

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고붕소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발’
(연구개발 기간 : 2014. 07. 11 ~ 2016. 07. 10.) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2016. 8. 24.

주관연구기관명 : 경북대학교 산학협력단 (이승훈) (인)

주관연구기관책임자: 이승훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C07747 1-02	해당 단계 연구 기간	2015.07.11. ~ 2016.07.10.	단계구분	2/2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고봉소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발			
	세부과제명				
연구책임자	이 승 훈	해당단계 참여 연구원 수	총: 18 명 내부: 13 명 외부: 5 명	해당단계 연구개발비	정부:200,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:200,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 24 명 내부: 19 명 외부: 5 명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:400,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	경북대학교 산학협력단/ 경북대학교 신소재공학부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 부경대학교 산학협력단			연구책임자: 정 철 우	
기존 콘크리트의 기계적 강도와 차폐성능의 강화를 위하여 Boron이 과량 함유된 비정질 스틸파이버를 콘크리트와 배합하고 또한, 잔골재를 대신하여 붕규산 유리를 혼입하였다. 위의 목표치에 부합하는 재료의 개발을 위하여 요구되는 비정질 스틸파이버의 특성인 20at.%을 상회하는 보론 함량, 2.0 GPa이상의 인장강도, 최대 26.2%에 달하는 굽힘 연신율, 3.777X10-8 A/cm2 의 부식전류밀도를 얻음과 동시에 고봉소 비정질 스틸파이버의 생산공정에 따른 변수를 정리한 DB제작을 할 수 있었다. 또한 연구개발 목표치에서 요구하는 콘크리트 복합체의 목표강도이상(>33MPa), 목표슬럼프(150mm), 목표 밀도(>2.23)을 만족함과 동시에, Am-Be선원을 통한 열중성자 차폐 실험에서 plane 콘크리트 대비 1.4배가 향상된 차폐율을 나타냄으로서 질적 목표에 부합하는 열 중성자 차폐용 콘크리트를 개발할 수 있었다. 또한 이 과정에서, 관련 특허출원 2건, 국내외 학술발표 7건, 국내외학술지 게재논문 7건 의 양적성과를 달성하여 학문적, 기술적으로 우수한 성과를 나타낼 수 있었다.				보고서 면수 : 121면	

<국문 요약문>

연구의 목적 및 내용	연구 목적 · 붕소 (B)는 중성자 차폐 효율이 매우 높은 원소로 알려져 있으며, 재료내에 존재하는 붕소의 함량이 증가할수록 중성자 차폐능이 증가한다. · 차폐용 금속재료로서는 Borated Stainless Steel이 있다. 그러나, 결정질 금속에 들어갈 수 있는 붕소 농도는 매우 적으며, 포화농도 이상의 붕소는 다양한 붕소함유 석출물로 존재하고 이로 인해 금속의 내부식성이 급격히 저하된다. 따라서, 현재 상용화된 결정질 Borated Stainless Steel의 최대 붕소 농도는 약 10 at% 정도로 제한된다. · 차폐용 콘크리트는 일반적으로 탄화붕소(B₄C) 분말을 혼화재료로 배합하여 제조된다. 그러나, 탄화붕소(B₄C) 함량이 증가할수록 콘크리트의 역학적 성능 (강도 등)이 급격하게 저하된다. 특히 후쿠시마 원전과 같이 지진하중이 발생할 경우, 설계 강도보다 현저히 저하된 인장강도로 인하여 균열이 발생할 수 있으며 방사선 차폐 및 구조물의 안전성 등에 큰 문제를 나타낼 수도 있다. · 본 연구에서는 상기 문제들을 동시에 해결할 수 있는 고붕소 강섬유 보강 콘크리트를 개발하고자 한다. 즉, 기존 소재 대비 월등히 높은 붕소 함량을 가지며 (>20 at%), 고강도 (>1.5 GPa),고내식성 및 경제성을 가지는 고붕소 합금을 개발하고, 다양한 붕소함유 물질을 혼화재료로 활용한 고붕소 콘크리트를 개발하여 최적의 차폐능과 기계적 특성 조합을 나타내는 새로운 중성자 차폐용 콘크리트의 개발을 추진한다. · 구체적으로는 붕소 포화농도 확대를 위해 비정질 합금 설계 기술과 신금속 공정기술인 급냉응고 기술을 조합하여 고농도의 붕소가 원자상태로 존재할 수 있는 고붕소 비정질 리본 (두께<50μm)형태의 강섬유를 개발한다. 또한, 다양한 고붕소 혼화재료의 최적배합비를 산출하고, 고붕소 비정질 강섬유를 강화재로 사용하여 콘크리트의 균열저감, 인장강도 및 인성의 증가, 건조수축 저감 등 역학적 성질을 개선함과 동시에 중성자 차폐성능을 효율적으로 향상시키고자 한다.
	연구 내용 <고붕소 비정질 강섬유 개발> · 철계 고붕소 비정질 합금설계 및 성능 개선 - 철계 고붕소 비정질 합금 설계: Fe-B-X-Y-Z (X, Y, Z는 합금원소) - 비정질 리본의 생산 공정:melt-spinning 공정 변수 (온도, 냉각속도 등) - 철계 고붕소 비정질 리본의 특성 평가 - 비정질 형성능 평가: 유리천이 온도, 결정화 온도, 용융 온도 등 - 기계적 특성 평가: 인장강도 (>1.5 GPa), 연신율 (>10%) - 계면 특성 평가: 고붕소 세멘트/금속섬유 계면 반응, 부식 반응 등 · 철계 고붕소 비정질 합금의 최적화 - 철계 고붕소 비정질 리본의 콘크리트 적용 후 물성 변화 측정 - 철계 고붕소 비정질 리본 성능 향상을 위한 합금 조성 조정 및 최적화 - 철계 고붕소 비정질 리본 생산 공정 최적화 <중성자 차폐용 콘크리트 혼화재료의 물성평가 및 최적배합 산출> · 중성자 차폐 혼화재료의 반응성 평가 - 붕규산 유리 함유 배합의 포졸란 반응성 평가 - 탄화붕소와 포틀랜드 시멘트 상호 작용 분석 · 중성자 차폐 혼화재료의 콘크리트 혼합비율 산출 - ASR 반응성 평가 및 포졸란 반응성 평가 - 강도특성, 미세구조의 차이 조사

		- 역학적 특성의 손실을 최소화한 배합비율 파악 <고붕소 비정질 강섬유 및 혼화재를 이용한 중성자 차폐용 콘크리트의 개발> • 고붕소 비정질 강섬유 보강 콘크리트의 특성 파악 - 차폐용 콘크리트 재료의 선정 및 평가 - 고붕소 비정질 강섬유 형상비 및 혼입율에 따른 콘크리트의 물리적 특성 평가 • 콘크리트의 역학적 특성 평가 및 중성자 차폐성능 평가 - 콘크리트의 최적 배합비 도출 - 고붕소 비정질 강섬유 및 혼화재를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 평가 - 고붕소 비정질 강섬유 및 혼화재를 혼입한 콘크리트의 차폐성능 평가			
연구개발성과	기술적 성과	• 고붕소 비정질 강섬유를 혼입한 차폐용 콘크리트는 새로운 건설재료의 개발 시도 및 관련 건설 시장을 선점할 수 있는 기회를 획득할 수 있다. • 개발된 고붕소 비정질 강섬유의 경우 중성자 차폐와 관련된 분야 뿐만이 아니라 각종 구조용 소재의 강화재로 활용 가능하다. • 리본 형태로 제조된 비정질 강섬유는 탄성 변형이 기존 결정질 강섬유의 약 7배 이상이고, flexibility 가 매우 좋으므로 강섬유 혼합효율이 극대화된 새로운 강섬유 보강 공정 및 소재 개발이 가능하다. • 본 연구개발 기술이 국내외적으로 시작단계이므로 국내 연구진들의 관심을 유도하고 이를 이용한 후속연구의 유발 및 연구의 활성화가 기대된다.			
	경제적 성과	• 수입대체 및 수출기대 - 중성자 차폐 소재 및 건설 기술의 해외 수출 및 기술력 판매, 특허관련 수입이 기대된다. • 당해기술의 시장성 - 원전 안전 및 폐기물 관리와 관련하여 향후 시장이 더욱 확대될 것으로 전망된다. - 원전 및 관련 기술 요소 시장이 나아가야 할 방향 제시로 전세계적인 발전 가능성이 기대된다. • 산업적 효과로서 산업발전에 영향 - 중성자 차폐와 관련된 타 산업기술 응용 및 이전으로 본 기술을 바탕으로 한 소재산업의 활성화가 기대된다.			
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 원전건설 및 의료시설건설을 비롯한 차폐용 건설산업 - 중성자 차폐율 개선 및 역학적 성질을 향상한 콘크리트의 개발로 원전 및 의료 시설 건설 산업 등에 다양한 응용이 가능하다. • 핵폐기물 관리시설 - 고붕소 비정질강은 중성자 차폐능, 강도 및 내부식성 등이 기존의 핵폐기물 저장용기로 사용되는 Borated stainless steel에 비해 월등히 우수할 것으로 예상되므로 대체 사용이 가능하다. - 핵폐기물의 저장용기의 저장고로 사용되는 기존 콘크리트 구조물의 대체 또는 보강이 가능하다. • 강섬유 보강 콘크리트 산업 - 고붕소 비정질 강섬유는 역학적 성질 및 내부식성이 우수하면서 기존의 결정질 강섬유 대비 탄성 및 flexibility가 월등히 우수하므로 강섬유 강화 콘크리트 산업에 광범위한 응용이 가능하다.				
핵심어 (5개 이내)	비정질 강섬유	차폐용 콘크리트	섬유보강 콘크리트	붕소	중성자

< SUMMARY >

Purpose & Contents	-Purpose- • Boron(B) is as known as the element which has high thermal neutron shielding efficiency, and the higher thermal neutron shielding rate as increasing boron contents in alloy. • The borated steel, as the conventional neutron shielding material, has low boron solubility. And, the corrosion resistance is drastically decreased by boron intermetallics which is precipitated out after boron has been saturated. Therefore, now, maximum contents of boron in conventional borated steel(crystalline material) is limited around 10 at.% • Generally, radiation shielding concrete mixture is mixed with boron-carbide powder(B₄C). However, as increasing boron-carbide contents, the mechanical properties(such as. strength) is getting decreased. Especially, if the earthquake load is initiated, it is caused crack initiation by the decreased tensile strength below the design strength of concrete. Therefore, its lower strength bring could make lethal issues such as the radiation leak and unstability of construction structure. • The purpose on this researching project is development of the concrete reinforced with high boron amorphous steel fiber which can solve these problems as mentioned. Thus, by developing the high boron amorphous alloy with higher contents of boron (>20 at.%), higher strength (>1.5GPa), superior corrosion resistivity and higher cost efficiency than conventional borated ferrous alloy and the high boron concrete with a mixture of boron contained materials, the developing new-type of concrete mixture with optimal shielding efficiency and strength -Contents- <Developing high boron amorphous steel fiber> • Fe-based high boron amorphous steel alloy designing - Fe-B-X-Y-Z (X, Y, Z; alloying elements) - Manufacturing process : modifying melt-spinning process parameters - Performance evaluation - GFA : glass transition temperature, crystallization temperature, melting points - Mechanical properties : tensile strength(>1.5GPa), elongation rate(>10%) - Surface properties : cement/metal fiber interface reaction, corrosion reaction • Optimization of Fe-based high boron amorphous steel alloy - Observe the changing properties of amorphous steel fiber in the concrete matrix environment - Modify the alloy compositions for improved properties of the amorphous fiber - Optimize the manufacturing process for the amorphous fiber. <Property evaluation and optimal combination drawing of admixtures for neutron shielding concrete> • Evaluation of reactivity of neutron shielding admixture - Pozzolan reactivity evaluation of the concrete with borosilicate glass powder - Interaction analysis between boron-carbide and portland cement • Calculating mixing ratio of neutron shielding concrete - Evaluation of ASR reactivity and Pozzolan reactivity - Strength transition dependancy of microstructure - Defining mixing ratio which minimize loss of mechanical property <Development of neutron shielding concrete with high boron amorphous steel fibers and mixtures> • Features of high boron amorphous steel fiber reinforced concrete
-----------------------	--

	- Selection and evaluation of concrete mixture materials with the neutron shielding property - Evaluation mechanical properties depending on the fiber's aspect ratio and percent of the fiber • Evaluation of neutron shielding efficiency and mechanical property - Determination of optimal mixture ratio - Evaluation mechanical properties - Evaluation neutron shielding efficiency				
Results	-In part of technology- • High boron amorphous steel fiber reinforced concrete could secure the opportunities that are the development of new-type of construction materials and domination the construction market in advance • The usage of a high boron amorphous steel fiber is not only applications for the neutron shielding field but also reinforcement goods for any structural materials. • The amorphous steel fiber in a shape of ribbon has seven times the elastic deformation of conventional steel fiber, and, superior flexibility property. Therefore, with maximized mixing efficiency, the amorphous steel fiber could allow to develop new-type of the steel fiber reinforcing process and materials. -In part of cost efficiency- • Import-substituting effect and expectation of exporting of the technology and materials - Prospection point * Export : neutron shielding materials and technology * Import : patent-related goods • Marketability of the technology - From now on, it is predicted that the market related with radioactive safety and waste disposal will be wider. - By providing direction guidance of the nuclear plant industry and related-technology market, the technological advance is predicted to the global applications • Influence on the development of industry - Based on this technology, the activation of material industry is expected to activate by applying and transferring technologies related with neutron shielding				
Expected Contribution	• Construction industry for nuclear plants and medical facility - Concretes with superior the neutron shielding efficiency and mechanical properties are plenty of applications for nuclear plant industry and medical facilities • Radioactive waste disposal - It could be alternated borated stainless steel by Fe based high boron alloy which has superior neutron shielding efficiency, corrosion resistance and mechanical properties than of the borated stainless steel. - Alternating and strengthening of conventional concrete structures which are applied at nuclear waste storage facilities. • Steel fiber reinforced concrete industry - The Fe-based high boron amorphous steel fiber has excellent mechanical property, corrosion resistance, elasticity and flexibility than the conventional steel fiber. Thus, it could be widely applicable to steel fiber reinforced concrete industry.				
Keywords	Amorphous Steel fiber	Shielding Concrete	Fiber Reinforced Concrete	Boron	Neutron

< CONTENTS >

1. Summary of Research Project	
2. Domestic and International R&D Trends	
3. Research Contents and Result	
4. Goal Achievement and Contributions on Related fields	
5. Future Plan of R&D Results	
6. International Scientific and Technical Information	
7. Security Level	
8. Registered Research Facilities and Equipment Status on NTIS	
9. Safeguards Implementation Performance	
10. Representative Research Results	
11. Etc.	
12. References	

< 목 차 >

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

제1장. 연구개발과제의 개요

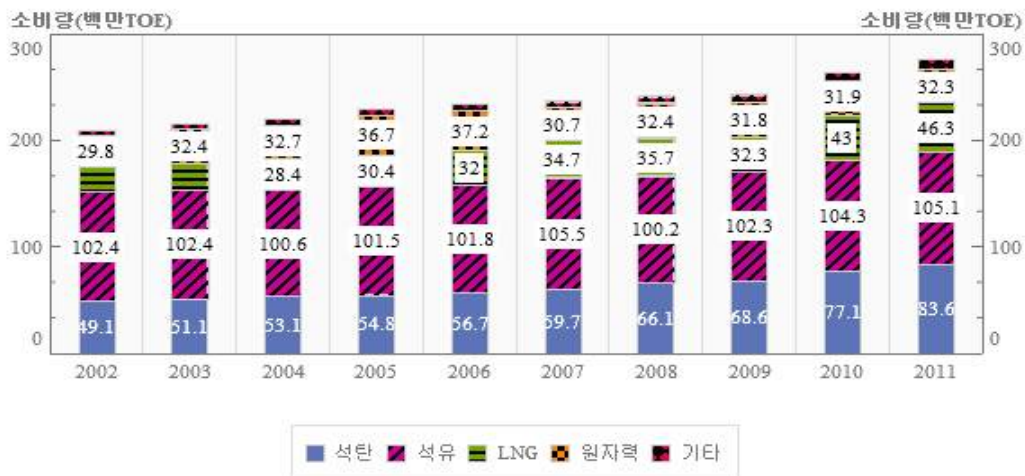
1. 연구개발 목적

- 붕소 (B)는 중성자 차폐 효율이 매우 높은 원소로 알려져 있으며, 재료내에 존재하는 붕소의 함량이 증가할수록 중성자 차폐능이 증가한다.
- 차폐용 금속재료로서는 Borated Stainless Steel이 있다. 그러나, 결정질 금속에 들어갈 수 있는 붕소 농도는 매우 적으며, 포화농도 이상의 붕소는 다양한 붕소함유 석출물로 존재하고 이로 인해 금속의 내부식성이 급격히 저하된다. 따라서, 현재 상용화된 결정질 Borated Stainless Steel의 최대 붕소 농도는 약 10 at% 정도로 제한된다.
- 차폐용 콘크리트는 일반적으로 탄화붕소(B_4C) 분말을 혼화재료로 배합하여 제조된다. 그러나, 탄화붕소(B_4C) 함량이 증가할수록 콘크리트의 역학적 성능 (강도 등)이 급격하게 저하된다. 특히 후쿠시마 원전과 같이 지진하중이 발생할 경우, 설계 강도보다 현저히 저하된 인장강도로 인하여 균열이 발생할 수 있으며 방사선 차폐 및 구조물의 안전성 등에 큰 문제를 나타낼 수도 있다.
- 본 연구에서는 상기 문제들을 동시에 해결할 수 있는 고붕소 강섬유 보강 콘크리트를 개발하고자 한다. 즉, 기존 소재 대비 월등히 높은 붕소 함량을 가지며 (>20 at%), 고강도 (>1.5 GPa), 고내식성 및 경제성을 가지는 고붕소 합금을 개발하고, 다양한 붕소함유 물질을 혼화재로 활용한 고붕소 콘크리트를 개발하여 최적의 차폐능과 기계적 특성 조합을 나타내는 새로운 중성자 차폐용 콘크리트의 개발을 추진한다.
- 구체적으로는 붕소 포화농도 확대를 위해 비정질 합금 설계 기술과 신금속 공정기술인 급냉응고 기술을 조합하여 고농도의 붕소가 원자상태로 존재할 수 있는 고붕소 비정질 리본 (두께<50 μ m)형태의 강섬유를 개발한다. 또한, 다양한 고붕소 혼화재료의 최적배합비를 산출하고, 고붕소 비정질 강섬유를 강화재로 사용하여 콘크리트의 균열저감, 인장강도 및 인성의 증가, 건조수축 저감 등 역학적 성질을 개선함과 동시에 중성자 차폐성능을 효율적으로 향상시키고자 한다.

2. 연구개발의 필요성

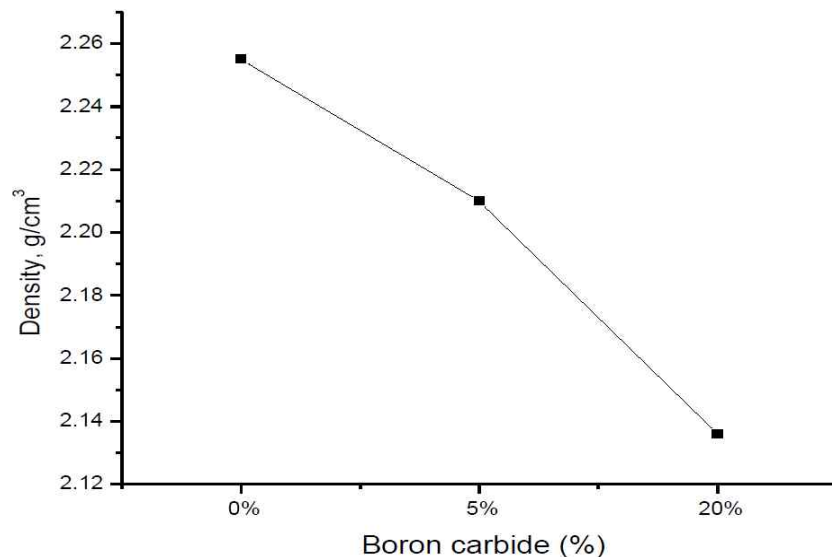
가. 연구개발과제의 설명

- 최근 우리나라의 1차 에너지 소비량 현황을 살펴보면 2002년 이후로 꾸준히 국내 에너지 소비의 30% 이상을 원자력 에너지에 의존하면서 대체 자원이 나오지 않는 이상 앞으로의 원자력 에너지에 대한 의존성은 불가피해 보인다.

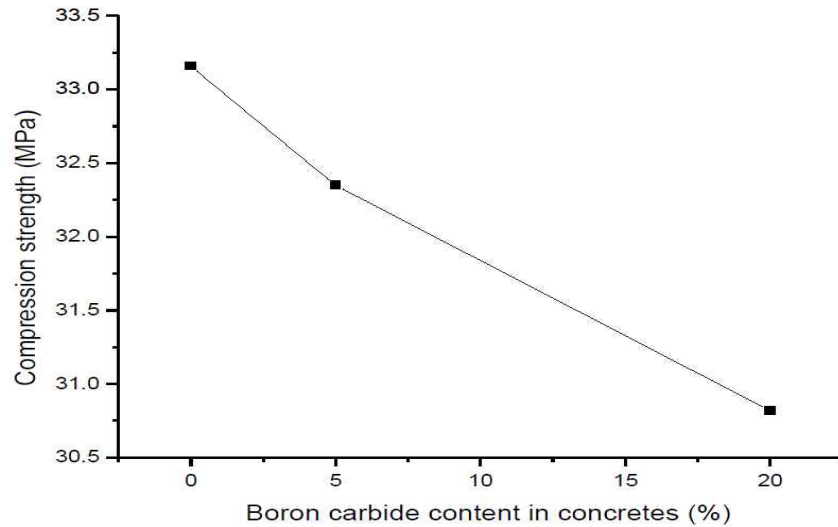


- 2011년 에너지경제연구원 「에너지통계연보」 1차에너지 소비량 현황 -

- 그러나 국내에서 원전을 가동하면서 매년 700톤씩 핵폐기물이 발생하고 있다. 이렇게 발생한 핵폐기물을 현재 가동 중인 원전 23기부지 내에 임시로 저장하고 있고, 2016년부터 고리원전을 시작으로 포화상태에 이르게 된다. 이로 인해 핵폐기물 관리가 미래의 사회적 이슈가 될 가능성이 매우 높다. 따라서 국민의 건강과 안전을 위해서는 핵폐기물 용기(Canister)의 안전성 확보에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 최근 후쿠시마 원전 사고 이후로 원자력 발전에 대한 사회적 우려가 높아지고 있어 방사능 유출을 미연에 방지할 수 있는 방안이 강구되어야 한다.
- 이에 원전 등에 사용되어지는 차폐 콘크리트의 안전관리기술이나 차폐성능에 대한 관심이 부각되고 있는 실정이다. 차폐콘크리트는 주로 생체방호를 위하여 감마선과 중성자선 등의 방사선을 차폐할 목적으로 사용되는 콘크리트이다. 방사선에는 α 선, β 선, γ 선, x선, 중성자선 등 여러 가지 종류가 있는데, α 선, β 선, x선은 콘크리트의 차폐성능과 연관되어지는 기본적인 방사선인 γ 선과 동일하게 고려되고 있다. 차폐성능은 차폐물체의 두께가 동일하면 밀도에 비례하고, 밀도가 동일하면 두께에 비례를 하게 된다. 즉, γ 선의 차폐성능은 차폐물질의 단위면적당 질량에 대부분 비례를 하게 된다. 이로 인해 원전건설에 있어서는 γ 선을 차폐하기 위한 방안으로 단위중량이 큰 골재를 사용하여 중량의 콘크리트를 제조하여 사용하고 있다. 하지만 중성자선의 경우에는 이와는 조금 다른 경향을 나타내게 된다. 중성자선의 경우에는 콘크리트 내부에서는 중성자선을 흡수를 함과 동시에 에너지원에 따른 2차 γ 선이 발생하기 때문에 γ 선의 차폐성능과 같이 차폐재의 두께와 밀도에는 큰 영향을 받지 못하게 된다. 이로 인해 일반적으로 차폐콘크리트에 있어서 중성자선을 흡수하기 위해 2차 γ 선을 발생시키지 않고 중성자선을 흡수하는 붕소 등의 원소를 혼입하여 사용하게 된다.



- 탄화붕소 함량 증가에 따른 콘크리트 밀도 감소 -



- 탄화붕소 함량 증가에 따른 콘크리트 강도 감소 -

- 국내외에서 상용화된 차폐 콘크리트에서는 중성자선을 흡수하기 위해서 일반적으로 탄화붕소(B4C) 파우더를 혼화재료로 배합하여 사용하고 있다. 하지만 중성자 차폐 특성을 위해 탄화붕소(B4C) 함량을 지속적으로 증가시킬수록 콘크리트 밀도의 감소로 인해 강도 등 역학적 성능이 급격하게 저하된다는 문제점을 가지고 있다. 콘크리트의 경우 장기간 방사선 조사 후에 탄성계수와 인장강도가 1/2이상 현저하게 저하되는 점을 감안할 때 중성자선을 흡수하기 위해 혼입되는 탄화붕소는 문제의 소지가 될 수도 있다. 특히 후쿠시마 원전과 같이 지진하중에 발생할 경우 설계 강도보다 현저히 저하된 인장강도로 인한 구조물의 균열 발생 등으로 방사선 유출 우려 및 구조물의 안전성 등에 큰 문제를 나타낼 수도 있다.
- 이러한 문제로 인해 차폐 콘크리트에 있어서 중성자를 효율적으로 흡수하는 동시에 콘크리트의 역학적 성질을 저하시키지 않은 새로운 소재 및 공법에 대한 연구가 필요하다.



- 본 연구에서 제시된 차폐용 콘크리트 개발 개념 모식도 -

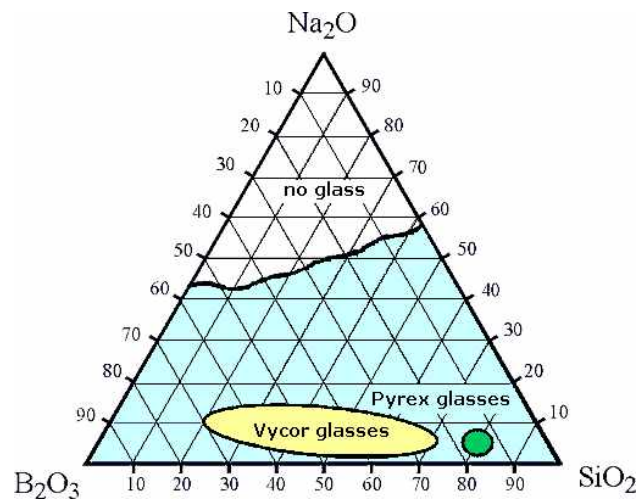
- 따라서 본 연구에서는 상기의 문제를 해결하기 위해 중성자 흡수능력이 높은 새로운 소재를 개발하여 이를 콘크리트에 적용시킴으로써 콘크리트의 중성자 차폐성능을 높이는 동시에 역학적 성질을 개선시킨 차폐 콘크리트를 개발하고자 한다. 구체적으로 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 붕소의 함량을 높여 중성자 차폐성을 높인 비정질 붕소합금을 개발하여 이를 리본타입의 강섬유로 콘크리트에 적용하고, 동시에 콘크리트의 역학적 성질을 최소화한 붕소성분을 함유

한 혼화재료의 최적배합비를 산출하여 콘크리트의 균열저감, 인장강도 및 인성의 증가, 건조수축 저감 등 역학적 성질을 개선하고 중성자 차폐성능을 효율적으로 향상시키고자 한다.

나. 연구개발의 중요성

- 콘크리트는 많은 다양한 원자력 관련 사업 및 시설에서 방사선을 차단하고, 구조재로서 성공적으로 사용되어져 왔다. 전통적인 원자력 발전소의 건설과정에서는, 두 개의 층 (Layer)의 콘크리트를 사용하는데, 하나는 원자로 내부를 감싸고, 외부로부터 격리하는 것이며, 다른 하나는 원자로를 감싸고 그것의 주 냉각 루프를 감싸는 형태로 존재하고 있다. 전자는 중성자 유출을 외부의 구조적 콘크리트에 해를 끼치지 않을 정도의 레벨로 줄여서, 안정성을 확보하도록 디자인이 되어 있다. 바깥쪽을 감싸고 있는 콘크리트는 중성자 및 감마선이 주변 환경으로 유출되는 것을 막는 역할을 하기 위해 만들어져 있다.
- 콘크리트는 시멘트, 물, 그리고 골재로 구성되어 있다. 그리고 최종적으로 콘크리트의 수화로부터 생성되는 물질은 일정 부분의 미반응 시멘트, 칼슘 실리케이트 수화물 (C-S-H) 및 수산화칼슘과 같은 수화 생성물, 물로 차 있는 공극 및 골재가 존재한다. 일반적으로 수소, 철, 탄소와 같은 원소들은 high interaction scattering 단면적으로 인한 산란효과 때문에 fast neutron을 감속시키는 것으로 잘 알려져 있다. 이 과정 중에 발생하는 slow neutron 혹은 thermal neutron의 경우는 붕소 및 카드뮴을 활용하면 더욱 효과적으로 잡아줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 콘크리트 내부에는 수화 반응시 미반응 상태로 남아있는 물이 존재하며, 물리적으로 C-S-H구조 내부에 흡착된 물, 화학적으로 결합된 결합수 (C-S-H의 H에 해당됨)가 존재하여, 이로 인한 높은 수소이온농도를 보이게 되므로, 높은 에너지의 중성자의 속도를 늦추고 에너지를 줄여준다. 또한, 탄산염 (석회석) 계열의 골재 혹은 화학적 결합수가 존재하는 골재를 활용할 수 있어 중성자 차폐에 더욱 효율적이고, 시멘트 내부에는 항상 철 성분이 C_4AF 의 형태로 존재하기 때문에, 이로 인한 fast neutron의 감속효과도 함께 얻을 수 있다.
- 그리고 콘크리트는 잘 알려진 감마선 차단재료이다. 이는 구조적으로 여러 종류의 치밀하거나, 각기 다른 크기의 공극을 가진 여러 다른 상태의 재료가 복합적으로 결합되었기 때문에 (heterogeneous), 감마선의 통과시 산란효과를 극대화시킬 수 있기 때문이다. 감마선의 차단을 위해서는 비중이 무거운 재료일수록 유리해지게 되는데, 따라서, 중금속 이온을 함유하고 있는 중량골재 (철 성분을 함유하는 hematite 등)와 같은 재료를 사용해서 차단하기도 한다. 그러나 중성자를 잡아줄 수 있는 붕소성분은 보통의 포트랜드 시멘트에는 존재하지 않기 때문에, 이를 투입하기 위해서는 다음과 같은 방법을 거쳐야만 한다.
 - 1) 붕소 성분을 함유하고 있는 특수 시멘트의 활용
 - 2) 콘크리트의 제조시에 붕소 성분을 투입하여 제조 (예시: boric acid, borax)
 - 3) 붕소 성분을 함유하고 있는 성분의 활용 (예시: borosilicate glass)
- 방사성 차폐 목적으로 붕소성분을 함유하고 있는 특수 콘크리트를 개발하고자 할 때, 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이 붕산, 보렉스와 같은 재료들을 콘크리트의 배합시 투입하는 것이다. 붕산의 경우, 통상 시멘트량의 1% 이하로 사용하는 것을 권고하고 있지만, 붕산의 투입은 항상 응결 및 경화속도를 늦출 수 있기 때문에, 매우 유의하여야만 한다. 과다하게 투입이 되게 되면, 응결 및 경화작용에 심각한 저해를 가져오며, 이후의 강도발현 또한 매우 나빠질 수 있기 때문에, 붕산의 투입량을 제한하는 것은 매우 중요하다. 보렉스의 경우에도 유사한 효과를 발휘하는 것으로 알려져 있다.

- 붕규산유리 (borosilicate glass)와 같은 재료를 콘크리트에 골재로서 활용할 수도 있다. 붕규산 유리의 경우 일반 소다 라임 유리보다 훨씬 높은 온도에서 용융되므로 제조가 힘들고 제조비용이 고가이다. 하지만 열에 대한 팽창성이 매우 낮아 파괴될 우려가 적기 때문에 내열유리로서 많이 활용되는 재료이다. 통상 붕규산 유리에 함유된 붕소의 양은 약 13%정도로 알려져 있으나, 아래의 그림과 같이 여러 다양한 종류의 화학적 성분비로 유리를 제조할 수 있다. 그러나 기존의 문헌에 따르면, vycor glass의 사용은 알칼리 실리카 반응을 유발하기 때문에 붕규산 유리 폐기물을 골재로 활용하기 위해서는 알칼리 실리카 반응을 줄이기 위한 적절한 골재의 크기를 찾아내어야만 한다. 이러한 방식은 여전히 알칼리 실리카 반응에 대한 잠재적인 위험성을 내포하고 있기 때문에, 최적의 접근법은 아니다.



- Borosilicate glass 의 결정구조 -

- 이와 같이 콘크리트에 있어서 중성자 차폐에 사용되는 붕소성분은 콘크리트의 역학적 성질의 저하라는 측면에서 투입량이 제한적이기 때문에 중성자 차폐성능에 있어서도 한계를 나타내게 된다. 따라서 콘크리트의 역학적 성질 유지와 중성자 차폐성능의 개선을 동시에 만족시킬 수 있는 새로운 기술의 개발이 필요하다.
- 이에 본 연구에서는 상기의 기술적인 문제를 해결하기 위한 새로운 기술적 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 붕소 함량이 높은 비정질의 강섬유를 개발하고 이를 콘크리트에 혼입하여 콘크리트의 역학적인 성질 저하가 없이 중성자 차폐성능을 향상시킬 수 있는 콘크리트를 개발하고자 한다. 동시에 중성자 차폐성능을 보다 효율적으로 향상시킬 수 있도록 붕소성분을 함유한 콘크리트 혼화재료에 대한 분석과 평가를 통해 콘크리트의 역학적 성질 저하를 최소화한 콘크리트 배합비를 제시하고자 한다.

다. 연구개발 단계(TRL에 근거하여 기술)

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

- 본 연구개발의 수준은 재료 및 자재 유형의 TRL 3단계인 <해석적 연구와 실험적 연구를 통한 개별 요소의 기능 및 특성 정립 단계>이다.
- 봉소성분을 이용한 중성자 차폐에 관한 콘크리트 기술은 기술적 응용개념으로 정의되고 제안되어지고 있다. 연구의 대부분은 관련 기술을 응용하기 위한 구체적인 문헌 및 자료 분석으로 이루어지고 있으며 기본원리를 규명하기 위한 실험적 연구 설계단계에 머무르고 있다.
- 본 연구에서는 이러한 기술적 응용개념을 넘어 기술적으로 이를 구현하기 위한 실험적 연구를 수행하며, 이를 통해 실험실 환경에서의 단위 요소기술에 대한 기초기술을 확보할 예정이다.

라. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

- 본 연구는 중성자 차폐를 목적으로하는 고봉소 비정질 합금을 개발하는 금속산업기술을 기반으로 한 새로운 건설 융복합 기술에서 관한 것으로 금속산업과 건설산업, 그리고 재료공학과 구조공학을 연계하는 산업 응용분야로의 확대적용이 가능하다.
- 또한 금속산업과의 상호협력 관계를 통해 건설산업에 보다 활용하기 적합하도록 섬유를 개질하고 소요성능을 개선하는 연구와 개발된 섬유를 건설재료로의 사용적합성을 평가하는 연구를 상호교차하여 수행할 수 있을 것이라 판단된다.
- 본 연구에 의해 개발되는 중성자차폐 콘크리트에 관한 기초기술은 원전건설수요가 있는 국가에 보급을 함으로써 각 국 유관산업계와의 협력체계 구축이 가능할 것이라고 기대된다.
- 개발된 소재는 중성자차폐 목적뿐만이 아니라 고성능 콘크리트 분야와 연계할 수 있으며, 국내외의 건설교통산업, 국방산업 등에 적극적으로 활용될 수 있다. 따라서 고성능 콘크리트가 활성화된 국내외의 업체 및 연구기관과의 연계를 통한 공동연구 및 기술이전이 가능할 것이라고 판단된다.

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 최종목표

(1) 최종목표

최종목표	기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고붕소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발
세부목표	기술개발 범위
Fe계 고붕소 비정질 합금개발	- 철계 고붕소 비정질 리본생산 및 중성자 차폐능 개선 - 철계 고붕소 비정질 리본 성능 향상을 위한 합금 조성 조정 및 생산 공정 최적화
중성자 차폐용 혼화재료의 분석 및 평가	- 붕소 계열 재료(붕규산유리, 탄화붕소)의 콘크리트 적용성 평가 - 콘크리트의 역학적 손실을 최소화한 혼화재료의 배합비율 도출
비정질 붕소강섬유 및 혼화재를 혼입한 중성자 차폐콘크리트	- 비정질 붕소강섬유 및 혼화재를 혼입한 콘크리트의 중성자 차폐성능 개선 - 비정질 붕소강섬유 및 혼화재를 혼입한 콘크리트의 최적배합 도출 및 역학적 성질 개선

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

- 선행연구 결과를 바탕으로 재료적, 기능적, 형상적으로 개선된 비정질 붕소강섬유를 합금하는 것을 선행으로 하며, 이를 바탕으로 비정질 붕소강 섬유를 제조하는 최적 공정을 개발하는 것과 붕소계열의 콘크리트 혼화재료에 대한 분석 및 평가를 1차적인 연구 목표로 설정한다.
- 개발된 비정질 붕소강 섬유와 혼화재료를 이용하여 차폐성능 및 역학적 성능을 평가하여 이를 통해 최적의 콘크리트 배합비를 도출하는 것을 2차적인 목표로 설정한다.
- 연구수행기관은 중성자 차폐성능을 개선을 위한 비정질 합금섬유 개발에 관한 기초실험과 이를 이용한 콘크리트의 물성개선에 관한 기초 실험을 마친 상태로 연구기간 내 연구목표의 달성에 매우 긍정적이라고 판단된다.

나. 연차별 연구목표 및 내용

(1) 연구목표 및 내용 (총괄로 작성)

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	철계 고붕소 비정질 합금 설계	- 선행 연구 결과 및 관련 논문 분석을 통한 합금 원소 확정 - 비정질 형성능, 중성자 차폐능, 역학적 특성, 부식 저항성을 고려한 합금 기본 조성 설계
	철계 고붕소 비정질 리본생산 및 중성자 차폐능 이론적 산출	- 합금의 붕소 조성 증가 및 기타 원소 조성 변화에 따른 비정질 형성능 평가 - 중성자 차폐 원소의 함량에 따른 중성자 차폐능 이론적 산출
	철계 고붕소 비정질 리본의 역학적 특성 및 부식 저항성 평가	- 리본의 pH 분위기에 따른(산성, 중성, 알칼리성) 부식 특성 평가 - 리본의 강도 및 연신율 측정을 통한 역학적 특성 평가
	붕규산 유리 함유 배합의 포졸란 반응성 평가	- 선행 연구 결과 및 관련 논문 분석을 통한 적정 입도 파악 - 포졸란 반응이 우선적으로 일어날 수 있는 입도범위 파악
	탄화붕소와 포틀랜드 시멘트 상호 작용 분석	배합비의 변화에 따른 수화반응, XRD, 응결 및 경화과정분석
	섬유보강 차폐용 콘크리트의 역학적 특성 분석 및 평가	- 차폐용 콘크리트의 특성관련 기술 및 자료 조사 - 고중량, 고밀도 콘크리트 재료의 선정 및 평가 - 섬유 형상비 및 혼입율에 따른 콘크리트의 물리적 특성 평가

연차	연구목표	주요연구내용
2차년도	철계 고붕소 비정질 리본의 콘크리트 적용 후 물성 변화 측정	- 콘크리트 적용 전 적용 후의 리본 물성 변화 비교 및 원인 분석(강도, 연신율, 부식저항성) - 기존 조성의 문제점 도출
	철계 고붕소 비정질 리본 성능 향상을 위한 합금 조성 조정 및 최적화	- 콘크리트 적용 리본 분석 결과 바탕으로 조성 조정 및 물성 변화 평가(강도, 연신율, 부식 저항성) - 조성 최적화 이후 설계 매뉴얼 구축
	철계 고붕소 비정질 리본 생산 공정 최적화	- 리본 생산 공정 조건에 따른 비정질 형 성능 평가 - 리본 생산 공정 최적화 이후 설계 매뉴얼 구축
	붕규산 유리 함유 배합의 포졸란 반응성 평가	ASR 반응성 평가 및 포졸란 반응성 평가
	탄화붕소와 포틀랜드 시멘트 상호 작용 분석	- 강도특성, 미세구조의 차이 조사 역학적 특성의 손실을 최소화한 배합비율 파악 - 역학적 특성의 손실을 최소화한 배합비율 파악
	콘크리트의 최적 배합비 도출	최종 개발된 비정질 붕소강 섬유 의 형상비와 선정재료를 이용하여 최적배합비 도출
	비정질 붕소강 섬유 및 혼화재를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 평가	압축강도, 인장강도, 휨강도, 인성지수 등의 역학적 특성 평가
	비정질 붕소강 섬유 및 혼화재를 혼입한 콘크리트의 차폐성능 평가	- Am-Be 중성자 선원 등을 사용하여 제작한 차폐용 각 입방체 시료에 대한 투과방사선 비 산출 - 새롭게 개발된 콘크리트와 Plain 콘크리트 및 정질강섬유 보강 콘크리트의 차폐성능 비교 데이터 작성

다. 연구개발 핵심성과

(1) 성과 리스트

연번	핵심성과물	성과유형	해당과제
1	철계 고붕소 비정질 리본 개발	재료·자재	기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고붕소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발
2	중성자 차폐용 콘크리트 혼화재료의 물성평가 및 최적배합 산출	재료·자재	기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고붕소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발
3	고붕소 비정질 강섬유 및 혼화재를 이용한 중성자 차폐용 콘크리트의 개발	재료·자재	기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고붕소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

(1) 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
산업통상자원부	방폐물관리기술개발	사용후핵연료 수송저장용기 차폐체 개발	2	
지식경제부	방폐물관리기술개발	사용후핵연료 수송저장용기 차폐체 개발	2	
교육과학기술부	선도기술개발사업	금속 Fiber 제조 및 Filter 개발	8.44	
중소기업청	산학연공동기술개발	강섬유 보강 콘크리트 개발	0.08	
중소기업청	중소기업상용화기술 개발지원	Steel Fiber를 적용한 高强度 高軟性 철근콘크리트 전주개발	2.25	
미래창조과학부	원자력연구기반확충 사업	보론 중성자 흡수재 노내 특성 연구	0.07	
지식경제부	청정제조기반산업원천기술개발	800MPa급 고성형성 고강도강 및 B첨가 자원가 고탄소강 제조기술 개발	3.5	
미래창조과학부	원자력연구기반확충 사업	노외조사 시험시설을 이용한 콘크리트의 인장강도변화와 거동분석	0.3	
미래창조과학부	원자력연구기반확충 사업	원전 1차 방호벽의 저방사화 및 차폐성능 향상 기술 개발	6.12	
지식경제부	방폐물관리기술개발	사용후핵연료 수송/저장 시스템 최적화 기술 개발	42.92	
산업자원부	전력산업연구개발 사업	콘크리트 표면밀도 증가에 의한 원전구조 성능개선 연구	1.99	
중소기업청	산학연공동기술개발	방사성 폐기물 처리처분용 폴리머 콘크리트 차폐재료 개발	0.54	
중소기업청	중소기업상용화기술 개발	국내외 원자력 발전소 구조물의 사용수명 연장을 위한 고내구성 콘크리트 개발 기술	2.32	
교육과학기술부	원자력기술개발사업	콘크리트 성능개선 및 밀실도 강화에 의한 원전 구조물 품질향상 기술개발	6	
지식경제부	원자력융합원천기술 개발	원전 격납건물 콘크리트의 시공 품질관리 및 유지관리 신기술 개발	1.57	
교육과학기술부	원자력기술개발사업	항공기 충돌을 고려한 격납건물용 Fiber 콘크리트 적용기술 개발	12	

- 본 과제와 관련하여 국토교통부 소관 연구개발사업 및 타 부처 연구개발사업으로 기 수행되었거나 수행 중인 유사과제와의 중복 여부를 국가과학기술지식정보서비스와 국가과학기술정보센터 통해 조사 및 검토한 결과, 차폐용 콘크리트의 대부분의 연구과제는 방사물질 차폐를 위한 콘크리트의 밀실도 증진에 관한 것과 섬유보강을 통해 구조성능을 개선하기 위한 것이었다.

-
- 본 연구과제의 핵심인 중성자 차폐를 위한 붕소기반 물질(고붕소함량 비정질 강섬유, 붕소기반 혼화재료)의 혼입과 동시에 역학적 성질을 개선하기 위한 비정질 강섬유를 혼입한 차폐용 콘크리트와 관련된 연구과제는 진행된 바가 없는 것으로 나타났다.

(2) 연구개발과제의 차별화 방안

본 연구에서는 아래의 3가지 방법을 통해 기존의 연구와 차별화를 시도한다.

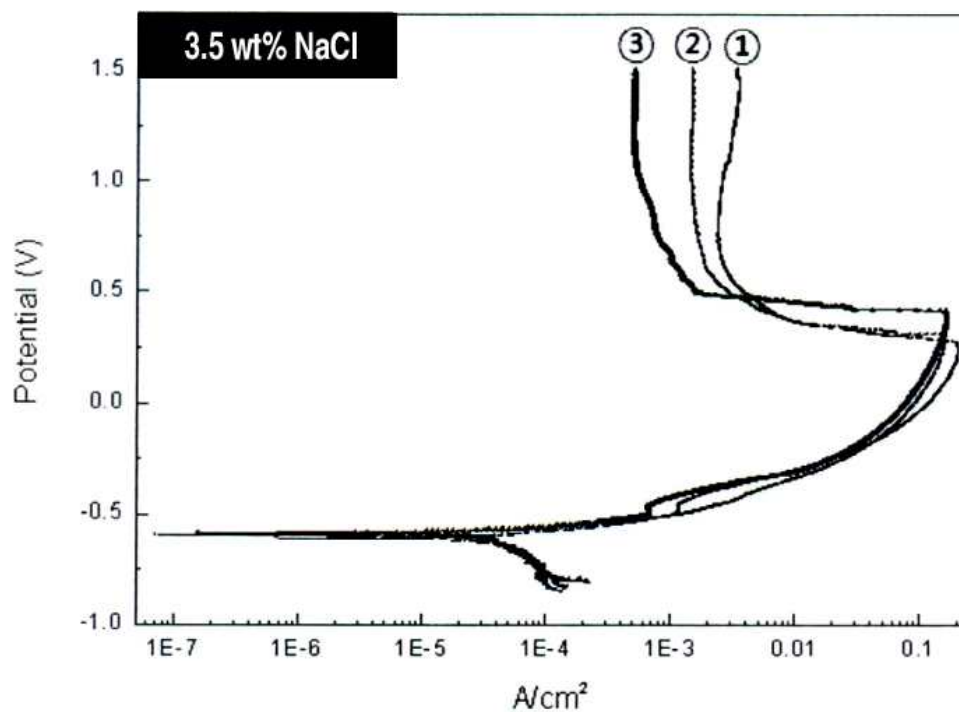
- 고붕소 함량 비정질 강섬유의 개발: 새로운 조성의 강섬유 개발
- 비정질 강섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성질개선
- 중성자 차폐성 향상 및 콘크리트의 역학적 성질 저하를 최소화시키기 위한 붕소기반 콘크리트 혼화재료에 대한 연구

(가) 고붕소 함량 비정질 강섬유 개발

- 현재 산업 현장에서 사용하고 있는 강섬유는 결정질 재료로 콘크리트의 기계적 성질을 향상시키기 위한 소재로만 활용 되어왔다. 핵폐기물이나 원자력 산업에 활용하기 위한 재료는 높은 중성자 차폐능을 가지고 있어야 하므로 대표적인 중성자 흡수 원소인 붕소가 많이 함유되어야 한다. 그러나 붕소가 기존의 결정질 합금강에 많이 첨가되게 되면 기계적 특성과 부식 특성이 급격하게 감소하게 되어 약 10 at% 이상 첨가할 수 없다.
 - 하지만 비정질 합금강으로 개발하게 되면 높은 붕소 함량(10 at% 이상)을 가져도 뛰어난 기계적 성질 효과를 가질 수 있다. 따라서 고붕소 비정질 합금강을 개발하고 그것을 강섬유 형태로 콘크리트에 첨가하게 되면 훌륭한 기계적 성질 뿐만 아니라 중성자 차폐능을 가질 수 있을 것으로 기대된다.
-



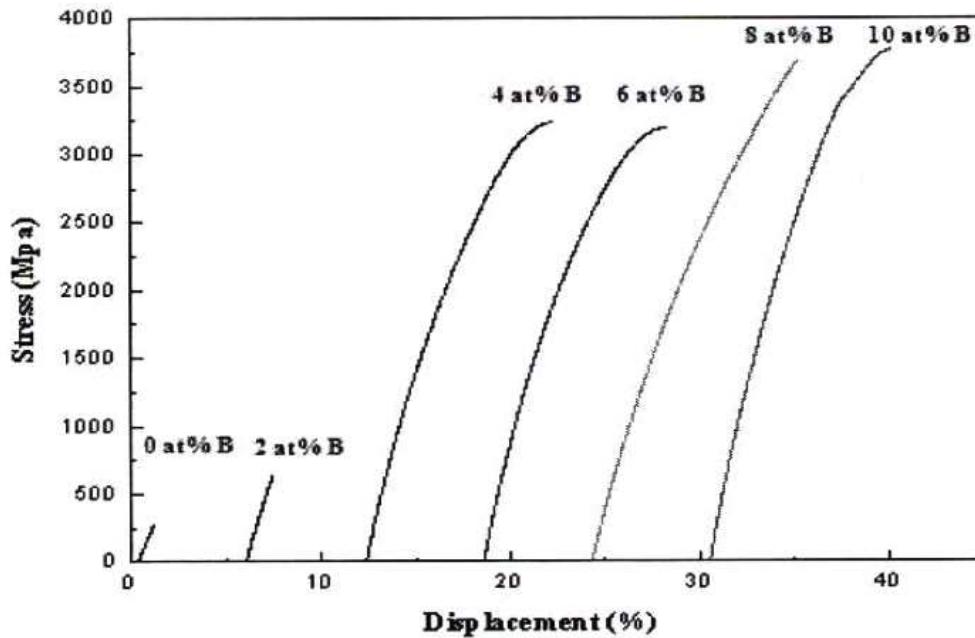
- 고붕소 비정질 강섬유 합금원소 구성도 -



- $Fe_{79-x}C_{11}Si_2B_{8-x}$ (X=2,0,-2) 비정질 합금의 Potentiodynamic polarization 곡선 -

		Boron contents	Composition (at %)	i_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (V)
1	Am+Crystal	6 at%	Fe ₈₁ C ₁₁ Si ₂ B ₆	4.2×10^{-5}	-604
2	Fully Amorphous	8 at%	Fe ₇₉ C ₁₁ Si ₂ B ₈	1.9×10^{-5}	-593
3	Fully Amorphous	10 at%	Fe ₇₇ C ₁₁ Si ₂ B ₁₀	1.5×10^{-5}	-583

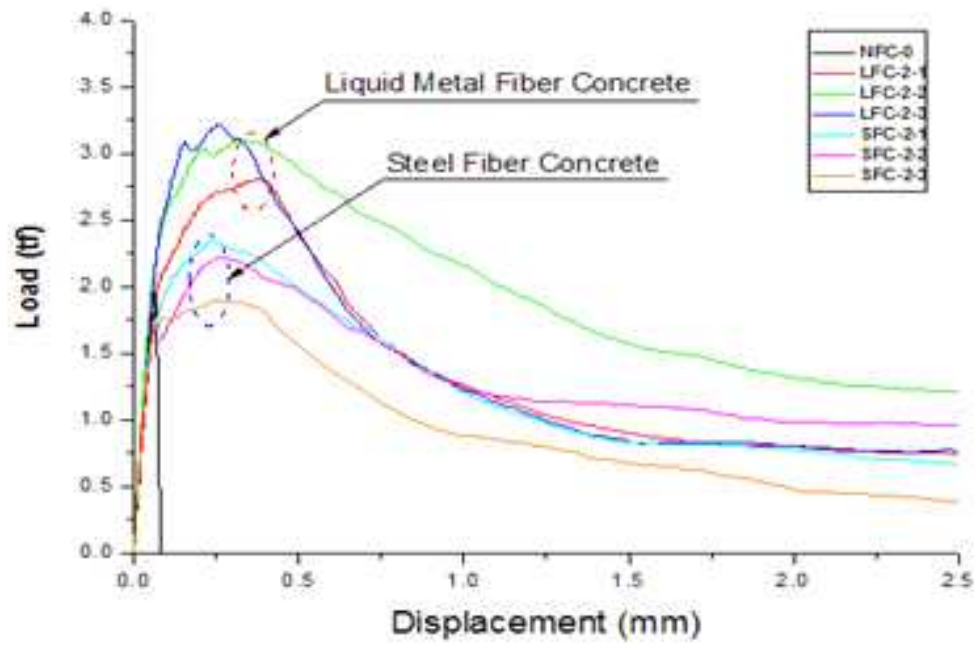
- Fe_{79+x}C₁₁Si₂B_{8-x}(X=2,0,-2) 비정질 합금의 부식전류, 부식전압 -



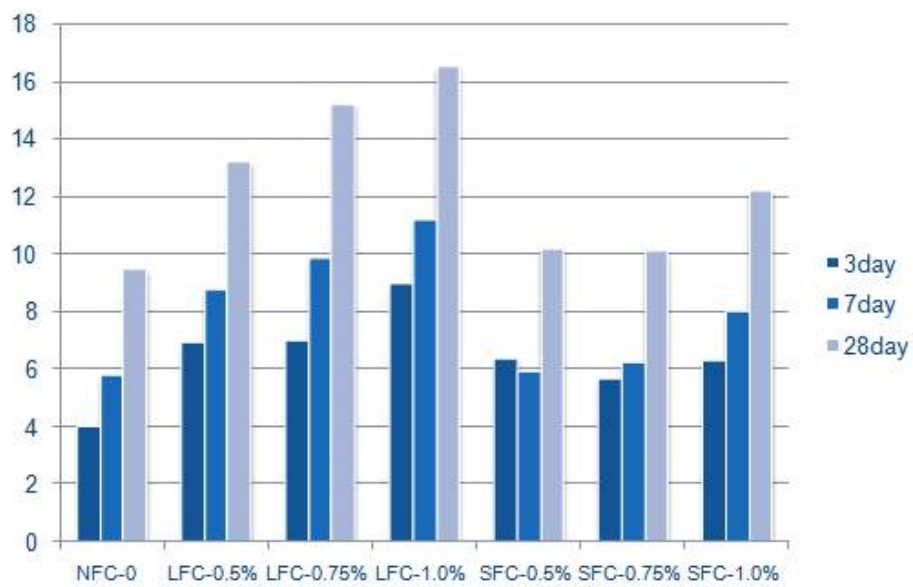
- Fe_{79-x}C₁₁Si₂B_{8-x}(X=8,6,4,2,0,-2) 비정질 합금의 Stress-displacement 곡선 -

(나) 비정질 강섬유를 혼입하여 콘크리트의 역학적 성질개선

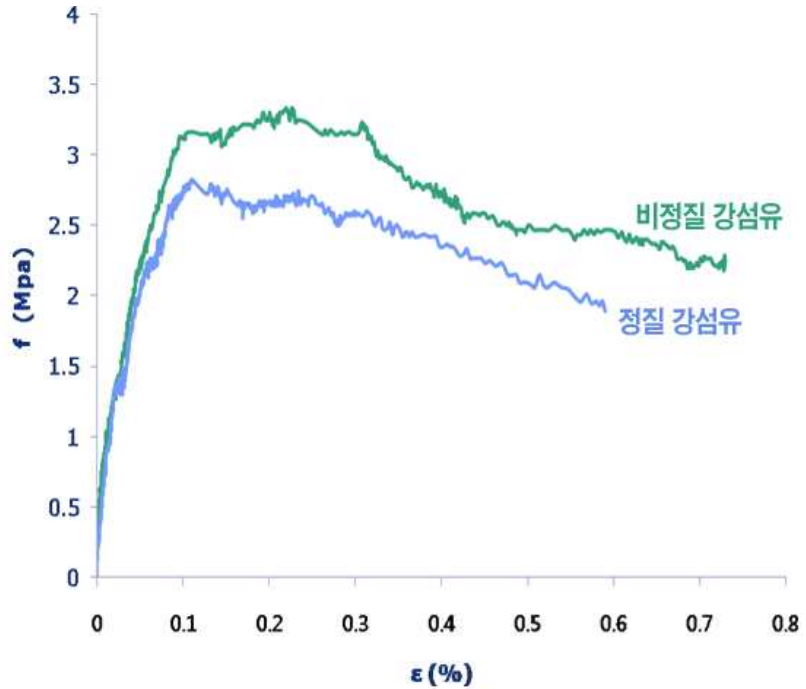
- 콘크리트사용된다. 특히 강섬유의 경우에는 콘크리트의 높은 인장강도와 트의 섬유보강은 콘크리트의 인장강도의 증진, 휨인성 증진, 건조수축의 저감, 균열의 저감 등 역학적 성질을 개선하기 위해 일반적으로 휨에 의한 균열 이후의 높은 연성을 발현하게 된다. 일반적으로 사용되어지는 강섬유의 경우 결정질의 탄소강으로 인장 강도가 1.1GPa 이상을 나타내고 있으나 콘크리트 혼입시 부식이 될 우려가 매우 크다.
- 이에 본 연구진에서는 일반적인 강섬유보다 인장강도가 높고 부식의 우려가 적은 비정질의 금속섬유를 이용하여 기초적인 역학적 특성에 관한 선행연구를 실시하였다. 실험결과, 강섬유를 혼입한 콘크리트에 비해 비정질의 금속섬유를 혼입한 경우가 더 높은 휨인장강도를 나타냈으며, 휨인성 지수 또한 높게 나타났다.
- 이를 통해 본 연구에서 개발되는 비정질의 붕소합금 섬유를 이용할 경우 콘크리트의 중성자 차폐성능 향상뿐만이 아니라 기초 실험결과와 같이 역학적 성질의 개선도 가능할 것이라고 판단된다.



- 비정질 금속섬유를 보강한 콘크리트의 중심점 재하 하중-변위 곡선 -



- 비정질 금속섬유를 보강한 콘크리트의 휨인성지수 평가 -



- 비정질 금속섬유를 보강한 콘크리트의 직접인장강도 -

(다) 붕소기반 콘크리트 혼화재료에 대한 연구

- 콘크리트의 붕소계열의 원소를 투입하는 방법은 다양하게 연구가 진행되고 있으나 이러한 기존의 방법들은 콘크리트의 역학적 성질에 영향을 미친다는 단점을 가지고 있다. 따라서 콘크리트의 방사선 차폐능을 향상시키기 위해 붕소 계열의 원소를 콘크리트에 안정적으로 투입하는 방법을 우선적으로 찾아내어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 통해 이를 해결하고자 한다.
 - 붕규산염 유리를 포졸란재로서 활용하는 방법 연구
 - 탄화붕소와 포틀랜드 시멘트와의 상호작용을 명확하게 규명하고, 이를 통해 차폐 콘크리트에 혼입될 수 있는 탄화붕소의 양을 발견
 - 기타 붕소를 함유한 다른 재료들과 포틀랜드 시멘트와의 상호작용을 규명하고, 이를 통해 또 다른 대안의 존재 가능성을 파악
- 붕규산염의 경우 알칼리 실리카 반응이 일어나는 재료로 이는 골재 자체가 반응성을 가진다는 의미도 내포하고 있기 때문에, 이를 미분쇄하면 포졸란재와 같은 효과를 얻을 수도 있다는 점은 충분히 고려해야 할 대상이다. 또한 이를 적절하게 포졸란재로서 활용할 수 있는 방안을 찾아낼 수 있다면, 콘크리트의 방사선 차폐율을 높일 수 있는 하나의 적절한 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.
- 붕규산염 유리를 포졸란재로서 활용하기 위해서는 이를 충분히 미분쇄하여 알칼리골재반응 이전에 포졸란 반응이 먼저 일어날 수 있도록 유도하는 것이다. 이를 위한 적절한 입경을 파악은 필수적인 요소이며, 이로 부족하다면, 알칼리 골재 반응의 위험성을 억제하기 위한 전처리 과정을 개발하여 알칼리 골재반응의 위험성을 제거하면서 중성자 차폐성능을 높인 배합비를 제시하고자 한다.
- 탄화붕소(Boron carbide; B_4C)의 경우, 재료의 화학적 성분비를 고려해 보면 중성자를 차단하는데 매우 효율적인 재료임을 알 수 있음. 그러나 이 재료와 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와의 상호작용

용에 대한 명확한 문건은 존재하지 않는다. 따라서 탄화붕소와 포틀랜드 시멘트와의 상호작용에 대해 명확하게 규명하고, 장기적인 거동에 문제점이 없음을 파악한다면, 차폐용 콘크리트의 제조시 큰 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

- 탄화붕소의 경우 혼입량에 따른 시멘트 수화반응의 차이를 수화열 및 XRD를 활용하여 분석함. 혼입량의 변화에 따른 응결 경화 및 역학적 성능의 차이를 확인하며, 미세구조를 확인하여 탄화붕소와 시멘트 매트릭스 상호간의 결합이 어떻게 존재하는지 확인하고자 함. 이러한 연구의 반복적인 수행을 통해, 콘크리트의 역학적 성능의 감소를 최소화한 적정 배합비를 찾고자 함.

나. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

- 국내의 연구동향은 국가과학기술지식정보서비스(NTIS), 국가과학기술정보센터(NDSL) 및 다양한 학술데이터 베이스를 통해 분석함.
 - 차폐콘크리트에 대한 연구동향은 제강 슬래그를 이용한 고중량, 고밀도를 통해 차폐성능을 높이는 연구가 주를 이루고 있으며, 일부에서는 Magnetite-Carbon과 같은 혼화재료를 이용하여 차폐 성능을 향상시키는 연구가 진행 중이지만 Magnetite-Carbon은 전자파 차폐 목적으로 사용되는 재료로, 본 연구의 핵심인 중성자 차폐와는 무관하다. 본 연구의 핵심적 개념인 중성자 차폐성능이 있는 섬유를 보강한 콘크리트나 중성자 차폐성능이 있는 혼화재료를 이용한 차폐콘크리트에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정임.
 - 붕소강에 관한 연구 동향은 미량의 붕소를 첨가하여 강의 기계적 강도를 높이는 연구 및 생산된 고강도 보론강에 대한 열처리 연구가 주로 이루어지고 있으며, 붕소 함량에 따른 용접부의 성질 변화에 대한 연구 또한 많이 이루어짐. 그러나 본 연구팀이 주목하는 붕소원소의 중성자 흡수능에 초점을 맞춰서 진행된 연구 사례는 찾을 수 없었으며 붕소함량 또한 매우 낮은 합금이었기 때문에 중성자 차폐재로 사용 할 수 없는 재료들이었음.
 - 중성자 차폐재에 대한 연구는 이루어지고 있지 않았으며 새로운 소재 개발에 대한 내용은 찾을 수 없었음. 중성자 차폐에 대한 연구들은 대부분 본 연구팀이 추구하는 방향인 중성자 차폐 원소인 붕소의 함량을 높인 새로운 소재 개발이 아닌 기존 소재에서 효율성을 높이기 위한 변화(캐스크 형상 설계) 및 중성자 검출기에 대한 내용이 대부분이었음.
- 국외 연구 동향은 학술 정보 사이트인 Sciencedirect 및 Scopus를 통해 분석을 실시함.
 - 차폐 콘크리트와 관련된 국외의 연구동향은 국내와 마찬가지로 고중량, 고밀도의 콘크리트를 이용하여 차폐성능을 높이는 것이 주를 이루고 있음. 일부 연구에서는 탄화붕소와 같은 중성자 차폐성능이 있는 붕소계열의 재료를 혼화재료나 골재로 사용하는 연구를 진행하고 있음. 하지만 현재까지 진행된 연구는 이러한 재료들을 혼입한 콘크리트의 차폐성능과 콘크리트에 미치는 영향에 관한 기초적인 연구단계이며, 실제 콘크리트에 응용할 수 있는 최적화 기술에 관한 연구는 미비한 실정임.
 - 2011년부터 최근까지 이루어진 연구에 대한 분석 결과 국내 연구팀들의 붕소강에 대한 연구방향과 차이점을 찾을 수 없었으며 대부분의 연구 주제는 붕소를 첨가한 고강도강에 대한 기계적 특성 평가 및 열처리 방법에 따른 미세조직 변화 조사에 대한 연구가 대부분 이루어 짐. 이러한 주된 연구

방향들은 본 연구팀에서 추구하고자 하는 방향과 공통점이 거의 없음.

- 중성자 차폐재 개발에 대해서는 본 연구팀이 목표로 하는 비정질 고붕소강과 유사한 연구 사례를 찾을 수 있음. 관련연구는 미국과 프랑스에서 진행되었으며 미국의 경우 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), J. Farmer 연구팀이 비정질 합금 코팅재를 개발하여 중성자 차폐능을 높이는 연구를 지속적으로 진행하여 왔고 2013년 7월에 코팅재 및 코팅기술의 조건에 관한 특허를 출원함. 프랑스의 경우 2006년 3월 Institut National Polytechnique de Grenoble, M. Stoica 연구팀이 비정질 형성능 및 자기적 특성에 초점을 맞춘 고붕소 철계 벌크 비정질에 대한 연구가 진행됨. 고붕소 철계 비정질이라는 점은 공통점으로 작용하나 미국의 사례의 경우 비정질 합금 코팅재를 목적으로 하였고 프랑스의 사례의 경우는 중성자 차폐 및 기계적 성질 강화를 위한 강재 개발이 아닌 자기적 특성에 초점을 맞췄다는 점에서 본 연구팀이 추구하는 방향과 다르다는 점을 알 수 있음.
-

구 분	내 용
이해우 (2007)	- 고강도강의 붕소 함량증가에 따른 용접성(Weldability)에 미치는 영향 - 붕소 함량에 따른 용접부위의 균열 발생거동 및 미세조직 분석에 관한 연구
채명수 (2008)	- 고강도 붕소 합금강의 기계적 특성 및 성형성 - 열간 성형법을 통해 생산한 고강도 붕소 합금강의 기계적 특성 및 성형성
이양 (2011)	- 붕소강의 급랭 온도 및 열간 성형법 시뮬레이션에 따른 기계적 특성 - 급랭 온도와 열간 성형법의 조건에 따라서 생산된 붕소강의 기계적 특성에 대한 면밀한 조사를 하고자 함
문동준 (2012)	- 고강도 붕소강의 냉각속도 및 오스테나이트화 온도에 따른 기계적 변형 및 상변태 거동 - 붕소가 첨가 되지 않은 강을 비교군으로 하여 고강도 붕소강의 냉각속도와 오스테나이트화 온도를 조절하고 붕소 원소의 석출 및 편석에 대한 연구
Anjana Deva (2011)	저탄소강의 가공 경화와 연신율에 미치는 붕소의 영향에 대한 연구
Genichi Shigesato (2012)	저탄소강에서의 오스나이트상 경계면에서 나타나는 붕소의 편석 거동에 대한 연구
J. Baral (2013)	붕소함량에 따른 P91 합금강의 크립(Creep)거동 연구
A. Terzic (2013)	붕소함량을 조절한 저탄소강의 연속 냉각에 의한 상변화 및 이러한 변화가 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구
Zhi-hong ZHANGa (2014)	붕소를 함유한 저탄소강의 연속 냉각에 의한 베이나이트상 변화를 조사하고 각 조건에 따른 강의 기계적 특성 조사
M. Stoica (2006)	고붕소 Fe-B-Nb 합금의 Nb 함량의 증가에 따른 비정질 형성능 변화 확인 및 Fe66Nb4B30 조성의 역학적 · 자기적 특성 평가
J. Farmer (2007)	고붕소 Fe-Cr-Mn-Mo-W-B-C-Si 합금(SAM2X5) HV0F(High Velocity Oxy-Fuel) 용사코팅을 적용한 코팅층의 부식 특성 및 중성자 흡수능에 대한 평가와 우수성 증명

구 분	내 용
임희섭 (2011)	▪ 전기로 산화슬래그 골재를 활용한 X선 차폐콘크리트 개발에 관한 실험적 연구 - 전기로 산화슬래그를 골재로 사용한 콘크리트의 방사선 차폐 성능 분석 연구
김진만 (2005)	▪ 급냉 제강 슬래그 전골재 대체율에 따른 차폐콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구 - 잔골재의 급냉 제강슬래그 대체율에 따른 콘크리트의 방사능 차폐성능 연구
박동철 (2004)	▪ Magnetite-Carbon을 이용한 전자파 흡수형 차폐 시멘트 모르타르의 물리적 특성과 차폐효율 - Magnetite-Carbon을 이용한 코팅용 전자파 흡수형 차폐 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 차폐효과에 관한 연구
민제순 (2003)	▪ LEDITE를 이용한 방사선 차폐시설에 관한 고찰 - LEDITE라는 차폐물질을 이용하여 차폐시설의 공간이용 효율성 및 공사비용 절감 효과 개선에 관한 연구
Yusof, M.R. (2012)	▪ Study of the Effect of Boron Carbide Content in Concrete as Radiation Shielding Application - 탄화붕소를 이용한 콘크리트의 열중성자 차폐성능 연구
yanova, V.S. (2014)	▪ Heavy Optical Glass in Concrete for Radiation Protection - silicate-lead glass을 골재로 사용한 콘크리트의 차폐성능 연구
Lee, S.Y. (2013)	▪ Assessing Aggregates for Radiation-Shielding Concrete: Methods for petrographic examination of high-density and boron-bearing aggregates - 고밀도 붕소를 첨가한 방사선 차폐 콘크리트용 골재의 골재별 특성평가
Alwaeli, .M. (2013)	▪ Application of granulated lead-zinc slag in concrete as an opportunity to save natural resources - lead-zinc slag의 잔골재 치환 콘크리트의 방사능 차폐성 분석에 관한 연구
Ali Basheer Azeez (2013)	▪ The Effect of Iron Fillings Waste Contents on the Attenuation Level of Anti-Radiation Shielding Concrete - 철가루를 첨가한 콘크리트의 방사능 차폐성 영향 분석에 관한 연구

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

출원번호	특허명칭	출원인
(US)09243229	Advanced neutron absorber materials	Bechtel BWXT Idaho, LLC
(US)11595623	Corrosion resistant neutron absorbing coatings	Choi Jor-Shan
(US)11598940	Amorphous metal formulations and structured coatings for corrosion and wear resistance	Farmer Joseph C.
(US)12426769	IRON-BASED AMORPHOUS ALLOYS AND METHODS OF SYNTHESIZING IRON-BASED AMORPHOUS ALLOYS	Saw Cheng Kiong
(US) 08984689	Stainless steel having excellent thermal neutron absorption ability	Sumitomo Metal Industries
(KR) 2011-0024136	콘크리트 잔골재 대체용 전기로 산화 슬래그를 포함한 방사능 차폐 콘크리트 조성물	한국건설생활환경시험연구원, 한양대학교 산학협력단
(KR) 2012-0033516	사용후핵연료 수송 또는 저장용 콘크리트 용기	한국원자력환경공단
(KR) 2011-7010297	방사선 차폐 구조물 조성물	그랜크릿, 인크. (US)
(KR) 2008-0097737	금속 분말을 도포한 전자파 차폐 콘크리트용 골재의 제조방법, 이에 의하여 제조된 골재 및 이를 이용한 콘크리트	한국과학기술원
(KR) 2005-0056880	방사선 차폐벽	강석중
(US) 2012-715058	RADIATION SHIELDING STRUCTURE COMPOSITION	Grancrete, Inc.
(US) 2001-790031	Antiradiation concrete and antiradiation shell	Framatome ANP GmbH
(US) 1998-123979	Radiation shielding composition	Bechtel BWXT Idaho, LLC
(US) 1998-030614	Process for producing an aggregate suitable for inclusion into a radiation shielding product	Bechtel BWXT Idaho, LLC
(US) 1981-261750	Device for receiving, moving and radiation-shielding of vessels filled with expended reactor fuel elements	Deutsche Gesellschaft fur Wiederaufarbeitung
(JP) 2012-173415	放射線遮蔽コーティング部材 (방사선 차폐 코팅 부재)	TOCALO CO LTD
(JP) 2012-164049	海水で練り混ぜた放射線遮蔽用コンクリート (해수로 혼합한 방사선 차폐용 콘크리트)	OHBAYASHI CORP
(JP) 2012-085658	放射線遮蔽コンクリート製容器および汚染土砂の管理方法 방사선 차폐 콘크리트제 용기 및 오염토사 관리 방법	FUJITA CORP
(JP) 2012-112099	放射性廃棄物收容容器 (방사성 폐기물 수용 용기)	TODA CONSTR CO LTD
(JP) 2011-220286	放射線遮蔽コンクリート (방사선 차폐 콘크리트)	SHIMIZU CORP

- 국내외 특허 현황을 알기위해 키프리스(KIPRIS) 및 국가과학기술정보센터(NDSTL)를 통해 <중성자 차폐재로 사용되는 붕소강>에 대한 다양한 키워드로 검색을 진행하였으나 중성자 차폐를 위한 정질 또는 비정질 붕소강에 대한 특허는 거의 찾을 수 없음. 국내 특허는 유사한 분야의 특허를 찾을 수 없었고 국외 특허로는 총 5건을 찾을 수 있었는데 그 중 3건이 중성자 차폐 비정질 코팅 소재를

연구하는 J. Farmer 연구팀과 연관되어 있다는 사실을 알 수 있었다. 하지만 본 연구팀이 목표로 하는 콘크리트와 배합될 중성자 차폐 붕소강과는 다소 거리가 있는 코팅 소재에 대한 특허이기 때문에 고붕소강의 합금 조성에 유의한다면 국제적으로 경쟁력을 가질 수 있는 유망한 분야가 될 것이라고 예측됨. 나머지 2건 중 Bechtel BWXT에서 출원한 특허는 희토류 금속을 이용하여 비정질 형성능과 중성자 차폐능을 높이는 연구지만 소재 자체에 대한 연구로 그치고 직접적인 적용 방법에 대해서는 명시되어 있지 않음. 마지막 1건 Sumitomo Metal Industries에서 출원한 특허의 경우 중성자 차폐능을 높인 철계 소재라는 공통점이 있으나 붕소함량이 3.75 at% 미만이고 결정질 소재이기 때문에 기술 및 특허의 중복성이 없다는 것을 확인 할 수 있음.

- <중성자 차폐 콘크리트>와 관련된 특허현황을 분석한 결과, 본 연구에서와 같이 차폐를 위해 강 섬유를 활용한 예를 찾을 수 없음. 강섬유를 활용한 차폐콘크리트와 관련된 특허는 콘크리트의 역학적 성질을 개선하기 위해 정질의 강섬유를 사용한 것으로, 차폐목적의 비정질 섬유를 사용한 예는 없는 것으로 나타남.
 - <중성자 차폐용 혼화재료>와 관련된 특허현황을 분석한 결과, 탄화붕소를 혼화재료 또는 골재의 형태로 사용한 특허는 존재하나, 콘크리트의 차폐목적에 향상시키기 위한 이론적 개념의 특허이며 콘크리트의 역학적 특성과 연관된 특허는 존재하지 않는 것으로 나타나 중복성이 없다는 것을 확인 할 수 있음.
-

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

가. 연구개발결과 요약

연차	연구 내용			연구 결과	
2차 년도	주관 A-1	합금 조성 조정에 따른 비정질 리본의 특성평가 및 조성 최적화	○ 문제점 DB 제작	○ 철계 고붕소 비정질 리본의 최적 제작 조건을 도출	
		철계 고붕소 비정질 리본의 콘크리트 적용 후 문제점 도출	○ 인장시편 및 부식시 편 제작	○ 비정질 스틸과 이버의 합금설 계 및 제작	○ 1차년도에 조성이 거의 확보된 철 계 고붕소 비정질 합금 Fe ₆₂ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₁₀ 의 크롬 조성 최적 화 실험을 위한 합금 설계 (Fe _{72-x} B ₂₅ Mo ₃ Cr _x < x=5, 6, 7, 8, 9 >)
	○ 크롬과 보론을 대체하여 가돌리늄 이 첨가된 합금 Fe-B-Mo-Gd 설계				
	○ 크롬 조성 최 적화를 위한 합금설계			○ 붕소가 포함된 철계 비정질 합금 관련 문헌 조사	
				○ 가돌리늄이 포 함된 비정질 스틸과이버 제 작을 위한 관 련 문헌조사	○ 열중성자 차폐능 향상을 위한 합금 원소 관련 문헌 조사
	○ 인장 시험		○ 인장시험을 위해 유연하고 탄성적 거동이 우수한 비 정질 리본 확보		
			○ 자체 인장 시험 이후 전문평가기관에 의뢰하여 인장 시험 진행		
			○ 평균 인장강도가 2350 MPa에 이르는 리본시편 확보.		
			○ 부식 시험	○ 인장시험 및 굽힘 연신을 측정을 통해 Flexibility 가 확보된 비정질 리본에 대한 동전위 분극시험 진행	
				○ 최저 부식전류가 3.777X10 ⁻⁸ A/cm ² 인 시편 확보	
	○ 보고서 및 논문 작성		○ 6월 중순에 작성이 완료되어 투고 예정		
● 열중성자 차폐능 시험 의뢰	○ 비정질 리본과 시편의 cold mounting 용 고분자 기지 를 배합하여 정사각형 모양의 시편 제작				
● 특허 출원	○ 비정질 리본의 열중성자 차폐능 시험을 위해 한국 표 준과학기술원에 의뢰 하였음				
	○ 크롬이 포함된 기존 조성과 가돌리늄이 첨가된 조성 의 열 중성자 차폐능 비교를 위해 다양한 합금의 측정 을 진행함				
	○ 6월 초에 결과를 포함한 특허 작성이 완료되어 출원 요청함				

		● 보론 함량 확인	○ 화학적 분석(ICP)의뢰를 통해 합금의 보론 함량을 정량적으로 확인하였음. ○ Flexibility 가 확보된 합금군에서 20at.% 이상의 보론 함량을 나타냄
주관 B-1	콘크리트의 최적 배합비 도출	○ 비정질 붕소강 섬유와 선정재료를 이용하여 최적 배합비 도출	○ 공기량, 슬럼프, 압축강도 및 인성, 휨강도 및 인성 등의 항목을 고려할시 비정질 붕소강섬유 길이 10mm, 혼입율 1.0 vol.%가 상대적 물성치에 있어서 가장 좋은 것으로 판단됨.
주관 B-2	비정질 붕소강 섬유 및 혼화제를 혼입한 콘크리트의 차폐성능 및 물리적 성능 평가	○ Am-Be 중성자 선원 투과 방사선비 평가	○ Plain 콘크리트 대비 비정질 붕소강섬유 및 붕규산 유리 혼입 콘크리트의 중성자 차폐율 1.4배 향상
		○ 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성 평가	○ 목표강도 33MPa, 목표슬럼프 150mm, 목표밀도 2.23 이상 만족 ○ Plain 콘크리트 대비 압축인성 및 휨인성 증가
위탁 A-1	붕규산 유리 함유 배합의 포졸란 반응성 평가	○ 포졸란 반응성 평가	○ 문헌 조사를 통하여 붕규산 유리의 팽창 반응을 최대한 배제할 수 있는 방안 모색 ○ TG/DTA 결과, 붕규산 유리 미분말을 시멘트 대체재로 사용한 시험체의 TGA 중량감소율이 Plain 시험체 대비 약 52% 감소한 것으로 나타남
		○ ASR 반응성 평가	○ 붕규산 유리를 모르타르의 잔골재를 대체하여 사용하였으며, 시멘트 대체재로 붕규산유리 미분말을 사용하여 ASR 팽창 억제가 가능함을 확인 ○ 시멘트 중량 대비 20% 붕규산 유리 분말을 사용한 시험체가 ASR 팽창을 확연히 억제하는 것으로 나타남
위탁 A-2	탄화붕소와 포틀랜드 시멘트 상호작용 분석	○ 압축강도 특성 및 미세구조의 차이 분석	○ 탄화붕소를 시멘트 모르타르에 여러 가지 입도로 적용하는 방안을 모색하였으나, 탄화붕소의 경도가 매우 높아 미분쇄하기 곤란함 ○ 탄화붕소를 시멘트 모르타르에 잔골재 크기로 적용할 경우 Plain 시험체 대비 최대 20% 정도의 압축 강도가 발현되는 것을 확인함
		○ 역학적 특성의 손실을 최소화한 최적 배합비율 파악	○ 잔골재 형태로 사용할 경우, 역학적 특성상 포졸란 반응을 발현하지 않은 것으로 보여짐 ○ 미분말 형태로 사용하는 것이 바람직하다고 여겨지나 미분쇄하는 과정이 매우 어려우므로 시멘트 모르타르에 적용하기에는 부적절할 것으로 판단됨 ○ 표준사와 함께 사용할 경우에는 Plain 시험체에 비하여 압축강도가 큰 차이 없는 수준으로 발현되는 결과를 나타냈다.

나. 연구개발 주요내용

주관-A 철계 고봉소 비정질 리본 개발

1. 조성 최적화 실험

가. 합금조성 선정

- 1차년도 마무리 실험의 결과를 토대로 $\text{Fe}_{72-x}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_x$ ($x=0, 5, 10, 15, 20$)의 조성에서 부식특성 및 인장강도가 우수한 $x=5, 10$ 의 합금을 기본으로 하여 조성 최적화를 위한 합금 조성을 선택하였음.
- 또한 고가의 원소인 Cr의 최소한의 사용을 통한 최적의 조성을 찾아냄으로서, 대량생산시의 비용 감소를 기대 할 수 있음. 따라서, 이를 바탕으로 한 최적 조성을 찾기 위해 아래 표와 같이 조성을 결정하였음.

표 1-1 설계된 합금의 조성

	at.%			
	Fe	B	Mo	Cr
$\text{Fe}_{67}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_5$	67.0000	25.0000	3.0000	5.0000
$\text{Fe}_{66}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_6$	66.0000	25.0000	3.0000	6.0000
$\text{Fe}_{65}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_7$	65.0000	25.0000	3.0000	7.0000
$\text{Fe}_{64}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_8$	64.0000	25.0000	3.0000	8.0000
$\text{Fe}_{63}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_9$	63.0000	25.0000	3.0000	9.0000

나. 시험편 제작

- 모합금은 20g을 기준으로 하여 합금화 원소의 무게를 측정하였다. 각 원소는 99%이상의 순도를 가진 물질을 이용하였음.(Ferro boron, Fe, Mo, Cr)
- 티타늄이 포함된 아르곤 분위기에서 5회 멜팅을 하여 편석이 생기지 않도록 하였음.
- 리본은 melt-spinning법을 이용하여 제작하였으며 회전하는 구리휠의 선속도는 40m/s으로 유지하였음.
- 모합금 제작 및 리본 제작시 사용한 챔버는 산화방지를 위해 고순도 Argon gas 분위기에서 실험을 진행하였음.
- 버니어캘리퍼스를 통해 생산된 리본의 폭과 두께를 측정한 결과 각각 0.62 - 0.74 mm, 0.015 - 0.020 mm 이었음.

다. X선 분석 및 열적특성 분석

- 모합금의 XRD는 분말형태로 만들고 비정질 리본은 2cm 정도로 잘라서 슬라이드 글라스에 붙였음. 그 이후 XRD D/Max-2500 (Rigaku, Japan)을 이용하여 20-90도 까지 측정하였음.

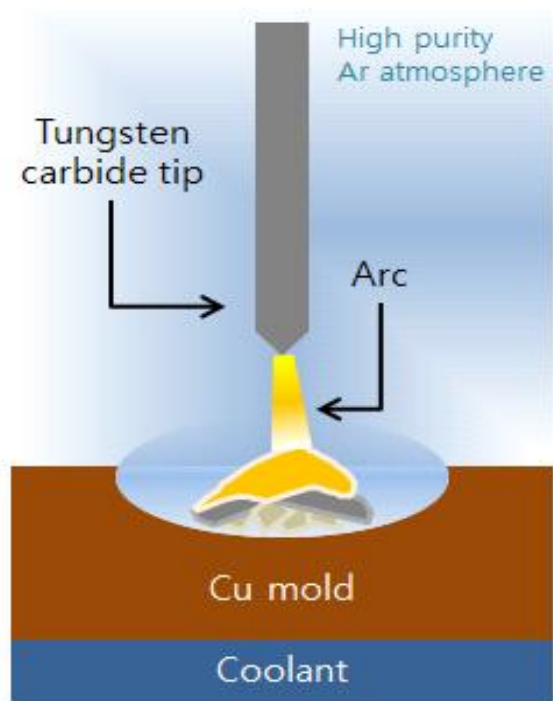


그림 1-1 Arc melting furnace 및 모식도

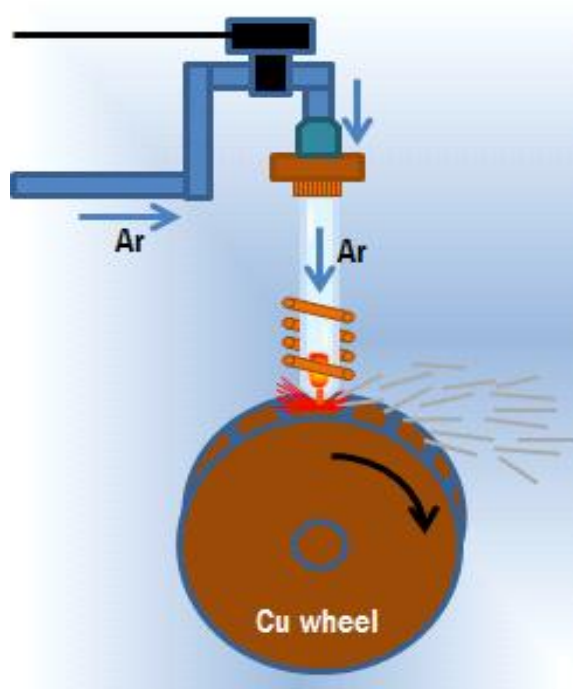


그림 1-2 Melt spinner 및 모식도

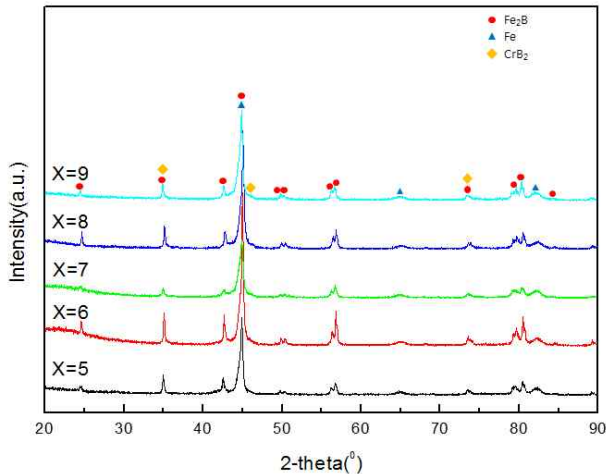


그림 1-3 모합금 XRD
(X는 Cr의 원자분율 함량)

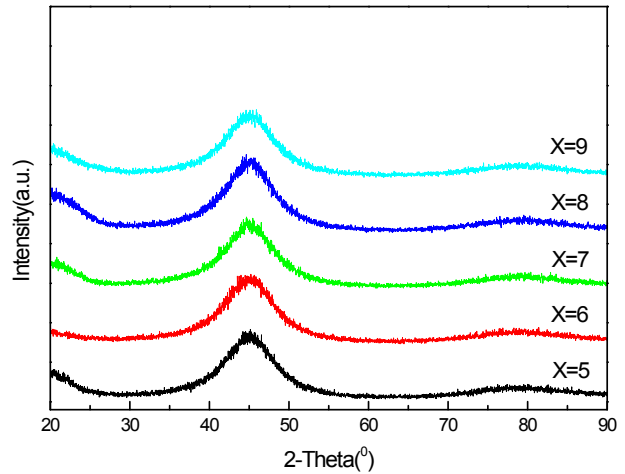


그림 1-4 리본 XRD
(X는 Cr의 원자분율 함량)

- 측정결과 모합금의 경우 Cr함량이 증가함에 따라 Fe_2B 의 intensity가 감소하였음. 이는 B와 Cr의 높은 친화도로 인해 Fe_2B 상의 형성에 방해가 되어 위의 결과값이 나오게 되었다고 생각됨. 특히, Cr과 B의 상대적인 분율을 확인한 뒤 상태도 상에서 가능성 있는 XRD peak를 찾은 결과, CrB_2 상이 검출됨을 알 수 있었음. 이는, 모합금에서 Fe보다 Cr이 B와의 친화도가 우수하여 나타난 결과라 생각됨.
- 리본의 경우 모든 경우에 대해 비정질로 판단되며 이러한 결과는 B와 Cr의 높은 친화도에 의해 비정질 미세구조에서 원자간 결합이 강하여 원자 재배열을 통한 결정화가 진행되지 않아 나타난 결과라고 생각됨.
- 비정질 리본의 열적 특성 분석은 DSC Pyris Diamond DSC (PerkinElmer, America)를 이용하였으며, 630 °C 까지 40 °C/min의 속도로 승온하였음. 모합금은 용융점 및 완전히 액체가 되는 온도를 알아보기 위해 DTA를 통해 측정하였으며, 사용한 장비는 SDT Q600 (TA instruments, America)로 1300 °C 까지 10 °C/min의 속도로 승온하였음.

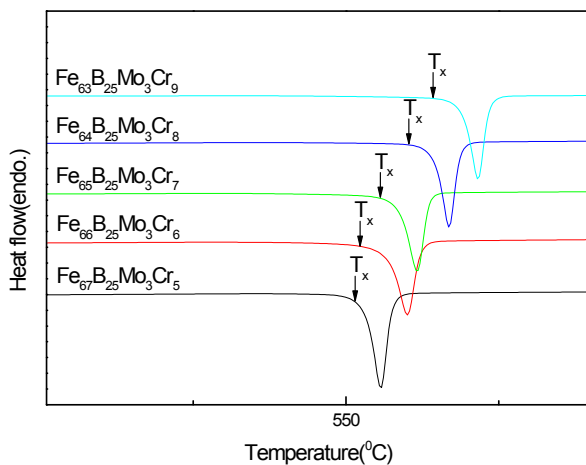


그림 1-5 리본 DSC

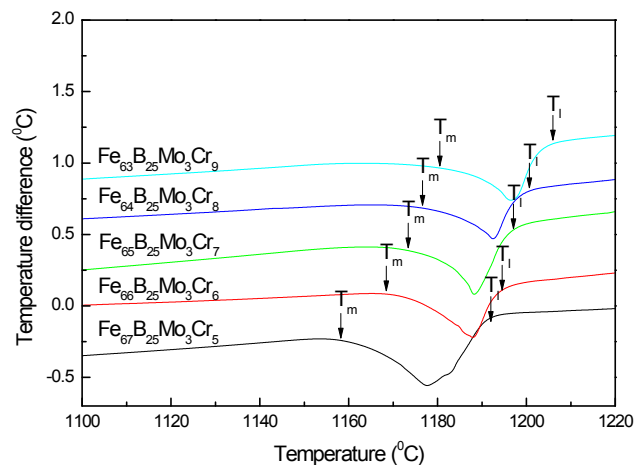


그림 1-6 모합금 DTA

- Cr함량에 따라 결정화 온도가 상승하는 것을 DSC그래프를 통해 알 수 있음. 이러한 결과는 B와 Cr의 높은 친화성 때문인 것으로 판단됨. 아래의 표는 발열량, 결정화 온도, 융점, 액체화 온도 및 α -parameter 를 나타냄.

표 1-2 발열량, 결정화 온도, 융점, 액체화 온도, α -parameter

	ΔH (J/g)	T_x (°C)	T_m (°C)	T_l (°C)	T_x/T_l
$Fe_{67}B_{25}Mo_3Cr_5$	-119.72	552	1161	1191	0.4635
$Fe_{66}B_{25}Mo_3Cr_6$	-118.34	553	1172	1193	0.4635
$Fe_{65}B_{25}Mo_3Cr_7$	-120.04	558	1178	1197	0.4662
$Fe_{64}B_{25}Mo_3Cr_8$	-117.83	562	1179	1198	0.4691
$Fe_{63}B_{25}Mo_3Cr_9$	-113.93	568	1183	1203	0.4722

- 비정질의 열적 안정성을 알아보기 위하여 α -parameter를 계산해본 결과, 계속적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 Cr함량이 증가할수록 비정질 상의 안정화가 진행되고 있다고 사료됨.

라. 동전위분극시험 (Potentiodynamic Polarization Test, 미국, Princeton Applied Research, Parstat 2273)

- 3.5 wt.% NaCl 해수분위기에서 리본 형태로 동전위 분극시험을 진행하였으며, 측정속도는 1mV/s, 측정범위는 -0.25 ~ 1.5V 이다. 결과는 아래의 그림 1-8, 표 1-3 와 같음.

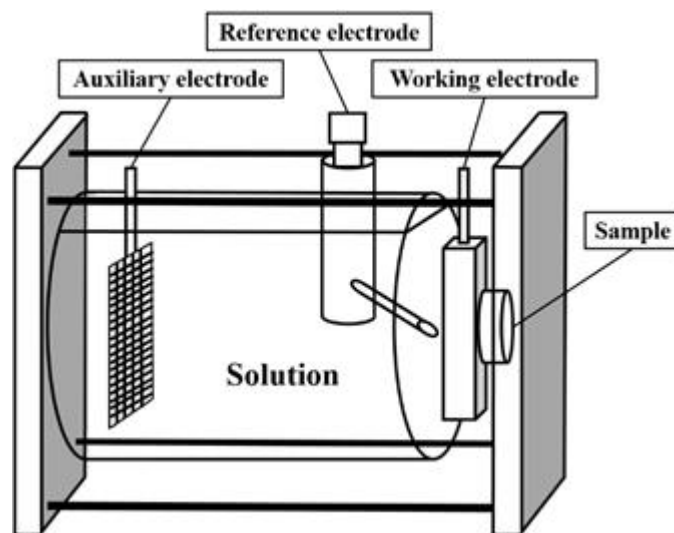


그림 1-7 동전위 분극시험 측정키트 사진 및 모식도

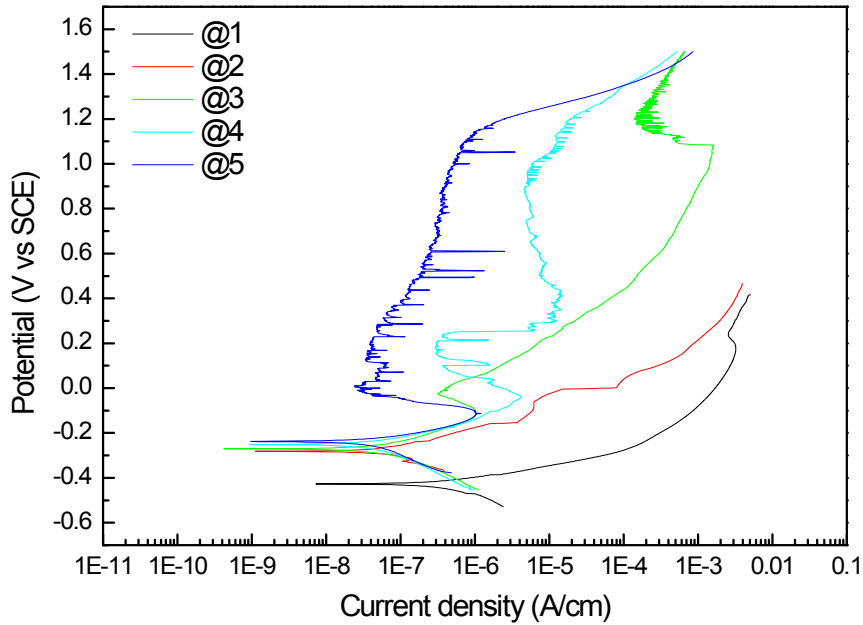


그림 1-8 동전위 분극시험 결과

표 1-3 부식 전류 및 전위

Composition (at.%)	E-Potential (mV)	Current density (A/cm ²)
@1 Fe ₆₇ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₅	-429.786	1.939X10 ⁻⁷
@2 Fe ₆₆ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₆	-280.407	9.268X10 ⁻⁸
@3 Fe ₆₅ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₇	-261.532	6.473X10 ⁻⁸
@4 Fe ₆₄ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₈	-247.826	4.562X10 ⁻⁸
@5 Fe ₆₃ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₉	-239.947	3.777X10 ⁻⁸

- 동전위 분극시험 결과 부식전류는 Cr함량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타남. 즉, 크롬 함량 증가에 따라 부식 속도가 감소하는 것을 알 수 있음.
- 또한, Cr의 원자분율이 증가하다가 7%일 때부터, 부동태 구간이 확인 되었음. 하지만 안정적인 부동태 거동은 Cr이 9%일 때 나타남. 따라서, 우수한 부식 특성을 위해서는 Cr의 분율이 9%가량 첨가되어야 함.

마. 인장시험 및 굽힘시험

- 인장강도의 측정을 위해 포항산업과학연구원(RIST)에 분석을 의뢰하였음.
- RIST역학시험팀에 있는 10톤 자동 인장시험기(ZWICK Z100, Zwick/Roell)를 사용하였으며 시편당 5회 측정을 실시하였음. 시편의 길이는 8cm, 표점거리 38-40mm, 인장속도는 1mm/min으로 설정하고 실험을 진행하였음.
- 인장 실험을 하기 위해 리본의 형상 특성상 측면 비틀림 및 압축하중에 매우 취약하여 인장기의 그림에 고정시 쉽게 파단이 일어나므로, 이를 완화시킬 조그를 제작하여 리본과 함께 인장기에 결속하였음. 또한, 실험에 대한 자세한 설명을 위해 아래 그림 1-10 에 묘사하였음.



그림 1-9 인장강도 측정을 위한 분석기기 (ZWICK Z100, ZWICK/Roell)

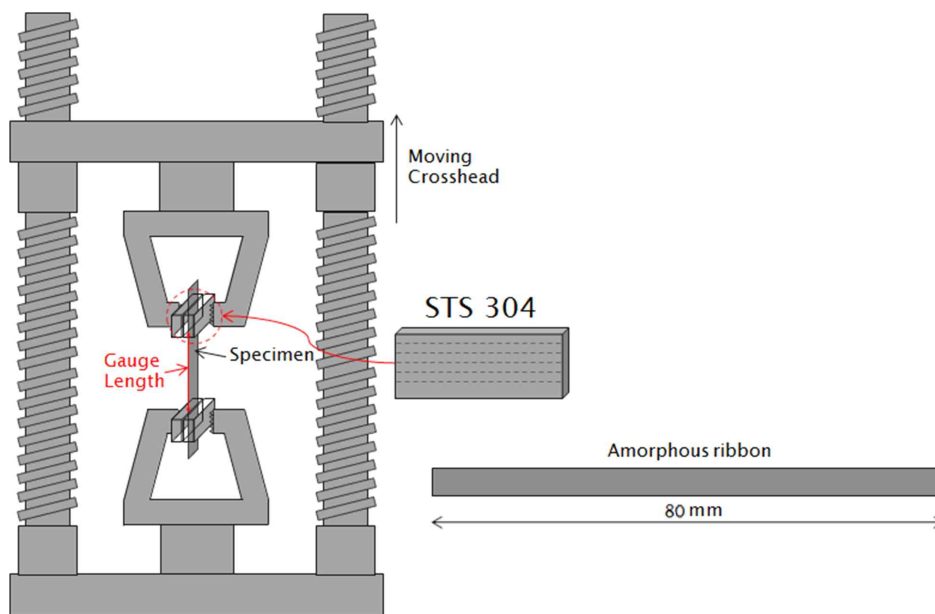


그림 1-10 인장강도 측정 방법



재단 포항산업과학연구원
37673 경상북도 포항시 남구 청암로 67
Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660
http://rac.rist.re.kr

시험 성적서

성적서번호 : 2016000688
의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단
대구광역시 북구 대학로 80(산격동)

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시료설명 : Fe20B3Mo5Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시험명	시험두께 (mm)	시험폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo5Cr-1	0.025	0.73	2 589
Fe20B3Mo5Cr-2	0.023	0.74	2 252
Fe20B3Mo5Cr-3	0.021	0.74	2 565
Fe20B3Mo5Cr-4	0.022	0.73	2 189
Fe20B3Mo5Cr-5	0.027	0.75	1 890

- 비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 재단 포항산업과학연구원



총 5 페이지 중 1 페이지

<양식 QAQP24-3>

그림 1-11 Fe₆₇B₂₅Mo₃Cr₅ 합금의 인장강도 테스트 결과지

시험 성적서

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시료설명 : Fe20B3Mo6Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시편명	시편두께 (mm)	시편폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo6Cr-1	0.020	0.75	2 844
Fe20B3Mo6Cr-2	0.021	0.74	2 672
Fe20B3Mo6Cr-3	0.021	0.76	2 116
Fe20B3Mo6Cr-4	0.021	0.75	2 908
Fe20B3Mo6Cr-5	0.022	0.74	2 642

- 비 고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 새단
법인 경북 포항산업과학연구원장



총 5 페이지 중 2 페이지

그림 1-12 Fe₆₆B₂₅Mo₃Cr₆ 합금의 인장강도 테스트 결과지

RIST

부산 포항산업과학연구원

37673 경상북도 포항시 남구 청암로 67

Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660

http://ric.rist.re.kr

성적서번호 : 2016000688

의 회 기 관 : 경북대학교 산학협력단

대구광역시 북구 대학로 80(신격동)

시험 성적서

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시 료 설 명 : Fe20B3Mo7Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시험명	시험두께 (mm)	시험폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo7Cr-1	0.025	0.95	1 937
Fe20B3Mo7Cr-2	0.026	0.96	2 579
Fe20B3Mo7Cr-3	0.026	0.98	2 968
Fe20B3Mo7Cr-4	0.026	0.99	2 502
Fe20B3Mo7Cr-5	0.026	0.99	2 410

- 비 고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
 2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
 3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 부산 포항산업과학연구원장

총 5 페이지 중 3 페이지

그림 1-13 Fe₆₅B₂₅Mo₃Cr₇ 합금의 인장강도 테스트 결과지

RIST

부산포항산업과학연구원

37673 경상북도 포항시 남구 청암로 67

Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660

http://ric.rist.re.kr

시험 성적서

설적서번호 : 2016000688

의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단

대구광역시 북구 대학로 80(신격동)

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시료설명 : Fe20B3Mo8Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시편명	시편두께 (mm)	시편폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo8Cr-1	0.024	1.06	776
Fe20B3Mo8Cr-2	0.024	1.04	2184
Fe20B3Mo8Cr-3	0.024	0.96	1025
Fe20B3Mo8Cr-4	0.023	1.03	1826
Fe20B3Mo8Cr-5	0.022	0.78	2518

비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료영에만 한정됩니다.

2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.

3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 부산포항산업과학연구원장

총 5 페이지 중 4 페이지

그림 1-14 Fe₆₄B₂₅Mo₃Cr₈ 합금의 인장강도 테스트 결과지

성적서번호 : 2016000688
의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단
대구광역시 북구 대학로 80(산격동)

시험접수일자 : 2016-06-14
시험완료일자 : 2016-06-15

시료설명 : Fe20B3Mo9Cr

시험방법 : 상온인장시험
시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시편명	시편두께 (mm)	시편폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo9Cr-1	0.021	0.75	2 797
Fe20B3Mo9Cr-2	0.021	0.75	3 184
Fe20B3Mo9Cr-3	0.021	0.76	2 749
Fe20B3Mo9Cr-4	0.020	0.75	2 954
Fe20B3Mo9Cr-5	0.018	0.50	3 465

비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.ac.kr

2016년 06월 15일

RIST 재단 포항산업과학연구원장

총 5 페이지 중 5 페이지

그림 1-15 Fe₆₃B₂₅Mo₃Cr₉ 합금의 인장강도 테스트 결과지

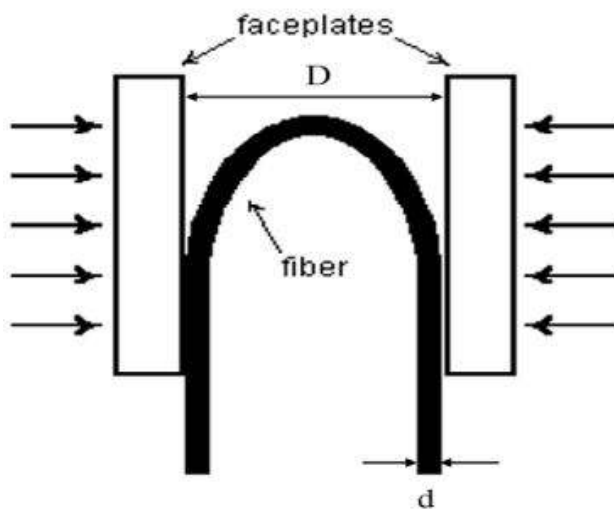
- 곱힘 연신율의 측정을 위해 리본을 6cm로 절단한 뒤, 양 끝단 1cm를 테이프로 맞붙여 수직으로 고정 시킨 후 마이크로미터로 압축하며 리본 파단시의 양 끝단 거리, D를 측정하였음.
- 리본이 360도로 완전히 접히는 경우에는 마이크로미터로 완벽하게 압축을 시도하여 얻은 D 값을 기록하였음.



그림 1-16 굽힘 연신을 측정시험 시편



그림 1-17 시편 측정에 사용된 마이크로미터



$$\varepsilon = \frac{d}{D-d}$$

D : Faceplates distance
d : Thickness of sample
 ε : Bending strain

그림 1-18 굽힘 연신을 시험 모식도 및 식

표 1-4 $\text{Fe}_{67}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_5$ 조성의 굽힘연신을 측정 데이터

Cr5	1	2	3	4	5	6
d	0.024	0.022	0.028	0.029	0.023	0.021
D	1.44	0.06	0.07	0.87	0.07	0.05
$\varepsilon \times 100$	1.69	57.89	66.67	3.45	48.94	72.41
7	8	9	10	11	12	Avg.
0.029	0.028	0.023	0.023	0.023	0.024	0.025
0.89	0.97	0.07	0.05	0.86	0.05	0.48
3.37	2.97	48.94	85.19	2.75	92.31	19.63

표 1-5 Fe₆₃B₂₅Mo₃Cr₉ 조성의 굽힘연신율 측정 데이터

Cr9	1	2	3	4	5	6
d	0.026	0.024	0.024	0.067	0.024	0.024
D	0.065	0.08	0.07	1.943	0.64	0.96
εx100	66.67	42.86	52.17	3.57	3.90	2.56
7	8	9	10	11	12	Avg.
0.023	0.023	0.023	0.024	0.023	0.024	0.023
0.06	0.07	0.67	0.7	0.07	1.47	0.51
62.16	48.94	3.55	3.55	48.94	1.66	14.07

- Cr 함량이 높아짐과 동시에 연신율이 소폭 하락함을 확인 할 수 있음. Cr이 비정질 상태에서 타 원자간 상호작용, 즉 B와의 상호작용이 Fe보다 크기 때문에 나타났다고 생각됨.

바. 총평

- Cr 분율의 최적화를 위한 실험에서 8at.%의 Cr을 포함한 리본에서부터 부동태 영역이 관측되었고 10 at.% 의 리본에서 8 at% 정도로 Cr의 양을 줄여 비용의 감소로 인한 경제성 제고가 가능하였음. 또한, 1.5GPa이상의 인장응력은 matrix에서 비정질 리본의 pull-out 효과를 통해 기존 콘크리트에 비해 파괴인성을 높일 수 있었으며 이를 통해 건축재료 사용의 감소, 건축물 붕괴시 산업 폐기물의 감소를 통하여 환경오염을 최소화 할 수 있을 것이라 전망함.

2. 추가 실험을 위한 자료조사

가. 자료조사 방법

- 기계적특성, 부식특성, 보론 함량 등의 목표치에 근접하였지만 우수한 특성의 열충성자 차폐능을 가지는 재료개발을 위한 추가 실험의 필요성이 재고되었음. 이에 따라, Gadolinium을 첨가한 철계 합금에 대한 문헌조사를 실시하였음. 논문조사는 Sciencedirect 및 Sci-Finder를 활용하여 진행하였음.

나. 조사결과 정리

- 논문의 원문 내용을 그대로 가져오기 위해 영어로 정리하였음.

	논문 제목	저널명	유용한 내용
1	Influence of Gadolinium on The Microstructure and Mechanical Properties of Steel and Stainless Steel	The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy (Apr 2012)	1. Influence of Gd element on corrosion resistance - In mild steel : Corrosion resistance is increased as increasing Gd contents up to 2 wt.% - In STS : Corrosion resistance is gradually strengthen by increasing Gd contents.

			- Passivation region is observed at the potentiodynamic test graph.
2	Fabrication of Gd Containing Duplex Stainless Steel Sheet for Neutron Absorbing Structural Materials.	Nuclear Engineering and Technology (Oct 2013)	1. Thermal neutron absorber - B : Contemporary thermal neutron absorber - Gd : Much higher the effective thermal neutron absorbing cross section than B (49,163 barn vs 745 barn) 2. Solubility - B : Up to 2.25 wt.% at steel 3. Alloying technique - Use HF-induction melt furnace with high purity Ar gas atmosphere for protection specimen from the oxidation. 4. Gd alloying - Gd precipitate at the inside of grain than grain boundaries. - Precipitation of CrxCy on the grain boundary is much prior than GdxMy
3	Neutron-Absorbing Coatings for Safe Storage of Fissile Materials with Enhanced Shielding & Critically Safety	Materials Science & Technology 2007 Conference and Exhibition (2007)	1. Effects of boron in amorphous metal - Enhances neutron absorption capability - Enable alloys to exist amorphous state 2. Alloying elements - W, Mo, Cr : Enhancing corrosion resistance - B : Good for glass formation and neutron absorption - Y : Lower critical cooling rate during glass forming process - After exposure to the high doses of fast neutron irradiation, the amorphous structure of material is not changed. - SAM2X5 coating(amorphous metal alloy) are three-to-four times higher than of borated stainless steel, and twice that of the nickel-gadolinium alloy.
4	Development of Gd-Enriched Alloys for Spent Nuclear Fuel Applications-Part 1: Preliminary Characterization of	Journal of Materials Engineering and Performance (2003)	- Gd : prevent the long term degradation of material. - Poor solubility at FCC and BCC matrixes, - Gadolinium is so reactive that it reacts with P, S, O. - In stainless steel, Gd intermetallic, (Fe,

	Small Scale Gd-Enriched Stainless Steels		Ni, Cr) ₃ Gd, is forming and, it will cause depletion of Ni, and to enrichment of Cr (the matrix will become ferritic.)
5	Corrosion and Wear Properties of Cold Rolled 0.087% Gd Lean Duplex Stainless Steels for Neutron Absorbing Material	Nuclear Engineering and Technology (2016)	- Corrosion rates according to the rolling direction; ST<TD<RD - Passivity was not formed.

다. 총평

- Gadolinium을 첨가한 합금계는 대체로 부식저항성이 우수하였으며, mild steel의 경우 일정 wt.% 이상 첨가시 부식 저항능이 오히려 감소하는 것으로 알려졌다.
- 열 중성자 차폐능을 더욱 향상시키기 위하여 Gadolinium을 적정량(최소한의 양)을 첨가하여야 함. Gadolinium 은 비용이 큰 희토류 원소이므로 최소한의 양으로 최적의 중성자 차폐능 및 부식특성을 나타내도록 합금 비율을 조정하여야 함.
- 비정질 스틸 파이버의 장점인 합금 원소의 우수한 용해도를 바탕으로 한 고붕소 비정질 합금 개발을 하여야 함.
- Gadolinium을 과량 포함한 비정질 스틸파이버에 대한 학술적 보고가 부족하므로 조성비의 다양화를 통한 분석이 필요하리라 생각함.

3. 2차년도 추가 실험

가. 합금조성 선정

- 위의 조사에 근거하여 Gd조성의 조정을 통한 실험을 위해 합금 설계를 시행함.
- Ni와 Cr이 없는 Fe-based 비정질에서 과량의 Gd는 오히려 부식특성을 악화시킬 가능성이 있으므로 합금 설계시 이 점을 고려함.
- 최적의 조성 결정을 위해 0.5 at.% 단위로 증가시키며 합금을 제작함.

표 1-6 설계된 합금의 조성

	Fe	B	Mo	Gd
Fe ₇₂ B _{24.5} Mo ₃ Gd _{0.5}	72.0000	24.5000	3.0000	0.5000
Fe ₇₂ B _{24.0} Mo ₃ Gd _{1.0}	72.0000	24.0000	3.0000	1.0000
Fe ₇₂ B _{23.5} Mo ₃ Gd _{1.5}	72.0000	23.5000	3.0000	1.5000
Fe ₇₂ B _{23.0} Mo ₃ Gd _{2.0}	72.0000	23.0000	3.0000	2.0000
Fe ₇₂ B _{22.5} Mo ₃ Gd _{2.5}	72.0000	22.5000	3.0000	2.5000

나. 시험편 제작 (도식은 생략)

- 모합금은 20g을 기준으로 하여 합금화 원소의 무게를 측정함. 각 원소는 99%이상의 순도를 가진 물질을 이용함.(Ferro boron, Fe, Mo, Gd)
- 티타늄이 포함된 아르곤 분위기에서 5회 멜팅을 하여 편석이 생기지 않도록 함.
- 리본은 melt-spinning법을 이용하여 제작하였으며 회전하는 구리 휠의 선속도는 40m/s으로 유

지함.

- 모합금 제작 및 리본 제작시 사용한 챔버는 산화방지를 위해 고순도 Argon gas 분위기에서 실험을 진행함.
- 버니어를 통해 생산된 리본의 폭과 두께를 측정한 결과 각각 0.62 - 0.74 mm, 0.015 - 0.020 mm 으로 됨.

다. X선 분석 및 열적특성 분석

- 모합금의 XRD는 분말형태로 만들고 비정질 리본은 2cm 정도로 잘라서 슬라이드 글라스에 붙임. 그 이후 XRD D/Max-2500 (Rigaku, Japan)을 이용하여 20-90도 까지 측정함.

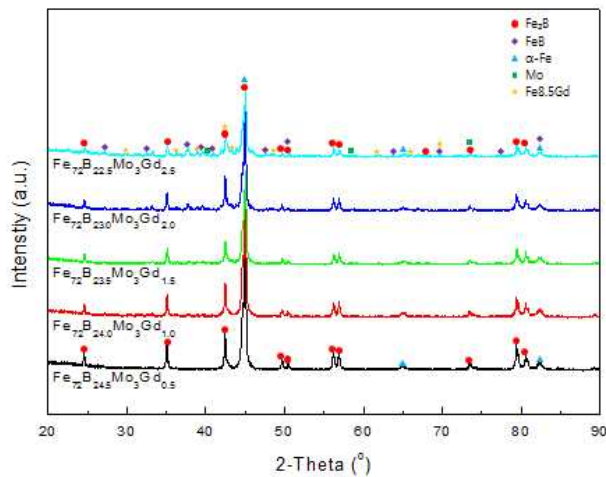


그림 1-19 모합금 XRD

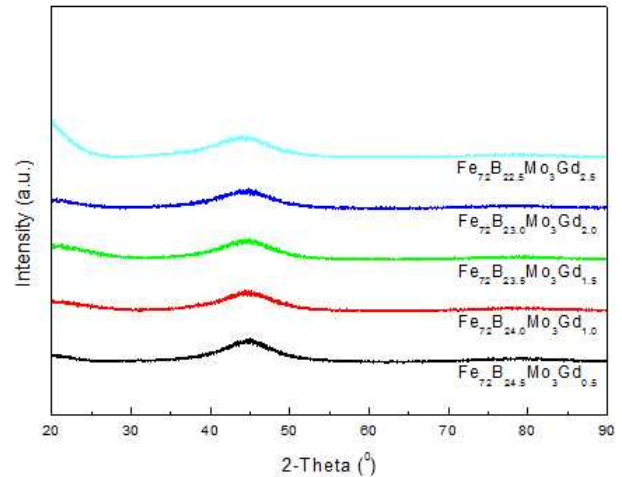


그림 1-20 리본 XRD

- 모합금 XRD peak에서 Gd의 양이 증가할수록 Fe-Gd상 및 Mo이 검출되었는데, 이는 Mo의 혼합 열이 다른 원소들의 혼합열에 비해 양의 방향으로 크므로 다른 원소들과의 결합이 불안정 하여 상대적으로 용해도 감소가 발생했다고 생각함.
- 리본의 XRD의 경우에는 타 원소간의 혼합열이 음으로 큰 Gd첨가의 영향으로 언덕모양의 비정질 결정구조를 나타내는 것을 관찰할 수 있음.
- 비정질 리본의 열적 특성 분석은 DSC Pyris Diamond DSC (PerkinElmer, America)를 이용하였으며, 630 °C 까지 40 °C/min 의 속도로 승온함. 모합금은 용융점 및 완전히 액체가 되는 온도를 알아보기 위해 DTA를 통해 측정하였으며, 사용한 장비는 SDT Q600 (TA instruments, America)으로 1300 °C 까지 10 °C/min 의 속도로 승온함.

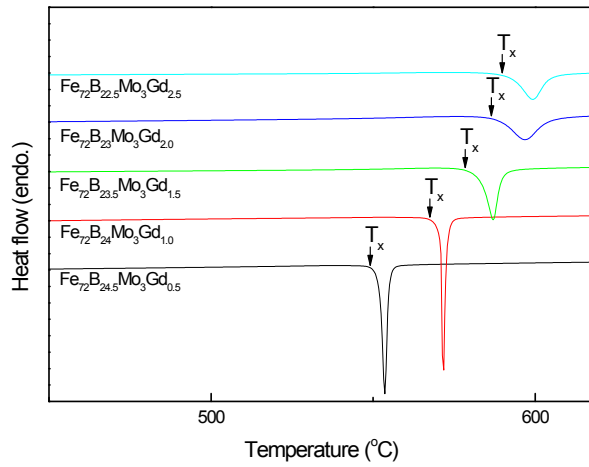


그림 1-21 리본 DSC

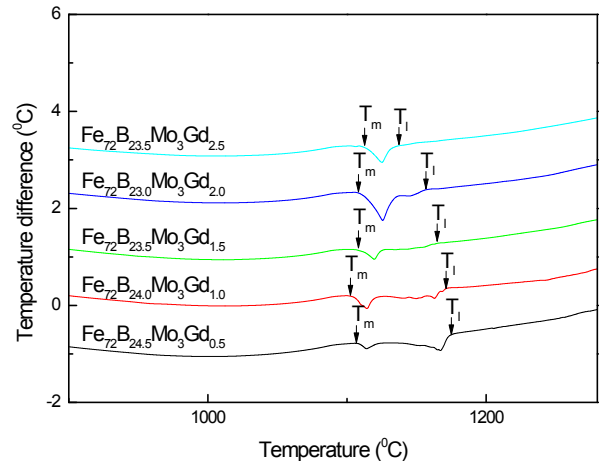


그림 1-22 모함금 DTA

- Gd 함량에 따라 결정화 온도가 상승하는 것을 DSC 그래프를 통해 알 수 있음. 이러한 결과는 B와 Cr의 높은 친화성 때문인 것으로 판단됨. 아래의 표는 발열량, 결정화 온도, 용점, 액체화 온도 및 α -parameter 를 나타냄.

표 1-7 발열량, 결정화 온도, 용점, 액체화 온도, α -parameter

	ΔH (J/g)	T_x (°C)	T_m (°C)	T_l (°C)	T_x/T_l
$\text{Fe}_{72}\text{B}_{24.5}\text{Mo}_3\text{Gd}_{0.5}$	-102.41	551	1109	1174	0.4692
$\text{Fe}_{72}\text{B}_{24.0}\text{Mo}_3\text{Gd}_{1.0}$	-94.57	570	1105	1172	0.4868
$\text{Fe}_{72}\text{B}_{23.5}\text{Mo}_3\text{Gd}_{1.5}$	-112.75	579	1111	1160	0.4993
$\text{Fe}_{72}\text{B}_{23.0}\text{Mo}_3\text{Gd}_{2.0}$	-103.65	587	1110	1155	0.5083
$\text{Fe}_{72}\text{B}_{22.5}\text{Mo}_3\text{Gd}_{2.5}$	-91.06	589	1114	1133	0.5196

- α -parameter를 계산해본 결과, Gd의 함량이 증가에 비례하는 경향을 확인함. 이는, Gd와 타 원소 (Fe, B, Mo)의 친화도가 높아서 나타난 결과라고 생각됨.(각각 Gd와의 혼합열을 확인해보면 음의 혼합열을 가지는 것을 알수있음.)

라. 동전위 분극 시험

- 3.5 wt.% 의 NaCl 용액에서 해수분위기에 가깝게 실험을 진행하였으며, 리본타입의 시편으로 동전위 분극시험을 시행함.

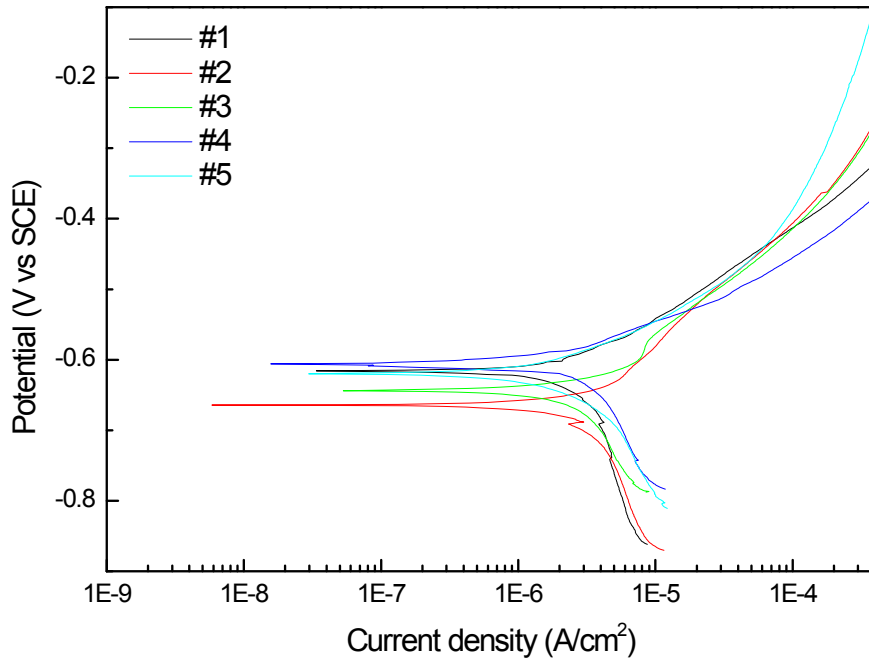


그림 1-23 동전위 분극시험 결과

Composition	Current density (A/cm ²)	E-Potential (mV)
#1 Fe ₇₂ B _{24.5} Mo ₃ Gd _{0.5}	7.412X10 ⁻⁷	-616.054
#2 Fe ₇₂ B _{24.0} Mo ₃ Gd _{1.0}	6.208X10 ⁻⁷	-664.317
#3 Fe ₇₂ B _{23.5} Mo ₃ Gd _{1.5}	4.724X10 ⁻⁷	-643.992
#4 Fe ₇₂ B _{23.0} Mo ₃ Gd _{2.0}	3.796X10 ⁻⁷	-606.426
#5 Fe ₇₂ B _{22.5} Mo ₃ Gd _{2.5}	3.370X10 ⁻⁷	-619.059

표 1-8 부식 전류 및 전위

- Gd의 첨가량이 증가함에 따라 부식 전류가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Gd와 용액속의 용존 산소가 반응하여 gadolinium oxide가 시편 표면에 생성되었고, 비정질의 균질한 구조의 영향으로 국부적인 부식이 최대한 억제되어 위의 결과를 도출하였다고 생각됨.

마. 리본+polymer matrix 의 열중성자 차폐능 평가

- 비정질 리본과 polymer matrix의 복합체를 제작 비정질 리본의 열 중성자 테스트를 시행함. polymer는 cold mounting 용 고분자 수지인 polycoat를 사용하였으며, 시편의 크기는 5cm X 5cm X 1cm 의 정사각 판형의 시편을 제작하여 한국표준과학연구원(KRISS)에 의뢰함. 중성자 선원은 ²⁴¹Am-Be를 사용하였으며, 중성자 방출률 2.334 X 10⁵ s⁻¹, 확장불확도 2.0% 의 조건에서 시행함. 열중성자 검출기로는 SP9 ³He 비례계수기를 사용하였으며 장비는 민감도 3.163 cm², 확장 불확도 2.0% 의 성능을 가짐. 열중성자 검출기는 산란 중성자를 차단하기 위해 전면부를 제외한 나머지 부분을 Cd로 차폐시킴. 시편을 열중성자 선원과 검출기 사이에 놓고 밀착시킨 뒤에 측정하였으며 이때의 선원거리는 시편의 두께에 따라 달라지게 됨. 또한 상대비교를 위하여 선원거리를 일정하

게 하고 열중성자 방출률을 측정함. 따라서, 최종적인 열중성자 차폐율은 공기 중에서의 열중성자 검출율과 시편이 존재할 때의 검출율의 비를 이용하여 측정함.

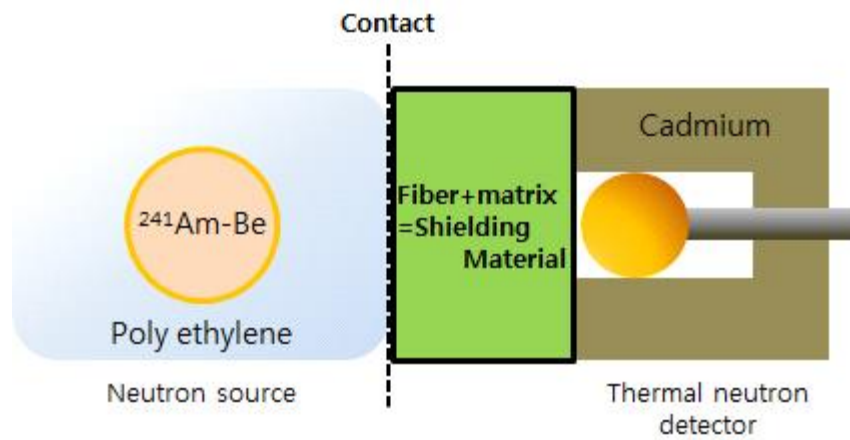


그림 1-24 열중성자 차폐시험 모식도



(a) 측정전 장비 사진



(b) 측정중의 장비 사진



(c) 시편 측정 중 장비사진 (확대)

그림 1-25 열중성자 차폐시험 장치 사진 (a), (b), (c)



그림1-26 열중성자 차폐시험을 위한 시편

표 1-9 열중성자 차폐시험 결과

Shielding Material	Thermal Neutron Counting Rate(s^{-1})	Type A Expanded Uncertainty(%)*	Shielding Efficiency (%)**
$Fe_{72}B_{23}Mo_3Gd_2$, 1 vol%	21.8	1.0	63.85
$Fe_{72}B_{20}Mo_3Gd_5$, 1 vol%	19.6	1.0	67.50
$Fe_{72}B_{15}Mo_3Gd_{10}$, 1 vol%	15.3	1.0	74.63
Air (Avg.)	60.3	0.3	—
Plane	34.4	1.1	26.65
$Fe_{62}B_{25}Mo_3Cr_{10}$ 1 vol%	27.7	1.3	40.94
$Fe_{62}B_{25}Mo_3Cr_{10}$ 2 vol%	20.6	1.4	56.08
Air (Avg.)	46.9	1.1	—

* Confidence level $\approx 95\%$, $k = 2$

** $(1 - \text{shielding material counting rate} / \text{air counting rate}) \times 100$

- 리본의 부피 분율이 같은 2 at.% Gd시편과 Fe-B-Mo-Cr 시편의 열 중성자 차폐능을 비교해보면 Gd를 첨가한 시편에서 약 20% 이상 우수한 열중성자 차폐율을 가지는 것을 알 수 있음. 열중성자 포획능이 B에 비해 약 60배 이상 뛰어난 Gd의 첨가에 의해 열중성자 차폐능이 좋아졌다고 할 수 있음.
- Gd의 분율 증가에 따라 열 중성자 차폐율도 같이 상승하지만 조금씩 정체되고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 열중성자가 시편을 투과할 때 차폐물의 분포와 모양에 따라 어느 한계가 있다고 생각하며 이를 확인하기 위해서는 추가적인 실험이 필요함.

바. 총평

- Gd를 넣은 리본에서 열중성자 차폐능이 훨씬 우수함을 알 수 있음. 하지만, Gd의 양이 증가가 절대적으로 중성자 차폐율을 결정한다고 할 수 없으며, 차폐체의 분포 상태 또한 중요하다. 또한 Gd는 희토류 원소이므로, 수급이 용이하지 않고 경제적인 관점에서 보았을 때 상용화가 힘들 것으로 예측되며 따라서, B와 Gd의 적절한 분율 도출 및 시멘트의 잔골재 등의 치환을 통해 최적의 열중성자 차폐능을 가지는 콘크리트를 제작하여 방사성 시설의 건축 및 보수에 사용 하도록 해야함.

4. 진도점점 검증에 대한 항목별 증빙 (2차년도 성과목표 기준)

가. 인장강도 (단위성과 A-2-1)

시험 성적서

RIST

재단 포항산업과학연구원

37673 경상북도 포항시 남구 청광로 67

Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660

http://ric.rist.re.kr

성적서번호 : 2016000688

의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단

대구광역시 북구 대학로 80(산격동)

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시료설명 : Fe20B3Mo5Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시험명	시험두께 (mm)	시험폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo5Cr-1	0.025	0.73	2 589
Fe20B3Mo5Cr-2	0.023	0.74	2 252
Fe20B3Mo5Cr-3	0.021	0.74	2 565
Fe20B3Mo5Cr-4	0.022	0.73	2 189
Fe20B3Mo5Cr-5	0.027	0.75	1 890

- 비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
 2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
 3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
 E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 재단 포항산업과학연구원

총 5 페이지 중 1 페이지

<알식 QAQP24-3>

그림 1-27 Fe₆₇B₂₅Mo₃Cr₅ 합금의 인장강도 테스트 결과지

RIST

경북 포항산업과학연구원

37673 경상북도 포항시 남구 청암로 67

Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660

http://rac.rist.re.kr

성적서번호 : 2016000688

의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단

대구광역시 북구 대학로 80(신격동)

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시료설명 : Fe20B3Mo6Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험결과

시편명	시편두께 (mm)	시편폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo6Cr-1	0.020	0.75	2 844
Fe20B3Mo6Cr-2	0.021	0.74	2 672
Fe20B3Mo6Cr-3	0.021	0.76	2 116
Fe20B3Mo6Cr-4	0.021	0.75	2 908
Fe20B3Mo6Cr-5	0.022	0.74	2 642

- 비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 재단법인 포항산업과학연구원장



총 5 페이지 중 2 페이지

그림 1-28 Fe₆₆B₂₅Mo₃Cr₆ 합금의 인장강도 테스트 결과지

RIST

부산 포항산업과학연구원

37673 경상북도 포항시 남구 청암로 67

Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660

http://ric.rist.re.kr

성적서번호 : 2016000688

의 회 기 관 : 경북대학교 산학협력단

대구광역시 북구 대학로 80(신격동)

시험 성적서

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시 료 설 명 : Fe20B3Mo7Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시험명	시험두께 (mm)	시험폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo7Cr-1	0.025	0.95	1 937
Fe20B3Mo7Cr-2	0.026	0.96	2 579
Fe20B3Mo7Cr-3	0.026	0.98	2 968
Fe20B3Mo7Cr-4	0.026	0.99	2 502
Fe20B3Mo7Cr-5	0.026	0.99	2 410

- 비 고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
 2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
 3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한

E-mail : ristkh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 부산 포항산업과학연구원장

총 5 페이지 중 3 페이지

그림 1-29 Fe₆₅B₂₅Mo₃Cr₇ 합금의 인장강도 테스트 결과지

RIST

부산포항산업과학연구원

37673 경상북도 포항시 남구 청암로 67

Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660

http://ric.rist.re.kr

시험 성적서

절적서번호 : 2016000688

의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단

대구광역시 북구 대학로 80(신격동)

시험접수일자 : 2016-06-14

시험완료일자 : 2016-06-15

시험방법 : 상온인장시험

시료설명 : Fe20B3Mo8Cr

시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시편명	시편두께 (mm)	시편폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe20B3Mo8Cr-1	0.024	1.06	776
Fe20B3Mo8Cr-2	0.024	1.04	2184
Fe20B3Mo8Cr-3	0.024	0.96	1025
Fe20B3Mo8Cr-4	0.023	1.03	1826
Fe20B3Mo8Cr-5	0.022	0.78	2518

- 비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료영에만 한정됩니다.
 2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
 3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.re.kr

2016년 06월 15일

RIST 부산포항산업과학연구원장

총 5 페이지 중 4 페이지

그림 1-30 Fe₆₄B₂₅Mo₃Cr₈ 합금의 인장강도 테스트 결과지



포항산업과학연구원
37673 경상북도 포항시 남구 항암로 67
Tel: 054-279-6950 Fax: 054-279-6660
http://ric.rist.ac.kr

시험 성적서

성적서번호 : 2016000688
의뢰기관 : 경북대학교 산학협력단
대구광역시 북구 대학로 80(산격동)

시험접수일자 : 2016-06-14
시험완료일자 : 2016-06-15

시료설명 : Fe₂₀B₃Mo₉Cr

시험방법 : 상온인장시험
시험환경 : 온도 (25 ± 2) °C, 습도 (67 ± 5) % R.H.

시험 결과

시편명	시편두께 (mm)	시편폭 (mm)	인장강도 (MPa)
Fe ₂₀ B ₃ Mo ₉ Cr-1	0.021	0.75	2 797
Fe ₂₀ B ₃ Mo ₉ Cr-2	0.021	0.75	3 184
Fe ₂₀ B ₃ Mo ₉ Cr-3	0.021	0.76	2 749
Fe ₂₀ B ₃ Mo ₉ Cr-4	0.020	0.75	2 954
Fe ₂₀ B ₃ Mo ₉ Cr-5	0.018	0.50	3 465

비고 : 1. 이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
2. * 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.
3. 위 성적서는 당 시험기관의 서면승인 없이 일부 항목을 삭제 또는 추가 할 수 없습니다.

시험자 : 이일욱

승인자 : 기술책임자 김종한
E-mail : ristkjh@rist.ac.kr

2016년 06월 15일

RIST 재판 포항산업과학연구원장

총 5 페이지 중 5 페이지

그림 1-31 Fe₆₃B₂₅Mo₃Cr₉ 합금의 인장강도 테스트 결과지

- 인장강도는 포항산업과학연구원(RIST)에서 측정하였다. 측정장비는 10ton 인장시험기(ZWICK Z 100)이며 인장속도는 1 mm/min, 표점거리 38-40mm, 시편길이 8cm의 조건으로 실험하였음.
- 인장시험 결과 약 2 GPa이 넘는 인장 강도를 확인하였음.

나. 연신율 (단위성과 A-2-2)

- 연신율의 측정은 1차년도에 실험과 마찬가지로 굽힘 실험을 실시함.
- 리본을 6cm길이로 절단한 뒤 양 끝단을 맞대어 1cm정도 포갠 후, 테이프를 이용하여 고정함. 이후 시편을 수직으로 고정하여 마이크로미터를 통해 표면까지의 거리를 측정함. 시편 당 12회씩 실시함.
- Gd가 포함된 시편은 1.5 at.% 의 Gd 함량을 가지는 시편에서부터 굽힘 연신율 시편 제작이 어려울 정도로 취성이 강했음. 따라서, 시편 제작이 가능한 0.5, 1.0 at.% 의 Gd함량을 가지는 재료를

사용하여 시험을 진행함.

- Gd0.5의 측정에서 11번째 측정값은 제외함.
- 굽힘 연신율 시험 결과 우수한 특성을 나타내는 것을 확인 할 수 있음.

표 1-10 Fe₇₂B_{24.5}Mo₃Gd_{0.5} 합금의 굽힘연신율 측정 데이터

Gd0.5	1	2	3	4	5	6
d	0.044	0.04	0.044	0.044	0.019	0.021
D	2.57	2.21	2.36	3.522	0.05	1.1
ex100	1.74	1.84	1.90	1.27	61.29	1.95
7	8	9	10	11	12	Avg.
0.028	0.018	0.018	0.018	0.022	0.02	0.021
1.099	0.04	0.047	0.042	0.04	0.05	3.81
2.61	81.82	62.07	75.00	122.22	66.67	26.20

표 1-11 Fe₇₂B_{24.0}Mo₃Gd_{1.0} 합금의 굽힘연신율 측정 데이터

Gd1.0	1	2	3	4	5	6
d	0.017	0.017	0.017	0.017	0.043	0.045
D	0.306	0.381	0.281	0.044	2.039	2.165
ex100	5.88	4.67	6.44	62.96	2.15	2.12
7	8	9	10	11	12	Avg.
0.057	0.066	0.017	0.017	0.017	0.017	0.152
2.808	2.044	0.416	0.089	0.04	0.04	23.41
2.07	3.34	4.26	23.61	73.91	73.91	15.09

표 1-12 Fe₆₇B₂₅Mo₃Cr₅ 합금의 굽힘연신율 측정 데이터

Cr5	1	2	3	4	5	6
d	0.024	0.022	0.028	0.029	0.023	0.021
D	1.44	0.06	0.07	0.87	0.07	0.05
ex100	1.69	57.89	66.67	3.45	48.94	72.41
7	8	9	10	11	12	Avg.
0.029	0.028	0.023	0.023	0.023	0.024	0.025
0.89	0.97	0.07	0.05	0.86	0.05	0.48
3.37	2.97	48.94	85.19	2.75	92.31	19.63

표 1-13 Fe₆₃B₂₅Mo₃Cr₉ 합금의 굽힘연신율 측정 데이터

Cr9	1	2	3	4	5	6
d	0.026	0.024	0.024	0.067	0.024	0.024
D	0.065	0.08	0.07	1.943	0.64	0.96
ex100	66.67	42.86	52.17	3.57	3.90	2.56
7	8	9	10	11	12	Avg.
0.023	0.023	0.023	0.024	0.023	0.024	0.023
0.06	0.07	0.67	0.7	0.07	1.47	0.51
62.16	48.94	3.55	3.55	48.94	1.66	14.07

다. 부식전류 (단위성과 A-2-3)

- 동전위 분극 시험을 실시하여 Tafel fit line을 그어 부식전위 및 부식전류의 측정 및 부동태 거동을 관측함.
- 부식시험은 리본 시편을 전극에 직결시켜 진행하였고, 부식 측정시 필요한 값인 리본의 면적을 구하기 위해 아래 그림의 계산식을 사용함.

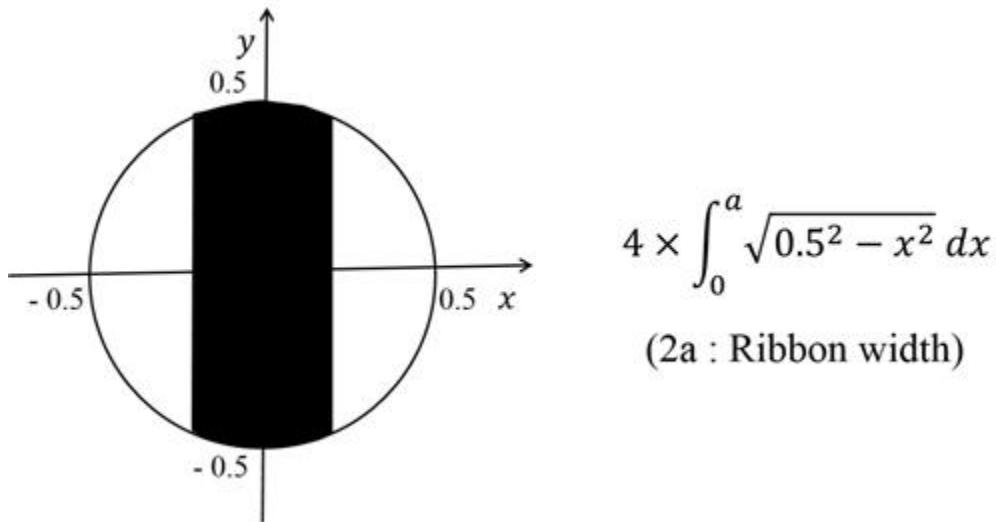


그림 1-32 부식 시험을 위한 면적계산시 사용한 도면 및 계산식

표 1-3 각 조성별 부식전류 및 전위

Composition (at.%)	E-Potential (mV)	Current density (A/cm ²)
@1 Fe ₆₇ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₅	-429.786	1.939X10 ⁻⁷
@2 Fe ₆₆ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₆	-280.407	9.268X10 ⁻⁸
@3 Fe ₆₅ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₇	-261.532	6.473X10 ⁻⁸
@4 Fe ₆₄ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₈	-247.826	4.562X10 ⁻⁸
@5 Fe ₆₃ B ₂₅ Mo ₃ Cr ₉	-239.947	3.777X10 ⁻⁸

표 1-8 각 조성별 부식전류 및 전위

Composition	Current density (A/cm ²)	E-Potential (mV)
#1 Fe ₇₂ B _{24.5} Mo ₃ Gd _{0.5}	7.412X10 ⁻⁷	-616.054
#2 Fe ₇₂ B _{24.0} Mo ₃ Gd _{1.0}	6.208X10 ⁻⁷	-664.317
#3 Fe ₇₂ B _{23.5} Mo ₃ Gd _{1.5}	4.724X10 ⁻⁷	-643.992
#4 Fe ₇₂ B _{23.0} Mo ₃ Gd _{2.0}	3.796X10 ⁻⁷	-606.426
#5 Fe ₇₂ B _{22.5} Mo ₃ Gd _{2.5}	3.370X10 ⁻⁷	-619.059

5. 1차년도 진도점검 검증에 대한 증빙 보충

가. 붕소함량 (단위성과 A-1-1)

- 위의 두 실험을 위해 제작된 철계 비정질 리본 약4g을 잘게 잘라서 ICP분석을 진행하였다. ICP분석은 B함량에 대하여 분석하였으며, 결과는 wt.%로 표기됨.
- 조성 변화에 따른 B함량의 경향성을 확인하기 위하여 각 합금계에서 2개씩 추출하여서 실험을 의뢰함.
- at.%로 변환하여 나타낸 결과 각 비정질 리본에서 20at.% 이상의 B함량을 나타냄.
- B의 함량이 감소한 것은, B가 가벼운 원소이므로 합금화 도중의 소실 가능성과, 리본 제작시 사용하는 melt spinner에서 용해시, 모합금 제작시에 생긴 B-Gd 또는 B-Cr 의 고용점 intermetallics 가 완전히 녹지 않고 리본이 제작 되었을 가능성의 두가지로 추측하고 있음.

KQT 한국품질시험원
KOREA QUALITY TESTING INSTITUTE

시험성적서
Analysis Research Center

Page : 1/2

성적서번호 : KM-160527-431
 업체명 : 경북대학교
 주소 : 대구광역시 북구 대학로 80 경북대학교 공대3호관 505C
 시료명 : Fe-25B-3Mo-5Cr 외 3종
 접수일자 : 2016. 05. 27.
 시험기간 : 2016. 05. 27. ~ 2016. 05. 31.
 성적서발행일자 : 2016. 05. 31.
 시험결과 : 불침침조
 시험환경 : 온도 (20 ~ 24) °C, 습도 (20 ~ 25) % R.H.

시험자 : 이보영
 기술책임자 : 김우택

경기도 수원시 권선구 오목천로 132번길 33 (교석동, 수원휴먼스카이라인빌리) 1010호
 TEL:031)227-4289-1 FAX:031)227-4291 E-mail:kqti@kqti.co.kr http://www.kqti.co.kr

1. 본 성적서는 고객이 제시한 시료 및 시료명으로서 시험한 결과에 한하며, 특정 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 2. 본 성적서는 당사의 사전 서면동의 없이 복사, 전전, 전고 및 급격한 온도변화를 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

KQT 한국품질시험원
KOREA QUALITY TESTING INSTITUTE

시험성적서
Analysis Research Center

Page : 2/2

성적서번호 : KM-160527-431
 시료번호 : 1
 시료명 : Fe-25B-3Mo-5Cr 외 3종

결과

시료명	단위	B
Fe-25B-3Mo-5Cr	%	5.13
Fe-25B-3Mo-9Cr	%	5.06
Fe-24.5B-3Mo-0.5Gd	%	4.88
Fe-22.5B-3Mo-2.5Gd	%	4.14

NOTE: 1) 분석방법=KS D 1476 (원소ICP 분석)
 2) 오차범위=신뢰수준 (95.45%)

이하어백

경기도 수원시 권선구 오목천로 132번길 33 (교석동, 수원휴먼스카이라인빌리) 1010호
 TEL:031)227-4289-1 FAX:031)227-4291 E-mail:kqti@kqti.co.kr http://www.kqti.co.kr

1. 본 성적서는 고객이 제시한 시료 및 시료명으로서 시험한 결과에 한하며, 특정 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 2. 본 성적서는 당사의 사전 서면동의 없이 복사, 전전, 전고 및 급격한 온도변화를 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

그림. 1-33 B 함량 분석을 위한 ICP 분석 결과지

표. 1-14 B함량 분석을 위한 ICP 분석 결과표

시료명	단위	wt.%	at.%
Fe-25B-3Mo-5Cr	%	5.13	22.23
Fe-25B-3Mo-9Cr	%	5.06	21.92
Fe-24.5B-3Mo-0.5Gd	%	4.88	20.82
Fe-22.5B-3Mo-2.5Gd	%	4.14	18.79

주관-B 비정질 붕소강 섬유 및 혼화재를 혼입한 중성자 차폐 콘크리트 제조

1. 콘크리트 최적 배합비 도출 및 역학적 특성 평가

가. 실험개요

(1) 실험계획

- 본 연구에서는 비정질 붕소강섬유의 혼입량과 형상비에 따른 굳지 않은 콘크리트 및 경화된 콘크리트의 물리적 특성을 평가하여 차폐용 콘크리트의 최적 혼입비에 대한 검토를 실시하였음.
- 본 연구에서의 콘크리트 설계배합강도는 35MPa로 설정하였으며, 이를 위해 Plain 콘크리트의 물시멘트비(W/C)는 52%, 잔골재율(S/a)은 49%인 배합으로 설정하였으며 목표공기량 3.5±1.0%, 목표슬럼프 150±20mm를 만족하도록 배합설계를 실시하였음.
- 실험변수로는 혼입되는 비정질 붕소강섬유의 혼입비와 형상비를 달리하였으며, 구체적인 섬유혼입비는 콘크리트 체적 대비 0.5 vol.%, 0.75 vol.%, 1.0 vol.%로 하였으며, 섬유의 형상비는 길이 10mm, 20mm로 조절하여 사용하였음.
- 실험사항으로는 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량을 측정하였으며, 경화된 콘크리트에서는 계획된 재령에서의 압축강도와 휨강도를 측정하였음.

표. 2-1 실험계획

Type	W/C (%)	Air contents (%)	Slump (mm)	Fiber (vol.%)		
				Amorphous boron fiber 10mm	Amorphous boron fiber 20mm	Steel fiber
Plain	52	3.5±1.0	150 ±20	-	-	-
10mm-0.5%				0.5	-	-
10mm-0.75%				0.75	-	-
10mm-1.0%				1.0	-	-
20mm-0.5%				-	0.5	-
20mm-0.75%				-	0.75	-
20mm-1.0%				-	1.0	-
SF				-	-	0.5

표. 2-2 Plain 콘크리트 배합비

W/C	S/a (%)	Unit weight (kg/cm3)		
		OPC	G	S
0.52	49	360.58	840.47	857.15

NOTE : W/C= water to cement ratio, S/a=sand to coarse aggregate ratio, OPC=ordinary Portland cement, S=Sand, G=Gravel

(2) 사용재료

- 본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 성질은 표3과 같음.

표. 2-3 사용 시멘트의 물리적 성질

Setting time(min)		Compressive strength(MPa)			Fineness (cm ² /g)	Specific gravity
Initial set	Final set	3d	7d	28d		
240	340	225	311	400	3,318	3.15

- 본 실험에 사용된 골재는 경북 낙동산 강모래를 잔골재로 사용하였으며, 경북 칠곡산 25mm 부순 골재를 굵은 골재로 사용하여 KS F 2526의 표준입도범위를 만족하도록 입도 조절하였으며, 골재의 물리적 성질은 표4와 같음.

표. 2-4 사용 골재의 물리적 성질

Type	specific gravity	Maximum size (mm)	Unit weight (kg/m ³)	Absorptance (%)	solid volume (%)	fineness modulus (%)
Fine aggregate	2.6	5	1564	1.05	53	2.63
Coarse aggregate	2.65	13	1569	0.9	59	6.49

- 본 실험에 사용된 비정질 붕소강섬유는 상기의 조성으로 제조된 폭 1.5mm, 길이 30mm의 리본타입 형상으로, 물리적 성질은 표5 와 같음.

표. 2-5. 실험에 사용한 비정질 붕소강섬유의 물리적 특성

Type	Specific gravity	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)
Ribbon type	7.8	0.021	2	10, 20	2219

- 본 실험에 사용한 강섬유는 국내 S사의 제품으로 지름 0.6mm, 길이 30mm의 양단 후크형 번들을 사용하였으며, 물리적 성질은 표5와 같음.

표. 2-6. 실험에 사용한 강섬유의 물리적 특성

Type		Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio	Specific gravity	Tensile strength (MPa)
Bundle (Hooked end)		0.6	30	50	7.85	1,100

(3) 시편의 제조

- 콘크리트 배합은 강제식 팬믹서를 배합을 실시하였으며, 배합이 완료된 이후 공기량, 슬럼프, 슬럼프 플로우 시험을 각각 실시한 후 공시체를 제작하였음. 압축강도 공시체의 경우 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체로 제작하였으며, 휨시편의 경우 폭 10cm, 높이 10cm, 길이 40cm의 각주형 공시체로 제작하였음. 제작된 공시체는 21±2℃의 온도에서 24시간 보관하였으며, 이후 탈형을 실시하여 각 실험 재령일까지 21±2℃의 온도로 습윤양생을 실시하였음.

(4) 실험방법

- 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성으로 콘크리트의 공기량, 슬럼프, 슬럼프 플로우를 측정하였음.

콘크리트의 공기량은 KS F 2421, 슬럼프는 KS F 2594에 의거 측정하였음.



(a) 공기량 측정



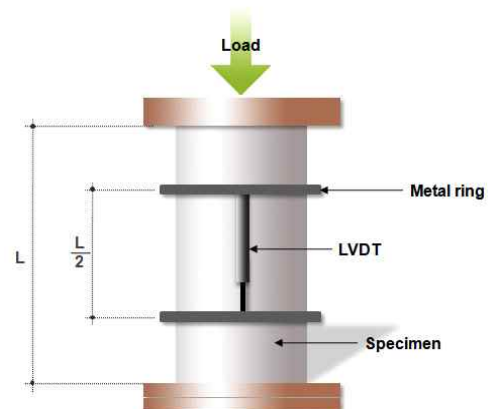
(b) 슬럼프 측정

그림. 2-1 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성 측정방법

- 경화된 콘크리트의 물리적 특성으로 압축강도를 측정하였음. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 의거 재령 7일, 28일에 실시하였으며, 압축시 변형 측정은 JSCE-SF5 (Method of Test for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fibre-Reinforced Concrete) 에 의거 실시하였음.



(a) 압축강도 측정



(b) JSCE-SF 변형률 측정

그림. 2-2 경화된 콘크리트의 압축강도 및 변형률 측정방법

- 경화된 콘크리트의 압축강도 실험을 통해 획득된 응력-변형률 데이터값을 이용하여 콘크리트의 정탄성계수를 산출하였음. 본 실험에서는 최대 응력의 1/3이내의 가장 근접한 측정값을 이용하여 탄성계수를 산출하였음. (C.S. Poon et al., 2004)

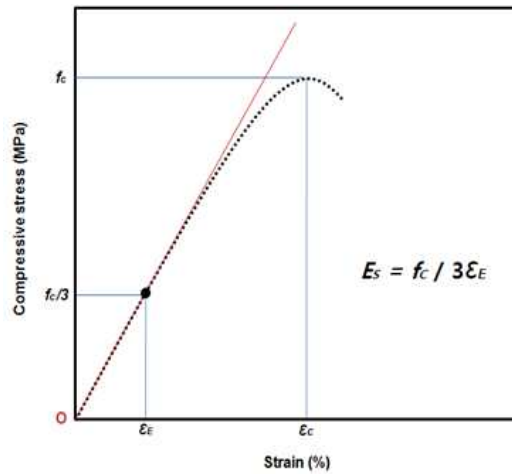


그림. 2-3 경화된 콘크리트의 응력 변형률을 이용한 정탄성계수 측정

- 경화된 콘크리트의 압축강도 실험을 통해 획득된 응력-변형률 데이터값을 이용하여 콘크리트의 압축인성을 산출하였음. 그림 4는 섬유보강 콘크리트에 있어서 압축인성비의 정의를 나타낸 것으로 콘크리트의 압축시험시 압축인성은 기준이 되는 변형률 값에서 응력-변형률 곡선 하부의 면적 (A)으로 정의되며 인성비는 (A/최대압축강도)로 산출함. (L.R. Taerwe, 1992) 본 실험에서는 JSCE-SF5와 Nataraja(1999), C.S Poon(2004)에 의한 기존연구에서 사용한 시험체 길이의 0.75%의 변형률 값을 기준으로 하여 응력-변형률 곡선 아래의 면적을 산출하여 압축인성비를 평가하였음.

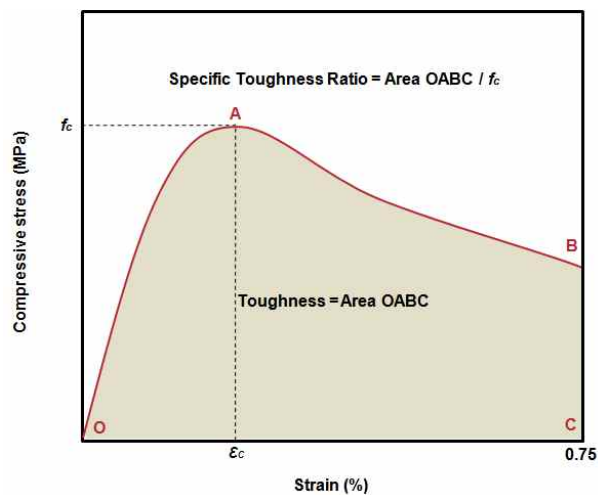


그림. 2-4 경화된 콘크리트의 응력 변형률을 이용한 압축인성 평가

- 경화된 콘크리트의 휨강도 실험은 KS F 2408에 의거 3등분 재하법을 이용하여 측정하였음. 재령 28일째의 시편을 이용하여 휨강도 실험을 실시하였음. 휨강도 실험시 변위계를 이용하여 시편 중앙부 하단에서의 변위를 측정하였으며, 하중-변위 데이터를 이용하여 휨인성을 평가하였음. 휨인성은 ASTM C 1609 (Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete - Using Beam With Third-Point Loading)의 인성지수 평가법을 통해 산출하였음.



그림. 2-5. 경화된 콘크리트의 휨강도 실험

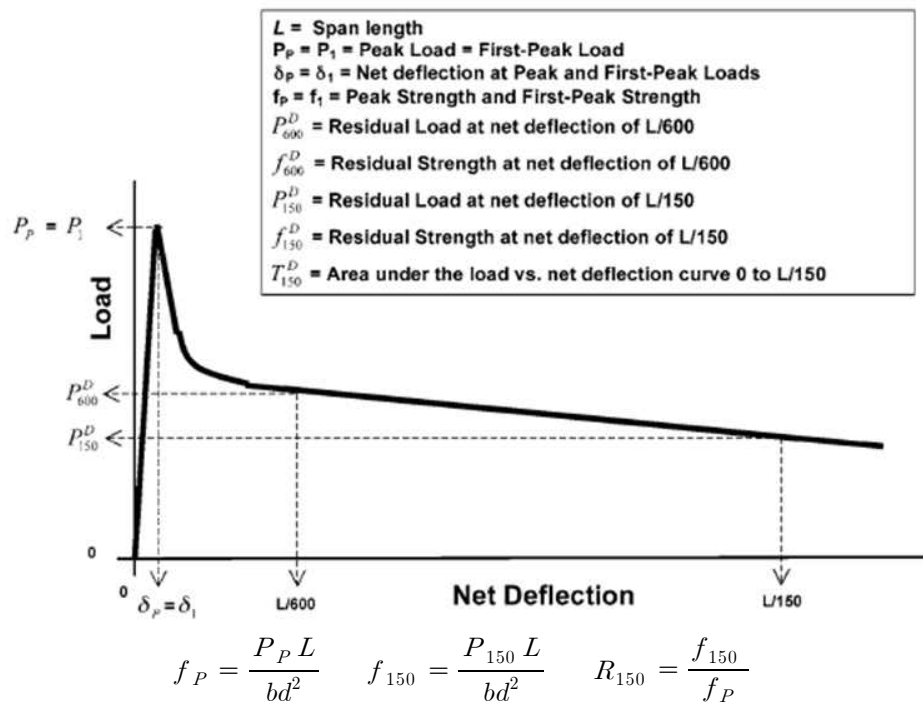


그림. 2-6 경화된 콘크리트의 휨인성지수 평가법

나. 실험결과 및 고찰

(1) 균지 않은 콘크리트의 물리적 특성 평가

- 표7은 균지 않은 콘크리트의 공기량, 슬럼프값을 나타낸 것임.

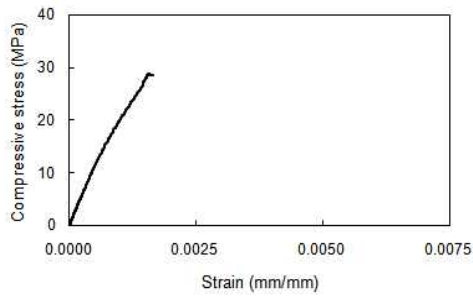
표. 2-7 공기량 및 슬럼프 실험값

Type	Air contents (%)	Slump loss (mm)
Plain	2.9	156
10mm-0.5%	3.1	144
10mm-0.75%	3.4	138
10mm-1.0%	3.9	120
20mm-0.5%	3.2	145
20mm-0.75%	3.8	130
20mm-1.0%	4.1	106
SF	3.2	145

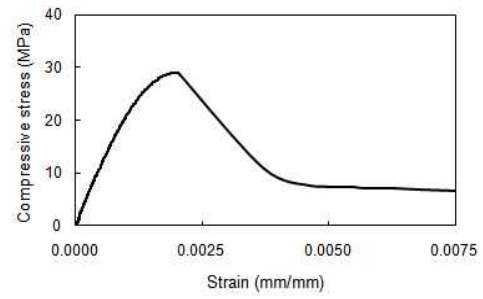
- 공기량의 경우 전반적으로 목표치인 $3.5 \pm 1.0\%$ 를 만족하는 것으로 나타났음. 하지만 섬유의 혼입량이 증가할수록 상대적으로 공기량이 증가하는 현상을 나타냈으며, 섬유의 길이가 길어질수록 동일 혼입비에서 공기량이 상대적으로 증가하는 현상을 나타냈음.
- 슬럼프 실험결과를 바탕으로 볼 경우, 전반적으로 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 섬유를 혼입한 콘크리트의 유동성이 저하되는 것으로 나타남. 섬유의 혼입율이 증가할수록 슬럼프값의 저하가 증가하는 현상을 나타냈으며, 섬유의 길이가 길어질수록 동일 혼입비에서 슬럼프값의 저하가 상대적으로 증가하는 현상을 나타냈음. 특히 비정질 붕소강섬유의 혼입비가 1.0 vol.%인 경우에는 목표 슬럼프치를 벗어나는 경향을 나타냈음.
- 비정질 붕소강섬유의 혼입율이 증가할수록 콘크리트의 유동성 저하가 발생하지만, 섬유 혼입비 1.0 vol.%까지 섬유불 현상이 발생하지 않았다는 점에서 만족할만한 결과를 도출하였다고 판단됨. 섬유 혼입비 1.0 vol.%의 경우 목표 슬럼프치를 벗어나지만, 이는 유동화제, 감수제 등의 혼화제를 사용하여 충분히 목표 슬럼프를 달성할 수 있을 것이라고 판단됨.

(2) 경화된 콘크리트의 특성

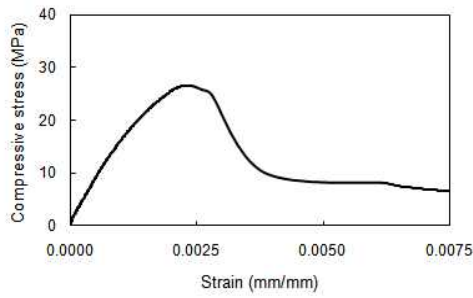
- 그림 78은 압축강도 실험을 통해 획득된 콘크리트의 각 재령별 응력-변형률 곡선을 나타내고 있음.



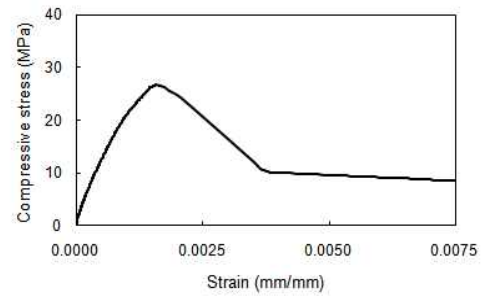
(a) Plain



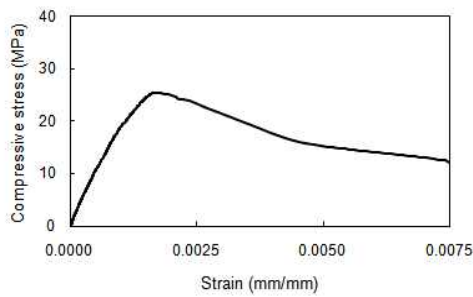
(b) 10mm-1.0%



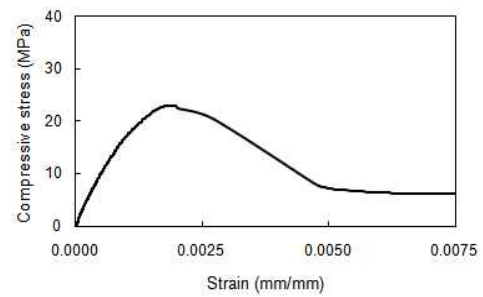
(c) 10mm-0.75%



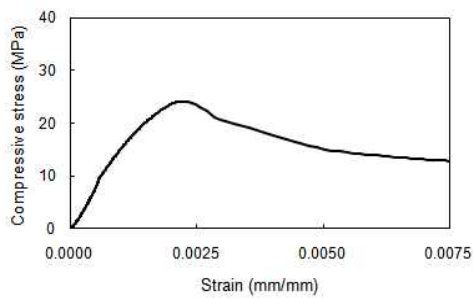
(d) 10mm-0.5%



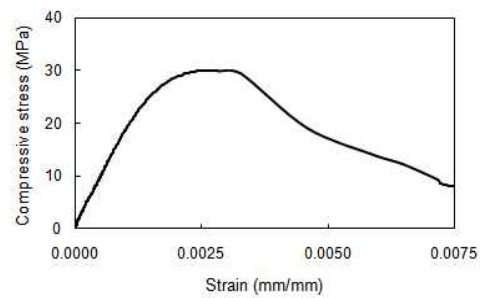
(e) 20mm-1.0%



(f) 20mm-0.75%

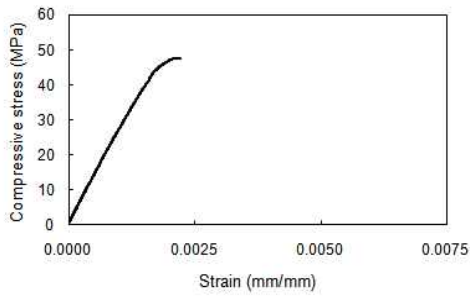


(g) 20mm-0.5%

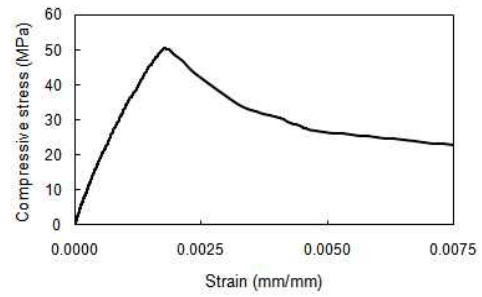


(h) SF

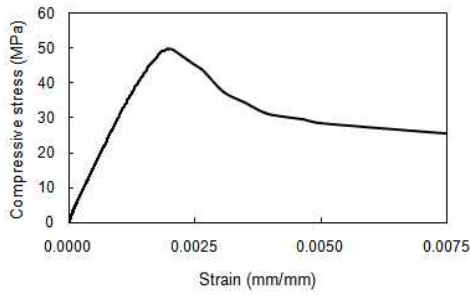
그림. 2-7 콘크리트의 응력-변형률 곡선 (재령 7일)



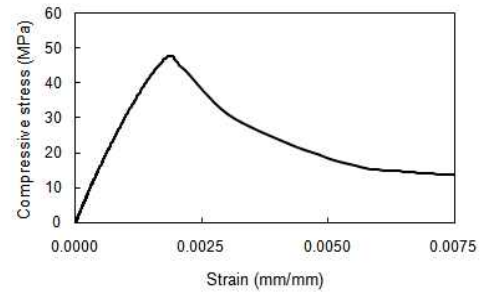
(a) Plain



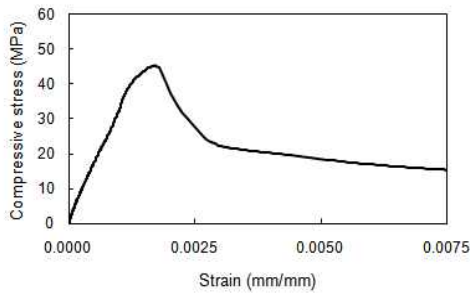
(b) 10mm-1.0%



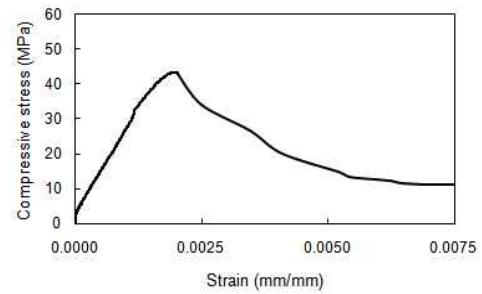
(c) 10mm-0.75%



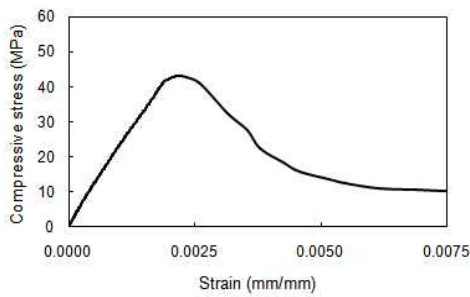
(d) 10mm-0.5%



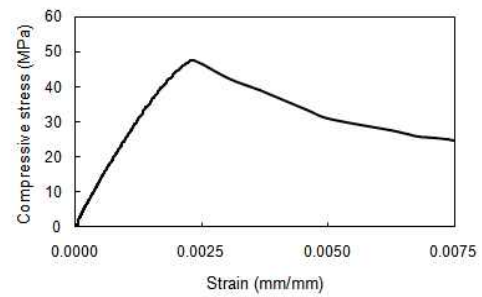
(e) 20mm-1.0%



(f) 20mm-0.75%



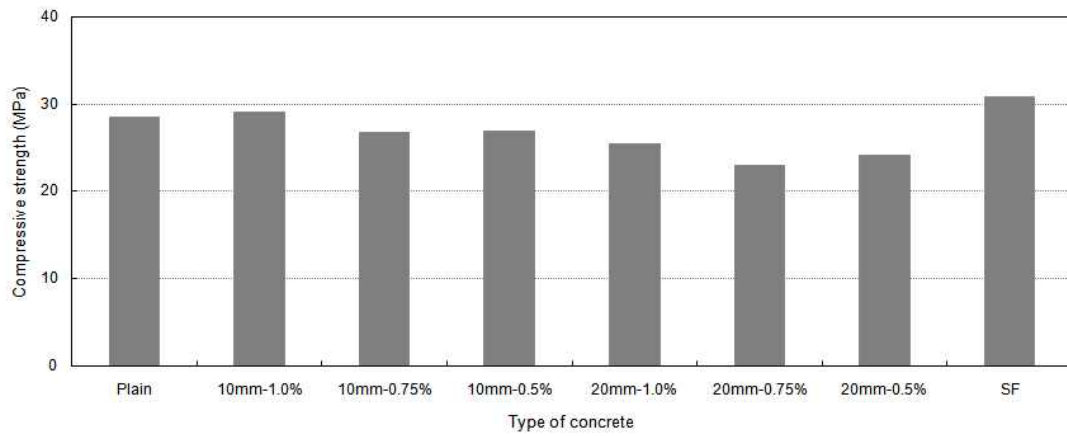
(g) 20mm-0.5%



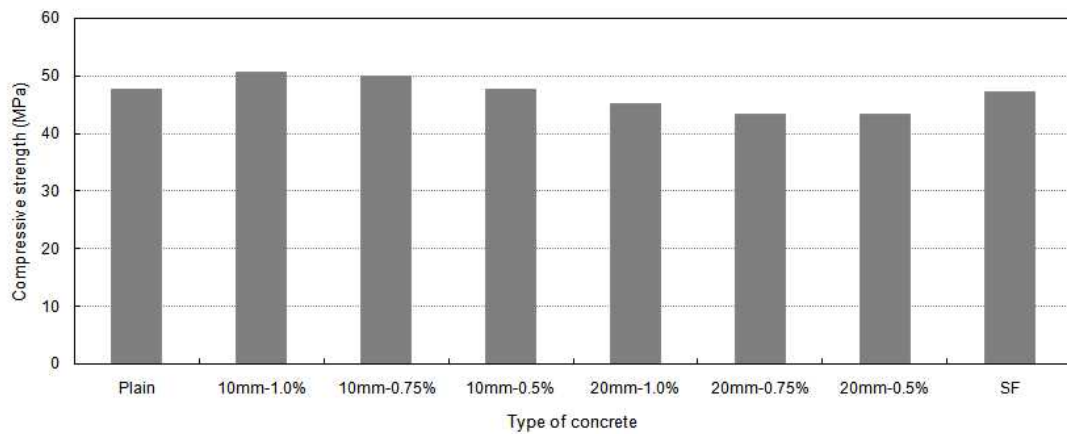
(h) SF

그림. 2-8 콘크리트의 응력-변형률 곡선 (재령 28일)

- 그림 9는 각 재령별 콘크리트의 압축강도를 나타내고 있음.



(a) 재령 7일



(b) 재령 28일

그림. 2-9 각 재령별 콘크리트의 압축강도

- 재령 28일째의 비정질 붕소강섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 목표 압축강도인 35MPa를 상회하는 것으로 나타났음. 전반적으로 비정질 붕소강섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 섬유의 혼입비가 증가할수록 압축강도의 상대적인 저하가 발생하고 있으며, 섬유의 길이가 증가할수록 동일 혼입비에서 압축강도는 상대적으로 저하되는 것으로 나타났음. Plain 콘크리트의 압축강도와 비교시 섬유길이 10mm인 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트는 섬유혼입비를 1.0 vol.%까지 증가하여도 동등 이상의 압축강도를 나타낸 반면, 섬유길이 20mm인 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트는 전반적으로 Plain 콘크리트에 비해 상대적으로 낮은 압축강도를 나타냄.

- 표8는 응력-변형률 데이터를 이용하여 산출한 각 시편의 최대응력시 변형률, 정탄성계수를 나타낸 것임.

표. 2-8 콘크리트의 최대응력시 변형률 및 정탄성계수

Type	Maximum stress (MPa)		Strain at maximum stress (%)		Static modulus of elasticity (GPa)	
	7days	28days	7days	28days	7days	28days
Plain	28.53	47.66	0.00157	0.00214	23.32	28.60
10mm-0.5%	29.03	50.57	0.00197	0.00179	23.59	39.50
10mm-0.75%	26.7	49.88	0.00233	0.00197	18.49	32.50
10mm-1.0%	26.92	47.74	0.00159	0.00186	24.72	2.74
20mm-0.5%	25.45	45.28	0.00173	0.00171	21.94	36.19
20mm-0.75%	22.99	43.44	0.0019	0.00201	21.00	30.80
20mm-1.0%	24.21	43.24	0.00223	0.00214	15.46	24.68
SF	30.87	47.30	0.00256	0.00231	20.24	27.46

- 그림10은 각 콘크리트의 상대적인 정탄성계수비를 나타낸 것으로, 전반적으로 비정질 봉소강섬유를 혼입한 경우 재령 28일째의 정탄성계수는 Plain 콘크리트와 비교하여 상대적으로 높게 나타났음. 섬유길이가 10mm인 경우 섬유혼입율이 0.75%까지 증가할수록 정탄성계수는 증가하였으며, 혼입율 1.0%에서는 약간의 저하를 나타냈음. 반면 섬유길이가 20mm인 경우 섬유의 혼입율이 증가할수록 정탄성계수는 저하하는 것으로 나타났음. 또한 동일 섬유혼입율에서 길이 10mm의 섬유를 혼입할 경우 20mm에 비해 상대적으로 정탄성계수가 증가하는 경향을 나타냈음.

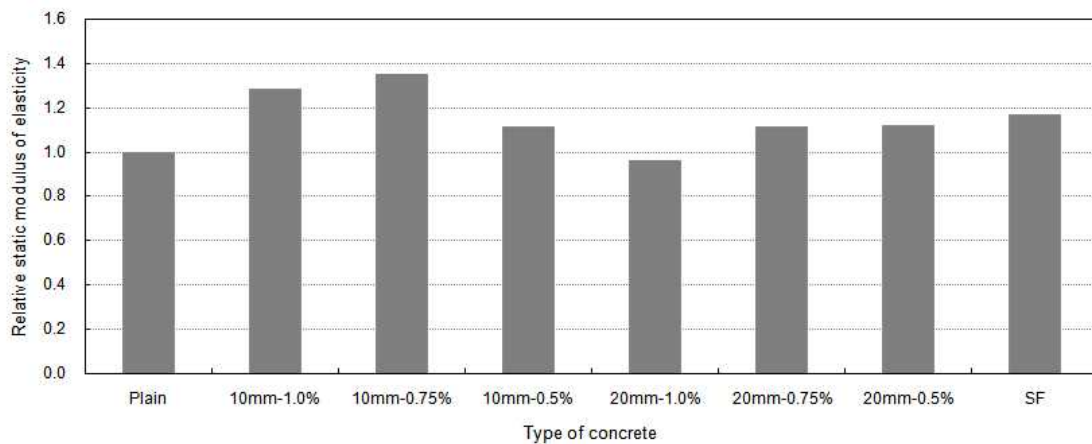


그림. 2-10 상대적인 정탄성계수 (재령28일)

- 표9는 응력-변형률 데이터를 이용하여 산출한 각 시편의 압축인성 및 압축인성비를 나타낸 것임.

표. 2-9 콘크리트의 압축인성

Type	Area under stress-strain curve (MPa×10 ⁻²)		Specific toughness ratio (%)	
	7days	28days	7days	28days
Plain	2.71	6.40	0.10	0.13
10mm-0.5%	10.14	22.92	0.35	0.45
10mm-0.75%	10.07	23.56	0.38	0.47
10mm-1.0%	10.32	18.68	0.38	0.39
20mm-0.5%	12.82	16.95	0.50	0.37
20mm-0.75%	9.33	16.34	0.41	0.38
20mm-1.0%	12.10	19.83	0.50	0.46
SF	14.44	23.85	0.47	0.50

- 그림11은 각 콘크리트의 상대적인 압축인성을 나타낸 것으로, 섬유를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 섬유를 혼입한 경우 최대하중 이후 섬유에 의한 인성 발현으로 하중에 대한 에너지를 흡수하기 때문에 콘크리트 자체의 압축인성이 증가하는 현상을 나타냈음.
- 비정질 붕소강섬유의 혼입율에 따른 압축인성은 섬유혼입율이 증가할수록 압축인성이 증가하는 경향을 나타냈으며, 동일 혼입율에서 섬유길이에 따른 압축인성은 길이 10mm의 섬유를 혼입한 경우 20mm의 섬유에 비해 상대적으로 압축인성이 증가하는 현상을 나타냈음.

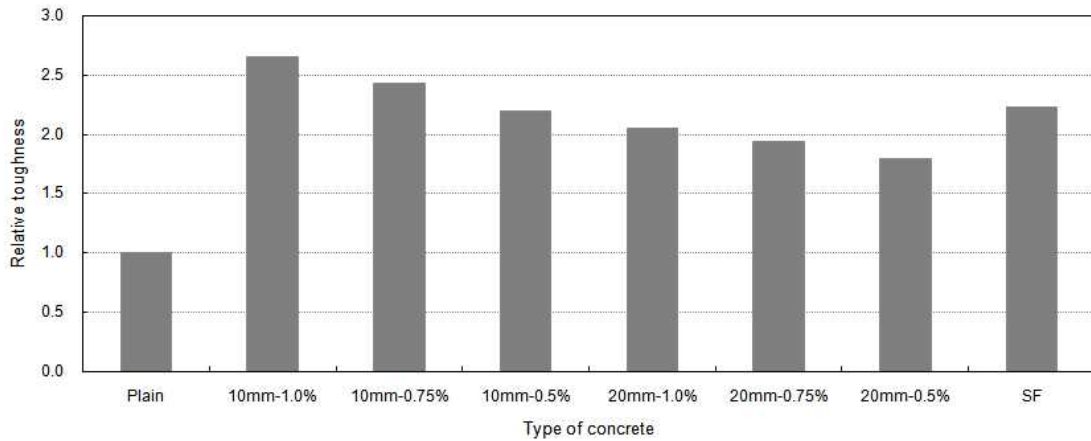
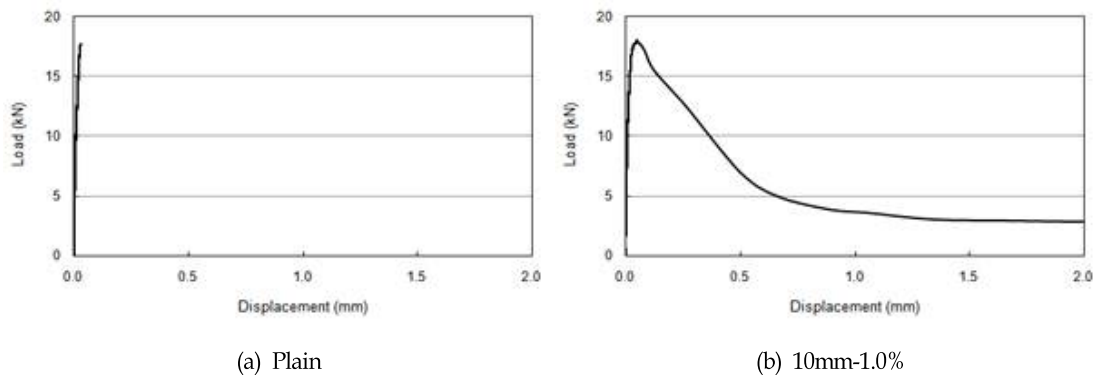


그림. 2-11 상대적인 압축인성 (재령28일)

- 그림12는 휨강도 실험을 통해 획득된 하중-변위 곡선을 나타낸 것임.



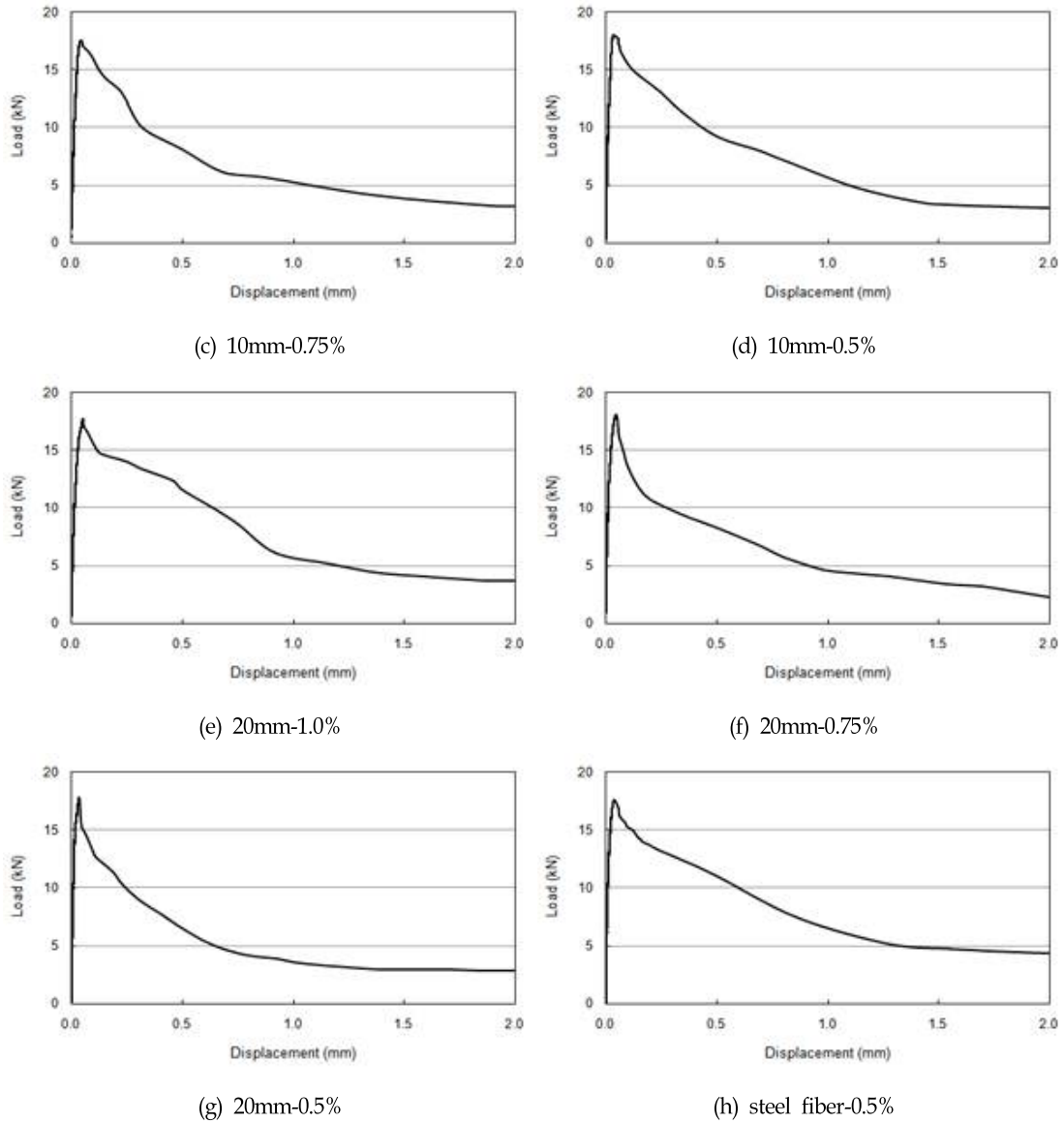


그림. 2-12 콘크리트의 휨하중-변위곡선 (재령 28일)

- 그림13은 각 시편의 재령 28일에서의 휨강도를 나타낸 것으로, 전반적으로 혼입되는 섬유에 상관 없이 휨강도는 약 5.35 MPa 정도로 거의 일정하게 나타났음. 따라서 1.0 vol.% 수준에서의 섬유혼입은 휨강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단됨.

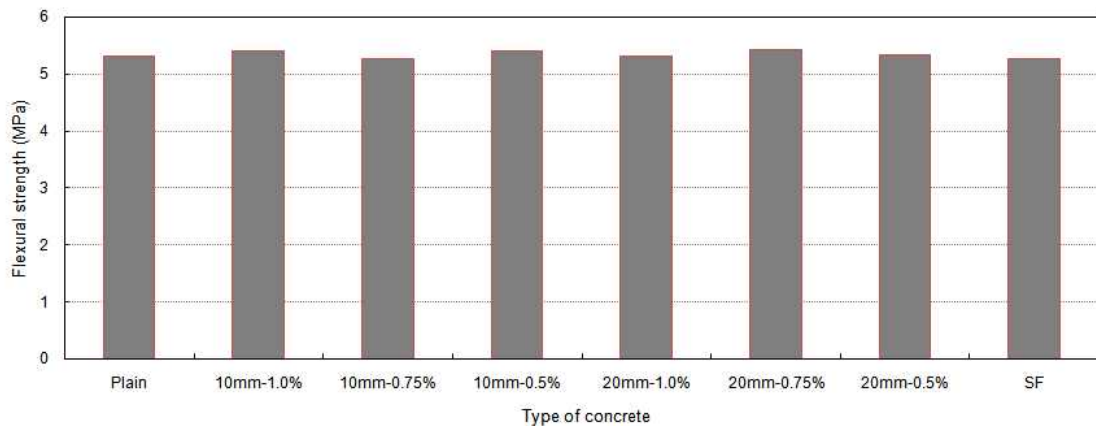


그림. 2-13 콘크리트의 휨강도 (재령 28일)

- 표10은 각 콘크리트 시편의 채령 28일에서의 휨인성지수를 나타낸 것임.

표. 2-10 콘크리트의 휨인성지수 평가

Type	PP (kN)	Fp (MPa)	P600 (kN)	F600 (MPa)	P150 (kN)	F150 (MPa)	T150 (J)	R150 (%)
Plain	17.73	5.32	-	-	-	-	2.32	0.00
10mm-0.5%	18.03	5.41	7.03	2.11	2.88	0.86	12.82	15.97
10mm-0.75%	17.57	5.27	8.12	2.44	3.21	0.96	14.41	18.27
10mm-1.0%	18.03	5.41	9.24	2.77	3.02	0.91	15.36	16.76
20mm-0.5%	17.73	5.32	11.56	3.47	3.65	1.09	16.58	20.58
20mm-0.75%	18.10	5.43	8.33	2.50	2.27	0.68	13.36	12.56
20mm-1.0%	17.80	5.34	6.55	1.96	2.84	0.85	11.58	15.96
SF	17.60	5.28	11.05	3.31	4.37	1.31	17.59	24.80

- 그림 14는 각 콘크리트 시편의 채령 28일에서의 휨인성을 나타낸 것으로, 전반적으로 섬유를 혼입한 경우 최대하중 이후 휨인성이 발현되는 것으로 나타났음. 비정질 붕소강섬유의 길이가 10mm인 경우는 섬유 혼입율이 증가할수록 휨인성이 저하되는 경향을 나타냈으나, 20mm인 경우 섬유 혼입율이 증가할수록 휨인성이 증가하는 경향을 나타냈음.

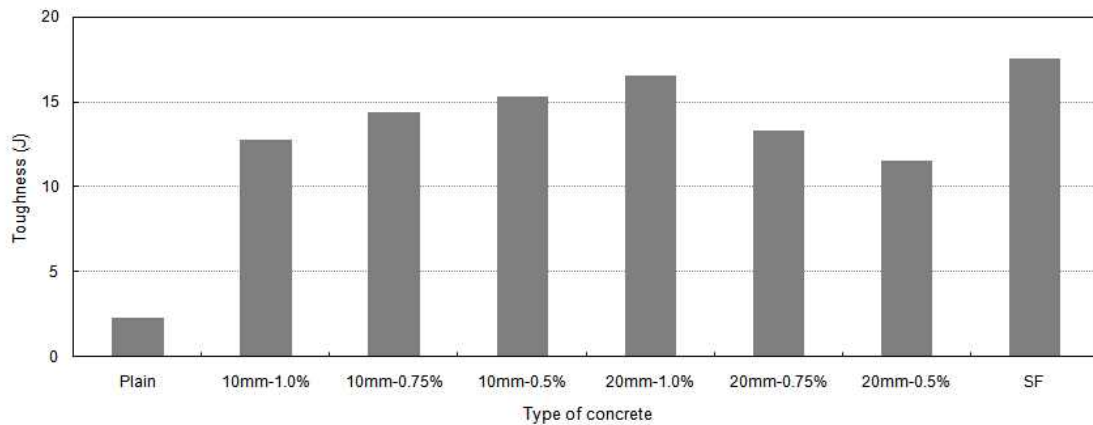


그림. 2-14 콘크리트의 휨인성 (채령 28일)

다. 총평

- 본 연구에서는 비정질 붕소강섬유의 혼입량과 형상비에 따른 굳지 않은 콘크리트 및 경화된 콘크리트의 물리적 특성을 평가하여 차폐용 콘크리트의 최적 혼입비에 대한 검토를 실시하였음.
- 각 콘크리트의 공기량은 섬유의 길이와 상관없이 비정질 붕소강섬유 혼입비 1.0 vol.% 수준에서 목표하는 $3.5 \pm 1.0\%$ 을 만족하는 것으로 나타났으나, 섬유의 혼입율이 증가할수록 상대적으로 공기량은 증가하는 것으로 나타났음.
- 슬럼프의 값은 비정질 붕소강섬유 혼입비 0.75 vol.% 수준까지는 목표로 하는 슬럼프값인 $150 \pm 20\text{mm}$ 를 만족하였으나, 1.0 vol.%에서는 목표 슬럼프값을 벗어나는 경향을 나타냈음. 또한 섬유길이가 증가할수록 동일 혼입비에서 슬럼프값은 저하되는 경향을 나타냈음.

- 재령 28일에서의 각 콘크리트의 압축강도는 목표로 하는 35MPa를 만족하는 것으로 나타났으며, 섬유 혼입율이 증가할수록, 섬유의 길이가 짧아질수록 압축강도 및 압축인성은 상대적으로 증가하는 경향을 나타냈음.
- 재령 28일에서의 각 콘크리트의 휨강도는 섬유혼입에 상관없이 거의 일정하게 나타났으나, 섬유를 혼입한 경우가 휨인성이 발현되는 것으로 나타났음. 또한 비정질 붕소강섬유의 길이가 10mm인 경우는 섬유 혼입율이 증가할수록 휨인성이 저하되는 경향을 나타냈으나, 20mm인 경우 섬유혼입율이 증가할수록 휨인성이 증가하는 경향을 나타냈음.
- 실험결과를 통해 각 콘크리트의 물성을 상대적으로 평가하면 표11과 같음.

표. 2-11 각 콘크리트의 상대적 물성 평가

구분	10mm 1.0%	10mm 0.75%	10mm 0.5%	20mm 1.0%	20mm 0.75%	20mm 0.5%	SF
공기량	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
슬럼프	×	×	△	×	×	△	△
압축강도	◎	○	△	×	×	×	△
압축인성	◎	○	○	○	○	○	○
휨강도	△	△	△	△	△	△	△
휨인성	◎	○	○	○	○	○	○

- 공기량, 슬럼프, 압축강도 및 인성, 휨강도 및 인성 등의 항목을 고려할시 비정질 붕소강섬유 길이 10mm, 혼입율 1.0 vol.%가 상대적 물성치에 있어서 가장 좋은 것으로 판단됨. 단, 슬럼프의 경우 유동화제나 감수제 등의 혼화제를 이용할 경우에 목표치를 달성할 수 있을 것이라고 판단.

2. 최종 선정 배합비를 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 중성자 차폐성능 평가

가. 실험개요

(1) 실험계획

- 본 연구에서는 최종 선정된 배합비를 이용하여 콘크리트의 역학적 특성과 중성자 차폐성능을 평가하였음.
- 본 연구에서의 최종적으로 콘크리트 설계배합강도를 35MPa로 설정하였으며, 이를 위해 Plain 콘크리트의 물시멘트비(W/C)는 40%, 잔골재율(S/a)은 32%인 배합으로 설정하였으며 목표공기량 3.5±1.0%, 목표슬럼프 150±20mm를 만족하도록 배합설계를 실시하였음.
- Plain 콘크리트와 대비하여 길이 10mm의 비정질 붕소강섬유를 콘크리트 체적 1.0 vol.% 혼입한 콘크리트와 잔골재를 붕규산 유리로 중량비 100%를 치환한 콘크리트를 실험 변수로 결정함.
- 실험사항으로는 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량을 측정하였으며, 경화된 콘크리트에서는 계획된 재령에서의 압축강도, 휨강도, 겉보기밀도 및 중성자 차폐성능을 측정하였음.

표. 2-12 실험계획

Type	W/C (%)	Air contents (%)	Superplasticizer (%)	Slump (mm)	Amorphous boron fiber (vol.%)	Fine aggregate	
						Sand	Pyrex glass power
Plain	52	3.5±1.0	-	150 ±20	-	○	-
Py			-		-	-	○
BF			0.5		1.0	○	-
Py-BF			0.5		1.0	-	○

표. 2-13 Plain 콘크리트 배합비

W/C	S/a (%)	Unit weight (kg/cm ³)		
		OPC	S	G
0.4	32	437.1	539.4	1178.1

NOTE : W/C= water to cement ratio, S/a=sand to coarse aggregate ratio, OPC=ordinary Portland cement, S=Sand, G=Gravel

(2) 사용재료

- 본 실험에 사용된 시멘트 및 골재는 표 3~4를 만족하는 재료를 사용하였으며, 붕규산유리는 2mm 이하로 입도 조절된 분말을 사용하였으며 붕규산 유리의 물성은 표14와 같음. 실험에 사용된 비정질 붕소강섬유는 표5에 해당하는 길이 10mm의 섬유를 사용하였음.

표. 2-14 실험에 사용된 붕규산 유리의 물성

Density	Elastic modulus (N/mm ²)	Chemical composition (weight %)			
		SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O	Al ₂ O ₃
2.23	63×10 ³	81	13	4	2

(3) 시편의 제조

- 콘크리트 배합은 강제식 팬믹서를 배합을 실시하였으며, 배합이 완료된 이후 공기량, 슬럼프 시험을 각각 실시한 후 공시체를 제작하였음. 압축강도 공시체와 겹보기 밀도 공시체의 경우 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체로 제작하였으며, 휨시편의 경우 폭 10cm, 높이 10cm, 길이 40cm의 각주형 공시체로 제작하였음. 중성자 차폐실험용 공시체는 지름 10cm, 높이 5cm로 제작하였음. 제작된 공시체는 21±2℃의 온도에서 24시간 보관하였으며, 이후 탈형을 실시하여 각 실험 재령일까지 21±2℃의 온도로 습윤양생을 실시하였음.

(4) 실험방법

- 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성으로 콘크리트의 공기량, 슬럼프, 슬럼프 플로우를 측정하였음. 콘크리트의 공기량은 KS F 2421, 슬럼프는 KS F 2594에 의거 측정하였음.
- 경화된 콘크리트의 압축강도 KS F 2405에 의거 재령 3일, 7일, 28일에 실시하였으며, 압축시 변형 측정은 JSCE-SF5 에 의거 실시하였음. 경화된 콘크리트의 압축강도 실험을 통해 획득된 응력-변

형률 데이터값을 이용하여 콘크리트의 정탄성계수와 압축인성을 산출하였음.

- 경화된 콘크리트의 휨강도 실험은 KS F 2408에 의거 3등분 재하법을 이용하여 측정하였음. 재령 28일째의 시편을 이용하여 휨강도 실험을 실시하였음. 휨강도 실험시 변위계를 이용하여 시편 중앙부 하단에서의 변위를 측정하였으며, 하중-변위 데이터를 이용하여 휨인성을 평가하였음. 휨인성은 ASTM C 1609의 인성지수 평가법을 통해 산출하였음.
- 경화된 콘크리트의 겉보기 밀도 실험은 KS F 2459에 의거 실시하였음. 재령 28일의 공시체를 $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 24시간 건조하여 데시케이터 내에서 24시간 냉각하여 실온이 되도록 한 후 시편의 질량을 측정하고 이를 공시체의 체적으로 나누어 겉보기 밀도를 산출하였음.
- 경화된 콘크리트의 중성자 차폐실험은 중성자 방출률이 $2.334\times 10^5\text{s}^{-1}$ 인 $^{241}\text{Am-Be}$ 를 중성자 선원으로 이용하였으며, SP9 ^3He 비례계수기를 이용하여 열중성자를 검출하였음. 중성자 선원에서 방출되는 중성자는 폴리에틸렌 감속재를 이용하여 열중성자로 변환시켰으며, 폴리에틸렌 감속재 주변은 납벽돌로 차폐하였음. 열중성자 검출기는 산란 중성자를 차단하기 위해 전면부를 제외한 나머지 부분을 카드뮴으로 차폐시켰으며, 중성자 선원으로부터 거리 13.5cm에 열중성자 검출기를 설치하였음. 이후 차폐시험 시료가 없는 대기상태에서 중성자 계수율을 측정하였으며, 이를 중성자 차폐율 제로상태로 설정하였음. 이후 중성자 선원과 열중성자 검출기 사이에 각 콘크리트 시편을 거치한 후 중성자 계수율을 측정하였음. 그림○은 중성자 차폐 실험 시험장치를 나타낸 것임.



(a) 중성자 차폐성능 시험장치



(b) $^{241}\text{Am-Be}$ 중성자 선원

그림. 2-15 중성자 차폐성능 시험장치

나. 실험결과 및 고찰

(1) 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성

- 그림 16은 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량을 나타낸 것임. 전반적으로 모든 시편이 목표 슬럼프인 $150\pm 20\text{mm}$, 목표공기량 $3.5\pm 1.0\%$ 를 만족하는 것으로 나타남.

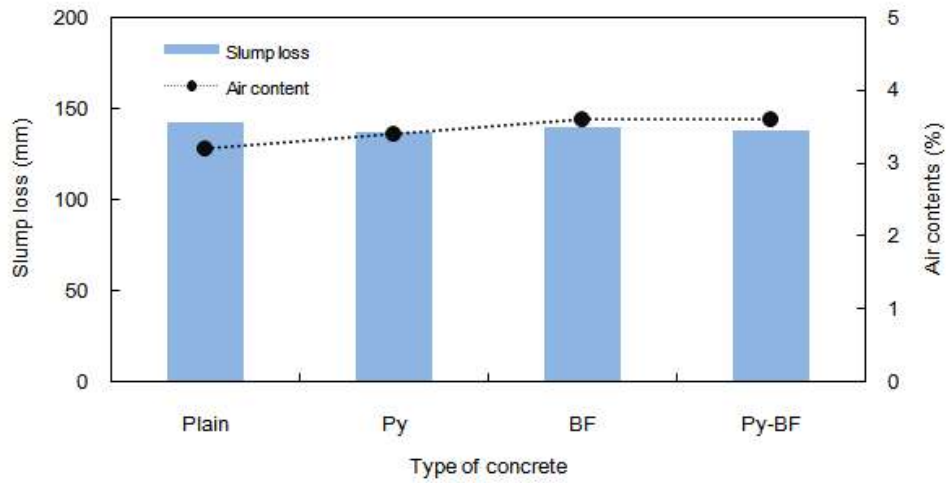


그림. 2-16 콘크리트의 슬럼프 및 공기량

(2) 압축강도

- 그림17은 각 콘크리트의 재령 3일, 7일, 28일에서의 압축응력-변형률 곡선을 나타낸 것임.

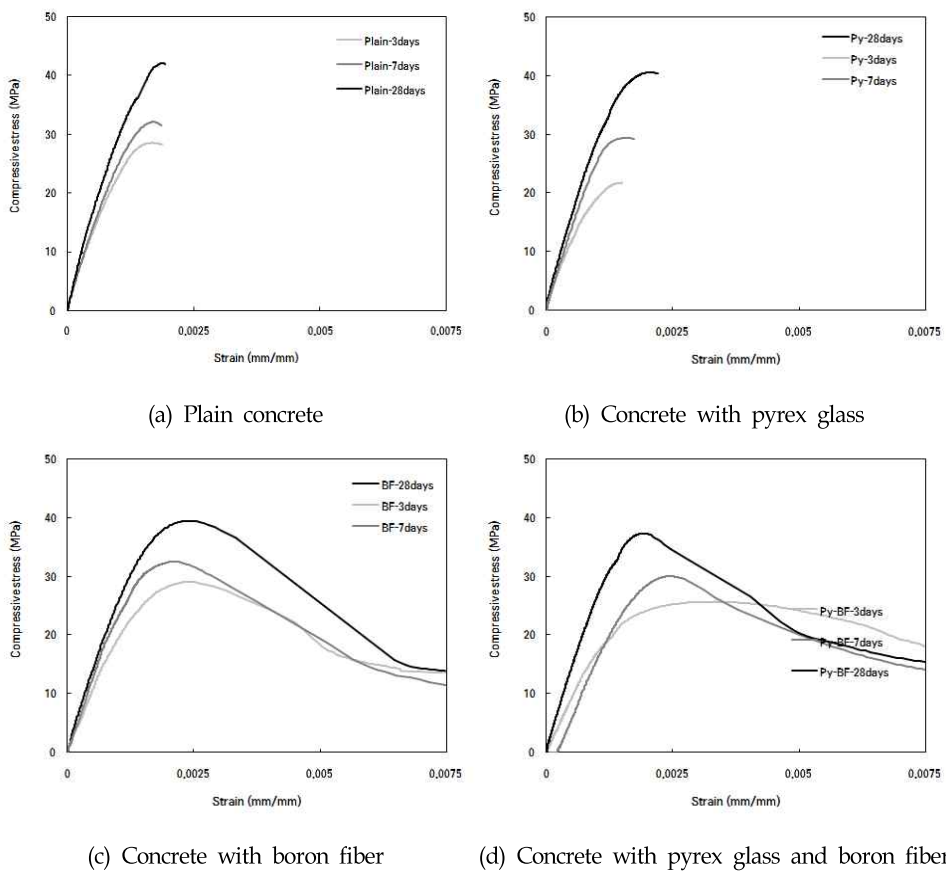


그림. 2-17 콘크리트의 압축응력-변형률 곡선

- 그림 18은 각 재령에서의 콘크리트 시편의 압축강도를 나타낸 것으로, 재령 28일에서의 콘크리트 시편의 압축강도는 목표강도인 35MPa를 모두 상회하는 것으로 나타났음. 붕규산 유리를 혼입한 콘크리트 시편(Py, Py-BF)의 경우, 조기재령(3일, 7일)에서는 Plain 콘크리트와 대비하여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타냈음. Py시편의 경우에는 재령 28일에서의 압축강도는 Plain 콘크리트와

대비하여 유사하게 나타났으나, Py-BF 시편의 경우는 상대적으로 낮은 압축강도를 나타냈음.

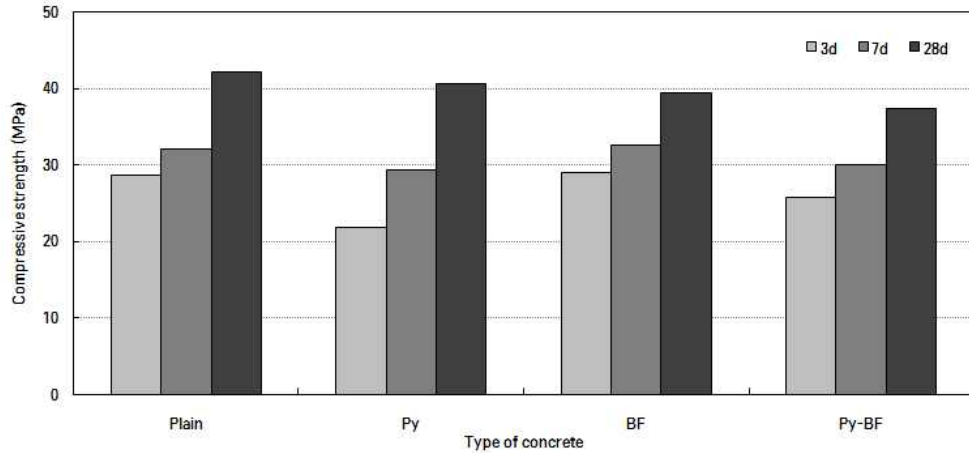


그림. 2-18 재령별 콘크리트의 압축강도

- 그림 19는 각 재령에서의 콘크리트 시편의 정탄성계수를 나타낸 것으로, 재령 28일에서의 콘크리트 시편의 탄성계수는 Plain 콘크리트와 대비하여 붕규산유리와 비정질 붕소강섬유를 혼입한 시편(Py, BF, Py-BF)이 상대적으로 낮은 것으로 나타났음. 비정질 붕소강섬유를 혼입한 시편(BF, Py-BF)의 경우 Plain 및 붕규산유리 혼입 시편에 비해 상대적으로 탄성계수가 저하되는 것으로 나타났음.

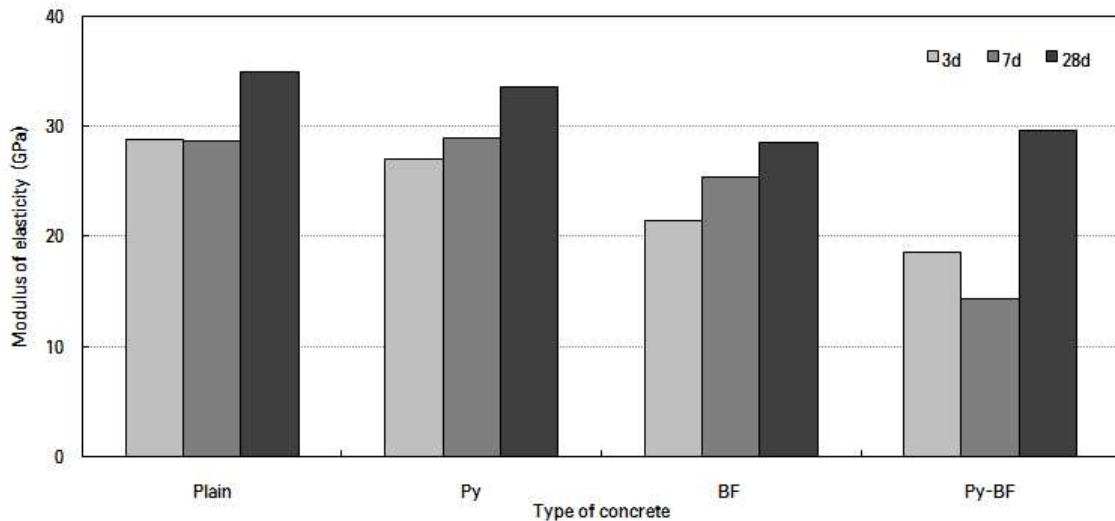


그림. 2-19 재령별 콘크리트의 정탄성계수

- 그림 20은 각 재령에서의 콘크리트 시편의 압축인성을 나타낸 것으로, 재령 28일에서의 콘크리트 시편의 압축인성은 비정질 붕소강섬유를 혼입한 시편(BF, Py-BF)이 현저하게 높은 것으로 나타났다. 이는 섬유를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 섬유를 혼입한 경우 최대하중 이후 섬유에 의한 인성 발현으로 하중에 대한 에너지를 흡수하기 때문으로 판단됨.

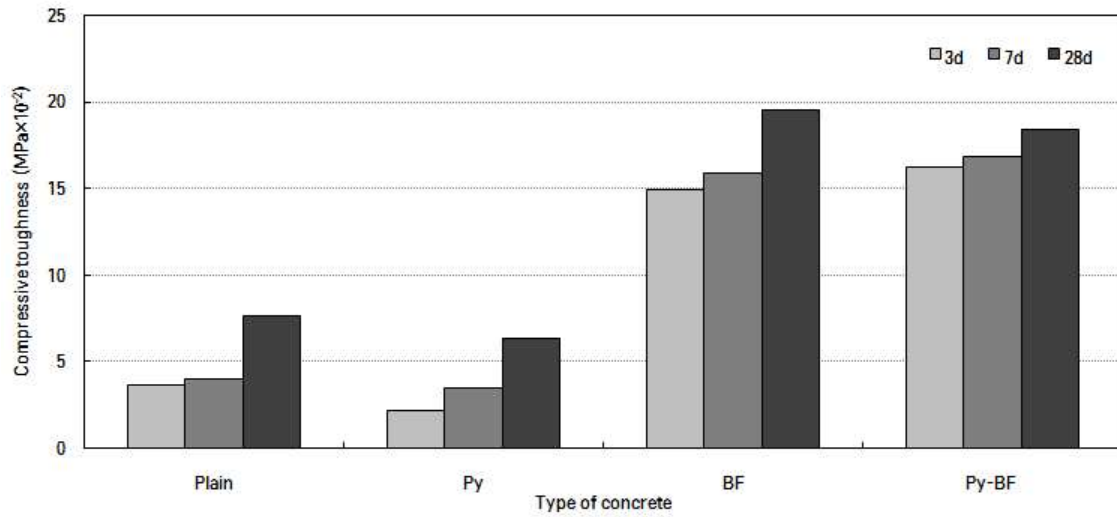


그림. 2-20 재령별 콘크리트의 압축인성

(3) 휨강도

- 그림 21은 휨강도 실험을 통해 획득된 재령 28일에서의 각 시편의 하중-변위 곡선을 나타낸 것임.

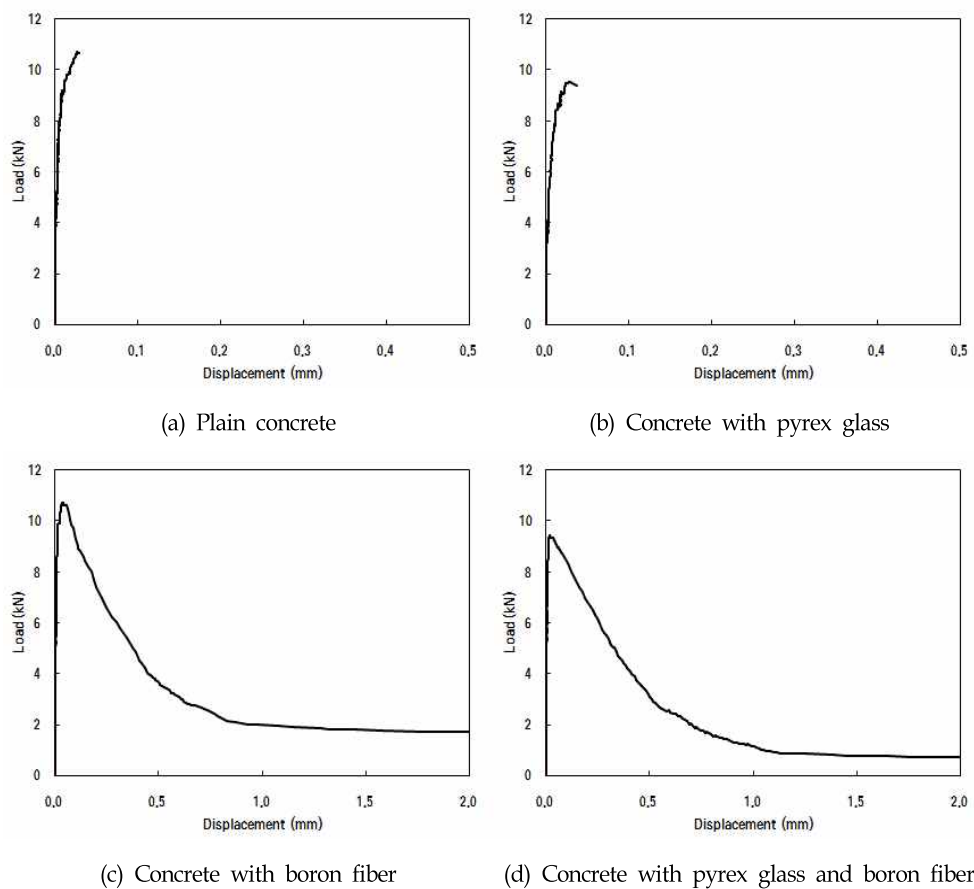


그림. 2-21 콘크리트의 휨하중-변위곡선 (재령 28일)

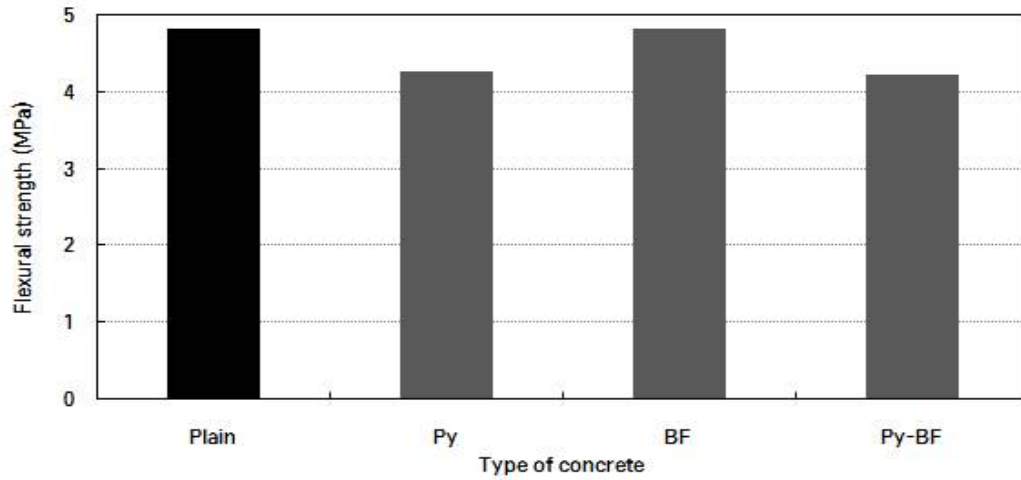


그림. 2-22. 콘크리트의 휨강도 (재령 28일)

- 그림22는 각 시편의 재령 28일에서의 휨강도를 나타낸 것으로, 붕규산유리를 혼입한 시편(Py, Py-BF)의 경우 Plain 시편에 비해 상대적으로 휨강도의 저하를 나타냈음. 비정질 붕소강섬유를 혼입한 시편의 경우 Plain 시편과 유사한 휨강도를 나타냈으며, 이를 통해 섬유 혼입율 1.0% 수준에서는 섬유혼입이 휨강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단됨.

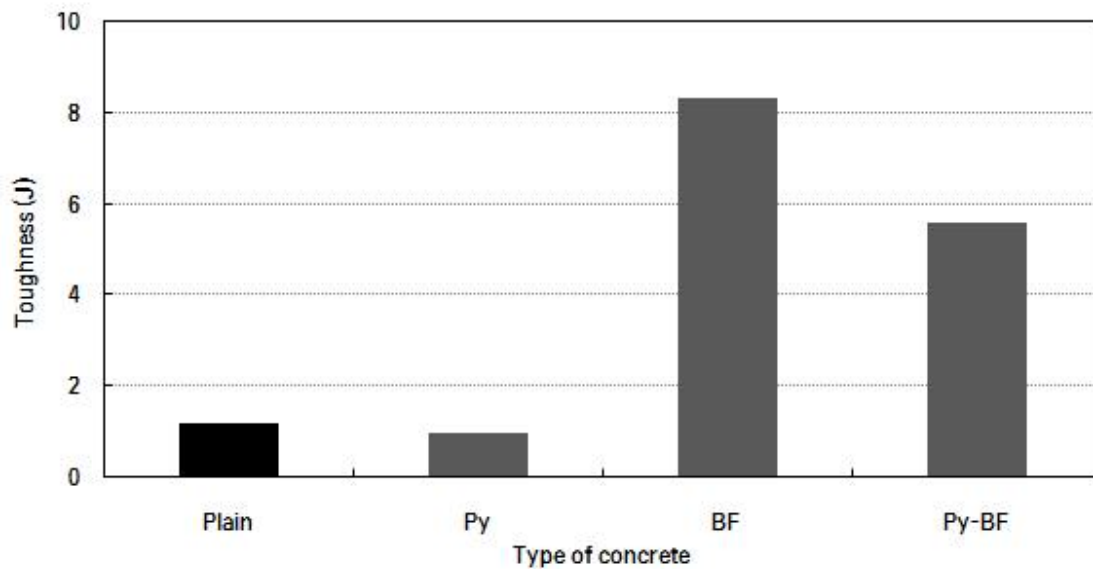


그림. 2-23 재령별 콘크리트의 휨인성

- 그림 23은 각 콘크리트 시편의 재령 28일에서의 휨인성을 나타낸 것으로, 전반적으로 섬유를 혼입한 시편(BF, Py-BF)의 경우 최대하중 이후 휨인성이 발현되는 것으로 나타났음.

(4) 중성자 차폐성능

- 표15와 그림24는 각 콘크리트의 중성자 차폐성능 실험결과를 나타내고 있음.

표. 2-15 중성자 차폐성능 실험결과

측정순서	차폐체	중성자 계수율 (s^{-1})	차폐율(%)
1	Air	32.0	0.00
2	Plain	10.1	68.44
3	Py	1.8	94.38
4	BF	4.5	85.94
5	Py-BF	1.5	95.31
6	Air	32.0	0.00

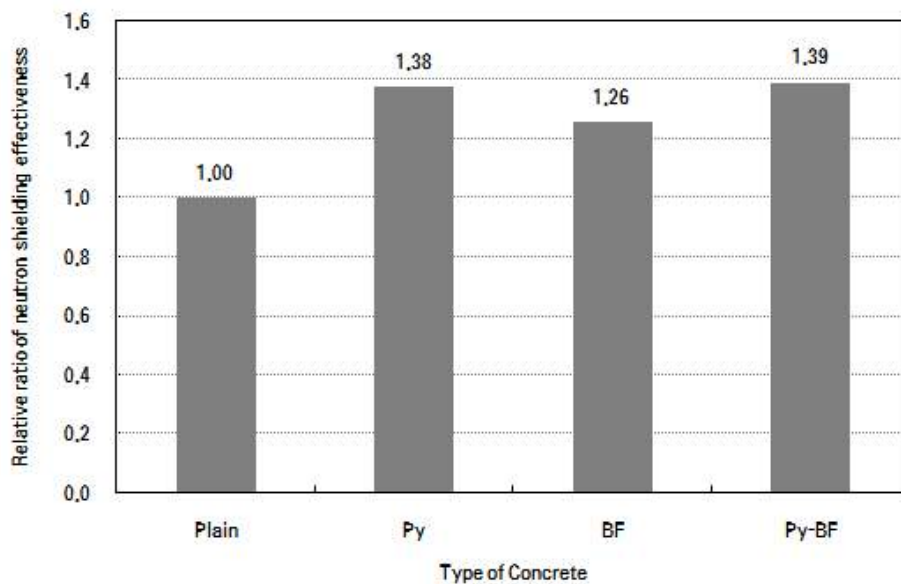


그림. 2-24 Plain 콘크리트 대비 각 콘크리트의 중성자 차폐성능

- 각 콘크리트의 중성자 차폐성능은 붕규산유리 및 비정질 붕소강섬유를 혼입한 콘크리트, 붕규산유리를 혼입한 콘크리트, 비정질 붕소강섬유를 혼입한 콘크리트, Plain 콘크리트 순으로 나타났음. Plain 콘크리트 대비하여 붕규산유리와 비정질 붕소강섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 1.39배, 붕규산유리를 혼입한 콘크리트의 경우 1.38배, 붕소강섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 1.26배의 중성자 차폐성능 향상을 나타냈음. 전반적으로 최종 선정된 배합비를 이용한 콘크리트의 경우 연구목표인 Plain 콘크리트와 비교하여 중성자 차폐성능이 1.2배 이상 향상되는 것으로 나타났음.

(5) 겉보기밀도

- 표16은 각 콘크리트의 겉보기 밀도를 나타낸 것으로, 전반적으로 목표밀도인 2.23을 만족하는 것으로 나타났음. 그러나 붕규산유리를 혼입한 시편(Py, Py-BF)의 경우 Plain 시편과 비교시 상대적으로 밀도가 낮아지는 경향을 나타냈음. 이는 Plain 시편에 사용된 잔골재에 비해 혼입된 붕규산유리의 비중이 낮기 때문인 것으로 판단됨.

표. 2-16 콘크리트의 겉보기 밀도

구분	Plain	Py	BF	Py-BF
높이(cm)	19.81	19.92	19.85	19.86
지름(cm)	9.82	9.89	9.84	9.92
부피(cm ³)	1500.3	1530.2	1509.5	1534.9
건조중량(g)	3578	3494	3554	3474
겉보기밀도(g/cm ³)	2.38	2.28	2.35	2.26

다. 총평

- 본 연구에서는 최종 선정된 배합비를 이용하여 콘크리트의 역학적 특성과 중성자 차폐성능을 평가하였음.
- 최종 선정된 배합비를 이용한 굳지 않은 콘크리트의 공기량과 슬럼프는 목표공기량 $3.5\pm 1.0\%$, 목표슬럼프 $150\pm 20\text{mm}$ 를 만족하였음.
- 재령 28일에서의 압축강도는 목표강도인 35MPa를 모두 만족하였으며, 비정질 붕소강섬유가 혼입된 콘크리트의 경우 최대응력 이후 압축인성이 발현되는 것을 확인할 수 있었음.
- 재령 28일에서의 휨강도는 전반적으로 약 4.5MPa 수준을 나타냈으며, 비정질 붕소강섬유가 혼입된 콘크리트의 경우 최대하중 이후 휨인성이 발현되는 것을 확인할 수 있었음.
- 최종 선정된 배합비를 이용한 콘크리트의 경우, Plain 콘크리트와 대비하여 중성자 차폐성능이 목표치인 1.2배 이상으로 나타났으며, 붕규산유리와 비정질강섬유를 동시에 혼입한 콘크리트의 경우 가장 높은 중성자 차폐성능을 나타냈음.
- 최종 선정된 배합비를 이용한 콘크리트의 겉보기 밀도는 목표치인 2.23을 모두 상회하는 것으로 나타났으나, 붕규산유리를 혼입한 경우에는 겉보기 밀도가 상대적으로 저하되는 경향을 나타냈음.
- 최종 선정된 배합비를 이용한 콘크리트는 슬럼프, 압축강도, 겉보기밀도 등 물리역학적 성능에 있어서 본 연구의 목표치를 만족하였으며, 중성자 차폐성능 또한 목표치를 만족하는 것으로 나타났음.

위탁-A 중성자 차폐용 혼화재료의 물성평가 및 최적배합 산출

1. 1차년도에 추가적인 배합 및 실험

가. 붕규산 유리 골재 및 분말을 사용한 모르타르 배합

- 1차년도의 실험 결과를 토대로 하여 붕규산유리 골재를 사용할 경우에 발생하는 ASR 팽창을 억제하는 붕규산유리 미분말의 적정 혼입량을 찾아냄.
- 또한 붕규산유리 미분말을 더 추가하여 사용할 경우, 모르타르에 함유되는 B_2O_3 의 양이 증가하게 되므로 중성자 차폐에 더욱 효과적일 것으로 판단함.

표. 3-1 유리 골재 모르타르 시험편의 배합표

Sample	w/c	Weight (g)			
		Water	Cement	Glass powder	Glass aggregate
0.47-GPL	0.47	406.55	865.0	-	1,946.25
0.47-G10			778.5	86.5	
0.47-G20			692.0	173.0	
0.40-GPL	0.40	346.00	865.0	-	
0.40-G10			778.5	86.5	
0.40-G20			692.0	173.0	

나. 모르타르 시험편 제작

- 모르타르 시험편의 배합은 이전 실험에서 ASTM C 1260을 기준으로 하여 배합하였을 시 W/C 0.47의 조건에서 플레인 모르타르에 비하여 플로우가 저하되는 결과를 나타냄. 따라서 W/C 0.47 이하의 물시멘트비를 적용할 경우 추가적으로 혼화제를 사용해야 할 것으로 판단되어 적용하지 않음.
- 시험편의 형상은 ASTM C 440과 ASTM C 1260에 따라 제작함.

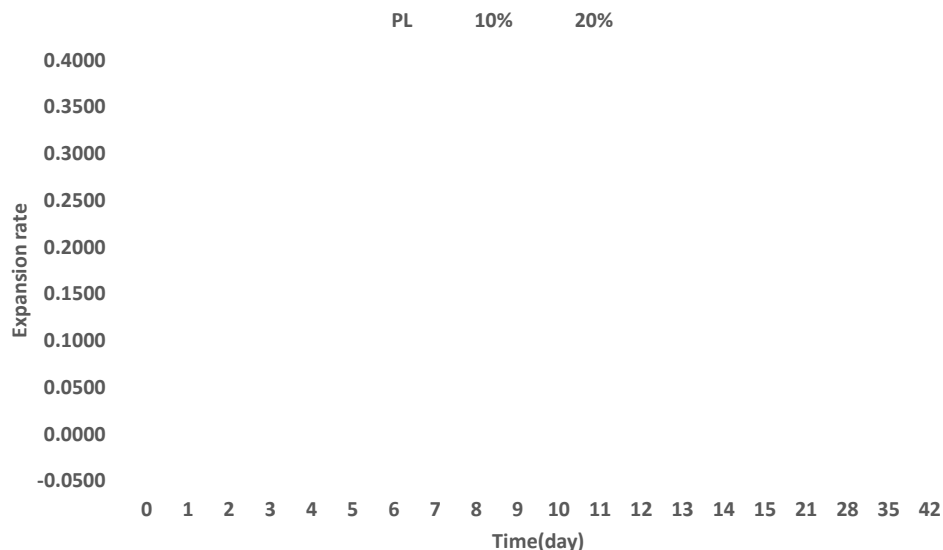


그림. 3-1 w/c 0.47 붕규산유리 골재 모르타르의 ASR 팽창율

- ASR 팽창 반응 실험 결과에서 20%의 붕규산 유리 골재로 인하여 발생하는 팽창을 확연히 저하시킬 수 있는 것으로 나타남.

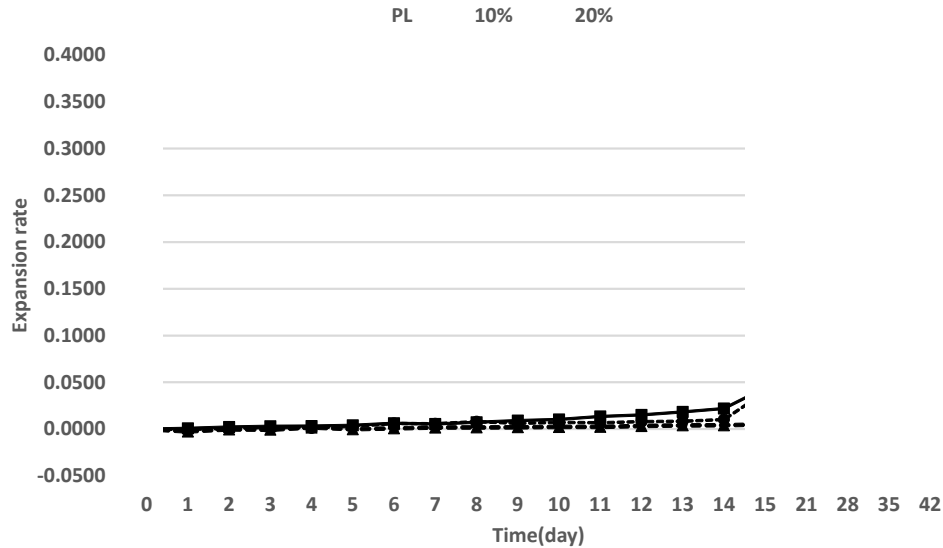


그림. 3-2 w/c 0.40 붕규산유리 골재 모르타르의 ASR 팽창율

- 기본 w/c 인 0.47 이외에 별도로 실시한 w/c 0.40의 배합에서도 붕규산 유리 미분말 혼입률이 20%인 시험체가 팽창을 억제하는 것으로 나타남.



그림. 3-3 ASR 팽창으로 파괴된 모르타르 막대 시편의 균열부

- w/c 0.40 및 0.47의 배합에서 Plain 및 10%의 혼입률을 갖는 시험체는 팽창으로 인하여 파괴되는 기간은 각기 1~2주간의 다른 간격을 두고 파괴되는 양상을 나타냈으나, 두 w/c 모두 20%의 혼입률에서 확연한 팽창 억제를 나타는 것으로 확인됨.
- 약 42일차의 측정에서 시험체가 파괴됨을 확인할 수 있었으며, 파괴되기 직전의 측정값 범위는 0.30~0.34의 1/30 정도였으며, 20% 혼입한 시험체는 0.010~0.012정도의 팽창율을 나타내는 것으로

확인됨.

다. XRD, TG/DTA

- 시멘트 페이스트 시험편의 배합 및 양생은 글로브 박스 내부에서 작업함. 또한 배합수의 경우에도 2차 증류수를 가열하고 냉각 시키는 과정에서 질소 가스를 충분히 주입하여 배합수 내부의 이물로 인한 수산화칼슘의 소비가 없도록 방지함.
- TG/DTA는 1200℃의 온도까지 분당 10℃씩 상승시킴.

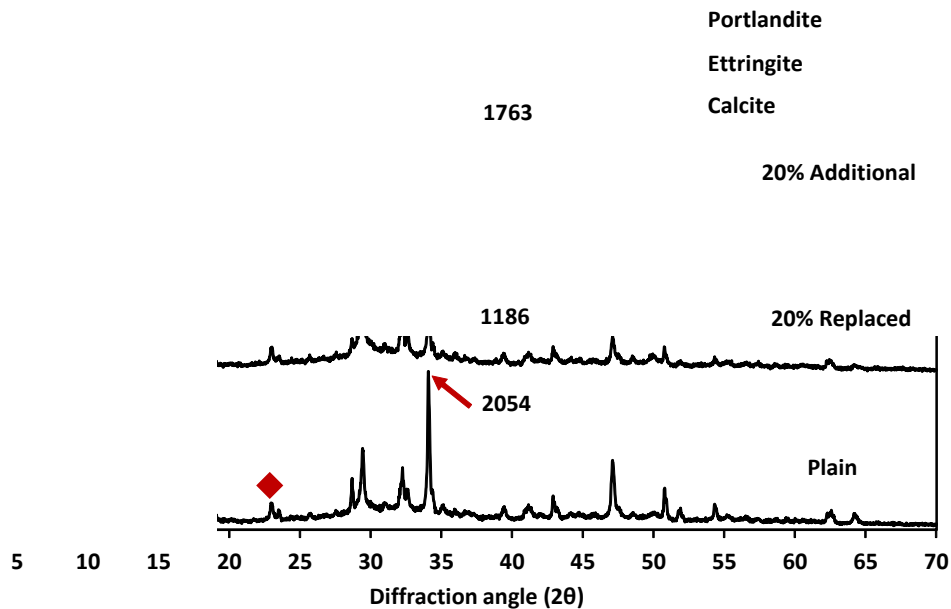


그림. 3-4 시멘트 페이스트 시편의 XRD 그래프

표. 3-2 시멘트 페이스트 시편의 수산화칼슘 peak

구 분 \ 시 편	Plain	20% replaced	20% additional
수산화칼슘 peak intensity	2,054	1,186	1,763
Plain 대비 감소량(%)	-	42.26	14.17

- XRD 패턴 분석을 통해 수산화칼슘의 존재를 확인하고 2θ 회절각 34.088°에 위치한 수산화칼슘의 main peak intensity를 비교 분석한 후 붕규산 유리 미분말을 혼입한 시멘트 페이스트에서 수산화칼슘 peak 값이 감소되는지의 여부를 확인함.
- 붕규산 유리 미분말을 혼입하지 않은 plain 시험체의 수산화칼슘 main peak intensity는 2054로 나타났고, 20%를 치환한 시험체(20% replaced)의 main peak intensity는 1186, 20%를 추가한 시험체(20% additional)은 1764으로 관찰되어 각각 plain 시험체 대비 42.26%, 14.17% 감소한 것으로 나타남.
- 외기가 차단된 질소 환경의 글로브 박스 내부에서 배합 및 양생된 시험체가 내부의 수산화칼슘이 포졸란 반응에 의해서만 소비될 것이므로 상기의 결과를 미루어 보아 붕규산 유리 미분말이 포졸란 반응의 거동을 한 것으로 나타남.
- TG/DTA를 통하여 Plain 시멘트 페이스트 시험체의 중량감소율과 시멘트 중량 대비 20%의 붕규

산유리 미분말 대체 시험체와 추가 시험체의 중량감소율을 비교하여 붕규산 유리 미분말의 포졸란 반응성을 알아본 결과,

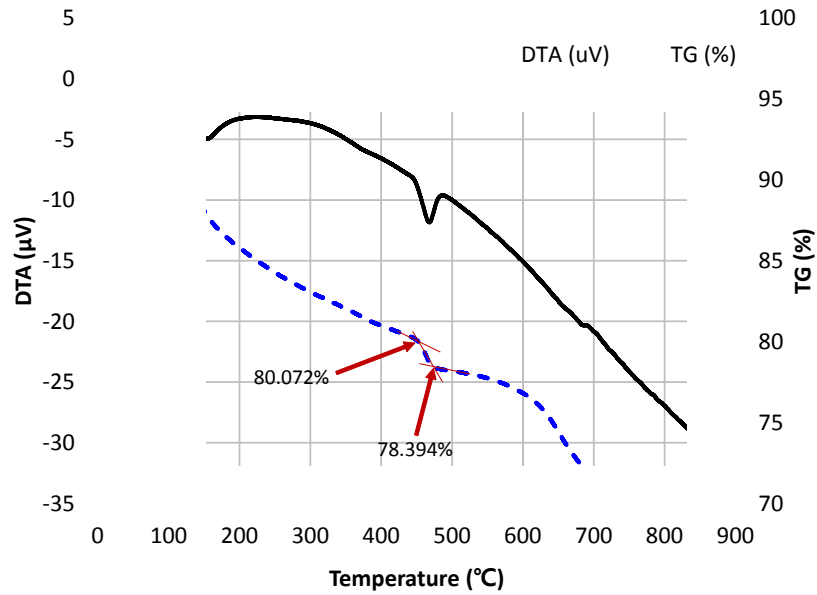


그림. 3-5 Plain 시편의 TG/DTA 그래프

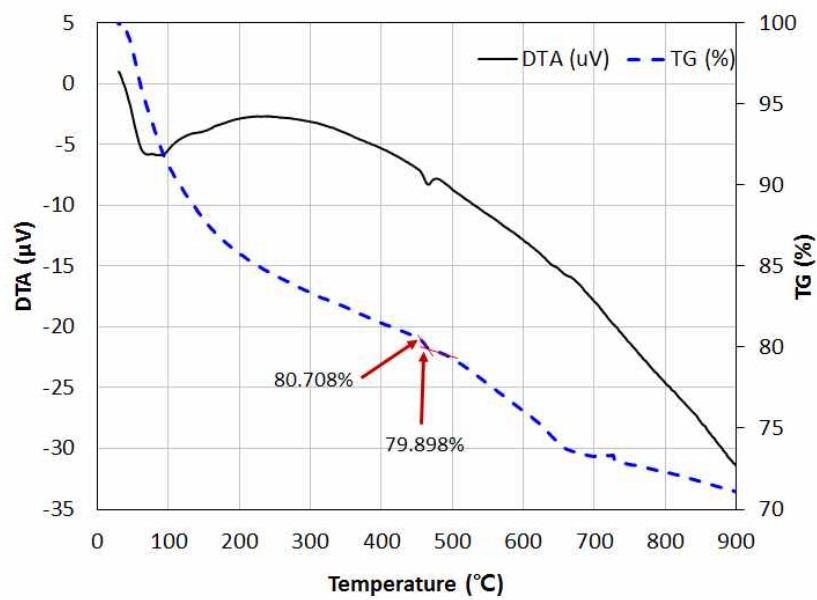


그림. 3-6 20% Replaced 시편의 TG/DTA 그래프

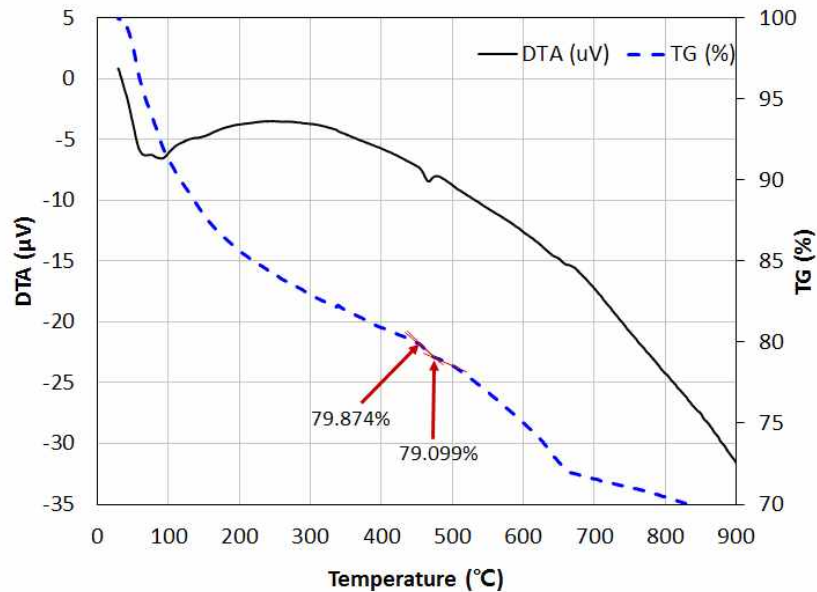


그림. 3-7 20% Additional 시편의 TG/DTA 그래프

표. 3-3 시멘트 페이스트 시편의 TGA 중량감소율

구분 \ 시편	Plain	20% Replaced	20% Additional
분해 전 측정값(%)	80.072	80.708	79.874
분해 후 측정값(%)	78.394	79.898	79.099
감소량(%)	1.678	0.81	0.775
Plain 대비 감소량(%)	-	51.728	53.814

- TG/DTA 그래프에서 DTA 곡선의 변곡점 간 차이를 보면 수산화칼슘의 분해가 일어나기 전의 중량감소율이 Plain 시험체는 80.072%, 20% 치환한 시험체(20% replaced)는 80.708%, 20% 추가한 시험체(20% additional)는 79.874% 으로 확인되었음. 반면에 분해가 일어난 후의 중량감소율은 Plain 시험체가 78.392%, 20% 치환한 시험체는 79.898%, 20% 추가한 시험체는 79.099%로 각각 1.678%, 0.81%, 0.775%가 감소하는 것으로 나타나 붕규산 유리 미분말이 포졸란 반응을 하는 것을 확인할 수 있었음.

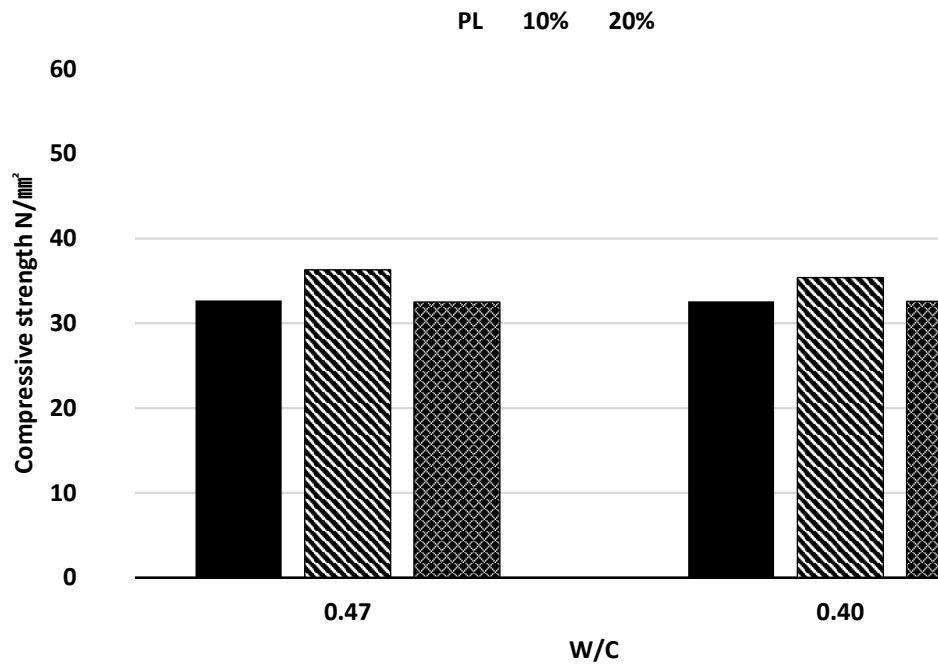


그림. 3-8 봉규산 유리 미분말을 혼입한 모르타르 시험체의 압축강도

- 주문진 표준사를 사용한 모르타르 배합에서 시멘트 중량의 10, 20%를 봉규산 유리 미분말로 대체한 시험체의 압축강도를 측정함. plain 시험체에 비하여 10% 대체한 시험체의 압축강도가 w/c 0.47에서 11%, w/c 0.40에서 약 8% 증가하는 것으로 나타났으며 20% 대체한 시험체의 경우에는 w/c 0.47 및 0.40 모두 plain 시험체의 압축강도 측정값과 큰 차이가 없는 것으로 나타남.

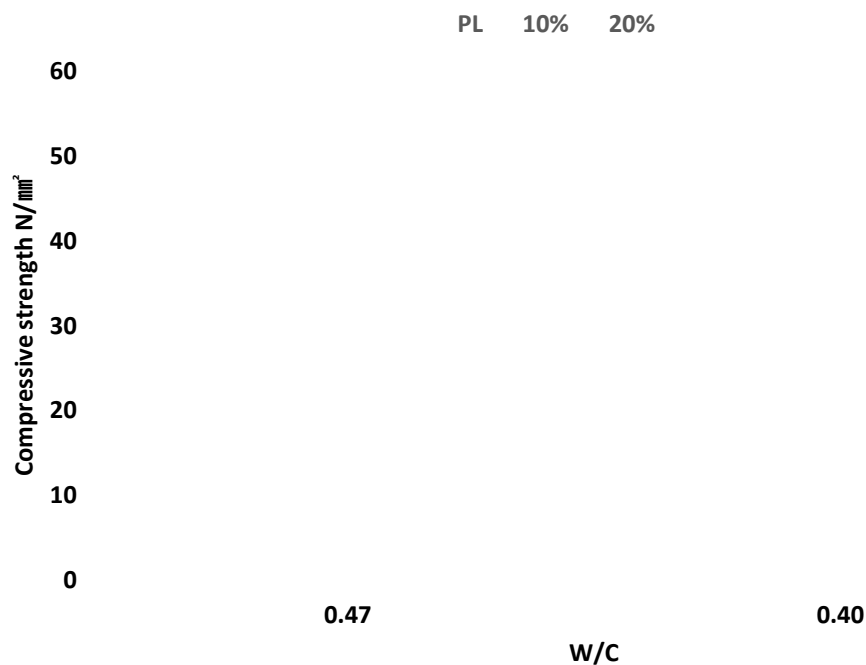


그림. 3-9 봉규산 유리 골재 및 미분말을 사용한 모르타르 시험체의 압축강도

- 모르타르의 잔골재 전량을 붕규산 유리로 대체한 시험체의 압축강도를 측정한 결과, plain 시험체에 비하여 10%를 치환한 시험체가 w/c 0.47에서 약 10%, w/c 0.40에서 약 21% 증가한 것을 확인할 수 있었음. 20%를 치환한 시험체의 경우에는 w/c 0.47에서 약 58%, w/c 0.40에서 약 80%정도 압축강도가 증가함.

2. 자료조사

가. 자료조사 방법

- Boron이 중성자 차폐재에 여러 형태로 사용되고 있으며 특히 Boron carbide의 경우 원자로 심재에 사용되는 등 중성자 차폐능이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있음. 그러나 본 연구의 목적인 Borosilicate glass의 경우 B_2O_3 의 차폐능을 기대하기 이전에 ASR로 인한 팽창이 우려되어 이에 대한 조사를 진행함.

나. 조사결과 정리

- 논문의 원문 내용을 그대로 가져오기 위해 영어로 정리함.

	논문 제목	저널명	유용한 내용
1	Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders	Cement and Concrete Research 35 (2005)	- Finely ground glass powders exhibited very high pozzolanic activity. The finer the glass is, the higher its pozzolanic activity is.
2	New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion	Journal of the american concrete institute (May 1951)	- No claim is made that the addition of lithium salts or other inhibitors is the answer to the alkali-aggregate expansion problem. These materials may be too expensive for practical use in concrete.
3	Studies on concrete containing ground waste glass	Cement and Concrete Research 30 (2000)	- Waste glass, if ground finer than $38\mu m$, did exhibit a pozzolanic behavior. The compressive strength of lime glass mixture was higher than the threshold limit of 4.1MPa.
4	Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete	Waste management 29 (2009)	- The pozzolanic effect of waste glass in concrete is more obvious at the later age of 28 days. The optimum percentage of waste glass that gives the maximum values of compressive and flexural strengths is 20%
5	Review on the addition of boron compounds to	Progress in Nuclear Energy 53 (2011)	- The addition of boric acid and its pure frit is not suitable for enhancement of the shielding properties of concrete, because of the deleterious effects on the

	radiation shielding concrete		setting process of cement - Borax has no obvious effect on the shielding efficiency against neutrons in thin concrete shields (10cm), but some good effect on the decrease of dose due to capture gamma rays - Borax has significant effects on shielding efficiency in thick concrete (100cm) shields, because it reduces the capture gamma rays up to 80% better than unborated concretes.
6	Value-added utilisation of waste glass in concrete	Cement and Concrete Research 34 (2004)	- The use of GLP(glass powder) in concrete would prevent expansive ASR in the presence of susceptible aggregate - It(glass powder) could be used as a replacement for expensive materials such as SF, fly ash and cement

다. 총평

- 붕규산 유리 분말을 혼입한 시멘트 페이스트의 XRD, TG/DTA를 통하여 포졸란 반응성을 나타내는 것을 알 수 있었음.
- 중성자 차폐능을 향상시키기 위함과 붕규산 유리 골재를 혼입할 경우 발생하는 ASR 팽창을 줄이기 위한 목적으로 붕규산 유리 미분말을 붕규산 유리 골재 모르타르에 사용함. 이 결과 Plain 시험체 및 시멘트 중량 대비 10%의 붕규산 유리 분말을 사용한 시험체의 경우 4~7주의 기간에 시험체가 과도한 팽창으로 측정이 불가하였으나, 20%를 사용한 시험체의 경우에는 장기적인 측정에서도 팽창이나 미세한 균열이 발생하지 않은 것으로 나타남.
- 붕규산 유리를 골재로 사용한 모르타르의 압축강도를 측정한 결과, 붕규산 유리 분말을 사용하지 않은 Plain 시험체에 비하여 압축강도가 비약적으로 상승함. 특히 시멘트 중량 대비 10%를 사용한 시험체에 비하여 20%를 사용한 시험체의 경우가 상대적으로 더 높은 압축강도를 나타냄.

3. 2차년도 추가 실험

가. 붕규산 유리 분말의 최적 혼입률을 추정을 위한 실험

- 상기의 연구 결과를 토대로 시멘트 페이스트 시험체에서 더욱 다양한 비율로 혼입된 붕규산 유리 미분말의 포졸란 반응성에 대한 추가적인 실험이 필요하다고 판단됨. 시멘트 중량 대비 20%의 붕규산 유리 미분말을 대체한 실험에서 목표치에 해당하는 결과를 얻을 수 있었으나 세부적인 배합을 정하기 위하여 혼입률 10%부터 30%까지 5%단위마다 적용한 배합을 산정하여 TG/DTA를 실시함.

표. 3-4 시멘트 페이스트 시험체 배합표

단위 : (g)

재료 비율	cement	glass powder	water
10%	45.0	5.0	23.5
15%	42.5	7.5	
20%	40.0	10.0	
25%	37.5	12.5	
30%	35.0	15.0	

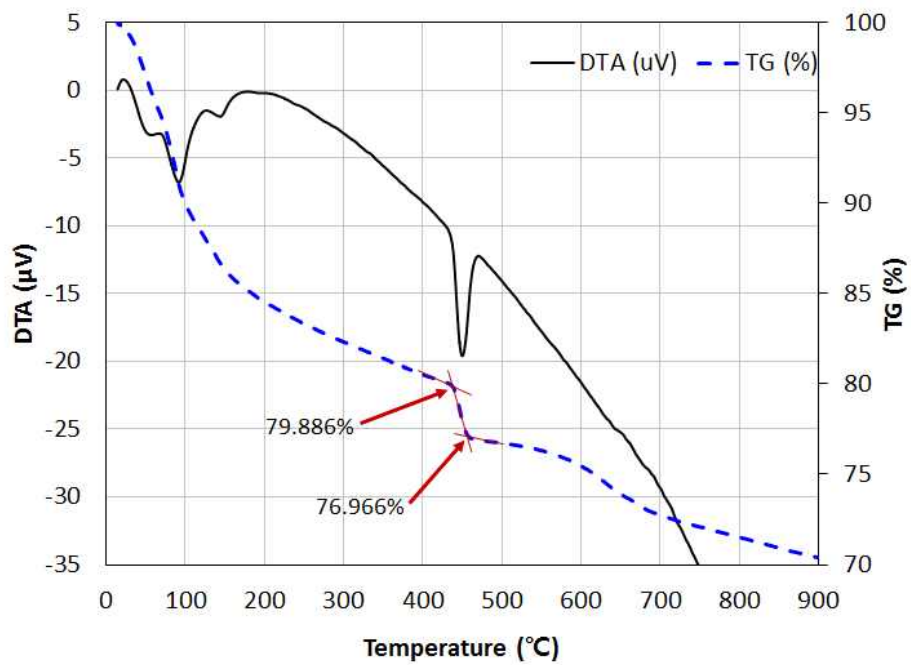


그림. 3-10 10% 시편의 TG/DTA 그래프

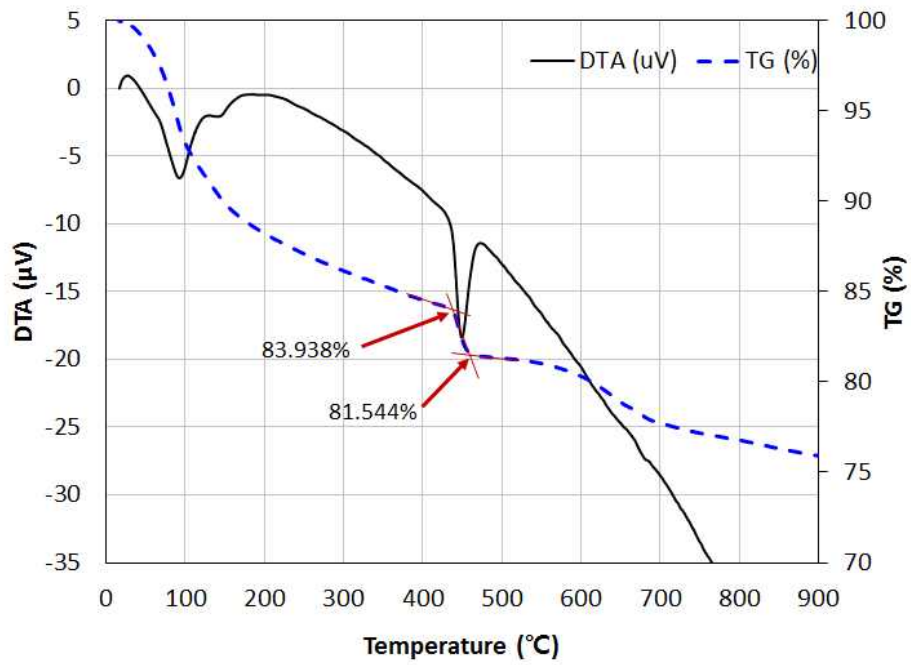


그림. 3-11 15% 시편의 TG/DTA 그래프

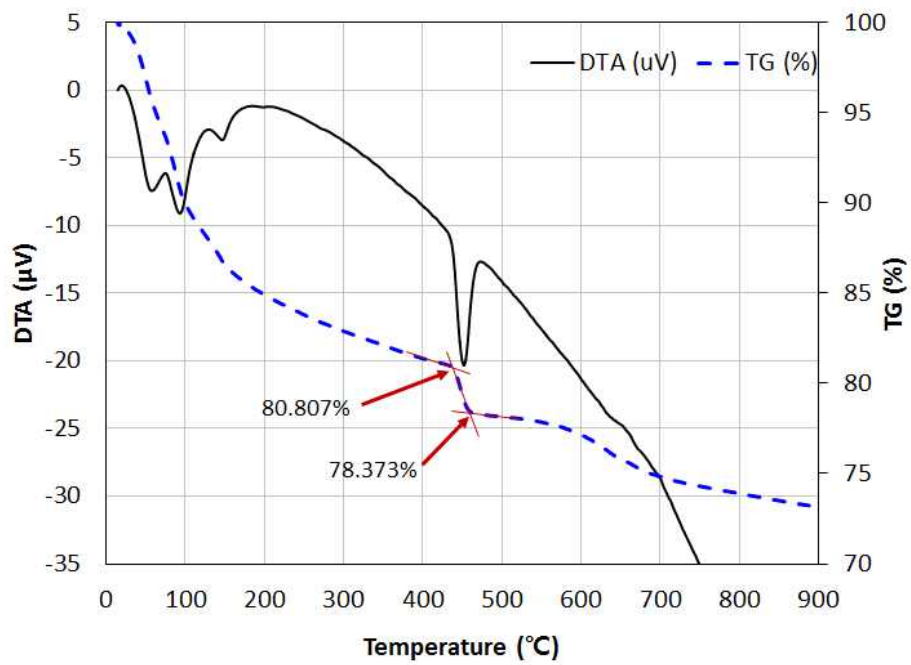


그림. 3-12 20% 시편의 TG/DTA 그래프

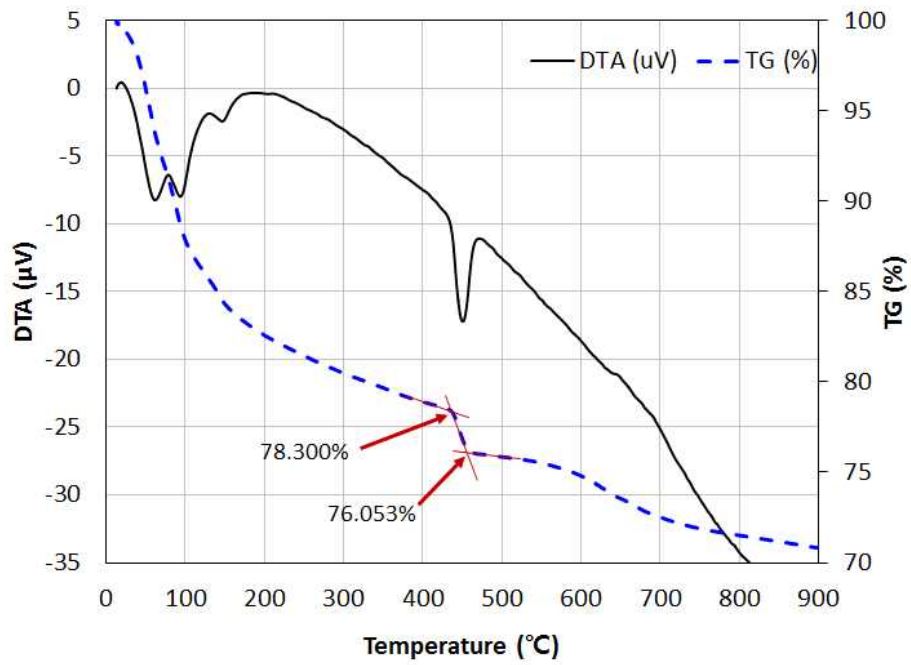


그림. 3-13 25% 시편의 TG/DTA 그래프

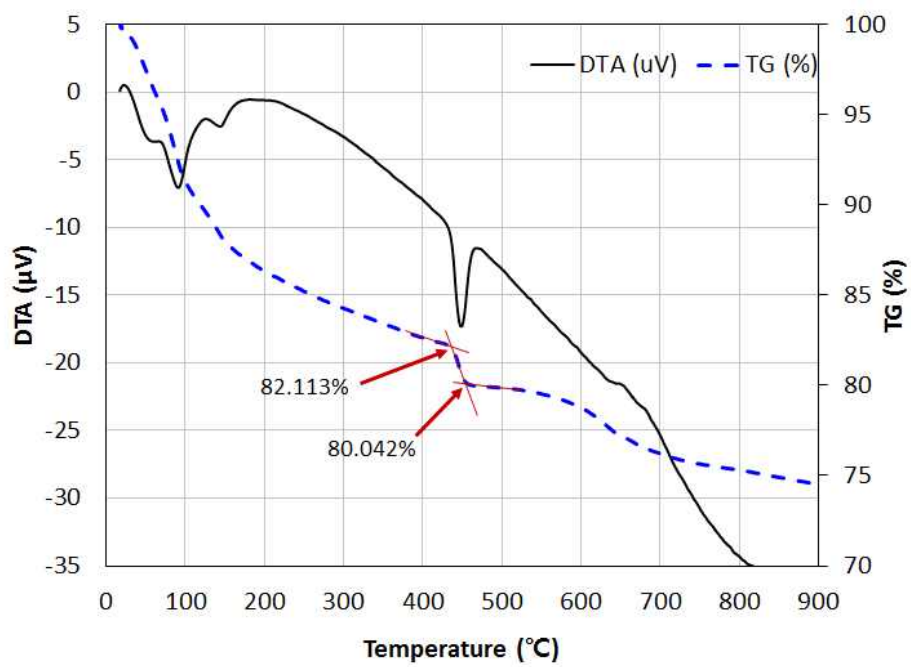


그림. 3-14 30% 시편의 TG/DTA 그래프

표. 3-5 붕규산 유리 분말 혼입 시멘트 페이스트 시험체의 10~30% TG/DTA 결과

단위 : (%)

구분 \ 시편	10%	15%	20%	25%	30%
분해 전 측정값	79.886	83.938	80.807	78.300	82.113
분해 후 측정값	76.966	81.544	78.373	76.053	80.042
감소량	2.92	2.394	2.434	2.247	2.071

- TG/DTA를 통하여 각 시험체의 450℃ 부근에서의 수산화칼슘 분해량을 측정한 결과, 붕규산 유리 미분말을 많이 투입할수록 수산화칼슘의 분해량이 감소하는 것으로 나타남. 외기와의 접촉이 철저히 배제된 질소 환경의 글로브 박스 내부에서 배합 및 양생된 시멘트 페이스트의 수산화칼슘 잔존량이 적다는 것은 포졸란 반응에 수산화칼슘이 소비되었음을 의미함.

나. 붕규산 유리 골재 모르타르의 열중성자 차폐 시험

- 본 실험은 한국표준과학연구원에 의뢰하여 열중성자 차폐능을 측정함.

표. 3-6 열중성자 차폐능 실험을 위한 모르타르 배합표

재료 배합	w/c	Weight (g)				
		Fine aggregate	Glass aggregate	Cement	Glass powder	물
Plain	0.47	990	-	440	-	206.8
Plain-R		990	-	352	88	
BG		-	990	440	-	
BG-R		-	990	352	88	
BG50		495	495	440	-	
BG50-R		495	495	352	88	

표. 3-7 열중성자 차폐 계수율

차폐재	중성자 계수율 (s^{-1})	A형 확장불확도* (%)
공기	56.1	0.7
Plain	39.7	0.6
Plain-R	29.0	1.7
BG	5.8	2.0
BG-R	5.7	1.9
BG50	10.3	2.0
BG50-R	9.9	1.6

- 상기의 표를 보아 붕규산 유리 분말의 경우 일반적으로 사용되는 모르타르 배합에 시멘트 대체재로 20% 정도 사용하여도 중성자 계수율이 Plain 시험체에 비하여 약 25%정도 감소하는 것으로 나타남. 또한 골재 전량을 붕규산 유리로 사용하며, 붕규산 유리 분말을 사용하여 내부에 함유된 B2O3 성분의 중성자 차폐능 효과를 극대화 하고자 한 배합(BG-R)의 경우에는 5.7의 계수율을 나타내어 Plain 시험체에 비하여 1/7~1/8 수준의 계수율을 나타내어 매우 우수한 중성자 차폐능을 갖는 것으로 나타남.

다. 붕규산 유리 혼입 모르타르의 적정 배합비 산출

- ASR에 의한 팽창을 억제하기 위한 적정 혼입량을 알아보기 위한 추가적인 실험 또한 필요할 것으로 판단됨. 다만, 전년도 실험에서 10% 혼입률이 팽창, 20%의 혼입률이 ASR 팽창이 억제되는 결과를 토대로 10%, 15%, 20%의 혼입률을 적용한 배합으로 실험을 실시함.

표. 3-8. 길이변화 측정을 위한 모르타르 시험체의 배합표

Sample	w/c	Weight (g)			
		Water	Cement	Glass powder	Glass aggregate
10% mortar	0.47	413.6	792	88	1980
15% mortar			748	132	
20% mortar			704	176	

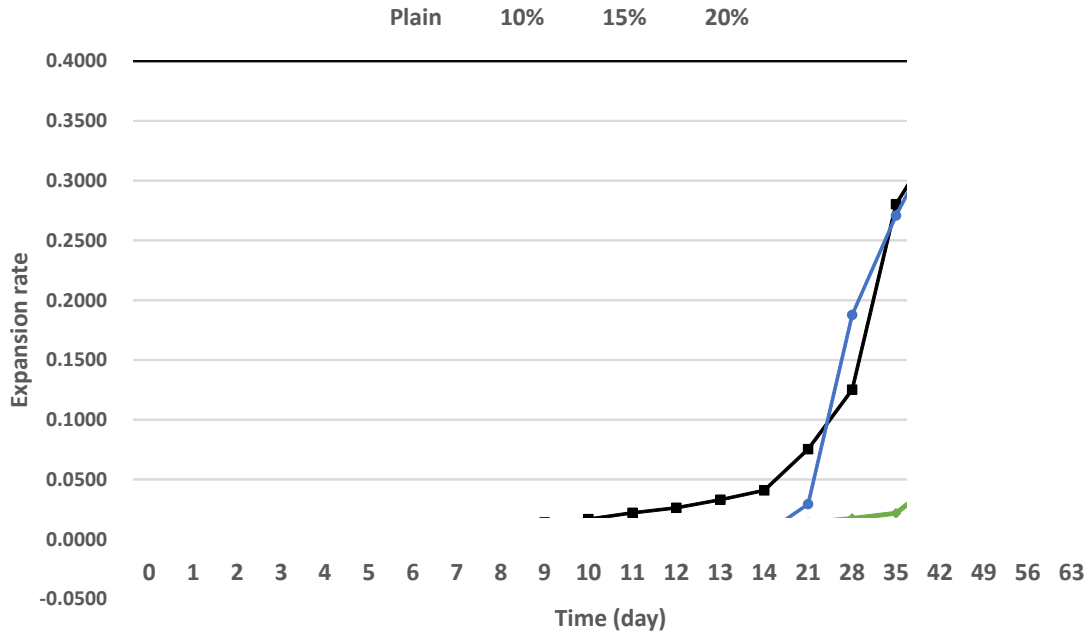


그림. 3-15 붕규산 유리 골재 모르타르의 팽창 곡선

- 상기의 결과를 보면 15%를 혼입한 시험체의 경우, Plain 시험체 및 10%를 혼입한 시험체에 비하여 상대적으로 ASR 팽창이 늦게 발현되는 것을 확인할 수 있었으나, 장기적으로 관찰하였을 경우, 42일의 측정값부터 폭발적으로 팽창하기 시작하여 56일의 측정값 이후로는 측정이 불가하였으며, 작은 충격에도 시험체가 파괴되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 20%를 혼입한 시험체의 경우 이후에도 지속적으로 실행된 측정에서도 ASR로 인한 이상 팽창은 나타나지 않았으며, 이는 붕규산 유리 분말의 포졸란 반응으로 ASR 반응을 억제한 것으로 판단된다.

라. 탄화붕소를 적용한 모르타르

- 탄화붕소(B_4C ; Boron carbide)의 경우 물질 자체에 붕규산 유리에 부분적으로 함유된 B_2O_3 보다 훨씬 많은 붕소를 갖고 있으며 원자로 심재로 사용되고 있는 재료이므로 이를 사용할 경우 확실한 중성자 차폐능을 갖게 될 것으로 판단하여 모르타르에 적용하는 방안을 모색함.
- 붕규산 유리의 경우, 그 물질의 일부분이 붕소 성분을 갖는 것이나 탄화붕소의 경우 대부분의 성분이 붕소이지만, 붕소 성분을 갖는 물질(대표적으로 Borax)을 콘크리트나 모르타르에 적용할 경우, 응결 및 경화에 영향을 미치게 되어 강도의 저하를 나타내는 것으로 알려져 있음. 따라서 전기전도도를(Electric conductivity)를 통하여 탄화붕소의 포졸란 반응성을 우선적으로 확인함.

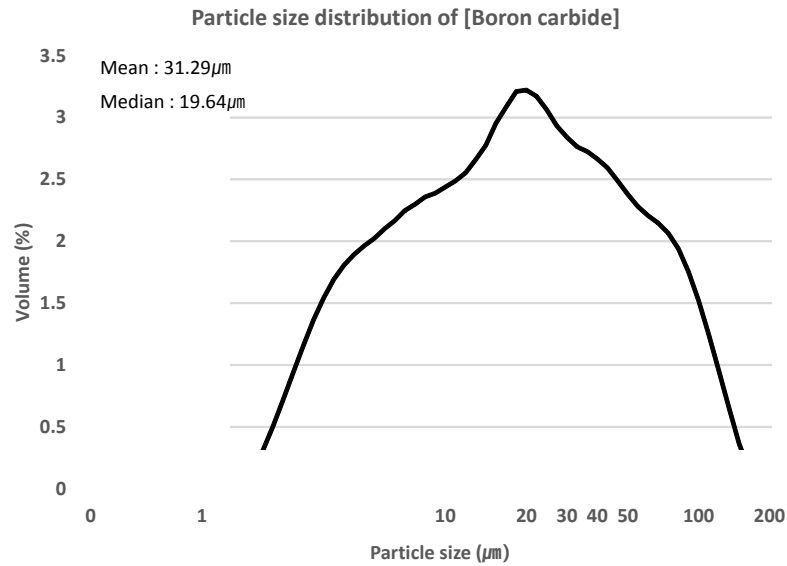


그림. 3-16 전기전도도 측정에 사용된 Boron carbide powder의 PSD

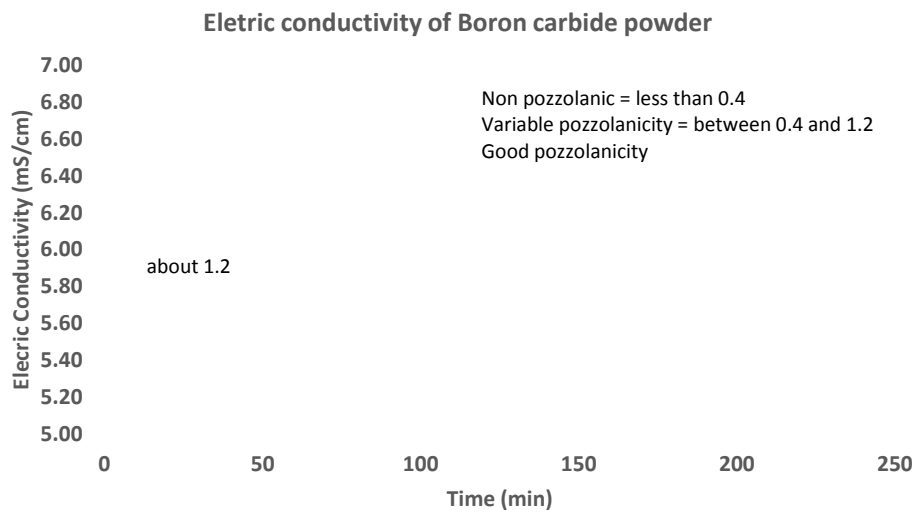


그림. 3-17 Boron carbide powder의 전기전도도

- 일반적으로 탄화붕소(B₄C; Boron carbide)를 사용할 경우에는 그 자체로서의 포졸란 반응성을 기대하기는 어려워 Disk mill을 활용하여 최대한 입자크기를 줄여 전기전도도를 측정하였다.
- 탄화붕소 분말의 전기전도도 측정 결과 초기 측정값과 최종 측정값간의 차가 약 1.2정도로 나타나 약한 포졸란 반응성을 띄는 것으로 나타났다.

표. 3-9 관입저항실험 시멘트 페이스트 배합

Material Sample	(g)	w/c	Water	Cement	B ₄ C powder
PL		0.3	600	2000	-
B ₄ C				1600	400

응결/경화 측정 그래프

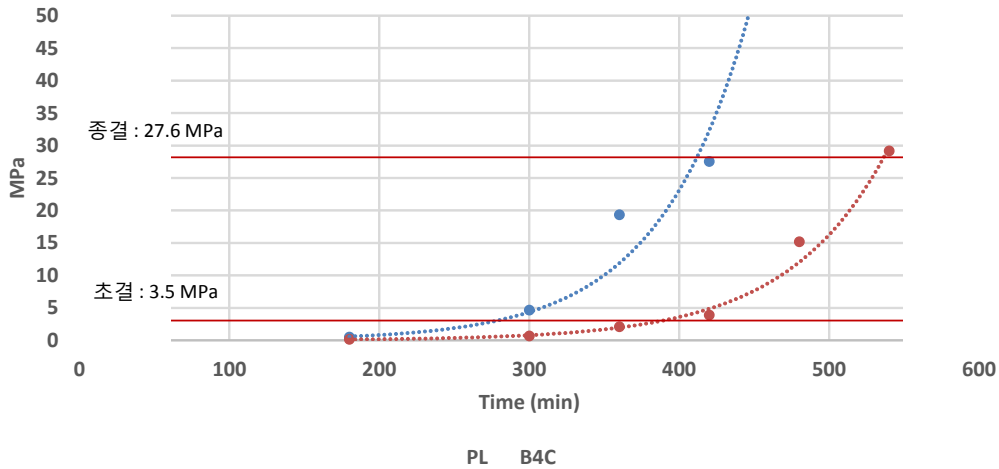


그림. 3-18 Boron carbide의 관입저항실험결과

- 상기의 실험에 사용된 탄화붕소 분말을 사용하여 관입저항실험을 실시한 결과, Plain 시험체에 비하여 상대적으로 느리게 강도가 발현되는 것으로 나타났다.
- 이러한 결과를 얻기 위하여 상당한 시간을 소비(약 30g의 시료를 얻기 위하여 30분에서 60분 정도의 시간이 소요되었으며, 높은 경도를 갖는 재료를 오랜 시간동안 분쇄하게 되어 과열된 장비의 냉각시간을 고려할 경우 훨씬 더 많은 시간이 걸렸다.)하게 되었다. 따라서 약한 포졸란 반응성을 띄는 것에 비하여 분말형태로의 사용은 이상적이지 않아, 골재 형태로 사용하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

표. 3-10 B₄C를 사용한 모르타르 시험체의 배합표

sample	w/c	Weight (g)				
		Water	Cement	Glass powder	Fine aggregate	B ₄ C
Plain	0.47	413.6	880	-	1980	-
B ₄ C				-	-	1980
B ₄ C50				-	990	990
B ₄ CR		704	176	-	-	1980
B ₄ C50R					990	990

- B₄C : 골재 전량이 B₄C, B₄C50 : 골재의 중량대비 50%를 B₄C로 치환,

B₄CR : 골재 전량이 B₄C이며 시멘트 중량대비 20% 붕규산 유리 분말 치환,

B₄C50R : 골재의 중량대비 50% B₄C로 치환하고 시멘트 중량대비 20% 붕규산 유리분말 치환

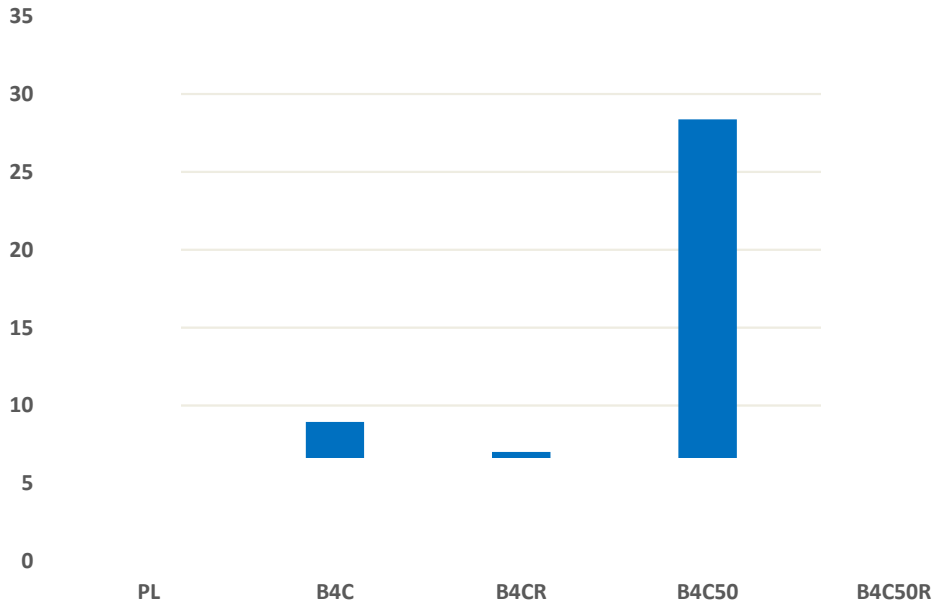


그림. 3-19 B₄C 혼입 모르타르의 압축강도 결과

- 상기의 그래프에 나타난 결과로 미루어 보았을 때 B₄C의 경우 그 자체로서는 재료의 특성상 매우 높은 강도를 지니고 있어 원하는 입도나 형태로의 분쇄 및 가공이 어려웠으며, 단독으로 모르타르에 사용될 경우에는 Plain 시험체에 비하여 상대적으로 매우 낮은 압축강도를 나타냄. 그러나 잔골재의 중량 대비 50%를 주문진 표준사를 사용, 나머지 50%를 탄화붕소를 사용하였을 경우에는 압축강도가 Plain 시험체에 비하여 크게 저하되지 않았으며, 시멘트 중량 대비 20%의 붕규산 유리 분말을 사용하였을 경우에는 Plain 시험체보다 약 7% 상승한 결과가 나타남.

마. 총평

- 붕규산 유리 미분말을 사용한 시멘트 페이스트 실험에서 혼입량이 증가할수록 수산화칼슘의 잔존량이 적어지는 것을 확인할 수 있었음. 이러한 결과로 미루어 보아 일정 수준(평균 입경 13 μ m) 이하로 붕규산 유리를 조절하여 사용한다면 포졸란 반응을 유도하여 ASR 팽창 반응을 확실히 저감시킬 수 있을 것으로 판단되었음.
- 또한 모르타르 배합에 붕규산 유리 골재로 사용할 경우 발생하는 ASR팽창 반응을 저감시키기 위한 붕규산 유리 분말의 적정 혼입량은 시멘트 중량 대비 20%로 판단됨. 15%의 혼입량을 갖는 시험체의 경우 초기 7~8주간에서는 큰 변화가 없었으나, 이후의 측정에서는 측정은 가능한 수준이었으나, 시험체의 곳곳에 미세균열이 육안으로 확인되어 장기적으로 측정을 지속할 경우 시험체 자체의 파괴가 우려되는 수준임.
- 탄화붕소의 경우 그 자체만으로 모르타르에 사용하기에는 상당한 무리가 있는 것으로 판단됨. 비교군으로 배합을 실시한 Plain 시험체에 비하여 약 70% 가량의 강도의 저하가 발생함. 그러나 모르타르의 잔골재 중량대비 50% 가량을 탄화붕소로 치환한 시험체의 경우 Plain 시험체와 비슷한 수준의 압축강도를 갖는 것으로 나타났으며, 해당 배합에서 시멘트 중량 대비 20%를 붕규산 유리 분말로 치환할 경우 압축강도가 약 7% 상승하는 것으로 나타남. 탄화붕소의 재료적 특성상 입도를 미세하게 조절하는 것이 매우 어려운 문제점이 있었으나, 이는 상기한 바와 같이 표준사와 혼합해서 사용하고 붕규산 유리 분말과 같은 포졸란 반응을 유도하는 재료와 함께 사용할 경우 건축재료로서 충분한 사용 가치가 있는 것으로 판단됨.

4. 진도점검 검증에 대한 항목별 증빙 (2차년도 성과목표 기준)

가. 붕규산 유리 함유 배합의 포졸란 반응성 평가 (단위성과 A-1-3)

그림 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14

나. ASR 반응성 평가 (단위성과 A-2-4)

그림1 및 2

다. 압축강도평가 미세구조 파악 (단위성과 A-2-2)

그림8 및 9

라. 최적배합비 산출 (단위성과 A-2-3)

(1) 붕규산 유리 골재를 사용한 경우 : 표1 및 8의 20% 배합, 표6의 BG50R배합

- w/c에 상관없이 20%의 시멘트 중량대비 치환율을 보이는 시험체의 경우가 종합적으로 판단하였을 때, (1)ASR 저감이 가장 확실하며 (2)압축강도의 증진이 가장 확실한 것으로 나타남.

(2) 탄화붕소(B_4C)를 골재로 사용한 경우 : 표9 및 그림15.

- 표7의 배합표에서 B4C50R(골재 중량 대비 50%를 B4C로 사용, 시멘트 중량 대비 20%를 붕규산 유리 골재 분말 사용)의 배합의 경우가 다른 배합에 비해서 유일하게 압축강도가 Plain 시험체에 비해 증가하였으며 본 배합을 제외한 경우에는 압축강도가 크게 감소한 경우가 대부분이었으며 B4C50(골재 중량 대비 50%를 B4C로 사용)의 경우에만 Plain 시험체의 결과값에 근접한 것으로 나타남. 해당 결과를 미루어 보아 B4C만을 단독으로 사용하기에는 무리가 있으나, 표준사와 함께 사용하는 것이 바람직하며 포졸란 반응을 유도하는 다른 재료와 함께 사용하는 것이 최선일 것으로 판단됨.
-

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

연구 내용			달 성 도 (%)	연구 결과	
주관 A-1	합금 조성 조정에 따른 비정질 리본의 특성평가 및 조성 최적화	○ 문제점 DB 제 작	100%	○ 철계 고분소 비정질 리본의 최적 제작 조건을 도출	
주관 A-2	철계 고분소 비정질 리본의 콘크리트 적용 후 문제점 도출	○ 인장시편 제작	100%	○ 비정질 스틸파이버의 합 금설계 및 제작	○ 1차년도에 조성이 거의 확보된 철계 고분소 비정 질 합금 $\text{Fe}_{62}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_{10}$ 의 크 롬 조성 최적화 실험을 위한 합금 설계 ($\text{Fe}_{72-x}\text{B}_{25}\text{Mo}_3\text{Cr}_x$ < $x=5, 6, 7, 8, 9$ >)
		○ 부식시편 제작			○ 크롬과 보론을 대체하여 가돌리늄이 첨가된 합금 Fe-B-Mo-Gd 설계
		○ 크롬 조성 최적화를 위한 합금설계			○ 붕소가 포함된 철계 비정 질 합금 관련 문헌 조사
		○ 가돌리늄이 포함된 비정 질 스틸파이버 제작을 위한 관련 문헌조사	○ 열중성자 차폐능 향상을 위한 합금원소 관련 문헌 조사		
		○ 인장 시험	100%	○ 인장시험을 위해 유연하고 탄성적 거동이 우수한 비정 질 리본 확보 ○ 자체 인장 시험 이후 전문평가기관에 의뢰하여 인장 시험 진행 ○ 평균 인장강도가 2350 MPa에 이르는 리본시편 확보.	
		○ 부식 시험	100%	○ 인장시험 및 굽힘 연신율 측정을 통해 Flexibility 가 확보된 비정질 리본에 대한 동전위 분극시험 진행 ○ 최저 부식전류가 $3.777\text{X}10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 인 시편 확보.	
○ 보고서 및 논문 작성	95%	○ SCI급 논문 1편 게재예정 및 SCI급 논문작성 후 게재 심사중.			
주관 B-1	콘크리트의 최적 배합비 도출	○ 비정질 붕소강 섬유의 형상비 와 선정재료를 이용하여 최적 배합비 도출	100%	○ 공기량, 슬럼프, 압축강도 및 인성, 휨강도 및 인성 등 의 항목을 고려할시 비정질 붕소강섬유 길이 10mm, 혼입율 1.0 vol.%가 상대적 물성치에 있어서 가장 좋 은 것으로 판단됨.	
주관 B-2	비정질 붕소강 섬유 및 혼화제를 혼입한 콘크리트의 차폐성능 및	○ Am-Be 중성자 선원 투과 방 사선비 평가	100%	○ Plain 콘크리트 대비 비정질 붕소강섬유 및 붕규산 유 리 혼입 콘크리트의 중성자 차폐율 1.4배 향상	
		○ 비정질 붕소강 섬유를 혼입한	100%	○ 목표강도 33MPa, 목표슬럼프 150mm, 목표밀도 2.23 이상 만족	

	물리적 성능 평가	콘크리트의 역 학적 특성 평 가		○ Plain 콘크리트 대비 압축인성 및 휨인성 증가
위탁 A-1	붕규산 유리 함유 배합의 포졸란 반응성 평가	○ 포졸란 반응성 평가	100%	○ 문헌 조사를 통하여 붕규산 유리의 팽창 반응을 최대한 배제할 수 있는 방안 모색 ○ TG/DTA 결과, 붕규산 유리 미분말을 시멘트 대체제로 사용한 시험체의 TGA 중량감소율이 Plain 시험체 대비 약 52% 감소한 것으로 나타남
		○ ASR 반응성 평가	100%	○ 붕규산 유리를 모르타르의 잔골재를 대체하여 사용하였으며, 시멘트 대체제로 붕규산유리 미분말을 사용하여 ASR 팽창 억제 효과가 가능함을 확인 ○ 시멘트 중량 대비 20% 붕규산 유리 분말을 사용한 시험체가 ASR 팽창을 확연히 억제하는 것으로 나타남
위탁 A-2	탄화붕소와 포틀랜드 시멘트 상호작용 분석	○ 압축강도 특성 및 미세구조의 차이 분석	100%	○ 탄화붕소를 시멘트 모르타르에 여러 가지 입도로 적용하는 방안을 모색하였으나, 탄화붕소의 경도가 매우 높아 미분쇄하기 곤란함 ○ 탄화붕소를 시멘트 모르타르에 잔골재 크기로 적용할 경우 Plain 시험체 대비 최대 20% 정도의 압축 강도가 발현되는 것을 확인함
		○ 역학적 특성의 손실을 최소화 한 최적 배합 비율 파악	100%	○ 잔골재 형태로 사용할 경우, 역학적 특성상 포졸란 반응을 발현하지 않은 것으로 보여짐 ○ 미분말 형태로 사용하는 것이 바람직하다고 여겨지나 미분쇄하는 과정이 매우 어려우므로 시멘트 모르타르에 적용하기에는 부적절할 것으로 판단됨 ○ 표준사와 함께 사용할 경우에는 Plain 시험체에 비하여 압축강도가 큰 차이 없는 수준으로 발현되는 결과를 나타냈다.

2. 관련 분야 기여도

- 세계적으로 원자력 발전의 효율성과 필요성은 인정하고 있지만 후쿠시마 원전 사고 같이 돌이킬 수 없는 사고의 위험성이 항상 도사리고 있기 때문에 우려와 거부감의 여론이 많다. 본 연구의 최종 성과물은 이렇게 세계적으로 사회적 이슈의 중심이 되고 있는 원전의 안전성과 직접적으로 관련되어 있다. 그러므로 최종 성과물의 연구개발은 세계적인 파급력과 가능성을 가지고 있는 분야다.
- 원자력 발전에 상당부분 의존하고 있는 우리나라는 방사능 차폐에 대한 우려감만 높을 뿐 직접적으로 차폐재를 새롭게 개발하려는 시도는 너무나도 미비했고 결과적으로 방사능 차폐 분야에 대해서 국외의 기술력에 의존하고 소재들 또한 수입하고 있는 실정이다. 따라서 새로운 방사능 차폐 콘크리트가 개발된다면 기존의 소재들을 대체할 수 있고 상당한 경제적인 성과가 기대되고 더 나아가 수출까지 할 수 있는 분야가 될 수 있다.
- 국내 기간산업인 철강산업의 침체가 심화되고 있는 가운데 비정질 합금강의 활용방안을 제시함으로써 기존의 정질 강에 치우쳐져 있는 산업구조에서 탈피하고 비정질 합금강 산업의 확대를 촉진시킬 수 있어 국내 경제에 순 영향을 미칠 것으로 기대된다.

가. 기술적 측면

연구과제	기술개발 효과
기존 콘크리트의 중성자 차폐능 1.2배 이상 향상시킨 고붕소 비정질 강섬유 강화 콘크리트 개발	- 고붕소 비정질 강섬유를 혼입한 차폐용 콘크리트라는 새로운 건설재료의 개발 시도 및 관련 건설 시장을 선점할 수 있는 기회 - 개발된 고붕소 비정질 강의 경우 중성자 차폐와 관련된 다양한 분야 뿐만이 아니라 일반적인 섬유보강 콘크리트 산업에도 응용이 가능 - 본 연구개발 기술이 국내외적으로 시작단계이므로 국내 연구진들의 관심을 유도하고 이를 이용한 후속연구의 유발 및 연구의 활성화 기대

나. 사회경제적 측면

기대성과 및 파급효과	내 용
수입대체 및 수출기대	중성자 차폐 소재 및 건설 기술의 해외 수출 및 기술력 판매, 특허관련 수입 기대
당해 기술의 시장성	- 원전 안전과 관련하여 향후 시장이 더욱 확대될 것으로 전망 - 원전 및 관련 기술 소요 시장이 나아가야할 방향제시로 전세계적인 발전 가능성 기대
산업적 효과로서 산업발전에 영향	중성자 차폐와 관련된 타 산업기술 응용 및 이전으로 본 기술을 바탕으로 한 소재산업의 활성화 기대

다. 전략적 측면

기대성과 및 파급효과	내 용
전문인력 양성	• 원전 소재산업의 전문인력 육성으로 관련산업의 활성화 기대 • 소재공학, 건설공학 등 다양한 전문지식을 갖춘 전문가 배출
산업구조 개선	• 타 산업 분야와 접목시켜 산업분야 간의 협업 촉진 • 관련 일자리 및 수요 창출
국가 이미지 제고	• 세계적으로 원전 안전에 대한 위기에 직면해 있는 상황에서 안전관리기술의 하나인 중성자 차폐용 합금 및 건설재료 개발로 일류국가 도약에 이바지 • 원전 소재 및 원전 건설 분야 기술의 선점으로 국가 이미지 상승

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구결과의 활용계획

- 본 연구에서는 중성자 차폐성을 가지는 비정질 붕소강섬유를 이용하여 고성능 차폐 콘크리트를 개발함으로써 기존의 건축용 차폐재를 사용하고 있는 다양한 분야에 본 연구 결과물을 활용할 수 있다. 그리고 본 연구결과로 개발되는 비정질의 붕소강은 기존의 핵폐기물 용기에 사용되는 Borated stainless steel을 대체할 수 있는 소재로 활용이 가능할 것으로 기대된다. 이 외의 본 연구결과의 대표적인 활용방안은 다음과 같다.

활용분야	활용방안
원전 분야 건설재료	• 중성자 차폐율 개선 및 역학적 성질을 향상한 콘크리트의 개발로 원전 건설산업에 적용 가능 • 원자력 발전 이후 발생하는 방사선 폐기물을 보관하는 폐기장 건설 및 기존 폐기장의 보완재로 활용이 가능
방사선 적용 분야 건설재료	• 대표적인 방사선 적용 분야인 의료, 공업, 농업, 분석 분야에 건설재료로 활용하여 일상생활에서의 방사능 노출을 안정적으로 방지 할 수 있음
비정질 붕소강의 핵폐기물 관리 분야 적용	• 비정질 붕소강의 역학적 성능 및 중성자 차폐율 개선으로 기존의 핵폐기물 저장용기로 사용되는 Borated stainless steel의 대체가 가능
강섬유보강 콘크리트 산업	• 역학적 성질이 우수한 비정질 붕소강 섬유의 개발로 정질의 강섬유를 사용하는 콘크리트 산업에 적용이 가능 • 비정질 강섬유와 콘크리트의 최적의 배합비를 밝힘으로써 비정질 붕소강이 아닌 다른 비정질 강섬유의 건설 자재 활용에 박차를 가할 수 있음

2. 연구결과의 기업 활용방안

- 해당사항 없음.

3. 연구성과의 등록·기탁 의향

- 본 과제 수행을 통해 창출한 성과물의 처리는 연구전담기관의 규정에 따를 계획이다.

연구성과	관리·유통 전담기관	등록·기탁 의향
논문	한국과학기술정보연구원	의향 있음
특허	교육과학기술부장관이 인정하여 지정 고시하는 기관	의향 있음
보고서원문 (전자원문 포함)	한국과학기술정보연구원	의향 있음

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 국외 관련 기술 연구 동향

- 국외 연구 동향은 학술 정보 사이트인 Sciencedirect 및 Scopus를 통해 분석을 실시하였다.
- 차폐 콘크리트와 관련된 국외의 연구동향은 국내와 마찬가지로 고중량, 고밀도의 콘크리트를 이용하여 차폐성능을 높이는 것이 주를 이루고 있다. 일부 연구에서는 탄화붕소와 같은 중성자 차폐성이 있는 붕소계열의 재료를 혼화재료나 골재로 사용하는 연구를 진행하고 있다. 하지만 현재까지 진행된 연구는 이러한 재료들을 혼입한 콘크리트의 차폐성능과 콘크리트에 미치는 영향에 관한 기초적인 연구단계이며, 실제 콘크리트에 응용할 수 있는 최적화 기술에 관한 연구는 미비한 실정이다.
- 2011년부터 최근까지 이루어진 연구에 대한 분석 결과 국내 연구팀들의 붕소강에 대한 연구방향과 차이점을 찾을 수 없었으며 대부분의 연구 주제는 붕소를 첨가한 고강도강에 대한 기계적 특성 평가 및 열처리 방법에 따른 미세조직 변화 조사에 대한 연구가 대부분 이루어 졌다. 이러한 주된 연구방향들은 본 연구팀에서 추구하고자 하는 방향과 공통점이 거의 없었다.
- 중성자 차폐재 개발에 대해서는 본 연구팀이 목표로 하는 비정질 고붕소강과 유사한 연구 사례를 찾을 수 있었다. 관련연구는 미국과 프랑스에서 진행되었으며 미국의 경우 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), J. Farmer 연구팀이 비정질 합금 코팅재를 개발하여 중성자 차폐능을 높이는 연구를 지속적으로 진행하여 왔고 2013년 7월에 코팅재 및 코팅기술의 조건에 관한 특허를 출원했다. 프랑스의 경우 2006년 3월 Institut National Polytechnique de Grenoble, M. Stoica 연구팀이 비정질 형성능 및 자기적 특성에 초점을 맞춘 고붕소 철계 벌크 비정질에 대한 연구가 진행되었다. 고붕소 철계 비정질이라는 점은 공통점으로 작용하나 미국의 사례의 경우 비정질 합금 코팅재를 목적으로 하였고 프랑스의 사례의 경우는 중성자 차폐 및 기계적 성질 강화를 위한 강재 개발이 아닌 자기적 특성에 초점을 맞췄다는 점에서 본 연구팀이 추구하는 방향과 다르다는 점을 알 수 있다.

구 분	내 용
Anjana Deva (2011)	▪ 저탄소강의 가공 경화와 연신율에 미치는 붕소의 영향에 대한 연구
Genichi Shigesato (2012)	▪ 저탄소강에서의 오스나이트상 경계면에서 나타나는 붕소의 편석 거동에 대한 연구
J. Baral (2013)	▪ 붕소함량에 따른 P91 합금강의 크립(Creep)거동 연구
A. Terzic (2013)	▪ 붕소함량을 조절한 저탄소강의 연속 냉각에 의한 상변화 및 이러한 변화가 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구
Zhi-hong ZHANGa (2014)	▪ 붕소를 함유한 저탄소강의 연속 냉각에 의한 베이나이트상 변화를 조사하고 각 조건에 따른 강의 기계적 특성 조사
M. Stoica (2006)	▪ 고붕소 Fe-B-Nb 합금의 Nb 함량의 증가에 따른 비정질 형성능 변화 확인 및 Fe66Nb4B30 조성의 역학적 · 자기적 특성 평가
J. Farmer (2007)	▪ 고붕소 Fe-Cr-Mn-Mo-W-B-C-Si 합금(SAM2X5) HV0F(High Velocity Oxy-Fuel) 용사코팅을 적용한 코팅층의 부식 특성 및 중성자 흡수능에 대한 평가와 우수성 증명
Yusof, M.R. (2012)	▪ Study of the Effect of Boron Carbide Content in Concrete as Radiation Shielding Application - 탄화붕소를 이용한 콘크리트의 열중성자 차폐성능 연구
yanova, V.S. (2014)	▪ Heavy Optical Glass in Concrete for Radiation Protection - silicate-lead glass을 골재로 사용한 콘크리트의 차폐성능 연구
Lee, S.Y. (2013)	▪ Assessing Aggregates for Radiation-Shielding Concrete: Methods for petrographic examination of high-density and boron-bearing aggregates - 고밀도 붕소를 첨가한 방사선 차폐 콘크리트용 골재의 골재별 특성평가
Alwaeli, ,M. (2013)	▪ Application of granulated lead-zinc slag in concrete as an opportunity to save natural resources - lead-zinc slag의 잔골재 치환 콘크리트의 방사능 차폐성 분석에 관한 연구
Ali Basheer Azeez (2013)	▪ The Effect of Iron Fillings Waste Contents on the Attenuation Level of Anti-Radiation Shielding Concrete - 철가루를 첨가한 콘크리트의 방사능 차폐성 영향 분석에 관한 연구

2. 국외 관련 기술 특허 동향

출원번호	특허명칭	출원인
(US)09243229	Advanced neutron absorber materials	Bechtel BWXT Idaho, LLC
(US)11595623	Corrosion resistant neutron absorbing coatings	Choi Jor-Shan
(US)11598940	Amorphous metal formulations and structured coatings for corrosion and wear resistance	Farmer Joseph C.
(US)12426769	IRON-BASED AMORPHOUS ALLOYS AND METHODS OF SYNTHESIZING IRON-BASED AMORPHOUS ALLOYS	Saw Cheng Kiong
(US) 08984689	Stainless steel having excellent thermal neutron absorption ability	Sumitomo Metal Industries
(US) 2012-715058	RADIATION SHIELDING STRUCTURE COMPOSITION	Grancrete, Inc.
(US) 2001-790031	Antiradiation concrete and antiradiation shell	Framatome ANP GmbH
(US) 1998-123979	Radiation shielding composition	Bechtel BWXT Idaho, LLC
(US) 1998-030614	Process for producing an aggregate suitable for inclusion into a radiation shielding product	Bechtel BWXT Idaho, LLC
(US) 1981-261750	Device for receiving, moving and radiation-shielding of vessels filled with expended reactor fuel elements	Deutsche Gesellschaft fur Wiederaufarbeitung
(JP) 2012-173415	放射線遮蔽コーティング部材 (방사선 차폐 코팅 부재)	TOCALO CO LTD
(JP) 2012-164049	海水中で練り混ぜた放射線遮蔽用コンクリート (해수로 혼합한 방사선 차폐용 콘크리트)	OHBAYASHI CORP
(JP) 2012-085658	放射線遮蔽コンクリート製容器および汚染土砂の管理方法 방사선 차폐 콘크리트제 용기 및 오염토사 관리 방법	FUJITA CORP
(JP) 2012-112099	放射性廃棄物收容容器 (방사성 폐기물 수용 용기)	TODA CONSTR CO LTD
(JP) 2011-220286	放射線遮蔽コンクリート (방사선 차폐 콘크리트)	SHIMIZU CORP

- 국내외 특허 현황을 알기위해 키프리스(KIPRIS) 및 국가과학기술정보센터(NDSTL)를 통해 <중성자 차폐재로 사용되는 붕소강>에 대한 다양한 키워드로 검색을 진행하였으나 중성자 차폐를 위한 정질 또는 비정질 붕소강에 대한 특허는 거의 찾을 수 없었다. 국내 특허는 유사한 분야의 특허를 찾을 수 없었고 국외 특허로는 총 5건을 찾을 수 있었는데 그 중 3건이 중성자 차폐 비정질 코팅 소재를 연구하는 J. Farmer 연구팀과 연관되어 있다는 사실을 알 수 있었다. 하지만 본 연구팀이 목표로 하는 콘크리트와 배합될 중성자 차폐 붕소강과는 다소 거리가 있는 코팅 소재에 대한 특허이기 때문에 고붕소강의 합금 조성에 유의한다면 국제적으로 경쟁력을 가질 수 있는 유망한 분야가 될 것 이라고 예측된다. 나머지 2건 중 Bechtel BWXT에서 출원한 특허는 희토류 금속을 이용하여 비정질 형성능과 중성자 차폐능을 높이는 연구지만 소재 자체에 대한 연구로 그치고 직접적인 적용 방법에 대해서는 명시되어 있지 않다. 마지막 1건 Sumitomo Metal Industries에서 출원한 특허의 경우 중성자 차폐능을 높인 철계 소재라는 공통점이 있으나 붕소함량이 3.75 at% 미만이고 결정질 소재이기 때문에 기술 및 특허의 중복성이 없다는 것을 확인 할 수 있었다.

- <중성자 차폐 콘크리트>와 관련된 특허현황을 분석한 결과, 본 연구에서와 같이 차폐를 위해 강

섬유를 활용한 예를 찾을 수 없었다. 강섬유를 활용한 차폐콘크리트와 관련된 특허는 콘크리트의 역학적 성질을 개선하기 위해 정질의 강섬유를 사용한 것으로, 차폐목적의 비정질 섬유를 사용한 예는 없는 것을 나타났다.

- <중성자 차폐용 혼화재료>와 관련된 특허현황을 분석한 결과, 탄화붕소를 혼화재료 또는 골재의 형태로 사용한 특허는 존재하나, 콘크리트의 차폐목적에 향상시키기 위한 이론적 개념의 특허이며 콘크리트의 역학적 특성과 연관된 특허는 존재하지 않는 것으로 나타나 중복성이 없다는 것을 확인할 수 있었다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

가. 보안등급의 분류

보안	일반
	○

나. 결정사유

창의도전연구 공고 및 2차 평가접수 안내서 참조

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
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 실험실 안전조치 이행계획 및 단계별 안전관리 대책

참여연구원들의 휴먼에러(human error)를 예방하고 실험실의 안전을 확보하기 위해서 예방적 차원의 조치들의 순서를 다음 순서와 같이 진행하고자 한다.

가. 본 구조재료 실험실의 안전점검 및 정밀안전진단을 실시한다.

나. 참여연구원들의 교육훈련 및 건강검진을 실시한다.

다. 참여연구원들의 산재보험가입을 한다.

라. 실험실의 위험 요소 자체를 근본적으로 없애기 위한 노력을 기울인다.

마. 현실적으로 위험 요소 자체를 100% 없애거나 어려운 경우 이를 완화할 수 있는 방법을 강구한다.

바. 심리적 갈등이나 휴먼에러 등이 발생해도 사고로 이어지지 않게 하는 방호장치(안전장치)를 부착한다.

사. 사고가 발생할 가능성이 있거나 사고가 발생하는 경우 조치를 위한 경보장치를 부착한다.

아. 위험요소에 노출을 막기 위한 개인보호구를 구비한다.

자. 참여연구원 스스로 심리적으로 안정된 환경유지로 안전 규칙 등을 준수할 수 있도록 권고한다.

참여연구원들에게 안전확보를 위해 고려해야 하는 각 조치들은 위와 같은 순서를 따르게 하고 초기 단계일수록 안전에 기여하는 정도가 크기 때문에, 설계 단계에서부터 근원적으로 사고를 예방하는 것이 가장 효과적이다.

2. 실험실 안전 확보 계획

근원적으로 에러를 100% 막는다는 것은 실제로 매우 힘들 수 있고, 경제성 때문에 그렇게 할 수 없는 경우가 많다. 이런 경우에는 가능한 에러 발생 확률을 최대한 낮추어 줄 수 있는 심리적 안전 환경유지, 재료나 기계·설비 등을 사용한다. 본 구조 재료 실험실에서는 가구·기계·설비 등의 모서리의 각을 완화시켜 충돌 시 다치는 것을 방지하고자 한다. 또한, 강화 유리를 사용한 실험 도구 등을 사용하여 파열 등의 사고를 완화시키는 한편 다음과 같은 연구실안전 확보 계획을 준수하도록 한다.

가. 방호장치(안전장치) 활용

방호장치 혹은 안전장치는 실험실에서 사용하는 기구·기구·설비 등에 사고를 예방하기 위한 장치로 콘크리트 믹서기와 같은 기계의 위험한 구역에 심적 현상인 무의식적으로 손을 넣을 경우 광센서에 의해 자동으로 기계를 멈추게 하는 등 본 실험실에 이미 이와 같은 방호장치가 구비되어 있는 관계로 이를 적절히 활용한다.

나. 경보장치 활용

경보장치는 사고가 발생하려는 징후가 있거나, 사고가 발생한 경우에 이를 알려주는 장치로 화재 경보기나 실험 설비 등에 이상이 있을 때 경보를 알려줄 수 있도록 하는 것으로 본 구조 재료 실험실에 경보장치가 설치되어 있어 이러한 경보시스템 또는 안전표지판 등을 이용한다.

다. 개인보호구 이용

사고가 나거나, 위험 요인에 노출될 때를 대비해 참여연구원들에게 헬멧이나, 보안경 등을 착용하도록 한다.

라. 참여연구원들의 규칙 준수

위에 언급한 조치들에 의해 위험요소가 완화되거나 각종 방호장치, 경보장치, 개인보호구가 갖추어지더라도, 최종적으로 안전에 대해서도 각 참여연구원이 안전 규칙을 준수해 행동하도록 주지시킨다. 이렇게 할 때에 사고를 사전에 예방하거나, 사고가 나더라도 그 피해를 최소화할 수 있을 것이다. 새롭게 연구 장비 및 실험체들을 구입하거나 제작할 때, 이러한 예러 제거 원칙과 예러완화 원칙 등이 충분히 반영되도록 계획한다.

3. 안전조치 이행계획의 세부추진 사항

구 분	세부 추진 사항	목표	1/4			2/4			3/4			4/4		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. 안전 관리 체계	1) 법정안전관리자(가스, 전기, 위험물, 방화, 보건 등) 선임 ○ 안전관리자 외 8개 분야	1회												
	2) 화기책임자·작업별 안전담당자 지정 및 학과 안전위원회 간사 확인	1회												
	3) 연구실안전관리위원회 개최	필요시												
	4) 학과안전위원회 개최	"												
	5) 연구실험안전관리 지침 개정	"												
	6) 실험 전 위험성평가 제도 도입(기준작성)	연중												
2. 안전교육	1) 법적교육 ○ 실험실 정기 안전교육(안전점검의 날 병행)	매월												
	○ 신입생 및 신규채용자 교육	11회												
	○ 방사선 관리감독자 법정 직무교육	1회												
	○ 도시가스 사용시설 안전관리자(신규선임)	1명												
	○ 위험물 안전관리자 직무교육	2명												
	○ 폐기물 배출자 교육	1명												
	2) 온라인 교육 ○ 온라인 안전인증 평가	2회												
	3) 정기교육 ○ 실험실 분야별 정기 안전교육	8회												
	○ 응급처치법 교육	2회												
	○ 소방안전교육 및 합동훈련	2회												

구 분	세부 추진 사항	목 표	1/4			2/4			3/4			4/4		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3. 안전점검	○ 방사선 신규종사자 교육	30명												
	○ 방사선 정기종사자 교육	40명												
	4) 안전관리자 직무교육													
	○ 작업환경 개선(실험실 안전관리자)	1회												
	○ 위험성평가 지도요원 양성(실험실 안전관리자)	1회												
	○ 전기화재예방 및 방폭안전(방화관리자)	1회												
	○ 전기설비 접지 실무	1회												
	○ 화재안전관리(방화관리자)	1회												
	○ 도시가스 사용시설 안전관리자	1명												
	○ 위험물 안전관리자	2명												
	○ 전기 안전관리원	1명												
	○ 폐기물 배출자 교육	1명												
	○ 검사대상기기 조정자 교육	4명												
	5) 기타 안전교육													
	○ 가스사고 응급대처요령 교육	1회												
	○ 안전관리자 Workshop 및 산업시찰	2회												
	1) 사용 전 점검													
	○ 전기설비 사용 전 검사	1회												
	2) 법정 정기점검													
	○ 전기설비 정기검사	1회												
	○ 전기설비 정밀 안전진단													
	○ 위험기계기구 안전검사	2회												
	○ 연구/실험실 정밀안전진단	1회												
	○ 연구/실험실 정기 안전점검	1회												
	3) 법정 자체검사													
	○ 소방시설 종합정밀점검	1회												
	○ 소방시설 자체점검	12회												
	○ 전기설비 정밀 안전진단	1회												
	4) 자체 안전점검													
	○ 연구/실험실 특별 안전점검	1회												
	○ 분야별 안전점검	12회												
	○ 안전점검의 날 행사 실시	매월												
	○ 학과별 순회 안전점검	1회												
	○ 설날, 추석 등 연휴전 안전점검	2회												
	○ 24시간 가동장비 점검	2회												
	○ 학기 초 안전점검	2회												

구 분	세부 추진 사항	목표	1/4			2/4			3/4			4/4		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	○ 비상샤워시설 안전점검	1회												
4. 기타 안전관리	1) 소방시설 유지관리	연중												
	2) 주요시설 보수													
	○ 실험실 가스조기경보시스템 구축	1식												
	○ 전기시설 보수	1식												
	○ 수전설비 용량 증설	1식												
	○ 보일러 화학세관	2회												
	○ 노후배관 교체공사	1식												
	○ 옥상방수 공사	1식												
	3) 건강검진 및 작업환경측정													
	○ 실험실 작업환경측정													
	○ 실험실 작업환경개선													
	4) 기타													
	○ 안전관련 장비구입(실험실 점검용)	2조												
	○ 기타 행정사항	연중												

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	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	비정질 철계 합금 및 이를 이용하여 제조한 방사능 차폐용 복합재 (10-2016-0086364)	경북대학교 산학협력단		대한민국		2016.07.07		특허출원
2	특허	붕규산 유리 미분말을 함유하는 모르타르 또는 콘크리트를 포함하는 중성자 차폐재 (10-2016-0053323)	부경대학교 산학협력단		대한민국		2016.04.29		특허출원
3	논문	Mechanical Properties and Thermal Neutron Shielding Efficiency of High B Amorphous Ribbons in the Fe-B-Mo-Cr System	경북대학교 산학협력단		Metals and Materials International	1.815	2016.09	단독 사사	SCI
4	논문	Effect of Gadolinium in Fe based amorphous ribbons with high boron contents on the neutron shielding efficiency	경북대학교 산학협력단		Annals of Nuclear Energy	1.174	게재심사중	단독 사사	SCI
5	논문	비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능 평가	경북대학교 산학협력단		Journal of the Korea Institute of Building Construction		게재심사중	단독 사사	SCOPUS
6	논문	붕규산 유리 및 비정질 붕소강 섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성능 및 중성자 차폐성능 평가	경북대학교 산학협력단		Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute		게재심사중	단독 사사	KSCI
7	논문	Enhancement on thermal neutron shielding in cement mortar using borosilicate glass powder	부경대학교 산학협력단		Journal of Nuclear Materials	2.199	게재심사중	단독 사사	SCI
8	논문	Can combination of borosilicate glass and powder be used as components to make neutron shielding mortar?	부경대학교 산학협력단		Construction & Building Materials	2.421	게재심사중	단독 사사	SCI
9	논문	Effect of borosilicate glass on thermal neutron shielding performance and compressive strength of cement mortar	경북대학교 산학협력단		Materials Letters	2.437	게재심사중	단독 사사	SCI

제12장. 참고 문헌

- 1) J. Famer, J. Haslam, S. Day, T. Lian, J. Payer, J. Perepezko, K. Hildal, D. J. Branagan, M. B. Beardsley, L. Arigliano, "Corrosion Resistances of Iron-Based Amorphous metals with Yttrium and Tungsten Additions in Hot Calcium Chloride Brine & Natural Seawater: Fe₄₈Mo₁₄Cr₁₅Y₂C₁₅B₆", 210th Meeting of The Electrochemical Society, 2006 Joint International Meeting (October 29, 2006 through November 4, 2006)
- 2) J. Blink, J. Farmer, J. Choi, C. Saw, "Applications in the Nuclear Industry For Thermal Spray Amorphous Metal and Ceramic Coatings" Metallurgical and Materials Transactions A (Volume 40A, June 2009)
- 3) Daniel James Branagan, "Properties of Amorphous/Partially Crystalline Coatings", United States Patent Application Publication (US 20040253381A1)
- 4) Daniel James Branagan, "Method of Modifying Iron Based Glasses to Increase Crystallization Temperature without Changing Melting Temperature", United States Patent Application Publication (US 20040250929A1)
- 5) J. Farmer, J. Choi, C. Saw, R. Rebak, S. Day, T. Lian, P. Hailey, J. Payer, D. Branagan, L. Aprigliano "Corrosion Resistance of Amorphous Fe_{49.7}Cr_{17.7}Mn_{1.9}Mo_{7.4}W_{1.6}B_{15.2}C_{3.8}Si₂ coating - a new criticality - controlled material", Journal of Nuclear Technology (March 28, 2007)
- 6) J. Farmer, F. Wong, J. Haslam, Xiaoyan Ji, S. Day, C. Blue, J. Rivard, L. Aprigliano, L. Kohler, R. Bayles, E. Lemieux, N. Yang, J. Perepezko, L. Kaufman, Arthur Heuer, E. Lavernia, "Compositions Of Corrosion-Resistant Fe-based Amorphous Metals Suitable For Producing Thermal Spray Coating", United States Patent Application Publication (US 8480864B2)
- 7) W. Botta, J. Berger, C. Kiminami, V. Roche, R. Nogueira, C. Bolfarini, "Corrosion resistance of Fe-based amorphous alloy", Journal of Alloys and Compounds (Volume 586, Supplement 1, 15 February 2014)
- 8) H. Kajimura, "Stainless Steel Having Excellent Thermal Neutron Absorption Ability", United States Patent Application Publication (US 5820818)
- 9) M. Madinehei, P. Bruna, M.J. Duarte, E. Pineda, J. Klemm, F.U. Renner, "Glass-formation and corrosion properties of Fe-Cr-Mo-C-B glassy ribbons with low Cr content", Journal of Alloys and Compounds (Volume 615, Supplement 1, 5 December 2014, Pages S128-S131)
- 10) A. O. Olofinjana, H. A. Davies, "Determination of the static and dynamic mechanical properties of Fe-Cr-Si-B metallic glass wire", Materials Science & Engineering, (A186, 1994, 143-149)

-
- 11) I. A. Figueroa, I. Betancourt, G. Lara, J. A. Verduzco, "Effect of B, Si and Cr on the mechanical properties of Fe- based amorphous metallic ribbons", *Journal of Non-Crystalline Solids* (Volume 351, Issues 37 - 39, 1 October 2005, Pages 3075-3080)
 - 12) X. J. Gu, S. Joseph Poon, Gary J. Shiflet, "Effect of carbon content on the mechanical properties of amorphous steel alloys", *Scripta Materialia* (Volume 57, Issue 4, August 2007, Pages 289-292)
 - 13) K. Mondal, B. S. Murty, "On the parameters to assess the glass forming ability of liquids ", *Journal of Non-Crystalline Solids* (Volume 351, Issues 16 - 17, 1 June 2005, Pages 1366-1371)
 - 14) B. Yao, Y. Zhang, L. Si, H. Tan, Y. Li, "Boron content dependence of crystallization, glass forming ability and magnetic properties in amorphous Fe-Zr-B-Nb alloys", *Journal of Alloys and Compounds* (Volume 370, Issues 1 - 2, 12 May 2004, Pages 1-7)
 - 15) S. J. Pang, T. Zhang, K. Asami, A. Inoue, "Bulk glassy Fe-Cr-Mo-C-B alloys with high corrosion resistance", *Corrosion science* (Volume 44, Issue 8, August 2002, Pages 1847-1856)
 - 16) Zainab Z. Ismail, Enas A. AL-Hashmi, "Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete", *Waste Management* (Volume 29, Issue 2, February 2009, Pages 655-659)
 - 17) Caijun Shi, Keren Zheng, "A review on immobilization of phosphate containing high level nuclear wastes within glass matrix - Present status and future challenges", *Journal of Hazardous Materials* (Volumes 235 - 236, 15 October 2012, Pages 17-28)
 - 18) Andrea Saccani, Maria Chiara Bignozzi, "ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete", *Cement and Concrete Research* (Volume 40, Issue 4, April 2010, Pages 531-536)
 - 19) İlker Bekir Topçu, Mehmet Canbaz, "Properties of concrete containing waste glass", *Cement and Concrete Research* (Volume 34, Issue 2, February 2004, Pages 267-274)
 - 20) M.H. Kharita, S. Yousef, M. AlNassar, "Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete", *Progress in Nuclear Energy* (Volume 53, Issue 2, March 2011, Pages 207-211)
 - 21) Yixin Shao, Thibaut Lefort, Shylesh Moras, Damian Rodriguez, "Studies on concrete containing ground waste glass", *Cement and Concrete Research* (Volume 30, Issue 1, January 2000, Pages 91-100)
 - 22) Seung Bum Park, Bong Chun Lee, Jeong Hwan Kim, "Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate", *Cement and Concrete Research* (Volume 34, Issue 12, December 2004, Pages 2181-2189)
 - 23) 高引性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会, "高引性セメント複合材料を知る・作る・使う" (日本コンクリート工学会, 2002.1)
 - 24) Bache, H. H., "Densified Cement Ultra-Fine Particulate-Based Materials", *The Second International Conference on Superplasticizers in Concrete* (June 1981, p.35)
 - 25) Alford, N. M., Groves, G. W., and Double, D. D., "Physical Properties of High Strength Cement Pastes", *Cement and Concrete Research* (Volume.12, No.2, May 1982, pp.349-358)
-

-
- 26) 윤현도 외, “고인성 시멘트 복합체의 최신기술 : DFRCC의 제조기술 및 특성”, 콘크리트 학회지 (Volume16, No.5, 2004.9, pp.49-58)
 - 27) 김윤용 외, “고인성 섬유 복합재료 ECC의 특성과 적용”, 콘크리트학회지, (Volume16, No.5, 2004.9, pp.64-72)
 - 28) Qingduo Hao, Yanlei Wangb, Zheng He, Jinping Ou, “Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete”, Construction and Building Materials, (Volume.23, 2009, pp.865 - 871)
 - 29) Muhammad N.S. Hadi, “Behaviour of eccentric loading of FRP confined fibre steel reinforced concrete columns”, Construction and Building Materials (Volume.23, 2009, pp.1102 - 1108)
 - 30) Özgür Eren, Khaled Marar, “Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete”, Construction and Building Materials (Volume.23, 2009, pp.981 - 988)
 - 31). D. Mehmet Özcan, Alemdar Bayraktar, Abdurrahman Sahin, Tefaruk Haktanir, Temel Türker, “Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete(SFRC) beams ultimate behavior”, Construction and Building Materials (Volume.23, 2009, pp.1064 - 1077)
 - 32) 윤현도, 김선우, 전 에스더, “섬유 혼입조건에 따른 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장 거동 특성”, 대한건축학회논문집 구조계 (Volume.22, No.12, 2006, pp.79-86)
 - 33) 김윤일, 박동순, 서치호, “강섬유 혼입량 증가에 따른 고강도 콘크리트 재료특성의 변화”, 대한건축학회논문집 구조계 (Volume.21, No.2, 2005, pp.95-101)
 - 34) ASTM C 1018, “Standard Test Methods for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete”, ASTM (Volume.4, 2002, pp.634-637)
 - 35) Abrishambag, A., Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F., “Relation between fiber distribution and post-cracking behaviour in steel fiber reinforced self-compacting concrete panels”, Cem.Concr.Res, (Volume.51, 2013, pp. 57 - 66)
 - 36) Barashykov, A.Ya., Melnyk, V.K., Riabenko, T.A, “The impact of fiber materials on operation properties of fiber concrete”, Ind. Build. Eng. Struct.(Volume.4, 2012, pp.41 - 44)
 - 37) ASTM C637 - 09, “Standard Specification for aggregates for Radiation Shielding Concrete”, American Society for Testing and Materials(ASTM). (2009)
 - 38) Blizard, E.P., Abbott, L.S., Reactor Handbook, vol. III. John Wiley & Sons Inc Shielding (1962)
 - 39) El-Khayatt, A.M., El-Sayed Abdo, A., “MERCFSF-N calculation program for fast neutron removal cross-sections in composite shields”, Ann. Nucl. Energy (volume.36, No.6, 2009, pp.832 - 836.)
 - 40) El-Sayed Abdo, A., “Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields”, Ann. Nucl. Energy (Volume.29, No.16, 2002, pp.1977 - 1988)
 - 41) Fang, J., “Introduction of Radiation Protection, Version 1 (in Chinese)”, Atomic Energy Press, Beijing (1991)
 - 42) Kharita, M.H., Yousef, S., AlNassar, M., “The effect of the initial water to cement ratio on shielding properties of ordinary concrete”, Prog. Nucl. Energy (Volume.52, 2010, pp.491 - 493)
-

-
- 43) Lee, S.Y., Daugherty, A.M., Broton, D.J., "Assessing aggregates for radiation - shielding concrete". *Concr. Int.* (Volume.35, 2013, 31 - 38)
 - 44) Z. Khan, "Influence of gadolinium on the microstructure and mechanical properties of steel and stainless steel", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* (Volume. 112, 2012, pp.309-321)
 - 45) Choi Yong, Moon Byung M, Sohn Dong-Seon, "Fabrication of Gd containing duplex stainless steel for neutron absorbing structural materials" (*Nuclear Engineering and Technology*, Volume. 45, Issue 5, 2013, pp.689-694)
 - 46) J-S. Choi, J.C. Farmer, C. Lee, L. Fischer, M. Boussoufi, B. Liu, H. Egbert "Neutron-Absorbing Coatings for Safe Storage of Fissile Materials with Enhanced Shielding & Critically Safety" (*Materials Science & Technology 2007 Conference and Exhibition*, Detroit, MI, United States, Sept. 16, 2007 - Sept. 20, 2007)
 - 47) C. V. Robino, J. R. Michael, J. N. DuPont, D. B. Williams, R. E. Mizia, E. Shaber, "Development of Gd-enriched alloys for spent nuclear fuel applications—Part 1: Preliminary characterization of small scale Gd-enriched stainless steels" (*Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 12, Issue 2, pp. 206 - 214, 2003)
 - 48) Yong Choi, Youl Baik, Byung-Moon Moon, Dong-Seong Sohn, "Corrosion and Wear Properties of Cold Rolled 0.087% Gd Lean Duplex Stainless Steels for Neutron Absorbing Material" (*Nuclear Engineering and Technology*, Volume 48, Issue 1, Pages 164 - 168, 2016)
 - 49) Caijun Shi, Yanzhong Wu, Chris Riefler, Hugh Wang, "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders" (*Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 5, Pages 987 - 993, 2005)
 - 50) W. J. McCoy and A. G. Caldwell, "New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion" (*Journal Proceedings*, Volume 47, Issue 5, pp. 693-706, 1951)
 - 51) Yixin Shao, Thibaut Lefort, Shylesh Moras, Damian Rodriguez, "Studies on concrete containing ground waste glass" (*Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 1, Pages 91 - 100, 2000)
 - 52) Zainab Z. Ismail, Enas A. AL-Hashmi, "Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete" (*Waste Management*, Volume 29, Issue 2, Pages 655 - 659, 2009)
 - 53) M.H. Kharita, S. Yousef, M. AlNassar, "Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete" (*Progress in Nuclear Energy*, Volume 53, Issue 2, Pages 207 - 211, 2011)
 - 54) Ahmad Shayan, Aimin Xu, "Value-added utilisation of waste glass in concrete" (*Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 1, Pages 81 - 89, 2004)
-

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.