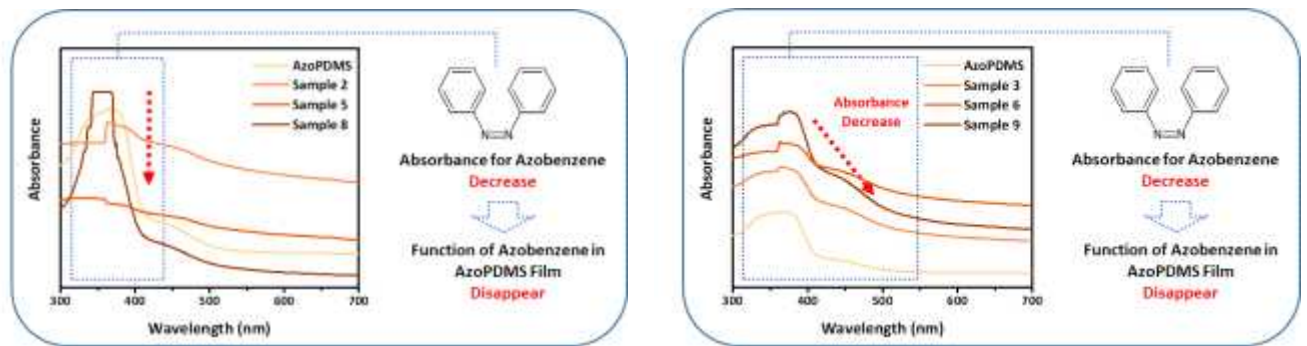


<염해 촉진 환경(1M NaCl 수용액) 양생>



<탄산화 촉진 환경(CO₂ 농도 100%) 양생>

그림 43. AzoPDMS 복합소재를 매립한 시멘트페이스트의 열화 환경별 양생.



<염해 환경에서 양생한 AzoPDMS 복합소재>

<탄산화 환경에서 양생한 AzoPDMS 복합소재>

그림 44. UV-Vis 평가를 통한 콘크리트 환경 하 AzoPDMS 복합소재의 구조 변화 결과.

- AzoPDMS 복합소재의 콘크리트 열화(염해, 탄산화) 환경 하 변화를 평가하기 위해 각각의 조건에서 매립 후 양생한 AzoPDMS 복합소재를 채취 후 UV-Vis 분석법을 통해서 흡광도 분석을 한 결과 주요 흡광 파장(350 nm)에서 흡광도가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보아 AzoPDMS 복합소재에서 일부 변형이 일어나는 것으로 판단됨 (그림 44).
- 기건 양생한 AzoPDMS 복합소재의 경우 채취 시 얇고 작은 특성으로 인해 크랙이 발생하여 측정이 불가함.
- AzoPDMS 복합소재를 활용하여 추후 센서 제작 시 소재를 보호할 수 있는 센서 보호막 등의 공정이 필요할 것으로 판단됨.

■ 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 및 내구수명 평가

- 시멘트 페이스트 내 가스센서 매립 실험 및 평가
- 본 연구에서 개발한 가스센서의 콘크리트 내 적용성을 평가하기 위하여 시멘트 페이스트 실험체를 제작하여 센서 매립 후 저항 변화를 측정함 (그림 45).
- 실험 배합은 표 3과 같으며 실험체 제작 직후 시간별로 저항을 측정함. 시멘트 페이스트는 KS L ISO 679에 의거하여 제작하였으며, 40 x 40 x 160 mm 철제몰드를 사용하여 제작함.
- 시멘트 페이스트를 몰도의 1/2 타설한 후 센서를 매립하고 나머지 1/2을 타설함.
- 20℃, 습도 60%의 항온항습실에서 실험체 제작 후 시간별로 멀티테스트기를 이용하여 저항을 측정함.

표 3. 3차 실험 배합표.

실험체명	W/B	Sensor (number)	단위 중량(g/mL)		
			물	시멘트	잔골재
SnO ₂ 300 nm	0.5	1	225	450	1350
실험체명	W/B	Sensor (number)	단위 중량(g/mL)		
			물	시멘트	잔골재
SiO ₂ 100 nm/ SnO ₂ 300 nm	0.6	2	270	450	1350



그림 45. 화학센서 및 시멘트 페이스트 내 매립 전경.

표 4. 화학센서 시멘트 페이스트 내 매립 후 저항 측정 결과.

	1번 센서 (W/C 50%)	3번 센서 (W/C 60%)
초기 저항값	1.8 MΩ	17 kΩ
2시간 후	측정불가	측정불가
4시간 후	측정불가	측정불가
6시간 후	6 MΩ 에서 저하되는 현상	9 MΩ 에서 저하되는 현상
8시간 후	5 MΩ 에서 저하되는 현상	8 MΩ 에서 저하되는 현상
10시간 후	6 MΩ 에서 저하되는 현상	4 MΩ 에서 저하되는 현상
12시간 후	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환
24시간 후	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환

- 표 4와 같이 저항 값의 변화가 심하고 매우 높게 측정되어 추후 화학센서를 매립 시 센서를 보호하기 위해 칩 캐리어 등의 추가 보호 공정(캡슐화 등)이 필요할 것으로 판단됨 (그림 46).
- 콘크리트는 특히 초기에 내부 수분의 양이 많고 변화가 심하여 화학센서의 저항이 높게 나타난 것으로 판단되며 추후 캡슐화가 필수적일 것으로 판단됨.

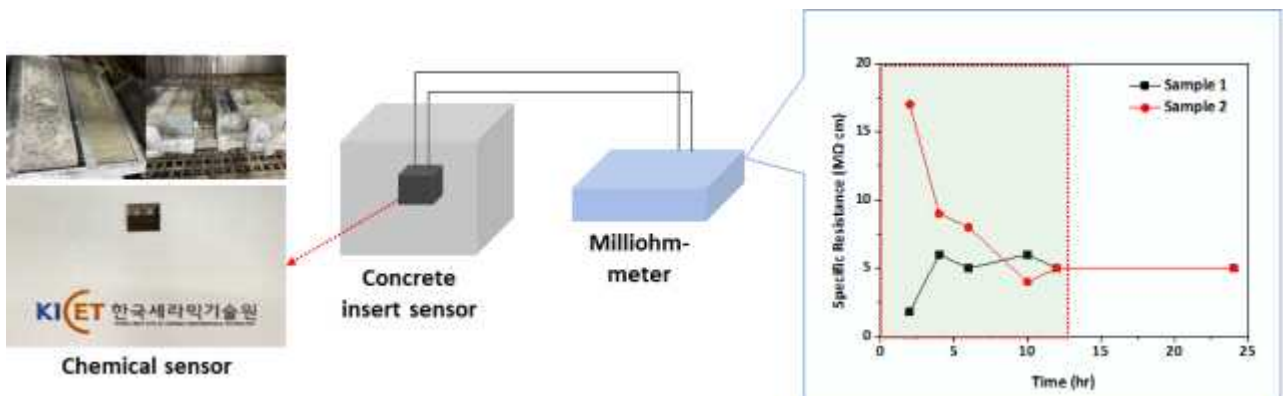


그림 46. 화학센서 및 시멘트 페이스트 내 저항.

■ 캡슐화 한 MEMS 센서 매립을 통한 염해 환경에서의 센서 적용 가능성 평가

- 1차년도 센서 매립 적용성 평가 결과를 기반으로 센서를 캡슐화 한 후 시멘트 페이스트 내 매립하고 염해환경 하에서 센서 적용성을 평가함 (그림 47).
- 시멘트 페이스트는 KS L 5109에 의거하여 제작하였으며, 5x5x5 cm 큐빅 형태의 몰드를 사용함. 혼합 방법은 시멘트에 물을 혼입한 후 30초 동안 저속으로 혼합하고, 혼합기를 정지하여 15초 동안 벽면에 묻어있는 페이스트를 긁어냄. 다음 고속으로 60초 동안 혼합하여 마무리함.
- 1차 실험의 실험체의 제작은 물시멘트비 30%, 40%, 50%로 하였으며, 각 물시멘트비별 센서의 종류를 다르게 매립한 후 1일간 항온항습기에 습윤양생 후 14일 간 염해환경에서 양생함.
- 염화 침지 시험은 염화물량을 해수의 2배 기준으로 설정하여 1 mol → NaCl 117 g/2000 mL 실험을 진행하고 양생이 끝난 직후 실험체 내에 센서를 추출하여 상태 확인함.

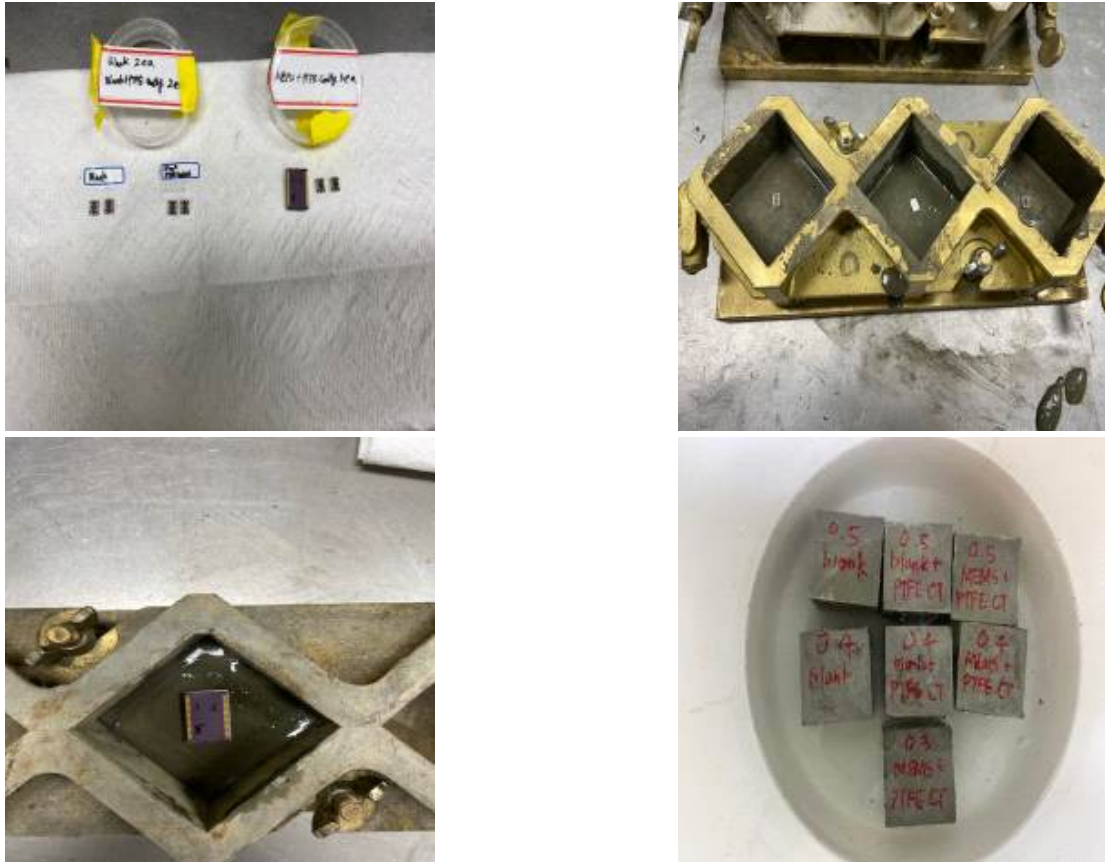


그림 47. 캡슐화 한 센서 매립 적용성 평가 실험

■ 캡슐화 한 가스센서 매립을 통한 열화 환경 하에서의 센서 적용 가능성 평가

- 시멘트 페이스트는 KS L 5109에 의거하여 제작하였으며, 5x5x5 cm 큐빅 형태의 몰드를 사용함.
- 혼합 방법은 시멘트에 물을 혼입한 후 30초 동안 저속으로 혼합하고, 혼합기를 정지하여 15초 동안 벽면에 묻어있는 페이스트를 긁어낸 후 고속으로 60초 동안 혼합하여 마무리함.
- 1차 실험의 실험체의 제작은 물시멘트비 30%, 50%, 60%로 하였으며, 1일간 항온항습기에 습윤양생 후 27일 간 수증양생 함.
- 2차 실험의 실험체 제작도 마찬가지로 30%, 50%, 60% 3가지 그룹으로 나누었으며, 각 배치별로 한 그룹 당 하나의 실험체 별로 습윤양생, 염화 침지 시험, 탄산화 시험을 통해 양생함 (그림 48).
- 습윤양생 그룹은 실험이 진행된 실험실에서 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 90% 항온항습기에 양생 시켰으며 염화 침지 시험은 염화 물량을 해수의 2배 기준으로 설정하여 1 mol → NaCl 117 g/2000 mL 실험을 진행함.
- 탄산화 시험은 CO_2 농도 100%의 챔버를 사용하여 실험을 진행하였고 양생을 마친 실험체는 매립된 가스센서를 추출 하였으며, 신라대학교로 샘플 발송하여 분석 실험이 진행됨.

표 5. 실험 배합

실험체명	W/B	Gas Sensor (Name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
GS 0.3	0.3	1, 2, 3	214	714
실험체명	W/B	Gas Sensor (Name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
GS 0.5	0.5	4, 5, 6	270	540
실험체명	W/B	Gas Sensor (Name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
GS 0.6	0.6	7, 8, 9	288	480



<캡슐화 센서>



<매립>



<타설>



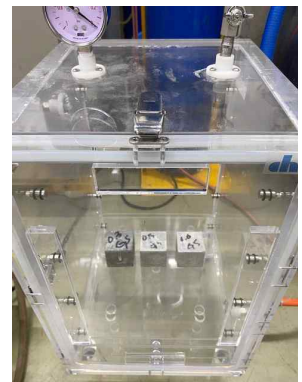
<염해 환경>



<양생>



<추출 센서>



<탄산화 환경>

그림 48. 캡슐화 가스센서 매립 및 열화환경 양생

■ 콘크리트 내 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 진단

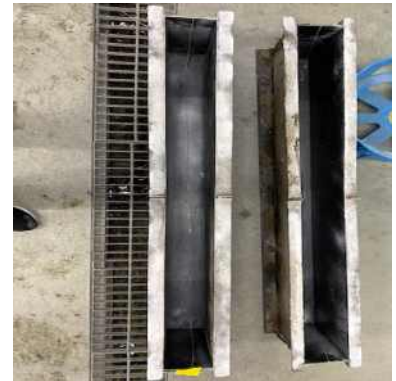
- 콘크리트 내 광섬유 매립 실험 및 평가
- 본 연구에서 개발한 광섬유의 콘크리트 내 응력 거동에 따른 빛 세기를 평가하기 위하여 콘크리트 실험체를 제작하여 센서 매립 후 콘크리트에 가해지는 응력에 따른 광세기의 변화를 측정함 (그림 49, 50).
- 실험 배합은 표 6, 7과 같으며 실험체 제작 이후 응력에 의한 광세기를 측정함. 콘크리트는 KS F 2403에 의거하여 제작하였으며, 100 x 300 x 1200 mm 철제 빔물드를 사용하여 제작함.
- 콘크리트를 물드의 1/2 타설한 후 광섬유를 매립하고 나머지 1/2을 타설함.
- 제작이 완료된 실험체는 14일간 온도 20℃의 실험실에서 기건양생 진행하였음.

표 6. 4차 실험 배합표(1m³).

구분	설계강도 (MPa)	물바인더비 (%)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m³)	단위량(kg/m³)			감수제(%)
					시멘트	잔골재	굵은골재	
Fiber_C1	24	50	46.3	174	344	711	941	0.1
Fiber_C2								
Fiber_550								

표 7. 4차 실험 배합표(50L).

구분	설계강도 (MPa)	물바인더비 (%)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m³)	단위량(kg/m³)			감수제(%)
					시멘트	잔골재	굵은골재	
Fiber_C1	24	50	46.3	8.7	17.2	35.6	47.1	0.1
Fiber_C2								
Fiber_550								

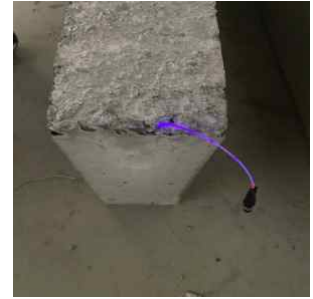
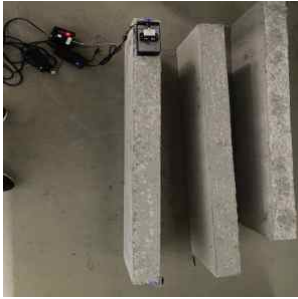


<실험 재료>



<실험체 제작 과정>

그림 49. 광섬유를 매립한 콘크리트의 실험 재료 및 제작과정.



<양생 완료 실험체의 광세기 테스트>



<응력에 따른 광세기 측정>

그림 50. 광섬유를 매립한 콘크리트의 광세기 측정.

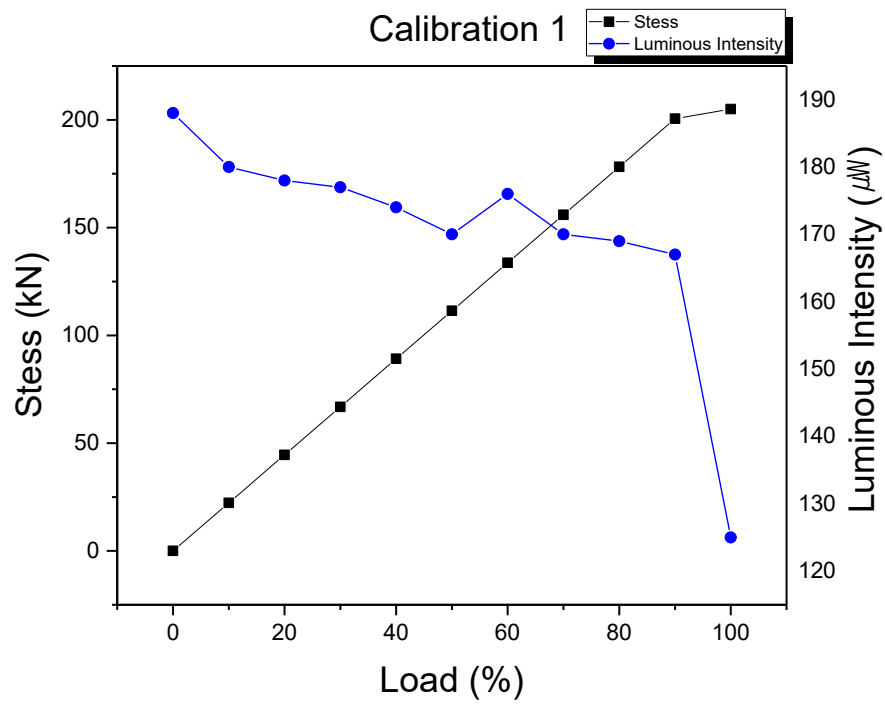


그림 51. Calibration 1 광섬유 광세기 측정결과.

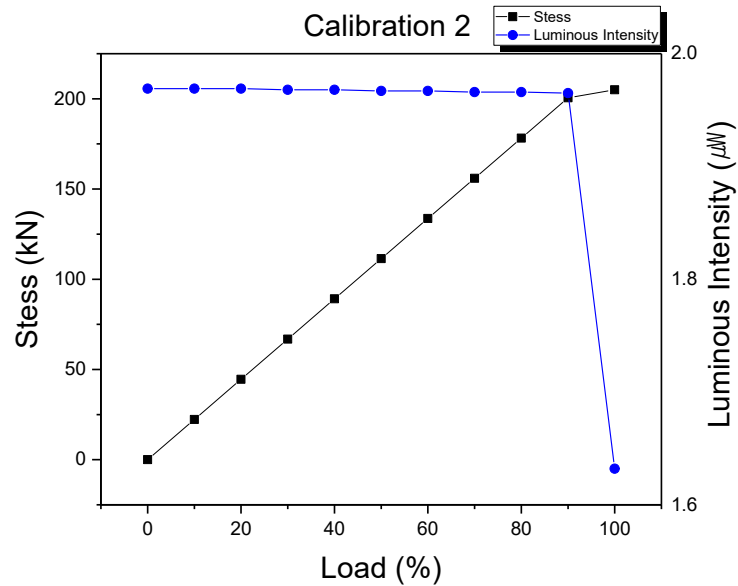


그림 52. Calibration 2 광섬유 광세기 측정결과.

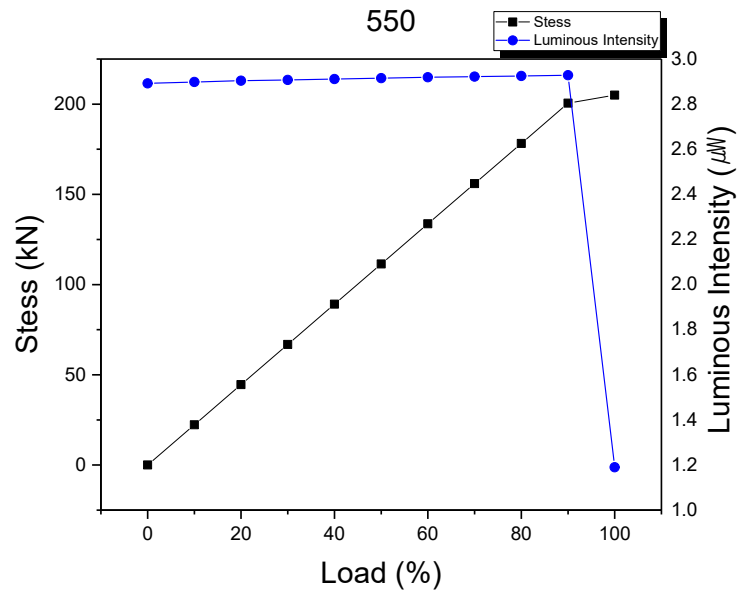


그림 53. 550 광섬유 광세기 측정결과.

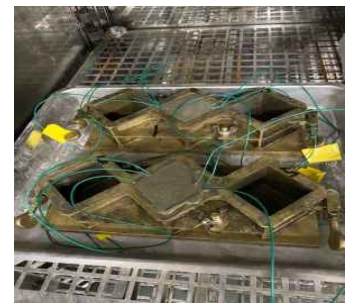
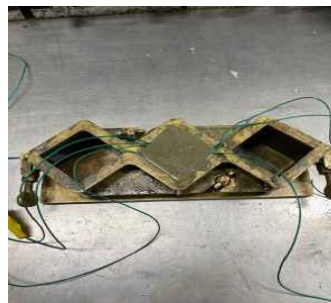
- 그림 51, 52, 53의 광세기 측정 결과 응력 증가에 따라 광세기의 정도(mW)값이 감소하는 것을 확인하였으며 실험체의 파단에 이른 경우 급격한 저점을 나타내는 것을 측정하였음.
- Fiber_C1 광섬유를 매립한 경우 하중이 없는 상태 기준 응력을 가함에 따라 콘크리트 부재 최대응력의 30%에서 5.9% 광세기가 감소하였으며 60%에서 6.4% 감소, 90%에서 11.2% 감소하였으며 파단 시 33.5% 급감하는 것으로 나타남.
- Fiber_C2 광섬유를 매립한 경우 하중이 없는 상태 기준 응력을 가함에 따라 콘크리트 부재 최대응력의 90%까지 약 0.2% 광세기가 감소하다 파단 시 17.1% 급감하는 것으로 나타남.
- Fiber_550 광섬유를 매립한 경우 하중이 없는 상태 기준 응력을 가함에 따라 Fiber_C2 광섬유의 경우와 같이 큰 차이를 보이지 않다가 파단 시 58.9% 급감하는 것으로 나타남.
- 해당 실험을 통해서 콘크리트 진단을 위해서는 uW 단위의 광세기 측정을 실시해야 할 것으로 판단되며 실시간 센싱을 통해서 콘크리트 부재의 응력 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단됨.
- 0~3 mW 의 빛에서 광 세기에 따라 약 6~7%의 반복적인 변화를 보이는 MEMS 정전식 센서를 연결하면 광세기의 변화에 해당하는 정전용량 값을 읽어내어 실시간으로 하중 변화를 감지하는 것이 충분히 가능함.

■ 시멘트 페이스트 내 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가

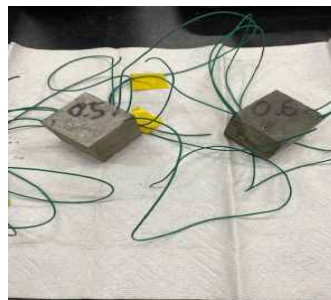
- 시멘트 페이스트 내 가스 센서 매립 실험 및 열화 인자 측정
- 본 연구에서 개발한 가스 센서를 활용하여 시멘트 페이스트 내 CO₂, H₂, O₂, Cl₂ 등 열화인자를 측정하고자 실험체를 제작하여 센서 매립 후 신라대학교에서 개발한 측정 장비를 통해 열화인자를 측정함 (그림 54).
- 실험 배합은 표 8과 같으며 실험체 제작 이후 CO₂ 챔버를 활용하여 CO₂ 농도 100% 환경을 조성하여 시간 경과에 따른 열화인자를 측정함. 실험체는 KS L 5109에 의거하여 제작하였으며, 50 x 50 x 50 mm 큐빅 물드를 사용하여 제작함.
- 큐빅 물드의 1/2 타설한 후 가스 센서를 매립하고 나머지 1/2을 타설함.
- 제작이 완료된 실험체는 14일간 온도 20℃, 습도90%의 항온항습실에서 습윤양생 진행하였음.

표 8. 5차 실험 배합표.

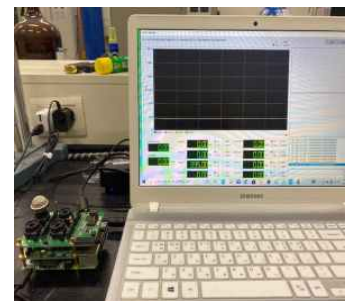
구분	W/B (%)	Gas Sensor (Name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
GS 1-1	50	1	270	540
GS 2-1	60	2	288	480



<센서 및 실험체 제작과정>



<탈형 후 온도℃, 습도90% 습윤양생>



<탄산화 촉진 환경(CO₂ 농도 100%)하 열화인자 측정>

그림 54. 가스 센서를 매립한 시멘트페이스트의 열화 인자 측정.

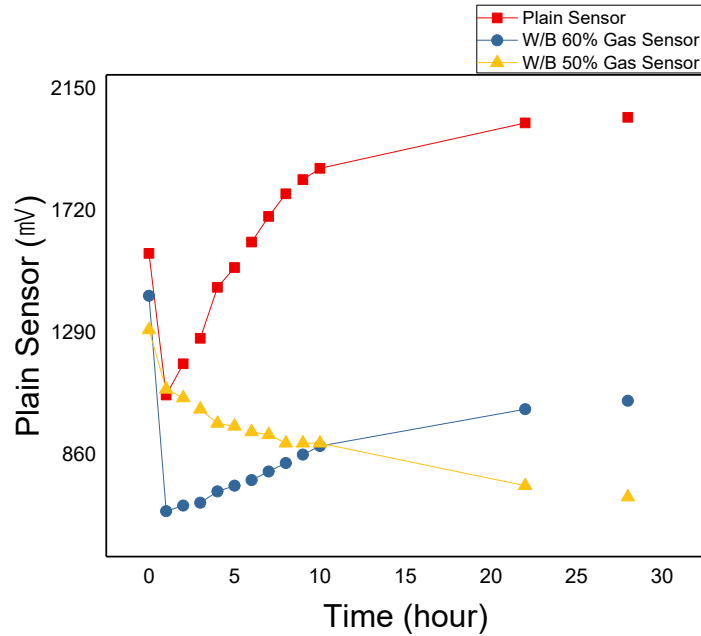


그림 55. CO₂ 측정결과.

- 그림 55의 열화인자 측정결과 상용 센서와 W/B 60% 매립 가스 센서의 CO₂ 농도 측정값이 시간의 경과에 따라 점차 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 상용화된 가스센서는 50 ppm CO₂ 에 대하여, 313%, 294.4%의 반응도를 나타내었으며, 신라대학교에서 개발된 SnO₂ 나노구조체는 309.5%의 반응도를 나타내었으며, Au 촉매를 코팅한 SnO₂는 약 3.6배의 향상된 1131.5%의 반응도를 나타냄. 이러한 결과는 본 연구개발에서 제작된 가스센서를 통하여, 미세농도의 열화인자까지 감지가 가능하다는 것을 의미함.
- 콘크리트 매립 환경 하에서 상용화 센서에 대한 반응도를 평가하였으며, 매립 환경 하에서도 열화인자(CO₂)에 대하여 높은 반응성을 나타냄. 이는 높은 농도에서의 가속 평가를 진행한 결과이며, 본 연구개발에서 제작된 가스센서는 이 보다 더 높은 반응성을 나타낼 수 있다는 것을 의미함 (그림 56).
- 외부 환경에서의 100% 농도를 기준으로 하였을 때, 매립된 가스센서의 감지한계율은 10% 이하에서도 가능하다는 것을 확인.
- 대기 중의 이산화탄소 평균 농도는 300 ppm이며, 환산을 하면 0.03%가 대기 중의 이산화탄소 농도임. 이를 기반으로 계산하면, 0.04%의 CO₂ 열화인자가 페이스트 내 25mm로 침투하는 시간은 약 7년이 소요됨.

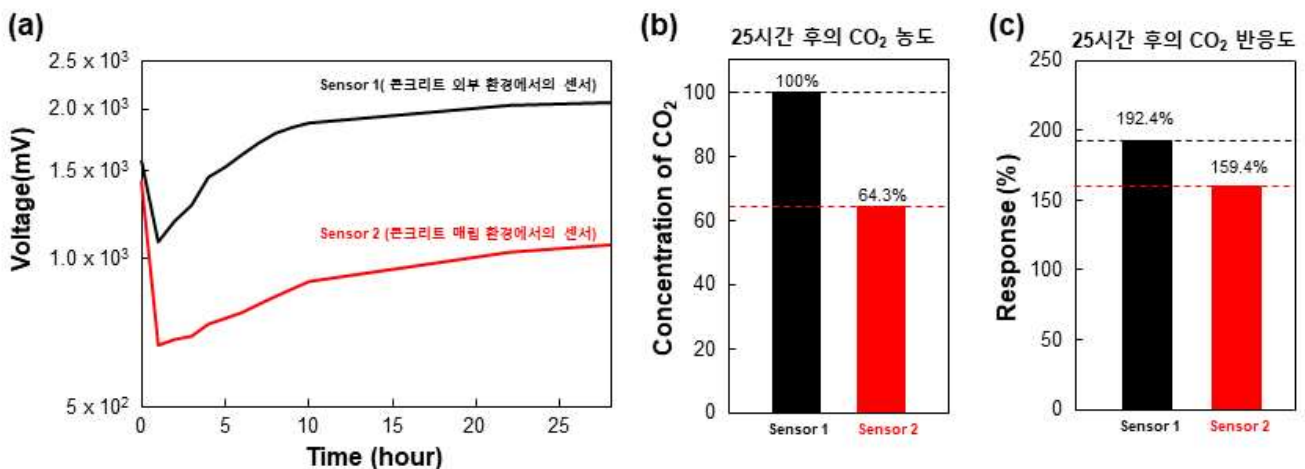


그림 56. 콘크리트 매립 환경 하에서 상용화 가스센서의 (a) CO₂ 감지 그래프 및 침투된 (b) CO₂의 농도와 (c) 반응도 그래프

■ 센서 매립, 활용 방법 및 계획

- 센서 매립 및 활용 방법

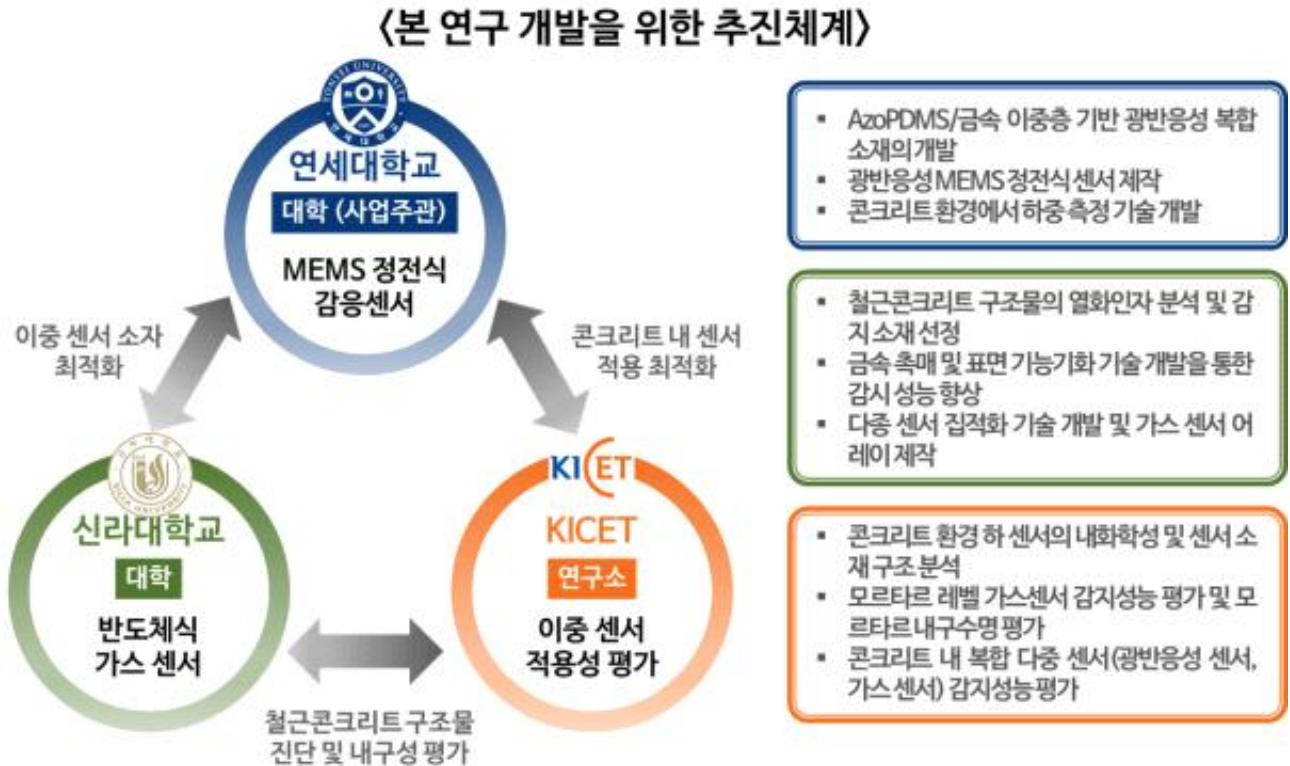
- 본 연구에서는 철근콘크리트구조물의 비파괴적 진단을 위해 물리센서를 개발하고 이를 매립하여 센싱을 통한 응력 거동을 평가하고자 하였고, 가스센서를 개발하고 매립하여 열화인자 측정을 통한 내구수명 평가를 목표로 함
- 또한, 두 센서를 복합센서 일체화 하여 두 기능을 발휘할 수 있는 이중 센서를 개발하여 철근 콘크리트 구조물의 응력거동과 내구수명 평가를 동시에 가능하도록 하고자 함
- 철근콘크리트 구조물의 센서 매립 사례 및 물리 센서, 가스 센서의 기능을 분석한 결과 각 센서의 성격이 크게 다르며, 물리 센서의 경우 철근콘크리트 구조물의 하중이 집중되는 취약부에 매립하는 것이 적절하며, 가스 센서의 경우 물리 센서와는 다르게 표면에서부터 매립 깊이가 중요한 요인이 되어 적절한 매립 위치가 서로 상이하여 같은 위치에 매립하기에는 부적절하다는 판단을 내림.
- 각 센서의 기능 및 성능을 최적으로 발휘할 수 있는 위치에 개별 적용하는 것이 적절할 것으로 결론을 내림.

- 센서 활용 및 성과 활용 계획

- 물리 센서는 향후 철근콘크리트 구조물의 응력이 집중되는 취약부 즉, 부재가 만나는 지점 위주로 매립하여 철근콘크리트 구조물이 응력을 받는 정도에 따른 변화를 센싱하여 해당 데이터를 기반으로 실시간 철근콘크리트의 응력거동을 평가하여 비파괴적 진단이 가능하도록 활용할 계획임.
 - 화학 센서는 철근콘크리트의 표면에서부터 깊이에 따라 매립하여 CO₂ 가스 등과 같은 철근콘크리트 구조물의 열화인자를 센싱하여 해당 데이터를 기반으로 실시간 철근콘크리트의 내구수명을 평가하여 비파괴적 방법으로 콘크리트 구조물의 수명을 제시하는데 활용할 계획임.
 - 본 연구에서 개발된 화학 센서는 CO₂, TVOCs 등 다양한 종류의 가스를 감지할 수 있으므로, 새집증후군이나 건축물의 실내오염도를 측정하는데 활용할 계획임.
-

2) 연구개발 추진전략

(1) 연구개발 추진전략 및 방법



- 본 과제에서는 1차년도에는 제안된 기술의 타당성이 입증되었으며, 2차년도에서는 제안된 기술에 대한 구체적 설계를 수행하여 실제적인 적용 기술의 구현 방안을 제시하였음.
- 본 연구팀은 철근콘크리트 구조물 진단 및 내구성 평가를 위한 구조물 진단 전문기관과 기초적인 센싱 소재에 대한 연구를 수행한 경험이 있는 기관을 연계하여 철근콘크리트 구조물 진단 및 내구성 평가를 위한 이중센서 소자 개발을 위한 연구를 수행하고, 실제 적용을 위해 요구되는 센서 소자 개발에 필요한 핵심소재를 중심으로 기술적 우수성이 담보되는 기관들을 확보하여 연계할 수 있도록 연구를 진행하였음.
- 본 과제에서 제안하는 개발목표를 달성하기 위해 각 연구 분야의 선도적인 중심기관과 연계 협력하여 원천 핵심요소기술과 핵심소재 및 적용 평가 시스템에 대한 최적화 연구개발을 수행함.
- 따라서, 본 기술개발의 추진전략을 모식적으로 나타냄. 먼저 연세대학교와 신라대학교가 구조 진단을 위한 이중 센싱 소자 및 최적화된 구조 기술에 대한 연구를 수행하고, 이의 철근콘크리트 구조물 진단 및 내구성 평가를 위한 적용 기술개발은 한국세라믹기술원에서 진행하였음.
- 향후 한국건설기술연구원과 한국시설안전공단은 구조물 성능개선 및 시설물의 안전사고 예방을 위하여 지속적으로 발전하고 있으며, 기후변화와 시설물 고령화에 대비한 성능개선 및 안전관리 기능 강화, 국민생활시설 안전 보장을 위하여 성능개선과 안전관리 강화와 연계를 통하여 ICT 기반 안전 및 유지관리 기술을 적용하여 안전 확보에 정확한 정보를 제공할 수 있는 연구과제 추진하였음.
- 또한, 한국토지주택공사와 SH공사는 국민주거안전과 삶의 질 향상을 통하여 국민경제 발전을 선도하고 있어 이와 연계를 통하여 ICT기반 건축물 안전 및 유지관리 기술을 도입하여 공동주택 관리 및 건축물 가치를 제고하고 공공주택 서비스 강화에 효과적으로 대응 가능할 것으로 판단됨.

(2) 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서 개발	주관연구책임자 (KIM JI WON) 외 총 15명

기관별 참여 현황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업		
중견기업		
중소기업		
대 학	2	12
국공립(연)		
출 연 (연)	1	4
기 타		

연세대학교
미세전자계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가
연구책임자(KIM JI WON) 외 8명
담당기술개발내용
- AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 광반응성 복합소재의 개발 및 분석 - AzoPDMS/금속 박막 이중층의 광굴절성 분석 및 거동 정립 - AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 광반응성 복합소재의 극한 조건(예. 고온, 고압, 강염기 등) 내 안정성 검증을 통한 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계 - AzoPDMS/금속 박막 이중층 캔틸레버 기반 광반응성 MEMS 정전식 센서 제작 및 정전 용량 변화 최적화 - 최적화된 광반응성 MEMS 정전식 센서를 실제 콘크리트 환경에 적용하여 하중 측정 기술 진단 및 평가

신라대학교
철근콘크리트 구조물의 내구성 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발
연구책임자(심영석) 외 2명
담당기술개발내용
- 철근콘크리트 구조물의 열화인자 분석 - 열화의 외부·내부 환경변화 및 생성물 분석 - 감지 소재 선정 및 나노 구조체 설계 - 저소비전력 센서 구조 설계 - 감지성능향상 및 대면적화 기술 설계 - 금속 촉매 및 표면 기능기화 기술 개발 및 역할 규명 - 다중 센서 제작 및 실험실 성능 평가 - 다중 센서 집적화 기술 개발 및 가스 센서 어레이 제작 - 가스 센서 어레이의 감지 특성 평가 - 가스 센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술 개발

한국세라믹기술원
철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가
연구책임자(조형규) 외 3명
담당기술개발내용
- 콘크리트 환경 하 센서의 내화학적 및 센서 소재 구조 분석 - 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가 - 모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가 - 콘크리트 내 이중 센서 감지성능 평가 - 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가 - 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가

(3) 연구개발 추진 일정

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	AzoPDMS/금속 이중층 모델의 광거동 예측													10,000	KIM JI WON (연세대)
2	AzoPDMS/금속 이중층 모델 실험적 검증													20,000	KIM JI WON (연세대)
3	실험실에서 성능평가 모의 실험													10,000	KIM JI WON (연세대)
4	1차 MEMS 시제품 설계도면 작성													10,000	KIM JI WON (연세대)
5	1차 MEMS 시제품 가공 및 평가													10,000	KIM JI WON (연세대)
6	열화 및 부식환경에서의 발생 가스 분석													5,000	심영석 (신라대)
7	감지소재 선별													5,000	심영석 (신라대)
8	나노물질 및 구조체 대면적화 기술 설계													10,000	심영석 (신라대)
9	다종의 단일센서 제작													20,000	심영석 (신라대)
10	열화인자 및 부식발생 가스에 대한 특성평가													10,000	심영석 (신라대)
11	센서 내화학적 및 센서 소재 구조 분석													20,000	조형규 (한국세라 믹기술원)
12	모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가													10,000	조형규 (한국세라 믹기술원)
13	가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가													20,000	조형규 (한국세라 믹기술원)

2차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	1차 MEMS 시제품 가공 및 평가													30,000	KIM JI WON (연세대)
2	주요평가방법에 따른 성능평가항목 결정													10,000	KIM JI WON (연세대)
3	다양한 조건에 따른 정전 용량 변화 최적화													20,000	KIM JI WON (연세대)
4	실제 광섬유 기반 콘크리트 하중 측정 성능 평가													30,000	KIM JI WON (연세대)
5	다중 센서가 집적화된 센서 어레이 제작													10,000	심영석 (신라대)
6	인자 및 방해 가스 구별을 위한 센서어레이 최적 조건 선정기술개발													10,000	심영석 (신라대)
7	실험적 RC 구조물 매립환경에서 가스 센서 어레이의 감지 성능평가													20,000	심영석 (신라대)
8	가스 센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술 개발													10,000	심영석 (신라대)
9	콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가													20,000	조형규 (한국세라 믹기술원)
10	광반응성 센서를 활용한 콘크리트 진단 평가													20,000	조형규 (한국세라 믹기술원)
11	가스 센서 기반 콘크리트 내구수명 평가													30,000	조형규 (한국세라 믹기술원)

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

가. 정성적 연구성과 목표

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치 (연구비, 백만원)	추진일정			
						1분기 (1/4)	2분기 (2/4)	3분기 (3/4)	4분기 (4/4)
1차 년도	2020	AzoPDMS/금속 이중층 기반 광반응성 복합소재의 개발 및 안정성 검증을 통한 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계	AzoPDMS/금속 이중층 모델의 광거동 이론적 예측	금속 박막 종류에 휘어짐, 곡률반지름, 캔틸레버 높이 변화 및 정전 용량 변화 예측 여부	5 (10)				
			AzoPDMS/금속 이중층 모델의 실험적 검증	극한 환경에 안정한 광반응성 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 합성 유무	5 (20)				
			광반응성 MEMS 정전식 센서 설계	광반응성 MEMS 정전식 센서 설계의 타당성 여부	5 (30)				
		열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발	열화인자 및 부식발생 가스 감지물질 선별 및 성능 조사	열화인자 및 부식발생 가스의 종류와 농도 감지 여부	10 (10)				
			선택적 감지와 정확도 향상을 위한 표면개질 기술 개발	표면 기능기화 및 촉매 코팅 기술 개발 여부	10 (20)				
			단일 센서 제작 및 실험실 환경에서의 성능 평가	열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부	20 (20)				
		콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가	콘크리트 환경 하 센서의 내화학성 및 센서 소재 구조 분석	내화학성 및 센서 소재 미세구조 분석 여부	5 (20)				
			모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가	가스 센서 감지성능 평가 결과	5 (10)				
			모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가	내구수명 평가 결과	5 (20)				
		2차 년도	2021	광반응성 MEMS 정전식 센서를 제작 및 최적화를 진행하고 이를 기반으로 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 기술을 개발	광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 제작	실험적 광원 조건에서 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서의 광 자극에 대한 정전 용량 변화 여부	5 (30)		
다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화	실험적 광원 조건에서 MEMS 정전식 감응 센서의 정전 용량 변화 최적화 여부				10 (30)				
실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가	실제 콘크리트 환경에서 광섬유에 가해지는 하중에 따른 빛의 세기 변화에 의한 MEMS 정전식 감응 센서의 정전 용량 변화 여부				10 (30)				
열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발	반도체식 가스 센서 어레이 개발			가스 센서 어레이의 수	10 (20)				
	콘크리트 환경 내 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가			매립상태에서의 열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부	10 (20)				
	가스 센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술			열화인자 및 부식발생 가스의 분별 여부	20 (10)				
광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가	콘크리트 내 이중 센서 감지성능 평가			복합 이중 센서 감지성능 평가 결과	5 (20)				
	광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가			콘크리트 진단 평가 결과	5 (20)				
	가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가			콘크리트 내구수명 평가 결과	5 (30)				

[1차년도-1] AzoPDMS/금속 이중층 기반 광반응성 복합소재의 개발 및 안정성 검증을 통한 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계

1-1) AzoPDMS/금속 이중층 모델의 광거동 이론적 예측

: 금속 박막 종류에 휘어짐, 곡률반지름, 캔틸레버 높이 변화 및 정전 용량 변화 예측 여부

■ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 광반응성 거동 분석

- AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재를 MEMS 정전식 감응 센서의 캔틸레버로 이용하기 위해, 바이메탈 구조체의 열팽창에 따른 곡률 반지름 공식의 변형식을 결합하고 실험적 결과와 비교하여 이론적으로 광반응성 거동을 예측 및 최적화된 굽힘을 도출함.

$$\rho \propto \frac{t \cdot \left[3 \cdot (1+m)^2 + (1+m \cdot n) \cdot \left(m^2 + \frac{1}{m \cdot n} \right) \right]}{(1+m)^2}$$

(ρ = 곡률 반지름, t = 이중층의 전체 두께, m = 각 층의 두께 비, n = 각 층의 영률 비)

식 1. 바이메탈 구조체의 열팽창에 따른 곡률 반지름 공식의 변형식

■ AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 두께 및 굽힘 최적화

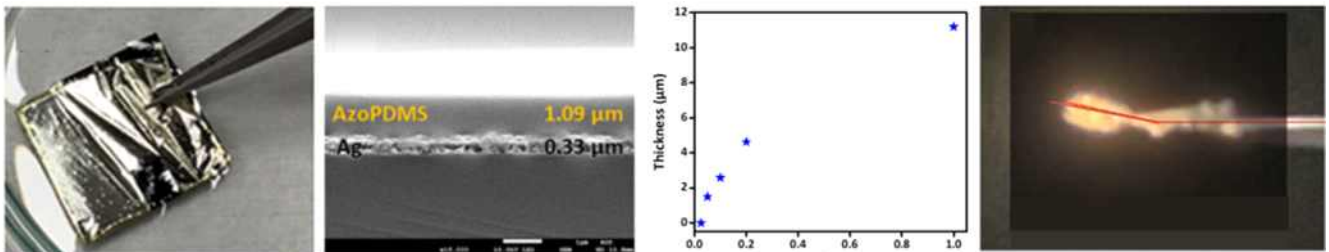


그림 57. AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 (a) 합성 및 필름 사진, (b) 주사전자현미경(SEM) 단면도. (c) AzoPDMS 층의 두께 최적화 과정, (d) 합성한 AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 광굽힘 분석.

- 개발한 복합소재는 은(300 nm)과 AzoPDMS(1 μm)의 이중층으로 구성되어있으며, 필름을 7 mm X 1.5 mm 의 직사각형으로 잘라 광굽힘 성능 시험을 진행함.
- 새로 개발된 광반응성 소재인 AzoPDMS의 스핀코팅 공정에서 프리폴리머를 노말헥세인(*n*-hexane) 용매에 비율(1(g):1(ml), 0.2:1, 0.1:1, 0.05:1)에 따라 희석해 고분자의 점성을 조절함으로써 AzoPDMS 층의 두께공정을 최적화함.
- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재에 빛을 가하여 복합소재의 광굽힘을 유도하였음. 광굽힘 성능 분석 결과 약 30 μm 의 높이 변화를 얻음 (그림 57).
- 이를 MEMS 정전식 센서 설계 상 캔틸레버 길이인 200 μm로 변환하면 0.85 μm로, 기존의 목표였던 1 μm 이하의 높이 변화를 달성하였음. 이는 MEMS 정전식 센서 구성 시 이중층 복합소재 이중층을 MEMS 상부에 형성할 때 정전용량의 변화를 충분히 이끌어 낼 수 있는 수치임.

1-2) AzoPDMS/금속 이중층 모델의 실험적 검증

: 극한 환경에 안정한 광반응성 AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 합성 유무

- AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 극한 환경(강염기, 고온, 고압)에서의 안정성 검증
 - pH 안정성(pH 12.5), 고온 안정성(80°C) 및 고압 안정성(~200 MPa)

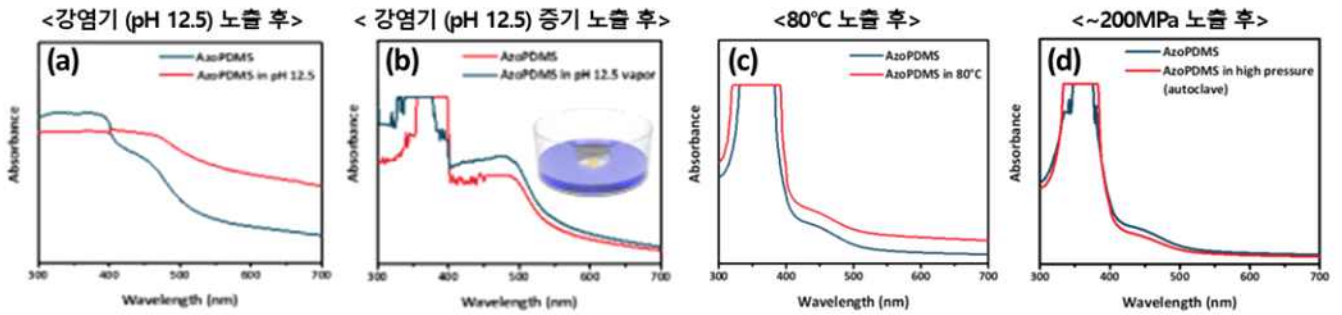


그림 58. 극한 환경(강염기, 고온, 고압)에의 노출 후 광학적 특성(흡광 그래프) 변화 검증. (a) 12.5 KOH 수용액 환경 하에서 24시간 노출 후, (b) 12.5 KOH 수용액 증기 환경 하에서 24시간 노출 후, (c) 고온(80°C) 환경 하에서 일주일 노출 후, (d) 고압(~200 MPa) 증기 환경 하에서 4시간 노출 후 자외선-가시광선 분광기로 측정된 흡광 그래프 상의 변화.

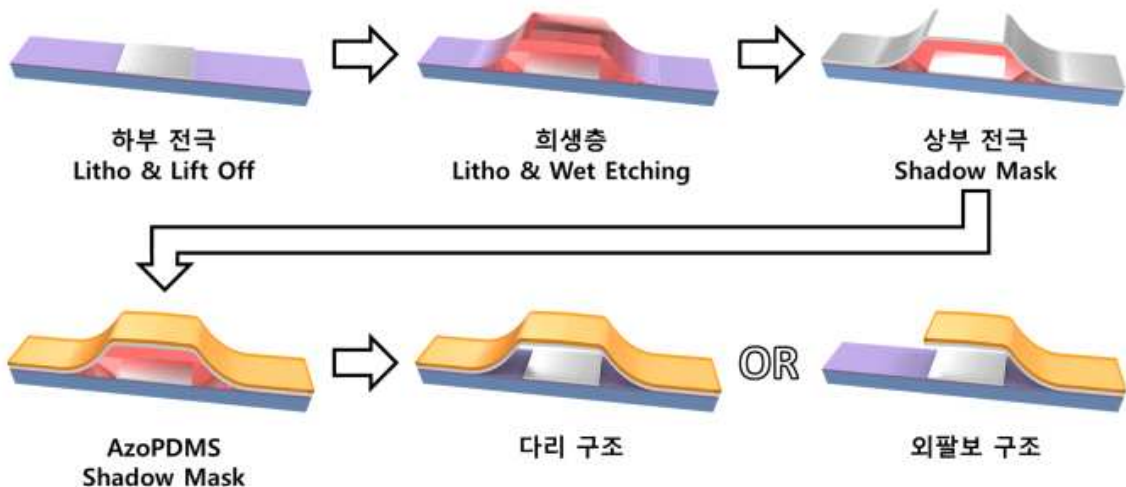
- pH, 온도, 압력 안정성 검증을 위해 AzoPDMS/금속 이중층 복합소재의 광급힘 성능 및 광반응성 특성(빛 흡광도)을 측정함.
- 콘크리트 내부는 pH 12.5의 강염기 환경이며, 양생 시 고온·고압 환경을 거치기 때문에, 각 조건에서의 복합소재의 적용가능성 검증이 요구됨.
- 이에 따라 강염기(pH 12.5의 KOH 수용액 및 증기), 고온(80°C) 양생, 고강도 콘크리트(~200 MPa) 기준 고압증기(120°C, 2.2기압의 오토클레이브) 양생 환경에서의 광급힘 성능 및 UV-Vis 흡광 변화를 관찰함.
- pH 12.5 수용액 환경 하에서 일주일 노출 시, 필름의 광급힘 성능이 유지되었으나 UV-Vis 상에서 손상이 관찰됨. 이는 콘크리트 내에서 센서를 보호해줄 칩 캐리어의 필요성을 보임 (그림 58a).
- 칩 캐리어 내부의 구조와 유사하게 설계하여(pH 12.5 KOH 수용액 내부에 공기가 순환할 수 있는 보호막을 추가하여, KOH의 증기에 필름이 노출된 환경) pH 안정성의 재검증을 수행하였을 때, UV-Vis 상 흡광도 그래프의 주요 피크(peak)가 남아있음 (그림 58b).
- 또한 콘크리트 양생 조건 중 고온 양생(80°C)과 고압증기 양생(120°C, 2.2기압의 오토클레이브 환경 하 30분의 온도상승시간, 3시간의 정온도시간, 30분의 온도하강시간)에 해당하는 극한 환경에서 복합소재의 안정성을 검증하였으며, 노출 후 광급힘 성능과 흡광 모두 변화 없이 성질이 유지됨 (그림 58c,d).

1-3) 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계

: 광반응성 MEMS 정전식 센서 설계의 타당성 여부

■ 광반응성 MEMS 정전식 센서의 구조 설계

- AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 MEMS 정전식 감응 센서 구조 및 제작 공정 설계



- 1차년도 실험 결과와 변형된 바이메탈 곡률 반지름 방정식을 통해 확정된 길이, 두께에 해당하는 AzoPDMS/금속 박막 이중층 기반 미세전자기계시스템(microelectromechanical systems; MEMS) 정전식 감응 센서를 설계함 (그림 59).

[1차년도-2] 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 고성능 반도체식 가스 센서 개발

2-1) 열화인자 및 부식발생 가스 감지물질 선별 및 성능 조사

: 열화인자 및 부식발생 가스의 종류와 농도 감지 여부

■ 나노구조체 제작 및 대면적 제작 기술 개발

- 열화인자: O_2 (산화성 가스), CO_2 (환원성 가스), H_2 (환원성 가스), Cl_2 (환원성 가스), H_2O
- 열화인자 감지 소재로서 SnO_2 , WO_3 , NiO , TiO_2 를 선정함.
- SnO_2 : 환원성 (CO_2) 가스 및 수분에 대한 높은 민감도.
- WO_3 : 산화성 가스(O_2 , NO_2)에 대하여 높은 민감도 보유.
- NiO : 산화·환원성 가스를 분별할 수 있는 기준 소재로 사용 가능.
- TiO_2 : 산화·환원성 가스에 대한 높은 민감도를 보유하며, 빛에 의하여 구동이 가능함. 저소비전력 가스센서 구현 가능.

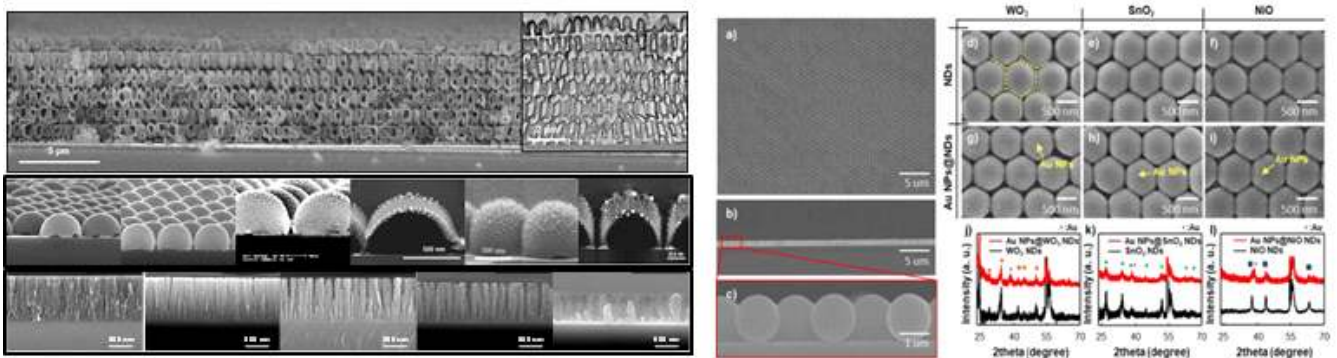


그림 60. 나노구조체 대면적화 합성기술로 제작된 다양한 나노구조체와 촉매가 부착된 나노구조체의 SEM 및 XRD 결과

2-2) 선택적 감지와 정확도 향상을 위한 표면개질 기술 개발

: 표면 기능기화 및 촉매 코팅 기술 개발 여부

■ 표면 기능기화 및 촉매 코팅 기술 개발 여부

- Polystyrene beads 기반의 템플레이트 법을 적용하여, WO_3 , SnO_2 , NiO 나노구조체를 형성함.
- 나노구조체의 대면화를 위하여 Langmuir-Blodgett method을 적용하여 4인치 웨이퍼 위에 균일한 형상의 산화물 나노구조체를 제작함 (그림 61).
- 전자빔 증착법을 이용하여 Au 촉매를 증착하였으며, 열처리 온도를 조절하여 금속 촉매의 크기를 최적화하였음.
- 그림 60을 통하여 Langmuir-Blodgett method 기반, 성공적으로 형성된 Polystyrene beads 단일층의 표면과 단면의 SEM 사진, 그리고 WO_3 , SnO_2 , NiO 감지막이 증착된 SEM 사진, WO_3 , SnO_2 , NiO 감지막 표면에 Au 촉매가 형성된 SEM 사진을 보여주고 있음. XRD를 통하여 형성된 감지소재와 금속 촉매를 검증함.



그림 61. 초소형 가스센서 전극 디자인과 제작된 기판, 그리고 단일 센서의 패키징 사진

2-3) 단일 센서 제작 및 실험실 환경에서의 성능 평가

: 열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부

■ 열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부

- WO_3 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 열화인자(CO_2 , Cl_2 , H_2) 감지특성 평가를 진행함.
- 동작온도 최적화를 위하여, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400도에서 CO_2 , Cl_2 , H_2 에 500초 동안 노출하였으며, 150도 이하의 낮은 온도에서는 가스의 반응이 일어나지 않았으며, 200도 이상에서는 온도가 증가할수록 반응성도 함께 증가하였으며, 반응 후에 다시 회복되는 것을 확인함 (그림 62).
- 열화인자 반응성은 CO_2 , Cl_2 , H_2 에 최대값 819.6, 901.8, 872.7%를 각각 나타내었으며, CO_2 , Cl_2 에 대한 가스감지한계는 21.4 ppb, 1.52 ppb를 각각 달성함.
- WO_3 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 선택성 향상을 위하여, CeO_2 를 3 nm 증착하여 동작온도에 따른 반응성 변화를 진행함 (그림 63).
- CeO_2 가 코팅된 WO_3 나노구조체는 250도 이하에서 열화인자와 반응을 하지 않음. 300도 이상에서는 온도가 증가함에 따라, 반응성도 증가하는 경향을 나타냄. 이러한 결과는 CeO_2 로 인하여, 가스의 흡착에너지가 바뀐 것을 의미하며, 온도를 조절함으로써 CO_2 , Cl_2 , H_2 에 대한 선택성과 정확도를 향상이 가능하다는 것을 의미함.

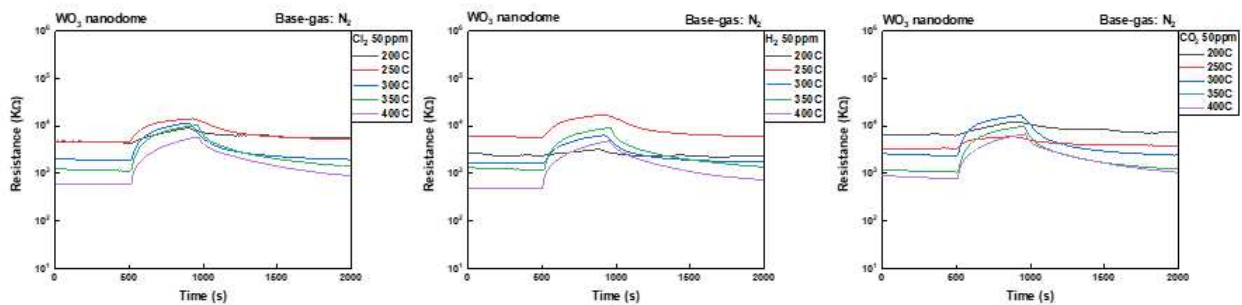


그림 62. 열화인자에 대한 WO_3 나노구조체의 동작 온도에 따른 반응 그래프.

(a) 50 ppm Cl_2 , (b) 50 ppm H_2 , (c) 50 ppm CO_2 .

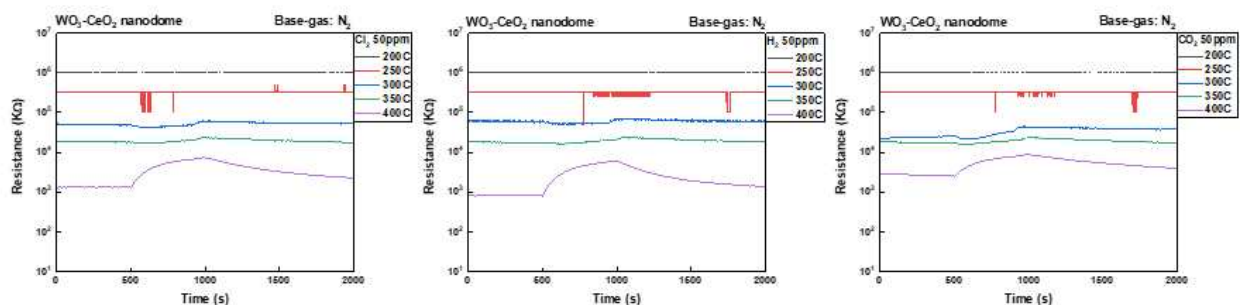


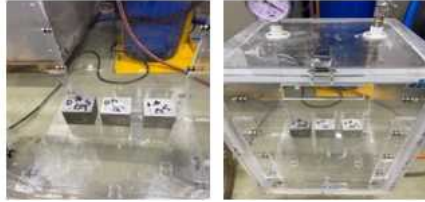
그림 63. 열화인자에 대한 CeO_2 가 코팅된 WO_3 나노구조체의 동작 온도에 따른 반응 그래프.

■ 매립 환경에서의 열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부

<센서 시스템 제작 완료>



<콘크리트 매립 안정성 시험>



<콘크리트 매립 후의 가스센서>



그림 64. 콘크리트 매립 환경 하에서 감지 특성 분석을 위해 제작된 센서 시스템 사진 및 콘크리트 매립안정성 시험 사진, 그리고 콘크리트 매립 후의 센서 내부 사진.

- 콘크리트 매립 환경 하에서의 반응성 평가를 위해서 휴대가 가능한 소형 가스센서 측정 시스템을 제작하였음 (그림 64).
- 세라믹기술원에서 콘크리트 매립 안정성 시험을 진행하였으며, 매립환경 하에서는 열화인자에 대한 감지를 못함. 연구실 환경에서와 실제 매립상태에서의 환경적 차이가 크다는 것을 확임함. 그 이유는 제작된 가스 센서의 내부로, 수분 및 콘크리트가 침투하여, 안정성이 저하되는 결과를 초래함.
- 가스센서의 콘크리트 내구수명 평가를 적용 가능성을 확인하기 위해서 고가의 상용화 가스센서를 구입하여 비교 시험을 진행함. 고가의 상용화 가스센서의 경우, 패키징이 잘되어 있어서 매립 후에도 열화인자를 감지하는 결과를 나타냄 (그림 65).

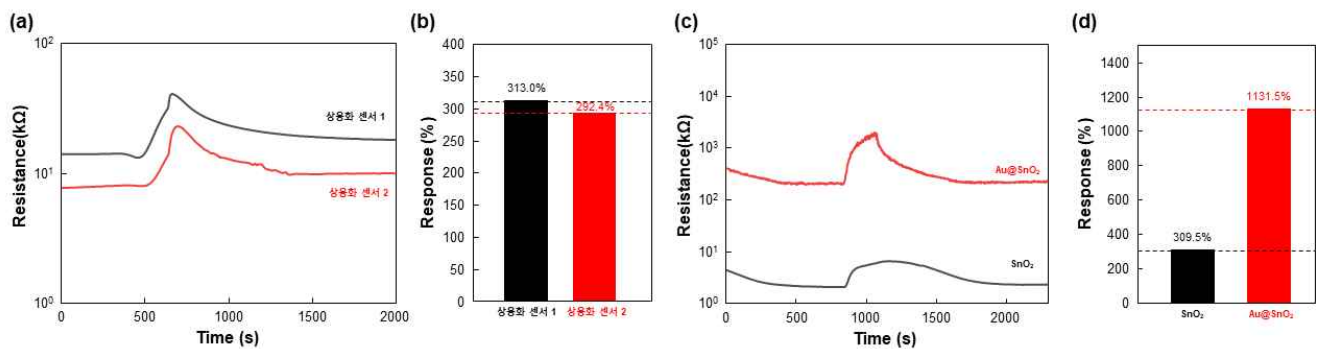


그림 65. 열화인자에 대한 상용화 센서의 (a) 실시간 반응 그래프와 (b) 반응도 그래프.

본 연구개발을 통해 제작된 SnO₂와 Au 촉매가 코팅된 SnO₂의 (c) 실시간 반응 그래프와 (d) 반응도 그래프.

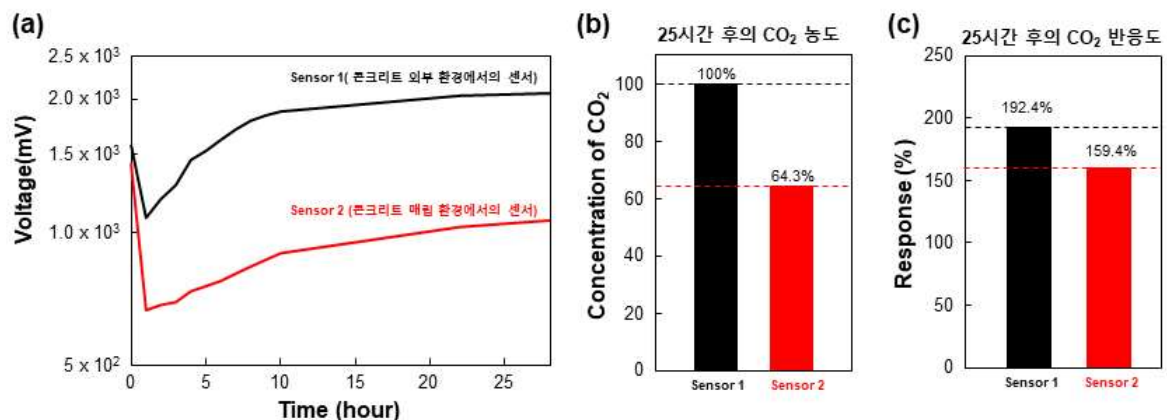


그림 66. (a) 콘크리트 매립 환경 하에서 감지 특성 분석 그래프. (b) 내부로 침투된 CO₂ 농도 및 (c) 반응도를 나타내는 그래프.

- SnO₂ 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 열화인자(CO₂) 감지특성 평가를 진행한 결과임 (그림

66).

- 명확한 성능 비교를 위해서, 상용화된 가스센서와의 특성을 동시에 비교를 진행함.
- 이러한 결과는 본 연구개발에서 제작된 가스 센서는 매립 환경 하에서 더 높은 반응도와 정확성을 나타낼 수 있다는 것을 의미함.

[1차년도-3] 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가 및 모르타르 레벨 간이 성능평가

3-1) 콘크리트 환경 하 센서의 내화학적 및 센서 소재 구조 분석

: 내화학적 및 센서 소재 미세구조 분석 여부

■ 콘크리트 환경 하 센서의 내화학적 및 센서 소재 미세구조 변화 분석

- 시멘트 페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 실험 및 평가

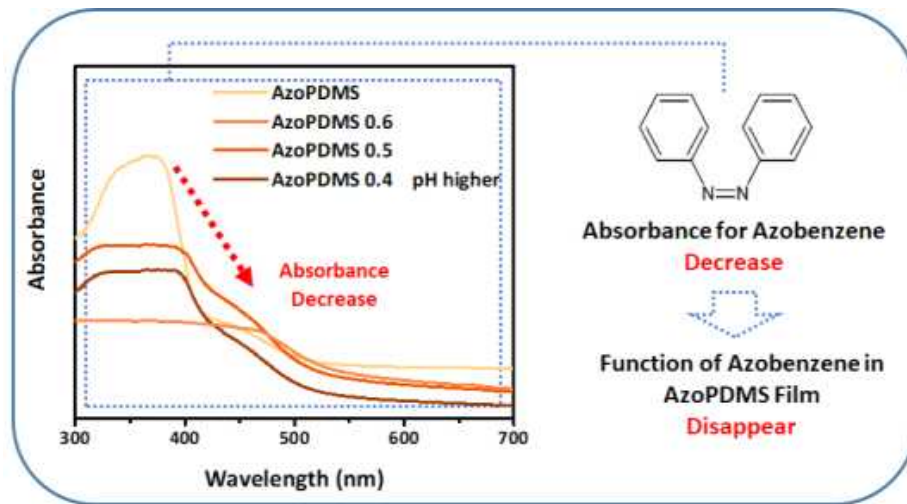
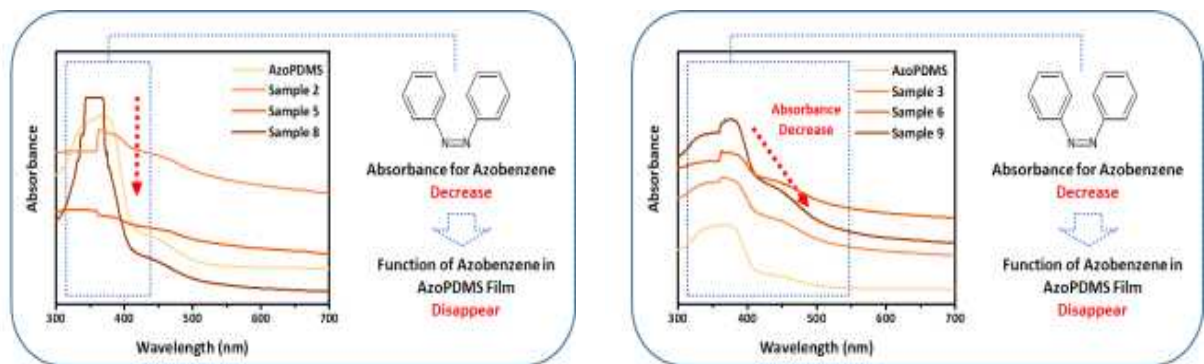


그림 67. UV-Vis 평가를 통한 콘크리트 환경 하 AzoPDMS 복합소재의 구조 변화 결과.

- AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합소재의 물시멘트비별 시멘트 페이스트 내 매립 시 변화를 평가하기 위해 UV-Vis 흡광 분석을 실시함. 분석 결과, 기존 350 nm에서 보인 흡광 피크(peak)가 시멘트 페이스트 내에서 시간이 지난 후에 감소하는 경향을 나타냄 (그림 67).
- 열화 환경의 시멘트 페이스트 내 AzoPDMS 복합소재 매립 실험 및 평가
- 본 연구에서 개발한 AzoPDMS 복합소재의 열화 환경의 콘크리트 내 변화를 평가하기 위하여 시멘트 페이스트 실험체를 제작하고 경화 전 내부에 AzoPDMS 복합소재를 매립하여 소재 변화 및 반응성 등을 평가함.



<염해 환경에서 양생한 AzoPDMS 복합소재>

<탄산화 환경에서 양생한 AzoPDMS 복합소재>

그림 68. UV-Vis 평가를 통한 콘크리트 환경 하 AzoPDMS 복합소재의 구조 변화 결과.

- AzoPDMS 복합소재의 콘크리트 열화(염해, 탄산화) 환경 하 변화를 평가하기 위해 각각의 조건에서 매립 후 양생한 AzoPDMS 복합소재를 채취 후 UV-Vis 분석법을 통해서 흡광도 분석을 한 결과 주요 흡광 파장(350 nm)에서 흡광도가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보아 AzoPDMS 복합소재에서 일부 변형이 일어나는 것으로 판단됨 (그림 68).
- 기건 양생한 AzoPDMS 복합소재의 경우 채취 시 얇고 작은 특성으로 인해 크랙이 발생하여 측정이 불가함.
- AzoPDMS 복합소재를 활용하여 추후 센서 제작 시 소재를 보호할 수 있는 센서 보호막 등의 공정이 필요할 것으로 판단됨.

3-2) 모르타르 레벨 가스 센서 감지성능 평가

: 가스 센서 감지성능 평가 결과



그림 69. 화학센서 및 시멘트 페이스트 내 매립 전경.

표 8. 화학센서 시멘트 페이스트 내 매립 후 저항 측정 결과.

	1번 센서 (W/C 50%)	3번 센서 (W/C 60%)
초기 저항값	1.8 MΩ	17 kΩ
2시간 후	측정불가	측정불가
4시간 후	측정불가	측정불가
6시간 후	6 MΩ 에서 저하되는 현상	9 MΩ 에서 저하되는 현상
8시간 후	5 MΩ 에서 저하되는 현상	8 MΩ 에서 저하되는 현상
10시간 후	6 MΩ 에서 저하되는 현상	4 MΩ 에서 저하되는 현상
12시간 후	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환
24시간 후	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환	5 MΩ 에서 저하되며 400 MΩ으로 전환

- 표 8와 같이 저항 값의 변화가 심하고 매우 높게 측정되어 추후 화학센서를 매립 시 센서를 보호하기 위해 칩 캐리어 등의 추가 보호 공정(캡슐화 등)이 필요할 것으로 판단됨 (그림 69,70).
- 콘크리트는 특히 초기에 내부 수분의 양이 많고 변화가 심하여 화학센서의 저항이 높게 나타난 것으로 판단되며 추후 캡슐화가 필수적일 것으로 판단됨.

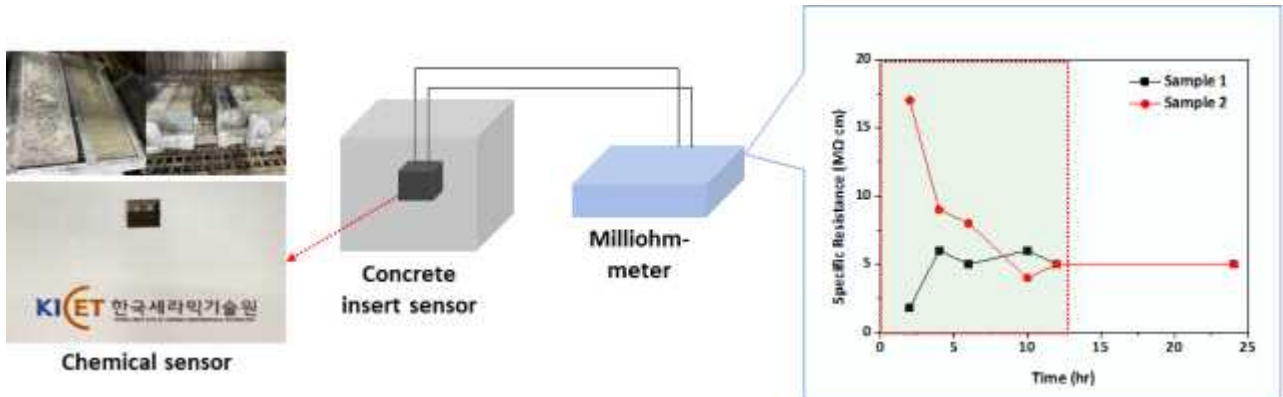


그림 70. 화학센서 및 시멘트 페이스트 내 저항.

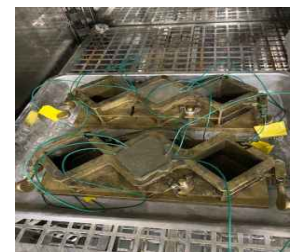
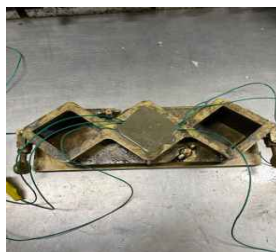
3-3) 모르타르 레벨 가스 센서를 통한 모르타르 내구수명 평가

: 내구수명 평가 결과

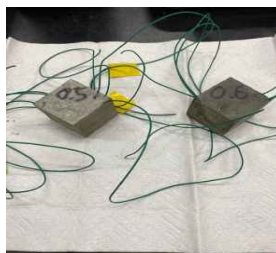
- 시멘트 페이스트 내 가스 센서 매립 실험 및 열화 인자 측정
- 본 연구에서 개발한 가스 센서를 활용하여 시멘트 페이스트 내 CO₂ 열화인자를 측정하고자 실험체를 제작하여 센서 매립 후 신라대학교에서 개발한 측정 장비를 통해 열화인자를 측정함 (그림 71).

표 9. 5차 실험 배합표.

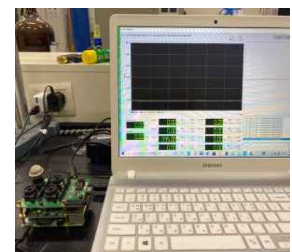
구분	W/B (%)	Gas Sensor (Name)	단위 중량(g/400 mL)	
			물	시멘트
GS 1-1	50	1	270	540
GS 2-1	60	2	288	480



<센서 및 실험체 제작과정>



<탈형 후 온도 20℃, 습도 90% 습윤양생>



<탄산화 촉진 환경(CO₂ 농도 100%)하 열화인자 측정>

그림 71. 가스 센서를 매립한 시멘트페이스트의 열화 인자 측정.

- 상용화된 가스센서는 50 ppm CO₂에 대하여, 313%, 294.4%의 반응도를 나타내었으며, 신라대학교에서 개발된 SnO₂ 나노구조체는 309.5%의 반응도를 나타내었으며, Au 촉매를 코팅한 SnO₂는 약 3.6배의 향상된 1131.5%의 반응도를 나타냄 (그림 72).
- 콘크리트 매립 환경 하에서 상용화 센서에 대한 반응도를 평가하였으며, 매립 환경 하에서도 열화인자(CO₂)에 대하여 높은 반응성을 나타냄.
- 대기 중의 이산화탄소 평균 농도는 400 ppm이며, 환산을 하면 0.04%가 대기 중의 이산화탄소 농도임. 이를 기반으로 계산하면, 0.04%의 CO₂ 열화인자가 페이스트 25mm로 침투하는 시간은 약 7년이 소요됨.

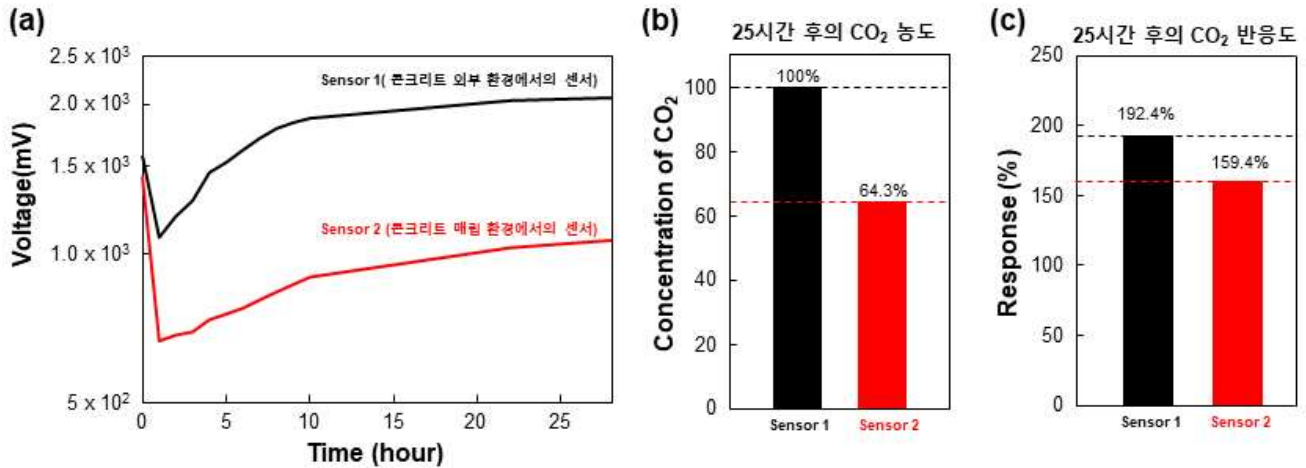


그림 72. 콘크리트 매립 환경 하에서 상용화 가스센서의 (a) CO₂ 감지 그래프 및 침투된 (b) CO₂의 농도와 (c) 반응도.

[2차년도-1] 광반응성 MEMS 정전식 센서를 제작 및 최적화를 진행하고 이를 기반으로 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 기술을 개발

4-1) 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 제작

: 실험적 광원 조건에서 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서의 광 자극에 대한 정전 용량 변화 여부



그림 73. (a) 하부 전극 및 희생층을 증착한 기판의 광학현미경 사진.

하부 전극, 희생층 및 상부 전극을 증착한 기판의 (b) 광학 현미경 사진 및 (c) SEM microscope 사진.

- MEMS 정전식 감응 센서 시제품을 제작하며 구조를 분석하고 및 피드백을 통해 제작 공정을 수정함.
- 상부 전극과 기판 사이의 유전층을 제거하고 아치형 다리 혹은 외팔보 형태로 구조를 수정함. 이중층을 형성하기 위한 상부 전극상에 AzoPDMS의 패터닝은 유사한 선행연구 결과가 존재하지 않으며, 식각을 통한 패터닝이 불가능하여 새도마스크(shadow mask) 공정으로 진행함 (그림 73).

4-2) 다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화

: 실험적 광원 조건에서 MEMS 정전식 감응 센서의 정전 용량 변화 최적화 여부

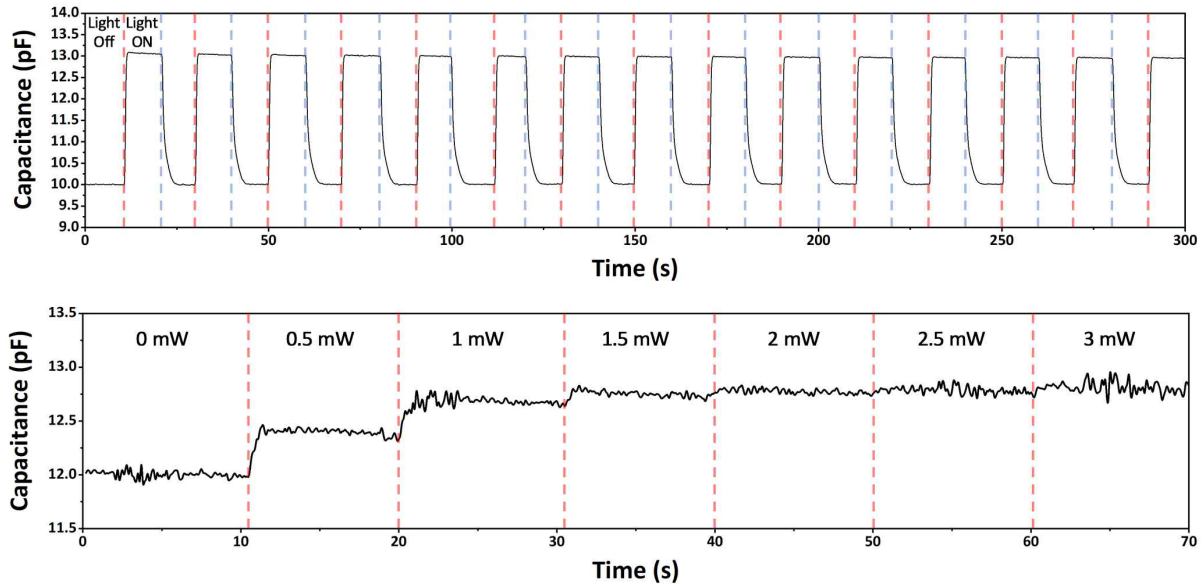


그림 74. 광 조사에 따른 MEMS 정전식 감응 센서의 광 자극 유무 및 광 세기에 따른 실시간 정전용량 변화 그래프.

- MEMS 정전식 감응 센서의 제작을 완료하고 광 조사에 따른 정전용량 변화에 대한 연구를 진행함 (그림 74).
- 550 nm에서 3.28 mW의 출력을 가지는 백색광원을 10초마다 ON/OFF 상태를 전환했을 때 정전용량이 10.0 pF에서 ~13.0 pF으로 변화하는 것을 확인함. 이 정전용량의 변화는 총 300초 동안 30번의 ON/OFF 상태 변화에도 지속적으로 성능을 유지하였음.
- 광 세기가 선형적으로 증가함에 따른 정전용량 변화를 측정함. 정전 용량은 전극 사이 거리에 반비례하기 때문에 선형적으로 증가하지 않음. 광도가 2 mW 이상이면 AzoPDMS에서 Azobenzene 그룹의 대부분이 cis에서 trans형태로 광이성질화되기 때문에 정전 용량이 수렴함.

4-3) 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가

: 실제 콘크리트 환경에서 광섬유에 가해지는 하중에 따른 빛의 세기 변화에 의한 MEMS 정전식 감응 센서의 정전 용량 변화 여부

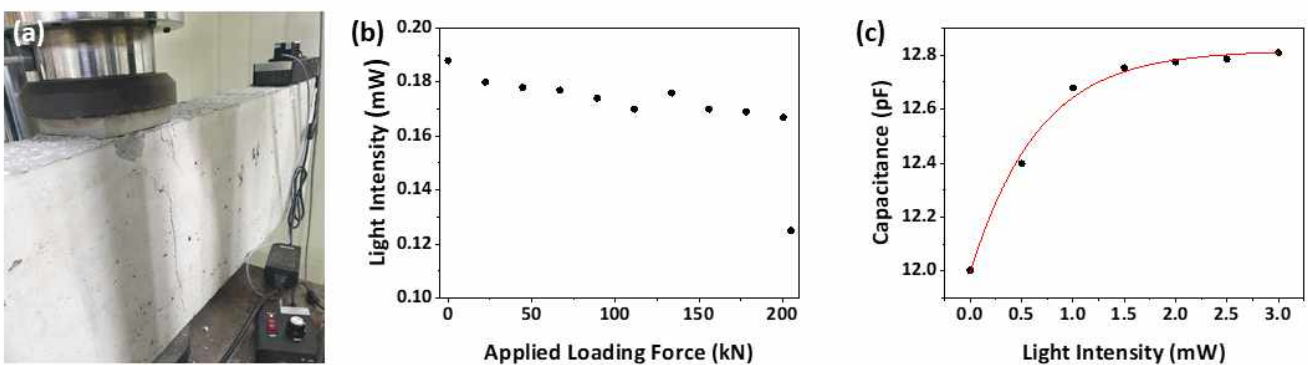


그림 75. (a) 고분자 광섬유가 내장된 콘크리트 제작 및 이를 사용한 하중 시험 사진. (b) 콘크리트에 인가되는 하중에 따른 광 세기 변화. (c) 광 세기에 따른 MEMS 센서의 정전용량 변화.

- 제작한 고분자 광섬유는 변형(직선 및 곡선)에 따라 광 세기가 변화함.
- 콘크리트 내부에 제작한 고분자 광섬유를 내장하고 양생을 진행함. 제작한 콘크리트에 하중을 인가하며 광섬유를 통과하는 광 세기를 측정함. 광 세기에 따른 정전용량 변화를 계산하여 0.13 pF의 정전용량 변화 및 평균 2.47×10^{-6} dB/N, 최대 1.51×10^{-5} dB/N의 민감도를 얻음 (그림 75).

[2차년도-2] 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발

5-1) 반도체식 가스 센서 어레이 개발

: 가스 센서 어레이의 수

■ 가스 센서 어레이의 수

- 단일 센서의 반응성을 유지하기 위하여, 단일 센서에 사용되었던 전극 디자인을 유지하면서 센서 어레이 전극을 디자인 하였으며, 다중센서 집적화를 수행함 (그림 76).
- 가스센서 어레이 대면적화를 위한 반도체식 공정 기반의 증착 기술을 적용함.
- 다종의 산화물과 촉매로 이루어진 8개(2x4), 9(3x3)개 센서를 집적화하여, 가스센서 어레이를 제작함.
- 또한, 콘크리트 매립 실험을 위한 패키징은 상용화된 센서의 칩캐리어를 참고하여 제작함.

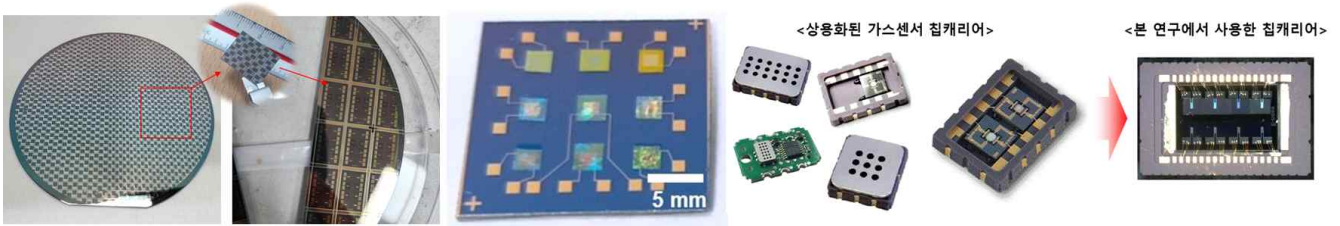


그림 76. 제작된 단일 센서를 집적화한 센서 어레이 기판 및 칩캐리어에 결합한 가스센서 어레이 사진

5-2) 콘크리트 환경 내 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가

: 매립상태에서의 열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부

■ 매립상태에서의 열화인자 및 부식발생 가스 감지성능 여부

- 매립상태에서의 칩캐리어 안정성 확보를 위한 연구를 진행하고 있음.

5-3) 가스 센서 어레이의 특징 추출 및 패턴 인식기술

: 열화인자 및 부식발생 가스의 분별 여부

■ 열화인자 및 부식발생 가스의 분별 여부

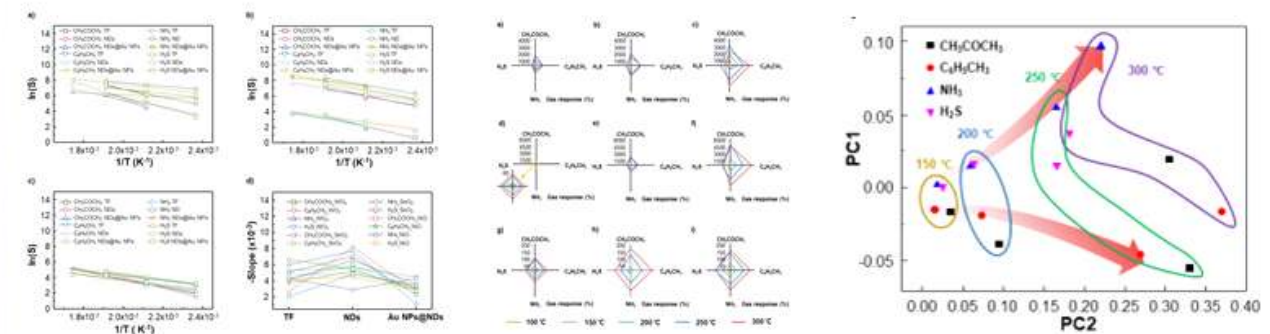
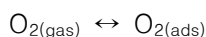
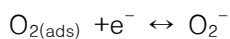


그림 77. WO₃, SnO₂, NiO 나노구조체와 Au 촉매가 부착된 WO₃, SnO₂, NiO 나노구조체의 동작 온도에 따른 환원성 가스의 흡착량 변화 및 산화성 가스에 대한 반응성 분석 및 주성분 분석 기반의 패턴인식 결과

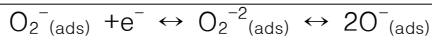
- 구동 온도 100 °C 이하에서의 O₂ 흡착 반응



- 구동 온도 100~250 °C 에서의 O₂ 흡착 반응



- 구동 온도 250 °C 이상에서의 O₂ 흡착 반응



- 구동온도가 상승함에 따라, O₂의 흡착량은 증가하고, 환원성 가스는 증가된 O₂ 흡착량에 비례하여 반응성이 향상하는 것을 확인함
- WO₃, SnO₂, NiO 나노구조체는 박막보다 높은 반응성을 나타내었으며, 각 감지소재의 내재된 촉매효과로 인하여 선택적 반응을 나타내었으며, Au가 부착된 나노구조체는 이와 같은 선택성과 반응성을 모두 극대화 하였음.
- 각 감지소재의 구동온도에 따른 반응성 변화를 기반으로 주성분 분석을 수행하였으며, **그림 77**에서 온도가 증가함에 따라 선택적 감지 능력이 향상되는 것을 확인하였음. 또한, 구동온도에 따른 반응성 변화를 Arrhenius equation를 사용하여 활성화 에너지 변화를 분석하였음.
- H₂, Cl₂, CO₂ 에 대한 분별 여부에 대한 연구가 진행 중.

[2차년도-3] 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가

6-1) 콘크리트 내 이중 센서 감지성능 평가

- 1차년도 평가에서의 심사위원 의견을 반영하여, 광반응성 센서와 가스센서를 분리하여 진행.
- 광반응성 센서는 물리적 센서이며, 가스센서는 화학적 센서이므로, 상호간의 간섭현상은 없으며, 매립되는 위치가 다름.
- 1차년도 평가에서의 심사위원 의견을 반영하여, 광반응성 센서와 가스센서를 분리하여 진행.
- 광반응성 센서는 물리적 센서이며, 가스센서는 화학적 센서이므로, 상호간의 간섭현상은 없으며, 매립되는 위치가 다름.
- 캡슐화 한 MEMS 센서 매립을 통한 염해 환경에서의 센서 적용 가능성을 평가함.
- 1차년도 센서 매립 적용성 평가 결과를 기반으로 센서를 캡슐화 한 후 시멘트 페이스트 내 매립하고 염해환경 하에서 센서 적용성을 평가함 (**그림 78**).
- 시멘트 페이스트는 KS L 5109에 의거하여 제작하였으며, 5x5x5cm 큐빅 형태의 몰드를 사용하였다. 혼합 방법은 시멘트에 물을 혼입한 후 30초 동안 저속으로 혼합하고, 혼합기를 정지하여 15초 동안 벽면에 묻어있는 페이스트를 긁어낸다. 다음 고속으로 60초 동안 혼합하여 마무리함.
- 1차 실험의 실험체의 제작은 물시멘트비 30%, 40%, 50%로 하였으며, 각 물시멘트비별 센서의 종류를 다르게 매립한 후 1일간 항온습기에 습윤양생 후 14일 간 염해환경에서 양생함.
- 염화 침지 시험은 염화물량을 해수의 2배 기준으로 설정하여 1 mol → NaCl 117 g/2000 mL 실험을 진행하고 양생이 끝난 직후 실험체 내에 센서를 추출하여 상태 확인함.

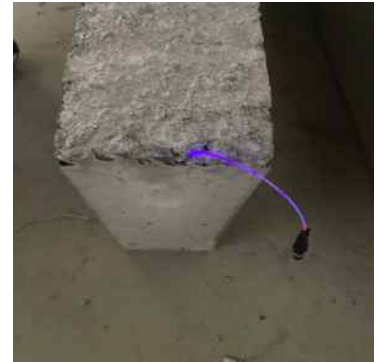


그림 78. 캡슐화 한 센서 매립 적용성 평가 실험

6-2) 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가
: 콘크리트 진단 평가 결과

■ 콘크리트 내 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 진단

- 콘크리트 내 광섬유 매립 실험 및 평가



<양생 완료 실험체의 광세기 테스트>



<응력에 따른 광세기 측정>

그림 79. 광섬유를 매립한 콘크리트의 광세기 측정.

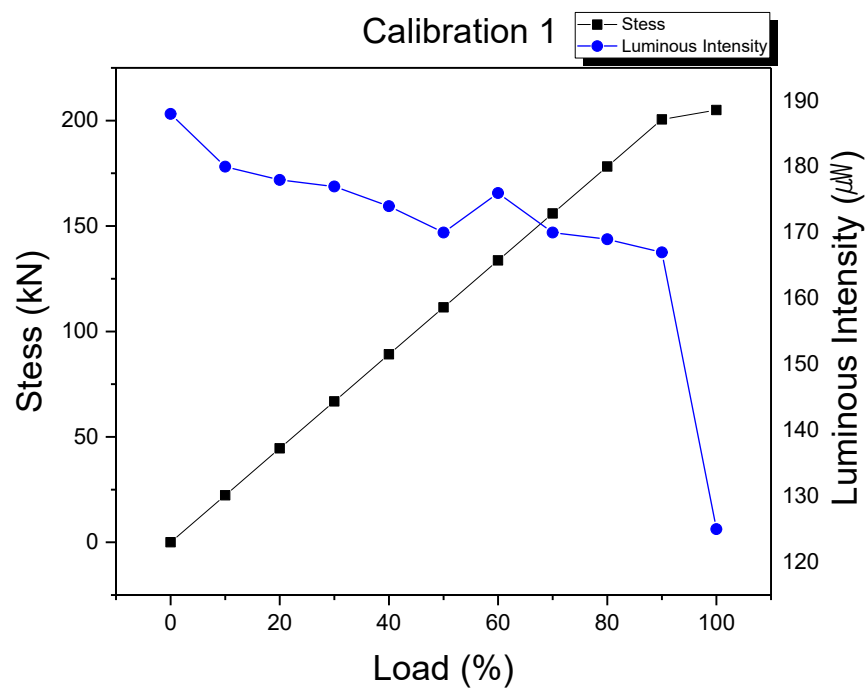


그림 80. Calibration 1 광섬유 광세기 측정결과.

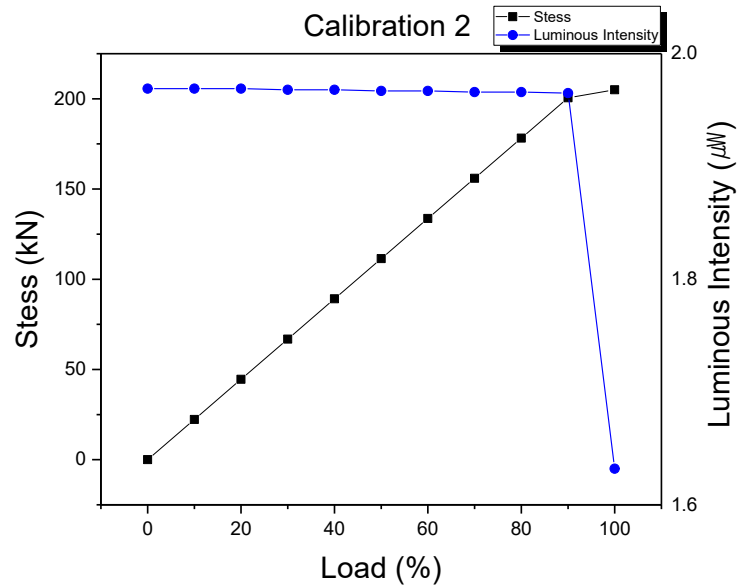


그림 81. Calibration 2 광섬유 광세기 측정결과.

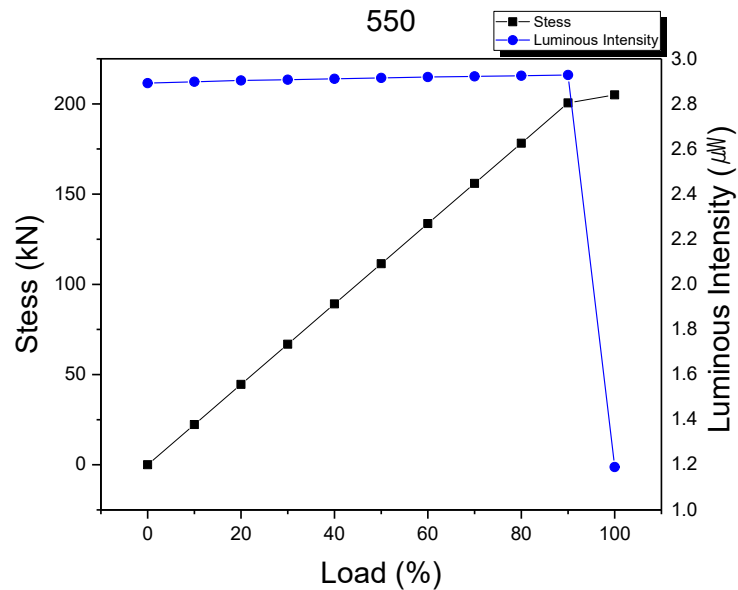


그림 82. 550 광섬유 광세기 측정결과.

- 그림 80, 81, 82의 광세기 측정 결과 응력 증가에 따라 광세기의 정도(mW)값이 감소하는 것을 확인하였으며 실험체의 파단에 이른 경우 급격한 저점을 나타내는 것을 측정하였음 (그림 79).
- Fiber_C1 광섬유를 매립한 경우 하중이 없는 상태 기준 응력을 가함에 따라 콘크리트 부재 최대응력의 30%에서 5.9% 광세기가 감소하였으며 60%에서 6.4% 감소, 90%에서 11.2% 감소하였으며 파단 시 33.5% 급감하는 것으로 나타남.
- Fiber_C2 광섬유를 매립한 경우 하중이 없는 상태 기준 응력을 가함에 따라 콘크리트 부재 최대응력의 90%까지 약 0.2% 광세기가 감소하다 파단 시 17.1% 급감하는 것으로 나타남.
- Fiber_550 광섬유를 매립한 경우 하중이 없는 상태 기준 응력을 가함에 따라 Fiber_C2 광섬유의 경우와 같이 큰 차이를 보이지 않다가 파단 시 58.9% 급감하는 것으로 나타남.
- 해당 실험을 통해서 콘크리트 진단을 위해서는 uW 단위의 광세기 측정을 실시해야 할 것으로 판단되며 실시간 센싱을 통해서 콘크리트 부재의 응력 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단됨.
- 0~3 mW 의 빛에서 광 세기에 따라 약 6~7%의 반복적인 변화를 보이는 MEMS 정전식 센서를 연결하면 광세기의 변화에 해당하는 정전용량 값을 읽어내어 실시간으로 하중 변화를 감지하는 것이 충분히 가능함.

6-3) 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가

: 콘크리트 내구수명 평가 결과

■ 시멘트 페이스트 내 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가

- 시멘트 페이스트 내 가스 센서 매립 실험 및 열화 인자 측정

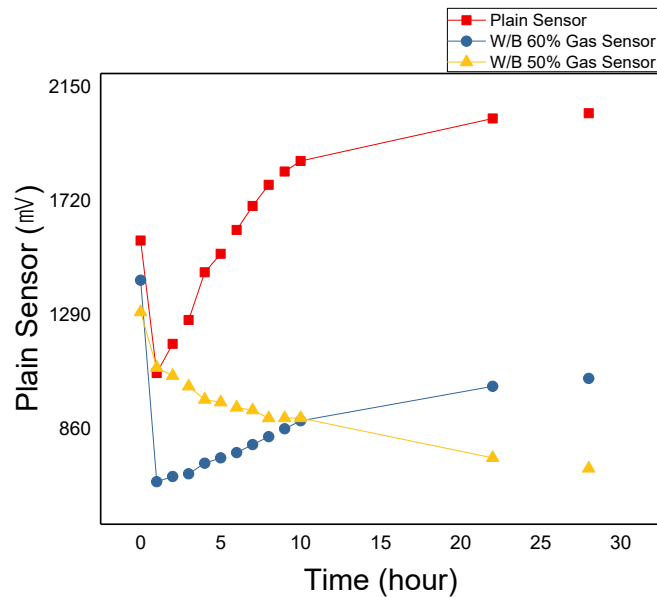


그림 83. CO₂ 측정결과.

- 그림 83의 열화인자 측정결과 상용 센서와 W/B 60% 매립 가스 센서의 CO₂ 농도 측정값이 시간의 경과에 따라 점차 증가하는 것을 확인할 수 있음.
- 가스센서의 콘크리트 내구수명 평가를 적용 가능성을 확인하기 위해서 고가의 상용화 가스센서를 구입하여 비교 시험을 진행함. 고가의 상용화 가스센서의 경우, 패키징이 잘되어 있어서 매립 후에도 열화인자를 감지하는 결과를 나타냄 (그림 84).

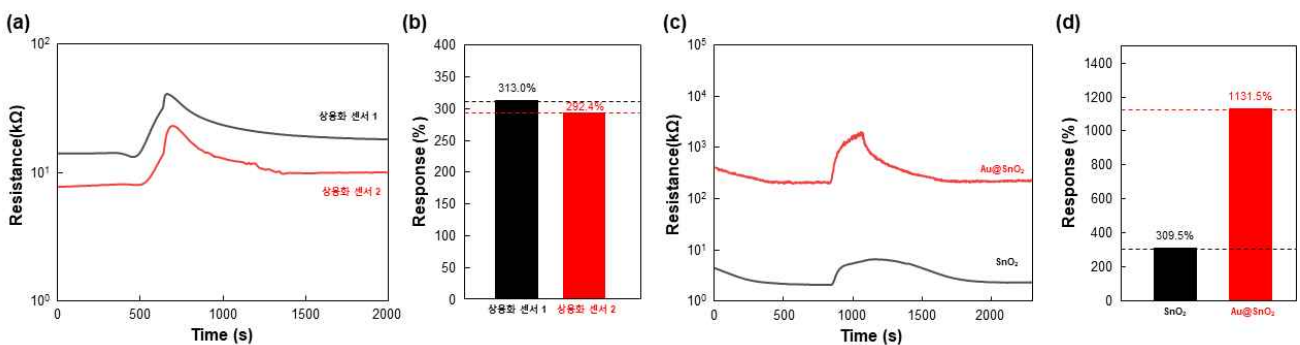


그림 84. 열화인자에 대한 상용화 센서의 (a) 실시간 반응 그래프와 (b) 반응도 그래프.

본 연구개발을 통해 제작된 SnO₂와 Au 촉매가 코팅된 SnO₂의 (c) 실시간 반응 그래프와 (d) 반응도 그래프.

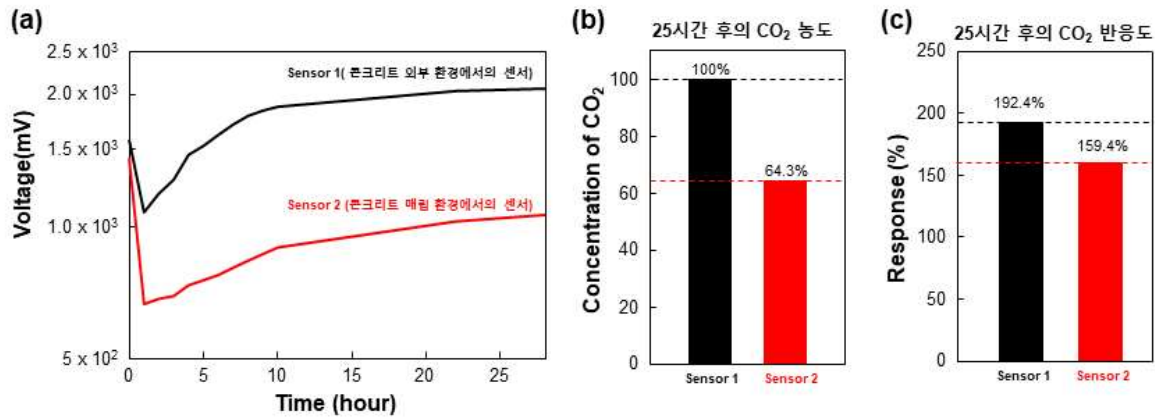


그림 85. (a) 콘크리트 매립 환경 하에서 감지 특성 분석 그래프. (b) 내부로 침투된 CO₂ 농도 및 (c) 반응도를 나타내는 그래프.

- SnO₂ 나노구조체 기반 반도체식 가스센서의 열화인자(CO₂) 감지특성 평가를 진행한 결과를 나타냄 (그림 85).
- 명확한 성능 비교를 위해서, 상용화된 가스센서와의 특성을 동시에 비교를 진행.
- 이러한 결과는 본 연구개발에서 제작된 가스 센서는 매립 환경 하에서 더 높은 반응도와 정확성을 나타낼 수 있다는 것을 의미함.
- 가속시험을 통하여, 가스센서 매립 위치와 반응성을 기반으로 열화인자(CO₂)의 콘크리트 내부까지의 침투시간을 계산하면 할 수 있음.
- 대기 중의 이산화탄소 평균 농도는 300 ppm이며, 환산을 하면 0.03%가 대기 중의 이산화탄소 농도임. 이를 기반으로 계산하면, 0.03%의 열화인자(CO₂)가 콘크리트 1cm 로 침투하는 시간은 약 10년이 소요됨.
- 신라대학교에서 개발된 단일 센서가 집적화 된 반도체식 가스센서 어레이는 콘크리트에 매립하여, 양생중이며, 열화인자(CO₂) 시험을 진행할 계획임.

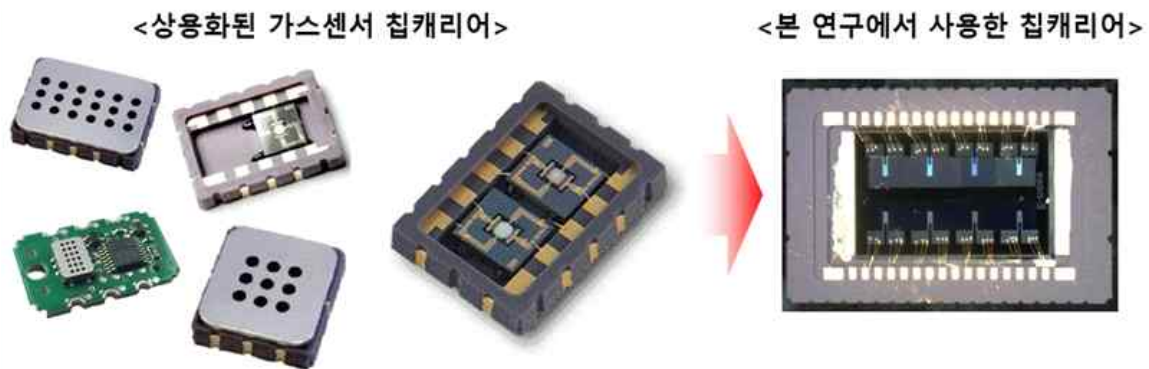


그림 86. 신라대학교에서 개발된 반도체식 가스센서 어레이.

[1·2차년도 연구 결과] 과제 진행에 대한 종합적인 결론

7-1) 본 연구의 한계성·보완점 및 향후 연구성과 활용계획

■ 본 연구의 한계성

- 과제 종료 기준 TRL 4단계의 연구실 단계 실험 결과물로, 실제 환경에 적용되기 위해서는 건축물への 적용 실험 진행 등 더 많은 연구 및 개발이 필요함.
- 기존 제안과 달리 하중 센서와 가스 센서가 필요한 건축물 내부의 위치가 달라, 복합 이중 센서의 개발 대신 개별로 보다 복잡한 매립 설계가 필요함.
- 건축물의 건설 단계에서 적용되는 센서로, 기존 건축물에는 적용이 어려움.

■ 본 연구의 보완점

- 개별 센서의 필요성에 따라 매립 위치를 변경하여 설계함.
- 하중 센서의 경우 철근과 가까운 곳의 하중 변화를 감지해야 하므로, 하중을 읽어 광 신호로 변환해주는 광섬유를 철근 가까이에 매립하여 양생함.
- 가스 센서의 경우 건물 외부로부터 열화 인자가 얼마나 깊이 들어왔는지를 감지해야하므로, 표면으로부터 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm 등 깊이 별로 매립하여 양생함.

■ 향후 연구성과 활용계획

- 본 과제에서 개발한 하중 및 가스 센서는 건물의 건강에 영향을 주는 두 요인(하중의 변화 및 열화 인자의 침투)을 감지하는 센서로, 차세대 건물 관리 시스템에 초소형 저전력 장수명 센서로 활용 가능할 것임.
 - 이를 통해 건물의 수명을 예상하고 위험 감지를 통해 사고를 미연에 방지하며, 측정 값을 축적하여 건물의 건강 정보를 데이터베이스화할 수 있음.
 - 특히 신라대에서 개발한 가스 센서는 TRL 4단계를 넘어 상용화 추진 계획이 있으며, 기존 연구성과 (논문, 특허)를 기반으로 장기 안정성을 검증하여 진행될 예정임.
-

(2) 정량적 연구개발성과

가. 정량적 연구성과 목표

○ 주요 평가항목에 대한 정량적 평가기준

평가 항목 (주요성능 Spec1))		단위	전체 항목 에서 차지하는 비중 (%)	세계최고 수준 보유국/ 보유기업	연구개발 전 국내수준	개발 목표치		평가 방법
				성능수준	성능수준	1차년도 (2020년)	2차년도 (2021년)	
광 반응성 센서	민감도	dB/N	5	-	-	$\geq 10^{-5}$	$\geq 10^{-5}$	공인성적서
	소비전력	mW	5	-	-	≤ 20	≤ 20	공인성적서
	검측 정확도 오차율	%	10	-	-	≤ 5	≤ 2	공인성적서
가스 센서	감지 한계농도	ppb	10	20(미국, Metalbolomx)	1000	100	100	공인성적서
	센서소자 수	개수	10	4(스위스, Sensorion)	-	>1	>4	자체 평가
	개별 센서소자의 검출감도	%	10	-	-	≥ 70	≥ 70	공인성적서
	개별 센서소자 소비전력	mW	5	24(일본, Figaro)	40(Seju Eng)	≤ 20	≤ 20	자체 평가
콘크리트 내구수명 평가		항목 수	10	-	-	-	-	자체 평가

* 외부 시험 인증평가 : 한국산업기술시험원(Korea Testing Laboratory) 등의 외부 시험기관 평가

* 검출 농도 : 센서 소자 시스템에서 측정 가능한 공기 혼합 유효 농도

* 검출한계 : 센서 출력 반응이 나타나는 한계 농도

* 검출농도 : 센서 출력 반응이 나타내는 값으로, 기저저항과 반응저항 값의 비에서 100을 곱한 값

* 센서 어레이 수 : 한 개의 칩 속에 집적되는 센서의 수

* 개별 센서소자 소비전력 : 개별 센서 소자의 동작에 필요한 전류와 전압을 이용하여 센서의 소비전력을 결정함

$$\text{소비전력 } P = V(\text{공급전압}) \times I(\text{공급전류})$$

나. 정량적 연구성과 목표 달성 정도

구분	년도	성과목표		세계최고수준 ^{주)} (보유국/ 보유기관)	연구전 국내수준 ^{주)}	목표치	단위	가중치 (%)	평가방법	달성치	비고
1차년도	2020	광 반응성 센서	민감도	-	-	$\geq 10^{-5}$	dB/N	5	공인성적서	1.51×10^{-5}	-
			소비전력	-	-	≤ 20	mW	5	공인성적서	222.4×10^{-9}	-
			검측 정확도 오차율	-	-	≤ 5	%	10	공인성적서	0.24	-
		가스 센서	감지한계농도	20(미국/Met albolomx)	1000	100	ppb	10	공인성적서	<30	공인성적 서 발급
			센서소자 수	4(스위스/Se nsorion)	-	>1	개수	10	자체평가	>4	-
			개별 센서소자의 검출감도	-	-	≥ 70	%	10	공인성적서	>300	공인성적 서 발급
			개별 센서소자 소비전력	24(일본/Fig aro)	40(Seju Eng)	≤ 20	mW	5	자체평가	<1	-
		콘크리트 내구수명 평가		-	-	-	항목 수	10	자체평가	-	-
최종목표	2021	광 반응성 센서	민감도	-	-	$\geq 10^{-5}$	dB/N	5	공인성적서	1.51×10^{-5}	-
			소비전력	-	-	≤ 20	mW	5	공인성적서	222.4×10^{-9}	-
			검측 정확도 오차율	-	-	≤ 2	%	10	공인성적서	0.24	-
		가스 센서	감지한계농도	20(미국/Met albolomx)	1000	100	ppb	10	공인성적서	<30	공인성적 서 발급
			센서소자 수	4(스위스/Se nsorion)	-	>4	개수	10	자체평가	>8	-
			개별 센서소자의 검출감도	-	-	≥ 70	%	10	공인성적서	>300	공인성적 서 발급
			개별 센서소자 소비전력	24(일본/Fig aro)	40(Seju Eng)	≤ 20	mW	5	자체평가	<1	-
		콘크리트 내구수명 평가		-	-	-	항목 수	10	자체평가	-	-

○ 광반응성 센서

■ 시험품: 광반응성 MEMS 정전식 센서



그림 87. 시험품, 시험품의 시험 사진 및 철근콘크리트 시험 사진.

■ 시험 항목: 광 세기 측정 민감도, 소비전력, 검측 정확도 오차율

■ 시험 규격 및 방법

- 광 세기 측정 민감도
 - 405 nm 파장을 가지는 광을 조사하였을 때, 광센서의 정전용량을 측정함. 철근콘크리트에 가해지는 하중에 따라 광 세기 변화를 측정함. 이를 통해 민감도를 계산함.

$$\text{민감도} = 10 \times |\log(C_2/C_1)| / (F_2 - F_1) \text{ (dB/N)}$$

- 소비 전력
 - 광반응성 MEMS 정전식 센서의 경우 이론적으로 소비전력이 0이며, 실제 센서에 인가되는 전압(V_b), Osc Level(V_o) 및 등가회로에서 등가직렬저항(R_s) 및 등가병렬 저항(R_p)을 통해 소비전력을 산출함.

$$\text{등가저항}(R_e) = \text{등가직렬저항}(R_s) + \text{등가병렬저항}(R_p)$$

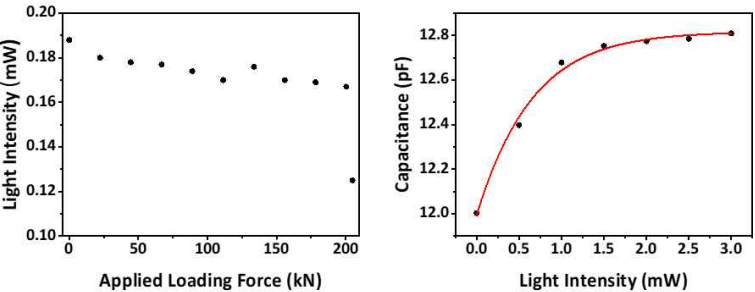
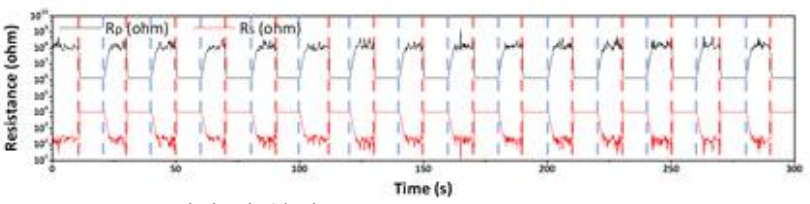
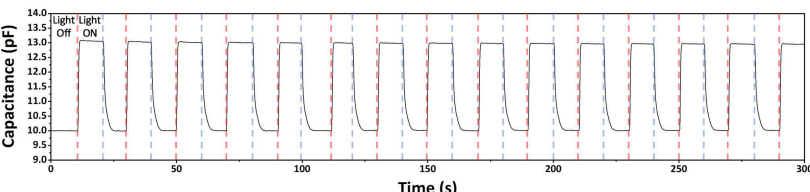
$$\text{소비전력} = V_b^2 / R_e + V_o^2 / 2R_e$$

- 검측 정확도 오차율
 - 405 nm 파장을 가지는 광을 조사하였을 때, 광센서의 정전용량 정확도 오차율을 계산함.

$$\text{오차율} = \text{표준편차} / \text{평균} \times 100$$

- 시험 장비
 - Power device probe station (MST-9000C, MS Tech)
 - Digital source multi meter (B1505A, Agilent Technologies)
 - Single wavelength LED (LFM405, CNI)

■ 시험 결과

측정 항목	측정 결과	비고
광 세기 측정 민감도	평균 2.47×10^{-6} dB/N 최대 1.51×10^{-5} dB/N	
소비 전력	222.4 pW	
검측 정확도 오차율	0.24 %	

○ 가스 센서

■ 시험품: 산화물 기반 가스센서



그림 88. 시험품의 시험 사진.

■ 시험 항목: 산화물 기반 가스센서의 성능 평가

■ 시험 규격 및 방법

• 검출 가스 반응성

- 검출 가스의 농도에 따라 센서의 저항 변화값을 측정하여 아래의 식을 이용하여 반응도를 산출함.

식(1) 가스 감응도 = 분위기 가스 90 %지점에서 저항(R_a)/감지가스 90 %지점에서 저항(R_g)

식(2) 가스 감응도(%) = (분위기 가스 90 %지점에서 저항(R_a)/감지가스 90 %지점에서 저항(R_g)) $\times 100$

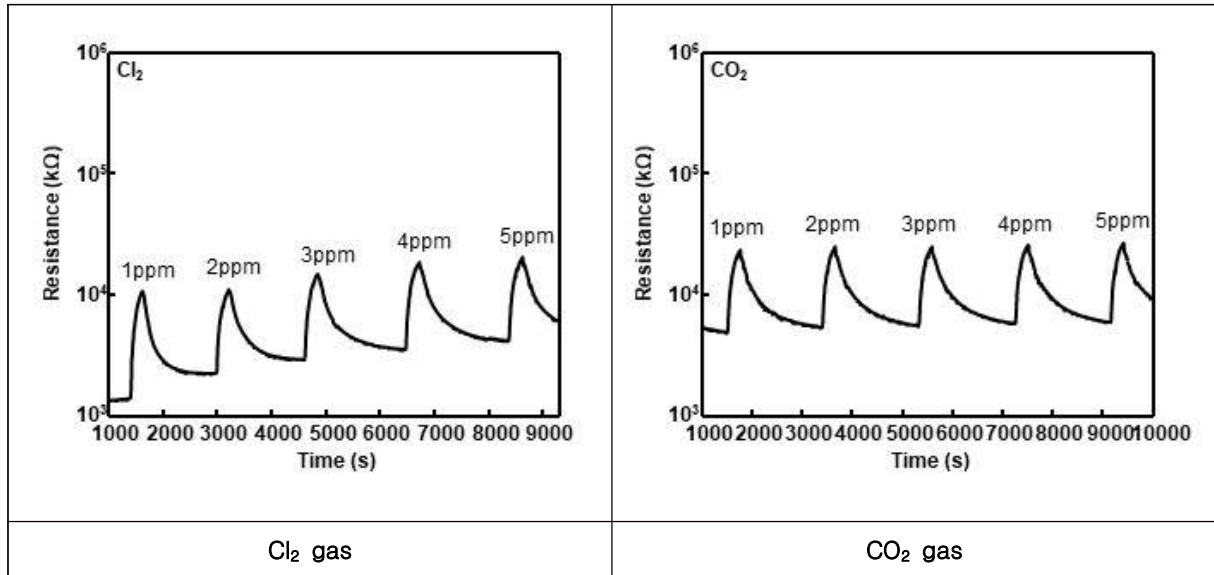
- 검출 한계

- 검출 가스 유량을 조절하여 가스 농도별 센서 반응도를 측정하고 감지한계를 산출함.
- 가스 농도: 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 ppb

- 시험 장비

- Gas sensor measurement system (GSW-3000AS-F, PHOCOS)
- Digital source multi meter (KEITHLEY 237)

■ 시험 결과



항목	농도(ppb)	감응도(%)	
		Cl_2 gas	CO_2 gas
WO_3 나노구조체	1000	630.1	362.8
	2000	662.9	397.5
	3000	898.5	397.5
	4000	1181.1	410.3
	5000	1314.6	423.7

- 감지한계: 1.52 ppb(Cl_2), 21.4 ppb(CO_2)

(3) 세부 정량적 연구개발성과

가. 과학적 성과

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Near-infrared/Visible Light Induced Spatio-temporal Electrical Switch via Independent Multi-states of Photoresponsive Nanocomposite	ACS Nano	KIM JI WON (교신저자)	-	미국	American Chemical Society	SCIE	Submitted	1936-0851	33%
2	MEMS Capacitive Photodetector via Photoresponsive Polymer	ACS sensors	KIM JI WON (교신저자)	-	미국	American Chemical Society	SCIE	In preparation	2379-3694	50%
3	Optically Activated 3D Thin-Shell TiO ₂ for Super-sensitive Chemoresistive Responses: Toward Visible Light Activation	Advanced Science	심영석 (교신저자)	-	독일	Wiley	SCIE	2020.12.03	2198-3844	20%
4	High-performance Gas Sensor Array for Indoor Air Quality Monitoring: The Role of Au Nanoparticles on WO ₃ , SnO ₂ , and NiO-based Gas Sensors	Journal of Materials Chemistry A	심영석 (교신저자)	9	영국	Royal Society of Chemistry	SCIE	2020.12.10	2050-7496	33%
5	Rationally Designed TiO ₂ Nanostructures of Continuous Nanonetworks for Fast-responding Highly Sensitive Acetone Sensor	Small Methods	심영석 (교신저자)	-	독일	Wiley	SCIE	2021.10.15	2366-9608	17%
6	Role of graphene quantum dots on metal-oxide nanodome for reversible low-temperature gas sensor	ACS sensors	심영석 (교신저자)	-	미국	American Chemical Society	SCIE	Submitted	2050-7496	100%
7	Proximity-Field Nanopatterning for High-Performance Chemical- and Mechanical Sensor Applications Based on 3D Nanostructures	Applied Physics Reviews	심영석 (교신저자)	9	미국	American Institute of Physics	SCIE	2022.03.29	1931-9401	33%
8	Volcano-like Au-decorated SnO ₂ Nanostructure Reconstructed by Laser Irradiation for High-performance Gas Sensor	Advanced Functional Materials	심영석 (교신저자)	-	독일	Wiley	SCIE	In preparation	1616-301X	50%
9	CeO ₂ -decorated WO ₃ , SnO ₂ nanodomains for high performance gas sensors	Electronic Materials Letters	심영석 (교신저자)	-	독일	Springer	SCIE	In preparation	2093-6788	100%
10	Penetration properties and injecting conditions of corrosion inhibitors for concrete	Construction & Building Materials	조형규 (교신저자)	284 (17)	영국	Elsevier	SCIE	2021.05	0950-0618	100%
11	분쇄 시멘트 및 화학 혼화제를 활용한 초고성능 모르타르 물성 평가	한국복합신소재구조학회	조형규 (교신저자)	12 (2)	대한민국	한국복합신소재구조학회지	비SCIE	2021.04	2093-5145	100%
12	EMP Shielding of Mortar Mixed with SiC and Graphite	Journal of Ceramic Processing Research	조형규 (교신저자)	-	대한민국	The Korean Association of Crystal Growth	SCIE	Accepted	1229-9162	100%
13	SiC 및 흑연 혼입 모르타르의 전자파 차폐 성능 평가	한국건축시공학회	조형규 (교신저자)	21 (5)	대한민국	한국건축시공학회	비SCIE	2021.10	1598-2033	50%
14	건축 외장 패널용 UHPC 개발	한국건축시공학회	조형규 (교신저자)	-	-	한국건축시공학회	비SCIE	In preparation	1598-2033	50%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020년도 한국재료학회 춘추계통합학술대회	Optical Mase-like TiO ₂ Nanonetworks for Efficient Photo-activated Chemiresistors at Room-Temperature	심영석, 임지산, 김찬걸, 오현진, 박수완, 이명한	2020.11.18	휘닉스 제주 섬지코지	대한민국
2	2020년도 한국재료학회 춘추계통합학술대회	Chemiresistive Gas Sensor based on Highly ordered Volcano-like Nanostructures for Diagnosis of Colorectal Cancer	김찬걸, 임지산, 오현진, 박수완, 이명한, 심영석	2020.11.19	휘닉스 제주 섬지코지	대한민국

나. 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	광반응성 복합 소재를 이용한 미세 전자 기계 시스템 기반 정전식 감응 센서 및 이의 센싱 방법	한국	연세대학교 산학협력단	2020.08.26	10-2020-0108052				100%	X
2	특허	다중 반응 광감응성 나노 복합체 필름 및 이를 이용한 생체 전기 자극 시스템	한국	연세대학교 산학협력단	2021.09.17	10-2021-0124799				50%	X
3	특허	나노복합소재의 동적 광변형에 따른 광감응성 색변환 센서	한국	연세대학교 산학협력단	2021.11.05	10-2021-0151059				100%	X
4	특허	광반응성 고분자 기반 나노복합체를 활용한 광감응성 가변 캐패시터	한국	연세대학교 산학협력단	2021.11.05	10-2021-0151072				100%	X
5	특허	튜브 형상의 나노구조체 및 이의 제조방법	한국	신라대학교 산학협력단	2021.12.29	10-2021-0190672				100%	X
6	특허	나노구조체 기반의 Cl ₂ , CO ₂ , H ₂ 감지 센서	한국	신라대학교 산학협력단	명세서 작성중	-				100%	X
7	특허	모르타르 및 콘크리트 CO ₂ 양생장치 및 양생방법	한국	한국세라믹기술원	2020.12.29	10-2020-0186158				50%	X
8	특허	전자파 차폐용 시멘트 조성물 및 그를 활용한 모르타르	한국	한국세라믹기술원	2020.12.29	10-2020-0186150				50%	X
9	특허	건축 외장 패널용 초고성능 콘크리트 배합 조성물 및 이를 이용한 건축 외장 패널의 제조 방법	한국	한국세라믹기술원	2021.12.28	10-2021-0190068				50%	X

○ 지식재산권 활용 유형

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

다. 사회적 성과

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사	2022(예정)		1				1	1				

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	언론보도	부산제일경제, 베타뉴스, CNB뉴스, 교수신문, 국제신문, 울산매일신문	신라대 심영석 교수 참여 연구팀, '1초만에 아세톤 감지' 초고속 가스센서 개발	2021.10.18.
2	언론보도	국제신문, CNB뉴스, 교수신문, 베타뉴스, 아시아경제, 부산일보, 한국대학신문, YTN사이언스, 네이버뉴스	신라대 심영석 교수 참여 연구팀, 유해가스 잡는 고성능 가스센서 어레이 개발	2021.02.10.
3	언론보도	CNB뉴스, 부산일보, 베타뉴스, 아시아경제, 국제신문	신라대 심영석 교수 참여 연구팀 빛으로 동작 가스 센서 개발	2020.12.23.
4	언론보도	CNB뉴스, 부산일보, 베타뉴스	신라대 신소재공학과 심영석교수, 첨단 센서용 고성능 감지소재 기술 및 연구방향 제시	2022.04.06.

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○ 언론보도 홍보실적 3건 및 국내 학술회의 발표 2건을 추가 달성

- '신라대 심영석 교수 참여 연구팀 빛으로 동작 가스 센서 개발'
- '신라대 심영석 교수 참여 연구팀, 유해가스 잡는 고성능 가스센서 어레이 개발'
- '신라대 심영석 교수 참여 연구팀, '1초만에 아세톤 감지' 초고속 가스센서 개발'
- 2020년도 한국재료학회 춘추계통합학술대회, 학술발표 2건

2) 목표 달성 수준

구분		1차년도 목표	2차년도 목표	계	달성치 (절대편수)	달성치 (환산편수)	남은 편수	기타	계 (목표치/달성치)
국외논문 게재	SCI	3	3	6	11 (진행중: 5)	6.36 (진행중: 3.33)	-		6/6.36 (진행중: 3.33)
	비SCI								
	계								
국내논문 게재	SCI								
	비SCI	1	1	2	3 (진행중: 1)	2 (진행중: 0.5)	-		2/2 (진행중: 0.5)
	계								
특허출원	국내	3	3	6	9 (진행중: 1)	7 (진행중: 1)	-		6/7 (진행중: 1)
	국외								
	계								
특허등록	국내		1	1	-	-	1		1/0
	국외								
	계								
인력양성	석사		3	3	1 (금년도 졸업예정)	1 (금년도 졸업예정)	-	2 (박사과정 진학)	3/3
	박사								
	계								
기술이전	계약건수								
	계약액								
	징수액								
국제 표준화	기고서 제출								
	기고서 채택								
	표준안 채택								
국내 표준화	기고서 제출								
	기고서 채택								
	표준안 채택								
등록·기 탁 대상 성과물	보고서 원문								
	연구시설·장 비								
	기술요약 정보								
	생명 자원	생명 정보							
		생물 자원							
		신품 종							
	소프트웨어								
	화학물								
기타	시제품	1	2	3	2 (진행중: 2)	2 (진행중: 2)	1		3/2
	성과 홍보			-	3	3	-		0/3
	일자리 창출								

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
[주관연구기관] 연세대학교 ○ 미세전자기계시스템(MEMS) 기반 광감응성 복합 센서 개발 및 콘크리트 매립 적용성 평가 - AzoPDMS/금속 박막 이중층 복합 소재 캔틸레버를 이용한 광반응성 MEMS 정전식 감응 센서 구축 및 성능 평가	① 광반응성 MEMS 정전식 센서 제작 당초 개발 목표였던 AzoPDMS/금속 전극 이중층 복합소재를 성공적으로 합성하였으며, 광감응 성능을 위해 각 층의 두께를 조절하여 공정을 최적화하여 충분한 높이 변화를 달성함. 또한 복합소재의 콘크리트 적용가능성을 평가하기 위하여 콘크리트 양생 조건을 기반으로 강염기, 고온, 고압 조건에서 각각 안정성 검증을 수행함. 이와 관련하여 <i>Advanced Functional Materials</i> (영향력 지수: 18.808, 상위 3.72%) 저널에서 SCI 논문 1건이 심사 중에 있음. ② 다양한 조건에 따른 MEMS 구조 최적화 AzoPDMS/금속 이중층 복합소재 기반 광반응성 MEMS 정전식 센서를 설계하고 특허 출원을 완료함(출원번호 10-2020-0108052). 설계를 바탕으로 MEMS 시제품 제작을 완료하였고 광 조사에 따라 정전용량이 반복적으로 변화하는 것을 확인함. 개발된 센서는 평균 2.47×10^{-6} dB/N, 최대 1.51×10^{-5} dB/N 의 민감도를 가지며, 222.4 pW 의 소비전력, 0.24%의 검측 정확도 오차율을 보여, 이에 대해 공인성적서를 발급 완료함. 이는 콘크리트 내에서 하중 변화에 따라 유의미한 감지를 할 수 있는 충분한 수치이며, 저소비전력의 효율적인 센서임. 이를 통해 MEMS 시제품 가공 및 평가할 수 있는 기반을 마련함. ③ 실제 콘크리트 환경에서 하중 측정 평가 고분자 광섬유를 기반으로 하는 광원을 제작하여 광섬유의 변형에 따라 변하는 신호를 확보하고, 콘크리트 내에 매립하여 하중에 따라 통과하는 광 세기가 변화하는 광섬유 기반 하중 센싱 시스템을 설계함. 이를 한국세라믹기술원과 함께 실제 콘크리트 내에 매립, 하중에 변화를 주어 콘크리트의 하중에 따라 광섬유를 통과하는 광 세기의 변화를 실현 및 수치화함. 이를 MEMS 정전식 센서에 연결하여 콘크리트의 하중을 감지 가능하게 함. 이와 관련하여 특허 3건을 출원 완료하였으며(출원번호 10-2021-0124799, 10-2021-0151059, 10-2021-0151072), <i>ACS sensors</i> (영향력 지수: 7.711, 상위 2.91%) 저널에 SCI 논문 1건 제출을 준비 중임.	90%
[공동연구기관1] ○ 철근콘크리트 구조물의 내구수명 평가를 위한 실시간 모니터링용 매립형 가스 센서 어레이 개발 - 열화인자 및 부식발생 가스 감지용 반도체식 가스 센서 어레이 개발	① 다중 단일 센서의 집적화 기술개발을 통한 반도체식 가스 센서 어레이 개발 다양한 산화물 나노구조체의 대면적화 합성 기술을 개발하여, 다중의 단일 센서에 대한 열화인자 감지 특성 평가를 수행하였으며, 열화인자 감지에 성공함. 이를 기반으로 다중 단일 센서를 8개, 9개를 집적화하여 반도체식 가스센서 어레이를 제작함. 열화인자 가스는 산화성 가스, 환원성 가스를 나눌 수 있으며, 상대적으로 인체에 덜 유해한 가스에 대하여 분별 특성을 평가함. 9개의 센서로 이루어진 가스센서 어레이는 영국왕립학회에서 출판하는 <i>Journal of Materials Chemistry A</i> (영향력 지수: 12.937, 상위 10% 이내)의 저널에 출판되었으며, 다수의 언론사에 홍보됨. ② 열화인자 및 부식발생 가스에 대한 감지특성의 최적화 다양한 형태의 나노구조체 개발을 통하여, 열화인자 및 부식가스에 대한 감지특성 평가를 수행하였으며, 목표치 보다 높은 반응성과 감지한계를 달성함. 또한, 본 사업에서 개발된 기술을 활용하여 추가적인 열원(히터) 없이 LED만으로 동작하는 저소비전력의 정렬다공성 TiO_2 나노구조체를 개발하였으며, 세계 최고 성능치를 기록하였음. 또한 본 연구결과는 소재분야 최상위분야 <i>Advanced Science</i> (I.F: 15.84)에 Accept 되었으며, 다수의 언론사에 홍보됨. ③ 가스 센서 어레이의 내장형 동작을 위한 패키징기술 개발	90%

	단일 센서를 상용화 센서에 패키징을 하였으며, 이를 매립하여 안정성평가를 수행함. 단일 센서 매립 실험 결과 콘크리트 및 물의 침투로 인하여 가스 센서 어레이 패키징의 경우, 뒷개에 소수성 코팅법을 개발하여 연구를 수행함. ④ 실험적 RC 구조물 내장환경에서 반도체식 가스 센서 어레이의 감지 성능평가 콘크리트 매립 환경 하에서의 반도체식 가스센서 어레이를 성능 평가는 반도체식 가스센서 어레이의 전극에서의 와이어 본딩에 대한 온도 문제가 발생하여 이를 해결하는 연구를 진행함. 추후, 매립 환경 하에서 특성평가를 진행할 예정임.	
[공동연구기관2] ○ 철근콘크리트용 이중 센서 콘크리트 내 매립 적용성 및 성능평가 － 광반응성 가스 복합 이중 센서를 활용한 콘크리트 진단 및 내구수명 평가	① 콘크리트관련 전문가 자문회의 및 사례분석을 통한 센서의 효율적 매립 위치 및 평가 방법 분석 콘크리트 관련 전문가 자문 및 사례분석 등을 통해서 콘크리트내 센서 매립 방법 등을 검토하고 최적의 매립 위치 등을 도출하고 평가 방법을 분석함. ② 콘크리트 내 복합 이중 센서 감지성능 평가 콘크리트 환경 하 센서 적용 가능성을 평가하기 위하여 물시멘트비별 시멘트페이스트 내 센서 소재 매립 실험뿐만 아니라 열화 환경에서의 양생을 통하여 개발된 센서를 콘크리트 내 매립 시 안정성 및 열화 인자 센싱 가능성을 평가함. 이를 통해 센서 매립을 통하여 콘크리트의 내구성을 평가할 수 있는 기반을 마련함. 콘크리트 내 센서 적용 가능성 평가를 위하여 센서 및 센서용 캐리어를 시멘트페이스트 내 물시멘트비 별, 열화환경 별 양생 후 변화를 관찰하였으며, 탄산화 양생을 위해 모르타르용 고농도 CO₂ 양생 장치를 자체 개발하여 특허 출원을 완료함(출원번호 10-2020-0186158, 10-2020-0186150). 또한 매립 실험과 관련하여 국외·국내 논문을 게재함(<i>Const. r. Build. Mater.</i> 2021, 284, 122761; 복합신소재구조학회 논문집 2021, 12, 41-49) ③ 광반응성 센서를 활용한 응력 거동 기반 콘크리트 진단 평가 광반응성 MEMS 정전식 센서 및 가스 센서 모두 페이스트 내 매립 시 오염 등으로 반드시 센서 캐리어를 활용해야 할 것으로 판단함. 이에 따라 열화 환경에 따른 센싱이 가능할 것으로 판단함. 콘크리트 부재를 제작하고 내부에 광섬유를 매립하여 하중에 따른 광섬유 세기를 센싱하여 균열 발생 시점 및 파단 시점의 광섬유 세기 데이터를 취득하고 이를 통하여 콘크리트 진단 기초 자료로 활용함. ④ 가스 센서를 활용한 열화 인자 기반 콘크리트 내구수명 평가 가스 센서 매립 실험체를 제작하고 자체 제작한 CO₂ 고농도 챔버 내에서 CO₂ 가스 주입에 따른 내부 센서의 변화를 관찰하여 CO₂에 따른 매립된 가스센서의 변화를 관찰함. 광섬유 및 가스센서를 매립하여 진단 및 열화인자 센싱 실험을 진행하였으며 관련 내용으로는 SCI 1건, 국문 2건, 특허 출원 1건을 진행함. 연구 수행 중 센서 활용 데이터 취득의 애로사항이 커 연구 진행에 어려움을 겪고 있으며 연구수행기관 이후에도 지속적으로 진행하여 연구수행을 마무리 하고자 함.	90%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 목표 미달 항목

- 정량적 성과(논문, 특허 및 시제품) 달성 현황

최종 목표: SCI 논문 6건, 비SCI 2건, 특허 출원 6건, 등록 1건, 시제품 3건

달성 현황: SCI 논문 3.03건, 비SCI 1.5건, 특허 출원 6건 완료

미달성 현황: SCI 논문 2.97건, 비SCI 0.5건, 특허 등록 1건, 시제품 3건 달성 필요

현재 진행 현황: SCI 논문 3.33건, 비SCI 0.5건, 특허 출원 1건, 특허 등록 2건 추가 진행 중

- 일부 정량적 결과 미달 (예. 매립 환경 하에서의 반도체식 가스센서 어레이의 열화인지 감지특성)

○ 목표 미달 원인(사유) 자체분석

- 본 연구과제는 철근콘크리트 구조물 진단 및 내구수명 평가를 위한 콘크리트 응력 거동/열화인자 동시 감지용 이중 센서를 개발하는 것이 목표이며, 초기 제안한 질적성과지표를 달성완료함.
- 연구기간 초반에 센서를 개발하고 후반에 철근콘크리트에 매설하여 실측 및 분석을 진행하는 프로세스로 이루어짐. 주요 연구결과가 2차년도 후반에 도출됨에 따라 일부 양적달성지표의 달성이 진행중임.
- 특허 및 논문 출판을 위한 연구내용 보강으로 인하여 지체되었으며, 자세한 원인은 아래와 같음.
- 특허 등록의 경우, 현재 1건의 미달성 건이 존재함. 출원으로부터 등록까지 3~4년의 시간이 필수적이므로 해당 과제 기간(2년) 내에 완수하기에 무리가 있음.
- 시제품의 경우, 현재 3건의 미달성 건이 존재함. TRL 4단계에 맞게 시작품 제작을 진행할 예정이며, 이에 따라 각 하중 센서 및 가스 센서의 실제 샘플을 제작 중에 있음.
- 가스센서 어레이를 제작하기 위해서는 포토리소그래피 공정이 필수적이며, 공정을 할 수 있는 기관은 국내에 3개 기관이 있음. 코로나 19로 인하여, 외부 출입이 통제되면서 연구진행에 차질이 발생함.
- 가스센서를 이용한 콘크리트 내구수명 진단용 센서 개발은 세계 최초로 시도되는 것이며, 예상치 못한 난관이 발생됨.
- 패키징을 위해서는 미세 와이어 본딩이 필수적이며, 외부기관에 의뢰를 하여 제작을 하였지만, 공정 온도 실수로 인하여 다수의 센서가 폐기됨.
- 콘크리트 매립 후, 양생하는 시간 및 가스 확산에 대한 시간이 많이 소요됨.

2) 자체 보완활동

○ 목표 미달 사항에 대한 자체 보완 활동

- 현재 SCIE 상위 저널 리뷰 중인 논문은 3건 (Adv. Funct. Mater. (IF: 18.808, 상위 4.22%), Small Methods (IF: 14.188, 상위 7.06%) 등) 2022년도 상반기 제출 예정 논문 3건 (Adv. Mater. (IF: 30.849, 상위 2.36%), ACS Sens. (IF: 7.711, 상위 6.63%), Sens. Actuators. B (IF: 7.460, 상위 3.47%) 등) 진행 중에 있음.
- 특허 등록 미달을 보완하기 위해, 1건의 특허를 추가 출원 중에 있음.
- 진행 중인 논문(Under Review 등)들이 게재 완료되면 기존에 목표로 제시하였던 SCIE급 논문 6편을 초과하여 약 6.36편을 완료할 수 있을 것으로 사료됨.
- 이외에도 기존 목표로 하지 않은 언론보도 홍보실적(3건), 국내 학술회의 발표(2건) 등을 추가 달성함.
- 각 목표 항목에 대한 자세한 만회대책 및 계획은 다음과 같음.
- 특허 등록의 경우, 현재 1건의 미달성 건이 존재함. 출원으로부터 등록까지 3~4년의 시간이 필수적이므로 해당 과제 기간(2년) 내에 완수하기 어려우며, 2022년 내에 초과 달성할 예정임.

한국세라믹기술원에서 2020년 출원한 아래 특허 2건에 대해, 2022년 등록 예정.

'모르타르 및 콘크리트 CO2 양생장치 및 양생방법',

'전자파 차폐용 시멘트 조성물 및 그를 활용한 모르타르'

-
- 특허 출원의 경우, 기존 목표를 달성하였으며, 추가로 1건을 더 진행 중에 있어 초과 달성 예정임.
신라대학교에서 아래 특허를 진행하고 있으며, 현재 명세서 작성 단계에 있음.

‘나노구조체 기반의 Cl_2 , CO_2 , H_2 감지 센서’, 22년 5월 초 출원 예정

- SCI 논문의 경우, 현재 2.97건의 미달성 건이 존재함.

연세대학교에서 아래 논문을 진행 중 또는 준비 중임.

‘Near-infrared/Visible Light Induced Spatio-temporal Electrical Switch via Independent Multi-states of Photoresponsive Nanocomposite’, *Adv. Funct. Mater.*, Submitted.

‘MEMS Capacitive Photodetector via Photoresponsive Polymer’. *ACS Sensors*, 22년 6월 제출 예정.

신라대학교에서 아래 논문을 진행 중임.

‘Volcano-like Au-decorated SnO_2 Nanostructure Reconstructed by Laser Irradiation for High-performance Gas Sensor’, *Adv. Funct. Mater.*, 22년 4월 제출 예정.

‘ CeO_2 -decorated WO_3 , SnO_2 nanodomes for high performance gas sensors’, *Electron. Mater. Lett.*, 22년 4월 제출 예정.

- 비SCI 논문의 경우, 현재 0.5건의 미달성 건이 존재함.

한국세라믹기술원에서 아래 국내 논문을 제출할 예정임.

‘건축 외장 패널용 UHPC 개발’, 한국건축시공학회, 22년 4월 제출 예정

- 시제품의 경우, 현재 3건의 미달성 건이 존재함. TRL 4단계에 적합하게 시제품 3건을 제작할 예정이며, 이에 따라 각 하중 센서 및 가스 센서의 실제 샘플을 제작 중에 있음. 특히, 신라대학교에서 단일 센서 시제품 2개(CO_2 sensor, Cl_2 sensor)를 제작 완료하였으며, 시제품 3건 모두 22년 8월 내에 제작이 완료될 것으로 보임. 아래에 제작 완료된 샘플의 사진을 함께 첨부함.

상용화 가스센서



영화인자 감지를 위한 가스센서 시제품 제작 (신라대학교)



3) 연구개발 과정의 성실성

○ 연구목표의 도전성

- 광반응성 고분자를 미세전자기계시스템(MEMS) 센서에 도입하는 것은 전세계적으로 아직 보고된 바 없으며 매우 도전적인 과제임.
- 광반응성 고분자의 패터닝을 달성하기 위해 섀도우 마스크(shadow mask) 및 스프레이 도포 공정을 제시하였으며, 구조의 최적화를 위해 외팔보(cantilever) 및 다리(bridge) 구조에 대해 수십차례 제작 및 시험을 진행함.
- 반도체식 가스센서를 활용하여 철근콘크리트 구조물 내구수명을 진단하는 것은 전 세계적으로 아직 보고된 바 없으며 매우 도전적인 과제임.
- 하나의 기관에서 소재기술, 패키징 기술, 시스템 기술, 실증연구까지 모두 수행하는 것은 상당히 도전적인 과제임.
- 직접적으로 광센서를 매립하여 콘크리트 내 크랙 유무 등의 진단을 수행하고 가스 센서를 매립하여 콘크리트 내 열화인자 측정을 통하여 내구수명을 평가한 연구는 부재하여 매우 도전적인 연구내용임.
- 콘크리트 내 Azo Film, 가스 센서, 캡슐화 센서, 광섬유 등 다양한 매립 실험을 통해서 콘크리트 환경 내 센서 적용성 등을 평가했고 또한 다양한 열화환경에서 양생을 통하여 센서 적용성을 평가함.

○ 연구개발 과정의 특수성

- 나노구조체 대면적화를 위하여, 물리적 기상증착법, 레이저 조사법, 랑뮤어 블로젯법 등, 다양한 합성 및 제조공정을 시도하여, 기존에 없는 새로운 형태의 구조 개발에 성공하였으며, 영향력 지수 10점 이상의 세계적인 저널에 다수의 논문이 출판되었으며, 다수의 언론에 보도됨.
 - 반도체식 가스센서는 포토리소그래피 공정을 기반으로 이루어지나, 코로나 19로 인한 외부인 출입금지로 인하여, 실험진행에 차질이 발생하였으나 타기관에 공동연구를 통하여 문제를 해결함.
 - 본 연구개발 사업은 종료 시, TRL 4단계를 목표로 하고 있으나, 상용화에 근접한 연구를 진행하기 위하여 우진I&S, 성화FT, 오감테크놀러지, KIST, 상명대학교, 서울대학교, 한국과학기술원 등 다수의 기관과 협업을 진행함.
 - 최초의 도전적 연구를 수행하면서, 결과를 예측 할 수 없는 부분이 존재함에 따라 센서 제작의 어려움, 콘크리트내 매립 실험 시 센서 매립 및 고정 방법, 센서 감지 불능 등의 많은 오류 및 실패를 겪으면서 어려움이 크고 많은 시간이 소요되는 애로 사항이 생김.
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ RC 구조물 진단 분야

- 콘크리트에 적용이 가능한 두 가지 형태의 센서를 활용한 콘크리트 기반 건축물의 모니터링 및 진단은 보다 신뢰도가 높은 비파괴 기법으로 활용가능하며, 초소형 저전력 장수명의 센서로 콘크리트 모니터링에 활용하기에 적합함.
- 콘크리트 내 센서 감지를 기반으로 하는 콘크리트 진단 및 내구수명 평가는 광반응성 MEMS 정전식 센서를 활용한 하중 진단 및 가스 센서를 활용한 열화인자 감지를 동시에 진행할 수 있기 때문에 복합적인 건축물의 실시간 모니터링이 가능함.
- **[RC구조물 모니터링 기술]** RC 노후 구조물이 급증하고 있는 시점에서 미국·일본 등 세계선진국 대비 국내 RC구조물의 짧은 평균수명 문제를 해결하고 장수명화를 도모함. 본 과제를 통해 비파괴적 방법을 활용한 RC구조물 내구성 평가 및 진단 기술에 기여함.
- **[RC구조물 유지관리]** 비파괴 모니터링 기술을 통한 RC구조물 진단, 내구수명 평가를 통한 보수보강 시점 제시 등을 통한 RC구조물 유지관리 기술에 기여함.
- **[신규시장 창출 및 ICT 융합 기술]** RC구조물의 능동적인 모니터링 기술을 통한 신기술 개발 기여 및 해외 건설시장 개척
- **[RC구조물 재해 예방]** RC구조물 모니터링 기술을 통한 재해예방 및 사회적 손실을 저감함.

○ 반도체 센서 개발 분야

- 반도체식 가스센서를 콘크리트 내에 깊이 별로 매립하여 열화인자 및 부식 발생 가스를 감지하여 열화인자의 침투 및 건축물의 부식 정도를 측정하고 위험을 사전에 예방하는 형태의 센서는 최초로 제안된 형태의 활용임.
- 반도체식 가스센서 개발 분야 내에서도 독보적인 반응도(12000%)와 소비전력(800 μ W), 센서의 집적 및 대면적화가 가능한 고수준의 가스 센서를 구현함.
- 광반응성 MEMS 정전식 센서는 기존 어디에서도 구현된 바 없는 새로운 형태의 센서로, 콘크리트와 같은 극한 환경에서 하중을 우회적으로 감지할 수 있도록 설계하고 최초 구현함.
- 광섬유 기반 하중 감지 시스템을 구현하고 MEMS 정전식 센서와 연결하여 순차적인 신호 변환을 통해 하중을 읽어내기에 충분한 민감도(최대 1.51×10^{-5} dB/N), 0에 가까운 소비전력(222.4 μ W) 및 낮은 정확도 오차율(0.24%)을 달성함.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

1) 연구개발성과의 활용 방안

(1) 국가/정책적 측면 : 미래 원천 기술 확보

- 현재 고령화가 된 사회기반 시설(2024년 기준 21.5%) 중 대부분이 콘크리트 시설물로 균열, 부식 등 보수비용이 증가해 국내·외적인 사회적 문제이며 시설물 유지관리의 필요성이 대두되고 있음.
- 현 정부의 국정과제 중 안전사고 예방 및 재난 안전관리의 국가책임체제 구축에서 IoT를 활용한 위험 예측, 감지, 분석 및 대응기술 개발에 초점이 맞춰져 있음.
- 건축물 열화 및 하중 융합 안전진단 센서 기반 건설구조물의 생애주기 동안에 발생하는 이력을 데이터베이스화 가능.
- 정부는 ‘첨단 스마트 센서 육성사업’에 2015년부터 6년간 1,508억 원을 투자할 계획이며, 2020년 기준 42억 달러 생산과 21억 달러 수출을 달성할 것을 목표로 설정하였으며, 국내 지능형 전자 소재/센서 소자 산업에서 고급제품은 일본, 미국 등의 선진기업에서 전량수입하고 저가의 부품은 중국에서 수입하고 있는 실정이므로 현존하는 소자의 성능향상이 아닌, 미래를 위한 새로운 개념의 원천소재 경쟁력 확보 가능.

(2) 산업/기술적 측면

- 스마트시티 5대 중점 분야별 기술 중 하나인 스마트빌딩, 빌딩 내 주요 설비 및 위치의 상황을 실시간으로 모니터링하여 빌딩 에너지 관리 시스템(Building Energy Management System, BEMS) 향상에 기여.
- 건물 열화 및 하중 변화를 동시에 모니터링할 수 있는 초소형 저전력 스마트 융합 센서를 개발함으로써 스마트빌딩 센서 허브로의 역할을 기대.
- 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT) 등이 융합된 스마트팩토리 내 공정 부품 간 상호 미세압력 정보 교환을 통한 안전 진단과 더 나아가 빅데이터 분석으로 사고를 예측하는 자동화 생산 시스템의 안정화에 기여.
- 미래 핵심 산업인 사물인터넷 분야의 핵심요소인 센서를 나노물질질을 기반으로 하여 초소형, 고집적화, 복합다기능화, 고성능화함으로써 우리나라의 차세대 성장 동력 산업에 적극 활용하여 미래 원천기술 확보 및 국가 경쟁력 향상에 기여할 원천소재 기술로 활용 가능.

(3) 환경/경제적 측면

- 광섬유 기반 하중 센서는 기존 구축된 광섬유 인프라를 활용하여 측정 가능하여, 자원의 낭비를 최소화할 수 있음.
- 차세대 고효율 3D 융합 안전진단 센서는 철근콘크리트의 노후화에 따른 열화와 동시에 하중의 불균형을 저전력으로 진단할 수 있어 에너지 효율화에 적극적으로 기여.
- 다양한 건물 센서 융합 및 정보 종합을 통해 안전 점검 및 정밀 안전진단의 시장 구축이 가능함.
- 고성능 가스 센서 어레이 제작 기술은 식품산업, 대기 환경오염 감지 센서, 군사용 생화학무기 감지키트로도 응용이 가능할 것으로 기대되며, 대기 환경 센서 및 센서 모듈, USN 송수신 단일 칩 및 일체화 모듈, 환경이식형 대기환경 모니터링 단말기 및 게이트웨이, 이로 인해 파생 가능한 각종 모바일 부가 서비스 어플리케이션 등 S/W를 비롯한 여러 분야로의 활용이 가능함.

(4) 미래 원천 기술 확보

- 기존 광섬유 내 빛 특성을 분석하는 기술에서 정보 측정방법에 있어 새로운 패러다임을 제시, 나아가 스마트리빙을 위한 센서 소재로 활용 가능성이 무한함.
- 현재 국내의 원천기술 부족으로 저가형 센서들이 시장이 중심이며, 차세대 IoT를 이끌어 나가기 위해서는 첨단센서 기술에 활용 가능함.
- 사물인터넷 환경에서 정보의 획득과 생성을 담당하는 중요한 요소인 센서 소재 분야 개발을 통해 스마트빌딩의 선두주자로 발돋움.

(5) 활용분야 및 활용방안

- 구조물 안전에 대한 관심이 향상되고 있어 타산업의 혁신과 생산성을 제고하고 기후변화, 재난 사고 등의 복잡해지는 사회 현안이슈를 해결할 수 있는 미래기술 확보 가능.
- 한국시설안전공단은 구조물 성능개선 및 시설물의 안전사고 예방을 위하여 지속적으로 발전하고 있으며, 기후 변화와 시설물 고령화에 대비한 성능개선 및 안전관리 기능 강화와 관련 본 연구에서 제안하는 콘크리트 구조물 열화를 실시간으로 감지 가능한 센서 소자와 연계하여 안전 확보에 정확한 정보 제공 가능.
- 본 연구에서 제안하는 비파괴 콘크리트 구조물 열화 감지를 위한 센서 소자를 콘크리트 구조물 내외부에 설치하여 실시간으로 검사하여 건축 구조물의 이상 여부를 파악해 대응할 수 있는 Test-bed 시스템을 도입하고, 건축물 안전 및 유지관리 기술의 실증 연구에 활용될 계획임.
- 또한, 센서 소자 제작을 하는 기관과 MOU 체결 및 워크숍을 통해 연구기술 교류를 진행하여, 본 연구 개발 후 발생하는 결과물에 대하여 시제품 생산 및 사업화를 진행할 계획임.



국민안전과 행복한 사회 구현

2) 연구개발성과의 기대 효과

○ 기술적 측면

건설구조물용 저전력·초소형 물리화학적 이중 센서 개발을 통한 기술력 선도	· 광섬유 내 빛 특성을 분석하는 기술에서 정보 측정방법에 있어 새로운 패러다임을 제시 · 콘크리트 <u>열화인자 및 응력 측정을 통한 콘크리트 구조물 진단 기술 확보</u> · 다양한 형태의 나노구조체 제조기술 개발에 따른 소재 적용범위 확대 및 복합소재 집적화기술 개발로 반도체와의 융합기술 도출 가능성 향상 · 대면적화 공정을 도입에 따라 나노물질 <u>제조공정의 시간단축, 공간 활용성 극대화 및 저가 대량 생산화</u> · 나노물질의 선택적 성막을 통한 복합다기능화와 같은 신공정기술의 확산 · 전자부품산업의 기술집약성 향상 · 신소재, 전기전자, 기계, 건축, 식품, 생명공학 등 다양한 분야에 소재합성 및 공정기술의 파급효과 증가
세계최고의 내구성 센싱 및 모니터링을 통한 기술력 선도	· 건축물 모니터링 시스템 수준 이상의 <u>내구성 센싱과 모니터링 수준 향상</u> · 실시간으로 구조물의 열화를 평가할 수 있는 새로운 기술 분야 개척 · 특허 및 Pilot 시험 등을 통한 세계 최고수준 기술력 확보
건설분야를 뛰어넘는 첨단 신소재 및 신기술 기반 다학제간 융합 연구 주도	· ICT, Asset Management 등 건축·토목 분야의 한계를 극복한 연구를 통하여 건설 기반 신학문 분야의 창조적 원천·응용 연구 선점 · 건설분야 전반에 걸쳐 신기술 뿐 아니라 새로운 고부가가치 기술 혁신 유도

○ 경제적·산업적 측면

구조물 진단/내구수명 평가를 통한 유지관리 시장 활성화 및 해외 건설시장 진출 교두보	· 개발기술의 기업 기술이전 및 사업화를 통한 국내 건설분야 시장 활성화 · 기술이전 및 사업화를 통한 건설구조물용 센서 산업 첨단화 · 국가 건설분야 창조경제의 거점으로서 해외 건설시장 진출 교두보 확보
제안기술 실용화를 통한 창조경제의 신성장동력 창출	· ICT 모니터링, 센서 업데이트, Library Packing과 같은 새로운 수익구조 창조 · 기업의 고부가가치화, 관련 시장구조 개선, 건설분야의 수익 개선 등의 가치 선순환 구조 창출
센서 소재 산업 및 건설 구조물 진단/내구수명 평가 기술 첨단 기술력 선도	· 실시간으로 건설구조물의 열화 및 하중을 측정하여 데이터베이스화 가능 · 스마트팩토리 내 안전 진단과 빅데이터 분석으로 자동화 생산 시스템의 안정화에 기여 및 <u>안전 점검/진단 시장 구축</u>(부실 안전 진단 손실, 연 130억) · 소재수입, 가공 후 재수출 구조의 소재 의존도 완화 · 사물인터넷으로 대표되는 미래사회 인프라 구축 사업을 선점할 수 있는 기회를 높여 고부가가치 산업 육성 가능 · 원천소재 기술 확보를 바탕으로 기존의 신호처리기술을 접목하여 정보사회시스템을 위한 인프라 구축 사업에 선도적 위치 선점가능성 확대 · 신공정 기술개발에 따른 생산공정의 간소화로 획기적 원가절감 가능

○ 사회적 측면

건축구조물 보수·보강 사회적 비용 절감 및 안전성 확보	· <u>건축물 모니터링 시스템의 구축</u> 및 건축물의 안전 관리 예방 · 건축구조물 관리 시스템 첨단화 및 보수보강 비용 절감 · 저전력 초소형 센서 개발을 통한 <u>에너지 절감 및 안전성 향상</u>
--------------------------------	--

7. 참고 문헌

1. Korposh, S., James, S. W., Lee, S. W., & Tatam, R. P. (2019). Tapered optical fibre sensors: Current trends and future perspectives. *Sensors*, 19(10), 2294.
2. Luo, D., Ibrahim, Z., Ma, J., Ismail, Z., & Iseley, D. T. (2016). Tapered polymer fiber sensors for reinforced concrete beam vibration detection. *Sensors*, 16(12), 2149.
3. Luo, D., Yue, Y., Li, P., Ma, J., Ling Zhang, L., Ibrahim, Z., & Ismail, Z. (2016). Concrete beam crack detection using tapered polymer optical fiber sensors. *Measurement*, 88, 96–103.
4. Kim, Y. J., & Matsunaga, Y. T. (2017). Thermo-responsive polymers and their application as smart biomaterials. *Journal of Materials Chemistry B*, 5(23), 4307–4321.
5. Huang, W., Koric, S., Yu, X., Hsia, K. J., & Li, X. (2014). Precision structural engineering of self-rolled-up 3D nanomembranes guided by transient quasi-static FEM modeling. *Nano letters*, 14(11), 6293–6297.
6. Zhao, Y., & Ansari, F. (2001). Quasi-distributed fiber-optic strain sensor: principle and experiment. *Applied optics*, 40(19), 3176–3181.
7. Ansari, F. (2009). Structural health monitoring with fiber optic sensors. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4(2), 103–110.
8. Chew, S. P., Zulkifli, A. Z., Hamad, H., Harun, S. W., Lee, L. Y., Razak, H. A., & Adikan, F. M. (2018). Singlemode-multimode-singlemode fiber structure as compressive strain sensor on a reinforced concrete beam. *Optik*, 154, 705–710.
9. Walewyns, T., Spirito, D., & Francis, L. A. (2014). A Tunable Palladium-Based Capacitive MEMS Hydrogen Sensor Performing High Dynamics, High Selectivity and Ultra-Low Power Sensing. *Procedia Engineering*, 87, 268–271.
10. Yamazaki, H., Hayashi, Y., Masunishi, K., Ono, D., & Ikehashi, T. (2018). High sensitivity MEMS capacitive hydrogen sensor with inverted T-shaped electrode and ring-shaped palladium alloy for fast response and low power consumption. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 28(9), 094001.
11. Van Rethy, J., & Gielen, G. (2013, November). An energy-efficient capacitance-controlled oscillator-based sensor interface for MEMS sensors. In *2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)* (pp. 405–408). IEEE.
12. Timoshenko, S. (1925). Analysis of bi-metal thermostats. *Josa*, 11(3), 233–255.
13. Priimägi, A. (2009). Polymer-azobenzene complexes: from supramolecular concepts to efficient photoresponsive polymers.
14. Liu, X. M., Jin, X. Y., Zhang, Z. X., Wang, J., & Bai, F. Q. (2018). Theoretical study on the reaction mechanism of the thermal cis-trans isomerization of fluorine-substituted azobenzene derivatives. *RSC advances*, 8(21), 11580–11588.
15. Zhang, L., Liu, Y., Everall, L., Williams, J. A. R., & Bennion, I. (1999). Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel applications as fiber-optic load sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 5(5), 1373–1378.
16. Kiddy, J. S., Baldwin, C. S., Salter, T., & Chen, P. C. (2002, July). Structural load monitoring of the RV Triton using fiber optic sensors. In *Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies* (Vol. 4698, pp. 462–472). *International Society for Optics and Photonics*.
17. Takeda, N., & Kosaka, T. (1997, June). Application of modal domain distributed fiber optic sensors to smart materials and structures. In *Smart Structures and Materials 1997: Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 3041, pp. 635–643). *International Society for Optics and Photonics*.

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

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.