

최종보고서(일반과제용)							보안등급						
							일반[✓], 보안[]						
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업						
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)						
공고번호	공고-제05호			연구개발과제번호		20CTAP-C157794-01							
국가과학기술 표준분류	EI0406	50%	EG0701	30%	EI0405	20%							
연구주제	(대분류) 고부가가치 건설기술 창출		(중분류) 신개념 건축·구조물		(소분류) 프리폼 건축·구조물 ▷ 모듈러 건축·구조물								
연구개발과제명	국문	감마선 조사 기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 및 이를 활용한 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 개발											
	영문	Fabrication of Modified Plastic Aggregates Using Gamma Irradiation Technology and Development of 40MPa-Grade High Strength-Lightweight Cement Composite Using Modified Plastic Aggregates											
주관연구개발기관	기관명	금오공과대학교 산학협력단			사업자등록번호	513-82-07067							
	주소	(39177) 경북 구미시 대학로 61			법인등록번호	176071-0002155							
연구책임자	성명	김우석			직위	부교수							
	연락처	직장전화	054-478-7591			휴대전화	010-5187-1626						
		전자우편	kimw@kumoh.ac.kr			국가연구자번호	10123578						
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)											
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (0년 9개월)											
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년 0개월)											
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 자립자금 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	-		
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고							
						역할	기관유형						
	공동연구개발기관	한국건설생활환경시험연구원	강용학	책임연구원	010-3566-9556	yhkang@kcl.re.kr	공동	기타					
	위탁연구개발기관												
연구개발기관 외 기관													
연구개발담당자 실무담당자	성명	이현석			직위	공학박사							
	연락처	직장전화	054-478-7591			휴대전화	010-9405-9341						
		전자우편	lhs@kumoh.ac.kr			국가연구자번호	11387521						

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

2022년 03월 18일

연구책임자 :

김 우 석



주관연구개발기관의 장 : 금오공과대학교 산학협력단 허 장 복



공동연구개발기관의 장 : 한국건설생활환경시험연구원 조 영 태



국토교통과학기술진흥원장 귀하

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

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		20CTAP-C157794-01			
내역사업명		국토교통기술혁신연구							
국가과학기술표준분류		EI0406	50%	EG0701		30%	EI0405	20%	
연구주제		(대분류) 고부가가치 건설기술 창출		(중분류) 신개념 건축·구조물		(소분류) 프리폼 건축·구조물 ▷ 모듈러 건축·구조물			
연구개발과제명		감마선 조사 기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 및 이를 활용한 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 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(2) 종료시점 목표(4)			
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [✓]							
연구개발과제 특성		기반연구							
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		본 연구는 4차 산업혁명 기술의 흐름에 맞추어 기술 영역간 융합을 도입한 스마트 건설 재료 기술로써 건설 자동화의 필수 요소인 모듈러/프리폼/프리캐스트 구조 부재 등의 제작에 필요한 「 고성능 플라스틱 경량 골재 및 고강도 경량 시멘트 복합체 개발 」을 최종 목표로 함.						
	전체 내용		[핵심기술 1] 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 기술 · 플라스틱 골재 성능 개선을 위한 감마선 영향에 따른 최적 표면개질 기법 도출 · 플라스틱 골재 성능 개선을 위한 최적 가공형상(pellet형, 비정형 등) 조건 도출 · 개질 플라스틱 골재 성능평가 및 평가 기법 도출 [핵심기술 2] 개질 플라스틱 골재 활용 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 개발 기술 · 시멘트 복합체 경량화를 위한 개질 플라스틱 골재 최적 치환율 도출 · 개질 플라스틱 골재 활용 고강도 경량 시멘트 복합체 (압축강도 40MPa, 단위용적 중량 1.7 t/m³) 개발 · 고강도 경량 시멘트 복합체 성능평가 및 성능 향상 기술 개발						
	1년차	목표	계면 부착력이 향상된 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 기술 개발						
		내용	1. 감마선 조사 플라스틱 골재 관련 선행연구 사례조사 · 경량골재, 플라스틱 골재 및 감마선 조사 플라스틱 골재 관련 선행연구 사례를 조 사함 2. 감마선 조사 플라스틱 성능개선 메커니즘 분석 · 감마선 조사 시 플라스틱의 물리·화학적 변화와 관련된 문헌 수집 및 분석을 수행함 · 감마선 조사 시 시멘트 페이스트와 플라스틱 골재 간 계면 부착성능 개선과 관련된 문헌 수집 및 분석을 수행함 3. 감마선 조사선량에 따른 최적 표면개질 기법 도출 · 감마선 조사선량을 변수로 감마선 조사 후 플라스틱 골재의 표면 구조 및 형상, 화학적 특성을 비교·분석하여 최적 표면개질 기법을 도출함 - 플라스틱 골재의 표면 구조 및 형상 분석 [표면조도 측정, SEM] - 플라스틱 골재의 단위용적 중량 및 흡수율 평가 [결정화도 특성 분석(XRD)] - 플라스틱 골재의 화학적 특성 평가 (FT-IR/ATR), 내열특성 변화 분석(TG/DTA) 4. 플라스틱 종류 및 가공형상에 따른 골재 기초물성 평가 · 플라스틱 가공형상(Pellet형 및 비정형) 및 플라스틱 종류별 기초물성 평가 결과를 토대로 최적 골재 조건을 도출함 - 단위용적 중량 및 흡수율 평가 - 건설재료용 최적 플라스틱 종류 및 골재 형상 선정						
			2년차	목표	개질 플라스틱 골재 활용 고강도 경량 시멘트 복합체 개발				
				내용	1. 감마선 활용에 따른 환경영향 및 안전 관련 문헌조사 · 감마선 조사 시 발생하는 환경영향 및 안전 관련 문헌 조사·분석 2. 시멘트 복합체 경량화를 위한 개질 플라스틱 골재 최적 치환율 도출				

			• 플라스틱 골재 치환율에 따른 경량화 특성 분석 (단위용적 중량 2.3t/m³ → 1.7t/m³) • 바인더 구성재료 및 물-바인더비에 따른 강도 대비 단위용적 중량 관계 분석 3. 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체 제조 시 품질확보 기술 도출 • 품질확보를 위해 혼화제 활용 시멘트 복합체 제조 시 경량 골재 재료분리 방지 기술 도출 - 플라스틱 골재 입도 및 치환율에 따른 시멘트 복합체 플로우 실험을 통해 골재 재료분리 저항성 분석 - 재료분리 저항성 최소화 골재 조건 도출 - 플라스틱 원료의 대량수급 및 품질관리 방안 검토 - 폐콘크리트 플라스틱 골재 재활용 방안 검토 4. 개질 플라스틱 골재 활용 압축강도 40MPa급 경량 시멘트 복합체 개발 • 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체 제조를 위한 최적 배합비 도출 • 감마선 영향에 따른 시멘트 복합체의 기계적 성능평가 - 압축강도 및 휨강도 평가 • 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체의 건설자재 적용을 위한 경제성평가 • 구조해석 Tool을 활용한 시멘트 복합체의 크리프에 대한 영향 검토 5. 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체의 내화성능 확보 기술 도출 • 최종 도출된 시멘트 복합체 최적 배합에 대한 내화성능 평가(냉간 내화실험: 압축강도 및 휨강도, 미세구조 변화 SEM 분석) 및 가스 유해성 평가 - 천연골재 시멘트 복합체 대비 플라스틱 골재 시멘트 복합체의 내화성능 개선 여부를 검토하기 위해 기존 콘크리트 내화실험과 동일한 승온온도, 가열온도 조건을 설정하여 내화성능 평가 후 강도 저감률 20% 개선 여부 검토 - 가스 유해성 평가(KS F 2271) 실시											
연구개발성과			본 연구는 기반 연구로서 기술적 성과물과 정량적 성과물은 다음과 같음. 1. 정성적 성과물 • 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 개발 • 개질 플라스틱 골재 활용 40MPa 경량 시멘트 복합체 개발 • 물성평가 공인 시험성적서 2. 정량적 성과물 (목표치/달성치) • 논문: SCIE (2편/2편) 달성, KCI (2편/2편) 달성 • 지적재산권: 특허출원 (2건/4건) 초과달성, 특허등록 (1건/2건) 초과달성											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			[활용방안] 본 연구 목표인 고강도 경량 시멘트 복합체는 모듈러 및 프리캐스트 구조부재에 적용할 수 있는 고성능 건설재료로, 이를 활용하여 건설 생산성 향상과 건설 자동화 구현이 가능하도록 경량 모듈러 부재 및 경량 프리캐스트 구조 부재에 적용할 계획임 [기대효과] 감마선 기술을 건설재료 기술에 적용한 신개념 원천기술로 본 기술을 활용함으로써 1) 기술적 측면에서 건설 시장에서 요구되는 생산성을 크게 향상시킬 수 있고, 2) 경제·산업적 측면에서 우수한 품질의 경량 모듈러/구조 부재의 대량 생산이 가능해 짐으로써 관련 건설시장의 일자리 창출과 함께 건설 자동화 시장의 경쟁력 확보가 기대되며, 3) 사회적 측면에서 최근 가속화 되는 4차 산업혁명 관련 사업들과의 융합을 통해 더욱 정밀하고 안전성 있는 건설 환경을 조성함으로써 쾌적한 생활환경을 구성할 수 있음											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유			해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수			논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화학물	신품종	
			Y	Y	N	N	N	N	N	N	생명 정보	생물 자원	N	정보
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황			구입기관	연구시설·장비명		규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호		
국문핵심어 (5개 이내)			플라스틱 경량 골재		감마선 조사기술		경량 시멘트 복합체		골재 표면개질		가교결합			
영문핵심어 (5개 이내)			Plastic lightweight aggregate		Gamma irradiation technology		Lightweight cement composite		Aggregate surface modification		Cross-linked bond			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	03
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	94
4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	103
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	104
6. 참고 문헌	105

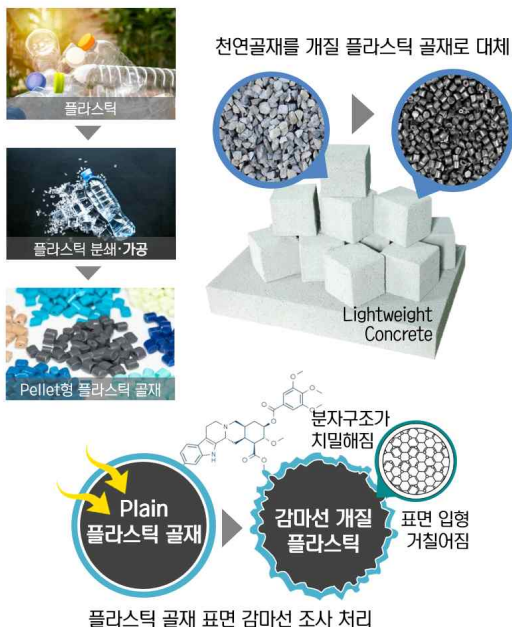
별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

구 분	내 용	
최종 목표	본 연구는 4차 산업혁명 기술의 흐름에 맞추어 기술 영역간 융합을 도입한 스마트 건설 재료 기술로써 건설 자동화의 필수 요소인 모듈러/프리폼/프리캐스트 구조 부재 등의 제작에 필요한 「고성능 플라스틱 경량 골재 및 고강도 경량 시멘트 복합체 개발」을 최종 목표로 함.	
연차 목표	1차 연도	계면 부착력이 향상된 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 기술 개발
	2차 연도	개질 플라스틱 골재 활용 고강도 경량 시멘트 복합체 개발
세부 목표	주관 금오공대	개질 플라스틱 골재 제조 및 고강도 경량 시멘트 복합체 개발
	공동 KCL	개질 플라스틱 골재 및 시멘트 복합체 성능 평가 기술 개발
주요 연구 내용	① 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 기술	
	[핵심기술 1]	• 문헌조사 및 메커니즘 정립 • 플라스틱 골재 성능 개선을 위한 감마선 영향에 따른 최적 표면개질 기법 도출 • 플라스틱 골재 성능 개선을 위한 최적 골재 조건 도출
	② 개질 플라스틱 골재 활용 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 개발 기술	
	[핵심기술 2]	• 감마선 활용에 따른 환경영향 및 안전 관련 문헌 조사 • 시멘트 복합체 경량화를 위한 개질 플라스틱 골재 최적 치환율 도출 • 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체 제조 시 경량골재 재료분리 방지 기술 도출 • 개질 플라스틱 골재 활용 압축강도 40MPa급 경량 시멘트 복합체 개발 (압축강도 40MPa, 단위용적 중량 1.7 t/m³) • 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체의 내화성능 확보 기술 도출

● 감마선융합기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 기술



● 개질 플라스틱 골재 활용 고성능 경량 시멘트 복합체 기술 개발



2) 연구개발과제의 연차별 목표

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	감마선 조사 플라스틱 소재 분석	• 문헌조사 결과 제시 • 감마선 조사 메커니즘 분석결과 제시	• 일부 플라스틱 종류에 대하여 제한적으로 분석됨.	• 1건	• 감마선 조사 플라스틱 골재 활용 및 개선 메커니즘의 합리성	3
				• 1건		5
	플라스틱 골재 표면 개질 기법 도출	• 표면구조 및 형상 변형 분석 결과 제시 • 플라스틱 물성 개선 기술 민감도 분석 결과 제시 • 골재 흡수율 $\pm 5\%$ 이내 • 골재 단위용적 중량 $\pm 5\%$ 이내	• 일부 플라스틱 종류에 대하여 표면구조 분석 수준으로만 진행됨.	• 1건	• 플라스틱 골재 표면 개질 분석을 통해 시멘트 복합체용 골재 기초물성 달성 여부	5
				• 1건		3
				• $\pm 5\%$ 이내		10
2년차 (2021)	감마선 조사 플라스틱 소재 분석	• 환경영향 및 안전성 평가 결과 제시	• 감마선 조사 플라스틱 소재에 대한 환경영향 및 안전성 평가 사례 없음.	• 1건	• 감마선 활용에 따른 환경영향 및 안전성에 대한 대응 방안의 합리성	2
				• 1건		2
	시멘트 복합체 경량화 기술 도출	• 시멘트 복합체 단위 용적중량 $1.7t/m^3$ 이하 • 경량화에 따른 강도 특성 분석 결과 제시	• 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 대상 경량화 기술개발 사례 없음.	• $1.7t/m^3$ 이하	• 최적 치환율에 따른 단위 용적중량 $1.7t/m^3$ 달성여부	15
				• 1건		10
	재료분리 방지기술 도출	• 재료분리 저항성 평가 결과 제시	• 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 대상 재료분리 저항성 관련 사례 없음.	• 1건	• 플라스틱 골재 치환율에 따른 시멘트 복합체 플로우 실험을 통한 재료분리 저항성 확보여부	2
				• 1건		2
	고강도 경량 시멘트 복합체 기술 개발	• 최적배합(안) 도출 • 압축강도 40MPa 이상 • 휨강도 10% 증가 • 경제성 평가 결과 제시 • 장기내구성 평가 결과 제시	• 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 대상 기술개발 사례 없음.	• 1건	• 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체의 압축 및 휨강도 목표성능 달성 여부 • 지속가능한 건설자재로서 활용성	5
				• 40MPa 이상		19
				• 10% 증가		3
				• 1건		2
				• 1건		3
	내화성 확보 기술 도출	• 가열 후 강도 저감률 20% 개선	• 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 대상 내화성 평가 사례 없음.	• 20% 개선	• 기존 플라스틱 골재 시멘트 복합체 대비 강도 저감률 개선 여부	3

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. 연구목표

■ 연구목표	계면 부착력이 향상된 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 기술 개발	
■ 연차별 연구목표	1차년도	1 플라스틱 골재 성능개선을 위한 감마선 영향에 따른 최적 표면개질 기법 도출 2 플라스틱 골재 성능개선을 위한 최적 골재 조건 도출 3 개질 플라스틱 골재 성능평가 및 평가 기법 도출
	2차년도	4 시멘트 복합체 경량화를 위한 개질 플라스틱 골재 최적 치환율 도출 5 개질 플라스틱 골재 활용 고강도 경량 시멘트 복합체 개발 6 고강도 경량 시멘트 복합체 성능평가 및 성능 향상 기술 개발

나. 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계

(가) 연구개발 추진전략·방법

- ☐ **모듈러 건설 무인·자동화 구현을 위한 스마트 건설재료 기술을 통해 글로벌 건설시장 선도**
 - 세계 건설시장 선도 및 최고 수준의 스마트 건설재료 원천기술 확보를 위한 전략 수립
 - 첨단 건설재료시장에서 요구하는 건설자동화를 구현하기 위해 감마선 기술과 건설산업의 융합기술을 중심으로 초경량·고성능 건설재료 개발을 위한 전략적 추진
- ☐ **기존 국내외 관련 선행연구 심층 분석을 통한 중복성 회피 및 전문성 강화 전략 수립**
 - 기존 국내외 관련 연구결과(시방, 지침, 보고서 등)를 대상으로 연계성 분석 및 검토
 - 본 연구 내용의 중요도를 고려하여 추진체계와 전략을 수립하고 기관별 연구역량 분석
 - 타 기술분야와 연계하여 기술교류 및 협업체계 구축
 - 공인시험연구기관을 통해 성능평가를 수행하고 성능 만족여부 검증과 피드백을 통한 전문성 강화
 - ※ 핵심 요소기술 도출단계에서부터 지적재산권 우선확보
 - ※ 본 연구 성과의 철저한 검증 및 관리
- ☐ **관련 정부부처와의 연계 전략 구축**
 - 국토교통부, 과학기술정보통신부 및 산업통상자원부에서 추진 중인 첨단 건설재료 연구개발 사업맞춤형 초경량·고성능 건설재료 활용방안 모색
- ☐ **국내 전문가 확보 및 우수 연구인프라 적극 활용 추진**
 - 한국건설기술연구원 등 정부출연 연구기관을 비롯한 한국건설생활환경시험연구원, 한국화학융합시험연구원 등 공인시험연구기관이 보유한 시험 연구장비 인프라 활용 적극 추진
 - 특히, 본 연구개발의 공동연구기관인 한국건설생활환경시험연구원은 국내 최고 수준의 시험 인프라와 다양한 분야(건설, 에너지, 환경, 바이오, 융합기술 등)의 특허 및 기술이전 실적을 보유함
 - 산·학·연의 건설분야 전문가를 비롯해 화학·방사선 분야 관련 전문가로 구성된 자문단을 구성하여 기술 자문회의를 통한 다학제간 융합기술개발의 방향성을 설정하고 기술적 완성도 향상
- ☐ **국외 선진기술 보유 기관과의 협력체계 구축**
 - 세계 최고 수준의 해외 전문 연구기관(대학, 연구소 등)과의 협력체계 추진
 - 향후 국제공동연구를 추진하여 해당 분야의 전문기관 방문 및 국외 전문가 자문을 통한 국제네트워크 구축
- ☐ **관련 연구 및 기술정보 수집**
 - 국제 표준 및 선진 각국의 인증기준을 중심으로 본 연구와 관련된 규정 비교·분석 실시
 - 기술세미나·학회 참여 및 인터넷매체 등을 통한 관련 분야 국내외 최신 연구 동향 수집과 전문 서적 및 논문 확보를 통한 정보 수집

(나) 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참여 연구원
(총괄) 과제명	감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 및 이를 활용한 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 개발	주관연구책임자 (김우석)외 총 8명

기관별 참여 현황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업		
중견기업		
중소기업		
대 학	1	6
국공립(연)		
출 연 (연)		
기 타	1	3

[주관연구기관]	
금오공과대학교 산학협력단	
개질 플라스틱 골재 제조 및 고강도 경량 시멘트 복합체 개발	
주관연구책임자 (김우석)외 5명	
담당기술개발내용	
감마선 조사 개질 플라스틱 골재 제조 및 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 개발	
• 플라스틱 골재 성능개선을 위한 감마선 영향에 따른 최적 표면개질 기법 도출 • 플라스틱 골재 성능개선을 위한 최적 가공형상(pellet형, 비정형 등) 조건 도출 • 시멘트 복합체 경량화를 위한 개질 플라스틱 골재 최적 치환율 도출 • 개질 플라스틱 골재 활용 고강도 경량 시멘트 복합체 개발	

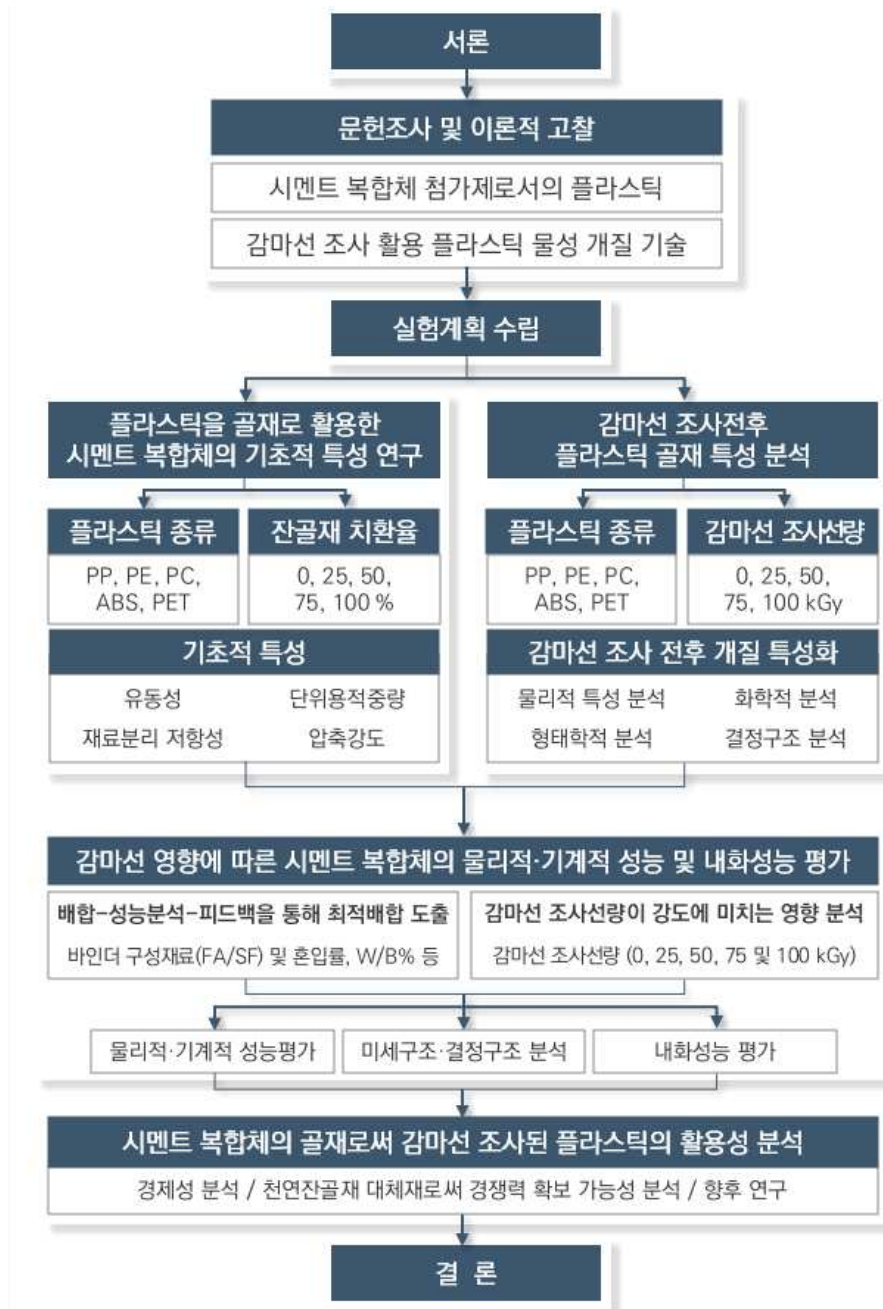
[공동연구기관]	
한국건설생활환경시험연구원	
개질 플라스틱 골재 및 시멘트 복합체 성능 평가 기술 개발	
공동연구책임자 (강용학)외 2명	
담당기술개발내용	
감마선 조사 플라스틱 골재 성능평가 및 성능개선을 위한 요소기술 개발	
• 개질 플라스틱 골재 성능 평가 및 평가 기법 도출 • 고강도 경량 시멘트 복합체 성능 평가 및 성능 향상 기술 개발	

(다) 추진일정

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	감마선 조사 시 발생하는 환경영향 및 안전 관련 문헌 조사분석													8,400	김우석 (금오공과 대학교 산학협력단) /강용학 (한국건설생 활환경시험 연구원)
2	플라스틱 골재 치환율에 따른 경량화 특성 분석													33,600	
3	바인더 구성재료 및 물-바인더비에 따른 강도 대비 단위용적 중량 관계 분석													42,000	
4	품질확보를 위해 혼화제 활용 시멘트 복합체 제조 시 경량 골재 재료분리 방지 기술 도출													8,400	
5	개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체의 최적 배합비 도출													21,000	
6	감마선 영향에 따른 기계적 성능평가													63,000	
7	건설자재 적용을 위한 경제성평가													8,400	
8	크리프에 따른 장기내구성 검토													12,600	
9	플라스틱 골재 시멘트 복합체의 내화성능 평가													12,600	

다. 연구개발과제 수행 과정 및 내용

□ 본 연구개발 과제는 다음과 같은 절차를 통해 수행되었음.



1 문헌조사 및 핵심개념의 메커니즘 정립

(가) 선행 연구 조사

① 경량골재 활용 경량 콘크리트 관련 선행연구

- 경량 콘크리트 제조를 위해 경량골재와 관련된 다양한 기술 개발이 이루어지고 있으나, 경량골재가 가진 물성으로 인해 구조물 적용에는 제한적임.
- ： 1990년경 경량골재 생산을 시작으로 경량골재 제조 및 경량 콘크리트 제조 기술에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나, 실제 적용 사례는 매우 미비함.
- ： 경량골재를 사용함에 따라 천연골재 대비 콘크리트 단위용적 중량을 30% 이상 저감시킬 수 있으나, 재료 분리 현상 등으로 인해 콘크리트의 유동성과 압축강도 등 품질이 저하하는 문제가 발생함.
- 경량골재 활용 경량 콘크리트 제조와 관련된 대표적인 연구를 표 1에 정리하였음.

표 1. 경량골재 콘크리트 관련 연구

저자명	연구 개요
Lee et al. (2010)	• 폐유리 분말 코팅에 따른 저흡수 경량골재의 특성 및 미세 구조 분석 연구를 수행함. • 폐유리와 바텀애시를 활용하여 경량골재를 제조하고 콘크리트로의 적용 가능성을 검토함. • 골재 표면의 폐유리 분말 코팅으로 흡수율 제어에 큰 효과가 있음을 확인하고, 콘크리트로의 적용 가능성함.
Kim et al. (2011)	• 흡수율이 높은 다공성의 경량 골재 표면에 도막 코팅제를 코팅할 경우 슬럼프 및 슬럼프 저하방지에 유리하는 것을 보고함. • 무코팅의 경우 W/B가 낮은 고강도 경량 골재 콘크리트에서 슬럼프 저하율이 27%로 높게 나타나는 것을 확인함.
Park et al. (2018)	• 경량골재 혼입률에 따른 압축강도의 특징은 없으나, 단위용적 중량은 균지않은 콘크리트 조건에서 일반 콘크리트 대비 22% 저감되고, 굳은 콘크리트의 경우 일반 콘크리트 대비 30% 저감 가능함을 확인함.
M. Priyanka et al. (2020)	• LECA(Lightweight Expanded Clay Aggregates, 팽창점토 경량골재)를 60% 혼입함으로써 콘크리트 단위용적중량을 1,550kg/m³로 저감시킬 수 있었으며, 강도는 25MPa 이상임을 확인하고 구조용 경량 콘크리트 사용이 가능함을 보고함.
Chun On Chin et al. (2020)	• 농업 폐기물인 OPKS(Oil Palm Kernel Shell)로 제조한 경량 활성탄을 굵은 골재 대체재로 사용한 콘크리트에 대한 연구를 수행함. • OPKS 활성탄이 혼입된 콘크리트의 경우, 거친 표면과 다공성 구조를 통해 시멘트 페이스트와의 결합강도를 증가시켜 일반 OPKS 대비 높은 압축강도를 확보할 수 있음을 보고함.

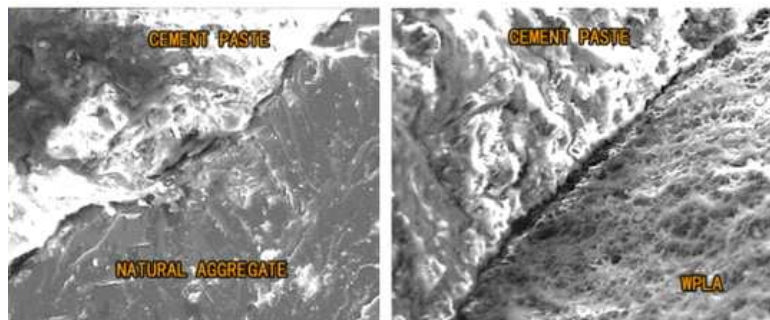
경량 골재를 구조용으로 활용하기 위해서는 **흡수율 및 단위용적중량 제어하기 위한 기술** 및 **시멘트 페이스트와 골재간 계면 부착을 향상시키기 위한 기술 개발**이 필요함.

② 플라스틱 골재 활용 기술 관련 선행연구

- 기존 플라스틱을 콘크리트용 골재로 활용한 연구의 대부분은 폐플라스틱을 활용한 연구임
- ： 비교적 양호한 품질의 PET를 중심으로, PP, PE, PVC 등 단일 재질의 플라스틱을 잔골재로 치환한 것이며, 플라스틱을 굵은골재로 치환하거나 개질하여 성능을 개선한 연구는 전무함.
- ： 플라스틱 골재를 적용한 콘크리트 연구의 경우, 플라스틱 골재의 매끄러운 표면이 골재-시멘트 매트릭스 간 계면의 낮은 부착성으로 인해 강도가 저하한다는 한계점과 함께 플라스틱 골재의 낮은 비중으로 배합 시 재료분리 문제가 발생한다는 점을 언급하고 있음.
- 플라스틱 골재 활용 경량 콘크리트 제조와 관련된 대표적인 연구를 표 2에 정리하였음.

표 2. 플라스틱 골재 혼입 콘크리트 관련 연구

저자명	연구 개요
Lee et al. (2019)	- 플라스틱 중 LLDPE 및 HDPE 2종의 플라스틱으로 제작된 잔골재의 혼입률(0, 25, 50, 75, 100%)에 따라 모르타르에 미치는 영향을 검토함. - 플라스틱 골재 혼입률 50%까지는 유동성이 향상되나, 혼입률 75% 이상에서는 일반 모르타르 대비 유동성이 저하됨을 확인함. - 플라스틱의 종류 및 혼입률에 관계없이 플라스틱 골재의 낮은 밀도로 인해 재료분리가 발생한다는 점과 플라스틱 골재와 시멘트 페이스트간 부착이 제대로 이루어지지 않음에 따라 압축강도가 저하됨을 보고함.
Lee et al. (2020)	- 플라스틱 골재의 치환에 따른 콘크리트 특성 변화를 평가하기 위하여 단일재질 및 복합재질의 플라스틱 골재를 제조하고 치환율에 따른 콘크리트 특성을 검토함. - 대상 플라스틱은 LDPE(Low Density Polyethylene)와 PP(Polypropylene)를 사용하고, 밀도와 흡수율은 부순 잔골재보다 낮은 수준임. - 플라스틱 골재의 낮은 밀도로 인해 플라스틱 골재의 치환률이 증가함에 따라 일반 시험체 대비 96~86% 수준으로 밀도가 감소하고, 플라스틱 골재의 낮은 계면 부착 성능으로 인해 일반 시험체 대비 압축강도가 감소하는 것을 보고함.
Fahad K. et al. (2020)	- 플라스틱 폐기물을 압출 성형한 PLA(Processed Lightweight Aggregates) 인공경량 골재의 치환율이 증가함에 따라 콘크리트의 밀도와 압축강도가 감소하는 것을 확인함. - 콘크리트의 압축강도의 감소는 시멘트 페이스트와 인공경량골재 사이의 결합을 방해하는 골재 매트릭스 내 존재하는 플라스틱의 소수성과 관련이 있다고 보고함.
Xuemiao Li et al. (2020)	- 고무와 플라스틱 폐기물로 제조한 재활용 골재를 활용하여 시멘트 복합체의 물성에 대한 연구를 진행함. - 플라스틱 골재의 매끄러운 표면과 낮은 비중이 시멘트 복합체 내 기공 구조를 증가시켜 시멘트 매트릭스의 밀도와 기계적 강도가 감소한다고 보고하고, 고무 골재의 경우, 화학적 전처리를 실시함으로써 골재와 시멘트 페이스트 간 결합이 향상되어 시멘트 복합체의 기계적 강도 손실을 보강할 수 있음을 보고함.



<시멘트 페이스트와 천연골재/PET 골재 사이의 ITZ>

☑ 플라스틱 골재를 콘크리트용 골재로 활용하기 위해서는 **재료분리 저항성을 높이고 콘크리트 작업성을 높이기 위한 기술** 및 **콘크리트 강도 향상을 위한 계면 부착강도 증진 기술 개발**이 필요함.

③ 감마선 조사 플라스틱 골재 활용 기술 관련 선행연구

- 감마선 조사 기술은 의학·바이오·공업·환경·건설 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 국내에서는 ^{60}Co 에서 방출되는 감마선(고준위 및 저준위)을 활용하여 고분자 재료의 가교, 경화, 그래프트 및 분해 가공을 통해 플라스틱의 내구성 및 내부식성 향상, 표면경화 등과 관련된 연구가 보고되고 있음.
: 감마선을 조사하여 가공된 플라스틱을 건설분야로 적용하기 위한 국내 연구는 전무한 실정임.
: 국외의 경우, 감마선 조사 플라스틱을 건설재료로 활용하기 위해 콘크리트용 골재로써 가능성을 검토하는 연구가 진행중임.
- 감마선 조사 플라스틱 골재 활용 기술과 관련된 대표적인 연구를 표 3에 정리하였음.

표 3. 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 콘크리트 관련 연구

저자명	연구 개요
A. Usman et al. (2018)	- 감마선 조사 플라스틱이 시멘트 모르타르 및 콘크리트에 미치는 영향에 대한 문헌 조사를 실시하고, 감마선 조사 시 플라스틱의 물성 변화에 관한 연구를 수행함. - 플라스틱의 건설분야 활용을 위해 폴리머의 분자구조를 화학적으로 개질하는 방법이 주로 사용되고 있으나, 감마선 조사를 통해 플라스틱을 개질하는 방법이 대안이 될 수 있음을 보고함. - 감마선 조사 플라스틱을 적용할 경우, 시멘트 페이스트와 플라스틱 골재 사이의 결합을 강화하여 콘크리트의 물성을 향상시킬 수 있음을 보고함.
Y. Yin et al. (2018)	- 바زل트 섬유로 보강된 PET 복합체에 대해 다양한 조사선량의 감마선을 조사할 시 발생하는 복합체의 화학적 구조, 형상변화, 기계적 특성 및 열저항에 대한 분석 연구를 수행함. - 감마선 조사를 통해 복합체 계면 영역의 PET 분자사슬이 섬유와 결합함으로써 가교 물질이 형성됨을 확인하고, 파단 표면의 형상 변화 분석을 통해 계면에서의 접착성이 개선됨을 보고함.
Martínez et al. (2019)	- 감마선을 조사한 PC(polycarbonate) 펠릿을 잔골재로 치환 혼입한 콘크리트의 기계적 특성에 대한 연구를 수행함. - 감마선 조사량을 증가시킴으로써 PC 펠릿의 매끄러운 표면을 거친 표면으로 바꾸는 것이 가능함을 확인함. - 감마선 조사 플라스틱의 거친 입자 표면이 시멘트 페이스트와의 접착을 용이하게 함으로써 콘크리트의 탄성계수, 압축 및 휨강도가 증진된 것이라 보고함.
Martínez et al. (2020)	- 감마선을 조사한 PET(PolyethyleneTerephthalate) 플레이크로 치환 혼입한 콘크리트의 물리적·화학적 특성에 대한 연구를 수행함. - PC 펠릿과 마찬가지로 PET 플레이크 또한 감마선 조사선량의 증가에 따라 표면을 거친 표면으로 바꾸는 것으로 확인되었으며, 이에 따라 기계적 강도가 향상되었음. - PET 플레이크가 혼입된 콘크리트의 경우 특히 연성이 증가하는 것을 확인함. <감마선 조사된 PET가 혼입된 콘크리트 시편의 SEM 사진>

- ☑ 감마선 조사 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 성능 개선을 검토한 기존 연구들을 분석하였으나, 대부분 고선량의 감마선을 사용한다는 점에서 일반적인 건설재료로의 적용이 어려운 실정임.
- ☑ 본 연구에서는 저선량의 감마선 조사를 통해 다양한 플라스틱 개질을 시도하고, 조사된 플라스틱 골재의 구조 및 형상, 물리·화학적 특성 분석과 함께 시멘트 모르타르 및 콘크리트로의 적용 가능성을 검토함.

(나) 플라스틱의 감마선 조사에 따른 개질 메커니즘 분석

① 플라스틱의 감마선 조사에 따른 화학 반응 메커니즘

- 플라스틱에 감마선을 조사함에 따라 그림 1 및 그림 2와 같은 화학적 반응이 발생하며, 이로 인해 플라스틱이 가진 물리·화학적 특성이 변화함에 따라 플라스틱의 고유 물성이 변하게 됨.

: 플라스틱의 화학반응에 사용되는 감마선은 ^{60}Co 과 같은 방사선 동위원소로부터 발생하는 것으로, 이로 인해 발생하는 이온화 및 여기(excitation)는 다양한 반응으로 유도됨.

- 플라스틱에 감마선을 조사함에 따라 발생할 수 있는 화학적 반응은 그림 3과 같이 다양함.

- : 일반적으로 플라스틱에 에너지가 전달됨에 따라 자유라디칼이 발생하며, 이는 수소원자 추출, 이중결합 형성, 가교, 분해, 산화, 그래프팅, 경화 등 다양한 화학반응이 유도됨.
- : 이 중 플라스틱의 물성 개선에 중요한 반응은 가교, 분해, 그래프팅 반응을 들 수 있음.
- ※ (가교 반응) 플라스틱 분자 사슬이 서로 연결되어 3차원 네트워크 구조를 형성하는 것
 - ※ (분해 반응) 플라스틱 분자 사슬이 절단되어 분자량이 감소하는 것
 - ※ (그래프팅 반응) 자유라디칼을 이용 단량체를 그래프트 중합하는 것



그림 1. 방사선 조사에 의한 고분자 재료 내의 주반응

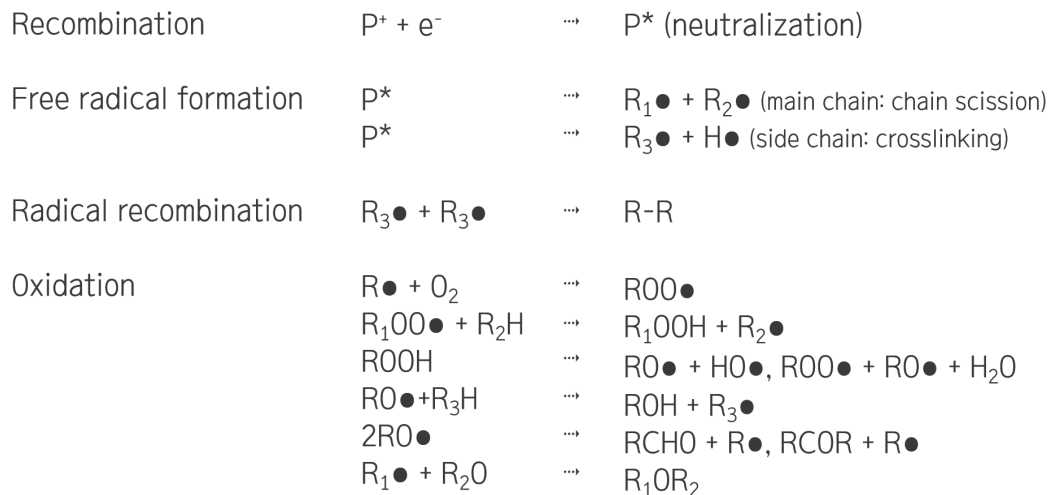


그림 2. 방사선 조사에 의한 고분자 재료 내의 이차반응

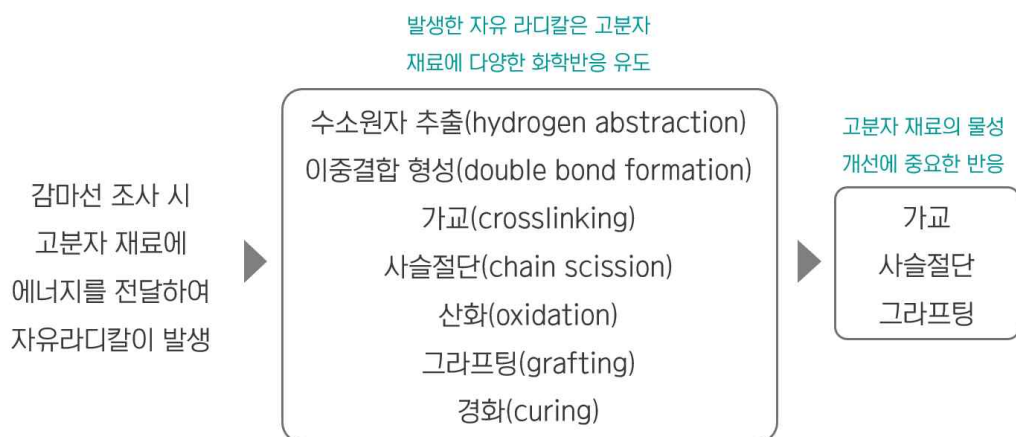


그림 3. 감마선 조사에 의한 고분자 재료의 다양한 화학반응

- 플라스틱에 감마선을 조사할 시, 어떠한 반응이 일어날지는 표 4와 같이 플라스틱이 가진 G-value에 의해 예측이 가능함.
- : G-value는 어떠한 물질에 흡수되는 방사선 에너지 100eV 당 화학반응을 일으키는 분자의 수로 정의됨.
- ※ G(X)는 가교, G(S)는 분해와 관련된 G-value 로 G(S)/G(X) 비가 1보다 작을 경우, 가교 반응이 주로 일어남
- : 일반적으로 감마선 조사 시 플라스틱의 주요 반응은 G-value에 좌우되기는 하나, 가교 반응과 분해 반응은 동시에 경쟁적으로 발생하는 것으로 그림 4와 같이 감마선 조사 조건(온도, 불활성 조건 등)에 따라 어떤 반응이 우세한가에 따라 결정됨.

표 4. 각 종 플라스틱의 G-value

플라스틱 종류	G(X)	G(S)	G(S)/G(X)
저밀도 폴리에틸렌 (LDPE)	1.42	0.48	0.34
고밀도 폴리에틸렌 (HDPE)	0.96	0.19	0.20
폴리프로필렌 (PP)	0.16 - 0.26	0.29 - 0.31	1.1~1.5
폴리테트라플루오로에틸렌 (PTFE)	0.1 - 0.3	3 - 5	10
폴리비닐레덴폴로라이드 (PVDF)	0.6 - 1.0	0.3 - 0.6	0.3
셀룰로오스	Low	11	High
폴리이소부틸렌 (PIB)	0.5	5	10
폴리메틸메타크릴레이트 (PMMA)	0.5	0.77	1.54
폴리메틸아크릴레이트 (PMA)	0.5	0.04	0.07
폴리스티렌 (PS)	0.019 - 0.051	0.0094 - 0.0019	0.41

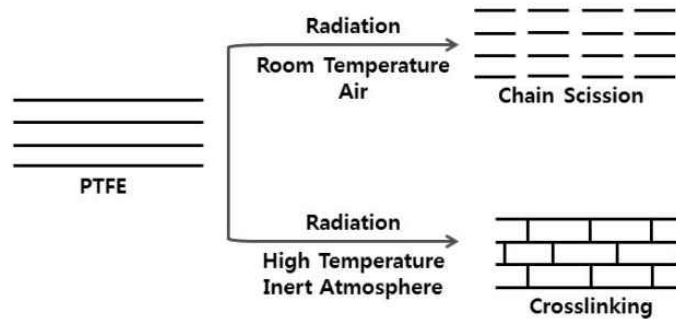


그림 4. 감마선 조사 시 환경 조건에 따른 PTFE의 반응

- 일반적으로 플라스틱은 표 5와 같이 감마선 조사에 따라 다른 반응을 가지고 있음.
: 방사선에 내성이 있는 플라스틱은 G-value가 매우 낮은 것으로 방향족 고분자 재료가 대표적임.

표 5. 감마선 조사에 따라 다른 반응을 갖는 대표적인 플라스틱

화학 반응	고분자 재료
방사선 가교형 고분자	PE, PB, PMA
방사선 분해형 고분자	PP, Cellulose, PMMA, PTFE
방사선 내성 고분자	PS, PET, PC

□ 감마선 조사에 따른 가교 반응 매커니즘

- 그림 5 및 그림 6과 같이 플라스틱에 감마선을 조사함으로써 플라스틱 내부에 발생하는 자유라디칼들이 서로 결합하여 3차원 네트워크 구조를 갖는 것을 가교 반응이라 함.
: 플라스틱에 감마선을 조사할 때 폴리머 사슬(화학적 결합)이 끊어지며 자유라디칼이 생성되고, 이 자유라디칼이 중합 반응 또는 그물망 사슬을 증가시켜 인접 분자 사이에 가교 결합을 일으킴에 따라 플라스틱 조직이 치밀해짐.
- 감마선 조사에 따른 가교 반응이 발생한 플라스틱은 일반 플라스틱 대비 탄성계수, 인성, 강도 및 경도 등 기계적 특성과 내열성 등의 기본적인 물성이 대폭 향상되는 특징이 있음.
: 감마선을 조사한 플라스틱을 분말화한 혼화재 또는 골재화한 골재 대체재로써 콘크리트 배합에 사용할 때 콘크리트의 강도 저하에 따른 구조적 안정성을 개선할 수 있음.

• Radiation Crosslinking

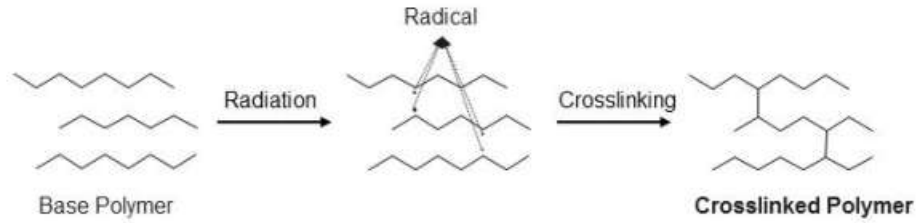


그림 5. 감마선 조사에 따른 가교 반응 개념도

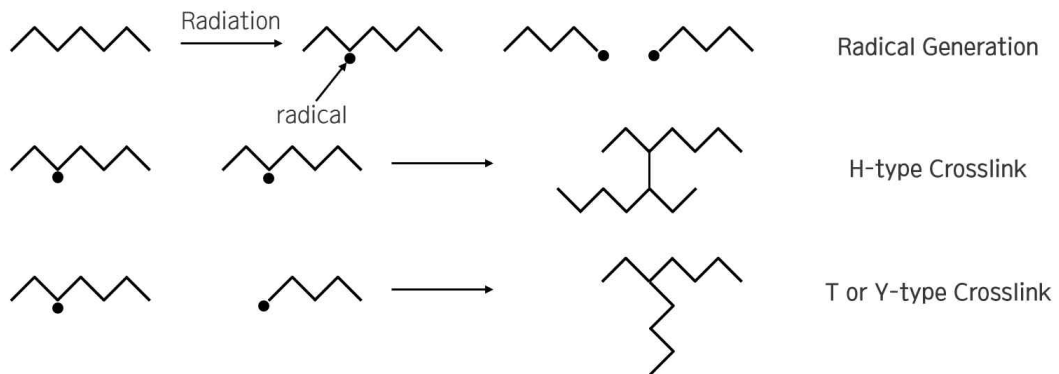


그림 6. 감마선 조사에 따른 라디칼 형성 및 가교 반응의 종류

□ 감마선 조사에 따른 분해 및 산화 반응 매커니즘

- 그림 7과 같이 플라스틱에 감마선을 조사함으로써 플라스틱 내부에 발생하는 자유라디칼들이 사슬을 절단하여 분자량이 감소하게 되는 것을 분해 반응이라 하고, 그림 8과 같이 자유라디칼이 공기 중 또는 재료 내부의 산소와 결합하여 다양한 O를 포함한 관능기를 형성하는 것을 산화 반응이라 함.
 - : 플라스틱에 감마선을 조사 시 일어나는 분해는 무질서하게 일어나며, 분자량 감소로 인해 플라스틱의 물성이 나빠지거나 특정 물성을 향상시키는 경우가 있음.
 - : 산화 반응의 경우 자유라디칼이 산소와 반응하여 C-O, C=O, COO, COOH 등 산소를 포함하는 다양한 관능기를 발생시키며, 이와 동시에 그림 9와 같은 산화성 분해가 일어나는 것이 특징임.
- 감마선 조사에 의한 분해와 산화 반응은 불활성이 강한 플라스틱의 표면을 개질시킴으로서 표면의 극성 및 표면 에너지를 증가시켜 접착성을 향상시키기도 함.
 - : 폴리에틸렌(PE)과 같은 플라스틱은 표면이 불활성이거나 감마선을 조사함으로써 표면에 다양한 친수성 관능기를 발생시켜, 접착성, 친수성이 부여되어 콘크리트에 적용 시 시멘트와의 결합력을 향상시키는 것이 가능함.

• Radiation Chain Scission (Degradation)

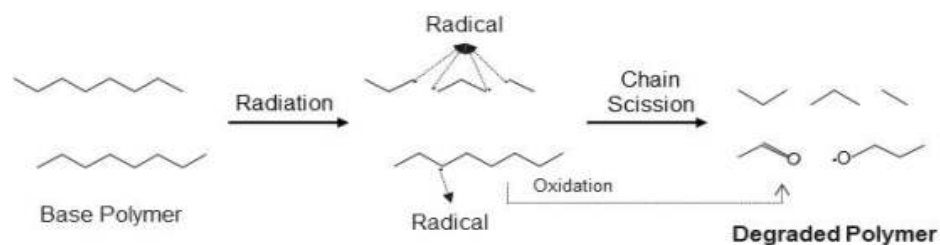


그림 7. 감마선 조사에 따른 분해 반응 개념도



그림 8. 감마선 조사에 의한 산화 반응

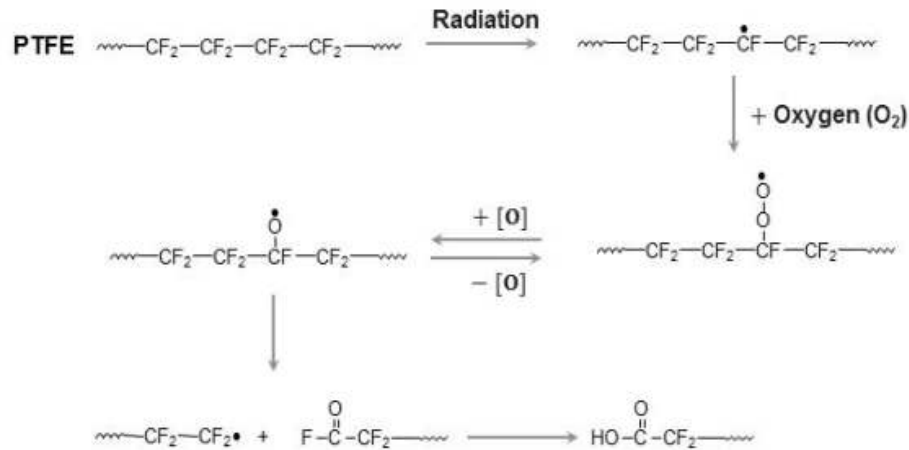


그림 9. 감마선 조사에 의한 산화성 분해 반응의 일례(PTFE)

- ✔ 플라스틱에 감마선을 조사함으로써 플라스틱의 종류에 따라 온도상승, 중합화(Polymerization), 융합(Grafting), 가교 결합, 분해 및 산화 등 물리·화학적 반응이 발생하게 됨
- ✔ 감마선을 조사한 플라스틱을 콘크리트에 적용하기 위한 연구가 많지 않음에 따라 콘크리트의 물성을 향상시킬 수 있는 플라스틱 종류를 선별하여 한정하는 것은 매우 어려운 실정임.
- ✔ 본 연구에서는 이와 같은 **플라스틱의 감마선 조사에 따른 개질 매커니즘을 분석**하고, 다양한 플라스틱 펠릿을 대상으로 저선량의 감마선을 단계적으로 조사하여 개질한 것을 시멘트 복합체에 적용함으로써 **플라스틱 자체의 물성 변화와 함께 이를 적용한 시멘트 복합체의 물성 변화를 검토하고 분석하는 것을 목표로 함**.
- ✔ **플라스틱 골재 표면 개질을 위한 감마선 도입의 당위성**
 - 플라스틱 재료를 골재로서 활용하기 위해 플라스틱 표면 개질을 위한 다수의 연구들이 진행되었으나, 대부분의 연구가 **표면개질을 통한 골재의 물리적 성능 개선 위주로 진행됨**.
 - 시멘트 복합체는 복합재료로서 다양한 화학적 반응에 의해 결합되기에, 물리적 개질만으로는 충분한 성능 개선이 이루어질 수 없음. 표면 거칠기 향상을 위해 가열이나 화학약품 처리 등에 의한 **기존 개질 방법**의 경우 플라스틱 원료가 가진 고분자의 고유 특성이 개질된다기보다 **표면의 거칠기를 변화시키는 물리적 개질 중심으로 이루어진다고 볼 수 있음**.
 - 다만, 플라스틱 골재 혼입에 따라 **시멘트 복합체의 강도 저하의 문제**는 플라스틱 골재의 매끈한 표면에 의한 물리적 접촉 불량뿐만 아니라 **시멘트 페이스트와 플라스틱 골재 표면 사이의 화학적 결합의 불량**이 포함됨.
 - 이는 **플라스틱 원료가 가진 소수성**에 의해 시멘트 복합체에 혼입 후 경화 시 **시멘트 페이스트와 골재 간 물의 이동을 억제함으로써 수화반응을 방해**하기 때문에 플라스틱 골재와 시멘트 페이스트와의 **화학적 결합에 문제**가 발생하는 것임.
 - 감마선 조사는 기존의 물리적 개질 방법(가열, 화학약품을 활용한 표면처리 등)에 더하여 **감마선 조사로 인해 중합체 사슬이 고분자의 작용기를 개질하여 플라스틱 골재의 표면에 친수성을 부여함으로써 수화반응을 촉진시켜 화학적 결합을 향상**시킬 수 있기에, 플라스틱 골재 성능 극대화가 가능함.
 - 따라서, **플라스틱 재료를 골재로서 활용하기 위해서는 물리적·화학적 특성을 동시에 개질하는 것이 필수적이며, 이를 위한 개질 방법으로서 감마선 조사 기술의 활용이 반드시 필요**하다고 볼 수 있음.

② 시멘트 페이스트와 골재 간 계면 부착성능 향상 메커니즘

- 일반적으로 콘크리트의 구성요소는 바인더, 골재 그리고 계면전이영역(Interfacial transition zone, 이하 ITZ)으로 구분될 수 있음.

: ITZ는 골재와 시멘트 페이스트의 매트릭스 사이에 형성된 20~50 μ m에 얇은 막 형태로 존재하는 영역으로 바인더와 골재에 비해 큰 공극비를 가지므로 콘크리트에 있어서 가장 취약한 상(phase)임.

: 시멘트 입자간에는 화학 반응을 통한 결합이 주를 이루지만 시멘트와 골재에는 이러한 결합이 이루어지지 않는 것이 특징이며, 시멘트 입자와 골재 입자 사이의 ITZ에서는 여러 가지 특성이 존재함.

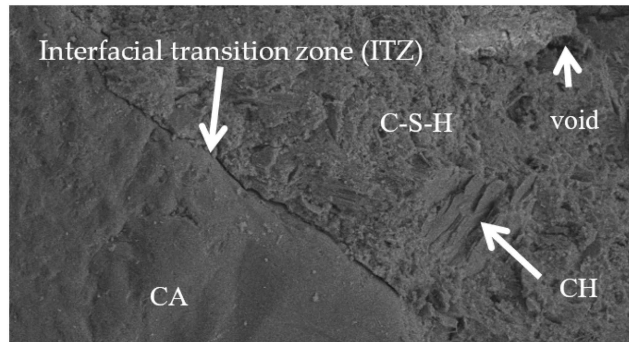


그림 10. ITZ에 대한 SEM 사진

- 콘크리트 재료에 있어 ITZ의 취약성은 압축강도 측정 시 확인되며, 통상적인 콘크리트 배합으로 제작한 시험체의 경우 압축강도 측정 시 파괴는 골재와 골재 표면을 따라 진행하며 골재가 떨어져 나간 모르타르 표면에는 백색의 물질(수산화칼슘)이 육안으로 관찰됨.

: 골재가 떨어져 나간 부분은 상대적으로 거대 공극이 존재하는 경우가 흔하며, 이와 같은 특성으로 인해 ITZ는 더욱 상대적으로 취약한 특성을 가지게 됨.

: 골재 상태로 인해 표면에 존재하는 수분은 시멘트 페이스트와 충분한 혼합이 이루어지지 않으며, 이로 인해 골재 표면에서는 수화물의 농도가 낮아지고 수산화칼슘과 같이 강도 발현 및 내구성 향상에 영향이 적은 수화 생성물이 상대적으로 거대하게 성장함.

- 일반적으로 ITZ의 특성을 충분히 개선한 콘크리트는 골재 표면을 따라 균열이 가지 않고 골재 자체가 관통되는 균열이 생성됨.

: ITZ의 특성이 향상되면 골재가 가지는 기본 강도보다 높은 강도 특성을 보이게 되어 골재 표면을 따라 균열이 발생하는 것이 아닌 골재 자체가 파괴됨.

: 콘크리트 시험체의 압축강도 측정 시 균열의 진행이 골재를 관통하여 전개되었다면 이는 ITZ의 특성을 충분히 개선한 것이라고 판단할 수 있음.

: ITZ의 특성을 개선하지 않고 고강도 및 고성능 콘크리트를 제조하는 것은 어려운 실정임.

✔ 고강도 및 고성능의 콘크리트를 제조하기 위해서는 ITZ의 특성을 개선하는 것이 반드시 필요하며, 이를 위해서 양질의 골재를 혼입하여 균열의 진행이 골재 자체를 관통하여 전개될 수 있도록 유도함으로써 콘크리트의 강도를 향상시킬 수 있음.

✔ 본 연구에서는 이와 같은 ITZ의 특성을 개선하기 위하여 감마선 조사를 통해 플라스틱 골재의 표면 거칠기를 개선하여 시멘트 페이스트와의 부착력을 증진시키고, 표면 구조를 조밀하게 개선하여 기공을 폐쇄함으로써 골재 주변의 블리딩수의 유입을 차단할 수 있도록 플라스틱 골재를 개선하는 것을 목표로 함.

✔ 본 연구에서는 이와 같은 플라스틱의 감마선 조사에 따른 개질 매커니즘을 분석하고, 다양한 플라스틱 펠릿을 대상으로 저선량의 감마선을 단계적으로 조사하여 개질한 것을 시멘트 복합체에 적용함으로써 플라스틱 자체의 물성 변화와 함께 이를 적용한 시멘트 복합체의 물성 변화를 검토하고 분석하는 것을 목표로 함.

② 플라스틱 골재 성능 개선을 위한 감마선 영향에 따른 최적 표면개질 기법 도출

○ 플라스틱 골재의 성능 개선을 검토하기 위하여 본 연구에서 활용한 플라스틱은 그림 11과 같이 총 5종이며, 기초적 연구 관점에서 플라스틱의 2차 가공을 거치지 않은 플라스틱 펠릿을 대상으로 함.

: 본 연구에 사용된 플라스틱의 크기는 4~6mm의 원주형 또는 플레이크 형태이며, 기본 물성은 다음과 같음.

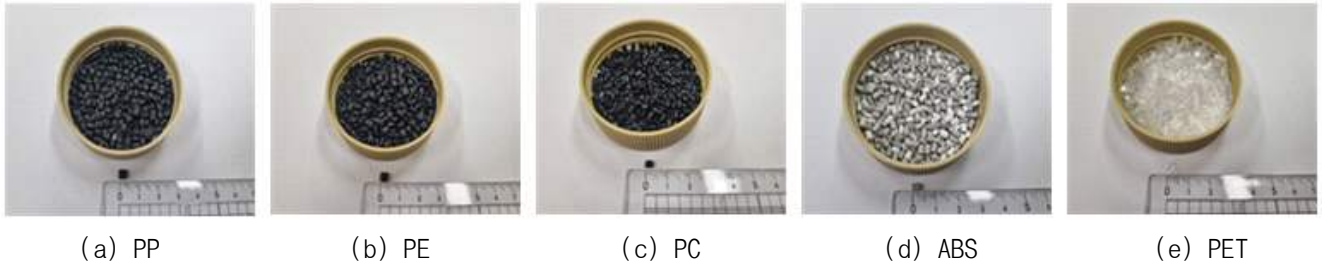


그림 11. 감마선 조사 및 시멘트 복합체 적용을 위한 플라스틱

표 6. 플라스틱 종류별 기본 물성

	PP	PE	PC	ABS	PET
밀도(g/cm ³)	0.90~0.95	0.94	1.2	1.04	1.371
인장강도(MPa)	24~27	18~20	57	37	26
연신율(%)	300	200	105	54	50~150
탄성률(MPa)	1,200~1,250	815	2,244	2,198	2,800~3,100
연화점(°C)	120	150~230	150	150~280	260
용융지수(g/10min)	5~9	1.2~2	18	24	122.1

○ 플라스틱 골재의 표면 개질을 위한 실험조건

: (감마선 조사시간) 감마선 조사시간은 조사선량(단위: kGy)에 따라 상이하하며, 일반적으로 분당 58Gy로 작동하는 것으로 확인됨.

: (감마선 조사장비) 본 연구에서 활용한 감마선 조사장비는 그림 12과 같이 캐나다 N사의 감마선원 자동 팔레트 타입의 설비를 통해 코발트 -60 방사성동위원소에서 나오는 단파장 빛인 감마선을 플라스틱 골재에 쬌어 고분자 개질을 통해 수행되었음.

: (감마선 조사조건) 감마선 조사 대상 플라스틱의 물성은 표 6과 같으며, 감마선 조사선량은 기존 문헌을 분석·참고하여 25kGy, 50kGy, 75kGy, 100kGy 4단계로 설정하였으며, 감마선 조사 시 플라스틱 골재를 비닐로 밀봉하여 박스에 개별 포장 후 상온에서 감마선 조사설비를 통해 조사되었음.

AUTOMATIC PALLET IRRADIATOR

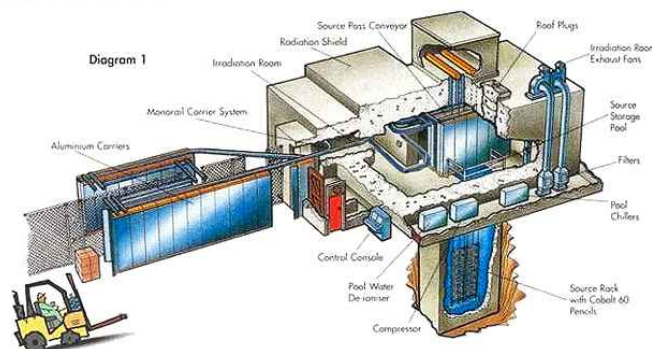


그림 12. 감마선 조사 설비

○ 본 연구에서는 감마선 조사에 의해 개질된 플라스틱 표면의 분자 구조, 표면 물성 및 표면 형상 등을 분석하기 위하여 주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM), 적외선 분광분석(Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) 및 열중량분석기(Thermogravimetric Analyzer, TGA)를 이용함.

(가) 감마선 조사 플라스틱 골재의 표면 구조 및 형상 분석

① SEM 분석을 통한 감마선 조사 전후 플라스틱 골재 표면 구조 및 형상 분석

- 감마선 조사에 의해 개질된 플라스틱 표면의 미세구조 및 표면 형상을 분석하기 위해 주사전자 현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM) 및 디지털 현미경(Digital Microscope)을 사용하여 개질 특성을 규명하였음.

: SEM 및 디지털 현미경 관찰을 위한 시편 전처리 과정으로, 시편을 매우 얇고 균일한 절단을 나타낼 수 있도록 Struers 사의 Secotom-50 모델을 사용하여 마이크로 미터로 절단한 후 Hitachi 사의 JP/E-1010 모델을 사용하여 백금으로 진공 코팅하였음.

: 2차 전자모드의 JEOL 모델 JSM-6500F 장비를 통해 SEM 분석을 수행하였으며, HIROX 사의 KH-8700 모델의 디지털 현미경 장비를 사용하여 3차원 영상 촬영 및 표면조도를 측정하였음.

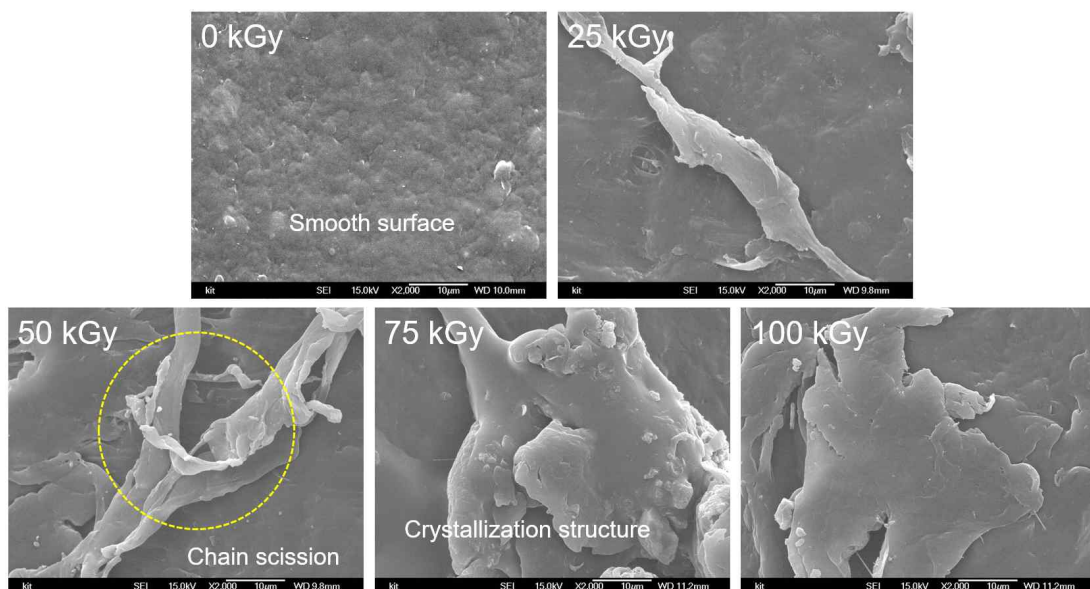
- 감마선 영향에 따른 플라스틱 골재 표면의 미세구조 변화 분석을 위해 FE-SEM 분석기기를 사용하여 각 조사선량 별 100, 500 및 2,000 배율로 플라스틱 골재 표면 관찰을 실시함.

: 분석은 PP, PE, PC, ABS, PET 5종에 대하여 실시하였음.

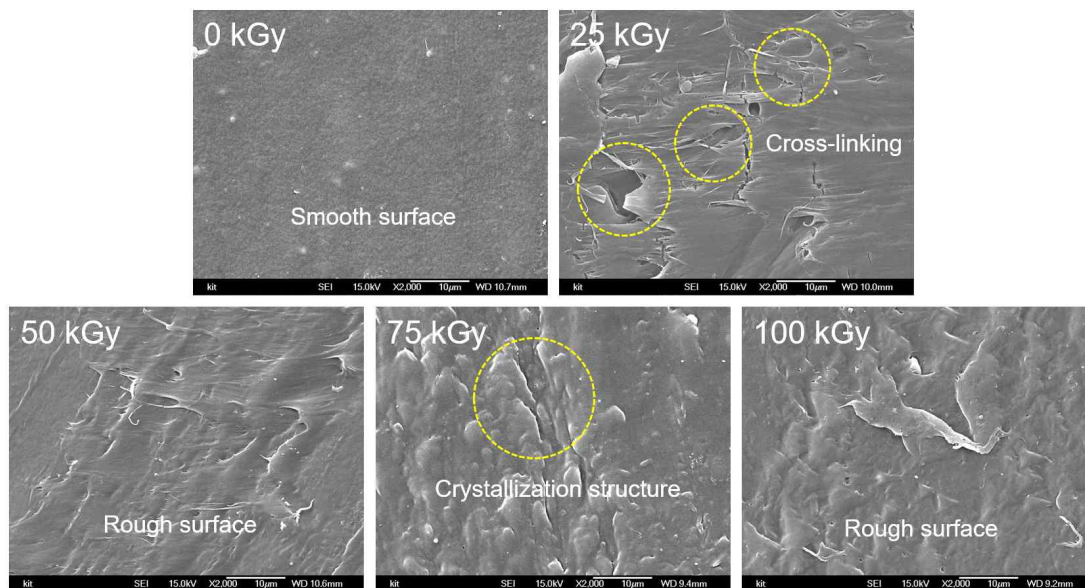
- 플라스틱 종류별 감마선 조사 전후의 표면 미세구조를 분석한 결과는 그림 14와 같으며, 개별 플라스틱의 배율에 따른 SEM 분석결과는 그림 15~19에 나타냄.



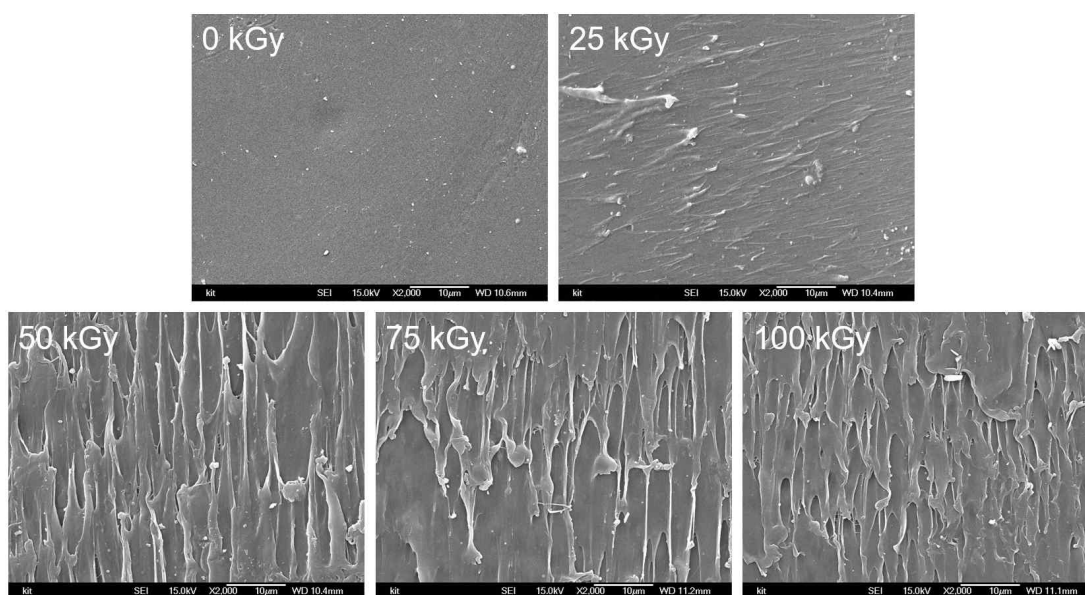
그림 13. FE-SEM(6500F) 분석기기



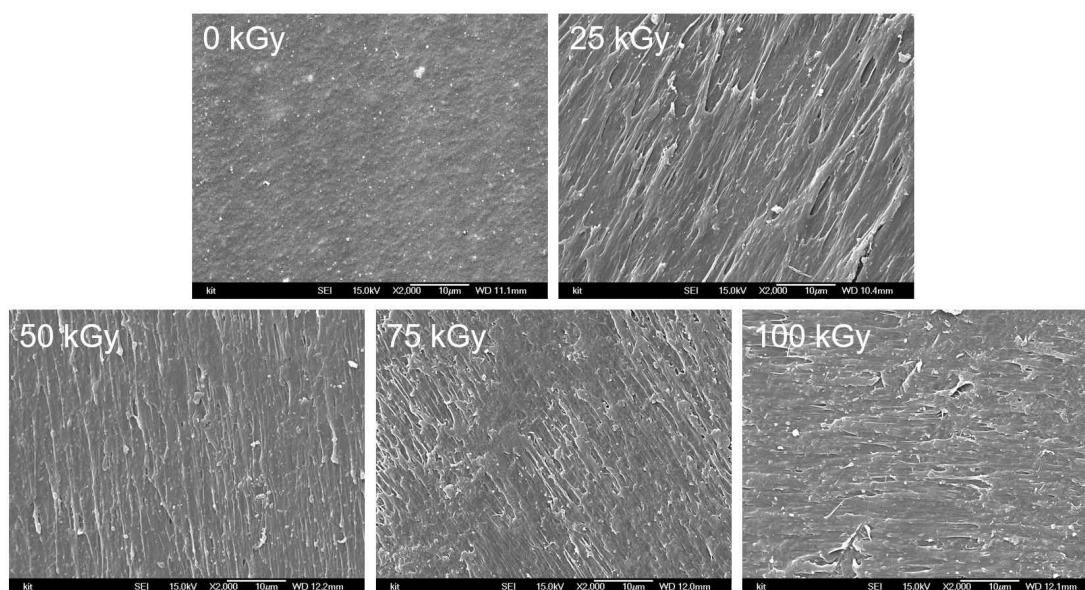
(a) PP



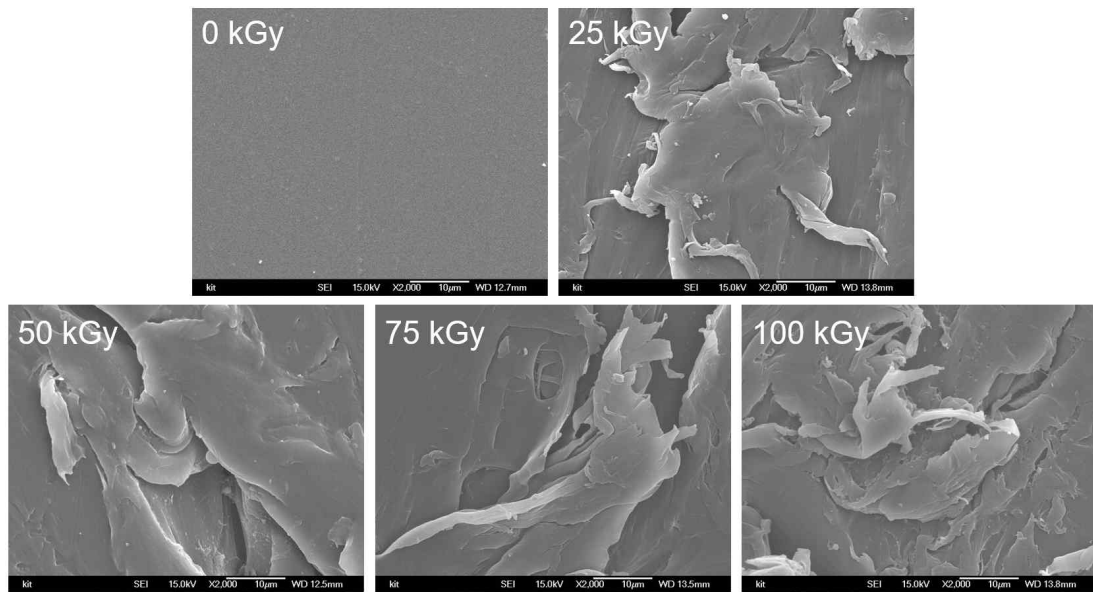
(b) PE



(c) PC

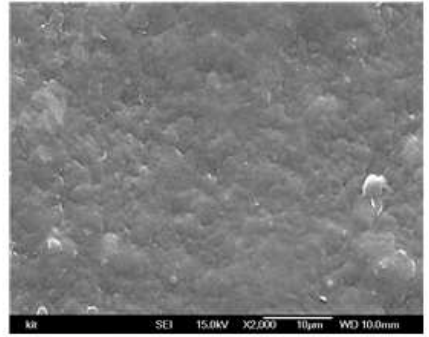
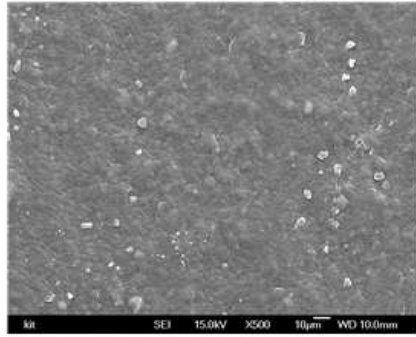
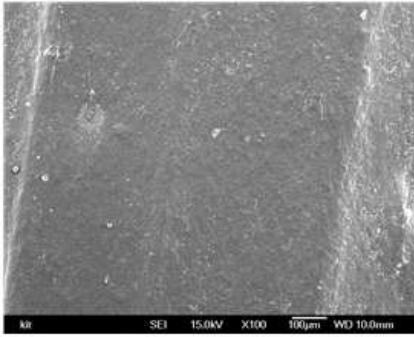


(d) ABS

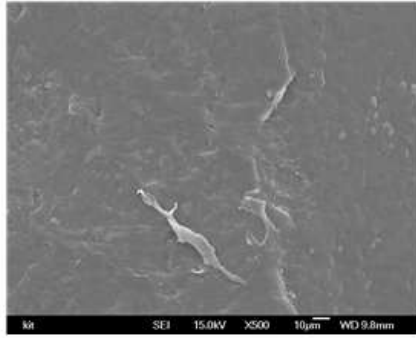
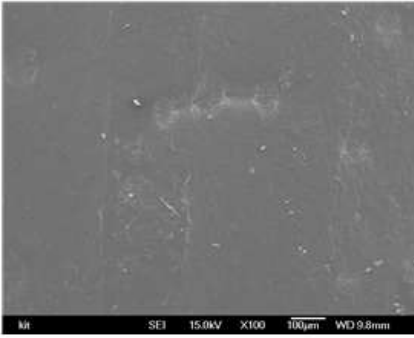


(e) PET

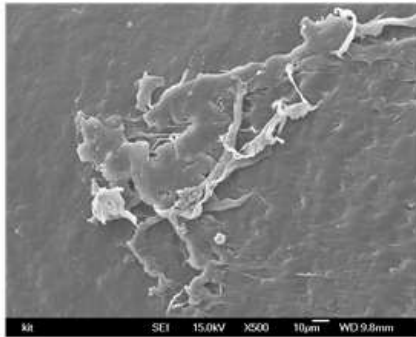
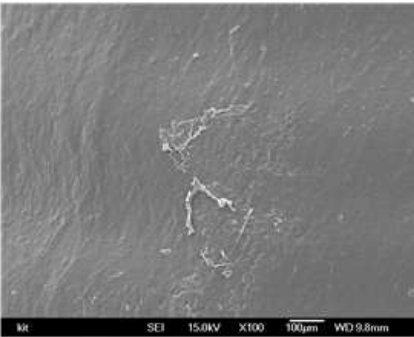
그림 14. SEM 촬영을 통한 플라스틱 골재 종류별 표면 미세구조



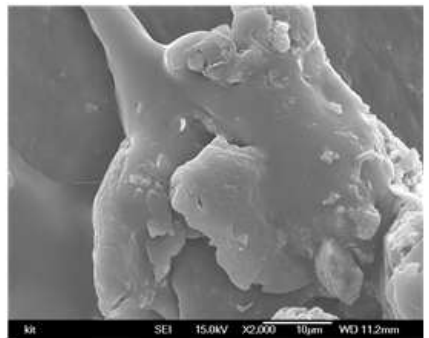
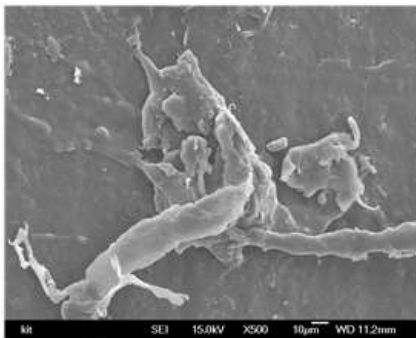
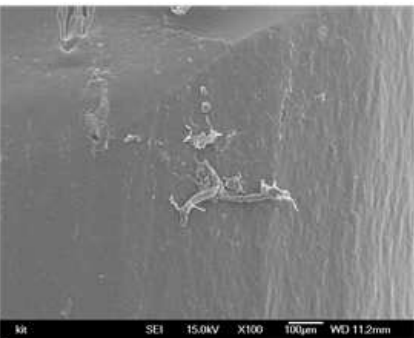
(a) PP-Plain (100 / 500 / 2,000 배율)



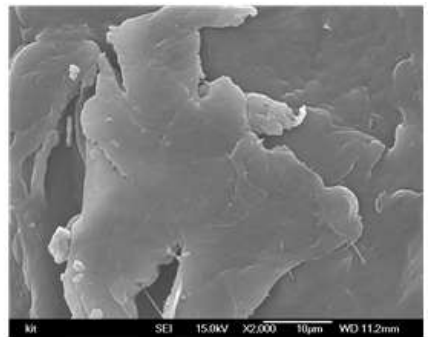
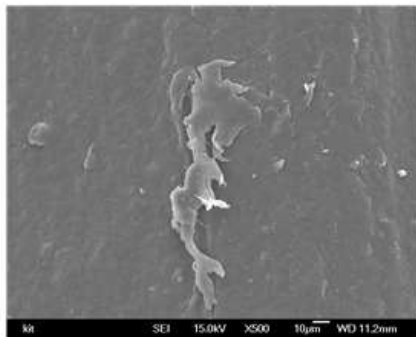
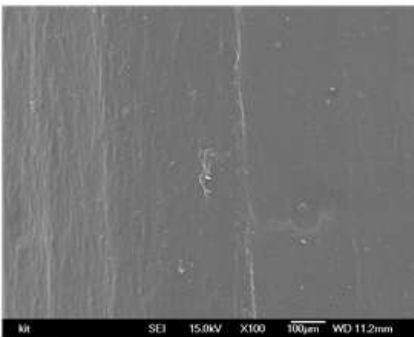
(b) PP-25kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(c) PP-50kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

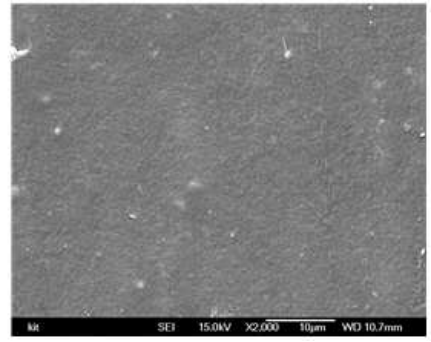
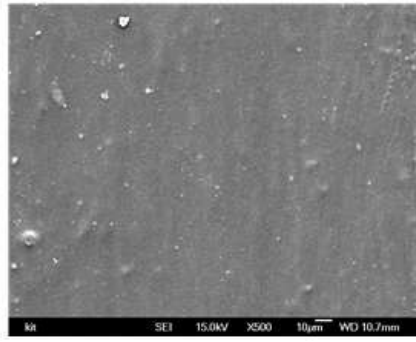
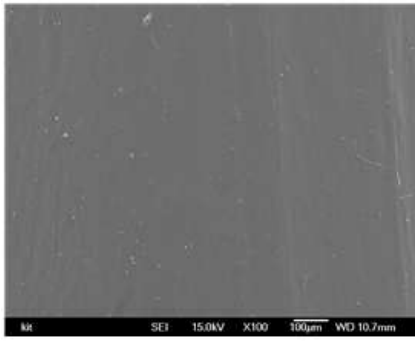


(d) PP-75kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

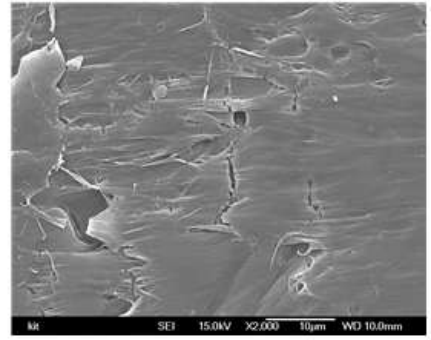
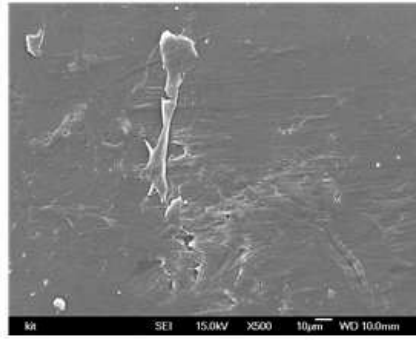
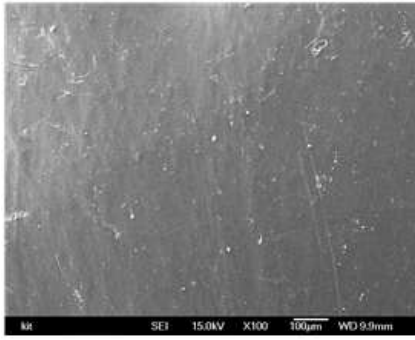


(e) PP-100kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

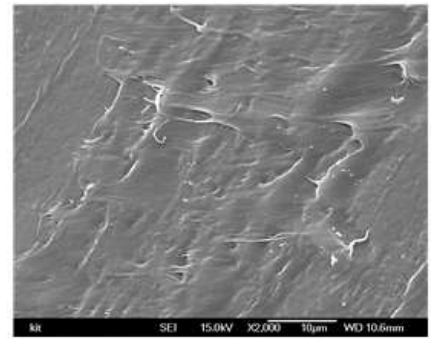
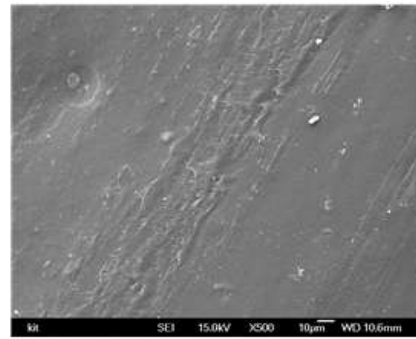
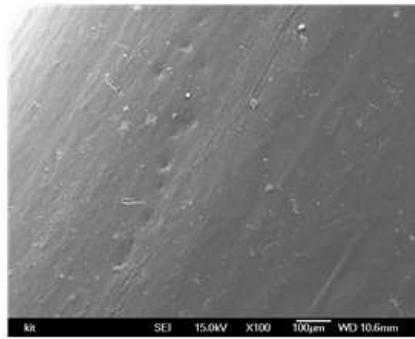
그림 15. SEM 촬영을 통한 PP 표면 미세구조



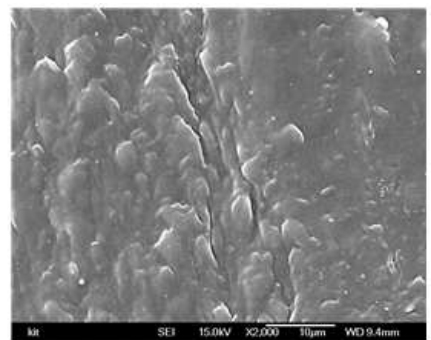
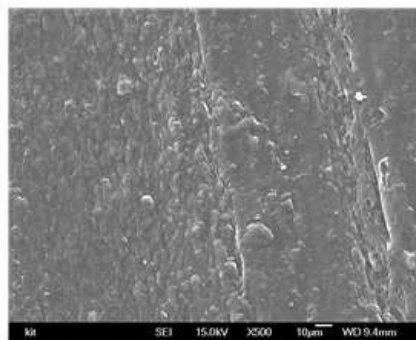
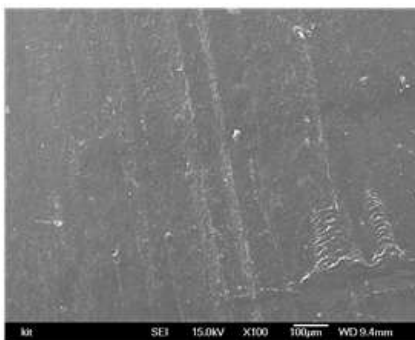
(a) PE-Plain (100 / 500 / 2,000 배율)



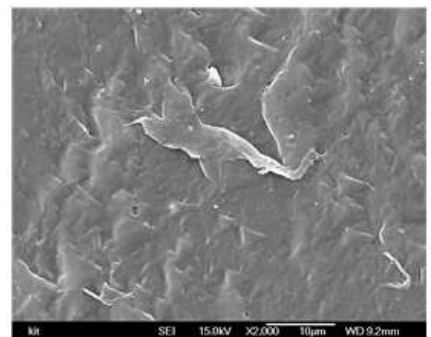
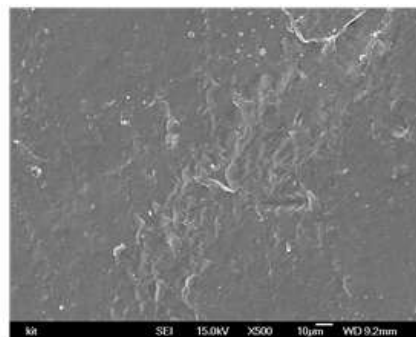
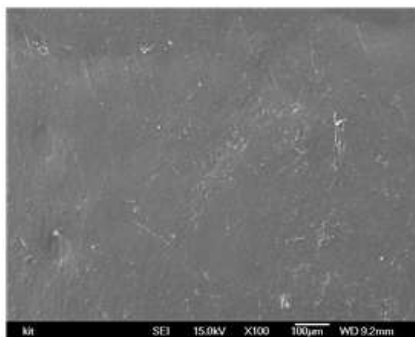
(b) PE-25kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(c) PE-50kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

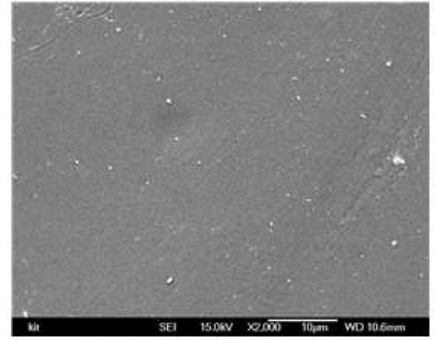
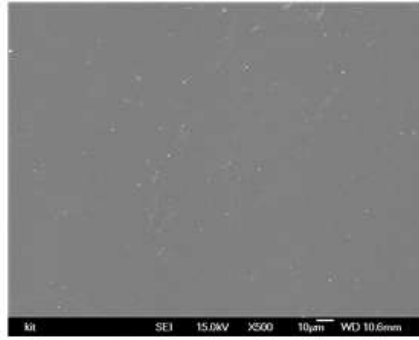
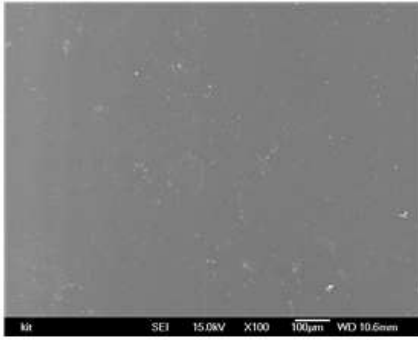


(d) PE-75kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

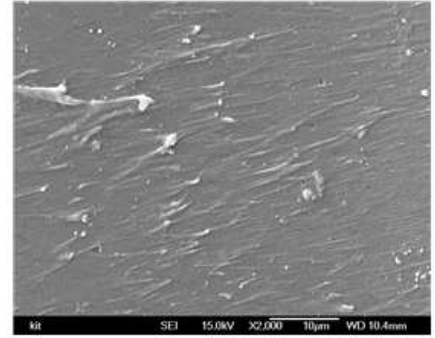
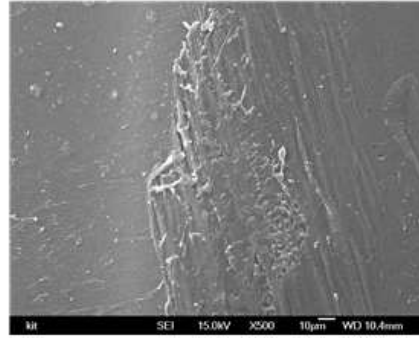
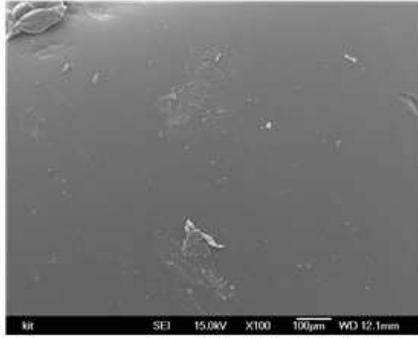


(e) PE-100kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

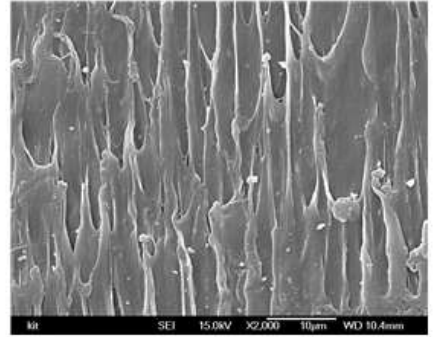
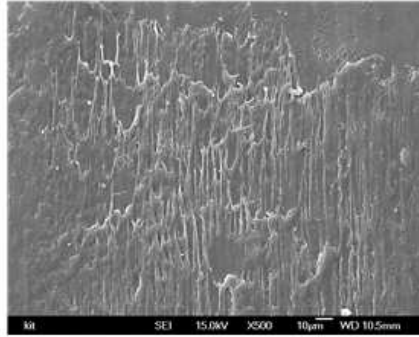
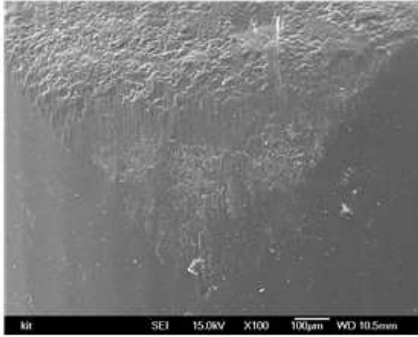
그림 16. SEM 촬영을 통한 PE 표면 미세구조



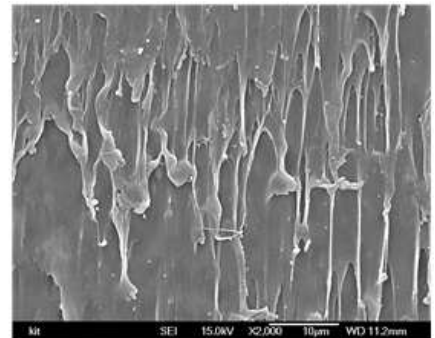
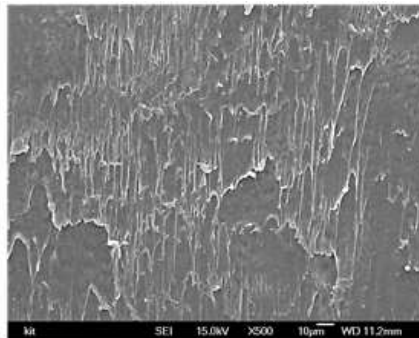
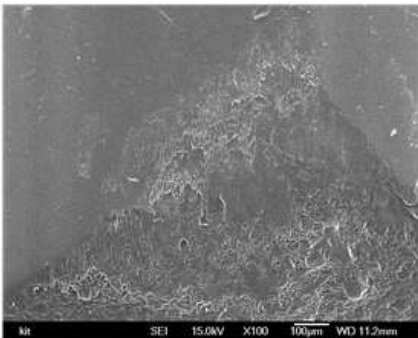
(a) PC-Plain (100 / 500 / 2,000 배율)



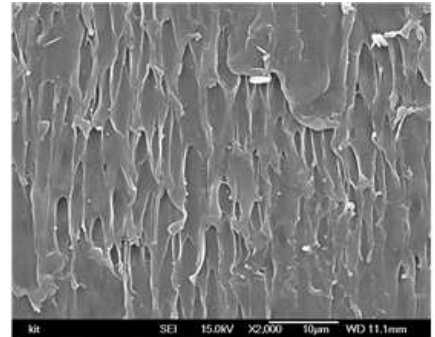
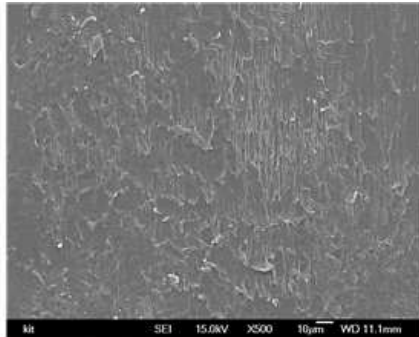
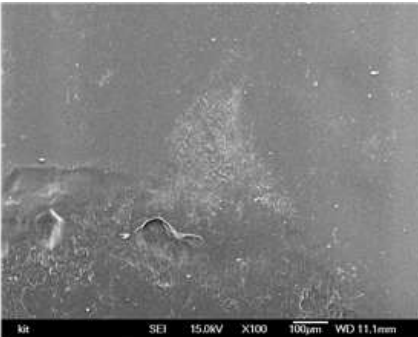
(b) PC-25kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(c) PC-50kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

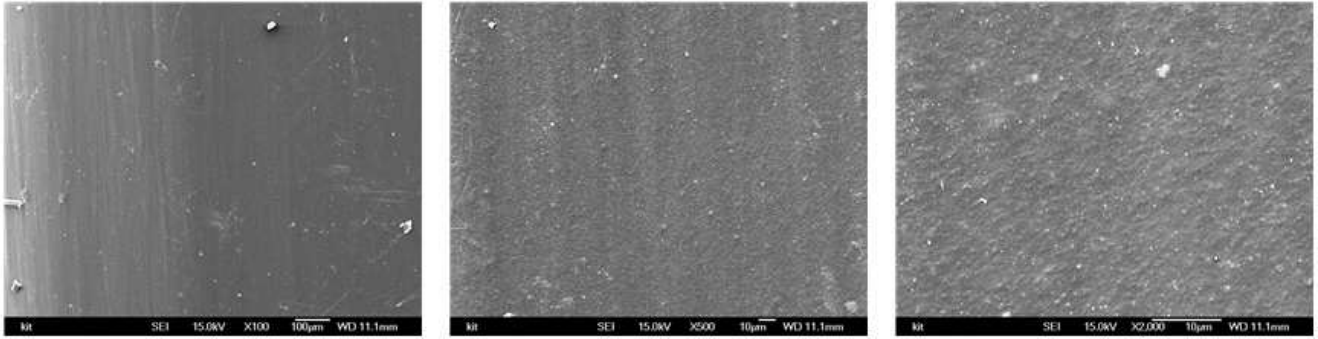


(d) PC-75kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

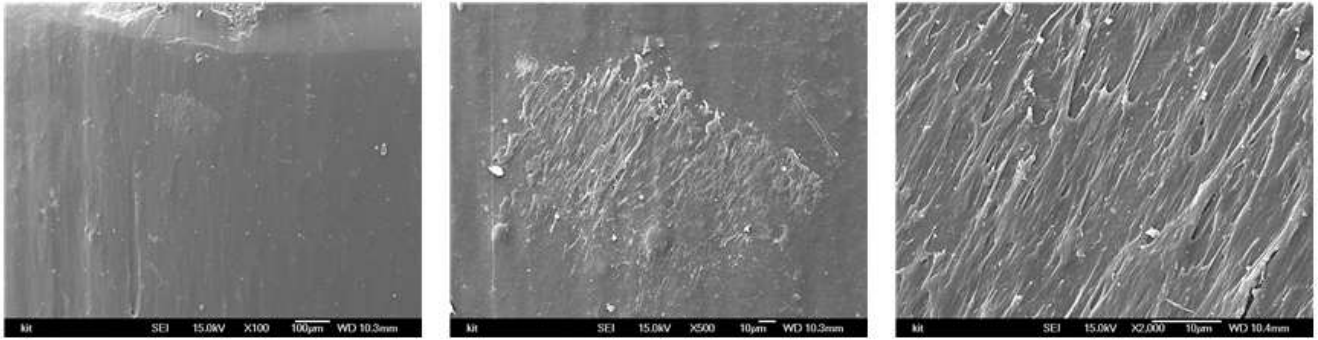


(e) PC-100kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

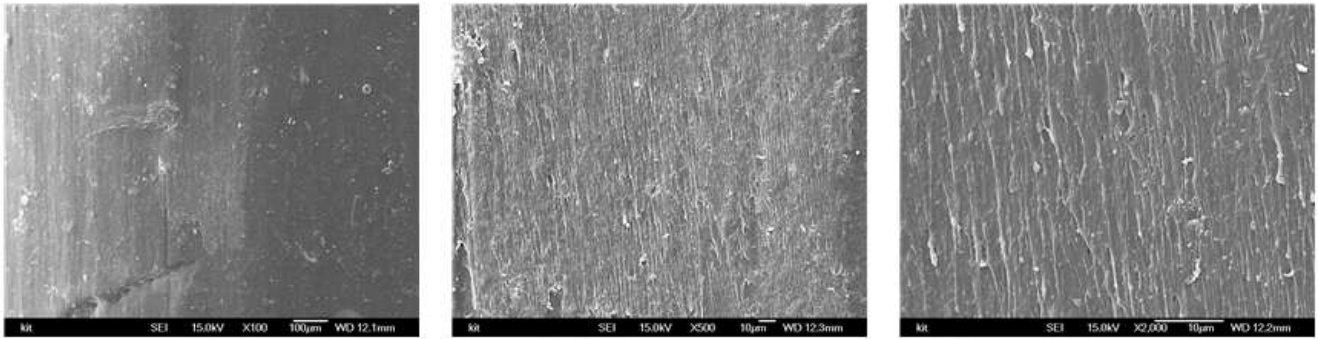
그림 17. SEM 촬영을 통한 PC 표면 미세구조



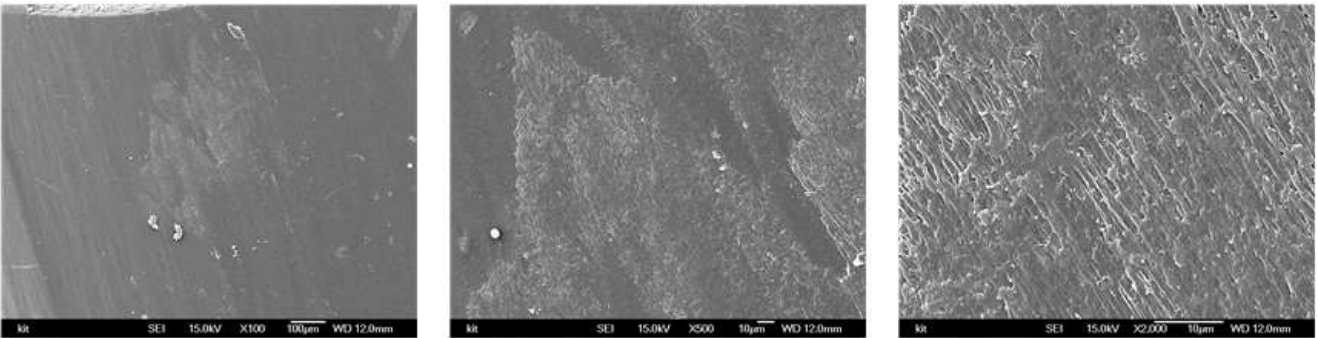
(a) ABS-Plain (100 / 500 / 2,000 배율)



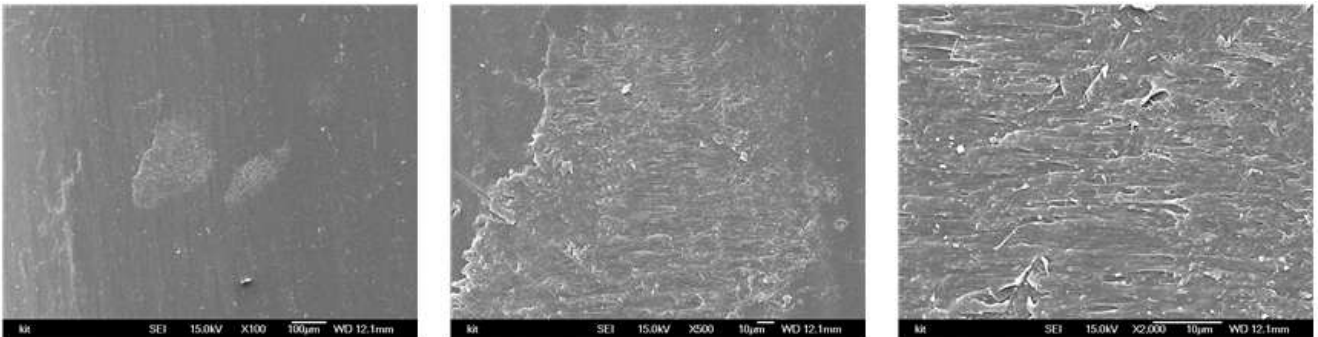
(b) ABS-25kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(c) ABS-50kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

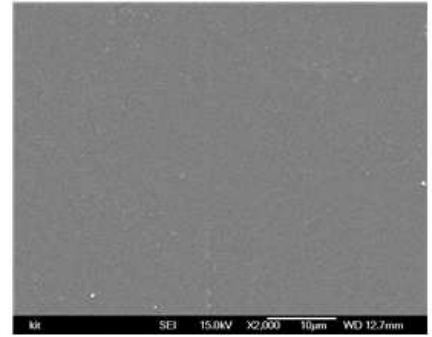
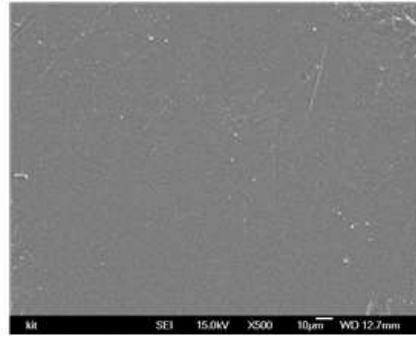
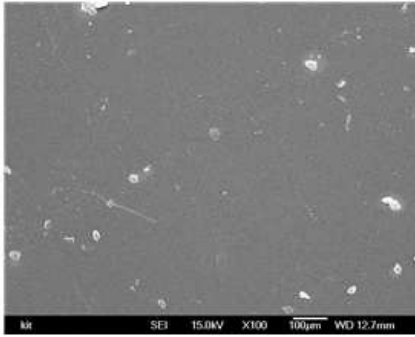


(d) ABS-75kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

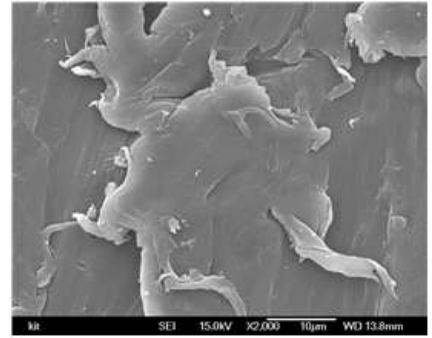
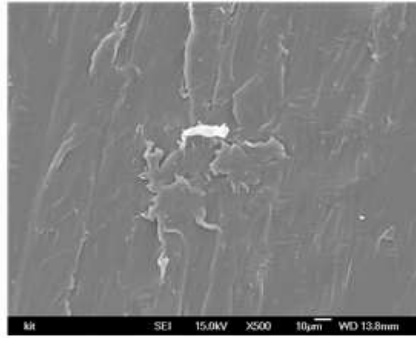
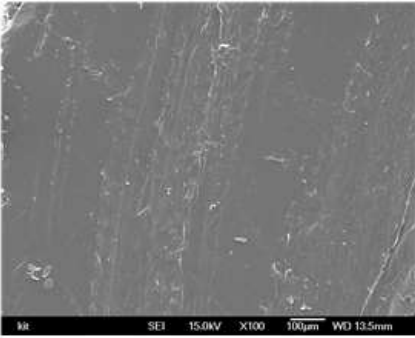


(e) ABS-100kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

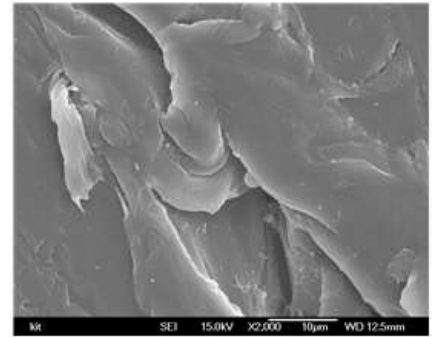
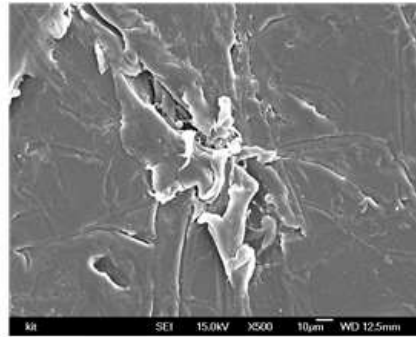
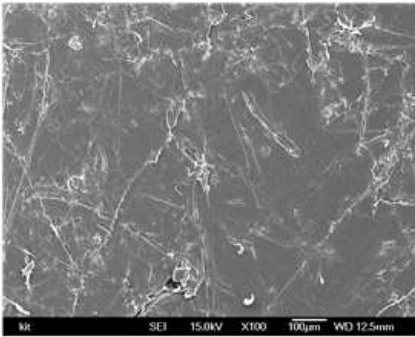
그림 18. SEM 촬영을 통한 ABS 표면 미세구조



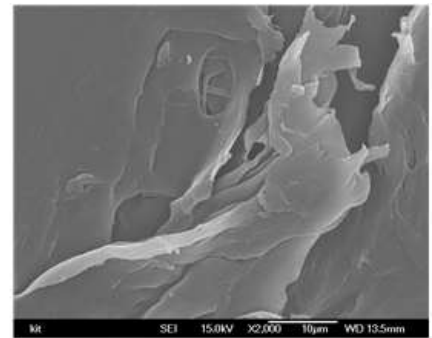
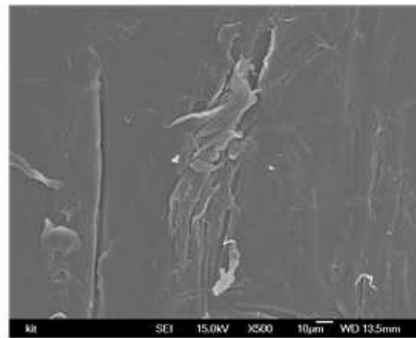
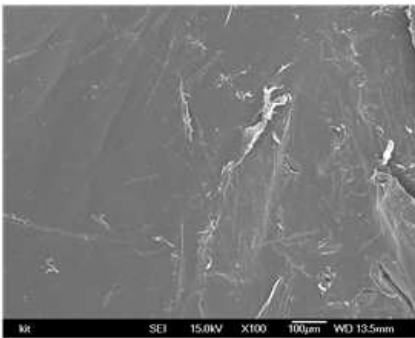
(a) PET-Plain (100 / 500 / 2,000 배율)



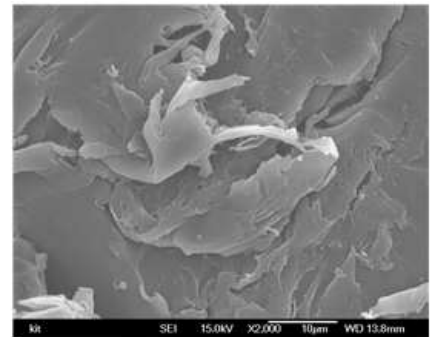
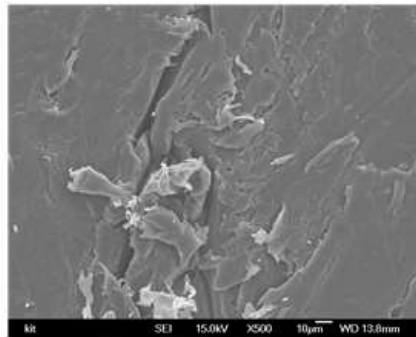
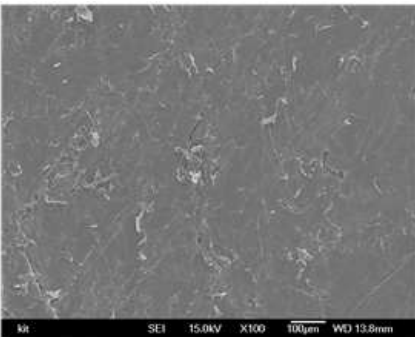
(b) PET-25kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(c) PET-50kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(d) PET-75kGy (100 / 500 / 2,000 배율)



(e) PET-100kGy (100 / 500 / 2,000 배율)

그림 19. SEM 촬영을 통한 PET 표면 미세구조

- SEM을 활용하여 감마선을 조사한 대표적인 플라스틱 5종의 골재 표면을 분석한 결과는 다음과 같음.
 - : 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재의 경우 5종 모두 매끄러운 상태임이 확인됨.
 - : 5종 시료 모두에서 감마선 조사량이 증가함에 따라 표면구조에 광범위한 손상을 나타내며 골재의 표면이 변형되어 거친 표면을 나타내는 것을 확인할 수 있음.
 - : 다만, 특정 선량(100 kGy) 이상 증가하면 표면의 입자들의 부분적 파괴가 발생하며, 표면구조의 열화가 발생하는 것으로 나타남.
 - : 이러한 표면구조의 열화는 플라스틱 골재의 물성을 악화시켜 시멘트 페이스트와의 계면 결합 성능의 저하를 야기할 수 있을 것으로 판단됨.
 - : SEM을 통해 관찰된 이러한 형태학적 변화는 플라스틱 골재의 내부의 고분자 사슬절단 및 가교 결합의 결과로 판단됨.
 - : 특히, 감마선 분해성 플라스틱인 PP 골재의 경우 사슬절단에 따른 전형적인 형상 변화가 관찰됨.
 - : 감마선 가교성 플라스틱인 PE 골재의 경우 가교결합에 따른 전형적인 형상 변화가 관찰됨.
 - : 이 외의 플라스틱 골재의 경우 감마선 조사에 따른 뚜렷한 형상 변화 없이 조사선량 증가에 따라 거친형상을 변화만 나타냄.
 - : 이러한 형상은 플라스틱 골재 표면에 더 많은 접촉 영역과 더 큰 표면적을 형성함. 따라서 변형된 플라스틱 골재의 표면은 시멘트 매트릭스와 지속적으로 상호작용하여 더욱 긴밀하게 결합되므로 기계적 물성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단됨.
 - : 결과적으로, 감마선 조사에 의해 개질된 플라스틱 입자는 시멘트 페이스트와의 계면 결합 강도를 향상시켜 물리적 상호작용의 결과로 시멘트 복합체에 적용 시 더 높은 기계적 강도를 확보하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

② 3차원 디지털 현미경을 통한 감마선 조사 전후 플라스틱 골재 표면 형상 변화 및 표면조도 측정

- 감마선 조사에 따른 영향을 가장 많이 받는 PP 골재를 대상으로 감마선 조사선량에 따라 변화하는 표면 형상을 그림 20에 나타내었으며, 표면조도 측정 결과를 그림 21 및 그림 22에 나타냄.

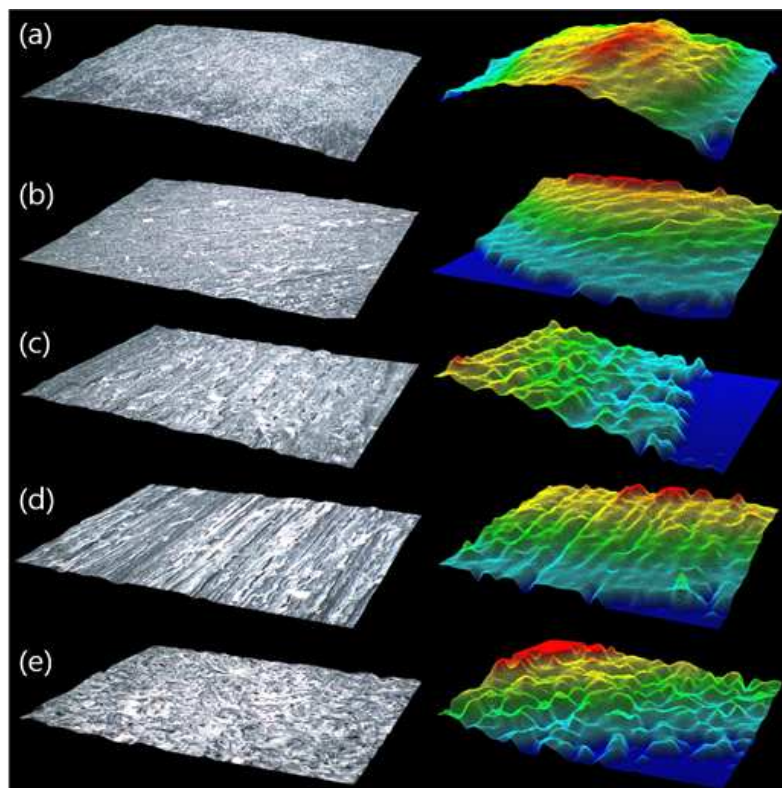
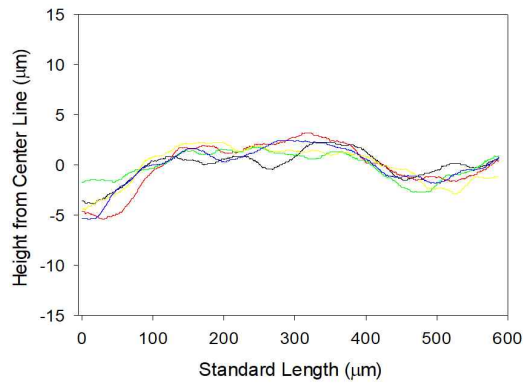
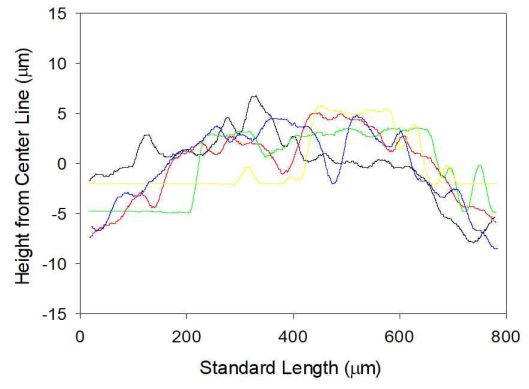


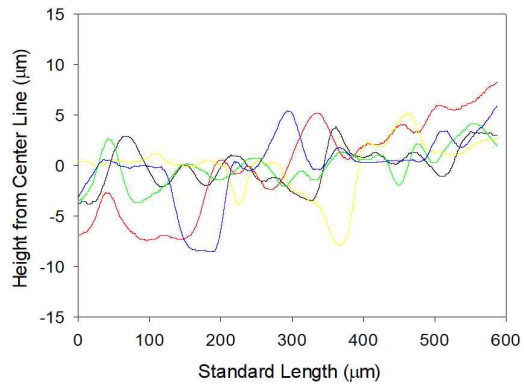
그림 20. 디지털 현미경을 통한 감마선 조사선량별 플라스틱 골재 형상변화:
 (a) 감마선 비조사; (b) 25kGy; (c) 50kGy; (d) 75kGy; (e) 100kGy



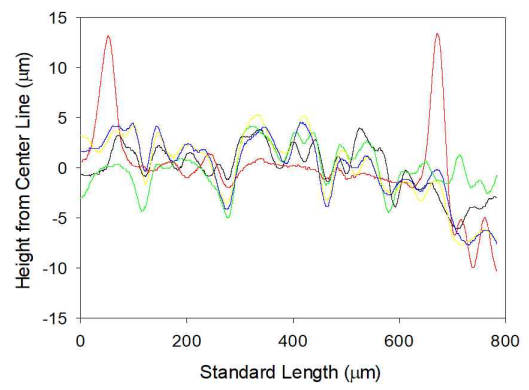
(a) 감마선 비조사



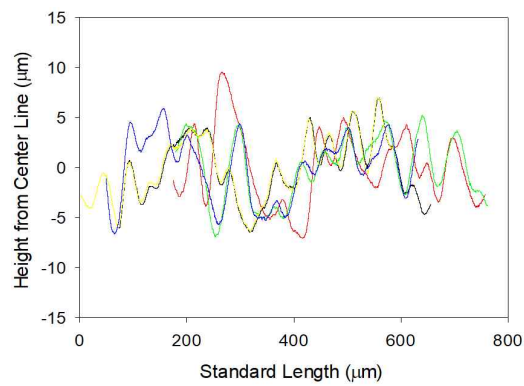
(b) 25 kGy



(c) 50 kGy



(d) 75 kGy



(e) 100 kGy

그림 21. 감마선 조사선량에 따른 개별 표면조도

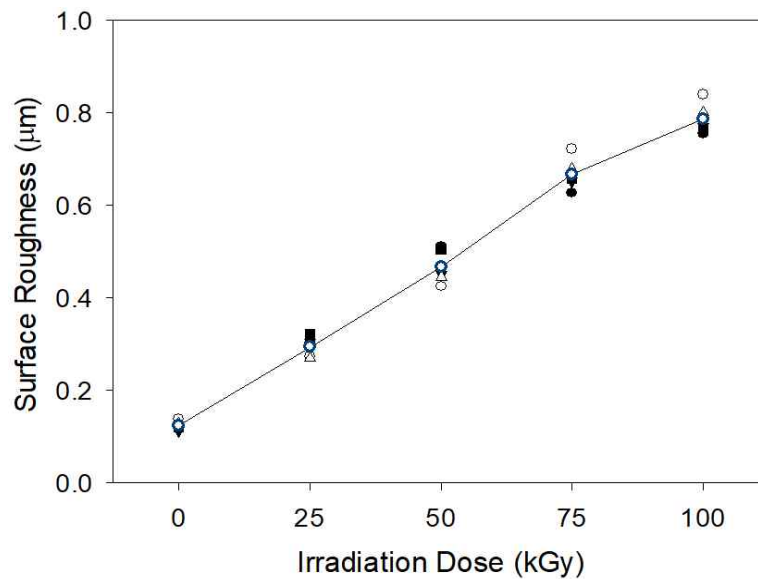


그림 22. 감마선 조사선량에 따른 표면조도 변화

- 감마선 조사선량 증가에 따른 플라스틱 골재의 3차원 표면의 형상 관찰을 통해 골재의 표면이 더욱 거칠어지는 것으로 확인됨.
- 표면조도를 정량적으로 분석하기 위해 중심선 평균 거칠기(Ra) 값을 측정하였으며, 측정된 결과를 토대로 감마선 조사선량 증가에 따라 골재 표면조도 값이 선형적으로 증가하는 것으로 나타남.
- 이는 SEM 촬영을 통한 분석결과와 마찬가지로 감마선 조사가 플라스틱 골재의 성능향상에 영향을 미치는 것으로 판단됨.

- ☑ **감마선을 조사하지 않은 경우 플라스틱 골재의 종류와 관계없이** 일반적으로 플라스틱 재료가 가진 표면 특성인 **매끈한 표면을 관찰**할 수 있었음.
- ☑ 다만, **감마선을 조사한 경우** 모든 플라스틱에서 **감마선 조사선량 증가에 따라 더욱 거친 표면 형상**으로 변화되며, 이를 정량적으로 분석한 **표면조도 값도 마찬가지로 증가**한 것으로 나타남.
- ☑ 이러한 **골재 표면의 물리적 변화는 감마선 조사로 유도된 가교결합 및 산화적 분해 반응에 따른 결과**로, 이를 시멘트 복합체에 적용할 경우 **플라스틱 골재의 거친 표면**으로 인해 **시멘트 페이스트와의 물리적 계면 결합성능이 향상**될 수 있을 것으로 판단됨.

(나) 감마선 조사 플라스틱 골재의 화학적 특성 분석

□ FT-IR 분석을 통한 감마선 조사 전후 플라스틱 골재 화학적 특성 분석

- 감마선 조사에 의한 플라스틱 입자의 화학적 특성은 BRUKER 사의 HYPERION 2000 장비에 결합된 VERTEX 80v 장비를 사용하여 FT-IR 분석을 통해 규명하였음.
- 표 7과 같이 기존 문헌으로부터 FT-IR 스펙트럼에 대한 흡수밴드를 정리하여 각각의 플라스틱에 대한 특성 분석을 실시함.
 - : 분석은 PP, PE, PC, ABS, PET 5종에 대하여 실시함.
 - : FT-IR 분석을 통하여 감마선 조사에 따른 플라스틱 골재의 가교 및 분해·산화 반응이 이루어지고 있는지를 분석함
- 플라스틱 종류별 감마선 조사선량에 따른 FT-IR 스펙트럼 변화를 비교하여 그림 23~27에 나타냄.

표 7. 기존 문헌에서 작성된 FT-IR 스펙트럼에 대한 흡수밴드 목록

플라스틱 종류	화학구조	흡수밴드 피크	흡수 피크에서 진동의 종류
Polypropylene (PP)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	2950 (a) 2915 (b) 2838 (c) 1455 (d) 1377 (e) 1166 (f) 997 (g) 972 (h) 840 (i) 808 (j)	C-H stretch C-H stretch C-H stretch CH ₂ bend CH ₃ bend CH bend, CH ₃ rock, C-C stretch CH ₃ rock, CH ₃ bend, CH bend CH ₃ rock, C-C stretch CH ₂ rock, C-CH ₃ stretch CH ₂ rock, C-C stretch, C-CH stretch
Polyethylene (PE)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	2915 (a) 2845 (b) 1472 (c) 1462 (d) 730 (e) 717 (f)	C-H stretch C-H stretch CH ₂ bend CH ₂ bend CH ₂ rock CH ₂ rock

Polyethylene Terephthalate (PET)		1713 (a) 1241 (b) 1094 (c) 720 (d)	C=O stretch C-O stretch C-O stretch Aromatic CH out of plane bend
Polycarbonate (PC)		2966 (a) 1768 (b) 1503 (c) 1409 (d) 1364 (e) 1186 (f) 1158 (g) 1013 (h) 828 (i)	C-H stretch C=O stretch Aromatic ring stretch Aromatic ring stretch CH ₃ bend C-O stretch C-O stretch Aromatic CH in of plane bend Aromatic CH out of plane bend
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)		2922 (a) 1602 (b) 1494 (c) 1452 (d) 966 (e) 759 (f) 698 (g)	C-H stretch Aromatic ring stretch Aromatic ring stretch CH ₂ bend =C-H bend Aromatic CH out of plane bend, =CH bend Aromatic CH out of plane bend

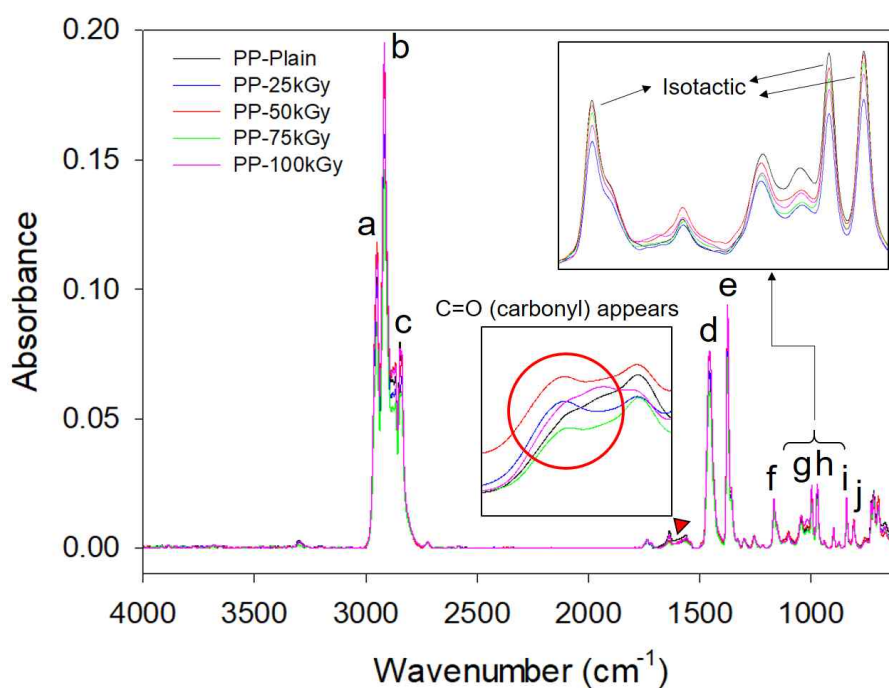


그림 23. 감마선 조사선량에 따른 PP 골재의 FT-IR 스펙트럼

- PP 골재의 FT-IR 분석결과, 감마선 비조사된 샘플의 FT-IR 스펙트럼의 1166과 977cm⁻¹ 부근에서 관찰된 피크는 분석에 사용된 플라스틱 골재가 PP 재료의 전형적인 isotactic polymer임을 입증함.
: 이러한 식별 피크의 세기는 감마선 조사선량이 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 감마선에 의한 사슬전단의 결과임을 시사함.
- 또한, 모든 조사선량 수준에서 1650cm⁻¹ 대역에서 새로운 특성 밴드가 나타났다. 이는 카르보닐기

(carbonyl) C=O 결합에 해당하며 C=O 결합의 생성은 산화가 진행되었음을 나타냄.

: 이는 PP 골재의 C-H 및 C-C 결합이 사슬절단의 결과이고 결과적으로 자유라디칼 및 이온화된 종이 형성된 것에 기인함.

- 자유라디칼과 공기중의 산소와의 반응은 중합체 사슬이 가교결합 되는 것을 허용하지 않으며, 이로 인해 PP 골재의 사슬절단 반응이 가교결합보다 우세하게 작용함.

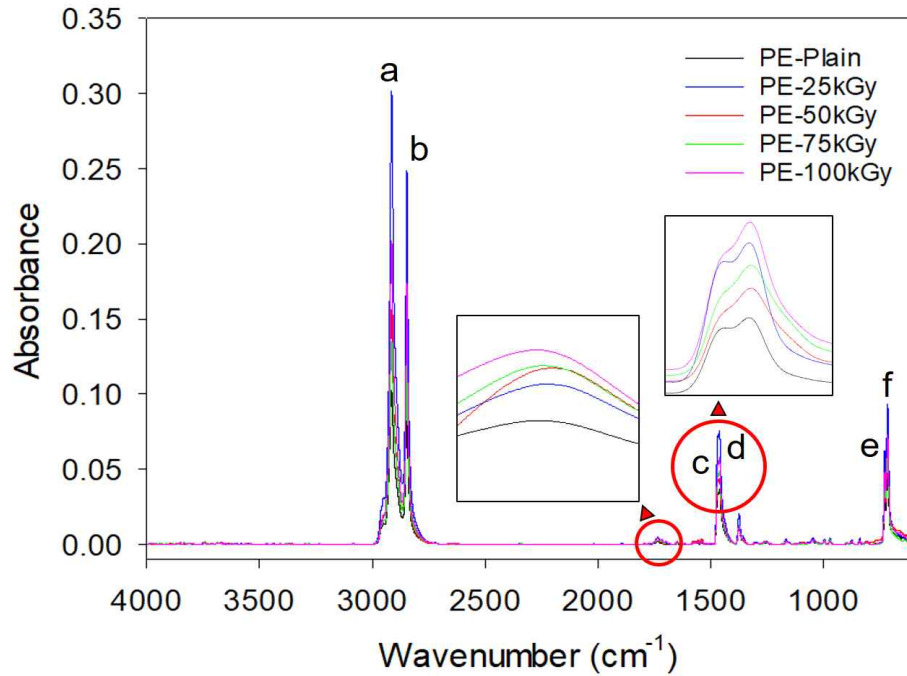


그림 24. 감마선 조사선량에 따른 PE 골재의 FT-IR 스펙트럼

- PE 골재의 FT-IR 분석결과, 조사되지 않은 샘플의 경우 고분자 구조의 side chain이 자유롭게 이동할 수 있기 때문에 1462cm^{-1} 의 C-C 신축 피크가 넓은 반면 조사된 샘플의 경우 피크가 날카롭게 변화됨.
- 또한, 1700cm^{-1} 영역에서 C=O 신축 피크는 조사선량이 증가함에 따라 증가함.
- 이러한 C=O 스트레칭 피크의 증가는 감마선 조사에 의한 가교 반응에 기인하여 나타나는 현상임.

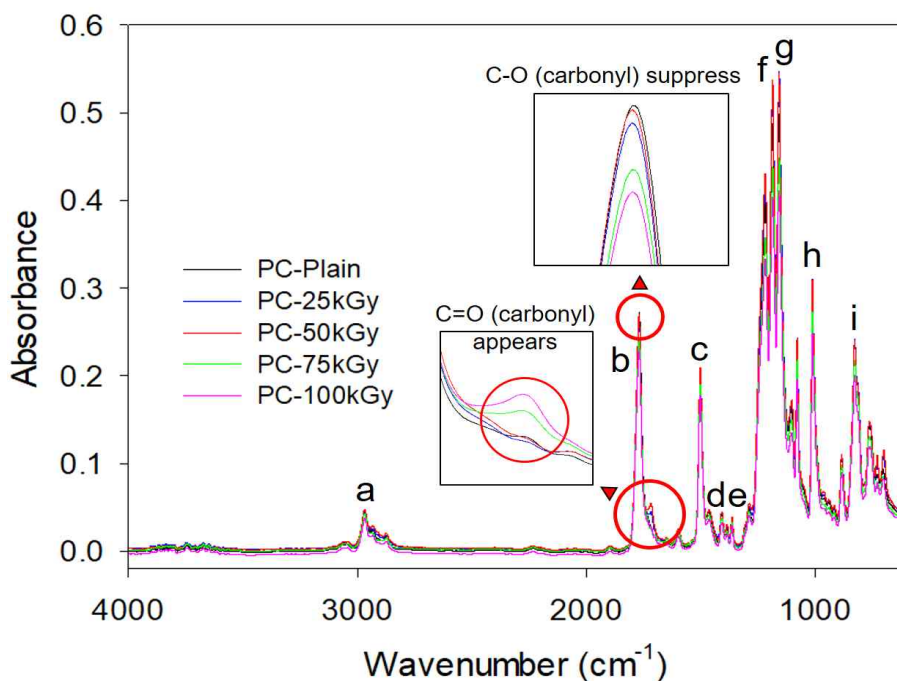


그림 25. 감마선 조사선량에 따른 PC 골재의 FT-IR 스펙트럼

- PC 골재의 FT-IR 분석결과, 감마선이 조사되면 1700cm^{-1} 의 피크는 감마선 조사에 의해 억제되고 1768cm^{-1} 에서 새로운 피크가 형성되는데 이는 C=O 결합에 의한 신축 진동으로 식별될 수 있음.
- : 이로 인해 C-O의 결합 에너지가 C=O의 결합 에너지보다 낮기 때문에 C=O 결합에 비해 C-O 결합이 쉽게 끊어짐.
- : 요약하면, 감마선 조사선량이 증가할수록 1700cm^{-1} 주변의 새로운 C=O 신축 진동과 방향족 탄화 수소를 형성시켜 강도가 증진되는 것으로 사료됨.

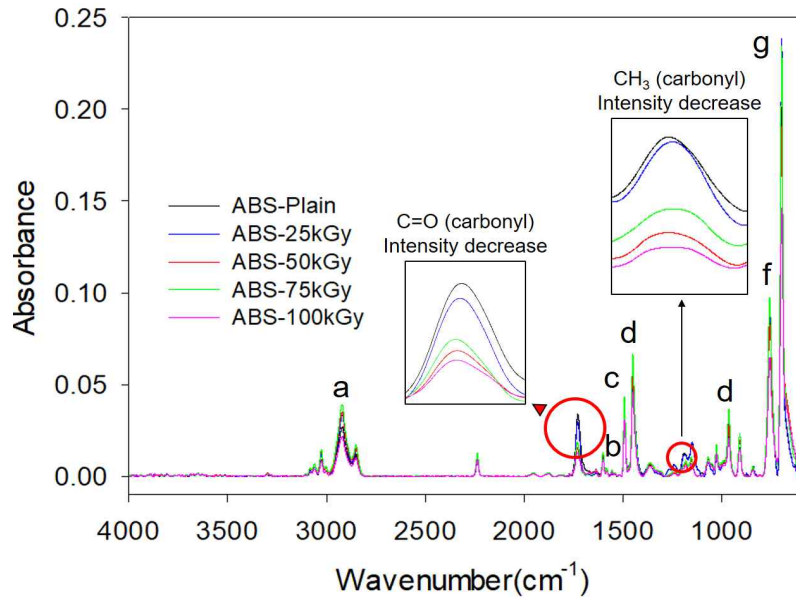


그림 26. 감마선 조사선량에 따른 ABS 골재의 FT-IR 스펙트럼

- ABS 골재의 FT-IR 분석결과, 감마선 조사선량 증가에 따라 1768cm^{-1} 부근에서 C=O 결합 및 1186cm^{-1} 부근에서 C-O 결합의 세기가 감소하는 것으로 나타남.
- : 이는 PC 골재 표면의 사슬 절단에 의한 결과로 판단됨.

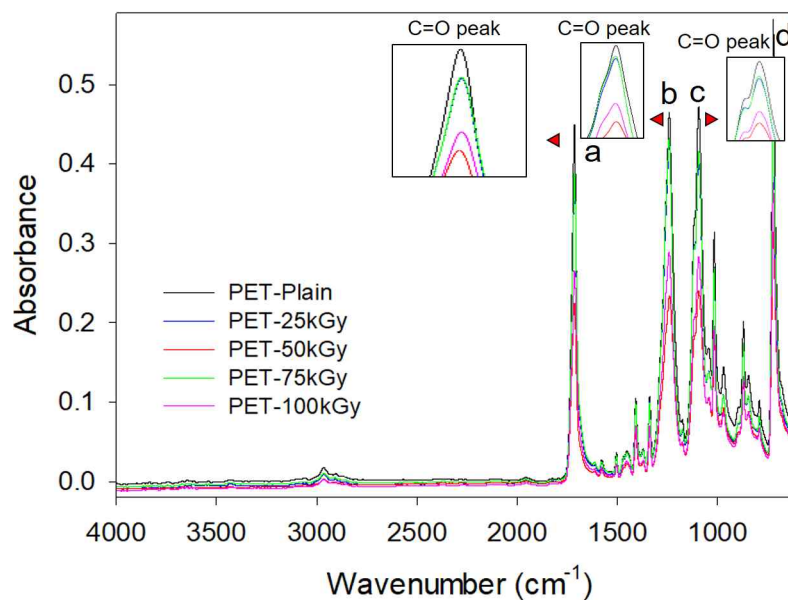


그림 27. 감마선 조사선량에 따른 PET 골재의 FT-IR 스펙트럼

- PET 골재의 FT-IR 분석 결과, 1713 , 1241 및 1094cm^{-1} 부근에서 산소 관능기인 C=O의 피크가 감마선량 증가에 따라 감소하는 것으로 나타남.

○ PET 샘플에 감마선을 조사하면 자유라디칼, 이온 및 중성 원자가 생성된다. 결과적으로 PET 표면 극성의 변화를 유도함.

: 이는 대기에 의한 산화가 진행되는 동안 OH 및 COOH 결합이 형성되기 때문임.

○ 공기 중의 산소는 감마선에 의해 유도된 자유라디칼과 반응하여 C=O 결합을 형성함.

○ H-C=O 밴드에서 방출된 산소는 표면을 산화시키고 친수성을 향상시킬 수 있음.

○ 또한, 극성을 향상시키는 자유라디칼 -C-O-가 방출될 수 있음.

: PET에 대한 감마선 조사는 표면의 화학구조 변화로 표면의 극성 및 친수성을 증가시킬 수 있음.

○ 결과적으로 표면의 친수성 증가는 시멘트 페이스트와의 산화를 촉진시켜 계면의 결합이 더욱 조밀해지고 부착성능을 개선시킬 수 있음.

✔ 플라스틱 골재 종류별 FT-IR 분석결과를 종합적으로 분석한 결과, 감마선을 조사함에 따라 특성 피크들의 세기가 증가 또는 감소하는 것으로 나타났으며 이는 감마선 조사 시 플라스틱 재료의 화학적 구조가 변화하였다는 것을 시사함.

✔ 골재 표면의 관능기는 골재와 시멘트 페이스트 간 계면 결합과 기계적 특성을 향상시키는 중요한 요인 중 하나이며, 구조적 안정성을 개선시키는 관능기에 대한 추가적인 분석 및 조사가 필요할 것으로 판단됨.

(다) 감마선 조사 플라스틱 골재의 내열특성 분석

□ 열중량분석기(TGA) 분석을 통한 감마선 조사 전후 플라스틱 골재 내열특성 분석

○ 감마선 영향에 따른 플라스틱 골재의 열적 특성의 분석을 위해 열중량분석기(TGA)를 이용하여 감마선 조사선량에 따른 열분해 온도(Td)의 변화를 측정하고 특성 분석을 실시함.

: 분석은 PP, PE, PC, ABS, PET 5종에 대하여 실시함.

: 분석을 위한 조건은 승온 속도 20℃/min, 최고온도 800℃까지의 범위로 설정함.

○ 감마선 조사에 의한 플라스틱 종류별 열분해온도(Td)의 변화를 그림 28~32에 나타냄.

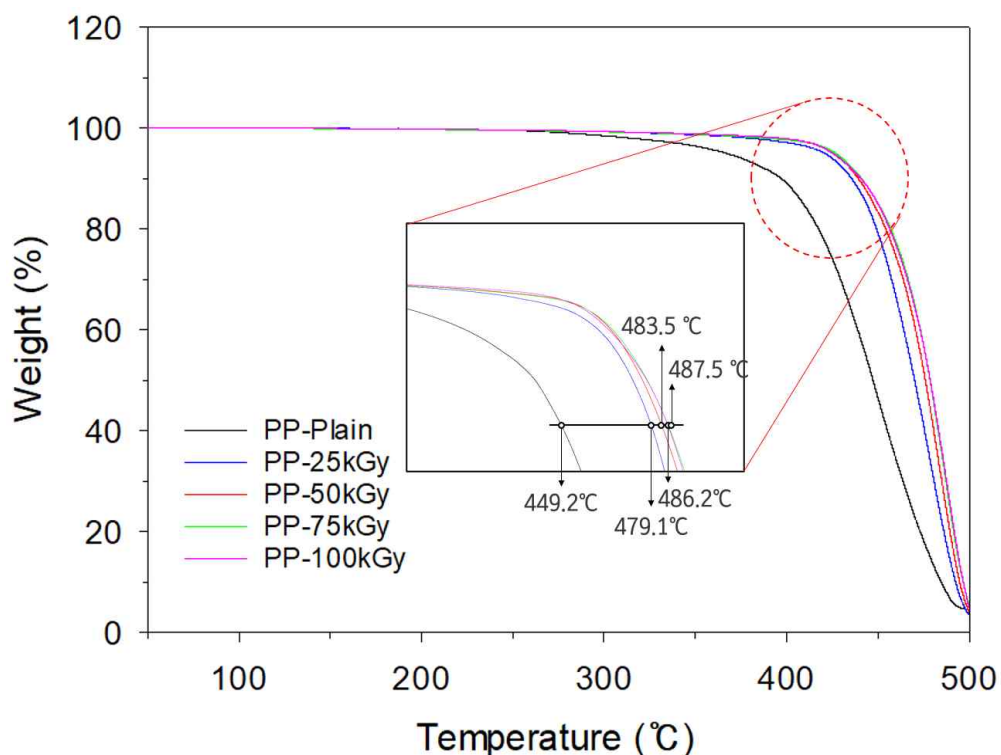


그림 28. 감마선 조사선량에 따른 PP 골재의 TGA 곡선

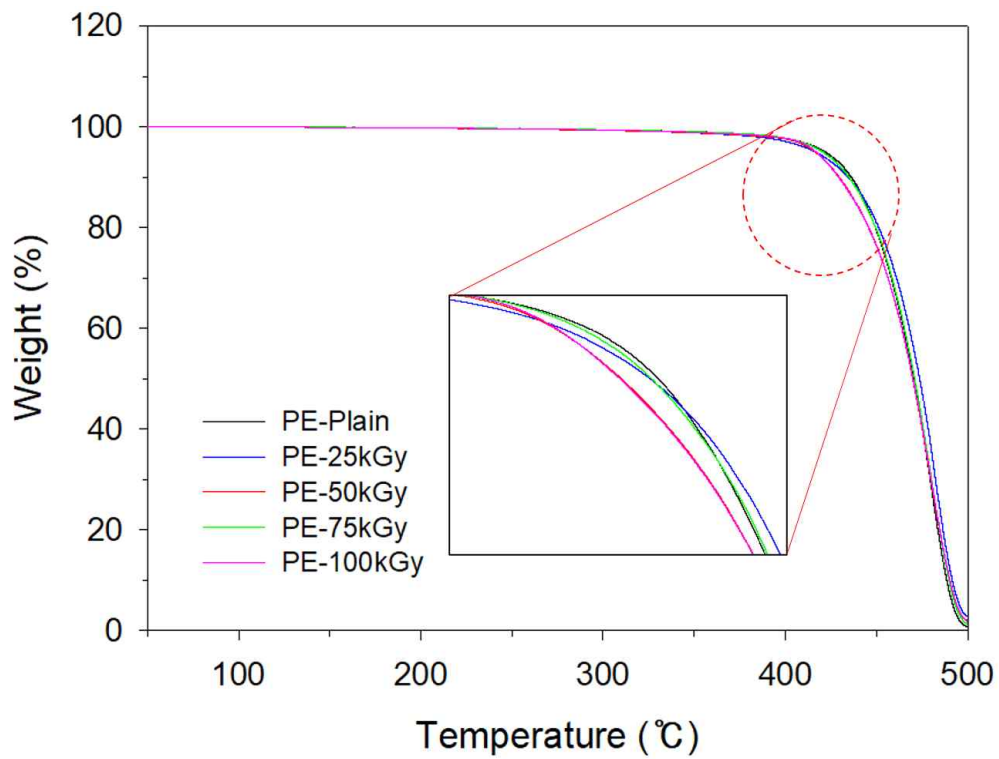


그림 29. 감마선 조사선량에 따른 PE 골재의 TGA 곡선

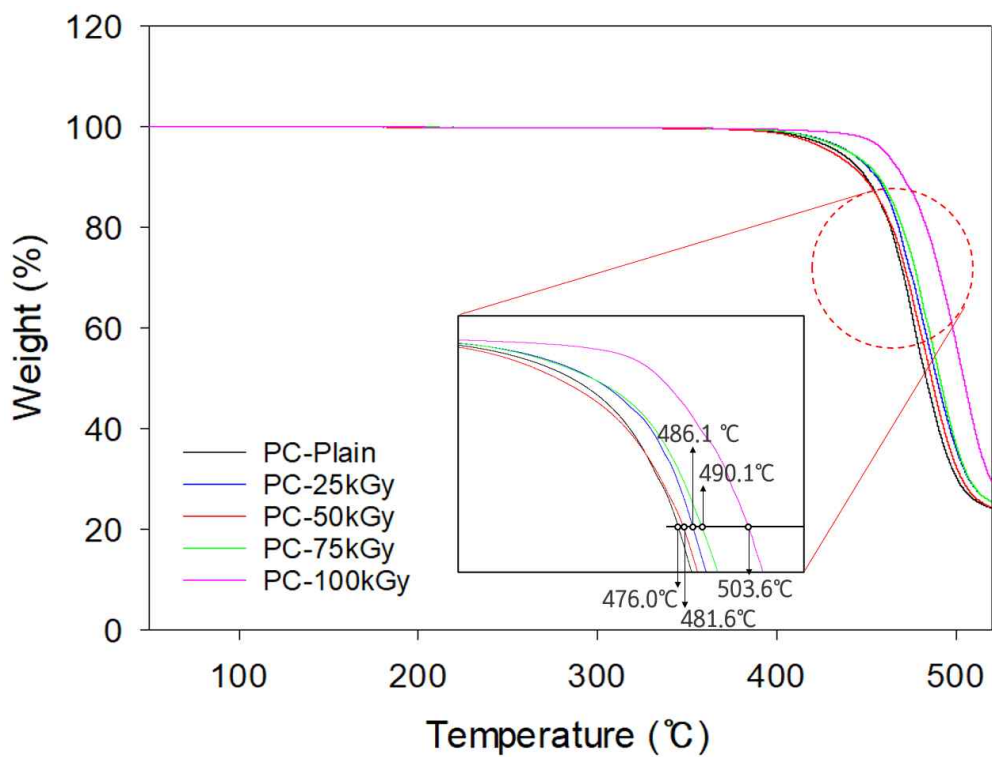


그림 30. 감마선 조사선량에 따른 PC 골재의 TGA 곡선

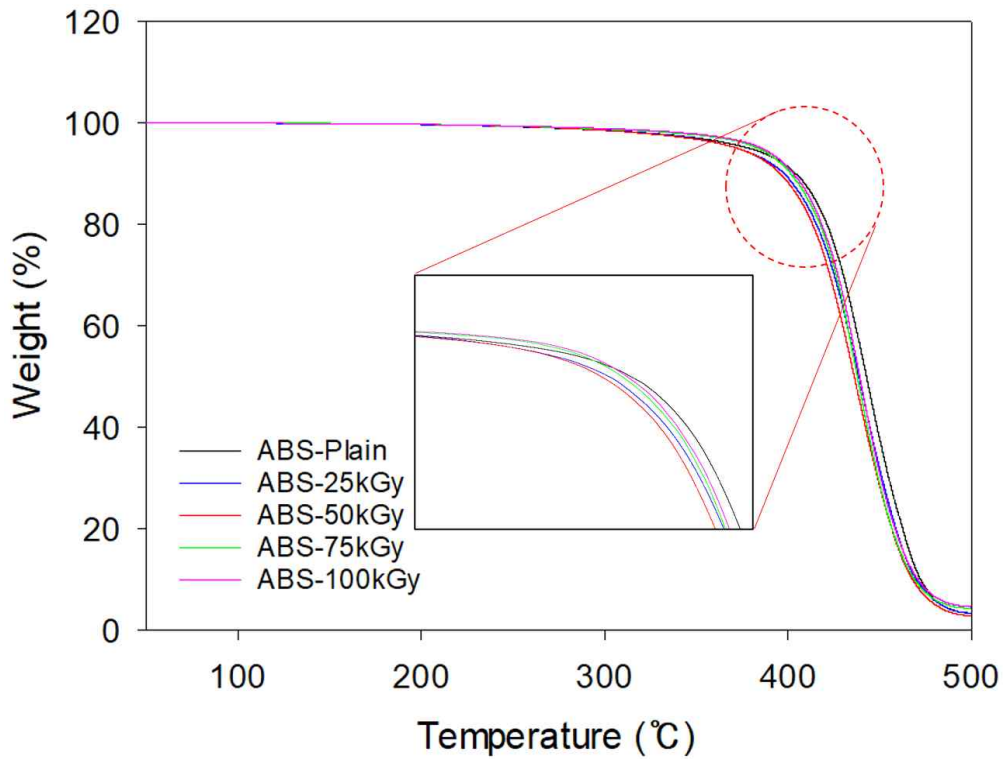


그림 31. 감마선 조사선량에 따른 ABS 골재의 TGA 곡선

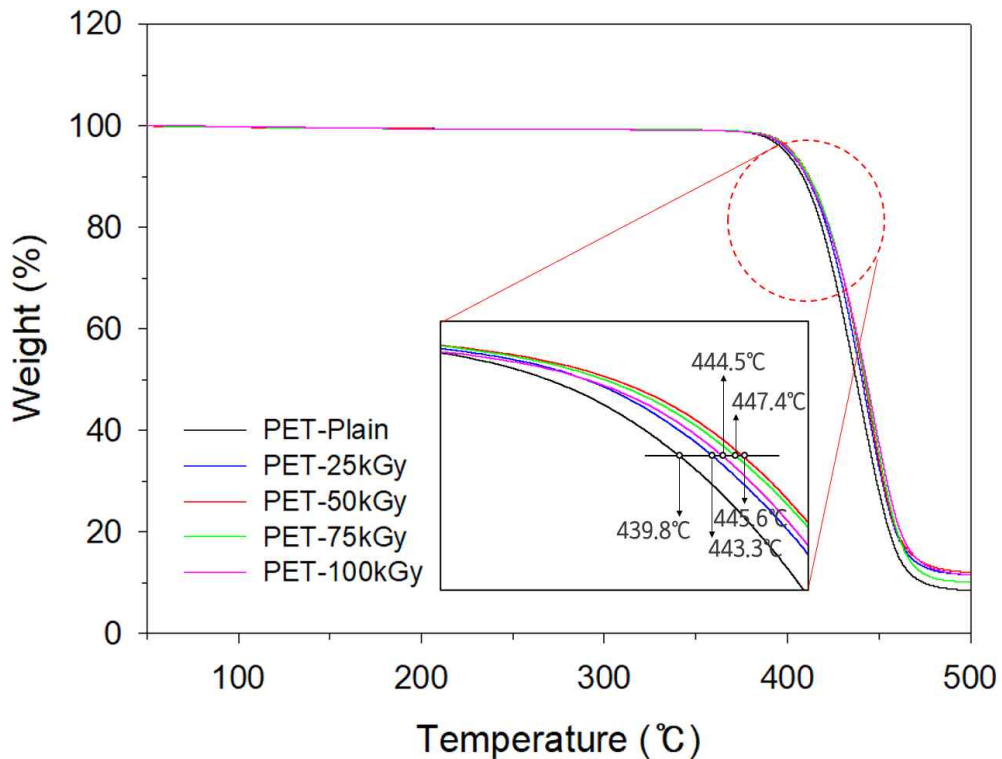


그림 32. 감마선 조사선량에 따른 PET 골재의 TGA 곡선

- 감마선 조사선량에 따른 플라스틱 골재의 종류별 내열특성 분석 결과는 다음과 같음.
: 감마선 조사선량에 따른 초기 열분해 거동은 어느 시료든 비슷하게 나타났으나 열분해가 급격히 일어나는 350~450°C 구간 이후에는 열분해 감소율이 감마선 조사선량에 따라 미세하게 차이가 나는 것이 확인되었으며, 이로 인해 감마선 조사선량에 따른 잔류량 차이가 발생하게 됨.
- PP, PC 및 PET의 경우 감마선 조사선량 증가에 따라 지속적으로 열분해온도(Td)가 증가하여 열안정성이 향상된 것으로 확인되었음.
- 다만, PE 및 ABS의 경우 감마선 조사선량과 무관하게 열분해온도는 불규칙적으로 나타남.

- ☑ 일부 플라스틱 종류에서 감마선 영향에 따라 열분해온도가 증가하여 열안정성 향상에 영향을 미치는 것으로 확인됨.
- ☑ 특히, PP의 경우 열안정성 향상 효과가 가장 우수했으며, 감마선 조사선량 증가에 따라 열분해온도가 449.2℃에서 최대 487.5℃까지 증가하였음.
- ☑ 이는 열분해가 지연될 정도의 거대 분자 사슬 네트워크 구조가 감마선 조사 동안 골재 내에 형성되었기 때문이라고 판단됨.
- ☑ 플라스틱에 감마선을 조사함으로써 화재 시 건물의 붕괴시간 지연에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단됨.

(라) 감마선 조사 플라스틱 골재의 결정구조 분석

□ X선회절(XRD) 분석을 통한 감마선 조사 전후 플라스틱 골재 결정구조 분석

- 감마선 조사선량에 따른 플라스틱 골재의 결정성은 Rigaku 사의 SmartLab 장비를 사용하여 X-ray diffraction(XRD) 분석을 통해 규명하였으며, 분석결과를 토대로 강도 변화에 기여할 수 있는 골재의 결정화도 변화 분석을 수행함.
: 실험 조건은 회절각 5~65°, 스캔속도 4 deg/min, 전압 45 kV 및 전류 200 mA로 설정하여 감마선 조사에 따른 영향을 가장 많이 받는 PP 골재를 대상으로 실시함.
- 감마선 조사선량에 따른 골재 결정화도 분석결과를 그림 33에 나타냄.

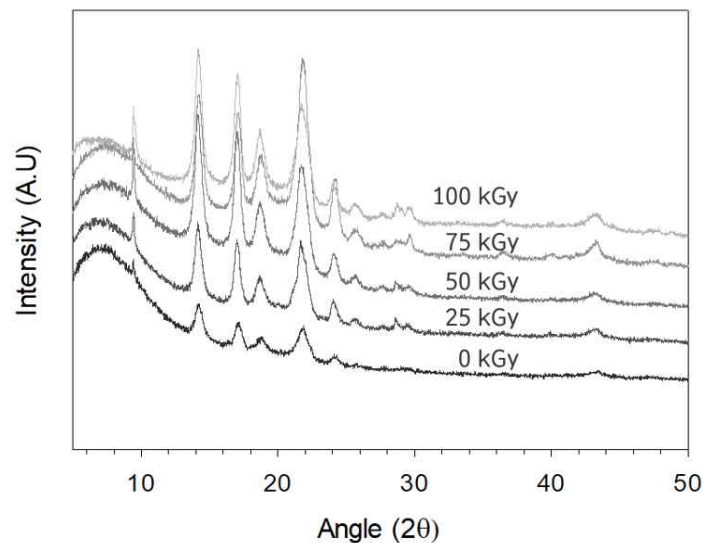


그림 33. 감마선 조사선량에 따른 X-ray diffraction

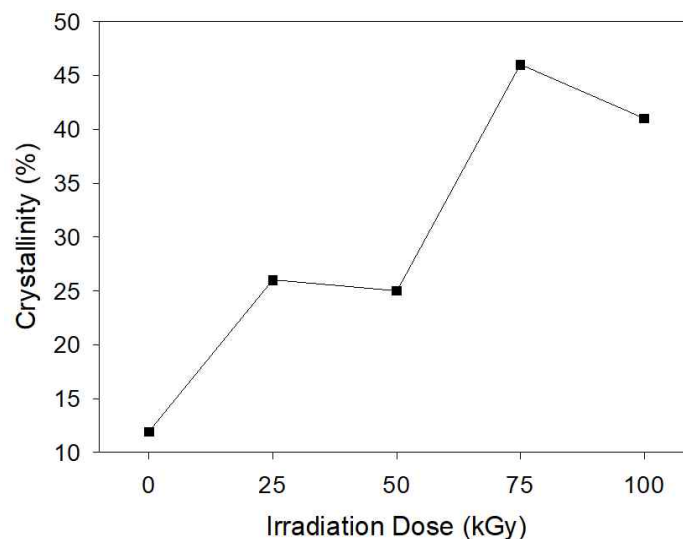


그림 34. 감마선 조사선량에 따른 결정도

- XRD 분석을 통해 감마선 조사선량 증가에 따라 PP 샘플의 회절 강도가 증가하는 것으로 나타남.
- PP 샘플의 결정성은 감마선에 의해 유도되는 사슬절단의 결과로 인한 정렬된 분자구조 형성에 기인하며, 감마선 조사선량의 증가에 따라 그림 34와 같이 플라스틱 재료의 결정성이 증가하는 것으로 나타남.
- ： 이는 감마선 조사에 따라 고분자 구조의 변형을 유도하여 플라스틱 재료의 결정성이 변화한 것으로, 이러한 결정성이 증가된 플라스틱 골재는 비조사 샘플보다 더 단단한 구조를 가지며 시멘트 복합체에 혼입 시 기계적 강도 증진에 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

✓ XRD 분석 결과, 감마선 조사로 인한 사슬절단 반응으로 플라스틱 표면의 결정화 유도를 통해 표면경도를 향상시켜 궁극적으로 시멘트 복합체에 골재로 첨가 시 강도 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단

(마) 감마선 조사 플라스틱 골재의 물리적 특성 분석

□ 단위용적질량 및 흡수율 시험을 통한 감마선 조사 전후 플라스틱 골재 물리적 특성 분석

- 감마선 영향에 따른 플라스틱 골재의 물리적 특성 분석을 위해 KS F 2503의 시험방법에 준하여 표 8, 표 9 및 그림 35와 같이 각 플라스틱 골재의 단위용적질량 및 흡수율을 측정함.
- ： 분석은 조사선량 0kGy, 25kGy, 50kGy로 조사된 PP, PE, PET, PC, ABS, HDPE, LDPE의 7종을 대상으로 하였음.
- ： 감마선 조사에 따른 플라스틱 골재의 가교 및 분해·산화 반응의 영향을 분석함.

표 8. 감마선 조사선량별 플라스틱 골재의 단위용적질량 변화

플라스틱 종류	형태	0 kGy (kg/m³)	25 kGy (kg/m³)	0kGy 대비 변화율 (%)	50 kGy (kg/m³)	0kGy 대비 변화율 (%)
PP	원주형	540	550	1.9	550	1.9
PE	원주형	530	540	1.9	540	1.9
PET	플레이크형	350	360	2.9	370	5.7
PC	원주형	700	700	0	710	1.4
ABS	원주형	640	640	0	650	1.6
LDPE	원주형	500	520	4.0	520	4.0
HDPE	원주형	550	560	1.8	560	1.8

표 9. 감마선 조사선량별 플라스틱 골재의 흡수율 변화

플라스틱 종류	형태	0 kGy (%)	25 kGy (%)	0kGy 대비 변화율 (%)	50 kGy (%)	0kGy 대비 변화율 (%)
PP	원주형	0.3	0.3	0	0.3	0
PE	원주형	0.7	0.7	0	0.7	0
PET	플레이크형	1.1	1.1	0	1.1	0
PC	원주형	0.7	0.7	0	0.7	0
ABS	원주형	0.8	0.8	0	0.8	0
LDPE	원주형	0.6	0.6	0	0.6	0
HDPE	원주형	0.4	0.4	0	0.4	0

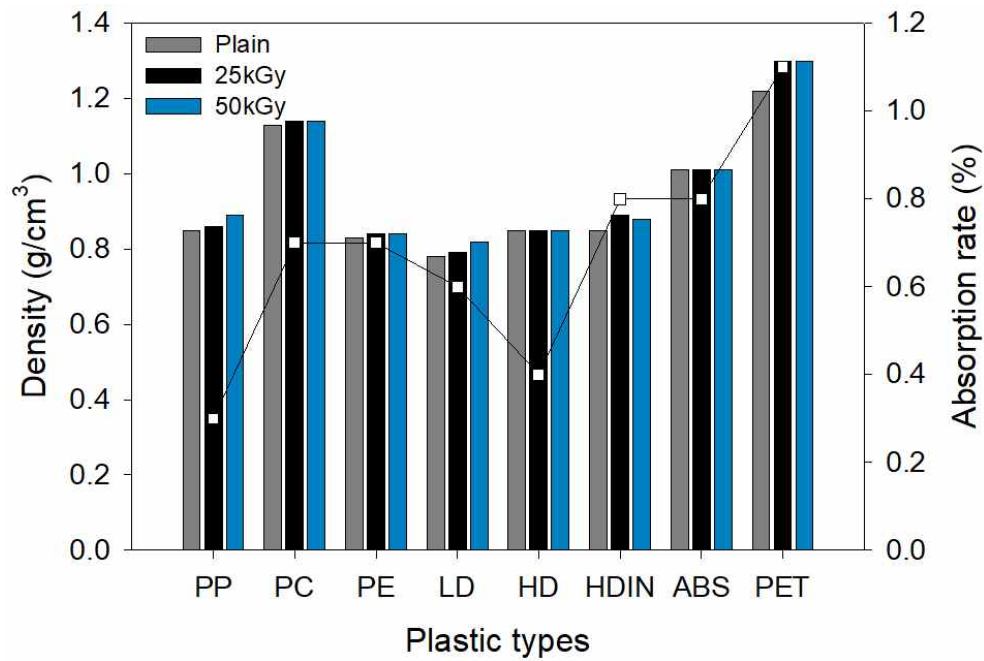


그림 35. 감마선 조사선량에 따른 플라스틱 종류별 밀도 및 흡수율

- 감마선 조사선량에 따른 플라스틱 골재의 종류별 단위용적질량 및 흡수율을 분석한 결과는 다음과 같음.
- ： 모든 플라스틱 골재가 감마선을 조사함에 따라 단위용적질량이 약간 증가하는 경향이 확인되었으며, 이는 감마선을 조사함에 따라 플라스틱 내부의 조직이 다소 치밀해짐에 의한 영향이라 판단됨.

- ☑ 감마선 조사에 따른 플라스틱 골재의 흡수율 변화는 확인되지 않음에 따라, 감마선 조사가 골재 표면 또는 내부에 별도의 공극을 만들거나 깊이 있는 손상을 부여하지 않았다고 판단됨.
- ☑ 각 플라스틱 골재별 약간의 흡수율이 발생함은 플라스틱 펠릿 제조 시 중앙의 작은 공극이 형성되어 극히 일부의 수분이 포함됨에 따른 것이라 판단됨.



시험성적서

접 수 번 호 : QT20-00300

접 수 일 자 : 2020년 10월 13일

시 료 명 : 플라스틱 골재

시료채취일 : -

채 취 장 소 : -

시료채취자 : -

의뢰인 : 서울특별시 서초구 남부순환로 319길 7(서초동)

생 산 자 : -

(재)한국건설생활환경시험연구원 강용학

용 도 : 과제 성능 평가용

- 결 과 -

연번	시험종목	시험방법	시험결과		
			0kg	25kg	50kg
1	PC - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	700	700	710
2	PC - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.7	0.7	0.7
3	PP - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	540	550	550
4	PP - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.4	0.4	0.4
5	PET - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	350	360	370
6	PET - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	1.1	1.1	1.1
7	ABS - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	640	640	650
8	ABS - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.8	0.8	0.8
9	PE - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	530	540	540
10	PE - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.7	0.7	0.7

과 제 명 : 감마선 조사 기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조 및 이를 활용한 40MPa급 고강도 경량 시멘트 복합체 개발
(과제번호) : 20CTAP-C157794-01

2020년 10월 23일

작성자 : 송락균

기술책임자 : 차성운

(주) 한국건설기술시험연구원



주소 : 경기도 화성시 정남면 보통내길 253번길 43-16

전화번호 : 031)353-1252

비고 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.

페이지 1/2

Korea Construction Technology & Test Researcher (주) 한국건설기술시험연구원



시험성적서

시 료 명 : 플라스틱 골재

접 수 번 호 : QT20-00300

- 결 과 -

연번	시험종목	시험방법	시험결과		
			0kgy	25kgy	50kgy
11	LDPE - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	500	520	520
12	LDPE - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.6	0.6	0.6
13	HDPE - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	550	560	560
14	HDPE - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.4	0.4	0.4
15	PP-injection - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	550	560	560
16	PP-injection - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.3	0.3	0.3
17	HDPE-injection - 단위용적질량 (kg/m ³)	의뢰자제시	560	570	570
18	HDPE-injection - 흡수율 (%)	KS F 2503:2019	0.8	0.8	0.8

비고 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.

페이지 2/2

(바) Calibration을 통한 민감도 분석

□ 플라스틱 골재 성능개선 효과 확인을 위한 평가방법 제시

○ 감마선 영향에 따른 플라스틱 골재의 물리·화학적 특성에 대한 유의미한 기기분석 데이터 확보를 위하여 분석 값에 대한 편차를 줄이기 위한 수준과 방법을 다음과 같이 제시함.

: 플라스틱 골재 표면구조 및 형상 변화를 확인하기 위한 SEM 비율의 선정

- 플라스틱 골재 표면의 거칠기 분석 배율 : 100배율 확대 시 확인 가능함.

- 플라스틱 골재 표면의 사슬구조 및 결정화 분석 배율 : 2,000배율 확대 시 확인 가능함.

: FT-IR 분석 시 플라스틱 골재의 가교 반응으로 형성되는 흡수밴드 피크 및 분해 반응으로 형성되는 관능기 Intensity의 증감 분석을 위한 흡수밴드 피크 목록 제시

- 표 7의 기존 문헌 분석을 통한 FT-IR 스펙트럼의 흡수밴드 목록 작성함.

: 내열특성 분석을 위한 TGA 분석 조건 수립

- 기존 승온속도 20℃/min, 최고온도 800℃로 설정에 대해 승온속도를 10℃/min으로 제어하고 최고온도를 600℃로 설정하여 신뢰성 있는 데이터를 확보함.

③ 플라스틱 골재 성능개선을 위한 최적 골재 조건 도출

(가) 시멘트 복합체용 플라스틱 골재 활용 기술 개발

○ 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 복합체 활용 가능성을 검토하기 위한 배합은 표 10과 같으며, 본 연구에서 활용한 플라스틱 골재는 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재 총 5종임.

: 배합에 사용된 플라스틱 골재는 펠릿 형태로 제작된 압출성형 PP(Polypropylene), PE(Polyethylene), PC(Polycarbonate), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene copolymer)이며, 비정형 형상으로 제작한 플레이크 형태의 PET(Polyethylene terephthalate)를 사용함.

: 각 플라스틱 골재 종류별 비중은 표 11, 각 플라스틱 펠릿의 형상은 그림 36에 나타냄.

표 10. 플라스틱 종류에 따른 배합비

	Cement (kg/m³)	Water (kg/m³)	Fine aggregate (kg/m³)						Vol. ratio (%)
			Sand	PP	PE	PC	ABS	PET	
Plain	508	254	1524	-	-	-	-	-	50
PP-50			762	268.6	-	-	-	-	
PE-50				-	273.0	-	-	-	
PC-50				-	-	350.3	-	-	
ABS-50				-	-	-	303.6	-	
PET-50				-	-	-	-	400.3	

표 11. 플라스틱 종류에 따른 비중

Plastic type	PP	PC	PE	ABS	PET
Specific gravity	0.92	1.2	0.94	1.04	1.371



(a) PP

(b) PE

(c) PC

(d) ABS

(h) PET

그림 36. 플라스틱 골재의 종류

: 시험체는 ISO 표준사를 사용하여 제작하였으며, 사용된 플라스틱 잔골재는 모두 사용 재료의 비중 등을 고려하여 ISO 표준사 용적 대비 50% 치환 후 플라스틱 잔골재의 종류에 따른 콘크리트 영향에 대한 평가를 실시함.

① 플라스틱 골재 종류별 시멘트 복합체 재료분리 저항성 분석

- 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 복합체 시험체 제작 후 그림 37과 같이 시험체 파단면의 형상 관찰을 통해 재료분리 상태를 확인함.

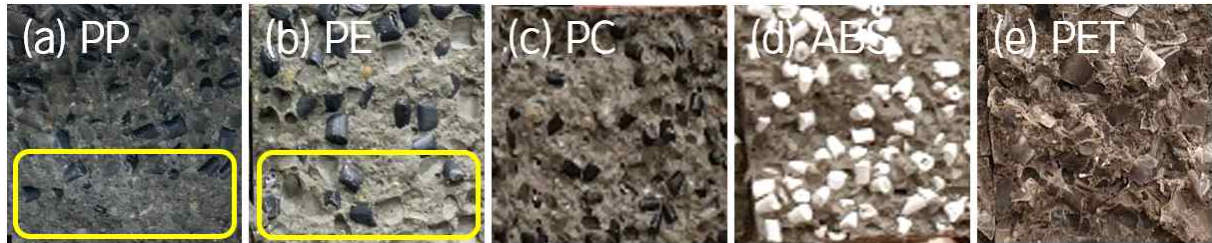


그림 37. 플라스틱 골재별 파단면 재료분리 상태

- 플라스틱 골재 종류별 재료분리 저항성을 분석한 결과는 다음과 같음.

: ABS, PC 및 PET의 경우 비교적 높은 비중을 가지고 있음에 따라, 시험체 제작을 위한 시멘트 복합체 배합 시 플라스틱 골재가 위로 떠오르는 재료분리 현상이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었으나, 이를 제외한 나머지 플라스틱 골재의 경우 비중이 1보다 낮음에 따라 재료분리가 확인됨.
: 플라스틱 잔골재 표면의 매끈한 표면 상태는 시멘트와의 부착을 방해함에 따라 이로 인한 재료 분리 발생 가능성도 예상되며, 이와 같은 결과로부터 감마선을 조사한 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 복합체 배합 시 증점제 등을 혼입함으로써 재료분리를 제어할 필요가 있다고 판단됨.

② 플라스틱 골재 종류별 시멘트 복합체 유동성(Flow test) 분석

- 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재를 활용한 굳지 않은 시멘트 복합체에 대한 유동성은 KS L 5111에 준하여 시험을 진행하고, 그 결과를 그림 38, 그림 39 및 표 12에 나타냄.

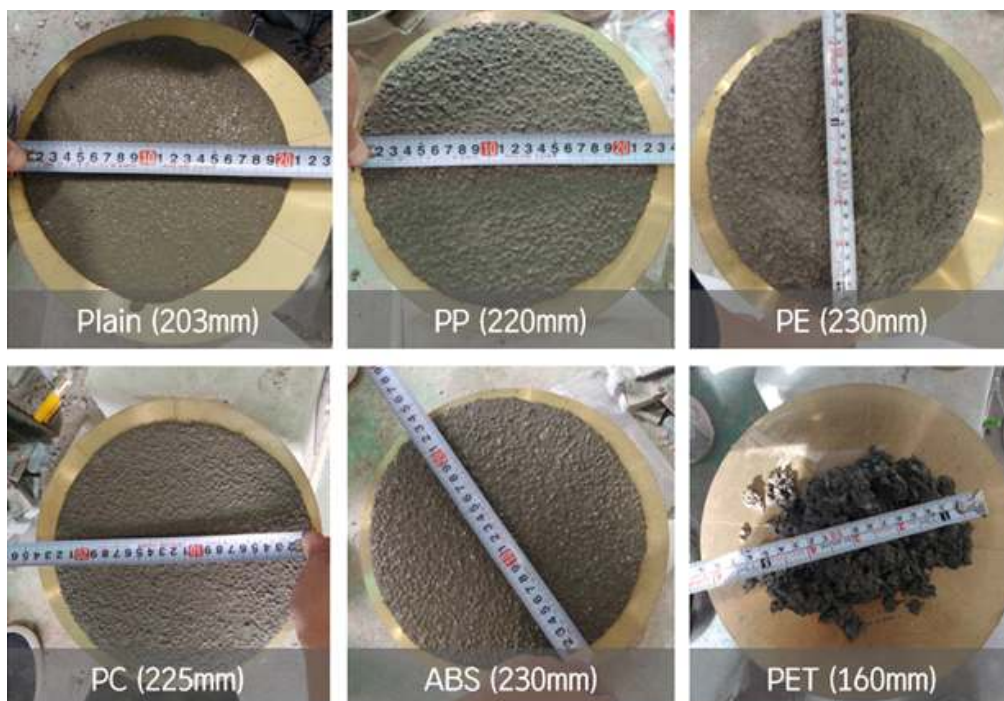


그림 38. 플라스틱 종류에 따른 플로우 실험 전경

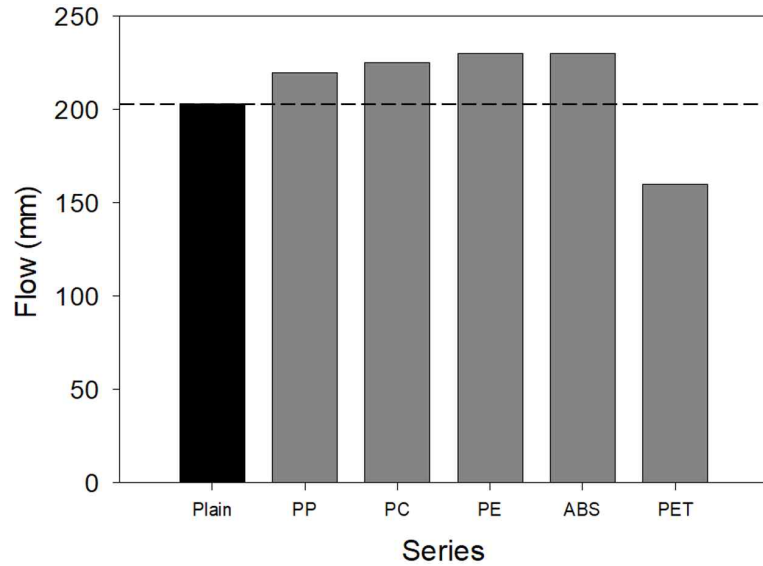


그림 39. 플라스틱 골재의 종류에 따른 플로우 값

표 12. 플라스틱 종류에 따른 플로우 값

Plastic type	Flow (mm)					
	Plain	PP	PE	PC	ABS	PET
Specific gravity	205	220	230	225	230	160

- 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재를 활용한 굳지 않은 시멘트 복합체의 유동성 평가 결과는 다음과 같음.
 - : 대부분의 시험체에서 Plain 시험체 대비 유동성이 증가하는 것이 확인되었으며, 이는 플라스틱 골재의 흡수율이 잔골재로 사용된 표준사에 비해 매우 낮기 때문이라 판단됨.
 - : PET의 경우 플레이크와 같은 비정형의 형상으로 인해 유동성이 현저히 떨어짐에 따라 시멘트 복합체를 제작함에 있어 어려움이 발생하였으며, 차후 표준사 대비 치환율과 플레이크 입자 크기를 조절하여 시험체를 제작할 필요가 있음.

- ✔ 대부분 천연잔골재 혼입 시멘트 복합체 대비 유동성 증가 ▶ 천연골재 대비 낮은 흡수율로 인한 것으로 판단됨.
- ✔ 플라스틱 골재 종류에 따른 유동성은 큰 변화 없음.
- ✔ PET의 경우 비정형(Flake) 형상으로 인해 유동성이 현저히 떨어짐.

(나) 플라스틱 종류 및 가공 형상이 시멘트 복합체 강도에 미치는 영향 분석

① 감마선 비조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 강도 특성 평가

- 시멘트 복합체용 골재로서 적합한 플라스틱 골재를 선정하기 위해 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재 종류에 따른 강도 특성 평가를 진행함.
- : 시멘트 복합체의 배합은 KS L ISO 679 표준 배합을 적용하고, 초기 및 장기 강도 특성을 분석하기 위해 재령 3, 7, 28일 압축강도 및 휨강도 실험을 수행함.



(a) 압축강도

(b) 휨강도

그림 40. 강도 특성 평가

- 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재를 적용한 시멘트 복합체의 3일, 7일 및 28일 압축강도 측정 결과를 표 13 및 그림 41에 나타냄.

표 13. 플라스틱 종류에 따른 시멘트 복합체의 단위용적중량 및 강도특성

Aggregate type	Compressive strength (MPa)			Flexural strength (MPa)	Unit Volume Weight (t/m ³)
	3 Days	7 Days	28 Days		
Plain	32.82	37.19	42.69	9.11	2.15
PP	17.16	19.04	19.09	3.62	1.66
PE	16.52	17.69	21.31	3.44	1.67
PC	18.65	22.57	22.02	4.01	1.73
ABS	18.08	22.00	22.89	4.2	1.71
PET	14.46	14.74	16.32	3.94	1.74

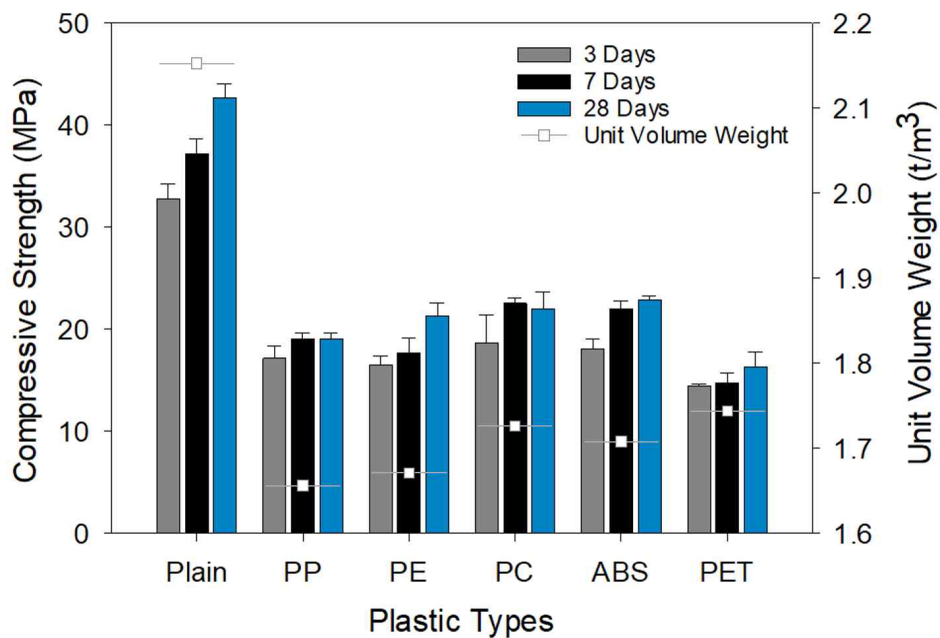


그림 41. 플라스틱 종류에 따른 시멘트 복합체 단위용적중량 및 압축강도

- 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 복합체의 재령별 압축강도 평가 결과는 다음과 같음.
- : 시멘트 복합체의 경우 재령이 늘어남에 따라 강도가 향상되는 것이 일반적이나, 플라스틱 골재 중 PC를 혼입한 경우 28일 강도가 7일 강도에 비해 다소 저하하는 경향이 확인됨.
 - : 이는 플라스틱 골재가 가진 매끈한 표면으로 인해 시멘트 복합체 배합 시 골재와 시멘트 페이스트간 충분한 결합을 갖지 못한 시험체가 제작되어 이런 현상이 나타난 것으로 판단됨.

- : 재령 28일 기준으로 각 종 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 복합체의 압축강도는 16.32 MPa ~ 22.89 MPa로 측정되었으며, 플라스틱 종류에 따른 압축강도의 큰 차이는 확인되지 않았으나, ABS와 PC와 같이 다른 플라스틱 골재에 비해 비중이 높은 골재의 경우 약 20% 정도 압축강도가 높아지는 경향이 확인됨.
- : PET의 경우 압축강도가 전반적으로 낮음을 확인하였으며, 이는 플레이크의 형상이 불균일하고 골재 입경이 큼에 따라 배합이 제대로 이루어지지 않아 전체적으로 시험체 내부에 공극이 많이 발생함에 따른 것으로 판단되며, 플라스틱 골재의 형상 및 크기가 시멘트 복합체의 강도특성에 영향을 미치는 것으로 확인됨.
- : 그러나 PET의 경우, 다른 시험체에 비해 연성적인 거동을 나타내며 최대 변형률이 2배 이상 증가함에 따라 PET 골재의 치환율을 조정하고 플레이크 크기가 작은 것을 사용함으로써 압축강도가 개선될 여지가 있다고 판단됨.

② 플라스틱 골재 비중 대비 강도 관계 분석

- 감마선을 비조사된 플라스틱 골재 종류별 비중과 응력 관계를 그림 42에 나타냄.

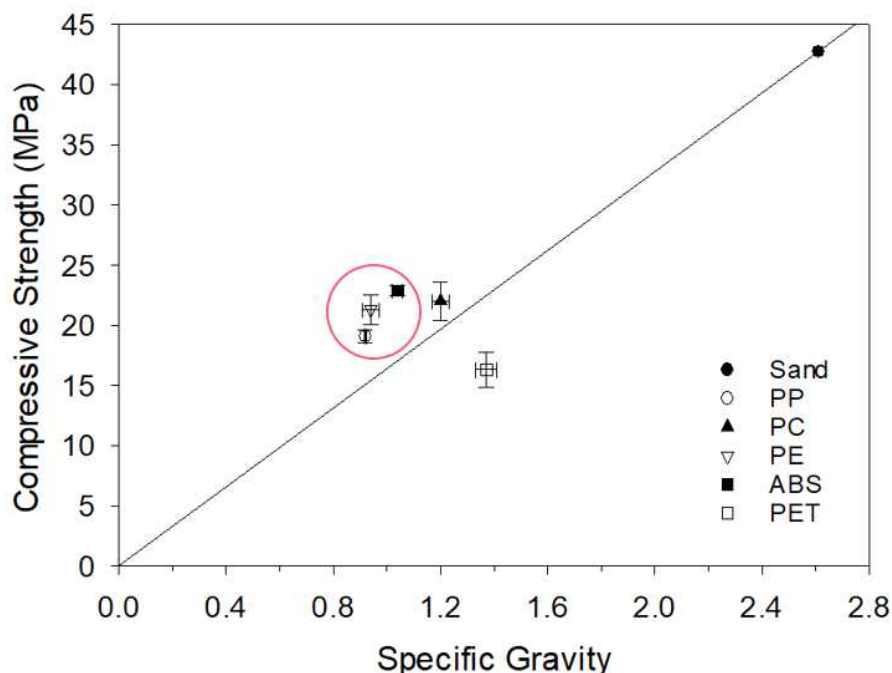


그림 42. 플라스틱 골재 종류별 시멘트 복합체의 잔골재 비중-응력 관계

- 감마선을 조사하지 않은 플라스틱 골재 비중 대비 압축강도 관계를 분석한 결과는 다음과 같음.
 - : 플라스틱 골재는 각기 다른 비중을 가지므로 비중에 비례하여 압축 응력이 선형적으로 향상되는지 여부를 확인할 필요가 있음.
 - : 그림 42와 같이 PET를 제외한 모든 플라스틱 골재의 비중 대비 응력의 효율성은 잔골재보다 좋은 것으로 나타났으며, PC의 경우 비중 대비 응력 추세선에 근접하므로 비중 대비 압축 응력의 효율성이 좋지 않음이 확인됨.
 - : 또한, PP, PE 및 ABS의 경우 추세선으로부터 좌상측으로 멀리 떨어져 있으므로 비중 대비 압축 응력의 효율성이 좋은 것으로 확인되며, 본 연구의 목표가 시멘트 복합체의 경량화와 소정의 압축 강도를 확보하는 것이므로 감마선 비조사 플라스틱 종류에 따른 평가 결과로부터 PP, PE 및 ABS가 압축강도 향상 효율성이 가장 좋은 것으로 판단됨.
 - : 다만, 단위용적중량 대비 압축강도 향상 효율을 동시에 고려한 경우 PP 및 PE 골재를 사용한 경우 모두 만족시킬 수 있는 것으로 확인됨.

- 경량화의 관점에서 천연골재 대체로 플라스틱 골재를 첨가함에 따라 단위용적중량을 대폭 감소시킬 수 있는 것으로 확인 되었으나, 기계적 강도가 저하되는 것으로 확인
- 가공형상의 경우 펠릿 형태를 적용한 것이 강도면에서 우수한 것으로 나타남.
- 각 플라스틱 골재의 종류 및 가공형상에 따른 단위용적중량 및 강도특성 분석을 통해 플라스틱 골재의 종류는 PP 및 PE 골재가 비중 대비 응력 향상 효율이 가장 우수한 것으로 나타남.

③ 플라스틱 골재 종류별 치환율에 따른 단위용적중량 및 압축강도 분석

- 플라스틱 골재 종류 중 비중 대비 강도 효율이 좋은 PP, PE 및 ABS와 가공형상이 다른 PET를 포함하여 총 4종의 플라스틱 골재를 대상으로 시멘트 복합체에 적용 시 적정 치환율을 검토하였으며, 배합은 표 14와 같음.
: 잔골재 대비 플라스틱 골재의 치환율은 15, 30 및 50%로 설정함.
- 감마선 비조사된 플라스틱 골재의 종류별 치환율에 따른 비중 및 응력을 표 15 및 그림 43에 나타냄.

표 14. 플라스틱 종류별 치환율에 따른 배합비

	Cement (kg/m³)	Water (kg/m³)	Fine aggregate (kg/m³)					Vol. ratio (%)
			Sand	PP	PE	ABS	PET	
PP-15	508	254	1295.4	80.58	-	-	-	15
PE-15				-	81.9	-	-	
ABS-15				-	-	91.09	-	
PET-15				-	-	-	120.08	
PP-30			1066.8	161.16	-	-	-	30
PE-30				-	163.79	-	-	
ABS-30				-	-	182.18	-	
PET-30				-	-	-	240.16	
PP-50			762	268.6	-	-	-	50
PE-50				-	273.0	-	-	
ABS-50				-	-	303.6	-	
PET-50				-	-	-	400.3	

표 15. 플라스틱 종류에 따른 시멘트 복합체의 단위용적중량 및 압축강도 측정 값

Specimen	Compressive strength (MPa)	Unit Volume Weight (t/m³)
PP-15	51.40	2.01
PE-15	48.90	1.95
ABS-15	52.48	2.01
PET-15	43.47	2.07
PP-30	38.06	1.85
PE-30	34.76	1.83
ABS-30	45.54	1.89
PET-30	34.81	1.97
PP-50	19.09	1.66
PE-50	21.31	1.67
ABS-50	22.89	1.71
PET-50	16.32	1.74

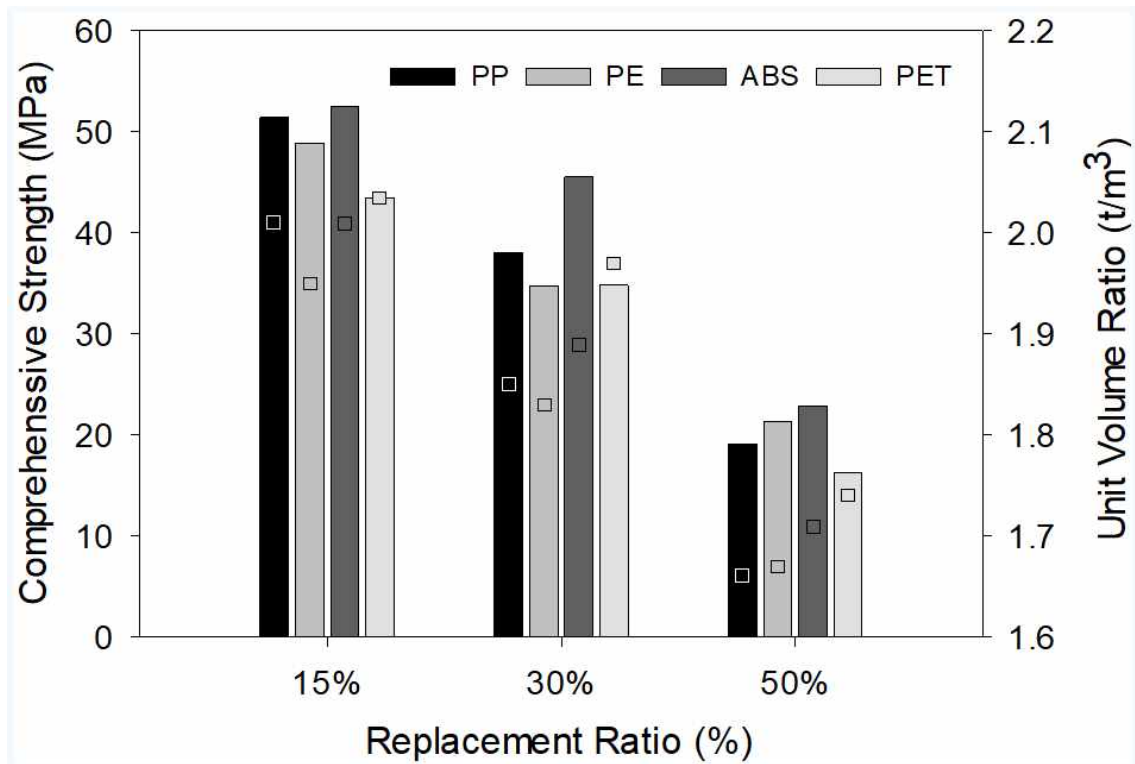


그림 43. 플라스틱 골재 종류별 치환율에 따른 단위용적중량 및 압축강도

- 플라스틱 골재 종류별 치환율에 따른 단위용적중량 및 압축강도 특성을 분석한 결과는 다음과 같음.
 - : 플라스틱 골재 종류와 관계없이 잔골재 대비 플라스틱 골재 치환율이 높아짐에 따라 압축강도가 선형적으로 저하되었으며, 단위용적중량 또한 선형적으로 감소되는 것으로 확인됨.
 - : 분석 결과를 기반으로 본 연구의 단위용적중량 및 압축강도 목표 수준을 달성하기 위해서는 우선적으로 단위용적중량을 낮추어 경량성을 확보하는 것이 우선적으로 필요하기에, 이를 만족시키기 위해서는 플라스틱 골재의 적정 치환율은 50% 수준이 적절할 것으로 판단됨.

(다) 감마선 조사 유무가 플라스틱 골재의 강도에 미치는 영향 분석

① 감마선 조사선량에 따른 압축강도 특성 평가

○ 감마선 조사선량 25kGy, 50kGy, 75kGy 및 100kGy로 조사된 플라스틱 골재를 대상으로 시멘트 복합체를 제작하고, 초기 및 장기 압축강도 측정 결과를 표 16 및 그림 44에 나타냄.

: 감마선 조사를 실시한 플라스틱 골재의 표면구조 및 물리·화학적 구조의 변화 분석을 통해 플라스틱 골재에 가교 결합 발생이 확인됨에 따라, 플라스틱 골재의 성능 개선이 시멘트 복합체의 강도에 영향을 미치는지 확인하기 위한 압축강도 특성을 평가함.

표 16. 감마선 조사선량별 시멘트 복합체 압축강도 측정 값

Specimen	Irradiation Dose (kGy)	Compressive Strength (MPa)	Increase Rate Compared to Nonirradiated Specimen (%)
PP0	0	19.09	—
PP25	25	25.09	31.4
PP50	50	25.69	34.8
PP75	75	33.02	73.0
PP100	100	32.55	70.5
PE0	0	21.31	—
PE25	25	24.02	12.7
PE50	50	25.76	20.9
PE75	75	39.43	85.0
PE100	100	32.67	53.3
PC0	0	22.02	—
PC25	25	28.81	30.8
PC50	50	30.3	37.6
PC75	75	32.54	47.8
PC100	100	30.02	36.3
ABS0	0	22.89	—
ABS25	25	28.6	25.0
ABS50	50	29.81	30.2
ABS75	75	34.94	52.6
ABS100	100	32.52	42.1
PET0	0	16.32	—
PET25	25	19.98	22.4
PET50	50	20.42	25.1
PET75	75	23.62	44.7
PET100	100	22.69	39.0

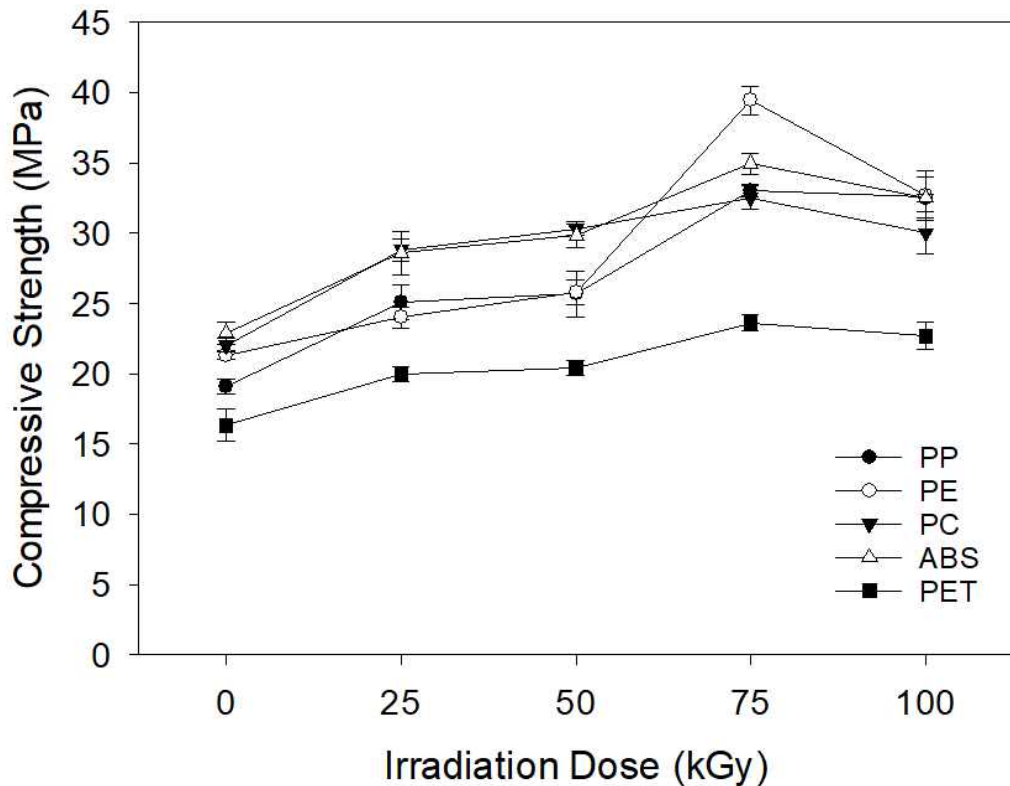


그림 44. 감마선 조사선량별 시멘트 복합체 압축강도

- 감마선을 조사한 플라스틱 골재를 혼입한 시멘트 복합체의 압축강도 특성을 분석한 결과는 다음과 같음.
 - : 감마선 조사선량별 시멘트 복합체의 압축강도 실험결과, 조사선량의 증가에 따라 압축강도가 완만하게 증가함.
 - : 천연골재 시멘트 복합체 대비 감마선 조사 플라스틱 골재를 활용한 시멘트 복합체의 강도 저하에 대하여 살펴보면, 천연골재 대비 밀도가 낮은 플라스틱 경량골재를 사용함으로써 낮은 골재 강도를 가지므로 시멘트 복합체 강도 저하에 영향을 미치는 것으로 판단됨.
 - : 또한, 골재의 표면 특성은 페이스트-골재간의 부착강도에 영향을 미치는데, 감마선 조사로 인해 일반적으로 매끈한 표면을 갖는 플라스틱 골재의 표면 거칠기를 개질하였으나, 표면이 거친 쇄사를 사용한 천연골재의 표면 거칠기가 더욱 거칠기 때문에 부착강도에 차이가 발생하고 이러한 차이가 시멘트 복합체의 압축강도에 영향을 미치는 것으로 사료됨.
 - : 감마선 조사선량에 따라서는 75 kGy까지 지속적으로 강도가 증가했으며, 그 이후 강도가 오히려 감소하는 것으로 나타남.
 - : 이러한 강도 증가 요인은 감마선 조사로 인한 플라스틱 골재의 물리적 및 화학적 변화로 인한 것으로 판단됨.
 - : 감마선 조사선량 증가에 따라 플라스틱 골재 표면조도의 증가로 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면전이영역(Interfacial Transition Zone, ITZ)에서의 접착성능이 개선되어 다공성이 감소하며 수화과정 중 형성되는 2차 C-S-H와 함께 C-A-S-H겔이 더욱 조밀하게 형성되는 것에 기인하여 시멘트 복합체의 강도가 증진된 것으로 판단됨.
 - : 감마선 조사된 플라스틱 골재의 화학적 개질을 통해 강도를 향상시킬 수 있는 것으로 판단되며, 이때의 강도 증진 메커니즘은 두 가지로 설명할 수 있음.
 - : 첫 번째로, PE 골재와 같은 가교성 플라스틱의 경우 인접 분자 사이에 가교가 일어나 플라스틱 구조가 조밀해지기 때문에 감마선 비조사 플라스틱 골재에 비해 기계적 물성이 우수하므로 이로 인해 강도를 향상시킬 수 있는 것으로 판단됨.
 - : 둘째로, PP 골재의 경우와 같은 산화분해성 플라스틱은 사슬 절단 반응에 의해 새로운 관능기가 형성되어 표면에 접착성과 친수성을 부여하여 시멘트 페이스트와의 접착력을 향상시킬 수 있는 것으로 판단됨.

- ☑ **감마선 조사선량 증가에 따라 75 kGy까지 지속적으로 강도가 증가함.**
- ☑ 감마선 조사는 **플라스틱의 종류에 따라 가교결합과 사슬절단 중 더 지배적인 반응을 유도**하며, 이러한 반응의 결과로 화학적 변화를 통해 **골재와 시멘트 페이스트간 계면 결합 특성을 향상시켜 시멘트 복합체의 강도 향상에** 기여할 수 있음.
- ☑ 반면, **조사선량 100 kGy에서는 강도의 감소를** 나타내었는데, 이는 기존 문헌검토를 통해 알려진 바와 같이 **일정 선량 이상의 감마선에 노출되면 플라스틱 표면의 열화가 발생**함에 따라 고분자와 시멘트 페이스트 사이의 결합을 방해하여 결과적으로 **강도가 저하**되는 것으로 판단됨.
- ☑ 실험결과를 종합적으로 분석한 결과, **PP 및 PE 골재에 감마선을 조사할 경우 시멘트 복합체의 강도를 더욱 효과적으로 개선**할 수 있는 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 통해 **최종적으로 PP 및 PE 골재를 최적 플라스틱 종류로 선정**함.

② 감마선 조사선량에 따른 휨강도 특성 평가

- 감마선 조사선량 25kGy 및 50kGy 에 조사된 플라스틱 골재를 대상으로 시멘트 복합체를 제작하고, 휨강도 측정 결과를 표 17 및 그림 45에 나타내었음.

표 17. 감마선 조사선량별 시멘트 복합체 휨강도 측정 값

Specimen	Irradiation Dose (kGy)	Flexural Strength (MPa)	Increase Rate Compared to Nonirradiated Specimen (%)
PP0	0	3.62	—
PP25	25	3.44	6.91
PP50	50	4.01	9.12
PP75	75	4.2	13.81
PP100	100	3.94	7.18
PE0	0	3.87	—
PE25	25	3.78	9.88
PE50	50	4.04	16.28
PE75	75	4.21	17.44
PE100	100	4.55	16.86
PC0	0	3.95	—
PC25	25	4.01	0.75
PC50	50	4.13	2.99
PC75	75	5.24	5.99
PC100	100	5.07	1.75
ABS0	0	4.12	—
ABS25	25	4.04	0.24
ABS50	50	4.25	24.76
ABS75	75	5.47	30.24
ABS100	100	5.23	22.62
PET0	0	3.88	—
PET25	25	4.02	15.48
PET50	50	4.08	28.68
PET75	75	5.15	32.74
PET100	100	4.97	26.14

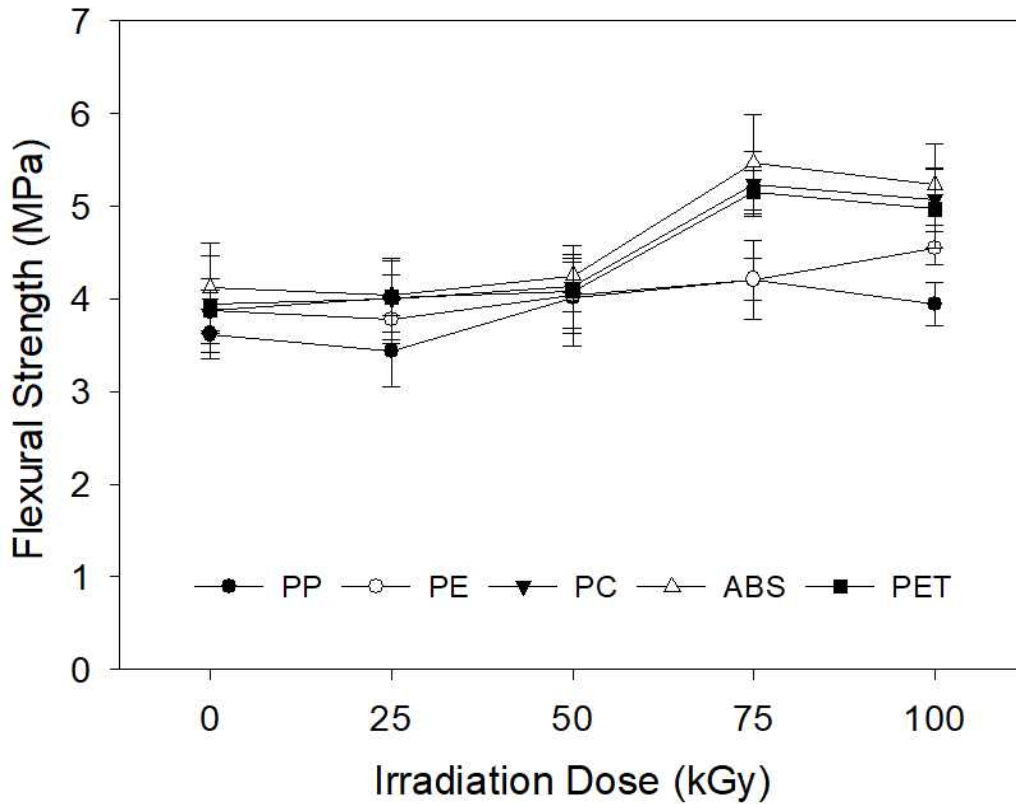


그림 45. 감마선 조사선량별 시멘트 복합체 휨강도

- 감마선을 조사한 플라스틱 골재를 혼입한 시멘트 복합체의 휨강도 특성을 분석한 결과는 다음과 같음.
 - : 압축강도 측정 결과와 유사한 양상을 나타냄.
 - : 최대 휨강도는 증가율은 플라스틱 종류에 따라 5.99%에서 32.74%까지 다양하게 나타났으며, 특히 PET 골재의 휨강도 증진률이 가장 높은 것으로 나타남. 이는 PET 골재의 경우 가공형상이 플레이크 형태이기 때문에 시멘트 복합체 내에서 섬유보강 효과와 유사하게 길쭉한 형상을 나타내어 균열 발생 시 가교 효과를 통해 휨강도가 증진된 것으로 판단됨.

✓ 분석된 결과를 통해 압축강도뿐만 아니라 휨강도 역시 감마선 조사로 인해 개질된 플라스틱의 영향으로 강도증진 효과를 입증할 수 있었음.

④ 감마선 활용에 따른 환경영향 및 안전 관련 문헌조사

(가) 감마선 조사 시 발생하는 환경영향 및 안전 관련 문헌 조사·분석

- 본 연구에서 활용한 감마선 조사 처리 기술은 Cobalt-60 방사성동위원소에서 나오는 단파장 빛인 감마선을 플라스틱 재료에 쬌어 온도상승 없이 고분자 물질의 화학적 결합 구조를 변화시켜 보다 안정적인 구조로 전환시키거나 원하는 물성으로 개질하는 방법임.
: 일반적으로 의료용품과 위생용품의 멸균을 위한 목적으로 사용되며, 멸균공정을 통해 원료의 상태를 안전한 멸균 상태로 도입이 가능하기 때문에 제품의 안정성을 보증함.
: 감마선 조사는 단파장을 사용하기 때문에 환경오염이나 오존층 파괴를 유발하지 않고 친환경적으로 사용이 가능함.
: 고투과력 빛 에너지를 사용하여 제품의 내부까지 투과해 조사된 재료의 변형 및 인류 건강에 해로운 유해가스 잔류나 독성물질과 같은 어떠한 물질도 남기거나 생성하지 않고 안전한 사용이 가능함.
- 본 연구에 사용된 플라스틱 재료는 국내 G사의 감마선 조사설비를 통해 조사 처리를 하였으며, 미국 FDA에서 국제적으로 승인된 멸균시설로 등록되어있으므로 감마선 조사된 플라스틱 재료 사용에 있어 환경영향 및 안전 관련 문제는 발생하지 않을 것으로 확인됨.
- “고준위 감마선, 저준위 감마선, 감마선 환경영향, 감마선 노출 및 감마선 유해물질”을 키워드로 국내외 다수의 문헌을 검토한 결과, 감마선 조사시설을 통해 감마선 조사된 플라스틱 재료 사용에 따른 환경 영향 및 안전관련 문제는 발견되지 않음.

⑤ 시멘트 복합체 경량화를 위한 개질 플라스틱 골재 최적 치환율 도출

(가) 플라스틱 골재 치환율에 따른 경량화 특성 분석 (단위용적 중량 2.3t/m³ → 1.7t/m³)

- 플라스틱 골재 치환율 0, 25, 50, 75 및 100%를 변수로 시멘트 복합체 제작 후 치환율 대비 단위용적 중량 및 압축강도 관계 분석
- 다양한 플라스틱 종류 중 범용적으로 가장 많이 사용되며, 1차년도에 수행된 연구를 통해 최적 골재 종류로 선정된 PE 골재를 대상으로 잔골재인 ISO 표준사를 대체하여 치환적용함.
: 플라스틱 골재 치환율에 따른 배합은 표 18에 나타냄.

표 18. 플라스틱 골재 치환율에 따른 배합

Series	W/B(%)	B:A	Unit weight (kg/m³)						
			Binder			Water	Sand	PE	AE
			Cement	F.A	S.F				
PE0	40	1 : 3	416	52	52	208	1560	—	3
PE25							1170	140	
PE50							780	279	
PE75							390	419	
PE100							—	559	

- 플라스틱 골재 치환율에 따른 단위용적중량 및 압축강도를 표 19 및 그림 46에 나타냄.
- 플라스틱 골재 치환율을 변수로 한 시멘트 복합체의 단위용적중량 및 압축강도를 검토한 결과는 다음과 같음.
: 단위용적중량 및 압축강도는 천연골재 시험체 대비 플라스틱 골재 치환율이 증가함에 따라 선형적으로 감소함.
: 일반적으로 경량골재를 활용한 시멘트 복합체의 수준을 만족시키기 위해서는 플라스틱 골재 치환율을 50%로 적용하는 것이 적합할 것으로 판단됨.

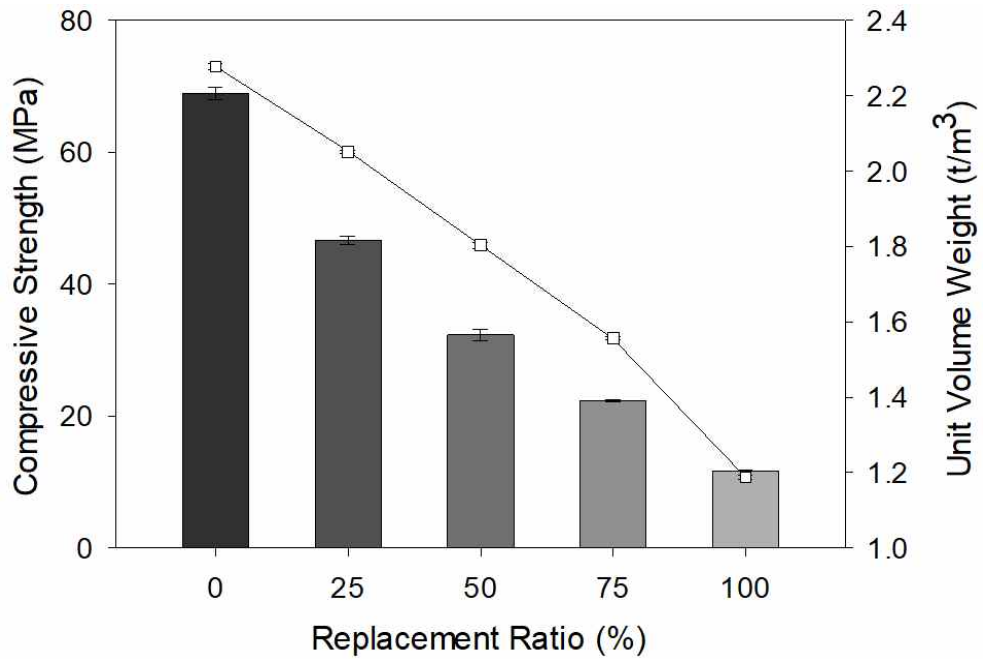


그림 46. 플라스틱 골재 치환율에 따른 단위용적중량 및 압축강도

표 19. 플라스틱 골재 치환율에 따른 단위용적중량 및 압축강도 값

Classification	Replacement ratio (%)				
	0	25	50	75	100
Unit volume weight (t/m³)	2.28	2.05	1.80	1.56	1.19
Compressive strength (MPa)	68.98	46.61	32.27	22.32	11.73

- ☑ **단위용적중량 및 압축강도**는 천연골재 시험체 대비 **플라스틱 골재 치환율이 증가함에 따라 선형적으로 감소함**.
- ☑ 일반적으로 경량골재를 활용한 시멘트 복합체의 수준을 만족시키기 위해서는 **플라스틱 골재 치환율을 50%로 적용하는 것이 적합할** 것으로 판단됨.

(나) 바인더 구성재료 및 물-바인더비에 따른 강도 대비 단위용적중량 관계 분석

- 시멘트 복합체의 고강도 경량화를 목표로 **최적배합을 도출**하기 위해 **바인더 구성재료**(표준사, 플라스틱 골재, 인공경량골재, 플라이애시, 실리카흄) 및 **실험변수**(골재치환율, 감마선 조사선량, W/B%, 바인더 대비 골재비)에 따른 다양한 배합을 작성하였으며, 각 배합에 따른 시멘트 복합체의 단위용적중량 대비 압축강도 특성을 분석하였음.

① 플라이애시 치환율에 따른 강도 대비 단위용적중량 관계

- 바인더 구성재료로서 **장기 압축강도 증진** 및 감마선 조사된 플라스틱 골재의 표면을 더욱 **조밀하게 채우기** 위해 미립 분말인 **플라이애시를 혼입하는 것을 고려함**.
- 배합은 표 20과 같으며, 플라이애시 치환율에 따른 압축강도 및 단위용적중량 관계를 그림 47에 나타냄.

표 20. 플라이애시 치환율에 따른 시멘트 복합체 배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m³)						AE (vol.%)
			Binder		W	S	LWA	PP	
			C	F.A					
Control	40	1 : 3	536	—	214	803	646	—	0.5
PP50-F0			536	—			—	283	
PP50-F10			482	54					
PP50-F15			456	80					
PP50-F20			429	107					

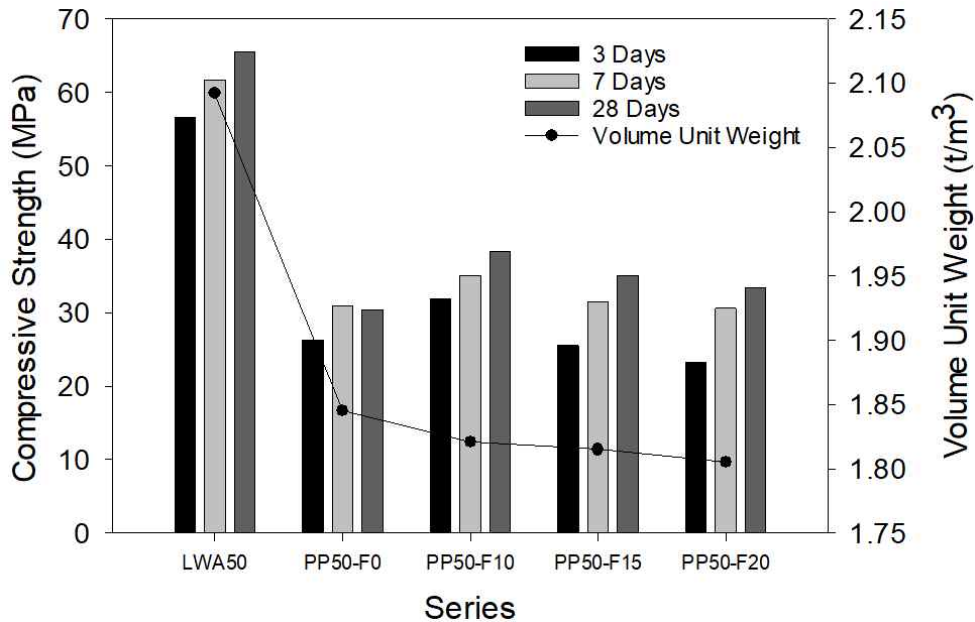


그림 47. 플라이애시 치환율에 따른 시멘트 복합체 압축강도

○ 압축강도 및 단위용적중량 실험결과, 플라이애시 치환율의 증가에 따라 단위용적중량에는 큰 차이가 없었으며, 치환율 10% 적용 시 강도증진에 가장 효율적인 것으로 나타났으므로, 최종배합에는 플라이 애시 최적 치환율을 10%를 적용함.

② 바인더 대비 골재(B:A) 비율에 따른 강도 대비 단위용적중량 관계

○ 바인더 대비 골재 비율에 따른 최적 조합을 도출하기 위해 표 21과 같은 배합을 적용하였으며, 배합에 따른 압축강도 및 단위용적중량 관계를 그림 48에 나타냄.

표 21. 바인더 대비 골재 비율에 따른 시멘트 복합체 배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m3)						AE (vol.%)
			Binder		W	S	LWA	PP	
			C	F.A					
PP-BA-2.5	40	1 : 2.5	537	60	239	448	240	263	0.5
PP-BA-3		1 : 3	482	54	214	482	259	283	

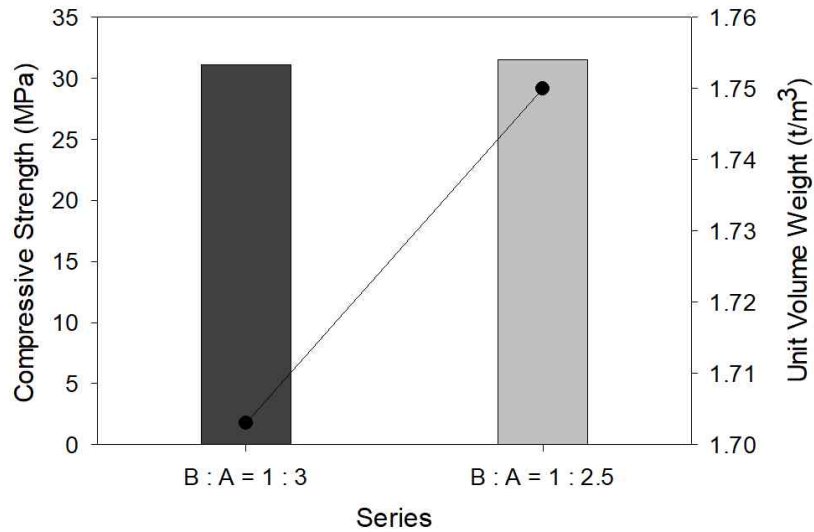


그림 48. 바인더 대비 골재 비율에 따른 시멘트 복합체 특성

- 바인더 대비 골재비율의 경우, **B:A 비율이 낮아질수록 단위용적중량은 대폭 증가하지만 강도향상에는 큰 변화가 없는 것**으로 나타남.

: 따라서, **바인더 대비 골재비율은 1 : 3이 적정한 것**으로 판단되므로, 최적배합에 이를 적용함.

③ 플라스틱 골재 대비 인공경량골재 치환율에 따른 강도 대비 단위용적중량 관계

- 플라스틱 골재를 치환하는 것만으로는 **압축강도 목표치인 40MPa를 달성**하는 것이 어려운 것으로 판단되어 **인공경량골재를 복합적으로 혼입하는 것을 고려함**.
- 플라스틱 골재 대비 인공경량골재 혼입률에 따른 최적 조합을 도출하기 위해 표 22와 같은 배합을 적용하였으며, 배합에 따른 압축강도 및 단위용적중량 관계를 그림 49에 나타냄.

표 22. 플라스틱 골재 대비 인공경량골재 혼입률에 따른 시멘트 복합체 배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m³)						AE (vol.%)
			Binder		W	S	LWA	PP	
			C	F.A					
S30-L20-P50	28	1 : 3	445	50	139	445	239	262	1.0
S30-L25-P45							299	236	
S30-L30-P40							358	209	

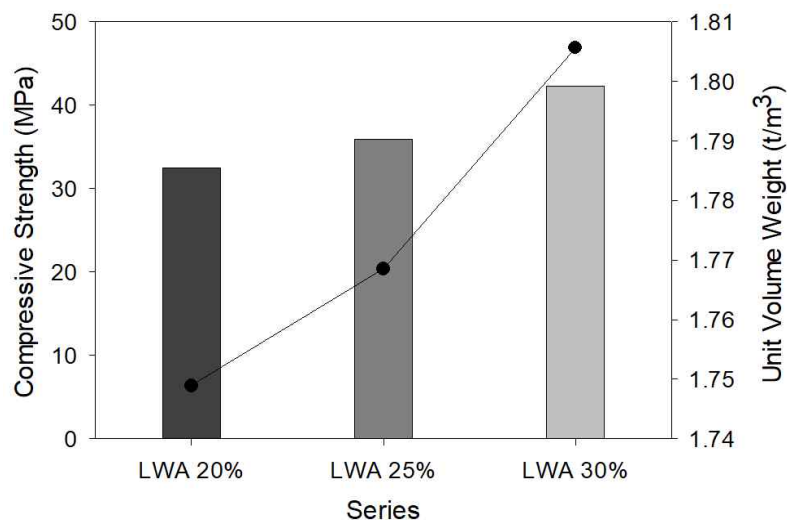


그림 49. 플라스틱 골재 대비 인공경량골재 혼입률에 따른 시멘트 복합체 특성

- 압축강도 및 단위용적중량 실험결과, 플라스틱 골재 대비 인공경량골재 혼입률이 증가할수록 압축강도는 높아지지만, 단위용적중량의 상승률이 급격히 증가함에 따라 경량화의 관점에서 인공경량골재의 적정 혼입률을 20%로 설정하였으며, 이를 최종배합에 적용함.

④ 인공경량골재 대비 표준사 혼입률에 따른 강도 대비 단위용적중량 관계

- 단위용적중량 목표 수준인 1.7t/m^3 이하를 달성하기 위해 표준사를 혼입률 적정 수준을 파악하여 적용하는 것이 필요함.
- 인공경량골재 대비 표준사 혼입률에 따른 최적 조합을 도출하기 위해 표 23과 같은 배합을 적용하였으며, 배합에 따른 압축강도 및 단위용적중량 관계를 그림 50에 나타냄.

표 23. 인공경량골재 대비 표준사 혼입률에 따른 시멘트 복합체 배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m³)						AE (vol.%)
			Binder		W	S	LWA	PP	
			C	F.A					
PP-WB28	28	1 : 3	445	50	139	445	239	262	1.0
PP-WB30						520	179		
PP-WB40						594	119		

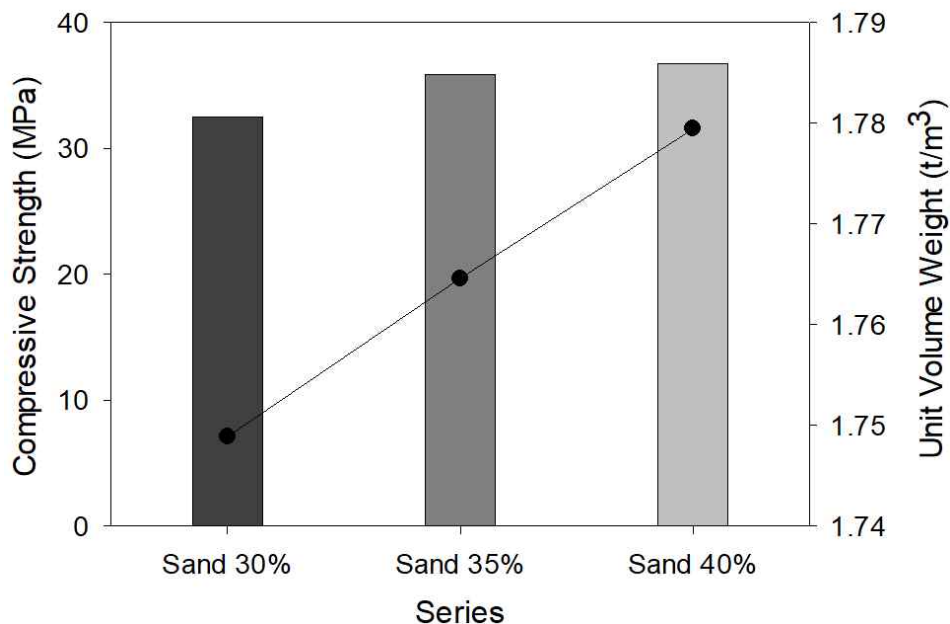


그림 50. 인공경량골재 대비 표준사 혼입률에 따른 시멘트 복합체 특성

- 인공경량골재 대비 표준사 혼입률이 증가함에 따라 압축강도 상승률은 다소 큰 폭으로 향상되지 않는 것으로 나타남.
- 반면 단위용적중량의 경우 선형적인 증가를 나타내어 경량성을 확보하기 어려우므로 표준사의 적정 혼입률은 최대 30%를 사용하는 것으로 최적배합에 적용함.

⑤ W/B%에 따른 강도 대비 단위용적중량 관계

- 1차년도에 진행된 실험에서는 표준 배합을 적용하여 W/B%를 50% 적용하였으나, 강도면에서 본 연구의 목표치를 달성하기 위해서는 단위수량을 줄여서 최적 W/B%를 도출하는 것이 필요함.
- W/B%에 따른 최적 조합을 도출하기 위해 표 24와 같은 배합으로 W/B%를 28%, 30% 및 40%로 적용하였으며, 배합에 따른 압축강도 및 단위용적중량 관계를 그림 51에 나타냄.

표 24. W/B%에 따른 시멘트 복합체 배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m3)						AE (vol.%)
			Binder		W	S	LWA	PP	
			C	F.A					
PP-WB28	28	1 : 3	445	50	139	445	239	262	1.0
PP-WB30	30		500	50	165	495	266	291	0.5
PP-WB40	40		482	54	214	482	259	283	

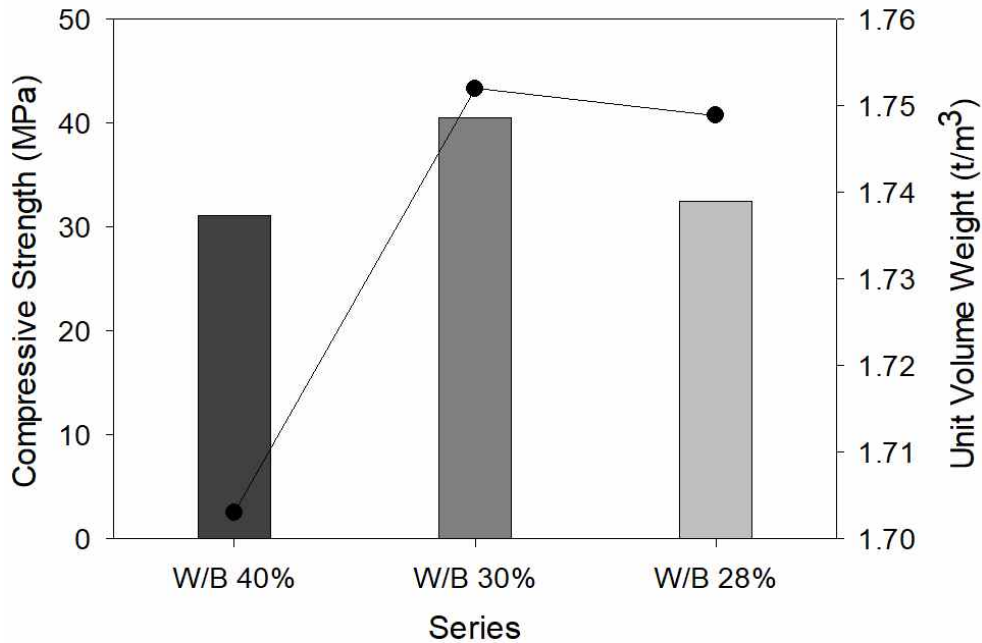


그림 51. W/B%에 따른 시멘트 복합체 특성

○ W/B%에 따른 시멘트 복합체의 특성을 살펴보면, 단위용적 중량의 경우 큰 차이를 보이지 않았으나 강도 면에서 소요 강도 이상 확보를 하기 위해서는 W/B%를 30% 이하로 적용하는 것이 적절한 것으로 판단됨.

: W/B% 28%를 적용한 경우 압축강도가 급격히 저하되는데 이는 배합 시 비빔에 문제가 발생한 것에 기인하며, 이에 따라 **최적 W/B%를 30%로 설정하여 최적배합에 적용함.**

✓ 최적배합 설정을 위한 일련의 비교·분석된 결과를 검토하여 도출된 최적배합의 조성은 다음과 같음.

✓ W/B% : 30%

✓ 바인더 대비 골재 (B:A) 비율 : 1: 3

✓ 표준사 혼입률 : 30%

✓ 인공경량골재 혼입률 : 20%

✓ 플라스틱 골재 혼입률 : 50%

⑥ 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체 제조 시 품질확보 기술 도출

(가) 품질확보를 위해 혼화제 활용 시멘트 복합체 제조 시 경량 골재 재료분리 방지 기술 도출

- 플라스틱 골재 치환율에 따른 시멘트 복합체 플로우 실험을 통해 재료분리 저항성 최소화 골재 조건 도출
 - 플라스틱 골재의 경우 비중이 1보다 낮음에 따라 블리딩수의 밀도보다 낮아 플라스틱 골재가 위로 부상하면서 그림 52와 같이 재료분리가 확인됨.
 - : 이는 플라스틱 잔골재 표면의 매끈한 표면 상태가 시멘트와의 부착을 방해함에 따라 재료분리가 발생한 것으로 판단됨.



그림 52. 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 재료분리

- 본 연구에서는 플라스틱 골재 혼입 시 발생하는 재료분리에 저항하기 위한 방안으로 다음과 같은 절차를 통해 재료분리 저항성을 확보하였음.
- 재료분리 방지를 위한 해결과정을 그림 53에 요약하여 나타내었음.
 - : 플라스틱 골재 치환율에 따른 플로우 실험을 통해 적정 치환율 도출
(플라스틱 골재를 75% 이상 치환할 경우 급격한 유동성 저하를 나타내므로 적정 치환율을 50% 이내로 설정)
 - : 배합 시 인공경량골재를 혼입하여 적정 혼입률 도출
(시멘트 복합체 내에서 플라스틱 골재와 적절히 분산됨)
 - : 고성능 AE 감수제를 사용하여 적정 혼입률을 도출
(인공경량골재 혼입으로 인해 떨어진 유동성 회복)
 - : 재료분리가 일어나지 않는 범위 내에서 플로우 실험을 통해 적정 혼입률 도출



그림 53. 재료분리 저항성 확보 방안

- 최종적으로 재료분리가 일어나지 않는 범위 내에서 플로우 실험을 통해 최적 조합을 도출하였음.
- ： 플라스틱 골재를 첨가한 시멘트 복합체의 유동성은 KS L 5111(수경성 시멘트 시험용 플로 테이블)에 따라 전동식 몰탈 플로우 실험기를 이용하여 시멘트 복합체의 유동성 평가 결과를 분석하여 평가하였으며, 그 결과는 표 25 및 그림 54에 나타냄.
- ： 이때, 최종 플라스틱 골재 종류로서 선정된 PP 골재를 대상으로 플라스틱 골재 치환율(0, 25, 50, 75 및 100%)에 따른 플로우 실험을 수행함.

표 25. 플라스틱 골재 치환율에 따른 플로우 값

Classifiaction	Replacement ratio (%)				
	Control	25	50	75	100
Flow (mm)	180	195	175	145	130

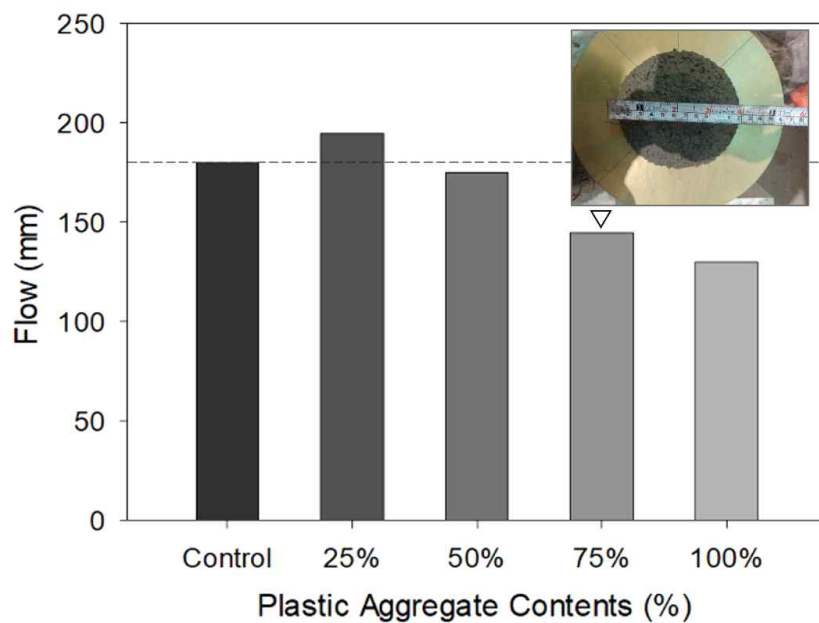


그림 54. 플라스틱 골재 치환율에 따른 플로우

- 플라스틱 골재 치환율에 따른 플로우 실험결과, 플라스틱 골재를 75% 이상 치환할 경우 급격한 유동성 저하를 나타냄.
- ： 이는 플라스틱 골재가 균일한 입도로 인해 다량 혼입 시 유동성이 저하되는 것으로 75% 이상 치환할 경우 사용성 면에서 불충분하다고 판단되기 때문에 플라스틱 골재의 적정 치환율을 50% 이내로 사용하는 것이 적합.

☑ 재료분리에 저항성을 가짐과 동시에 유동성을 확보하기 위해서는 플라스틱의 종류와는 무관하나 가공형상은 펠릿의 형태로 적용하는 것이 유리할 것으로 판단되며, 인공경량골재를 배합 시 병행 혼입하여 사용하고 고성능 AE 감수제를 필수적으로 사용하여 최적 조합에 따른 배합을 통해 재료분리 저항성 확보가 가능함.

(나) 플라스틱 원료의 대량수급 및 품질관리 방안 검토

① 플라스틱 원료의 대량수급 방안

- 플라스틱 원료의 경우 한국플라스틱단일재질협회를 통해 균일한 품질의 플라스틱 원료 대량 수급이 가능하며, 금액의 경우 플라스틱 종류에 따라 kg당 350 ~ 850원 수준으로 저렴한 단가로 수급이 가능함.

② 플라스틱 원료의 품질관리 방안

- 플라스틱 Pellet 원료는 기성품으로 제조하고 있으며, 한국플라스틱단일재질협회에서 선별된 업체를 통해 균일한 품질로 생산 및 관리하고 있음.

: 감마선 조사된 플라스틱 재료에 대한 품질 확인의 경우, 국내 G사에서 선량 보증 전문기업인 Aerial 사 및 한국원자력연구원의 검증을 거쳐 제품의 종류와 선량에 맞는 적정 선량계를 사용하여 적정 선량을 확인하고 있으므로 감마선 조사에 따른 균일한 품질관리가 가능함.

(다) 폐콘크리트 플라스틱 골재 재활용 방안 검토

□ 폐콘크리트 플라스틱 골재 재활용을 위한 공정 도출

- 플라스틱 골재를 혼입하여 제작된 콘크리트를 파쇄하여 얻은 폐콘크리트에 포함된 플라스틱 골재 재활용을 위해 기존 재활용 처리기업의 생산공정 분석을 통해 폐콘크리트로부터 플라스틱 골재 재활용을 위한 공정을 그림 55와 같이 도출하였음.

: 파쇄 - 용융 - 선별 - 압출성형 후 생산되는 재생 가공원료가 플라스틱 골재로 적용 가능할 것으로 판단됨.

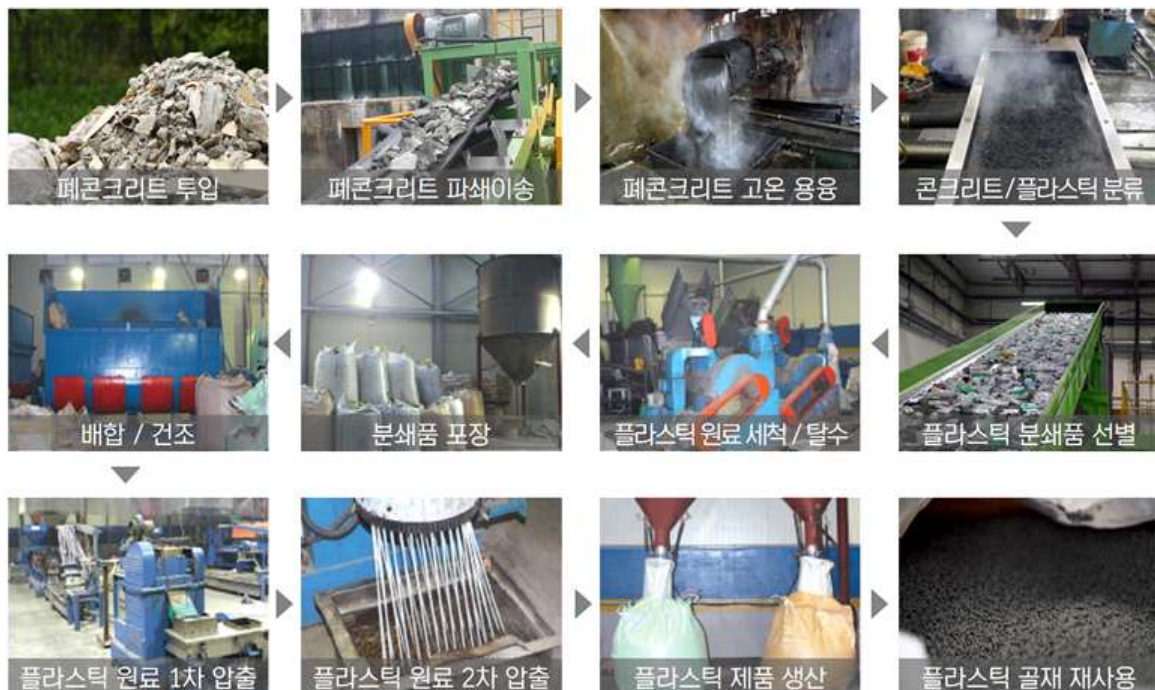


그림 55. 폐콘크리트 플라스틱 골재 재활용 공정

- ✓ 본 연구를 통해 플라스틱 원료의 대량수급과 감마선 조사를 통해 균일한 품질로 대량 개질을 통해 플라스틱 골재를 제조할 수 있는 프로세스를 확립하였음.
- ✓ 또한, 플라스틱 재활용 처리 생산공정 분석을 통해 폐콘크리트로부터 플라스틱 골재 재활용을 위한 공정을 도출하였음.

7 개질 플라스틱 골재 활용 압축강도 40MPa급 경량 시멘트 복합체 개발

(가) 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체 제조를 위한 최적 배합비 도출

- 최적 배합비를 도출하기 위해 앞서 최종적으로 감마선 영향에 따라 시멘트 복합체의 기계적 성능향상에 가장 우수한 골재를 선정하기 위한 압축강도 실험을 수행함.
- 1차년도에 진행한 실험을 통해 감마선 조사에 따라 우수한 기계적 성능향상 효과를 나타낸 PP 및 PE 골재를 혼입한 시멘트 복합체를 대상으로 표 26과 같은 배합으로 압축강도 특성을 비교·분석하였으며, 그 결과는 그림 56에 나타냄.

표 26. PP 및 PE 골재 혼입 시멘트 복합체 배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m3)							AE (vol.%)	
			Binder		W	S	LWA	PP	PE		
			C	F.A							
PP0	30	1:3	434	48	159	557	256	252	–	0.5	
PP25											
PP50											
PP75											
PP100											
PE0								–	256		
PE25											
PE50											
PE75											
PE100											

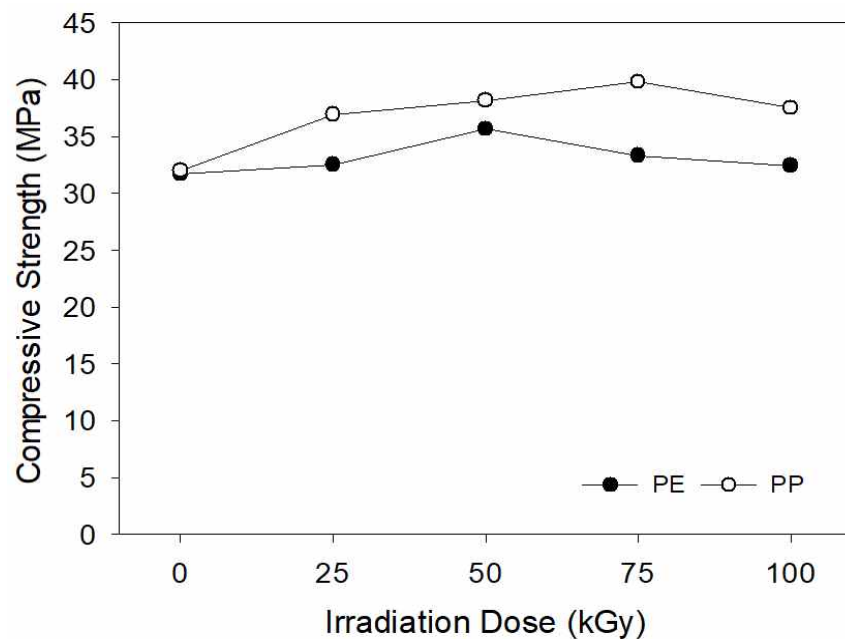


그림 56. PP 및 PE 골재 혼입 시멘트 복합체 압축강도

- PP 및 PE 골재를 혼입한 시멘트 복합체의 감마선 조사선량에 따른 압축강도 특성을 비교·분석한 결과, PP 골재를 혼입한 경우가 PE 골재와 비교하여 감마선 조사에 따른 강도증진 효율성이 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 통해 최종 플라스틱 골재 종류를 PP 골재로 선정하였음.
- 시멘트 복합체의 성능 목표 수준인 압축강도 40 MPa 및 단위용적중량 1.7 t/m³을 달성하기 위해 바인더 구성재료 및 혼입률, W/B% 및 바인더 대비 골재 비율 등을 변수로 다양한 조합에 대한 실험을 통해 최적배합비를 도출하였으며, 이를 표 27에 나타내었음.

표 27. 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 최적배합

Series	W/B (%)	B:A	Unit weight (kg/m³)							AE (vol.%)
			Binder			W	S	LWA	PP	
			C	F.A	S.F					
PP0	30	1:3	434	48	48	159	477	256	280	0.75
PP25										
PP50										
PP75										
PP100										

(나) 감마선 영향에 따른 시멘트 복합체의 기계적 성능평가

① 압축강도 평가

- 최적배합에 따른 감마선 조사선량별 단위용적중량 대비 압축강도 특성을 분석하였으며, 실험결과를 표 28 및 그림 57에 나타냄.

표 28. 최적배합에 따른 시멘트 복합체 단위용적중량 및 압축강도 특성

Series	Compressive strength (MPa)			Unit Volume Weight (t/m ³)
	3 Days	7 Days	28 Days	
PP0	23.54	26.86	31.33	1.677
PP25	28.55	33.55	38.06	1.683
PP50	28.88	34.26	40.63	1.686
PP75	33.5	36.12	41.46	1.686
PP100	26.24	32.31	37.65	1.687

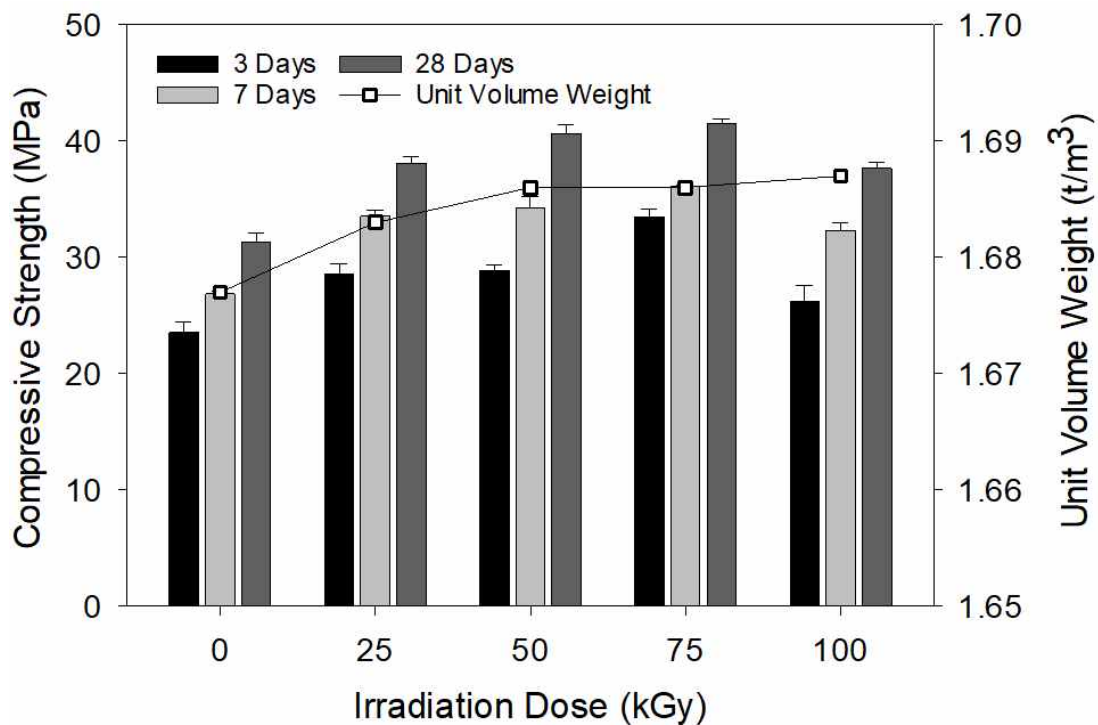


그림 57. 최적배합에 따른 시멘트 복합체 단위용적중량 및 압축강도

- 본 실험에서 고강도 경량화를 위한 감마선 조사 플라스틱 혼입 시멘트 복합체는 설계기준강도 30 MPa로 설정하였음.
: 제조된 시멘트 복합체의 28일 압축강도는 31.33~41.46 MPa로서 목표로 한 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타남.
- 감마선 조사선량에 따른 분석결과, 조사선량 75 kGy까지 지속적으로 압축강도가 증가하였으며, 고선량인 100 kGy에서는 오히려 강도가 감소하며, 이전 실험에서 나타난 결과와 유사한 양상을 나타냄.
- 실험결과에 따른 시멘트 복합체의 성능 수준을 살펴보면, 가장 높은 압축강도를 나타낸 75 kGy에서의 압축강도는 41.46 MPa로 감마선 조사하지 않은 대조 시험체의 압축강도 31.33 MPa와 비교하여 압축강도가 30.8% 증진하였으며, 이때의 단위용적중량은 1.686 t/m^3 으로 측정되었음.
: 이는 경량 시멘트 복합체 세계적 수준에 준하는 것으로 감마선 조사로 개질된 플라스틱 골재를 활용하여 경량성을 확보함과 동시에 소요의 강도를 확보할 수 있는 것으로 확인되었으며, 본 연구에서 목표로 한 성능 수준인 압축강도 40 MPa 이상, 단위용적중량 1.7 t/m^3 이하를 모두 달성하였음.
- 경량콘크리트에 대한 기준은 국내의 경우 단위용적중량 $1.4 \sim 2.0 \text{ t/m}^3$ 이하, 압축강도 15 MPa 이상을 경량콘크리트로 규정하며, 국외의 경우 ACI 211에서 단위용적중량 1.842 t/m^3 이하, 압축강도 17.2 MPa 이상인 경량골재 콘크리트를 구조용으로 정의함.
: 따라서, 본 연구에서 달성한 단위용적중량 및 압축강도의 성능 수준은 구조용 경량콘크리트의 기준에 적합한 것으로 확인됨.
- 국내외 기존 연구자들에 의해 제시된 인공경량골재를 활용한 경량콘크리트의 단위용적중량 대비 압축강도 수준을 본 연구에서 달성한 성능 수준과 비교·분석하여 그림 58에 나타냄.

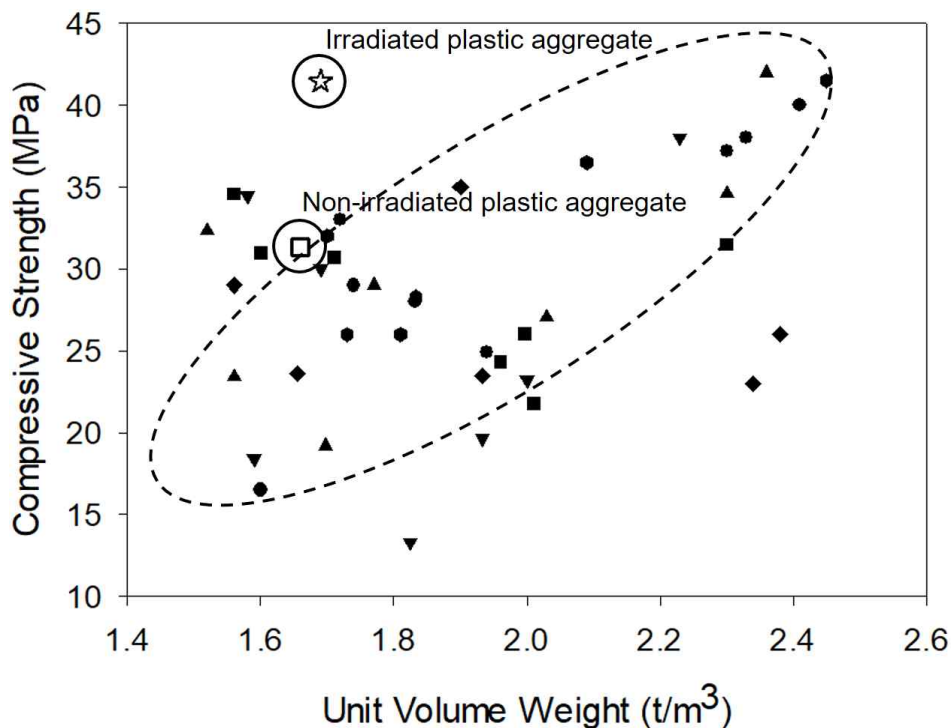


그림 58. 본 연구의 경량 시멘트 복합체와 기존 경량콘크리트 성능 비교

- 대부분의 연구에서 단위용적중량의 증가에 따라 선형적으로 압축강도의 증가를 나타내어 그림 58과 같이 타원형을 이루는 범위 내에서 대부분의 성능 수준이 나타났지만, 본 연구에서 감마선 조사로 개질된 플라스틱을 활용함에 따라 성능 수준이 기존 연구 대비 확연히 우수한 성능을 확보할 수 있는 것으로 확인되었으며, 이러한 결과는 고성능 경량 시멘트 복합체 고품질화를 위한 충분한 경쟁력을 확보할 수 있다는 것을 의미함.

② 휨강도 평가

- 최적배합에 따른 감마선 조사선량별 단위용적중량 대비 휨강도 특성을 분석하였으며, 실험결과를 표 29 및 그림 59에 나타냄.
- 감마선 조사선량에 따른 단위용적중량 대비 휨강도 분석 결과, 압축강도 실험 결과와 유사한 경향을 나타냄.
- 감마선 조사된 플라스틱을 혼입한 시멘트 복합체의 강도 증진 요인은 플라스틱의 개질 메커니즘에 기인하며, 추가적으로 SEM 및 XRD 분석을 통해 강도 증진 메커니즘을 설명할 수 있음.

표 29. 최적배합에 따른 시멘트 복합체 단위용적중량 및 휨강도 특성

Series	Flexural strength (MPa)	Unit Volume Weight (t/m ³)
PP0	4.61	1.677
PP25	4.77	1.683
PP50	5.23	1.686
PP75	5.47	1.686
PP100	5.00	1.687

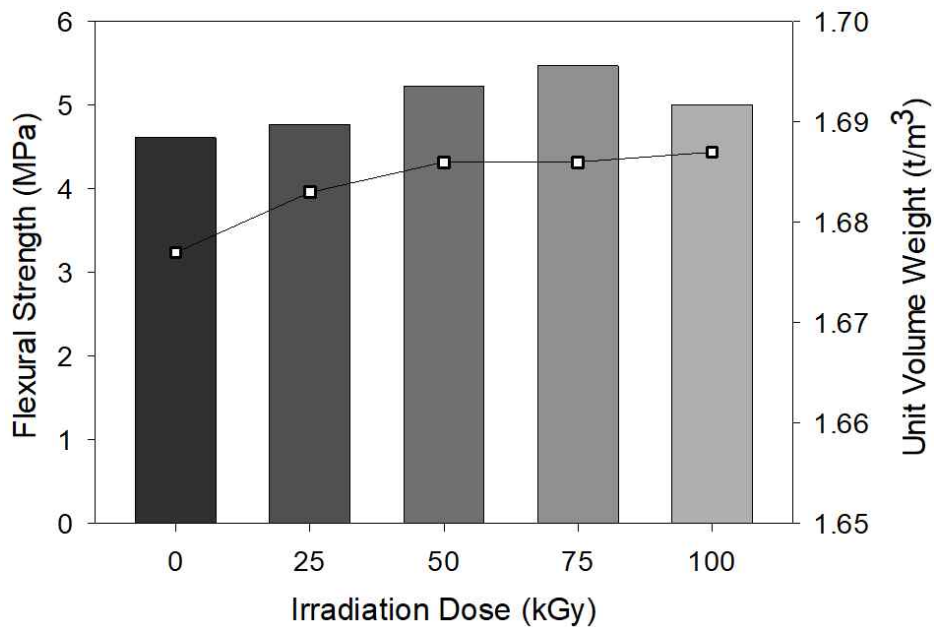


그림 59. 최적배합에 따른 시멘트 복합체 단위용적중량 및 휨강도

- ✓ 감마선 조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체의 성능평가 결과, 감마선 비조사 시험체 대비 감마선 조사 시 압축강도가 30.8% 증가하였으며, 본 연구개발을 통해 달성한 성능 수준은 압축강도 41.46 MPa, 단위용적중량 1.686 t/m³로 목표성능 수준인 압축강도 40 MPa, 단위용적중량 1.7 t/m³을 모두 달성하였음.
- ✓ 국내·외 기존 연구자들에 의해 수행된 인공경량골재 활용 콘크리트의 성능 수준과 비교 시 확연히 우수한 성능을 확보할 수 있는 것으로 확인되었으며, 고성능 경량 시멘트 복합체 고품질화를 위한 충분한 경쟁력을 확보한 것으로 판단됨.



위변조확인

시험성적서

접 수 번 호 : QT21-00579

접 수 일 자 : 2021년 09월 13일

시 료 명 : 감마선 조사 Polypropylene (PP) 골재 혼입 시멘트 복합체 5종

시료채취일 : -

채 취 장 소 : -

시료채취자 : -

의뢰인 : 서울특별시 서초구 남부순환로 319길 7(서초동)

생 산 자 : -

(재)한국건설생활환경시험연구원 강용학

용 도 : 과제 성능 평가용

- 결 과 -

연번	시험종목	시험방법	시험결과
1	압축 강도-PP (0 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	31.99
2	휨 강도-PP (0 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	4.61
3	단위 용적 중량-PP (0 kGy) (t/m ³)	KS F 2462:2016	1.677
4	압축 강도-PP (25 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	38.15
5	휨 강도-PP (25 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	4.77
6	단위 용적 중량-PP (25 kGy) (t/m ³)	KS F 2462:2016	1.683
7	압축 강도-PP (50 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	40.66
8	휨 강도-PP (50 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	5.23
9	단위 용적 중량-PP (50 kGy) (t/m ³)	KS F 2462:2016	1.686
10	압축 강도-PP (75 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	41.83

2021 년 10 월 15 일

작성자 : 송락균 송락균

기술책임자 : 이대석 이대석

(주) 한국 건설 기술 시험 연구원



전화번호 : 031)353-1252

주소 : 경기도 화성시 정남면 보통내길253번길 43-16, 홈페이지 : <http://kcttr.co.kr>

비고 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.

페이지 1/3

(주) 한국 건설 기술 시험 연구원 (Korea Construction Technology & Test Researcher)



위변조확인

시험성적서

시 료 명 : 감마선 조사 Polypropylene (PP) 골재 혼입 시멘트 복합체 5종 접 수 번 호 : QT21-00579

- 결 과 -

연번	시험종목	시험방법	시험결과
11	휨 강도-PP (75 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	5.47
12	단위 용적 중량-PP (75 kGy) (t/m ³)	KS F 2462:2016	1.686
13	압축 강도-PP (100 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	38.87
14	휨 강도-PP (100 kGy) (28일) (MPa)	KS L ISO679:2006	5.00
15	단위 용적 중량-PP (100 kGy) (t/m ³)	KS F 2462:2016	1.687

- 비고 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.

페이지 2/3

(주)한국건설기술시험연구원 (Korea Construction Technology & Test Researcher)



위변조확인

시험성적서

시 료 명 : 감마선 조사 Polypropylene (PP) 골재 혼입 시멘트 복합체 5종

접 수 번 호 : QT21-00579

사 진

[시험배합비]

Series	W/B (%)	B : A	Unit weight (kg/m ³)							
			Binder			Water	Sand	³ LWA	⁴ PP	⁵ AE
			Cement	¹ F.A	² S.F					
PP0	30	1 : 3	434	48	48	159	477	256	280	3.98
PP25										
PP50										
PP75										
PP100										

¹ F.A: Fly ash, ² S.F: Silica fume, ³ LWA: Light weight aggregate, ⁴ PP: Polypropylene, ⁵ AE: Air entraining agent

비고 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.

페이지 3/3

(주)한국건설기술시험연구원 (Korea Construction Technology & Test Researcher)

③ SEM을 이용한 감마선 조사 플라스틱 혼입 시멘트 복합체 미세구조 분석

- 감마선 조사된 플라스틱 골재를 첨가한 시멘트 복합체의 강도실험 후 파단된 시편 내 플라스틱 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 결합을 상세히 검토하기 위하여 SEM을 이용하여 미세구조를 분석함.
 - : 플라스틱 골재와 시멘트 페이스트 사이 계면의 결합 관찰 시 전처리 과정에서 경계면의 훼손이 발생할 수 있음을 고려하여 별도의 전처리 없이 SEM 분석을 진행하고, 이후 그림 60과 같이 전처리를 진행한 후 SEM 분석을 진행하는 방법으로 나누어 분석을 미세구조 분석을 진행함.
 - : 감마선 비조사된 샘플을 포함하여 플라스틱 종류별 감마선 조사선량의 증가에 따라 나타나는 플라스틱 골재의 형상 변화에 대하여 전처리를 생략한 SEM 분석결과는 그림 61에, 전처리 후 SEM 분석결과는 그림 62에 나타냄.

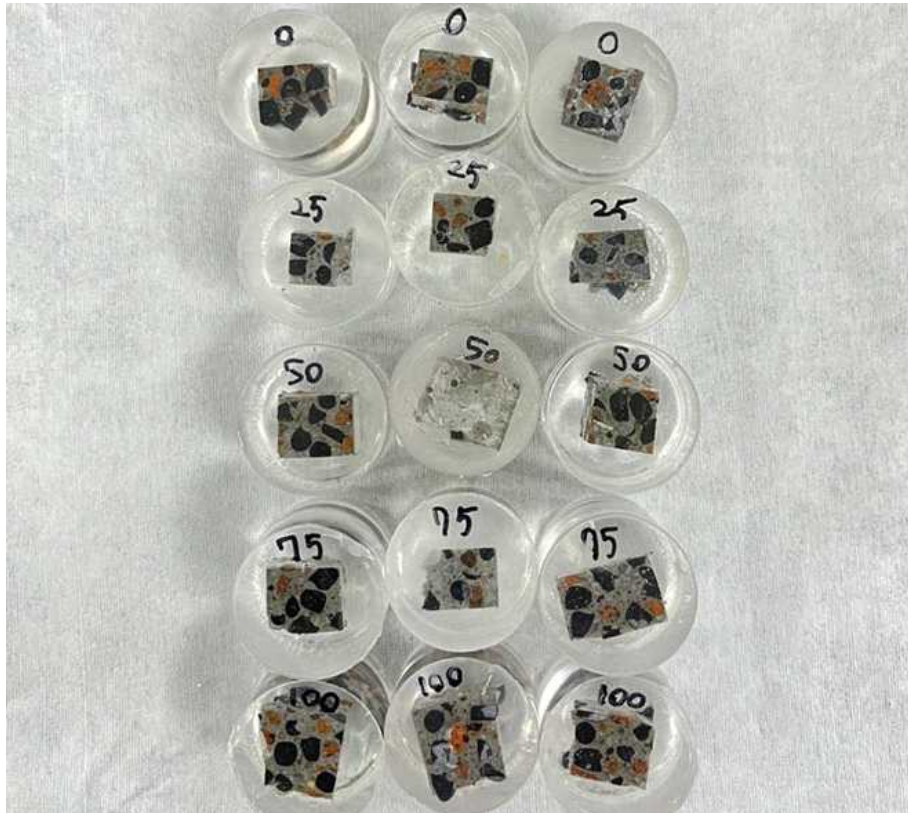
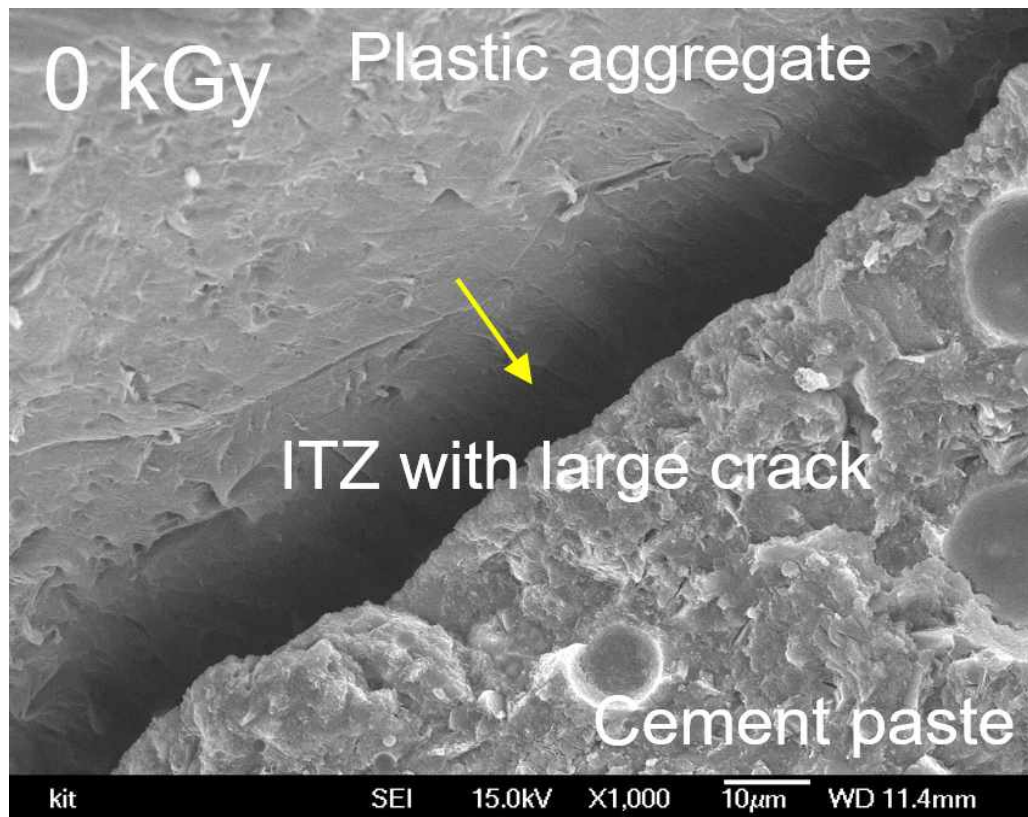
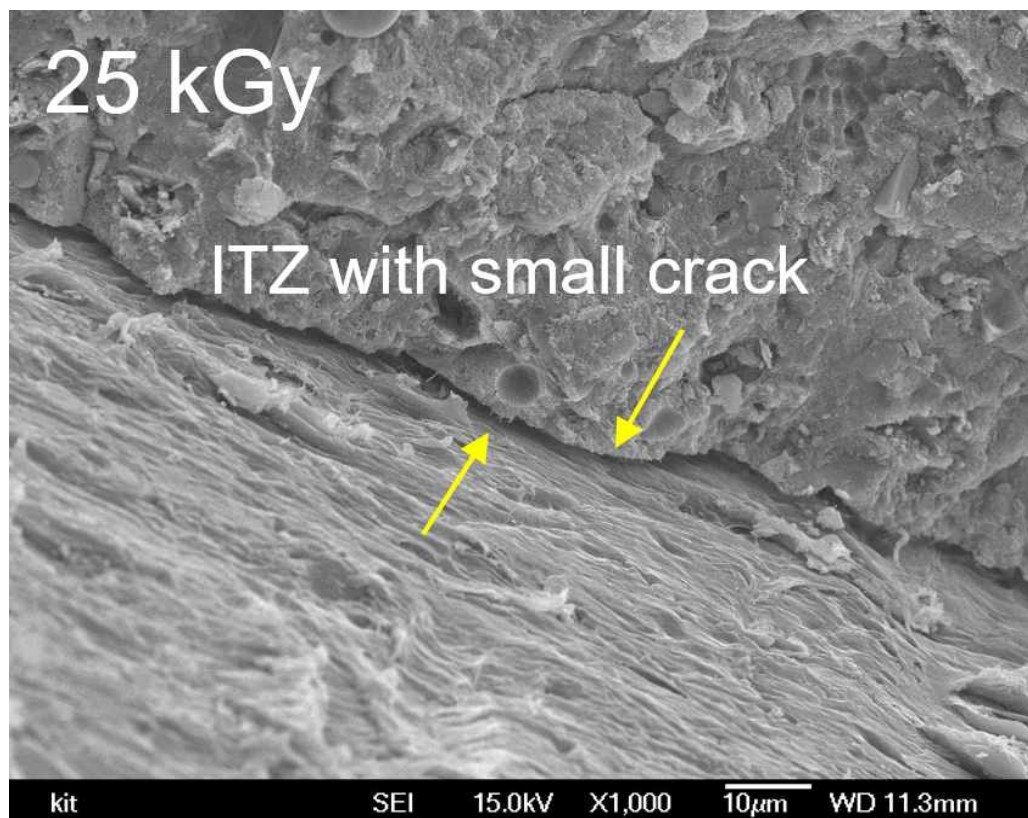


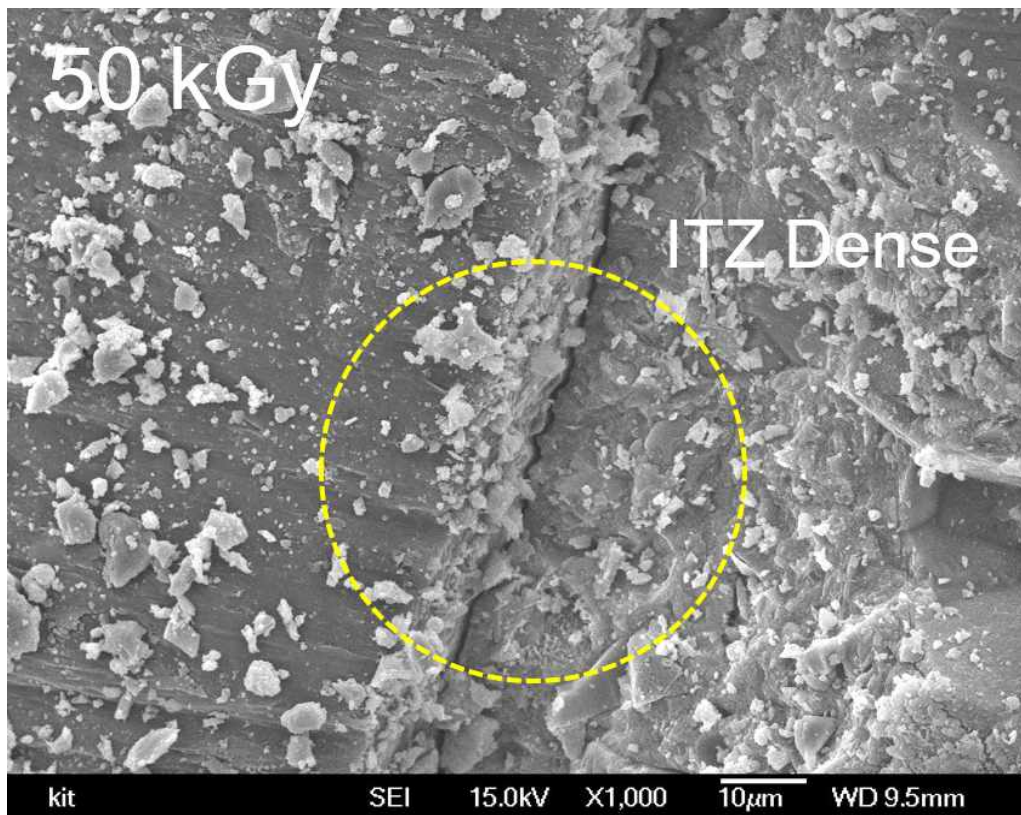
그림 60. SEM 촬영용 전처리된 시편



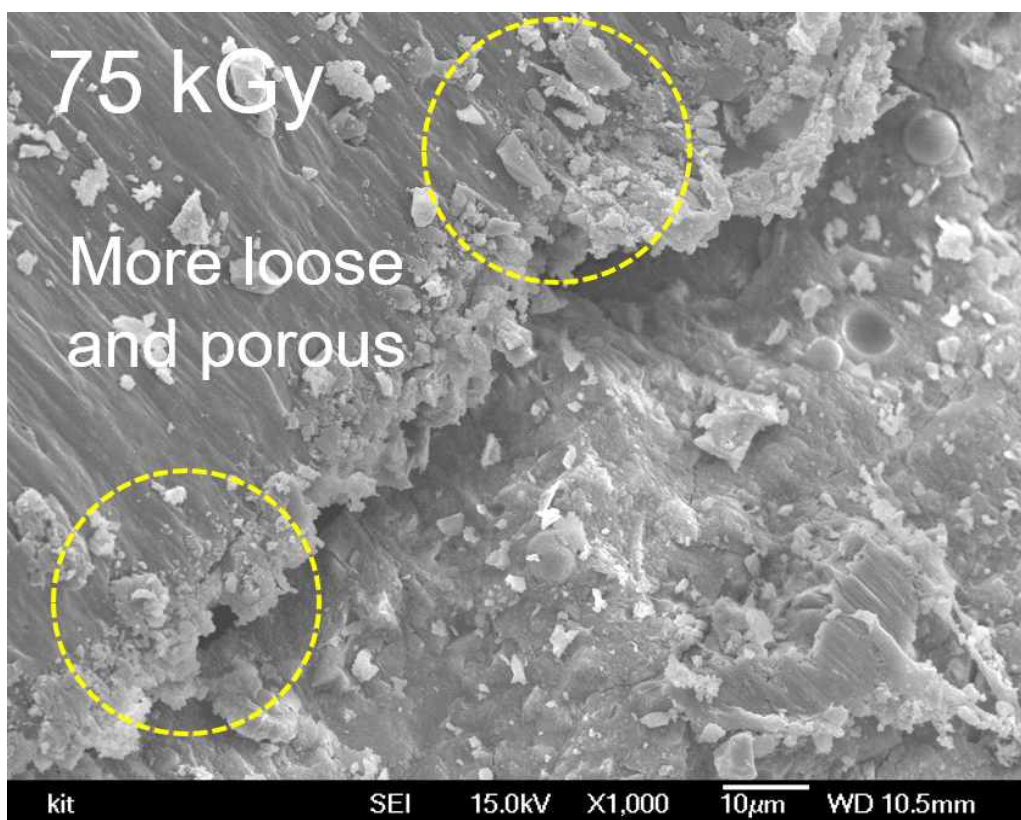
(a) 0 kGy



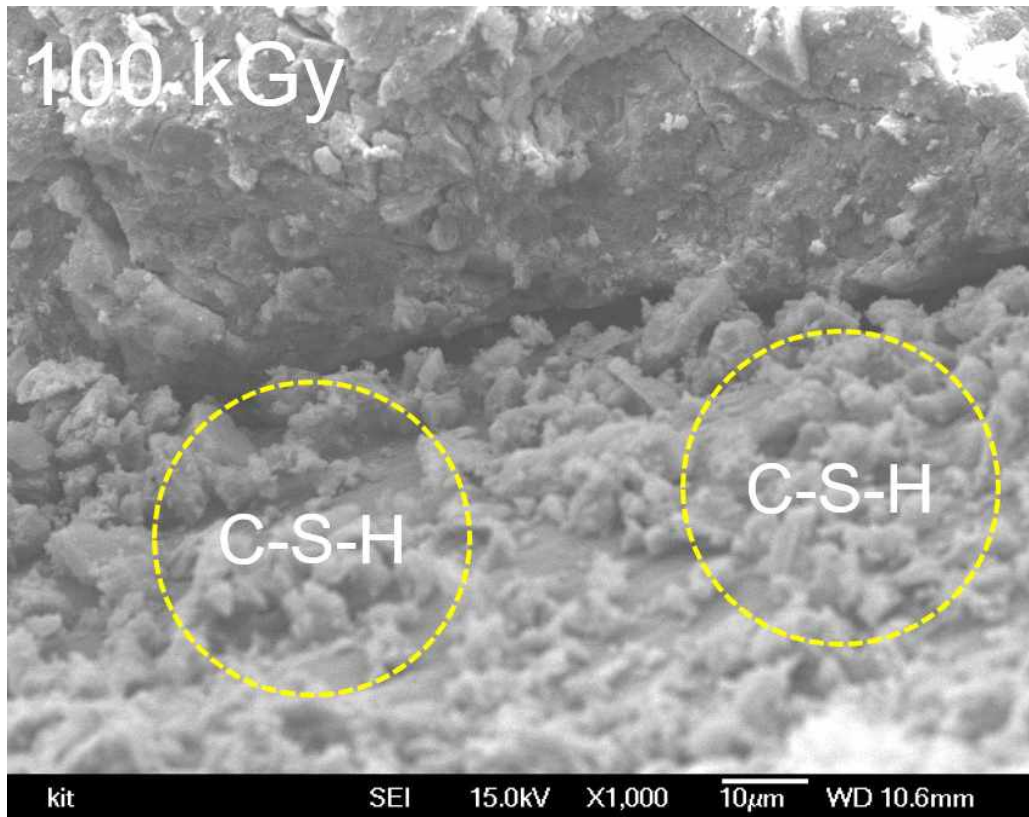
(b) 25 kGy



(c) 50 kGy

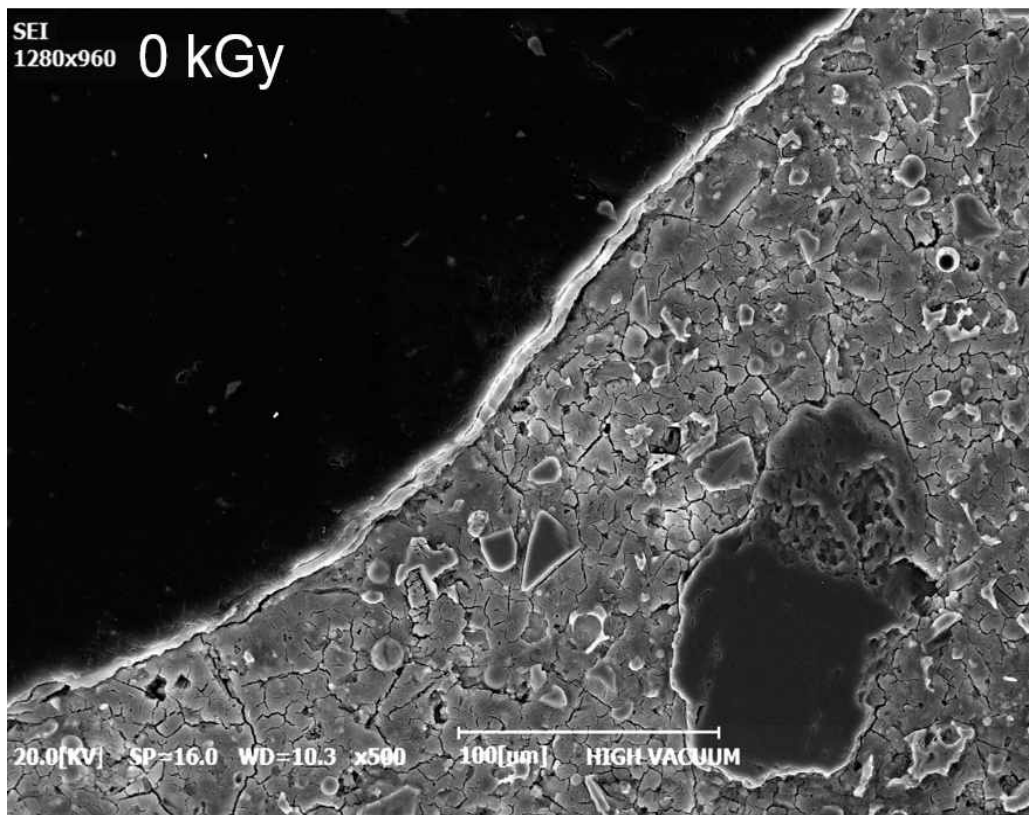


(d) 75 kGy

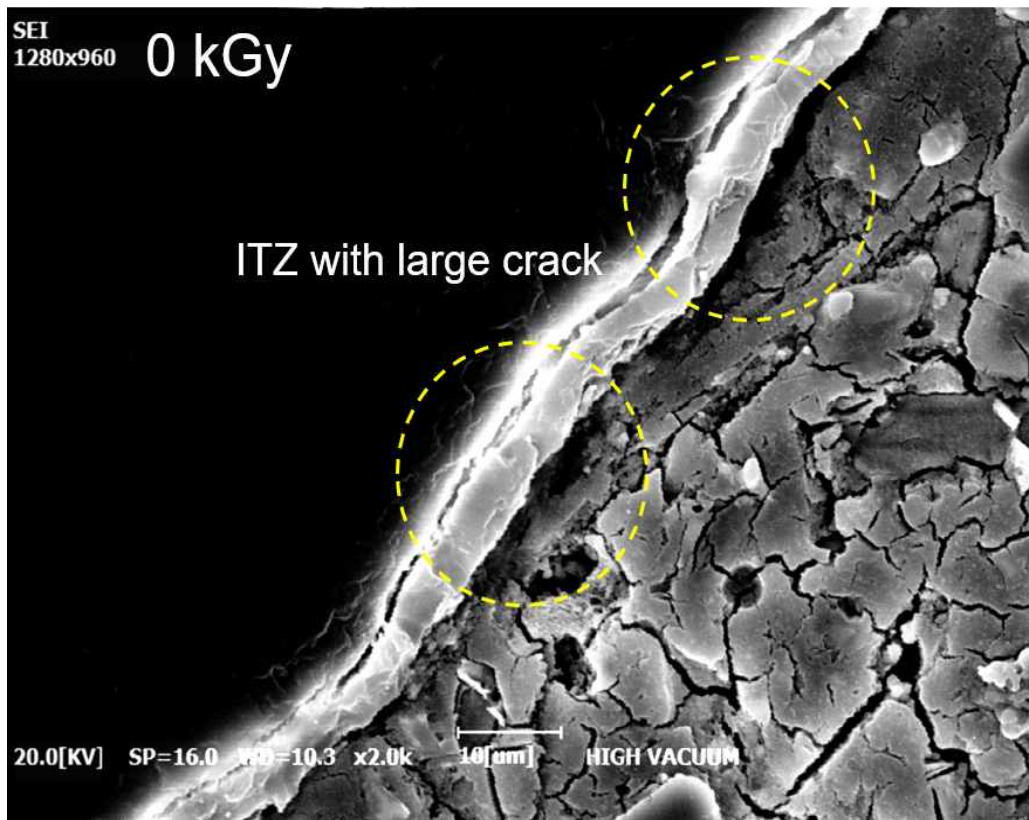


(e) 100 kGy

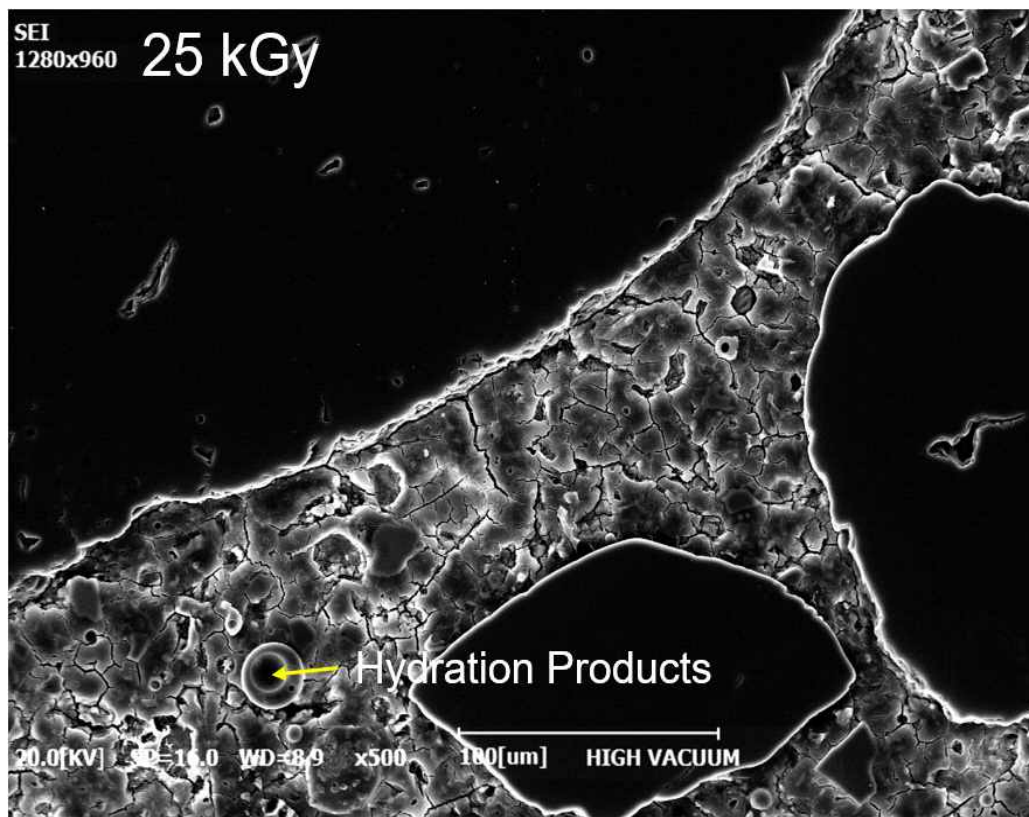
그림 61. 전처리 전 시편에 대한 SEM 이미지



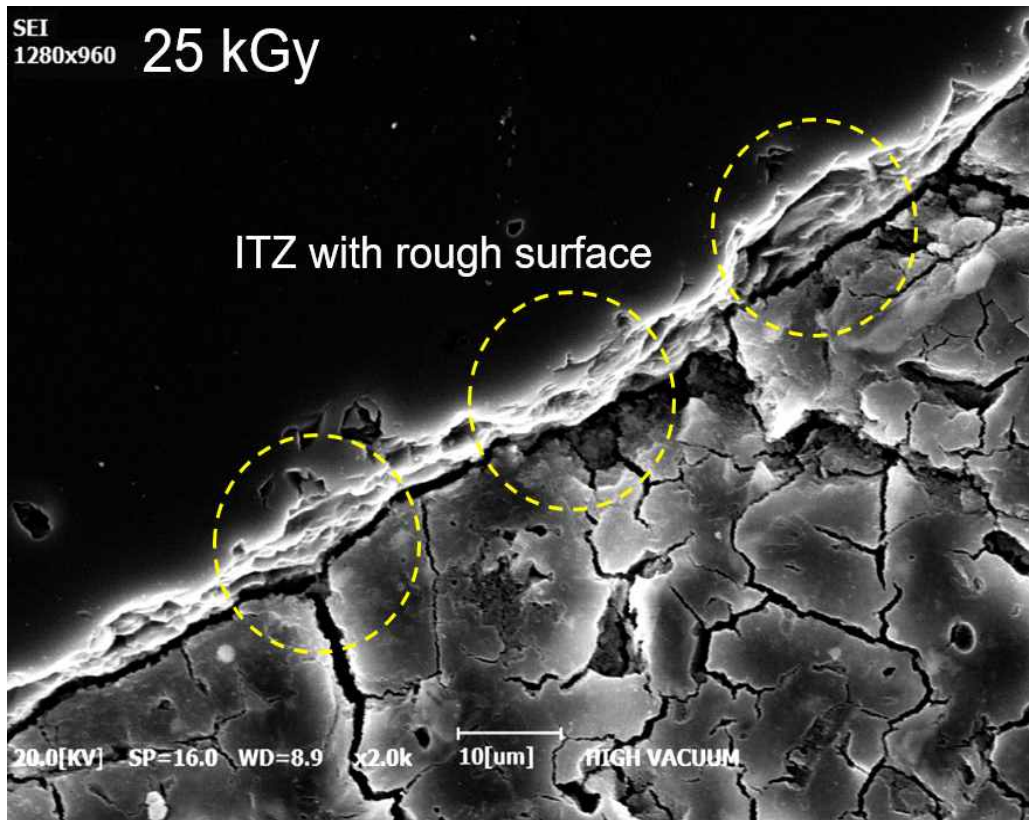
(a) 0 kGy (배율 : ×500)



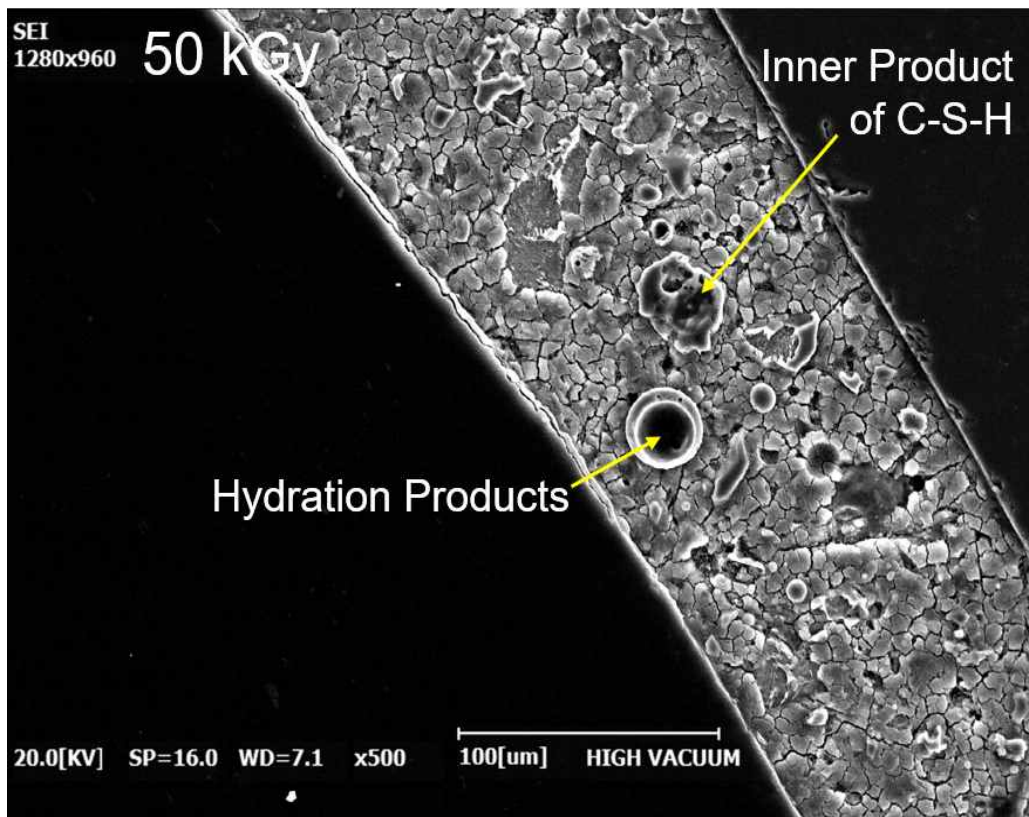
(b) 0 kGy (배율 : ×2,000)



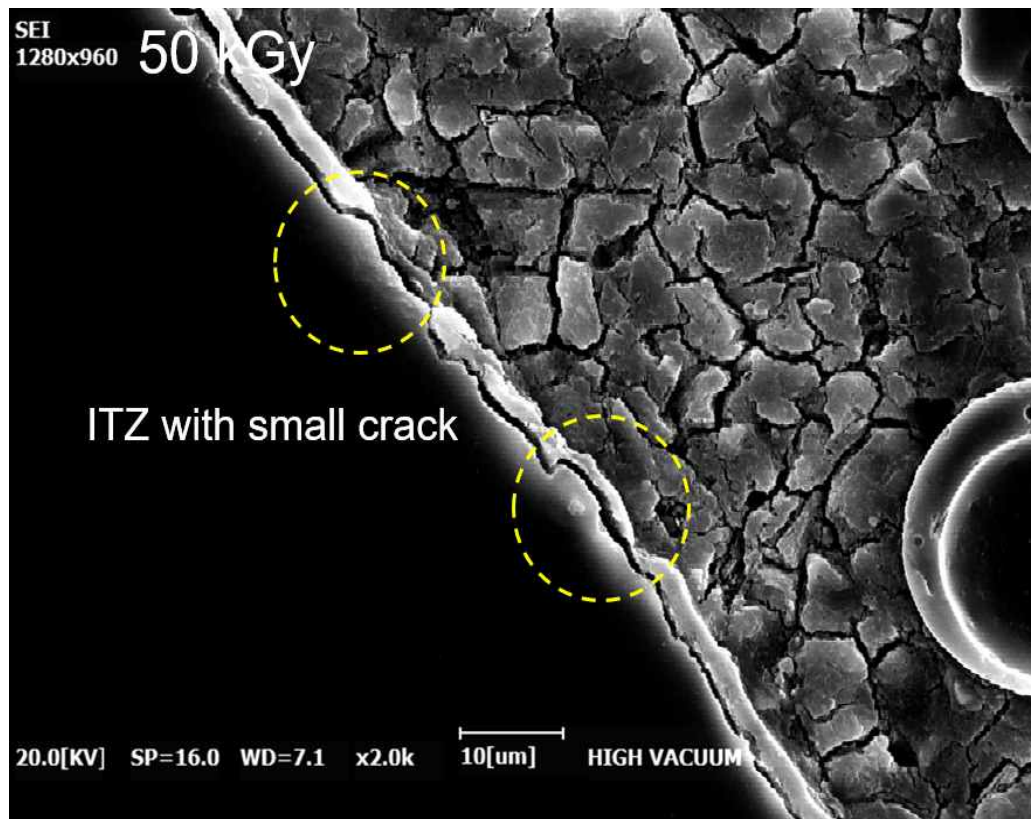
(c) 25 kGy (배율 : ×500)



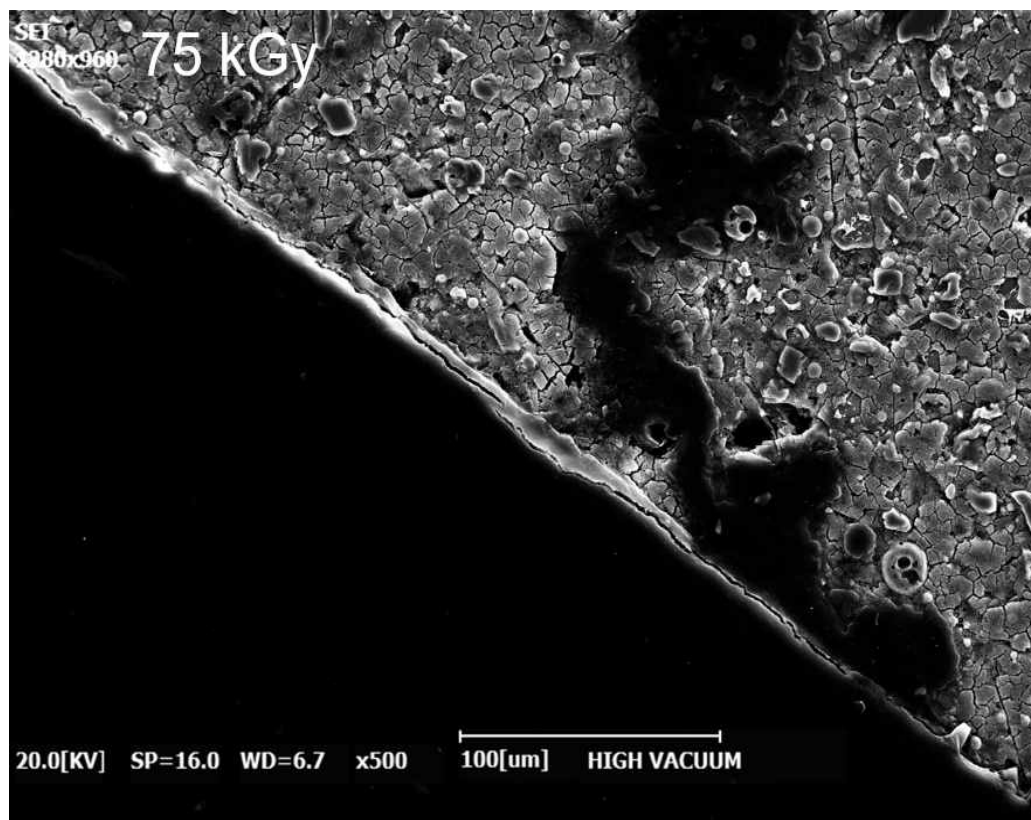
(d) 25 kGy (배율 : $\times 2,000$)



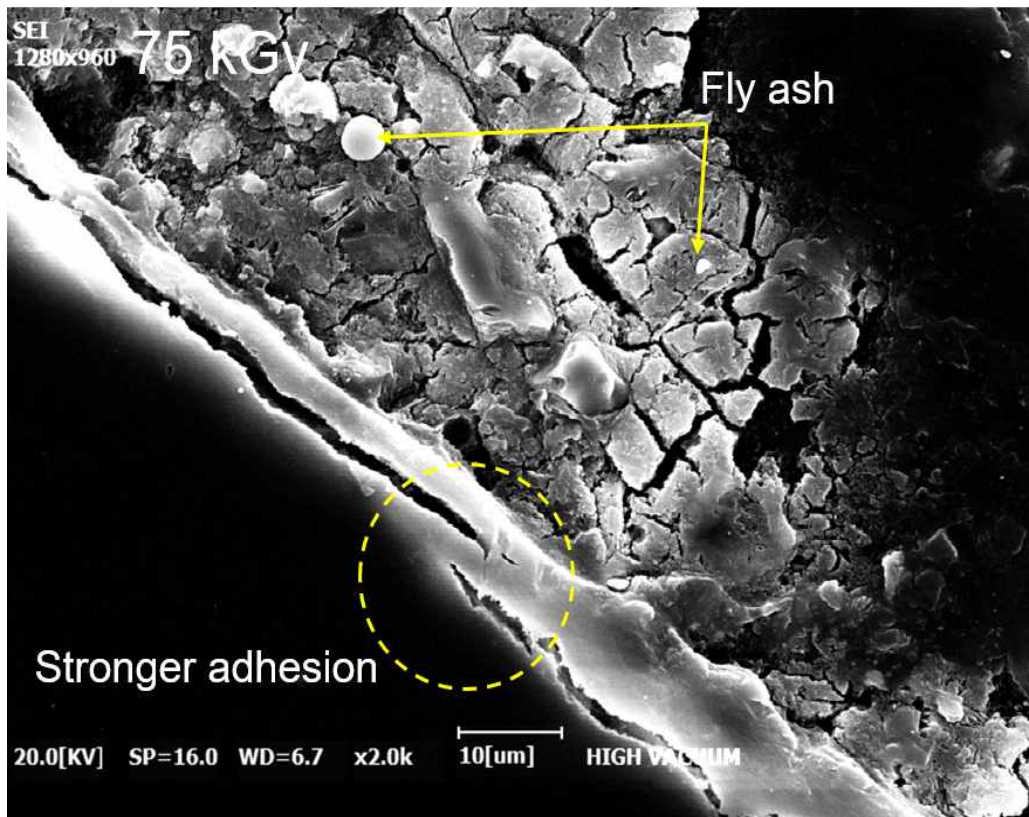
(e) 50 kGy (배율 : $\times 500$)



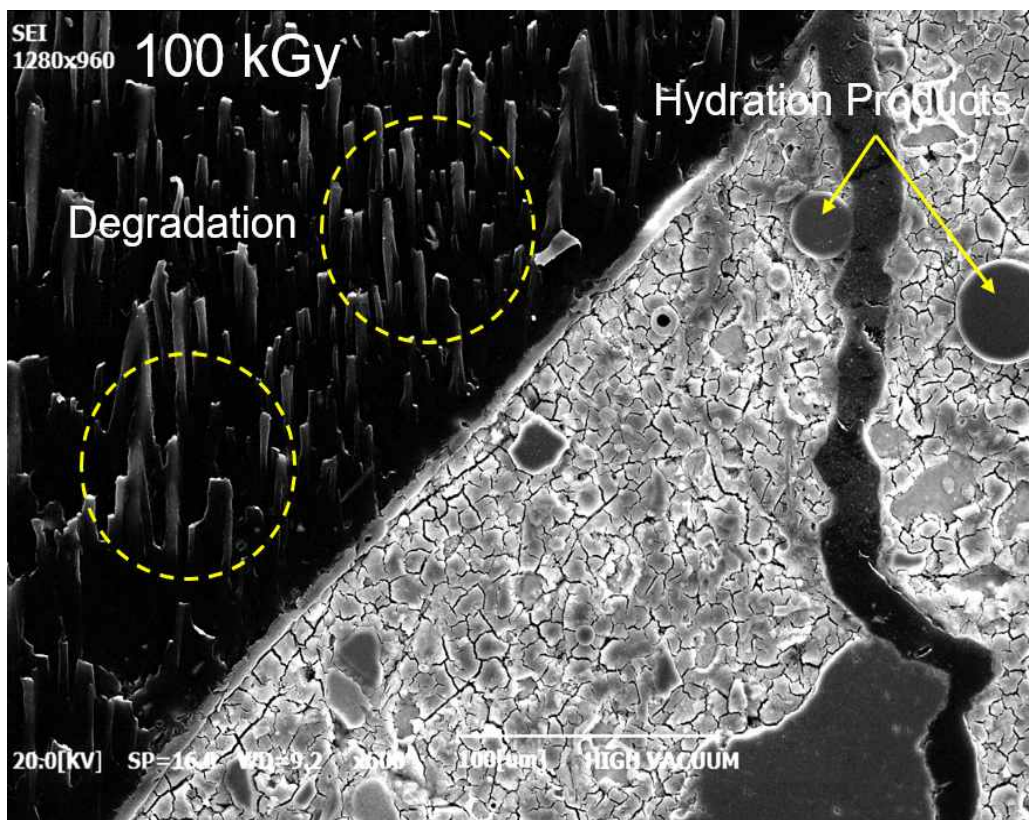
(f) 50 kGy (배율 : ×2,000)



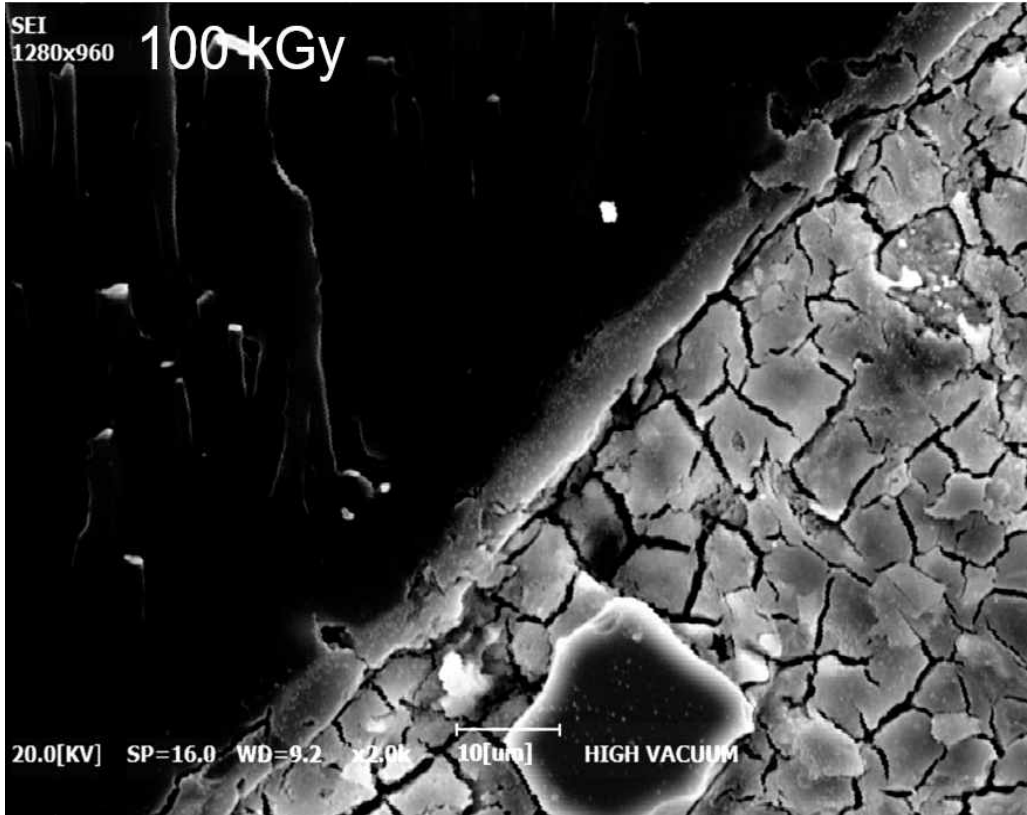
(g) 75 kGy (배율 : ×500)



(h) 75 kGy (배율 : $\times 2,000$)



(i) 100 kGy (배율 : $\times 500$)



(j) 100 kGy (배율 : ×2,000)

그림 62. 전처리 후 시편에 대한 SEM 이미지

- 전처리 전 시편에 대한 SEM 분석결과, 감마선 조사되지 않은 시편의 경우 ITZ에서 큰 균열이 발생하여 골재와 시멘트 페이스트 사이 계면이 큰 폭으로 떨어져 있는 것으로 확인됨.
 - 감마선을 조사한 경우 ITZ가 조밀하게 채워지면서 균열 폭이 점차 좁아짐과 동시에 계면 결합이 용이한 형상으로 변화되는 것으로 관찰됨.
 - 전처리 후 시편에 대한 SEM 분석의 경우, 감마선 조사선량의 증가에 따라 플라스틱 골재 표면의 형상이 거칠어지는 것을 관찰할 수 있었고, 플라스틱 골재와 시멘트 페이스트 사이 경계면에 존재하는 ITZ의 결합이 단단해짐에 따라 균열 발생 후 그림 62(h)와 같이 결합이 완전히 끊어지지 않고 계면을 따라 이어져 있는 형상을 확인할 수 있었음.
- : 이러한 골재 표면의 형상 변화는 수화를 촉진시켜 계면의 성능을 향상시킬 수 있으며 이러한 결과로 인해 시멘트 복합체의 강도가 증진된 것으로 판단됨.
- : 다만, 조사선량 100 kGy의 경우 그림 62(i)에서 플라스틱 골재 표면에 열화가 발생한 것으로 관찰되었으며, 이는 시멘트 복합체의 강도 특성 분석 시 100 kGy 조사에 따라 강도가 저하되는 현상과 관련이 있는 것으로 판단됨.

☑ SEM을 사용하여 **골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 부착 형상을 분석**한 결과, 시멘트의 강도 증진과 관련하여 인공경량골재의 단점으로 부각된 **표면의 접착 불량**이 개선되는 것으로 확인되었으며, **ITZ의 성능개선으로 부착강도 증진과 더불어 시멘트 복합체의 강도 증진에 기여**한 것으로 판단됨.

④ XRD를 이용한 감마선 조사 플라스틱 혼입 시멘트 복합체 결정구조 분석

- 압축시험에서 파단된 시편을 분말로 분쇄한 샘플 분석을 통해 강도 변화에 기여할 수 있는 결정상을 식별하고 정량화할 목적으로 XRD 분석을 수행하였으며, 분석된 XRD 결과를 그림 63에 나타냄.

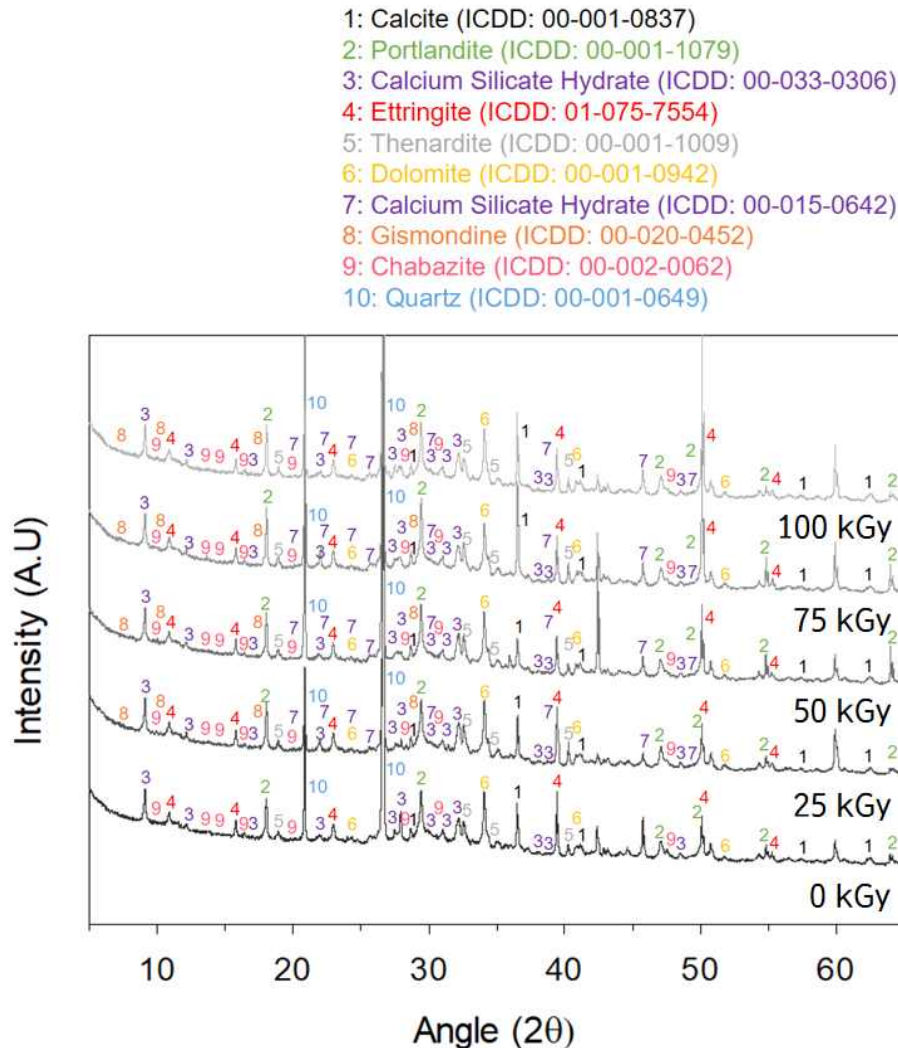


그림 63. 감마선 조사선량에 따른 시멘트 복합체 시편 XRD 분석결과

- XRD 분석결과와 다음과 같음.
 - : 수화 OPC에서 일반적으로 관찰되는 C-S-H(Calcium Silicate Hydrate) 상이 모든 샘플에서 검출됨.
 - : 시료 중 방해석과 함께 수산화칼슘의 결정형인 Portlandite가 관찰됨.
 - : 황산염 관련 상은 테나르다이트 및 에틀링자이트가 검출됨.
 - : 모든 샘플에서 백운석이 검출됨.
- 감마선 비조사 시료와 비교하여 감마선 조사 플라스틱을 혼입한 시료의 피크 강도가 증가한 것으로 나타남.
 - : 이러한 결과는 시멘트 복합체에 감마선 조사된 플라스틱을 혼입함에 따라 C-S-H 겔의 결정 및 화학구조가 변화될 수 있음을 나타냄.
- 감마선을 조사한 플라스틱을 혼입한 시멘트 복합체 시편에서는 다양한 형태의 C-S-H 상이 형성됨.
 - : 또한, 실리카흙의 추가와 함께 조사된 플라스틱은 독특한 C-A-S-H 겔을 형성할 수 있음.
 - : 특히 기스몬다이트(Gismondine) 상은 작은 케이지에 칼슘과 규소 이온을 포함하는 화학적으로 결합된 구조로 물을 저장하는데 도움이 되며, 이는 나중에 C-S-H 겔과 함께 수화를 촉진시켜 궁극적으로 시멘트 매트릭스의 강도 증가에 기여할 수 있음.
 - : 따라서, 이러한 효과는 감마선 조사된 플라스틱을 혼입한 샘플에서 관찰된 강도 증가를 설명할 수 있음.

- 요약하자면, 감마선 조사된 플라스틱을 혼입한 시멘트 복합체의 파단 후 분쇄한 분말에 대한 XRD 분석을 통해 비조사 플라스틱 시편에서 관찰되지 않은 C-S-H 겔 및 C-A-S-H 겔의 형성이 관찰되었으며, 이는 수화과정에서 시멘트 매트릭스의 강도증가에 기인하여 시멘트 복합체의 강도를 증가시키는 요인이 될 수 있음.

☑ XRD를 사용하여 강도실험 후 분쇄한 시편에 대한 결정구조를 분석한 결과, 감마선 조사되지 않은 시편에서는 관찰되지 않은 새로운 결합의 형성되는 것으로 검출되었으며, 이는 수화과정에서 시멘트 매트릭스의 강도 증진에 기여하여 시멘트 복합체의 강도가 향상된 것으로 판단됨.

(다) 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체의 건설자재 적용을 위한 경제성평가

① 경제성 분석

- 본 연구를 통해 개발한 감마선 조사 기술 활용 개질 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 관련 기술의 경제성평가를 실시하였으며, 평가 방법은 전문 분석업체를 통하여 진행하였음.
 - ： 유사분야의 TRL 평가지표 비교를 통해 기술 측면에서의 상용화 수준을 검토하였으며, 기술, 시장, 비즈니스 측면에서의 기술사업화 타당성을 검토하였음.
 - ： 구체적인 사안의 관점에서 사업화의 가능과 보완점을 검토하여 기술사업화의 방향성을 체크함.
- 천연잔골재, 인공경량골재 및 플라스틱 골재 원재료 제조 단가 비교를 통해 플라스틱 골재 사용에 따른 경제성을 비교·분석함.
 - ： 골재 제조 시 소요되는 단가는 노무비를 제외한 비용으로 산정 후 비교하였음.
 - ： 천연잔골재의 경우 한국응용통계연구원 유통물가 및 전문 판매업체의 단가를 참고하여 산정된 단가는 50,000 원/ton로 추정됨.
 - ： 플라스틱 골재의 경우 순환자원정보센터에서 제공된 플라스틱 원재료에 대한 평균 제조비용(2021년 기준)을 토대로 산정된 단가는 약 280,000 원/ton로 추정됨.
 - ： 인공경량골재의 경우 표 30과 같이 예상 원재료 제조비용을 토대로 산정된 단가는 103,000 원/ton로 추정됨.

표 30. 인공경량골재 예상 원재료 제조비용 산정 (단위: 원/ton)

구분	주원료	예상 원재료 제조비용	비고
인공 경량골재	바텀애시(50%) +플라이애시(35%) +Ca(OH) ₂ (10%) +Na ₂ CO ₃ (5%)	20,000(0.5)+150,000(0.35) +130,000(0.1)+550,000(0.05) = 103,000	90℃ 양생

※ 바텀애시 : 20,000 원/ton, 플라이애시 : 10,000 원/ton,
Ca(OH)₂ : 120,000 원/ton, Na₂CO₃ : 550,000 원/ton

- 원재료 자체의 단가 측면에서만 봤을 때, 플라스틱 골재의 제조비용이 가장 높게 산정되어 가격경쟁력이 다소 낮은 것으로 보일 수 있지만, 이는 제조에 필요한 노무비 및 기타 추가 공정에 필요한 비용을 모두 제외한 금액이므로 원재료에 들어가는 제조비용에 대한 단가를 동일한 기준으로 비교하기는 어려울 것으로 판단됨.
- 천연잔골재인 모래의 비중은 평균적으로 2.6이며, 플라스틱 골재의 비중은 약 0.9이므로 천연잔골재 대비 플라스틱 골재의 비중이 약 3배 낮음.
 - ： 요약하자면, 상기 제시한 단가는 무게당 단가를 비교한 것으로 실제 시멘트 복합체 제조를 위해 골재 배합 시 실 투입량은 비중이 3배가 낮으므로 단가 계산 시 이를 고려하여 적용하면 단가 측면에서 큰 차이가 없는 것으로 판단됨.

- 한편, 국토교통부 제 5차 골재수급기본계획 (2014~2018)에 따르면, 천연잔골재인 모래는 보존량이 지속적으로 감소하고 있으며, 이와 더불어 환경규제 및 주민들의 반대로 인해 골재 수급이 상당히 어려운 실정임.
- 정부는 이에 연간 모래 부족량을 사용량의 8%인 800만 m³로 분석하고 있지만, 실제로 업계에서는 최소 1,000만 m³ 이상 부족할 것으로 판단하고 있음.
- 뿐만 아니라, 산림이나 파쇄모래 등과 같은 대안마저도 부실한 점을 감안하면 천연모래 수급은 점진적으로 어려워지고 있어 이에 따른 자재 단가 급등이 불가피할 전망이다.
- 따라서, 이러한 상황을 고려한 단가 비교를 통해 향후 예상되는 수익성을 비교하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

② 천연잔골재 대체재로써 경쟁력 확보 가능성 분석

- 본 연구에서 제안한 기술은 인류에게 가장 쉽고 편리하게 사용할 수 있는 재료 중 하나인 플라스틱을 주원료로 사용함.
- 최근 코로나(COVID-19) 전염병은 배달 음식의 포장 등으로 인해 플라스틱의 사용이 급증하면서 주원료의 공급이 넘치고 있는 상황이므로 플라스틱 소재를 천연잔골재 대체재로 활용하는 것은 부가가치를 높이고 수익성을 확보하기에 충분한 경쟁력이 있을 것으로 판단됨.
- 최근 감마선 동위원소의 활용 기술의 선점과 우위 확보를 위해 정부에서 지속적으로 투자를 확대하고 있음.
- 정부에서 연구개발에 대한 추가적인 지원 방안이 마련되고 있어 국가 주도의 중장기적인 대규모 투자가 가능하여 국내 감마선 조사 양산화 산업기반의 구축이 용이할 것으로 판단됨.
- 다만, 천연골재를 대체하기 위해 플라스틱 개질 방법과 관련하여 현재 이용되고 있는 타 기술과의 비교를 통해 본 기술의 경쟁력 확보 가능성에 대한 검토가 필요하며, 이를 위해 표 31에 플라스틱 개질 관련 타 기술대비 본 기술의 공정 효율성을 분석하여 나타내었으며, 기존 개질 기술대비 비교우위를 분석하여 표 32에 나타냄.

표 31. 플라스틱 개질 관련 타 기술 대비 공정 효율성 분석

개질 방법	사용범위	개질 원리	본 기술 대비 장점	본 기술 대비 약점
플라즈마 표면처리	• 모든 플라스틱	진공상태에서 O ₂ , Ar, N ₂ 가스 등을 주입한 후 플라즈마를 발생시켜 표면에 친수성 부여	• 장치의 설치 및 사용 공정이 간단함	• 대량생산 불가
화학적 표면 처리	• 열에 민감한 재료 사용 불가 • 용융 온도 250℃ 이상의 엔지니어링 플라스틱 적용 불가	과산화물을 넣고 고온으로 가열하여 과산화물의 분해로 발생한 라디칼이 가교 결합을 통한 개질 산 촉매 하에서 고온의 물이나 수증기를 공급하여 가수분해 시 실록산 결합을 통해 형성된 가교 구조로 인한 개질	• 초기투자 비용 저렴	• 복잡한 공정 • 유해 화학물질 첨가 • 별도의 가열 공정 필요
섬유강화 플라스틱 (Fiber Reinforced Plastics)	• 폴리에스테르 • 에폭시수지 • 폴리아미드 • 폴리아세탈 • 폴리에틸렌	폴리에스테르 수지에 유리섬유 또는 탄소섬유와 같은 섬유 재료를 혼합하여 복합재료 형태로 개질함	• 강도 및 내열성을 크게 향상시킬 수 있음	• 원료 제조 고비용 • 표면결합 성능 불량
이온빔 (E-beam)	• 모든 플라스틱	이온화 고에너지를 투과시켜 가교 반응 및 산화분해 반응을 통해 개질함	• 조사시간 및 비용 저감	• 개질 효과에 대한 데이터 불충분
UV 조사	• 모든 플라스틱	인공적인 UV광을 방사하여 감마선 조사와 유사한 형태로 개질함	• 초기투자 비용 저렴	• 조사공정 장시간 소요 • 대량 조사 시설 부재

표 32. 기존 개질 기술대비 비교우위

개질 방법	시장 규모	기술 수요	개질 성능효율	지속 가능성	예상 투자비용	미래 시장성
플라즈마 표면처리	작음	낮음	높음	보통	보통	높음
화학적 표면처리	큼	보통	낮음	낮음	낮음	낮음
섬유강화 플라스틱	보통	높음	매우 높음	보통	낮음	보통
이온빔 조사	보통	높음	높음	높음	높음	매우 높음
UV 조사	작음	낮음	높음	매우 높음	낮음	매우 높음
감마선 조사	큼	매우 높음	매우 높음	매우 높음	매우 높음	매우 높음

- 본 연구에서 활용한 감마선 조사 플라스틱 골재 개질 기술은 타 기술대비 초기 투자비용이 높은 편이지만 개질 성능 효과가 가장 우수하고, 특히 대량생산이 가능하며, 제조 과정의 단순화, 처리시간 단축 및 저에너지 제조가 가능하므로 충분한 경쟁력을 갖추고 있는 것으로 판단됨.
: 더욱이 천연골재 공급량이 절대적으로 부족한 현재 상황에서 양산화 기술 개발과 균일한 품질확보로 조기 시장 진입이 가능할 것으로 판단됨.
- 본 기술의 가장 큰 장점은 타 기술과 같이 별도의 가열 공정이나 화학반응을 유도하기 위한 복잡한 공정을 거치지 않고 수급된 원료를 운반하여 단순 조사를 통한 방식으로 플라스틱의 물성 개질이 가능하므로 생산제조원가를 크게 낮출 수 있을 것으로 판단됨.
- 상기 분석을 통해 감마선 조사를 통한 개질 기술의 기술적 및 가격경쟁력 면에서 우위를 점할 수 있을 것으로 판단되었으며 감마선 조사를 이용한 플라스틱 개질 방법은 제조시간 단축, 공정혁신 및 단순화와 균일한 품질확보를 위한 측면에서 타 개질 기술대비 가장 효율적인 개질 기술이라고 할 수 있으므로 미래 시장성이 확대될 전망으로 판단됨.
- 이를 종합적으로 검토하기 위해 SWOT 분석을 실시하여 표 33에 나타냄.

표 33. 감마선 조사 플라스틱 개질 기술에 대한 SWOT 분석

S (Strengths)	W (Weakness)
• 개질을 통한 성능향상 효과가 가장 우수함 • 폐자원을 재활용하는 자원순환형 개질 기술 • 건설재료 기술로 4차 산업기술과 접목하는 융합기술로서 최근 세계적 흐름과 부합 • 제조공정이 단순하며 에너지 소비량이 적음 • 유해화학물질 사용이 필요 없어 균일한 품질로 제조가 가능 • 개질 후 장기 보관이 가능함	• 초기 투자비용이 다소 높은 편임 • 천연골재의 공급이 풍부한 지역에서는 경쟁력이 떨어짐 • 제조공정이 단순하며 모방 및 특허권 침해의 우려가 있음
O (Opportunities)	T (Threats)
• 천연골재 공급량 부족 상황이 더욱 심화될 전망임 • 자원순환 기술에 대한 자원 법규 강화에 따라 사업화에 필요한 자금지원 및 판매 활성화 지원을 받을 수 있음 • 방사성동위원소 활용 기술의 선점과 우위 확보를 위해 정부에서 지속적인 투자 확대 • 제조공정에서 에너지 소비량이 적고, CO₂ 발생이 거의 없는 친환경 건설재료 제조 기술임	• 폐플라스틱을 재활용 시 생산 및 품질관리가 미흡할 경우 제품의 강도 및 품질의 안정성 확보가 어려움 • 플라스틱 원료 수급을 위한 안정적인 공급 루트를 확보해야 함 • 초기 투자비용이 높아 양산화에 따른 진입장벽이 높음

- ☑ 현재 플라스틱 골재의 제조비용이 천연골재 대비 다소 높은 것으로 확인되었지만, 이는 단순 원재료에 들어가는 제조비만 포함하므로 제조에 필요한 모든 공정에서 가격경쟁력을 갖추기 위해서는 성능 대비 제조 단가에 대한 선택과 집중이 필요함.
- ☑ 감마선 조사를 통한 플라스틱 개질 기술을 타 개질 기술과 비교·분석한 결과, 기술적 측면에서 우위를 점할 수 있는 것으로 판단되었으며, 더욱이 공정 단순화와 제조시간 단축과 같은 장점을 부여하여 가격경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단

(라) 구조해석 Tool을 활용한 시멘트 복합체의 크리프에 대한 영향 검토

- 최적배합에 따른 시멘트 복합체의 장기내구성을 검토하기 위하여 크리프 영향에 대한 구조해석을 수행함.
- ： 범용 프로그램인 ABAQUS를 활용하여 구조해석을 수행함.
- ： 해석에 사용된 모델은 감마선 영향에 따른 성능이 가장 우수한 PP 골재를 감마선 조사선량 75 kGy로 조사된 시리즈와 대조군으로 감마선 비조사된 시리즈 두 가지 종류에 대하여 해석을 수행함.
- ： 앞선 강도실험을 통해 분석된 결과를 토대로 물성 데이터를 입력하였으며, 이를 표 34에 나타냄.

표 34. 크리프해석 모델별 물리적 특성

Specimen	Density (Ton/mm ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson Ratio
Original model	2.40E-09	20,000	0.2
PP0	1.67E-09	27,000	0.2
PP75	1.13E-06	29,500	0.2

- 크리프해석 시 분석 조건은 다음과 같으며, 그림 64와 같은 절차를 통해 분석을 수행하였으며, 경계 조건을 그림 65에 나타냄.
- Element type : C3D8R Solid mesh
- Average element size : 10mm
- Material : Concrete
- Number of elements : 7,200
- Number of nodes : 8,215

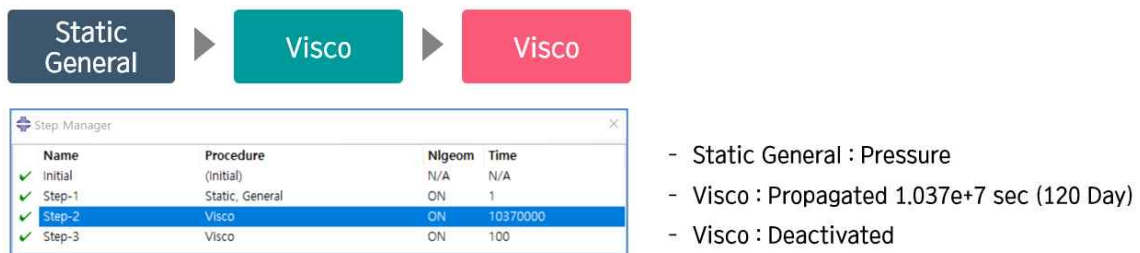


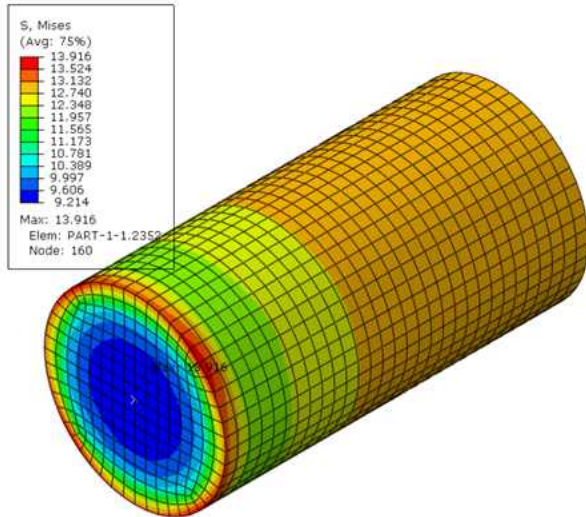
그림 64. 크리프해석 수행 절차



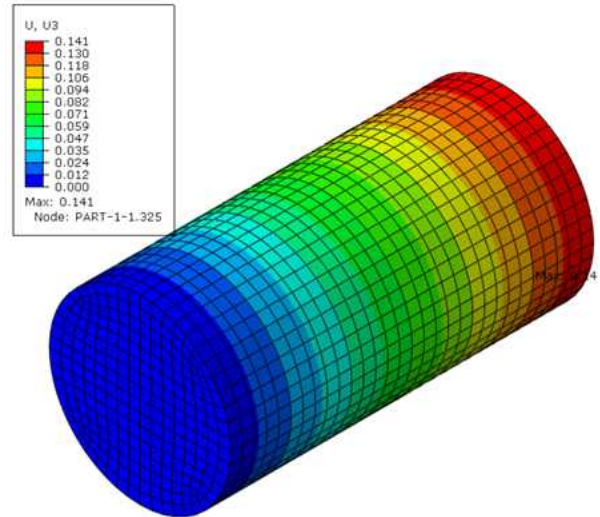
그림 65. 크리프해석 경계조건

○ 크리프해석은 KS F 2453 기준에 따라 크리프 거동을 120일간 측정하는 것으로 가정하였으며, 크리프 해석에 따른 Von Mises Stress 분포와 변형도를 그림 66에 나타내었으며, 크리프 해석에 따른 PP0 및 PP75의 변형시간-변형량 관계를 그림 67에 나타냄.

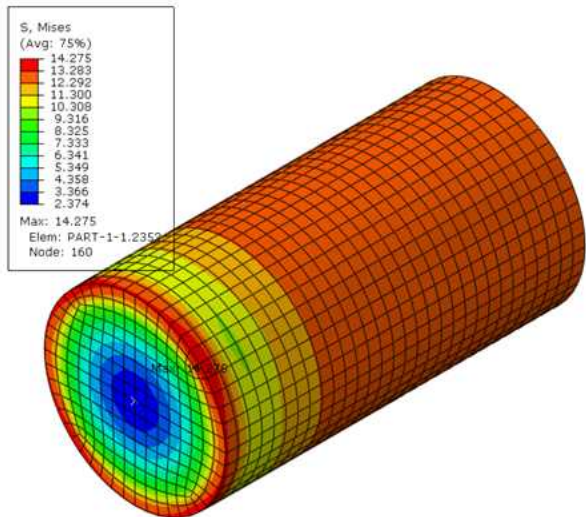
: 해석결과를 통해 지속하중(각 재령 압축강도의 40% : KS F 2453)에 의한 크리프 거동(120일)에서 시간에 따른 응력 및 변위 증가와 경향을 확인할 수 있음.



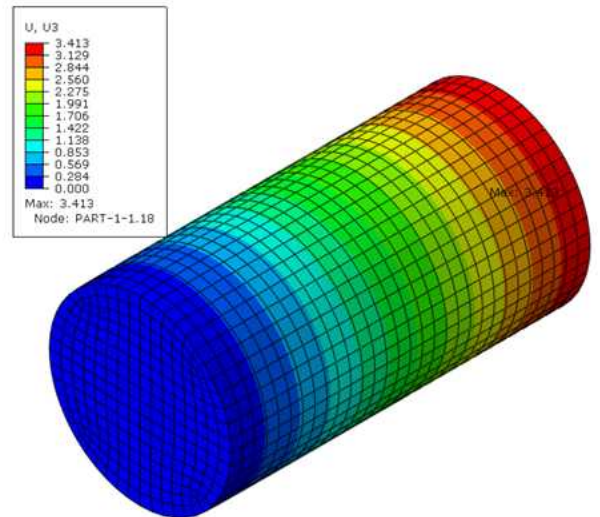
(a) Von Mises Stress (Static general – PP0)



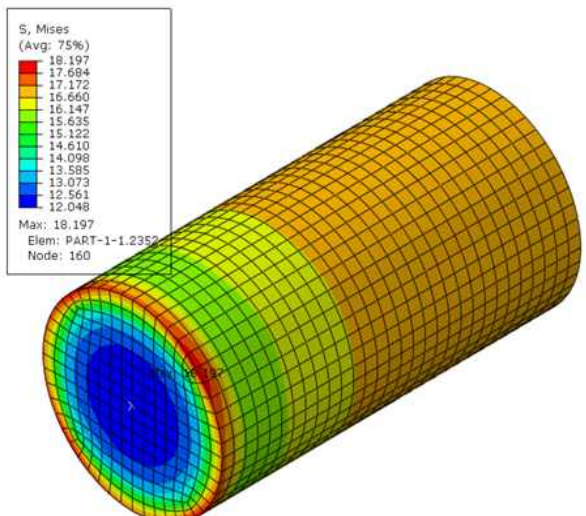
(b) Displacement U3 (Static general – PP0)



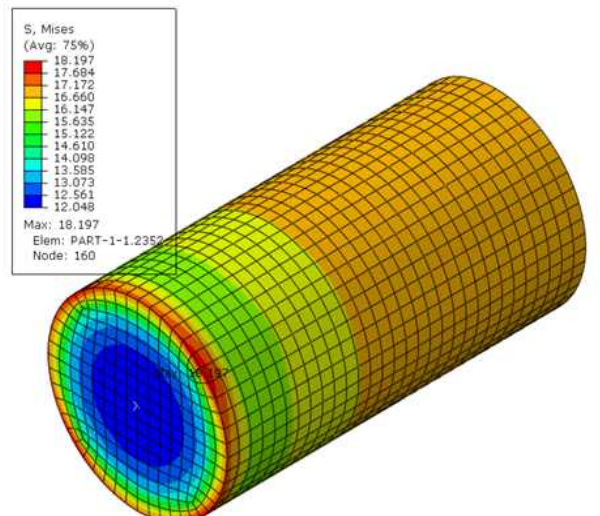
(c) Von Mises Stress (Creep analysis – PP0)



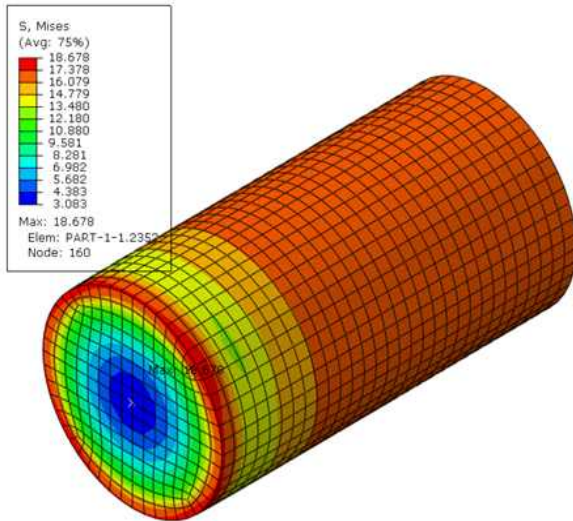
(d) Displacement U3 (Creep analysis – PP0)



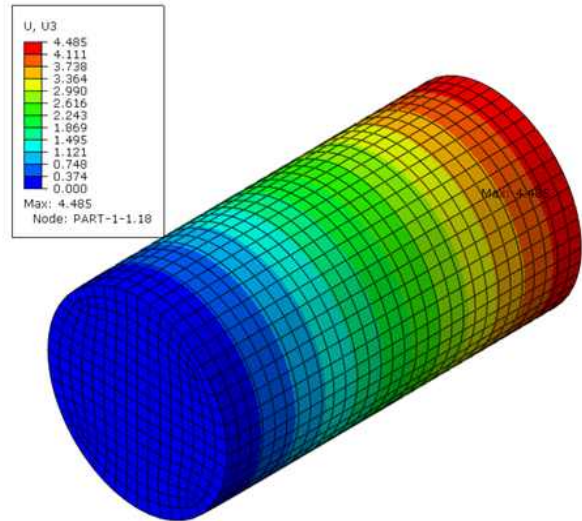
(e) Von Mises Stress (Static general – PP75)



(f) Displacement U3 (Static general – PP75)



(g) Von Mises Stress (Creep analysis – PP75)



(h) Displacement U3 (Creep analysis – PP75)

그림 66. 크리프해석에 따른 Von Mises Stress 분포 및 변형도

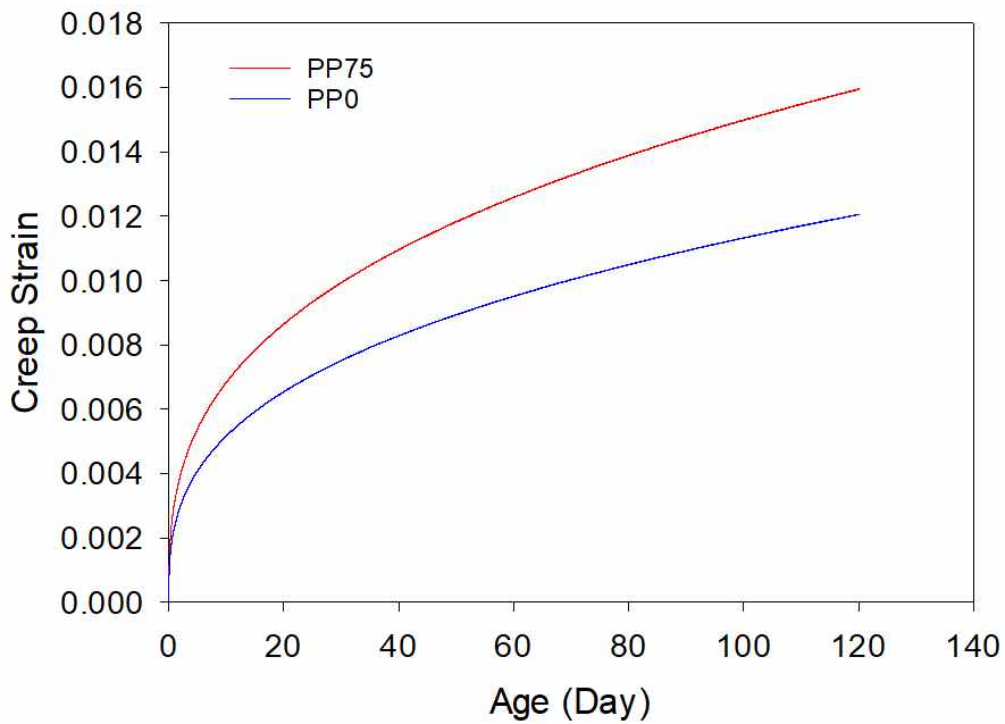


그림 67. PP0 및 PP75의 크리프 변형 해석결과

- ✔ 크리프해석 시 각 모델의 배합 조건과 재하 하중의 크기가 상이함을 고려하여 그래프 해석을 판단해야 함.
- ✔ 크리프 해석결과, 응력 및 변위가 120일 이후 극한응력값에 도달하지 않는 것으로 나타남.
- ✔ 향후 실제 시험의 Creep curve 데이터를 통해 정확한 결과를 도출할 수 있음.
- ✔ 상기 조건을 만족할 시 장기 재령의 크리프 변형을 예측할 수 있음.

⑧ 개질 플라스틱 골재 활용 시멘트 복합체의 내화성능 확보 기술 도출

(가) 최종 도출된 시멘트 복합체 최적 배합에 대한 내화성능 평가 및 가스 유해성 평가

① 감마선 조사 유무에 따른 가열 시 잔존강도 특성

- 최종 도출된 시멘트 복합체의 최적배합에 따라 제조된 감마선 조사되지 않은 시험체와 감마선 조사에 따른 강도 증진 효율이 가장 우수한 75 kGy로 조사된 시험체를 대상으로 그림 68에 나타낸 가열로를 사용하여 고온 가열 후 형상 변화와 압축강도 개선 여부를 검토함.



그림 68. 내화성능 평가용 가열로

- 플라스틱 재료의 경우 일반적으로 용융점이 200℃ 내외로 매우 낮기 때문에 가열온도가 200℃를 초과한 경우 그림 69와 같이 플라스틱 재료의 용융 및 팽창 현상이 발생하여 이를 포함한 시멘트 복합체의 역학적 성능을 거의 손실되는 것으로 나타남.

: 따라서, 200℃ 내로 가열온도를 제한하여 실험을 진행함.

: 가열온도는 상온(20℃)부터 200℃까지 50℃ 간격으로 가열하는 것으로 설정하였으며, 승온 온도는 2℃/min으로 목표 온도까지 가열 후 1시간 동안 온도를 유지시킨 후 형상변화 관찰 및 압축강도 실험을 실시함.

: 가열온도에 따른 형상변화를 그림 70에 나타내었으며, 압축강도 실험결과를 그림 71 및 표 35에 나타냄.

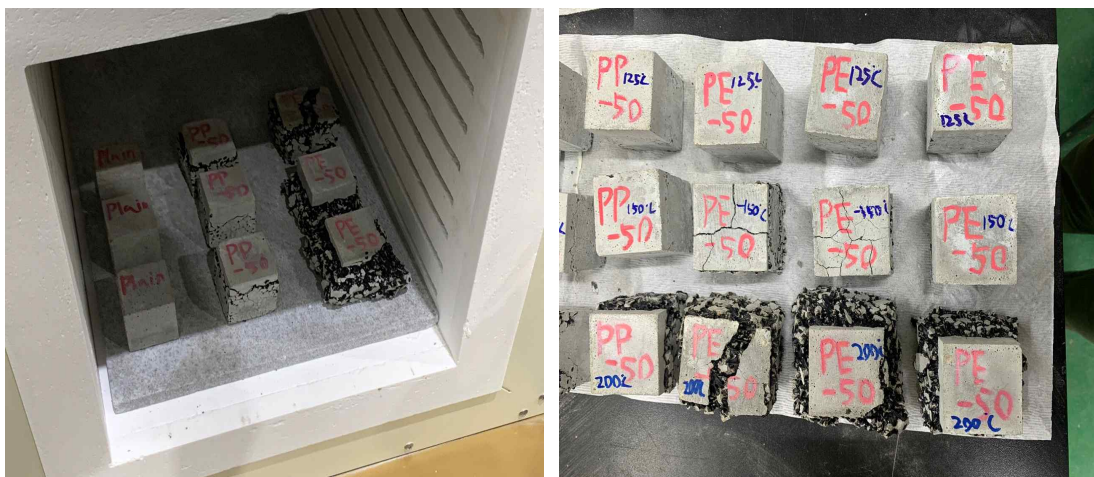


그림 69. 200℃ 이상 고온 가열 시 플라스틱 형상

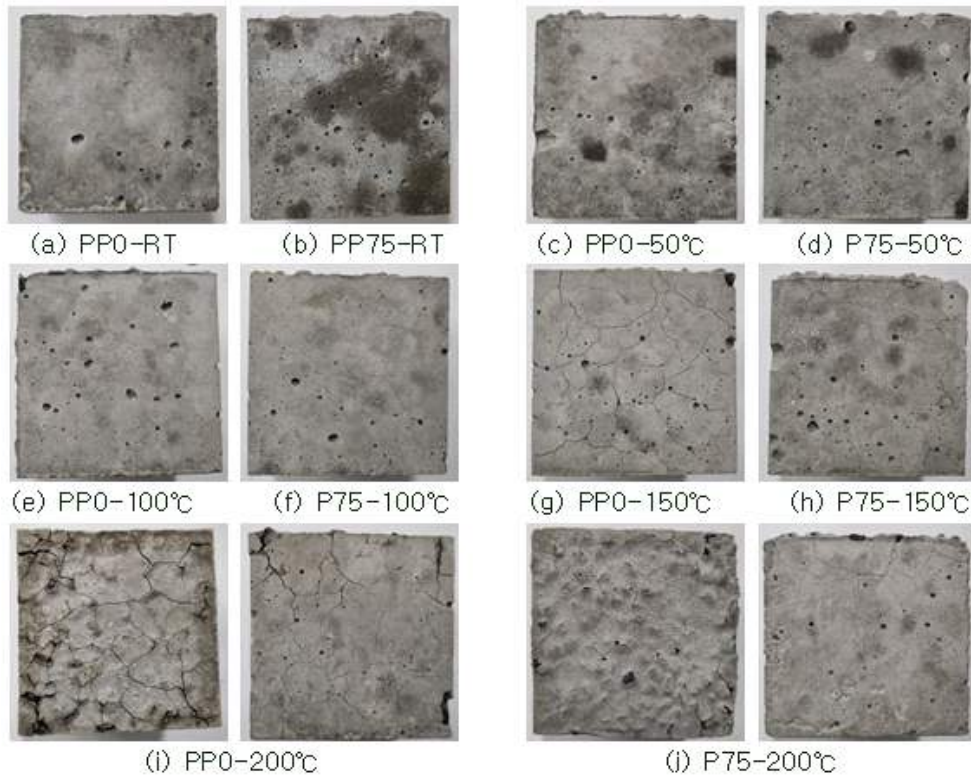


그림 70. 고온가열에 따른 시멘트 복합체 형상변화

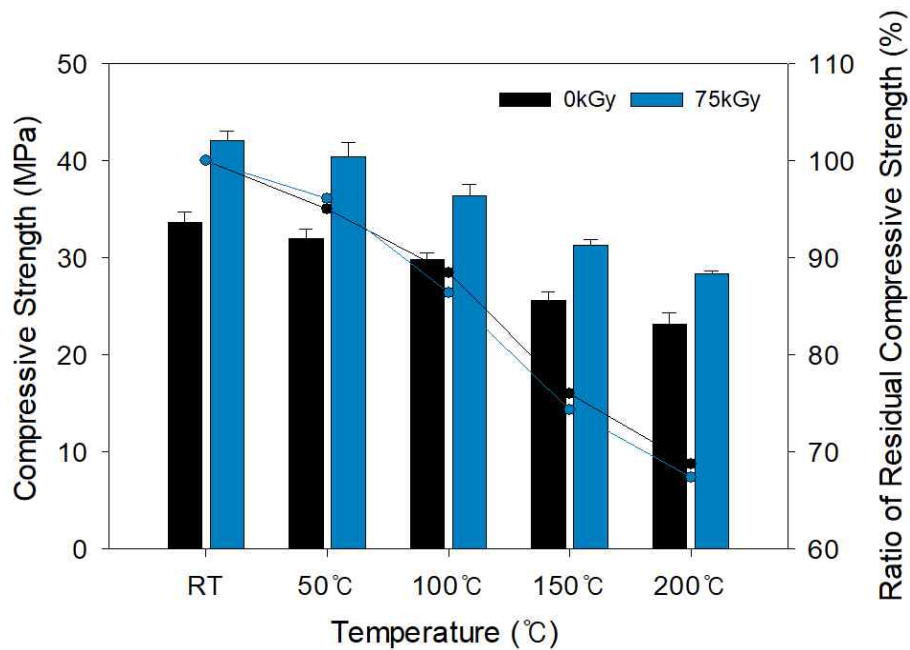


그림 71. 가열온도별 시멘트 복합체 압축강도 및 잔존압축강도율

표 35. 가열온도에 따른 압축강도 특성

Classification		Heating temperature (°C)				
		RT	50	100	150	200
Compressive strength (MPa)	0 kGy	33.69	32.01	29.81	25.60	23.17
	75 kGy	42.10	40.47	36.39	31.28	28.35
Ratio of residual Compressive strength (%)	0 kGy	100	95.02	88.49	75.98	68.77
	75 kGy	100	96.14	86.44	74.30	67.34
Increasing ratio (%)		24.96	26.43	22.07	22.20	22.36

- 각 가열온도에 따라 시멘트 복합체 가열하였을 때 감마선 비조사 플라스틱을 포함하는 시험체 대비 감마선 조사 플라스틱을 포함한 시험체에서 가열에 따른 균열이 억제되는 것으로 나타남.
: 또한, 두 시험체 모두 가열온도 100℃에서 처음 균열이 발생하였으며, 가열온도 200℃를 가한 경우 형상 유지가 힘들며 다수의 균열이 발생하는 것으로 나타남.
: 특히 200℃ 이상의 온도로 가열한 경우 아래의 사진과 같이 플라스틱 골재가 완전히 용융되어 강도 실험이 불가능한 수준으로 변형됨.
- 200℃ 내의 가열온도에서 내화성능 평가 결과, 감마선 비조사된 플라스틱 골재를 혼입한 시멘트 복합체 대비 감마선 조사선량 75 kGy로 조사된 플라스틱 골재를 혼입한 경우 전체 가열온도에서 강도가 20% 이상 증진됨.

② 가스 유해성 평가(KS F 2271) 실시

- 감마선 조사된 플라스틱을 포함하는 시멘트 복합체의 내화성능을 평가하기 위해 KS F 2271: 2019 “건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법”에 의거한 가스유해성시험을 수행함.
: 시험조건은 표 36에 따라 가열 시간은 총 6분으로 부열원으로 3분간 가열한 후 주열원으로 3분간 가열함.
: 시험체의 재료 및 구성은 감마선 조사된 플라스틱을 포함하는 시멘트 복합체의 최종배합과 같은 것으로 하며 시험체 개수는 2개로 함.
: 시험체 조건을 표 37에 나타내었으며, 그림 72와 같이 시험체의 표면에서 뒷면을 관통하는 지름 25mm인 구멍을 3개 천공하여 가열하는 것으로 함.
: 시험은 실험용 쥐를 한 마리씩 넣은 회전 바구니 8개를 피검 상자 내에 넣고, 가열 시작 후 15분 간 개개의 실험용 쥐를 대상으로 수행함.

표 36. 가스유해성 시험조건

가열조건	부열원(LPG)으로 3분간 가열 후 다시 주열원(전열)으로 3분간 가열					
가열면	앞 · 뒷면 동일					
시험 환경	온도 (22 ~ 25) °C, 습도 (59 ~ 55) % R.H.					
시험 시간 (분)	15					
시험용 흰 쥐	계통	ICR계 암놈	주령	5주	체중	(18 ~ 22) g

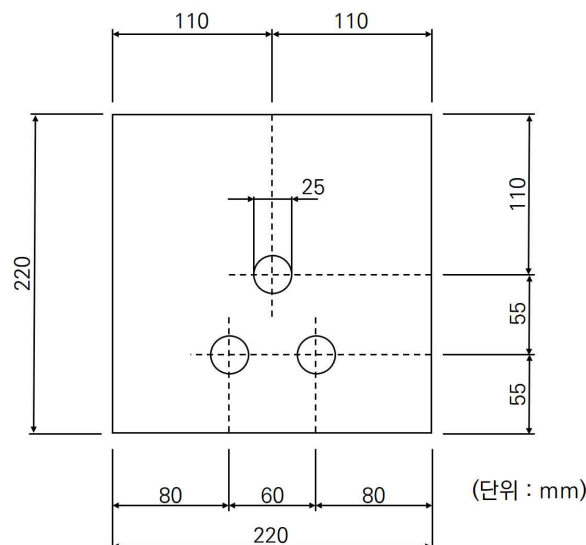
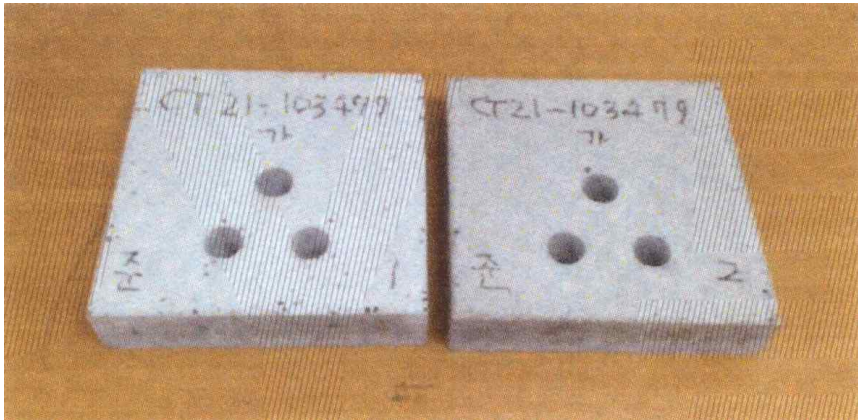
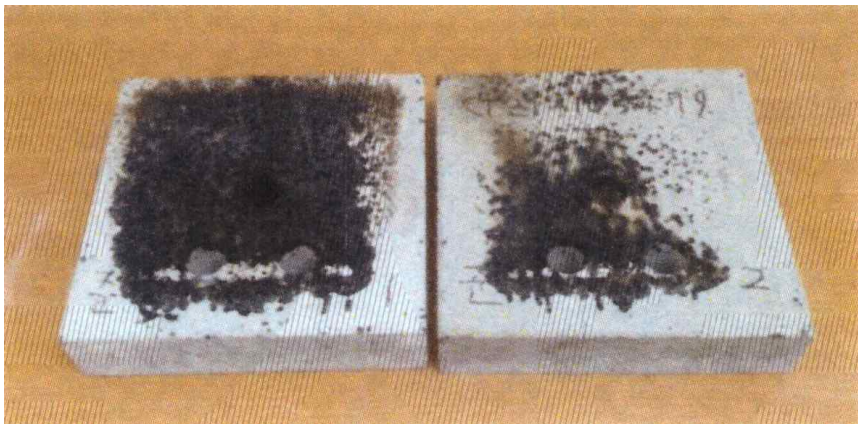


그림 72. 가스유해성 시험용 시험체 준비

표 37. 가스유해성 시험체조건

크기 (mm)	220 × 220			
두께 (mm)	시험체 1	51.4	시험체 2	51.3
질량 (g)		3,955.4		4,165.5
밀도 (kg/m³)		1,584.2		1,666.3
전처리	온도 (23 ± 2) °C, 습도 (50 ± 5) % R.H.			
시험체 사진				
	시험 전  시험 후			

- 국내에서 내화성능을 구분하는 등급은 불연재료, 준불연재료 및 난연재료로 구분하고 있으며 등급별 KS F 2271 시험방법에 의거 하여 판정 기준은 모두 실험용 쥐의 평균 행동 정지 시간이 9분을 초과 하였을 경우 적합 판정을 내림.

: 감마선 조사된 플라스틱 골재를 포함한 시멘트 복합체 시험체의 가스유해성시험 결과를 표 38에 나타냄.

: 이때 한 마리당 측정된 시간을 평균하여 결과를 산출하였으며, 식 (1)은 가스유해성 평가의 기준이 되는 실험용 쥐의 평균 행동 정지 시간 산출식을 나타냄.

$$x = \bar{X} - \sigma \quad (1)$$

: 여기서, x : 평균 행동 정지 시간 (min)

$\bar{X}$: 행동 정지 시간의 평균값 (min)

σ : 행동 정지 시간의 표준편차 (min)

표 38. 가스유해성 시험결과

회전상자	행동정지시간	
	시험체 1	시험체 2
M1	15 min 00 s	14 min 59 s
M2	15 min 00 s	14 min 59 s
M3	15 min 00 s	14 min 56 s
M4	15 min 00 s	15 min 00 s
M5	14 min 11 s	15 min 00 s
M6	15 min 00 s	15 min 00 s
M7	14 min 59 s	15 min 00 s
M8	15 min 00 s	14 min 59 s
평균값	14 min 54 s	14 min 59 s
표준편차	00 min 16 s	00 min 01 s
평균행동정지시간	14 min 38 s	14 min 58 s

- 가스유해성시험에 따른 실험용 쥐 평균 행동 정지 시간을 분석해보면, 시험체 1의 경우 14분 54초, 시험체 2에서는 14분 58초로 2회의 결과 모두 적합 기준인 9분을 초과하는 것으로 확인됨.

: 따라서 감마선 조사된 플라스틱을 포함하는 시멘트 복합체를 구조부재로 사용할 경우 화재 시 유해 가스 발생으로 인한 위험 요인이 감소될 수 있다고 판단됨.

- ☑ 감마선을 조사한 플라스틱 골재를 혼입한 시멘트 복합체의 경우 고온 가열 시 균열을 제어하여 형상을 유지하는 능력이 비조사된 시험체보다 우수한 것으로 확인되었으며, 압축강도가 20% 개선된 것으로 확인
- ☑ 다만, 200℃ 이상의 고온에서는 형상유지가 힘든 것으로 확인되었으며, 이러한 결과를 통해 플라스틱 혼입 시멘트 복합체를 구조용으로 사용하기에는 적합하지 않을 것으로 판단하였으며, 경량패널, 단열재, 지붕재, 블록 등 비구조적 건설자재에 적용하여 활용할 수 있을 것으로 판단됨.



시험성적서

1. 성적서 번호 : CT21-103479K
2. 의뢰자
 - 업체명 : 금오공과대학교산학협력단
 - 주소 : 경상북도 구미시 대학로 61 금오공과대학교 글로벌관 510호
3. 시험기간 : 2021년 09월 28일 ~ 2021년 10월 20일
4. 시험성적서의 용도 : 연구과제 제출용
5. 시료명 : PP 혼입 시멘트 복합체(50 mm)
6. 시험방법
 - (1) KS F 2271:2019

확인	작성자 성명	나인걸	기술책임자 성명	박인욱
비교 : 1. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 관련이 없으며, 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다. 3. 이 성적서의 일부만을 발췌하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다. 4. 이 성적서의 진위여부는 홈페이지(www.kcl.re.kr)에서 확인 가능합니다.				

2021년 10월 20일

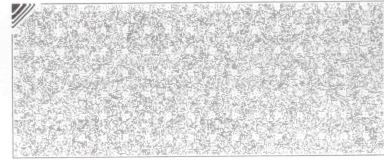
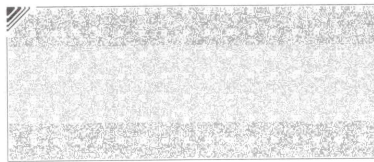
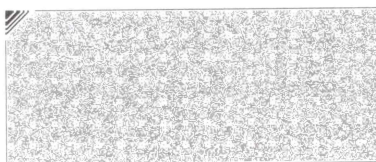
한국건설생활환경시험연구원장



결과문의 : 42994 대구광역시 달성군 유가읍 테크노순환로12길 36 ☎ (053)670-7315

총 5페이지 중 1페이지

양식TQP-12-01-03(1)



시험성적서

성적서번호 : CT21-103479K

7. 시험결과

■ 가스유해성 시험결과

시험 항목	단위	시험 결과		시험 방법	시험 장소
		1회	2회		
시험용 흰 쥐 평균 행동 정지 시간	분:초	14:38	14:58	(1)	A

시험 일자

2021. 10. 14.

※ 시험방법 : (1) KS F 2271:2019

※ 시험장소 : A. 대구광역시 달성군 유가읍 테크노순환로12길 36

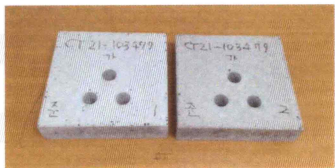
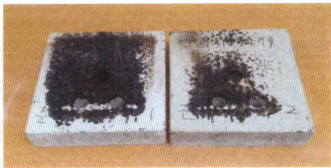
※ 시험체의 구성 (의뢰자 제시)

구성	재질	제조업체	모델명	두께
시멘트 복합체	PP, 시멘트, 표준사, 물	-	-	50 mm

■ 가스유해성 시험조건

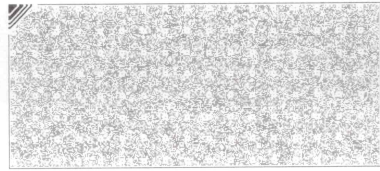
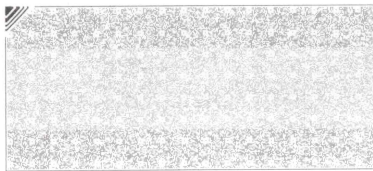
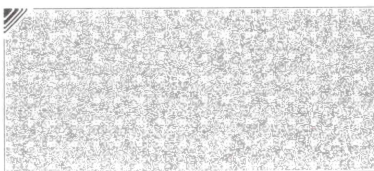
가열 조건	부열원(LPG)으로 3분간 가열 후 다시 주열원(전열)으로 3분간 가열					
가열면 (의뢰자 제시)	앞 · 뒷면 동일					
시험 환경	온도 (22 ~ 25) °C, 습도 (59 ~ 66) % R.H.					
시험 시간 (분)	15					
시험용 흰 쥐	계통	ICR계 암놈	주령	5주	체중	(18 ~ 22) g

■ 가스유해성 시험체조건

크기 (mm)	220 × 220			
두께 (mm)	시험체 1	51.4	시험체 2	51.3
질량 (g)		3 955.4		4 165.5
밀도 (kg/㎥)		1 584.2		1 666.3
전처리	온도 (23 ± 2) ℃, 습도 (50 ± 5) % R.H.			
시험체 사진				
	시험 전		시험 후	

총 5페이지 중 2페이지

양식TQP-12-01-03(1)



시험성적서

성적서번호 : CT21-103479K

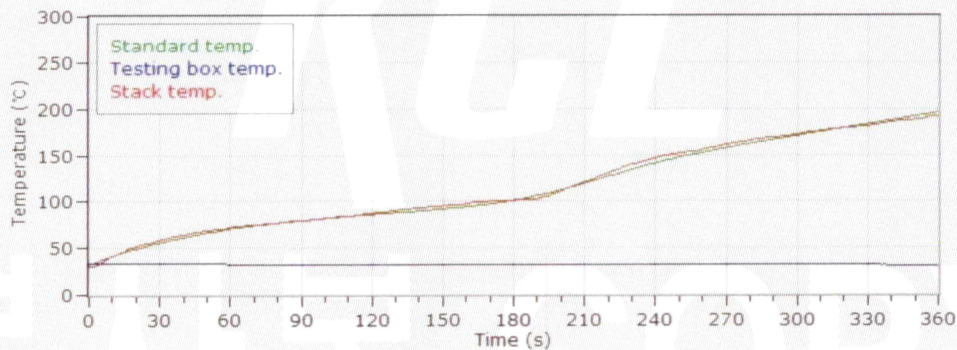
■ 표준판 시험

- 시험체 : 섬유강화 규산칼슘판

< 배기 온도 >

경과 시간 (s)	표준 온도 (℃)	측정 온도 (℃)	온도 편차 (℃)
0.0	30.0	29.7	-0.3
60.0	70.0	70.8	0.8
120.0	85.0	86.3	1.3
180.0	100.0	100.4	0.4
240.0	140.0	145.1	5.1
300.0	170.0	171.2	1.2
360.0	195.0	191.5	-3.5

< 배기 온도곡선 >



총 5페이지 중 3페이지

양식TQP-12-01-03(1)



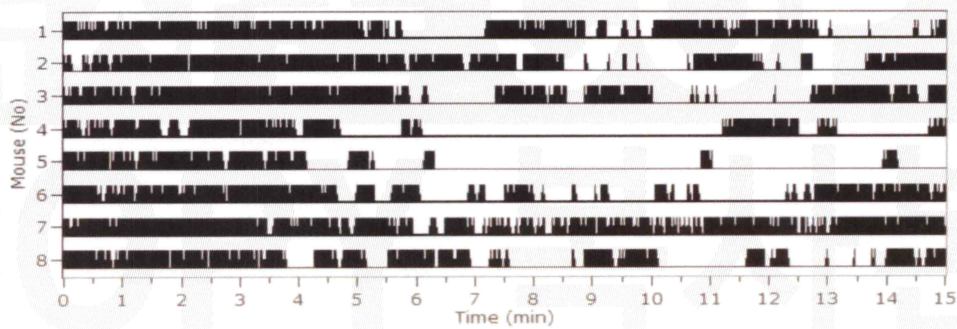
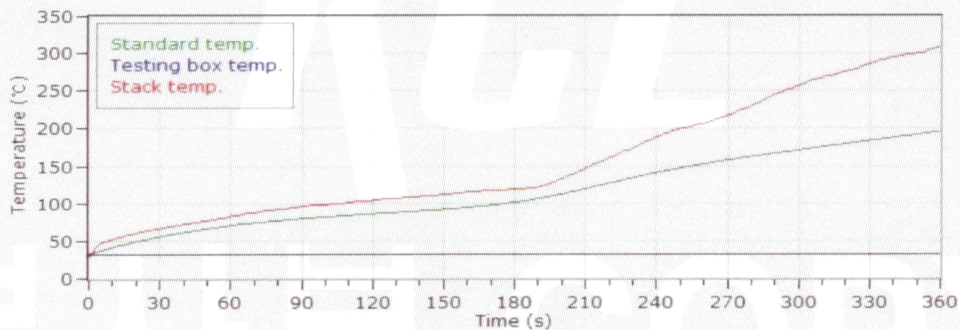
시험성적서

성적서번호 : CT21-103479K

■ 가스유해성 시험결과 (시험체 1)

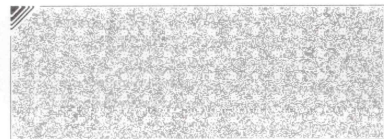
경과 시간 (s)	측정 온도 (℃)
0	30.1
60	81.2
120	102.7
180	118.1
240	187.4
300	255.8
360	307.3

회전상자	정지시간
M1	15 min 00 s
M2	15 min 00 s
M3	15 min 00 s
M4	15 min 00 s
M5	14 min 11 s
M6	15 min 00 s
M7	14 min 59 s
M8	15 min 00 s
평균값	14 min 54 s
표준편차	00 min 16 s
평균행동정지시간	14 min 38 s



총 5페이지 중 4페이지

양식TQP-12-01-03(1)



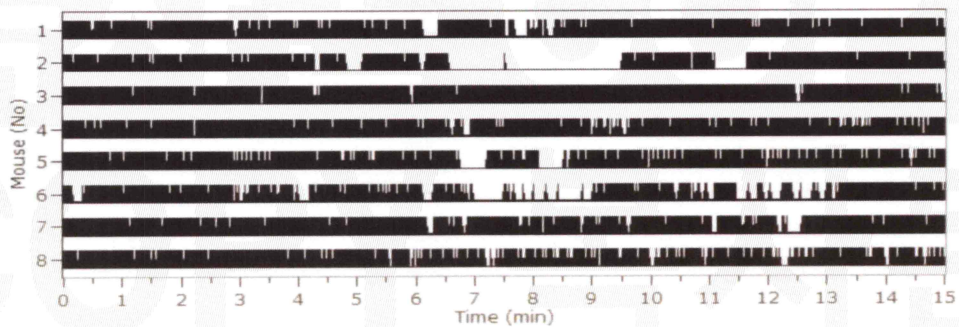
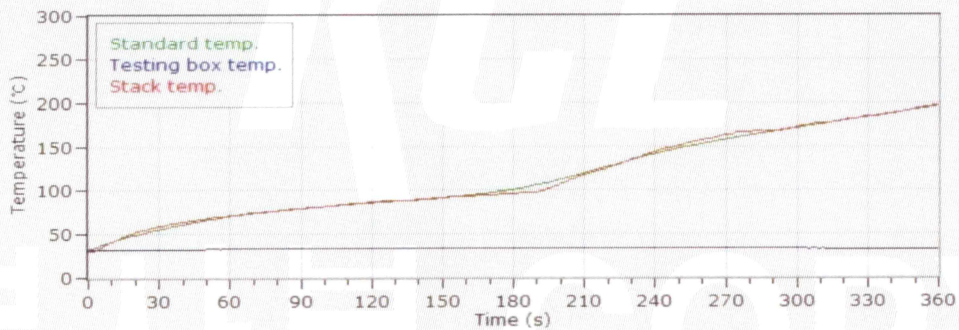
시험성적서

성적서번호 : CT21-103479K

■ 가스유해성 시험결과 (시험체 2)

경과 시간 (s)	측정 온도 (℃)
0	30.0
60	70.2
120	85.8
180	95.4
240	142.3
300	171.1
360	195.6

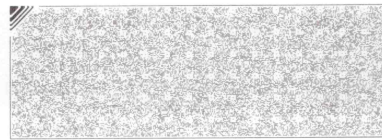
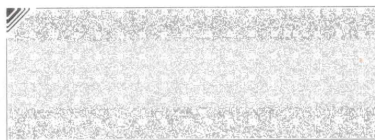
회전상자	정지시간
M1	14 min 59 s
M2	14 min 59 s
M3	14 min 56 s
M4	15 min 00 s
M5	15 min 00 s
M6	15 min 00 s
M7	15 min 00 s
M8	14 min 59 s
평균값	14 min 59 s
표준편차	00 min 01 s
평균행동정지시간	14 min 58 s



----- 끝 -----

총 5페이지 중 5페이지

양식TQP-12-01-03(1)



㉑ 본 연구개발 핵심기술의 활용방안 및 한계점 극복을 위한 향후 연구 제시

(가) 본 연구개발 핵심기술의 활용방안

- 본 연구개발과제의 핵심기술을 구조부재로 활용하기 위해서는 내화성 부분이 해결되어야 하기에, 현재의 개발된 수준으로는 그림 73과 같이 비구조재에 적용하여 활용이 가능할 것으로 판단됨.



그림 73. 연구개발 핵심기술의 비구조재 적용에 따른 활용 방안

(나) 향후 연구 제시

○ 구조부재로 활용하기 위한 내화성능 개선 연구

- : 본 연구에서 활용된 기술이 비구조재부터 구조재에 이르기까지 다양한 건설재료 분야에 원천기술로서 활용되기 위해서는 플라스틱 골재를 사용함에 따라 고온(200℃ 이상)에서 구조적 성능을 상실하는 문제를 해결하는 것이 주안점임.
- : 이를 위해, 다음과 같은 추가 연구가 필요할 것으로 판단됨.
 - 플라스틱 원재료에 불연성, 준불연성 및 난연성과 같은 내열 안정성을 부여하기 위한 처리 기술 확보에 관한 연구
 - PET와 같이 용융 온도가 300℃ 이상이 되는 플라스틱 종류를 포함하여 엔지니어링 플라스틱과 같이 플라스틱 원재료 자체의 기계적 물성 및 내열성이 우수한 플라스틱을 대상으로 한 내화성능 평가 연구
 - 엔지니어링 플라스틱과 같은 고품질 원재료 사용에 따라 비용을 절감하기 위한 UV 조사에 따른 개질 성능평가에 관한 연구

○ 가격경쟁력 면에서 우위를 점하기 위한 경제성 확보 연구

- : 본 연구를 통해 도출된 결과를 통해 감마선 조사를 통한 플라스틱 개질 기술의 기술적 경쟁력은 충분히 우위를 점할 수 있을 것으로 판단됨. 또한, 본 기술로 제조된 시멘트 복합체를 통해 달성한 성능 수준은 기존 경량콘크리트 대비 월등히 우수한 것으로 확인되었으므로 성능을 조금 낮추고 가격경쟁력을 대폭 향상시켜 가격경쟁력을 확보하는 것이 본 연구개발의 후속 연구에 있어서 주요한 과제라고 할 수 있음.
- : 가격경쟁력 면에서 감마선 조사는 초기투자비용 과다로 양산화에 따른 진입장벽이 높아지기 때문에 본 개질 기술의 진입장벽을 낮추고, 비용 대비 최고의 효율성을 확보하기 위한 추가적인 연구가 필요한 실정임.
- : 이에 따라 가격경쟁력에서 우위를 점하기 위해 다음과 같은 후속 연구가 필요할 것으로 판단됨.
 - 플라스틱 원재료 제조비용이 비싼 Pellet 대신 Flake를 활용한 연구(Flake의 적정 입경 및 혼입률 등에 관한 분석을 통해 Flake 활용성을 높임)

- Flake 골재 사용 시 단가를 절감하기 위해 유색 G-PET 등 저가의 PET 종류 활용 후 활용 가능한 PET 선별을 위한 실험적 연구
- 감마선 조사를 통한 개질 메커니즘과 유사한 이온빔(E-Beam) 및 UV 조사와 같은 초기 투자비용이 낮으면서 본 기술의 개질 메커니즘과 관련된 개질 방법에 대한 연구 필요

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

번호	연구개발목표	핵심 연구개발성과	연구수행 결과
1	감마선 조사 플라스틱 소재 분석	- 문헌조사 결과 제시 - 감마선 조사 메커니즘 분석결과 제시 - 환경영향 및 안전성 평가 결과 제시	<u>경량골재, 플라스틱 골재 및 감마선 조사 플라스틱 골재 관련 선행연구 사례</u>를 조사함. - 감마선 조사 시 <u>플라스틱의 물리·화학적 변화</u>와 관련된 문헌 수집 및 분석을 수행함. - 감마선 조사 시 <u>시멘트 페이스트와 플라스틱 골재 간 계면 부착성능 개선</u>과 관련된 문헌 수집 및 분석을 수행함. - 감마선 조사업체 및 방사선 연구소 전문가로부터 환경영향 및 안전성에 이상 없다는 <u>검토 의견 자료를 정리</u>하였으며, 관련 문제에 대한 <u>키워드로 국내외 다수의 문헌검토</u>를 통해 <u>감마선 조사된 플라스틱 재료 사용에 따른 환경영향 및 안전 관련 문제는 발견되지 않음</u>.
2	플라스틱 골재 표면 개질 기법 도출	- 표면구조 및 형상 변형 분석 결과 제시 - 플라스틱 물성 개선 기술 민감도 분석 결과 제시 - 골재 흡수율 $\pm 5\%$ 이내 - 골재 단위용적중량 $\pm 5\%$ 이내	- 감마선 조사선량을 변수로 감마선 조사 후 플라스틱 골재의 <u>표면 구조 및 형상, 화학적 특성을 비교·분석</u>하여 <u>최적 표면개질 기법을 도출</u>함. - 플라스틱 가공형상(Pellet형 및 비정형) 및 플라스틱 종류별 <u>기초물성 평가 결과를 토대로 최적 골재 조건</u>을 도출함. - 골재 흡수율 및 단위용적중량 <u>$\pm 5\%$ 이내 달성. (시험성적서 확보)</u>
3	시멘트 복합체 경량화 기술 도출	- 시멘트 복합체 단위 용적중량 $1.7t/m^3$ 이하 - 경량화에 따른 강도 특성 분석 결과 제시	- 최적 치환율에 따른 배합을 통해 시멘트 복합체 <u>단위용적중량 $1.7t/m^3$ 이하 달성</u>. - 단위용적중량 대비 강도 특성에 대한 분석결과를 도출함.
4	재료분리 방지기술 도출	재료분리 저항성 평가 결과 제시	- 인공경량골재 혼입, 고성능 AE 감수제 사용 및 플라스틱 골재 적정 치환율 적용 등 <u>재료분리 대응 방안 도출</u>. - 플라스틱 골재 치환율에 따른 시멘트 복합체 플로우 실험을 통한 <u>재료분리 저항성을 확보</u>함.
5	고강도 경량 시멘트 복합체 기술 개발	- 최적배합(안) 도출 - 압축강도 40MPa 이상 - 휨강도 10% 증가 - 경제성 평가 결과 제시 - 장기내구성 평가결과 제시	- 본 연구개발을 통해 달성한 시멘트 복합체 <u>압축강도의 성능 수준은 41.46MPa로 목표성능 수준인 40MPa 이상 달성</u>. - 본 연구개발을 통해 달성한 시멘트 복합체 휨강도의 성능 수준은 <u>기존대비 휨강도가 18.7% 증가</u>하였으므로 <u>목표성능 수준인 10% 증가 지표를 달성</u>하였음. - 지속가능한 건설자재로서 <u>경제성 및 장기내구성 검토 결과를 도출</u>함.
6	내화성 확보 기술 도출	가열 후 강도 저감률 20% 개선	- 감마선 비조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 대비 <u>강도 20% 증진</u>. <u>가스유해성시험 결과 모두 적합 기준으로 판정</u>됨.

(2) 정량적 연구개발성과

구분	성과지표명	번호	제 목
기술적 성과	특허(출원)	1	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재
		2	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재를 이용한 경량 시멘트 복합체 및 이의 제조방법
		3	머신러닝 기반 감마선처리 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 강도예측시스템 및 이를 이용 한 강도예측방법
		4	자연 감마선을 이용한 플라스틱 골재 개질 시스템
	특허(등록)	1	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재를 이용한 경량 시멘트 복합체 및 이의 제조방법
		2	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재
학술적 성과	국내외 학술지 게재 (SCI(E)학술지)	1	State-of-the-Art Modification of Plastic Aggregates Using Gamma Irradiation and Its Optimization for Application to Cementitious Composites
		2	Mechanical Properties of Cement Composites Using Modified Plastics by Gamma Irradiation
	국내외 학술지 게재 (일반학술지)	1	인공 경량골재로 치환된 플라스틱 골재 종류에 따른 시멘트 복합체의 역학적 성질에 관한 연구
		2	플라스틱 골재 종류와 양생 방법에 따른 시멘트 복합체의 물리적 특성에 관한 실험적 연구
	국내외 학술회의 발표	1	플라스틱 골재의 시멘트 복합체 적용을 위한 골재 성능개선에 관한 기존 문헌 고찰 연구
		2	폐플라스틱의 건설재료 적용을 위한 감마선 조사 기술에 관한 사례 분석 연구
		3	플라스틱 골재 유형별 시멘트 복합체의 재료 특성
		4	감마선 조사를 통한 개질 플라스틱 골재 적용 시멘트 복합체의 역학적 성능 연구
		5	양생방법에 따른 플라스틱 골재 유형별 시멘트 복합체의 재료 특성
		6	감마선이 조사된 플라스틱을 혼입한 시멘트 복합체의 특성에 관한 고찰
		7	Performance of cross-linked plastics as aggregates for cement composites through gamma-ray irradiation
사회적 성과	포상 및 수상 실적	1	제31회 과학기술우수논문상

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Mechanical Properties of Cement Composites Using Modified Plastics by Gamma Irradiation	Applied Sciences	천현욱	Vol.11, Issue.24	스위스	MDPI	SCI	21.12.16	2076-3417	100%
2	State-of-the-Art Modification of Plastic Aggregates Using Gamma Irradiation and Its Optimization for Application to Cementitious Composites	Applied Sciences	이현석	Vol.11, Issue.22	스위스	MDPI	SCI	21.11.03	2076-3417	100%
3	플라스틱 골재 종류와 양생 방법에 따른 시멘트 복합체의 물리적 특성에 관한 실험적 연구	한국복합신소재 구조학회 논문집	천현욱	Vol.12, No.5	대한민국	한국복합신소재 구조학회	비SCI	21.10.30	2093-5145	100%
4	인공 경량골재로 치환된 플라스틱 골재 종류에 따른 시멘트 복합체의 역학적 성질에 관한 연구	한국복합신소재 구조학회 논문집	천현욱	Vol.11, No.6	대한민국	한국복합신소재 구조학회	비SCI	20.12.30	2093-5145	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국콘크리트학회 2021 가을 학술대회	양생방법에 따른 플라스틱 골재 유형별 시멘트 복합체의 재료 특성	천현욱	21.11.04	경주 화백컨벤션 센터	대한민국
2	한국콘크리트학회 2021 가을 학술대회	감마선이 조사된 플라스틱을 혼입한 시멘트 복합체의 특성에 관한 고찰	이현석	21.11.04	경주 화백컨벤션 센터	대한민국
3	The 2021 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM21)	Performance of cross-linked plastics as aggregates for cement composites through gamma-ray irradiation	천현욱	21.08.24	서울대학교 GECE	대한민국
4	한국콘크리트학회 2021 봄 학술대회	플라스틱 골재 유형별 시멘트 복합체의 재료 특성	천현욱	21.05.10	여수 엑스포 컨벤션센터	대한민국
5	2021 한국복합신소재구조학회 학술발표회	감마선 조사를 통한 개질 플라스틱 골재 적용 시멘트 복합체의 역학적 성능 연구	천현욱	21.04.20	제주 오리엔탈 호텔	대한민국
6	2020 한국복합신소재구조학회 학술발표회	플라스틱 골재의 시멘트 복합체 적용을 위한 골재 성능개선에 관한 기존 문헌 고찰 연구	천현욱	20.07.09	제주 오리엔탈 호텔	대한민국
7	2020 한국복합신소재구조학회 학술발표회	폐플라스틱의 건설재료 적용을 위한 감마선 조사 기술에 관한 사례 분석 연구	김우석	20.07.09	제주 오리엔탈 호텔	대한민국

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[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 (출원)	자연 감마선을 이용한 플라스틱 골재 개질 시스템	대한민국	금오공과 대학교 산학협력단	21.12.29	10-2021-0 191294				100%	
2	특허 (출원)	머신러닝 기반 감마선처리 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 강도에측시스템 및 이를 이용 한 강도에측방법	대한민국	금오공과 대학교 산학협력단	21.09.30	10-2021-0 130119				100%	
3	특허 (등록)	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재	대한민국				금오공과 대학교 산학협력단	21.03.10	10-222846 3-0000	100%	
4	특허 (등록)	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재를 이용한 경량 시멘트 복합체 및 이의 제조방법	대한민국				금오공과 대학교 산학협력단	21.02.25	10-222305 3-0000	100%	
5	특허 (출원)	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재	대한민국	금오공과 대학교 산학협력단	21.10.26	10-2020-0 138915				100%	
6	특허 (출원)	감마선 조사에 의해 개질처리된 플라스틱 골재를 이용한 경량 시멘트 복합체 및 이의 제조방법	대한민국	금오공과 대학교 산학협력단	21.10.26	10-2020-0 138917				100%	

○ 지식재산권 활용 유형

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

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

□ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

☐ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

☐ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

☐ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

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

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

☐ 전문 연구 인력 양성

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

☐ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
	논문상	과학기술우수논문상	제31회 과학기술우수논문상	김우석	21.09.10	한국과학기술단체 총연합회

[인프라 성과]

☐ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과]

- 해당사항 없음.

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

- 본 연구개발 기술과 관련하여 현재 플라스틱 투수블럭 제조 업체와 기술이전 협약 진행중임.
- 현재 해당 업체에서 공장외벽 시멘트 판넬 및 마감재로 활용하여 현장 적용 테스트 중이며, 기술이전 시기는 협약이 현재 진행중이므로 차후 협약 완료 시점에서 사후 성과로 등록할 예정임.

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
감마선 조사 플라스틱 소재 분석	- 본 세부 연구목표는 감마선을 조사한 플라스틱 소재의 물리적·화학적 개질과 관련한 선행연구 분석 및 개질 메커니즘 규명을 목표로 함. - 본 연구는 국내외 감마선 조사 플라스틱 골재 관련 선행연구 사례조사를 통해 목표성능 향상을 위한 연구개발 방안을 모색하였으며, 문헌을 참고하여 감마선 조사로 인한 플라스틱의 성능개선 메커니즘을 정립하였음. - 감마선 조사업체 및 방사선 연구소 전문가로부터 환경영향 및 안전성에 이상 없다는 검토의견 자료를 정리하였으며, 관련 문제에 대한 키워드로 국내외 다수의 문헌검토를 통해 감마선 조사된 플라스틱 재료 사용에 따른 환경영향 및 안전 관련 문제가 없음을 규명하였음.	100
플라스틱 골재 표면 개질 기법 도출	- 본 세부 연구목표는 플라스틱 골재에 감마선을 조사하여 골재의 성능개선의 원인이 되는 주요 요소를 파악하고 골재의 성능을 극대화할 수 있는 표면개질 기법 도출을 목표로 함. - 추가적으로 플라스틱 종류 및 가공형상에 따른 최적 골재 조건 도출하고자 함. - 본 연구는 펠릿형 플라스틱 4종(polypropylene(PP), polyethylene(PE), Polycarbonate(PC), Acrylonitrile butadiene styrene(ABS))과 플레이크 형태의 Polyethylene Terephthalate(PET)에 대한 기초물성 평가 결과를 토대로 우수한 물성을 나타내는 플라스틱 골재의 조건을 도출하였음. - 또한, 감마선 조사선량을 변수로 감마선 조사 후 플라스틱 골재의 표면 구조 및 형상, 화학적 특성을 비교·분석하여 최적 표면개질 기법을 도출함. - 상술한 플라스틱 종류에 따른 기초물성 평가 결과를 분석·정리하여 비SCI논문 1건, SCI논문 1건 및 학술발표 4건의 학술적 성과를 달성하였으며, 상술한 연구내용의 우수성과 독창성을 토대로 국내 특허출원 2건 및 특허등록 1건의 기술적 성과를 달성하였음.	100
시멘트 복합체 경량화 기술 도출	- 본 세부 연구목표는 플라스틱 골재 사용에 따른 시멘트 복합체의 경량화 기술 도출을 목표로 함. - 최적 치환율에 따른 배합을 통해 본 연구의 경량화를 위한 성능목표 수준인 시멘트 복합체 단위용적중량 1.7t/m^3 이하를 달성하였음. - 또한, 단위용적중량 대비 강도 특성에 대한 분석결과를 기반으로 경량화에 따른 강도 특성 관계를 도출함.	100
재료분리 방지기술 도출	- 본 세부 연구목표는 플라스틱 골재 사용에 따라 발생하는 재료분리 방지 기술 도출을 목표로 함. - 인공경량골재 혼입, 고성능 AE 감수제 사용 및 플라스틱 골재 적정 치환율 적용 등 재료분리 대응 방안을 도출하였음. - 또한, 플라스틱 골재 치환율에 따른 시멘트 복합체 플로우 실험을 통한 재료분리 저항성을 확보하였음.	100
고강도 경량 시멘트 복합체 기술 개발	- 본 세부 연구목표는 감마선 조사로 개질된 플라스틱 골재를 혼입한 시멘트 복합체의 최적배합을 도출하고 그에 따른 성능평가를 통해 압축강도 40MPa 및 단위용적중량 1.7t/m^3를 달성하는 것을 목표로 함. - 본 연구개발을 통해 달성한 시멘트 복합체 압축강도의 성능 수준은 41.46MPa로 목표성능 수준인 40MPa 이상 달성하였으며, 단위용적중량은 1.686t/m^3으로 목표수준을 달성하였음. - 또한, 시멘트 복합체 휨강도의 성능 수준은 기존대비 휨강도가 18.7% 증가하였으므로 목표성능 수준인 10% 증가 지표를 달성하였음. - 경제성 및 장기내구성 검토 결과를 통해 지속가능한 건설자재로서의 활용성에 대하여 분석하였음. - 상술한 플라스틱 종류에 따른 기초물성 평가 결과를 분석·정리하여 비SCI논문 1건, SCI논문 1건 및 학술발표 3건의 학술적 성과를 달성하였으며, 상술한 연구내용의 우수성과 독창성을 토대로 국내 특허출원 2건 및 특허등록 1건의 기술적 성과를 달성하였음.	100
내화성 확보기술 도출	- 본 세부 연구목표는 감마선 영향에 따라 플라스틱 골재의 내열특성 개질 효과 및 이를 적용한 시멘트 복합체의 내화성능 평가를 통해 화재 시 내화성 확보 기술 도출을 목표로 함. - 본 연구는 화재 시 감마선 영향에 따른 내화성 확보기술을 도출하는 것으로, 고온 가열 후 강도실험을 통해 감마선 비조사 플라스틱 골재 혼입 시멘트 복합체 대비 감마선 조사 시 강도 증진률 20%를 달성하였음. - 또한, 플라스틱 혼입에 따라 유해가스 발생 여부에 대하여 분석하기 위해 가스 유해성시험을 실시하였으며, 시험결과 모두 적합 기준으로 판정되어, 화재 시 가스발생에 대한 안전성을 입증하였음.	100

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

가. 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조기술 개발

① 감마선 조사 플라스틱 소재 분석

- 국내외 감마선 조사를 활용한 플라스틱 소재 물성 개질과 관련된 선행연구 분석과 개질 메커니즘을 분석하여 건설재료로서 활용하기 위한 원천소재의 개념 정립하는데 기여함.

② 플라스틱 골재 표면 개질 기법 도출

- (기존기술 수준) 경량골재를 제조하기 위해 다양한 발포형 인공경량골재를 이용한 경량화 연구가 진행되고 있고, 또한 플라스틱 경량골재에 대한 연구도 진행되고 있으나, 이를 콘크리트용 골재로 사용하기 위한 성능 개선 연구의 대부분은 유해한 화학가교제를 사용한 화학적 개질을 통한 콘크리트용 소재를 개발하는 정도이며, 실험실 수준에 지나지 않음.
- (개발기술 수준) 감마선 조사 기술을 활용하여 유해한 화학가교제를 사용하지 않아 품질이 우수하고, 감마선 조사선량만 조절하여 조성물을 변화시킬 필요 없이 물리·화학적 특성을 자유롭게 조절할 수 있어 효율적으로 골재의 성능을 개선할 수 있는 고성능 재료로 활용하기 위한 기반 기술을 확보하는데 기여함.

나. 개질 플라스틱 골재 활용 고성능 경량 시멘트 복합체 제조기술 개발

① 시멘트 복합체 경량화 기술 도출

- 국내 경량콘크리트에 대한 기준은 단위용적중량 $1.4\sim 2.0\text{t/m}^3$ 이하, 압축강도 15MPa 이상을 경량 콘크리트로 규정하며, 국외의 경우 ACI 211에서 단위용적중량 1.842t/m^3 이하, 압축강도 17.2MPa 이상인 경량골재 콘크리트를 구조용으로 정의함.
- 본 연구에서는 플라스틱 골재를 활용하여 시멘트 복합체의 단위용적중량을 대폭 감소시킬 수 있었으며, 경량콘크리트의 성능 수준에 부합될 수 있도록 플라스틱 골재 적정 치환율을 도출하여 향후 경량성 확보를 위한 건설재료로 활용 시 치환적용을 위한 기반 기술을 확보하는데 기여함.

② 재료분리 방지기술 도출

- 골재로서 플라스틱 소재를 시멘트 복합체에 혼입 시 낮은 비중으로 인해 재료분리 현상이 발생하는 문제가 발생하며, 본 연구에서 도출된 재료분리 방지기술을 토대로 차후 현장에 적용 시 시공성과 품질관리를 위한 기반 기술을 확보하는데 기여함.

③ 고강도 경량 시멘트 복합체 기술 개발

- (기존기술 수준) 플라스틱 골재를 경량골재로 치환 혼입하여 건설재료에 적용하려는 시도는 있으나, 플라스틱 재료가 가진 매끈한 표면으로 인해 시멘트 페이스트와의 부착력이 떨어져 강도가 저하되는 문제점이 발생하며, 이를 개선하기 위해 화학적 방법에 의한 개질을 통한 골재 표면 개질 기술이 연구되고 있으나, 실험실 수준에 지나지 않음.
- (개발기술 수준) 감마선 조사 기술을 활용하여 개질된 플라스틱 골재를 치환 혼입한 시멘트 복합체를 개발하기 위해 감마선 조사로 인해 플라스틱 골재의 성능 개선이 충분히 발휘되어야 하며 본 연구에서는 압축강도 40MPa, 단위용적 중량 1.7t/m^3 수준의 고강도 경량 시멘트 복합체를 개발하였으며, 이러한 성능 수준을 국내외 경량골재 혼입 경량콘크리트의 성능과 비교하여 확연히 우수한 성능을 확보할 수 있는 것으로 확인되었으며, 이는 고성능 경량 시멘트 복합체 고품질화를 위한 기반 기술을 확보하는데 기여함.

④ 내화성 확보기술 도출

- 플라스틱 소재는 화재에 매우 취약한 특성을 가지고 있으나 감마선 조사의 영향으로 열분해 온도를 지연시켜 화재 시 건물의 붕괴시간을 지연시키는데 기여할 수 있으며, 더욱이 이를 시멘트 복합체에 적용 시 고온 가열에 따른 균열을 제어하여 형상을 유지할 수 있으며 감마선 비조사된 시험체 대비 강도를 증진시킬 수 있어 내화성능을 확보하는데 기여함.

5. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

가. 감마선 조사기술 활용 개질 플라스틱 골재 제조기술 개발

① 기술개요

- 플라스틱 소재의 물성 개질과 관련된 연구가 수행되고 있으나, 대부분의 연구가 솔벤트나 알칼리성 표백처리와 같은 화학물질을 활용한 개질 방법이 활용되고 있으며, 일부 연구에서는 감마선 조사기술을 활용한 개질 처리에 관한 연구가 이루어지고 있으나 대부분 충전재나 섬유 형태의 플라스틱 소재를 대상으로 수행된 연구가 주를 이루고 있어 감마선 조사된 플라스틱을 골재로서 활용한 연구가 다소 부족한 실정임.

② 활용계획

- 천연잔골재인 모래 보존량이 지속적으로 감소하고 있으며, 이와 더불어 환경규제 및 주민들의 반대로 인해 골재 수급이 상당히 어려운 실정임으로 감마선 조사기술을 활용한 플라스틱 골재 물성 개질을 통해 골재로서 요구되는 성능을 확보하여 모래 대체재로 활용할 수 있음.
- 향후 플라스틱 소재를 충전재, 섬유, 골재 및 레진 등 다양한 형태로 적용하여 제조된 시멘트 복합체를 대상으로 적용 형태별 물성을 비교·분석하여 건설재료로서 가장 적합한 형태를 도출하는 것과 관련된 연구를 진행하여 감마선 조사 플라스틱 소재 활용 기반연구를 폭 넓게 연구할 수 있음.

나. 개질 플라스틱 골재 활용 고성능 경량 시멘트 복합체 제조기술 개발

① 기술개요

- 감마선 조사로 플라스틱 소재의 개질에 관한 연구는 폭넓게 수행되고 있으나 이를 건설재료로 활용한 사례는 극히 소수이며 대상으로 한 플라스틱의 종류 및 감마선 조사선량의 범위도 한정적이기 때문에 이를 활용한 시멘트 복합체의 기계적 물성 향상 효과를 입증할만한 DB가 필요한 실정임.

② 활용계획

- 범용 플라스틱인 PP(Polypropylene), PE(Polyethylene), PC(Polycarbonate), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene copolymer) 및 PET(Polyethylene terephthalate) 5종을 대상으로 플라스틱 종류별 감마선 영향에 따른 개질 효과를 개별적으로 분석하여 건설재료로서 적용 가능성 검토 및 적용 사례 자료로 활용할 수 있음.
- 향후 고온에서 활용이 가능한 플라스틱 소재를 활용한 연구를 추가적으로 진행하여 구조부재에 적용하기 위한 후속 연구의 기초 모델로 활용할 수 있으며, 경량패널, 단열재, 지붕재, 블록 등 다양한 비구조 요소로도 활용할 수 있음.
- 현재 본 기술과 관련하여 플라스틱 투수블럭 제조 업체와 기술이전 관련 협약이 진행중이며, 업체를 통해 시범적용을 위한 기반 마련에 기여할 수 있음.

6. 참고 문헌

- [1] R. Sharma and P.P. Bansal, "Use of different forms of waste plastic in concrete – a review," J. Clean. Prod., Vol. 112, pp. 473–482, 2016.
- [2] N. Saikia and J. de Brito, "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review," Constr. Build. Mater., Vol.34, pp.385–401, 2012.
- [3] R. Siddique, J. Khatib and I. Kaur, "Use of recycled plastic in concrete: a review," Waste Manage., Vol.28, No.10, pp.1835–1852, 2008.
- [4] N. Saikia and J. De Brito, "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate," Constr. Build. Mater., Vol.52, pp.236–244, 2014.
- [5] M.J. van der Meulen, S.F. van Gessel and J.G. Veldkamp, "Aggregate resources in the Netherlands," Neth. J. Geosci., Vol.84, No.4, pp.379–387, 2005.
- [6] A.J. Babafemi, B. Šavija, S.C. Paul and V. Anggraini, "Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: a review," Sustainability, Vol.10, No.11, 3875, 2018.
- [7] H. Su, J. Yang, T.C. Ling, G.S. Ghataora and S. Dirar, "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes," J. Clean. Prod., Vol.91, pp.288–296, 2015.
- [8] T.R. Naik, S.S. Singh, C.O. Huber and B.S. Brodersen, "Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites," Cem. Concr. Res. Vol.26, No.10, pp.1489–1492, 1996.
- [9] G. Martínez-Barrera, E. Vigueras-Santiago, S. Hernández-López, W. Brostow, and C. Menchaca-Campos, "Mechanical Improvement of Concrete by Irradiated Polypropylene Fibers," Polym. Eng. Sci. Vol.45, No.10, pp.1426–1431, 2005.
- [10] G. Martínez-Barrera, C. Menchaca-Campos, S. Hernández-López, E. Vigueras-Santiago, and W. Brostow, "Concrete reinforced with irradiated nylon fibers," J. Mater. Res. Vol.21, No.2, pp.484–491, 2006.
- [11] G. Martínez-Barrera, F. Ureña-Nuñez, O. Gencel and W. Brostow, "Mechanical properties of polypropylene-fiber reinforced concrete after gamma irradiation," Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. Vol.42, No.5, pp.567–572, 2011.
- [12] 박승호, 이정배, 김성수, "비텀에시를 잔골재로 사용한 콘크리트의 내구성능에 관한 연구", 한국건설순환자원학회 논문집 제4권, 제4호, pp.349–355, 2016.
- [13] 이경호, 양근혁, "비텀에시 및 준설토 기반 인공 경량골재 콘크리트의 역학적 특성", 대한건축학회 논문집 제37권, 제2호, pp.189–196, 2021.
- [14] 김호진, 정용훈, 배제현, 박선규, "EIS를 활용한 경량골재 종류별 시멘트 경화체의 계면특성 분석", 한국건설순환자원학회 논문집 제8권, 제4호, pp.498–505, 2020.
- [15] 김규용, 남정수, 손민재, 유하민, "폐유리를 활용한 시멘트 복합재료에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제33권, 제5호, pp.29–33, 2021.
- [16] 박정훈, "폐유리를 분쇄 및 발포하여 제조한 인공경량골재의 경량모르타르 적용 기초물성 평가", 한국건설순환자원학회 논문집, 제14권, 제2호, pp.28–34, 2019.
- [17] H.S. Wong and N.R. Buenfeld, "Euclidean Distance Mapping for computing microstructural gradients at interfaces in composite materials," Cem. Concr. Res., Vol.36, No.6, pp.1091–1097, 2006.
- [18] 이경호, 양근혁, "경량골재 콘크리트 배합 및 시공의 리뷰", 한국건설순환자원학회 논문집, 제12권, 제3호, pp.8–13, 2017.
- [19] O. Youssf, J.E. Mills and R. Hassanli, "Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete," Constr. Build. Mater., Vol.125, pp.175–183, 2016.

- [20] B. Coppola, L. Courard, F. Michel, L. Incarnato and L. Di Maio, "Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar," *Compos. Part B: Eng.*, Vol.99, pp. 75–83, 2016.
- [21] M.A. Aldahdooh, A. Jamrah, A. Alnuaimi, M.I. Martini, M.S. Ahmed and A.S. Ahmed, "Influence of various plastics–waste aggregates on properties of normal concrete," *J. Build. Eng.*, Vol.17, pp.13–22, 2018.
- [22] J. Thorneycroft, J. Orr, P. Savoikar and R.J. Ball, "Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand," *Constr. Build. Mater.*, Vol.161, pp.63–69, 2018.
- [23] L. Gu, T and Ozbakkaloglu, "Use of recycled plastics in concrete: a critical review," *Waste. Manage.*, Vol.51, pp.19–42, 2016.
- [24] R. Saxena, S. Siddique, T. Gupta, R.K. Sharma and S. Chaudhary, "Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste," *Constr Build Mater*, Vol.176, pp.415–421, 2018.
- [25] E.A. Ohemeng and S.O. Ekelu, "Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate," *J. Sustain. Cem. Mater.*, Vol.8, No.4, pp.228–243, 2019.
- [26] I. Almeshal, B.A.Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar and A.M. Mohamed, "Eco–friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand," *J. Mater. Res. and Technol.*, Vol.9, No.3, pp.4631–4643, 2020.
- [27] Z. Tang, W. Li, V.W. Tam and C. Xue, "Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials," *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol.6, 100036, 2020.
- [28] R. Wei and Y. Sakai, "Experimental investigation on bending strength of compacted plastic–concrete," *Resour. Conserv. Recycl.* Vol.169, 105521, 2021.
- [29] J.J. Sokołowska, T. Piotrowski, A. Garbacz and P. Kowalik, "Effect of introducing recycled polymer aggregate on the properties of C–PC composites," *Adv. Mat. Res.*, Vol.687, pp.520–526, 2013.
- [30] E.R. Castillo, N. Almesfer, O. Saggi and J.M. Ingham, "Light–weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste," *Constr. Build. Mater.*, Vol.265. 120199, 2020.
- [31] M. Belmokaddem, A. Mahi, Y. Senhadji, and B.Y. Pekmezci, "Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate," *Constr. Build. Mater.*, Vol.257. 119559, 2020.
- [32] N. Li, G. Long, C. Ma, F. Qiang, X. Zeng, K. Ma, Y. Xie and B. Luo, "Properties of self–compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: a comprehensive study," *J. Cleaner. Prod.*, Vol.236, 117707, 2019.
- [33] A.M. Silva, J. Brito and R. Veiga, "Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars," *Constr. Build. Mater.*, Vol.71, pp.226–236, 2014.
- [34] M.A. Mustafa, I. Hanafi, R. Mahmoud and B.A. Tayeh, "Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation," *Struct.*, Vol.20, pp.519–526, 2019.
- [35] S.I. Basha, M.R. Ali, S.U. Al–Dulaijan, and M. Maslehuddin, "Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete," *J. Build. Eng.*, Vol.32, 101710, 2020.
- [36] R.H. Faraj, A.F.H. Sherwani and A.D. Mechanical, "Mechanical, fracture and durability properties of self–compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles," *J. Build. Eng.*, Vol.25, 100808, 2019.
- [37] M. Gesoglu, E. Güneyisi, O. Hansu, S. Etli, and M. Alhassan, "Mechanical and fracture characteristics of self–compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder," *Constr. Build. Mater.*, Vol.140, pp.562–569, 2017.

- [38] F.K. Alqahtani, G. Ghataora, M.I. Khan, and S. Dirara, "Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate," *Constr. Build. Mater.*, Vol.148, pp.386–397, 2017.
- [39] E. Rahmani, M. Dehestani, M.H.A. Beygi, H. Allahyari and I.M. Nikbin, "On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles," *Constr. Build. Mater.*, Vol.47, pp.1302–1308, 2013.
- [40] O. Olofinnade, S. Chandra and P. Chakraborty, "Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction," Edited by G. Manoj, D. Paulo, M. Uma and P. Reddy P, ICE3MT, Vol.35, Proc. Int. Conf. on Mechanical, Material and Manufacturing Technology, Elsevier, Hyderabad, pp.2151–2156, 2021.
- [41] N.K. Bui, T. Satomi and H. Takahashi, "Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study," *Waste. Manage.*, Vol.78, pp.79–93, 2018.
- [42] F.K. Alqahtani, M.I. Khan, G. Ghataora and S. Dirar, "Production of recycled plastic aggregates and its utilization in concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol.29, No.4, 4016248, 2016.
- [43] X. Li, T.-C. Ling and K.H. Mo, "Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete—A review," *Constr. Build. Mater.*, Vol.240, 117869, 2020.
- [44] A.A. Mohammed, I.I. Mohammed and S.A. Mohammed, "Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets," *Constr. Build. Mater.*, Vol.201, pp. 232–245, 2019.
- [45] Z.Z. Ismail and E.A. Al-Hashmi, "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement," *Waste. Manage.*, Vol.28, No.11, pp.2041–2047, 2008.
- [46] S.D.A. Shubbar and A.S. Al-Shadeedi, "Utilization of waste plastic bottles as fine aggregate in concrete," *Kufa. J. Eng.*, Vol.8, No.2, pp.132–146, 2017.
- [47] G. Martínez-Barrera, M. Martínez-López, J.J. Coz-Díaz, F.López-Gayarre and V. Varela-Guerrero, "Waste polymers and gamma radiation on the mechanical improvement of polymer mortars: experimental and calculated results," *Case. Stud. Constr. Mater.*, Vol.11, e00273, 2019.
- [48] G. Spadaro and A. Valenza, "Influence of the irradiation parameters on the molecular modifications of an isotactic polypropylene gamma-irradiated under vacuum," *Polym. Degrad. Stab.* Vol.67, No.3, pp.449–454, 2000.
- [49] G. Martínez-Barrera, L. Ávila-Córdoba, F. Ureña-Núñez, M.A. Martínez, F.P. Álvarez-Rabanal and O. Gencele, "Waste Poly-ethylene terephthalate flakes modified by gamma rays and its use as aggregate in concrete," *Constr. Build. Mater.*, Vol.268, 121057, 2021.
- [50] G. Burillo, R.L. Clough, T. Czikovszky, O. Guven, A.L. Moel, W. Liu, A. Singh, J. Yang and T. Zaharescu, "Polymer recycling: Potential application of radiation technology," *Radiat. Phys. Chem.*, Vol.64, No.1, pp.41–51, 2002.
- [51] R. Folland and A. Charlesby, "Pulsed NMR studies of crosslinking and entanglements in high molecular weight linear polydi-methylsiloxanes," *Radiat. Phys. Chem.*, Vol.10, No.1, pp.61–68, 1977.
- [52] G. Martinez-Barrera, U.T. Villarruel, E. Viguera-Santiago, S. Hernández-López and W. Brostow, "Compressive strength of gamma irradiated polymer concrete," *Polym. Compos.*, Vol.29, No. 11, pp.1210–1217, 2008.
- [53] G. Martínez-Barrera, H. López, V.M. Castaño and R. Rodríguez. "Studies on the rubber phase stability in gamma irradiated polystyrene-SBR blends by using FT-IR and Raman spectroscopy," *Radiat. Phys. Chem.*, Vol.69, No.2, pp.155–162, 2004.
- [54] M. Kattan, "Thermal behavior of gamma-irradiated amorphous poly (ethylene terephthalate) films," *Polym. Eng. Sci.*, Vol.46, No. 10, pp.1374–1377, 2006.

- [55] A. Usman, M. Sutanto and M. Napiah, "Effect of recycled plastic in mortar and concrete and the application of gamma irradiation – a review," Edited by Y.F. Huang, K.W. Tan, L. Ling and K.H. Leong, ICCEE2018, Vol.65, Proc. Int. Conf. on Civil and Environmental Engineering, EDP Sciences, Kuala Lumpur, 05027, 2018.
- [56] D.R Ochbelagh, S. AzimKhani and H.G. Mosavinejad, "Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete," Nucl. Eng. Des., Vol.241, No.6, pp.2359–2363, 2011.
- [57] C.E. Schaefer, K. Kupwade–Patil, M. Ortega, C. Soriano, O. Büyüköztürk, A.E. White and M.P. Short, "Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo–mechanical properties and lower carbon footprint," Waste. Manage. Vo.71, pp.426–439, 2018.
- [58] G. Martínez–Barrera, J.J. Coz–Díaz, E. Martínez–Cruz, M. Martínez–López, M.C.S. Ribeiro, C. Velasco–Santos, H.E.H. Lobland and W. Brostow, "Modified recycled tire fibers by gamma radiation and their use on the improvement of polymer concrete," Constr. Build. Mater., Vol.204, pp.327–334, 2019.
- [59] S. El–Hamouly, M.R. Ismail, H.A. Abdel–Rahman, M.M. Younes and E.H. Amin, "Thermal, Mineralogical, and Microstructural Characterizations of Irradiated Polymer Blended Cement Mortar Composites," Polym. Compos., Vol.36, No.10, pp.1849–1858, 2014.
- [60] M.R. Jung, F.D. Horgen, S.V. Orski, V. Rodriguez, K.L. Beers, G.H. Balazs, T.T. Jones, T.M. Work, K.C. Brignac and S.J. Royer, "Validation of ATR FT–IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms," Mar. Pollut. Bull., Vol.127, pp.704–716, 2018.
- [61] N.L. Mathakari, V.N. Bhoraskar and S.D. Dhole, "A comparative study on the effects of Co–60 gamma radiation on polypropylene and polyimide," Plasma. Sci. Technol., Vol.169, No.9, pp.779–790, 2014.
- [62] F. Gaston, N. Dupuy, S.R.A. Marque, M. Barbaroux and S. Doreyd, "One year monitoring by FTIR of γ –irradiated multilayer film PE/EVOH/PE," Radiat. Phys. Chem., Vol.125, pp.115–121, 2016.
- [63] S. Yeo, W. Cho, D. Kim, C. Lee, Y. Hwang, J. Suk, C. Kim and J. Ha, "A mechanism of surface hardness enhancement for H⁺ irradiated polycarbonate," RSC Adv., Vol.10, No.48, pp.28603–28607, 2020.
- [64] S.F. Ahmed, J.W. Yi, M. Moon, Y. Jang, B. Park, S. Lee, K. Lee, "The Morphology and Mechanical Properties of Polycarbonate/Acrylonitrile Butadiene Styrene Modified by Ar Ion Beam Irradiation," Plasma. Process. Polym., Vol.6, No.12, pp.860–865, 2009.
- [65] A.A. El–Saftawy, A. Elfalaky, M.S. Ragheb, S.G. Zakharya, "Electron beam induced surface modifications of PET film," Radiat. Phys. Chem., Vol.102, pp.96–102, 2014.
- [66] V. Kumar, Y. Ali, R.G. Sonkawade, A.S. Dhaliwal, "Effect of gamma irradiation on the properties of plastic bottle sheet," Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B., Vol.287, pp.10–14, 2012.
- [67] M.I. Khan, M.H. Sutanto, M.B. Napiah, K. Khan and W. Rafiq, "Design optimization and statistical modeling of cementitious grout containing irradiated plastic waste and silica fume using response surface methodology," Constr. Build. Mater., Vol.271, 121504, 2021.
- [68] Y.W. Choi, D.J. Moon, J.S. Chung and S.K. Cho, "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete," Cem. Concr. Res., Vo.35, No.4, pp.776–781, 2005.
- [69] M.I. Juki, and S.K. Faisal, "Relationship between compressive, splitting tensile and flexural strength of concrete containing granulated waste polyethylene terephthalate (PET) bottles as fine aggregate," Adv. Mater. Res., Vol.795, pp.356–359, 2013.
- [70] M.A.–T. Mustafa, I. Hanafi, R. Mahmoud and B.A. Tayeh, "Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation," Structure., Vol.20, pp.519–526, 2019.
- [71] I.S. Agwa, O.M. Omar, B.A. Tayeh and B.A. Abdelsalam, "Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self–compacting concrete," Constr. Build. Mater., Vol.235, 117541, 2020.

- [72] A.A.A. Hassan, M.K. Ismail, J. Mayo, "Mechanical properties of self -consolidating concrete containing lightweight recycled aggregate in different mixture compositions," J. Build. Eng., Vol.4, pp.113-126, 2015.
- [73] O. Youssf, M. Elchalakani, R. Hassanli, R. Roychand, Y. Zhuge, R.J. Gravina and J.E. Mills, "Mechanical performance and durability of geopolymer lightweight rubber concrete," J. Build. Eng., Vol.45, 103608, 2022.
- [74] M. Hasan, T. Saidi and M. Afifuddin, "Mechanical properties and absorption of lightweight concrete using lightweight aggregate from diatomaceous earth," Constr. Build. Mater., Vol.277, 122324, 2022.
- [75] M. Pekgöz, İ. Tekin, "Microstructural investigation and strength properties of structural lightweight concrete produced with Zeolitic tuff aggregate," J. Build. Eng., Vol.43, 102863, 2021.

< 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.