

R&D /
18CTAP
-C1297
56-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

발 간 등 록 번 호

11-B552989-000077-01

R&D/18CTAP-C129756-02

3.0이상의 밀도를 갖는 전자폐기물을 적용하여 차폐 성능을 1.3배 향상시킨 차폐 채움재의 원천기술 및 성능 평가법 개발 최종보고서

2019. 03. 29.

주관연구기관 / 강릉원주대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)제이엔티아이엔씨
공동연구기관 / (재)한국건설생활환경시험연구원

최
종
보
고
서

2018

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원
국
토
교
통
부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'3.0이상의 밀도를 갖는 전자폐기물을 적용하여 차폐 성능을 1.3배 향상시킨 차폐 채움재의 원천 기술 및 성능 평가법 개발'(연구개발 기간 : 2017.04. ~ 2018.12.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 01. 18.

주관연구기관명 : 강릉원주대학교 산학협력단 (김환석)



공동연구기관명 : (주)제이엔티아이엔씨 (은정호)



공동연구기관명 : (재)한국건설생활환경시험연구원 (윤갑석)



주관연구기관책임자: 양 은 익

공동연구기관책임자: 송 용 순

공동연구기관책임자: 최 윤 석

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129756-02	해당 단계 연구 기간	2017.04.01. ~ 2018.12.31.	단계구분	2/2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	3.0이상의 밀도를 갖는 전자폐기물을 적용하여 차폐 성능을 1.3배 향상시킨 차폐 채움재의 원천기술 및 성능 평가법 개발			
연구책임자	양 은 익	해당단계 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 8 명 외부: 8 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 73,500 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 293,500 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 31 명 내부: 14 명 외부: 17 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 123,500 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 493,500 천원
연구기관명 및 소속 부서명	강릉원주대학교 산학협력단			참여기업명 (주)제이엔티아이엔씨	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	본 연구개발사업은 [국토교통부소관 연구개발사업 운영규정] 제7장 연구개발사업의 보완 및 정보관리, 제47조의 4 (보완등급 분류기준)에 명시된 보안등급 분류에 따라 일반과제로 구분됨.
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

- (1) 전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 원천기술개발 및 성능향상 연구
- 차폐 채움재의 내구성능 확보
 - 차폐 채움재의 역학적 특성 평가
 - 차폐 채움재의 내구성능 검증
- (2) 고밀도 전자 폐기물을 포함한 차폐 채움재의 기초재료 개발
- 밀도상승 및 혼화재료에 따른 시공성 확보
 - 차폐 채움재의 내구성능 개선 혼화재료 개발
 - 건조수축 및 ASR 반응 저감 혼화재료 개발

보고서 면수
128 페이지

(3) 전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 성능 평가법 개발					
- 방사선 차폐율 검증 방법 조사 및 분석 - 차폐 채움재의 물성별 차폐 성능 D/B 구축 - 차폐 채움재의 강도별 최적 차폐율 도출					
연구의 목적 및 내용	- 고밀도 전자폐기물을 이용한 친환경적 차폐 채움재 및 제조기술 개발 - 고밀도 전자폐기물을 사용한 차폐 채움재의 내구성능 향상 연구 - 차폐 채움재의 차폐 성능 평가시스템 개발				
	- 고밀도 전자폐기물을 이용한 친환경적 차폐 채움재 및 제조기술 개발 · 국내외 관련 연구 및 개발 사례 조사 · 고밀도 전자폐기물의 적용형태 결정 · 차폐 채움재의 내구성능 개선을 위한 혼화재료 검토 및 개발 - 고밀도 전자폐기물을 사용한 차폐 채움재의 내구성능 향상 연구 · 차폐 채움재의 내구성능 검토 · 차폐 채움재의 건조수축 및 ASR 저감 기술 확보 - 차폐 채움재의 차폐 성능 평가시스템 개발 · 차폐채움재 혹은 차폐를 위한 콘크리트(모르타르)의 정량적 차폐 성능 평가 시스템 구축 · 감마선 분광법을 이용한 차폐 채움재의 차폐 성능 정량화 및 D/B 제공				
연구개발성과	- 본 연구개발을 통한 핵심성과는 “고밀도 전자폐기물을 포함한 차폐 채움재의 기초재료 개발” , “차폐 채움재의 내구성능 향상” 및 “차폐 채움재의 차폐 성능 검증 시스템 개발” 임. - 본 연구의 성과달성에 따른 정량적 성과는 다음과 같음. · SCI(E)급 논문 게재 : 2 건 · 일반 학술지 논문 게재 : 4 건 · 국내외 학술회의 발표 논문 : 11 건 · 특허 출원 및 등록 : 2 건 · 연구성과 확산 노력: 4 회				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 활용방안 · 전자폐기물의 재활용 기술 개발 · 방사성폐기물 처분으로 인해 발생하는 방사능 누출가능성에 대한 안전성 확보 · 차폐 채움재의 차폐 성능 평가 - 기대효과 · 기술적 측면 : 고밀도 전자폐기물의 재활용 기술 확보 : 전자파 차폐 시설 재료의 제조기술 창출 : 방사성폐기물의 안전성 확보 · 경제 · 산업적 측면 : 전자폐기물의 전량 재활용 기술 확보 : 저비용 고효율의 건설재료 확보 · 사회적 측면 : 원자력 분야의 인식 개선 : 고밀도전자폐기물로 인한 사회문제 해결				
핵심어 (5개 이내)	중 · 저준위 방사성폐기물	친환경성	전자폐기물	차폐성능	내구성

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	– Development of eco-friendly manufacturing technique and filler material ensuring shielding performance by substitution of high-density electrical waste as a filler ingredient – Study on the improvement for durability of filler materials using high-density electrical waste – Development of performance evaluation system for filler material ensuring shielding performance – Development of eco-friendly manufacturing technique and filler material ensuring shielding performance by substitution of high-density electrical waste as a filler ingredient • Case study of domestic and international research and development • Determine of the application type of high-density electrical waste • Investigation and development of mineral admixture to improve durability of shielding filler material – Study on the improvement for durability of filler materials using high-density electrical waste • Investigation for durability of shielding filler material • Reduction technology of shrinkage and alkali-silica reaction of shielding filler material – Development of performance evaluation system for filler material ensuring shielding performance • Establishment of the quantitative shielding performance evaluation system of filler material or for shielding concrete(mortar) • Provision of basic database and quantification of shielding performance of filler material using gamma ray spectroscopy				
Results	– The core achievements through this research are "Development of basic material for shielding filler material including high-density electrical waste", "Improvement of durability of filler material" and “Development performance evaluation system of filler material”. In this study, quantitative performances are as follows. • Domestic and foreign academic journals: 6 cases • Domestic and foreign academic conferences : 11 cases • Patent application and registration: 2 cases • Research promotion: 4 cases				
Expected Contribution	– Utilization Plan • Development of recycling technic of electrical waste • Ensuring the safety of radioactive leaks from radioactive waste disposal • Evaluation of shielding performance of shielding filler material – Expected effect • Technical Aspect : Development of recycling technic of high-density electrical waste : Creation of manufacturing technology of electromagnetic shielding material : Confirmation of the safety of radioactive waste • Economic-industrial Aspect : Ensuring recycling method of all the electrical waste : Ensuring low-cost and high-efficiency construction material • Social Aspect : Improvement of awareness of nuclear energy : Solution of social problems due to high-density electrical waste				
Keywords	Low and intermediate level radioactive waste	Eco-friendly	Electrical waste	Radiation shielding performance	Durability

< Table of Contents >

1. Summary of research project	1
2. Status of domestic and overseas technology development	13
3. Research performance content and primary achievements	17
4. Achievement of goal and contribution to relevant field	99
5. Plan to utilize R&D achievements	102
6. Overseas science and technology information collected during the research process	106
7. Security rating of R&D achievements	122
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	122
9. Implementation of safety measures in laboratories during R&D tasks	123
10. Representative research achievements of R&D tasks	127
11. The others	128
12. References	128

< 목 차 >

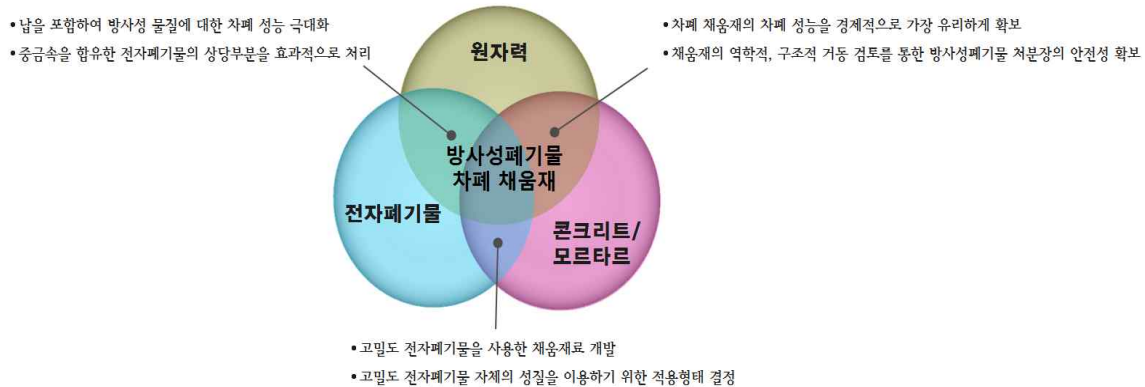
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	13
3. 연구수행내용 및 성과	17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	99
5. 연구개발성과의 활용 계획	102
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	106
7. 연구개발성과의 보안등급	122
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	122
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	123
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	127
11. 기타 사항	128
12. 참고 문헌	128

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 본 기술 제안의 목적은 (1) 건설분야에서의 내구성을 확보한 차폐 채움재의 개발과 (2) 환경분야의 전자폐기물 재활용 기술 및 (3) 원자력 분야의 차폐 성능 검증기술을 모두 융합하여 방사성폐기물 처분용 채움재의 제조기술 및 차폐 성능에 대한 검증 시스템 개발에 관한 혁신 기술을 확립하는 것임.

전자폐기물을 재활용한 방사성폐기물 처분용 차폐 채움재 개발



○ 전자폐기물 재활용 기술

- 최근, 전 세계적으로 환경오염을 방지하고 자원 소비를 절감할 수 있는 ‘자원순환사회’로의 전환을 서둘러야 한다는 공감대가 확산되고 있음. 여기서 ‘자원순환사회’란 폐기물의 소각, 매립을 최소화하고 재활용을 촉진함으로써 환경오염방지 및 자원·에너지 절약을 추구하는 사회적인 움직임을 뜻함.
- ‘자원순환사회’의 정착을 위해 보다 강력한 성격을 갖는 규제/법규가 출범되었으며, 초창기에는 단순히 오염물질 저감에 초점을 맞추었으나, 점차 지속가능한 산업 발전을 목표로 생산에서 폐기되기까지 최대 재활용하는 기술 개발을 추구하고 있음.
- <표 1.1>에 나타난 바와 같이 크게 3가지 형태의 환경 법규가 있으며, 그 중 폐기물 처리 기술이 빠르게 발전함에 따라 환경오염 물질을 유용한 자원으로 바꾸는 ‘유해폐기물 재활용’산업이 부상하고 있음. 이에 우리나라를 포함한 주요국에서는 유해폐기물에 대하여 폐기물 처리에 대한 규제를 지정하여 엄격한 관리를 요구하고 있음.
- 특히, 미국 환경보호국(EPA)에서 발간한 ‘Electronic Recycling Market-Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2013-2019’ 보고서에 따르면, 미디어 기기에 의해 발생된 폐기물은 향후 10년 동안 연간 500%이상 증가하고, 그중 75%가 중금속을 포함한 유해폐기물로 나타나, 이를 재처리할 수 있는 기술 개발이 시급한 상황임.

<표 1.1> 유형별 규제 및 규제 내용

구분	주요 규제	내용 (규제 항목)
온실가스	- EU 배출권 거래제 - 자동차 연비 및 배기가스	- 온실가스(이산화탄소, 메탄, 질소산화물, 수소화불화탄소 등)
에너지 효율	- 친환경설계지침(EuP) - 절전형 TV - 제품에 따른 에너지 효율 표기	- 모든 에너지이용 제품에 대한 의무사항 • 친환경 설계 개발방법 준수 • 인증마크 부착 • 지침 준수여부의 증명
유해물질 (폐기물)	- 유해물질사용제한지침(RoHS) - 폐전기·전자제품처리지침(WEEE) - EU 유해폐기물 규정	- 전기·전자제품에 유해물질(Pb, Hg, Cd, Cr ⁶⁺ , PBB, PBDE) 사용 금지 - 폐전기 전자제품의 재활용 비율 의무화 - 유해폐기물(고위험, 감염성, 독성)의 매립 금지

<표 1.2> 국가별 전자폐기물 발생현황

(단위: 천대/년)

	품명 (평균수명/년)	남아프리카	우간다	모로코	세네갈	브라질	인도	중국
연 배 출 량	TV (8)	23,700	1,900	15,100	1,900	137,000	275,000	1,350,000
	냉장고 (10)	11,400	900	5,200	650	115,100	101,300	495,000
	PC (5-8)	19,400	1,300	13,500	900	96,800	56,300	300,000
	휴대전화 (4)	850	40	1,700	100	2,200	1,700	7,000
	프린터 (5)	4,300	250	2,700	180	17,200	4,700	60,000

(출처 : UNEP “Recycling from e-waste to Resources”, Greenpeace, 2009)

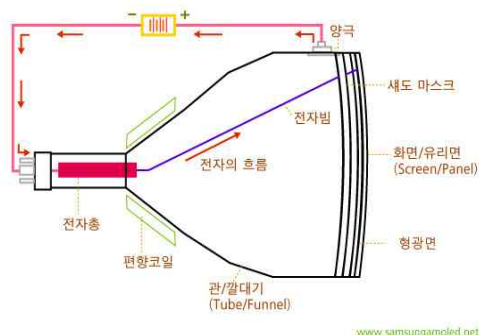
<표 1.3> 국내의 연도별 전기·전자제품 판매량 및 유통현황

(단위: 천대)

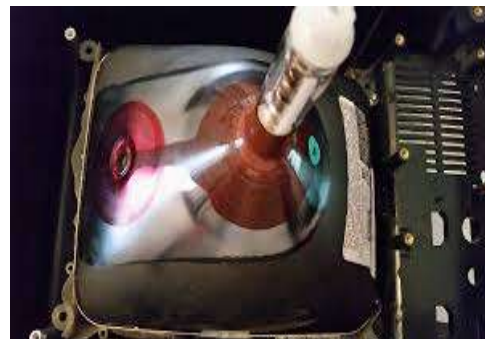
	2001	2002	2003	2004	2005	2006
신제품 판매량	9,542	10,524	11,528	10,604	11,436	11,736
폐제품 발생량	5,595	5,682	5,765	6,771	6,805	7,010
회수량	1,281	1,757	2,506	2,683	2,837	3,005

(출처 : 한국환경공단, ‘2010년 환경기술전문서 - 폐금속 자원 재활용 기술’)

- 또한, 전기·전자산업의 급속 성장으로 인해 전자제품의 종류와 형태가 기하급수적으로 증가하였으며 폐제품 발생량 역시 동반 상승하고 있음. <표 1.2>에 나타난 바와 같이 세계적으로는 매년 2천~5천만 대의 폐제품이 발생하고 있으며, 우리나라의 경우, 폐제품 발생량이 2006년에 700만대를 돌파하였으며, 2017년인 현재, 더욱 증가했음을 예상할 수 있음.
- 우리나라는 세계적으로 전기·전자분야의 우수한 기술을 보유하고 있고, 폐제품으로 인한 전자폐기물의 발생량도 높은 국가에 속하기 때문에 폐자원순환 및 폐기물 재활용 기술 개발 위해 전자업계와 폐전자제품 생산자 재활용에 관한 협약인 생산자책임재활용(EPR) 제도를 본격적으로 실시함.
- EPR 제도를 실행하기 위해서 2000년 이후, 리사이클링 센터를 권역별로 설치하여 전국적으로 폐전자제품을 회수하여 재활용하는 체계를 구축하였으며, 이를 통해 수거된 TV, 냉장고 에어컨 등이 100만톤의 유가 자원으로 재생산되어 약 4,000억원 이상의 경제적 가치를 확보하였음.
- 그중 가장 많은 양이 발생한 TV의 경우, <그림 1.1>에 나타난 것과 같이 브라운관 전면부(Pannel), 브라운관 후면부(Funnel, 고밀도 전자폐기물), 편향코일, 전자총 등으로 다양하게 구성되어 있으며, 그중 가장 환경적으로 문제가 많은 부분은 <그림 1.2>에 나타난 고밀도 전자폐기물임. 고밀도 전자폐기물은 브라운관에서 전파 흐름에 의해 발생하는 전자파를 브라운관 외부로 반출하지 않기 위해 중금속을 유리에 용융시켜 안정화된 상태로 사용하였음. 또한, 고밀도 전자폐기물의 경우, 전량 수거후 고온에 용융시켜 다시 브라운관 후면부로 제작하여 사용하였기 때문에 100% 재활용되어 환경적으로 크게 유해하지 않았음.



<그림 1.1> 아날로그 TV의 구성요소



<그림 1.2> 브라운관 후면부 유리

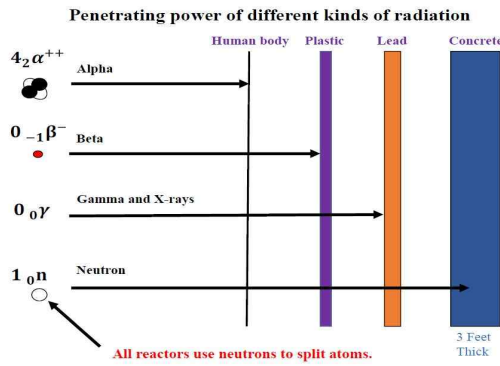
- 그러나 「지상파 텔레비전 방송의 디지털 전환과 디지털방송의 활성화에 관한 특별법(이하 디지털 전환 특별법)」이 발효되면서 아날로그 형식의 방송이 종료되고 디지털 방송이 시행되어 아날로그 형식의 TV는 더 이상 사용이 불가함. 현재 이러한 TV는 100만대 이상이 수거되었으며 추후 1000만대 이상 더 발생할 것으로 예상되나, 중금속을 함유한 고밀도 전자폐기물 기술력 한계로 인해 매립되고 있음.
- 이에 본 연구개발에서는 고밀도 전자폐기물을 차폐 채움재의 재료로 전량 대체함으로써 전자폐기물을 효과적으로 재활용함과 동시에 고밀도 전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 재료를 개발하고자 함.

○ 원자력 분야의 차폐 성능 검증 기술

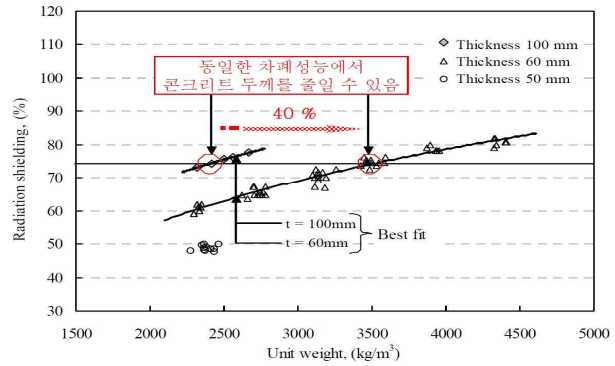


<그림 1.3> 방사성폐기물의 분류기준과 처분방식

- 에너지경제연구원에서 발행된 '2016년도 에너지통계 연보(2017. 01)'에 따르면, 국내에서 생산되는 에너지의 양은 약 5천만 TOE(국제 에너지기구(IEA)에서 정한 단위로 지구상에 존재하는 모든 에너지원의 발열량을 석유의 발열량으로 환산한 것으로 각종 에너지의 단위를 비교하기 위한 가상단위이며, 1TOE는 원유 1톤의 순발열량에 해당하는 열량으로 107kcal에 해당함.)로 공급에너지 대비 5.2%로 나타나 에너지의 해외 의존도가 높은, 즉 에너지 안보에 매우 취약한 공급구조를 가지고 있음.
- 해외 에너지 의존도 해결을 위해 우리나라에서 자체 생산이 가능한 원자력 에너지를 이용하여 국내 생산 에너지의 50%이상을 생산하고 있으며, 이 밖에도 의료기기인 x-ray를 비롯한 의료 분야에서도 다양한 종류의 원자력을 이용하고 있어 원자력 사용에 의해 발생하는 방사성 폐기물은 점차 증가할 것으로 예상됨.
- 방사성폐기물은 단순 폐기물의 증가로 인한 환경오염이나 자원낭비가 아닌, 방사능 물질의 외부노출로 인한 인체의 직·간접적인 위해를 가할 수 있어 에너지 수준 및 그 양에 따라 별도의 처분 기준이 존재하며, 반감기 20년 이상의 알파선을 방출하는 핵종의 4,000Bq/g 이상을 갖는 방사능 밀도와 2 kW/m³의 열 발생률을 기준으로 고준위, 중·저준위 폐기물로 구분하여 처분 과정을 거치나(<그림 1.3>), 에너지 준위에 관계없이 외부노출을 방지하는 차폐시설이 요구됨.
- 방사성 물질의 이동방지를 위한 차폐 시설은 <그림 1.4>에 나타난 바와 같이, 원자번호가 크고 밀도가 큰 중금속인 납, 철, 텅스텐 등을 사용하여 구성해야 하지만, 중금속이 단가가 높고 관리가 어려워 상대적으로 관리가 용이하고 비용이 낮은 콘크리트를 이용하여 차폐 시설을 구성하고 있음.
- 콘크리트를 이용한 방사성 물질의 차폐는 콘크리트의 두께를 증가시키는 방법으로 단순히 적용하고 있으나, 콘크리트 부재 크기 증가에 따른 콘크리트의 건조수축, 수화열 등에 의한 균열이 쉽게 발생할 수 있는 단점이 있어 <그림 1.5>와 같이 중정석, 자철석등의 고밀도재료를 사용하여 콘크리트 자체의 밀도 증가를 통해 사용량을 절감하여 건조수축, 수화열에 의한 열화를 방지할 수 있음.



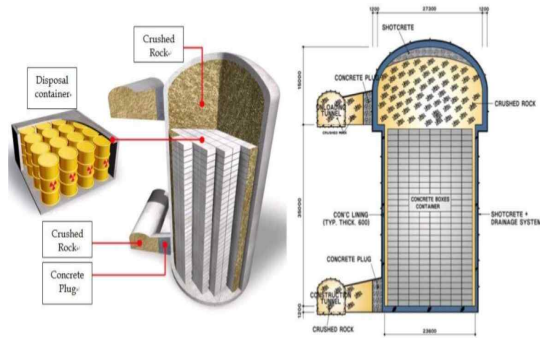
<그림 1.4> 방사선 종류 및 차폐체



<그림 1.5> 콘크리트밀도에 따른 콘크리트 차폐율



<그림 1.6> 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 및 폐기물 보관용 콘크리트 사일로



- 우리나라는 방사성폐기물관리법에 의거하여 ‘방사성폐기물 관리 기본계획’을 수립하고 아시아 최초로 동굴처분방식을 적용한 중·저준위방사성폐기물 처분장을 건설함. 동굴처분방식을 적용한 처분장은 <그림 1.6>과 같이 해수면 아래 지하 80~130m 지점에 수평 또는 수직 동굴을 뚫어 방사성폐기물 드럼을 쌓은 후 폐쇄하는 방식으로, 사일로의 크기는 직경 23.6m, 높이 50m 이고 총 6개가 건설되어 처분장 건설 이전에 발생한 10만 폐기물드럼을 보관하고, 단계적으로 증설하여 추후 60년간 추가로 70만 드럼(총 80만 드럼)의 폐기물을 저장할 수 있게 건설되었음.
- 중·저준위 방사성 폐기물 처분장에서는 방사성폐기물의 형태를 액체, 고체, 기체 상태로 구분하고 각기 다른 처리 과정을 통해 처분하고 있음. 그중, 액체폐기물에 경우에는 여과설비를 이용하여 입자성 물질을 제거하여 기준치 미만인 경우에는 소외로 방출하고, 기준치 이상인 경우에는 탱크에 별도 보관함. 기체폐기물은 공기정화기를 이용하여 처리한 후 대기로 방출함.
- 반면, 고체 폐기물의 경우에는 <그림 1.7>과 같이 드럼에 폐기물과 방사성물질의 누출을 방지하기 위한 채움재를 함께 타설하여 밀봉 및 압축하여 사일로에 적층함. 이후 사일로가 수용한계에 도달하게 되면 드럼통 사이를 쇠석과 모르타르 등의 채움재를 사용하여 방사성폐기물의 이동을 단순하게 방지하는 방법으로 차폐를 확보한 후, 사일로 자체를 폐쇄하여 영구 보관함.



<그림 1.7> 중·저준위 방사성 고체 폐기물의 처분 과정

- 그러나 채움재가 방사성폐기물에 잔존하는 방사성 물질의 차폐를 위해 사용됨에도 불구하고, 현재까지 차폐 채움재 자체의 차폐 성능에 대한 직접적인 평가가 진행된 바 없어, 방사능 물질에 대한 차폐 수준에 대한 성능은 신뢰할 수 없는 상황임.
- 또한, <표 1.4>에 나타난 법정 방사선의 허용선량 기준을 이유로 하여 현재 방사성폐기물을 처리하는 기관에서는 처분장 인근 지역의 방사선량이 법적기준인 연간 0.1mSv의 1/25 수준인 0.004mSv보다 낮기 때문에 안전하다고 발표하고 있으나, 건설 분야에서 요구되는 방사선 차폐용 콘크리트에 관한 콘크리트 표준 시방서 기준은 <표 1.5>와 같이 단위 용적질량, 슬럼프, 물-결합재비 등으로만 규정짓고 차폐율에 대한 뚜렷한 정의가 존재하지 않아, 원자력법에 의거한 법정 차폐기준과 연관성이 없는 것으로 나타남.
- 따라서 원자력 분야에서 적용하고 있는 차폐 성능 평가 방법 중 감마선 분광법을 이용한 채움재의 차폐 성능을 평가하여, 차폐 성능 검증 기술을 정립하고, 일반적으로 사용되는 모르타르(혹은 콘크리트)와 개발된 채움재의 차폐 성능 정량적으로 비교·평가하여 제시하고자 함.

<표 1.4> 법정 방사선의 허용선량

구분	방사선 작업 종사자	수시출입자 및 운반종사자	일반인
유효선량한도 (단위: mSv/년)	50	12	0.1

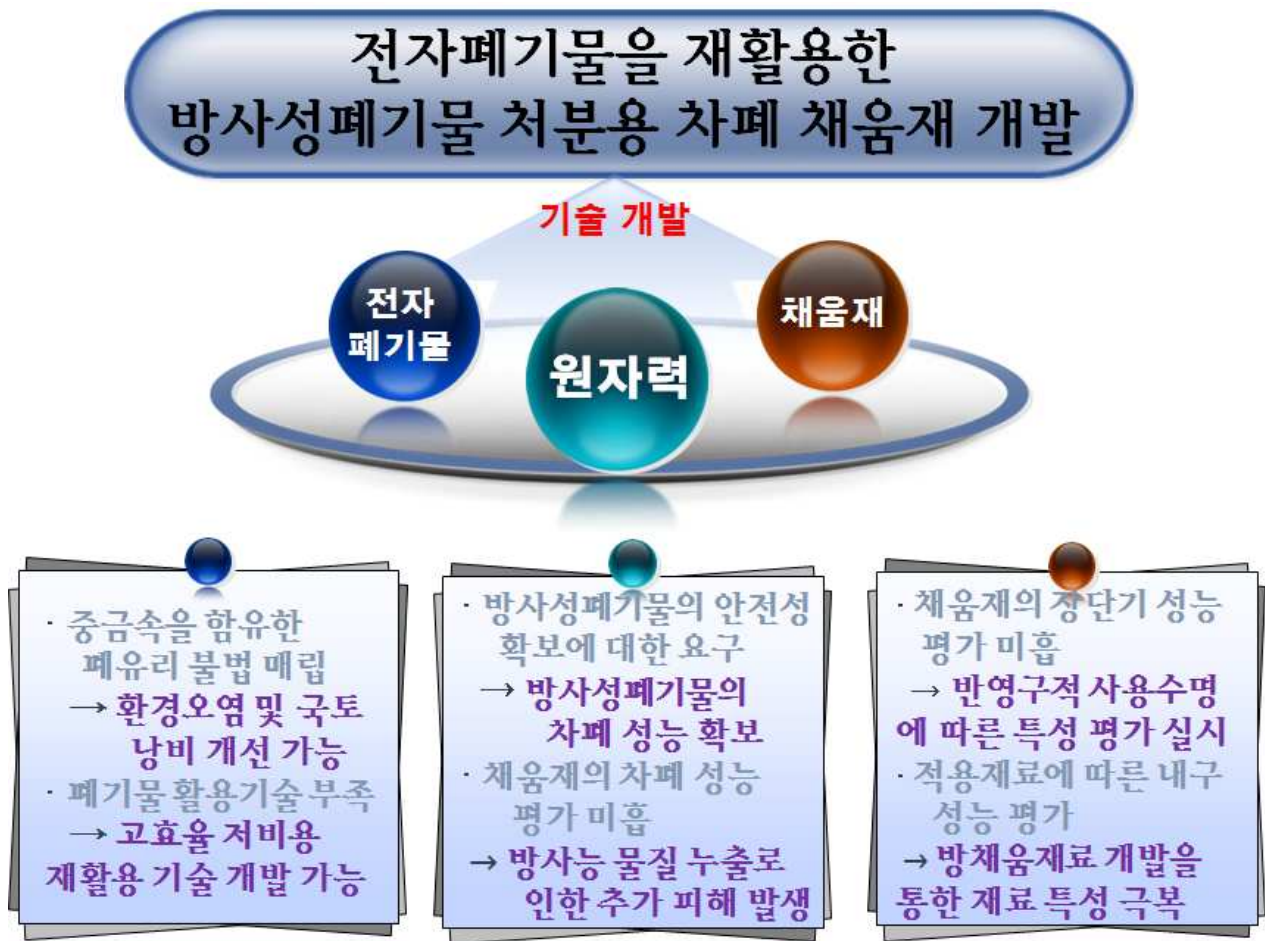
<표 1.5> 방사선 차폐용 콘크리트 기준

구분	단위용적질량	슬럼프	물-결합재비
기준	2.5~4.0 t/m ³	150mm 이하	50%이하

○ 건설분야의 내구성을 확보한 차폐 채움재 개발 기술

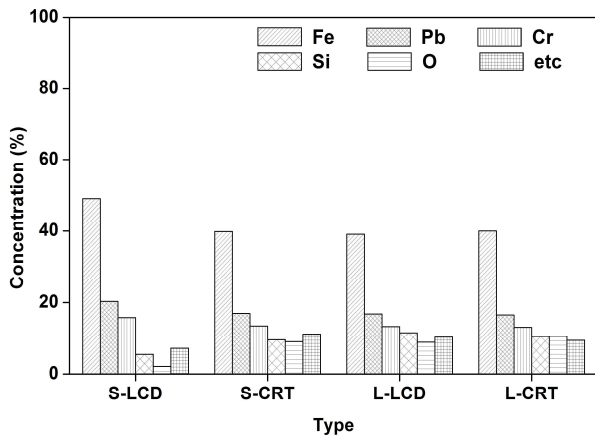
- 최근 천연자원의 고갈로 인해 건설 분야에서 대체재 개발에 대한 다양한 접근이 진행되고 있음. 그중 유리를 건설재료로 개발하기 위한 시도가 있었으나 알칼리-실리카반응(ASR)으로 인해 적용이 어려움.
- 따라서 본 연구 개발에서는 ASR 저감을 위한 고효율 저비용재료인 산업부산물(플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카폼 등)의 2차 사용을 고려하여 ASR 저감 방안을 확보할 계획임. 또한, 고밀도 전자폐기물에 포함된 Cr₂O₃의 성분의 함유율이 일반 병유리에 비해 높기 때문에 팽창에 대한 저항성을 확보할 수 있을 것으로 예상됨.
- 또한, ASR 저감을 위해 산업부산물인 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말등을 시멘트의 일부로 치환하여 사용하여 탄소 저감 효과 및 고밀도 전자폐기물 사용에 따른 알칼리-골재 반응을 저감시킬 수 있으므로 고밀도 전자폐기물을 차폐 채움재료로 적용하는 것이 가능할 것으로 판단됨.
- 고밀도 전자폐기물은 전자 폐기물이 함유하고 있는 중금속의 자연적인 용출에 대한 우려로 환경오염과 더불어 인체에 유해한 물질이라는 일반적인 인식이 고밀도 전자 폐기물의 재활용을 저해하였음. 그러나 최근 발표된 연구 결과에 따르면, 고밀도 전자폐기물에 존재하는 중금속은 안정화된 상태이므로, 자연적인 방법으로 용출되지 않아 본 기술에 적용 가능한 것으로 판단됨.
- 한편, 차폐 채움재와 같이 막대한 양을 사용하게 되는 콘크리트/모르타르의 경우(예를 들면 댐콘크리트, 매스콘크리트)에는 시멘트 수화물에 존재하는 공극수와 표면에 존재하는 자유수의 증발로 인해 발생하는 수축현상이 존재함. 이러한 수축 현상은 타설 초기에 활발하게 발생하는 측면이 있으나, 수축이 진행되는 동안 구속하중이 존재하지 않는 경우에는 균열이 발생할 가능성이 낮음.
- 그러나 채움재는 방사성 폐기물과 함께 폐기물 드럼에 함께 타설되어 밀봉 이후 압축·진공 처리되기 때문에 채움재에 가해지는 구속압력으로 인해 외부에 노출되지 않더라도 채움재에서는 수축 발생으로 인한 균열이 진전될 가능성이 있음.
- 따라서 본 연구 개발에서는 채움재에 발생할 수 있는 건조수축을 비롯하여 채움재의 내구성능 평가에 척도가 되는 다양한 실험을 실시하여 차폐 채움재의 내구성 확보를 평가하고자 함.

2. 연구개발의 필요성

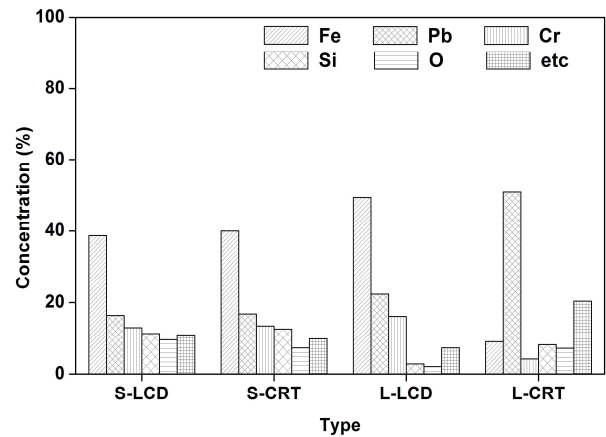


○ 전자폐기물을 활용한 방사성폐기물 차폐 채움재의 기초재료 및 제조기술 개발

- 환경오염을 비롯하여 자원낭비에 문제점이 사회적 이슈로 떠오르면서, 각종 전자폐기물은 물론 다양한 종류의 폐기물이 발생하고 있음. 이에 반해 재활용 처리기술은 새로운 생산기술에 비해 미흡한 현실임.
- 재활용 처리기술은 물질 회수기술과 에너지 회수기술로 분류되며, 물질 회수의 대상이 되는 폐기물은 재생이 가능한 물질, 유가 물질 및 물질 함유 폐기물, 유·무기성 폐기물 등으로 다양하지만, 그 자체를 재활용하는 기술은 재생가공 및 유가물질을 회수하는 기술 정도만 개발되어 그 적용에는 한계가 있음.
- 특히, 본 기술개발에서 사용하고자 하는 고밀도 전자폐기물은 중금속을 함유하고 있기 때문에 종래에는 전량 브라운관 유리로 재사용하여 그 폐기물 자체의 특성을 활용하는 재생가공이 가능했지만, 생산기술의 변화와 디지털전환 특별법(아날로그 방송 송출 종료)로 인해 재사용이 불가해지면서 수거된 전자폐기물은 매립(혹은 적치) 됨. 추후 공공기관에 존재하는 아날로그 TV의 회수까지 포함한다면 해마다 수만톤 이상의 전자폐기물이 발생할 것으로 예상되고 있어 고밀도 전자폐기물의 재활용 기술을 확보하거나, 재활용 기술 개발의 기초 연구에 대한 요구가 급증함.
- 따라서 본 기술 개발에서는 기존 고밀도 전자폐기물과 관련한 연구 결과들이 중금속을 용출하여 그 특성을 상실하여 사용되므로 경제성 확보가 어려운 점과 그 특성을 이용할 수 있는 분야에서의 융합을 도모하고자, 고밀도 전자폐기물에 존재하는 중금속 용출 과정을 생략하고, 고밀도 폐유리가 함유하고 있는 중금속을 차폐 성능 개선에 중점적인 역할로 적용하고자 함. 이를 통해 고밀도 전자 폐기물 재활용시 발생했던 불편요소를 제거할 수 있을 것으로 예상됨.



<그림 1.8> 21인치 TV



<그림 1.9> 29인치 TV

- 또한, 고밀도 전자폐기물에 존재하는 중금속의 자연적인 용출에 대한 우려로 고밀도 전자폐기물의 재활용을 저해하여 왔으나, 최근 중금속에 포함된 중금속은 자연적으로는 용출되지 않는 것이 밝혀짐.
- 본 기술개발팀에서는 고밀도 전자폐기물의 재활용 기술에 대한 기초 자료를 확보하고자 TV의 제조사, 크기, 브라운관의 형태에 따라 분류하여 수거한 후 XRF 분석방법을 이용하여 고밀도 전자폐기물의 구성성분을 정량적으로 분석하였으며 그 결과는 <그림 1.8>, <그림 1.9>에 나타내었음.
- 고밀도 전자폐기물의 성분분석 결과, TV의 형태, 제조사, 크기 등 모두 상관없이 모든 고밀도 전자폐기물에서는 철, 납, 크롬등의 중금속이 다량 포함을 확인하였고, 이미 전자파의 차폐를 위해 사용됐음에도 불구하고 중금속의 손실이 없는 것으로 나타남. 따라서 고밀도 전자폐기물은 전자파의 차폐뿐만 아니라, 방사성폐기물의 방사성 물질의 이동을 방지하고, 차폐를 확보하기 위해서 사용되는 채움재의 재료로 사용이 가능할 것으로 판단됨.
- 그러나 자연적인 방법으로 용출되지 않는다고 해서 중금속의 용출 가능성이 전무하다고 판단하기엔 다소 무리가 있으므로, 본 연구 개발팀에서는 고밀도 전자폐기물에 포함된 중금속의 용출을 방지하기 위해 시멘트 풀과 고밀도 전자폐기물의 부착성 증대를 위한 혼화재료를 혼입 <그림 1.10>, <그림 1.11>하여 차폐 채움재에 존재하는 중금속 용출 가능성을 제한하여 고밀도 전자폐기물 사용을 위한 전 과정에서 발생하는 위험요소를 제거할 수 있음.
- 따라서, 전자파의 차폐를 위해 중금속을 함유한 고밀도 전자폐기물을 방사성폐기물의 차폐를 위해 사용되는 채움재의 재료 및 제조기술 개발한다면, 고밀도 전자폐기물의 재활용 기술을 확보하고, 방사성폐기물 처분용 채움재의 차폐성능도 향상시킬 수 있으므로, 본 기술 개발은 고밀도 전자폐기물의 재활용 및 방사성폐기물의 완벽한 차폐에 대한 기술적 갈증을 해결할 수 있을 것으로 사료됨.



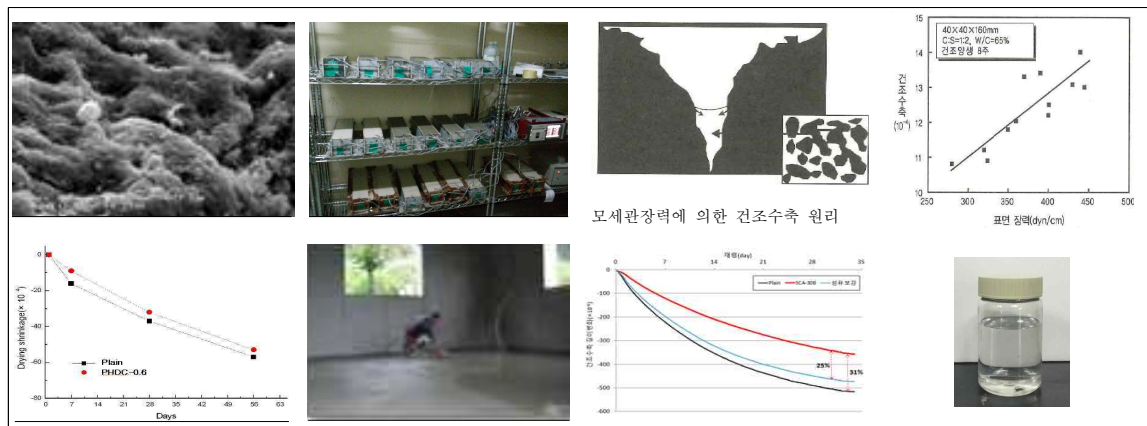
<그림 1.10> 분말형 혼화재료 (예시)



<그림 1.11> 액상형 혼화재료 (예시)

○ 차폐 채움재의 내구성능 향상 연구

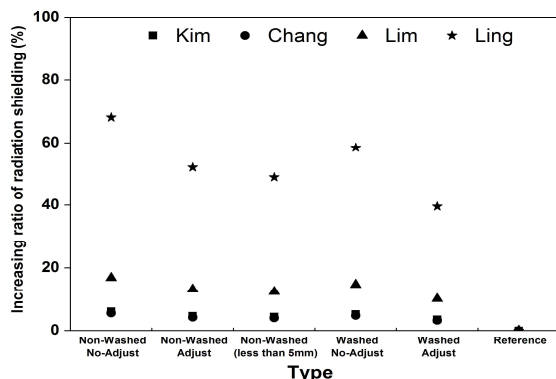
- 차폐 채움재는 방사성폐기물의 밀폐와 방사성폐기물에 존재하는 방사능 물질의 누출을 방지하기 위해 사용되므로 일정 수준 이상의 압축강도를 비롯하여 내구성능을 만족해야하나, 방사성 폐기물의 차폐에 사용되는 콘크리트나 모르타르에 배합에 대한 기준이 모호한 상태임. 즉, 방사성폐기물 처분용 차폐 콘크리트에 대한 내구성능 기준 미흡으로 막연하게 압축강도가 높다고 해서 내구성능을 확보한 것으로 평가하고 있음. 그러나 미국의 원전구조물 구조기준인 ACI 349와 ANSI 6.4에서는 원전 콘크리트의 경우, 압축강도에 비례하여 차폐능능이 개선되는 것은 아닌 것으로 규명하였음.
- 따라서 채움재에서 요구되는 압축강도 수준은 초고강도, 고강도 콘크리트처럼 40MPa 이상의 압축 강도 수준이기 보다는, 타설 방법 및 채움재의 사용 목적 등을 함께 고려했을 때, 방사성폐기물의 이동을 방지할 수 있는 수준을 상회할 것으로 예측함.
- 본 기술 개발에서는 국내외 문헌연구를 통해 방사성폐기물의 차폐 채움재에서 요구되는 강도수준을 규정하고, 이와 동등 이상의 차폐 채움재의 강도를 확보하여 방사성폐기물과 채움재 사이의 부착력 증진을 도모하여 방사성 물질의 이동을 방지할 수 있는 차폐 채움재를 개발할 예정임.
- 또한, 아시아 최초로 동굴처분식 처분 방법을 선택한 우리나라는 중·저준위 방사성 폐기물 처분장이 최소 1000년 이상 성능저하가 발생하지 않아야 하고, 방사성폐기물의 방사성동위원소(RI)의 반감기를 고려하여 최소 100년~300년 이상 처리/격리/보관되기 때문에 차폐 채움재는 반영구적인 사용수명을 확보해야함. 또한 다량의 콘크리트/ 모르타르가 사용되는 방사성폐기물 채움재는 매스 콘크리트의 성격을 갖게 되므로 사용 재료에 의한 수축, 크리프 특성을 포함한 구조성능에 이르기까지 전반적인 성능평가와 검증 과정을 통해 차폐 채움재의 내구성능에 대한 기초 자료를 제시할 필요성이 있음.
- 특히, 차폐 채움재의 다량 사용으로 인해 발생하는 수축은 균열을 진전시키기 때문에 균열을 방지하기 위해서는 수축을 저감 할 수 있는 방안이 필요하며, 일반적으로 수축은 굵은 골재 존재 여부에 영향을 받지만, 차폐 채움재의 특성상 굵은 골재 존재 여부에 관계없이 모두 수축 저감을 확보할 수 있는 방안을 마련해야할 것으로 보임.
- 또한 본 연구개발팀은 이미 팽창기능을 갖는 무수축 모르타르 및 콘크리트 혼합용 액상 수축 저감제를 개발한 바 있으며, 이를 통해 수축 보상 및 수축 저감 효과를 갖는 콘크리트를 개발한 바 있음. 따라서 본 연구 개발팀에서 확보한 기술력을 바탕으로 방사성 폐기물 처분용 차폐 채움재의 수축 저감을 위한 혼화재료 개발이 가능할 것으로 판단됨.
- 이뿐만 아니라, 방사성폐기물 처분장은 지하수 및 해안가에 인접하여 지속적으로 지하수와 염해에 노출되는 환경이고, 인근 지역에서 지하수를 취수할 경우, 담수 경계가 내륙으로 이동할 가능성이 존재하여 내륙의 지하수에서 염화물 이온이 증가하는 현상이 발생한 사례가 보고됨에 따라, 본 연구에서는 차폐 채움재의 염화물 확산에 대한 저항성 확보 여부를 평가하고자 함.



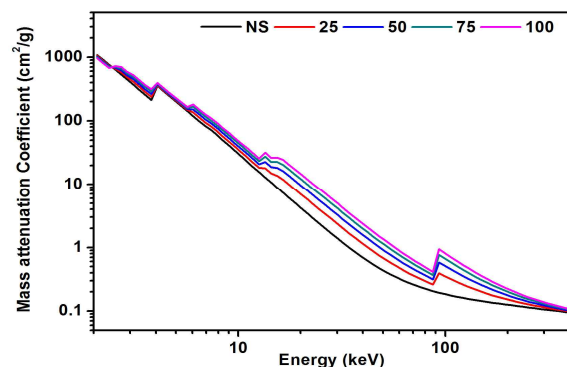
<그림 1.12> 무수축 모르타르 및 액상형 수축저감제

○ 차폐 채움재의 차폐 성능 검증시스템 개발

- 원자력은 친환경적이고 경제적인 에너지원으로 평가받고 있으나, 원자력이 가지는 위험성으로 인해 매우 협소한 분야에서 한정적으로만 연구가 진행되어 국민적인 입장에서는 무섭고도 불편한 에너지원임.
- 게다가 최근 급격하게 발생한 지진으로 인해 원전 발전 및 의료용 방사선 기기 사용에 의해 발생하는 각종 방사성폐기물이 매립된 경주 월성 지역에서 발생할 수 있는 방사성폐기물의 외부 노출에 대한 가능성이 제기되면서, 방사성물질의 차폐와 관련한 연구의 필요성이 증가하고 있으나, 차폐 성능 검증이 일반 기관에서 진행되기 어려움.
- 또한, 원전 발전에 직접적으로 이용되는 구조물에 사용되는 재료의 차폐 성능은 직·간접적인 차폐 성능에 대한 검증과정을 실시한 후 적용되고 있으나, 방사성폐기물 처분시 사용되는 차폐 채움재에 대한 차폐 성능 검증과정은 진행되지 않음.
- 특히, 방사성폐기물의 처분은 총 4단계의 방벽을 설치하여 방사성물질의 누출을 방지하고 있으며, 이 4단계 과정을 살펴보면 폐기물드럼, 처분용기, 사일로방벽, 자연암반에 매립하는 과정으로 외부와의 단절로만 차폐 성능을 확보하였을 뿐, 각 단계에 따른 직접적인 차폐 성능에 대한 평가는 이루어지지 않은 상태임.
- 위와 같이 방사성 폐기물의 처분 과정에서는 직접적인 차폐 성능에 대한 평가가 진행되지 않아 방사성폐기물의 밀폐 여부로 차폐 성능을 확보했다고 판단하기엔 다소 문제의 소지가 있음. 이러한 문제 해결을 위해 본 연구개발에서는 방사성폐기물용 차폐 채움재의 직접적인 차폐 성능을 감마선 분광법을 이용하여 차폐 성능 검증이 필요한 것으로 판단됨. 이를 통해 차폐 성능을 정량적으로 평가하여 안전성을 확보할 수 있을 것으로 보임.
- 차폐 성능에 대한 정량적 평가 기법은 감마선 분광법을 이용할 예정이며, 특히, 차폐 채움재로 사용되고 있는 콘크리트는 감마선 및 중성자 조사에 대한 확립된 선형감쇠계수를 갖는 차폐재로써, 비교적 가격이 저렴하고 질량감쇠계수가 크며, 광자와 중성자 감쇠를 위한 좋은 핵적 특성을 갖고 있음. 또한, 이러한 재료에다가 특히 차폐성능이 우수한 재료를 차폐 채움재의 구성물로 추가하면, 보다 확실한 차폐 성능을 부여할 수 있으며, 그 효과는 더욱 극대화 될 수 있음.
- 이뿐만 아니라, 본 기술 개발팀은 이미 고밀도 전자폐기물을 차폐 재료로써 적용하기 위한 가능성 검토를 추진한 바 있으며, <그림 1.13>와 <그림 1.14>에 나타낸 바와 같이 고밀도 전자폐기물 적용량에 따른 단위용적질량을 이용한 차폐성능 평가와 에너지 준위에 따른 질량감쇠계수를 평가하여 각각 차폐성능이 개선되는 것을 간접적으로 확인하였음.
- <그림 1.13>에는 기존 모르타르와 고밀도 전자폐기물의 처리 형태를 및 입자 크기 등의 변수를 두어 제작한 모르타르를 기존 단위용적질량과 차폐 성능에 관한 연구사례들을 이용하여 차폐 성능의 증가율을 평가하였음. 평가 결과, 최소 10%에서 최대 60% 이상 까지 차폐 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구 개발을 통해 진행되는 직접적인 차폐 성능 평가를 이용한다면, 최소 30%의 차폐성능이 개선되는 것을 확보할 수 있을 것으로 예상됨.

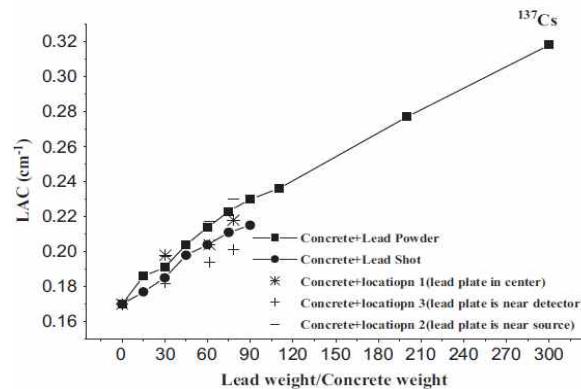


<그림 1.13> 고밀도전자폐기물과 차폐증가율



<그림 1.14> 에너지 준위에 따른 질량감쇠계수

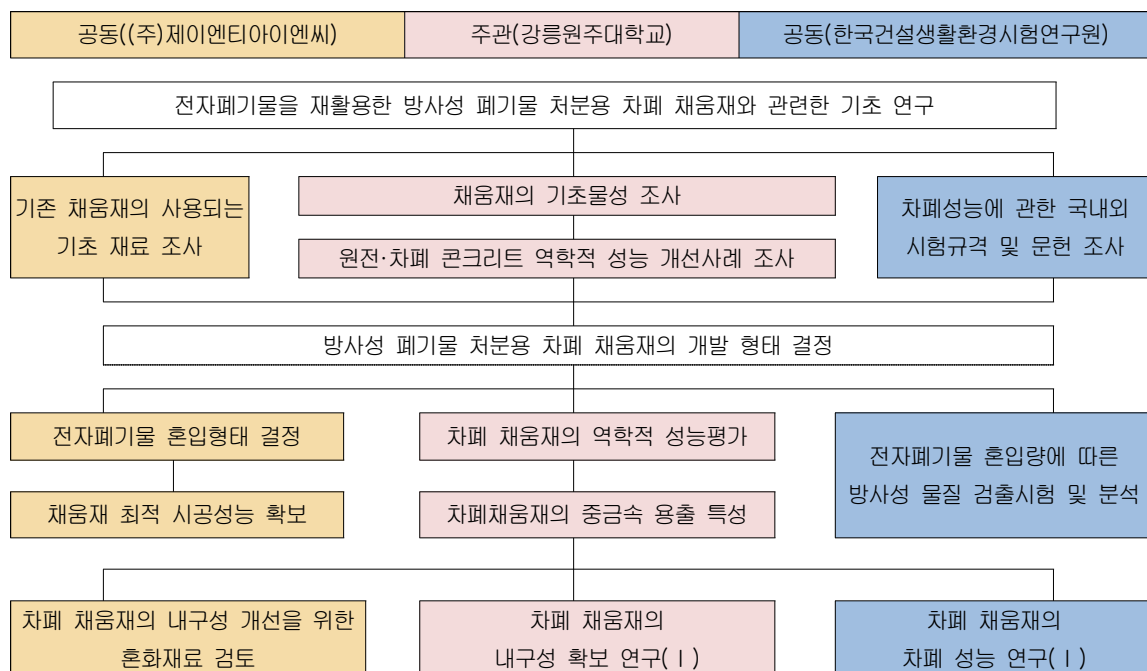
- 또한, <그림 1.15>에 나타난 바와 같이, 콘크리트에 방사성물질의 차폐능력이 우수한 납성분을 적용하여 차폐 성능을 평가한 실험 결과를 살펴보면, 납의 성분이 증가할수록, 차폐능력이 증가하는 것으로 나타남. 이는, 본 연구과제에서 사용될 전자폐기물이 구성된 성분이 납, 철 등임을 고려할 때, 전자폐기물을 적용하면 납을 적용하여 차폐 성능을 개선한 연구결과와 마찬가지로 차폐능력이 개선 될 것으로 사료됨.
- 본 연구에서 진행할 차폐 성능 평가 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있으며, x-선 투과 실험은 공 시체를 제작하여 LaBr3(Ce)섬광체 (Scintillator) 계측기를 이용하여 측정할 계획이며, x-선 스펙트럼 정도는 15kVp x-선을 사용함. 또한, 감마선 투과 실험의 경우, 고준위 감마선 조사장치를 이용하여, 코발트-60 방사성동위원소에서 방출되는 1.17 및 1.33 MeV 감마선을 사용할 계획임.
- 따라서 본 연구 개발에 고밀도 전자폐기물을 적용하여 차폐 채움재의 밀도 증진을 비롯하여 중금 속을 함유한 차폐 채움재를 개발한다면, 차폐 성능이 개선될 수 있을 뿐만 아니라, 차폐 성능을 정량적으로 평가하여 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.



<그림 1.15> 납의 적용량 증가에 따른 차폐성능 개선 연구 결과

3. 연구개발 범위

가. 1차년도



① 개발 목표

- 주관연구기관(강릉원주대학교):

- 차폐 채움재의 친환경성 확보
- 차폐 채움재의 내구성능 확보 (1)
- 공동연구기관 1 ((주)제이엔티아이엔씨):
 - 고밀도 전자폐기물의 혼입형태 결정
 - 고밀도 전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 시공성 확보
 - 차폐 채움재의 내구성 개선을 위한 혼화재료 검토
- 공동연구기관 2 (한국건설생활환경시험연구원)
 - 방사선 투과율 및 차폐 성능 검증을 통한 시험 시스템 구축

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(강릉원주대학교):

- 차폐 채움재의 기초 물성조사
- 원자력 콘크리트 및 차폐용 콘크리트의 역학적 성능 개선 연구 실례 조사/분석
- 전자폐기물 및 혼화재 혼입에 따른 중금속 용출 특성 실험 및 결과 분석
- 전자폐기물 혼입 및 차폐채움재 물성별 역학적 성능 분석
- 전자폐기물 혼입에 따른 알칼리골재반응성 시험 분석 및 개선 방향 도출 연구
- 차폐 채움재의 급속 염화물 침투 저항성 시험 및 분석

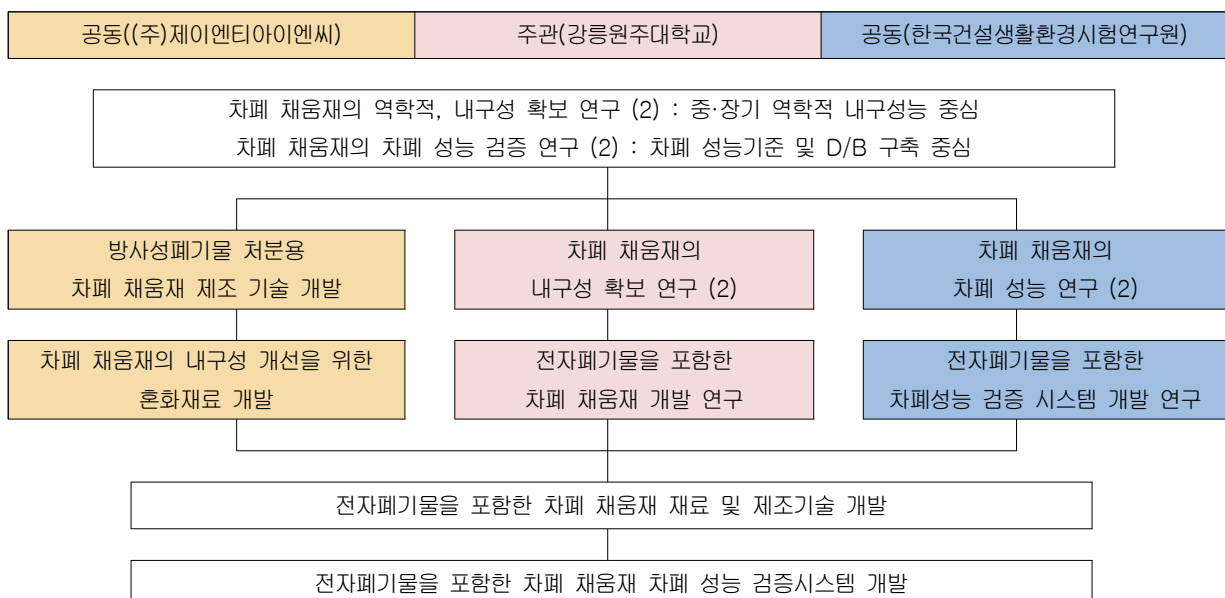
- 공동연구기관 1 ((주)제이엔티아이엔씨):

- 기존 채움재의 사용되는 기초 재료 조사
- 방사성폐기물 차폐 채움재 적용을 위한
- 고밀도 전자폐기물의 혼입형태 결정
- 밀도상승 및 혼화재료에 따른 시공성 확보
- 고밀도 전자폐기물의 혼입률 및 혼입형태에 따른 최적 시공성능 도출
- ASR 저감을 위한 혼화재료 검토
- 건조수축 저감을 위한 혼화재료 검토

- 공동연구기관 2 (한국건설생활환경시험연구원):

- 방사선 및 방사성 물질 차폐성능 검증 실험 방법 조사/연구
- 전자 폐기물의 혼입량에 따른 채움재의 방사성 물질 검출 시험 및 분석
- 방사선 차폐율 검증 방법 조사 및 분석
- 콘크리트 및 모르타르의 차폐율 검증 시험방법(안) 도출
- 차폐채움재 물성별 차폐성능 D/B 구축 및 시험 방법 개선

나. 2차 연도



① 개발 목표

– 주관연구기관(강릉원주대학교):

- 차폐 채움재의 내구성능 확보 (2)
- 차폐 채움재 개발

– 공동연구기관 1 ((주)제이엔티아이엔씨):

- 차폐 채움재 제조 기술 개발
- 차폐 채움재의 내구성 개선을 위한 혼화재료 개발

– 공동연구기관 2 (한국건설생활환경시험연구원)

- 전자폐기물을 포함하는 차폐 채움재의 차폐성능 검증시스템 개발

② 개발 내용 및 범위

– 주관연구기관(강릉원주대학교):

- 차폐 채움재의 장기 거동 실험 및 분석
- 차폐 채움재의 장기 염화물 침투저항성 시험 및 분석
- 차폐 채움재의 수축 특성 시험 및 분석 (건조수축 및 크리프 등)
- 시공성, 경제성을 고려한 최적 배합설계 D/B 구축
- 방사성폐기물 처분장 적용을 위한 차폐 채움재의 역학적·내구적 성능 D/B 제시

– 공동연구기관 1 ((주)제이엔티아이엔씨):

- 시공성, 경제성을 고려한 최적 배합설계 D/B 구축
- ASR 반응저감 혼화재료 개발
- 건조수축 저감 혼화재료 개발

– 공동연구기관 2 (한국건설생활환경시험연구원):

- 일반 콘크리트의 차폐 성능 검증을 위한 시험 방법 정립
 - 차폐 채움재의 물성 및 장기 재령별 차폐 성능 D/B 구축
 - 차폐 채움재의 강도별 최적 차폐율 도출 및 차폐 성능 예측식 개발 연구
 - 방사성폐기물 처분장 적용을 위한 차폐 채움재의 최적 차폐 성능 D/B 제시
-

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 · 외 기술 동향

가. 국내 기술 동향

○ 건설 분야

- 방사성 폐기물 처분용 차폐 채움재에 관한 국내 기술 및 기준은 존재하지 않음. 다만, 콘크리트 표준시방서에는 방사선 차폐 콘크리트에 대한 규정이 존재하나, 방사성 폐기물 처분용이 아닌 원자력 구조물 건설시 요구되는 건설재료에 관한 내용을 다루고 있음. 또한, 표준시방서에서 다루지는 차폐 콘크리트의 기준이 직접적인 차폐 성능에 대한 기준을 제시하는 것이 아니라 단위용적질량의 증가를 도모할 수 있는 중량골재에 대한 가이드라인을 제공하는 수준임.
- 한편, 현재 방사성 폐기물 처분장에서 적용되고 있는 차폐 채움재에 관한 기준배합을 비롯하여 압축강도, 휨강도 등의 역학적 성능은 물론, 내구적, 장·단기 구조적 성능에 대한 기준이 존재해야하나, 현행 방사성폐기물 처분장에서는 초음파펄스를 이용한 압축강도 측정(비파괴시험법)으로만 강도를 측정하여 처분을 실시할 뿐, 그에 관한 규정 역시 존재하지 않아 반영구적인 수명을 요구하는 채움재의 특성에 대한 기준도 불명확한 상황임.
- 그러나, 방사성 폐기물 처리 처분용 폴리머 콘크리트 차폐 재료 개발에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 고밀도 급랭 제강슬래그와 폴리머 결합재를 사용하여 본 연구개발에 비해 사용 재료의 단가가 매우 높고, 특히, 제강슬래그는 방사성 물질을 내포한 후 일정 시간 경과 후 다시 방출하는 ‘방사화’가 진행되는 물질이므로 반영구적인 차폐 채움재에 적용하기엔 다소 문제가 있는 것으로 판단됨.

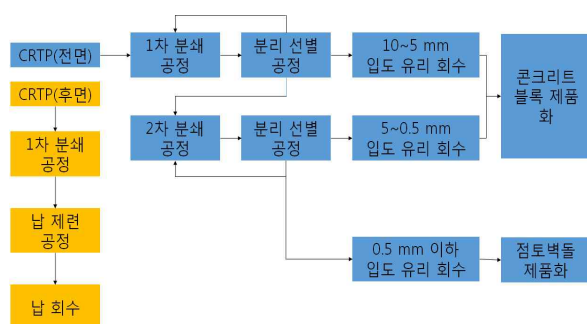
○ 원자력 분야

- 방사성폐기물의 이동을 방지하기 위해 사용되는 채움재의 차폐 성능과 관련한 연구는 미진한 상황이나, 일부 방사선 차폐 물질을 포함하는 방사선 차폐재와 제조에 관한 특허가 존재함.
- 이 연구 개발의 내용은 나노 크기의 방사선 차폐 물질을 고분자 기재 또는 금속기재와 동일한 또는 친화도가 높은 계면 활성제로 표면 처리한 후 상기 고분자 또는 금속 기재와 분말 혼합 또는 용융시켜 혼합한 물질을 차폐재로 개발 한 것임.
- 그러나 이 연구개발의 경우, 나노 크기의 방사선 차폐 물질로 가공하는 공정과 고분자 기재에 균일하게 분산시킨 후 성형하는 과정을 포함하는 전반적으로 긴 소요시간과 복잡한 과정을 포함하고 있음. 또한, 전체 차폐재의 80% 이상이 금속 기재로 구성되어야 하며, 그 미만인 경우, 차폐 성능이 저하되는 것으로 나타남. 또한 여기서 사용되는 금속기재는 주로 보론, 리튬, 카드뮴 등 단가가 높은 자재로써, 여러 가지 측면으로 미루어볼 때, 다량 사용해야하는 차폐 채움재로써는 적합하지 않은 것으로 사료됨.
- 이밖에도, 방사선 차폐 시설 자체의 차폐벽을 설치하여 차폐 성능을 확보하는 기술이 대부분을 차지하고 있으나, 방사성 폐기물 처분에 사용되는 차폐 채움재에 관하여 차폐 성능을 직접적으로 평가하고, 방사성 폐기물의 처리과정 및 차폐에 관한 연구는 거의 진행된 바 없는 것으로 나타남.
- 따라서, 본 기술 개발은 차폐재에 적용하고자 하는 부분과 기존 개발된 부분에서는 본 기술개발에서 얻어진 연구결과와는 상이할 것으로 판단 됨.

○ 환경 분야(전자폐기물 재활용 분야)

- 전자폐기물과 관련한 연구는 브라운관에 포함된 전면부 유리를 이용하여 친환경 보도블럭과 점토 벽돌로 재활용한 사례가 있으나, 본 연구 개발에서 사용하고자 하는 재료와는 중금속 함유 여부에 따른 큰 차이가 존재함. 또한, 일부 연구 사례들 중에서 고밀도 전자폐기물에 포함된 유가 금속을 회수하기 위한 연구가 진행된 바 있으나, 고밀도 전자폐기물에 포함된 중금속의 종류가 다양한 점, 오랜 기간 동안 용융 후 재제조의 반복된 과정으로 인해 다양한 불순물의 유입으로 인해 중금속의 순도가 낮아 활용도가 낮은 단점이 보고된 바 있음.

- 중금속 용출 공정 등은 고밀도 전자폐기물의 처리과정에서 기술적인 특수성을 가지나, 그 특수성으로 인한 처리 비용 상승의 문제점 역시 내포하고 있음.



▲주요 시스템

<그림 2.1> 유사과제의 고밀도 전자폐기물의 처리공정도

<그림 2.2> 유사과제의 고밀도 전자폐기물의 처리설비 및 공장

나. 국외 기술 동향

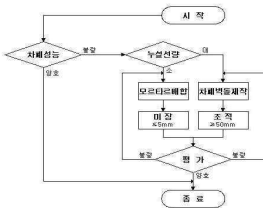
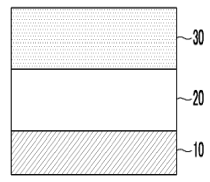
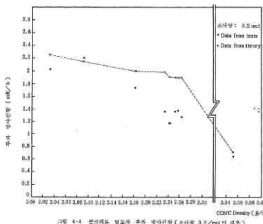
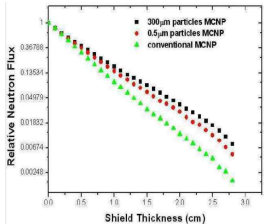
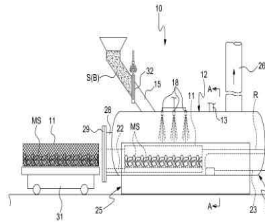
- 우리나라에 비해 에너지원이 많은 선진국의 경우, 대부분 석유를 이용하여 에너지를 공급하기 때문에 원자력 발전소 건설을 비롯하여 방사선 사용을 지양하는 경향이 있음. 따라서, 방사성 폐기물과 관련된 연구는 크게 진행되지 않거나, 국가 안전을 위해 원자력과 관련된 연구에 대하여 대외적으로 공개하지 않는 경향이 있음. 전자폐기물 연구 사례에 대하여 검토한 결과는 다음과 같음.
- 앞서 밝힌 바와 같이, 전 세계적으로 전자폐기물을 비롯하여 폐기물 자체를 재활용하고자 하는 연구는 꾸준히 진행되고 있음. 특히, 폐기물에 포함된 유리는 안정화된 상태로 장시간 보존 가능하기 때문에 국가차원 및 민간 기업에서도 적극적인 재활용을 추진하고 있음.
- 그러나 본 기술개발에서 사용할 전자폐기물처럼 중금속을 함유한 폐유리가 아닌, 일반 판유리, 병유리 등 일상생활에서 발생하는 폐유리에 관한 연구가 진행되어 건설재료로 적용되고 있음.
- 그 중, 미국의 경우, ReTAP(Recycling Technology Assistance Partnership)에서는 생활 폐기물에서 발생한 병 유리를 아스팔트나 콘크리트의 골재로 활용하여 Glassphalt로의 응용, 건축용 골재로의 활용, 보도 포장 벽돌로의 응용분야에 대한 연구를 진행하고 있음. 또한, 병유리를 건설재료로 개발하거나 타일을 비롯하여 친환경적인 방향으로 접근하고 있으며, 병 유리 뿐만 아니라 페타이어 등을 비롯한 폐기물을 복합적으로 사용할 수 있는 연구를 진행한 바 있음.
- 그 밖에도, 중금속을 함유한 전자폐기물에 대한 건설 재료 적용 사례는 중금속을 전량 용출 시킨 후 보도블럭으로 적용한 사례와 중금속 용출 후 건설 재료로의 적용을 위해 별도의 공정을 추가하여 입도를 조절하여 사용하는 사례가 발표된 바 있음.

다. 국내·외 기술 특허 동향

○ 국내·외 관련 기술 특허 동향

- 차폐 채움재와 관련한 국내외 기술 및 특허 동향을 분석한 결과, 우선적으로 차폐 채움재에 관한 기술에 대한 연구 사례가 희박하였음. 특히 전자폐기물을 방사성폐기물 처분을 위해 사용되는 차폐 채움재의 중점적인 원료로 사용하고자 함으로 기술적 혁신성을 확보한 것으로 판단됨.
- 그러나 기존에 방사선 차폐재에 관한 국내외 기술은 일부 존재하는 것으로 나타났으며, 각 기술 및 특허에 대한 장·단점을 분석하여 기존 기술들에서 확보하지 못한 경제성, 독창성 및 우수한 내구성능 및 차폐 성능을 강화하고자 함.
- 국내·외 관련 기술 및 핵심 특허를 다음의 <표 2.1>~<표 2.2>에 나타내었음.

<표 2.1> 국내 유사 특허기술 분석

구 분	국내 유사 특허기술					
기술명	저에너지의 방사선 차폐를 수단으로 하는 차폐성능 보강방법	방사선 차폐용 코팅구조	방사능 차폐제	방사선 차폐 콘크리트 조성물	나노 크기의 방사선 차폐물질을 포함하는 방사선 차폐재 및 이의 제조방법	차폐재료, 그 제조방법 및 방사선 차폐조
특허번호 (등록일)	10-2004-0087695 (2004.10.30)	10-2012-0157606 (2012.02.18)	10-2015-0137252 (2015.09.30.)	10-2014-0172888 (2014.12.04)	10-2012-0124689 (2012.11.06)	10-2013-0100830 (2013.08.26)
출원인	박영웅	김진홍, 이경환	김동웅, 소홍섭	이주호, 장성훈	한국원자력연구원	유철성, 켄자부로하야시
기술개요	‘원자력이용시설’내부의 차폐벽에 대한 차폐성능 보완에 관한 것으로, 중정석을 이용 하여 미장 및 조적 등의 방식으로 차폐벽의 차폐성능을 보완	사용후핵연료의 보관 및 이송용기의 내부에 사용될 수 있는 방사선 차폐용 코팅구조 기술	의료용 방사선 또는 원자력 설비의 방사능 폐기물의 운반용 차폐체로 황토와 맥반석, 탄소섬유 및 옷칠을 이용하여 제조	방사선 차폐 콘크리트 조성물에 관한 것으로서 제강슬래그를 사용하여 감마선 및 중성자선을 차단하기 위한 기능성 콘크리트 조성물	10~900nm의 나노 크기로 분쇄된 1.0~20.0(%)의 방사선차폐물질을 80.0~99.0(%)의 고분자 또는 금속 기재에 분산시킨 방사선 차폐재 및 제조방법	단열기능, 내화기능 및 방사선 차폐기능 등을 가지는 차폐재료, 그 제조방법 및 방사선 차폐조
장점	밀도가 높은 재료를 사용하고 미장 및 조적 등을 이용하여 적용	중금속 및 탄소강의 사용후 핵연료의 보관 용기의 두께 및 중량 감소 가능, 부식에 대한 저항성 향상	다층구조를 만들어 표피층을 탄소 섬유층으로 형성해 옷도막을 형성하는 방식으로 차폐재를 구성	일반 콘크리트와 동일한 차폐효과를 유지하면서도 차폐벽 두께감소 가능	기공의 존재로 인한 흡수효과의 저하 및 차폐재의 물성 저하를 방지	우수한 단열기능, 내화기능 및 방사선 차폐기능 등을 포함
단점	국내에서 생산이 용이하지 않은 중정석 사용으로 인한 제품 생산 비용 증가	다양한 종류의 중금속을 전처리없이 사용하므로 중금속 용출가능성 증가	황토, 맥반석, 탄소섬유, 옷칠등 복잡한 공정과정으로 인한 적용성 저하	차폐제의 핵심 재료인 제강슬래그는 방사성물질을 다시 방출하는 ‘방사성’을 지니고 있어 안전하지못함.	80%미만의 금속기재 사용시 차폐 성능 저하	차폐를 위해 적용하는 차폐재료의 다양성 및 원료 비용으로 인한 제품 생산비용 증가
개요도						

<표 2.2> 국외 유사 특허기술 분석

구 분	국외 유사 특허기술				
기술명	방사선 차폐 구조물	방사선 차폐 재료	캐스크, 중성자 차폐체용 조성물 및 중성자 차폐체 제조법	시멘트 조성물, 경화체, 콘크리트 캐스크, 및 경화체의 제조방법	콘크리트 캐스크 및 그 제조방법
특허번호 (등록일)	10-2014-7011477 (2014.04.28.)	03080232 (1991.04.12.)	10-2004-7019785 (2004.12.04.)	10-2003-0049220 (2003.07.18.)	10-2004-0006268 (2004.01.30.)
국 적	미국	일본	일본	일본	일본
출원인/출 원기관	Crucible Intellectual Property LLC.	NIPPON TUNGSTEN CO., LTD.	MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.	1.KOBE STEEL, LTD. 2.TAISEI CORPORATION	1.KOBE STEEL, LTD. 2.TAISEI CORPORATION
기술개요	벌크 응고형 비정질 합금을 포함하는 방사선 차폐 구조물 및 구성요소를 니어-네트 형상의 형태로 제조하는 방법이 제공	텅스텐이 가지고 있는 차폐 특성을 활용하여 방사선 차폐 성능을 확보한 차폐 재료임.	중성자 차폐체용 조성물에 관한 것으로, 사용 종료 연료의 저장·운반용 캐스크	사용후 핵연료 등의 방사성 물질을 수송하거나 보관하기 위한 콘크리트 캐스크	방사선의 유출의 억제 효과가 높고, 제조가 용이한 콘크리트 캐스트를 제공하는 것
장점	저에너지 및 고에너지에 관계 없이 모든 방사선의 차폐가 가능	5μm 이하의 입자를 갖는 미분말 상태의 텅스텐 자체의 특성을 이용하여 방사선 차폐 성능을 확보	중성자 및 감마선을 효과적으로 차폐하여 내화성이 우수한 중성자 차폐체 조성물을 제공	방사능 저장이 가능하고 높은 안전성을 얻는 동시에, 단순하고 비용이 저렴한 캐스크를 제공함	상기 전열 핀이 개구부를 가지고 있기 때문에 상기 개구부를 통해서 콘크리트가 유통되기 쉬움.
단점	벌크 응고형 비정질 합금을 제작하기 용이하지 않으며, 의료용 방사성에만 적합한 차폐 구조물임.	텅스텐을 적용하기 위해 소결 후 응결과정 및 미분말 상태로 생산하는 공정이 포함되어 생산비용이 증가	파이프, 판상부재, 바스켓, 외통, 고분자 물질의 생산방식이 복잡하고, 밀도 증가제, 차폐재료, 내화재 등의 추가적인 재료 사용에 의한 비용 상승	캐스크에 부식이 발생할 경우, 차폐 성능 저하를 유발하므로 캐스크의 부식을 방지해야함.	콘크리트 캐스크에 포함된 개구부로 인해서 방사성 물질의 누출이 용이함
개요도					

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 고밀도 전자폐기물을 포함한 차폐 채움재의 기초재료 개발

가. 차폐 채움재의 기초물성 조사

- 현재 중·저준위 방사성폐기물은 과거에도 발생한 양이 많아 현재에도 처분 작업이 진행될 예정이고, 추후 발생될 방사성 폐기물의 처분을 위해서라도 다양한 연구가 진행되고 있음. 따라서 차폐 채움재에서 요구되는 기초 물성에 대한 분석이 반드시 수반되어야 하며, 본 연구에서는 우선적으로 차폐 채움재에서 요구되는 기초 물성을 조사하고, 그 연구사례를 검토하고자 하였음.
- 특히, 차폐 채움재는 방사성폐기물이 처분될 방사성폐기물 처분장에서 안전한 격리 성능을 지니도록 일정한 요건 및 기술 수준을 갖추어야 하며, 이에 대한 평가가 수반되어야 함. 특히, 방사성 폐기물을 1차적으로 격리하는 역할을 하는 차폐 채움재의 경우, 처분장의 방사학적 안전성과 구조적 안전성을 위하여 차폐 채움재의 물리·화학적 특성과 차폐 채움재의 방사성핵종의 핵종별 농도가 규명되어 방사성물질이 외부로 누출되는 것을 방지해야 함.

○ 물리적 특성

- 차폐 채움재의 물리적인 특성 중 처분과 관련된 주요 특성으로 균일성, 다공성, 구조변형, 유리수 및 수분 함량이 있음. 균일성, 다공성 및 구조변형은 기계적 특성에 영향을 미치는 요인이며, 밀도는 해양 처분의 방식을 적용하는 경우에 특히 중요 평가 대상이 되는 반면, 육지 처분을 실시하는 우리나라의 경우에는 처분에 사용되는 격납용기의 균일도를 확인하는 정도 수준임.
- 차폐 채움재 내의 수분특성으로는 유리수가 중요하며, 방사성폐기물과 함께 타설되는 차폐 채움재에 존재하는 잉여수가 추후에 폐기물 드럼에 부식 및 방사성 물질의 누출에 영향을 미칠 수 있으므로 장기 보관의 안전성 확보를 위해서는 잉여수가 발생하지 않을 수준이거나 부식에 영향을 미치는 pH를 고려하여 차폐 채움재의 배합을 결정해야 함.
- 그러나, 국내 폐기물 관리 기준에서 명시하는 차폐 채움재의 유리수에 관한 규정은 미비한 반면, 미국과 프랑스 등지에서는 차폐 채움재의 유리수 평가 방법 및 그 기준을 제시하고 있음. 실제로 폐기되는 방사성폐기물 드럼에 폐기물 드럼을 제외한 고화체(방사성폐기물+차폐 채움재)의 채취를 통하여 유리수의 pH를 측정하거나, 프랑스의 경우에는 0.35 MPa에 응력을 가하여 유리수의 침출 여부를 평가함.

○ 역학적 특성

- 차폐 채움재에서 평가되어야 할 역학적 특성으로는 압축강도, 인장강도, 충격강도, 내구성, 지속하중에 의한 내하중성 등이 있음. 이중 압축강도는 차폐 채움재의 구조적 안전성을 평가할 수 있으므로, 차폐 채움재의 압축강도 평가가 반드시 수반되어야 함. 특히, 측정의 용이성, 각종 시험영향을 평가하기 위한 응용성 및 측정 결과의 신뢰성 확보를 위하여 세계 각국에서 적용하고 있음.
- 그러나 세계 각국마다 그 적용 기준이 상이하며, 우리나라의 경우에는 봉산을 함유한 액체 방사성 폐기물의 처분 조건을 고려하였을 때 차폐 채움재의 압축강도는 15 MPa 이상 확보해야하나, 고체 방사성폐기물을 처분하기 위해 사용되는 차폐 채움재는 균열 발생 한계치인 5 MPa 수준을 압축강도의 기준치로 추천하고 있음. 그러나 미국의 경우에는 3.4 MPa, 스웨덴 4.9 MPa, 독일 10 MPa, 프랑스는 가장 높은 30 MPa로 규정하고 있음.

○ 열전도 및 온도 특성

- 방사성폐기물이 처분되는 처분장의 기후 및 온도의 조건에서 차폐 채움재의 안전성 확보를 위하여 열전도 및 온도 특성 평가가 필요함. 따라서 열전도 및 온도 변화에 의해 예상되는 사고를 가정한 조건이나, 기후 변화를 가정한 시험조건에 실험을 실시하여 구조적인 변화가 없거나 시험을 실시한 이후에도 차폐 채움재의 특성이 일정 기준 이상을 확보해야 함.

- 따라서 차폐 채움재의 열전도 및 온도 변화에 반복적으로 노출될 경우에 대한 성능 평가가 필요하지만, 이에 대한 명확한 기준은 미비한 상황임. 일부 시멘트 계열의 차폐 채움재를 적용하는 경우에는 KS F 2456에 제시된 동결융해 평가방법을 통해 반복적인 동결, 융해를 적용하여 평가하기도 함.

○ 내구성

- 방사성폐기물의 영구처분이 실시되는 처분장 주변 환경 조건에 의해서 예상되는 처분장 인근 지역의 수질, 토양 등과의 접촉으로 인한 반응성, 안전성 저하와 기체 또는 흡착화합물의 발생, 부식성 등에 영향을 받지 않도록 차폐 채움재는 일정 수준 이상의 내구성을 확보해야 함.
- 특히, 처분장으로 유입될 수 있는 지하수 등은 차폐 채움재의 핵종 누출에 영향을 끼치게 되므로 지하수나 염해에 접촉 될 경우에 대하여 침출 특성과 침수안전성으로 나누어 평가해야 함.
- 침출특성은 차폐 채움재 내의 핵종이 물로 확산되는 핵종의 이동특성을 말하며, 침출 실험은 1972년 IAEA에서 방사성 성분의 물에 의한 침출율을 측정하는 표준법을 제안한 이래, 많은 시험법이 제안되고 있는 상황임. IAEA에서 제안하는 시험법뿐만 아니라 프랑스에서 적용하고 있는 ISO 6961과 미국에서 적용하고 있는 ANS 16.1 있음.
- 침수안전성은 차폐 채움재에 흡수된 물에 의해 일어나는 차폐 채움재 자체의 구조적인 변형력에 대한 저항성을 말함. 그 중 침수안전성에 대한 평가는, 액체 폐기물의 처분을 실시할 때 평가해야 함.

○ 내방사성

- 차폐 채움재는 처분장에서 관리하는 기간 동안 자체조사되는 누적피폭선량에 대해서도 안전성을 확보해야 함. 방사선 조사를 받는 동안 예상되는 변화는 팽윤, 기체 발생, 함유된 휘발성 성분의 발산으로 인한 부피팽창, 차폐 채움재의 체적변화를 예로 들 수 있음. 봉소를 이용하여 제작된 차폐 채움재의 경우, 방사선 조사에 의한 변화가 거의 없는 것으로 밝혀졌으나, 액체 폐기물의 처분에 이용하는 경우, 평가가 수반되어야 함.
- 외국의 경우에는 Co-60 선원을 이용하여 누적 피폭선량에 해당하는 $1 \times 10^6 \text{Gy}$ 의 감마선을 조사시키면서 팽윤 및 기체 발생량과 압축강도를 측정하고 있음. 흡수선량을 실험을 실시할 때, 시편은 과열되어 녹지 않을 정도 혹은 80°C 미만의 온도를 유지하여 실험을 실시하고 있음. 흡수선량 한계 기준은 프랑스는 $1 \times 10^6 \text{ Gy/h}$ 이나, 우리나라와 미국에 대한 기준은 아직 없음.

○ 생물학적 특성

- 방사성폐기물의 처분기간이 영구적인 것을 감안할 때, 처분장 인근지역에 생물체나 처분장에 유입되는 생물체에 의해 차폐 채움재의 성능 저하를 유발할 가능성이 있으며, 특히 차폐 채움재의 형태가 유기물을 사용하게 되는 경우, 이를 반드시 고려해야함. 주로 미생물에 의해 이루어지며, 그 영향으로 물리적인 파괴 또는 방사성 핵종의 유동성 증가 유도, 미생물 분해에 의한 기체 발생 등이 있으며, 이로 인한 핵종 누출의 가능성이 증가하고, 발생기체로 인한 처분장 안전성 저하 및 처분장의 환경 변화를 유발함.
- 처분장 주위 환경에서 자생하거나 유입될 수 있는 미생물, 곰팡이류, 박테리아 등에 대한 안전성 실험을 평가해야 함.

나. 원자력 콘크리트 및 차폐용 콘크리트의 역학적 성능 개선 연구 사례 조사/분석

(1) 중량 콘크리트의 역학적 성능 개선 사례

○ 일반사항

- 현재 국내외에서 적용되고 있는 원전구조물은 원전구조물의 특수성 및 보안성을 이유로, 원전구조물에 관한 연구가 진행되어도 보안과제로 등록되어 일부공개만 허용하고 있어 그 접근이 쉽지 않은 단점이 있음. 그러나 원전 및 차폐용 콘크리트의 역학적 성능 개선에 관한 일부 연구 사례가 존재하며, 그 연구 논문을 정리하면 다음 <표 3.1>과 같음.

- 일반적으로 원전 구조물이나 차폐를 위해 사용되는 콘크리트는 중량콘크리트로서 밀도가 높은 재료를 채택하고 있고, 밀도 개선을 위하여 굵은 골재의 밀도가 높은 중량 골재를 사용하는 특성이 있음.
- 중량 골재를 사용한 콘크리트의 역학적 성능 개선을 위한 연구 결과는 <표 3.1>과 같으며, 대부분 중량 골재 사용에 의해 단위용적질량, 압축강도, 휨강도 및 탄성계수가 개선 가능한 것으로 나타남.
- 그러나 본 연구의 목적은 고밀도 전자폐기물을 함유한 차폐 채움재 개발이므로, 폐유리를 건설분야에서 적용한 사례에 관한 추가적인 연구자료 분석이 필요한 것으로 판단 됨. 따라서 폐유리를 사용한 콘크리트에 관한 연구사례를 추가적으로 분석함.

<표 3.1> 원전 및 차폐용 콘크리트의 역학적 성능 개선 연구 사례

논문제목	저자 (발행지)	논문요약
원전용 중량콘크리트의 배합설계 및 역학적 특성	양근혁,문주현 (건축시공학회, 12(3), 2012)	▪ 원전용 중량콘크리트는 ACI 304R-06의 기준에서 제시하는 방법을 이용하여 설계 가능하며, 비중 증가로 인한 성형성 및 유동성 저하를 고려하고 있음. ▪ 수화열제어와 내구성 확보를 위해 플라이애쉬를 함께 사용하게 되면, 혼화재의 적정혼입비율이 존재함. ▪ ACI 349-06, CEB-FIP 예측모델은 중량콘크리트의 역학적 특성을 안전측에서 평가하고 있지만, 파괴계수에 대한 별도의 평가가 필요함.
중량 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 대한 물-결합재비와 플라이애쉬 치환율의 영향	문재성 외 2인, (대한건축학회, 28(8), (2012) 129-136)	▪ 중량골재를 사용하게 되면, 유동성, 압축강도 발현이 골재특성에 영향을 받으나, 압축강도는 일반골재를 사용한 경우와 마찬가지로 물-결합재비 증감에 따른 압축강도 경향은 일정함. ▪ 중량골재 사용에 의해 탄성계수 증가율에 대한 기존 예측모델 식을 적용하기엔 다소 무리가 있으므로, 탄성계수 증가율에 대한 보정이 요구됨.
Evaluation of physical and mechanical characteristics of siderite concrete to be used as heavy-weight concrete	Yüksel Esen, Zülfü Murat Dogan (Cement and Concrete Composites, 82, (2017) 117-127)	▪ 중량골재의 대체율이 증가함에 따라 압축강도, 인장강도 및 단위용적질량이 증가하는 것으로 나타남. ▪ X-ray를 이용하여 방사성 차폐 성능에 대한 평가를 진행한 결과, 일반골재를 사용할 때에 비해 70% 수준의 방사선 흡수율이 향상되는 것으로 나타남.
Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study	Ashish Kumer Saha, Prabir Kumar Sarker (Journal of Cleaner Production 162 (2017) 438-448)	▪ 니켈 생산에 의해 발생하는 페로니켈 슬래그를 잔골재로 치환하여 제작한 콘크리트의 시공성, 압축강도, 쪼갬 인장강도, 탄성계수 및 화학적 용출 특성을 평가한 결과, 페로니켈 슬래그 잔골재를 적용하면 압축강도 개선이 가능한 것으로 나타났으며, 쪼갬 인장강도, 휨강도 및 탄성계수 역시 모두 개선 가능한 것으로 나타남.

(2) 일반골재를 사용하여 역학적 특성을 개선한 콘크리트에 관한 연구

- 중량골재의 수급 안전성 및 비용절감을 위하여 일반 골재를 사용하여 역학적 성능에 관한 연구사례가 있음. 원전구조물에서 안전성 확보 및 역학적 성능을 개선하기 위하여 고성능 거동을 위한 최적 배합설계에 관한 연구가 진행된 바 있으며, 그 배합표는 <표 3.2>와 같음.
- 특히, 원전구조물에서는 일반적으로 중량골재를 사용하고 있으나, 기존재료를 사용해도 8,000 psi ~10,000 psi (56 MPa~ 70 MPa)급의 고성능 콘크리트를 개발한다면, 중량콘크리트 사용에 의한 비용절감이 가능할 것으로 보임.

- 고성능 원자력 구조물 개발을 위한 콘크리트 배합을 검토한 내용을 살펴보면, <표 3.2>와 같은 배합 조건에 대하여 배합을 실시한 후, 재령 증가에 따른 압축강도 및 탄성계수 평가를 진행하였음.
- 평가 결과에 따르면, 기존 재료를 사용하여도 8,000 psi 급 이상의 압축강도를 갖는 콘크리트를 개발할 수 있지만, 본 연구에서 사용되고 있는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 등 혼화재료의 강도 발현 특성을 함께 검토해야 하는 것으로 나타남.

<표 3.2> 콘크리트 배합표

Type	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					
		Water	Cement	Aggregate		FA	BFS
				Fine	Coarse		
35OPC	35	155	443	734	971	-	-
35FA20		155	354	720	952	89	-
35BFS50		155	221	700	926	-	221
35TB		155	221	699	925	89	133
40OPC	40	155	388	754	997	-	-
40FA20		155	310	741	980	78	-
40BFS50		155	194	724	958	-	194
40TB		155	194	723	957	78	116
45OPC	45	155	344	769	1018	-	-

(3) 폐유리를 적용한 콘크리트의 역학적 성능에 관한 연구

- <표 3.3>에는 폐유리를 잔골재 및 시멘트로 대체 혼입한 콘크리트 및 모르타르, 페이스트에 관한 연구 사례를 정리하여 나타내었음.
- 일반적으로 폐유리를 잔골재로 대체하여 적용하면 압축강도가 감소하고 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창이 우려되므로, 추가적인 압축강도 증진방안에 관한 연구가 필요한 것으로 판단됨.

<표 3.3> 폐유리를 잔골재로 적용한 콘크리트에 관한 연구 사례

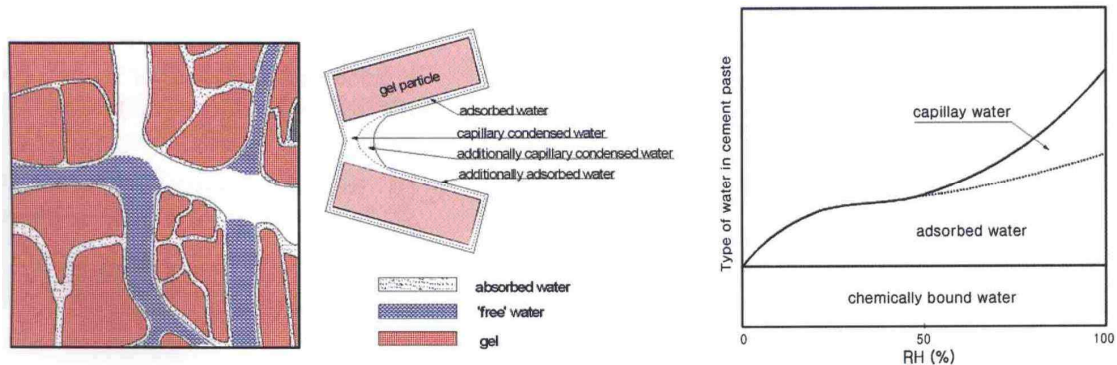
논문제목	저자 (발행지)	논문요약
Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks	G. Lee et al., (Construction and Building Materials, 25(5), (2011), 2611-2618	▪ 폐유리 잔골재의 입도가 작을수록 알칼리-실리카 반응성 팽창 감소 ▪ 폐유리로 인한 공극구조 개선효과 확인
Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars	T. C. Ling et al., (Cement and Concrete Composites, 33, (2011) 848-854	▪ 폐유리 잔골재 혼입시 콘크리트 마모저항성 감소 ▪ 폐유리 잔골재 혼입시 압축 및 휨강도 감소 ▪ 폐유리 잔골재로 인한 황산염 저항성 증가
Properties of concrete containing waste glass	I. B. Topc, M. Canbaz (Cement and Concrete Research, 34(2), (2003) 267-274	▪ 폐유리 굵은 골재 대체시 콘크리트 단위중량 감소 ▪ 폐유리 골재 혼입에 따른 공기량 및 슬럼프 감소 ▪ 폐유리 골재와 페이스트간의 접착력 감소로 인한 강도 감소
Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete	Z. Z. Ismail, E. AL-Hsshmi (Waste Management, 29(2), (2008), 655-659.	▪ 폐유리 잔골재 혼입시 재령 14일 이후 강도발현

다. 차폐 채움재 성능개선 혼화재료 개발

(1) 수축저감제

○ 콘크리트 건조수축에 의한 체적변화 개요

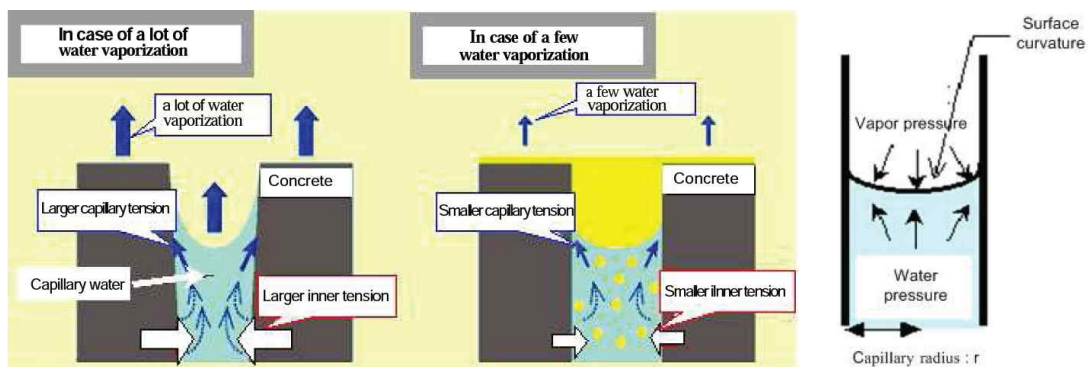
- 수화과정에서 콘크리트의 공극구조는 겔공극(gel pore)과 수십 Å에서 수십 μm 의 다양한 크기를 가지는 모세관공극(capillary pore)으로 나눌 수 있고, 겔공극 내의 물리적 결합수는 그 결합력이 강하여 일반적인 대기습도상태에서 이동하지 않음. 따라서 건조와 관련되는 수분은 모세관 공극내의 수분임 <그림 3.1>, 건조수축은 시멘트 수화물의 화학, 광물적 성질의 변화에 의한 원인이 아니라 수분증발에 따른 물리적인 거동으로 건조수축 기구는 모세관 장력기구, 표면장력기구로 분류됨.



<그림 3.1> 콘크리트 미세공극 조직내의 수분 분포상태

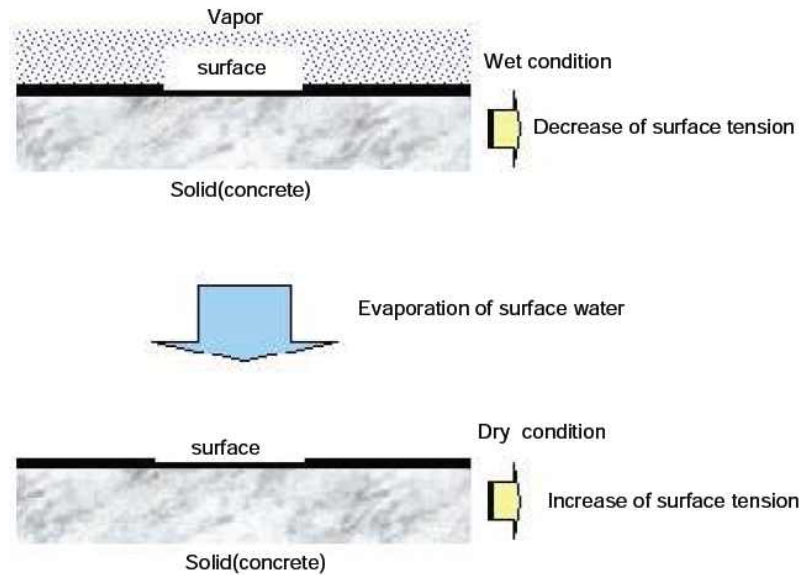
① 모세관 장력기구

- 모세관 장력은 건조에 따른 메카니즘의 형성에 의해 모세관수 중에 인장응력이 발생하며, 이것이 경화체에 탄성적인 체적감소를 발생시킴. 이러한 기구는 가역적이며, 고습도의 조건에서 작용되는 것으로 알려지고 있다. <그림 3.2>에서 보는 바와 같이 상대습도가 작을수록(수분증발량이 클수록) 모세관장력(Δp)이 커지게 되어 그의 인장력에 의해 콘크리트 조직을 인장시켜 수축이 발생되게 된다.



<그림 3.2> 공극수 증발에 의한 모세관 및 내부 장력의 변화

- 표면 에너지 이론은 고체 표면에 기체와 증기가 흡착되면 표면장력이 감소되고 반대로 건조되면 고체의 표면장력이 증가되어 시멘트의 겔입자가 압축된다. 표면 에너지 이론은 <그림 3.3>처럼 고체 표면이 습윤하게 되면 표면장력이 감소하게 되고, 반대로 건조되면 고체의 표면장력이 증가됨으로서 변형이 발생됨. 표면 장력은 단위 면적당 일어나는 것으로, 단위 면적당 표면을 최소화 하는 작용으로 건조에 의해 작용이 크게 되는 것임. 성질은 일반적으로 표면을 최소화 하려고 하는 것으로 이것이 표면장력이 됨.



<그림 3.3> 표면수 증발에 따른 표면장력 증가 개념도

○ 수축저감제 작용 메커니즘 주요성분

- 모세관 장력은 표면장력과 액면의 곡률반경의 상관수치로서 나타낼 수 있으며, 건조에 의해 수분이 증발하게 되면 곡률반경은 작게 되고, 모세관 장력이 크게 되어 수축이 발생함.

$$\Delta p = \gamma [1/\gamma_1 + 1/\gamma_2]$$

여기서, Δp : 모세관 장력

γ : 액체의 표면장력

γ_1, γ_2 : 액체의 주 곡률반경(m)

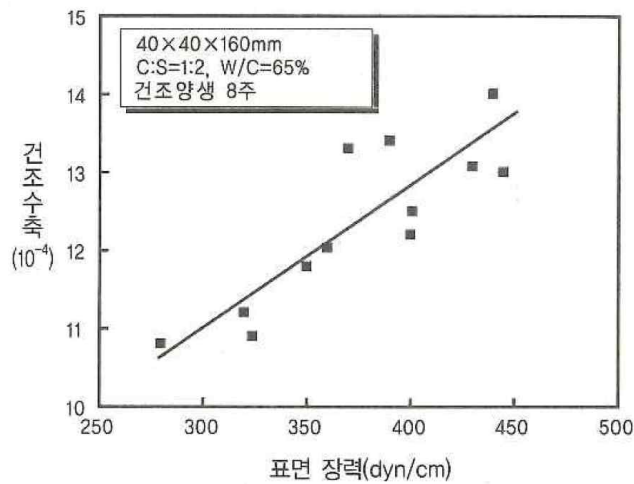
- 수축저감제를 사용하면 물의 표면장력이 낮게 되어 인장응력을 완화 시키는 것으로 건조수축이 감소하게 됨. 수축저감제를 첨가할 경우 모세관수의 표면장력을 30~45 mN/m까지 감소시켜 건조수축을 줄일 수 있다고 보고됨.
- 수축저감제는 자기수축에 있어서도 현저한 저감효과가 있으며, 이 저감율을 표면장력의 저하와 일치되는 것으로 설명됨. 자기수축은 수분의 증발에 기인하는 것이 아니라 시멘트의 수화반응에 의해 수분이 소비되고 콘크리트 내부가 일종의 건조상태로 되면서 콘크리트가 수축하는 현상임. 자기수축의 원인은 자기건조에 의한 메니커스의 형성에 의해 모세관 장력이 발생하기 때문으로 보고되며, 이는 수분의 이동과는 메커니즘이 다르지만 중·고습도 영역에 있는 건조수축의 기구 혹은 모세관 장력기구와 기본적으로 같은 원리임.
- 기존의 보통 콘크리트에서 자기수축은 $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 정도로 실제 무시할 수 있는 값이지만 고강도, 고유동 등 분체량이 많고 물시멘트 비가 작은 모르타르나 콘크리트에서는 자기수축만으로도 균열이 발생할 수 있음.
- 수축저감제의 원료는 일반식이 $R_1(AO)_nR_2$ [R_1, R_2 : 소수기, 알킬기나 페닐기, A: 탄소수 2~3의 alkylene기나 2종류의 서로 다른 alkylene기]로 표현되는 유기화합물이 일반적으로 사용됨. <표 3.4>에 일반적으로 사용되는 수축저감제의 종류 및 특성을 나타냄.

○ 수축저감제 적용 및 특성

- 본 연구에서 적용하고자 하는 채움재는 고유동 등의 성능을 요함에 따라 콘크리트의 자기수축의 영향이 크기 때문에 수축저감대책으로서 수축저감제의 활용이 요구됨. 기존 실험결과에 의하면, 수축저감제의 혼입률이 많을수록 수축저감 효과가 크게 되고, 그 효과는 물/시멘트비에 관계없이 거의 비슷하며 고유동 콘크리트의 자기수축에 대해서도 건조수축의 경우와 동일한 효과가 발휘된다고 알려져 있음.

<표 3.4> 수축저감제의 종류별 특성

Type	색상	비중	점도 (cPs)	pH	표면장력 (dyn/mm)	용해성	사용량
저급알콜알킬렌 옥시드부가물	무색	0.99	16	6±1	419	가용성	5kg/m ³
저급알콜알킬렌 오시드부가물	무색	1.00	20	6	296	가용성	6kg/m ³
폴리에테르계	무색, 담색	1.02	100±20	7±1	395	가용성	C×2~6%
폴리글리콜계	담황색	1.04	50	6±1	335	난용성	C×1~4%



<그림 3.4> 콘크리트 건조수축과 혼합수의 표면장력과의 관계

○ 개발된 수축저감제 적용평가

• 실험방법 및 사용재료

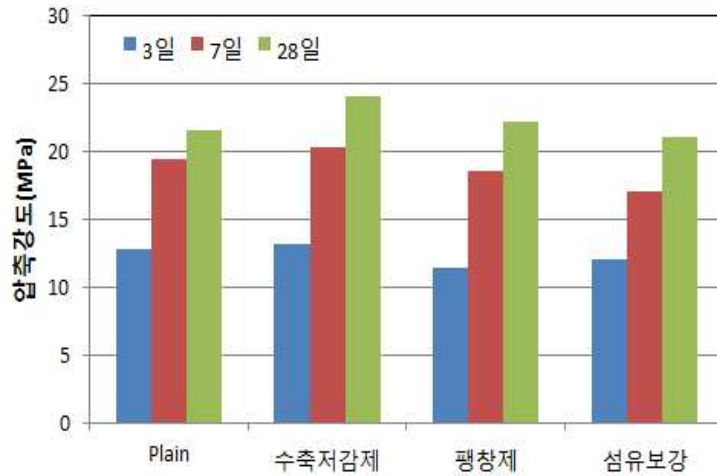
- 수축저감제의 평가를 위해, 개발된 글리콜 계열의 액상 수축저감제와 국내에서 생산되는 팽창제 및 일반적으로 균열저감에 효과가 있다고 보고되는 나일론 섬유를 혼합하여 역학적 특성 및 길이변화율을 평가하였음.
- 시험체는 배합강도 24 MPa의 콘크리트에 수축저감 재료를 혼합하고, $\phi 100 \times 200$ mm의 압축강도 공시체를 제작하여, 3, 7, 28일의 강도를 측정하였고, 수축특성은 $100 \times 100 \times 400$ mm의 휨강도용 시험체를 제작하여 시험체의 길이변화율을 측정하여 평가하였음.

<표 3.5> 개발 수축저감제의 특성

Type	수분함량(%)	밀도 (g/cm ³)	pH	유효성분 (%)
Glycol ether	28.2	0.98	6.5	71.8

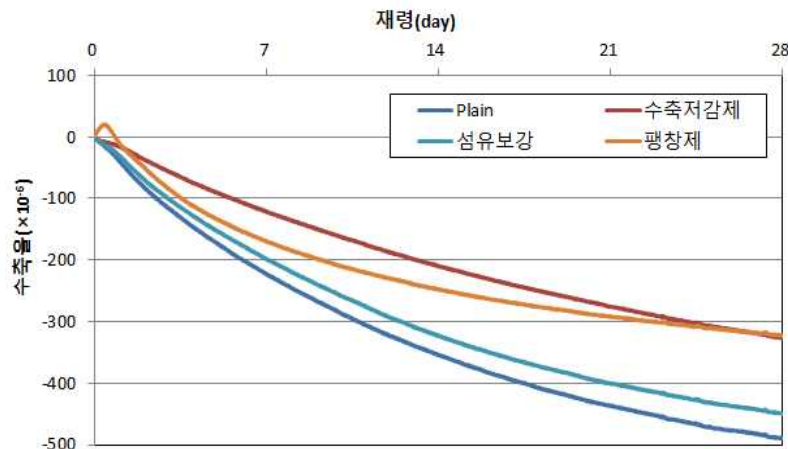
• 결과 및 고찰

- Plain에 비하여 액상형 수축저감제를 제외하고, 기타 배합에서는 강도가 저하되는 것으로 나타났으나 그 영향은 미비하였음. 다만, 액상형 수축저감제 혼입시 28일 강도는 다소 향상되는 경향을 나타내었음.



<그림 3.5> 수축저감재료 혼입조건별 압축강도 결과

- 수축저감재료를 혼입하지 않은 Plain의 경우 가장 큰 수축율을 나타내었으며, 섬유보강을 하였을 경우, 수축율이 미소하지만 보상되는 경향을 나타내었음.
- 28일 재령에서는 액상형 수축저감제와 팽창제 혼입시 가장 우수한 수축저항성을 나타내었지만, 팽창제의 경우 초기재령에서 팽창을 한 뒤 급격한 수축을 하고 28일경에서는 수축률이 수렴되는 경향을 나타내었고, 액상형 수축저감제는 동일한 비율로 계속 수축이 진행되는 경향을 나타내었음.

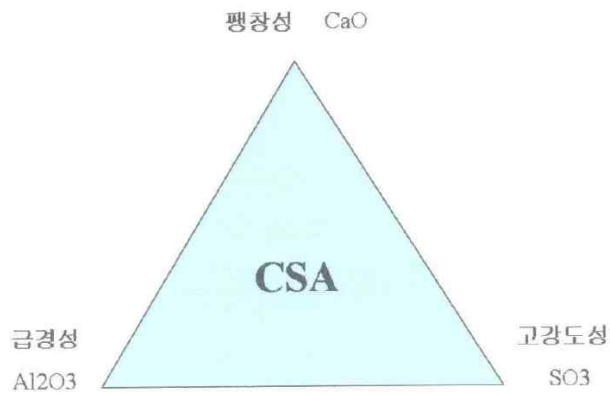


<그림 3.6> 수축저감재료 혼입조건별 길이변화시험 결과

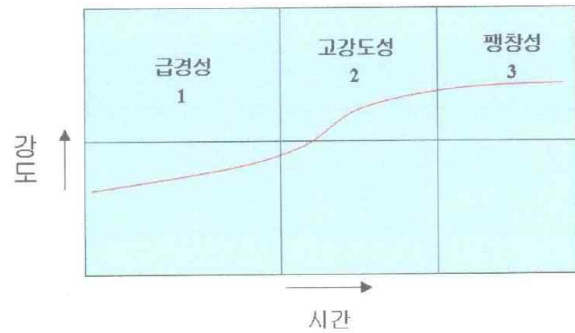
(2) 팽창제

○ CSA계 팽창제 개요

- CSA는 석회, 석고, 보크사이트를 주성분으로 하는 소성화합물(Calcium Sulfo Aluminate)을 적당한 입도분포를 가지도록 분쇄하여 제조한 것이며, 이 클링커의 주요한 광물은 아원($3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$, CaSO_4), 유리석회(CaO), 무수석고(CaSO_4)임.
- CSA는 주요광물이 수화반응에 의해 칼슘설포알루미네이트 수화물을 생성하는데, 이 수화반응에서 Ettringite($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)라는 침상의 결정이 생성됨.
- CSA의 화학조성은 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SO}_3$ 를 주성분으로 하고 있으며 각 조성에 따라 팽창성, 급경성, 고강도성을 나타냄.

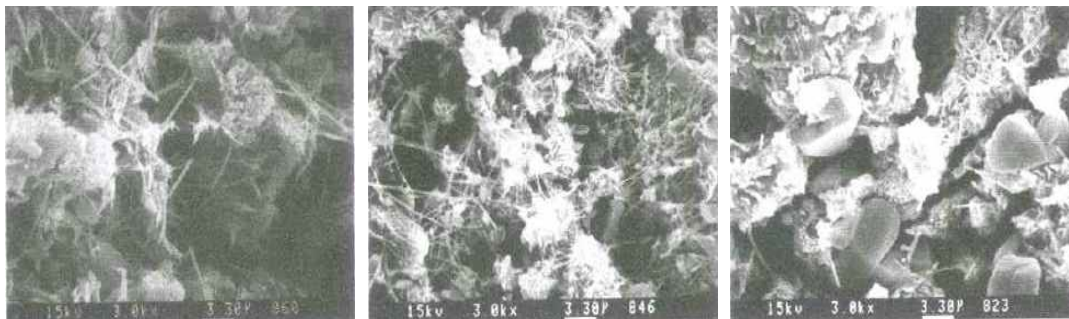


<그림 3.7> CSA의 특성



<그림 3.8> CSA의 응결과정 및 에트린자이트의 생성시기 관계

- CaO성분이 많으면 팽창성이 강해지고, Al_2O_3 의 성분이 많으면 급결성이, SO_3 성분이 높으면 고강도성을 나타냄.
- 시멘트의 응결과정과 에트린자이트의 생성시기의 관계는 <그림 3.8>에 제시하였음. 1기에서 에트린자이트를 생성시켜 급결성을, CSA의 응결경화가 시작되는 시기인 2기에 에트린자이트를 집중적으로 생성시키면 고강도성이 나타나며, 3기에 주로 팽창성이 나타남.



(a) 1기(급결성)

(b) 2기(고강도성)

(c) 3기(팽창성)

<그림 3.9> 에트린자이트 생성시기와 결정형태

- CSA경화체가 아직 형성되지 않은 1기에서는 큰 침상이 형성되어 있고, 이것이 강도발현에 기여하며, 2기에서는 CSA경화체가 형성되어 있는 가운데 공극에 침상의 결정이 성장하여 공극을 감소시키면서 고강도 특성을 나타내며, 3기에서는 경화체 조직이 형성되어 있고 결정성장이 그다지 크지 않아 결정은 작지만 주변의 경화체가 단단하게 되어 에트린자이트의 성장압이 주변의 경화체를 밀어내기 때문에 팽창력을 얻을 수 있음.
- 본 연구에서는 CaO함량을 높은 팽창형 CSA를 적용하여 검토함.

○ 팽창형 CSA의 특성

- 팽창형 CSA는 콘크리트 및 모르타르에 적용시 경화과정에서 미세한 침상 또는 봉상결정의 고황산염 수화물(에트린자이트)이 생성되며, 이 수화물이 팽창력을 발휘하여 경화체의 구조를 치밀하게 해주며, 건조수축 및 경화수축을 최소화 하는 원리임.
- 팽창형 CSA의 주요 구성물질인 C_4A_3S 는 콘크리트 및 모르타르에서 경화시 $CaSO_4$ 및 CaO와의 반응에 의해 미세 침상의 에트린자이트 결정을 생성시켜 팽창작용을 함으로서 건조 및 경화수축을 최소화 할 수 있음.
- CSA계 팽창제는 수화된 시멘트 경화체 중의 시멘트겔 사이의 미세한 공극에 에트린자이트를 생성시킴으로써 콘크리트 조직을 치밀화시켜 콘크리트의 수밀성을 증대시킴. 따라서, 콘크리트의 내구성 향상에 효과적임.

- 본 연구에서 적용한 CSA계 팽창제는 밀도는 2.95 g/cm^3 , 분말도는 $2,950 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 제품을 사용하였으며 화학적 특성은 <표 3.6>에 제시함.

<표 3.6> CSA계 팽창제의 화학적 특성

성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	lg.loss
함량 (%)	1~2	12~14	0.5~1	50~60	1.5이하	1.00이하	15~25	3이하

○ 개발된 팽창제 적용평가

• 실험방법 및 사용재료

- 팽창제 적용평가는 KS F 2562 ‘콘크리트 팽창제 시험방법’의 의해 수행하였으며, 응결, 압축강도 및 길이변화 시험을 모르타르 및 콘크리트에 대하여 수행하였음.

• 결과 및 고찰

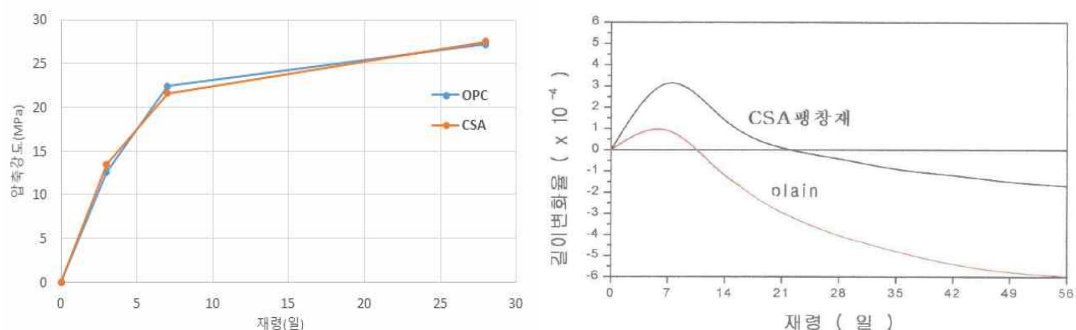
- 모르타르 및 콘크리트에 대한 CSA계 팽창제 적용평가결과는 <표 3.7>~<표 3.8>에 제시함.
- 모르타르의 경우, 응결 및 압축강도 조건에서 모두 KS기준을 충족하는 것으로 나타났으며, 길이변화의 경우에서도 구속조건에서 길이변화량이 기준을 만족하는 것으로 확인됨.
- 콘크리트의 경우, 물리 역학적 특성에서 OPC와 유사한 경향을 나타내었으며, 길이변화 시험 시, 초기팽창으로 인해 재령 28일 이후 수축량이 OPC 대비 개선되는 것으로 확인됨.

<표 3.7> 배합조건별 모르타르 특성 평가 결과

구분		모르타르					
		응결		압축강도(MPa)			길이변화(*10 ⁻⁴)
		초결	종결	3	7	28	1주 4주
KS 기준		1:00 ↑	10:00 ↓	7↑	15 ↑	30 ↑	3 ↑ -2 ↑
OPC		3:45	5:10	20.1	29.6	37.5	0.7 -9.0
CSA	무구속	3:50	4:50	19.5	29.8	37.7	2.5 0.6
	구속	3:50	4:50	19.5	29.8	37.7	7.4 1.7

<표 3.8> 배합조건별 콘크리트 특성 평가 결과

구분		콘크리트					
		슬럼프 (mm)	공기량 (%)	압축강도(MPa)		길이변화(*10 ⁻⁴)	
				7	28	1주	4주
OPC		175	4.6	22.4	27.2	0.75	-3.21
CSA	무구속	180	4.3	21.6	27.5	2.45	0.95
	구속	180	4.3	21.6	27.5	0.85	0.35

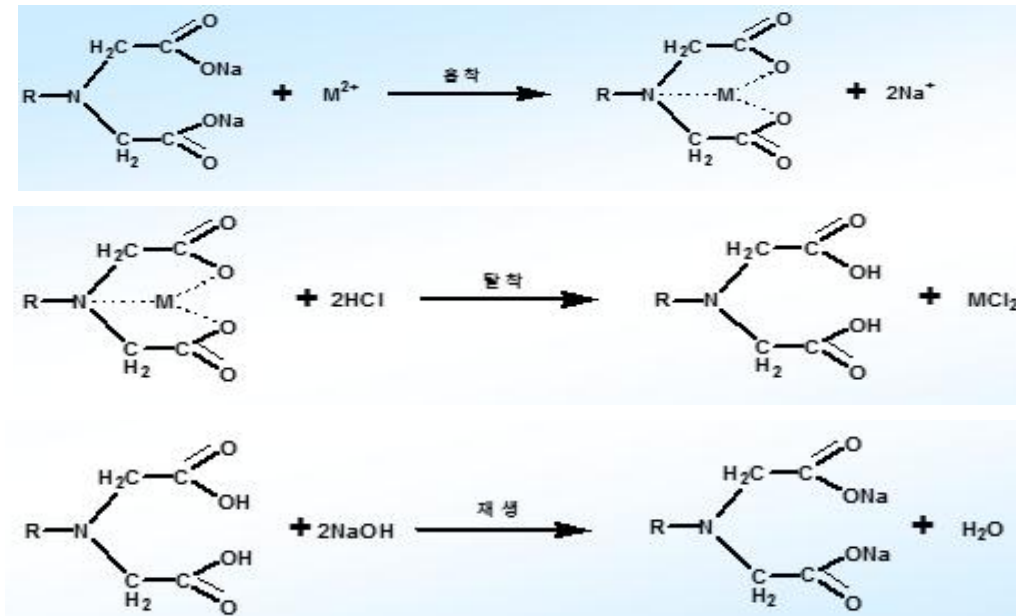


<그림 3.10> 콘크리트 시험결과

(3) 중금속 용출방지 혼화제

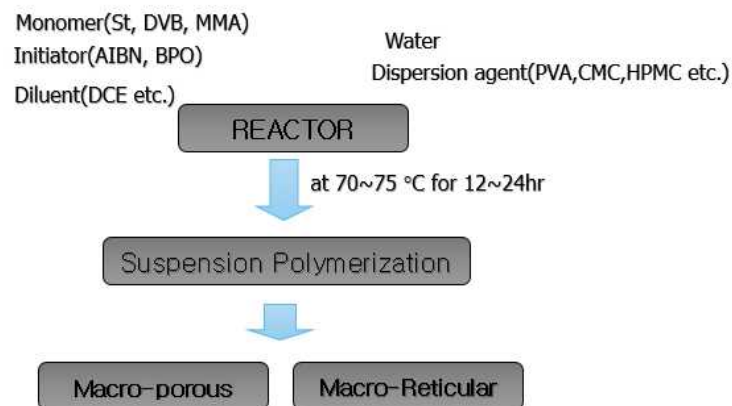
○ 킬레이트 수지 개요

- 킬레이트 수지는 3차원 가교된 고분자기재에 해당 중금속과 배위결합 결합이 가능한 관능기(N, S, O, P)를 결합시킨 것으로, 물리적 형상은 비드 형태로 기공이 미세한 겔형 이외에 세밀한 다공질형 등이 있으며, 반복사용이 가능한 재생능력을 가짐.
- 중금속 이온 흡·탈착 과정 개념

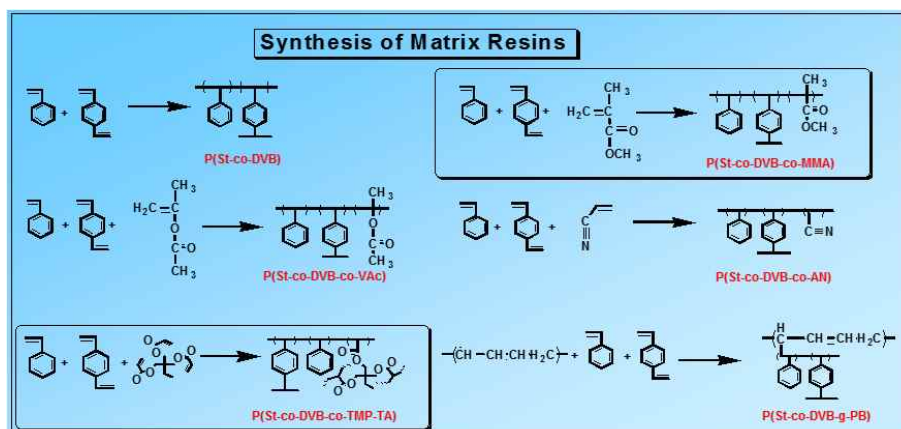


<그림 3.11> Iminodiacetic acid형 수지의 중금속 이온의 흡·탈착 과정

○ 킬레이트 수지 제조



<그림 3.12> 비드형 수지의 합성



<그림 3.13> 킬레이트 매트릭스 수지의 제조

○ 킬레이트 수지를 적용한 페이스트의 중금속 용출시험

- 일반 시멘트 페이스트 및 킬레이트 수지를 적용한 페이스트의 중금속 용출량 시험결과에 다음 <표 3.9>에 제시하였음. 굳지 않은 일반 시멘트 페이스트와 킬레이트수지를 적용한 페이스트에 대하여 수조에 침한 후 재령에 따른 중금속 용출량을 측정하였음. 일반 시멘트의 경우, 수중에서 중금속이 용출되는 반면, 킬레이트 수지를 적용한 페이스트의 경우 중금속이 용출되지 않아 혼화재료로서 사용가능성을 확인하였음.

<표 3.9> 중금속 용출 시험 결과

Type	Cr ⁶⁺ detection (ppm)	
	수중 1일	수중 5일
일반 시멘트 페이스트	8.74	8.80
킬레이트수지 적용 페이스트	불검출	불검출

○ 킬레이트 수지를 적용한 페이스트의 중금속 용출시험

- <표 3.10>와 같이 방사선 차폐 콘크리트 배합을 설계하여, 킬레이트 수지(CR)를 시멘트 중량대비 0.2%를 혼입하였을 경우의 작업성 확인을 위한 슬럼프와 중금속 용출량을 측정하였음.
- 시험체 제작 후, 재령 28일간 양생기간을 거친 뒤 시험체를 분쇄하여 폐기물공정시험방법으로 평가하였음.
- <표 3.11>와 같이 중금속 종류에 따라 수은, 납, 카드뮴, 비소, 구리에 대한 폐기물공정시험방법의 허용기준치와 시험결과를 나타냄. 결과와 같이, 수은, 카드뮴, 비소의 용출은 없는 것으로 나타났으나, 납의 경우 CR0% 때 0.12 mg/L, CR 0.2% 때 0.23 mg/L이 검출되었고, 구리는 CR 0% 때 0.19 mg/L, CR 0.2% 때 0.012 mg/L이는 폐기물관리법 허용기준치를 만족하는 것으로 확인됨.
- 킬레이트 수지를 혼입하였을 경우 혼입하지 않은 경우보다 구리 용출량은 적지만 납의 용출량이 높고, 작업성에 영향이 커 본 재료보다 개선할 수 있는 혼화재료 검토가 필요하다 판단됨.

<표 3.10> 폐유리를 잔골재로 적용한 방사선 차폐 콘크리트 배합표

Type	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					AD(%)
		Water	Cement	BFS	Aggregate		CR
					Glass	Coarse	
CR 0%	45	170	378	113	851	1008	0
CR 0.2%							0.2

<표 3.11> 중금속 용출 시험 결과

시험항목	단위	허용 기준치	시험결과	
			CR 0%	CR 0.2%
수은	mg/L	0.005	불검출	불검출
납	mg/L	3	0.12	0.23
카드뮴	mg/L	0.3	불검출	불검출
비소	mg/L	1.5	불검출	불검출
구리	mg/L	3	0.019	0.012

<표 3.12> 킬레이트 수지 물리적 특성

형태	비중 (g/cm ³)	pH	점도 (mPa.s ,23℃)
액상	1.05	2.5±1	72.9

(4) 알칼리-실리카 반응의 억제 방안

○ 알칼리-골재 반응성

- 알칼리-실리카 반응은 시멘트 또는 콘크리트 내부에 존재하거나 외부로부터 유입되는 알칼리 성분 (Na⁺, K⁺ 등)이 골재에 포함되어 있는 반응성 또는 열역학적으로 불안정 상태의 실리카 성분(Si)과 일정 기간 동안 화학적으로 반응하여 알칼리 실리카 겔을 생성하는 현상임.
- 물이 존재한다면 알칼리 실리카 반응으로 생성된 알칼리 실리카 겔은 물을 흡수하여 팽창하며 콘크리트의 체적팽창을 초래한다는 특징을 가지고 있음.
- 알칼리-실리카 반응에 의한 콘크리트의 체적 팽창이 발생할 수 있는 조건은 일정량의 반응성 골재가 존재해야 하며 콘크리트 내부에 충분한 수산화 알칼리 용액이 존재해야 하고 충분한 수분이 필수적임.
- 알칼리-실리카 반응은 화학반응이므로 일반적으로 온도가 높아질수록 반응이 촉진된다고 알려져 있고, 일부에서는 온도에 좌우되는 수산화칼슘의 용해도에 따른 수산화칼슘의 농도 또한 알칼리 실리카 반응에 영향을 준다고 제시하고 있음.
- 알칼리-실리카 반응은 상기의 세 가지 조건이 충분조건으로 작용할 때 발생하며 알칼리 실리카 반응으로 콘크리트 내부의 골재 주변에 알칼리-실리카 겔이 생성됨.
- 이러한 알칼리 실리카 겔은 생성 초기에는 점성이 낮기 때문에 콘크리트 내부를 이동할 수 있지만 수화가 진행됨에 따라 콘크리트의 공극 중에 농축되기도 하고 표면으로 흘러나오기도 하고, 공극 등에 농축된 겔이 물을 흡수하여 팽창하고 이 때 발생하는 팽창압이 콘크리트의 인장응력을 초과한다면 콘크리트에 균열 등 손상의 원인을 발생시킴.

○ 반응성 골재의 사용 제한

- 알칼리-실리카 반응의 주요한 원인으로는 반응성 골재의 사용이므로 반응성이 없는 무해한 골재를 사용함으로써 알칼리 실리카 반응에 의한 피해를 억제할 수 있음.
- 천연 골재와 같이 골재 자체가 안정적이고 반응성을 나타내지 않는 골재를 사용하는 것이 바람직하고, 상대적으로 반응성이 의심스러운 쇄석 골재의 경우에는 임의의 쇄석 골재를 대상으로 알칼리-실리카 반응성을 판정하는 일련의 시험 절차를 통하여 알칼리-실리카 반응성 여부를 판정한 후 무해한 골재가 아니라고 판정된 경우에는 그 골재의 사용을 금지하여야 함.

○ 시멘트의 알칼리 함량 제한

- 시멘트의 등가 알칼리 함량은 알칼리 실리카 반응에 의한 콘크리트의 이상 팽창을 결정하는 주요한 요인임
- 일반적으로 시멘트의 등가 알칼리 함량이 높으면 더 큰 팽창이 발생할 것이며 등가 알칼리 함량이 낮으면 팽창이 상대적으로 적게 발생할 것임
- 시멘트의 등가 알칼리 함량이 0.6% 이하인 저알칼리시멘트를 사용한다면 알칼리-실리카 반응을 억제할 수 있음
- 알칼리-실리카 반응은 콘크리트의 알칼리 함유량을 제한함으로써 예방할 수 있고, 혼화재료를 별도로 사용하지 않고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 배합설계에서는 단위시멘트량을 제한함으로써 콘크리트의 알칼리 함량을 조절할 수 있음
- <표 3.13>은 시멘트의 등가 알칼리 함량과 허용 단위 시멘트 량의 관계를 나타낸 것으로 콘크리트의 알칼리 함량을 3 kg/m³ 이하로 제한하면 알칼리-실리카 반응에 의한 피해를 억제할 수 있음

- 따라서 시멘트의 등가 알칼리 함량이 0.6% 이하인 저알칼리 시멘트를 사용한다면 단위시멘트량을 500 kg/m³ 까지 혼입할 수 있음
- 그러나 상대적으로 시멘트의 등가 알칼리 함량이 1.15% 인 고알칼리 시멘트를 사용한다면 단위시멘트량이 260 kg/m³ 으로 제한하여야 함.

<표 3.13> 알칼리 함량에 따른 단위시멘트량

Cement	Alkali content of cement (%)	Cement content of mix (kg/m ³)
Low alkali	0.50	600
	0.55	545
	0.60	500
Medium alkali	0.65	460
	0.70	430
	0.75	400
	0.80	375
	0.85	350
	0.90	335
	0.95	315
	1.00	300
High alkali	1.05	285
	1.10	275
	1.15	260

○ 혼화재료의 사용

- 알칼리-실리카 반응을 억제하기 위하여 주로 사용되는 방법은 포졸란 재료의 혼입임. 포졸란 재료의 종류와 혼입량을 적절하게 선택한 후 고알칼리의 시멘트 일부를 대체하여 알칼리의 함량을 희석시킬 수 있음
- 또한 2차 반응인 포졸란 반응으로 시멘트 페이스트의 투수성을 급격히 감소시키고 콘크리트 내의 이온 이동을 제한함으로써 알칼리 실리카 반응을 억제할 수 있음
- 투수성 감소 및 밀실한 내부구조 형성으로 콘크리트의 강도가 증진되는 효과를 얻을 수 있음. 증진된 콘크리트의 강도는 알칼리 실리카 반응으로 인한 팽창응력에 대한 저항성을 높이게 됨
- 현재까지는 알칼리-실리카 반응의 억제 방안으로 포졸란 재료의 혼입이 가장 우수한 효과를 나타내고 있어, 본 연구에서도 플라이애시, 고로슬래그 미분말로 광물성 혼화재의 종류 및 혼입률에 따른 알칼리-실리카 반응성 저감 효과를 제시함

라. 전자폐기물 및 혼화재 혼입에 따른 중금속 용출 특성 실험 및 결과 분석

(1) 개요

○ 일반사항

- 전자폐기물인 고밀도 폐유리에는 브라운관에서 발생하는 전자파의 외부노출을 방지하기 위하여 다량의 중금속을 함유하고 있어 고밀도 폐유리에 포함된 중금속의 용출 가능성으로 인해 다양한 사회문제를 야기해왔음.
- 이를 해결하기 위해, 고밀도 폐유리에 포함된 중금속을 용출시키고자 고밀도 폐유리를 pH 5인 산(acid)에 용융시켜 납을 일부 처리하여 적용한 경우가 있으나, 용융된 산의 처리방법과 고밀도 폐유리에 포함된 다른 중금속을 용출하기엔 부적절한 방법임.
- 특히, 반영구적인 내구수명을 요구하는 차폐 채움재는 방사성폐기물에 포함된 방사성물질이 외부로 방출되는 것을 방지하기 위하여 밀도가 높은 재료를 적용해야 그 성능을 향상시킬 수 있으므로 중금속을 함유하여 밀도가 높으면서도 적용하기 용이한 고밀도 폐유리를 차폐 채움재의 잔골재로 적용하고자 하였음.

- 따라서 본 연구에서는 고밀도 폐유리를 적용한 차폐 채움재를 개발하기 위하여 고밀도 폐유리를 차폐 채움재로 적용하였을 때 발생할 수 있는 고밀도 폐유리에 포함된 중금속의 용출 특성을 평가, 분석하고자 하였음.

(2) 중금속 용출 실험 조건 및 시험체 제작

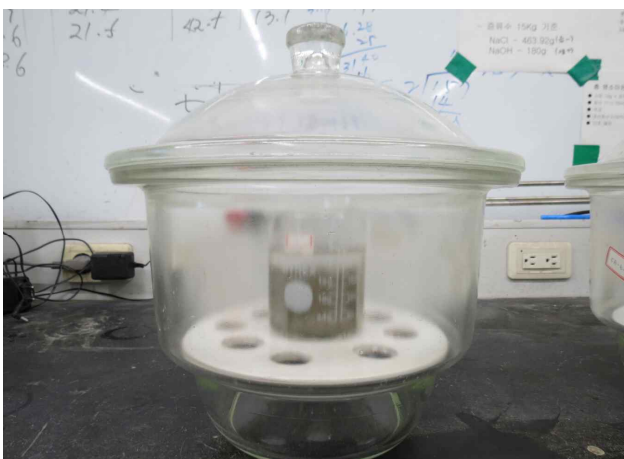
- 본 연구에서는 중금속 용출 특성을 평가하기 위하여 <표 3.24>에 나타난 모르타르 배합표를 이용하여 50×50×50 mm 크기의 시험체를 제작하였음.
- 제작된 모르타르는 미국 음용수 자재의 인체 유해영향을 관리하는 미국 음용수 관련 콘크리트 자재관리 기준의 시험법인 ANSI(American National Standard Institute) 67-2007a 법에 의해 전처리하고 ICP/MS로 분석을 실시함.
- ANSI 67-2007a 방법은 모르타르 공시체 제작 후 24시간 경과시 탈형한 후 수침시켜 91일간 수중 양생을 실시하고 용출 시험을 실시하기 전에 200 mg/L 염소용액으로 컨디셔닝함. 이후 공시체의 비표면적이 최소 50 cm²/L 이 되도록 pH 5의 산성용액과 pH 10 염기성 용액에 각각 노출시키고 23±2 ℃에서 4일 동안 1일 마다 노출 용액을 교체 하는 과정을 3일 동안 반복함.
- 3일 경과 후 4일째에 산성 및 염기성 용액을 모두 버린 후 새로운 산성 및 염기성 용액에 1일 동안 모르타르 시험체를 침지하여 중금속 용출을 실시한 후 pH 용액에 용출된 중금속을 분석하는 방법이며 그 실험 전경은 <그림 3.14>에 나타냄.



(a) 재료혼입 후 믹싱



(b) 모르타르 시험체 제작



(c) 모르타르 시험체 보관 전경



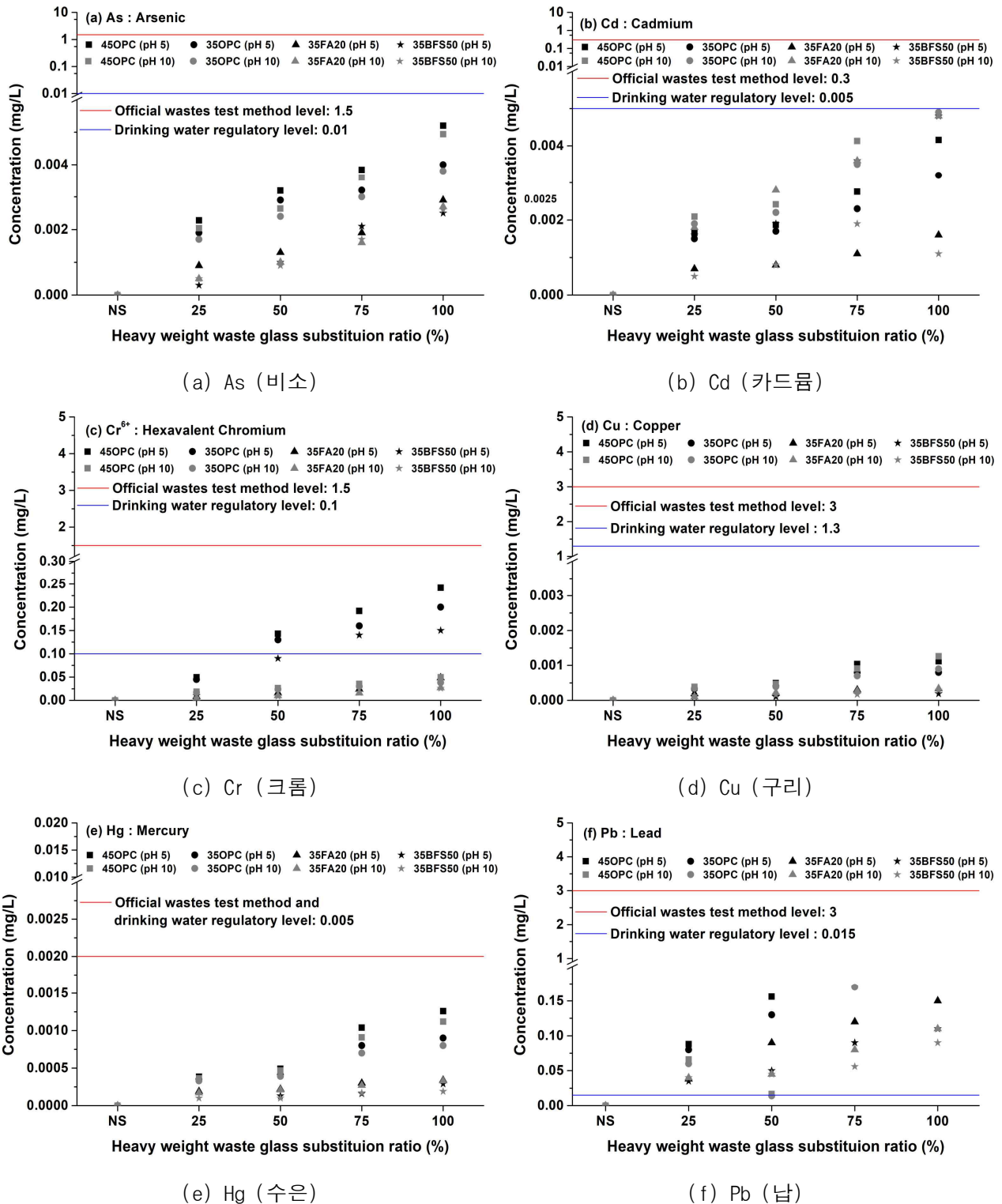
(d) 모르타르 시험체 컨디셔닝 과정

<그림 3.14> 중금속 용출 실험 전경

(3) 실험 결과

- 중금속 용출 실험은 광물질 혼화재료의 충분한 수화반응을 유도하기 위하여 재령 91일 동안 수중 양생한 시험체를 이용하여 중금속 용출을 실시함. 제작된 시험체의 중금속 용출 실험은 미국 음용수 기준인 ANSI 67-2007a에 따라 실시하였으며 폐기물공정시험법에 의한 용출기준과 미국 음용수 용출 기준으로 중금속 용출 정도를 평가하였음.

- <그림 3.15>에 나타난 실험 결과, 고밀도 폐유리의 혼입량이 증가함에 따라 모두 중금속 용출량이 증가하였으며, 이는 물-결합재비, 광물질 혼입에 영향을 받지 않았음. 그러나 비소, 카드뮴, 구리, 수은의 경우에는 폐기물 공정시험법은 물론, 미국 음용수 기준보다 낮은 용출량을 보이므로, 비소, 카드뮴, 구리 수은의 경우에는 중금속 용출로부터 안전할 것으로 사료됨.
- 한편, 고밀도 폐유리의 대체율이 증가함에 따라 납과 크롬의 용출량이 증가하는 것으로 나타났으나, 용출량은 모르타르에 포함된 납과 카드뮴에 증감에 따라 비례적으로 증가하지 않았음. 또한, 납과 크롬은 폐기물 공정 시험 기준은 만족하였으나, 미국 음용수 기준보다는 높은 양이 용출된 것으로 나타남. 이러한 현상은 고밀도 폐유리 대체율 증가에 따른 강도 감소로 인하여 고밀도 폐유리와 시멘트 페이스트 사이에 구속효과가 감소함에 따라 발생한 것으로 판단됨.



<그림 3.15> 중금속 용출 실험 결과

- 좀 더 구체적인 분석을 위하여 본 연구에서는 모르타르에서 용출된 납과 크롬의 양과 고밀도 폐유리를 혼입한 모르타르에 포함된 납과 크롬의 절대량을 비교하여 다음 <표 3.14>에 나타내었음.

<표 3.14> 모르타르 시험체에 포함된 납, 크롬에 대한 용출 비율

Type	Quantity in cubic specimen		concentration (mg/l)			
			Leached lead from mortar specimen		Leached chromium from mortar specimen	
	Lead	Chromium	pH 5	pH 10	pH 5	pH 10
35OPC-0	0	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
35OPC-25	7.744	6.116	0.08 (1.03)	0.06 (0.77)	0.045 (0.74)	0.017 (0.28)
35OPC-50	15.466	12.215	0.13 (0.84)	0.014 (0.09)	0.13 (1.06)	0.024 (0.20)
35OPC-75	23.21	18.331	0.17 (0.73)	0.17 (0.73)	0.16 (0.87)	0.03 (0.16)
35OPC-100	30.932	24.429	0.21 (0.68)	0.22 (0.71)	0.2 (0.82)	0.038 (0.16)
45OPC-0	0	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
45OPC-25	8.36	6.603	0.088 (1.05)	0.066 (0.79)	0.05 (0.75)	0.019 (0.28)
45OPC-50	16.72	13.205	0.156 (0.93)	0.0168 (0.1)	0.143 (1.08)	0.026 (0.20)
45OPC-75	25.058	19.790	0.221 (0.88)	0.221 (0.88)	0.192 (0.97)	0.035 (0.18)
45OPC-100	33.418	26.393	0.294 (0.88)	0.308 (0.92)	0.242 (0.92)	0.05 (0.18)

* 여기서, () 값은 모르타르에 포함된 전체 중금속량과 용출실험을 통해 용출된 중금속량의 비율임 (%)

- 분석 결과, 납의 경우, 산성용액에서 용출을 실시한 경우에는 고밀도 폐유리의 혼입량이 증가함에 따라 모르타르에 포함된 중금속량에 비하여 용출되는 납의 함량이 감소하는 것으로 나타났으나, pH 10 용액에서는 그 특성이 나타나지 않음.
- 한편, 크롬의 경우에는 pH 5 용액에 비하여 pH 10 용액에서 용출량이 감소하는 것으로 나타났으나 고밀도 폐유리의 혼입을 증감에 따른 영향은 나타나지 않음.
- 따라서 중금속 용출을 실시하는 용액의 pH와 중금속 종류에 따른 용출 특성이 상이한 것으로 보이며, 납과 크롬의 기준 만족을 위한 중금속 용출 방지 방안이 필요한 것으로 사료됨.

마. 전자폐기물 혼입에 따른 알칼리-골재 반응성 시험 분석 및 개선방향 도출 연구

(1) 개요

○ 일반사항

- 알칼리-골재반응은 시멘트 속의 알칼리성분과 골재 속의 실리카 성분이 반응하여 팽창성 물질인 알칼리-실리카겔을 형성한 후 실리카겔이 콘크리트에 포함된 수분을 흡수하여 팽창되는 것을 말함. 이때 팽창량 증가는 콘크리트의 균열 발생을 유도하게 되며, 궁극적으로는 콘크리트의 내구성능 저하를 유발함.
- 특히, 실리카 광물을 함유하고 있는 유리질 골재 사용에 의한 알칼리-골재 반응으로 인하여 콘크리트의 팽창을 유발하기 때문에 유리질 골재를 사용할 경우, 반드시 ASR에 의한 위험도 평가를 수반해야함.
- 알칼리-골재 반응(ASR)은 상대적으로 오랜 시간에 걸쳐 진행되기 때문에 다양한 열화조건을 고려한 알칼리-골재 반응 실험이 존재하며, ASTM C 1260, ASTM C 227, JIS A 1146, KS F 2546등의 실험 방법이 있고, 각각의 특성을 <표 3.15>에 요약하여 나타냄.

<표 3.15> 알칼리-골재 반응 실험의 비교

Name Contents	KS F 2546	ASTM C 227	JIS A 1146	ASTM C 1260
Type of test	Mortar-bar	Mortar-bar	Mortar-bar	Mortar-bar
Testing	Expansion	Expansion	Expansion	Expansion
Type of particles	Fine or crushed	Fine or crushed	Fine or crushed	Fine or crushed
Size of sample or specimen(mm)	3beam of 25.4×25.4×254	3beam of 25.4×25.4×254	3beam of 40×40×160	3beam of 25.4×25.4×254
Temp(℃)	38±2	38±2	40±2	80±2
Alkali content L=Limited UL:Un-limited	L : Na ₂ O _{eq} of cement	L : Na ₂ O _{eq} of cement	L : 1.2% (+ NaOH)	UL : immersion in 1N NaOH
Humidity	Undefined : Put specimens between 25mm upper water in container	Undefined : Put specimens between 25mm upper water in container	Above RH 95%	Immersed in NaOH solution (RH 100%)
Criteria	0.1%	0.1%	0.1%	0.1~0.2%
Time	6 months	6 months	6 months	14 days

- ASR 실험에 관한 많은 연구가 진행되고 있으나, ASR에 대한 골재의 잠재적 팽창성을 결정하기 위한 평가 방법은 아직 발견되지 않은 상태에 있으며, ASTM C 227의 경우, 상대적으로 장기간의 실험 기간이 소요되기 때문에 잠재적 반응 골재에 대해서 관대하게 평가하는 경향이 있음.

(2) 실험조건 및 시험체 제작

- ASTM C 1260의 경우, 높은 알칼리를 띄는 NaOH 수용액과 높은 온도(80℃)의 실험 조건 때문에 상대적으로 엄격하며, 14일이라는 시간동안 진행되는 실험으로 인해 상대적인 편리성을 확보하였기 때문에 본 연구에서는 폐유리의 ASR에 대한 영향을 평가하기 위해서 ASTM C 1260과 유사하게 진행함.
- ASR 실험에 사용된 시험체는 40×40×160mm의 각주형 시험체를 사용하였으며, 각 배합당 3개씩의 시편을 제작함. 24시간 표준양생을 진행한 후 24시간 동안 80℃의 증류수에서 양생한 후, 80℃의 밀폐된 1N NaOH 수용액 안에 14일간 양생하여 길이변화를 측정함. 길이변화의 측정은 저장된 용기에서 꺼낸 후 측정 표면을 말린 직후 길이변화 측정기를 이용하여 측정함. <그림 3.16>, <그림 3.17>에는 ASR 실험 전경을 나타냄.

(3) 실험결과

- 그림에는 고밀도 폐유리 대체율 변화와 물-결합재비 변화에 따른 알칼리-골재반응에 의한 길이 변화 측정 결과를 나타냄. ASTM C 1260에서 알칼리-골재 반응에 의한 유해성 판단 기준은 알칼리-골재 반응 실험 종료 후 팽창률이 0.1%이하로 나타나면 알칼리-골재반응이 발생하지 않는 것으로 간주하고, 팽창률이 0.1~0.2%이면 알칼리-골재 잠재 반응성 있음으로 평가함. 또한 0.2%이상의 팽창이 발생할 경우에는 알칼리-골재 반응이 있는 것으로 판정하게 됨.

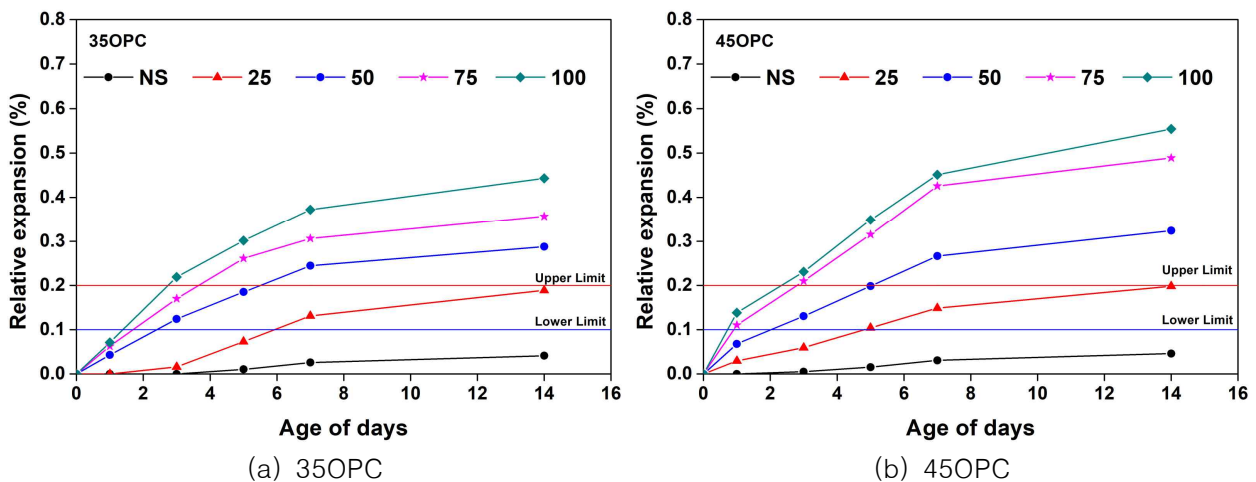


<그림 3.16> ASR 실험 전경



<그림 3.17> 길이변화 측정 전경

- 실험결과 <그림 3.18>를 살펴보면, 물-결합재비가 35%인 경우에는 고밀도 폐유리를 사용하지 않은 배합과 고밀도 폐유리의 대체율이 25%인 경우를 제외하고 모두 알칼리-골재 반응 실험의 종료일인 재령 14일에서의 팽창률이 0.2%를 넘어서는 것으로 나타남.
- 특히, 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 팽창률 역시 증가한 것으로 나타났음. 이와 같이 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 팽창률이 증가하는 것은 폐유리에 포함된 실리카 성분이 시멘트에 포함된 알칼리성분과 반응하기 때문인 것으로 판단됨.
- 또한 물-결합재비가 45%인 경우에는 고밀도 폐유리에 혼입률에 관계없이 모두 팽창한계인 0.2%를 재령 14일에 넘어서는 것으로 나타났으며, 특히 고밀도 폐유리 대체율이 75 및 100%인 경우에는 재령 5일 만에 팽창한계를 넘어서는 것으로 나타남. 따라서 고밀도 폐유리 대체에 따른 알칼리-골재 반응 저감을 위한 방안 마련이 필요한 것으로 사료됨.



<그림 3.18> 알칼리-골재반응에 의한 팽창률 측정결과

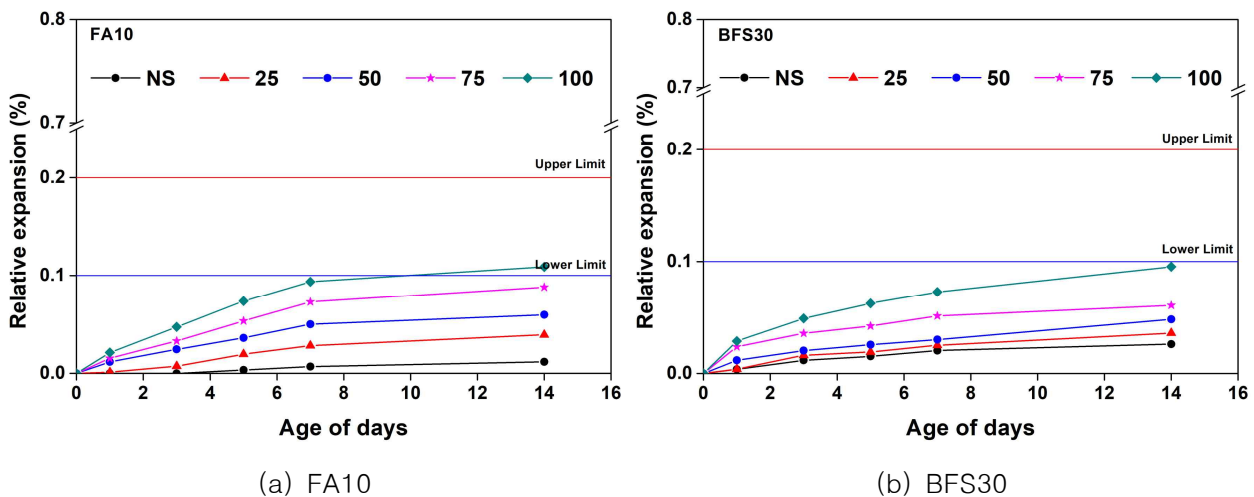
(4) 알칼리 골재반응 개선 연구

- 한편, 알칼리-골재반응에 의해 발생하는 팽창량 감소를 위해서는 결합재로 시멘트에 광물질 혼화재를 일부 대체하는 것이 유익한 것으로 다양한 연구를 통해서 밝혀진 바 있음.
- 따라서 본 연구에서는 고밀도 폐유리 대체에 따른 알칼리-골재반응에 의한 팽창량 감소를 위하여 광물질 혼화재를 두 종류로 설정하고, 현재 건설현장 및 KS 규격에서 제시하는 광물질 혼화재 대체비를 기준으로 하여 광물질 혼화재 혼입에 따른 알칼리-골재 반응을 평가하고자 하였음.

<표 3.16> 모르타르 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)					
			Water	Cement	Sand	Waste glass	FA	BFS
35FA10-0	35	0	251	646	1181	—	76	—
35FA10-25		25			886	347		
35FA10-50		50			591	695		
35FA10-75		75			295	1042		
35FA10-100		100			0	1389		
35BFS30-0		0	251	502	1181	—	—	215
35BFS30-25		25			886	347		
35BFS30-50		50			591	695		
35BFS30-75		75			295	1042		
35BFS30-100		100			0	1389		

- 우선적으로 광물질 혼화제로는 플라이애시와 고로슬래그 미분말로 설정하였고 플라이애시는 시멘트량의 10%, 고로슬래그는 30%로 결정하여 물-결합재비 35%인 경우에 대하여 우선 치환하여 알칼리-골재반응성을 우선적으로 평가하기 위하여 배합설계를 진행하였고, 배합표는 <표 3.16>과 같음.
- <그림 3.19>에는 광물질 혼화재를 치환한 알칼리-골재 반응 평가 결과를 나타내었음. 평가 결과를 살펴보면, 플라이애시를 10%만 치환한 경우에는 고밀도 폐유리의 대체율이 100%일 때, 재령 14일에서의 팽창률이 0.1%를 넘는 것으로 나타남. 반면, 고로슬래그를 30%까지 치환한 경우에는, 고밀도 폐유리의 대체율이 관계없이 모두 팽창률이 0.1%미만으로 나타남.



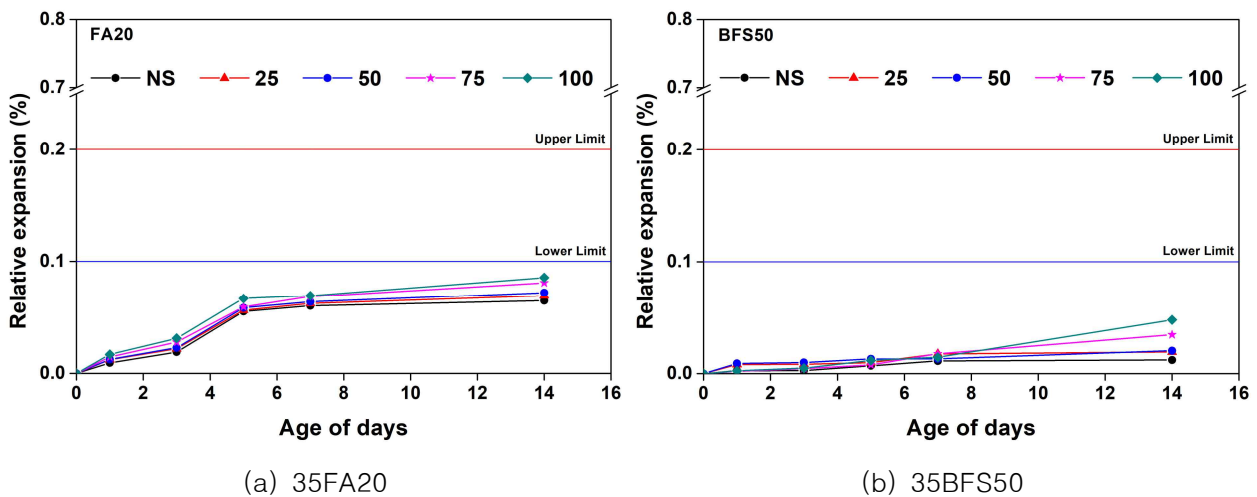
<그림 3.19> 알칼리-골재반응에 의한 팽창률 측정결과

- 따라서 플라이애시 및 고로슬래그는 고밀도 폐유리 사용에 의해 발생하는 알칼리-골재 반응을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으나, 고밀도 폐유리를 100% 잔골재로 대체하고 플라이애시를 결합재의 10% 수준만 치환하게 되면 0.1% 미만의 팽창률 확보는 어려운 것으로 판단됨.
- 앞선 실험 결과를 토대로, 본 연구에서는 고밀도 폐유리 대체에 따른 팽창률 0.1% 미만을 확보하기 위하여 플라이애시의 대체율을 20%로 증량하고, 고로슬래그는 50%까지 증가시켜 고밀도 폐유리를 혼합한 모르타르의 팽창성을 평가하였으며 본 연구에 사용된 배합표는 <표 3.17>과 같음.

<표 3.17> 모르타르 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)					
			Water	Cement	Sand	Waste glass	FA	BFS
35FA20-0	35	0	250	571	1167	-	143	-
35FA20-25		25			875	343		
35FA20-50		50			583	686		
35FA20-75		75			290	1029		
35FA20-100		100			-	1373		
35BFS30-0		0	250	357	1171	-	-	358
35BFS30-25		25			878	344		
35BFS30-50		50			586	689		
35BFS30-75		75			293	1033		
35BFS30-100		100			-	1378		

- <그림 3.20>의 실험 결과를 살펴보면, 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 증가시키면 모두 팽창률이 0.1% 미만인 것으로 나타났으며, 고밀도 폐유리의 대체율이 100%인 경우에도 팽창한계를 넘어서지 않는 것으로 나타남. 따라서 고밀도 폐유리 사용에 의해 발생하는 팽창은 광물질 혼화재를 적용함으로써 개선이 가능 한 것으로 사료됨.



<그림 3.20> 알칼리-골재반응에 의한 팽창률 측정결과

바. 차폐 채움재의 내구성 개선을 위한 혼화재료 개발

(1) 폐유리를 잔골재로 사용한 차폐채움재의 내구성 개선을 위한 혼화재료의 성능평가

(가) 실험계획

- 차폐 채움재의 내구성 개선을 위한 실험계획을 <표 3.18>에 나타냄.
- 차폐용 채움재의 배합은 <표 3.19>에 나타난 바와 같이 콘크리트 용적 1m³ 에서 굵은 골재를 사용하지 않은 모르타르 배합으로 하였음.

<표 3.18> 실험계획

구분	폐 유리 대체율 (%)	W/B (%)	결합재(%)			혼화재(%)		평가항목
			시멘트	고로 슬래그	플라이 애시	수축 저감제	팽창재	
혼화재 (AD) 0%	0	35	100	0	0	0	0	·밀도 ·압축강도 ·건조수축 ·알칼리- 실리카반응
	100		70	30	0	0	0	
			80	0	20	0	0	
			100	0	0	0	0	
			70	30	0	0	0	
			80	0	20	0	0	
수축 저감제 (SR) 1%	100		100	0	0	1	0	
			70	30	0		0	
			80	0	20		0	
팽창재 (EX) 3%, 7%	100		100	0	0	0	3	
			70	30	0	0		
			80	0	20	0		
			100	0	0	0	7	
			70	30	0	0		
			80	0	20	0		

<표 3.19> 모르타르 배합

구분		폐 유리 대체율 (%)	단위질량 (kg/m ³)					혼화재 (B%)		
			혼 합수	결 합재			잔골재	폐 유리	수축 저감제	팽창재
				시멘트	고로 슬래그	플라이 애시				
혼화재 0%		0	178	509	－	－	1555	－	－	－
				357	152	－	1555	－	－	－
				407	－	102	1555	－	－	－
		100		509	－	－	－	1830	－	－
				357	152	－	－	1830	－	－
				407	－	102	－	1830	－	－
수축저감제 1%		100		509	－	－	－	1830	1	－
				357	152	－	－	1830		－
				407	－	102	－	1830		－
팽창재	3%	100		509	－	－	－	1815	－	3
				357	152	－	－	1815	－	
				407	－	102	－	1815	－	
	7%	100		509	－	－	－	1794	－	7
				357	152	－	－	1794	－	
				407	－	102	－	1794	－	

- 물-결합재비는 선행연구에서 40~50 MPa의 강도를 낼 수 있는 35%로 고정하였으며, 폐유리 사용시 알칼리-실리카반응 억제 등 차폐재의 내구성 개선을 위해 고로슬래그 미분말을 시멘트에 대한 중량비로 30%를, 그리고 플라이애시는 20%를 대체하였음.
- 또한, 본 연구에서 사용한 혼화재료 중 글로클즈계 액상 혼화제인 수축저감제는 선행연구에서 도출한 결과를 바탕으로 결합재의 중량비로 1%를 첨가하였으며 CSA계 분말형 혼화재인 팽창재는 결합재의 중량비로 3%와 7%를 잔골재 대체재로 첨가하였음.
- 실험변수로는 밀도, 재령 3일, 7일, 28일에서의 압축강도 및 건조수축에 따른 길이변화 및 알칼리-실리카반응으로 하였음.

(나) 실험방법

a. 밀도

- 폐유리를 사용한 차폐재움재의 밀도변화를 측정하기 위하여 KS L 5105 「수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법」에 따라 50 mm의 모르타르 입방체를 제작하였음.
- 실험체는 온도 20 ± 1 °C에서 28일간 수중양생을 실시하였으며 자체 중량 측정 후 면적으로 나누어 밀도를 구함.

b. 압축강도

- 폐유리와 혼화재료를 사용했을 경우의 내구성 검토를 위해 압축강도를 측정하였음.
- 시험체로는 KS L 5105 「수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법」에 따라 50 mm의 모르타르 입방체를 3개씩 제작하였으며, 온도 20 ± 1 °C에서 수중양생 후 재령 3일, 7일 및 28일에 압축강도 시험을 실시하였음.

c. 건조수축 길이변화

- 차폐재움재의 건조수축에 따른 길이변화를 검토하기 위해 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트 길이변화 시험방법」기준에 의하여 $40 \times 40 \times 160$ mm의 모르타르 각주 시험체를 2개씩 제작하였으며, 온도 20 ± 1 °C에서 재령 7일간 수중양생을 수행한 후, 1일간 기건양생 실시 후 이로부터 7일 간격으로 버니어 캘리퍼스를 이용하여 길이변화를 측정하였음.

d. 알칼리-실리카 반응(ASR)

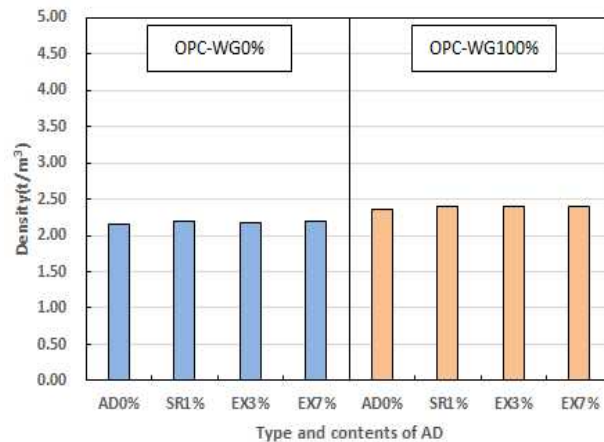
- 유리질 재료의 혼입으로 인해 발생하는 알칼리-실리카 반응(ASR)에 의한 팽창성을 확인하기 위해, ASTM C 1260 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates」 기준에 따라 $25 \times 25 \times 285$ mm 크기의 시험체를 제작하였음.
- 시편은 제작 후 1일 동안 온도 20 ± 1 °C의 항온항습에서 양생한 후 탈형하여, 물로 채워진 밀폐 용기의 80°C가 유지되는 항온에서 1일간 수중양생을 하였음. 수중양생 후 시편을 건조하여 15초 이내에 다이얼게이지 측정기를 이용하여 영점을 측정하였음. 영점이 측정된 시편은 1N의 NaOH 용액이 담긴 밀폐 용기에 넣어 다시 80°C가 유지되는 항온에 보관하면서 침지 2일, 4일, 7일 및 14일에 알칼리-실리카반응을 측정하였음.

(다) 실험결과 및 분석

a. 밀도

- 혼화재료가 전혀 첨가되지 않고 폐유리도 사용되지 않은 시험체는 밀도가 2.16 t/m^3 으로 측정되었으며 폐유리를 100% 사용한 시험체는 2.35 t/m^3 으로 측정됨.
- 수축저감제를 사용하고 폐유리를 사용하지 않은 시험체는 2.20 t/m^3 으로 측정되었으며 폐유리를 100% 사용한 시험체는 2.38 t/m^3 으로 측정됨.
- 팽창재를 3% 사용하고 폐유리를 사용하지 않은 시험체는 2.18 t/m^3 으로 측정되었으며 폐유리를 100% 사용한 시험체는 2.39 t/m^3 로 측정됨. 팽창재를 7% 사용하고 폐유리를 사용하지 않은 시험체

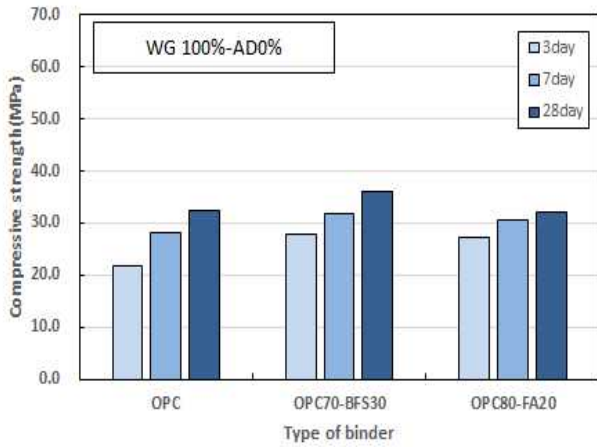
는 2.20 t/m³으로 측정되었으며 폐유리를 100% 사용한 시험체는 2.40 t/m³으로 측정되어 혼화재료의 종류와 투입량에 상관없이 폐유리의 사용량이 증가하였을 때 밀도는 증가하는 것으로 나타남.



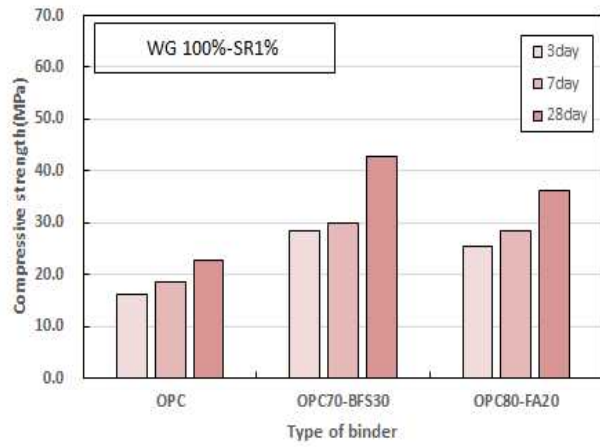
<그림 3.21> 밀도 측정결과

b. 압축강도

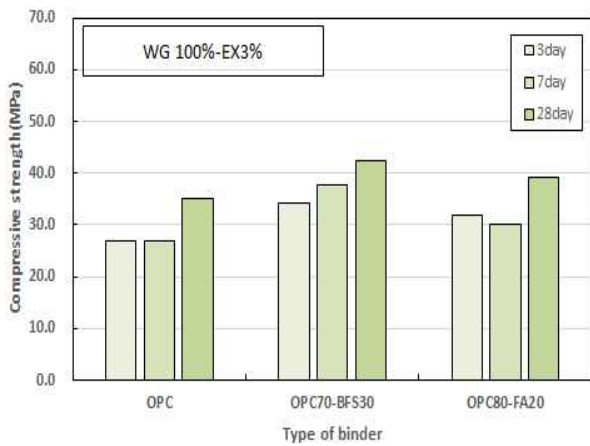
- 폐유리를 사용하고 수축저감제와 CSA계 팽창재를 사용하지 않은 차폐재의 압축강도 발현비에 대한 측정결과를 <그림 3.22>에 나타냄.
- 본 연구 결과에서는 압축강도 발현비의 기준 Plain은 결합재로 OPC를 사용하고 폐유리를 사용하지 않은 차폐재를 나타내고 이 Plain의 3일, 7일 및 28일에서의 압축강도는 각각 31, 37 및 43 MPa로 나타나 기준으로 하였음.
- 강도를 측정한 결과, 결합재를 BFS 30% 및 FA 20%를 사용하고 폐유리를 사용한 차폐재의 재령 3일 및 7일에서의 압축강도 발현비는 OPC와 비교하여 상대적으로 우수한 것으로 나타남. 그러나 재령 28일 압축강도 발현비는 OPC와 비교하여 상대적으로 낮게 측정됨. 즉, 폐유리를 사용한 차폐재의 28일 압축강도 발현비는 Plain과 비교하여 결합재로 OPC를 사용한 차폐재에서 24%, BFS 30%에서 26%, FA 20%에서 36% 낮게 측정되어 폐유리를 사용할 경우 압축강도 발현비는 감소하는 것으로 나타남. 이는 기존 연구결과에서 보고한 바와 같이 폐유리 분말이 시멘트 페이스트 사이의 부착강도를 저하시킨 것으로 판단됨.
- 수축저감제를 사용하고 폐유리를 사용한 차폐재의 압축강도 발현비에 대한 측정결과를 <그림 3.23>에 나타냄. 그 결과, 결합재를 BFS 30% 및 FA 20%를 사용하고 폐유리를 사용한 차폐재의 재령 3일 및 7일 압축강도 발현비는 OPC와 비교하여 다소 우수한 경향을 나타내었으며, 결합재로 BFS 30%를 사용한 차폐재의 재령 28일 압축강도 발현비는 Plain과 유사하게 나타냄. 수축저감제를 사용한 차폐재의 28일 압축강도 발현비는 Plain과 비교하여 결합재를 OPC로 사용한 차폐재에서 24%, BFS 30%에서 1%, FA 20%에서 16% 낮게 측정됨.
- CSA계 팽창재와 폐유리를 사용한 차폐재의 압축강도 발현비에 대한 측정결과를 <그림 3.24>~<그림 3.25>에 나타냄. 측정결과, CSA계 팽창재를 3% 사용한 차폐재의 28일 압축강도 발현비는 Plain과 비교하여 결합재로 BFS 30%를 사용한 차폐재가 가장 유사하게 나타남. CSA계 팽창재를 7% 사용한 차폐재의 28일 압축강도 발현비는 Plain에 가장 유사한 강도를 확보하는 것으로 나타남.
- 따라서, 폐유리를 사용한 차폐재의 압축강도 발현비는 혼화재료를 사용하지 않은 <그림 3.22>과 비교하여 CSA계 팽창재를 적용함으로써 압축강도 발현비가 개선됨을 확인할 수 있었음. 이는 미세한 침상의 에트링가이트가 생성되면서 팽창되어 경화체의 조직을 치밀하게 함으로써 압축강도가 증진된 것으로 판단됨.



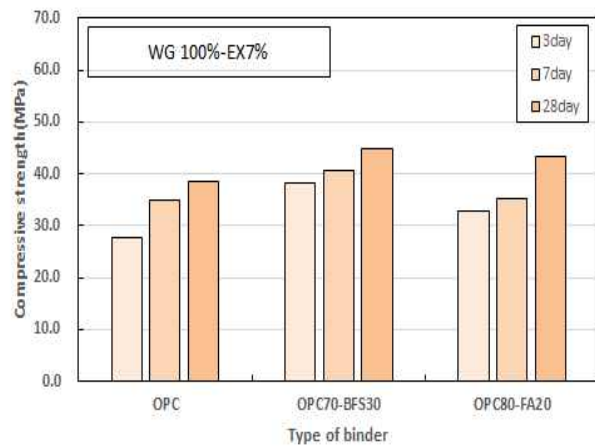
<그림 3.22> 압축강도 측정결과 (AD 0%)



<그림 3.23> 압축강도 측정결과 (SR 1%)



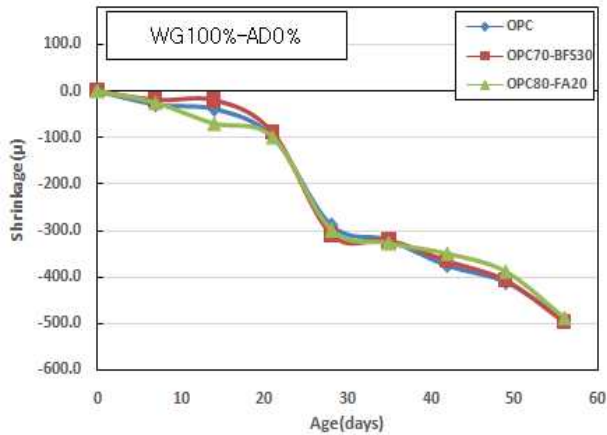
<그림 3.24> 압축강도 측정결과 (EX 3%)



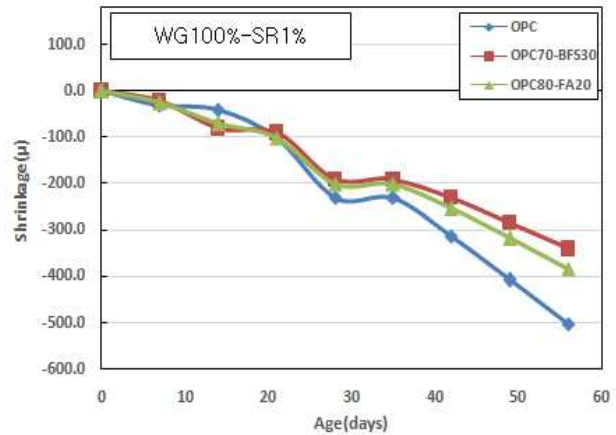
<그림 3.25> 압축강도 측정결과 (EX 7%)

c. 건조수축

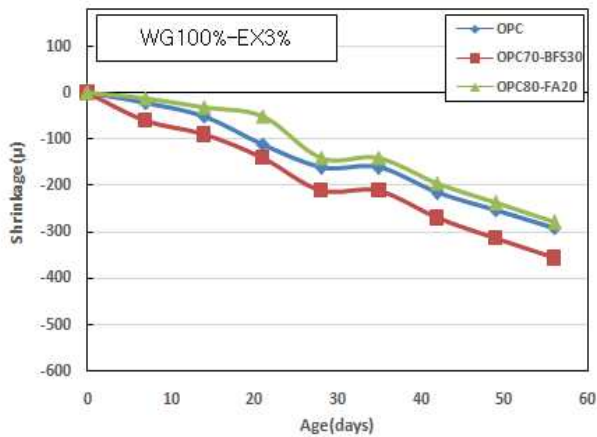
- 혼화재료를 사용하지 않은 차폐재의 건조수축에 따른 길이변화의 측정결과를 <그림 3.26>에 나타냄.
- 본 연구 결과에서는 Plain은 폐유리를 사용하고 혼화재료를 사용하지 않은 차폐재를 의미함. 혼화재료를 사용하지 않은 차폐재의 건조수축은 측정 28일부터 상대적으로 급격하게 발생하는 것으로 나타남.
- 수축저감제를 사용한 차폐재의 건조수축으로 인한 길이변화의 측정결과를 <그림 3.27>에 나타냄. 수축저감제를 사용한 시험체는 Plain <그림 3.26>과 비교하여 건조수축이 상대적으로 적게 발생하는 것으로 나타남. 이는 기존 연구결과에서 보고된 바와 같이 매트릭스내 모세관 공극수의 표면장력 저하에 따라 계면특성이 개선되었기 때문으로 판단됨.
- CSA계 팽창재를 사용한 차폐재의 건조수축으로 인한 길이변화의 측정결과를 <그림 3.28>~<그림 3.29>에 나타냄. CSA계 팽창재 사용량이 증가할수록 차폐재의 건조수축률은 감소하는 경향을 보였으며, CSA계 팽창재를 7% 사용한 경우 건조수축률이 약 300μ이하로 건조수축 저감효과 가장 큰 것으로 나타남. 이는 팽창성 물질인 미세한 결정의 에트링가이트가 미세공극을 충전하면서 수축을 보상하기 때문으로 판단됨.



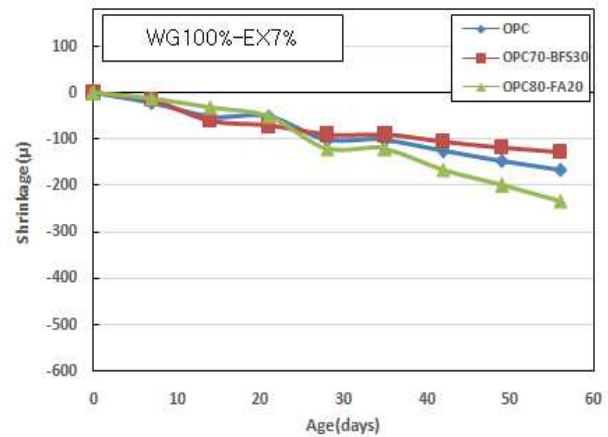
<그림 3.26> 건조수축 결과 (AD 0%)



<그림 3.27> 건조수축 결과 (SR 1%)



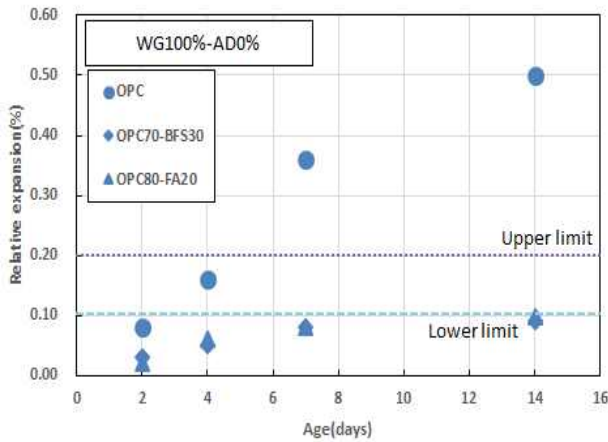
<그림 3.28> 건조수축 결과 (EX 3%)



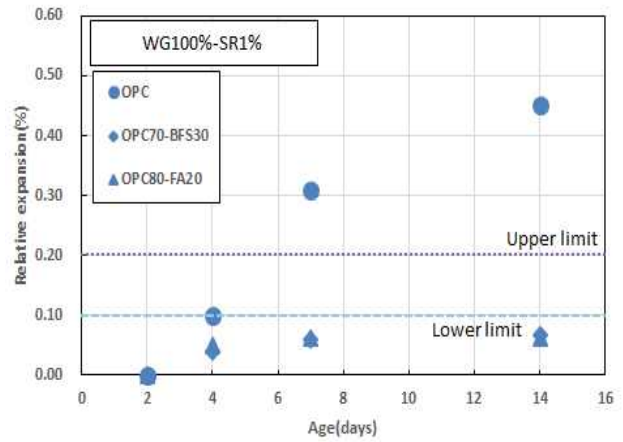
<그림 3.29> 건조수축 결과 (EX 7%)

d. 알칼리-실리카반응

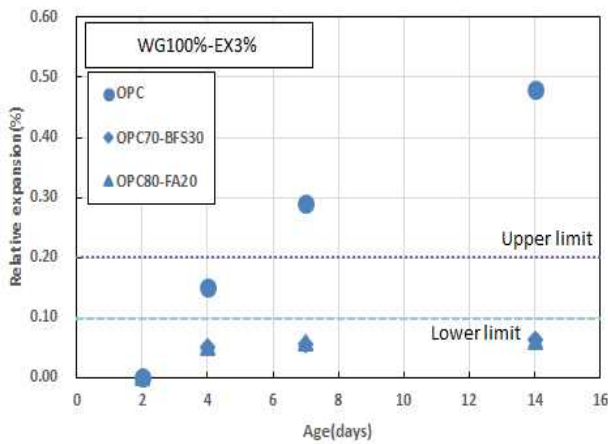
- 폐유리를 사용하고 혼화재료를 사용하지 않은 차폐재의 알칼리-실리카반응에 따른 길이변화의 측정결과를 <그림 3.30>에 나타냄.
- 결합재로 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 시험체에서는 알칼리-실리카반응으로 인해 재령 4일까지는 팽창률이 0.2% 미만으로 측정되었으나 재령 7일 이후부터 팽창률이 증가하여 재령 14일에서는 ASTM C 1260에서 규정하고 있는 0.2% 이상인 0.5%로 나타나 알칼리-실리카반응으로 인해 유해한 것으로 판정됨. 그러나, 결합재로 고로슬래그와 플라이애시를 사용한 시험체의 경우 재령 14일에서도 팽창을 0.1%이하로 나타나 폐유리를 사용하더라도 알칼리-실리카반응을 억제할 수 있는 것으로 판단됨.
- 폐유리와 수축저감제를 사용한 차폐재의 알칼리-실리카반응에 의한 길이변화는 <그림 3.31>와 같이 나타냄. 수축저감제를 사용하지 않은 시험체의 경우인 Plain <그림 3.30>과 비교하여 유사한 경향을 나타내고 있어 수축저감제를 단독 사용하는 경우 알칼리-실리카반응을 억제하는 데는 효과가 없는 것으로 나타남.
- 폐유리와 CSA계 팽창재를 사용한 차폐재의 알칼리-실리카반응으로 의한 길이변화를 <그림 3.32>~<그림 3.33>에 나타냄. 이 경우의 길이변화는 수축저감제에서와 유사한 경향을 보였으며, 고로슬래그와 플라이애시를 사용하지 않고 CSA계 팽창재를 단독 사용한 경우는 CSA계 팽창재의 사용량에 상관없이 재령 14일부터 0.2% 이상 팽창하여 알칼리-실리카반응의 억제 효과가 없는 것으로 파악됨.
- 즉, 수축저감제나 CSA계 팽창제만을 사용한 경우는 알칼리-실리카반응의 억제를 위한 알칼리 수화물의 저감 또는 폐유리내 반응성 실리카반응의 억제 효과는 없는 것으로 판단되며, 이 연구에서와 같이 고로슬래그 미분말 또는 플라이애시를 대체하여 사용하는 것이 시멘트내 알칼리 함량을 저감 및 알칼리-실리카반응성 수화물을 저감하는 것으로 나타나 알칼리-실리카반응의 저감에 가장 양호한 방안으로 사료됨.



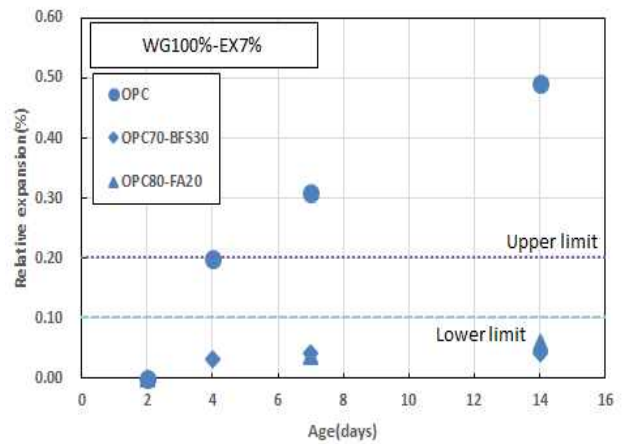
<그림 3.30> 알칼리-실리카반응 결과 (AD 0%)



<그림 3.31> 알칼리-실리카반응 결과 (SR 1%)



<그림 3.32> 알칼리-실리카반응 결과 (EX 3%)



<그림 3.33> 알칼리-실리카반응 결과 (EX 7%)

(라) 결론

- 밀도는 폐유리의 사용량이 증가할수록 높아지는 경향을 나타내었으며, 혼화재료의 사용 유·무, 종류 및 사용량에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타남.
- 압축강도는 폐유리의 사용량이 증가하였을 때 낮아지는 경향을 나타내었으며 이는 폐유리와와 부착 강도 저하 등에 의한 것으로 판단되었다. 그러나 CSA계 팽창재를 7% 사용하고 폐유리를 사용한 차폐재의 압축강도는 일반 잔골재를 사용한 차폐재와 유사한 압축강도를 결과를 나타냄.
- 건조수축 길이변화는 CSA계 팽창재 7%를 사용했을 때 약 150 μ 이내의 건조수축으로 나타나 수축 저감 효과가 가장 큰 것으로 판단됨.
- 알칼리-실리카반응의 측정결과, 폐유리 사용 시 알칼리-실리카반응이 있는 것으로 확인되었으며 고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 사용에 의해 알칼리-실리카반응의 억제 효과가 있는 것으로 나타남. 또한, 수축저감제 및 CSA계 팽창재의 단독사용은 알칼리-실리카반응에 영향을 미치는 않는 것으로 나타남.

(2) 차폐 채움재의 중금속 용출 저감 방안: 폐유리와 킬레이트 수지를 사용한 방사선 차폐재의 재료특성 평가

(가) 실험계획

- 폐유리를 잔골재로 사용함에 따른 차폐채움재의 특성평가를 위해 <표 3.20>에 실험계획과 배합설계를 나타내었음.
- 실험배합은 <표 3.21>과 같이, 콘크리트 용적 1m³에서 굵은 골재를 사용하지 않은 모르타르 배합으로 하였으며, 물-결합재비는 예비시험에서 40~50 MPa의 강도를 낼 수 있는 35%로 고정하였고 폐유리 사용시 알칼리-실리카반응 억제 등 차폐재의 내구성 개선을 위해 고로슬래그 미분말을 시멘트

에 대한 중량비로 30%를 대체하였고, 폐유리의 중금속 용출 억제 가능성을 검토하고자 킬레이트 수지(Chelate resin, CR)를 결합재의 중량비로 0.2%와 1%를 첨가함.

- 실험변수로는 재령 3일, 7일, 28일에서의 압축강도와 건조수축에 따른 길이변화, 알칼리-실리카반응 및 중금속 용출로 하였음.

<표 3.20> 실험계획

구분	폐유리 대체율 (%)	W/B (%)	결합재(%)		킬레이트수지	평가항목
			시멘트	고로 슬래그		
혼화재 (AD) 0%	0	35	100	0	0	·밀도 ·압축강도 ·건조수축 ·알칼리-실리카반응 ·중금속용출
	100		80	20	0	
			100	0	0	
			80	20	0	
킬레이트수지 (CR)0.2%	100		100	0	0.2	
			80	20		
킬레이트수지 (CR)1%	100		100	0	1	
			80	20		

<표 3.21> 모르타르 배합

구분		폐유리 대체율 (%)	단위질량 (kg/m³)				킬레이트수지 (%)	
			혼합수	결합재		잔골재		폐유리
				시멘트	고로 슬래그			
혼화재 0%		0	178	509	－	1555	－	－
		0		357	152	1555	－	－
		100		509	－		1830	－
		100		357	152		1830	－
킬레이트 수지	0.2%	100		509	－	－	1830	0.2
		100		357	152	－	1830	
	1%	100		509	－	－	1830	1
		100		357	152	－	1830	

(나) 실험방법

a. 압축강도

- 폐유리와 혼화재료를 사용했을 경우의 내구성 검토를 위해 압축강도를 측정하였음.
- 시험체로는 KS L 5105 「수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법」에 따라 50mm의 모르타르 입방체를 3개씩 제작하였으며, 온도 20±1℃에서 수중양생 후 재령 3일, 7일 및 28일에 압축강도 시험을 실시하였음.

b. 건조수축 길이변화

- 차폐채움재의 건조수축에 따른 길이변화를 검토하기 위해 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트 길이변화 시험방법」 기준에 의하여 40×40×160mm의 모르타르 각주 시험체를 2개씩 제작하였으며, 온도 20±1℃에서 재령 7일간 수중양생을 수행한 후, 1일간 기건양생 실시 후 이로부터 7일 간격으로 버니어 캘리퍼스를 이용하여 길이변화를 측정하였음.

c. 알칼리-실리카반응(ASR)

- 유리질 재료의 혼입으로 인해 발생하는 알칼리-실리카반응(ASR)에 의한 팽창성을 확인하기 위해, ASTM C 1260 「Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates」 기준에 따라 25×25×285mm 크기의 시험체를 제작하였음.
- 시편은 제작 후 1일 동안 온도 20±1℃의 항온항습에서 양생한 후 탈형하여, 물로 채워진 밀폐 용기의 80℃가 유지되는 항온에서 1일간 수중양생을 하였음. 수중양생 후 시편을 건조하여 15초 이내에 다이얼게이지 측정기를 이용하여 영점을 측정하였음. 영점이 측정된 시편은 1N의 NaOH 용액이 담긴 밀폐 용기에 넣어 다시 80℃가 유지되는 항온에 보관하면서 침지 2일, 4일, 7일 및 14일에 알칼리-실리카반응을 측정하였음.

d. 중금속 용출 시험

- 본 연구에서는 전자폐기물인 폐유리를 잔골재로 사용함으로써 중금속 용출을 평가하고자 한국 폐기물 재활용 기준인 KSLP법(폐기물공정시험법)과 미국 음용수법에 따라 콘크리트 자재 관리기준에서 정한 ANSI(American National Standard Institute) 67-2007a법으로 평가를 수행하였음.
- 각 시험법에 따라 수은(Hg), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 구리(Cu), 크롬(Cr)에 대한 허용기준치는 <표 3.22>와 같음.

<표 3.22> 폐유리의 물리화학적 특성

시험방법	허용기준치 (mg/L)					
	Hg1)	Pb	Cd	As	Cu	Cr
KSLP	0.005	3.0	0.3	1.5	3.0	-
ANSI 67-2007a	0.005	0.015	0.005	0.01	1.3	0.1

(Note) Hg : Hydrargyre, Pb : Plomb, Cd : Cadmium, As : Arsenic, Cu : Cuprum, Cr : Chromium

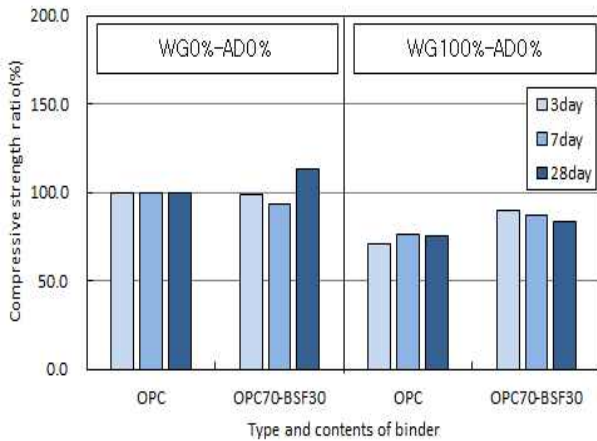
(다) 실험결과 및 분석

a. 압축강도

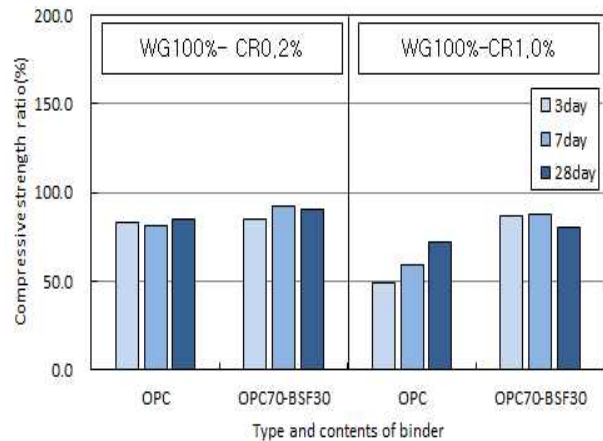
- 킬레이트 수지를 사용하지 않고 폐유리를 사용한 경우, 차폐채움재의 압축강도 발현비에 대한 결과를 <그림 3.35>에 나타냄.
- 본 연구 결과에서는 압축강도 발현비의 기준(Plain)은 폐유리를 사용하지 않고 결합재로 OPC를 사용한 차폐재로 하였고, 이 Plain의 3일, 7일 및 28일에서의 압축강도는 각각 31, 37 및 43 MPa로 나타남.
- 강도를 측정한 결과, 폐유리를 사용하지 않고 결합재로 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 재령 3일과 7일에 Plain보다 각각 98%, 94%로 낮게 측정되었지만 재령 28일에서 114%로 높게 측정되어 장기 강도 개선에 효과가 있는 것으로 판단됨. 또한, 폐유리를 사용한 차폐재의 경우에도 OPC 보다 BFS30%에서 압축강도가 상대적으로 높게 측정되어 BSF의 사용에 따른 강도개선에 효과가 있는 것으로 나타남. 반면, 폐유리를 사용한 차폐재인 경우 사용하지 않은 차폐재보다 압축강도 발현비가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 연구에서와 같이 폐유리와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도가 저하된 때문으로 판단됨.
- 폐유리와 킬레이트 수지를 사용한 차폐재의 압축강도 발현비에 대한 결과를 <그림 3.35>에 나타냄. 그 결과, <그림 3.34>에서와 같이 폐유리를 사용한 OPC 차폐재의 경우 압축강도가 재령 3일, 7일 및 28일에서 각각 71%, 77%, 75%로 낮게 측정되었지만, 폐유리와 킬레이트 수지 0.2%를 혼입한

OPC 차폐재의 경우 각각 83%, 81%, 85% 낮게 측정되어 강도개선에 효과적이었으나 킬레이트 수지 1.0% 혼입한 OPC 차폐재일 때는 재령 3일, 7일 및 28일에서 각각 49%, 60%, 73%로 낮게 측정됨. 이는 킬레이트 수지가 시멘트 수화물과 매트릭스처럼 화학적 반응을 형성하여 혼입량이 증가할수록 강도 발현에 영향이 있는 것으로 판단되며, 향후 킬레이트 수지의 적정 혼입량에 따른 내구성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단됨.

- 또한, 폐유리를 혼입하고 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 킬레이트 수지의 사용량에 관계없이 OPC 배합보다 압축강도가 높게 측정되었는데 이는 OPC와 킬레이트 수지의 화학적 반응보다 BFS와 킬레이트 수지와의 화학적 반응의 영향이 강도 발현에 영향이 작기 때문으로 판단됨.



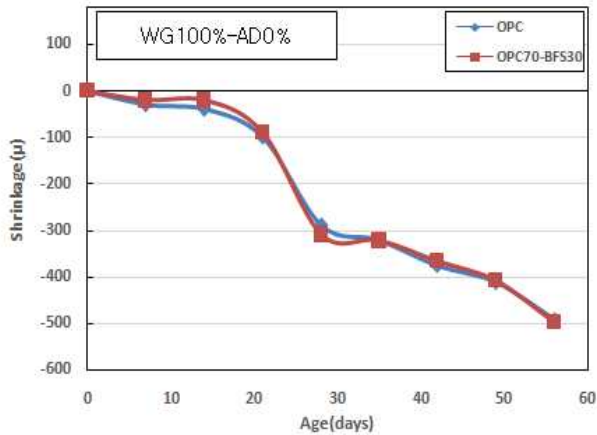
<그림 3.34> 압축강도 발현비 측정결과
(AD 0%)



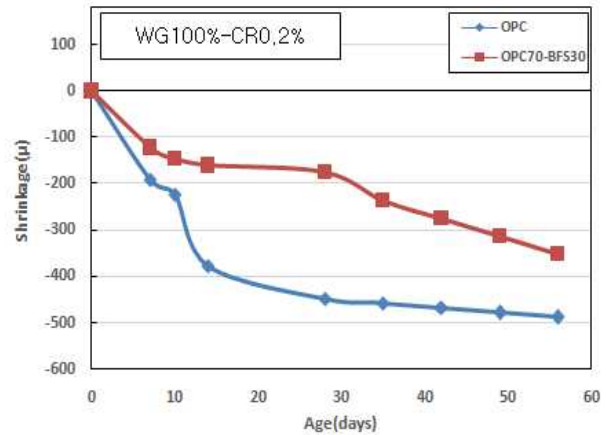
<그림 3.35> 압축강도 발현비 측정결과
(AD 0.2, 1%)

b. 건조수축

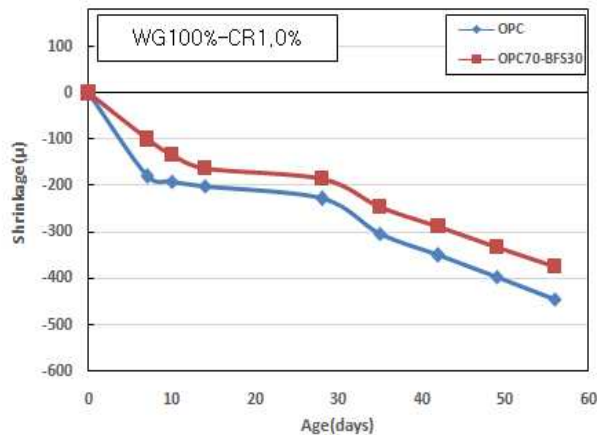
- 킬레이트 수지를 사용하지 않은 차폐재의 건조수축에 따른 길이변화를 <그림 3.36>에 나타냄. 측정 결과, 킬레이트 수지를 사용하지 않은 차폐재의 건조수축은 BFS 첨가와 관계없이 측정 28일부터 상대적으로 급격하게 발생하는 것으로 나타남.
- 킬레이트 수지를 사용한 차폐재의 건조수축으로 인한 길이변화를 <그림 3.37>~<그림 3.38>에 나타냄. 측정 결과, 킬레이트 수지를 혼입하였을 경우는 혼입하지 않은 경우보다 길이변화가 적게 발생하는 것으로 나타나 킬레이트 수지가 건조수축의 개선에 효과가 있는 것으로 판단됨.
- 고로슬래그를 혼합한 경우는 품질, 분말도, 분쇄방법 등에 따라 차이가 있지만 보통포틀랜드시멘트에 비해 건조수축이 크게 발생하는 것으로 알려져 있음. 하지만 <그림 3.37>에서는 같이 킬레이트 수지 0.2%를 혼입하였을 때 OPC의 경우는 측정 56일 488 μm 를 나타내지만 BSF30% 치환 시는 측정 56일 352 μm 이 되어 길이변화가 상대적으로 적게 발생하는 것으로 나타났고, <그림 3.37>과 <그림 3.38>의 비교에서는 OPC의 경우 킬레이트 수지 혼입량이 증가할수록 길이변화가 적게 나타나고, BSF30% 치환일 경우에 킬레이트 수지 혼입량에 상관없이 킬레이트 수지를 혼입하지 않은 경우보다 길이변화가 적어 건조수축의 개선에 효과가 있는 것으로 나타남. 이는 앞서 압축강도에 대한 결과에서와 같이 킬레이트 수지가 결합재 수화물과 매트릭스 구조를 이루어 건조수축에 효과적임을 나타냄.



<그림 3.36> 건조수축 결과 (AD 0%)



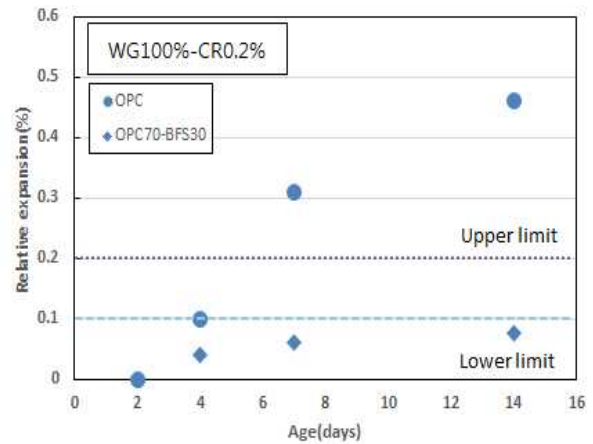
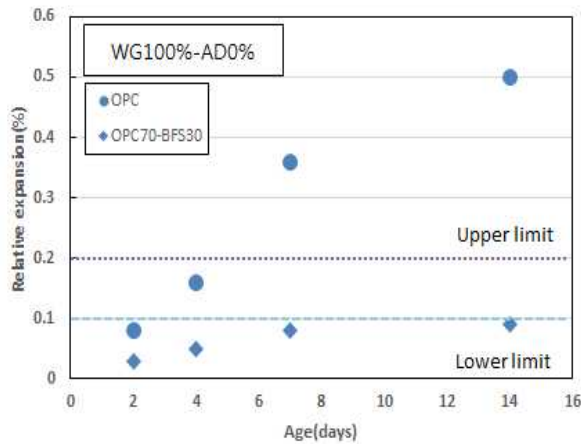
<그림 3.37> 건조수축 결과 (AD 0.2%)



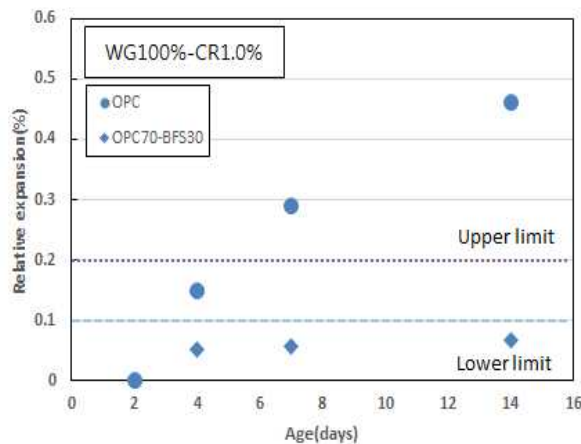
<그림 3.38> 건조수축 결과 (AD 1%)

c. 알칼리-실리카반응

- 폐유리를 사용하고 킬레이트 수지를 혼입하지 않은 차폐재의 ASR반응에 따른 길이변화를 <그림 3.39>에 나타냄. OPC의 경우, ASR 반응에 의해 재령 4일까지는 팽창률이 ASTM C 1260에서 규정하고 있는 0.2% 미만으로 측정되었으나 재령 7일 이후부터는 팽창률이 증가하여 재령 14일에서 0.2% 이상인 0.5%로 나타나 ASR반응으로 인해 유해한 것으로 판단됨. 그러나, 결합재로 BFS30%를 치환한 시험체의 경우 재령 14일에서도 팽창률 0.1%이하로 나타나 폐유리를 사용하더라도 ASR 반응을 억제할 수 있는 것으로 나타남.
- 폐유리와 킬레이트 수지를 사용한 차폐재의 ASR 반응에 의한 길이변화를 <그림 3.40>~<그림 3.41>에 나타냄. 이들은 <그림 3.39>과 유사한 경향을 나타내고 있어 킬레이트 수지의 사용은 ASR 반응을 억제하는 데는 효과가 없는 것으로 판단됨.
- 즉, 킬레이트 수지의 사용은 실리카반응의 억제를 위한 알칼리 수화물의 저감 또는 폐유리내 반응성 실리카반응의 억제에 효과가 없는 것으로 판단되며, 고로슬래그 미분말을 대체하여 사용하는 것이 시멘트 내 알칼리 함량 및 알칼리-실리카반응성 수화물을 저감하는데 효과적인 것으로 나타나 알칼리-실리카반응의 저감에 가장 양호한 방안으로 사료됨.



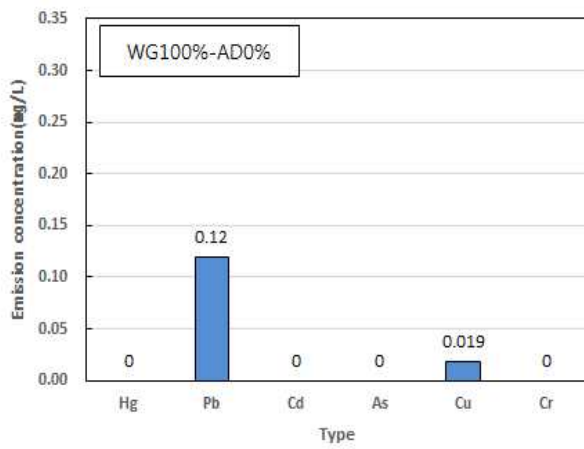
<그림 3.39> 알칼리-실리카반응 결과 (AD 0%) <그림 3.40> 알칼리-실리카반응 결과 (AD 0.2%)



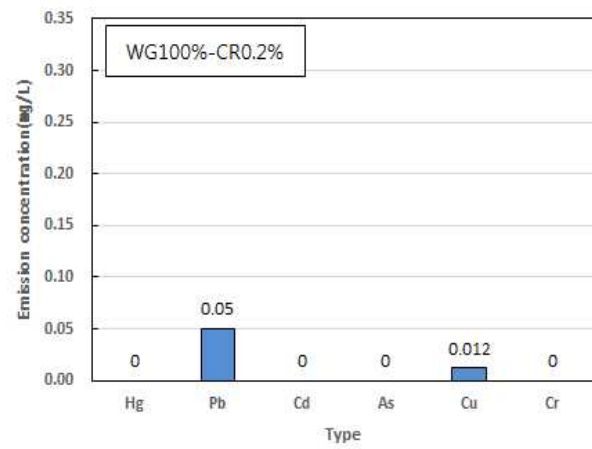
<그림 3.41> 알칼리-실리카반응 결과 (AD 1%)

d. 중금속 용출

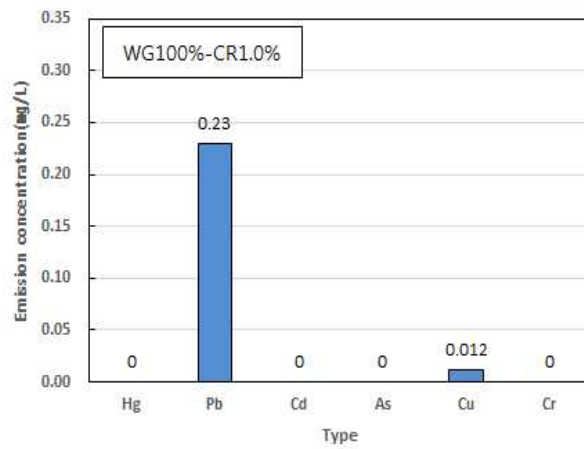
- 폐유리를 사용한 OPC 차폐재의 경우보다 BFS30%를 치환한 차폐재의 경우가 압축강도 증진과 건조 수축 및 ASR 반응저감에 효과적이므로 중금속 용출 시험에서는 BFS30%를 치환한 차폐재에 킬레이트 수지의 혼입량과 중금속 용출 시험방법에 따른 중금속의 용출 여부를 평가하였음.
- 한국 KSLP 시험법에 따른 결과를 <그림 3.42>~<그림 3.44>에 나타내었다. 시험결과, 킬레이트 수지를 사용하지 않고 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 납 0.12 mg/l와 구리 0.019 mg/l가 검출되었고, 킬레이트 수지 0.2% 사용한 차폐재에서는 납 0.05 mg/l와 구리 0.012 mg/l가 검출되었으며 킬레이트 수지 1.0%를 사용한 차폐재에서는 납 0.23 mg/l와 구리 0.012 mg/l가 검출 됨. 즉, 킬레이트 수지의 사용 여부와 관계없이 이 시험법에서는 모든 경우 허용기준치 <표 3.22> 이하를 만족함.
- 미국 ANSI 67-2007a 시험법에 따른 결과는 <그림 3.45>~<그림 3.50>에 나타내었다. 시험결과, pH 10의 경우 모든 시험체에서 구리가 검출되었으나 중금속 용출량이 허용기준치 <표 3.22>를 만족함. 한편 pH 5의 경우 킬레이트 수지를 사용하지 않고 BFS30%를 치환한 차폐재에서는 납 0.62 mg/l와 구리 0.032 mg/l가 검출되었고 킬레이트 수지 0.2%를 사용한 차폐재에서는 납 0.59 mg/l와 구리 0.236 mg/l가 검출되었으며 킬레이트 수지 1.0%를 사용한 차폐재에서는 납 0.53 mg/l와 구리 0.086 mg/l가 검출되어 납을 제외한 모든 중금속이 킬레이트 수지의 사용 여부와 상관없이 허용기준치를 만족함.
- 중금속 용출 시험 결과 한국 KSLP 시험법에서는 폐기물의 중금속 용출 허용 기준치를 만족하였으나, 납의 경우 ANSI 67-2007a 음용수 기준의 중금속 용출이 허용기준치를 초과하여 인체에 해롭거나 환경오염 등의 다양한 사회문제를 야기 시킬 우려가 있으므로 추후 중금속 용출을 더 저감할 수 있는 연구를 진행해야 할 것으로 판단됨.



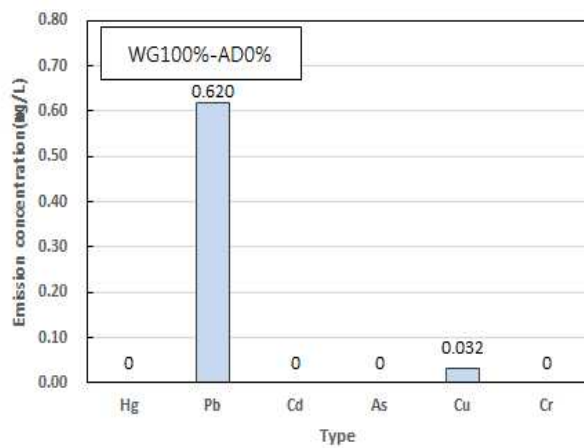
<그림 3.42> 중금속 용출 결과
(KSLP method-AD0%)



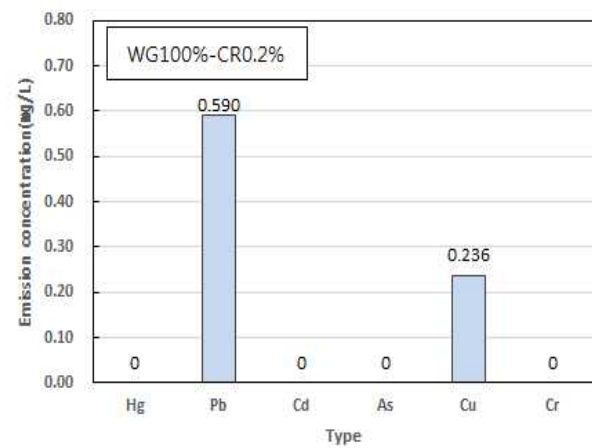
<그림 3.43> 중금속 용출 결과
(KSLP method-AD0.2%)



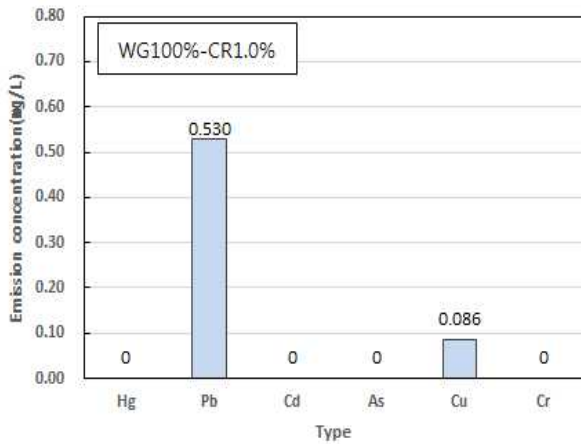
<그림 3.44> 중금속 용출 결과
(KSLP method-AD1%)



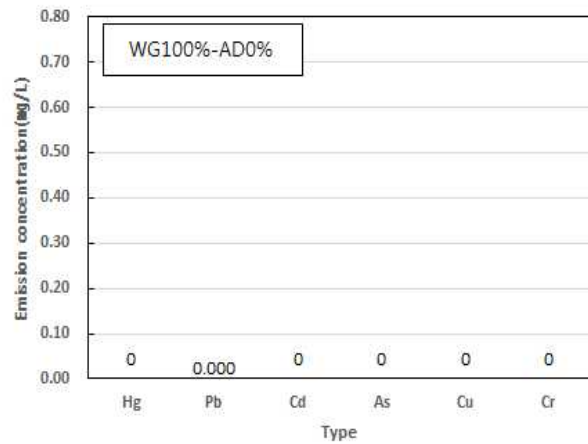
<그림 3.45> 중금속 용출 결과
(ANSI 67-2007a method pH5-AD 0%)



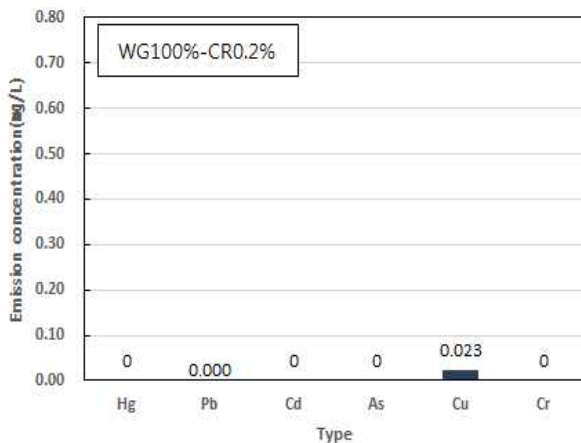
<그림 3.46> 중금속 용출 결과
(ANSI 67-2007a method pH5-AD 0.2%)



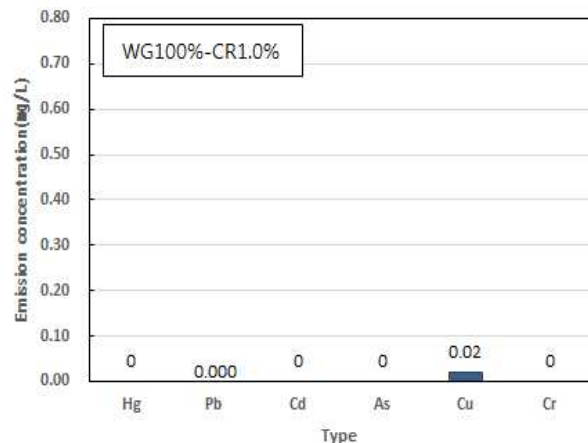
<그림 3.47> 중금속 용출 결과
(ANSI 67-2007a method pH5-AD 1%)



<그림 3.48> 중금속 용출 결과
(ANSI 67-2007a method pH10-AD 0%)



<그림 3.49> 중금속 용출 결과
(ANSI 67-2007a method pH10-AD 0.2%)



<그림 3.50> 중금속 용출 결과
(ANSI 67-2007a method pH10-AD 1%)

2. 차폐 채움재의 내구 성능 향상 연구

가. 차폐 채움재의 기본 배합 구성

- 원전구조물의 역학적 성능 개선을 위해서 고려되었던 배합조건을 나타내면 다음 <표 3.23>와 같음. <표 3.23>에 나타난 배합표는 콘크리트 배합을 기준으로, 따라서 본 연구에서는 차폐 채움재의 개발 형태를 결정하기 위하여 우선적으로 차폐 채움재를 모르타르 형태로 제작하여 성능 평가를 실시하고자 하였음.
- 차폐 채움재를 모르타르 형태로 제작하기 위하여 사용된 배합표는 <표 3.23>에 사용된 콘크리트 배합표에서 포함된 굵은 골재 사용량(부피비)을 제외하고 굵은 골재 부분을 일정한 비율로 각 사용재료에 균등 배분하여 배합표를 <표 3.24>와 같이 설계하였음. 또한 고밀도 폐유리의 잔골재 대체율은 부피비의 0, 25, 50, 75, 100으로 결정함.
- 따라서 본 연구에서 사용된 차폐 채움재의 모르타르 형태로 제작하기 위하여 사용된 배합표는 <표 3.24>와 같음. 그러나 사전 연구에서 사용된 물-결합재비 40%의 경우에는 물-결합재비 45%의 경우에 역학적 성능과 비교하였을 때 낮은 물-결합재비에서 오는 효과를 확인할 수 없었기 때문에 본 연구에서는 물-결합재비 35%의 경우와 45%의 경우만 고려하여 차폐 채움재 배합을 결정하였음.

<표 3.23> 콘크리트 배합표

Type	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					
		Water	Cement	Aggregate		FA	BFS
				Fine	Coarse		
35OPC	35	155	443	734	971	—	—
35FA20		155	354	720	952	89	—
35BFS50		155	221	700	926	—	221
35TB		155	221	699	925	89	133
40OPC	40	155	388	754	997	—	—
40FA20		155	310	741	980	78	—
40BFS50		155	194	724	958	—	194
40TB		155	194	723	957	78	116
45OPC	45	155	344	769	1018	—	—

<표 3.24> 모르타르 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)			
			Water	Cement	Aggregate	
					Fine	Glass
35OPC-0	35	0	252	721	1195	—
35OPC-25		25			897	352
35OPC-50		50			598	703
35OPC-75		75			299	1055
35OPC-100		100			—	1406
45OPC-0	45	0	260	578	1291	—
45OPC-25		25			968	380
45OPC-50		50			646	760
45OPC-75		75			323	1139
45OPC-100		100			—	1519

나. 전자폐기물 혼입 및 차폐 채움재 물성별 역학적 성능 분석

(1) 개요

○ 일반사항

- 본 연구는 고밀도 폐유리를 혼입하여 차폐 채움재의 개발을 목적으로 하고 있으며, 차폐 채움재의 기초 물성을 평가하기 위하여 역학적 성능 검토를 추진하고자 함. 차폐 채움재의 최종 적용형태를 결정하기에 앞서, 차폐 채움재를 모르타르 형태로 제작하여 그 성능을 우선적으로 평가하였음.

(2) 실험조건 및 시험체 제작

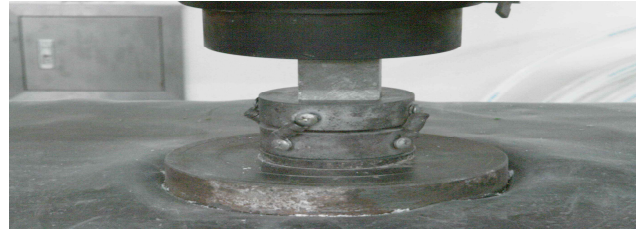
- 굳지 않는 모르타르의 반죽질기를 판단하기 위하여 플로우 테스트는 ASTM C 1437 (Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar)의 규정에 의거하여 수행하였으며, 그 실험 전경은 <그림 3.51>과 같음.
- 역학적 성능 평가에서 기본적인면서도 중요한 의미를 가지는 압축강도 시험은 50×50×50 mm의 입

방형 시험체를 제작하여 ASTM C 349 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars) 규정에 따라 측정 함. 본 연구에서 사용된 측정 장비는 일본 S사의 만능재료시험기(1000 kN)를 사용하였으며 재령 7일, 28일, 91일에 측정하였으며 <그림 3.52>에는 압축강도시험 전경을 나타냄.

- 휨강도 시험은 40×40×160 mm의 각주형 시험편을 제작하여 KS L ISO 679 (시멘트의 강도 시험방법)에 의거하여 각기둥의 양쪽 끝부분을 지지봉에 얹어 놓고 각기둥의 긴축이 지지봉과 직교하도록 공시체를 시험기(휨강도 시험을 위한 부속기구)에 놓은 뒤 각기둥의 반대측면 표면에 하중 봉을 수직으로 재하하고, 파괴에 이를 때까지 50 ± 10 N/s의 속도로 재하 함. 측정재령은 7일, 28일 91일이며, 실험 전경은 <그림 3.53>와 같음.



<그림 3.51> 플로우 테스트 실험 전경



<그림 3.52> 압축강도 실험 전경

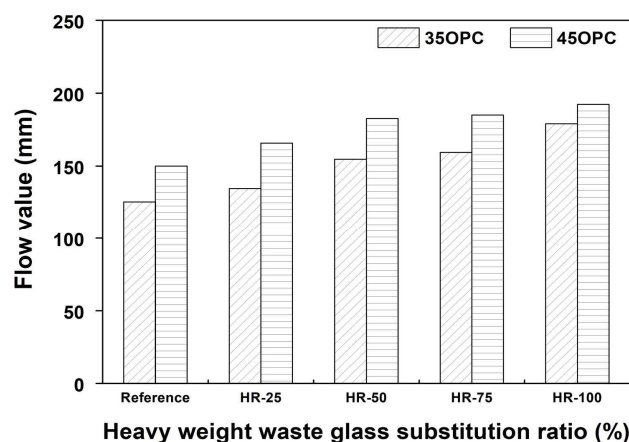


<그림 3.53> 휨강도 실험 전경

(3) 실험결과

○ 슬럼프

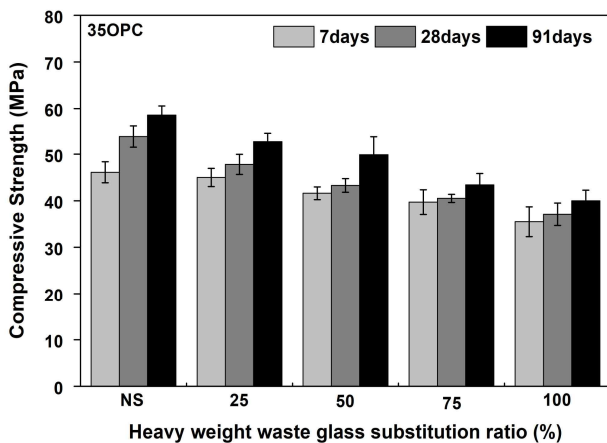
- <그림 3.54>에는 고밀도 폐유리를 혼입한 모르타르의 플로우 값 측정 결과를 나타냄. 실험결과, 고밀도 폐유리의 대체율이 증가함에 따라 물-결합재비에 상관없이 모두 플로우 값이 증가하는 것으로 나타남.
- 플로우 값은 고밀도 폐유리를 사용하지 않은 경우에 비해 5~40mm 까지 증가하는 것으로 나타났으며, 플로우 증가는 고밀도 폐유리의 표면 형태가 매끄럽기 때문인 것으로 판단됨. 따라서 추후 차폐채움재로 개발할 경우, 시공성능 확보가 용이할 것으로 사료 됨.



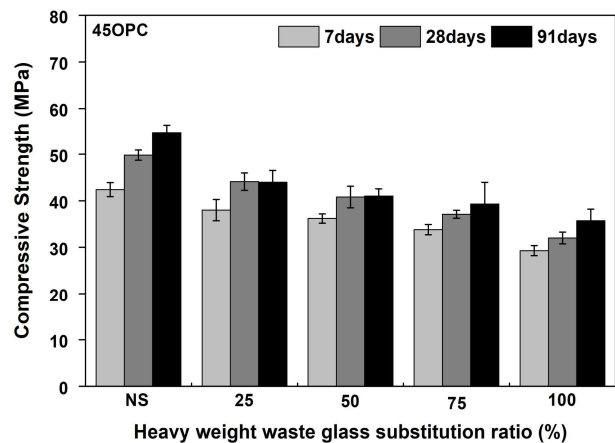
<그림 3.54> 플로우 측정 결과

○ 압축강도

- <그림 3.55>에는 고밀도 폐유리 혼입률 변화에 따른 압축강도 측정결과를 재령에 따라 나타내었음. 실험결과를 살펴보면, 우선, 고밀도 폐유리 대체에 관계없이 재령이 증가함에 따라 압축강도가 개선되는 일반적인 모르타르에 특성이 나타남.
- 또한, 물-결합재비가 낮을수록 강도개선이 우수하였으나, 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 고밀도 폐유리를 사용하지 않는 경우에 비하여 약 2.3~36% 수준까지 압축강도의 감소가 발생하였음. 모르타르의 강도감소 비율은 재령 증가와 함께 증가하였으며, 고밀도 폐유리를 대체하면 압축강도가 감소하는 것으로 판단됨.
- 이는 고밀도 폐유리의 표면상태가 일반적인 잔골재의 표면상태와 달리 매끄러워 시멘트 페이스트와 고밀도 폐유리의 부착력 저하에 기여한 것으로 사료되며, 이러한 연구 결과는 다수 연구자에 의해 발표된 바 있음. 뿐만 아니라 일부 연구에 의하면 고밀도 폐유리 분쇄에 의해 발생한 미세균열로 인해 강도 감소가 유발됨.



(a) 35OPC

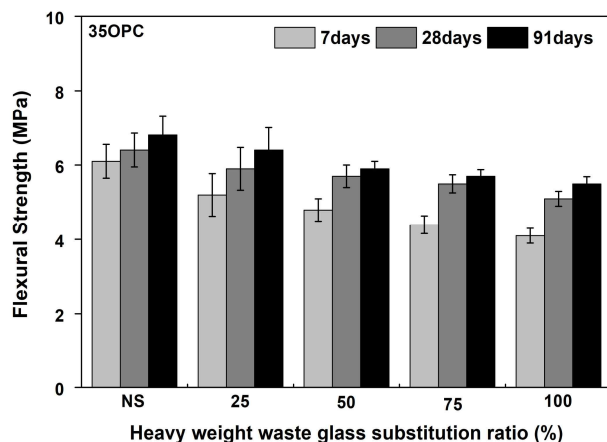


(b) 45OPC

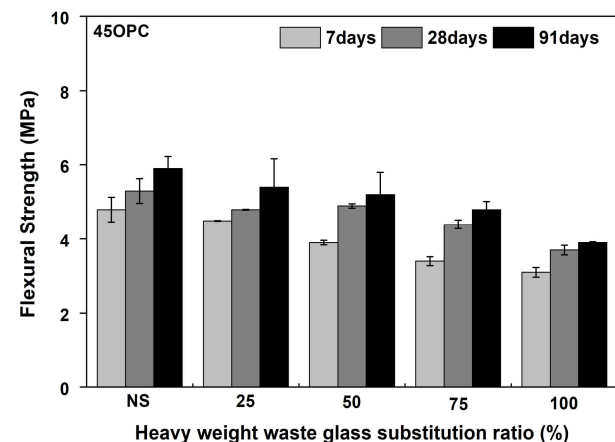
<그림 3.55> 압축강도 측정결과

○ 휨강도

- 한편, <그림 3.56>에는 휨강도 측정 결과를 나타냄. 휨강도 측정결과 고밀도 폐유리를 대체하게 되면 고밀도 폐유리를 대체 하지 않은 경우에 비하여 약 1~35%까지 휨강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 측정된 압축강도 실험결과와 동일한 경향을 나타내는 것으로 보임.



(a) 35OPC



(b) 45OPC

<그림 3.56> 휨강도 측정결과

다. 차폐 채움재의 급속 염화물 침투 저항성 시험 및 분석

(1) 개요

○ 일반사항

- 현재, 중·저준위 방사성폐기물 처분장은 해안가에 인접한 지하 80m 아래에 지하수가 존재하는 위치에 존재하는 지중구조물임. 따라서 반복적인 지하수에 노출될 환경에 놓여있을 뿐만 아니라, 인근지역에서 지하수 채취에 따른 담수 경계가 내륙으로 이동할 가능성에 관한 다양한 문제 제기가 있음.
- 특히, 내륙의 지하수에서 염화물 이온이 증가하는 현상이 발생할 가능성이 있으므로, 염해에 대한 내구연한을 평가하거나, 염화물에 의한 성능 저하를 검토하기 위하여 차폐 채움재의 급속 염화물 침투 저항성 평가를 진행해야할 것으로 보임.

(2) 실험계획 및 실험 변수

- <표 3.23>에 나타난 배합표는, 단위수량이 155 kg/m^3 이며, 일반적인 단위수량의 범위인 $170 \sim 180 \text{ kg/m}^3$ 보다 낮은 수량을 사용하기 때문에 본 연구에 동일하게 적용하게 되면 자기수축 및 수화열 발생을 유발할 가능성이 있음.
- 특히, 낮은 단위수량 사용으로 인해 시공성능 저하를 유발하며, 이의 개선을 위한 혼화제의 추가적인 검토가 요구됨. 따라서 본 연구에서는 차폐 채움재의 적용형태를 고려하기 위해서 콘크리트로 제작할 경우에는 단위수량을 170 kg/m^3 로 수정하여 배합을 결정하였음.
- 배합표는 <표 3.25>와 같으며, 이를 이용하여 제작된 시험체를 이용하여 급속염화물 침투 시험에 의한 염화물 저항성을 평가하였음.

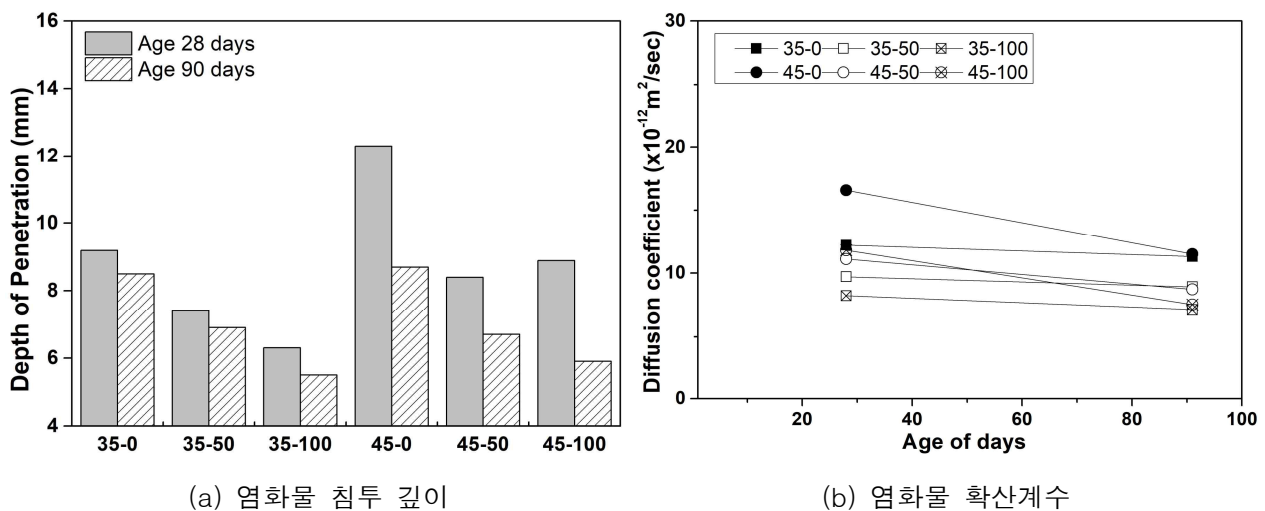
<표 3.25> 콘크리트 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m^3)				
			Water	Cement	Aggregate		
					Coarse	Fine	Glass
35-0	35	0	167	477	999	673	0
35-50		50				337	388
35-100		100				0	777
45-0	45	0	170	378	1008	738	0
45-50		50				369	426
45-100		100				0	851

- 또한, 고밀도 폐유리의 대체율은 50, 100%로 잔골재의 부피비로 결정하고 고밀도 폐유리를 대체하지 않은 시험체도 함께 제작하였으며, 측정 재령은 28일, 91일임.
- 염화물 침투 저항성 실험은 Tang& Nisson이 제안한 전기촉진에 의한 급속 염화물 침투 시험법을 토대로 진행하였으며, $\varnothing 100 \times 200$ (mm)로 제작된 시험체로부터 $\varnothing 100 \times 50$ (mm)크기의 중앙부위를 채취하여 (-)극에는 3%의 NaCl 수용액을, (+)극에는 0.3N의 NaOH 수용액을 설치하여 8시간 동안 30V의 전압을 가하여 1시간 마다 온도변화를 기록함.
- 또한, 확산계수 산정방법에 따라 확산계수를 산정하였으며, 침투 깊이의 측정은 질산은 변색법을 이용하여 시편을 할렬한 후, 0.1N 의 AgNO_3 용액을 분무하여 변색된 부분을 염화물 침투 깊이로 산정함.

(3) 실험 결과

- <그림 3.57>에는 급속 염화물 침투 시험을 실시한 후 측정된 콘크리트 시험체의 염화물 침투깊이와 침투깊이 및 용액의 온도 등을 이용하여 계산된 염화물 확산계수를 나타내었음.
- 실험결과 물-결합재비가 낮을수록, 재령이 증가할수록 염화물 침투깊이 및 염화물 확산계수가 모두 감소하는 일반적인 콘크리트의 특성을 나타내었음.
- 한편, 고밀도 폐유리의 대체율이 증가함에 따라 염화물 침투깊이가 감소하고 염화물 확산계수가 개선되는 것으로 나타났으며, 이러한 이유는 고밀도 폐유리가 일반 잔골재에 비해 공극이 적고 균질하기 때문에, 염화물 확산이 용이하지 않아 염화물 침투 저항성이 개선된 것으로 사료됨.
- 따라서 염해환경에 노출 될 가능성이 있는 차폐 채움재의 염화물 저항성은 기존 콘크리트보다 우수한 것으로 판단되며, 차후 방사성폐기물 처분장의 환경변화에 따른 염해 노출조건에서도 차폐 채움재는 일정수준 이상의 염화물 침투 저항성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

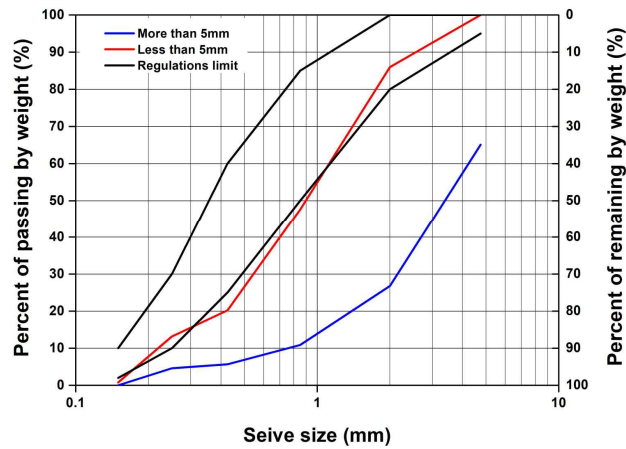


<그림 3.57> 염화물 침투 저항성 평가 결과

라. 고밀도 폐유리를 차폐 채움재의 최적재료로 사용하기 위한 배합설계

(1) 개요

- 1차년도에는 항목 “가“에 나타난 바와 같이, 차폐 채움재의 형태를 결정하기 위하여 우선적으로 고밀도 폐유리를 잔골재로 적용하여 모르타르 형태로 제작하여 차폐 채움재의 성능 검토를 수행하였음. 일반적으로 모르타르는 5mm 체를 통과하는 골재인 잔골재와 시멘트, 물로 구성된 것으로, 5mm 이상의 직경을 갖는 굵은 골재 유무에 따라 콘크리트와 구별하고 있음.
- 그러나 <그림 3.58>에 나타난 바와 같이, 고밀도 폐유리를 jaw-crusher로 분쇄한 직후의 입도분포 곡선을 살펴보면, 5 mm 체에 잔존하는 고밀도 폐유리의 양은 전체 분쇄량의 약 30%를 차지하고 있음. 5 mm를 포함하는 고밀도 폐유리의 조립률은 4.78이며, 이는 일반적으로 사용되는 잔골재의 조립률의 범위를 크게 넘어서고 있기 때문에 본 연구팀에서는 분쇄된 고밀도 폐유리의 5 mm 잔존부분을 제거하여 <그림 3.58>에 나타난 5 mm 미만의 고밀도 폐유리만 사용하여 조립률이 3.23인 폐유리를 사용하였음.
- 그러나 5 mm 체를 통과하지 못하는 고밀도 폐유리를 전량 폐기하거나, 추가적인 분쇄작업을 수행할 경우에는 고밀도 폐유리의 추가처리에 대한 비용 증가가 예상되므로, 5 mm체에 잔존하는 고밀도 폐유리의 적절한 활용방안을 모색해야 할 것으로 판단됨.



<그림 3.58> 분쇄된 고밀도 폐유리의 입도분포 곡선

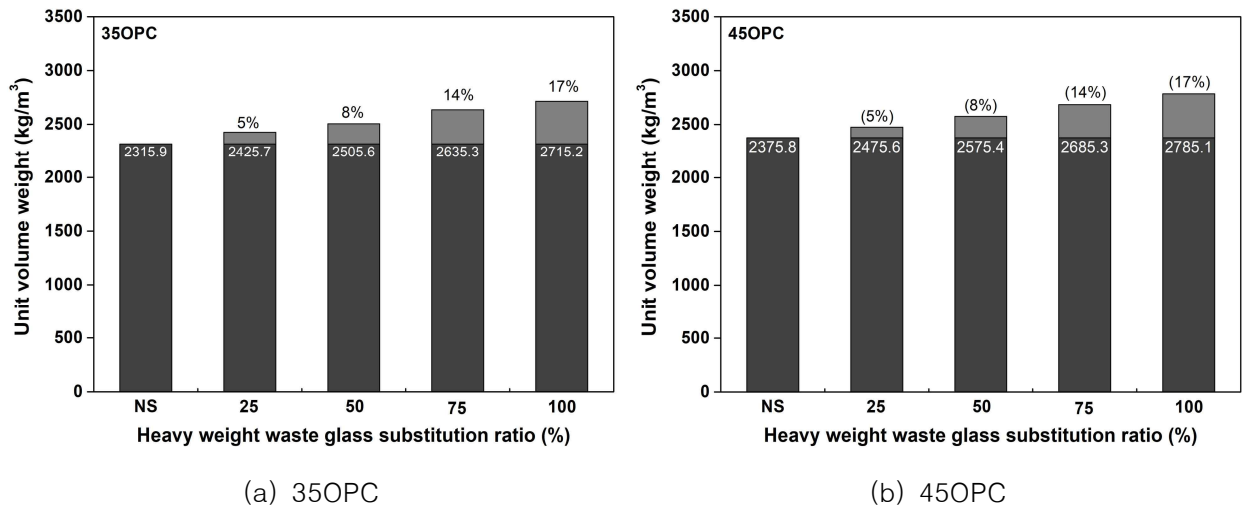
(2) 1차년도 배합설계에 대한 검토

- <표 3.26>에는 현재 고밀도 폐유리를 적용한 차폐 채움재의 배합표를 나타내었으며, 공기량을 제외하여 총 체적이 950 m³이고, 각 재료의 무게를 더하여 나타낸 차폐 채움재의 무게를 함께 나타내었음.
- <표 3.26>을 살펴보면, 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 차폐 채움재의 질량증가가 가능한 것으로 나타났으며, 다수 연구자들에 의하면, 차폐 채움재의 질량증가에 따라 차폐 성능 개선이 진행되는 것으로 밝혀졌음.
- 따라서 차폐 채움재는 일정수준의 역학적, 내구적 성능확보와 더불어 차폐 성능 개선을 위하여 질량을 증가시킬 수 있는 배합설계가 필요한 것으로 판단됨.

<표 3.26> 차폐 채움재의 기존 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)				Unit weight (kg/m ³)	Volume (m ³)
			Water	Cement	Sand	Waste glass		
35OPC-0	35	0	252	721	1195	0	2168	950
35OPC-25		25			897	352	2222	
35OPC-50		50			598	703	2274	
35OPC-75		75			299	1055	2327	
35OPC-100		100			0	1406	2379	
45OPC-0	45	0	260	578	1291	0	2129	
45OPC-25		25			968	380	2186	
45OPC-50		50			646	760	2244	
45OPC-75		75			323	1139	2300	
45OPC-100		100			0	1519	2357	

- 따라서 차폐 채움재의 질량 증가를 위해 밀도가 높은 고밀도 폐유리의 혼입비율을 증가시키는 방안이 있음. 고밀도 폐유리의 혼입비율을 증가시키기 위해 우선 1차년도에서는 잔골재의 부피비로 대체하여 사용하여 시험체를 제작하였으며, 잔골재 대체에 따른 질량증가율은 <그림 3.59>과 같으며 <표 3.26>의 배합표를 토대로 제작된 모르타르의 단위 중량 측정 결과를 나타내었음.



<그림 3.59> 단위용적질량

- <그림 3.59>을 살펴보면, 고밀도 폐유리 대체율이 증가함에 따라 배합표와 마찬가지로 단위질량이 비례적으로 증가하는 것으로 나타남. 또한, 배합표에 나타난 단위질량과 실제 측정결과를 비교하기 위하여 <표 3.27>에는 배합표에 의한 단위질량 계산결과와 시험체를 제작하여 측정된 단위질량 측정 결과를 비교하였으며, 차폐 채움재 시험체의 실제 측정된 단위질량과 고밀도 폐유리를 혼입하지 않은 모르타르 단위질량에 대한 비율을 함께 나타내었음.

<표 3.27> 차폐 채움재 단위질량의 계산 값과 실험 값 비교

Type	Unit weight of test results (kg/m³)	Ratio of unit weight of test results of calculate results (%)
35OPC-0	2375.8	109.6
35OPC-25	2475.6	114.2
35OPC-50	2575.4	118.8
35OPC-75	2685.3	123.9
35OPC-100	2785.1	128.5
45OPC-0	2315.9	108.8
45OPC-25	2425.7	113.9
45OPC-50	2505.6	117.7
45OPC-75	2635.3	123.8
45OPC-100	2715.2	127.5

- <표 3.27>을 살펴보면, 배합표를 토대로 계산된 단위질량에 비하여 실제 제작된 시험체의 단위질량이 최소 9.6%에서 최대 28.5%까지 증가한 것으로 나타남. 이는 차폐 채움재에 포함된 실제 공기량에 의해 개선된 것으로 보여지며, 특히 배합표에 나타난 바와 같이 가정된 공기량으로 계산하였기 때문에 실제 측정값과 배합표를 토대로 계산된 값의 차이가 존재하는 것으로 보임.
- 즉, 실제로 제작된 차폐 채움재의 단위질량은 배합표에 의해 계산된 단위질량보다 증가할 수 있으며, 추후 고밀도 폐유리의 대체율이 증가함에 따라 단위질량 역시 비례적으로 증가할 것으로 예상됨.

- 차폐 채움재의 개발 형태 및 고밀도 폐유리의 효율적인 활용을 위해서는 고밀도 폐유리의 사용량을 증가시키는 것이 필요하므로, 전체 배합에서 차지하는 골재 부분의 비율을 할증하고, 물-결합재비는 고정하지만 총 체적이 950 m³을 만족하기 위하여 물-결합재비의 비율을 감소시키는 배합설계를 진행하였으며, 그 결과를 나타내면, 다음 <표 3.28>~<표 3.32>과 같음.
- <표 3.28>를 살펴보면, 배합표를 통해 계산된 일반 모르타르의 단위질량에 비하여 질량증가비율은 약 1.1~11.9%로 나타났으나, 실제 실험결과를 토대로 예상할 경우, 실제 제작되는 차폐 모르타르의 단위질량은 기존대비 28.5% 이상 증진될 것으로 예상되므로, 골재 비율을 할증함에 따라 단위질량 개선이 가능한 것으로 나타남.
- 이러한 경향은 <표 3.29>~<표 3.32>에 나타난 바와 같이 골재비율이 증가함에 따라 그 증가량이 더욱 증가할 것으로 보임. 따라서 2차년도에서는 <표 3.28>~<표 3.32>에 나타난 배합표를 토대로 차폐 채움재의 역학적, 내구적, 차폐적 성능 검증에 관한 연구를 수행할 예정임.

<표 3.28> 골재 비율 10% 할증시킨 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)				Unit weight (kg/m ³)	Volume (m ³)
			Water	Cement	Sand	Waste glass		
35OPC-0	35	0	228	650	1316	0	2194	950
35OPC-25		25			987	387	2252	
35OPC-50		50			658	774	2310	
35OPC-75		75			329	1161	2368	
35OPC-100		100			0	1548	2426	
45OPC-0	45	0	222	492	1459	0	2173	
45OPC-25		25			1094	429	2237	
45OPC-50		50			729	858	2302	
45OPC-75		75			365	1287	2366	
45OPC-100		100			0	1716	2430	

<표 3.29> 골재 비율 20% 할증시킨 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)				Unit weight (kg/m ³)	Volume (m ³)
			Water	Cement	Sand	Waste glass		
35OPC-0	35	0	203	580	1436	0	2218	950
35OPC-25		25			1077	422	2282	
35OPC-50		50			718	845	2345	
35OPC-75		75			359	1267	2408	
35OPC-100		100			0	1689	2472	
45OPC-0	45	0	191	425	1592	0	2207	
45OPC-25		25			1194	468	2277	
45OPC-50		50			796	936	2348	
45OPC-75		75			398	1404	2418	
45OPC-100		100			0	1872	2488	

<표 3.30> 골재 비율 30% 할증시킨 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)				Unit weight (kg/m ³)	Volume (m ³)
			Water	Cement	Sand	Waste glass		
35OPC-0	35	0	178	509	1555	0	2243	950
35OPC-25		25			1167	457	2312	
35OPC-50		50			778	915	2380	
35OPC-75		75			389	1372	2449	
35OPC-100		100			0	1830	2518	
45OPC-0	45	0	161	357	1724	0	2242	
45OPC-25		25			1293	507	2318	
45OPC-50		50			862	1014	2394	
45OPC-75		75			431	1521	2470	
45OPC-100		100			0	2028	2546	

<표 3.31> 골재 비율 40% 할증시킨 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)				Unit weight (kg/m ³)	Volume (m ³)
			Water	Cement	Sand	Waste glass		
35OPC-0	35	0	154	439	1675	0	2268	950
35OPC-25		25			1256	493	2342	
35OPC-50		50			837	985	2416	
35OPC-75		75			419	1478	2490	
35OPC-100		100			0	1971	2563	
45OPC-0	45	0	130	289	1857	0	2276	
45OPC-25		25			1393	546	2358	
45OPC-50		50			928	1092	2440	
45OPC-75		75			464	1638	2522	
45OPC-100		100			0	2184	2604	

<표 3.32> 골재 비율 50% 할증시킨 배합표

Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit weight(kg/m ³)				Unit weight (kg/m ³)	Volume (m ³)
			Water	Cement	Sand	Waste glass		
35OPC-0	35	0	129	369	1795	0	2293	950
35OPC-25		25			1346	528	2372	
35OPC-50		50			897	1056	2451	
35OPC-75		75			449	1583	2530	
35OPC-100		100			0	2111	2609	
45OPC-0	45	0	100	221	1989	0	2310	
45OPC-25		25			1492	585	2398	
45OPC-50		50			995	1170	2486	
45OPC-75		75			497	1755	2574	
45OPC-100		100			0	2341	2661	

마. 기초 실험을 통한 최적의 고밀도 폐유리 할증 비율 선정

(1) 개요

- 1차년도에서 계획한 대로 고밀도 폐유리의 재활용율을 높이고 채움재의 밀도 상승을 높이기 위해 골재 혼입 비율을 할증하여 모르타르 배합을 실시하였음. 물-시멘트비는 35, 45% 이고, 고밀도 폐유리 혼입율을 0, 100% 이며, 할증 비율은 0, 20, 30, 40, 50% 임. 모르타르의 플로우, 밀도, 압축강도를 측정하여 최적의 할증율을 선정하였음. 사용된 배합표를 <표 3.33>에 나타내었음.

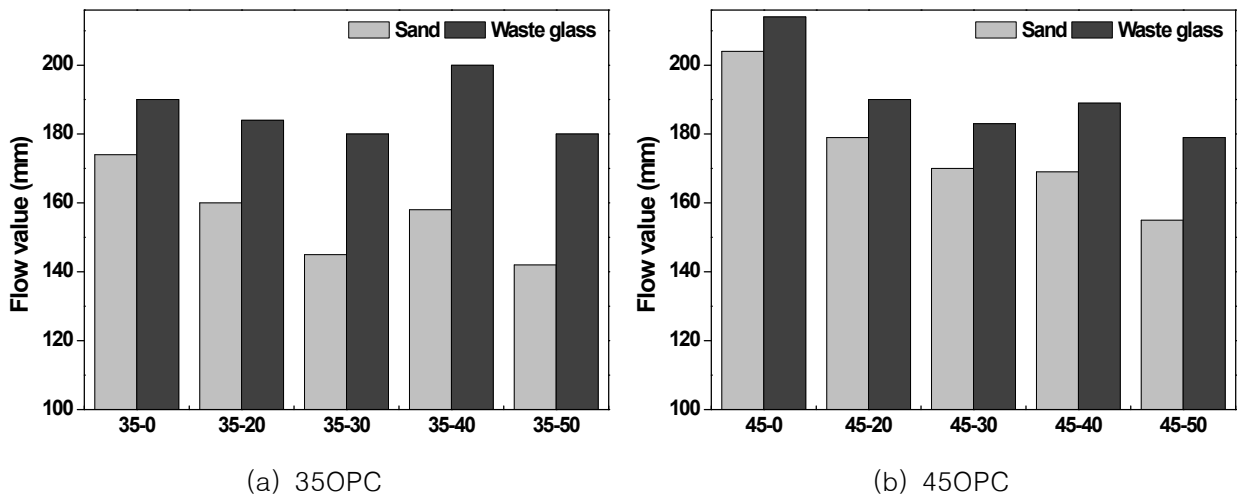
<표 3.33> 골재 비율을 할증시킨 모르타르 배합표

Type	S/C (%)	Increasing ratio of Fine Aggregate (%)	Content of H.G (%)	Unit weight(kg/m ³)				W.R.A (C×%)
				Water	Cement	Sand	Waste glass	
35-OPC-0-S	1.41	0	0	289	826	1166	-	0.30
35-OPC-0-H	1.63		100			-	1346	
35-OPC-20-S	1.69	20	0	266	758	1284	-	0.40
35-OPC-20-H	1.96		100			-	1482	
35-OPC-30-S	1.84	30	0	255	728	1336	-	0.45
35-OPC-30-H	2.12		100			-	1542	
35-OPC-40-S	1.97	40	0	245	701	1384	-	0.70
35-OPC-40-H	2.28		100			-	1597	
35-OPC-50-S	2.12	50	0	236	675	1429	-	0.70
35-OPC-50-H	2.44		100			-	1649	
45-OPC-0-S	1.95	0	0	296	659	1286	-	0.00
45-OPC-0-H	2.25		100			-	1483	
45-OPC-20-S	2.34	20	0	270	599	1404	-	0.00
45-OPC-20-H	2.70		100			-	1620	
45-OPC-30-S	2.54	30	0	258	574	1456	-	0.30
45-OPC-30-H	2.93		100			-	1679	
45-OPC-40-S	2.73	40	0	247	550	1503	-	0.50
45-OPC-40-H	3.15		100			-	1734	
45-OPC-50-S	2.93	50	0	238	528	1547	-	0.50
45-OPC-50-H	3.38		100			-	1784	

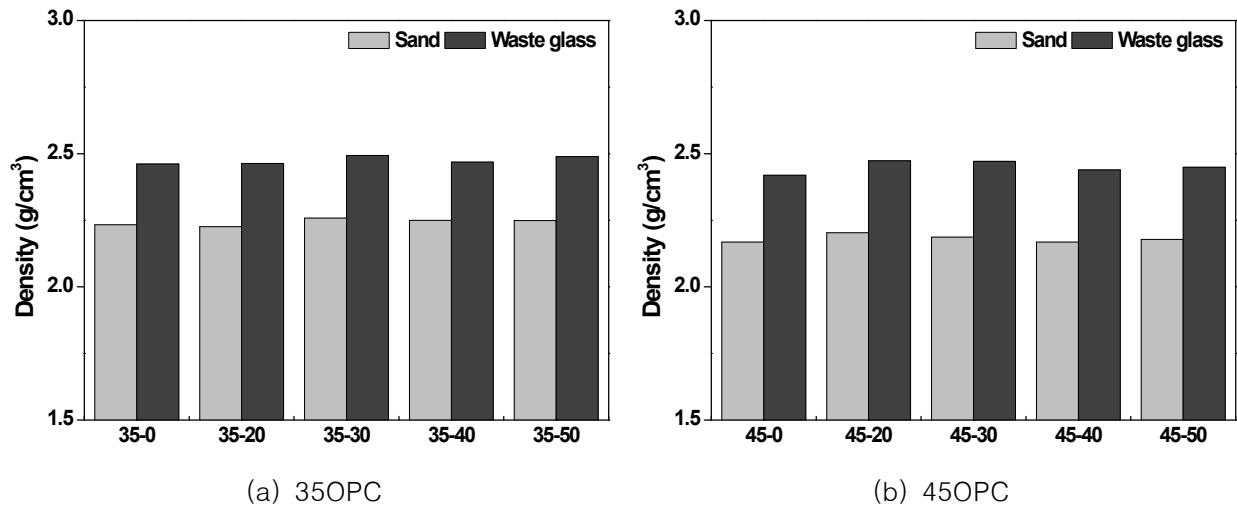
(2) 모르타르의 기초실험을 통한 최적 배합 선정

- 고밀도 폐유리를 할증시킨 모르타르의 밀도와 플로우 값을 <그림 3.60>~<그림 3.61>에 나타내었음. 고밀도 폐유리가 혼입되면 배합에 관계없이 플로우 값은 증가하였으며, 밀도는 30% 할증이 가장 큰 값을 나타내었으나, 차이는 크지 않았음.
- 모르타르의 압축강도 결과를 <그림 3.62>에 나타내었음. 골재 비율이 할증됨에 따라 강도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 할증 비율 30% 이상에서 감소 폭은 더 크게 나타났음.

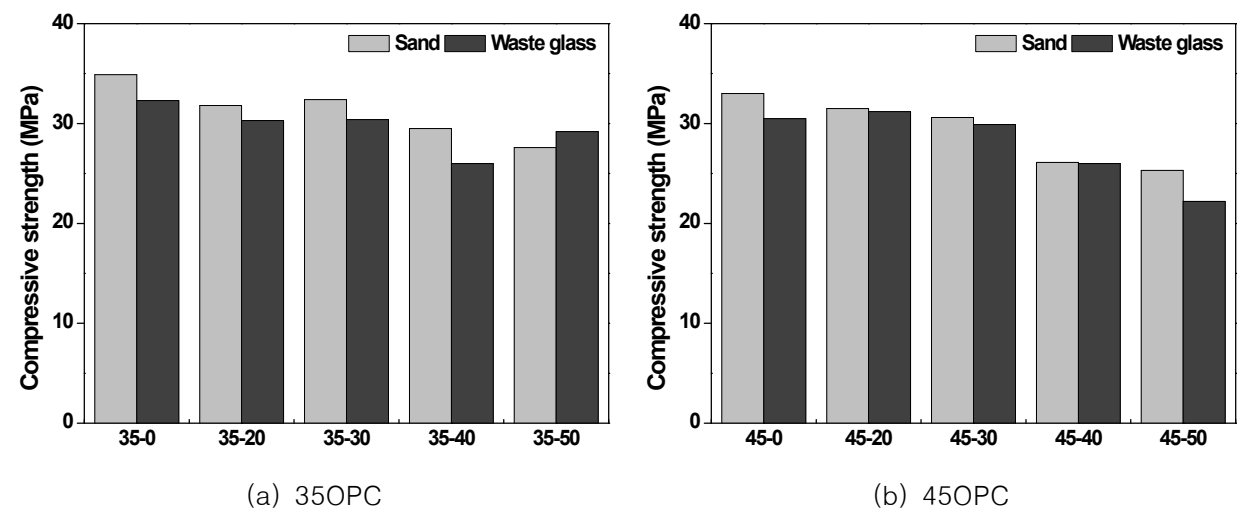
- 위 기초 실험결과를 토대로, 본 연구진은 최적의 골재 할증 비율을 30%로 결정하였으며, 결정된 배합표를 사용하여 모르타르 채움재의 내구성 실험을 진행하였음.



<그림 3.60> 기초실험 결과_플로우 값



<그림 3.61> 기초실험 결과_밀도



<그림 3.62> 기초실험 결과_압축강도

바. 고밀도 폐유리를 혼입한 차폐 채움재의 내구 성능 평가

(1) 개요

- 기초실험을 통한 최적의 고밀도 폐유리 함량 비율을 선정하였으며, 선정된 배합을 사용하여 모르타르 차폐 채움재의 내구 성능을 평가하였음. 물-시멘트비는 35, 45% 이며, 고밀도 폐유리 대체율은 0, 100%로 결정하였음. 광물질 혼화재에 의한 영향을 평가하기 위해 플라이애시(FA)와 고로 슬래그(BFS)를 시멘트 질량대비 각각 20%, 30% 대체하였음. 사용된 결합재의 물리·화학적 특성을 <표 3.34>에, 모래와 고밀도 폐유리의 특성을 <표 3.35>에, 결정된 배합을 <표 3.36>에 나타내었음.

<표 3.34> 결합재의 물리·화학적 특성

Properties		Material		
		OPC	FA	BFS
Physical	Specific gravity	3.15	2.19	2.92
	Blaine (cm ² /g)	3,350	3,300	6,330
Chemical (%)	SiO ₂	21.7	51.7	33.5
	Al ₂ O ₃	5.7	21.5	15.2
	Fe ₂ O ₃	3.2	3.2	0.5
	CaO	63.1	1.1	43.9
	MgO	2.8	—	2.95
	SO ₃	2.2	—	1.72
	LOI	—	2.56	0.11

<표 3.35> 잔골재의 물리적 특성

Type	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Natural sand	2.60	1.01	2.48
Waste glass	3.00	0.00	3.34

<표 3.36> 차폐 채움재 배합표

Type	S/B (%)	W/B (%)	Content of H.G (%)	Unit weight(kg)						W.R.A (C×%)
				W	C	BFS	FA	S	H	
35-OPC-S	1.84	35	0	255	728	—	—	1336	—	0.45
35-OPC-H	2.12		100					—	1542	
35-BFS-S	1.84		0	255	510	218	—	1336	—	
35-BFS-H	2.12		100					—	1542	
35-FA-S	1.84		0	255	583	—	146	1336	—	
35-FA-H	2.12		100					—	1542	
45-OPC-S	2.54	45	0	258	574	—	—	1456	—	0.30
45-OPC-H	2.93		100					—	1679	
45-BFS-S	2.54		0	258	402	172	—	1456	—	
45-BFS-H	2.93		100					—	1679	
45-FA-S	2.54		0	258	459	—	115	1456	—	
45-FA-H	2.93		100					—	1679	

※ S: Natural Sand, H: Heavyweight waste glass, W.R.A: Water reducing agent

(2) 알칼리-실리카 반응 실험 (ASR test)

○ 실험개요

- 알칼리-실리카 반응은 시멘트 속의 알칼리 성분과 골재 속의 실리카 성분이 반응하여 팽창성 물질인 알칼리-실리카겔을 형성한 후 실리카겔이 콘크리트에 포함된 수분을 흡수하여 팽창되는 것을 말함. 이 때 팽창량 증가는 콘크리트의 균열 발생을 유도하게 되며, 궁극적으로는 콘크리트의 내구성능 저하를 유발함.
- 특히, 실리카 광물을 함유하고 있는 유리질 골재 사용에 의한 알칼리-실리카 반응으로 인하여 콘크리트의 팽창을 유발하기 때문에 유리질 골재를 사용할 경우, 반드시 ASR에 의한 위험도 평가를 수반해야함.

○ 실험방법

- ASTM C 1260의 경우, 높은 알칼리를 띄는 NaOH 수용액과 높은 온도(80℃)의 실험 조건 때문에 상대적으로 엄격하며, 14일이라는 시간동안 진행되는 실험으로 인해 상대적인 편리성을 확보하였기 때문에 본 연구에서는 폐유리의 ASR에 대한 영향을 평가하기 위해서 ASTM C 1260 기준에 따라 실험을 진행하였음. <표 3.37>와 <표 3.38>에 실험에 사용된 골재규격과 배합표를 나타내었음.
- 실험에는 일반 모래와 고밀도 폐유리를 골재로 사용하였으며, 파쇄하여 ASTM C 1260에서 제시하는 골재 규격에 맞춰 준비하였음. 배합표는 ASTM C 1260에 제시되어 있는 배합을 사용하였음.

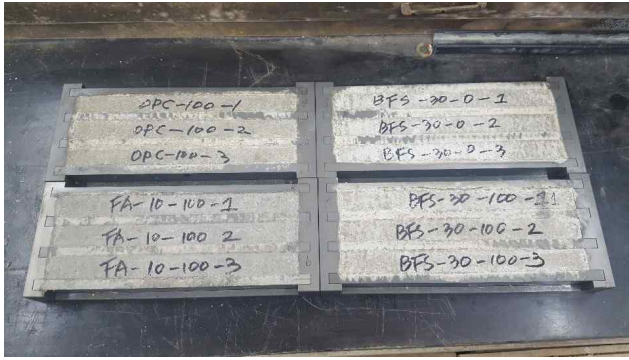
<표 3.37> 골재 규격

골 재 규 격		중량비 (%) (무게)
통과 체 규격	잔류 체 규격	
4.75 mm (No.4)	2.36 mm (No.8)	10 (99.0 g)
2.36 mm (No.8)	1.18 mm (No.16)	25 (247.5 g)
1.18 mm (No.16)	600 μ m (No.30)	25 (247.5 g)
600 μ m (No.30)	300 μ m (No.50)	25 (247.5 g)
300 μ m (No.50)	150 μ m (No.100)	15 (148.5 g)
합 계		100 (990 g)

<표 3.38> ASR 배합표

Type	C	BFS	FA	S	H	W
OPC-0	440 g	-	-	990 g	-	206.8 g
OPC-100		-	-	-	990 g	
BFS-0	308 g	132 g	-	990 g	-	
BFS-100			-	-	990 g	
FA-0	352 g	-	88 g	990 g	-	
FA-100		-		-	990 g	

- ASR 실험에 사용된 시험체는 25×25×285 mm의 각주형 시험체를 사용하였으며, 각 배합당 3개씩의 시편을 제작함. 타설 24시간 후 탈형하고, 그 후 24시간 동안 80 ℃의 증류수에서 양생한 후, 80 ℃의 밀폐된 1N NaOH 수용액 안에 14일간 양생하여 길이변화를 측정함. 길이변화의 측정은 저장된 용기에서 꺼낸 후 15±5초 내에 길이변화 측정기를 이용하여 측정함. <그림 3.63>, <그림 3.64>에는 ASR 실험 전경을 나타냄.



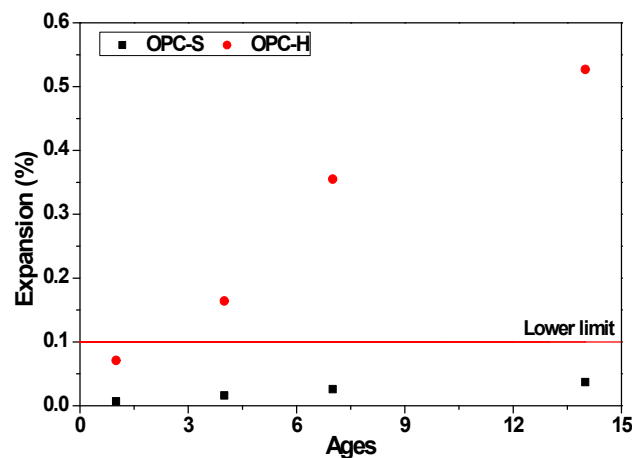
<그림 3.63> ASR 실험 전경



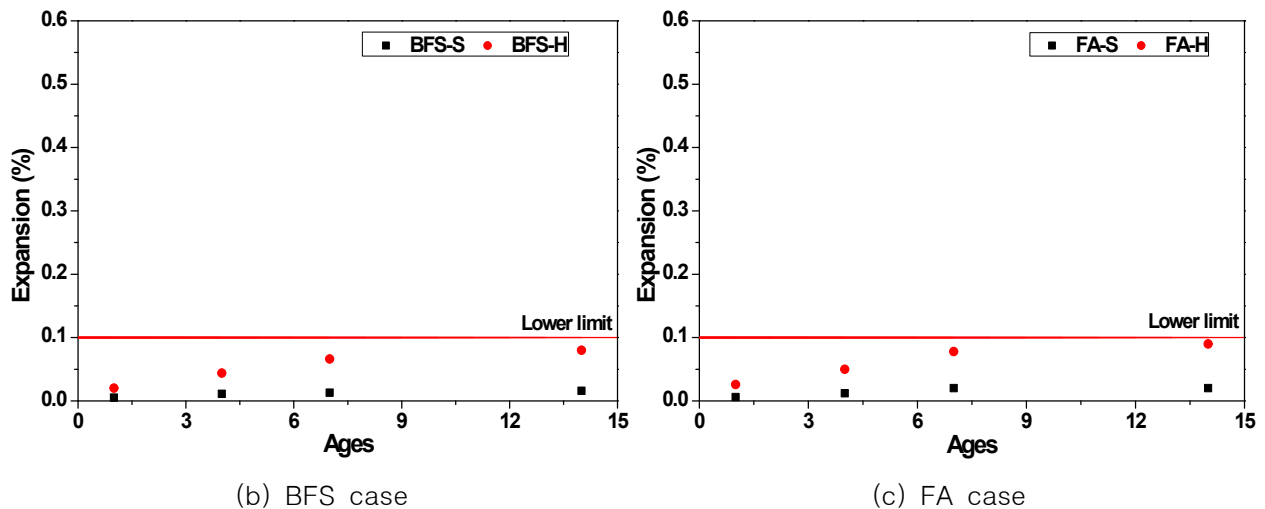
<그림 3.64> ASR 길이 변화

○ 실험결과

- <그림 3.65>에는 골재로 고밀도 폐유리를 사용하고 고로 슬래그와 플라이애시를 각각 30%, 20% 대체한 모르타르의 알칼리-실리카 반응에 의한 길이 변화 측정 결과를 나타내었음. ASTM C 1260 기준에서 알칼리-실리카 반응에 의한 유해성 판단 기준은 알칼리-실리카 반응 실험 종료 후 팽창율이 0.1%이하면 대부분의 상황에서 무해함을 나타냄. 팽창율이 0.1~0.2%이면 현장조건에 따라 무해할 수도 유해할 수도 있음을 나타내고, 팽창율이 0.2%이상이면 잠재적으로 유해한 팽창을 나타냄.
- 실험결과를 살펴보면, OPC의 경우 일반 모래를 사용하였을 경우에는 최종 팽창율이 0.1% 미만이었으나, 고밀도 폐유리 혼입 모르타르의 경우에는 0.5% 이상의 팽창율을 나타내 알칼리-실리카 반응에 유해함을 알 수 있음. 그러나 혼화재인 BFS나 FA를 혼입한 경우에는 일반 모래와 고밀도 폐유리 모두 최종 팽창율이 0.1% 미만으로 나타났음.
- 기존 연구에서 알려진 것처럼, BFS나 FA 같은 광물질 혼화제는 ASR 팽창을 감소시키는데 효과적임을 확인할 수 있었음. 따라서 고밀도 폐유리를 혼입하여 사용할 경우에는 ASR에 의한 팽창을 제어하기 위해 반드시 광물질 혼화제를 혼입하여야 될 것으로 판단됨.



(a) OPC case



<그림 3.65> ASR 실험 결과

(3) 차폐 채움재의 플로우 실험

○ 실험개요

- 차폐 채움재의 경우, 방사성 폐기물 드럼통 등의 내부 채움재로서 사용을 할 예정이므로 일정 수준 이상의 플로우 값을 확보하는 것이 필요함.

○ 실험방법

- 모르타르의 플로우 실험은 KS L 5105 기준에 따라 수행하였으며, <표 53>에 제시된 배합표를 이용하여 배합을 실시하였음. 감수제(W.R.A)의 경우 기초실험을 통하여 고밀도 폐유리 혼입시 플로우 값이 180 mm 이상의 수준이 되도록 감수제 혼입량을 결정하였음. 혼화제에 의한 영향을 파악하기 위해 동일 W/B비에는 동일한 양의 감수제를 사용하였음. <그림 3.66>에 플로우 실험 장비를 <그림 3.67>에 실험 전경을 나타내었음.



<그림 3.66> 플로우 실험 장비

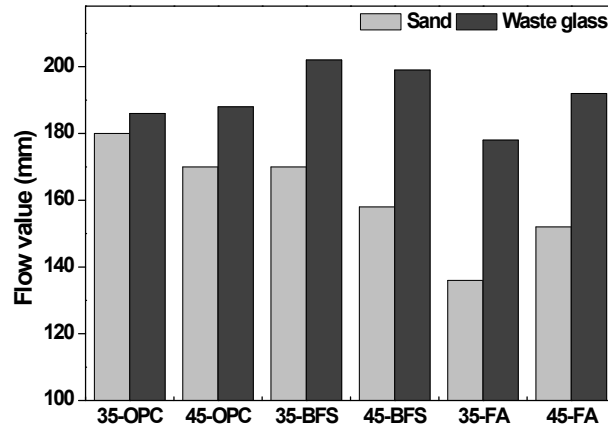


<그림 3.67> 플로우 실험 전경

○ 실험결과

- <그림 3.68>에 모르타르의 플로우 실험 결과를 나타내었음. 실험결과를 살펴보면, 모르타르의 플로우 값은 모든 배합에서 고밀도 폐유리가 혼입되면 증가하는 경향을 나타내었음. 고밀도 폐유리의 매끄러운 표면과 낮은 흡수율 등의 기본 물성과 사용된 잔골재의 밀도가 플로우에 영향을 주었을 것으로 판단됨.
- 한편, 고밀도 폐유리 혼입에 의한 플로우 값의 증가율은 OPC 보다 BFS나 FA를 혼입하였을 때, 상대적으로 더 컸음. 혼화제의 분말도와 형태가 영향을 주었을 것으로 판단됨. 고밀도 폐유리 혼

입시의 플로우 값은 모든 배합에서 180 mm 이상으로 차폐 채움재로의 유동성은 충분히 확보된 것으로 판단됨.



<그림 3.68> 플로우 실험 결과

(4) 차폐 채움재의 강도 특성

○ 실험방법

- 고밀도 폐유리와 혼화재가 혼입된 차폐 채움재의 압축 강도 및 휨 강도를 재령 7일, 28일, 91일에 측정하였음. 강도 실험은 ASTM C 348과 ASTM C 349에 따라 수행하였으며, 시험체는 40×40×160 mm 크기의 각주형 시험체를 사용하였음. 휨 강도는 3개의 시험체를 ASTM C 349에 따라 측정하였으며, 휨 강도 후 파단된 시험체 6개를 이용하여 ASTM C 348에 따라 압축강도를 측정하였음. <그림 3.69>에 압축강도 실험 전경을, <그림 3.70>에 휨 강도 실험 전경을 나타내었음.



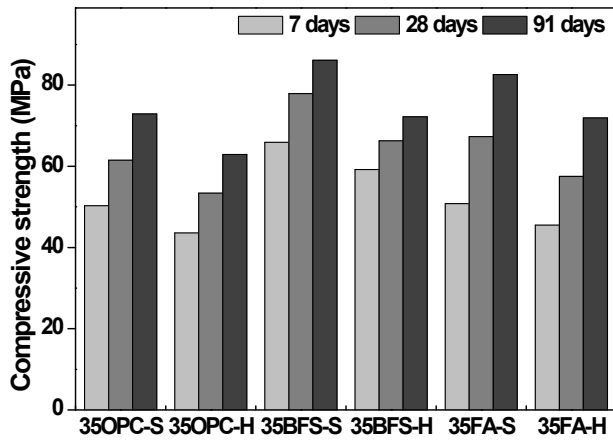
<그림 3.69> 압축강도 실험 전경



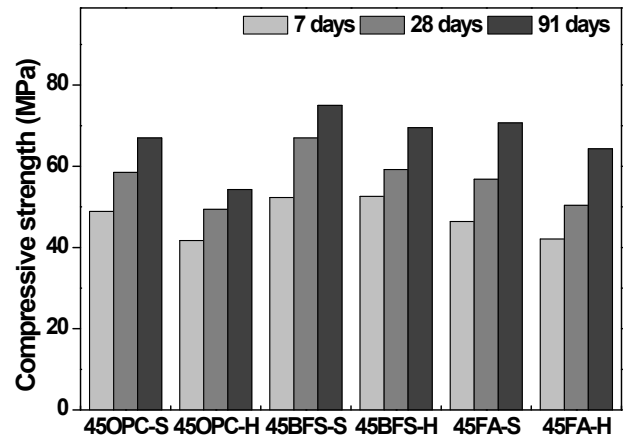
<그림 3.70> 휨 강도 실험 전경

○ 실험결과

- <그림 3.71>에 압축강도 실험 결과를 W/B 별로 구분하여 나타내었으며, <그림 3.72>에 휨 강도 실험 결과를 W/B 별로 구분하여 나타내었음. 실험결과를 보면, 압축강도와 휨 강도는 재령이 증가함에 따라 증가하였고, 고밀도 폐유리를 혼입하면 감소하였음. 폐유리의 매끄러운 표면이 시멘트 페이스트와의 접착력을 방해하여 강도를 감소시킨 것으로 판단됨. 한편, 혼화재를 혼입하면 대부분 OPC보다 우수한 강도 특성을 보이는데, 이는 혼화재의 분말도와 포졸란 반응에 의한 것으로 판단됨.

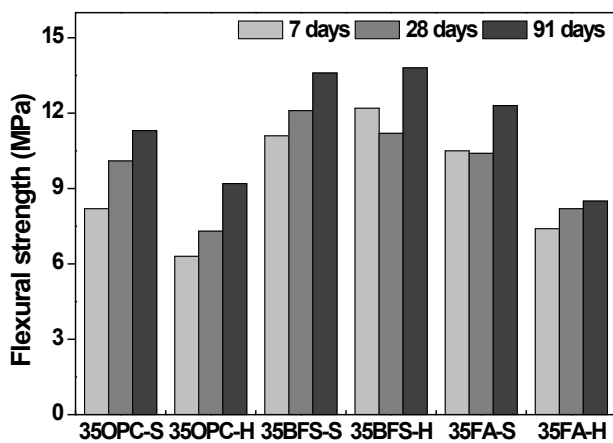


(a) W/B 0.35 case

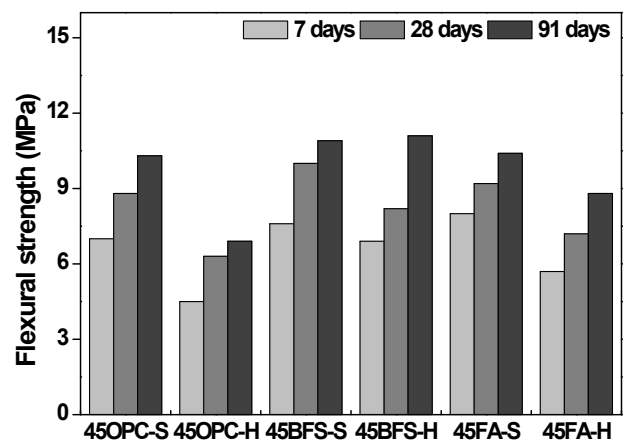


(b) W/B 0.45 case

<그림 3.71> 압축강도 측정 결과



(a) W/B 0.35 case



(b) W/B 0.45 case

<그림 3.72> 휨 강도 측정 결과

(5) 차폐 채움재의 염화물 침투 저항성 특성 분석

○ 실험개요

- 염화물 침투 저항성을 측정하는 방법으로는 KS F 2711 기준과 NT Build 492 기준이 있음. 두 방법은 전기장치를 이용하여 염화물 이온을 급속 침투시켜 단기간에 염화물 침투 저항성을 평가할 수 있는 대표적인 방법임. KS F 2711 기준은 통과전하량을 산출하여 전하량에 의한 염소이온 침투성을 평가하고, NT Build 492 기준은 확산계수를 산출하여 상대적인 염화물 침투 저항성을 평가하고 있음. <표 3.39>에 통과전하량에 따른 염소이온 침투성 기준을 나타내었음.

<표 3.39> 전하량에 따른 염소이온 침투성

Charge Passed (C)	Chloride Ion Penetrability
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very Low
< 100	Negligible

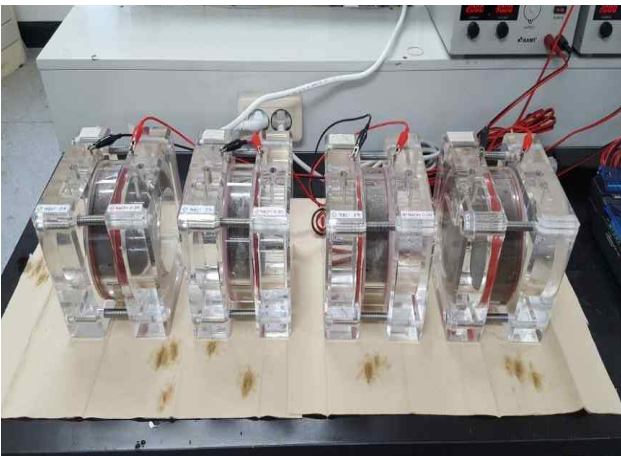
○ 실험방법

- 양생기간에 따른 염화물 침투 저항성을 비교하기 위해 시험체를 재령 28일, 91일 간 수중양생하고 실험을 실시하였음. 배합은 <표 3.36>에 제시된 배합표를 이용하여 실시하였음. KS F 2711에 의한 방법은 Ø100×200 mm 원통형 시편을 Ø100×50 mm 의 크기로 절단하여 사용하였음. 시험체의 양극에는 0.3M의 NaOH 용액을 넣고 음극에는 3%의 NaCl 용액을 넣어 30V 전압을 8시간동안 가하여 염화물 침투 실험을 실시하였음. 실험 후 염화물 이온이 침투한 시험체를 할렬하여 0.1N AgNO₃ 용액을 침투면에 분무하고 침투깊이를 측정하고, 전류 값을 데이터로거를 통해 수집하여 통과 전하량을 계산하였음. 침투 깊이는 시험체 3개의 평균 값으로 계산하였음. 통과전하량은 아래의 식을 통하여 구함.

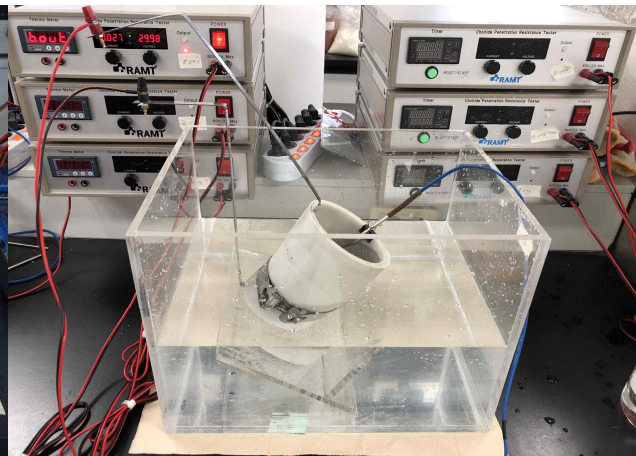
$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{t-30} + I_t)$$

여기서, Q 는 통과 전하량, I_0 은 전압을 가한 직후의 전류(A), I_t 는 전압을 가한 후 t 분 경과 후의 전류(A) 임.

- NT Build 492에 의한 방법은 상대비교를 하기 위해 KS F 2711 기준과 동일한 농도의 용액과 동일한 전압과 시간을 가하여 염화물 침투 실험을 실시하였음. 침투 깊이 또한 같은 방법으로 진행하였고, 확산계수 산정한 필요한 자료를 계수를 데이터로거를 통해 수집하여 확산계수를 산정하였음. 각 시험법에 대한 실험 전경을 <그림 3.73>와 <그림 3.74>에 나타내었음.



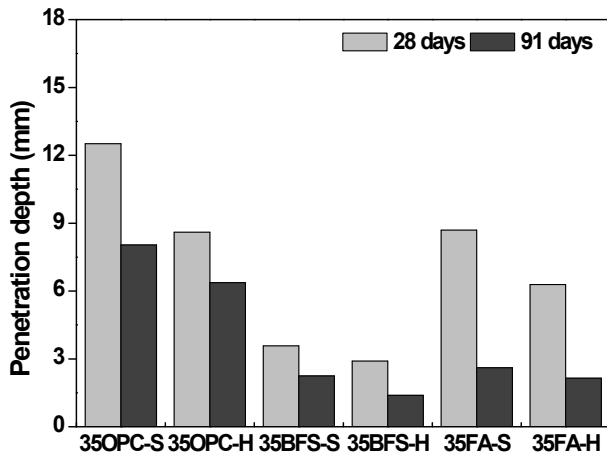
<그림 3.73> KS F 2711 시험 전경



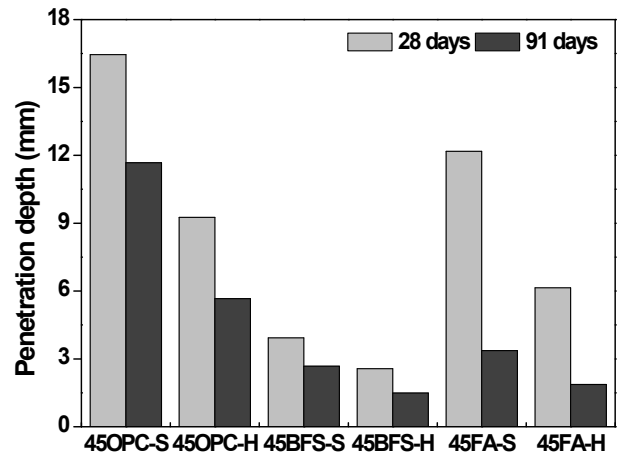
<그림 3.74> NT Build 492 시험 전경

○ 실험결과

- KS F 2711 기준과 NT Build 492법에 의한 염소 이온 침투 저항성 실험 종료 후 시험체를 할렬하고 질산은 용액을 분무하여 침투 깊이를 측정하였음. 염화물 침투 깊이 결과를 <그림 3.75>와 <그림 3.76>에 나타내었음.
- 실험결과를 보면, 고밀도 폐유리를 혼입하면 염화물 침투 깊이가 감소하여 일반 모래 사용시 보다 염화물 침투 저항성이 향상됨을 알 수 있음. 또한, 혼화재를 혼입하면 OPC보다 염화물 침투 저항성이 우수하게 나타났는데, 이는 혼화재의 분말도 및 포졸란 반응으로 인한 것으로 내부 조직을 더 치밀하게 만들어 주는 것으로 판단됨. FA의 경우 포졸란 반응으로 인해 재령 91일의 침투 깊이가 재령 28일에 큰 폭으로 감소하였음.

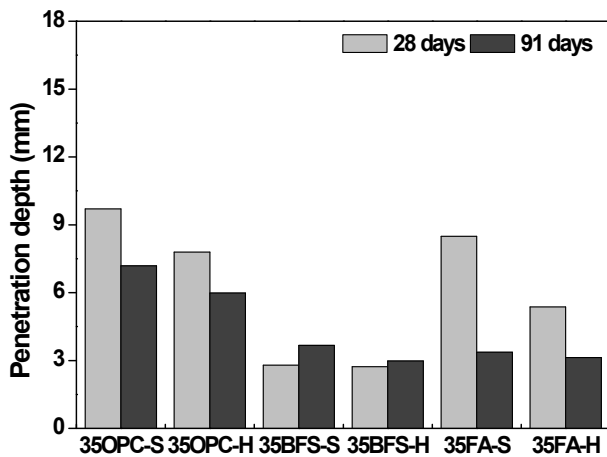


(a) W/B 0.35 case

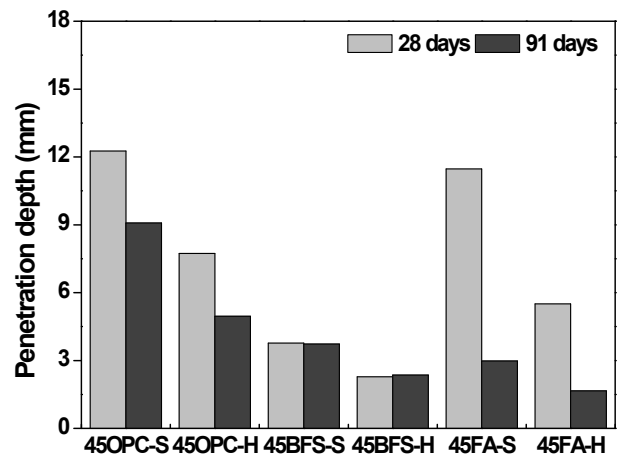


(b) W/B 0.45 case

<그림 3.75> 염화물 침투 깊이 결과 (KS F 2711)



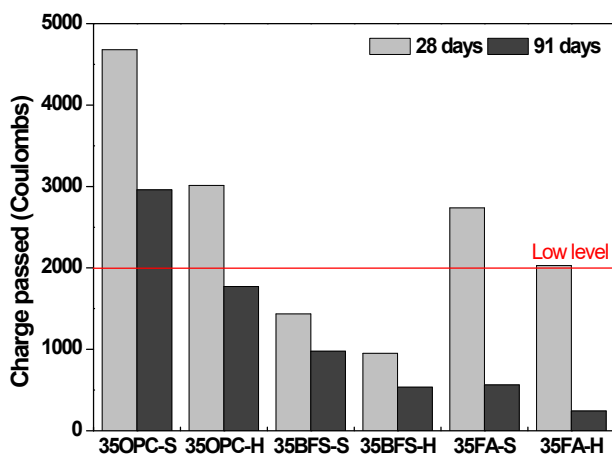
(a) W/B 0.35 case



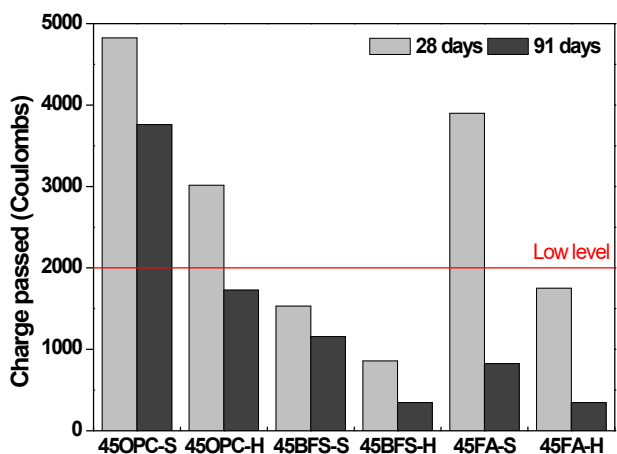
(b) W/B 0.45 case

<그림 3.76> 염화물 침투 깊이 결과 (NT Build 492)

- KS F 2711 기준에 의한 통과전하량 결과를 <그림 3.77>에 나타내었음. 결과를 보면, 혼화재 혼입 배합이 OPC보다 통과전하량이 낮은 것으로 나타났음. 고밀도 폐유리 혼입의 경우 대부분의 배합에서 통과전하량은 2,000 Coulombs 이하로 나타나 본 연구의 질적 성과를 만족하는 것으로 나타남.
- NT Build 492 법에 의한 확산계수 산정 결과를 <그림 3.78>에 나타내었음. 결과를 보면, 혼화재 혼입 경우의 확산계수가 OPC보다 낮은 것으로 나타남. 혼화재의 분말도와 포졸란 반응에 의한 영향으로 판단되며, 혼화재 혼입시 재령 91일 이상의 시험체는 확산계수가 낮아 염화물 침투 저항성이 우수한 것으로 판단됨.

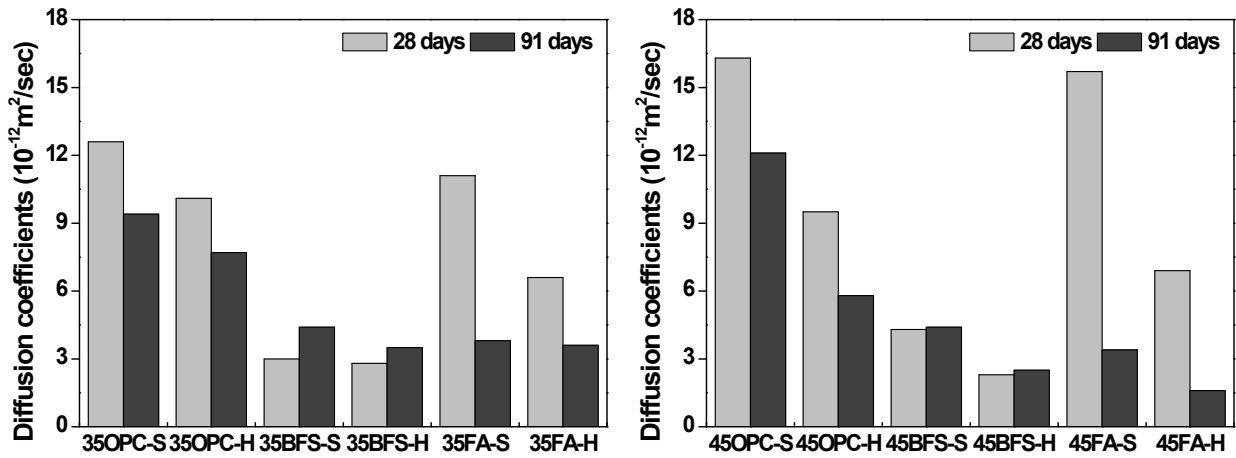


(a) W/B 0.35 case



(b) W/B 0.45 case

<그림 3.77> 통과 전하량 측정 결과 (KS F 2711)



(a) W/B 0.35 case

(b) W/B 0.45 case

<그림 3.78> 확산계수 산정 결과 (NT Build 492)

(6) 차폐 채움재의 건조수축 특성 분석

○ 실험방법

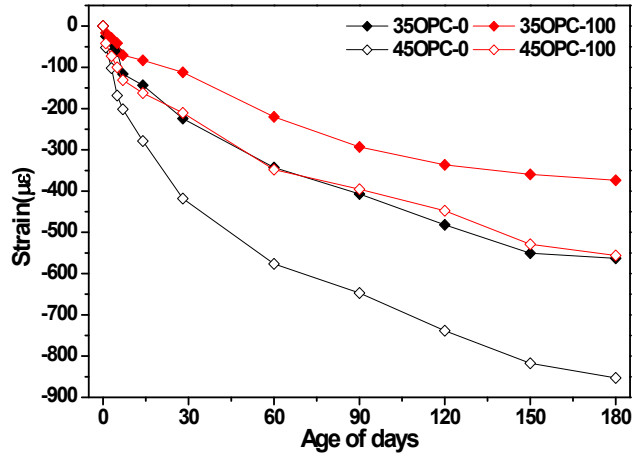
- 차폐 채움재의 건조수축은 ASTM C 157에 의거하여 측정하였으며, 배합은 <표 3.36>에 제시된 배합표를 이용하여 실시하였음. 시험체는 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 크기의 각주형 시험체를 사용하였으며, 재령 7일간 수중 양생 후 항온항습실 (20°C , 60%)로 옮겨 재령 6개월까지 길이변화를 측정하였음. 각 배합당 3개의 시험체를 제작하였으며, 3개의 평균 값을 사용하였음. 길이변화 측정 전경을 <그림 3.79>에 나타내었음.



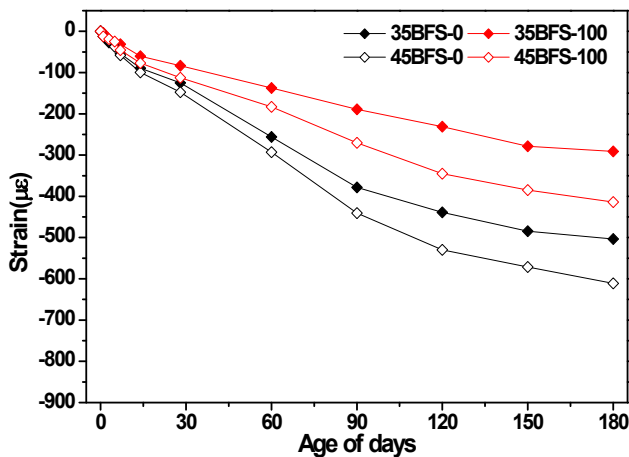
<그림 3.79> 길이변화 측정 전경

○ 실험결과

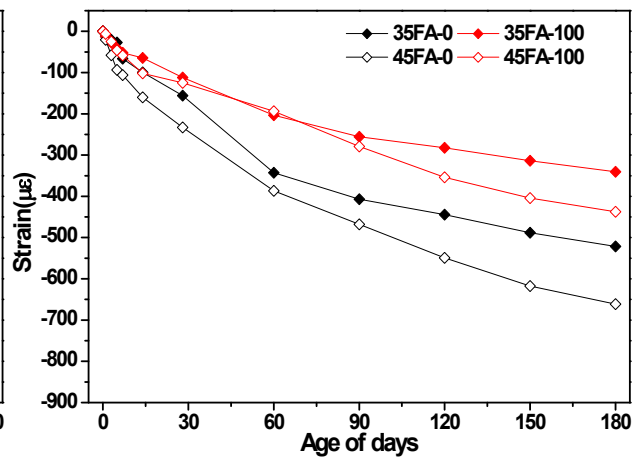
- 건조수축 측정 결과를 <그림 3.80>에 나타내었음. 실험결과를 보면, 모든 배합에서 고밀도 폐유리 혼입시 건조수축량은 감소하는 경향을 나타냈으며, 혼화재를 혼입하면 건조수축량을 더욱 감소시킬 수 있음. 재령 6개월에서의 건조수축량은 혼화재 혼입시 $500 \mu\text{m}$ 미만으로 나타나 본 연구의 질적 성과 기준을 만족하는 것으로 나타났음.



(a) OPC case



(b) BFS case



(c) FA case

<그림 3.80> 건조수축 측정 결과

(7) 차폐 채움재의 중금속 용출 특성

○ 실험개요

- 전자폐기물인 고밀도 폐유리에는 브라운관에서 발생하는 전자파의 외부노출을 방지하기 위하여 다량의 중금속을 함유하고 있어 고밀도 폐유리에 포함된 중금속의 용출 가능성으로 인해 다양한 사회문제를 야기해왔음.
- 따라서 고밀도 폐유리를 적용한 차폐 채움재를 개발하기 위하여 고밀도 폐유리를 차폐 채움재로 적용하였을 때 발생할 수 있는 고밀도 폐유리에 포함된 중금속의 용출 특성을 평가, 분석하고자 하였음.

○ 실험방법

- 본 연구에서는 중금속 용출 특성을 평가하기 위하여 <표 3.36>에 제시된 배합표를 이용하여 50×50×50 mm 크기의 시험체를 제작하였음. 제작된 시험체는 미국 음용수 자재의 인체 유해영향을 관리하는 미국 음용수 관련 콘크리트 자재관리 기준의 시험법인 ANSI(American National Standard Institute) 67-2007a 법에 의해 전처리를 실시하였음.
- ANSI 67-2007a 방법은 모르타르 공시체 제작 후 24시간 경과시 탈형한 후 수침시켜 91일간 수중 양생을 실시하고 용출 시험을 실시하기 전에 200 mg/L 염소용액으로 컨디셔닝함. 이후 공시체의 비표면적이 최소 50 cm²/L 이 되도록 pH 5의 산성용액과 pH 10 염기성 용액에 각각 노출시키고 23±2 °C에서 4일 동안 1일 마다 노출 용액을 교체 하는 과정을 3일 동안 반복함. 3일 경과 후 4일째에 산성 및 염기성 용액을 모두 버린 후 새로운 산성 및 염기성 용액에 1일 동안 모르타르 시험체를 침지하여 중금속 용출을 실시한 후 pH 용액에 용출된 중금속을 분석하는 방법임.

- 중금속 용출 특성은 2가지 방법으로 시험을 실시하였음. 먼저 ANSI 67-2007a 방법으로 용출된 용액을 국가공인시험인증기관에 의뢰하여 모르타르 외부로 용출되는 중금속 함유량을 분석하였으며, 두 번째는 폐기물 공정 시험법에 따른 방법으로 모르타르 시험체를 분쇄하여 모르타르 내부에 함유된 중금속 함유량을 분석하였음.

○ 실험결과

- 차폐 채움재의 중금속 함유량 분석 결과를 <표 3.40>에 나타내었음. 실험결과를 보면, 시험체를 분쇄하여 분석한 채움재 내부에는 납, 구리, 크롬 성분이 검출 되었으며, 특히 납 성분이 많이 검출된 것을 확인하였음. 채움재 내부의 납 성분은 밀도를 증가시켜 차폐 성능에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단됨.
- 한편, 산성 및 염기성 용액에 용출시킨 경우에는 중금속이 거의 검출되지 않았음. 이는 시멘트 등 결합재의 결합력이 강해 중금속을 외부로 용출시키지 않은 것으로 판단됨. 본 연구에서 개발한 차폐 채움재는 폐기물 드럼통 등 내부에 사용되는 재료로 실제 외부환경에 노출될 가능성이 거의 없으므로 외부 용출 가능성 또한 매우 적음. 따라서 고밀도 폐유리를 혼입한 차폐 채움재의 중금속 용출 가능성 거의 없는 것으로 판단됨.

<표 3.40> 중금속 함유량 분석 결과

Type	External leaching		Internal leaching
	pH 5	pH 10	powder
비소 (As)	Non Detection	Non Detection	Non Detection
카드뮴 (Cd)	Non Detection	Non Detection	Non Detection
크롬 (Cr)	Non Detection	Non Detection	24 mg/kg
6가 크롬 (Cr ⁶⁺)	-	-	Non Detection
구리 (Cu)	Non Detection	Non Detection	49 mg/kg
수은 (Hg)	Non Detection	Non Detection	Non Detection
납 (Pb)	0.1 mg/L	Non Detection	8,676 mg/kg

사. 고밀도 폐유리와 산업 폐기물을 혼입한 차폐 채움재의 내구 성능

(1) 실험개요

- 차폐 채움재의 밀도를 상승시켜 차폐 성능의 상승을 도모하고자 하였음. 전자 폐기물인 고밀도 폐유리와 산업 폐기물인 전기로 산화 슬래그를 혼입하여 차폐 채움재를 제작하였음. 기초 물성 및 내구 성능 실험을 통하여 고밀도 폐유리와 전기로 산화 슬래그 혼입 차폐 채움재의 사용 가능성을 평가해 보았음.

○ 실험방법

- 산업 폐기물인 전기로 산화 슬래그는 5~10 mm 사이의 골재를 사용하였으며, 같은 크기의 일반 모래 및 자갈과 혼합하여 채움재로서의 적용 가능성을 다각도로 비교해 보았음. 물-시멘트 비는 0.45로 고정하였음. ASR 저감 및 내구 성능 개선을 위해 광물질 혼화재를 사용하였으며, 고로 슬래그(BFS)는 시멘트 질량의 30%를 대체하였고, 플라이 애시(FA)는 시멘트 질량의 20%를 대체하여 배합을 선정하였음. 밀도와 압축강도 및 탄성계수, 전기 비저항을 측정하였음. 전기로 산화 슬래그의 물리적 특성은 <표 3.41>에 나타내었고, 사용된 배합표는 <표 3.42>에 나타내었음.

<표 3.41> 전기로 산화 슬래그의 물리적 특성

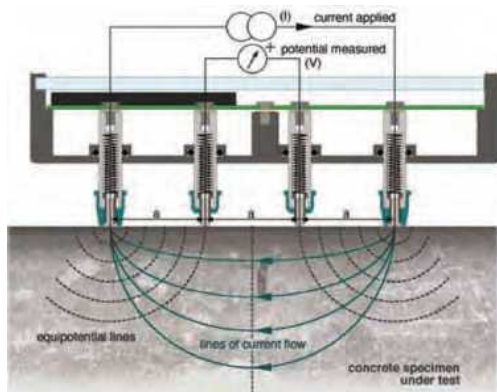
Type	Density (g/cm ³)	Absorption (%)
Electric Arc Furnace Slag	3.71	2.05

<표 3.42> 전기로 산화슬래그와 고밀도 폐유리 혼입 채움재 배합표

Type	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)							
		W	C	BFS	FA	S	H	G	E
OPC-SG	45	170	378	-	-	635	-	1069	-
OPC-SE						635	-	-	1543
OPC-HG						-	733	1069	-
OPC-HE						-	733	-	1543
BFS-SG	45	170	264	113	-	632	-	1110	-
BFS-SE						632	-	-	1536
BFS-HG						-	730	1110	-
BFS-HE						-	730	-	1536
FA-SG	45	170	302	-	76	625	-	1097	-
FA-SE						625	-	-	1518
FA-HG						-	721	1097	-
FA-HE						-	721	-	1518

※ H: Heavyweight waste glass, E: Electric arc furnace slag

- 전기비저항 측정은 AASHTO TP 95-14에 제시된 시험방법을 준용하였으며, 측정장비는 P사의 Resipod를 사용하였음. 비저항 측정시 AC 미세전류를 사용하여 표면전기저항을 측정하며, 각 전극의 간격은 38 mm로 하였음.
- 전기비저항 측정 원리와 실험 사진을 <그림 3.81>, <그림 3.82>에 나타내었음.



<그림 3.81> 비저항 측정원리



<그림 3.82> 비저항 측정 전경

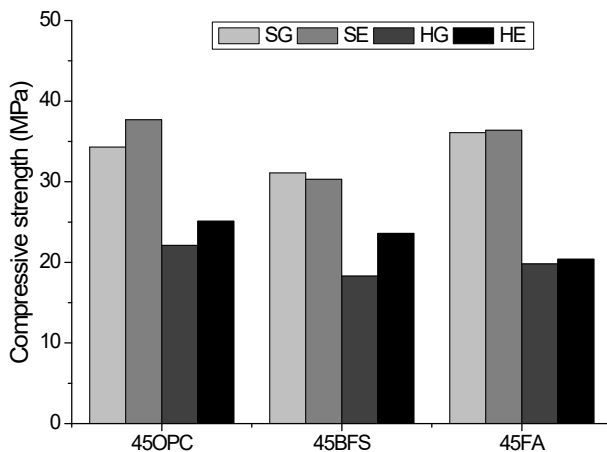
○ 실험결과

- 고밀도 폐유리와 전기로 산화 슬래그 혼입 채움재의 밀도 측정 결과를 <표 3.43>에 나타내었음. 밀도 측정결과, 고밀도 재료인 전기로 산화슬래그와 폐유리를 혼입한 경우(HE) 가장 높은 밀도 상승 효과를 보였음. HE 배합의 경우 2.8 t/m³ 이상의 밀도를 나타내 중량콘크리트 기준을 만족하는 것으로 나타남.

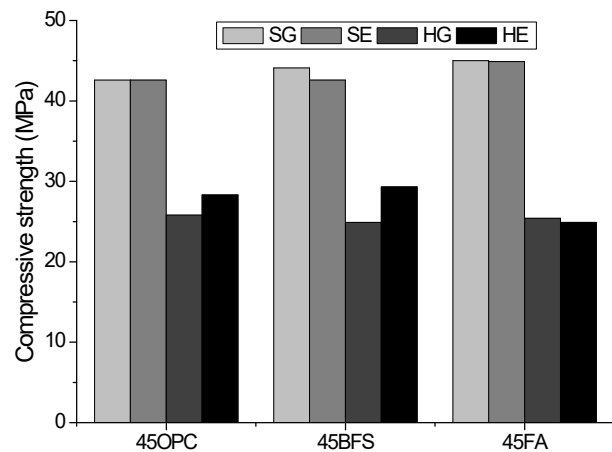
<표 3.43> 채움재 밀도 측정 결과

Type	OPC	BFS	FA
SG (t/m ³)	2.27	2.32	2.35
SE (t/m ³)	2.75	2.75	2.81
HG (t/m ³)	2.30	2.39	2.43
HE (t/m ³)	2.82	2.83	2.92

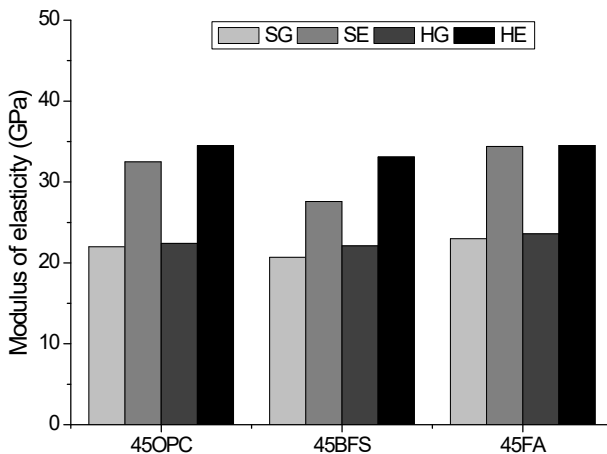
- <표 3.42>의 배합표를 이용하여 제작된 채움재의 압축강도를 재령 7일, 28일에 측정하여 그 결과를 <그림 3.83>~<그림 3.84>에 나타내었음. 실험 결과를 보면, 압축강도는 폐유리 혼입에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 전기로 산화슬래그의 혼입은 압축강도를 증가시켰음. 모든 배합은 재령 28일에 24 MPa 이상의 강도를 나타내, 전기로 산화 슬래그 혼입으로 인한 압축강도는 채움재로서의 사용이 가능한 수준으로 판단됨.
- <표 3.42>의 배합표를 이용하여 제작된 채움재의 탄성계수를 재령 7일, 28일에 측정하여 그 결과를 <그림 3.85>~<그림 3.86>에 나타내었음. 실험 결과를 보면, 탄성계수는 굵은 골재의 영향을 많이 받는 것을 확인하였으며, 잔골재의 종류와는 큰 차이가 없는 것으로 나타났음. 전기로 산화슬래그를 혼입하면 일반 자갈보다 탄성계수를 증가시키는 경향을 나타내었음.



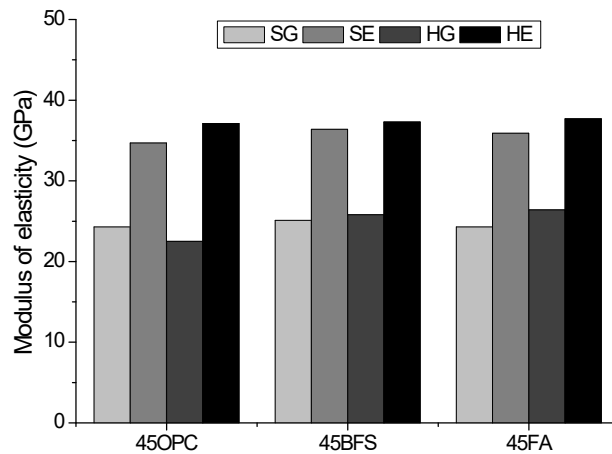
<그림 3.83> 압축강도 측정 결과 (7일)



<그림 3.84> 압축강도 측정 결과 (28일)

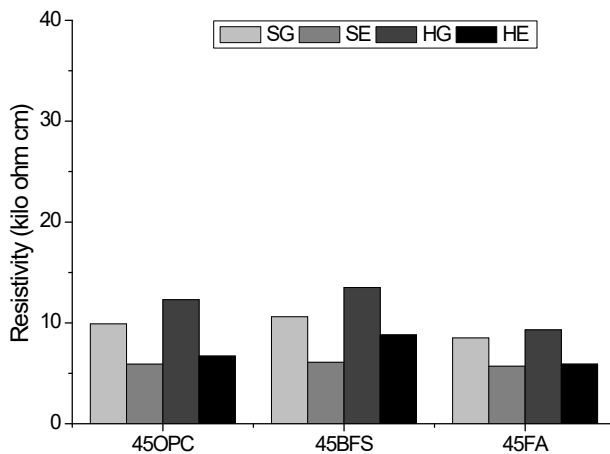


<그림 3.85> 탄성계수 측정 결과 (7일)

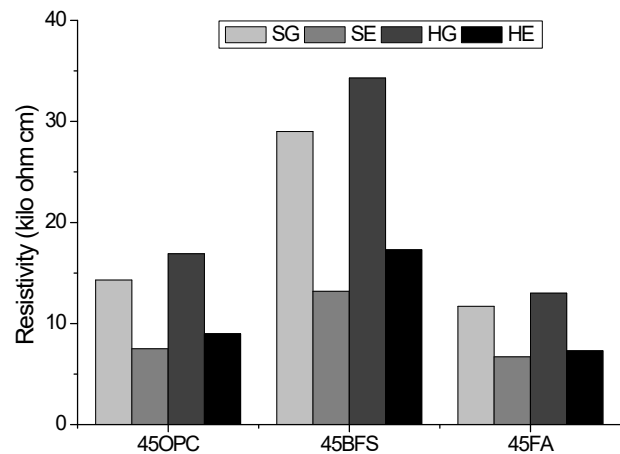


<그림 3.86> 탄성계수 측정 결과 (28일)

- <표 3.42>의 배합표를 사용하여 제작된 채움재의 전기비저항을 재령 7일, 28일에 측정하여 그 결과를 <그림 3.87>~<그림 3.88>에 나타내었음.
- 실험 결과를 보면, 전기로 산화슬래그를 혼입하면 비저항이 감소하였고, 폐유리를 혼입하면 비저항이 증가하는 경향을 나타냄. 일반적으로 W/B가 낮거나 혼화재를 사용하면 내부 조직이 치밀해져 전기비저항이 증가함.
- 폐유리는 내부에 중금속 성분을 많이 함유하고 있으며, 특히 납(Pb) 성분이 많이 함유되어 있음. 전기전도도가 낮은 납 성분으로 인하여 폐유리가 혼입된 채움재는 전기비저항이 증가하는 것으로 판단됨.
- 철강 슬래그의 부산물인 전기로 산화슬래그는 내부에 Fe 성분을 포함하고 있어, 미세전류를 잘 통과시켜 비저항을 감소시키는 것으로 판단됨.



<그림 3.87> 전기비저항 측정 결과 (7일)



<그림 3.88> 전기비저항 측정 결과 (28일)

3. 차폐 채움재의 차폐 성능 검증 시스템 개발

가. 차폐 성능 검증을 위한 시험 방법 정립

(1) 방사선 차폐에 대한 문헌조사

○ 방사선 차폐의 기본요소

- 방사선으로부터 인체를 방어하는 방법은 거리, 시간, 차폐의 3가지 기본인자로 구성됨.

• 거리

- 방사선은 공간 중에서 진행할 때 빛의 피질과 같기 때문에 선원으로부터 거리가 가까우면 피폭의 정도는 크고, 거리가 멀면 피폭도가 낮아지는 원리로서 선원에서 멀리 떨어질수록 피폭량은 적어짐. 점선원인 경우, 방사선 강도는 거리제곱에 반비례함.

• 시간

- 방사선의 피폭량은 시간과 방사선의 선량율의 곱으로 주어지며, 선량율이란 단위시간당 방사선량으로서 작업자가 피폭 받는 양을 표현하는 것이 아니라 임의의 주어진 위치에서의 방사선장의 세기를 나타내기 위한 것임.
- 선량 또는 피폭선량은 어떤 방사선장 내에서 일정시간 동안 체류하면서 받는 피폭량을 일컬으며, 동일한 방사선장의 조건에서 작업이 이루어지더라도 작업시간(체류시간)이 감소하면 결과적으로 피폭선량을 줄일 수 있음. (피폭시간과 피폭선량은 비례함.)

• 차폐

- 거리를 멀리하거나 피폭시간을 단축하여 방사선을 방어하는 방법에는 한계가 있음. 따라서 차폐란 방사선원과 피폭자 사이에 적절한 흡수체를 설치함으로써 방사선이 피폭자에 도달하는 것을 차단하는 방법임.

○ 방사선의 종류

- 원자를 구성하는 양성자, 중성자, 전자가 균형을 이루지 못할 때 방사선을 낼 수 있는 능력(방사능)을 띄게 되며, 이 방사선은 물질을 투과하는 성질을 갖고 종류나 에너지 크기에 따라서 투과성이 다름.
- 방사선의 종류로는 α 선, β 선, γ 선, 중성자선이 있으며, 방사선은 물리학적으로 불안정한 원소가 안정된 원소가 되면서 방출하는 전자기파로 볼 수 있음.

• α 선

- 입자로 구성되어 있어 알파입자로도 칭하며, 베타선보다 무겁고 크기가 작아 종이 한 장으로도 차폐가 가능함.

• β 선

- 전자의 흐름으로 알려져 있으며, 빠른 속도로 인해 빛의 속도에 가깝다고 알려져 있음. 속도는 빠르지만 전기를 띤 입자로 구성되어 있어 물속에서 정전기력을 받으며 투과력은 강하지 않음.

• γ 선

- 원자핵이 아닌 원자 내의 전자가 에너지를 방출하면서 나오는 전자기파를 γ 선이라 하며, 전자기파의 종류로 γ 선과도 비슷한 성질을 갖고 있음. 보통의 빛과 마찬가지로 반사, 굴절 및 편차를 나타내며, 회절격자를 사용하여 파장을 세밀하게 측정할 수 있음.

• γ 선

- 원자핵 내부에서 방출되는 파장이 매우 짧은 전자기로 빛과 비슷하며, γ 선과 유사한 성질을 나타냄. γ 선은 한 원소의 원자핵이 붕괴하여 다른 원소로 변화될 때 생성되는 에너지가 방출되는 전자기파를 말함.
- 또한 에너지가 매우 크기 때문에 물질의 원자나 분자를 교란해서 에너지를 주고 이온화시키지만, 이온화 능력 자체는 알파선이나 베타선보다 약하며, 투과력이 매우 강력하여 일반적인 방사선 피폭 허용치에 대하여 반드시 고려되어야 함.

• 중성자선

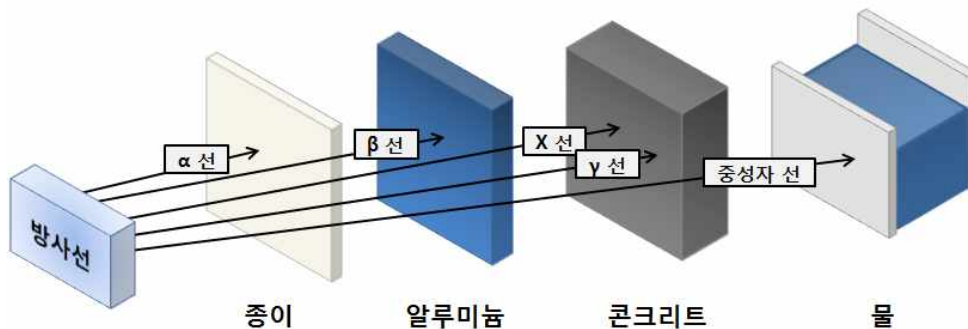
- 핵이 붕괴하면서 발생하지는 않으며, 원자로나 입자가속기와 같은 인위적인 수단에 의해 발생됨. 전하를 가지지 않으나 운동에너지가 크기 때문에 운동에너지를 잃으면서 감마선을 내놓거나 양성자를 방출하여 이온화 작용을 일으킴.
- 입자나 전자파와 같은 파장의 형태가 없으며 투과력이 가장 높음.

○ 차폐재

- 일반적으로 투과력이 큰 γ 선이나 γ 선의 차폐에는 원자번호가 크고 밀도가 높을수록 방사선의 감쇠가 커지므로 밀도가 큰 납, 철, 텅스텐 및 감손 우라늄이 쓰이지만 경제성 때문에 대부분 콘크리트가 널리 쓰임.
- 베타선 차폐에는 원자번호가 낮은 물질(예: 플라스틱, 알루미늄, 등)을 쓰며, 그 이유는 베타선이 차폐재 구성 핵 또는 원자의 전자장과 작용하여 제동복사선(Bremsstrahlung X-선)을 방출함.
- 따라서, 베타선의 에너지가 전환되는 비율이 차폐재 구성물질의 원자번호 및 베타선 최대에너지 곱에 비례하기 때문에 이의 전환율을 감소시키기 위하여 원자번호가 낮은 물질을 베타선 차폐재로 선택함.
- 중성자는 원자번호가 작을수록 에너지를 잘 잃는 성질 때문에 보통 물이나, 파라핀, 폴리에틸렌 및 탄소 등을 차폐재로 쓰지만 경제적 이점 때문에 콘크리트를 널리 사용하고 있음.
- 앞서 설명한 바와 같이 감마선이나 X-선의 차폐 경우에는 차폐재의 밀도와 깊은 관련이 있으며, 아래의 <표 3.44>과 같이 차폐재 별 비중을 나타낼 수 있음.

<표 3.44> 차폐재 종류별 비중 예시

차폐재	세부 분류	비중 (g/cm^3)
철광석	적철광(Fe_2O_3)	5.24
	자철광(Fe_3O_4)	5.18
	활철광(FeS_2)	5.00
연광석	방연광(PbS)	5.24
	백연광($PbCO_3$)	5.24
산화납	산화납(PbO)	9.53
납	납 알갱이	11.35



<그림 3.89> 방사선 종류 및 차폐재

○ 방사선 차폐의 이론적 원리

- 방사선이 어떤 물질(또는 매질)을 통과하는 동안 그 매질의 구성원자 또는 원자핵과 반응할 때 방사선의 세기가 감쇠함. 공간 중 두께가 x cm인 차폐체가 있을 때 차폐 효과로 인하여 감쇠한 방사선의 세기(monoenergetic Photons, Narrow Beam), Φ 를 다음식과 같은 지수감쇠 함수로서 표현함.

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\mu x) \dots\dots\dots \text{(식 1)}$$

- 식 (1)에서 Φ_0 는 차폐체가 없을 때의 방사선 세기(또는 선속밀도)를 나타내며, μ 는 선형 감쇠계수(cm^{-1})이며, 동시에 방사선이 차폐재에서 단위길이 당 통과하는 동안 차폐물질과 상호작용을 일으켜 방사선 세기가 감쇠될 확률임.

$$\Phi = \Phi_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x\right] \dots\dots\dots \text{(식 2)}$$

- 선형감쇠계수(μ)는 방사선의 에너지와 차폐재의 종류에 따라 달라지며, 같은 차폐재라도 재료의 조성에 따라 밀도가 달라질 수 있기 때문에 밀도와 관계없는 방사선의 감쇠를 나타내기 위하여 식 (2)과 같이 질량감쇠계수(μ/ρ , g/cm^3)와 밀도두께(ρx , g/cm^2)를 도입하여 차폐계산에 사용함.
- 실제로 방사선 차폐 시에는 차폐재에서 방사선의 산란(Wide Beam 조건일 때)이 일어나기 때문에 인체로 들어오는 방사선의 산란기여분을 고려하여야 하는데 이것을 보통 축적인자(Build-up factor) B로 나타내며, B는 차폐재의 두께 및 차폐재에서의 선형감쇠계수에 따라 달라짐. 방사선의 산란에 의한 축적인자를 고려한 참 선속밀도 Φ 는 다음 식과 같음.

$$\Phi = \Phi_0 B(\mu x) \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x\right] \dots\dots\dots \text{(식 3)}$$

- 식 (3)에서 보는 바와 같이 방사선의 차폐효과는 차폐재의 비중과 두께의 곱에 비례하며, 두께가 동일하면 비중이 클수록 차폐 효과는 우수하게 나타남.

- 최초의 방사선 선속의 세기를 절반으로 감소시키는 임의의 차폐재의 두께를 ‘반가층(Half-value layer, HVL)’이라 하며, 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있음.

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \dots\dots\dots \text{(식 4)}$$

- 위의 식 (4)는 차폐재의 설계에 주로 사용되며, 반가층은 차폐효용성(effectiveness)을 의미함. 즉, 재료의 반가층이 작을수록 건식캐스크(dry cask) 재료의 더 작은 체적 요구사항으로 인해 감마 차폐효용성이 좋아지는 것을 의미하며, 이는 차폐재의 두께를 감소시킬 수 있는 경제적인 효과를 지님.

○ 방사선 차폐재의 설계 기초

• 차폐시설의 최대 허용선량

- 방사선 차폐 설계의 기준이 되는 최대허용선량은 선량율로 규정되어 있기 때문에 사용의 실태, 즉 피폭 가능한 기회의 실태를 고려하여 차폐를 설계하는 것이 합리적이며 경제적임.

<표 3.45> 법정 방사선 차폐기준

구역	관리구역 (Controlled area)	일반구역 (Non-controlled area)	
	사용시설 안의 사람이 상시 출입하는 구역	사용시설 경계에 인접 사람이 거주하는 구역	병원, 진료소의 병실
허용선량	1 mSv/W (100mrem/W)	0.1 mSv/W (10mrem/W)	1.3 mSv/3개월 (130mrem/3개월)

• 사용시설 (관리구역)

- 사용시설의 경우 방사선 작업종사자가 항상 출입을 하는 장소(방사성 핵종 사용실, 조사실에 인접한 조종실 등) 상시 출입을 하는 자소에 대한 차폐를 고려함.
- 상기의 표에서 사용시설에 대한 차폐물의 차폐능력을 주당 100 mrem 이하로 규정하고 있기 때문에 설계상의 목표로는 100 mrem/40h = 2.5 mrem/h 이하로 값을 채용함.

• 사용시설 경계에 인접한 구역 (일반구역)

- 사용시설의 인접한 주변에 방사선 작업 종사자 이외의 사람이 접근할 기회가 많다고 가정하여, 법정 취업시간(주당 40시간)내에는 수시 출입자가 있을 것으로 가정하여 계산하면, 10 mrem/40h = 0.25 mrem/h가 기준 수치가 될 수 있음.

○ 방사선 차폐 콘크리트

- 콘크리트는 감마선 및 중성자 조사에 대한 확립된 선형감쇠계수(Linear attenuation coefficient)를 갖는 차폐재로 그 성능이 우수하고 다양한 차폐재로 알려지고 있음.
- 이 재료는 연구로와 상용로, 고에너지 입자 가속기, 핫셀(hot cells), 고준위 폐기물 건식용기(dry cask), 핵 시스템을 이용한 의료시설과 X-선, 생물학적 및 화학적 실험실을 포함한 연구시설에 폭넓게 이용됨.
- 콘크리트는 비교적 가격이 저렴하고 질량감쇠계수(Mass attenuation coefficient)가 큰 건설자재로서의 탁월한 특성 외에도 차폐재로서 매력적인 특성을 가지고 있음.
- 부가적으로 콘크리트 배합과 준비과정이 복잡하지 않고 다양한 형태로 주조하기가 용이함 또한 시멘트와 골재(aggregate)를 혼합한 콘크리트는 좋은 원소들의 혼합물이며, 광자와 중성자 감쇠를 위한 좋은 핵적 특성을 갖는 재료임.
- 콘크리트 표준시방서에 제시된 차폐 콘크리트는 단위용적중량 2.5~4.0 t/m³을 만족하며, 콘크리트 슬럼프 150 mm 이하, 물-시멘트비 50% 이하의 물성을 기준으로 하고 있음.

- 이러한 방사선 차폐 콘크리트 시설물로는 크게 고출력 원자로에서부터, 작게는 소출력의 입자 가속기까지 있으며, 방사선 종류에 따라 차폐 성능을 해석하여 조건에 만족하는 시설이 되어야함.
- 그러나, 방사선 차폐재로서의 콘크리트에 대한 단위용적질량은 명시되어 있으나 정확한 차폐 감쇄율에 대한 자료는 전무함.

(2) 차폐재의 차폐율 검증 방법

○ Microshield 코드를 이용한 차폐율 검증 방법

- 서로 다른 콘크리트 조성을 갖는 재료의 이론적인 질량감쇠계수를 계산하는 방법으로써 이 코드를 이용하여 차폐성능을 분석하고 감마 조사선량을 계산할 수 있음.
- 잘 알려진 바와 같이, 선형 및 질량 감쇠계수는 지수법칙을 이용하여 계산되며 이들은 특정 에너지를 갖는 광자를 차폐할 수 있는 재료의 능력을 평가하는데 이용됨.
- 질량감쇠계수는 다음의 식으로 계산되는데 $\mu_i = N_i \sigma_i$, $\mu_i / \rho_i = \ln(I_0/I) / \rho t$, μ_i 는 총 선형감쇠계수, N_i 는 단위체적당 원자수, σ_i 는 밀도(g/cm^3)이며 I_0 와 I 는 입사 및 투과강도이고 t 는 흡수체의 두께임.
- 원소들의 혼합물에 대한 질량감쇠계수는 W 임. 여기서, W 은 원소들의 혼합물에 대한 총질량감쇠계수이고 W_i 는 조성 i 의 질량무게 분율임. (반가층, $HVL=0.693/\mu$)
- 이론적으로는 Microshield 코드를 이용하여 서로 다른 조성을 갖는 차폐재의 이론적인 질량감쇠계수를 계산할 수 있음.
- Microshield는 종합적인 광자/감마선차폐와 선량평가 프로그램으로 차폐설계, 방사선측정으로 선원강도 평가와 환경에 미치는 최소선량을 계산하는데 이용됨.
- 이러한 분석 이외에도 대중들과 장비에 대한 방사선 피폭, 정비업무를 위한 잠정적인 차폐, 감마 조사량 측정으로 폐기물 특성화 및 처분을 위한 선원강도 계산 등이 있음.

○ 감마선 분광분석 방법

• 감마선 측정원리

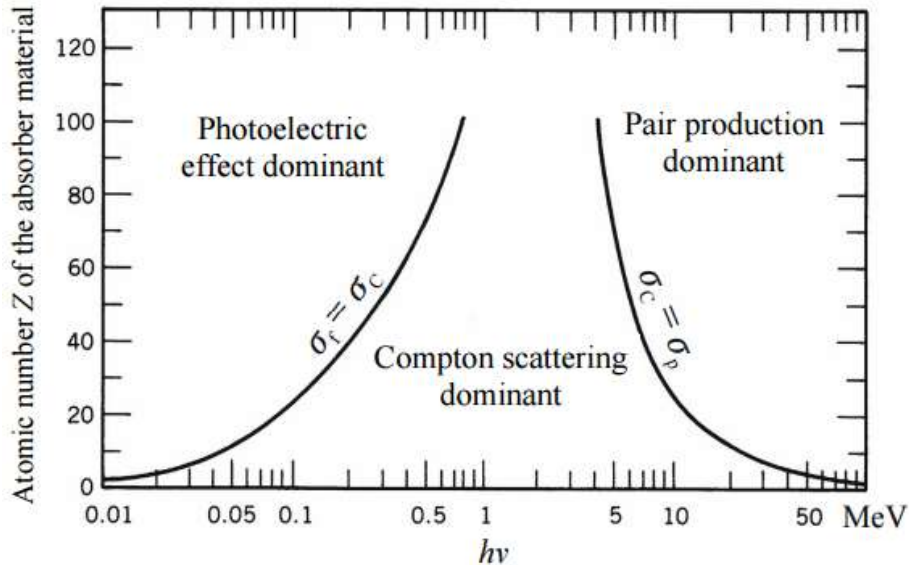
- 감마선은 알파입자나 베타선과 달리 물질을 통과할 때 그 물질을 직접 이온화를 시키지 않기 때문에 감마선의 검출은 광자가 물질과 상호작용하여 그 에너지의 전부 혹은 일부를 물질내의 전자에 전달하는 방법에 의존함.
- 감마선이 물질에 입사한 경우에서 일어날 수 있는 상호작용은 광전흡수, 콤프턴 산란 그리고 전자쌍 생성 등 세 가지이며, 이러한 세 종류의 상호작용이 갖는 상대적 중요성은 입사감마선의 에너지와 물질의 원자번호에 따라 다르게 되는데 약 100 keV이하의 낮은 감마선 에너지에 있어서 원자번호가 20이상인 물질인 경우에는 광전 흡수가 주요 반응이 되고, 원자번호가 20에서 30, 또는 그 이하의 낮은 원자번호를 갖는 물질에 대해서는 약 0.1 ~ 100MeV의 넓은 에너지 영역에 대해 콤프턴 산란이 주요 반응임.

• 광전효과(Photoelectric absorption)

- 감광전효과와 경우 입사감마선은 한 개의 원자와 상호작용을 하여 입사감마선의 모든 에너지를 원자의 내각전자에 전달되며, 입사 감마선의 에너지에서 전자의 결합에너지를 뺀 에너지를 갖는 한 개의 전자가 원자로부터 방출됨. 이러한 방출전자의 에너지는 다음의 식 (5)과 같이 나타낼 수 있음.

$$E_c = E_\gamma - E_b \dots\dots\dots (식 5)$$

- 여기서, E_c 는 방출전자의 에너지, E_γ 는 입사감마선 에너지, 그리고 E_b 는 전자의 결합에너지를 의미함.



<그림 3.90> 3가지 주요 유형의 감마선 상호작용의 상대적 중요성

- 광전흡수는 에너지 및 운동량 보존법칙으로 인하여 자유전자와의 사이에서는 일어날 수 없고 항상 원자에 속박된 전자와의 사이에서만 가능하기 때문에 외각전자보다 더 크게 속박되어 있는 내부의 전자와 더 쉽게 반응함.
- K-궤도 전자의 결합에너지보다도 더 큰 에너지를 갖는 감마선이 입사할 경우 전체 광전흡수 반응 중에서 약 80%는 K-궤도 전자와의 사이에서 일어나고, 나머지 20%의 반응 중 대부분은 L-궤도 전자와의 반응이 차지함.
- 광전효과는 물질의 원자번호가 증가함에 따라 일어날 확률이 증가하고 감마선 에너지가 증가함에 따라 단면적은 감소함. 즉 광전흡수가 일어날 확률은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있음.

$$\gamma = constant \cdot \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \dots\dots\dots (\text{식 6})$$

- 여기서, m 및 n 값은 E_γ 및 Z 범위에 따라 약간의 차이는 있으나 대체적으로 $m = 3 \sim 3.5$, $n = 4 \sim 5$ 사이의 값을 나타냄.

• 감마선 분광분석시스템의 기본구성

- 감마선의 측정방법들 중에서 감마선 분광법이 가장 널리 이용되고 있는데, 이는 감마선의 고유에너지를 이용하여 감마선 방출 핵종을 판별한 후 그 에너지에서의 계수율을 구할 수 있는 방법이기 때문임.
- 감마선 스펙트럼 분석을 위하여 필수적인 검출기와 검출기를 통해 얻은 신호를 처리하여 필요한 정보를 얻을 수 있는 다중파고 분석시스템을 구성하고 있는 기본적인 기기들은 다음과 같음.

① HPGe 검출기

- 섬광검출기에 비해 분해능이 뛰어나 감마선 분광분석법에 널리 이용되며, 고순도 Ge검출기의 재료로 사용되는 순수 Ge물질이 갖는 여러 물리적 성질을 아래의 <표 3.46>와 같음.
- 물질내에서 한개의 전자-홀 쌍을 생성하는데 필요한 평균에너지는 보통 밴드폭 에너지 크기의 3~4배 정도인데 비해 Ge의 경우 액체질소온도(77 K)에서는 이 값이 2.96 eV을 나타냄. 이값은 섬광형 검출기로 사용되는 NaI(Tl)의 평균에너지, 약 20 eV와 비교해 보면 고순도 Ge검출기의 에너지 분해능이 NaI(Tl) 검출기의 것보다도 우수함을 알 수 있음.

<표 3.46> 고순도 Ge검출기에 사용되는 순수 Ge물질의 물리적 성질

물리적 특성	특성 값
Atomic number	32
Atomic weight	72.60
Density(300K)(g/cm ³)	5.33
Dielectric constant	16
Forbidden energy gap(300K)(eV)	0.665
Forbidden energy gap(0K)(eV)	0.746
Electron mobility(300K)(cm ² /V-s)	3,900
Hole mobility(300K)(cm ² /V-s)	1,900
Electron mobility(77K)(cm ² /V-s)	36,000
Hole mobility(77K)(cm ² /V-s)	42,000
Energy/Electron-hole pair	2.96

- 검출기 전극에 수집된 전하운반체에 의한 전기적 신호는 전치증폭기(preamplifier)와 증폭기(amplifier)를 통하여 신호처리된 후 아날로그-디지털 변환기(ADC, analog to digital converter)를 거쳐 다중파고분석기(MCA, multichannel analyzer)로 입력되어 스펙트럼으로 나타남.
- 이와 같은 방법으로 얻어진 감마선 스펙트럼으로 부터 감마선 에너지를 구하고 필요한 데이터를 분석하여 정보를 얻는 방법이 감마선 분광분석법인데 여기에 이용되는 각 기기의 일반적 기능은 다음과 같음.

② 고전압공급기

- 방사선 검출기를 동작시키기 위해서 필요한 고전압을 검출기에 인가해 주는 기기가 고전압 공급기(high voltage power supply)임.
- 보통 감마선 검출을 위한 반도체검출기의 경우 인가전압은 positive, 또는 negative 3000 V 근처의 검출기가 흔히 이용되고 이러한 검출기에 고전압을 공급하기 위해서 최대 5 kV까지 공급이 가능한 고전압 공급기가 주로 사용됨.
- 고순도 Ge검출기에 고전압을 인가해 주는 고전압공급기의 필수적인 첨가 기능으로서는 바이어스 셧다운 기능이 반드시 있어야 함. (검출기 냉각을 위한 액체질소 소진 경고)

③ 전치증폭기(Preamplifier)

- 모든 펄스형 방사선검출기의 기본적인 출력신호는 입사방사선에 의해서 생성된 전하 Q 에 대응하는 펄스임.
- 가이거물러형 계수관이나 섬광검출기에서는 전하 Q는 매우 커 비교적 큰 출력펄스를 얻을 수 있지만 그 외의 검출기에서는 전하는 아주 작기 때문에 중간정도의 증폭단 없이는 검출기로부터 들어온 신호만을 갖고서는 신호펄스를 처리해 분석하기에는 어려움.
- 이를 위해 증폭기 앞에 전치증폭기를 사용하게 되는데 전치 증폭기는 가능한 검출기 가까운 곳에 설치해 검출기의 전기 용량성 부하를 최소로 하는 것이 바람직함.

④ 증폭기(Amplifier)

- 전치증폭기의 출력에서 중요한 것은 baseline에서 펄스의 높이가 아니라 갑자기 변화한 부분의 높이를 의미함.
- 이 높이를 평가하기 위해서는 펄스의 높은 끝부분을 뭉툭하게 하고 다음의 펄스가 들어오기 전에

baseline으로 돌아가게 하여야 하며, 이것이 펄스의 단순한 증폭과 함께 증폭기가 하는 가장 중요한 역할임.

- 이러한 일을 수행하는 기본적인 회로를 CR-RC 회로라고 하며, CR미분회로는 다음 펄스가 들어 오기 전에 baseline으로 돌아오게 하는 역할을 하고, RC적분회로는 전치증폭기에서 얻어진 펄스의 높은 끝부분을 뭉뚱하게 하는 역할을 함. 이 두 회로가 결합하여 가우시안 피크와 유사한 모양의 펄스를 나타내게 됨.

⑤ 아날로그-디지털 변환기(ADC)

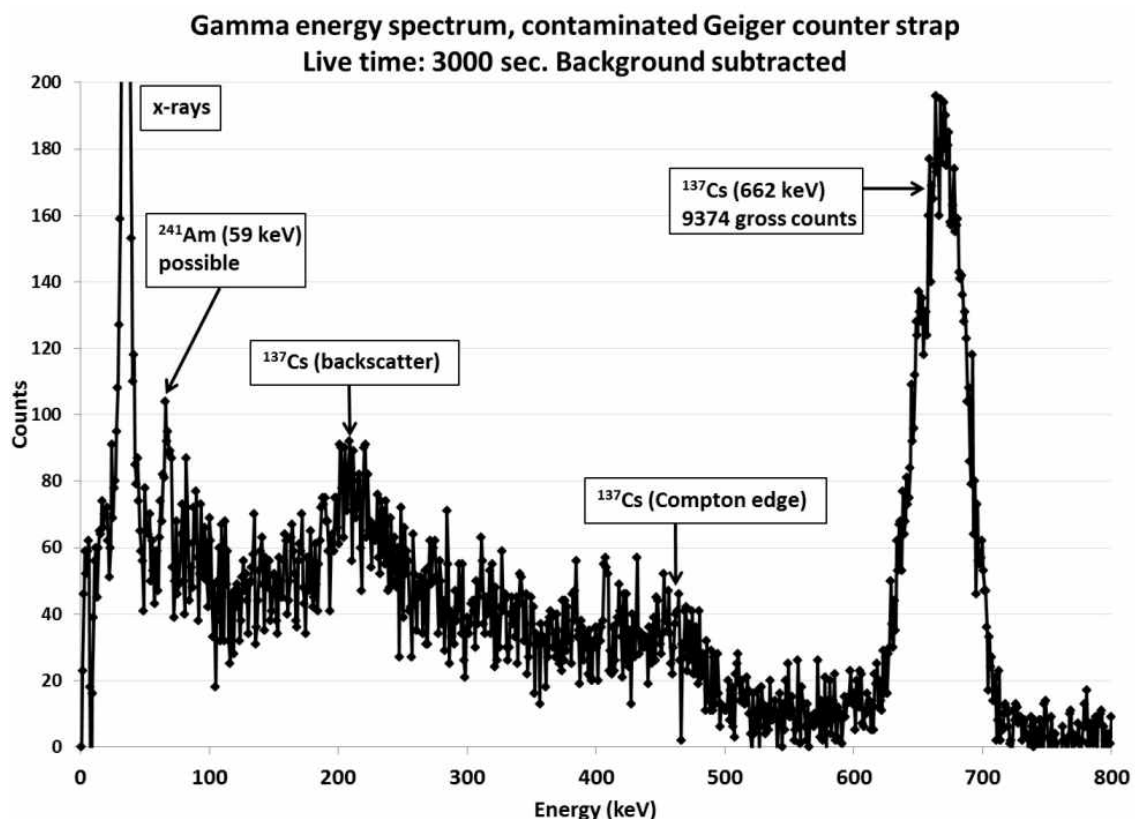
- 아날로그-디지털 변환기(ADC)의 기능은 입력펄스의 높이에 비례하는 디지털 수를 도출 하는 것이며, ADC의 성능은 변환을 수행하는 속도, 변환의 선형성 또는 디지털 출력이 입력진폭에 비례하는 충실성과 변환의 분해능 또는 변환될 수 있는 진폭의 최대영역에 대응한 디지털 척도의 합리성 등의 파라메타로 나타내는 것임.

• 감마선 분광분석 방법

- 검출기와 감마선 분광분석시스템으로 부터 얻은 감마선 스펙트럼에서 필요한 정보를 얻기 위해서는 적절한 분석을 실시하여야 하는데, 최근에는 많은 분광분석 소프트웨어의 개발로 사용자의 요구에 맞도록 분광분석을 자동으로 수행할 수 있음.
- 검출기전극에 수집된 전하운반체에 의한 전기적신호를 앞에서 설명한 감마선 분광시스템을 이용해 얻은 감마선 스펙트럼으로 부터 감마선 에너지를 구하고, 필요한 데이터를 분석하여 정보를 얻는 방법을 감마선 분광분석법이라 하는데, 감마선 스펙트럼으로부터 필요한 데이터를 얻는데 필요한 감마선 스펙트럼의 기본적인 특성과 형태 및 감마선 스펙트럼의 분석방법은 아래와 같음.

① 감마선 스펙트럼의 형태

- 우선, 감마선 검출기와 감마선 분광분석시스템을 이용해 측정 한 감마선원으로 부터 얻어진 감마선 스펙트럼의 기본적 형태는 아래의 그림과 같이 감마선과 검출기 물질과의 상호작용 결과로 피크가 결과를 나타냄.



<그림 3.91> Measured spectrum of ^{137}Cs from a NaI(Tl) detector

- <그림 3.91>에 나타난 피크 외에 감마선 스펙트럼상에 나타날 수 있는 피크들이 많이 있는데 각 피크들은 다음과 같은 검출 특성에 의해 나타남.

- Photopeak : 감마선과 검출기물질과의 광전효과에 의해서 발생한 엑스선과 오제전자의 에너지 모두를 검출기내에서 잃는다고 하면 감마선에너지와 똑같은 에너지의 피크가 생기는데 이것이 photopeak로써 핵종의 종류와 양을 분석하는데 가장 유용하게 이용됨.
- Backscatter peak : 검출기는 일반적으로 주위를 차폐해서 사용하기 때문에 방사선원으로부터 방출된 감마선이 주위의 차폐물질에 의해 컴프턴 산란이 일어나 이것이 검출기에 흡수됨으로써 후방산란피크가 나타나게 됨. 후방산란 피크의 에너지는 식으로 구 할 수 있음.

$$E_{\gamma, \min} = \frac{m_0 c^2}{2 + m_0 c^2 / E_{\gamma}} \dots\dots\dots (\text{식 } 7)$$

- Compton edge : 입사 감마선이 컴프턴산란에 의해 잃게 되는 최대 에너지이고, 그 값은 다음 식에 의해 구할 수 있음.

$$E_{\gamma, \max} = \frac{E_{\gamma}}{1 + m_0 c^2 / 2 E_{\gamma}} \dots\dots\dots (\text{식 } 8)$$

- Annihilation peak : 이 피크는 0.511 MeV에서 나타나는데 양전자 소멸시간이 매우 짧기 때문에 최초의 전자쌍 생성 상호작용과 거의 동시에 일어남.
- Compton continuum : 감마선 스펙트럼상에 약 1 MeV이하에서 평활하게 생기는 부분으로서 이것에 의해 감마선 스펙트럼상에 background의 영향이 항상 존재하게 되어, 측정하한 값에 영향을 미치며, 작은 피크판별에 어려움.
- Ge escape peak : 광전효과에 수반되어 발생한 X선이 검출기 바깥으로 이탈할 경우에는 감마선 에너지에서 X선의 에너지를 뺀 피크가 나타남. 검출기의 유효체적이 작을 경우 이러한 X선 이탈피크가 생길 확률이 높아짐.
- Single escape peak : 전자쌍 생성에 이은 양전자 소멸에 수반된 2개의 광자가 검출기 내에서 모두 감소되거나 일부가 소멸되는 복잡한 과정이 일어나게 되며, 이때 한 개의 광자가 검출기 밖으로 이탈할 경우, $(h\nu - m_0 c^2)$ 의 위치에 피크가 나타나게 되는데 이것이 단일 이탈피크임.
- Double escape peak : 전자쌍 생성에 이은 양전자 소멸에 수반된 2개의 광자가 검출기 밖으로 이탈할 경우, $(h\nu - 2m_0 c^2)$ 의 위치에 피크가 나타나는데 이것을 이중 이탈피크라고 함.
- Sum peak : 한 핵종으로 부터 두개의 감마선이 동시에 발생할 경우, 이를 측정할 때 검출기 내에서 두개의 에너지가 동시에 검출기물질에 흡수되면 두 에너지가 합쳐진 에너지를 갖는 핵종이 흡수된 것으로 판별해 그 위치에 피크가 나타나게 되는데 이것을 sumpeak 라 함. 예로써 ^{60}Co 핵종을 측정할 때 광전피크는 1173 keV와 1332 keV에서 나타남. 그러나 감마선 스펙트럼상에는 두 에너지의 합인 2505 keV에서도 피크를 볼 수 있으며, 이것은 sum peak에 의해서 나타난 것으로 판단할 수 있음. 이것은 고방사능의 핵종을 측정할 경우와 우물형의 검출기를 이용해 감마선 스펙트럼을 얻을 때 흔히 나타나는 현상임.

• 분해능

- 감마선 스펙트럼 분석에 있어서 검출기의 분해능이 좋아야 하는 것은 꼭 필요한 조건으로서 핵종분석 시 분해능이 좋은 검출기로 얻은 감마선 스펙트럼상의 피크의 모양은 피크의 면적을 구하는데 있어서 오차를 줄이고, 감마선 핵종의 에너지를 분리해 핵종을 판별하는데 큰 역할을 함.

• 에너지 교정

- 감마선 분광분석시스템에 대한 에너지교정은 감마선에 의해 검출기에 축적된 에너지와 출력펄스의 크기와 관계에 의해 구할 수 있으며, 펄스의 크기는 MCA의 ADC를 이용해 측정할 수 있고 에너지교정은 ROI(region of interest)의 폭과 위치를 결정하고 미지의 감마선 핵종의 에너지를 이용해 핵종을 판별하는데 필요함.

- 따라서, 좋은 분광시스템은 직선성이 좋아 한번 에너지교정을 하면 변화가 작아야 하는데, 실제 분광시스템을 사용하다 보면 약간의 변화가 오게 되므로 사용 시 자주 에너지교정을 하는 것이 요구됨.
- 특히, 핵종 판별에 있어서 분광분석시스템의 직선성은 필수 불가결한 조건이며, 에너지교정을 위해서는 알고 있는 감마선 핵종의 에너지가 2개 이상 있어야 함. 알고 있는 감마선 에너지를 E_1 , E_2 로 놓고, 각각의 에너지가 스펙트럼상에 나타나는 위치를 x_1 , x_2 라 하면, 에너지 E 와 펄스 크기 x 와의 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립됨.

$$E = mx + b, \quad m = \frac{E_2 - E_1}{x_2 - x_1}, \quad m = \frac{x_2 E_1 - x_1 E_2}{x_2 - x_1} \dots\dots\dots (\text{식 9})$$

나. 전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 기초 물성

(1) 전자폐기물을 잔골재로 대체한 모르타르의 기초물성

(가) 압축강도 및 휨강도

○ 시험체 제작 및 실험 방법

- 일반 자연사로 제작한 모르타르 시험체를 기준으로 폐 브라운관 유리를 파쇄하여 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 압축 및 휨강도 특성을 비교·분석하였음.
- 아래의 <표 3.47>에 나타난 것과 같이 시험체 배합 조건은 물-결합재비 0.45와 0.35를 기준 배합으로 플라이애시(FA) 20%, 고로슬래그(BFS) 30%를 치환하였으며, 폐 유리 잔골재 대체율은 0%, 50%, 100%로 하였음.
- 압축강도 및 휨강도 실험은 사진에 나타난 것과 같이, KS L ISO 679 시험방법에 따라 크기 40×40×160 mm 시편을 제작하여 측정하였으며, 휨강도를 선 측정한 후 파단된 시편을 이용하여 압축강도를 측정하였음.



<그림 3.92> 시험체 제작



<그림 3.93> 압축강도 측정 사진

<그림 3.94> 휨 강도 측정 사진

<표 3.47> 시험체 배합표

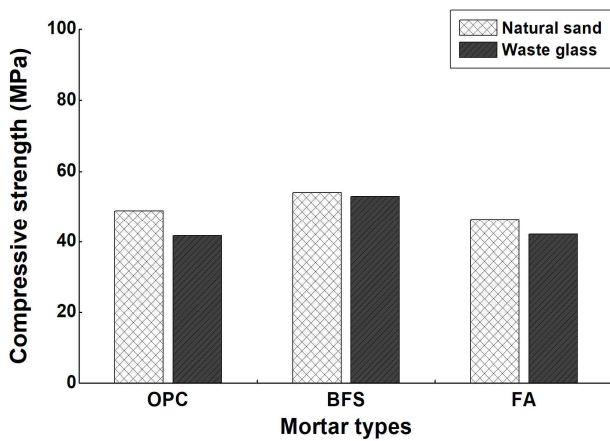
Type	W/B	Weight (kg)					
		Water	Cement	Sand	W.G	FA	BFS
0.35OPC_0%	0.35	255	728	1336	-	-	-
0.35OPC_50%	0.35	255	728	668	771	-	-
0.35OPC_100%	0.35	255	728	-	1542	-	-
0.35FA20_100%	0.35	255	583	-	1542	146	-
0.35BFS30_100%	0.35	255	510	-	1542	-	218
0.45OPC_0%	0.45	258	574	1456	-	-	-
0.45OPC_100%	0.45	258	574	-	1679	-	-
0.45FA20_0%	0.45	258	459	1456	-	115	-
0.45FA20_100%	0.45	258	459	-	1679	115	-
0.45BFS30_0%	0.45	258	402	1456	-	-	172
0.45BFS30_100%	0.45	258	402	-	1679	-	172

* W.G : waste glass (CRT glass)

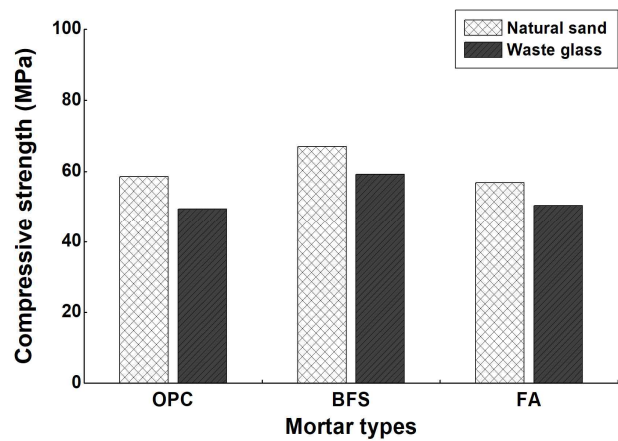
○ 압축강도 및 휨강도 특성

- <그림 3.95>에는 물-결합재비 0.45를 기준으로 자연사를 잔골재로 사용한 모르타르 시험체와 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 압축강도를 나타낸 것임. <그림 3.95>의 (a)는 양생재령 7일 후 측정한 값이며, (b)는 28일 양생 후 측정한 결과임.
- 실험 결과를 살펴보면, 일반 자연사를 사용한 모르타르 시험체는 양생 재령이 증가할수록 압축강도가 증가하는 일반적인 특성을 나타냈으며, 고로슬래그를 혼합 사용한 경우의 압축강도 상승효과가 14.52%로 가장 높게 나타남.
- 반면, CRT 폐유리를 100% 대체한 모르타르 시험체는 양생 기간이 7일에서 28일로 증가했을 때 압축강도가 다소 상승하였으나, 물-결합재비와 혼화재 종류에 상관없이 일반 자연사를 사용한 시험체보다 압축강도가 저하되는 현상을 보임.
- 양생 기간 28일 후 측정한 CRT 폐유리 시험체의 압축강도를 살펴보면, 일반 모르타르 시험체 대비 OPC 시험체는 16%, BFS시험체는 12%, FA시험체는 11%의 강도감소를 나타냄. 이는 폐유리의 매끄러운 표면이 시멘트 페이스트와의 점착을 방해하여 압축강도가 감소하는 것으로 판단됨.
- 광물질 혼화재에 의한 압축강도의 영향을 살펴보면, 폐유리 잔골재의 대체 유·무에 상관없이 고로슬래그와 플라이애시를 치환한 시험체가 OPC 시험체보다 다소 높은 압축강도를 나타냄. 특히, <그림 3.95>의 (b)에서, CRT 폐유리를 100% 대체하고 고로슬래그를 혼합한 시험체(BFS_waste glass)의 압축강도가 자연사를 사용한 시험체(OPC_natural glass)의 압축강도와 동등한 수준을 나타내는 것을 알 수 있음.
- 따라서 CRT 폐유리의 대체 사용으로 인해 압축강도가 저하되는 현상은 분말도가 높은 광물질 혼화재를 함께 사용하여 원활한 수화반응과 포졸란 반응을 유도함으로써 시멘트만을 결합재로 사용한 경우와 동등한 수준으로 강도 보상 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨.

- <그림 3.96>의 (a)와 (b)는 7일 및 28일 양생 조건에 대한 각각의 휨강도를 나타낸 것임. 휨강도 특성에서도 압축강도 특성과 같이 양생 기간이 길어질수록 휨강도는 상승하였으며, 혼화재를 사용한 시험체의 휨강도가 다소 증가하는 것으로 나타남.
- 따라서, 압축강도와 마찬가지로 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 경우에는 고로슬래그 혼화재를 함께 사용하여 OPC 수준으로 휨강도를 향상할 수 있을 것으로 사료됨.
- 한편, <그림 3.97>은 물-결합재비 0.35를 기준으로 자연사를 잔골재로 사용한 모르타르 시험체와 CRT 폐유리를 0%, 50%, 100% 대체한 시험체의 28일, 91일 압축강도와 휨강도를 비교하여 나타낸 것임.
- 시멘트량을 증가시켜도 CRT 폐유리의 대체율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타냈으나, 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 대체하여 강도보상 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨.

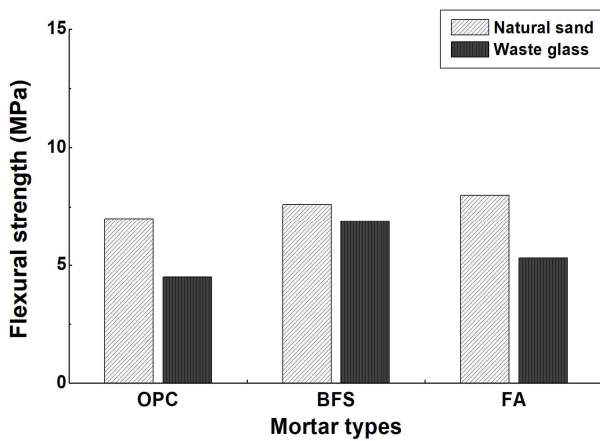


(a) 7 days curing

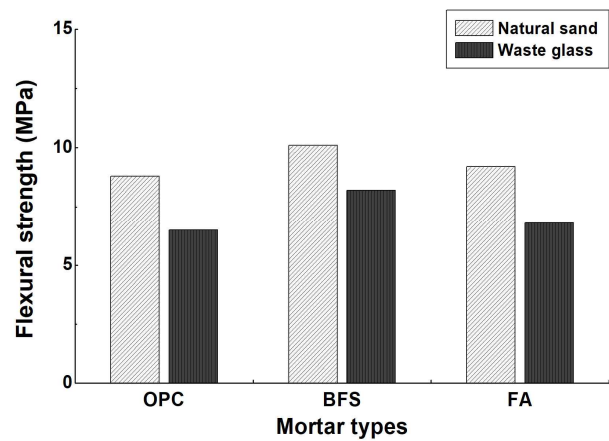


(b) 28 days curing

<그림 3.95> Result of compressive strength (W/B 0.45)

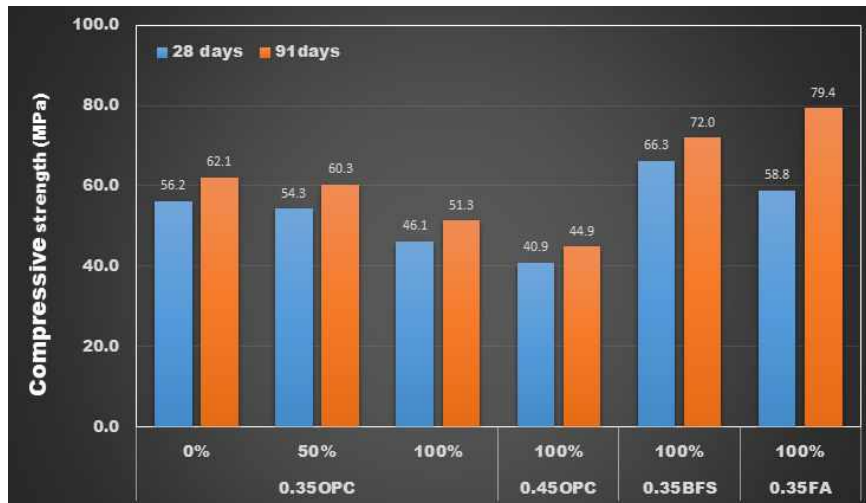


(a) 7 days curing

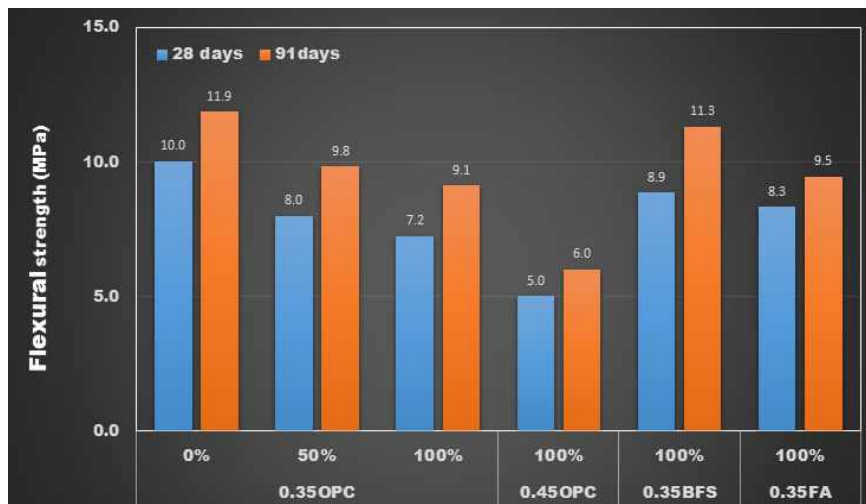


(b) 28 days curing

<그림 3.96> Result of flexural strength (W/B 0.45)



(a) 압축강도 결과

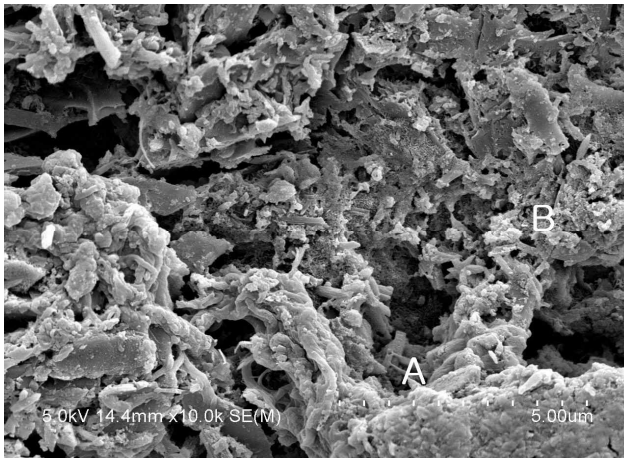


(b) 휨강도 결과

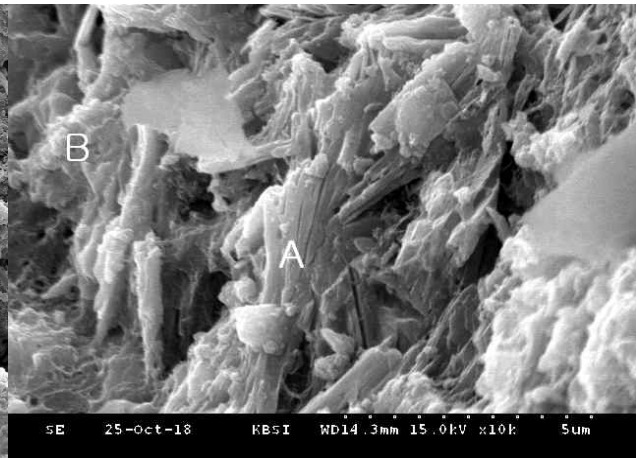
<그림 3.97> 물-결합재비 0.35 시험체의 압축강도 및 휨강도 결과

(나) SEM 이미지 및 XRD 분석

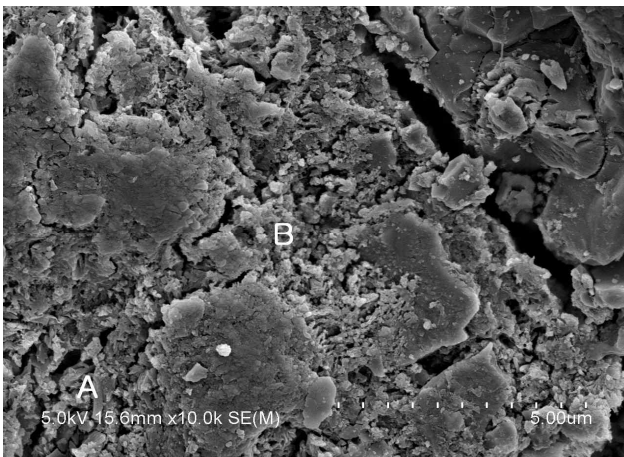
- 일반 자연사로 제작한 모르타르 시험체와 CRT 폐유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 입상 및 조성변화를 확인하기 위해 각 시험체의 분말 샘플을 대상으로 전자주사현미경(SEM) 이미지 분석과 MiniFlex 600(Rigaku)을 이용하여 XRD분석을 수행하였다. 분석시료는 건조기($100 \pm 5^\circ\text{C}$)에서 24시간 건조한 시료를 이용하였으며 XRD의 측정조건은 CuK α : 40kV, 15mA, Scanning speed: $5^\circ/\text{min}$, 2: $5 \sim 65^\circ$ 로 하였음.
- <그림 3.98>의 SEM 사진 결과에서 알 수 있듯이, 일반 자연사를 사용한 경우와 동일하게 CRT 폐유리를 대체한 모르타르 분말 시료에서도 수산화칼슘과, C-S-H가 형성된 것을 확인할 수 있음. 또한 밀실한 구조를 나타내는 것을 확인할 수 있음.
- 한편, <그림 3.99>에 제시된 XRD 측정 결과, 자연사 모르타르 시험체 결과와 유사하게 CRT 폐유리 모르타르 시험체의 Quartz와 C-S-H의 피크가 확인되었음.
- 따라서 중금속이 함유된 CRT 폐유리를 잔골재로 사용한 경우에도 수화생성물의 형성에 큰 무리가 없는 것으로 판단됨.



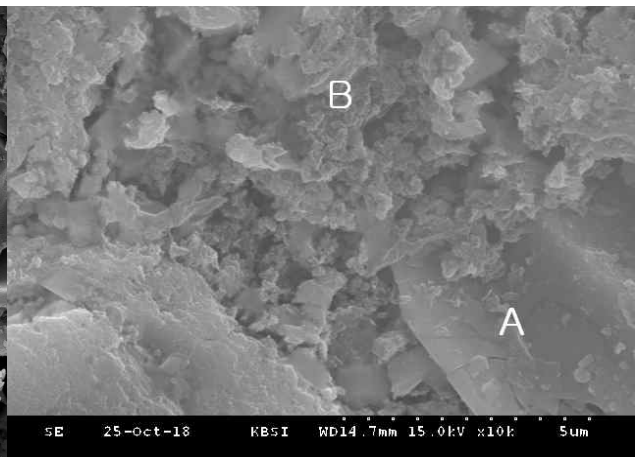
(a) 0.35OPC_0%



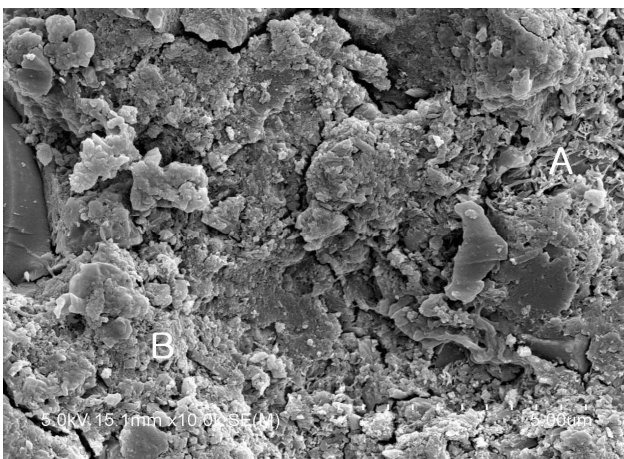
(b) 0.35OPC_50%



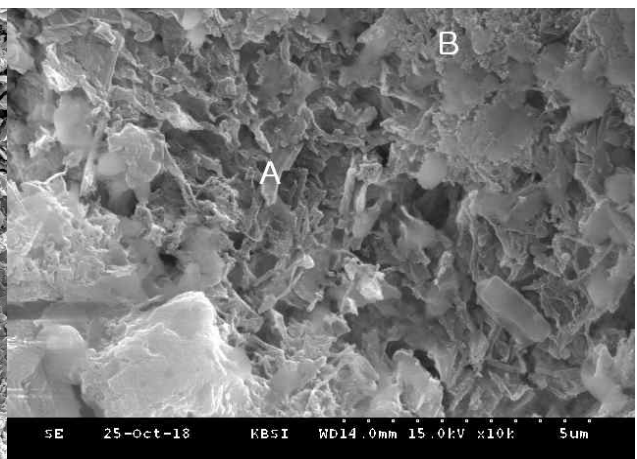
(c) 0.35OPC_100%



(d) 0.35BFS30_100%



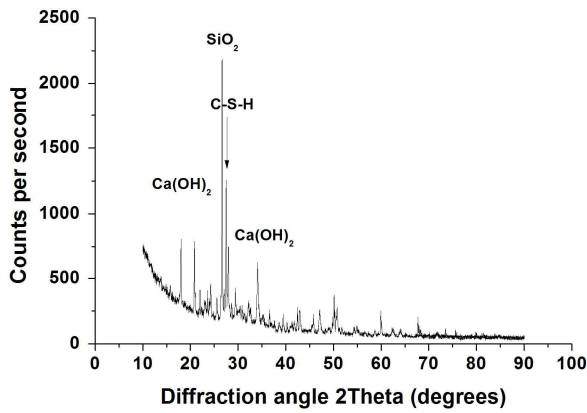
(e) 0.35FA20_100%



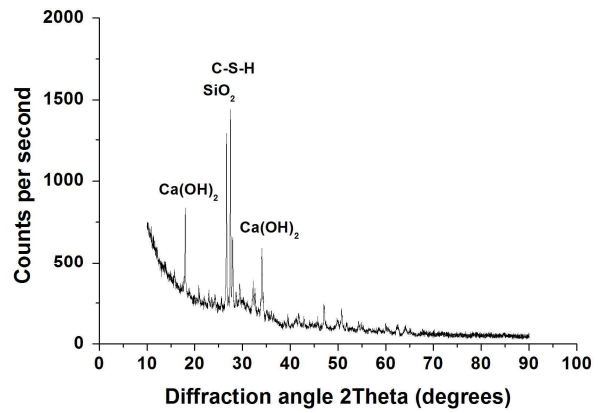
(f) 0.45OPC_100%

※ A = $\text{Ca}(\text{OH})_2$, B = C-S-H

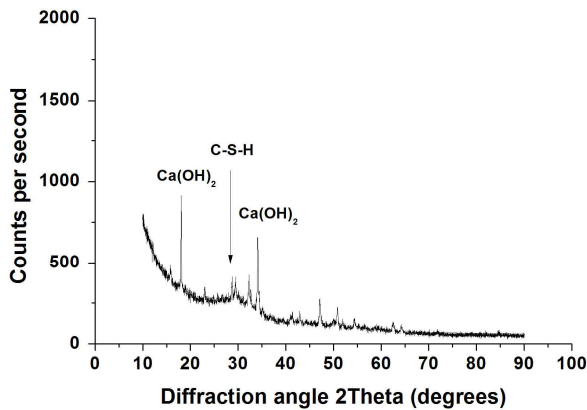
<그림 3.98> SEM 이미지



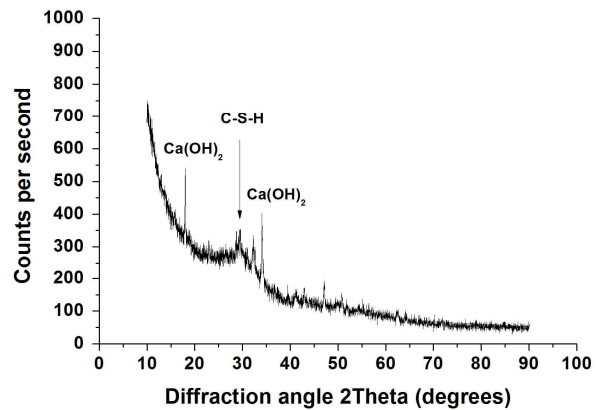
(a) 0.35OPC_0%



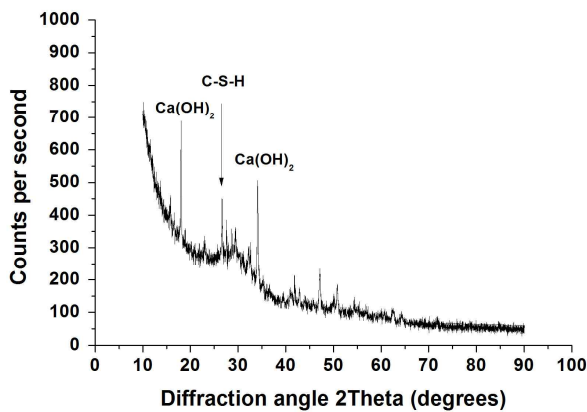
(b) 0.35OPC_50%



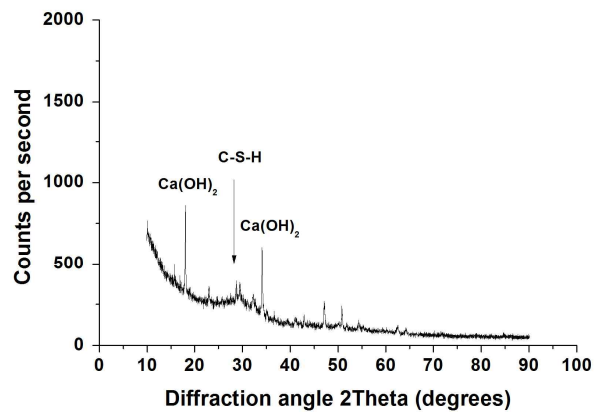
(c) 0.35OPC_100%



(d) 0.35BFS30_100%



(e) 0.35FA20_100%



(f) 0.45OPC_100%

<그림 3.99> XRD 분석 결과

다. 전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 방사선 차폐 성능

(1) 감마선 분광법을 이용한 차폐 채움재의 차폐 성능 검증

○ 전자폐기물 차폐채움재 실험체 블록 제작

- 감마선 차폐 특성을 파악하기 위한 실험에 사용된 시험체는 물-시멘트비 0.45의 조건으로 일반 강모래와 전자폐기물 혼입한 시험체를 각각 제작하였음. 시험체는 150 mm×150 mm×50 mm의 큐빅 형태로 제작하였으며 채움재의 배합 설계는 아래의 <표 3.48>와 같음.

<표 3.48> 시험체 배합 조건

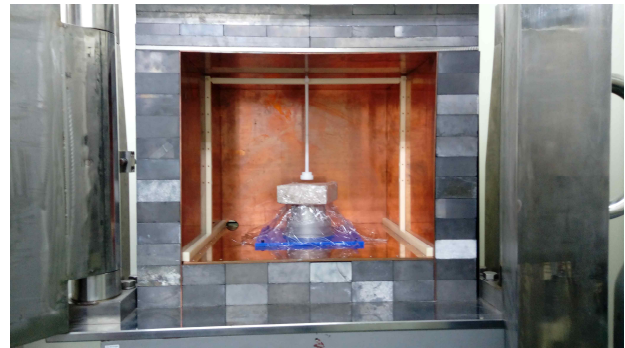
Type	W/B (%)	Heavy weight waste glass substitution ratio (%)	Unit Weight (kg/m ³)			
			Water	Cement	Sand	Waste glass
River Sand	45	0	260	578	1291	–
Heavy weight waste glass	45	100	260	578	–	1519

○ 전자폐기물을 적용한 채움재의 감마선 분광 실험 방법

- 방사선 차폐 실험을 수행하기 위해서는 핵과 관련된 사건을 일으킬 수 있는 핵이나 입자선을 제공해 줄 수 있는 장비인 선원과 방출되는 핵이나 입자를 검출하기 위한 검출기, 그리고 검출기에 수집된 정보를 처리하기 위한 정보처리장치가 필수임.
- 본 연구에서는 전자폐기물을 적용한 차폐채움재의 감쇠계수를 산정하기 위하여, 감마선 분광법을 이용한 감마선 투과율 실험을 수행하였음.
- 방사선이 차폐물질을 1차원적으로 투과하는 정량적인 투과율(T)과 감쇠계수를 구하기 위해서 아래의 <그림 3.100>과 같이 납 블록 챔버에 방사선원과 검출기 사이에 차폐채움재 블록을 설치하여 실험 장치를 구성하였음.



(a) 핵종 별 Blank 상태에서의 실험



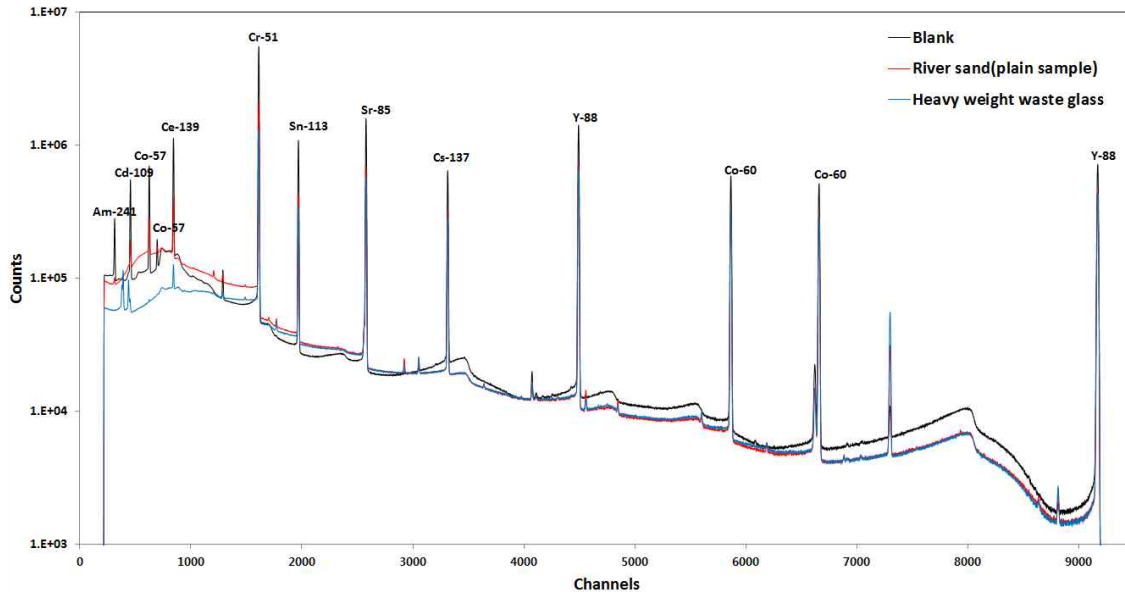
(b) 차폐 채움재 블록 거치 후 핵종별 감마선 투과 실험

<그림 3.100> 감마선 분광법 실험 전경

- 즉, 방사선의 세기는 방사선이 진행하는 방향과 거리에 따라 변화하므로 일정한 방향으로 충분한 직진성을 가지고 있는 방사선만 차폐재에 입사시켜 정확한 차폐실험을 진행할 수 있도록 하였으며, 방사선 차폐 실험에 사용된 감마선 검출기는 상대효율 120% 고순도 Ge-검출기를 사용하였음.
- 방사선원(핵종)은 국내 시험기관에서 일반적으로 사용 가능한 표준핵종을 사용하였으며, 중·저준위 방사성 폐기물을 대상으로 한 감마선 투과 실험을 실시하였음.
- 본 연구에서 방사선원(핵종)은 ⁵⁷Co, ¹¹³Sn, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co를 사용하였으며, 각각의 감마선 에너지량은 122.1 keV, 391.77 keV, 661.7 keV, 1173.2 keV, 1332.5 keV로 하여 중·저에너지부터 고에너지까지의 선형감쇠계수 변화를 분석하였음.

○ 전자폐기물을 적용한 채움재의 감마선 차폐 성능 결과 (반가층)

- <그림 3.101>은 감마선 투과 실험에서의 스펙트럼 결과를 나타낸 것이며, 그 결과를 이용하여 식 (1)을 이용하여 계산한 선형감쇠계수 값의 변화를 <표 3.49>와 <그림 3.102>에 나타내었음.
- 고순도 Ge-검출기와 감마선 점선원 사이에 실험체를 거치했을 때와 해당 감마선 피크의 순계수율을 측정하여 비교하였음.



<그림 3.101> 감마선에너지와 방사선원(핵종)별 채움재 블록의 감마선량 변화

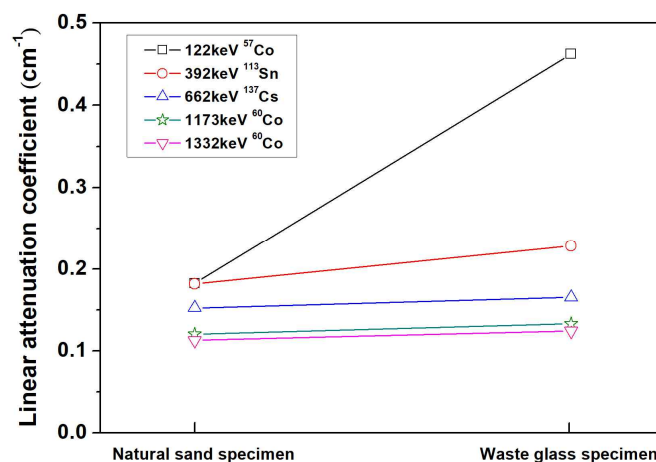
- 여기서, 재료 내에서 이동한 단위 거리 당 방사선 빔 강도에 대한 감소 정도의 측정값(cm^{-1})을 선형 감쇠계수(linear attenuation coefficient, μ)로 표현할 수 있으며, 아래의 식(1)을 이용하여 차폐체의 선형감쇠계수를 산정할 수 있음.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

- 여기서, x 는 차폐체의 두께이며, N 과 N_0 는 검출기와 감마선 점선원 사이에 차폐체가 있을 때와 없을 때의 해당 감마선 피크의 순계수율을 각각 나타냄.

<표 3.49> 차폐채움재의 감마선 선형감쇠계수 결과

감마선 에너지	방사선원(핵종)	선형감쇠계수 (cm^{-1})		상승률(%)
		River Sand (plain sample)	Heavy weight waste glass	
122.1keV	^{57}Co	0.18	0.46	256
391.7keV	^{113}Sn	0.18	0.23	128
661.7keV	^{137}Cs	0.15	0.17	113
1173.2KeV	^{60}Co	0.12	0.13	108
1332.5keV	^{60}Co	0.11	0.12	109

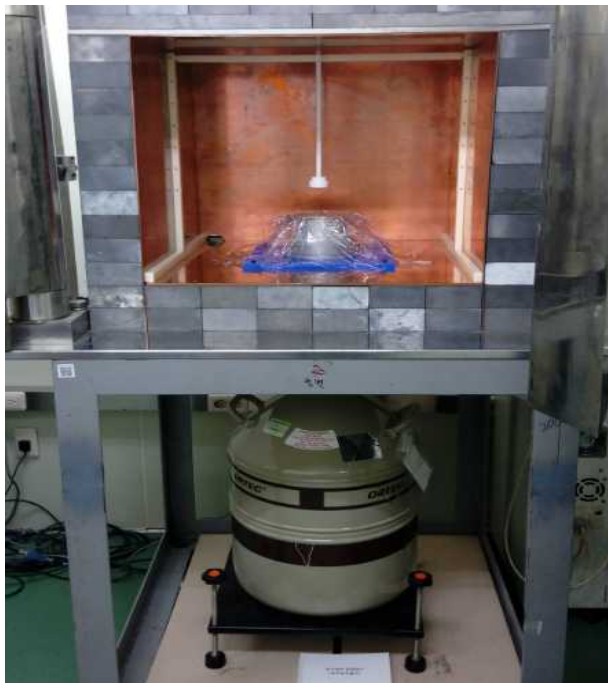


<그림 3.102> 방사선원 종류에 따른 차폐재별 감마선 선형감쇠계수

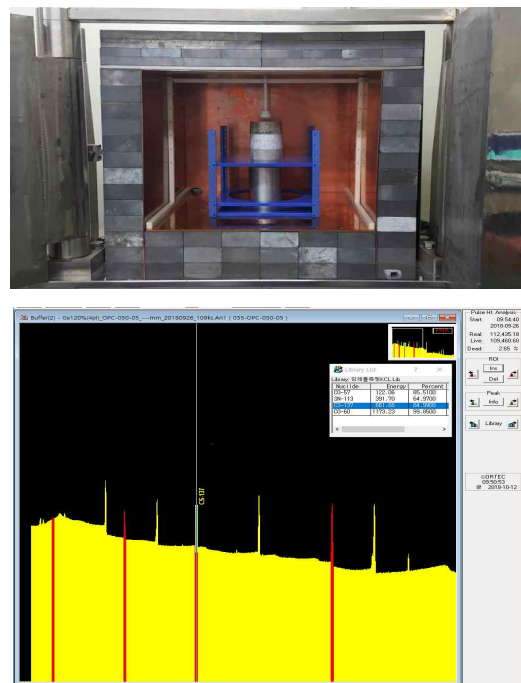
- 감마선 선형감쇠계수의 비교 결과를 살펴보면, 전자폐기물을 대체 혼합한 채움재의 선형감쇠계수가 일반 강모래를 사용한 모르타르 블록의 선형감쇠계수보다 높은 것을 알 수 있음.
- 방사선원(핵종)별 선형감쇠계수를 살펴보면, 강모래를 사용한 차폐재의 경우, 122.1 keV ^{57}Co , 391.7 keV ^{113}Sn , 661.7 keV ^{137}Cs , 1173.2 keV ^{60}Co , 1332.5 keV ^{60}Co 에 대하여 각각 0.18, 0.18, 0.15, 0.12, 0.11 (cm^{-1})의 선형감쇠계수를 나타냄. 반면, 전자폐기물을 대체한 차폐 블록의 선형감쇠계수는 0.46, 0.23, 0.17, 0.13, 0.12 (cm^{-1})를 나타냄.
- 특히, 본 연구의 개발 재료가 중·저준위 방사성 물질의 차폐재임을 감안했을 때, 122.1 keV ^{57}Co 방사선원에 대해서 선형감쇠계수는 256% (자연사 차폐재 대비 2.56배 상승) 증가하여 차폐 성능 상승 효과를 나타내었음.

(2) 차폐 성능 검증 시험 방법 정립

- 저에너지부터 고에너지까지 분석이 가능한 감마선 분광법을 최적화하기 위한 다양한 변수의 차폐 투과 실험을 수행하였음. 또한, 시험체의 크기를 최적화하고 전처리 과정을 거쳐 시험 결과의 신뢰도를 향상하였음.
- 감마선 투과 방법(감마선분광법)을 이용한 차폐블록의 차폐성능 실험 방법
 - 표준 방사선원(핵종)의 종류와 에너지상의 변화에 따른 전자폐기물 시험체의 차폐 성능을 평가하기 위하여 감마선 분광법을 이용한 감마선 투과 실험을 세부적으로 수행하였음.
 - 감마선 투과 실험은 방사선이 차폐 재료를 1차원적으로 투과하는 정량적인 감쇠율을 측정하기 위하여 아래 <그림 3.103>과 같이 납 블록 챔버를 구성하였으며, 표준 방사선원과 검출기 사이에 시험체를 거치시키고 방사선만을 선형으로 직접 입사시켜 정확한 차폐성능 실험의 신뢰도를 향상하였음.
 - 상대효율 120%의 고순도 Ge-검출기를 이용하였으며, 방사선원의 종류는 ^{57}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{60}Co 의 표준 핵종을 대상으로 하였음. 각각의 방사선원에 대한 에너지상은 122.1 keV, 391.77 keV, 661.7 keV, 1173.2 keV로 하여 중·저에너지부터 고에너지까지의 방사선 차폐 특성을 데이터 D/B로 구축함.



(a) Blank 상태에서의 감마선 측정 (N_0)



(b) 시험체 거치 후 감마선 측정 (N)

<그림 3.103> 감마선 분광법을 이용한 차폐블록의 차폐성능 실험

○ 시험체 제작 및 실험 변수

- 산업폐자원을 사용한 차폐 블록은 모르타르 및 콘크리트의 공인시험용 시험체 크기인 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체 크기로 제작하였으며, 일정 기간 양생 과정을 거친 후 시험체를 절단하여 실험함.
- 감마선 투과실험에 앞서 절단면을 연마한 후 미세 폴리싱 처리를 통해 감마선이 직접 투과되는 표면을 전처리 하였음.
- 1차년도와 달리 중금속을 함유한 고밀도의 산업폐유리의 사용량을 달리하여 대체율에 따른 차폐 성능 변화를 분석하였음.
- 반가층의 산정과 방사능 차폐에 적절한 차폐체 두께를 정립하고자 시험체 두께를 5, 10, 15 cm로 달리하여 시험을 수행함.
- 산업폐유리 외 플레이애시 및 고로슬래그 산업부산물의 영향을 검토하고자 다음과 같은 <표 3.50>의 배합 조건을 추가하였음.

<표 3.50> 변수별 차폐 블록 배합 조건

Type	W/B (%)	S/C (%)	Unit weight (kg)					
물결합재비_시멘트종류_폐유리대체율			W	C	S	H	FA	BFS
35_OPC_0%	35	1.83	255	728	1336	-	-	-
35_OPC_50%		1.98	255	728	668	771	-	-
35_OPC_100%		2.12	255	728		1542	-	-
35_FA20_100%		2.12	255	583	-	1542	146	-
35_BFS30_100%		2.12	255	510	-	1542	-	218
45_OPC_100%	45	2.93	258	574	-	1679	-	-

※ H: Heavyweight waste glass



(a) 일반 잔골재와 산업폐유리

(b) 공시체 제작



(c) 두께별 시험체 절단

(d) 표면처리 후 시험체 사진

<그림 3.104> 방사선 차폐 성능 시험용 시험체 제작 과정

(3) 차폐 성능 검증식 (선형감쇠계수 및 반가층 산정)

○ 선형감쇠계수 (linear attenuation coefficient, μ)

- 방사선이 어떤 물질 혹은 매질을 통과하는 동안 그 매질의 구성 원자 또는 원자핵과 반응할 때 방사선의 세기가 감쇠하게 됨. 즉, 공간 중 두께가 x cm 인 차폐체가 있을 때 차폐 효과로 인하여 감쇠현상을 나타내게 됨.
- 따라서 재료 내에서 이동한 단위 거리 당 방사선 빔 강도에 대한 감소 정도의 측정값(cm^{-1})을 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient, μ)로 표현할 수 있으며, 아래의 식(1)을 이용하여 차폐체의 선형감쇠계수를 산정할 수 있음.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

- 여기서, x 는 차폐체의 두께이며, N 과 N_0 는 검출기와 감마선 점선원 사이에 차폐체가 있을 때와 없을 때의 해당 감마선 피크의 순계수율을 각각 나타냄.
- 선형감쇠계수는 방사선의 에너지와 차폐재의 종류에 따라 변화되며, 같은 종류의 차폐재라도 재료의 조성(밀도)에 따라 달라지기 때문에 같은 종류 및 동일한 두께의 차폐체에서 선형감쇠계수가 큰 것이 차폐효과가 높다는 것을 의미함.

○ 반가층 (Half-value layer, HVL (cm))

- 방사선의 차폐효과는 차폐재의 비중과 두께의 곱에 비례하며, 두께가 동일하면 재료의 비중이 클수록 차폐효과는 우수하게 나타남.
- 최초의 방사선 선속의 세기를 절반으로 감소시키는 임의의 차폐체의 두께를 ‘반가층(Half-value layer, HVL)’이라 하며, 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있음.

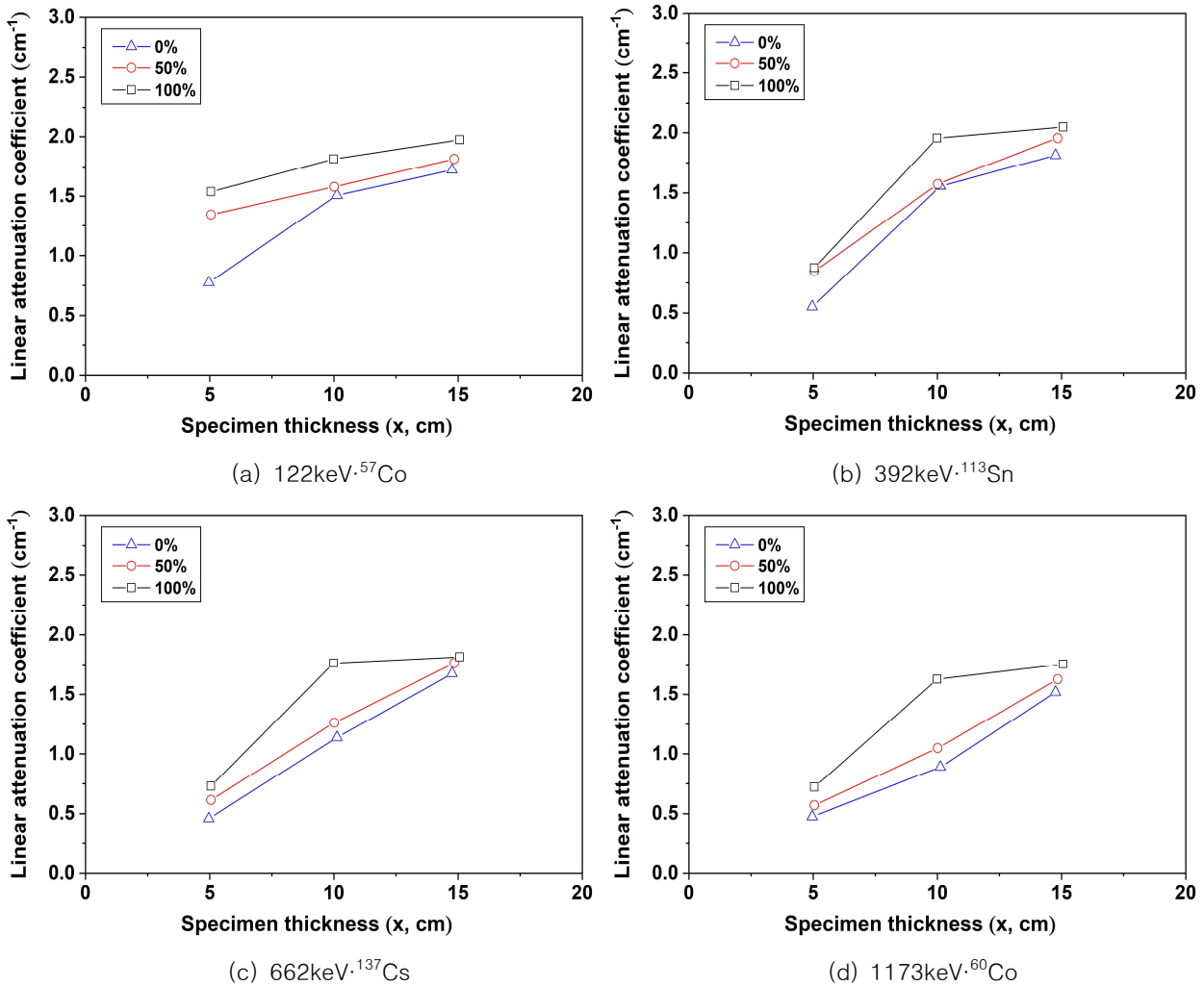
$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \doteq \frac{0.693}{\mu} \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

- 반가층은 차폐체의 설계에 주로 사용되며, 차폐효용성(effectiveness)을 의미함. 즉, 재료의 반가층이 작을수록 더 작은 체적으로 차폐성능을 만족할 수 있으므로 감마 차폐 효용성이 좋아지는 것을 의미하며, 이는 차폐재의 두께를 감소시킬 수 있는 경제적인 효과를 지닌 것임.

(4) 전자폐기물을 적용한 모르타르 시험체의 차폐 특성 및 성능 D/B

○ CRT 폐유리 대체율에 따른 감마선 감쇠계수 변화

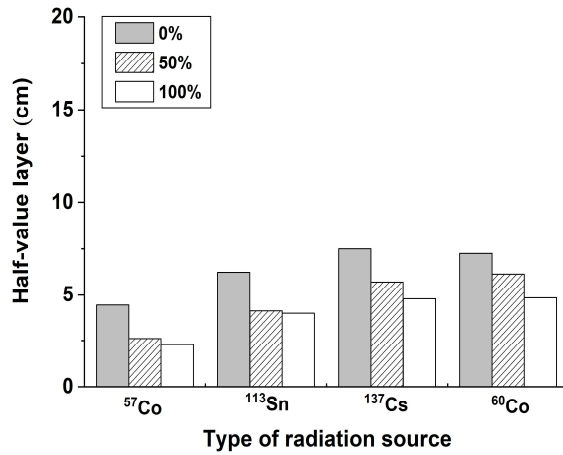
- 아래의 <그림 3.105>은 전자폐기물을 분쇄한 잔골재로 제작한 차폐블럭의 감마선 분광실험을 통해 얻은 감마선 스펙트럼 결과를 바탕으로 식(1)을 이용하여 계산한 선형감쇠계수의 변화를 그래프로 나타낸 것임.
- 실험 결과, 산업폐자원(고밀도 폐유리)의 대체 혼입율이 높아질수록 선형감쇠계수가 상승하는 효과를 보였으며, 이는 산업폐유리가 함유하고 있는 중금속으로 시험체가 높은 밀도를 갖게 됨으로써 방사선 차폐효과가 상승하는 것으로 판단됨
- 특히, ^{57}Co 방사선원에 대해서는 선형감쇠계수가 크게 상승하는 것으로 나타남. 고에너지의 감마선에 대해서는 선형감쇠계수가 증가 효과가 다소 낮아지는 것을 알 수 있음.



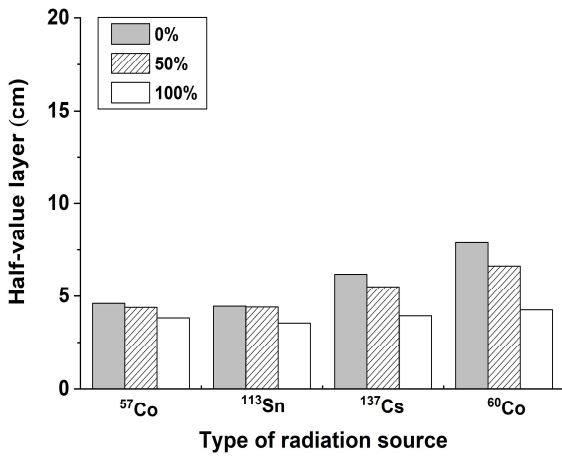
<그림 3.105> 차폐체의 두께 증가에 따른 핵종별 선형감쇠계수 변화

○ CRT 폐유리 대체율에 따른 반가층

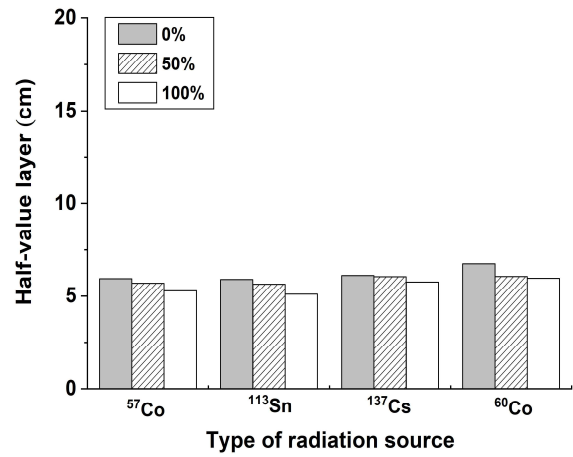
- 시험체의 정밀 두께로 계산한 각각의 선형감쇠계수를 통해 아래 그림과 같이 산업폐자원의 대체율에 따른 핵종별 반가층 변화를 나타내었음.
- <그림 3.106>를 보면, 일반 모래로 제작한 시멘트 블록보다 고비중의 산업폐자원으로 제작한 시험체의 반가층이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 5cm의 시험체 두께에서는 48%까지 반가층이 감소하는 것으로 나타남.
- 10cm 두께의 시험체 결과에서도 반가층이 다소 감소하는 경향을 보였으나, 15cm로 두께를 크게 증가시킨 경우에는 반가층의 감소효과가 낮아지는 결과를 보임.
- 이는 시험체 두께가 커짐에 따라 방사선의 차폐효과가 증가하고 이로 인해 선형감쇠계수의 격차가 작아지면서 나타난 결과로 판단되며, 재료 특성 보다 물리적인 영향으로 볼 수 있음.



(a) 시험체 두께 5cm



(b) 시험체 두께 10cm

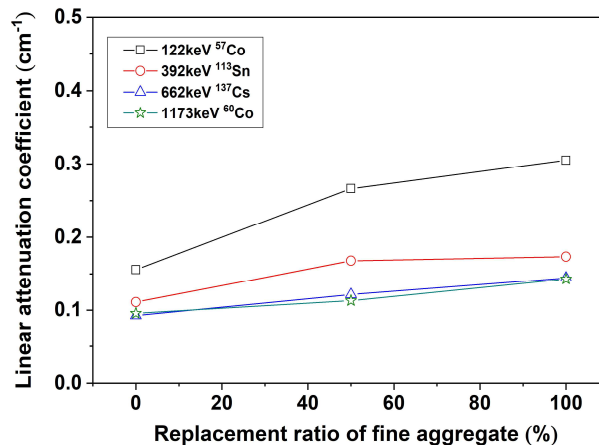


(c) 시험체 두께 15cm

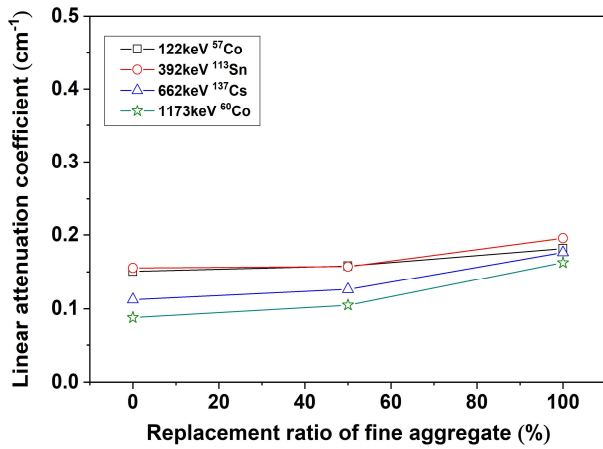
<그림 3.106> 산업폐유리의 대체에 따른 반가층

○ 차폐체의 두께에 의한 방사선 차폐 성능의 영향

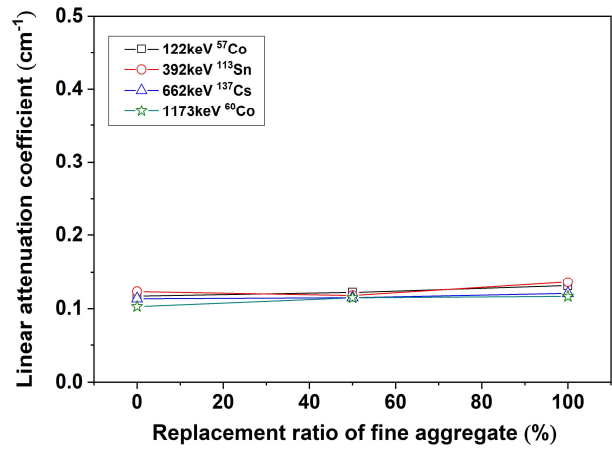
- <그림 3.107>는 차폐블럭의 차폐성능을 평가하기 위한 감마선 시험방법의 최적화를 위해 시험체 두께가 미치는 영향을 분석한 결과임.
- 시험체 두께 10 cm까지는 선형감쇠계수의 변화를 확인할 수 있었으나, 시험체 두께가 십분의 일가층(Tenth-Value Layer, TVL) 이상일수록 감마선 투과실험으로 재료의 차폐성능을 가늠하기에는 무리가 있는 것으로 판단됨.
- 일반적으로 콘크리트의 감마선 반가층은 ^{60}Co 의 경우 대략 6~7 cm이며, ^{137}Cs 의 경우 대략 4~5 cm임. 따라서 굵은 골재가 포함되지 않는 모르타르의 경우 이보다 반가층은 커짐. 따라서 본 실험에서는 잔골재만으로 제작한 모르타르 블록 시험체임을 고려해야 했을 때 차폐 효율성이 상대적으로 높은 것으로 판단됨.



(a) 시험체 두께 5cm



(b) 시험체 두께 10cm

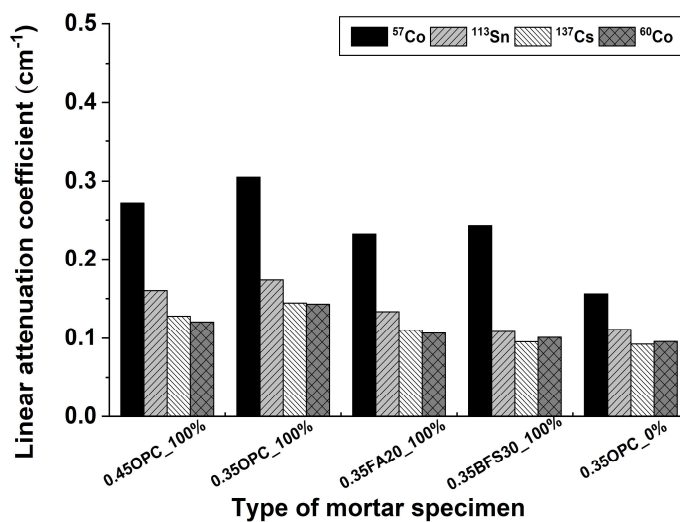


(c) 시험체 두께 15cm

<그림 3.107> 산업폐유리의 대체율에 따른 두께별 선형감쇠계수 변화

○ 전자폐기물을 잔골재로 사용한 차폐체의 물성에 따른 성능 변화

- <그림 3.108>은 산업폐자원인 중금속을 함유한 산업폐유리를 잔골재로 100% 대체한 모르타르 블록에 산업부산물인 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 혼합했을 때의 차폐블록 물성에 따른 감마선 선형감쇠계수를 비교하여 나타낸 것임.
- 산업폐유리와 산업부산물을 혼합하여 제작한 모르타르 차폐 블록은 일반 모래로 제작한 모르타르 블록에 비해 선형감쇠계수가 다소 상승하는 효과를 나타냄. 그러나 CRT 폐유리만으로 제작한 모르타르 블록 보다는 선형감쇠계수의 상승효과가 크지 않았음.
- 결합재 비율에 따른 선형감쇠계수 결과에서는 본 연구개발의 기본 물-결합재 비인 35%에 비해 물-결합재비 45%는 선형감쇠계수가 핵종에 관계없이 낮게 나타남.
- 전자폐기물인 고밀도 폐유리를 차폐 채움재의 잔골재로 재활용하였으며, 폐유리를 혼입함으로써 선형감쇠계수 증가, 반가층 감소 등 차폐 성능을 향상시켰음. 따라서 폐자원의 재활용을 통한 환경 문제 해결과 차폐체 두께 감소를 통한 경제적인 효과를 동시에 얻을 수 있음.



<그림 3.108> 산업폐유리를 100% 대체한 차폐블록의 물성별 선형감쇠계수

○ 차폐성능 D/B

- <표 3.51>는 각 변수별 시험체의 공인차폐성능을 정리하여 나타낸 것임.

<표 3.51> 공인차폐성능

(단위:%)

0.350PC 50% 5cm ↓ ↓ ↓ 시험체물성 대체율 두께	122keV· ⁵⁷ Co	392keV· ¹¹³ Sn	662keV· ¹³⁷ Cs	1173keV· ⁶⁰ Co
0.350PC_0%_5cm	81.72	65.34	57.47	47.99
0.350PC_50%_5cm	97.48	69.92	60.00	49.31
0.350PC_100%_5cm	99.58	72.68	60.49	49.12
0.350PC_0%_10cm	96.58	88.31	81.99	72.89
0.350PC_50%_10cm	99.87	90.79	83.73	74.05
0.350PC_100%_10cm	99.91	92.03	83.78	73.69
0.350PC_0%_15cm	98.75	95.70	92.10	85.28
0.350PC_50%_15cm	99.92	97.25	93.34	86.78
0.350PC_100%_15cm	100.00	97.87	93.68	87.07
0.450PC_100%_5cm	100.00	72.13	60.86	48.87
0.35FA20_100%_5cm	100.00	73.39	61.44	50.28
0.35BFS30_100%_5cm	100.00	74.05	62.38	51.15

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 본 연구개발의 연차별 개발 내용 및 수행진도는 다음의 <표 4.1>과 같음.

<표 4.1> 연차별 개발 내용 및 진도율

개발 내용			구 분												진도 (%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 차 년 도	전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 원천기술개발 및 성능향상 연구	차폐 채움재의 기초 물성조사													100
		차폐 채움재의 중금속 용출 특성 분석													100
		차폐 채움재의 물성별 역학적 성능 분석													100
	고밀도 전자폐기물을 포함한 차폐채움재의 기초재료 개발	밀도상승 및 혼화재료에 따른 시공성 확보													100
		ASR 저감을 위한 혼화재료 검토													100
		건조수축 저감을 위한 혼화재료 검토													100
	전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 성능 평가법 개발	방사성 물질 차폐성능 검증 실험 방법 조사													100
		방사선 차폐율 검증 방법 조사 및 분석													100
		채움재의 방사성 물질 검출 시험 및 분석													100
2 차 년 도	전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 원천기술개발 및 성능향상 연구	채움재의 내구성능 확보													100
		채움재의 수축 특성 시험 및 분석													100
		채움재의 염화물 침투저항성 시험 및 분석													100
	고밀도 전자폐기물을 포함한 차폐 채움재의 기초재료 개발	최적 배합설계 D/B 구축													100
		ASR 반응저감 혼화재료 개발													100
		건조수축 저감 혼화재료 개발													100
	전자폐기물을 적용한 차폐 채움재의 성능 평가법 개발	채움재의 차폐 성능 검증													100
		채움재의 물성별 차폐 성능 D/B 구축													100
		채움재의 강도별 최적 차폐율 도출													100

2. 관련 분야 기여도

가. 연구개발과제의 차별성

- 일반적으로 방사선 차폐와 밀도는 선형적인 관계에 있음. 즉 밀도가 높을수록 차폐 성능이 우수함. 기존의 차폐 콘크리트는 밀도를 높이기 위해 중량 골재를 활용한 연구 및 논문이 대다수임.
- 또한, 폐유리를 잔골재로 활용한 과제 및 논문의 경우, 폐유리가 내포하고 있는 중금속을 제거 처리한 후 실험에 사용하였으며, 대부분의 콘크리트에서 폐유리 혼입시 강도 저하가 나타났음.

<표 4.1> 원전 및 차폐용 콘크리트의 역학적 성능 개선 연구 사례

논문제목	저자 (발행지)	논문요약
원전용 중량콘크리트의 배합설계 및 역학적 특성	양근혁, 문주현 (건축시공학회, 12(3), 2012)	- 원전용 중량콘크리트는 ACI 304R-06의 기준에서 제시하는 방법을 이용하여 설계 가능하며, 비중 증가로 인한 성형성 및 유동성 저하를 고려하고 있음. - 수화열제어와 내구성 확보를 위해 플라이애쉬를 함께 사용하게 되면, 혼화재의 적정혼입비율이 존재함. - ACI 349-06, CEB-FIP 예측모델은 중량콘크리트의 역학적 특성을 안전측에서 평가하고 있지만, 파괴계수에 대한 별도의 평가가 필요함.
중량 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 대한 물-결합재비와 플라이애쉬 치환율의 영향	문재성 외 2인, (대한건축학회, 28(8), (2012) 129-136)	- 중량골재를 사용하게 되면, 유동성, 압축강도 발현이 골재특성에 영향을 받으나, 압축강도는 일반골재를 사용한 경우와 마찬가지로 물-결합재비 증감에 따른 압축강도 경향은 일정함. - 중량골재 사용에 의해 탄성계수 증가율에 대한 기존 예측모델 식을 적용하기엔 다소 무리가 있으므로, 탄성계수 증가율에 대한 보정이 요구됨.
Evaluation of physical and mechanical characteristics of siderite concrete to be used as heavy-weight concrete	Yüksel Esen, Zülfü Murat Dogan (Cement and Concrete Composites, 82, (2017) 117-127)	- 중량골재의 대체율이 증가함에 따라 압축강도, 인장강도 및 단위용적질량이 증가하는 것으로 나타남. - X-ray를 이용하여 방사성 차폐 성능에 대한 평가를 진행한 결과, 일반골재를 사용할 때에 비해 70% 수준의 방사선 흡수율이 향상되는 것으로 나타남.
Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study	Ashish Kumer Saha, Prabir Kumar Sarker (Journal of Cleaner Production 162 (2017) 438-448)	니켈 생산에 의해 발생하는 페로니켈 슬래그를 잔골재로 치환하여 제작한 콘크리트의 시공성, 압축강도, 쪼갬 인장강도, 탄성계수 및 화학적 용출 특성을 평가한 결과, 페로니켈 슬래그 잔골재를 적용하면 압축강도 개선이 가능한 것으로 나타났으며, 쪼갬 인장강도, 휨강도 및 탄성계수 역시 모두 개선 가능한 것으로 나타남.

<표 4.2> 폐유리를 잔골재로 적용한 콘크리트에 관한 연구 사례

논문제목	저자 (발행지)	논문요약
Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks	G. Lee et al., (Construction and Building Materials, 25(5), (2011), 2611-2618)	- 폐유리 잔골재의 입도가 작을수록 알칼리-실리카 반응성 팽창 감소 - 폐유리로 인한 공극구조 개선효과 확인
Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars	T. C. Ling et al., (Cement and Concrete Composites, 33, (2011) 848-854)	- 폐유리 잔골재 혼입시 콘크리트 마모저항성 감소 - 폐유리 잔골재 혼입시 압축 및 휨강도 감소 - 폐유리 잔골재로 인한 황산염 저항성 증가
Properties of concrete containing waste glass	I. B. Topc, M. Canbaz (Cement and Concrete Research, 34(2), (2003) 267-274)	- 폐유리 굵은 골재 대체시 콘크리트 단위중량 감소 - 폐유리 골재 혼입에 따른 공기량 및 슬럼프 감소 - 폐유리 골재와 페이스트간의 접착력 감소로 인한 강도 감소
Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete	Z. Z. Ismail, E. AL-Hsshmi (Waste Management, 29(2), (2008), 655-659.	폐유리 잔골재 혼입시 재령 14일 이후 강도발현

- 본 연구에서는 폐유리의 중금속을 제거하지 않고 간단한 파쇄 작업 후 사용하므로, 복잡한 중금속 제거 과정을 거치지 않아 폐유리의 준비 과정이 매우 간단함.
- 차폐 채움재의 중금속 용출 실험을 통해 중금속이 외부 용출이 되지 않음을 확인하였으며, 중금속으로 인한 환경적인 문제를 해결하여 친환경성을 확보하였음.

- 중금속을 함유하고 있어 재활용이 힘든 고밀도 폐유리를 재활용함으로써 기존 매립지 부지 확보 및 경제성을 확보하였음.

나. 연구개발과제의 기여도

- 처리가 어려워 매립 또는 적치되어 있던 전자 폐기물인 고밀도 폐유리를 재활용하여 사용처를 확보하였음. 전자 폐기물을 포함한 산업 폐기물의 재활용 방안을 모색하는 데 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단됨.
- 기존에 채움재로 사용되고 있는 모르타르나 고화재 대신에 본 차폐 채움재를 사용하면 자원절약 및 폐기물 처리를 동시에 확보할 수 있음.
- 전자폐기물인 고밀도 폐유리는 전 세계적으로 분포되어 있으므로, 연구개발과제로 지재권을 확보하고 차폐 성능을 확보하여 해외로의 수출을 기대할 수 있을 것으로 판단됨.

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 본 연구에서는 고밀도 폐유리를 잔골재로 활용한 차폐 채움재를 개발하였으며, 전자 폐기물을 재활용하여 친환경성과 경제성을 동시에 확보한 것으로 판단됨.
- 본 연구에서 추가적으로 수행한 실험인, 고밀도 폐유리와 전기로 산화 슬래그(5~10mm)를 혼입한 차폐 채움재의 기초물성과 내구성능을 평가한 결과, 전기로 산화 슬래그의 보완 효과로 인해 내구성이 개선되었으며, 밀도가 높아 차폐 성능이 우수할 것으로 예상됨.
- 추후 기존의 고밀도 폐유리 혼입 차폐 채움재에 산업폐기물인 전기로 산화 슬래그나 고밀도 골재를 굵은 골재로 대체하여 밀도를 더욱 높인 차폐 콘크리트 개발이 필요할 것으로 사료됨.
 - 방사선을 사용하는 병원, 연구소 등 시설에서의 차폐시설은 주로 순도 99% 수준의 납을 압연하여 판 형태로 가공한 납 판 <그림 4.1>이나, 납을 블록형태로 가공한 납 블록 <그림 4.2>를 주로 사용하여 시공하고 있음.
 - 납은 경제적이고 가공성이 우수하여 많은 곳에서 사용되고 있음. 그러나 시설이 노후화 되어 차폐벽에 균열이 발생하면 납이 유출될 가능성이 있음. 특히, 건물 화재발생시 납은 약 400℃부터 녹기 시작하며, 이 때 발생한 유독가스 등으로 인체에 치명적 손상을 줄 수 있음. 최악의 경우 차폐벽이 붕괴할 수도 있음.
 - 현재 국내에서는 납을 대체할 수 있는 건축자재가 없는 실정임.
 - 전기로 산화슬래그와 폐유리를 혼입한 방사선 차폐재 개발을 진행하여, 차폐 블록 형태의 차폐재를 병원 및 연구소의 건축자재로 개발이 필요할 것으로 판단됨.



<그림 4.1> 납 판 시공 (예시)



<그림 4.2> 납 블록

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용방안

- 본 개발기술의 최종 결과는 건설기술 분야의 차폐 채움재의 제조기술과 환경 분야의 전자폐기물 재활용 기술 및 원자력 분야의 차폐 성능 검증기술을 모두 융합하여 방사성 폐기물 처분용 채움재의 제조기술 및 차폐 성능에 대한 검증 기술 정립으로써, 사회적·기술적 요구사항에 따른 활용방안은 다음과 같음.

· 전자폐기물의 재활용 방안 확보

- 인구증가와 함께 산업의 발전은 수많은 물품을 개발·생산하여 생활의 편리함을 제공하였으나, 재처리기술 및 재활용 불가로 인해 자원 낭비를 가속화하고 있음.
- 특히 환경오염을 야기할 수 있는 중금속을 함유한 고밀도 전자폐기물에 대한 적용성과 재사용성을 두루 겸비한 재활용 기술개발의 필요성이 증가한 상황임.
- 본 기술 개발을 통해 고밀도 전자폐기물의 특성을 이용하여 차폐 재료로써 활용함에 따라 매립지 부족으로 인한 국토낭비를 차단할 수 있을 것으로 예상되며, 이와 더불어 폐기물의 재처리 기술 및 재활용 기술의 발전에 일조할 수 있을 것으로 예상됨.

· 방사성폐기물 처분으로 인해 발생하는 방사능 누출 가능성에 대한 안전성 확보

- 원자력 에너지원 및 의료 방사선의 사용으로 인해 발생하는 방사성폐기물을 효과적으로 관리하기 위해 방사성폐기물 처분장(동굴처분식)을 건설하여 국가차원에서 방사성폐기물을 관리하고 있으나, 방사성 폐기물에 존재하는 방사성 물질에 누출 및 현재 방사선 허용선량 계측기에 오류로 인한 국민적 불안감 조성 등의 안전성 문제에 대한 대책 마련이 시급한 상황임.
- 본 기술개발을 통해 얻어진 방사성폐기물 처분용 차폐 채움재는 방사성물질의 외부 이동을 방지하여 방사성물질의 누출을 완벽하게 차단할 수 있을 것으로 보이며, 특히, 방사성 물질의 차폐 정도를 정량적 평가하여 수치화할 수 있기 때문에 심리적, 기술적 안전성을 모두 확보하여 방사성물질의 안전관리와 사회적 인식 제고를 동시에 추구할 수 있는 기술로 사회적 요청사항에 부합된다고 평가됨.

· 차폐 채움재의 차폐 성능 평가

- 현재 적용되고 있는 일반적인 차폐 성능은 단순히 높은 단위중량을 통해 차폐 성능의 확보여부와 허용 방사선량에 의존하는 등, 차폐 채움재 자체의 정량적인 차폐성능 평가에 대한 검토는 이루어지지 않음.
- 본 기술개발을 통해 방사성 폐기물 처분용 차폐 채움재의 차폐성능을 정량화하여 평가하고, 직접적인 차폐 성능 검증 시스템 개발을 통해 방사성폐기물을 비롯한 차폐를 목적으로 하는 콘크리트의 차폐 성능을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 예상 됨.

2. 기대효과

○ 기술적 측면

· 고밀도 전자폐기물의 재활용 기술 확보

- 고밀도 전자폐기물은 중금속을 함유한 특수성으로 인하여 재활용 기술이 부족한 상황임. 최근 폐금속·유용자원재활용 기술개발 사업단을 통해 고밀도 전자폐기물에 존재하는 중금속을 용출하는 기술이 개발된 바 있으나, 고밀도 전자폐기물에 존재하는 다양한 중금속 중 오직 ‘납’만 추출되었을 뿐만 아니라, 추출된 납의 순도가 낮은 것으로 드러남. 또한, 중금속 용출은 유리를 고온에서 가압하고 용융시키는 과정이 필요하고 비용도 상당히 소요되기 때문에 고밀도 전자폐기물 자체의

중금속을 용출하는 기술의 수준은 부족한 상황임.

- 하지만, 본 기술 개발에서는 고밀도 전자폐기물이 중금속을 포함한 특성을 그대로 사용하여 차폐 채움재의 차폐 성능을 확보하므로 중금속을 포함한 전자폐기물 자체의 특성을 살릴 수 있을 뿐만 아니라 고밀도 전자폐기물의 재사용 판로를 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

• 전자파 차폐 시설 재료의 제조기술 창출

- 한편, 우리나라는 생산은 남부지방, 소비는 수도권에 편중되어 에너지의 장거리 수송이 필수적인 상황으로 송전탑 건설은 피할 수 없는 상황임. 현재 전국을 거미줄처럼 연결하는 다중환상망(Multi-roop) 형식의 송배전 계통을 구축하고 있으나, 고압 송전선 및 송전탑 인근 주민들은 전자파의 인체 위해성 때문에 송전탑 건설에 부정적인 입장을 취하고 있음.
- 게다가 전 세계적으로 송전선로에 의한 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 다양한 연구 결과를 토대로 세계보건기구(WHO)는 각 국가별로 전자파 노출 영향에 대한 전자파 저감 대책을 수립할 것을 권고하고 있음. 그러나 현재 우리나라에서 전자파 차폐와 관련한 내용은 전자기기 자체에 한정되어 적용되고 있으며, 송전탑 주변 인근 구조물을 비롯하여 지속적인 전자파를 차단할 수 있는 전자파 차폐 시설에 대한 개발은 아직 미흡한 상황임.
- 따라서 고밀도 전자폐기물은 본디 목적 자체가 전자파의 차단이므로, 그 특성을 이용한다면 고압의 전류가 흐르는 고압송전선 부근 지역에서의 유해한 전자파 차단을 위한 건설 재료로 적용이 가능할 수 있을 것으로 예상됨.

• 방사성폐기물의 안전성 확보

- 현재 방사성폐기물 처분시 사용되는 채움재 자체의 차폐 성능에 대한 평가 시설 및 기준 자체는 미흡한 상황이며, 앞서 밝힌 바와 같이 단순히 방벽으로만 차폐성능을 가늠하고 있음.
- 발생가능성이 있는 방사성폐기물의 외부 노출은 방사성 물질의 누출로 이어져 방사능 피폭이라는 인체에 직·간접적인 피해를 야기할 수 있음. 따라서 본 기술 개발을 통해 차폐 채움재의 차폐 성능을 확보한다면 방사성폐기물 자체의 차폐 수준에 대한 평가가 가능하여 원자력 사용으로 인한 안전 문제는 해결할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 경제적·산업적 측면

• 전자폐기물의 전량 재활용 기술 확보

- 본 기술 개발을 통해 고밀도 전자폐기물이 차폐 채움재의 재료로 사용되면, 고밀도 전자폐기물의 적절한 재사용처를 확보할 수 있을 것으로 보이며, 일반 전자폐기물과 달리 중금속을 함유하여 요구되는 추가적인 중금속 용출 작업이 해소되어 재사용으로 인한 추가비용 역시 절감할 수 있을 것으로 판단됨.
- 또한, 고밀도 전자폐기물을 차폐 채움재의 재료로 대체할 시 사용되는 차폐 채움재의 재료의 수입량이 크게 감소할 수 있을 것으로 예상됨.

• 저비용 고효율의 건설재료의 확보

- 현재 구조물에 사용되는 건설재료는 대부분 고갈될 위험에 처해있음. 그래서 구조물 해체시 발생하는 건설 폐기물들을 다시 재활용하고자 하는 연구가 다방면으로 진행되고 있으나, 꾸준히 공급이 불가능한 측면과 이미 사용된 재료 자체의 변질로 인해 그 적용은 다소 어려움. 따라서 항상성을 확보한 건설 재료를 개발하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있음.
- 한편, 유리는 우리나라를 비롯하여 전 세계적으로 가장 많이 쓰이는 사용되고 그 재활용도가 가장 높음. 그래서 유리질 재료를 콘크리트나 모르타르 등의 건설재료로 적용하기 위해 많은 연구가 진행됐으나, 알칼리-골재반응을 유도하여 구조물의 변형을 발생시키기 때문에 적용하기 어려운 단점이 있음.
- 그러나 본 기술 개발을 통해 개발된 기술을 응용하면, 콘크리트나 모르타르 등에 발달할 수 있

는 알칼리-골재반응을 저감시켜 건설재료로의 보급이 보장되므로 추후 구조물의 건설재료로도 적용이 가능함.

○ 사회적 측면

· 원자력 분야의 인식 개선

- 원자력에너지는 그 특성상 원자력 자체의 효용성과 중요성에 동감하는 인식과 원자력 발전소 사고로 인해 원전에 대한 부정적 인식이 동시에 존재함. 또한 세계적으로 원자력 안전에 대한 규범과 기준이 강화됨에 따라 우리나라에서도 원자력 안전 구현을 목표로 원자력안전위원회를 출범, 국민의 신뢰를 얻고 원자력 안전성을 확보하기 위해 노력하고 있음.
- 그러나 현재 우리나라는 원자력 발전소 운영에서의 투명성 확보 실패, 원활하지 않은 대중과 전문가의 소통으로 국민들의 원전 안전에 대한 불안감이 높아지고 있는 상황임. 특히, 방사성 물질 누출 가능성에 대한 사회적 인식이 확산되면서, 정부차원에서 방사성폐기물의 안전성 확보가 시급한 상황임.
- 따라서 본 연구개발은 실추된 원자력 에너지의 안전성을 고치시킬 수 있는 기회로 작용할 것이며, 나아가 세계적 수준의 방사성 폐기물의 효과적인 차폐 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

· 고밀도 전자폐기물로 인한 사회문제 해결

- 본 기술개발로 고밀도 전자폐기물을 차폐 채움재의 재료로 개발한다면, 중금속을 함유한 특성으로 인해 고밀도 전자폐기물의 불법적인 매립과 고철로 속여 판매된 불법 사례들을 전부 해결할 수 있을 것으로 판단됨.

3. 개발 완료 후 상용화 계획

○ 생산계획

- 본 과제를 통해 개발예정인 제품은, 액상형 혼화재(수축저감제, 분산제, 감수제) 및 분말형 혼화재료(팽창제 등)이다. 참여기업인 제이엔티아이엔씨는 건설화학재료를 생산 판매하는 업체로 김제공장에 7~50 ton 까지 Batch식 반응기와 포항공장에 특수시멘트 생산시설을 보유하고 있어, 기존 생산 설비를 활용하여 제품을 생산 판매할 계획이다. 또한, 지적재산권 확보와 신기술 출원, 시험시공을 통한 신뢰성 인증을 확보하며, 기존 혼화재료 영업망을 구축하여 2차제품 적용처를 확대할 계획임.

구분		(2020 년) 개발 종료 후 1년	(2021 년) 개발 종료 후 2년	(2022 년) 개발 종료 후 3년
국내	시장점유율(%)	1%	2.5%	5%
	판매량(단위: ton)	1,000	2,000	3,000
	판매단가(원/kg)	500~5,000	500~5,000	500~5,000
	국내매출액(백만원)	1,000	2,000	3,000
당사 생산능력		5,000 ton	5,000 ton	5,000 ton
개발 제품		수축저감제, 감수제, 분산제, 팽창제 외	수축저감제, 감수제, 분산제, 팽창제 외	수축저감제, 감수제, 분산제, 팽창제 외

○ 투자계획

항목		(2020년) 개발 종료 후 1년	(2021년) 개발 종료 후 2년	(2022년) 개발 종료 후 3년
매출원가		50	125	250
판매관리비		10	25	50
자본적 지출	토지	-	-	-
	건물/구축물	500	500	500
	기계장치등	250	250	250
자본적 지출 합계		810	900	1,050

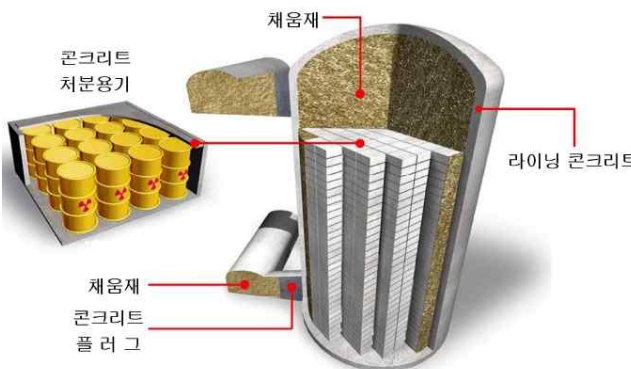
4. 개발 완료 후 사업화 계획

○ 고밀도 폐유리를 혼입한 차폐 채움재

- 중·저준위 방사성 폐기물은 동굴 처분 방식과 표층 처분 방식으로 처리되고 있음. 두 방식 모두 200L 드럼통을 내부에 적치하고 공간이 다 차게 되면 시설을 밀봉 폐쇄하는 과정을 거치고 있음. 두 처분 방식의 모식도를 <그림 5.1>, <그림 5.2>에 나타내었음.
- 드럼통 내부에는 방사성 폐기물을 처분 후 채움재(고화제 or 모르타르)로 채운 후 드럼통을 밀폐하고 있음 <그림 5.3>. 또한, 동굴 처분 시설의 경우 콘크리트 처분 용기가 가득 차게 되면 남은 공간과 처분장 입구를 채움재(쇄석 등)로 채운 후 시설을 폐쇄하고 있음 <그림 5.2>.
- 본 연구에서는 고밀도 폐유리를 혼입한 모르타르 채움재 형태로의 개발을 진행하고 있음. 개발 후 드럼통 내부 채움재나 동굴 처분 시설 채움재로 적용할 것이며, 특허등록 및 사업화를 진행할 예정임.



<그림 5.1> 표층 처분 시설 모식도 (출처: 한국원자력환경공단)



<그림 5.2> 동굴 처분 시설 모식도



<그림 5.3> 드럼통 처분 개요

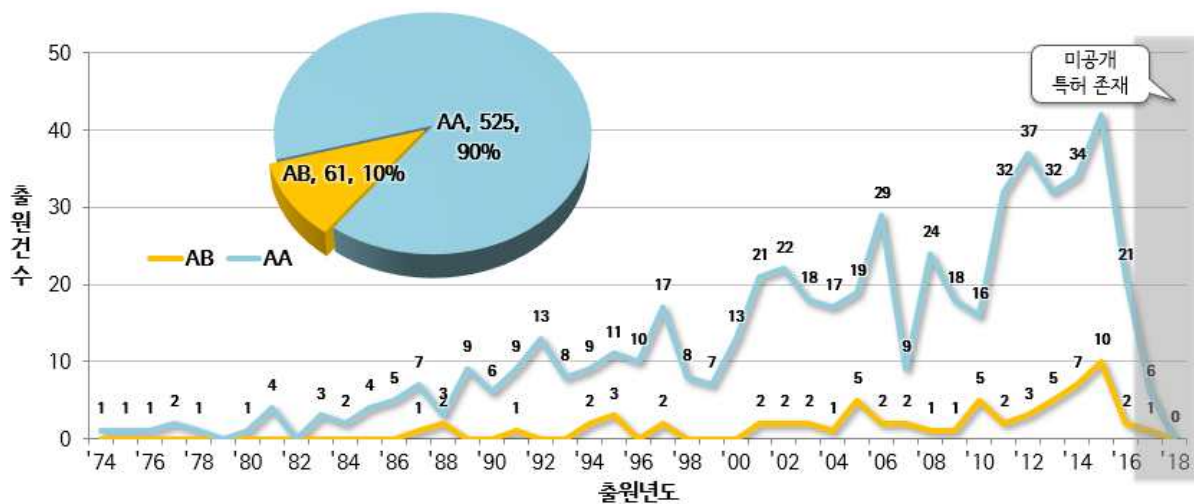
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 국내·외 관련 기술 특허

(1) 조사 및 분석 범위

- 방사선 차폐재의 특허 동향 및 평가장치 관련 기술 동향 분석을 「방사선 차폐용 소재」(AA), 「방사선 차폐도 평가장치」(AB)를 대상으로 구분하여 조사·분석 하였음.
- 「방사선 차폐용 소재」(AA)분야는 인체를 방사선으로부터 보호하는 장치나 방사선 차폐 장치/구조물과 관련된 기술을 제외한 것 중에서 방사선 물질 처리 구조물에 사용되는 금속 복합체 또는 콘크리트와 관련된 특허를 대상으로 하였음.
- 「방사선 차폐도 평가장치」(AB)분야는 방사선을 차폐하는 장치와 관련된 기술을 제외한 것 중에서 방사선의 차폐도를 평가하는 장치와 관련된 특허를 대상으로 하였음.

(2) 특허 동향 분석 (정량 분석)



<그림 2.3> 세부기술별 특허 동향

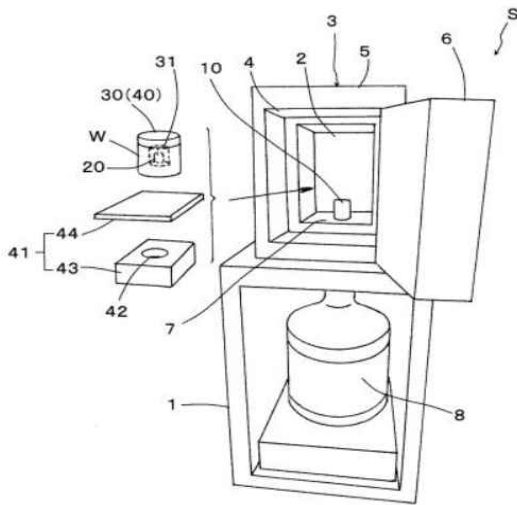
- 방사선 차폐 기술과 관련된 특허는 분석구간 초기부터 1990년대 후반까지는 완만한 형태의 증가 추세를 보이고 있으나, 2011년 이후 일본 특허청(JPO)에서 본 기술과 관련된 특허가 급격하게 증가함에 따라 전체 동향 또한 가파르게 증가하는 추세를 나타내고 있음.
- 2011년 이후 일본 특허청(JPO)에서의 급격한 출원건수 증가 동향은 후쿠시마 원전 폭발사고 이후 방사능 차폐와 관련된 기술의 관심도가 증가함에 기인한 것으로 판단됨.
- 주요 출원국 중 일본 특허청(JPO)에서는 가장 많은 273건(51%)의 특허가 출원되고 있으며, 한국 특허청(KIPO)에서는 116건(22%), 미국 특허청(USPTO)에서는 86건(16%), 유럽 특허청(EPO)에서는 56건(11%)의 특허가 출원되고 있음.
- 주요 출원국의 내·외국인 특허 동향을 살펴보면, 일본 국적 출원인은 자국 출원뿐만 아니라 한국, 미국, 유럽 특허청에서도 가장 많은 특허를 출원하고 있고, 미국 국적 출원인 또한 해외에도 다수 출원하고 있는 것으로 파악되나, 한국 국적 출원인은 해외 출원보다 자국 출원에 집중하고 있는 것으로 파악됨.
- 방사선 차폐 기술의 특허기술 성장단계를 분석한 결과, 분석구간 초기부터 최근까지 출원건수와 출원인수가 모두 증가하는 성장기의 단계를 보이고 있으며, 특히 한국과 일본에서는 4구간(2000년~2007년)과 5구간(2008년~2015년)에서 출원건수와 출원인수가 급격하게 증가하는 성장기인 것으로 판단됨.
- 방사선 차폐 기술과 관련하여 방사선 차폐용 소재(AA) 및 방사선 차폐도 평가장치(AB)에 관한 세부기술을 분석한 결과, 방사선 차폐용 소재(AA)와 관련된 특허가 525건으로 90%를 차지하며, 방

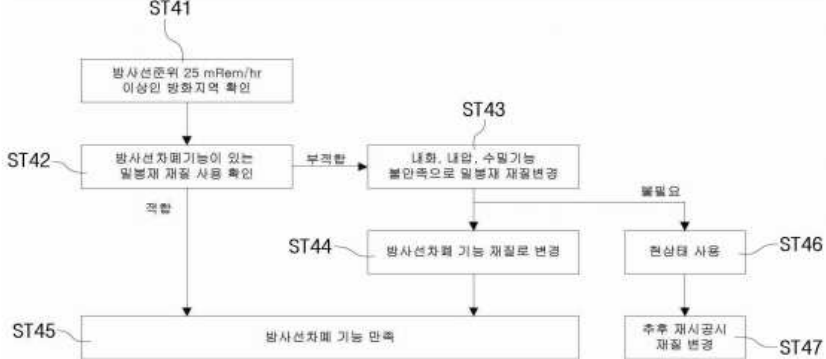
방사선 차폐능 평가장치(AB)에 관련된 특허는 61건으로 10%를 차지함.

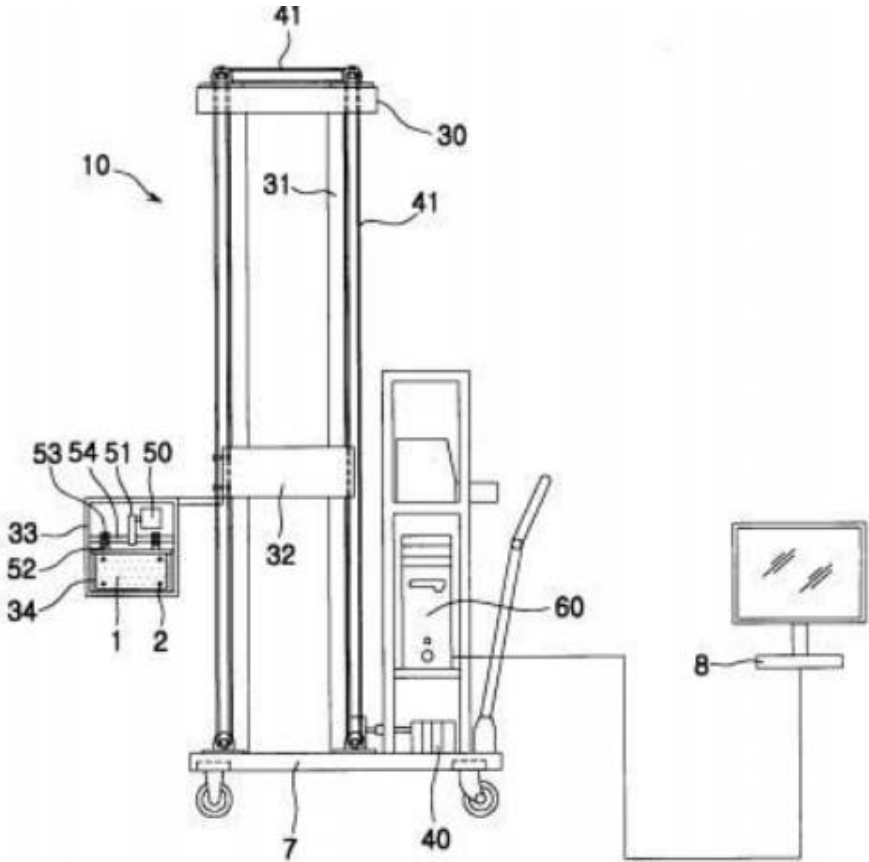
- 방사선 차폐용 소재(AA)와 관련된 특허는 분석구간 초기부터 현재까지 꾸준히 출원이 증가하고 있으며, 특히 2011년 이후부터 큰 폭으로 증가하고 있는 것을 알 수 있으나, 구간별 점유율 현황을 살펴보면 해당 기술과 관련된 점유율은 최근 구간으로 갈수록 감소하고 있는 모습을 보이고 있음.
- 방사선 차폐도 평가장치(AB)와 관련된 기술은 2000년대 초반 이후부터 본격적으로 출원이 이루어지기 시작하였으며, 특히 2011년 이후부터 출원건수가 소폭 증가하고 있는 것으로 파악되고, 구간별 점유율 현황을 살펴보면 해당 기술과 관련된 점유율은 최근 구간으로 갈수록 증가하는 모습을 보임.
- 방사선 차폐 기술과 관련하여 주요 출원국별로 세부기술 출원 현황을 살펴보면, 주요 출원국 모두 방사선 차폐용 소재(AA)와 관련된 기술에서 주로 출원이 이루어진 것을 알 수 있으며, 그 중 일본 특허청(JPO)에서 가장 많은 특허가 출원된 것을 알 수 있음.
- 방사선 차폐도 평가장치(AB)와 관련된 기술에서는 한국 특허청(KIPO)과 일본 특허청(JPO)에서 주로 출원이 되고 있는 것으로 판단됨.
- 방사선 차폐 기술과 관련하여 주요 출원인 상위 16인을 살펴보면 주로 일본과 한국, 미국 국적을 갖고 있으며, 방사선 차폐용 소재(AA)와 관련된 특허를 주로 출원하고 있는 것을 알 수 있음
- 방사선 차폐용 소재(AA)와 관련하여 일본의 TAISEI CORP, MITSUBISHI HEAVY IND LTD, TOSHIBA KK, 한국의 한국원자력연구원, 미국의 Co-Operations, inc. 등이 해당 기술과 관련된 특허를 다수 보유하고 있음.
- 방사선 차폐도 평가장치(AB)와 관련하여 한국원자력연구원이 가장 많은 특허를 보유하고 있으며, 일본의 Nippon Electric Glass CO., Ltd., SANYO CHEM IND LTD 등이 해당 기술과 관련된 특허를 보유하고 있음.

<표 6.1> 국내 핵심 특허 리스트

발명의 명칭	방사선의 차폐 능력 시험 방법, 이것에 이용하는 용기 및 판체		
공개 번호	JP 2015-227868	출 원 일	2015.04.30.
출원인	KAWAHARA SHOKAI:KK		
요약	【과제】 방사선 발생 기기를 이용하지 않아도 범용 방사선 측정 장치를 이용하여 간단하게 피시험재료의 방사선에 대한 차폐 능력의 시험을 할 수 있는 방법을 제공한다. 【해결 수단】 피시험재료 W의 방사선에 대한 차폐 능력을 시험하는 것으로 특정 방사성 핵종의 기준량을 방사하는 기준 방사선원체 20을 준비하는 한편, 피시험재료 W의 소요량을 이용하여 구성되어 기준 방사선원체 20을 밀폐해 수납하는 수납부 31을 가진 소요 형상의 용기 30을 제작하고 미리 기준 방사선원체 20에 있어서의 특정 방사성 핵종의 방사선 기준 강도를 측정해 두어, 기준 방사선원체 20을 용기 30에 수납하고, 기준 방사선원체 20을 수납한 용기 30에 있어서의 특정 방사성 핵종의 방사선 측정 강도를 측정하고 기준 강도와 측정 강도와의 차이로부터 피시험재료 W의 차폐 능력을 판정한다.		
대표청구항	피시험재료의 방사선에 대한 차폐 능력을 시험하는 방사선의 차폐 능력 시험 방법에 있어서 특정 방사성 핵종의 방사선 강도를 측정 가능한 검출부를 가진 방사선 측정 장치를 이용해 특정 방사성 핵종의 기준량을 방사하는 기준 방사선원체를 준비하고 상기 방사선 측정 장치에 의해 미리 상기 기준 방사선원체에 있어서의 특정 방사성 핵종의 방사선 기준 강도를 측정해 두어, 그 후 상기 기준 방사선원체와 상기 검출부 사이에 피시험재료와 관련된 측정물을 개재시켜 특정 방사성 핵종의 방사선 측정 강도를 측정하고 상기 기준 강도와 측정 강도와의 차이로부터 피시험재료의 차폐 능력을 판정하는 것을 특징으로 하는 방사선의 차폐 능력 시험 방법.		

대표 도면			
발명의 명칭	방화벽 관통부 성능평가 시스템 및 그 방법		
공개번호	KR 2009-0032381	출 원 일	2007.09.27.
출원인	한국전력공사		
요약	본 발명은 방화벽 관통부 성능평가 시스템 및 그 방법을 제공하기 위한 것으로, 방화벽 관통부의 밀봉재 시공상태가 적정 내화성능을 유지하고 부가기능을 수행하는지 여부의 판별결과를 전달받아 시공상태가 양호한 관통부로 선별된 관통부의 정보를 입력받는 제 1 단계와; 상기 제 1 단계 후 관통부 데이터베이스로부터 시공상태가 양호한 관통부로 선별된 관통부의 정보를 가져와 내화성능, 내압성능, 수밀기능, 방사선 차폐기능을 판단하여, 방화벽 관통부가 내화성능, 내압성능 및 수밀기능 중 어느 하나라도 만족하지 못하면 개선이 필요한 관통부로 분류하고, 방사선차폐기능이 불만족하면 성능은 미흡하지만 현상태 사용이 가능한 것으로 분류하여 성능평가 결과를 출력하는 제 2 단계;를 포함하여 구성함으로써, 원자력발전소 방화벽 관통부의 형상, 재질, 위치 등을 고려하여 현재 시공된 관통부 상태가 요구 성능을 만족하는 지를 평가하여 방화벽 관통부의 성능 기준을 만족시키고 나아가 원자력발전소의 안전성을 향상시킬 수 있게 되는 것이다.		
대표청구항	방화벽 관통부의 내화성능, 내압성능, 수밀기능, 방사선 차폐기능 정보를 저장하는 관통부 데이터베이스와; 상기 관통부 데이터베이스로부터 시공상태가 양호한 관통부로 선별된 관통부의 정보를 가져와 내화성능, 내압성능, 수밀기능, 방사선 차폐기능을 판단하는 방화벽 관통부 성능 판단부와; 상기 방화벽 관통부 성능판단부의 결과를 전달받고, 방화벽 관통부가 내화성능, 내압성능 및 수밀기능 중 어느 하나라도 만족하지 못하면 개선이 필요한 관통부로 분류하고, 방사선차폐기능이 불만족하면 성능은 미흡하지만 현상태 사용이 가능한 것으로 분류하여 성능평가 결과를 출력하는 성능평가 출력부; 를 포함하여 구성된 것을 특징으로 하는 방화벽 관통부 성능평가 시스템.		

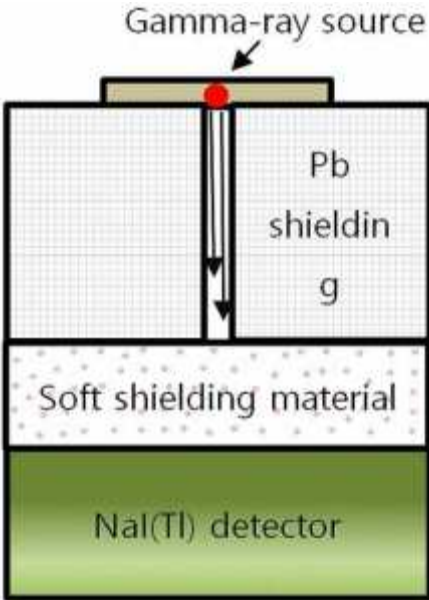
대표 도면	 <pre> graph TD ST41[ST41 방사선준위 25 mRem/hr 이상인 방화지역 확인] --> ST42[ST42 방사선차폐기능이 있는 밀봉재 사용 확인] ST42 -- 적합 --> ST45[ST45 방사선차폐 기능 만족] ST42 -- 부적합 --> ST44[ST44 방사선차폐 기능 재질로 변경] ST43[ST43 내화, 내압, 수밀기능 불안측으로 밀봉재 재질변경] -- 불합 --> ST44 ST43 -- 불필요 --> ST46[ST46 현상재 사용] ST46 --> ST47[ST47 후후 재사용시 재질 변경] </pre>
발명의 명칭	자동화된 차폐성능 비파괴시험장치
등록번호	KR 0524144
출원인	삼영검사엔지니어링
요약	본 발명은 핵물질을 사용하는 시설의 방사선 차폐성능을 비파괴적인 방법으로 시험하는 장치에 대한 것으로서, 더 상세하게는 컴퓨터에 의해 제어되는 자동화된 차폐성능 비파괴시험장치에 관한 것이다. 본 발명은 상기 비파괴시험장치와 떨어진 곳에서 장치를 조작하고 결과를 디스플레이 하는 원격조작용 컴퓨터(8)와; 접촉센서(2)로부터 얻어진 차폐체와의 거리 및 접촉여부에 대한 정보가 입력되는 접촉센서 입력부(61), 미리 입력된 검사조건 및 상기 접촉센서 입력부(61)에 입력된 데이터에 따라서 방사선 계측기(1)를 측정지점으로 이동시키기 위해 모터(40, 50)를 구동시키는 모터구동부(63), 방사선 계측기(1)를 작동시켜 상기 방사선 계측기(1)로부터 측정된 데이터가 입력되는 계측기 통신부(64) 및 상기 조작들을 제어하는 제어부(62)로 구성되며 방사선 계측기(1)로부터 입력된 계측결과를 상기의 원격조작용 컴퓨터(8)에 전송하는 제어용 컴퓨터(60); 및 상기 모터구동부(63)의 명령에 따라서 방사선 계측기(1)를 상하방향으로 이동시키기 위한 Y축 모터(40)와 전후방향으로 이동시키기 위한 X축 모터(50), 차폐체의 방사선 차폐성능을 측정하는 방사선 계측기(1) 및 방사선 계측기(1) 전면에 부착된 접촉센서(2)로 이루어지는 측정기구(10);를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 자동화된 차폐성능 비파괴시험장치에 관한 것이다. 본 발명으로 인하여 방사선 작업종사자에게는 방사선 피폭에 의한 위험을 저감시킬 수 있으며, 컴퓨터로 처리된 차폐성능 시험결과에 의하여 정확한 누설 방사선량의 측정하고 누설 방사선량의 분포를 알 수 있는 자동화된 장비를 사용함으로써 재현성과 정확도가 뛰어난 검사를 수행할 수 있다.
대표청구항	방사선 차폐성능을 시험하기 위해 사용되는 차폐성능 비파괴시험장치에 있어서, 차폐체로부터 방사선량 및 분포를 측정하는 방사선 계측기(1)와, 상기 방사선 계측기(1) 전면에 부착된 접촉센서(2)와, 상기 방사선 계측기(1)를 상하방향으로 이동시키기 위한 Y축 모터와(40), 전후방향으로 이동시키기 위한 X축 모터(50)로 이루어지는 측정기구(10)와, 상기 접촉센서(2)로부터 상기 차폐체와의 거리 및 접촉여부에 대한 정보가 입력되는 접촉센서 입력부(61)와, 미리 입력된 검사조건 및 상기 접촉센서 입력부(61)에 입력된 데이터에 따라 상기 방사선 계측기(1)를 측정지점으로 이동시키기 위해 상기 Y축 모터(40)와 상기 X축 모터(50)를 구동시키는 모터구동부(63)와, 상기 방사선 계측기(1)로부터 입력된 계측결과를 전송받는 계측기 통신부(64)를 포함하는 제어용 컴퓨터(60)와, 상기 측정기구(10)와 떨어진 곳에서 상기 측정기구(10)를 조작하기 위한 설정조건을 입력하고, 측정이 종료된 후 상기 제어용 컴퓨터(60)로부터 전송된 측정결과를 디스플레이 하는 원격조작용 컴퓨터(8)를 포함하여 구성된 것을 특징으로 하는 자동화된 차폐성능 비파괴시험장치.

대표 도면			
권리범위 분석	방사선 차폐성능 평가를 위한 비파괴 시험장치에 관한 특허로서, 성능평가 대상물인 차폐체와의 거리 및 접촉여부를 판단하는 수단을 포함하는 것에 특징이 있음 접촉센서에 관한 구성은 필수구성요소가 아닌 것으로 판단되어, 접촉센서를 사용하지 않는 방사선 차폐성능 평가장치에 대해서는 권리범위가 미치지 않음 또한, 측정결과를 디스플레이 하기 위한 원격조작용 컴퓨터 등과 같은 대체 가능한 구성이 청구범위에 기재되어서 권리범위에 제한을 가져, 측정결과를 시험장치에서 바로 디스플레이하는 경우에는 침해가 성립되지 않음		
발명의 명칭	강판의 전자파 차폐능 측정방법 및 그 장치		
등록번호	KR 0236180	출원일	1995.12.30.
출원인	포항종합제철		
요약	본 발명은 가전용 소재로 사용되는 강판의 전자파 차폐능력을 효과적으로 측정하기 위한 측정방법과 그 장치에 관한 것으로 그 기술적인 구성은, 네트워크 어댑라이저(1)와 웨이브 가이드(3)를 전도선(2)으로 연결하고 웨이브 가이드(3) 사이에 강판(4)을 사이에 끼우고 전자파 차폐능을 평가하는 방법에 있어서, 측정에 사용되는 강판(4)에 10mm 이하의 구멍(5)을 기공을 0.5~8%가 되도록 형성시켜 최종 차폐능이 40~75dB 사이 범위에서 측정되도록 하는 것을 요지로 한다. 이에 따라서, 강판의 전자파 차폐능 측정작업을 강판에 형성된 구멍에 의해 가일층 효과적으로 수행할 수 있는 것이다.		
대표청구항	전자파를 송수신하는 네트워크 어댑라이저(1)의 양측단부에 전도선(2)이 연결되고, 상기 전도선(2)은 네트워크 어댑라이저(1)의 중앙에 사각형 형상의 웨이브 가이드(3)가 설치되어 그 사이에 강판(4)이 장착되며, 상기 강판(4)에는 다수개의 구멍(5)이 형성되어 상기 강판(4)을 통한 전자파의 송수신이 가능토록 설치되는 것을 특징으로 하는 강판의 전자파 차폐능 측정장치.		

대표 도면																																										
권리범위 분석	강판의 전자파 차폐 측정장치에 관한 특허로서, 도전선, 웨이브 가이드, 강판에 형성된 다수개의 구멍 등에 관한 구성으로 한정되어 있음 패밀리특허인 KR 0236173과 유사한 권리범위를 가지지만, 강판에 형성된 다수개의 구멍 등에 관한 한정이 추가되어 권리범위가 상대적으로 더 협소함																																									
발명의 명칭	비정질 철계 합금 및 이를 이용하여 제조한 방사능 차폐용 복합재																																									
등록번호	KR 1801861	출 원 일	2016.07.07.																																							
출원인	경북대학교																																									
요약	본 발명은, 비정질 철계 합금에 관한 것으로서, 상세하게는 일반식 $Fe_aB_bX_cZ_d$ 로 표현되고, 상기 a는 철(Fe)의 원자%로, 상기 a는 $a=100-(b+c+d)$이고 $a>50$이며, 상기 b는 보론(B)의 원자%로 $5<b<35$이고, 상기 c는 X의 원자%로 $1<c<15$이며, 상기 X는 Mo, Cr, C, Si, Gd, Mn, Zr, Ti 및 Nb 중에서 선택되는 어느 하나이고, 상기 d는 Z의 원자%로 $0\leq d<25$ 이고, 상기 Z는 Mo, Cr, C, Si, Gd, Mn, Zr, Ti 및 Nb 중에서 선택되는 어느 하나이면서, 단, 상기 X와 동일하지 않는 것을 특징으로 하는, 비정질 철계 합금에 관한 것이다.																																									
대표청구항	일반식 $Fe_aB_bX_cZ_d$ 로 표현되고, 상기 a는 철(Fe)의 원자%로, 상기 a는 70 내지 80이며, 상기 b는 보론(B)의 원자%로 $5<b<25$이고, 상기 c는 X의 원자%로 $1<c<15$이며, 상기 X는 Mo이고, 상기 d는 Z의 원자%로 $0\leq d<25$ 이고, 상기 Z는 Gd인 것을 특징으로 하는, 비정질 철계 합금.																																									
대표 도면	<table><tr><td></td><td>조성</td><td>열중성자 차폐율(%)</td></tr><tr><td>실시예 1-1</td><td>polyester + $Fe_{72}B_{25}Mo_3$ 1vol%</td><td>40.94</td></tr><tr><td>실시예 1-2</td><td>polyester + $Fe_{72}B_{25}Mo_3$ 2vol%</td><td>56.08</td></tr><tr><td>실시예 2</td><td>polyester + $Fe_{63}B_{25}Mo_3Cr_{10}$ 1vol%</td><td>25.74</td></tr><tr><td>실시예 3-1</td><td>polyester + $Fe_{72}B_{23}Mo_3Gd_2$ 1vol%</td><td>63.85</td></tr><tr><td>실시예 3-2</td><td>polyester + $Fe_{72}B_{20}Mo_3Gd_5$ 1vol%</td><td>67.50</td></tr><tr><td>실시예 3-3</td><td>polyester + $Fe_{72}B_{15}Mo_3Gd_{10}$ 1vol%</td><td>74.63</td></tr><tr><td>실시예 3-4</td><td>concrete + $Fe_{72}B_{24.5}Mo_3Gd_{0.5}$ 1vol%</td><td>85.94</td></tr><tr><td>비교예 1</td><td>polyester + FIBRAFLEX 1vol%</td><td>22.29</td></tr><tr><td>비교예 2</td><td>polyester + FIBRAFLEX 2vol%</td><td>21.87</td></tr><tr><td>대조군 1</td><td>only-polyester</td><td>26.65</td></tr><tr><td>대조군 2</td><td>only-mortar</td><td>13.52</td></tr><tr><td>대조군 3</td><td>only-concrete</td><td>68.44</td></tr></table>				조성	열중성자 차폐율(%)	실시예 1-1	polyester + $Fe_{72}B_{25}Mo_3$ 1vol%	40.94	실시예 1-2	polyester + $Fe_{72}B_{25}Mo_3$ 2vol%	56.08	실시예 2	polyester + $Fe_{63}B_{25}Mo_3Cr_{10}$ 1vol%	25.74	실시예 3-1	polyester + $Fe_{72}B_{23}Mo_3Gd_2$ 1vol%	63.85	실시예 3-2	polyester + $Fe_{72}B_{20}Mo_3Gd_5$ 1vol%	67.50	실시예 3-3	polyester + $Fe_{72}B_{15}Mo_3Gd_{10}$ 1vol%	74.63	실시예 3-4	concrete + $Fe_{72}B_{24.5}Mo_3Gd_{0.5}$ 1vol%	85.94	비교예 1	polyester + FIBRAFLEX 1vol%	22.29	비교예 2	polyester + FIBRAFLEX 2vol%	21.87	대조군 1	only-polyester	26.65	대조군 2	only-mortar	13.52	대조군 3	only-concrete	68.44
	조성	열중성자 차폐율(%)																																								
실시예 1-1	polyester + $Fe_{72}B_{25}Mo_3$ 1vol%	40.94																																								
실시예 1-2	polyester + $Fe_{72}B_{25}Mo_3$ 2vol%	56.08																																								
실시예 2	polyester + $Fe_{63}B_{25}Mo_3Cr_{10}$ 1vol%	25.74																																								
실시예 3-1	polyester + $Fe_{72}B_{23}Mo_3Gd_2$ 1vol%	63.85																																								
실시예 3-2	polyester + $Fe_{72}B_{20}Mo_3Gd_5$ 1vol%	67.50																																								
실시예 3-3	polyester + $Fe_{72}B_{15}Mo_3Gd_{10}$ 1vol%	74.63																																								
실시예 3-4	concrete + $Fe_{72}B_{24.5}Mo_3Gd_{0.5}$ 1vol%	85.94																																								
비교예 1	polyester + FIBRAFLEX 1vol%	22.29																																								
비교예 2	polyester + FIBRAFLEX 2vol%	21.87																																								
대조군 1	only-polyester	26.65																																								
대조군 2	only-mortar	13.52																																								
대조군 3	only-concrete	68.44																																								

권리범위 분석	방사선 차폐를 위한 비정질 합금에 관한 특허로서, 철, 보론, 몰리브덴 등의 함량비로 한정된 권 리범위를 가지고 있음																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
보론, 몰리브덴과 같은 구성은 페브라운관에 상기 조성으로 포함될 가능성이 매우 낮아서 페브라 운관을 이용한 헤비콘크리트 조성물에 권리범위가 미치지 않음																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
발명의 명칭	중성자선 차폐재용 폴리우레탄 수지 형성성 조성물																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
공개번호	JP 2017-058363	출 원 일	2016.07.01.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
출원인	SANYO CHEM IND LTD																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
요약	【과제】 점도가 낮게 시공성이 우수하고, 높은 중성자선 차폐성을 성형품에 부여하는 중성자선 차폐재용 폴리우레탄 수지 형성성 조성물을 제공한다. 【해결 수단】 폴리올, 폴리이소시아네이트 및 천연 존재비에 있어서 열중성자선 흡수 단 면적이100~50,000 반인 원소를 구성 원소로서 포함한 무기 필러를 함유하여 이루 어진 조성물로서, 상기 조성물의 중량에 기초한 상기 무기 필러의 함유량이5~30중량% 인 중성자선 차폐재용 폴리우레탄 수지 형성성 조성물;상기 조성물이 경화한 중성자선 차폐재용 폴리우레탄 수지 성형품.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
대표청구항	폴리올(A), 폴리이소시아네이트(B) 및 천연 존재비에 있어서 열중성자선 흡수단 면적이 100~50,000 반인 원소를 구성 원소로서 포함한 무기 필러(D)를 함유하여 이루어진 조 성물로서, 상기 조성물의 중량에 기초한 상기 (D)의 함유량이5~30중량%인 중성자선 차 폐재용 폴리우레탄 수지 형성성 조성물(X).																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
대표 도면	<table><tr><th colspan="2"></th><th colspan="18">実施例</th><th colspan="3">比較例</th></tr><tr><th colspan="2"></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>7</th><th>8</th><th>5</th><th>6</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr><tr><td colspan="2">中性子線透過率(%)</td><td>X-1</td><td>X-2</td><td>X-3</td><td>X-4</td><td>X-5</td><td>X-6</td><td>X-7</td><td>X-8</td><td>X-9</td><td>X-10</td><td>X-11</td><td>X-12</td><td>X-13</td><td>X-14</td><td>X-15</td><td>X-16</td><td>X-17</td><td>比X-1</td><td>比X-2</td><td>比X-3</td></tr><tr><td rowspan="16">樹 脂 組 成 (部)</td><td>ポリオール(A-1)</td><td>70.5</td><td>59.0</td><td>59.0</td><td>59.0</td><td>59.0</td><td>59.0</td><td>59.0</td><td>59.0</td><td>51.7</td><td>63.1</td><td>44.2</td><td>44.2</td><td>44.2</td><td>44.2</td><td>21.1</td><td>15.8</td><td></td><td>74.3</td><td>48.0</td><td></td></tr><tr><td>ポリオール(A-2)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>21.1</td><td>15.8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>ポリオール(A-3)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>34.8</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>ポリイソシアネート(B-1)</td><td>23.5</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>17.3</td><td></td><td>14.8</td><td>14.8</td><td>14.8</td><td>14.8</td><td>36.8</td><td>27.4</td><td></td><td>24.7</td><td>16.0</td><td></td></tr><tr><td>ポリイソシアネート(B-2)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>15.9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>ポリイソシアネート(B-3)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>34.2</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>有機フィラー(C-1)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td>35.0</td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>有機フィラー(C-2)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>有機フィラー(C-3)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D1-1)</td><td>5.0</td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>30.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>5.0</td><td>20.0</td><td>20.0</td><td>30.0</td><td></td><td>35.0</td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D1-2)</td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D1-3)</td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D2-1)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D2-2)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D3-1)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>無機フィラー(D4-1)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>20.0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>脱水剤</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td><td>1.0</td></tr><tr><td>消泡剤</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr><tr><td>硬化触媒</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr><tr><td>合計</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td><td>100.0</td></tr><tr><td>水素原子濃度(10²¹個/cm³)</td><td>6.1</td><td>5.0</td><td>5.1</td><td>5.1</td><td>5.4</td><td>5.4</td><td>5.4</td><td>5.1</td><td>4.5</td><td>4.9</td><td>5.4</td><td>5.6</td><td>5.6</td><td>6.9</td><td>5.0</td><td>5.4</td><td>3.8</td><td>4.5</td><td>4.5</td><td>8.0</td></tr><tr><td>評 価</td><td>密度 (g/cm³)</td><td>1.03</td><td>1.11</td><td>1.14</td><td>1.14</td><td>1.21</td><td>1.22</td><td>1.21</td><td>1.23</td><td>1.20</td><td>1.09</td><td>1.11</td><td>1.12</td><td>1.12</td><td>0.99</td><td>1.19</td><td>1.15</td><td>1.37</td><td>1.03</td><td>1.20</td><td>0.94</td></tr><tr><td>粘 度</td><td>粘度 (mPa・s)</td><td>1600</td><td>7000</td><td>15000</td><td>4600</td><td>11000</td><td>5100</td><td>6000</td><td>6500</td><td>41000</td><td>9500</td><td>46000</td><td>47000</td><td>47000</td><td>49000</td><td>8000</td><td>47000</td><td>44000</td><td>1300</td><td>58000</td><td>-</td></tr><tr><td>結 果</td><td>作業性(施工性)</td><td>◎</td><td>◎</td><td>○</td><td>◎</td><td>○</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>◎</td><td>○</td><td>○</td><td>◎</td><td>×</td><td>×</td></tr><tr><td rowspan="2">実 験</td><td>線量 (μSv/h)</td><td>2.5</td><td>2.3</td><td>2.4</td><td>2.3</td><td>2.5</td><td>2.4</td><td>2.5</td><td>2.5</td><td>2.2</td><td>2.4</td><td>2.3</td><td>2.3</td><td>2.4</td><td>2.4</td><td>2.5</td><td>2.4</td><td>2.5</td><td>3.4</td><td>2.4</td><td>1.9</td></tr><tr><td>中性子線透過率(%)</td><td>80.3</td><td>81.9</td><td>81.1</td><td>81.9</td><td>80.3</td><td>81.1</td><td>80.5</td><td>80.3</td><td>82.7</td><td>81.1</td><td>81.9</td><td>81.9</td><td>81.1</td><td>81.1</td><td>80.3</td><td>81.1</td><td>80.3</td><td>73.2</td><td>81.1</td><td>85.0</td></tr></table>					実施例																		比較例					1	2	3	4	7	8	5	6	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1	2	3	中性子線透過率(%)		X-1	X-2	X-3	X-4	X-5	X-6	X-7	X-8	X-9	X-10	X-11	X-12	X-13	X-14	X-15	X-16	X-17	比X-1	比X-2	比X-3	樹 脂 組 成 (部)	ポリオール(A-1)	70.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	51.7	63.1	44.2	44.2	44.2	44.2	21.1	15.8		74.3	48.0		ポリオール(A-2)															21.1	15.8					ポリオール(A-3)																	34.8				ポリイソシアネート(B-1)	23.5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	17.3		14.8	14.8	14.8	14.8	36.8	27.4		24.7	16.0		ポリイソシアネート(B-2)										15.9											ポリイソシアネート(B-3)																	34.2				有機フィラー(C-1)											20.0			35.0		20.0					有機フィラー(C-2)												20.0									有機フィラー(C-3)													20.0								無機フィラー(D1-1)	5.0	20.0							30.0	20.0	20.0	20.0	20.0	5.0	20.0	20.0	30.0		35.0		無機フィラー(D1-2)			20.0																		無機フィラー(D1-3)				20.0																	無機フィラー(D2-1)					20.0																無機フィラー(D2-2)						20.0															無機フィラー(D3-1)							20.0														無機フィラー(D4-1)								20.0													脱水剤	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	消泡剤	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	硬化触媒	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	水素原子濃度(10 ²¹ 個/cm ³)	6.1	5.0	5.1	5.1	5.4	5.4	5.4	5.1	4.5	4.9	5.4	5.6	5.6	6.9	5.0	5.4	3.8	4.5	4.5	8.0	評 価	密度 (g/cm ³)	1.03	1.11	1.14	1.14	1.21	1.22	1.21	1.23	1.20	1.09	1.11	1.12	1.12	0.99	1.19	1.15	1.37	1.03	1.20	0.94	粘 度	粘度 (mPa・s)	1600	7000	15000	4600	11000	5100	6000	6500	41000	9500	46000	47000	47000	49000	8000	47000	44000	1300	58000	-	結 果	作業性(施工性)	◎	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	◎	×	×	実 験	線量 (μSv/h)	2.5	2.3	2.4	2.3	2.5	2.4	2.5	2.5	2.2	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5	3.4	2.4	1.9	中性子線透過率(%)	80.3	81.9	81.1	81.9	80.3	81.1	80.5	80.3	82.7	81.1	81.9	81.9	81.1	81.1	80.3	81.1	80.3	73.2	81.1	85.0
		実施例																		比較例																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		1	2	3	4	7	8	5	6	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
中性子線透過率(%)		X-1	X-2	X-3	X-4	X-5	X-6	X-7	X-8	X-9	X-10	X-11	X-12	X-13	X-14	X-15	X-16	X-17	比X-1	比X-2	比X-3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
樹 脂 組 成 (部)	ポリオール(A-1)	70.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	51.7	63.1	44.2	44.2	44.2	44.2	21.1	15.8		74.3	48.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	ポリオール(A-2)															21.1	15.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	ポリオール(A-3)																	34.8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	ポリイソシアネート(B-1)	23.5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	17.3		14.8	14.8	14.8	14.8	36.8	27.4		24.7	16.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	ポリイソシアネート(B-2)										15.9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	ポリイソシアネート(B-3)																	34.2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	有機フィラー(C-1)											20.0			35.0		20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	有機フィラー(C-2)												20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	有機フィラー(C-3)													20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
	無機フィラー(D1-1)	5.0	20.0							30.0	20.0	20.0	20.0	20.0	5.0	20.0	20.0	30.0		35.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	無機フィラー(D1-2)			20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	無機フィラー(D1-3)				20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	無機フィラー(D2-1)					20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	無機フィラー(D2-2)						20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	無機フィラー(D3-1)							20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	無機フィラー(D4-1)								20.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
脱水剤	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
消泡剤	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
硬化触媒	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
水素原子濃度(10 ²¹ 個/cm ³)	6.1	5.0	5.1	5.1	5.4	5.4	5.4	5.1	4.5	4.9	5.4	5.6	5.6	6.9	5.0	5.4	3.8	4.5	4.5	8.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
評 価	密度 (g/cm ³)	1.03	1.11	1.14	1.14	1.21	1.22	1.21	1.23	1.20	1.09	1.11	1.12	1.12	0.99	1.19	1.15	1.37	1.03	1.20	0.94																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
粘 度	粘度 (mPa・s)	1600	7000	15000	4600	11000	5100	6000	6500	41000	9500	46000	47000	47000	49000	8000	47000	44000	1300	58000	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
結 果	作業性(施工性)	◎	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	◎	×	×																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
実 験	線量 (μSv/h)	2.5	2.3	2.4	2.3	2.5	2.4	2.5	2.5	2.2	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5	3.4	2.4	1.9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	中性子線透過率(%)	80.3	81.9	81.1	81.9	80.3	81.1	80.5	80.3	82.7	81.1	81.9	81.9	81.1	81.1	80.3	81.1	80.3	73.2	81.1	85.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
발명의 명칭	중성자 차폐체																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
공개번호	KR 2015-0003534	출 원 일	2015.08.11.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
출원인	한국수력원자력																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
요약	본 고안은 중성자 조사실내에 폴리에틸렌 차폐체를 선원과 천장의 중간부분에 위치시 켜, 선원에서 천장으로 진행되는 중성자를 선택적으로 차폐하여 차폐체의 크기 및 중량 을 줄일 수 있도록 한 중성자 차폐체를 제공하는데 그 목적이 있다. 상기한 목적을 달성하기 위한 본 고안에 따른 중성자 차폐체는 콘크리트 또는 폴리에틸 렌으로 이루어지는 중성자 조사실과; 상기 중성자 조사실의 바닥에 고정 설치되는 칼리 포르늄 중성자 선원과; 상기 중성자 조사실의 천장과 칼리포르늄 중성자 선원 간의 소 정위치에 와이어로프를 매개로 고정 설치되는 폴리에틸렌 차폐체로 구성됨을 특징으로																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												

	한다.																																																																							
대표청구항	콘크리트 또는 폴리에틸렌으로 이루어지는 중성자 조사실(10)과; 상기 중성자 조사실(10)의 바닥(11)에 고정 설치되는 칼리포늄 중성자 선원(20)과; 상기 중성자 조사실(10)의 천장(12)과 칼리포늄 중성자 선원(20) 간의 소정위치에 와이어로프(32)를 매개로 고정 설치되는 폴리에틸렌 차폐체(30)로 구성됨을 특징으로 하는 중성자 차폐체.																																																																							
대표 도면																																																																								
발명의 명칭	방사선 차폐용 조성물 및 이의 제조방법																																																																							
등록번호	KR 1708840	출 원 일	2015.10.29.																																																																					
출원인	젬스메디컬																																																																							
요약	본 발명의 방사선 차폐용 조성물은 납 화합물 및 바인더를 포함한다.																																																																							
대표청구항	납 화합물, 바인더 및 기능성 성분을 포함하며, 상기 기능성 성분은 나노 입자 혼합물 및 제1 화합물 중에서 하나 이상을 포함하고, 상기 나노 입자 혼합물은 나노 골드(nano gold) 및 나노 텅스텐(nano tungsten)을 포함하며, 상기 제1 화합물은 디브로모엔트라센(dibromoanthracene), 보론 실리케이트(Boron silicate), 유로퓸-도핑 바륨 플루오라이드(barium fluoride, BaF ₂ :Eu), 유로퓸-도핑 칼슘 플루오라이드(CaF ₂ :Eu), 비스무스 게르마네이트 옥사이드(bismuth germanate oxide, BGO), 은-활성 황화아연(silver-activated zinc sulfide, ZnS(Ag)), 텅스텐산아연(ZnWO ₄) 및 산화 란탄(lanthanum oxide, La ₂ O ₃) 중에서 하나 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 방사선 차폐용 조성물.																																																																							
대표 도면	<table><tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="4">방사선 차폐율(%)</th></tr><tr><th>60kVp</th><th>80kVp</th><th>100kVp</th><th>120kVp</th></tr><tr><td>실시예 1</td><td>100</td><td>94.3</td><td>90.5</td><td>88.1</td></tr><tr><td>실시예 2</td><td>100</td><td>95</td><td>91.3</td><td>88.9</td></tr><tr><td>실시예 3</td><td>100</td><td>95.9</td><td>92</td><td>89.9</td></tr><tr><td>실시예 4</td><td>100</td><td>92.4</td><td>90.1</td><td>88.9</td></tr><tr><td>실시예 5</td><td>100</td><td>94.9</td><td>91.8</td><td>88.4</td></tr><tr><td>실시예 6</td><td>100</td><td>93.4</td><td>90.3</td><td>89</td></tr><tr><td>실시예 7</td><td>100</td><td>96.1</td><td>91.8</td><td>89.2</td></tr><tr><td>실시예 8</td><td>100</td><td>96.5</td><td>92.2</td><td>90</td></tr><tr><td>실시예 9</td><td>100</td><td>95</td><td>91.2</td><td>88.9</td></tr><tr><td>실시예 10</td><td>100</td><td>93.7</td><td>88.5</td><td>80</td></tr><tr><td>비교예 1</td><td>100</td><td>95.8</td><td>91.9</td><td>89.1</td></tr><tr><td>비교예 2</td><td>100</td><td>94.6</td><td>90.7</td><td>89</td></tr></table>			구분	방사선 차폐율(%)				60kVp	80kVp	100kVp	120kVp	실시예 1	100	94.3	90.5	88.1	실시예 2	100	95	91.3	88.9	실시예 3	100	95.9	92	89.9	실시예 4	100	92.4	90.1	88.9	실시예 5	100	94.9	91.8	88.4	실시예 6	100	93.4	90.3	89	실시예 7	100	96.1	91.8	89.2	실시예 8	100	96.5	92.2	90	실시예 9	100	95	91.2	88.9	실시예 10	100	93.7	88.5	80	비교예 1	100	95.8	91.9	89.1	비교예 2	100	94.6	90.7	89
구분	방사선 차폐율(%)																																																																							
	60kVp	80kVp	100kVp	120kVp																																																																				
실시예 1	100	94.3	90.5	88.1																																																																				
실시예 2	100	95	91.3	88.9																																																																				
실시예 3	100	95.9	92	89.9																																																																				
실시예 4	100	92.4	90.1	88.9																																																																				
실시예 5	100	94.9	91.8	88.4																																																																				
실시예 6	100	93.4	90.3	89																																																																				
실시예 7	100	96.1	91.8	89.2																																																																				
실시예 8	100	96.5	92.2	90																																																																				
실시예 9	100	95	91.2	88.9																																																																				
실시예 10	100	93.7	88.5	80																																																																				
비교예 1	100	95.8	91.9	89.1																																																																				
비교예 2	100	94.6	90.7	89																																																																				

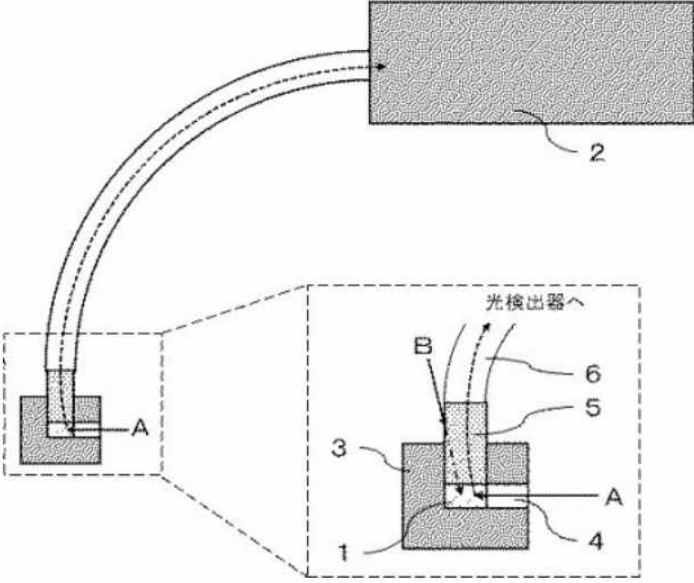
권리범위 분석	방사선 차폐를 조성물에 관한 특허로서, 나노골드 및 나노텅스텐에 관한 구성을 청구범위에 포함함 페브라운관에 포함된 납이 구성요소로 기재되어 있으나, 그 외에 나노골드 및 나노텅스텐에 관한 구성에서 권리범위가 크게 제한되어 침해 성립 가능성이 매우 낮음		
발명의 명칭	하이드로젤을 포함하는 연성 방사선 차폐재, 이의 제조방법, 및 이를 포함하는 방사성 물질의 보관용기		
등록번호	KR 1731785	출 원 일	2015.11.17.
출원인	제주대학교		
요약	본 발명의 하이드로젤을 포함하는 연성 방사선 차폐재는, 이온성 가교결합 및 공유결합성 가교결합을 포함하는 상호침투성중합체 구조의 수분함유 고분자인 하이드로젤 매트릭스를 포함한다. 상기 연성 방사선 차폐재는 두께를 증가 시켜도 연성의 특징을 가지면서 신축성이 우수하고, 진동이나 충격에 의한 방사성 물질 차폐재의 균열 발생이 방지되거나 최소화되어 안정적인 방사선 차폐 효과를 제공할 수 있다.		
대표청구항	가교이온과 상기 가교이온에 접하는 제1고분자의 고분자 체인에 존재하는 반응기에 의해 형성되는 가교결합을 포함하는, 이온성 가교결합 및 i) 가교제에 의하여 제2고분자의 서로 이웃하는 고분자 체인에 형성되는 제1공유결합성 가교결합; 및 ii) 상기 제1고분자의 고분자 체인과 상기 제2고분자의 고분자 체인 사이에 존재하고 가교제에 의하여 형성되는 제2공유결합성 가교결합;을 포함하는, 공유결합성 가교결합을 포함하는 상호침투성중합체 구조의 수분함유 고분자인 하이드로젤 매트릭스를 포함하는, 연성 방사선 차폐재.		
대표 도면			
권리범위 분석	고분자로 이루어진 연성 방사선 차폐재에 관한 특허로서, 고분자의 가교결합에 관한 구체적인 한정을 포함함 연성 방사선 차폐재에 관한 권리범위를 가지므로 헤비콘크리트 조성물에 대하여 권리범위가 미치지 않고, 고분자 결합에 관한 구체적인 한정으로 권리범위가 더욱 제한됨		
발명의 명칭	방사선 차폐용 조성물 및 그의 제조방법		
공개번호	KR 2016-0142634	출 원 일	2015.06.03.
출원인	알에스엠테크		
요약	본 발명은 시트의 내구성과 감마선 차폐능이 향상된 방사선 차폐용 조성물 및 그의 제조방법에 관한 것이다.		

	본 발명의 방사선 차폐용 조성물은 초고분자량의 폴리우레탄을 사용하여 차폐 물질의 함유량과 내가수분해성을 증가시킬 수 있다. 또한, 본 발명의 방사선 차폐용 조성물은 폴리에테르 에테르 케톤(PEEK) 수지, 나노 클레이(점토)를 포함하여 시트의 내구성을 높였다. 또한, 본 발명의 방사선 차폐용 조성물은 중성자 차폐능이 가장 우수한 물을 캡슐화하여 포함하고 있어 중성자 차단에 월등히 우수한 성능을 보여줄 수 있다. 또한, 본 발명은 폴리에테르 에테르 케톤(PEEK) 수지를 포함하여 장시간 방사선에 노출되어도 감마선 차폐능력을 유지할 수 있다.																																													
대표청구항	폴리우레탄 수지, 폴리실록산 수지, 실리콘 수지, 불소 수지, 아크릴 수지, 및 알키드 수지로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 베이스 수지 ; 워터 캡슐, 폴리 비닐알콜(PVA), 중밀도 폴리에틸렌(MDPE), 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 및 저밀도 폴리 에틸렌(LDPE)로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 중성자 차폐 물질 ; 내구성 향상을 위한 폴리에테르 에테르 케톤(PEEK) 및 금속 분말, 금속 산화물 분말, 파라핀, 붕소 화합물 및 탄소 분말로 이루어진 군에서 선택된 2종 이상의 첨가 물질을 포함하는 방사선 차폐용 조성물.																																													
대표 도면	<table><tr><th>Co-60감마(γ)선 조사시간</th><th>Polyether ether keton (PEEK) γ 선 차폐율</th><th>Polyether keton (PEK) γ 선 차폐율</th><th>저하율 (%)</th></tr><tr><td>12 hr</td><td>63.54</td><td>41.26</td><td>22.28</td></tr><tr><td>24 hr</td><td>60.24</td><td>35.96</td><td>24.28</td></tr><tr><td>48 hr</td><td>53.62</td><td>25.36</td><td>28.26</td></tr><tr><td>96 hr</td><td>40.48</td><td>4.16</td><td>36.32</td></tr></table>			Co-60감마(γ)선 조사시간	Polyether ether keton (PEEK) γ 선 차폐율	Polyether keton (PEK) γ 선 차폐율	저하율 (%)	12 hr	63.54	41.26	22.28	24 hr	60.24	35.96	24.28	48 hr	53.62	25.36	28.26	96 hr	40.48	4.16	36.32																							
Co-60감마(γ)선 조사시간	Polyether ether keton (PEEK) γ 선 차폐율	Polyether keton (PEK) γ 선 차폐율	저하율 (%)																																											
12 hr	63.54	41.26	22.28																																											
24 hr	60.24	35.96	24.28																																											
48 hr	53.62	25.36	28.26																																											
96 hr	40.48	4.16	36.32																																											
발명의 명칭	방사선 차폐재																																													
등록번호	JP 6007276	출 원 일	2015.03.26.																																											
출원인	TAKUTO:KK																																													
요약	【과제】 감마선 등의 방사선 차폐 효과가 우수하고 게다가 도막의 형성이나 성형품의 조제 작업 효율성이 좋은 방사선 차폐재 또는 방사선 차폐성 도료로 하는 것이다. 【해결 수단】 불포화 폴리에스테르 수지로 구성되는 바인더 100 질량부에 대해서 황산바륨50~200질량부를 배합한 수지 조성물로 구성되는 방사선 차폐성 도료나 성형체로 구성되는 방사선 차폐재로 한다. 불포화 폴리에스테르 수지의 원료와 이온 결정성 황산바륨과의 친화성이 좋기 때문에 황산바륨은 불포화 폴리에스테르 수지 중에 균일 분산되기 쉽고 그 우수한 방사선 차폐성이 충분히 발휘된다.																																													
대표청구항	불포화 폴리에스테르 수지로 구성되는 바인더 100 질량부에 대해서 침강성 황산바륨 85 ~200질량부를 배합한 수지 조성물로 구성되는 방사선 차폐재.																																													
대표 도면	<table><tr><th colspan="2">項 目 例番号</th><th>板状成形体の厚さ(cm)</th><th>線量率(μSv/h)</th><th>遮蔽率(%)</th></tr><tr><td rowspan="6">実施例</td><td>1</td><td>2.5</td><td>5.46±0.12</td><td>24.0</td></tr><tr><td>2</td><td>5</td><td>4.12±0.08</td><td>42.8</td></tr><tr><td>3</td><td>7.5</td><td>2.93±0.05</td><td>59.5</td></tr><tr><td>4</td><td>10</td><td>1.98±0.04</td><td>72.8</td></tr><tr><td>5</td><td>鉄板0.8mm/5/鉄板2.3mm</td><td>3.74±0.07</td><td>48.1</td></tr><tr><td>6</td><td>鉄板0.8mm/5/鉄板3.2mm</td><td>3.56±0.06</td><td>50.6</td></tr><tr><td rowspan="3">比較例</td><td>1</td><td>8</td><td>2.84±0.06</td><td>50.1</td></tr><tr><td>2</td><td>10</td><td>2.24±0.04</td><td>60.8</td></tr><tr><td>3</td><td>12</td><td>1.73±0.04</td><td>69.9</td></tr></table>			項 目 例番号		板状成形体の厚さ(cm)	線量率(μSv/h)	遮蔽率(%)	実施例	1	2.5	5.46±0.12	24.0	2	5	4.12±0.08	42.8	3	7.5	2.93±0.05	59.5	4	10	1.98±0.04	72.8	5	鉄板0.8mm/5/鉄板2.3mm	3.74±0.07	48.1	6	鉄板0.8mm/5/鉄板3.2mm	3.56±0.06	50.6	比較例	1	8	2.84±0.06	50.1	2	10	2.24±0.04	60.8	3	12	1.73±0.04	69.9
項 目 例番号		板状成形体の厚さ(cm)	線量率(μSv/h)	遮蔽率(%)																																										
実施例	1	2.5	5.46±0.12	24.0																																										
	2	5	4.12±0.08	42.8																																										
	3	7.5	2.93±0.05	59.5																																										
	4	10	1.98±0.04	72.8																																										
	5	鉄板0.8mm/5/鉄板2.3mm	3.74±0.07	48.1																																										
	6	鉄板0.8mm/5/鉄板3.2mm	3.56±0.06	50.6																																										
比較例	1	8	2.84±0.06	50.1																																										
	2	10	2.24±0.04	60.8																																										
	3	12	1.73±0.04	69.9																																										

권리범위 분석	폴리에스터 수지로 이루어진 바인더를 포함하는 차폐재에 관한 특허로서, 고분자의 종류 및 충전제의 종류로 한정되어 있음 고분자 수지를 포함하는 차폐재에 관한 권리범위를 가지므로 헤비콘크리트 조성물에 대하여 권리범위가 미치지 않고, 황산바륨과 같은 충전재에 관한 한정으로 권리범위가 제한되어 있음		
발명의 명칭	중성자 차폐 구조		
공개번호	JP 2017-090376	출 원 일	2015.11.16.
출원인	SHIMIZU CORP		
요약	【과제】 강도가 우수하고, 변질 부식 부패 등을 방지하기 위한 관리나 부속 시설의 설치를 필요로 하지 않고 더욱 간편하게 구축 가능한 중성자 차폐 구조를 제공한다. 【해결 수단】 중성자를 발하는 시설 P를 둘러싸서 마련된 콘크리트부 2(다이치콘크리트부 5 및 제2 콘크리트부 6)와 콘크리트부 2에 접하여 시설 P를 둘러싸도록 마련된 함수부 4와 수용성 고분자의 수용액이 충전된 밀폐 용기 8를 구비하고, 상기 수용액에 있어서의 물의 비율은 98 중량% 이상이며 밀폐 용기 8은 함수부 4에 충전되어 있는 중성자 차폐 구조 1A.		
대표청구항	중성자를 발하는 시설을 둘러싸서 마련된 콘크리트부와 상기 콘크리트부에 접하여 상기 시설을 둘러싸도록 마련된 함수부와 수용성 고분자의 수용액이 충전된 밀폐 용기를 구비하고, 상기 수용액에 있어서의 물의 비율은 98 중량% 이상이며 상기 밀폐 용기는 상기 함수부에 충전되어 있는 것을 특징으로 하는 중성자 차폐 구조.		
대표 도면			
발명의 명칭	방사선 차폐용 콘크리트와 그 제조 방법		
공개번호	JP 2017-090329	출 원 일	2015.11.13.
출원인	SE CORP		
요약	【과제】 본 발명은 방사선 차폐용 콘크리트에 관한 것으로 종래의 방사선 차폐용 콘크		

	리트에서는 골재의 분포가 불균일하고 프레스 콘크리트의 유동성이 나쁘고 강도의 향상에 과제가 있으므로, 그것을 해결하는 것이다. 【해결 수단】 콘크리트의 조성이 적어도 시멘트와 물과 골재의 금속재로 이루어져, 그 중량비가 시멘트 :1, 물 :0.15~0.25, 골재의 금속재:5~10, 인 방사선 차폐용 콘크리트 1으로 하는 것이다.		
대표청구항	콘크리트의 조성이 적어도 시멘트와 물과 골재의 금속재로 이루어져, 그 중량비가 시멘트 :1, 물 :0.15~0.25, 골재의 금속재:5~10, 인 것을 특징으로 하는 방사선 차폐용 콘크리트.		
대표 도면			
발명의 명칭	방사선 차폐용 수지 조성물과 방사선 차폐용 수지 재료 및 방사선 차폐용 수지 성형물		
공개번호	JP 2016-035397	출 원 일	2014.08.01.
출원인	SANKO IRIKA:KK		
요약	【과제】 우수한 방사선 차폐성을 가지는 패널이나 블록, 시트를 성형하는 것이나 용기의 내면에 도포해 방사성 폐기물용 용기로 할 수 있는 상온에서의 작업성이 양호한 방사선 차폐용 수지 조성물을 제공한다. 【해결 수단】 에폭시 수지 1과 경화제 2를 혼합한 수지 중에 방사선 차폐물질로서 적어도 1.5~16 μm, 바람직하게는 4~8 μm의 입경 범위에 있는 텅스텐분 3 a, 3 b가 상온에서 혼합물의 유동성을 잃지 않는 범위의 분량이며 비중이 4 g/cm³ 이상이 되도록 배합해 방사선 차폐용 수지 조성물 20으로 한다. 텅스텐분 3 a, 3 b는 4~8 μm의 입경 범위에 있는 세입자체와 함께 10~40 μm의 입경 범위에 있는 조입자체를 배합하면 좋고 그 배합 중량비는 3:1로 하면 바람직하다. 또한 실란 커플링제나 알칸올 아민, 소포제, 가요성 부여제를 조합하면, 방사선 차폐성, 유동성, 물성이 한층 바람직한 것이 된다.		
대표청구항	액상 에폭시 수지와 그 경화제 및 방사선 차폐물질을 적어도 포함한 에폭시 수지 조성물로서, 상기 에폭시 수지와 상기 경화제를 혼합한 수지 중에 상기 방사선 차폐물질로서 적어도 1.5 μm~16 μm의 입경 범위, 바람직하게는 4 μm~8 μm의 입경 범위에 있는 텅스텐분이 상온에서 혼합물의 유동성을 잃지 않는 범위의 분량이며 비중이 4g/cm³ 이상이 되도록 배합되어 있는 것을 특징으로 하는 방사선 차폐용 수지 조성물.		

대표 도면	(A) (B) (C)
발명의 명칭	차폐성능이 우수한 고강도 난연성 중성자 차폐재 및 그 제조방법
등록번호	KR 1132322
출원인	원일티엔아이
요약	본 발명은 사용후핵연료의 수송 및 저장용기 등에 사용되는 중성자 차폐재에 관한 것으로서, 중량%로, 에폭시 수지 50~60%, 수산화 알루미늄 25~35%, 실리카 알루미나 5~8%, 탄화붕소 0.4~1.0%, 경화제 4~6% 및 불가피한 불순물을 포함하는 차폐성능이 우수한 고강도 난연성 중성자 차폐재 및 이를 제조하는 방법에 관한 것이다.
대표청구항	중성자 차폐를 위한 중성자 차폐재에 있어서, 중량%로, 에폭시 수지 50~60%, 수산화 알루미늄 25~35%, 실리카 알루미나 5~8%, 탄화붕소 0.4~1.0%, 경화제 4~6% 및 불가피한 불순물을 포함하되; 상기 에폭시 수지는 비수페놀 A형 에폭시 수지 또는 브롬화 비스페놀 에폭시 수지를 사용하며, 상기 경화제는 테트라에칠렌 펜타민을 사용하는 것을 특징으로 하는 차폐성능이 우수한 고강도 난연성 중성자 차폐재.
대표 도면	(a) (b)
권리범위 분석	에폭시 수지 및 충전제 등을 포함하는 차폐재에 관한 특허로서, 수지의 종류, 충전제, 경화제의 종류가 구체적으로 한정되어 있음

	고분자 수지를 포함하는 차폐재에 관한 권리범위를 가지므로 헤비콘크리트 조성물에 대하여 권리범위가 미치지 않고, 경화제가 테트라에틸렌 펜타민 등으로 구체적으로 한정되어 권리범위가 협소함		
발명의 명칭	지향성 방사선 검출기 및 투명 차폐재		
공개번호	JP 2012-127703	출 원 일	2010.12.13.
출원인	TOKUYAMA CORP		
요약	【과제】 특정 방향으로만 감도를 가지며, 소형화할 수 있는 지향성 방사선 검출기 및 상기 지향성 방사선 검출기에 유용한 투명 차폐재를 제공한다. 【해결 수단】 신틸레이터 및 광감지기를 구비하는 방사선 검출기로서, 특정 방향으로 개구부를 가지는 방사선 차폐재에 의해 신틸레이터가 덮여 있고 상기 방사선 차폐재 중 적어도 일부가 투명 차폐재이며 신틸레이터와 광감지기가 상기 투명 차폐재를 통해 광학적으로 접합되어 있는 것을 특징으로 하는 지향성 방사선 검출기이다.		
대표청구항	신틸레이터 및 광감지기를 구비하는 방사선 검출기로서, 특정 방향으로 개구부를 가지는 방사선 차폐재에 의해 신틸레이터가 덮여 있고 상기 방사선 차폐재 중 적어도 일부가 투명 차폐재이며 신틸레이터와 광감지기가 상기 투명 차폐재를 통해 광학적으로 접합되어 있는 것을 특징으로 하는 지향성 방사선 검출기.		
대표 도면			
발명의 명칭	방사선 차폐능 비교대비용 레퍼런스 블록 및 이의 운용방법		
등록번호	KR 0652937	출 원 일	2006.04.11.
출원인	코스텍기술		
요약	본 발명은 방사선 차폐능 비교대비용 레퍼런스 블록 및 이의 운용방법에 관한 것으로, 방사선 차폐능 비교대비용 레퍼런스 블록의 재질은 방사선 사용시설에 설치되는 차폐체와 동일하고, 두께는 상기 차폐체의 두께에 맞추어 조합하여 사용할 수 있게 다양한 두께로 제조되는 것을 특징으로 한다. 또한, 본 발명의 방사선 차폐능 비교대비용 레퍼런스 블록의 운용방법은 방사선 사용시설에 설치되는 방사선 차폐체의 두께와 동일한, 다양한 두께를 가진 다수의 레퍼런스 블록중에서 일정 두께의 레퍼런스 블록을 조합하는 레퍼런스 블록 조합단계와; 방사선원을 조합블록에 투과시켜 측정한 방사선량으로 방사선 차폐체의 두께를 측정하여 그 두께가 허용오차를 벗어나면 수정 보완하여 재검사를 실시하는 방사선 차폐체의 검증단계로 이루어진 것을 특징으로 한다. 이에 따라 방사선 차폐체의 실제 두께 및 방사선 차폐체 전체의 두께 균일성을 정확하게 측정할 수 있고, 방사선 차폐체의 검증시 비교분석할 수 있기 때문에 검증의 신뢰성을 확보할 수 있으		

	며, 방사선 차폐체의 차폐성능(효능)이 보증되어 완벽한 방사선 안전관리가 가능해진다.		
대표청구항	밀도가 3500kg/m ³ 이고, 압축강도는 평균 47.0 N/mm ² 인 중량 콘크리트(heavy concrete)로 다수의 블록을 제작하되, 상기 다수 블록의 두께 차이는 50mm이고, 상기 다수 블록의 조합두께는 200mm~1500mm가 되게 두께가 200,250,300,350,400mm인 5개의 블록으로 이루어진 것을 특징으로 하는 방사선 차폐능 비교대비용 레퍼런스 블록.		
대표 도면	<pre> graph TD S1([시작]) --> S2[레퍼런스 블록 선정] S2 --> S3[블록 조합] S3 --> S4[조합블록의 두께 확인] S4 --> S5[방사선 측정기 선정] S5 --> S6[방사선 측정기 사용여부 판단] S6 --> S7[조합블록에 방사선원 조사] S7 --> S8[방사선량 측정] S8 --> S8{설계두께?} S8{설계두께?} -- 아니오 --> S9[미달두께 산정 수정보완후 재검사] S9 --> S2 S8{설계두께?} -- 예 --> End([종료]) </pre>		
권리범위 분석	방사선 차폐성능 평가를 위한 장치에 이용되는 레퍼런스 블록에 관한 특허로서, 블록의 압축강도 및 두께가 수치 한정되어 있음 레퍼런스 블록의 압축강도 평균이 47.0 N/mm ² , 두께가 200, 250, 300, 350, 400mm로 한정되어 매우 제한된 권리범위를 가지고 침해 가능성이 없음		
발명의 명칭	보론 및 납이 함유된 폴리에틸렌 방사선 차폐재 및 그 제조방법		
등록번호	KR 0889286	출원일	2005.02.25.
출원인	한국원자력연구원		
요약	본 발명에 따라서 전체 부피를 기준으로 폴리에틸렌이 80~90부피%이고, 보론 화합물과 납 화합물의 합이 10~20부피%이되, 상기 납 화합물이 1 내지 10부피%인 보론 및 납이 함유된 폴리에틸렌 방사선 차폐재가 제공되며, 이는 보론 화합물 및 납 화합물을 각각 파우더링하는 단계; 상기 분쇄된 보론 화합물과 납 화합물을 폴리에틸렌과 혼합하여 혼합물을 형성하고 승온시키는 단계; 상기 혼합물을 소형 칩으로 제조하는 단계; 및 상기 제조된 소형 칩을 압출 성형하는 단계에 의해 제조된다. 이에 따라 제공되는 차폐재는 중성자와 감마선을 동시에 차폐하는 효과가 있다.		
대표청구항	보론 화합물 및 납 화합물을 각각 파우더링하는 단계; 상기 보론화합물과 납 화합물의 분말을 폴리에틸렌 분말에 혼합하여 혼합물을 형성하고 승온시키는 단계; 상기 혼합물을 소형 칩으로 제조하는 단계; 및 상기 제조된 소형 칩을 압출 성형하는 단계; 를 포함하는 보론 및 납이 함유된 폴리에틸렌 방사선 차폐재의 제조방법.		
대표 도면			

권리범위 분석	방사선 차폐재 제조방법에 관한 특허로서, 고분자 수지 종류가 폴리에틸렌으로 한정되고, 압출 성형 등의 제조방법에 관한 구성으로 한정되어 있음 압출성형 단계에 대한 침해 입증에 어렵고, 고분자 수지로 폴리에틸렌으로 한정되어 권리범위가 협소함		
발명의 명칭	중성자 차폐능력이 높은 에폭시 수지조성물 및 이 에폭시수지조성물을 경화시킨 투명성이 있는 중성자 차폐재		
등록번호	KR 0779789	출원일	2001.11.08.
출원인	도오토 레진 가코 가부시키키가이샤		
요약	중성자 차폐능을 갖는 투명한 에폭시 수지조성물 및 그 조성물을 경화하여 성형시킨 투명한 중성자 차폐재를 제공하는 것을 목적으로 한다. 중성자 차폐능을 갖는 불투명한 무기질류 등을 포함하지 않는 에폭시 수지와 경화제로 되고, 혼합점도가 7000 mPa·s 이하인 상온 경화할 수 있는 것을 특징으로 하는 중성자 차폐능을 갖는 투명한 에폭시 수지조성물로서, 상기 상온에서 경화 가능한 에폭시 수지조성물을 사용하여, 형틀에서 온화하게 상온 경화시켜 기포가 없는 투명하고 일그러짐이 없는 중성자 차폐재이다.		
대표청구항	지방족계 에폭시 수지류 및 4,4'-이소프로필리덴비스시클로헥사놀계 에폭시 수지로부터 선택된 적어도 하나 이상 100 중량부에 대하여 지방족 아민, 지환식 아민, 복소환식 디아민 및 그들의 변성물로 이루어진 군으로부터 선택된 적어도 하나 이상의 경화제를 20 내지 100 중량부로 배합하여 되는 상온 경화 가능한 조성물로서, 혼합점도가 7,000 mPa·s 이하인 것을 특징으로 하는, 중성자 차폐능력이 높은 투명한 경화물이 얻어지는 에폭시 수지조성물.		
대표 도면	선원 : ^{252}Cf 1.45MBq 검출기: ALOKA Neutron Dose Meter TCS-451BS 측정용 배치도 (특수차량 운전석위치에서 측정)		
권리범위 분석	방사선 차폐용 에폭시 조성물에 관한 특허로서, 에폭시 수지의 종류 및 점도 등과 같은 물성으로 한정되어 있음 에폭시 수지에 관한 한정과, 에폭시 수지의 종류에 관한 한정(지방족계 에폭시 수지류 또는 4,4'-이소프로필리덴비스시클로헥사놀계 에폭시 수지), 점도에 관한 한정으로 권리범위가 매우 협소함		

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		0
결정 사유	본 연구개발사업은 [국토교통부소관 연구개발사업 운영규정] 제7장 연구개발사업의 보완 및 정보관리, 제47조의 4 (보완등급 분류기준)에 명시된 보안등급 분류에 따라 일반과제로 구분됨.	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-------	----------------	-------------	----	--------	---------------	---------------	---------------	-----------------

○ 해당사항 없음.

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 강릉원주대학교

1) 연구실 안전 점검 체계 및 실시



※ 위험등급별로 환경안전점검을 단계별로 체계화하여 관리

※ 관리위험등급의 지정

- A등급 : 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B 등급 : 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C 등급 : 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

○ 일상점검

- 실험·실습에 사용되는 기계·기구·전기·약품·병원체등의 보관상태 및 보호장비의 관리실태 등을 육안으로 실시하는 점검으로서 실험·실습 시작 전 매일 1회 실시
- 점 검 자 : 실험·실습실(연구실) 책임자 및 조교 또는 연구원

○ 정기점검

- 실험·실습에 사용되는 기계·기구·전기·약품·병원체등의 보관상태 및 보호장비의 관리 실태 등을 안전 점검기기를 이용하여 실시하는 세부적인 점검으로서 매년 1회 이상 실시

○ 특별안전점검

- 폭발사고·화재사고 등 연구활동종사자의 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있을 것으로 예상되는 경우에 하는 점검으로 총장이 필요하다고 인정하는 경우에 실시
- 점검반 : 소방서, 가스·전기 안전공사 및 관련 전문가를 참여시켜 실시

○ 정밀안전진단

- 연구실 안전 환경조성에 관한 법률 시행령 제9조에 해당되는 실험실(유해화학물질 및 유해인자취급 실험실, 독성가스취급실험실)에 대하여 2년마다 1회이상 정기적으로 실시.
- 점 검 반 : 외부 전문기관에 위탁실시

○ 실험실 정밀안전진단 실시

- 대상 : 연구 개발 활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
- 실시 : 2년마다 1회 실시

2) 교육 훈련

- 개요 : 실험실의 안전을 확보하고 종사자의 건강을 보호하여 실험 및 연구 활동에 기여하고, 또한 연구실 안전환경조성에 관한 법률에 의거하여 실험실의 환경 안전교육이 의무화됨에 따라 이공계열 대학원생 및 관련자 전원은 환경안전교육을 의무적으로 수강

3) 교육 대상

- 교수, 대학원생, 실험조교, 전문직원, 소속연구원, 실험참여 학부생 및 업체직원 등

4) 단계별 교육 이수과정

- 1단계 : 공통이수과목(등록실험실전체)
- 2단계 : 특수실험실

5) 교육구분

- 정기교육 : 방학기간 중 2회 출석 수업 실시
- 비정기 임시교육 :
 - 대상 : 새로운 실험과정의 신설시, 연구소의 신설시, 교육 미 이수자 (신입 대학원생, 전담직원, 연구원, 업체직원, 유해물질 취급자 등)
 - 방법 : 사이버 교육 환경안전교육 등(홈페이지 개설 동영상교육), 자료/유인물, 외부 온라인상, 외부강사, 전문교육기관의뢰 등
 - 특별교육: 해당기관에서 자체 또는 외부의 전문기관에 의뢰하여 위탁교육 실시

6)보험 가입 현황

보 험 명	보 상 내 용	대 상	주관부서
재산종합 보험 (종합패키지 보험)	재산종합위험담보 :2조 5천 6백억원 (신체배상책임보험 특별약관포함)	피보험자	설비안전팀
	대인대물일괄 : 20억원-사고당	전체	설비안전팀
	제3자 치료비 보상:1천만원/인당, 8천만원/사고당	제3자 보상	설비안전팀
	학생교내외치료비:1천5백만원/인당, 8천만원/사고당	학생	설비안전팀
학생단체 상해보험	상해사망, 후유장해 : 2억원, 의사상자 상해위험 : 1억원 상해, 후유정도에 따른 보상 : 약관보상 연구활동중사자보험 포함(특별약관)	학부생, 대학원생	학생복지처
교직원 단체안심 보험	사망, 후유장해, 질병 : 1억원/인 의료비지원 암치료비 : 1천만원/인당, 입원의료비지원 : 3천만원/인당 상해의료실비 : 2백만원/인당	교직원	인사팀

○ (주)제이엔티아이엔서

1) 인력전문성 제고

- 안전(관리감독자 교육) : 대한산업안전협회(년 2회)
- 안전(소방감독자 교육) : 소방협회(년 1회)

2) 점검사항

구 분	점 검 분 야	중점 점검 사항	비 고
자 체	○담당자별 점검	○ 유틸리티 장비 ○ 분석 장비	일일
	○안전관리팀 합동	○ 고압가스 사용 및 관리상태	매월, (안전점검의 날 관련)
	○야간 및 휴일	○ 시설운영상태 ○ 24시간 가동장비 운영상태	일일
	○비상대응 훈련	○ 안전시설 시험동작 및 대피훈련	년 2회
외부전문기관	○안전검사	○ 호이스트, 압력용기 안전검사	2년1회
	○정기 및 자율검사	○ 고압가스저장시설 안전관리상태	년 5회
	○수시검사	○ 위험물옥내저장소 안전관리상태	년 2회

3) 관련수칙

수 칙 명	주 요 내 용	비 고
안전보건관리요령	- 안전관리 총괄, 고압가스, 전기, 안전관리 세부사항	
전기관리 수칙	- 전기시설물 취급 및 구매설치 - 전기시설물 설치 등에 관한 규제	
고압가스 취급 수칙	- 보관 및 운반, 사용 및 조작 - 누설 및 경보, 작업	
환경 관리 수칙	- 안전관리자 임무, 조치 및 의무 - 취급, 통제구역, 비상재해 - 오염물질 배출 및 방지 준수사항 - 장비도입 및 폐기시 준수사항	

○ 연구실 안전점검 정기적 실시

- 연구실의 기능 및 안전을 유지 관리하기 위하여 안전점검지침에 따라 연구실에 관한 안전점검을 정기적으로 실시함.

○ 참여 연구원의 안전관련 교육훈련 시행

- 산업안전보건법 제31조 (안전보건교육) 및 연구실 안전환경조성에 관한 법률 제 18조에 의거, 전 직원에 대한 안전보건교육을 매달 실시함. 교육 방법은 모든 직원에 대한 자체교육(2시간)을 실시하고, 안전보건교육 일지를 작성하여 관리함.

○ 연구 내용 및 결과물 안전 확보

- 정기적으로 인원 및 시설 보안 항목, 문서보안 항목 그리고 정보보안 항목의 보안점검을 실시하여 연구 내용 및 결과물의 안전을 확보하고 있음. 참여 연구원들을 대상으로 연구 결과의 안전한 관리를 위한 안전교육 실시

○ 연구실 안전 확보 계획

- 참여 연구원들이 안전관련 각종 법규, 규정 및 지침을 준수하도록 하며, 요구되는 안전교육 및 훈련 실시
- 실험에 관련된 위험 정보를 숙지하고 적절한 개인 보호 장비 착용 실험실에 노출된 위험을 안전관리 책임자에게 보고
- 연구실의 잠재되어 있는 위험성 발견 및 위험물질과 각종 실험장비 등 사용에 따른 안전수칙이 잘 이행될 수 있도록 지도점검 및 교육

○ (재)한국건설생활환경시험연구원

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

○ 안전관리: 연구실의 기능 및 안전을 유지관리하기 위하여 연구실에 관한 안전점검을 실시

- 일상점검: 육안으로 실시하는 점검으로 연구개발 활동을 시작하기 전에 연구활동자가 매일 1회 실시
- 정기점검: 안전점검기기를 이용하여 실시하는 세부적인 점검으로서 연구실별 안전환경관리자가 주관하여 매년 1회 이상 실시

- 특별안전점검: 폭발 및 화재사고 등 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있을 것으로 예상되는 경우에 실시하는 점검으로서 연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 경우에 실시

종류 내용		일상점검	정기점검	특별안전점검
점검대상		연구원 내 과학기술분야 연구활동을 위하여 설치된 연구실	-연구원 내 과학기술분야 연구활동을 위하여 설치된 연구실 -연구 중단으로 1년이상 방치된 후 연구를 재개하려는 연구실	-일상·정기점검의 결과 안전에 취약한 연구실 -폭발·화재사고 등 연구활동 종사자의 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있다고 판단되는 연구실 (연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 연구실)
점검 내용		연구개발 활동에 사용되는 기계기구전자·가수약품병원체 등의 이상유무 및 보호장비의 관리실태 점검	당해 연구실 내의 모든 인적·물적인 면에서의 물리·화학적·기능적 결함 여부 점검	폭발·화재사고 등 연구활동 종사자의 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있는 인적·물적 연구 자원의 세부적인 특별점검
점검 방법		외부육안검사 및 점검 장비를 사용한 점검		
점검 시기		1회/일	1회 이상 / 년	연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 경우
점검 주체	자격 요건	연구 활동 종사자	시행령 제 7조 제2항의 자격에 해당하는 자 -연구실 안전환경관리자(법 제6조의 2에 정한 자격조건) -국가자격법령에 따른 안전관련 기사자격 소지자 (산업안전·건설안전·산업위생·소방설비·가스·인간공학기사) -전기사업법 제 73조에 따른 전기안전관리자 -소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률 제 20조에 따른 방화관리자 -국가기술자격 법령에 따른 안전관련 기술사 (기계·화공·전기·건설·산업위생관리·소방·가스·인간공학)	
	해당자	연구실 안전담당자	연구실 안전환경관리자 해당 자격증 소지자	연구실 안전환경관리자 해당 자격증 소지자
결과 기록/보관		일상안전 점검을 위하여 연구실 특성에 적합한 안전수칙 및 체크리스트를 개발하여 적용하며 그 결과를 기록하고 지적사항에 대한 조치 결과를 익일 안전점검 시 반드시 확인하여 기록하여야 한다.	정기 점검 후 아래 내용이 포함된 결과 보고서 작성 보관 - 점검일시· 점검자· 점검개요 - 점검범위 및 대상 - 점검장비 및 방법 - 점검결과 평가 - 안전조치 사항 - 결론 및 건의사항	정기 점검 후 아래 내용이 포함된 결과 보고서 작성 보관 - 점검일시· 점검자· 점검개요 - 점검범위 및 대상 - 점검장비 및 방법 - 점검결과 평가 - 안전조치 사항 - 결론 및 건의사항
비 고		점검결과 사고 및 위험가능성이 있는 사항 발견시 연구 활동 중단 등의 긴급조치 후 즉시 당해 연구실 책임자 및 연구실 안전환경관리자에게 보고하여야 한다.	위험요인 발견 시 즉각 제거하기 위한 안전조치를 취하도록 당해 연구실 책임자에게 문서로 통보하고 개선 결과를 연구실 책임자 임회하여 재검사하여 확인한다.	특별 점검 결과 및 이에 따른 안전조치 이행 여부를 연구주체의 장에게 보고

- 교육·훈련: 연구실 안전사고 예방을 위해 연구활동 종사자는 안전교육을 이수해야 됨
- 정기 교육·훈련: 연구활동 종사자/ 반기별 6시간 이상
 - 신규채용 등에 따른 교육·훈련: 신규 연구활동 종사자/ 8시간 이상, 대학생·대학원생/ 2시간 이상
 - 특별 안전교육·훈련: 연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 연구활동 종사자/ 2시간 이상
- 비상 시 대응 및 안전사고처리
- 화재나 폭발 등 생명에 위협을 주거나 심각한 상해를 입힐 정도의 상황일 경우에는 다음의 절차를 따른다.
 - 사고 즉시 주변에 상황전파 및 인근병원 응급실 또는 119에 연락
 - 인근직원의 협조를 얻어 조기진압 및 응급조치
 - 진압불가 시 해당 연구실이나 건물에서 긴급히 대피한 후 조치
 - 화학물질 전도 등과 같은 경미한 상해를 입힐 정도의 상황
 - 부상자가 있을 경우 인근병원 응급실로 후송 및 응급조치
 - 현장에 즉각적인 유해위험성이 없는 경우에는 적절한 보호구를 착용하고 전도된 화학물질을 제거
 - 화학물질 제거 시에는 주위의 모든 발화원인을 제거하고 물질안전 보건자료를 참고하여 조치
- 보험가입 및 건강검진
- 연구활동 종사자에 대한 보험은 관련법 시행령 제15조에 의거 산업재해보상보험법에 따라 가입
 - 연구활동 종사자는 산업안전보건법에 따른 특수건강진단기관에서 1년에 1회 이상 실시하여야 함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번 호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	방사선 차폐 성능측정 장치 및 이를 이용한 측정 방법	KCL	공동연구 책임자	대한민국	-	2018.11.27	단독	출원
2	특허	방사선 차폐용 채움재 조성물을 위한 중금속 용출 억제용 혼화제	JNTInc	공동연구 책임자	대한민국	-	2018.12.17	단독	출원
3	논문	Characteristics of volume change and heavy metal leaching in mortar specimens recycled heavyweight waste glass as fine aggregate	강릉원 주대	연구 책임자	대한민국	-	2018.01.06	단독	SCIE
4	논문	칼슘용출 열화 조건에서 광물질 혼화제를 사용한 RC부재의 휨 거동에 관한 실험적 연구	강릉원 주대	연구 책임자	대한민국	-	2018.03.01	중복	일반 학술지
5	논문	An Experimental Study on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Member Replaced Heavyweight Waste Glass as Fine Aggregate under Cyclic Loading	강릉원 주대	연구 책임자	대한민국	-	2018.11.09	단독	SCIE
6	논문	Characteristics of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Member Substituted Heavyweight Waste Glass as Fine Aggregate	강릉원 주대	연구 책임자	대한민국	-	2018.12.10	중복	일반 학술지
7	논문	Analytical Study on the Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam with Mineral Admixture under Calcium Leaching Degradation	강릉원 주대	연구 책임자	대한민국	-	2018.12.10	단독	일반 학술지
8	논문	폐 브라운관(CRT) 유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시험체의 기초 물성 및 방사선 차폐 특성	KCL	공동연구 책임자	대한민국	-	2019.01.02	단독	일반 학술지
9	논문	폐유리를 잔골재로 사용한 차폐채움재의 내구성 개선을 위한 혼화재료의 성능 평가	JNTInc	공동연구 책임자	대한민국	-	게재예정	단독	일반 학술지

제11장. 기타 사항

- 해당사항 없음.
-

제12장. 참고 문헌

0. 최윤석, 김일순, 최소영, 양은익, (2019), 폐 브라운관(CRT) 유리를 잔골재로 대체한 모르타르 시멘트의 기초 물성 및 방사선 차폐 특성, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.23, No.1, pp.163-170
 0. S.Y.Choi, S.Kim, E.I.Yang, (2018), Characteristics of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Member Substituted Heavyweight Waste Glass as Fine Aggregate, Materials Science Forum, Vol. 940, pp.141-145
 0. S.Y.Choi, Y.S.Choi, I.S.Kim, E.I.Yang, (2018), An Experimental Study on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Member Replaced Heavyweight Waste Glass as Fine Aggregate under Cyclic Loading, Applied sciences, Vol.8, Issue 11, pp.1-13
 0. 이경종, 최소영, 최윤석, 양은익, (2018), 칼슘용출 열화 조건에서 광물질 혼화재를 사용한 RC부재의 휨 거동에 관한 실험적 연구, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.22, No.2, pp.16-25
 0. S.Y.Choi, Y.S.Choi, E.I.Yang, (2018), Characteristics of volume change and heavy metal leaching in mortar specimens recycled heavyweight waste glass as fine aggregate, Construction and Building Materials, 165, pp. 424-433
 0. 국토교통부, (2014), 제5차 골재 수급 계획 수립 연구보고서
 0. 산업통상자원부, (2016), 에너지 통계연보, 에너지경제연구원
 0. 최상원, 김빅토르, 장우석, 김은영, (2007), 국내외 철강슬래그의 발생 및 이용 현황, 콘크리트학회지, Vol.19, No.6, pp. 28-33
 0. 최소영, 최윤석, 원민식, 양은익, (2015), 고밀도 폐유리의 차폐 콘크리트 잔골재로의 활용가능성 평가, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.19, No.4, pp.101-108
 0. 김용무, 최소영, 김일순, 양은익, (2018), 전자폐기물을 잔골재로 적용한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, Vol.22, No.2, pp.90-97
 0. 최영래, (2012), 아날로그 TV 재활용 기술 상용화를 통한 자원순환 촉진 방안, 아주대학교 환경공학과, 석사학위논문
 0. 서용철, (2014), 폐 CRT Cullet 재활용 기술개발 최종 보고서, 환경산업기술원
 0. T.C.Ling, C.S.Poon, (2011), Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar, Journal of Hazardous Materials, 192, pp.451-456
 0. H.Y.Wang, H.H.Zeng, J.Y.Wu, (2014), A study on the macro and micro properties of concrete with LCD galss, Construction and Building Materials, 50, pp.664-670
 0. S.D.Castro, J.D.Brito, (2013), Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, Journal of Cleaner Production, 41, pp.7-14
 0. Z.Z.Ismail, E.A.AL-Hashmi, (2009), Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, Waste Management, 29, pp.655-659
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

비매품/무료



ISBN 979-11-966890-0-1

