

친환경 화학처리기법을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감 및 환경영향성 평가 최종보고서

2013. 06. 29

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관/연세대학교
공동연구기관/한양대학교
위탁연구기관/충북대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 "친환경 화학처리기술을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감 및 환경영향성 평가"의 보고서로 제출합니다.

2013. 6. 29.

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 박경수

참 여 연 구 원 : 황준필

김의근

최하번

정민선

김재환

김용재

이기홍

박세용

최봉호

김지은

박제영

송인환

이규화

송승연

박준우

최재방

배성민

김희정

이원우

공동연구책임자 : 안기용

위탁연구책임자 : 우수동

보 고 서 요 약 서

과제고유번호	10기술혁신E02	해 당 단 계 연 구 기 간	2012. 6. 30. ~ 2013. 6. 29.	단 계 구 분	3/3
연 구 사 업 명	세부사업명	건설교통기술연구개발사업			
연 구 과 제 명	세부과제명	친환경 화학처리기법을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감 및 환경영향성 평가			
연 구 책 임 자	박 경 수	해당단계 참 여 연구원수	총 : 22명 내부 : 명 외부 : 명	해당단계 연 구 비	정부: 586,100천원 기업: 천원 계: 586,100천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 84명 내부 : 명 외부 : 명	총연구비	정부: 1,593,100천원 기업: 천원 계:1,593,100천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	연세대학교 산학협력단 토목환경공학과		참여기업명		
공 동 연 구	연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단		연구책임자 : 안 기 용		
위 탁 연 구	연구기관명 : 충북대학교 산학협력단		연구책임자 : 우 수 동		
요약				보고서면 수	141
당해연도 연구목표인 “콘크리트에서 발생하는 환경영향인자의 억제 개발 기술의 현장 적용성 평가 및 환경영향성 평가”를 다음과 같이 작성					
- 수용성 6가크롬의 경우 시멘트 수화에 따라 농도가 변화 - Loess 20% 치환한 시멘트 경화체의 6가크롬 침출량은 시멘트 경화체에서 침출되는 6가크 롬의 80%이상을 저감 - 20% Loess, 20% Loess + 40% GGBS는 수서환경/해양환경에서 우수한 성능을 보임 - 물벼룩에 대한 환경영향성 평가를 통해 알칼리이온의 침출이 치명적임을 확인 - 전기화학적기법 적용 시 화학적 상평형상태가 유지됨에따라 알칼리이온의 추가적인 침출이 방지됨을 확인 - GGBS 또는 Loess콘크리트는 약알칼리성의 특성으로 인해 OPC콘크리트 보다 상대적으로 낮은 알칼리이온 침출량을 나타냄 - 포졸란계 혼화재의 사용으로 CO₂ 배출량 저감을 위한 방안을 제시 - 3각기법 검증결과 경제성 및 공학적성능은 OPC<30%PFA<60%GGBS 순으로 나타남 - 콘크리트 생산 시 발생하는 CO₂ 배출저감을 위한 Web 기반형 데이터베이스 구축					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	콘크리트, 중금속이온, 알칼리이온, CO ₂ , 환경영향성			
	영 어	Concrete, Heavy metal ion, Alkaline ion, Carbon dioxide, Environmental impact			

요 약 문

I. 제 목

친환경 화학처리기술을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감 및 환경영향성 평가

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 과제는 환경친화적 화학처리기술을 이용한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감기술개발로 콘크리트로 제작되는 토목, 건축구조물로 건설 및 공용될 시 발생할 수 있는 잠재적 환경오염원인 CO₂가스의 배출, 중금속 및 강알칼리이온의 침출을 저감함으로써 사회 인프라 시설의 건설에 발생하는 환경부하를 조절하는데 최종목표가 있다. 특히 당해연도에는 “**콘크리트에서 발생하는 환경영향인자의 억제**를 위한 **화학적, 전기화학적 기술개발 및 환경영향성 평가**”에 대한 모델을 제기하는데 연구목적이 있다.

2. 연구개발의 필요성

콘크리트는 매우 우수한 공학적 건설재료로서 건설재료 중 약 80%를 차지할 만큼 토목, 건축 건설에 대해 필수불가결한 재료라 할 수 있다. 콘크리트는 건설시장의 꾸준한 성장에 맞춰 사용량이 매년 증가하는 추세이나 최근의 녹색성장, 친환경에 대한 세계적 이슈와 맞물려 콘크리트의 유해성 및 환경파괴적인 면이 부각되고 있다. 사실 콘크리트의 환경파괴적인 부분에 대해서는 전세계적으로 구체적이고 정량적인 연구가 이루어진 경우가 매우 드물며 단편적인 연구에 그치게 사실이다.

그러나 시멘트 산업에 의해 발생하는 CO₂ 발생량은 우리나라의 전체 CO₂ 발생량의 약 7%를 차지하고 있으며 콘크리트가 화학적으로 강알칼리성을 띠고 있기 때문에 수서환경에 노출 될 경우 일정부분 영향을 미칠 수 있음은 사실이다. 또한 콘크리트에서 침출되는 중금속 및 알칼리이온에 의한 피부질환, 천식, 알레르기가 보고되기도 하며 생태파괴에도 일정부분 영향을 미치고 있음은 여러 매체를 통해 보고되고 있다.

이와 같은 환경영향에도 불구하고 아직 콘크리트의 환경영향에 대한 규제나 가이드라인은 전무하거나 부재인 경우가 대부분이며 관련 연구조차도 공학적, 경제적 관점에서 접근할 뿐 환경에 대한 영향은 배제된 채 이루어지고 있는 현실이다. 또한, 현재 국제적으로 탄소배출권거래제 (Cap and trade)가 곧 실시될 시점에서 콘크리트를 재료로 이용하는 토목구조물의 환경영향평가 모델은 매우 시급한 문제이며 또한 콘크리트 구조물 완공 시 주변 환경에 미치는 영향 또한 정량적인 연구가 요구되고 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 총 연구년도 3차년 중 3차년도 (2010.6.30 ~ 2013.6.29)에 해당하는 연구로서 연구개발의 내용 및 범위는 다음과 같다.

- (1) 수중 콘크리트의 중금속이온 침출 비교조사, 첨가제의 침출억제 및 현장적용
 - 현장조사를 통한 중금속이온 침출, 침적, 자정에 따른 중금속이온량 산정
 - Loess 첨가제의 현장적용 및 효율성 평가
 - Loess 첨가 콘크리트/모르타르의 장기강도, 내구성 및 화학적 반응 분석
 - Loess 첨가제 사용에 따른 경제성 평가
 - 중금속 침출에 관한 매뉴얼 및 국내/국제표준 Committee Draft 제정
- (2) 생태보존을 위한 최대 알칼리이온 침출량에 대한 정의 및 현장적용
 - 하천, 해양환경에서의 콘크리트 구조물의 알칼리이온의 침출량 조사
 - 전기화학적 기법의 현장적용
 - 알칼리이온 침출에 따른 생태환경영향성에 관한 지침 제정
 - 전기화학적 기법 적용에 따른 경제성 평가
- (3) 콘크리트 생산공정에 따른 CO₂ 발생량에 관한 매뉴얼 제정
 - 최소 CO₂ 배출을 위한 최적의 콘크리트 생산공정에 관한 프로토콜 정립
 - 콘크리트 생산방식에 따른 예상 CO₂ 배출량에 관한 모델정립 및 검증

IV. 연구개발결과

- (1) 콘크리트 중의 중금속 이온 침출
 - 수서환경/해양환경의 현장적용성 평가에서 Loess 혼입한 경우 중금속 이온 침출 저감효과 높음
 - Loess 혼입한 경우 성능저하가 발생하나 저하의 폭이 크지 않음
 - Loess 사용시 기존의 저감제 비해 작업 용이성 및 경제성에서 유리
- (2) 콘크리트 중의 알칼리이온 침출
 - 하수처리장에서의 시험결과 콘크리트에 전기화학적 처리기법을 통한 알칼리이온의 침출억제 효과는 매우 높음
 - 인공수로 실험 결과 유수접촉 5시간 이내에 알칼리이온 급속 침출
 - 자연정화능력에 있어서 일정부분 알칼리이온의 침출에 대한 pH증가 후 다시 감소하나 원래 유수의 pH 까지는 감소하지 않음을 확인
- (3) 콘크리트에 따른 CO₂ 배출
 - 비용에 따른 경제성 및 장기강도와 같은 공학적 성능은 OPC < 30% PFA < 60%

- GGBS , CO₂ 배출량에 대한 환경성은 60% GGBS < 30% PFA < OPC
- Web 데이터베이스를 활용한 CO₂ 발생량의 실시간 모니터링 시스템 구축

V. 연구개발결과의 활용계획

(1) 콘크리트 중의 중금속 이온 침출

- 실구조물에 적용, 콘크리트의 중금속 침출 감소 개선효과에 적극적으로 활용
- 수중환경 내 콘크리트로부터 침출된 중금속 측정 제품 개발
- 콘크리트의 중금속 침출을 방지하여 콘크리트 구조물의 친환경이미지 개선에 활용

(2) 콘크리트 중의 알칼리이온 침출

- 콘크리트 표면에 시공함으로써 구조물의 성능 강화
- 콘크리트 전기화학적 표면 처리 공법에 관한 국내·외 특허 등록 및 사업화 가능
- 수중 내 알칼리이온 규제 관련 지침 및 국가/국제 표준 개발

(3) 콘크리트에 따른 CO₂ 배출

- 콘크리트 생성 과정에서의 최소 CO₂ 배출을 위한 프로토콜 개발, 실제 콘크리트 제작 과정에 적용
- CO₂ 발생량을 저감하는 시멘트 제조 방식, 콘크리트 배합 개선 등 각 공정별 원천 기술 국내·외 특허 등록 및 사업화
- 콘크리트 개발 내 CO₂ 발생량에 대한 관련지침 개발 및 국가/국제 표준 개발

SUMMARY

I. Title

Environmental assessment of concrete structures using the environmental-friendly chemical treatment

II. Aim of the research and background

1. Research aim

This research project concerns a reduction of the environmental loading against CO₂ emission, leaching of heavy metallic and alkali ions, using the environmental friendly chemical treatment to civil infrastructures. In particular, the main objective of the present year covers **“The development of chemical, electrochemical treatment to lower the environmental loading and assessment of the environmental impact”** then to provide an appropriate model for concrete structures.

2. Research background

Concrete occupies about 80% of construction materials due to its engineering benefits, and its market is increasingly developed. However, there is some opinions that concrete is environmental-destructive against green development and environmental-friendly issues. In fact, there have been rarely investigated about the influence of concrete structure on environments or intermittently.

The emission of CO₂ from cement industry occupies about 7%, and its toxic components may induce dermatic allergic diseases, as reported in media. Notwithstanding, no guideline or obligation on environmental impact of concrete has been provided, but only engineering benefit and economic expense are of interest. Moreover, the cap and trade is about to initiate and thus the environmental model on concrete is urgent to provide qualitative information.

III. Extent of research

This project is planned for totally 3 years and in the third year (2012.6.30~2013.6.29.) the following research topics are included.

- (1) In situ application of addition to reduce heavy metallic ions leached from concrete in aquatic environments
 - Quantification of hexavalent chromium leached from concrete on the spot
 - In situ application of concrete using the loess addition
 - Properties of concrete and mortar using the loess addition
 - Economic evaluation of loess concrete

- Standardization of leaching of heavy metallic ions from concrete
- (2) Determination of the amount of maximum alkali leaching from concrete to preserve ecology and in situ application
- Quantification of alkali leaching from concrete in sea and aquatic environments
 - In situ application of electrochemical treatment
 - Guideline for ecological preservation from alkali leaching
 - Economic evaluation of concrete on applying electrochemical treatment
- (3) Manual for CO₂ emission in concrete mix
- Protocol of optimized concrete mix to minimize CO₂ emission
 - Confirmation of expected CO₂ emission model depending on concrete mix

IV. Research results

- (1) Leaching of heavy metallic ions
- Performance of concrete containing loess to reduce hexavalent chromium leaching is better than normal concrete in aquatic and sea environments
 - Fundamental property and durability for concrete containing loess is marginally lower than normal concrete
 - Loess as hexavalent chromium leaching reducer compared to other reducer (sulfate ferrous and tin sulfate) is good in terms of economy and workability
- (2) Alkali leaching
- Effect of alkali leaching inhibition of concrete applying electrochemical treatment is excellent
 - Alkali ions were leached from Mock up waterway consisting of concrete within 5 hours
 - The limitation of natural purification to recover increased pH by alkali leaching is showed
- (3) CO₂ emission
- Concrete properties against production costs: OPC < 30% PFA < 60% GGBS , environmental effects for CO₂ emission: GGBS < 30% PFA < OPC
 - Development of real time monitoring program to estimate CO₂ emission

V. Application of research results

- (1) Leaching of heavy metallic ions

- In situ application of loess concrete
- Development of a hexavalent chromium measuring device
- Promotion of eco-friendly concrete structures with technique for prevention of hexavalent chromium leaching

(2) Alkali leaching

- Enhancement of concrete performance on applying electrochemical treatment
- Registration of domestic and international patents for electrochemical treatment to avoid alkali leaching from concrete and commercialization
- Standardization of alkali leaching from concrete in aquatic environments

(3) CO₂ emission

- Protocol of minimum CO₂ emission in concrete mix and cement production process
- Registration of domestic and international patents for technique to reduce CO₂ emission and commercialization
- Standardization of CO₂ emission in production of cement and concrete mix

CONTENTS

1. Introduction

- 1.1 Research background
- 1.2 Research objectives
- 1.3 Research extent

2. Technology trends in domestic and international

- 2.1. Domestic technology
 - 2.1.1 Leaching of heavy metallic
 - 2.1.2 Alkali leaching
 - 2.1.3 Emission of CO₂
- 2.2 International research
 - 2.2.1 Leaching of heavy metallic ions
 - 2.2.2 Alkali leaching
 - 2.2.3 Emission of CO₂
- 2.3 Review

3. Research content and results

- 3.1 Research background
- 3.2 Evaluation of impact on ecology resulting in alkali leaching
 - 3.2.1 Previous research
 - 3.2.2 Background
 - 3.2.3 Research on impact on ecology resulting in alkali leachings
 - 3.2.4 Results
- 3.3 Heavy metallic ion leaching from concrete
 - 3.3.1 Background
 - 3.3.2 Previous research and research plan
 - 3.3.3 Research on reduction of metallic ion leaching
 - 3.3.4 Results
 - 3.3.5 Application for reduction of metallic ion leaching
- 3.4 Alkali leaching of concrete
 - 3.4.1 Background
 - 3.4.2 Previous research and research plan
 - 3.4.3 Research on alkali leaching of concrete
 - 3.4.4 Results
 - 3.4.5 Application for reduction of alkali leaching
- 3.5 CO₂ emission in concrete industry
 - 3.5.1 Background
 - 3.5.2 Previous research and research plan
 - 3.5.3 Research on reduction of CO₂ emission
 - 3.5.4 Results
 - 3.5.5 Application for reduction of CO₂ emission in concrete industry

4. Achievement and contribution

- 4.1 Achievements
- 4.2 Contribution to technology

5. Application of research results

- 5.1 In situ application
- 5.2 Standardization
- 5.3 Academic application

6. Conclusion

7. References

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	1
1.1 연구개발의 배경	2
1.2 연구개발의 목적	5
1.3 연구개발의 연구범위	6
제2장 국내외 기술개발 현황	8
2.1 국내기술 동향	9
2.1.1 콘크리트 중의 중금속이온 침출	9
2.1.2 콘크리트 중의 알칼리이온 침출	12
2.1.3 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 배출저감	14
2.2 국외기술 동향	18
2.2.1 콘크리트 중의 중금속이온 침출	18
2.2.2 콘크리트 중의 알칼리이온 침출	19
2.2.3 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 배출저감	23
2.3 총평	25
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	26
3.1 연구개발내용 개요	27
3.2 콘크리트 환경에서 알칼리이온 침출에 따른 생태환경영향 평가	29
3.2.1 연구개요	29
3.2.2 선행연구	30
3.2.3 연구내용	33
3.2.4 연구결과	36
3.2.5 저감효과	38
3.3 콘크리트 중의 중금속이온 침출	39
3.3.1 개요	39
3.3.2 선행연구 및 연구방향	40
3.3.3 중금속이온 침출 저감기법 연구내용	51

3.3.4 중금속이온 침출 저감기법 연구결과	59
3.3.5 중금속이온 침출 저감기법의 적용성	71
3.4 콘크리트의 알칼리이온 침출	73
3.4.1 개요	73
3.4.2 선행연구 및 연구방향	74
3.4.3 콘크리트의 알칼리이온 침출 연구내용	81
3.4.4 콘크리트의 알칼리이온 침출 연구결과	87
3.4.5 알칼리이온 침출저감을 위한 전기방식법의 적용성	95
3.5 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 발생	96
3.5.1 개요	96
3.5.2 선행연구 및 연구방향	97
3.5.3 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 배출저감 연구내용	104
3.5.4 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 배출저감 연구결과	110
3.5.5 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 배출저감 패키지 적용성	121
제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	122
4.1 연구개발목표의 달성도	123
4.2 관련분야 기술발전 기여도	129
제5장 연구개발결과의 활용계획	130
5.1 현장적용	131
5.2 국제/국내표준 제정	135
5.3 학문적 활용	137
제6장 결론	139
제7장 참고문헌	143

<그림 목차>

<그림 1.1> 하천구조물 건설과정에서 콘크리트의 타설에 따른 생태피해에 관한 기사 (오마이뉴스 2012. 2.23)	4
<그림 2.1> 전기응집 반응	10
<그림 2.2> 콘크리트의 어독실험의 예	13
<그림 2.3> 콘크리트의 알칼리이온 침출시험 모식도	20
<그림 2.4> 콘크리트 중의 알칼리이온의 용매 pH에 따른 침출특징	21
<그림 2.5> 콘크리트 중의 알칼리이온의 용매 pH에 따른 침출속도	22
<그림 3.1> 본 연구개발과제의 목표 및 연구내용 흐름도	27
<그림 3.2> 중크롬산 농도에 따른 물벼룩의 사망 및 유영	31
<그림 3.3> 알칼리이온 침출수 희석농도 및 결합재에 따른 물벼룩의 사망 및 유영	32
<그림 3.4> 큰물벼룩 배양액의 조제	36
<그림 3.5> 큰물벼룩 성충 (좌)과 배양 환경	37
<그림 3.6> 중크롬산칼륨 (Potassium dichromate)을 이용한 큰물벼룩의 표준독성실험	37
<그림 3.7> 선행연구 및 3차년도 연구방향 개요 (중금속침출)	40
<그림 3.8> 용매의 산성도 증가에 따른 시멘트 내의 6가크롬의 농도 변화	41
<그림 3.9> pH에 따른 6가크롬의 용해도	41
<그림 3.10> 시멘트 경화체에서의 산농도에 따른 6가크롬의 농도변화(재령 28일)	42
<그림 3.11> 시멘트 수화작용 전/후의 수용성 6가크롬의 농도 변화	43
<그림 3.12> 시멘트 수화작용 전/후의 산가용성 6가크롬의 농도 변화	43
<그림 3.13> 수서환경에서 시멘트 경화체로부터 침출된 수용성 6가크롬의 농도	44
<그림 3.14> Loess 첨가제의 치환에 따른 강도 변화	46
<그림 3.15> 결합재 및 Loess첨가제의 산가용성 6가크롬의 농도	47
<그림 3.16> 6가크롬 첨가 후 시멘트 페이스트에서의 용출 6가크롬의 농도	47
<그림 3.17> 6가크롬 1000 mg 혼입에 따른 XRD 분석	49
<그림 3.18> 수서환경 (하수처리장)에서의 6가크롬 침출능 및 침출량 측정개요	52
<그림 3.19> 콘크리트/모르타르 시편의 6가크롬 함유량 측정 및 처리장 내의 수서환경에서의 6가크롬 측정을 위한 Spectrophotometry	53
<그림 3.20> 해양환경 노출을 통한 콘크리트의 6가크롬 침출시험	54
<그림 3.21> 해수 노출 시 콘크리트의 6가크롬 침출에 따른 해수 중 6가크롬 농도 모니터링 모식도	54
<그림 3.22> Loess 콘크리트의 염소이온 침투특성 측정을 위한 시험 (ASTM C 1202)	55
<그림 3.23> 동결융해 시 1사이클에서의 온도 및 수중, 기건 상태	57

<그림 3.24> Loess 콘크리트의 황산염저항성 측정을 위한 시험	58
<그림 3.25> 수서환경에서 Loess첨가에 따른 6가크롬 침출저감효과 (90일 침지 후, 콘크리트 시편 표면부 5.0mm 까지의 6가크롬 농도)	61
<그림 3.26> 해수에 침지한 Loess 콘크리트의 6가크롬 함유농도 (90일 침지 후, 콘크리트 표면부 5.0 mm 까지의 6가크롬 농도)	62
<그림 3.27> 콘크리트 깊이에 따른 잔존 6가크롬의 농도 및 침출 한계깊이의 예측 (1000 mg/kg-cem의 6가크롬 혼입 후 90일간 해수침지를 통한 침출)	63
<그림 3.28> 해수에 노출된 콘크리트의 시간에 따른 6가크롬의 침출농도 (밀폐형)	64
<그림 3.29> Loess 콘크리트의 강도발현 (장기강도)	65
<그림 3.30> 압축강도와 물-시멘트비와의 관계	66
<그림 3.31> Loess 콘크리트의 염소이온 투과성	66
<그림 3.32> Loess 콘크리트의 동결융해 저항성	67
<그림 3.33> Loess 콘크리트의 황산염 침식저항성 (길이변화)	68
<그림 3.34> Loess 콘크리트의 황산염 침식저항성 (중량변화)	69
<그림 3.35> 시멘트 중의 산가용성 6가크롬 농도 측정을 위한 메커니즘 및 국내표준 제정을 위한 제출문	70
<그림 3.36> 콘크리트에서 6가크롬의 침출능 측정을 위한 개념도 및 국내표준제정을 위한 제출문	71
<그림 3.37> 용매 pH에 따른 콘크리트 중의 알칼리이온의 침출 특성	74
<그림 3.38> 물-시멘트 비에 따른 시멘트 경화체 내 용액의 pH 변화	75
<그림 3.39> 결합재에 따른 시멘트 경화체 내 용액의 pH 변화	76
<그림 3.40> 물-시멘트 비에 따른 시멘트 pH 침출능	77
<그림 3.41> 물-시멘트 비에 따른 시멘트 pH 침출속도	77
<그림 3.42> 통전기간 및 전류량에 따른 전해질용액의 최종 pH 농도	78
<그림 3.43> 전기화학적 처리기법 이후의 알칼리이온 침출에 따른 pH 농도변화	79
<그림 3.44> 선행연구 및 3차년도 연구방향 개요 (알칼리이온 침출)	80
<그림 3.45> 전기방식법의 전류량에 따른 알칼리이온 침출효과 (제2차년도)	82
<그림 3.46> 알칼리이온 침출능 측정을 위한 시편제작 및 노출시험	83
<그림 3.47> 알칼리이온 침출 시험을 위한 노출환경 검증 (pH: 약산성)	83
<그림 3.48> pH 프로파일링을 위한 표면분말 채취, Suspension 제조 및 pH 측정	84
<그림 3.49> 인공수로를 통한 알칼리이온 침출시험을 위한 시편 모식도	85
<그림 3.50> 인공수로 제작과정 및 제작완성 후 모습	85
<그림 3.51> OPC 콘크리트의 침지 90일 후의 pH 프로파일	87
<그림 3.52> 전기방식을 적용한 OPC 콘크리트의 알칼리이온 침출저감 효과 (90일 침지)	88
<그림 3.53> 전기방식을 적용한 GGBS 콘크리트의 알칼리이온 침출저감 효과 (90일 침지)	89
<그림 3.54> 전기방식을 적용한 Loess 콘크리트의 알칼리이온 침출저감 효과 (90일 침지)	90

<그림 3.55> 인공수로 실험을 통한 알칼리이온 침출 및 자연복원 효과 (Binder)	91
<그림 3.56> 인공수로 적용 시 전기방식법의 알칼리이온 침출저감 효과	92
<그림 3.57> 알칼리이온 침출 시험법의 국내외 표준화를 개념도 및 국내표준 제안	93
<그림 3.58> 콘크리트의 알칼리이온 침출 억제를 위한 전기방식법 모식도	94
<그림 3.59> 시멘트 제조 시 에너지원 및 재료에 의한 CO ₂ 배출량	98
<그림 3.60> 시멘트 제조 시 CaO 손실에 따른 CO ₂ 배출량	98
<그림 3.61> 포졸란계 혼화제의 CO ₂ 배출저감 효과	99
<그림 3.62> 콘크리트 배합에 따른 CO ₂ 배출량	100
<그림 3.63> 결합재에 따른 콘크리트의 CO ₂ 배출량	101
<그림 3.64> 콘크리트 생산에 필요한 총 CO ₂ 배출량	102
<그림 3.65> Web 기반형 데이터베이스 모식도	103
<그림 3.66> 선행연구 및 3차년도 연구방향 개요	103
<그림 3.67> 콘크리트 구성재료에 따른 3각기법 검증개념	104
<그림 3.68> CO ₂ 배출량에 대한 통합형 프로그램	106
<그림 3.69> 상부구조 모식도 및 횡단면도	107
<그림 3.70> 상부구조 측면도 및 상부 철근배치도	107
<그림 3.71> 하부구조 측면도 및 정면도	108
<그림 3.72> 결합재에 관한 3각기법 검증	110
<그림 3.73> 골재에 관한 3각기법 검증	111
<그림 3.74> 철근에 관한 3각기법 검증	112
<그림 3.75> 시멘트 설정	113
<그림 3.76> 배합설계	114
<그림 3.77> 시멘트에 따른 CO ₂ 배출량	114
<그림 3.78> W/B에 따른 CO ₂ 배출량	115
<그림 3.79> 단위시멘트량에 따른 CO ₂ 배출량	115
<그림 3.80> 혼화재 사용에 따른 CO ₂ 배출량	116
<그림 3.81> 운송에 따른 CO ₂ 배출량	116
<그림 3.82> 상부구조 콘크리트에 대한 CO ₂ 배출량	117
<그림 3.83> 하부구조 콘크리트에 대한 CO ₂ 배출량	118
<그림 3.84> 전체 콘크리트의 CO ₂ 배출량	119
<그림 3.85> 상부구조 철근량에 대한 CO ₂ 배출량	120
<그림 3.86> 하부구조 철근량에 대한 CO ₂ 배출량	120
<그림 4.1> 성과로드맵	123
<그림 5.1> 국제표준제정을 위한 (a) 제18차 ISO 총회 (Hong Kong, June 2011), (b)	

제19차 ISO 총회 (San Jose, Costa Rica, June 2012) 에서의 제안 및 Ad-hoc group 결성에 대한 최종발표	135
--	-----

<표 목차>

[표 1.1] 세계건설시장 동향 및 전망 (단위: 10억달러, 2011년이후는 예상치)	2
[표 1.2] 미국 Green Building 시장 동향 및 전망 (단위: 억달러)	3
[표 1.3] 국내 친환경 건설자재 시장현황 (단위: 조원)	3
[표 2.1] 콘크리트 중의 중금속이온 침출에 관한 국내 법령 및 제한	11
[표 2.2] 콘크리트 중의 중금속이온 침출 관련 국내특허동향	12
[표 2.3] 콘크리트 생산 시 발생하는 CO ₂ 억제에 관한 연구	15
[표 2.4] 콘크리트 생산에 따른 CO ₂ 억제 관련 법령/법규 및 국가 연구	15
[표 2.5] 시멘트 중의 6가크롬 침출 억제제	19
[표 2.6] 영국의 알칼리이온 침출방지를 위한 진행 연구	22
[표 2.7] 국내외 기술 및 특허 현황	25
[표 3.1] 콘크리트 알칼리이온 침출수의 물벼룩에 대한 급성독성시험	31
[표 3.2] 물벼룩 배양액의 구성	33
[표 3.3] 물벼룩 배양 조건	34
[표 3.4] 생태독성 실험에서의 주요 용어	35
[표 3.5] Loess 및 결합재별 화학조성	45
[표 3.6] 결합재의 화학조성	50
[표 3.7] 시험 개요	50
[표 3.8] 통과전하량에 따른 이온투과저항성 (ASTM C 1202)	56
[표 3.9] Sulfate계 6가크롬 저감제와의 Loess의 사양비교	70
[표 3.10] 인공수로 실험의 사양	84
[표 3.11] 건설재료별 CO ₂ 배출량 및 산정식	105
[표 3.12] 콘크리트 배합설계 단위: kg/m ³	108
[표 3.13] 상부구조 철근량 및 무게	109
[표 3.14] 하부구조 철근량 및 무게	109
[표 4.1] 정성적 연구개발성과	124
[표 4.2] 정량적 연구개발성과	125
[표 4.3] 관련분야 기술발전 기여도	129
[표 5.1] 연구 결과물에 따른 활용방안	132

제1장 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 배경

1.2 연구개발의 목적

1.3 연구개발의 연구범위

제1장 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 배경

세계적인 건설시장의 동향을 볼 때 중국, 동남아시아 및 중남미 등의 개발도상국의 경우 도시개발, 플랜트산업 확충, 사회기간자본 시설확충과 같은 대형 토목사업은 활발히 이루어지고 있다 (Global Insight 2011). 뿐만 아니라 선진국의 경우도 기존의 사회간접자본과 관련된 시설의 노화에 따른 개보수 및 신설, 신도시 개발 및 도로망 확충과 같은 건설시장은 세계적인 불경기에도 불구하고 꾸준한 투자를 시행하고 있다. 이는 최근의 건설시장의 규모에서 알 수 있듯이 2009년 기준 6.3조 달러의 세계건설시장 규모가 매년 증가하여 2011년에는 약 7.1조 달러로 성장하며 이러한 성장추세는 2014년에는 약 8.8조 달러에 이를 것으로 예상하고, 이러한 성장세는 연간 5.3%에 이른다. 우리나라는 세계 10위권의 건설시장 규모를 차지하고 있으며 해외에서의 수주규모는 매년 꾸준한 증가세를 보이다가 2011년에는 약 400억달러의 수주로 세계점유율 약 7.1%를 기록하고 있다. 뿐만 아니라 국내에서는 현재 신도시 건설, 4대강 정비사업, 대형토목인프라구조물의 시설확충 등과 같이 건설인프라 구축을 위한 국가기간 인프라 구축을 위한 투자가 대대적으로 진행하고 있다.

[표 1.1] 세계건설시장 동향 및 전망 (단위: 10억달러, 2011년이후는 예상치)

구분	2009	2010	2011	2012	2013	2014
세계건설시장	6,389	6,601	7,149	7,764	8,417	8,864
해외건설시장	511.1	528.1	571.9	621.2	673.4	709.1
수주액	49.1	71.6	70.0	80.0	90.0	100.0
매출액	26.0	35.4	40.5	48.2	56.7	63.9
점유율	5.1%	6.7%	7.1%	7.8%	8.4%	9.0%

이와 같은 사회기반산업인 건설에 대한 투자가 전방위적으로 진행되고 있는 가운데, 현재 세계건설은 패러다임의 변화로 친환경, 그린건설시장이 급속하게 확대되고 있다. 미국 Green Building Materials 시장은 2009년 96억 달러에서 2014년에 314억 달러의 시장규모 예측을 하고 있으며 앞으로 지속적으로 증가할 것으로 예상하고 있다. 또한 과거 프로젝트의 최소 16% 이상을 친환경 프로젝트를 가진 건설업체는 24% 정도에 불과하나

현재는 67%에 달하며, 2013년에는 거의 94% 이상 대부분의 프로젝트가 친환경 프로젝트가 될 것으로 예측 된다 (McGraw-Hill Construction, 2008). 국내의 경우 친환경 건설자재 시장은 2015년 3.8조원에서 2025년까지 6.2조원 규모로 성장이 예상된다 (한국 건설산업연구원, 2011).

[표 1.2] 미국 Green Building 시장 동향 및 전망 (단위: 억달러)

구분	2015	2020	2025
구조재료분야	271	1,753	11,323
내장재분야	72	446	2,765
외장재분야	57	342	2,061
합계	400	2,540	16,148

[표 1.3] 국내 친환경 건설자재 시장현황 (단위: 조원)

구분	2015	2020	2025
친환경 상품시장	25	33	41
친환경 건설자재시장	3.8	5.0	6.2

이처럼 건설시장 흐름 중 환경영향성에 대한 관심은 선진국을 중심으로 현재 활발히 논의 되고 있음은 주지의 사실이다. 실제로 건설산업에 있어 우리나라도 최근에는 환경에 대한 관심과 경각심이 각종 언론매체 및 미디어를 통해서 보도되고 있으며 (오마이뉴스, 2012) 실제로 이로 인한 건설산업에 대한 부정적 인식이 팽배해 있음은 부정할 수 없는 사실이다. 예를 들어 4대강 개발사업에서 발생하는 각종 환경영향 및 생태계의 파괴현상에 대해 콘크리트에서 침출되는 각종 유독물질에 대한 경고 및 주변 수생환경의 파괴 등이 보도된 바 있다. 그러나 실제로 환경영향성 평가에 대해서는 건설산업과의 연계된 합리적인 기준이나 가이드라인이 부재함으로 이에 대한 대응책을 찾는 데에도 어려움이 있다.

또한 국제적으로 탄소배출권거래제 (Cap and trade)가 곧 실시될 시점에서 건설산업에서 차지하는 환경분담에 대한 논의도 매우 시급한 사안으로 대두되고 있으며 국내외적으로 이에 대한 대응책 마련 및 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 건설산업에서 발생하는 CO₂ 배기가스 감소를 위한 연구는 국내관련 학계, 산업, 연구소를 중심으로 세계적인 수준의 성과를 보이고 있다. 또한 CO₂ 배기가스 감축을 위한 국제공조 노력 또한 활

발히 진행되고 있는데 국제표준협회 (International Standardization Organization; ISO) 콘크리트 기술위원회 (Technical Committee 71; TC 71)에서는 최근 수년 사이에 CO₂ 배출감소를 위한 국제표준 및 가이드라인 제정에 우리나라를 비롯한 미국, 일본 등 많은 국가들이 참여하고 있다.



<그림 1.1> 하천구조물 건설과정에서 콘크리트의 타설에 따른 생태피해에 관한 기사
(오마이뉴스 2012. 2.23)

건설시장에서 환경영향성 저감을 위한 노력의 핵심은 건설산업에서의 주요재료인 콘크리트와의 관련성이 가장 크다. 콘크리트는 강재, 비철금속, 플라스틱, 목재와 더불어 건설산업의 주요재료이며 건설재료로 차지하는 비중은 약 80%로 절대적이라 할 수 있다. 이는 콘크리트의 우수한 성형성, 강성, 경제성 등을 고루 갖추고 있어 건설시장의 꾸준한 성장에 맞춰 콘크리트의 사용량도 매년 증가하는 추세로 우리나라의 경우 연간 약 3억ton의 콘크리트가 그리고 약 5000만ton의 시멘트가 사용되고 있다 (한국양회공업협회, 2009). 그러나 건설재료로서 콘크리트에 대한 평가는 녹색성장, 친환경에 대한 세계적 이슈와 맞물려 콘크리트의 유해성 내지는 환경과파괴적인 면이 부각되고 있다. 더불어 콘크리트의 환경영향성에 대해서는 구체적이고 정량적인 연구가 이루어진 경우가 매우 드물고 단편적인 연구에 그친 게 사실이다. 본 연구에서는 콘크리트의 환경영향성에 대한 정량평가 기준을 마련하기 위해 콘크리트의 환경유해 가능성이 있는 요인에 대한 환경영향성 평가, 환경오염 저감기술개발 및 현장적용성 평가로 순차적으로 이루어지며 최종적으로는 이에 관한 국내/국제표준 제정을 통해 국내외적으로 건설산업이 환경에 미치는 영향인자를 최소화하는데 목적이 있다.

1.2 연구개발의 목적

본 연구의 최종목표는 “환경친화적 화학처리기법을 이용한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감기법개발”로 콘크리트로 제작되는 토목, 건축구조물 건설 및 공용시 발생될 수 있는 환경오염의 주요 인자인 중금속 및 강알칼리이온의 침출, 콘크리트 생산시 발생하는 CO₂ 가스의 배출을 침출저감 기법 및 CO₂ 가스 최소 배출 프로토콜을 이용하여 사회 인프라 시설 건설 및 공용에 의해 발생하는 환경부하를 조절하는데 최종 목표를 두고 있다. 특히 당해연도에서는 제1,2차년도에서 연구개발된 유해물질 침출 메커니즘 및 침출 저감 기법을 이용하여 실제 콘크리트 구조물에 적용함으로써 개발된 기법의 효율성 및 CO₂ 가스 최소 배출 프로토콜을 적용하기 위한 개발모델의 검증 작업을 포함한다. 또한 콘크리트 구조물의 환경영향성에 관한 매뉴얼, 국내/국제표준 및 지침안을 제시함으로써 연구내용의 실용화를 꾀하고자 한다.

최종목표:

친환경 화학처리기법을 통한 콘크리트의 환경영향성 저감 및 환경영향성 평가

당해연도 연구목표:

콘크리트에서 발생하는 환경영향인자에 대한 저감기법의 현장적용 및 환경영향성 평가

당해연도 세부연구목표:

- (1) 콘크리트 내 침출형 중금속의 침출방지 기술 현장 적용 및 효율성 평가
- (2) 전기화학적 처리 기법을 콘크리트 내 강알칼리이온의 침출 저감 기법 현 침출방지 기술 현장 적용 및 효율성 평가
- (3) 최소 CO₂ 배출저감을 위한 콘크리트 생산공정에 대한 프로토콜 및 예상 CO₂ 배출계산을 위한 모델 정립

1.3 연구개발의 연구범위

본 연구는 “콘크리트에서 발생하는 환경영향인자의 저감기법 적용 및 환경영향성 평가”라는 당해연도 연구 목표를 세우고 이에 따른 세부 연구 목표를 중금속 이온 침출 저감 기법적용, 강알칼리이온 침출 저감 기법적용 및 구축된 Web 데이터베이스를 기반으로 한 최소 CO₂ 배출 모델 정립을 세우고 그에 따른 연구범위와 연구내용을 수행하였다. 특히 당해연도에는 제 1차, 2차년도의 연구결과를 바탕으로 한 현장에서의 연구결과의 효율성에 초점을 맞추어 현장적용에 따른 경제 효율성 평가 및 생태영향성 평가를 포함하고 있으며, 국내/국제표준 및 지침안을 통한 연구개발에 대한 실용성을 극대화 시킬 수 있도록 세부연구목표를 세우고 연구범위와 연구내용을 다음과 같다.

(1) 콘크리트 내 침출형 중금속의 침출방지 기술 현장 적용 및 효율성 평가

- 현장조사를 통한 중금속이온 침출량, 침적량, 자정에 따른 중금속이온량 산정
- Loess첨가제의 현장적용 및 효율성평가
- Loess 첨가 콘크리트/모르타르의 장기강도, 내구성 및 화학적 반응 분석
- Loess 첨가제 사용에 따른 경제성 평가
- Loess 첨가제의 실용화를 위한 유관 업계와의 공조
- Loess외의 중금속 침출저감제 (Tin sulfate, Ferrous sulfate)와 의 비교평가
- 하이브리드스마트시멘트와의 차별성 제고
- 중금속 침출에 관한 매뉴얼 및 국내/국제표준 Committee Draft 제정

(2) 전기화학적 처리 기법을 콘크리트 내 강알칼리이온의 침출 저감 기법 현 침출방지 기술 현장 적용 및 효율성 평가

- 유수환경에서의 콘크리트 표면에서 부터의 pH 프로파일링 및 알칼리이온의 침출량 조사
- 전기화학적 기법의 현장적용
- 알칼리이온침출의 생태환경영향성에 관한 지침제정
- 전기화학적 기법 적용에 따른 경제성 평가

(3) 최소 CO₂ 배출저감을 위한 콘크리트 생산공정에 대한 프로토콜 및 예상 CO₂ 배출 계산을 위한 모델 정립

- 콘크리트 생산방식, 콘크리트배합, 운송에 따른 CO₂ 배출량에 관한 프로토콜 및 가이드라인 제정
- 콘크리트 생산에 따른 예상 CO₂ 배출량에 관한 패키지프로그램 개발
- Database에 의해 산정된 예상 CO₂ 배출량과 실측치 CO₂ 양과의 비교분석 및 검증
- 통합형 환경저감제 활용에 관한 3각법적 종합 정보 매뉴얼 개발

제2장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내기술 동향

2.2 국외기술 동향

2.3 총평

제2장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내기술 동향

2.1.1 콘크리트 중의 중금속이온 침출

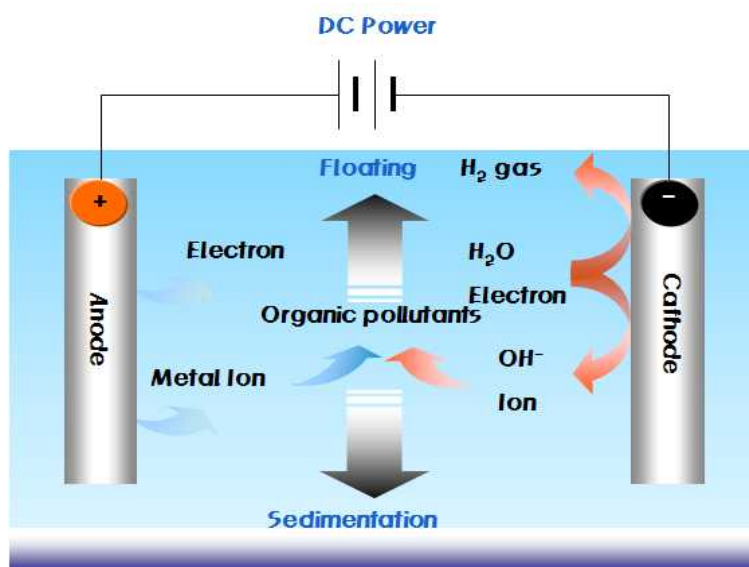
현재 국내에서 콘크리트 중의 중금속 및 6가크롬 등의 유해물질 침출 가능성에 관한 연구는 시험법 위주로 측정치의 정확도를 높이는데 주목적을 두고 연구를 진행되고 있으나, 이 또한 구체적이고 체계적으로 이루어지지 않아 측정방법에 따라 결과가 다르게 나타나고 있는 실정이다. 현재 국내에서는 콘크리트 내의 유해물질 중 6가크롬에 대해서는 시멘트내에서의 농도를 제한함으로써 콘크리트 생산시 발생될 수 있는 유독성을 방지할 수 있는 가이드라인이 제시되고 있고, 환경부에서는 2009년부터 시멘트내의 6가크롬의 양을 20 ppm으로 제한치를 엄격하게 두고 있지만, 구속력을 가진 제한이 아니란 점에서 강력한 규제를 가진 2 ppm (우리나라의 1/10)인 유럽에 비하면 유명무실하다고 할 수 있다.

반면, 국립환경과학원에서 시멘트의 중금속 용출 특성을 폐기물공정시험방법(용출시험)에 의한 실험결과에서 보면, 6가크롬의 함량은 0.51 - 1.70 ml/l 이고 나머지 중금속(카드뮴, 납, 구리, 비소 등)은 검출되지 않는 것을 나타냈다. 또한 더욱이 폐기물을 재활용하여 생산된 시멘트에 포함된 중금속 유해성 논란과 관련하여 민·관 합동으로 중금속 정밀조사를 실시('07.12~'08.5)한 결과 시멘트 제품에서 묻어나오는 6가크롬 등 중금속량(용출량)은 모든 항목에서 기준치의 절반 이내인 것으로 조사되었다. 하지만 일본시멘트협회시험법을 적용한 분석에서는 6가크롬의 양이 평균 25.5 mg/kg이 검출되어 일본산 시멘트 평균치 8.1 mg/kg 보다 3배나 많이 함유되어 있는 것을 알 수 있다. 이렇게 국내의 6가크롬의 양이 다른 선진국에 비해 높게 나타나는 것은 한국산업규격에는 시멘트의 유효 성분 함유량과 고화되었을 때의 강도등 품질 기준만 정할 뿐 중금속과 같은 유해물질 함유량에 대한 규정을 있지 않기 때문이다.

그리고 시멘트 내의 6가크롬의 양이 측정방법마다 상이하게 나타나고 있으며, 특히 국내에서 적용되는 시험법에서 6가크롬의 양이 더 적게 검출되는 것은 (1) 시멘트 내에 존재하는 수용성 6가크롬만을 측정, (2) 측정 시 미세한 양을 채취하여 기기분석에서의 오류와 같은 가능한 시나리오로 볼 수 있다. 실제로 국내에서 사용하는 6가크롬 농도측정은 시멘트를 증류수에 희석하여 측정함으로써 시멘트 내에서 화학반응에 의한 침전(Precipitation), 고정화(Binding), 결정화(Solidification)의 가능성이 있음에도 불구하고 이러한 부분에 대해 무시함으로써 발생한 오류일 수 있다. 또한 6가크롬 측정 시 사용되는 시멘트의 양이 측정하기에 너무 미소량으로, 본 연구의 선행연구로 1g 시멘트 시료를 타기관에 측정되려 하였을 때, '불검출' 판정을 받았으나, 2g의 시멘트 시료를 가지

고 측정하였을 때에는 35ppm이 검출되는 것을 확인 할 수 있었다. 다시말해서, 시료양이 너무 적어서 측정기기의 측정값의 농도를 가지게 되는 오류가 발생한 것으로 판단된다.

시멘트내에는 일반적으로 6가크롬 이외에도 앞에서 언급한 여러 중금속 물질이 존재하는 것으로 알려져 있으나, 그 양이 국내의 기준치 대비 1/10 - 1/1000의 매우 낮은 값을 가져 인체 및 생태계에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 비록 6가크롬을 비롯하여 중금속 물질의 존재 혹은 침출량이 적더라도 인체 및 생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위한 중금속 이온 처리 방법에 관한 기술은 진행되고 있다. 중금속 이온 처리 방법은 화학적 침전법, 막분리, 이온교환 수지법, 생체 흡착법, 증발법, 활성탄 흡착법이 있으나 최근 전기응집 기술을 이용한 중금속 이온 처리 방법에 관한 연구가 진행되고 있다. 전기응집 기술이란 전기를 공급하여 음전하를 띠고 있는 수중의 불순물들이 양극에서 용출된 금속 이온에 의해 전기적으로 중화하여 응집, 침전이 일어나게 하는 방법이며 원리를 그림 2에 도식화 하였다. 전기응집 기술은 염색 폐수의 처리, 하수처리, oil-water emulsion의 처리, 중금속함유 폐수의 처리, 정수처리 등과 같이 다양한 수처리 분야에 적용이 가능하며 전기응집 기술을 산업폐수가 아닌 타 수처리 분야에 적용 (한무영 등, 2004) 및 튜브형 전기응집 장치에 의한 중금속과 난분해성 유기물 제거에 연구함으로써 다양한 전극형태에 대한 연구를 제시하였다 (정종식 등, 1997). 또한 하수처리 효율에 대한 연구 (이승민 등 2007) 및 병원폐수에 대한 적용을 연구하는 등 다양한 분야에서의 적용이 시도되고 있다 (정병곤 등, 2008).



<그림 2.1> 전기응집 반응

현재 콘크리트의 유해물질 관련 국내 연구 동향에서 보면, 대부분 6가크롬에 초점을 맞춰 연구가 진행되고 있으며, 정부에서 추진한 정부 정책이나 관련 법령에서도 중금속 이온의 전반적인 규제보다는 6가크롬 농도에 대한 규제가 주를 이루고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 콘크리트의 유해이온침출에 관해서는 국내의 연구동향을 볼 때 주로 6가크롬에 초점이 맞추어져 있으며 정부에서도 관련 법령 및 정책을 실현함으로써 콘크리트의 환경 영향성에 대해 규제하고 있다. 표 2.1에서 제시한 바와 같이 폐기물관리법을 통해 전반적인 유독물질 침출에 대해 억제하고 있으며 콘크리트와 관련해서는 “시멘트소성로 환경관리개선계획 (환경부)” “시멘트 6가크롬 관리방안 (환경부)” 를 통해 콘크리트에서 존재하는 6가크롬의 농도에 대해 규제해오고 있다.

[표 2.1] 콘크리트 중의 중금속이온 침출에 관한 국내 법령 및 제한

관령법령/ 정부정책	담당기관	주요내용
폐기물관리법	환경부	- 6가크롬, 비소, 수은, 카드뮴, 납 등이 침출을 방지 및 회수
시멘트 소성로 환경관리 개선계획	환경부	- 국산, 일본, 중국 시멘트 등 총 408건의 시료에 대해 중금속 용출정도, 함량 등을 정밀검사 실시('07.12~'08.3) - 용출시험은 국산과 외산 모두 기준치의 1/2 이내로 검출 - 6가크롬은 자율기준(30mg/kg) 이내이나 일본에 비해 다소 높았으며, 함량은 일부 항목이 외산보다 다소 높았으나 기준이 없어 판단 곤란
시멘트에 포함된 중금속 기준 마련	환경부	- 시멘트 제품의 6가크롬 함량 가이드라인 설정('06.12)
시멘트 6가크롬 관리방안	환경부	- 시멘트의 6가크롬 함유기준은 2008년 30mg/kg, 2009년 20mg/kg으로 단계적으로 강화 - 2008년부터 6가크롬 함유량에 대한 분석결과를 공표
수질 및 수생태계 보전에 관한 법률	환경부	- 사람의 건강, 재산이나 동·식물의 생육에 직접 또는 간접적으로 위해를 줄 우려가 있는 물질을 특정수질유해물질로 지정. - 현재까지는 가크롬, 수은, 카드뮴, 페놀 등 총 19종이 지정
중금속 관련 폐기물관리법	환경부	- 시멘트 소성시 사용 가능한 폐기물에 대한 중금속 함량 기준 지정('11.09)

콘크리트 중의 6가크롬의 농도를 억제할 수 있는 기술적 연구에 대해 특허출원 및 등록이 진행되고 있으며 정부에서도 관련 연구에 대한 국책과제로 발전시키는 사례가 증가하고 있다. 표 2.2에서 보듯이 콘크리트 중의 6가크롬의 침출억제를 위한 산업의 동향은

토목구조물과 같이 대량의 콘크리트를 사용하는 경우가 아닌 주로 주택용으로 제한되며 화학적 첨가제를 사용함으로써 6가크롬의 침출억제를 목적으로 한다. 또한 콘크리트의 다공질 특성을 이용하여 오폐수에 존재하는 유독물질을 흡착하는 방식의 특허도 있으나 본 연구의 방향과는 거리가 있어 연구진행에서 제외하였다.

[표 2.2] 콘크리트 중의 중금속이온 침출 관련 국내특허동향

특허명	관련내용
6가크롬이 제거된 시멘트계 콘크리트 먼처리용 조정제 (한국, 10-2006-0034156)	- 목적: 콘크리트의 6가크롬 제거 - 기술: 콘크리트 표면에 조정제를 도포함으로써 6가크롬 침출 억제 - 장점: 6가크롬 침출 억제 외에 경비절감효과
6가크롬이 제거된 공동주택의 콘크리트 바닥용 시멘트 모르타르 조성물 (한국, 10-2006-0043522)	- 목적: 바닥용 콘크리트의 6가크롬 침출 저감 - 기술: 황산제일철수화물을 콘크리트에 첨가하여 6가크롬을 3가크롬으로 전이 - 장점: 6가크롬 저감외에 균열방지효과
경량 기포콘크리트를 이용한 폐수중의 중금속 제거 기술 (한국, 10-2002-0046233)	- 목적: 폐수 중에 존재하는 중금속 흡착 - 기술: 경량기포콘크리트의 다공에 중금속 이온을 흡착하여 제거 - 장점: 경비절감효과
콘크리트의 중금속 용출방지용 기능성 혼합재와 이를 이용한 지반보강용 조성물 (한국, 10-2012-0103453)	- 목적: 시멘트내의 중금속과 6가크롬 고정 - 기술: 중금속 용출방지용 혼합재를 첨가하여 중금속과 6가크롬 고정 - 장점: 6가크롬 고정외에 지반보강기능
CO ₂ 고용화 폐시멘트를 이용한 오염물질 내의 중금속 흡착방법 (한국, 10-2009-0099806)	- 목적: 오염물질 내 중금속 흡착 - 기술: CO₂ 가스를 고용한 폐시멘트를 이용하여 오염물질 내 중금속 흡착 - 장점: 폐자원의 유효 이용 및 환경 개선 효과

2.1.2 콘크리트 중의 알칼리이온 침출

콘크리트 구조물을 건설된 위치에 따라 해수, 하천 및 우수 등의 다양한 형태로 물과 접촉하게 된다. 콘크리트의 양생 동안에는 물과 접촉하는 것이 시멘트의 수화작용에 이롭

게 작용한다. 그러나 콘크리트에 접촉된 물은 다양한 유해성분을 함유하고 있어 수중생태로 유입 시 생태환경에 유해한 변화를 일으킬 수 있다. 콘크리트의 물 접촉으로 인한 알칼리이온의 침출은 구조물의 공학적 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 알칼리도를 상승시킴으로 생물체에도 유해할 수 있다. 일반적으로 pH 7.0-8.5가 수중생물체의 환경으로 적합한 것으로 알려져 있다. 고알칼리는 생물체의 피부, 아가미, 눈에 직접적인 물리적 손상을 야기할 수 있다.

침출작용은 고체물질에서 용해성을 가진 용매에 의해 특정 이온 물질이 추출되는 것으로 정의할 수 있다. 콘크리트의 생산에 주로 사용되는 포틀랜드 시멘트는 산화칼슘(CaO)이 주성분이다. 산화칼슘이 수화작용 동안에 물과 접촉하여, 규산칼슘 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)과 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 생성된다. 석회라고도 불리는 규산칼슘과 수산화칼슘의 주요 특성은 견고한 접착성이다. 이로 인해 콘크리트는 골재들을 구속시켜 경화된다. 또한 규산칼슘은 콘크리트의 강도 특성에 큰 영향을 미친다. 수화작용 동안에 생성된 수산화칼슘은 콘크리트의 공극수의 알칼리도를 약 12.5로 유지한다.

선행연구에 의하면 침출작용에 영향을 미치는 주된 인자는 단위 시멘트량, 콘크리트의 물 접촉 면적, 물-콘크리트 체적비, 물 접촉 시간, 물 접촉시의 콘크리트 재령이다. 콘크리트의 접촉면적과 침출량과의 직접적인 연관성에 관한 연구에서 접촉면적이 클수록 침출량도 크게 증가한다. 그러나 콘크리트의 체적이 일정하지 않았기 때문에 용매에 접촉하는 표면적 변화에 의한 침출량의 증가라 하기 어렵다. 체적 변화는 알칼리이온이 침출되는 경로의 길이와 연관이 있기 때문에 침출이 일어나는 기간에 영향을 미칠 수 있다. 현재 국내 외적으로 콘크리트의 알칼리이온 침출에 관한 다양한 연구에도 불구하고 대부분이 침출현상에 따른 콘크리트의 열화 및 내구성 저하와 관련된 연구이고, 침출된 알칼리이온에 의한 오염에 대한 연구는 미미한 실정이다.



<그림 2.2> 콘크리트의 어독실험의 예

콘크리트의 알칼리이온 침출에 관한 국내연구는 환경 및 생태영향성과 관련한 연구는 거의 전무한 실정이다. 최근 굳지 않은 콘크리트를 수중환경에 두었을 때의 어독실험에 관한 연구가 있었으나 생태환경과 알칼리이온 침출량에 관한 정량적 관계를 확보하지 못한 채 콘크리트의 유해성에 대한 확인만을 하였다.

2.1.3 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출저감

우리나라에서는 콘크리트의 환경영향성에 대한 연구로 중금속이온의 침출보다는 CO₂ 배출과 관련 매우 많은 연구가 진행되고 있다. 연구방향은 표 2.3에서 보는 바와 같이 주로 세가지로 (1) 포졸란계 혼화재를 치환한 시멘트 사용의 억제, (2) 재생골재, 폐타이어 등의 폐기물의 시멘트용 또는 콘크리트용 재료로 재활용 및 (3) 콘크리트의 중성화에 따른 배출 CO₂ 의 재흡수가 있다.

플라이애시를 사용할 경우 대체율 20%일 때 약 15% 정도의 CO₂ 배출 감소효과를 볼 수 있으며 (양근혁 등, 2011) 공학적 우수성이 이미 수많은 연구를 통해 이루어져 왔다 (황광률, 2002). 또한 고로슬래그 미분말을 비롯한 제강슬래그의 활용에 따라서도 상당한 CO₂ 배출 저감효과가 있음은 주지의 사실이다 (한국환경산업기술원 2011). 최근에는 시멘트 생산 시 발생하는 CO₂ 발생량을 최소화 하기 위해 무시멘트 콘크리트에 대한 개발연구가 진행중이다. 즉 시멘트를 전혀 사용하지 않고 포졸란계 혼화재만을 이용하여 콘크리트를 생산하는 방식으로 시멘트의 수경성을 확보하기 위해 알칼리게 촉진제를 같이 사용함으로써 콘크리트의 강성을 확보하며 환경영향성을 최소화 하는 방식이다. 그러나 현재로서는 시멘트의 사용보다는 경제적비용이 발생하게 되는데 이는 무시멘트 콘크리트를 생산하기 위해서는 포졸란계 혼화재의 추가적인 미립화를 위한 공정처리를 거치는 과정에서 비용발생이 이루어지며, 또한 전력사용증가로 인한 CO₂ 배출로 인한 환경영향성 발생이라는 단점을 가지고 있어 현재로는 연구단계에 머물러 있다 (Lim et al 2012). 또한 골재의 재사용을 통한 CO₂ 배출 저감에 관한 연구를 진행하고 있다. 시멘트생산에 따른 CO₂ 배출에 비해서는 골재생산에 따른 CO₂ 배출은 미미한 수준이나 자원의 재활용의 관점에서 전방위적으로 이루어지고 있다 (한국건설기술연구원, 2011).

콘크리트의 CO₂ 배출과 관련하여 색다른 연구방향도 진행되고 있다. 예로써 “CO₂ 배출 보상”이라는 연구방향인데, 시멘트 생산에 따라 CO₂ 배출이 발생한다고 하더라도 콘크리트 구조물이 건설된 이후에는 공기 중의 CO₂ 와의 화학반응을 통해 중성화가 되고 이 과정에서 CO₂ 가 소모되므로 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출은 일정부분 보상을 이룬다는 연구이다 (이상현 등, 2009). 그러나 CO₂ 배출을 어느 정도 보상하느냐 그리고 중성화에 의한 콘크리트 구조물의 열화가능성에 대해서는 걱정점을 찾아야 할 듯하다. 즉 중성화가 많이 되어 CO₂ 를 많이 소모하면 환경적으로는 유리하나 구조물의 내구성능이

감소하는 단점이 있으므로 이에 대한 고찰이 반드시 따라야 하고, 또한 중성화의 속도 대비 사용된 콘크리트 양을 생각할 때 이는 건축구조물과 같이 콘크리트의 두께가 작고 비표면적이 넓으며 중성화에 적합한 온도, 습도조건에 노출되었을 때만이 가능할 것으로 판단된다.

[표 2.3] 콘크리트 생산 시 발생하는 CO₂ 억제에 관한 연구

연구방향	연구내용	한계
시멘트 사용억제	- 시멘트 대신 포졸란계 혼화재인 플라이애시, 고로슬래그미분말을 콘크리트용 결합재로 사용. - 최근에는 제로시멘트 (또는 무시멘트) 콘크리트 연구개발	- 이미 포졸란계 혼화재 사용은 활발 - 무시멘트 콘크리트의 생산을 위해 추가적 경제비용 발생
폐기물의 콘크리트 첨가 및 재사용	- 페타이어, 재생골재 등을 콘크리트에 혼입하여 환경처리 시 발생하는 CO₂ 발생에 대한 보상	- 콘크리트의 강성저하
CO ₂ 의 콘크리트 채흡수	- 콘크리트의 중성화 과정을 통해 CO₂ 를 소비함으로써 시멘트 생산과정에서 발생하는 CO₂ 를 일정부분 보상함	- 실제 CO₂ 채흡수량 미미 - 콘크리트 내구성 저하

콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출과 관련한 국내의 법령/법규 및 국가주도 연구현황을 표 2.4에 나타내었다. 환경부의 “저탄소녹색성장기본법”을 중심으로 콘크리트 및 시멘트 생산에 따른 CO₂ 저감에 관한 국가적인 차원에서의 정책과 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히 시멘트 생산관리에 관한 연구가 국가 주도로 진행되고 있다. 국내학계에서는 상기 언급한 바와 같이 콘크리트 재료의 보정을 통한 CO₂ 저감 구현과는 상이한 연구방향으로 진행되고 있음을 주지한다.

[표 2.4] 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 억제 관련 법령/법규 및 국가 연구

관령법령/ 정부정책	담당기관	주요내용
건설기술의 녹색성장 실행계획	국토해양부	- 건축 및 토목 시설물 전 단계의 탄소배출량 분석 및 전생애적 관점에서의 탄소배출량 최소화 추진 - 기획설계 단계에서 저탄소 녹색성장의 개념이 추가된 건설기준으로 전환

건설기술의 녹색성장 실행계획		- 재료단계에서 자재, 시공포함 전 생애적 관점에서의 온실가스 평가방법 정립 및 시설물 유형별, 공종별, 건설사업 단계 온실가스 배출량 평가지표, 통계시스템 구축 - 해체단계에 있어서 건설폐기물 발생 억제 및 재활용기술 개발 - 녹색건설기술 R&D 확대 및 녹색기술 인력양성 - 녹색성장 성과지표 개발 및 인센티브 마련
건설기술의 녹색성장 실행계획 (제2009-35호)		- 옥상조경 권장설계도서의 작성 및 보급자 확대 - 기술발달 가능성을 저해할 수 있는 그늘식재 삭제 및 식재토심 규정 보완 - 식재수종 선택기준 및 품질기준 신설
건축물에너지절약 설계기준 개정 (제2008-652호)		- 에너지절약형 건축물에 대한 건축기준 완화 - 에너지성능지표(EPI) 검토서 배점기준 개선 - 건축·전기·기계설비 부문별 의무·권장사항 보완 - 에너지절약계획서 이행 관리
친환경 주택의 건설기준 및 성능 (제2010-421호)		- 저에너지, 고효율, 외부환경 조성, 녹색 IT기술 보급 - 친환경 주택 건설기준 및 성능 설정 - 단위 세대의 에너지 사용량, 이산화탄소 배출량을 전용면적이 60제곱미터를 초과하는 경우 20% 이상
녹색성장 국가전략	녹색성장 위원회	- 저탄소 녹색성장을 위한 정책목표·추진전략·중점·추진과제 등을 포함하는 국가전략을 수립·시행 - CO₂ 포집, 저장, 처리기술과 친환경 저에너지 건축기술을 27개 중점기술에 선정
기후변화대응 종합대책	환경부	- 가정·상업·공공·운송 부문 등 비산업부문의 에너지 수요관리를 중심으로 한 온실가스 감축대책 - 개인·기업·지방정부 간 온실가스 배출권을 사고 팔 수 있도록 하는 제도 도입 - 친환경제품 기준 강화
저탄소 녹색성장기본법	환경부	- 정부가 관리업체의 온실가스 배출량과 에너지 사용량에 대한 목표를 부과하고 이에 대한 실적을 점검·관리 - 제로온실가스 배출 및 에너지 사용에 대한 정보가 체계적으로 관리
친환경 상품 구매 촉진정책		- 재활용제품, 환경친화성을 갖는 제품으로써 인증받은 제품(GR, 환경마크)을 공공기관에서 의무구매로 폐기물 및 순환자원 등의 재활용을 촉진
건설폐기물 재활용 기본계획	환경부	- 건설폐기물의 재활용 촉진을 위한 순환골재 의무사용 증대 - 순환골재의 고품질 활용 증대 추진

콘크리트시방서 친환경 녹색성장 부합해 개정	한국콘크리트학회	- 순환골재 콘크리트 재료품질 및 배합 등 기준을 마련 - CO₂ 저감을 위한 시멘트 사용량을 줄이기 위한 대체 바인더 사용 - 친환경 녹색성장에 맞게 환경부하, 환경성능 등을 고려한 시공계획, 적정 품질확보를 위한 품질관리 및 품질시험계획 수립, 콘크리트 재료·시공상황 기록 등 품질관리도 강화
CO ₂ 저감 및 처리기술개발사업	과학기술부	- 대표적 온실가스인 CO₂ 배출량 저감을 위해 에너지 이용효율 향상 - CO₂ 회수·분리 및 전환·저장을 위한 혁신적 핵심기술 개발과 실용화 추진
환경부문온실가스 배출량 Inventory 작성 및 배출계수 개발	국립환경과학원	- 시멘트 생산시설 중에서 CO₂ 배출량 실측
2010 국토해양 발전전략	한국 건설교통 기술평가원	- 국토해양의 2030 지향 시나리오로 기후변화대응과 기술혁신을 양축으로 한 그린혁명을 제시 - 국토해양 R&D의 미래를 이끌어갈 미래핵심기술 (Green-up 30)의 선정(탄소저감형 건설재료 포함)

2.2 국외기술 동향

2.2.1 콘크리트 중의 중금속이온 침출

콘크리트 내에 존재하는 중금속유해이온에 대해서는 1970년대부터 주로 의학자들에 의해 연구되기 시작하였다. 건설현장에서 작업자들에게 피부발진, 알레르기성 질환의 원인 조사 결과 시멘트에 존재하는 6가크롬이 굳지 않은 콘크리트에 의한 질환으로 판명되었다 (Fregert and Gruvberger, 1973; Fregert et al., 1979). 이후 2000년대에 들어 콘크리트내의 중금속 및 유해이온 중 납, 카드뮴, 비소 등의 그 양이 미미하고 불용성이므로 유해성이 없음이 확인되었으나, 6가크롬의 경우 시멘트에 존재하는 농도가 상대적으로 높을 뿐만 아니라 수용성이므로 그에 대한 위험성에 대해 지각하기 시작하였다. 유로연합에서는 시멘트 내의 6가크롬 양에 대한 제한을 법적으로 규제하고 있는데 (Directive 2003/53/EC, 2003) 제한농도는 시멘트 중량 대비 2.0 ppm (i.e. 2.0mg/kg-cem)이하로 수용성에 한하고 있다. 이와 같은 시멘트 내의 6가크롬 존재는 시멘트 생산과정에서 킬른의 표면에 부식방지용으로 코팅 되어있던 크롬이 화학적 변이를 통해 용출되고 시멘트에 일부 존재하여 발생함을 확인하였다 (Hills and Johansen, 2007).

Directive 2003/53/EC의 엄격한 제한을 준수하기 위해 시멘트 내에 존재하는 6가크롬을 감소하기 위한 대책으로 황산염계 화합물인 황산염철 (Fe_2SO_4) 또는 황산염주석 (SnSO_4)을 시멘트 생산 시 혼입하여 에트링가이트 ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)계 흡착 방식으로 침전시키는 연구가 진행되었다 (Kuehl, 2006). 즉 에트링가이트계 황산염칼슘 (CaSO_4)이 산화크롬(CrO_4)으로 대체되어 시멘트 수화물 (Chromate ettringite)내에서 물리적으로 흡착 (Immobilisation)시키는 방식으로 실제로 황산염화합물을 시멘트 또는 클링커에 혼입하였을 때 6가크롬의 용해도가 현저히 감소함이 확인되었다 (Wang and Vipulanandan, 2000; Trezza and Ferraiuelo 2003).

그러나 황산염철의 경우 시멘트를 장기보관 시 황산염의 소모에 따라 흡착성의 감소하는 한계를 가지고 있다. 이에 대한 대안으로서 최근에는 산화안티몬 (SbO_3)를 이용하여 시멘트 내의 6가크롬을 제거하는 방법을 연구개발 중이다. 산화안티몬의 시멘트 내 6가크롬의 흡착효과는 매우 뛰어난 장점을 가지고 있으나, 오히려 더 유해한 혼화제를 시멘트에 첨가함으로 사용성에는 한계가 있다. 표 2.5은 시멘트 내의 6가크롬의 흡착을 통한 침출방지를 위한 혼화제로 사용되는 황산염철, 황산염주석 및 안티몬주석의 특징을 비교분석한 것으로 성능면에서는 황산염주석이나 안티몬 주석이 우수하고 경제성에서는 황산염철이 우수함을 알 수 있다.

[표 2.5] 시멘트 중의 6가크롬 침출 억제제

종류	메커니즘	경제성	평가
황산염철 ($\text{Fe}_2 \text{SO}_4$)	황산염이온에 의해 발생하는 에트린가이트계 화합물의 6가크롬 흡착	좋음	공기 중 장기노출/보관 시 효과감소
황산염주석 (SnSO_4)	황산염철과 동일	나쁨	매우 효과적 6가크롬 흡착 방식
안티몬주석 (SbO_3)	안티몬이온과 6가크롬의 화학적 결합에 의한 산화크롬 생성	중간	안티몬이온 침출 시 환경 오염 가능성

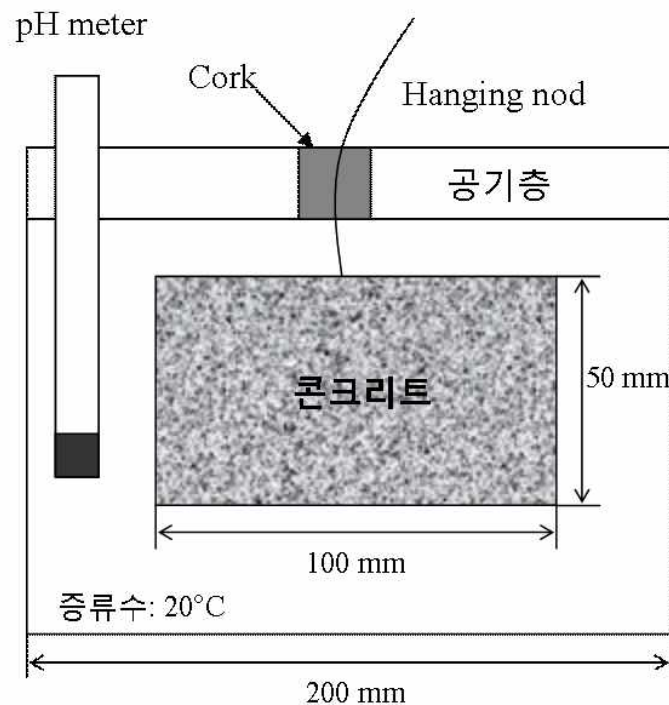
Guohua Chen에 의해 여러 중금속을 처리할 경우 개선해야 할 문제점에 대해 제안하였으며 아연, 구리, 니켈 그리고 6가크롬이 혼합된 폐수를 알루미늄 전극을 사용하여 전기응집 처리를 한 경우 완전한 처리를 위해서는 처리 전에 6가크롬을 3가크롬으로 환원 시켜야 한다고 제안하였다(Guohua Chen, 2004). 또한 유럽에서는 전기응집과 타 기술을 접목하여 Hybrid 형태의 시스템 등이 일찍이 제안되어 연구되었으며 유럽에서는 구리 생산 공정에서 발생하는 As, Se 물질을 전기응집을 통해 처리하는데 완전한 처리를 위해서는 처리수를 재순환하여 처리해야 하는 문제가 발생하여 전기응집과 MF(Micro Filter)를 연계하여 폐수를 처리하는 시스템을 제안하였다.

2.2.2 콘크리트 중의 알칼리이온 침출

콘크리트의 알칼리이온 침출은 수중생태환경에 직접적이고 즉각적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이미 국내연구 동향에서 언급한 바와 같이 어독실험을 통한 결과에서 콘크리트 경화체가 수중에 존재할 경우 물고기들이 즉시 폐사함을 확인하였다. 그럼에도 불구하고 국내외적으로 콘크리트의 알칼리이온 침출에 따른 환경영향성에 대한 연구는 실제로 거의 전무한 실정이다. 다만 댐, 교량과 같은 대형 콘크리트 구조물 주위에 생태학적 파괴현상이 있을 때 콘크리트에서 유독성분 침출에 따른 영향이라는 가십성 기사만 존재할 뿐 구체화된 연구사례는 아직 보고 된 바 없다. 국외에서도 콘크리트의 알칼리이온 침출에 대해서는 공학적 접근이 주된 주제이고 환경영향에 대해서는 아직 연구된 바가 미미하다. 콘크리트의 알칼리이온 침출문제는 공학적 관점에서 콘크리트 구조물의 안전성 및 내구성에 직접적으로 연관되어 있다. 특히 콘크리트 구조물의 화학적 저항성에 직결된 문제로 알칼리이온의 침출은 수산화이온 뿐만 아니라, CSH gel, Ca(OH)_2 등의 수화물을 분해하므로 콘크리트의 화학적 안정성과 직결되어 있다 (Yokozeki et al., 2004).

그러므로 국외연구의 사례에서도 주로 알칼리이온의 침출속도, 침출량, 침출 시 발생

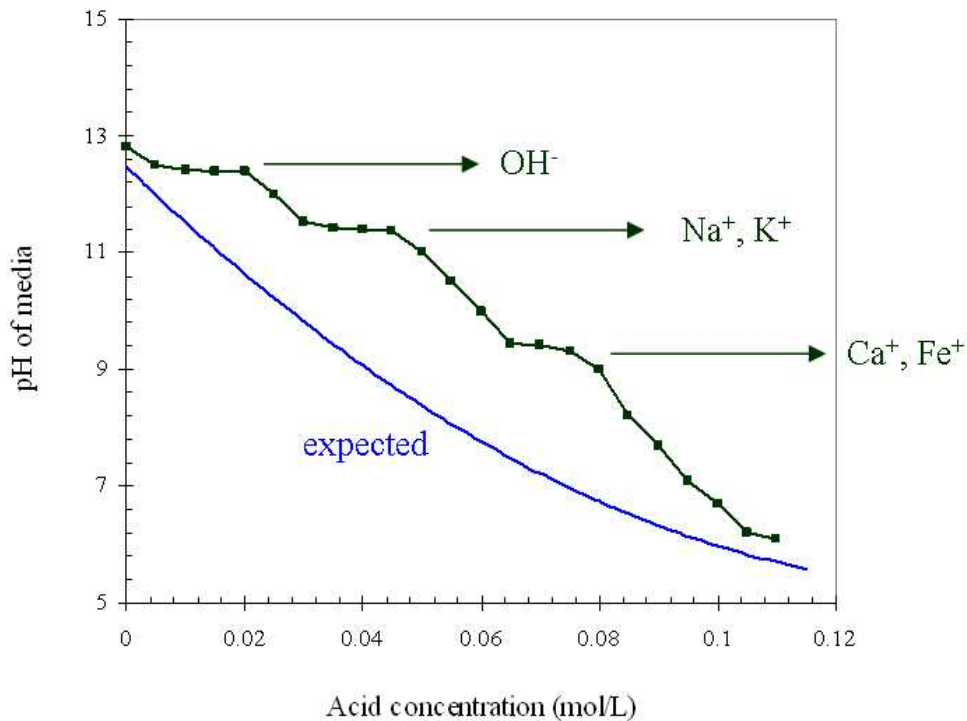
하는 콘크리트의 강성 및 화학적 결합, 내구성 등과 같은 공학적 문제에 주로 초점을 맞추고 있다. 콘크리트 중의 알칼리이온 침출은 공극수에 존재하는 수산화이온이 알칼리메탈과의 화학적 평형을 이루고 있으므로 알칼리 메탈의 양에 선형적으로 비례한다 (Li et al., 2005). 이 점에 착안하여 알칼리이온의 침출 시험법은 콘크리트에 존재하는 Na_2O , K_2O 의 농도를 측정하는 방법에 대해 제시하고 (BS EN 480-12, 2005) 있고, ANSI 에서 제시하는 방법은 콘크리트에 침출되는 알칼리이온 침출에 따른 용매의 pH변화 및 최대 침출능에 초점을 맞추고 있다. 즉 그림 2.3에서 보는 바와 같이 콘크리트 시편을 밀폐된 용기에 넣어 증류수를 채워 pH의 변화를 시간대별로 모니터링 하는 방법을 택하고 있다 (ASTM C 1097-93a, 2003). 알칼리이온의 침출속도 및 침출량은 ANSI에서 제시한 방법을 응용하여 일정시간이 되면 용매를 갈아줌으로써 침출능을 확보할 수 있게 하였다. 즉 오염되지 않은 용매를 통해 이온의 침출을 가속하여 최대 침출능을 산정하고 이에 따른 침출속도도 측정하는 원리이다.



<그림 2.3> 콘크리트의 알칼리이온 침출시험 모식도

콘크리트 중의 알칼리이온 침출은 용매의 pH농도에 따라 사이하게 됨을 최근 스페인의 연구진에 의해 밝혀졌다 (Alonso 2012). 즉 알칼리이온의 침출은 단순히 수산화이온 (OH^-)의 침출만이 발생하는게 아니라 알칼리 메탈이온의 침출이 동시에 수반되는데 각각의 알칼리 메탈이온은 용매의 pH농도에 따라 상이하게 침출하게 된다. 즉 중성상태의 용매 (pH: 6.5-8.5)에서 실제로 알칼리이온 뿐만 아니라 모든 이온의 침출이 확산 (Diffusion)을 통해 수중환경으로 침출하게 되는데 이후 pH 9.0-9.5구간에서는 칼슘 및

철이온 (Ca^{2+} , Fe^{2+})이 먼저 침출하게 되고 pH 10.8-11.2구간에서는 나트륨 및 칼륨이온 (Na^{+} , K^{+})이 침출하게 된다. 실제로 알칼리이온의 주체인 수산화이온 (OH^{-})은 pH 12.5이상 되었을 때 침출하게 됨을 증명하였다 (그림 2.4). 이는 본 연구개발과제에서 제 1차년도 연구성과에서 재확인되기도 하였다. 용매의 pH에 따라 알칼리이온의 침출량이 일정구간에서 급격히 증가함을 관찰하였는데 동일구간의 용매의 화학성분을 통해 상기의 내용을 검증하였다.

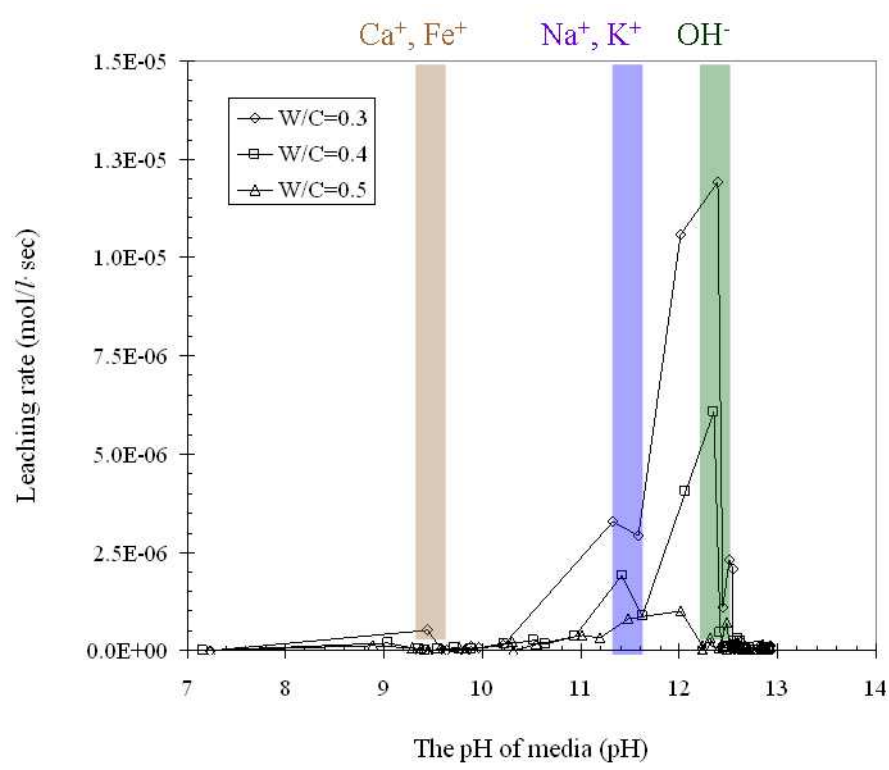


<그림 2.4> 콘크리트 중의 알칼리이온의 용매 pH에 따른 침출특징

알칼리이온 침출방지를 위한 대책에 관해서 영국 Broomfield Consulting Co.의 자문을 통해 연구현황을 보고받았다 (Broomfield 2012). 영국에서는 이온의 침출방지를 위한 기술개발에 중점적으로 지방정부 및 민간기업에서도 연구에 투자하고 있는 상황이라 다양한 침출방지 대책이 나왔다. 표 2.6에서는 현재 영국에서 연구 중인 침출방지책으로 표면도장 (Surface treatment), 멤브레인 코팅 (Membrane coating), 중성화 선처리 (Pre-carbonation) 등이 있다. 표면도장은 신설구조물에 사용하기에는 매우 편리하고 경제적이고 구조물의 성능유지, 외관조성 등의 장점으로 선호되었으나 현재는 주기적인 유지관리의 어려움으로 꺼려지고 있는 상황이다.

콘크리트 표면의 Membrane coating은 콘크리트 내에 이온상으로 존재하는 화합물이 콘크리트 표면에서 외부이온과의 척력을 유지시킴으로써 이온의 상호교환 (침출 및 침투)을 억제하도록 하였다. Pre-carbonation법 역시 알칼리이온 침출 방지를 위한 대책으로

연구 중에 있다. 즉 콘크리트 표면에 약 3-5mm 정도 인위적으로 중성화를 유도하는 방법으로 중성화를 통해 콘크리트 표면에서의 공극수 내에 존재하는 알칼리이온을 침전시킴으로써 침출자체를 방지하는 방법이다.



<그림 2.5> 콘크리트 중의 알칼리이온의 용매 pH에 따른 침출속도

[표 2.6] 영국의 알칼리이온 침출방지를 위한 진행 연구

종류	메커니즘	한계
표면도장 (Surface treatment)	폴리머계 물질을 콘크리트 표면에 도장처리함으로써 이온의 침출방지	주기적인 유지보수가 필요
멤브레인 코팅 (Membrane coating)	콘크리트 표면에 전기이중층을 가압하여 이온의 이동을 제한시킴	외부환경조건에 민감
중성화선처리 (Pre-carbonation)	콘크리트 표면부를 인위적으로 중성화시킴으로 알칼리이온의 침출억제	콘크리트의 강성, 내구성 문제 발생가능

2.2.3 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출저감

현재 전 세계는 기술 발달의 가속 및 경제규모의 거대화, 지구온난화 방지를 위한 전세계적 협력체계 구축 등 글로벌화가 심화되고 있으며, 이는 건설분야에서도 글로벌화, 녹색건설 증대 및 기술혁신의 요구가 대두되고 있다. 국제 탄소배출량은 2008년 28.8Gt에서 2020년 34.5Gt, 2030년 40.2Gt로 계속 증가할 것으로 전망된다 (IEA, World Energy Outlook). 우리나라의 CO₂ 배출량은 2007년 기준 4억8천870만ton으로 2006년에 이어 2007년에도 OECD내에서 6위, 전세계에서 9위를 차지하였다 (World Energy Outlook). 우리나라 온실가스 배출량 중 건설분야 비중은 42.3%로 높은 비중을 차지하고 있으며, 2020년 대비 온실가스 30% 감축목표 설정하였고, 건설분야에서도 동일한 감축목표 설정하였다 (국토해양 R&D 발전전략).

시멘트 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량은 전체배기가스 중에서 약 8%정도 차지하고 있고, 또한 배출량이 꾸준히 증가하고 있어 2030년에는 현재수준의 약 두 배가량의 시멘트산업이 형성될것이라는 보고도 있다 (GreenBiz, 2009). 특히 탄소배출권거래제 (Cap and trade)가 시기적으로 다가옴으로서 이에 대한 연구는 매우 지대한 관심을 가지고 있다. 온실가스 저감을 위하여 선진국 등에서는 CCS(Carbon Capture & Storage) 기술개발을 추진하고 있으며 CO₂ 저장기술로서 대량의 CO₂ 를 지중 및 해양 또는 광물이나 건설폐기물, 부산물 등에 저장하기 위한 기술개발을 진행하고 있다. 한편 콘크리트 생산과정에서 발생하는 CO₂ 가스 배출저감을 위한 연구는 국외에서도 마찬가지로 시멘트 대체재의 개발에 역점을 두고 있다. 그러나 상기 언급한 바와 같이 시멘트 대체재의 대부분은 포졸란계 혼화재로 이미 사용화되어 널리 사용되고 있으며 이에 따른 CO₂ 저감효과에 대한 분석이나 경제성 등을 연구하는 바 특별한 연구진척이나 획기적인 방안의 도출은 없는 실정이다 (Flower and Sanjayan, 2007; Josa et al., 2003; Gartner 2004; Pade and Guimaraes 2006). 또한 시멘트 대체재로 각종 농업폐기물, 산업부산물을 결합재로 제조하는 연구가 진행되고 있다. 예를 들면 쌀겨나 팜올리브를 태워서 생긴 재를 정제하여 플라이애시처럼 시멘트 혼화재로 사용하는 연구도 많이 진행되고 있다 (Zhang et al., 1996, Ismail et al., 2011). 이외에 시멘트 생산과정에서 에너지 효율을 높여 화석연료의 사용을 줄이거나, 시멘트의 주재료인 석회석 대체 물질을 개발함으로써 CO₂ 배출을 감소시킬수 있다는 연구가 있다 (The Research Council of Norway, 2010).

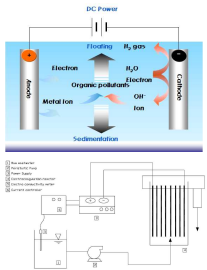
즉 시멘트 또는 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출은 실제로 해결하기 한계가 있는 문제로 해결방안으로 국외에서의 연구동향은 (1) 비시멘트 또는 콘크리트 재료의 활용, (2) 해당 콘크리트 구조물의 CO₂ 배출에 해당하는 산소생산을 위한 녹지 조성 (3) 구조물의 유지관리에 필요한 에너지원의 자체조달 (예: 지열발전) 등의 방법이 제시되고 있다. 그러나 상기의 방법은 주어진 환경에 따라 적용에 있어 한계가 있을 수 있다. 예를 들면, 산소생산을 위한 녹지조성은 서울과 같은 도심에서는 해당면적을 확보하기 힘들고 콘크리트 대체재료로 활용가능한 Fibre reinforced polymer 계열의 재료는 대개 경제성이 떨어져

는 경우가 많다. 따라서 현재로선 시멘트 및 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출을 감소시키기에 앞서 각 생산단계별 CO₂ 배출량에 대한 조사 및 이에 따른 프로토콜을 완비하는게 시급할 것으로 보인다.

2.3 총평

본 연구의 주요 내용인 콘크리트 중의 중금속이온 침출, 콘크리트 중의 알칼리이온 침출, 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출저감과 관련된 국내외 기술 및 특허 현황을 표 2.7에 나타내었다. 수질환경에서의 국내외 기술은 전기응집을 통한 수처리 분야 기술이 있으며, 대기환경의 경우 CO₂ 배출 보상과 관련하여 콘크리트의 화학반응을 통한 CO₂ 배출 및 흡수에 관한 기술과 시멘트 대체재료의 사용에 관한 연구 및 기술이 진행되고 있다.

[표 2.7] 국내외 기술 및 특허 현황

구분	국외	국내	사진
전기응집에 의한 중금속이온 처리기법	- 산업폐수가 아닌 타 수처리 분야에 적용 - 중금속과 난분해성 유기물 제거 연구를 통한 다양한 전극형태를 제시	- 6가크롬물질이 혼합된 폐수의 완전처리를 위한 처리전 6가크롬을 3가크롬으로 환원 - 전기응집과 타기술을 접목한 Hybrid 형태의 시스템제안	
LCCO ₂ 평가 및 LCI DB 기술	- 건축물 또는 건축 및 건설관련 제품의 LCCO₂ 평가 프로그램으로 GEM-21(일본), BASIX(호주), ENVEST2(영국), Eco-Quantum(네덜란드), EQUER(프랑스), ecost(핀란드) 등이 개발 활용 중	- 저탄소 제품 사용확대를 위한 탄소성적표지 제도운영 - 1990년대 후반 이후 환경부와 지식경제부 중심 LCI DB 구축 및 관리 진행 중 - DB 구축 확대 및 LCCO₂ 평가기술 등 CO₂ 관리를 위한 연구 필요	
탄소저감형 시방기술	- RC 건축물 환경배려 시공 지침, 콘크리트 설계 및 사용시 CO₂ 저감 가이드 등을 추진 중	- 국내 CO₂ 관련 건설계획 및 시공기준 전무 - 본격적인 연구개시 단계	
시멘트 저감형 콘크리트 기술	- 시멘트대체 60%, 50MPa 고강도콘크리트 범용화 - 알칼리 활성화 시멘트 실용화 단계(70MPa 수준)	- 시멘트 대체 40%, 50MPa 고강도콘크리트 실용화 추진필요 - 시멘트 저감형 콘크리트 실용화 기술필요	

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 연구개발내용 개요

3.2 콘크리트 환경에서 알칼리이온 침출에 따른 생태환경영향 평가

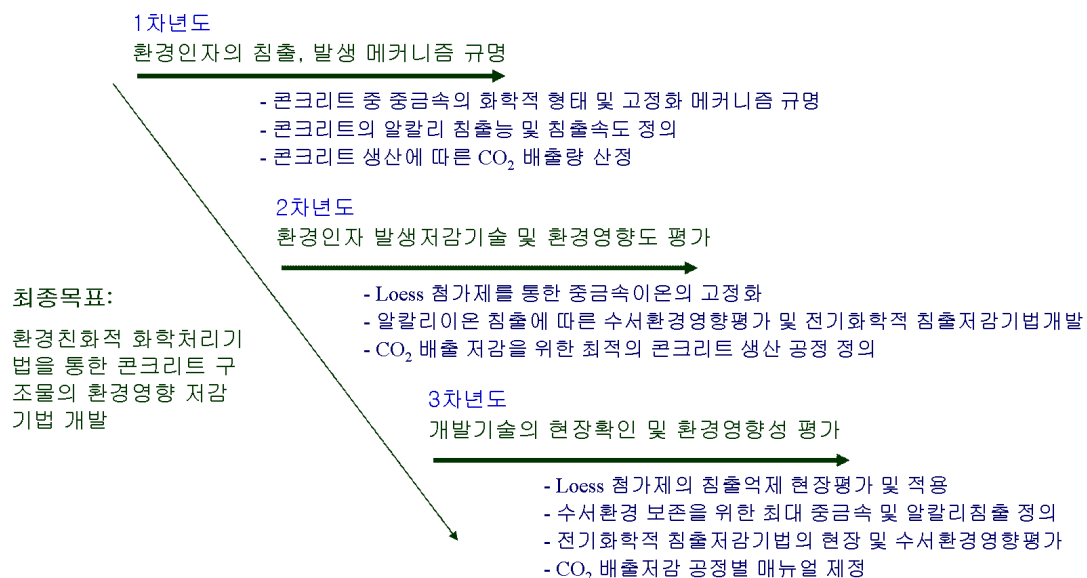
3.3 콘크리트 중의 중금속이온 침출

3.4 콘크리트의 알칼리이온 침출

3.5 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 발생

3.1 연구개발내용 개요

본 연구개발 과제는 환경친화적 화학처리기술을 이용한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감기술개발을 목표로 하여 콘크리트로 제작되는 토목, 건축구조물로 건설 및 공용될 시 발생할 수 있는 잠재적 환경오염원인 CO₂ 가스의 배출, 중금속 및 알칼리이온의 침출을 저감함으로써 사회 인프라 시설의 건설에 발생하는 환경부하를 조절하고자 한다. 특히 당 해연도에는 “콘크리트에서 발생하는 환경영향인자의 억제 개발 기술의 현장 적용성 평가 및 환경영향성 평가” 하는데 연구목적이 있다.



<그림 3.1> 본 연구개발과제의 목표 및 연구내용 흐름도

이는 그림 3.1에서 보는 바와 같이 제1차년도에서 연구된 콘크리트의 환경영향성 인자의 메커니즘을 규명하여 제2차년도에서는 이를 제어할 기술개발이 주된 목적이다. 또한 제3차년도 연구에서는 개발된 기술을 현장에 적용함으로써 적용성 평가 및 개발기술의 보정을 통해 실제로 환경부하를 감소하는 구체적인 기술의 완성을 목표로 한다. 이와 더불어 연구과정에서 발생하는 각종 학문적 기술적 성취에 대해서는 프로그램 개발, 국내외 논문 게재, 특허출원 및 등록 외에도 국내/국제표준 제정을 최종목표로 하여 콘크리트 구조물의 환경영향부하 감소를 실현할 정량적 근거로 사용할 실질적인 연구개발결과의 국제적 효용에 역점을 두었다.

당해연도 연구목표인 “콘크리트에서 발생하는 환경영향인자의 억제 개발 기술의 현장 적용성 평가 및 환경영향성 평가”를 위해 세부연구목표를 설정하여 연구범위 및 내용을 설정하여 진행하였다. 콘크리트의 주요한 환경영향인자인 중금속이온 침출, 알칼리이온 침

출에 따른 생태환경 영향성 및 콘크리트 생산과정에서의 CO₂ 배출의 저감을 위한 친환경적 화학처리 및 전기화학적 처리기법의 현장적용성 평가와 더불어 생태영향성평가 및 CO₂ 발생량에 관한 프로토콜 정립을 세부연구 목표로 세우고 진행하였다.

3.2 콘크리트 환경에서 알칼리이온 침출에 따른 생태환경영향 평가

3.2.1 연구개요

산업 기술의 발달과 인류문명의 발전으로 자연계에 존재하지 않았던 많은 화학물질은 그 종류 및 특성에 있어 매우 다양하며, 생태계로 다수의 유해화학물질이 유입되어 심각한 오염을 야기 한다. 이러한 유해화학 물질에 의한 환경오염을 일으키고, 그 결과로 인체보건 및 생태계 피해로 나타나기 때문에 각 물질에 대한 생태계 독성자료가 필요하나, 모든 물질을 분석하고 물질 별로 생태계 허용 지침을 설정하기는 어려운 실정이다. 또한 생태계에서 화학물질이 생물에 미치는 영향은 복합적으로 나타나기 때문에, 단일 물질의 자료만으로 그 물질의 영향을 정확하게 평가하는 것이 어렵다. 따라서 유해화학물질에 따른 생태학적인 영향에 대한 평가가 필요하다 (류성민, 2003). 이러한 생태학적인 영향 평가의 한 방법으로 사용되는 생물검정은 어떤 물질이 유기체에 미치는 신진대사, 번식의 감소, 생체기능의 상실이나 치사 등에 미치는 영향을 조사 분석함으로써 오염물질의 유해성을 검정하는 방법이다 (김인경, 2001). 독성 물질의 영향에 관한 연구나 조사에 많은 생물이 이용되고 있으며 특히, 미국 EPA에서 추천하고 있는 담수 생태종으로 물벼룩은 먹이사슬의 하위 단계에서 중요한 역할을 하며, 배양이 쉽고, 짧은 생활사, 높은 번식력과 함께 독성물질에 대한 감수성을 가진다는 장점 때문에 유해물질의 독성 시험종으로 대표적으로 이용되고 있다 (EPA, 1978). 이와 같이 유해화학물질의 독성을 평가하여 통합적으로 관리 가능하게 한 것이 생태독성관리제도로써, 우리나라에서도 2011년부터 시행되고 있다 (<http://www.biowet.or.kr>). 따라서 본 연구에서도 콘크리트 알칼리 침출수의 생태학적 독성 평가를 실시하여 생태환경영향성에 관한 지침을 제시하고자 하였다.

전 세계적으로 약 24만여 종, 그리고 국내에서도 약 4만여종의 유해화학물질이 제조되어 사용되고 있으며, 해마다 유해 화학물질의 사용과 유통이 급증하고 있다. 우리나라의 경우도 매년 400여종의 신규 화학물질이 수입되거나 제조되고 있는 실정이다. 따라서 하·폐수에 함유되어 수계로 배출되는 수많은 유해화학물질에 대하여 일일이 배출허용기준을 설정하는 지금까지의 산업수질관리방법으로는 개별오염물질 측정비용에 엄청난 비용이 소요되며 현실적으로 기준 설정이 불가능한 실정이다. 따라서 이러한 문제점을 해결 및 보완하기위하여 수계로 배출되는 유해화학물질의 독성을 통합적으로 관리하고, 수생태계에서 서식하는 생물의 수질관리체계를 구축하여 보다 건강한 하천을 만들기 위해 2011년 1월부터 생태독성 관리제도가 우리나라에도 도입되어 현재 하·폐수 관리에 이용되고 있다 (한국환경공단). 여러 가지 생태독성 시험생물 중 특히 우리나라의 경우에는 큰물벼룩 (*Daphnia magna*)을 이용하여 독성시험을 실시하고 있으며 본 연구에서도 콘크리트 침출수의 생태독성을 큰물벼룩을 이용하여 검정하였다.

물벼룩의 시료 물질에 대한 급성독성을 평가하는 방법으로, 여러 비율로 희석한 시험수에 물벼룩을 투입하고 24시간 후 유영상태를 관찰하여, 시료농도와 치사 혹은 유영저해

를 보이는 물벼룩 마리수와의 상관관계를 통해 생태독성값을 산출하는 방식이다 (한국환경공단).

본 연구의 목표는 콘크리트 생산 및 공용과정에서 배출, 침출되는 환경인자인 알칼리이온의 저감기법을 개발하는데 있어 기초자료를 제공하는데 있다. 국내 생태독성 통합 관리 제도에 기초하여 알칼리이온 침출수에 대한 물벼룩의 생존율을 조사함으로써 생태 환경에 영향을 주지 않는 최대 알칼리이온량 및 pH 정립에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

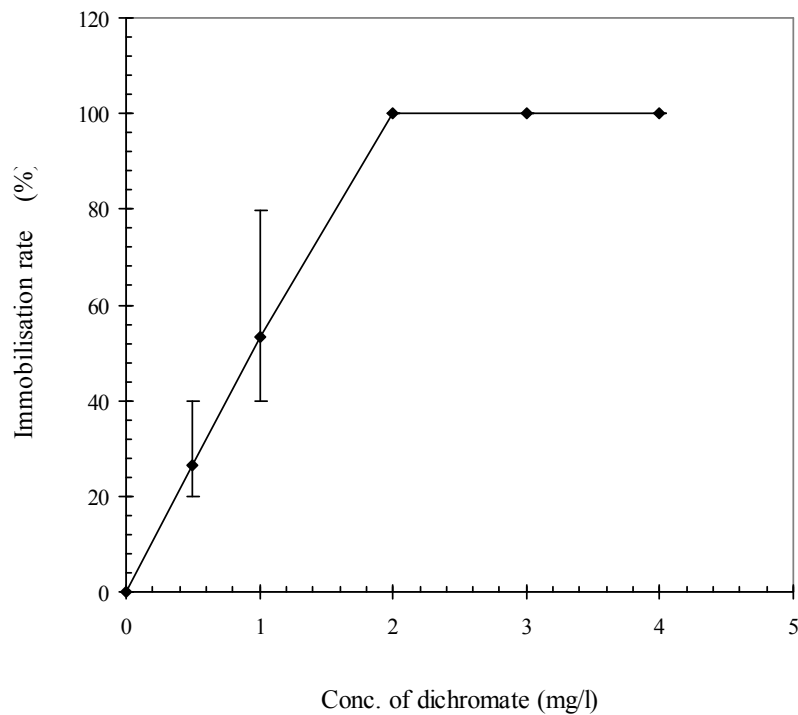
생태독성평가를 위한 물벼룩은 생존을 영향을 주는 외부물질이 함유되지 않은 청결한 환경에서 계대배양되고 독성검정전 적절한 조건에서 사육되어야 독성검정의 결과를 신뢰할 수 있다. 따라서 물벼룩의 실내 사육체계를 구축하고자, 국립환경과학원에서 국내 실험종 물벼룩을 분양받고 실내 계대배양 및 독성평가 체계를 구축하였다. 기본적인 시설로써 사육을 위한 별도의 항온배양기를 준비하고 기구축된 증류수제조장치를 이용한 증류수 준비, 그리고 pH 측정기, 산소발생기 등 기본적인 실험장비를 모두 구축하였다. 구축된 배양체계의 적합성 및 사육된 물벼룩의 독성물질의 반응성에 대한 신뢰도는 다이크롬산칼륨 ($K_2Cr_2O_7$, Potassiumdichromate)을 이용한 표준독성실험을 통하여 검정하였다.

3.2.2 선행연구

급성생태독성실험이 정상적인 조건에서 수행될 수 있는지 확인하기 위하여 중크롬산칼륨 ($K_2Cr_2O_7$, Potassium dichromate)을 이용한 표준지표독성실험을 매 독성실험 이전에 수행하였다. 결과로서 그림 3.2에 나타난 바와 같이 2.0mg/l이상의 중크롬산칼륨의 농도에서의 사망 및 유영은 100%였다. 즉, EC50 값이 1.01 로 나타났으며 이러한 값은 표준독성실험에서 정상환경범위로 인정하는 0.9~2.1 mg/L 내에 존재하는 수치로써 본 연구에서 이용하는 물벼룩의 사육환경 및 독성실험조건이 정상임을 보여주는 것이며, 급성독성실험의 결과가 신뢰할 수 있음을 지적해주고 있다.

알칼리이온의 저감기법을 개발하는데 있어 기초 자료를 제공하기 위해 국내 생태독성 통합 관리 제도에 기초하여 알칼리이온 침출수에 대한 물벼룩의 생존율을 조사하였다. 콘크리트의 알칼리이온 침출수를 이용한 급성독성실험을 지수식 시험방법으로 수행하였다. 콘크리트는 물-시멘트비에 따라 0.3, 0.4, 0.5 보통포틀랜드시멘트를 사용한 페이스트와 결합재의 종류에 따른 OPC, 30% PFA, 60% GGBS, 60% GGBS + Loess 첨가제를 사용하여 30일간 알칼리이온 및 중금속이온을 충분히 침출시켜 사용하였다. 이와 같이 생산한 침출수는 배양수와 희석하여 0.00, 6.25, 12.50, 25.00, 50.00, 100.00%의 침출수의 비율을 적용하였다. 그림 27에서와 같이 시료를 여러 비율로 희석한 시험수에 물벼룩을 넣고 24시간 후 유영상태를 관찰하여 시료농도와 유영저해를 보이는 물벼룩의 비율사이의 관계를 통해 물벼룩의 50%가 유영저해를 받는 시료농도를 구하고 단위환산을 통해 생태

독성값을 계산하여 표 3.1에 나타내었다.



<그림 3.2> 중크롬산 농도에 따른 물벼룩의 사망 및 유영

[표 3.1] 콘크리트 알칼리이온 침출수의 물벼룩에 대한 급성독성시험

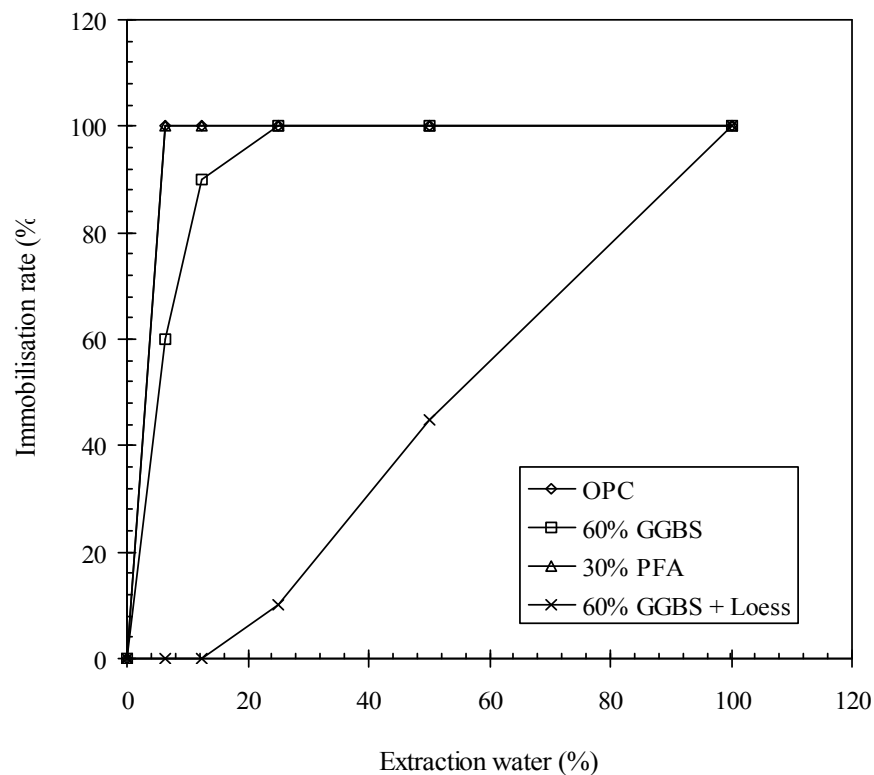
시 료	LC ₅₀			LC ₉₅			독성값 (TU)
	conc.	lower	upper	conc.	lower	upper	
W/C=0.3	ND*	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W/C=0.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W/C=0.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30% PFA	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
60% GGBS	5.65	2.33	7.50	14.84	10.81	47.51	17.67
60% GGBS +Loess	49.05	39.06	59.15	90.20	71.51	157.84	2.04

*: 모든 물벼룩이 사망하여 독성값을 구할 수 없을 정도로 독성이 높음

콘크리트의 알칼리이온 침출수 8종을 이용하여 실험을 수행한 결과 OPC만을 사용한 콘크리트에서는 모든 농도에서 물벼룩이 사망하여 알칼리이온 침출이 생물이 생존할 수 없을 정도로 심각한 것으로 나타났다. 또한 30% PFA 콘크리트에서도 모든 농도에서 물벼룩이 사망하여 PFA만으로 문제해결이 불가능을 확인하였다. 그러나 60% GGBS의 경우

12.5%로 알칼리이온 침출수를 희석하였을 때 물벼룩이 약 10% 정도 생존할 수 있음을 관찰하였다. 이에 착안하여 GGBS 콘크리트에 본 연구에서 개발한 Loess첨가제를 혼입한 콘크리트를 통한 침출수 시험에서는 25% 침출수 희석에 대해 오직 10%의 물벼룩이 사망하였으며 50% 희석에서도 약 55%의 물벼룩이 사망이나 유영이 아닌 건강하게 활동함을 확인하였다. 이는 Loess 첨가제를 혼입한 경우 독성값 (TU)가 OPC나 다른 결합재만으로 만든 콘크리트 보다 현저히 낮음으로써 수서생물체의 생존에 도움이 됨을 확인하였다.

또한 그림 3.3에서 보는 바와 같이 OPC만을 사용한 모든 콘크리트는 물-시멘트비나 희석비율에 관계없이 사망 및 유영이 모두 100%로 수서생태환경에 치명적임을 확인하였다. 그러나 Loess 첨가제를 사용한 콘크리트의 경우에는 희석비율 12.5%까지는 모든 물벼룩이 원활히 생존하며 25% 희석비율부터 사망 및 유영비율이 증가하였다. 특히 50% 희석비율에서도 생존율이 절반이상의 높은 값을 보였다. 본 연구에서 사용한 알칼리이온 침출수가 콘크리트의 비표면적이 크고 상대적으로 용매의 양이 적음으로써 침출량이 매우 크다는 점을 감안하더라도 이미 침출수의 희석을 90% 이상 한 경우에도 물벼룩이 사망이 100% 이므로 실제 수서환경에 미치는 영향은 지대할 것으로 예상된다.



<그림 3.3> 알칼리이온 침출수 희석농도 및 결합재에 따른 물벼룩의 사망 및 유영

콘크리트 중의 알칼리이온 및 중금속이온의 침출에 의한 수서환경영향성에 대한 연구에서는 물벼룩을 표본생물로 하여 연구를 진행하였다. 결과로써 OPC만을 사용한 콘크리트에서 침출된 용액을 이용하여 생태환경 영향성을 평가한 결과 희석비율이 6.25%에서도 모두 사망 또는 유영함으로써 생태환경영향서의 심각함을 관찰하였다. 그러나 60% GGBS 콘크리트의 경우 침출수 12.5% 희석까지는 일부 물벼룩이 생존하였다. 이에 착안하여 본 연구에서 개발한 Loess 첨가제와 GGBS를 혼용한 콘크리트에서는 침출수 희석율 50%에서도 약 55%이 물벼룩이 생존함으로써 환경부하를 감소시키는데 효과가 있음을 입증하였다.

3.2.3 연구내용

(1) 배양액의 조제

물벼룩의 순수 사육을 위한 배양액은 국립환경과학원에서 제시하는 방법에 의해 표 3.2와 같이 조제하였다. 물벼룩은 그 중에 따른 경도, 조건이 각기 다르며 일반적으로 D. magna는 Hard Water인 경도 160~180mg/L 에서 배양한다.

[표 3.2] 물벼룩 배양액의 구성

contents	concentration (mg/L)
KCl	8mg/L
MgSO ₄	120mg/L
CaSO ₄ .2H ₂ O	120mg/L
NaHCO ₃	192mg/L

(2) 물벼룩의 배양

물벼룩의 성장, 번식, 생존은 먹이의 양과 질에 의해 아주 많은 영향을 받는다. 실험실 내 물벼룩의 배양 조건은 표 3.3와 같으며 먹이는 녹조류를 1L 당 3ml씩 급여하였다. 단 세포 녹조류는 시험액 15 ml당 조류세포 수가 약 2~2.8x10⁵cell정도가 되도록 조정하였다. 또한 적절한 용존산소량을 유지시켜주기 위해서 통기를 시켜주었으며, 일반적으로 물벼룩의 최저 용존산소농도는 3mg/L이며, 6mg/L가 되었을 때 최상의 상태를 보인다.

[표 3.3] 물벼룩 배양 조건

Items	Conditions
Lighting	900Lux ~ 1000Lux “Cool white” Fluorescent 16h light : 8h dark
Temperature	20±1℃
Hardness	160~180mg/L
pH	7.6~7.8
Prey	Pseudokirchneriella sp.

(3) 표준독성실험

시험동물의 민감도와 실험절차의 전반적인 신뢰성을 점검하고, 생태독성시험의 적절한 수행 여부 확인을 위한 표준독성실험은 아래 순서에 따라 수행되었다

- ① 24개의 50ml 유리비커를 준비하고 대조군 용기에는 순수 배양액을 넣는다.
- ② 0.5, 1, 2, 3, 4 mg/L 농도로 다이크롬산칼륨을 배양액에 녹여 만든다.
- ③ 농도별로 4개의 50ml 용액을 준비한다.
- ④ 농도별로 물벼룩을 5마리씩 투입하고, 24시간 후 유영저해 및 사망을 기록 한다
- ⑤ Probit 분석을 이용하여 통계분석 한 후 EC50을 계산한다.
- ⑥ EC50이 0.9~2.1 mg/L 범위 안에 포함되는지 확인 한다.

(4) Probit analysis

이 방법은 독성효과는 양적인 반응이고 그 반응정도는 투여용량에 비례하며 반응 누적치는 정규분포에 따른다고 가정한 방법이다. Probit 확률지의 probit scale에는 유영저해율(치사율포함)을 log scale에는 농도를 plotting 하면 원래의 자료가 정규분포곡선 또는 S자형의 곡선으로 나타나는 것이 직선의 그래프로 만들어지게 된다. 이 직선식으로부터 통

계적으로 유의성을 가질 수 있는 백분율의 probit이 5인 값에 해당하는 log농도를 얻어 EC50을 구해낸다.

(5) 생태독성 실험용어

본 연구에서의 생태독성실험의 경우 건설분야에서 생소한 실험용어가 상당수 존재하여 이에 대한 정리를 표 3.4에 제시하였다.

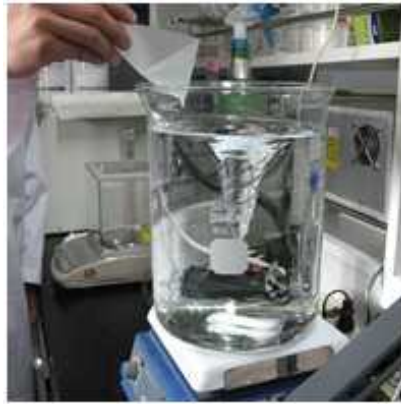
[표 3.4] 생태독성 실험에서의 주요 용어

용어	정의
반수영향농도 (Median effective concentration; EC50)	일정 시험기간 동안 시험생물의 50%가 유영저해를 일으키는 농도
생태독성값 (Toxic unit; TU)	단위시험기간 시험생물 50%가 유영저해를 일으키는 농도인 EC50을 100/EC50로 환산한 값
지수식시험 (Static test)	시험기간 중 시험용액을 교환하지 않는 시험
생존	24시간 시료 노출 후 자유롭게 유영 또는 움직임이 활발
유영저해 (Immobilisation)	독성물질에 의해 영향을 받아 일부 기관 (촉각, 후복부 등)이 움직임이 없을 경우를 ‘유영저해’로 판정. 촉수를 움직인다하더라도 유영을 하지 못한다면 ‘유영저해’로 판단
치사	심장, 촉각 등의 움직임이 완전히 없는 상태
단위	농도는 중량/용량 (mg/L)로 표시

3.2.4 연구결과

(1) 물벼룩의 배양체계 구축

생태독성 평가를 위한 물벼룩의 실내 사육을 위한 배양액은 국립환경과학원에서 분양 받은 물벼룩의 성공적인 계대배양을 통해 실험에 이상없이 사용될 수 있음을 확인하였다 (그림 3.4). 배양액 제조에 이용된 물은 3차 증류수를 이용하였으며, 배양액 제조전에 박테리아 필터를 사용하여 여과하고 14일 이상 저장된 것은 사용하지 않았다. 배양액 제조를 위해 첨가한 각종 시약들의 충분한 용해를 위하여 24시간 이상 처리한 후 배양액으로 이용하였다.



<그림 3.4> 큰물벼룩 배양액의 조제

준비된 배양액 및 조류를 공급하며 물벼룩을 사육한 결과, 기보고된 생활사와 기간에 정상적인 발육이 이루어짐을 확인할 수 있었으며, 실험에 충분한 양적 확보 역시 계대배양이 진행됨에 따라 이루어짐으로써 독성평가를 위한 생물검정이 이상없이 준비되었음을 확인할 수 있었다 (그림 3.5).

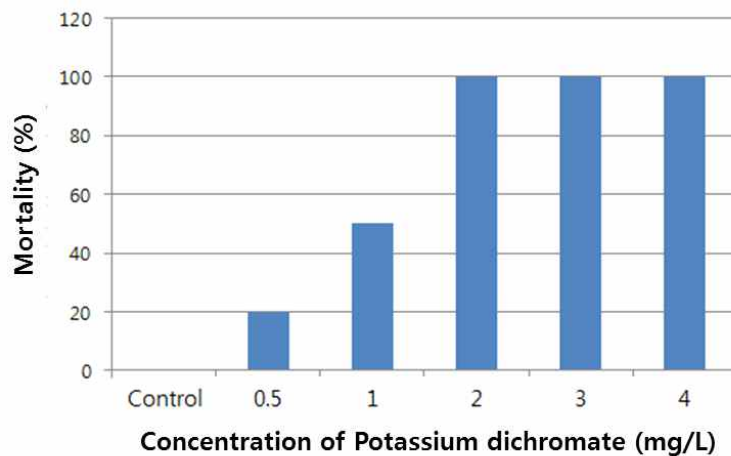
환경 독성 물질에 민감한 반응을 보이는 물벼룩이므로 사육과정중에 미량의 독성물질이 존재하더라도 정상적인 발육이나 계대배양이 힘든 점을 고려할 때, 본 연구실에서 구축한 배양체계는 이후 독성 검정에 이상없이 사용될 수 있음을 지적해주는 것이며, 일반적으로 이러한 미량의 독성물질 또는 다른 요인으로 인하여 물벼룩이 시험물질에 대하여 정상적인 반응을 보이지 않을 위험성을 평가하기 위하여, 물벼룩의 사육중 수시로 표준독성실험을 실시하여 이후 독성평가 결과에 대한 신뢰도를 검정하는 과정을 거치고 있다. 따라서 본 연구에서도 이러한 표준독성실험을 실시하여 실험결과의 신뢰성을 높였다.



<그림 3.5> 큰물벼룩 성충 (좌)과 배양 환경

(2) 표준지표독성실험

물벼룩의 민감도 및 실질적인 독성실험인 급성생태독성실험이 정상적인 조건에서 수행될 수 있는지 확인하기 위해 다이크롬산칼륨 ($K_2Cr_2O_7$)을 이용한 표준지표독성실험을 매 급성생태독성실험 이전에 수행하였으며 큰물벼룩의 표준독성실험에 대한 결과를 그림 3.6에 나타내었다.



<그림 3.6> 중크롬산칼륨 (Potassium dichromate)을 이용한 큰물벼룩의 표준독성실험

그 결과 반수영향농도인 EC_{50} 값이 1.01로 나타났으며 이러한 값은 표준독성실험에서 정상환경범위로 인정하는 0.9~2.1 mg/L 내에 존재하는 수치로써 본 연구에서 이용하는 물벼룩의 사육환경 및 독성실험조건이 정상임을 보여주는 것이며, 향후 급성독성실험의 결과가 신뢰할 수 있음을 지적해주고 있다.

3.2.5 저감효과

콘크리트 알칼리이온 침출수의 생태독성 평가를 위한 생물종으로써 우리나라에서 이용되고 있는 물벼룩의 사육 및 계대배양 환경을 구축하고 물벼룩의 실험생물로서의 적합성 검정을 위한 표준독성실험을 수행하여 콘크리트 알칼리이온 침출수의 생태독성 평가를 위한 준비를 완료하였다.

(1) 국내 생태독성관리 시험기관인 국립환경과학원으로부터 생태독성 생물종인 큰물벼룩(*D. magna*)을 분양받고 실내 사육 체계의 구축을 기본 사육시설 및 장비를 완비하였다.

(2) 국립환경과학원의 방법에 따라 제조한 배양액과 녹조류 먹이에 의해 정상적인 발육단계 및 계대배양이 이루어짐을 확인하였다.

(3) 큰물벼룩의 민감도 및 이후 독성실험의 신뢰도 검정을 위한 표준독성지표실험 결과 본 연구에서 구축된 배양시설 및 체계가 급성독성 실험에 적합함을 확인 할 수 있었다.

3.3 콘크리트 중의 중금속이온 침출

3.3.1 개요

콘크리트 구조물에서의 유해 중금속 침출 및 유해성은 자연환경 보호 및 중요성이 강조됨에 따라 사회적인 문제로 대두되고 있다. 특히 유해 중금속이온 중 6가크롬(Hexavalent chromium; Cr (VI))은 피부에 자극을 유발하여 접촉성 피부염을 발생시키며 심할 경우 피부암까지 일으킬 수 있는 인류 건강에 매우 위대한 이온으로 알려져 있다. 시멘트 내의 6가크롬은 대부분 소성과정 중 킬른 내 크롬 이온이 부풀어 떨어져 나오거나(Fregert and Gruvberger, 1973; Bravo et al., 2005), 시멘트 제조에 사용되는 천연원료, 연료 등 주요 구성 성분 이외에 함유되어 있는 중금속에 의해 발생된다고 알려져 있다. 일반적으로 포틀랜드 시멘트나 클링커는 6가크롬으로 쉽게 변환하는 수용성 크롬을 함유하고 있으며 이는 5-20mg/kg-cement 정도로 보고되고 있으며 총 크롬이온 양은 수백 mg/kg-cement 정도 될 것으로 예측되고 있다(Hills and Johansen, 2007; Potgieter et al., 2003).

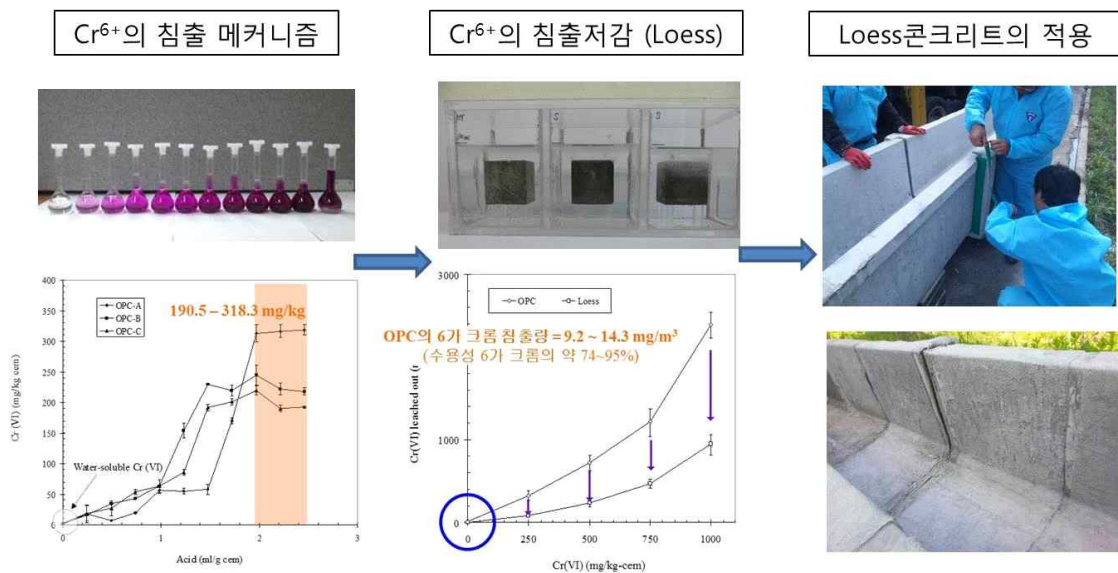
본 연구과제의 1,2차년도에 수행되었던 시멘트 및 시멘트 경화체에 존재하는 6가크롬의 농도 및 침출 및 중금속 이온 침출저감제로서의 Loess에 침출 저감 효과에 대한 연구 결과에 따르면 6가크롬의 양은 pH에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 시멘트 내 수용성 6가크롬의 양은 매우 낮으나 산가용성 6가크롬의 농도는 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 산의 농도, 즉 pH 감소에 따라 6가크롬의 농도가 증가하지만 일정 산 농도 이상일 경우에는 오히려 6가크롬의 농도가 떨어지는 현상을 확인할 수 있었다. 시멘트 수화에 따른 수용성 6가크롬 농도는 매우 감소하였다. 또한, Loess의 재료적 특성상 SiO₂ 함유량이 42.05로써 일반 포틀랜드 시멘트에 비해 매우 높았으며 시멘트 수화 생성물인 Ca(OH)₂와 결합하여 안정된 포졸란 생성물을 생성하게 할 수 있을 것으로 확인되었다. Loess의 압축강도 시험에서는 치환율 20 %에서 36 MPa로 최고값을 나타내었으며, 이후 치환율에서 감소하는 경향을 확인할 수 있다. Loess의 수용성 6가크롬의 농도는 8.5 mg/kg으로 다른 포졸란계 혼화재인 PFA나 GGBS의 6가크롬 농도보다는 높은 것으로 나타났다. 산가용성 6가크롬의 경우에는 일반 포틀랜드 시멘트 및 다른 혼화제와 다르게 수용성 6가크롬의 농도보다 작은 값으로 측정되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Loess의 경우 주요 광물인 Quartz, Calcite 성분으로 인해 중금속의 침출량을 저감하는데, 본 연구에서는 Loess 20%를 치환한 시멘트 경화체의 경우 침출되는 6가크롬의 80% 이상 저감시키는 것을 확인하였다.

제3차년도 연구에서는 전년도 연구개발에서 성취한 연구개발을 바탕으로 하여 콘크리트의 중금속이온(6가크롬)의 침출 저감기술을 실제 수서환경 및 해양환경에 적용할 경우

실용성, 적합성의 검토에 초점을 맞추었다. 동시에 Loess 콘크리트의 물성평가를 통하여 건설재료로서의 적합성 여부를 판정하기 위하여 실험을 실시하였다. 이와 같은 제반의 연구 성과를 통해 기존의 표준 지정에 있어서 시멘트 내의 존재하는 수용성 6가크롬에 관한 실험법을 시멘트 및 시멘트 경화체내에 존재하는 산가용성 6가크롬 및 시멘트 경화체로부터 침출된 산가용성 6가크롬에 관한 국내 표준지정을 위한 실험법을 개발하였다.

3.3.2 선행연구 및 연구방향

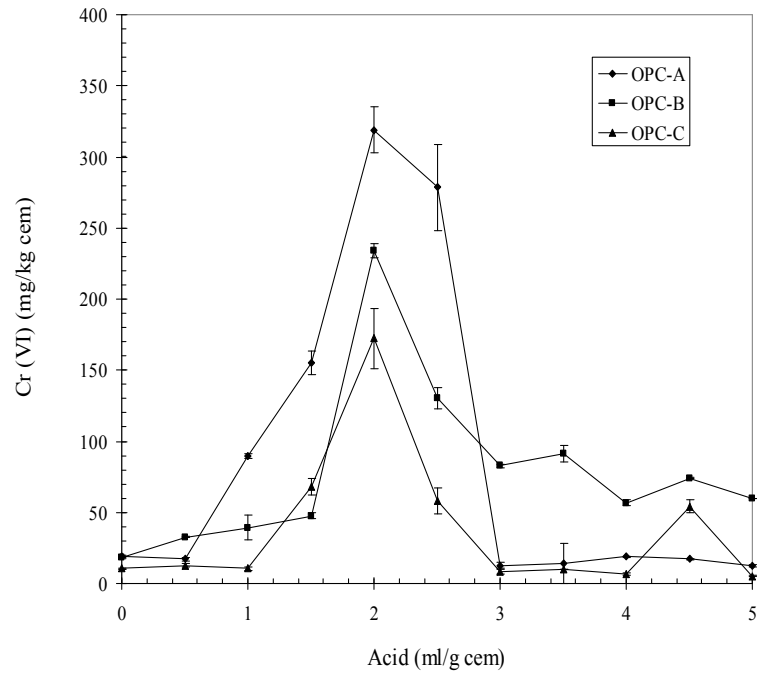
본 연구는 콘크리트 중의 중금속이온 침출저감 기술 개발로 시멘트 생산과정 중 발생되는 유해 중금속이 콘크리트 제작 시 포함되어 침출되는 문제점을 해결하기 위하여 그림 1과 같은 단계로 연구를 진행하였으며, 특히 콘크리트 내에 존재하는 여러 유해 중금속중 가장 문제시될 수 있는 6가크롬에 대해서 이를 침출저감 시킬 수 있는 침출저감제인 Loess를 이용한 침출저감 기술 개발을 실시하였다. 전체적인 기술개발의 흐름은 메커니즘 규명(1차년도), 침출저감제 개발(2차년도), 침출저감제의 현장적용성 평가(3차년도)로 나타낼 수 있다.



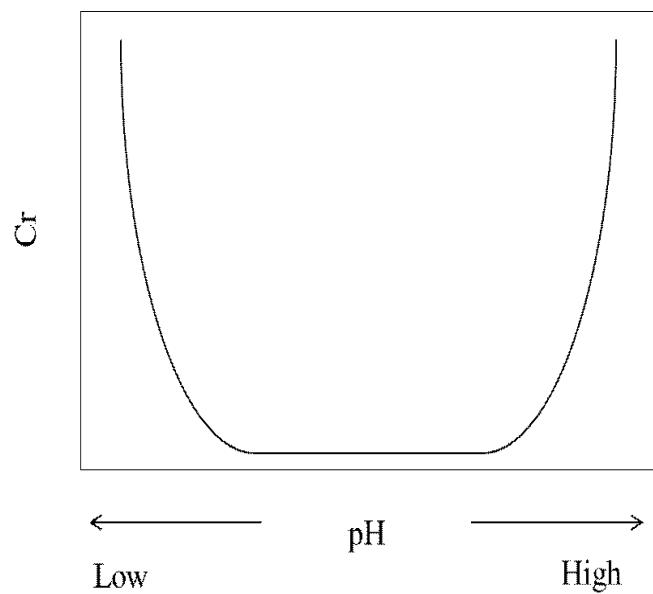
<그림 3.7> 선행연구 및 3차년도 연구방향 개요 (중금속침출)

본 연구과제의 1차년도에서는 콘크리트의 중금속이온(6가크롬) 침출 및 메커니즘 규명으로 시멘트 및 시멘트 경화체에 존재하는 6가크롬의 농도 및 침출에 대한 연구 결과에 따르면 6가크롬의 양은 pH에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 그림 3.8에서 보는 바와 같이, 시멘트 내 수용성 6가크롬의 양은 매우 낮으나 산가용성 6가크롬의 농도는 급격히

증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 산의 농도, 즉 pH 감소에 따라 6가크롬의 농도가 증가하지만 일정 산 농도 이상일 경우에는 오히려 6가크롬의 농도가 떨어지는 현상을 확인할 수 있었다.



<그림 3.8> 용매의 산성도 증가에 따른 시멘트 내의 6가크롬의 농도 변화

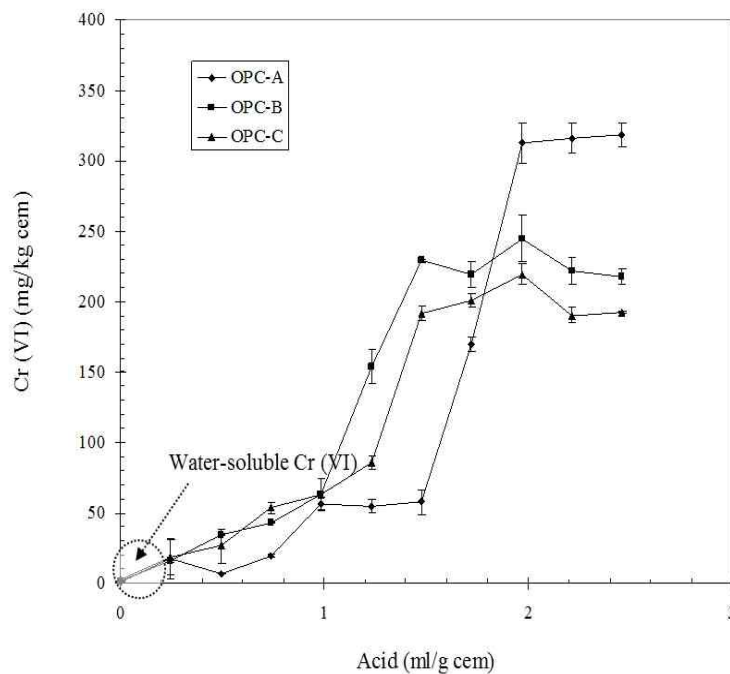


<그림 3.9> pH에 따른 6가크롬의 용해도

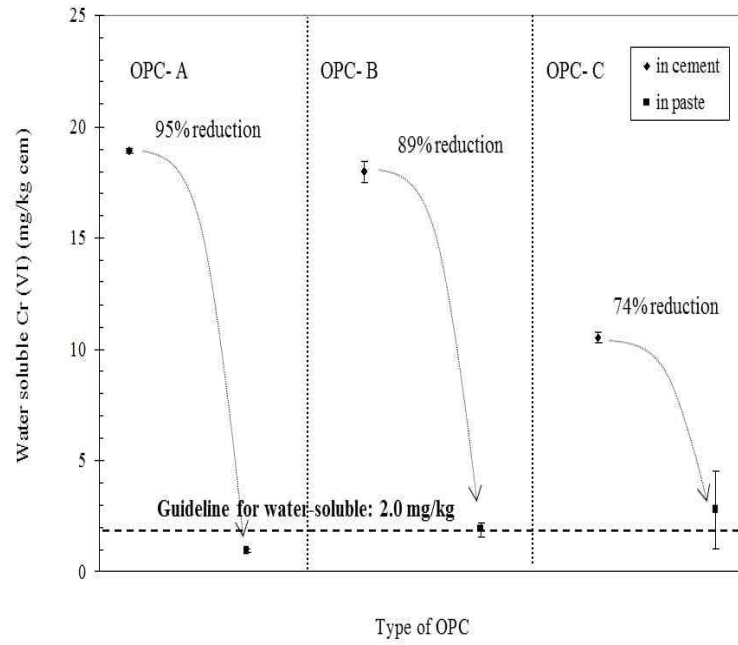
그림 3.10에서는 시멘트 경화체에서의 산농도에 따른 6가크롬의 농도변화를 나타내었

다. 시멘트 경화체에서도 산의 농도가 증가할수록 6가크롬의 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 산의 거의 존재하지 않는 상태에서 측정된 6가크롬의 경우 수용성 6가크롬으로 판단할 수 있다. 하지만 그 양이 산가용성 6가크롬의 양에 비해 매우 적은 것으로 확인 되었다.

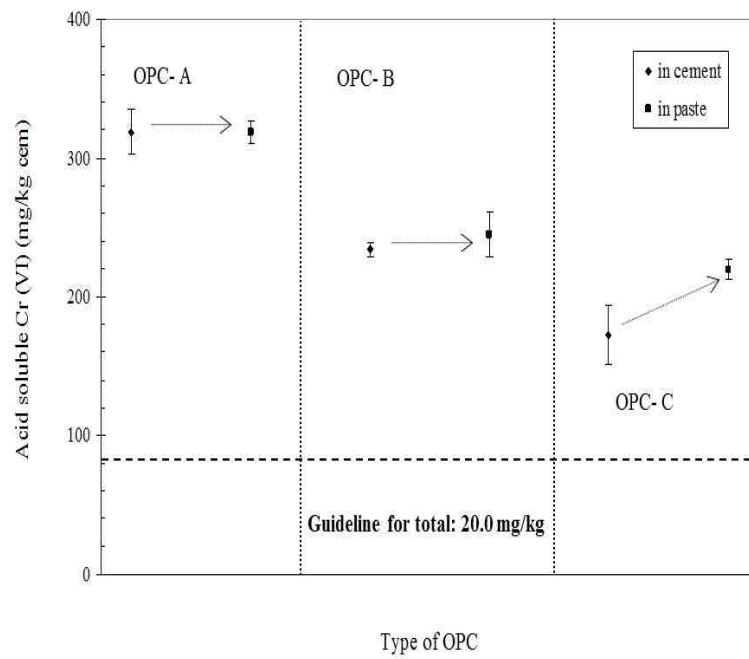
그림 3.11와 그림 3.12에서 알 수 있듯이, 시멘트 수화에 따른 수용성 6가크롬 농도는 매우 감소하였다. 이는 시멘트 수화과정에서 발생하는 수화물과 6가크롬의 화학적, 물리적 반응, 흡착에 의해 농도가 감소하는 것을 확인하였다. 수용성 6가크롬에 비해 산가용성 6가크롬의 농도는 수화에 대한 영향을 받지 않았다. 이는 6가크롬의 시멘트 내에서의 흡착 원리가 화학적 반응에 의한 결정화가 아니라 물리적 흡착에 의한 결과로서 수화에 상관없이 pH변화에 따른 동일한 결과를 나타내는 것으로 판단되었다. 수서환경에 노출되었을 때 시멘트 경화체의 침출되는 6가크롬의 농도는 시멘트 수화에 의해 이미 흡착된 이후라서 농도가 매우 낮았으나 이는 경화체의 크기를 고려할 경우 적지 않은 값이었다.



<그림 3.10> 시멘트 경화체에서의 산농도에 따른 6가크롬의 농도변화(재령 28일)

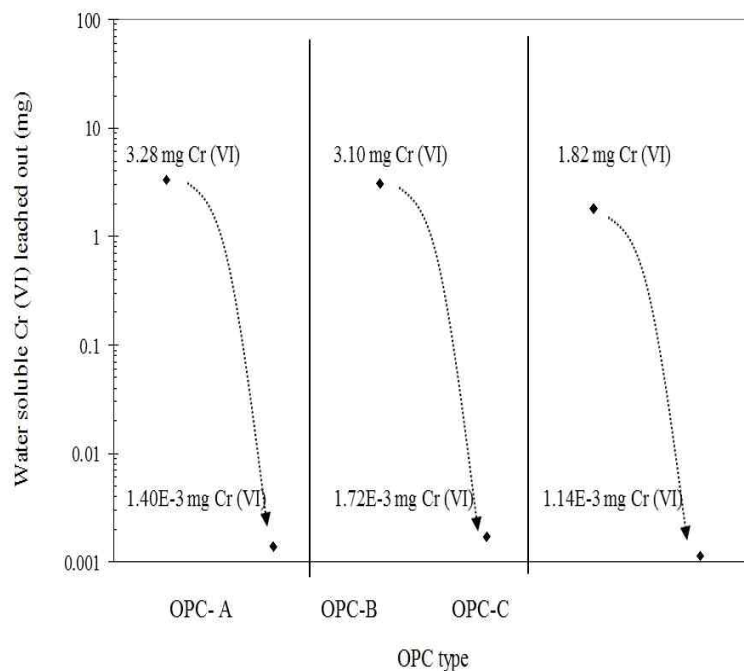


<그림 3.11> 시멘트 수화작용 전/후의 수용성 6가크롬의 농도 변화



<그림 3.12> 시멘트 수화작용 전/후의 산가용성 6가크롬의 농도 변화

수서환경에서의 시멘트 경화체에서 침출되는 6가크롬의 양을 10동안 측정하였을 때, 그림 3.13에서 보는바와 같이 시멘트 경화체 내에 존재하는 6가크롬의 양에서 미세한 양만이 침출되는 것을 확인 할 수 있었지만, 본 연구에서의 사용된 시멘트 경화체의 크기가 매우 작고, 수서환경이 증류수인 점을 고려한다면 침출된 수용성 6가크롬의 양은 무시할 만한 수치가 아닐 수 있다. 다시 말해서, 실제 콘크리트 구조물의 경우 대부분 대형 구조물이고, 건설된 수서환경의 경우 용매로 작용할 해수, 하수, 하천 등에서는 pH가 본 연구에서 사용된 경우보다 약산 또는 약알칼리일 경우가 대부분이기 때문에 6가크롬의 용해도 역시 증가할 가능성을 배제할 수 없다. 더욱이 6가크롬의 경우 자연정화나 화학반응에 의해 소모되기 보다는 계속적으로 축적되기 때문에 이에 대한 연구를 진행 할 필요성이 있다.

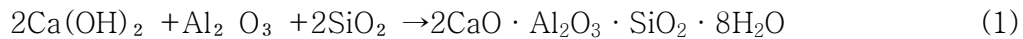


<그림 3.13> 수서환경에서 시멘트 경화체로부터 침출된 수용성 6가크롬의 농도

2차년도에는 1차년도의 연구결과를 바탕으로 하여 콘크리트 구조물에 대한 6가크롬의 침출량 저감을 위한 방안으로 친환경 건설재료인 Loess를 결합재로 사용하였다. 중금속 침출 저감제로 사용한 Loess의 화학적 특성 측정 결과는 표 3.5와 같이 정리하였다. 본 연구에서 사용되었던 일반 포틀랜드 시멘트 및 다른 혼화재의 화학 조성과 비교하였다.

Loess의 SiO_2 양은 42.05로써 OPC의 약 2배이며, PFA와 GGBS의 중간정도의 값을 갖으며, 이로부터 본 연구에서 사용할 Loess 재료가 충분한 수화반응성을 가지고 있는 재료임을 알 수 있으며, 특히 Loess에 함유되어 있는 SiO_2 는 시멘트의 수화생성물인

Ca(OH)₂ 와 상온에서 결합하여 안정된 포졸란 생성물을 생성하게 되어 고로슬래그나 플라이애시, 실리카폼과 같은 포졸란 재료들과 같은 역할을 하게 된다. Loess의 SiO₂와 Al₂O₃성분은 Ca(OH)₂ 와 반응하여 stratlingite를 생성하여 Loess는 밀실한 모르타르가 되는데 이 반응을 stratlingite 반응이라고 하며 반응 화학식은 다음과 같다.



[표 3.5] Loess 및 결합재별 화학조성

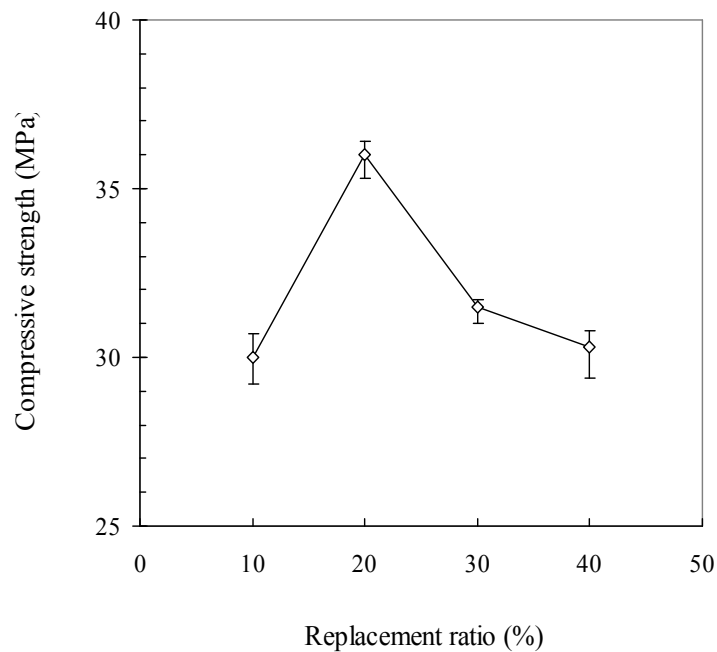
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	TiO ₂
OPC	20.7	4.6	3.0	0.65	0.13	1.0	64.7	—	—
PFA	48.7	18.8	7.7	1.9	0.4	1.0	17.0	—	0.9
GGBS	34.2	11.7	1.43	0.31	0.29	8.81	41.2	0.3	0.58
SF	94.9	0.23	0.07	0.56	0.15	0.04	0.31	—	—
Loess	42.05	36.6	4.02	0.41	0.18	0.69	0.57	—	0.23

이러한 반응들에 의하여 불안정 상태의 Ca(OH)₂ 를 안정한 상태로 만들어 콘크리트의 장기 강도를 증가시키고 내구성 및 균열저항성을 높일 수 있다.

Loess의 결합재 치환율 증가에 따른 콘크리트 압축강도의 변화에서는 10% 치환시 약 30 MPa의 압축강도를 보였으며, 20% 치환율에서 36 MPa로 최고값을 보이며, 이후 30%, 40% 치환율에서 약 30 MPa 정도의 값으로 감소하는 경향을 알 수 있었다. 이는 Loess 내 SiO₂함유량이 OPC의 약 2배로, 시멘트의 수화생성물인 Ca(OH)₂와 포졸란반응과 stratlingite 반응으로 강도를 증가시킨다. Loess 비율이 증가할수록 수화 생성물이 증가하게 되어 압축강도가 증가하지만, 치환율이 20%를 초과하게 되면 SiO₂량이 과다하여 오히려 수화반응에 역효과를 주게되므로 별다른 성능의 향상없이 오히려 강도의 저하를 야기하게 되는 것이다. 따라서 콘크리트 압축강도의 측면에서 최적의 Loess 치환율은 20%정도가 최적의 치환율로 판단된다.

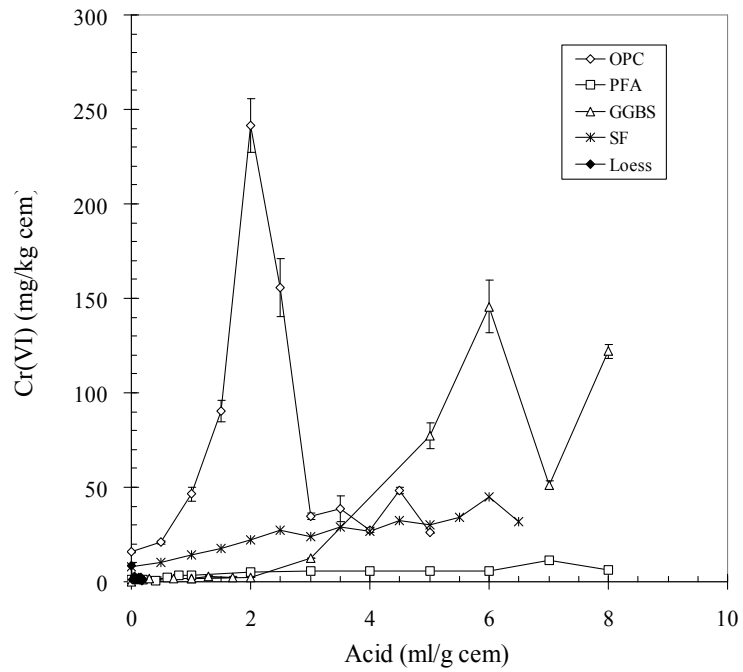
Loess에 존재하는 산가용성 6가크롬의 농도 측정에서는 최대 2.5 mg/kg이고, 평균 2.0 mg/kg 정도로서 이는 국내 자율 규제뿐만 아니라 유럽의 2.0 mg/kg-cem 규제에도 만족하는 결과이다. 일반 포틀랜드 시멘트의 경우 최대 산가용성 6가크롬의 농도가 수용성의 10-20배에 이를 정도였으며 산의 농도가 증가할수록 다시 농도가 급격히 감소하였다. 이는 시멘트 내 6가크롬의 용해도가 pH에 매우 의존적임을 의미하며 6가크롬의 농도는 용매의 pH와 용매의 성분에 의해 결정적인 영향을 받는다고 알려져 있다 (BS EN

196–10, 2006). Loess의 6가크롬의 농도도 pH 변화에 따라 증가와 감소가 반복되는 경향을 나타냈으나 측정된 값이 평균 2.0 mg/kg로 매우 작아 pH 변화에 따른 Loess의 6가크롬의 농도 변화를 무시하여도 될 것으로 판단된다.

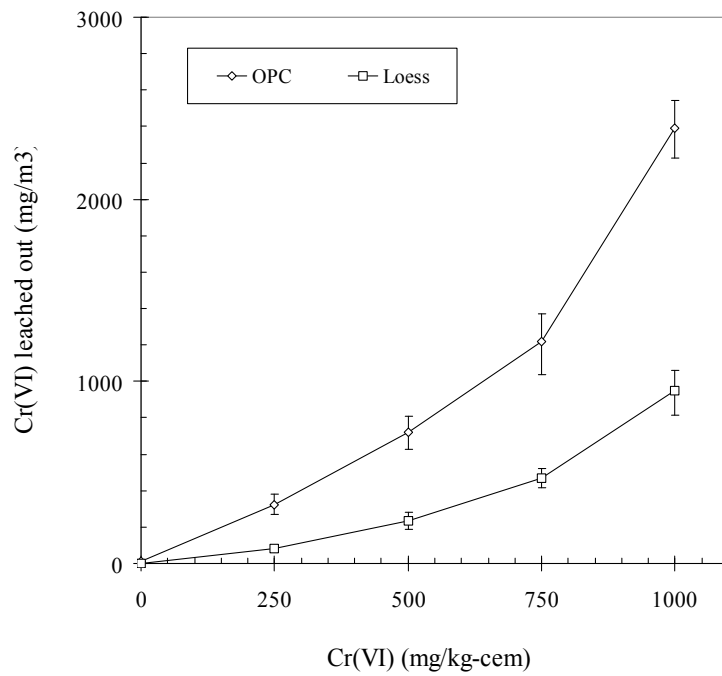


<그림 3.14> Loess 첨가제의 치환에 따른 강도 변화

수서환경에서의 중금속 이온 침출 및 중금속 침출 저감제 사용에 따른 6가크롬 고정화 특성 평가를 위해 경화체를 제작, 양생 후 밀폐된 수조에서 침지시험을 수행하였다 (그림 15). 중금속 침출 저감제로 사용한 Loess를 20% 함유하여 제작된 시멘트 경화체의 6가크롬 침출량은 평균 2.157 mg/m^3 으로써 시멘트만 사용한 시멘트 경화체에서 침출되는 6가크롬의 80% 이상을 저감시키는 것을 확인할 수 있다. Loess의 주요 광물인 Quartz, Calcite는 6가크롬뿐만 아니라 중금속을 제거하는 것으로 보고되고 있다 (Shirvani et al., 2006a; Shirvani et al., 2006b). Loess에 함유된 Quartz, Calcite 는 중금속과 결합하여 중금속의 침출량을 저감한다 (Wang et al., 2009).



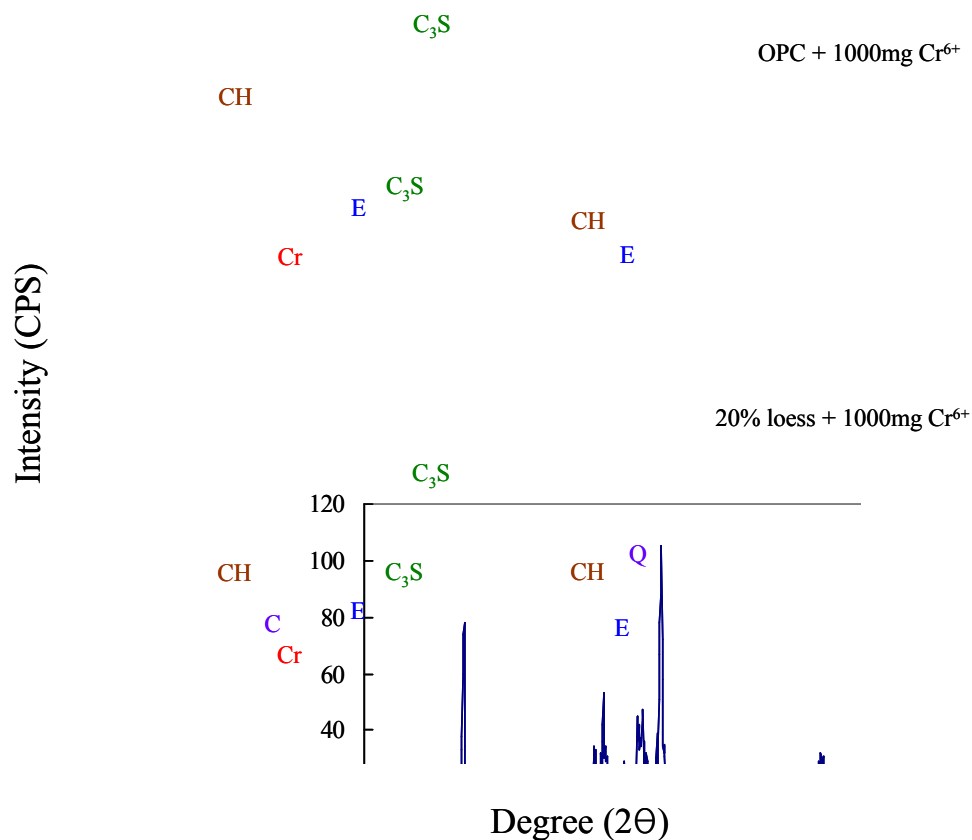
<그림 3.15> 결합재 및 Loess첨가제의 산가용성 6가크롬의 농도



<그림 3.16> 6가크롬 첨가 후 시멘트 페이스트에서의 용출 6가크롬의 농도

또한 X선 회절법을 통해 시멘트 경화체에 존재하는 6가크롬의 화학적 형태와 중금속 저감제 사용에 따른 6가크롬 침출량 저감을 확인하고자 하였다. 시멘트 자체 내에는 6가크롬의 양이 매우 적기 때문에 X선 회절 분석 시 명확하게 나타나지 않기 때문에 시멘트 경화체 제작시 1000 mg/kg-cem의 6가크롬을 혼입한 시멘트 경화체와 중금속 저감제 Loess를 20% 함유한 경우에 한해서만 분석을 실시하였다. 그림 11은 일반 포틀랜드 시멘트에 6가크롬을 1000mg 혼입한 경우와 Loess 20% 치환한 시멘트 내 6가크롬을 1000mg 혼입한 경우의 XRD Curve를 나타내었다. 일반 포틀랜드 시멘트의 XRD 측정 결과 기존의 연구자들에 의해 보고된 에트링게이트나 C-S 계열의 수화물에 의한 흡착을 보여주는 형태의 결정체는 보이지 않는다. 다만, 크롬이온 자체가 XRD Curve에서 나타나는 데 이는 6가크롬을 포함한 크롬이온이 시멘트 수화물과의 화학적 반응을 통한 변이가 일어났다고 보다는 오히려 수화물에 의해 물리적으로 흡착 (Adsorption)되어 있다는 간접적 증거이기도 하다.

중금속 침출 저감제 Loess를 20% 치환한 시멘트 경화체의 XRD에서는 Loess의 주요 광물인 Calcite와 Quartz를 확인할 수 있다. 또한 6가크롬의 함유량이 일반 포틀랜드 시멘트에 비해 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 Loess를 혼화재로 사용함으로써 Quartz, Calcite의 중금속 화학적 반응으로 6가크롬의 침출을 저감할 수 있으며 중금속 침출 저감제로서 작용을 확인할 수 있었다.



CH: Calcium hydroxide (Portlandite)
 E: Ettringite
 C₃S: Tricalciumsilicate
 Cr: Chromium components
 C: Calcite
 Q: Quartz

<그림 3.17> 6가크롬 1000 mg 혼입에 따른 XRD 분석

본 차년도(3차년도)에서는 1,2차년도에서 연구된 결과를 가지고 중금속이온 침출저감제를 이용한 현장적용성 평가, Loess 콘크리트의 물성 및 경제성 평가, 국내표준화 작업을 진행하였다.

본 연구에서 사용된 재료은 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement::OPC), 포졸란계 결합재로 고로슬래그(Ground Granulated Blast Furnace Salg:GGBS)와 중금속 침출 저감제인 Loess를 사용하였으며, 시험체의 종류는 총 3종류로 OPC, Loess (20% Loess를 함유) 및 Ternary (20% Loess 와 40% GGBS를 함유)로 나누어 시험체를 제작하였으며, 사용된 재료들의 화학적 성분은 표 3.6과 같으며, 시험체 종류 및 시험개요에 대해서는 표 3.7와 같이 나타내었다.

[표 3.6] 결합재의 화학조성

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	TiO ₂
OPC	20.7	4.6	3.0	0.65	0.13	1.0	64.7	—	—
GGBS	34.2	11.7	1.43	0.31	0.29	8.81	41.2	0.3	0.58
Loess	42.05	36.6	4.02	0.41	0.18	0.69	0.57	—	0.23

[표 3.7] 시험 개요

시험체 종류	배합비	시험 종류	비고
콘크리트	결합재: 물: 잔골재: 굵은골재 = 1.00: 0.40: 2.40: 3.10	콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 농도	수서환경
		콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 농도	해양환경
		압축강도	구조성능평가
		축진 염소이온 침투 저항성 평가	내구성능평가
		동결융해 저항성 평가	내구성능평가
		콘크리트에서 침출된 6가크롬의 농도	해양환경
모르타르	결합재: 물: 잔골재 = 1.00: 0.40: 2.40	콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 농도	수서환경
		황산염침식 저항성 평가	내구성능평가

3.3.3 중금속이온 침출 저감기법 연구내용

(1) 중금속이온 침출 저감기법의 현장적용성 평가

중금속이온 침출 저감기법의 현장적용성 평가를 위하여 2가지 현장환경(수서환경, 해양환경)에서 중금속이온 침출 저감제의 현장적용성을 평가하였다. 현장환경은 수서환경의 경우 일상생활과 가장 밀접하게 콘크리트와 노출될 수 있는 환경인 하수처리장에서 저감기법을 적용하여 실험을 실시하였으며, 해양환경은 옥외폭로시험장에서 해수를 직접적으로 노출시켜 콘크리트내의 중금속이온 침출저감량을 산정하였다. 선행연구에서 제시된 바와 같이 다른 중금속이온의 영향성이 미비하기 때문에 콘크리트내의 중금속이온중 6가크롬이온에 대해서만 측정하였다. 중금속이온의 정량화는 콘크리트내 존재하는 6가크롬이온의 양과 침출수에 존재하는 6가크롬 이온의 양을 측정하여 실험의 정확성을 높였다. 현장적용성에 대한 재현성을 확보하기 위하여 수서환경의 경우에는 콘크리트와 모르타르 시험체에 대해서 실시하였고, 해양환경의 경우에는 주로 콘크리트 구조물이 설치되는 점을 고려하여 콘크리트에 대해서만 현장적용성 평가를 실시하였다.

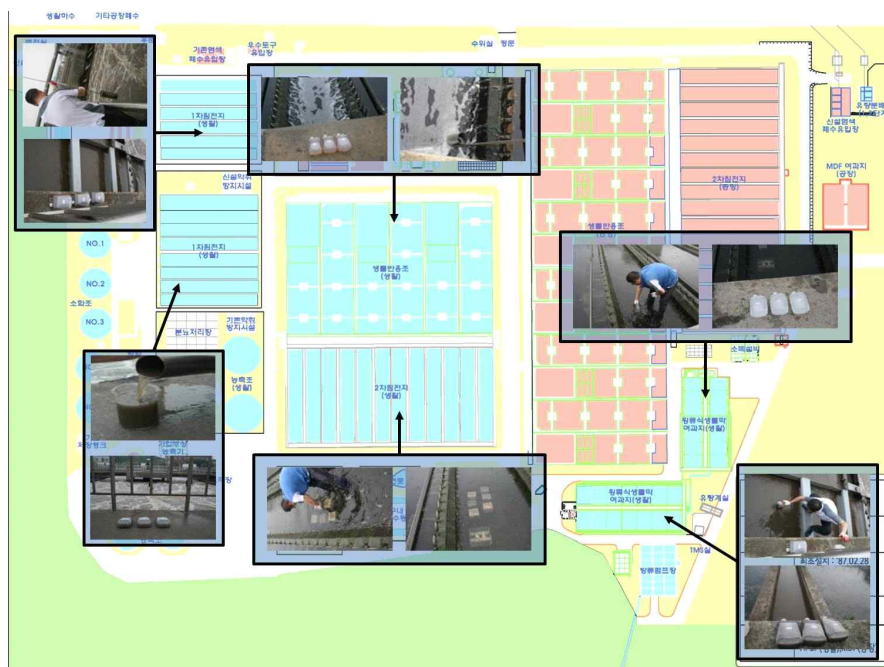
－ 수서환경에서의 중금속이온 침출 저감제의 현장 적용성 평가

수서환경에서의 중금속 침출 저감제 사용에 따른 현장적용성 평가하고자 현장에서 사용되는 모르타르와 콘크리트 시험체를 각각 제작하였다. 제작된 시험체는 물-시멘트비 0.4로 모두 동일하게 하였으며, 시험체의 중량비는 결합재: 물: 잔골재: 굽은골재 = 1.00:0.40:2.40:2.64의 비율로 150×150×150 mm 시험체를 배합하였다. 현장적용 장소(하수처리장)의 경우 콘크리트내 혼입되는 중크롬산칼륨의 침출에 의한 환경오염 문제 발생을 없애기 위하여 결합재 단위중량당 250 mg의 크롬만을 추가로 혼입하여 현장 적용성 평가를 실시하였다. 제작된 시험체는 탈형 후 28일간 폴리스틸렌 필름으로 밀봉한 후 25±2 ℃에서 기건양생을 하였다. 양생이 완료된 시험체는 그림 2에서 보는 바와 같이 하수처리장의 각 처리공정마다 시험체를 침지시켰으며, 콘크리트의 중금속이온 고정화를 고려하여 제작된 시험체의 일부는 기건양생 상태를 유지시켰다. 시험체는 90일 동안 침지 후 콘크리트/모르타르 내의 6가크롬의 양을 측정하기 위하여 분말채취기를 이용하여 콘크리트/모르타르 표면부터 5 mm까지 골재를 제외한 콘크리트/모르타르 분말을 채취하였다. 콘크리트/모르타르 분말양과 콘크리트/모르타르 표면부터 채취 부분까지의 잔존 6가크롬의 양을 정확하게 측정하기 위하여 분말 채취부분은 침출면마다 3부분으로 나누어 채취하였다.

콘크리트/모르타르 내에 존재하는 잔존 6가크롬의 양을 정량 분석하기 위하여 측정 전 표준용액을 이용하여 분광광도계의 6가크롬 측정 범위는 표준용액을 결정하였다. 중크롬산

칼륨 (Potassium dichromate; $K_2Cr_2O_7$) 1.414 g을 계량하여 증류수 1000.0 ml에 용해하여 50.0 mgCr/ml의 크롬 용액을 제작한 후, 다시 50.0 mg Cr/ml의 크롬 용액 10 ml를 1000 ml로 희석하여 5 μ g Cr/ml 표준용액을 제조하였다. 5 μ g Cr/ml의 크롬 표준용액을 50 ml 메스플라스크에 0-40 ml를 단계적으로 취하여 황산(1:1)0.6 ml를 넣어 흔들어 섞은 후 냉각시킨다. 여기에 디페닐카바지드 용액 (Diphenylcarbazide; $(C_6H_5NHNH)_2CO$) 1.0 ml를 넣어 즉시 흔들어 섞고 물을 표선까지 채웠으며, 제조된 표준용액은 6가크롬의 농도에 따라 분홍색을 띠며 농도가 높을수록 진한 색을 띠게 된다. 5분 후 분광광도계 (Spectrophotometer)를 이용하여 파장 540 nm에서 6가크롬 이온에 대한 흡광도를 측정하였다. 측정 결과 6가크롬 농도와 흡광도는 6가크롬의 농도에 따라 고유파장인 540 nm에서 일정한 패턴의 peak를 나타나게 된다. 이는 현장 적용에 사용된 시험체 (콘크리트/모르타르)에 존재하는 6가크롬의 농도를 측정, 계산할 때 이용하였다.

콘크리트/모르타르내 존재하는 6가크롬을 측정하기 전 콘크리트/모르타르에서 채취된 분말을 측정 전 24시간 동안 101 ± 2 °C의 건조로에서 건조시켜 불필요한 수분을 제거하였다. 시료는 5.00 g씩 계량하여 증류수와 염산 0.0-1.0 ml이 단계적으로 혼합된 100 ml의 산 용액과 혼합하여 10분 동안 교반하였다. 교반이 끝나는 즉시 거름종이로 여과하고 여과액의 25 ml를 취하여 50 ml 메스플라스크에 담아 황산(1:1) 0.6 ml를 첨가하여 섞은 후 실온에서 냉각시켰다. 디페닐카바지드 용액 1.0 ml를 첨가하여 흔들어 섞고 물을 표선까지 첨가한 후 분광광도계를 이용하여 540 nm에서 흡광도를 측정하였다.



<그림 3.18> 수서환경 (하수처리장)에서의 6가크롬 침출능 및 침출량 측정개요



〈그림 3.19〉 콘크리트/모르타르 시편의 6가크롬 함유량 측정 및 처리장 내의
수서환경에서의 6가크롬 측정을 위한 Spectrophotometry

－ 해양환경에서의 중금속이온 침출 저감제의 현장 적용성 평가

해양환경에서의 중금속이온 침출 저감제의 현장 적용성 평가를 위하여 콘크리트 내의 존재하는 6가크롬의 양과 시간에 따른 해수에 존재하는 6가크롬의 양으로 나누어 측정을 실시하였다. 제작된 시험체는 해양환경을 고려하여 콘크리트로만 제작하였으며, 물-시멘트 비는 0.4로 하였고, 배합 중량비는 수서환경과 동일하게 하였다.

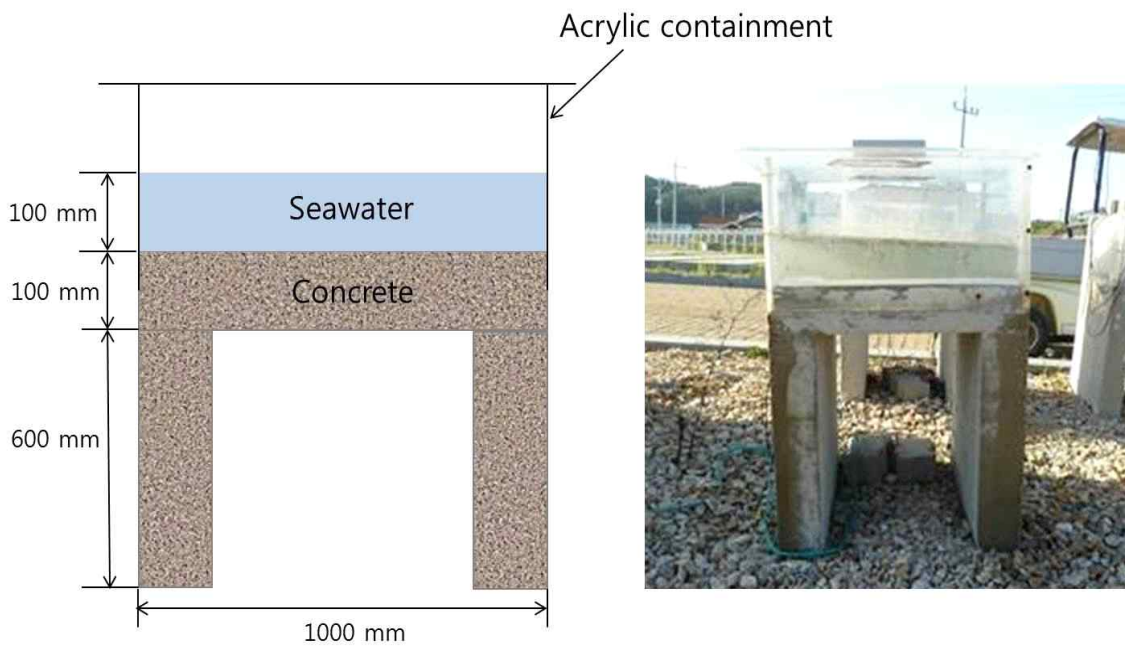
해양환경 노출시 콘크리트 6가크롬 침출 시험은 그림 4와 같이 100×100×400 mm의 시험체를 사용재료에 따라 3종류(OPC; 100 % OPC, Loess; 20% Loess+80% OPC, Ternary; 20% Loess + 40% GGBS+ 40% OPC)를 각 3개씩 제작하였고, 침출량을 더 정확히 정량화하기 위하여 결합재 단위중량당 250, 500, 1000 mg의 크롬을 추가로 혼입하였다. 시험체 제작 24시간 후 탈형하여 폴리에틸렌 필름으로 밀봉한 후 28일간 양생하였다. 양생한 시험체는 해양 옥외 폭로 시험장에서 90일간 거치시킨 후, 그림 3.20과 같이 콘크리트 분말채취기를 이용하여 콘크리트 표면으로부터 5 mm까지 분말을 채취하였다. 이때, 콘크리트 내의 존재하는 6가크롬의 양을 정확하게 측정하기 위하여, 분말 채취는 침출면마다 3부분으로 나누어 각각 채취하였다. 채취된 분말을 건조로(101±2℃)에서 24시간 동안 불필요한 수분을 완전히 제거시킨 후, 수서환경에서와 같은 방법으로 표준용액 및 콘크리트 내에 존재하는 6가크롬 측정 용액을 제조하여 분광광도계를 이용하여 540 nm에서 흡광도를 측정 하였다.

해수 노출시 콘크리트의 6가크롬 침출을 시간에 따른 해수의 6가크롬 농도 변화를 모니터링하기 위하여 옥외 폭로 시험장에 중금속이온 침출저감제를 사용한 시험체를 포함한 3종류의 시험체를 그림 5와 같이 제작하였다. 콘크리트 내에는 중크롬산칼륨을 결합재 중량 대비 250, 500, 750, 1000 mg의 크롬을 혼합하였다. 아크릴 수조를 밀폐형으로 제작하여 콘크리트 침출면에 설치하고, 해수를 6가크롬 이온이 충분하게 용해 될 수 있을 만큼 채운 후 밀폐시켰다. 해수에 존재하는 6가크롬이온의 양을 모니터링은 30, 60, 150, 200 일 각각 실시하였다. 이때, 모니터링을 위한 침출 용액은 25 ml를 채취하고 50 ml 메스플라스크에 담아 황산(1:1) 0.6 ml를 첨가하여 섞은 후 실온에서 냉각시켰다. 디페닐 카바지드 용액 1.0 ml를 첨가하여 흔들어 섞고 물을 표선까지 첨가한 후 분광광도계를 이용하

여 540 nm에서 흡광도를 측정하였다.



<그림 3.20> 해양환경 노출을 통한 콘크리트의 6가크롬 침출시험



<그림 3.21> 해수 노출 시 콘크리트의 6가크롬 침출에 따른 해수 중 6가크롬 농도 모니터링 모식도

(2) Loess 콘크리트의 물성

콘크리트는 토목이나 건축 구조물에서 공학적 성능이 우선적으로 발현이 되어야 건설

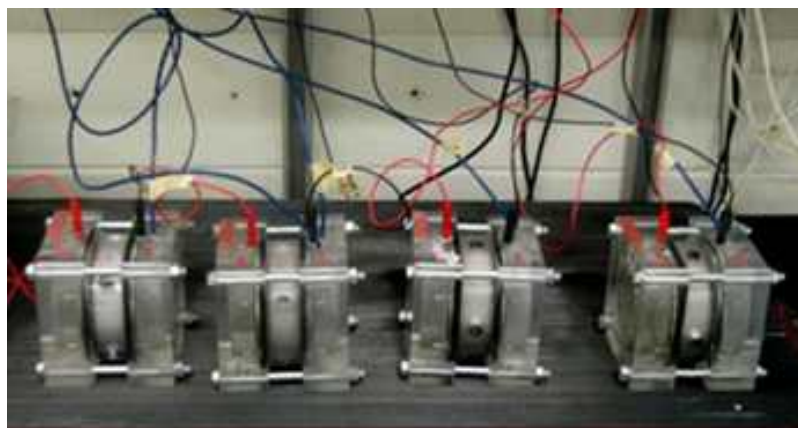
재료로서 사용적 가치를 인정받을 수 있다. Loess 콘크리트가 중금속이온 침출저감제로 사용하는데 있어서 콘크리트 공학적 성능을 평가하였다. 콘크리트의 공학적 성능 평가는 구조적 성능으로 장기 압축강도를 평가하였고, 내구성 측면에서는 염해, 동결융해 및 황산 염침식 저항성에 대해서 평가를 실시하였다.

- Loess 콘크리트의 장기강도 평가

Loess 콘크리트의 구조적 성능 평가를 위하여 콘크리트의 강도를 평가하였다. 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 몰드에 진동 다짐하여 제작하여 콘크리트 시편을 20 ± 2 °C의 수중에서 양생한 후 KS F 2405 ‘콘크리트의 압축강도 시험법’에 의하여 재령 28, 90, 180, 270일의 압축강도를 측정하였다.

- Loess 콘크리트의 염해 저항성 평가

축진 염소이온 침투 시험으로 콘크리트의 염소이온 침투 저항성을 평가하는 시험방법으로 ASTM C 1202-91 ‘Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration’ 법을 이용하였다. 콘크리트 시편은 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 몰드에 제작하였으며, 충분한 시멘트의 수화가 이루어지기 위해 20 ± 2 °C의 수중에서 양생하였고, 재령 28, 60 및 90일에 측정하였다. 원주형 시편은 해당 재령일에 높이 50 mm가 되도록 다이아몬드 톱을 이용하여 절단한 뒤, 1방향 염화물침투를 유도하기 위해 양단면을 제외한 측면을 에폭시수지를 이용하여 코팅하였다. 절단 및 코팅 시에 발생하는 콘크리트 내부 수분 손실을 보상하기 위해 코팅을 마친 후 시편을 24시간 동안 수중에 재 침지 시킨 뒤 침투 시험을 실시하였다.



<그림 3.22> Loess 콘크리트의 염소이온 침투특성 측정을 위한 시험 (ASTM C 1202)

염소이온 촉진 침투 시험시 콘크리트 양단면에는 원활하게 전하를 이동시키기 위해 스텐인레스 메쉬를 사용하였고, 3.0 % NaCl 용액과 0.3 M NaOH 용액의 아크릴 챔버를 그림 3.22에서 보는 바와 같이 콘크리트 시편에 접하도록 한 뒤, 60 V 직류전압을 6시간동안 공급하였다. 이때 양단에 부하된 전류량을 매 30분마다 모니터링하여 비정상상태의 이온 투과도를 관찰하였다. 표 3.8는 ASTM C 1202에서 제시하는 통과 전하량에 따른 콘크리트의 투과정도 및 콘크리트의 이온 투과 저항성을 평가하는 기준이다.

[표 3.8] 통과전하량에 따른 이온투과저항성 (ASTM C 1202)

통과전하량 (Coulombs)	이온투과성
>4000	매우높음
2000 - 4000	높음
1000 - 2000	중간
100 - 1000	낮음
< 100	매우낮음

- Loess 콘크리트의 동결융해 저항성 평가

동결융해 평가에 관해서는 콘크리트 시편(OPC, Loess, Ternary)에 대해 실시하였다. 100×100×400 mm의 콘크리트 시편을 제작하여 20±1° C의 온도에서 28일간 수중 양생 후 동결융해 저항성을 측정하였다. 동결융해의 온도 범위는 -18 ° C에서 4 ° C까지의 범위로 설정하였으며 초기 동결기간은 -18 ° C에서 1.5시간으로 설정 하였다. 이후 융해를 위한 온도상승속도는 10 ° C/h로 하여 4 ° C까지 수중융해 후 4.0시간 동안 지속하였다. 이후 같은 동결속도로 다시 -18 ° C까지 동결을 하여 그림 3.23에서 보는 바와 같이 이를 1사이클로 설정하여 300 사이클 동안 동결융해의 반복환경을 유지하였다. 이와 같은 동결융해 과정은 ASTM C 666 ‘Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing’ 에 준하여 실시하였다.

동결융해 시 동탄성계수를 측정은 매 50 사이클마다 측정 300까지 실시하였으며, 이를 바탕으로 내구성 지수를 산정하였다. 동탄성계수는 동결융해 환경에 노출 직전의 횡파주파수 (Transverse frequency)를 기준으로 하여 식 1에서와 같이 상대동탄성계수 (Relative dynamic modulus of elasticity; %)를 측정하였다. 동탄성계수 측정은 수중융해 직후, 동결 직전에 측정하였다.

5°C 4.0h in water

10°C/h

-18°C 1.5h
in the air

<그림 3.23> 동결융해 시 1사이클에서의 온도 및 수중, 기건 상태

$$P_C = \frac{n_C^2}{n_0^2} \times 100 \quad (1)$$

여기서,

P_C : relative dynamic modulus of elasticity, %

n_C : fundamental transverse frequency (Hz) at C cycles, Hz

n_0 : fundamental transverse frequency at 0 cycle, Hz

C : number of cycles

또한 계산된 상대동탄성계수를 이용하여 내구성지수를 식 2과 같이 도출하였다.

$$DF = \frac{P_C}{C} \quad (2)$$

여기서,

DF : durability factor

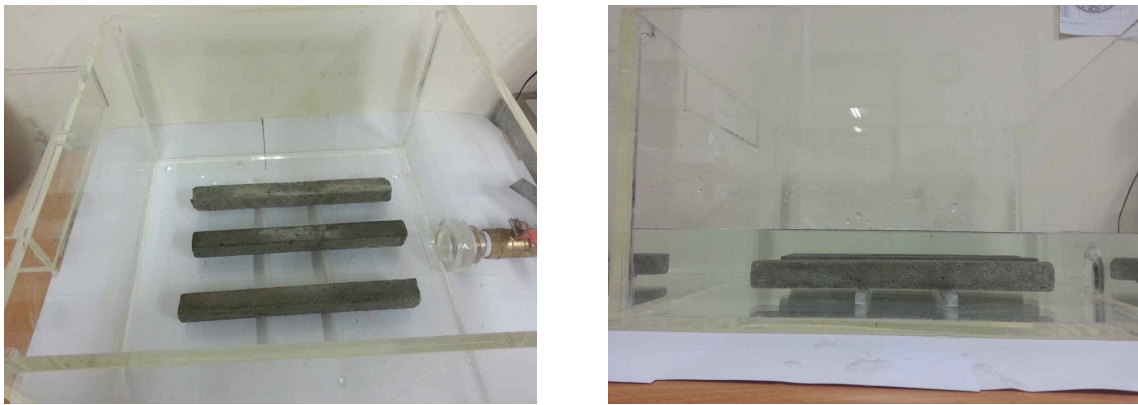
P_C : relative dynamic modulus of elasticity at the C cycle, %

C : number of cycle

– Loess 콘크리트의 황산염 침식 저항성 평가

Loess 콘크리트의 황산염 침식 저항성을 평가하기 위해 사용된 시편은 모르타르 시편을 이용하였다. 실험결과의 재연성 확보를 위하여 각 배합마다 3개씩 시편을 제작하여 길이변화 및 중량변화에 대해 측정하였다.

그림 3.24에서 보는 바와 같이, ASTM C 1012 ‘Standrad Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution’ 에 의거한 25×25×285 mm의 사각형 몰드를 이용하여 모르타르 시편을 제작하였으며, 타설한 시편은 24시간 후 탈형하여, 콘크리트 양생조에 20±2 ℃의 온도로 충분한 콘크리트 공학적 성능 발현을 위해 수중양생을 28일동안 양생시켰다. 양생이 완료된 모르타르 시편은 5% Na₂SO₄ 용액에 20±2 ℃의 온도로 침지시켜 황산염 침식을 유도하였으며, 용액의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 용액은 2주에 한번 교체하였다. 황산염 침식 저항성을 평가하기 위하여 침지기간 28, 60, 90일에 대한 질량변화와 중량변화에 대해서 측정하였다.



<그림 3.24> Loess 콘크리트의 황산염저항성 측정을 위한 시험

(3) Loess 콘크리트의 경제성 및 표준화

콘크리트 내의 중금속 침출저감제로서 본 연구에서는 Loess라는 시멘트 결합재를 제시하였다. 기존의 연구에서는 황산염계 중금속이온 침출저감제에 대한 연구가 진행되었지만, 이에 대한 실용성에 대한 부분에서는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 Loess를 이용한 중금속이온 침출저감제로서의 실용성을 확보하기 위한 경제성 평가 및 표준화 작업에 대해서 연구를 실시하였다.

우선, Loess의 중금속이온 침출저감제로서 경제성 평가를 위한 연구는 기존의 제시된 시멘트내의 중금속이온 침출저감제(황산염계 중금속이온 침출 저감제)와 비교 분석하였고, 연구 범위를 다음과 같이 나누어 실시하였다.

- (1) 중금속이온 침출저감제로서 사용 용이성
- (2) 콘크리트 재료로서 공학정 발현 가능성
- (3) 토목/건축 구조물에 적용시 경제성

현재 시멘트내에 존재하는 6가크롬의 양을 측정하는 방법에 대한 표준화 작업이 되어 있지만, 우선적으로 수용성 6가크롬의 양에 대한 표준화가 진행되어 있는 상태이다. 본 연구에서 제시했듯이, 콘크리트의 열화과정에서 발생하는 6가크롬은 대부분 낮은 pH 상태에서 발생되기 때문에 산가용성 상태에서의 시멘트내의 6가크롬의 양을 측정하는 것이 적절하다고 판단하여 이에 대한 표준화와 시멘트의 수화작용에 의한 콘크리트 생성에서 발생하는 6가크롬의 고정화를 고려하였을 때, 실구조물에서의 6가크롬이온의 양을 정량화하는 방법인 콘크리트에서의 6가크롬 침출능에 대한 표준을 제시하였다.

3.3.4 중금속이온 침출 저감기법 연구결과

(1) 중금속이온 저감기법의 현장적용성 평가

상기 기술한 바와 같이, 중금속이온 저감기법의 현장적용성 평가는 수서환경과 해양환경을 나누어 실시하였다. 수서환경에서는 콘크리트와 모르타르 시험체에 대한 6가크롬이온의 침출량을 콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 양으로 측정하여 침출저감제인 Loess사용시 침출저감에 대한 정량화하였다.

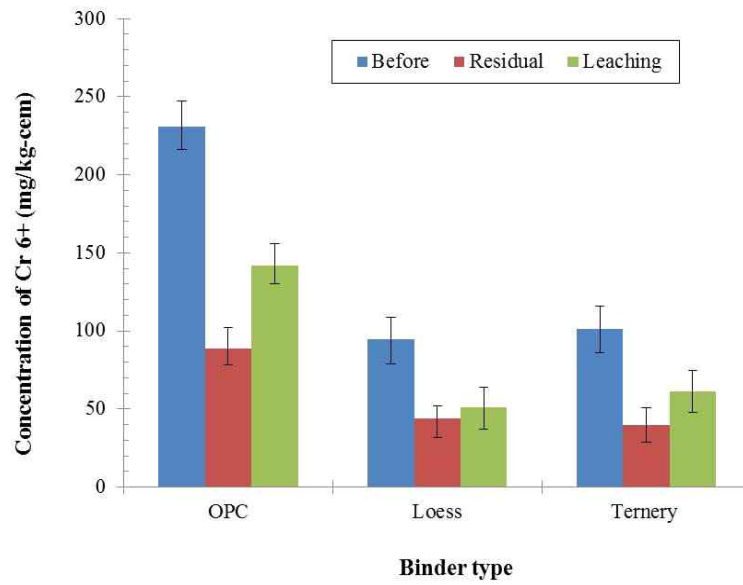
수서환경에서의 중금속이온 침출저감 기법 적용시 콘크리트 및 모르타르에 존재하는 6가크롬이온의 양을 살펴보면, 그림 3.25에서와 같이 나타낼 수 있다. 우선 콘크리트/모르타르 타설시 중금속산칼륨을 결합제 중량대비 250 mg을 혼합하여 제조하였지만, 90일간 양생 후 콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 양은 모든 시험체에서 250 mg이 존재하지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 콘크리트의 수화과정에서 발생될 수 있는 에트링가이트(Ettringite; $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)가 황산염 이온을 해리하고 대신 6가크롬과 결합하여 크롬산-에트링가이트(Chromate-ettringite; $C_3A \cdot 3CaCrO_4 \cdot 32H_2O$)로 형태가 변화되었기 때문으로 판단된다. 중금속이온 침출 저감제를 사용한 Loess나 Ternary의 경우에는 OPC에 비해서 콘크리트/모르타르 내에 존재 6가크롬의 양의 현저하게 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있는데, Loess내에 존재하는 중금속을 제거하는 물질로 알려진 Quartz, Calcite에 의한 것으로 중금속이온 침출 저감제로서 Loess의 역할을 확인 할 수 있다. 다시 말해서, Loess를 첨가한 콘크리트의 경우 중금속이온의 고정화 능력이 Loess를 첨가하지 않는 경우 보다 대략 3배정도 높은 것으로 판단된다. 하지만, 40% 고로슬래그를 함

유한 시험체의 경우 Loess의 시험체보다 높은 6가크롬의 양이 존재하는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 고로슬래그가 낮은 CaO 함유에 의한 Calcite 생성이 불리하기 때문에 발생한 것으로 보인다.

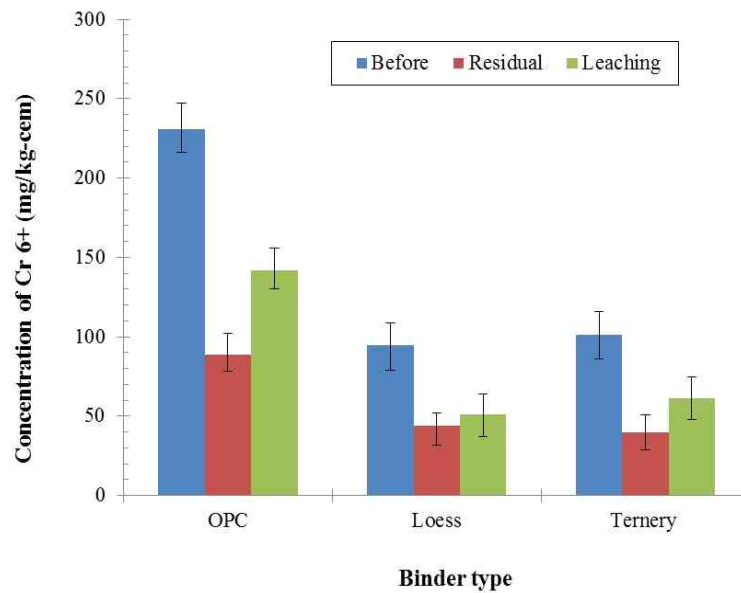
수서환경에서의 6가크롬의 침출량을 산정하는데 있어서는 90일간 기건양생을 시킨 콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 양에서 90일간 침지 이후 시험체내에 존재하는 6가크롬의 양을 뺀 것으로 산정하였다. 콘크리트의 침출량을 우선 살펴보면, OPC의 경우 166 mg/kg-cem인데 반해서 Loess와 Ternary는 53 mg/kg-cem, 55 mg/kg-cem로 OPC에 비해서 낮게 나타났다. OPC의 경우 콘크리트 내에 존재하는 높은 6가크롬의 양에 다른 시험체에 비해서 월등히 많은 양이 존재하기 때문에 많은 침출량을 보인 것으로 판단된다. 그리고 침출능에서 살펴보면 OPC의 경우 68%로 Loess 나 Ternary의 60%, 59%보다 높은 것을 알 수 있는데, 이는 콘크리트 내에 존재하는 화학적 고정화 능력 보다 물리적 흡착(Absorption)의 영향도 동시에 작용하는 것을 확인 할 수 있다. 모르타르 시험체의 경우 수서환경에서의 침출량이 51-142 mg/kg-cem로 콘크리트 시험체의 53-166 mg/kg-cem에 비해 더 낮은 6가크롬의 침출량이 더 작을 것을 확인 할 수 있었다. 콘크리트 배합 시 모르타르에 비해 더 적은 양의 결합재 사용에 의한 것으로 판단되며, 수화작용에 의한 6가크롬의 고정화능력에 비해서 물리적 흡착(Absorption)이 6가크롬 침출을 저감시키는데 더 큰 역할을 하는 것을 확인 할 수 있었다.

현장 적용성에 있어서는 콘크리트나 모르타르 모두 Loess 침출저감제를 사용한 경우 침출 전/후 콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 양이 침출저감제를 사용하지 않는 경우 보다 현저하게 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, 하수처리장의 경우 낮은 pH의 환경에서도 Loess를 사용한 경우 월등한 중금속이온 침출저감 효과를 보이는 것으로 보아 수서환경에서의 침출저감제로서 Loess는 그 성능이 우수하다고 판단된다.

(a) 콘크리트



(b) 모르터

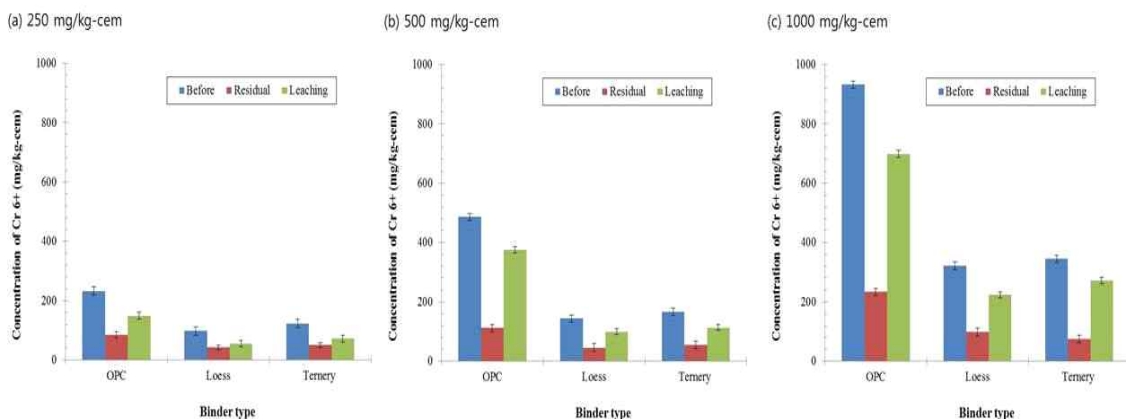


<그림 3.25> 수서환경에서 Loess첨가에 따른 6가크롬 침출저감효과 (90일 침지 후, 콘크리트 시편 표면부 5.0mm 까지의 6가크롬 농도)

해양 환경에서는 6가크롬의 양은 콘크리트 내에 존재하는 6가크롬의 양과 해수에 존재하는 6가크롬의 양으로 나누어 실험을 실시하였으며, 그림 3.26 에서는 해양 폭로 시험장에 90일간 침지시킨 후 콘크리트 내에 존재하는 콘크리트의 양을 나타내었다.

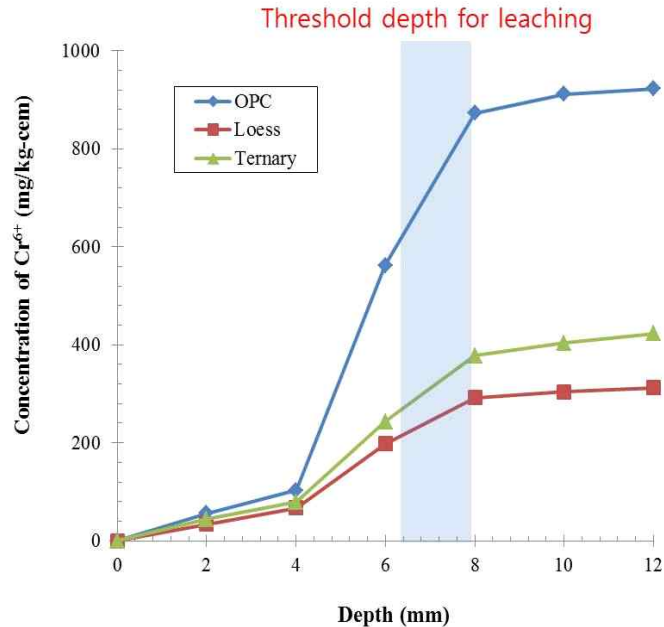
해양 폭로 시험에서의 콘크리트 시험체 제작시 중크롬산칼륨을 결합재 중량대비 250, 500, 1000 mg/kg-cem의 크롬을 혼합하여 제작하였다. 전반적으로 혼입한 크롬의 양보다 적게 나타나는 것은 수서환경에서의 결과에서 알 수 있듯이, 콘크리트 수화과정에서 발생하는 물리적 흡착 및 화학적 고정화 과정에 의해서 비롯된 것을 알 수 있다. 혼합된 크롬의 양이 증가할수록 침출된 양이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 특히 Ternary의 경우 250 mg/kg-cem의 경우 고정화 능력이 20% 인데 반해서 1000 mg/kg-cem 에서는 7%로 현저하게 떨어지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 시멘트 치환재로 사용된 고로슬래그의 CaO나 Al₂O₃가 중금속 이온을 고정화 시키는 C-A계의 수화물을 생성하는데, 이 화학 성분들이 OPC 보다 현저하게 낮은 양을 가지고 있고, 일부 C-A계의 수화생성물이 해수에 존재하는 염소이온 고정화에 참여하기 때문으로 판단된다.

그림 3.26에서는 1000 mg/kg-cem의 크롬을 콘크리트에 혼입한 후 90일간 침치 후 2 mm 간격으로 6가크롬의 양을 프로파일을 나타내었다. 측정결과에서 보면, 콘크리트 표면에서 2 mm 까지의 6가크롬은 해수에 의해 거의 침출된 것을 확인 할 수 있고 측정깊이가 깊어질수록 6가크롬의 양이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 대부분의 시험체가 콘크리트 표면에서 6-8 mm 이후에는 6가크롬의 양이 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있었다. 결국, 모든 시험체에서 콘크리트에서의 6가크롬의 침출한계는 6-8 mm로 나타낼 수 있다. 일반적인 콘크리트의 열화인자 (염소이온, 이산화탄소, 황산이온)의 경우 콘크리트내로 침투할 때 콘크리트의 공극구조에 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있지만, 6가크롬의 경우에는 콘크리트에서 침출과정에서 결합재의 종류에 상관없이 일정하다는 것을 알 수 있다. 즉, 6가크롬의 경우 콘크리트내에 존재하는 미세공극(Capillary pore) 이하의 공극에서도 자유롭게 이동할 수 있다는 것을 의미하며, 미세분말을 이용한 콘크리트의 공극구조의 밀실화는 침출저감제 Loess를 통한 화학적 고정화나 물리적 흡착을 이용한 중금속이온 침출기법 적용보다 비효율적일 것으로 판단된다.



<그림 3.26> 해수에 침지한 Loess 콘크리트의 6가크롬 함유농도 (90일 침치 후, 콘크리트 표면부 5.0 mm 까지의 6가크롬 농도)

그림 3.27에서는 콘크리트 깊이에 따른 잔존 6가크롬 농도 및 침출 한계깊이를 나타내었다. 침출 한계깊이는 콘크리트 표면부에서 6-8 mm이며, 결합재별 잔존 6가크롬 농도는 OPC, Loess, Ternary 각각 871, 328, 290 mg/kg-cem으로 측정되었다.



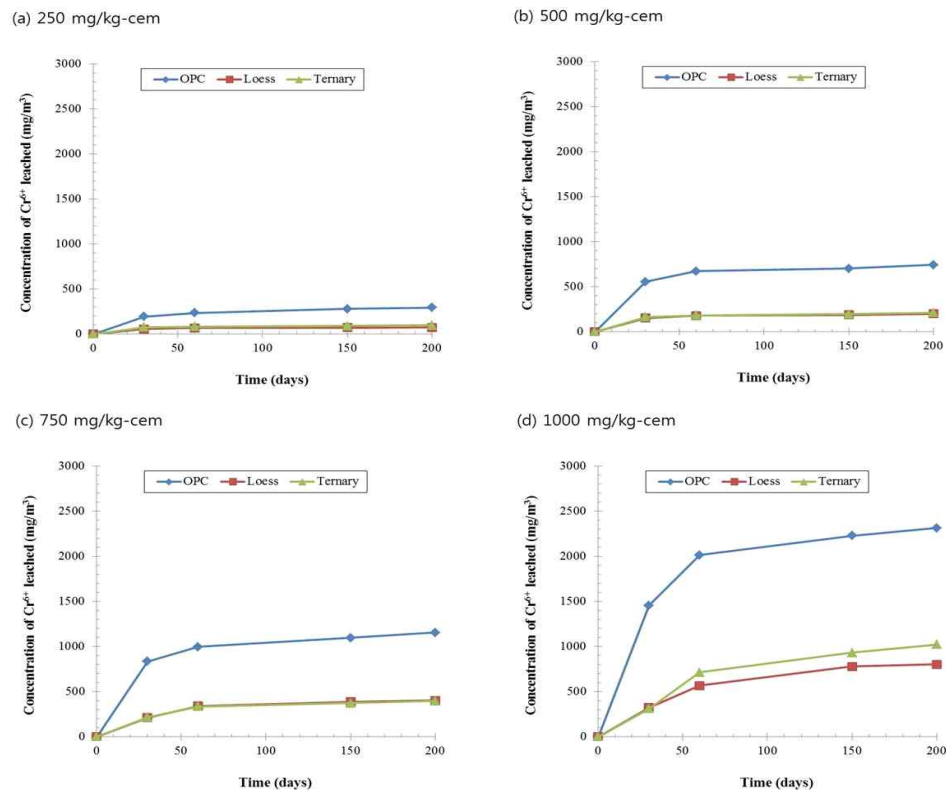
<그림 3.27> 콘크리트 깊이에 따른 잔존 6가크롬의 농도 및 침출 한계깊이의 예측
(1000 mg/kg-cem의 6가크롬 혼입 후 90일간 해수침지를 통한 침출)

그림 3.28에서는 시간에 따른 해수내에 존재하는 6가크롬 이온의 양을 모니터링한 결과를 나타내었다. 콘크리트 시험체에 혼입한 양은 결합재 중량 대비 250-1000 mg/kg-cem의 크롬으로 총 4단계로 나누어 제작하였고, 침출기간에 따라 각각 해수내에 존재하는 6가크롬의 양을 측정하였다. 침출된 6가크롬의 양이 콘크리트 시험체와 해수와 접촉한 한면에서만 침출되었기 때문에 6가크롬의 침출량은 해수노출면적 대비 6가크롬의 양으로 나타내었다.

1000 mg/kg-cem의 크롬을 혼입한 경우 노출기간 28일, 56일, 150일, 180일의 OPC 콘크리트의 6가크롬 침출량은 각각 1,456, 2,016, 2,231, 2,314 mg/kg-cem으로 측정되었다. Loess 콘크리트의 경우 6가크롬 침출량은 322, 567, 778, 803 mg/kg-cem으로 측정됨에 따라 OPC 대비 65-80% 저감되었다. 전체적으로 해수에 노출된 콘크리트에서 60일 이후 6가크롬의 양의 증가가 거의 없는 것으로 보아 대부분의 수용성 6가크롬이 침출됨을 확인할 수 있었다. 그리고 OPC가 Loess나 Ternary에 비해서 6가크롬의 침출량이 월등하게 높은 것을 확인 할 수 있는데, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 Loess 침출저감제 사용에 의한 중금속이온 침출저감 효과가 나타나는 것이라 볼 수 있다. 추가적으로 본 연구과제의 목표인 콘크리트 내 중금속이온 95% 침출방지를 위해 콘크리트의 배합 조정을 통하여 콘크리트의 강성 및 내구성을 유지하는 범위에서의 Loess 첨가량을 증가하거나, 6가크롬 흡착을 위해 활성 Loess 골재를 콘크리트용 굵은 골재로의

활용을 통해 물성 및 환경성에 관한 적합성 여부에 관한 추가연구가 필요하다고 판단된다.

1000 mg/kg-cem의 크롬을 혼입한 경우에는 Ternary와 Loess에 대한 차이가 더 적은 크롬 혼입양에서와는 다르게 그 차이가 현저하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 시멘트 대체재인 고로슬래그가 일정량의 6가크롬의 양을 초과하였을 때에는 중금속 이온 침출 저감효과를 반감시키는 역할을 할 수 있는 것으로 보인다.



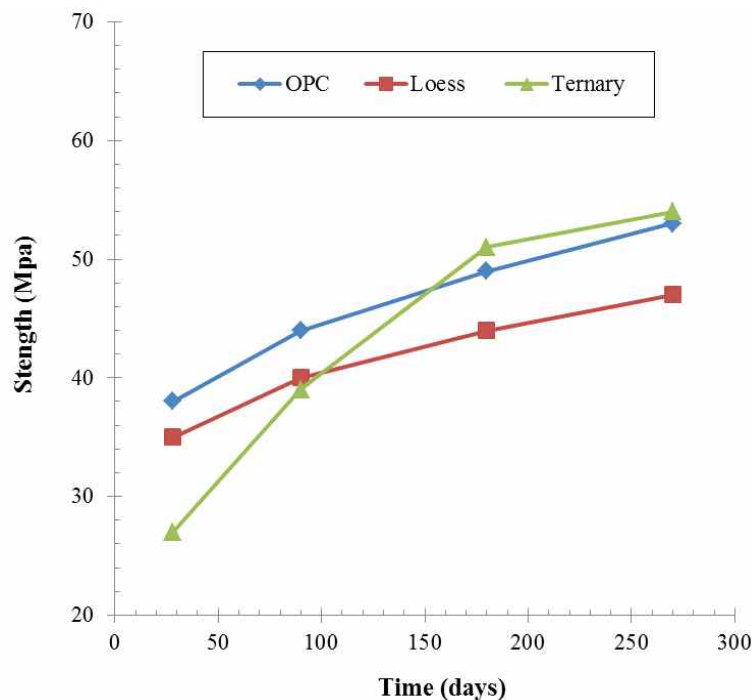
<그림 3.28> 해수에 노출된 콘크리트의 시간에 따른 6가크롬의 침출농도 (밀폐형)

해양환경에서도 Loess 콘크리트가 다른 콘크리트 보다 중금속이온 침출저감에 효과적인 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 경우 해수에 존재하는 염소이온에 의해서 수서환경에 비해서 중금속이온 침출저감 효과를 반감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

(2) Loess 콘크리트의 물성

침출저감제인 Loess를 사용하였을 때의 콘크리트의 공학적 성능을 확인하기 위하여 강도 및 내구성 평가를 실시하였고, 내구성 평가의 경우 염해, 동결융해 및 황산염에 대해서 평가하였다.

그림 3.29에서는 Loess 콘크리트의 구조적 성능 평가를 위해서 우선 압축강도평가를 실시하였다. 압축강도는 재령이 증가하면서 콘크리트의 수화과정에 의해 전체적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. Ternary의 경우에는 초기강도가 다른 콘크리트에 비해 현저하게 낮게 나타나는데 이는 사용된 시멘트 대체제인 고로슬래그의 잠재수경성에 기인한 것으로 장기 강도에서는 오히려 가장 높은 강도를 보인 것을 확인 할 수 있었다. Loess의 경우에는 전반적으로 OPC에 비해서 모든 재령에서 낮은 압축강도를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이는 OPC에 비해 Loess에는 매우 낮은 CaO의 양에 의해 강도발현에 필요한 CA계의 수화생성물이 적게 생성되기 때문으로 판단된다. 하지만 본 실험에서 Loess의 초기 강도는 35 MPa로 OPC의 38 MPa에 비해 미세하게 낮은 것으로 나타났으며, 장기강도인 재령 270일에서도 47 MPa로 53 MPa인 OPC에 비해서 약간 낮은 것으로 나타났다.



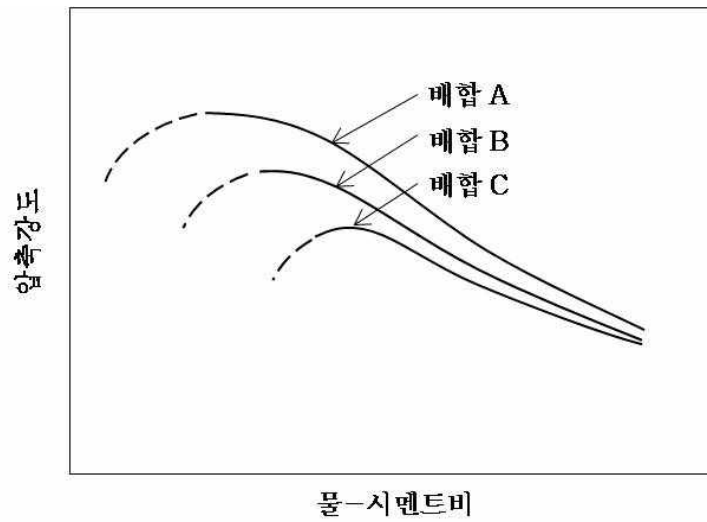
<그림 3.29> Loess 콘크리트의 강도발현 (장기강도)

본 실험에서 사용된 20% Loess를 치환한 콘크리트의 경우 구조적 성능면에서는 거의 동일한 수준의 성능을 발휘 할 수 있으나, 일반콘크리트 기준에 만족하는 최적화 개선에 관한 대책이 필요하다. 일반적으로 콘크리트 강도에 영향을 미치는 요인 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 물-시멘트비이며, 보통골재를 사용한 콘크리트가 워커블하고 플라스틱하다면 콘크리트의 강도는 시멘트페이스트의 물-시멘트비에 의하여 결정된다. 그림 3.30은 ‘Lyse 이론’ 으로 압축강도와 물-시멘트비와의 관계를 나타낸 것으로 압축강도와 물-시멘트비와의 사이에는 직선관계가 성립하고, 측정된 압축강도 및 시멘트-물비를 이용하여 목표강도가 식 1과 같이 도출된다. 따라서 콘크리트의 배합조정 (물-시멘트비)에 의해 20% Loess를 치환한 콘크리트의 강도저하를 최소화할 수 있다고 판단된다.

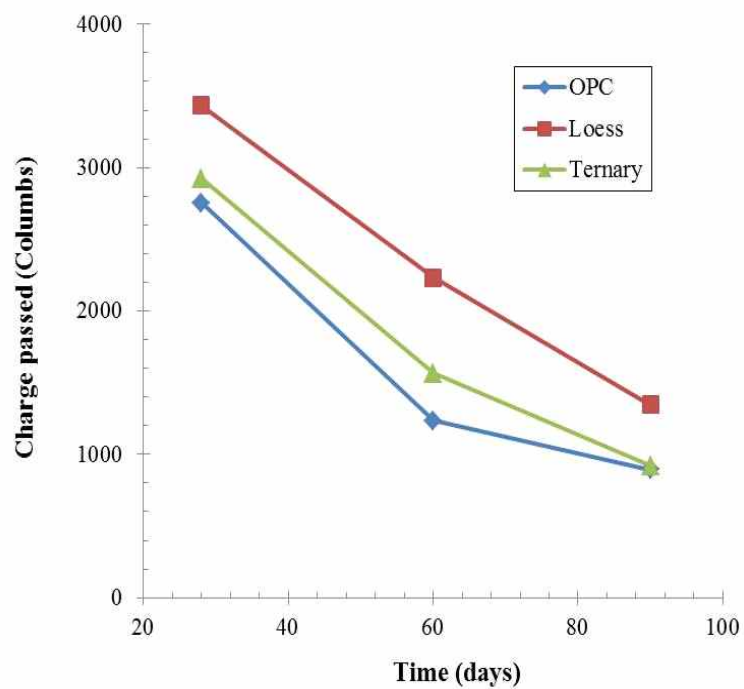
$$\sigma = A + B\left(\frac{C}{W}\right) \quad (1)$$

여기서,

σ : 압축강도
 A, B : 실험상수

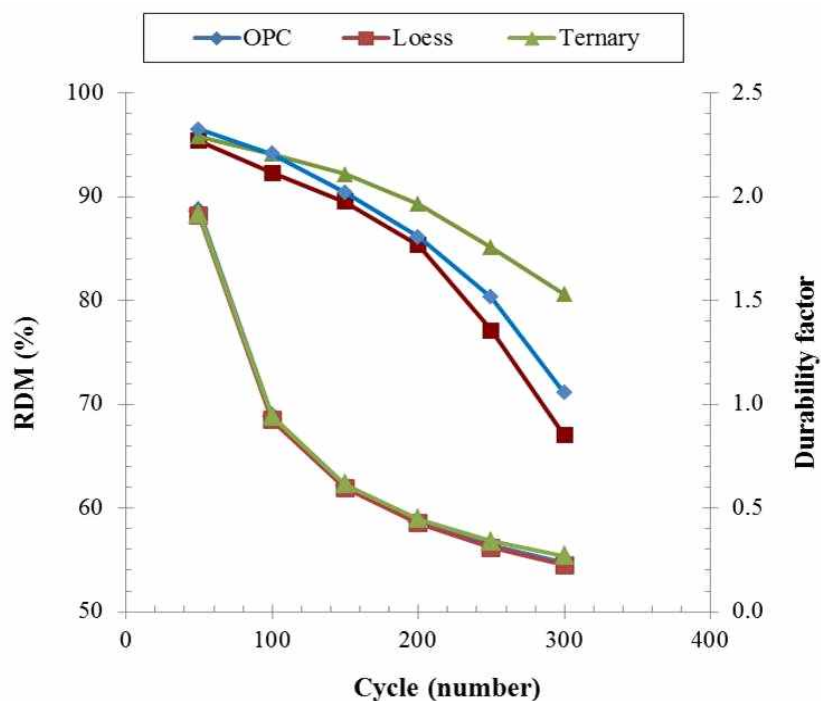


<그림 3.30> 압축강도와 물-시멘트비와의 관계



<그림 3.31> Loess 콘크리트의 염소이온 투과성

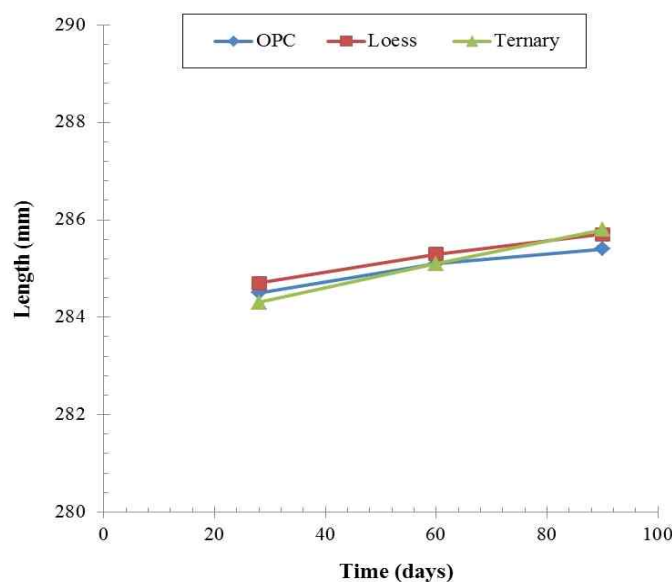
염해 저항성을 평가하기 위해서 ASTM C 1202에 의거한 촉진 염소이온 침투시험을 실시하였으며, 그림 3.31 에서는 염소이온 투과저항성을 재령일에 따른 통과전하량으로 나타내었다. 통과전하량은 재령일 증가할수록 모든 배합에서 통과전하량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 콘크리트는 수화과정이 진행되면서 콘크리트 내의 공극구조가 밀실해지므로 그에 따른 이온 투과저항성도 동시에 증가하기 때문이다. 초기 재령 28일에서는 OPC의 총 통과전하량이 2755 Columbs, Ternary는 2922 Columbs, Loess는 3432 Columbs의 순으로 나타났고, 재령 90일에서도 Loess의 경우에는 1345 Columbs로 다른 배합에 비해서 상대적으로 높게 나타났다. ASTM C 1202에서 제시된 총 전하량에 따른 이온투과저항성에서 살펴보면 재령 90일에서 Loess는 보통, OPC와 Ternary는 낮음으로 나타나 이온투과저항성에서 대부분 우수한 것을 알 수 있다. 촉진 염소이온 침투시험의 경우 총 통과전하량 값을 가지고 이온투과저항성의 정도의 차이만을 확인 할 수 있을 뿐 정량적인 차이를 판단하는데는 무리가 있다. 이는 촉진 염소이온 침투시험의 경우 60 V의 높은 직류전압을 양단에 걸어줌으로써 Joule의 효과에 의해 열이 발생하는데, 이때는 콘크리트의 공극구조에 따른 이온의 이동뿐만 아니라 전기를 걸어줌으로써 콘크리트 시편 내의 이온이 이동하게 되는 현상이 발생하게 되어 콘크리트 내의 수화도나 수화생성물에 따른 영향도 무시할 수 없다. 그러므로 본 실험에서 제시된 결과는 염소이온 침투저항성에 대한 정량적인 판단보다는 정성적으로 판단하는 것이 더 적합하다고 할 수 있다.



<그림 3.32> Loess 콘크리트의 동결융해 저항성

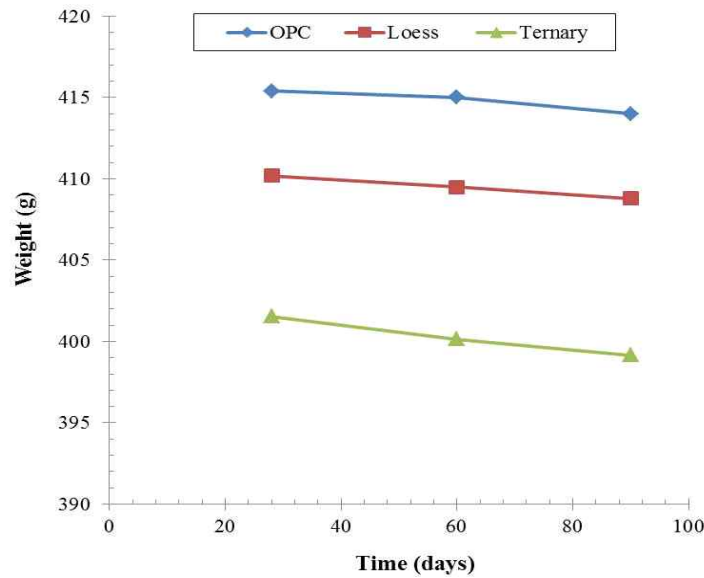
동결융해 저항성은 평가하기 위하여 ASTM C 666에 준하여 실험을 실시하였고, 매 50 사이클마다 상대동탄성계수를 측정하고 이를 바탕으로 내구성 지수를 산정하였다. 그림 3.32에서는 300 사이클 동안의 상대동탄성계수와 내구성지수의 변화를 나타내었다.

전반적으로 배합에 관계없이 사이클이 증가할수록 상대동탄성계수가 95.6-96.5%에서 67-80.6%로 저하되어 확인 할 수 있다. 초기 50사이클에서는 OPC가 가장 적은 저하를 보였고, Loess가 가장 많은 저하를 보였지만 그 차이는 매우 작은 값이므로 상대동탄성계수의 저하도는 거의 동일하다고 볼 수 있다. 그에 반해 300 사이클이 완료된 후의 상대동탄성계수에서 Ternary의 경우 80.6%로 가장 적게 저하되고, Loess가 67%정도로 가장 많이 저하되는 것을 알 수 있었다. 이는 고로슬래그가 수화진행속도가 다른 배합에 비해 느리게 나타나는 잠재수경성에 기인한 것으로 수화도가 진행될수록 콘크리트 내부의 조직의 치밀해져 동결융해 저항성에서 더 좋은 효과를 발휘하는 것으로 보인다.



<그림 3.33> Loess 콘크리트의 황산염 침식저항성 (길이변화)

그림 3.33과 3.34에서는 황산염 침식 저항성에 대한 각 배합에 대해서 평가를 하였다. 측정은 길이와 중량변화를 측정하였으며, 5% Na_2SO_4 용액에 침지기간 각 28, 60, 90일에 측정을 실시하였다. 우선 Ternary와 Loess의 경우 단위중량이 작다는 것을 OPC와 비교하였을 때 알 수 있었다. 측정기간동안의 미세한 양의 중량감소나 길이변화가 발생하기 하였지만, 전체적으로는 그 양이 매우 작아 무시할 수 있을 정도이다. 하지만 Ternary 나 Loess의 경우 Al_2O_3 의 성분이 OPC에 비해 많아, 콘크리트 팽창성을 유도할 수 있는 에트링가이트의 생성에 유리하므로 이는 Na_2SO_4 용액을 사용한 황산염 침식 저항성에는 취약하다고 판단된다. 하지만 황산염침식의 경우 Na_2SO_4 이외의 다른 용매인 MgSO_4 의 경우에는 콘크리트의 팽창성 보다는 콘크리트 내의 수화생성물을 붕괴시키기 때문에 좀더 정확한 황산염 침식저항성을 판단하기 위해서는 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 여겨진다.



<그림 3.34> Loess 콘크리트의 황산염 침식저항성 (중량변화)

(3) Loess 콘크리트의 경제성 및 표준화

Loess 콘크리트의 현장 적용에 있어서 건설재료로서의 효율성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 Loess 중금속이온 침출저감제와 기존의 연구에서 시멘트 6가크롬 저감제로 제시된 황산염계 재료에 대한 경제성 및 적용성 평가를 실시하였다.

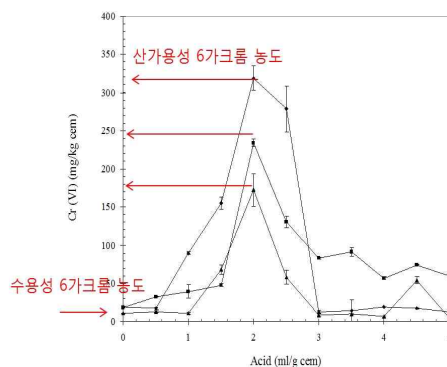
제시된 표 3.9에서 알 수 있듯이, 황산염계의 6가크롬 저감제의 시멘트 제조과정에서 직접 혼입하여 클링커 내에서의 6가크롬을 저감시키는 것으로 현재까지 황산염계 저감제를 적용한 콘크리트에 대한 기초 물성실험을 제시되어 있지 않는 실정이다. 경제적인 측면에서도 황산염계 저감제 (Tin sulfate, Ferrous sulfate)는 사용되는 양이 극히 적은 양이 사용되지만 일반 시멘트 대비 대략 8-15배 정도의 많은 비용이 드는 것을 알 수 있었다. 황산염계 저감제의 경우 황산염의 용해도가 높기 때문에 수분에 노출될 경우 황산염계에 고정화되어 있던 6가크롬이 해리 될 수 있는 단점이 있다. 그에 비해 본 연구에서 제시한 Loess의 경우 시멘트 대체재로서 작업의 용이성을 확보된 반면, 일정량 이상의 사용하였을 경우 콘크리트 물성 저하되는 것을 본 연구에서 확인 할 수 있었다. 경제성에서는 시멘트 가격 대비 1.5배정도 경제적인 측면에서는 다른 황산염계 저감제에 비해서 월등히 저렴한 것을 알 수 있다.

[표 3.9] Sulfate계 6가크롬 저감제와의 Loess의 사양비교

저감제	적용범위	콘크리트 물성	경제성	사용한계점
Sulfate계 (Tin, ferrous)	시멘트클링커에 적용 (클링커 내의 6가크롬 저감)	N/A	대략 50,000원/kg (시멘트 대비 8-15배)	수분 노출 시 6가크롬 저감효과제거
Loess 저감제	시멘트대체제로 활용 (경화된 콘크리트 내의 6가크롬 및 침출저감)	강도 및 내구성 저하 (결합제 대비 20%이상 사용 시)	대략 10,000/25kg (시멘트 대비 1.5배이나 사용량 제한)	콘크리트 물성 저하

본 연구를 바탕으로 시멘트 경화체 및 시멘트 경화체에서 침출된 산가용성 6가크롬 함유량 측정법에 대한 국내표준을 제시하였다.

기존 시멘트의 6가크롬의 함유량 측정법의 경우 국내외적으로 수용성 6가크롬의 함유량만을 측정하는 방법만을 제시하고 있는데, 정확한 시멘트 내에 존재하는 6가크롬의 양을 산정하기 위해서는 총 6가크롬 함유량을 측정해야 하기에 그림 3.35에서 보는 바와 같이 시멘트 중의 산가용성 6가크롬 농도 측정법에 대한 국내표준을 제시하였다.



시멘트 경화체의 수용성 및 산-가용성 6가 크롬 함유량 측정법 Determination of chromium(VI) in Hardened Cement Paste - Acid soluble & Water soluble 주의 - 총크롬산입량을 다룰 시 발달성 물질이므로 주의해야 한다. 1. 측정 범위 이 규격은 시멘트 경화체에 함유되어 있는 6가 크롬(Cr(VI))의 함유량을 측정하는 방법을 규정한다. 시멘트를 재료로 한 시료에 산가용성 또는 수용성 6가 크롬(Cr(VI))의 추출 및 측정 방법을 규정한다. 2. 인용 규격 다음에 나타내는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정 일부를 구성한다. 이들 인용 규격 중에서 발효 연도를 부기하고 있는 것은 기체 연도의 편만이 이 규격의 규정을 구성하는 것으로 그 후의 개정판 추측에는 적용하지 않는다. 발효 연도를 부기하지 않은 인용 규격은 그 최신판(초판)을 포함한다.를 적용한다. KS M 8001 시약 통칙 KS M ISO 3696 분석 실험용 물-규격 및 시험 방법 KS M 7602 기중중량(화학 분석용) KS M ISO 6353-2 화학 분석용 시약 - 제2부-규격-제1집 3. 원리 시멘트를 비롯한 경화체 내의 6가 크롬의 농도는 분광광도법을 이용하여 측정한다. 분광광도법은 일반적으로 광원으로 나오는 빛을 단색화장치, 다색화장치 또는 필터에 의하여 좁은 파장범위의 빛만을 산출하여 액층을 통과시킨 다음 광전측량으로 흡광도를 측정하여 목적 성분의 농도를 결정하는 방법이다. 강도 I_0 되는 단색광속이 농도 C, 길이 l 되는 용액층을 통과하면 이 용액에 빛이 흡수되어 입사광의 강도가 감소한다. 통과한 빛의 강도 I와 I_0 사이의 관계는 Lambert-Beer의 법칙에 의하여 관계가 다음과 같이 성립한다. $T = \frac{I}{I_0} \quad (I_0 = I \times 10^{-10})$ $A = -\log T = \log \frac{I_0}{I}$ Lambert-Beer의 법칙: $\log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \epsilon \times l \times C$ 여기에서, I_0 : 입사광의 강도 I : 투과광의 강도 ϵ : 흡광계수 l : 빛의 투과거리 C : 농도
--

<그림 3.35> 시멘트 중의 산가용성 6가크롬 농도 측정을 위한 메커니즘 및 국내표준 제정을 위한 제출문



시멘트 경화체의 수용성 및 산가용성 6가 크롬 침출 측정법 Determination of Chromium(VI) leaching out of hardened cement paste - Acid soluble & Water soluble 주의 6가 크롬 추출 시 용기 입자와 같은 산화 물질이나 특히 이가철(Fe^{2+})과 같이 6가 크롬을 환원시킬 수 있는 물질들을 시료 재와 과정 중에 주의해야 한다. 1. 적용범위 수거 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 침출되는 6가 크롬을 재해 위해 분광광도계로 측정한다. 2. 방법론적 다음에 나타내는 구체적인 이 규격에 입도범위로서 이 규격의 규정 범위를 구성한다. 이들 입도 규격 중에서 필요 연도를 부가하고 있는 것은 거래 연도의 편차가 이 규격의 규정을 구성하는 것으로, 그 등의 개정된 조항에는 적용하지 않는다. 필요 연도를 부가하지 않은 입도 규격은 그 최신판(주요)을 적용한다. (주) 적용한다. KS L 2317, 부속속성을 고려하기 KS M 2002, 2006, 분기입도용 물 - 규격 및 시험 방법 KS M 1206, 연산 3. 분해 용량광도 분석법은 좋은 해상도 범위의 빛을 비추어 통과시켜 흡광도를 측정하여 적외선 분광의 농도를 측정하는 방법이다. 강도 4의 입사량이 측정되고자 하는 용액용을 용액 하연 빛이 용액에 통과하여 강도 4의 빛을 가지는 용액용을 통해 빛이 통과하여 통과한 입사량의 투사량의 강도를 이용하여 $\log \frac{I_0}{I}$ - 4인 흡광도를 도출할 수 있다. 추출한 시료나 일정 용액은 황산(1:1)을 첨가함으로써 산성화 상태에서 6가 크롬은 디테닐카바라이드를 산화시켜 디테닐카바라이드 산으로 만들고 자신은 황닐로로써 황화물을 형성하여 540 nm 파장에서 흡광도를 측정할 수 있다. 4. 기구 4.1 측정기구 4.1.1 분광광도계 500 nm 파장에 측정 가능한 것 4.1.2 용해용액 KS L 2317에 명시된 재료 4의 50-1,000 ml, 동급 0 이상인 것을 사용한다. 4.1.3 시약(Reagents) 10 ml 용량이고 적정온도(20°C) 또는 불활성 재료 4.1.4 시약(Reagents) 100 ml 용량이고 적정온도(20°C) 또는 불활성 재료 4.2 시료 준비 4.2.1 시료용 액체(50×50×50 mm) 물-시멘트 비 0.4 4.2.2 수조 온도 20°C 이하 4.2.3 디테닐카바라이드($C_{12}H_{10}N_4O_4$) 용액 아래는 50 ml에 1.5-디테닐카바라이드 200 mg을 용해시킨다. 4.2.4 아래는 시약용

<그림 3.36> 콘크리트에서 6가크롬의 침출능 측정을 위한 개념도 및 국내표준제정을 위한 제출문

앞에서 언급했듯이 시멘트 자체 내 6가크롬 함유량에 대해서는 규정되어진바 있으나 시멘트 경화체 또는 콘크리트에 대한 6가크롬 측정법에 대해서는 정립되어 있지 않는 상태이다. 특히 수서환경에 노출된 콘크리트는 주로 pH가 낮은 강산성이나 pH가 높은 강알칼리성인 물과 주로 접촉하게 되는데, 이때 용매의 pH 값에 따른 콘크리트 또는 시멘트 경화체로부터 침출되는 6가크롬의 양은 다양하다고 할 수 있다. 이에 대한 정확한 6가크롬의 침출량을 산정하기 위하여 시멘트 경화체의 산가용성 6가크롬 침출 측정법에 대한 국내 표준도 제시하였으며, 그림 3.36과 같이 나타내었다.

3.3.5 중금속이온 침출 저감기법의 적용성

본 차년도에서는 1, 2차년도의 중금속이온 침출 저감에 관한 선행연구를 바탕으로 한, 건설재료로서의 중금속침출 저감제로 Loess를 이용한 현장적용, 콘크리트 물성 평가 및 경제성/표준화 작업을 실시하였으며, 이에 대한 연구결과는 다음과 같이 나타내었다.

(1) Loess 콘크리트의 중금속이온 침출 저감 효과를 평가하기 위하여 현장적용성 평가를 수서환경/해양환경으로 나누어 시험체를 제작 실시하였다. 본 연구결과에서는 살펴보면, OPC의 경우 다른 배합(Loess, Ternary)에 비해서 침출량이 월등히 많을 것을 알 수 있다. 이는 Loess 나 Ternary에 혼입한 중금속침출 저감제인 Loess에 의한 고정화 효과에 기인한 것으로 판단되며, 수서환경/해양환경에서 우수한 성능을 보였다. 하지만, 해양환경에서의 Ternary의 경우 GGBS가 염소이온 침투에 따른 고정화 참여에 의해 Loess에

비해서 침출저감 및 고정화 효과가 반감되는 것을 확인 하였다. 중금속이온의 임계 깊이에서는 배합에 관계없이 침지기간이 90일 경우 6-8 mm로 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, 이를 통해서 6가크롬의 경우 기존의 열화인자와 다르게 콘크리트 내의 공극구조의 밀실화에 따른 효과는 기대하기 어렵다고 판단되어, 미세분말을 이용한 중금속이온 침출 저감기법의 적용에는 비효율적일 것으로 판단된다.

(2) Loess 콘크리트의 물성 평가는 구조적 평가와 내구성 평가로 나누어 실시하였으며, 구조적 평가에서는 장기 압축강도에 대해서 측정하였다. 재령 270일에서 압축강도에서는 OPC는 53 MPa로 GGBS와 Loess를 혼입한 Ternary가 54 MPa로 이었고, 가장 낮은 강도로 Loess 콘크리트는 47 MPa로 나타났지만 그 차이가 크지 않아 Loess가 콘크리트 구조적 재료로서의 성능은 만족한다고 판단된다. 그리고 내구성 평가에서 살펴보면, 염소이온 침투 저항성에서는 Loess가 OPC나 Ternary에 비해서 침투저항성이 조금 더 낮은 것으로 나타났지만, 본 연구에서 실시한 촉진 염소이온 침투시험의 경우 정량적인 양이 아니기 때문에 염해에 저항성에서도 만족하는 결과로 볼 수 있다. 동결융해 저항성에서는 Loess 만을 첨가한 콘크리트가 가장 낮은 상대통탄성계수의 저하 율을 보였지만 내구성 지수를 살펴보면 모든 배합에서 일정하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 황산염 침식에서는 Loess의 높은 Al_2O_3 의 구성에 의해 OPC 보다 황산염 침식에 취약할 것으로 판단되지만, 현재까지 진행된 본 연구에서 성능 저하의 폭이 크지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) Loess 콘크리트의 현장 적용에 있어서 건설재료로서의 효율성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 Loess 중금속이온 침출저감제와 기존의 연구에서 시멘트 6가크롬 저감제로 제시된 황산염계 재료에 대한 경제성 및 적용성 평가를 실시하였을 때, 기존의 연구에서 중금속이온 침출저감제로 사용된 황산염계 저감제의 경우 무과 반응하였을 때, 6가크롬이 해리되는 단점이 있고 연구가 계속적으로 진행 중에 있다. 그에 본 연구과제에서 사용된 Loess의 경우에는 시멘트 대체재로 사용할 수 있어서 작업의 용이성이 유리하며, 경제적인 측면에서도 기존의 연구재료에 비해 월등히 유리한 것을 확인할 수 있었다.

3.4 콘크리트의 알칼리이온 침출

3.4.1 개요

콘크리트 구조물의 유수환경과의 접촉은 해수, 하천 및 우수 등에 의해 이루어 지며 시멘트의 수화작용을 원활히 하여 강도증진, 내구성 증대와 같은 긍정적인 영향을 미친다. 그러나 이와 같은 수서환경에의 노출은 시멘트 수화물에 존재하는 여러유해성분, 예를 들면 다양한 중금속이온, 강알칼리이온의 침출로 인해 환경적인 악영향을 미치기도 한다. 뿐만 아니라 콘크리트의 알칼리이온 침출은 콘크리트의 표면에서의 화학적 평형성이 불안정하게 되어 미세구조상 다공성을 띠게 되어 구조물의 공학적 성능을 저하시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 대개 고알칼리도 상태에서는 수생환경에서 생물체의 피부, 아가미, 눈에 직접적인 물리적 손상을 일으킨다. 그러나 이와 같은 알칼리이온의 침출로 인한 콘크리트의 공학적 성능저하에 관해서는 기존에 많은 연구가 이루어져 왔으나 환경에 미치는 영향, 알칼리이온의 침출한계에 대한 연구는 실제로 전무한 실정이다.

본 연구에서 진행되었던 제1, 2차년도 연구개발에서는 알칼리이온의 침출은 용매의 pH농도에 의해 결정되며 각 pH에 따라 일차적으로 철이온 및 칼슘이온 (pH 9.0-9.5), 나트륨 및 칼륨이온 (pH 10.8-11.2) 그리고 마지막으로 수산화이온 (pH 12.5이상)이 침출됨을 확인하였다. 또한 알칼리이온의 침출은 콘크리트의 결합재에 따라 상이한데, 예를 들면 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 경우 침출속도나 침출량은 보통포틀랜드 시멘트만을 사용한 콘크리트에 비해 낮게 나타났으나 침출로 인해 콘크리트 내의 수산화이온 농도분포에 있어서는 콘크리트 피복의 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 특히 알칼리이온의 침출은 용매의 pH 12이상일 때 급격히 증가하는데 이는 알칼리이온의 주체인 수산화이온의 침출이 시작됨으로 인해 발생함을 확인하였다. 또한 알칼리이온의 침출이 수서환경의 생태학적 영향에 대해 표본생물중의 하나인 물벼룩에 대한 환경영향성 평가를 통해 알칼리이온의 침출이 치명적임을 확인하였다. 더불어 전기화학적 기법이 기존의 내구성 증진 내지는 보수보강의 의미 외에도 알칼리이온의 침출억제를 가능하게 하는 순기능의 역할이 있음을 확인하였다. 특히 이와 같은 전기화학적 기법은 전류량이 500-1000 mA/m² 이상 일 경우에 확연하게 드러나며 특히 4주 이상 적용할 경우에는 전기화학적 기법이 종료된 이후에도 화학적 상평형상태가 유지되어 알칼리이온의 추가적인 침출이 방지됨을 확인하였다.

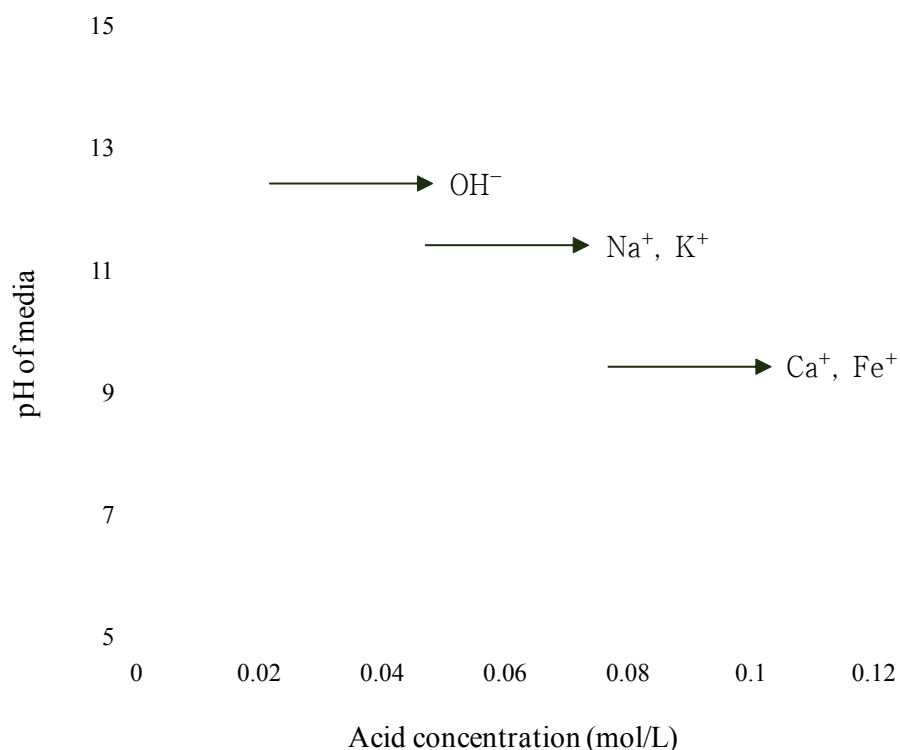
제3차년도 연구에서는 전년도 연구개발에서 성취한 연구개발을 바탕으로 하여 콘크리트의 알칼리이온 침출을 억제할 수 있는 전기화학적 기법을 실제 수서환경에 적용할 경우 실용성, 적합성의 검토에 초점을 맞추었다. 동시에 중금속이온 침출억제를 위한 기법으로 개발한 Loess 콘크리트와의 적합성 여부를 판정키 위한 실험을 실시하였다. 이를 위해 국

내 하수처리장 한곳을 지정하여 전기화학적 기법을 설치한 콘크리트 시편을 장기침지하여 이에 따른 알칼리이온의 침출억제 효과를 정량적으로 측정하였다. 특히 콘크리트 표면에서 부터 매 2.0 mm 간격으로 최대 14 mm까지의 알칼리이온의 분포를 정량화 하여 각 깊이 별 침출능을 검증하였으며 한계 침출깊이를 정의하였다. 동시에 유수에 따른 전기화학적 기법의 적용성 검토를 위해 축소된 수로모형실험을 실시하여 자연환경에 노출될 경우의 pH의 변화 및 알칼리이온의 침출저감효과를 확인하였다. 이와 같은 제반의 연구성과를 통해 기존에 알칼리이온의 침출에 관한 국내외 표준이 전무함을 확인하여 표준지정을 위한 실험법을 개발하였다.

3.4.2 선행연구 및 연구방향

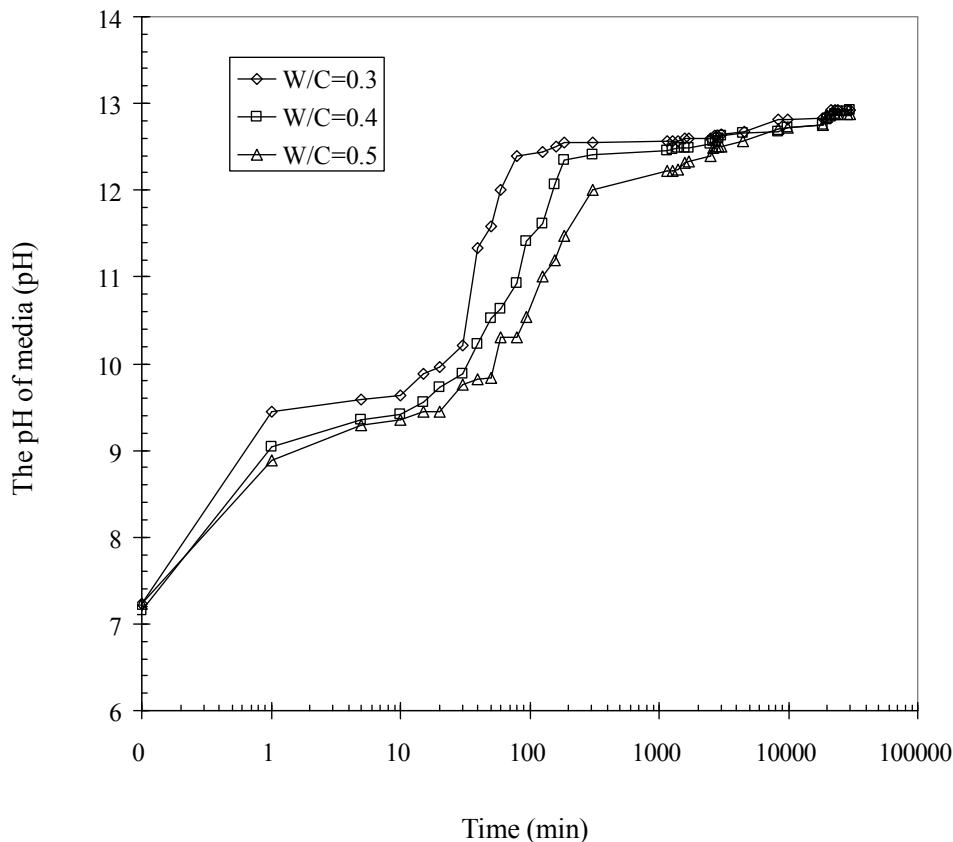
선행연구로서 1차년도 연구에서는 콘크리트의 침출속도 및 침출능에 대한 평가를 위해 수조 형상의 시멘트 경화체를 제작하여 접촉한 증류수의 pH 변화를 측정하여 알칼리이온 침출량, 침출속도, 침출능에 관한 특성을 규명하였다.

그림 3.37에 나타나듯이 알칼리이온의 침출은 용매의 pH농도에 의해 결정되며 각 pH에 따라 일차적으로 철이온 및 칼슘이온 (pH 9.0-9.5), 나트륨 및 칼륨이온 (pH 10.8-11.2) 그리고 마지막으로 수산화이온 (pH 12.5이상)이 침출됨을 확인하였다.



<그림 3.37> 용매 pH에 따른 콘크리트 중의 알칼리이온의 침출 특성

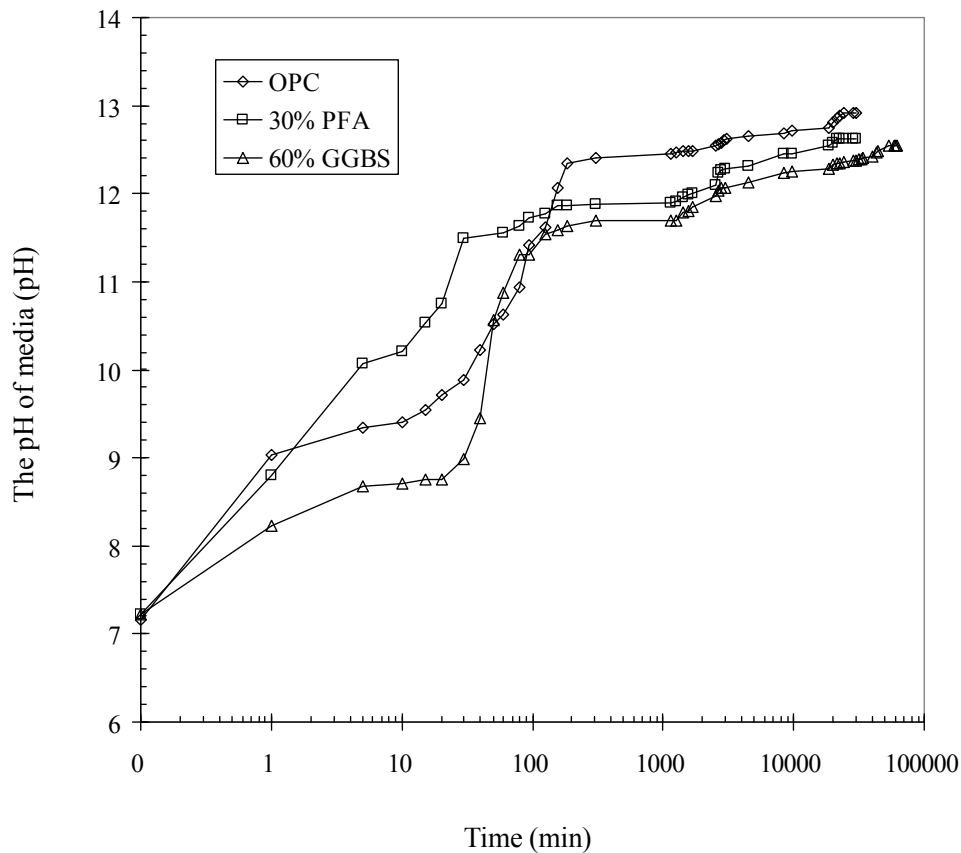
물-시멘트 비에 따른 시멘트 경화체 수조 내 용액의 pH 변화를 그림 3.38에 나타내었다. 모니터링 하는 시간은 로그눈금간격으로 나타내었다. 물-시멘트 비가 각각 0.3, 0.4, 0.5인 경우 공통적으로 용매의 pH에 따라 계단식으로 증가하는 양상을 나타냈다. 초기에 급격하게 pH 9 정도까지 급격하게 증가된 후 완만하게 증가하다가 다시 급격하게 증가하여 pH 12 정도에 이르는 것으로 나타났다. 그러나 물-시멘트 비가 커질수록 pH값 상승이 지연되다가 최고값은 약 pH 12.8까지 증가함을 확인하였다.



<그림 3.38> 물-시멘트 비에 따른 시멘트 경화체 내 용액의 pH 변화

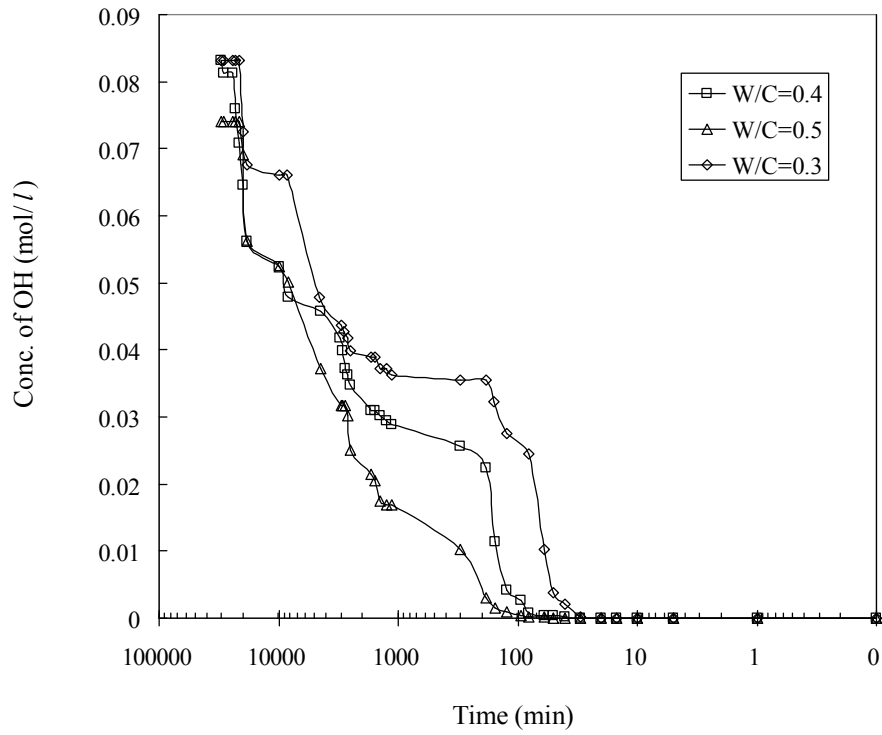
포졸란 물질로 치환한 경우에는 그림 3.39에서 보는 바와 같이 OPC를 사용한 경우에 비해 최종 수렴하는 구간에서의 pH가 전반적으로 낮은 수준을 유지했다. 이는 단위 시멘트 사용량의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 또한 포졸란 물질을 치환하여 사용한 경우에도 앞서 설명한 것과 같은 특정 pH 환경에서 급격하게 증가하다 완만지기를 반복하는 계단식 상승 양상을 보였다. 그러나 30% PFA 경우에는 pH가 약 11.4에 도달 할 때까지 선형적으로 상승한 후 상승폭이 완화되어 약 pH 12.1에서 수렴하였다. 60% GGBS 시험체의 경우에는 약 pH 8.7까지 1차적으로 증가한 후 단기간 동안에 급격하게 pH 12.2까지 증가한 후 상승폭이 완화되었다. 이와 같이 일정 pH에서 시간경과에도 불구하고 pH의 상승이 정체되는 것은 시멘트 경화체의 종류에 따른 수화물이 pH의 변화에 대한 완충작용

을 하는것으로 이는 결합재의 종류 즉, 수화물의 종류에 따른 차이로 판단된다.

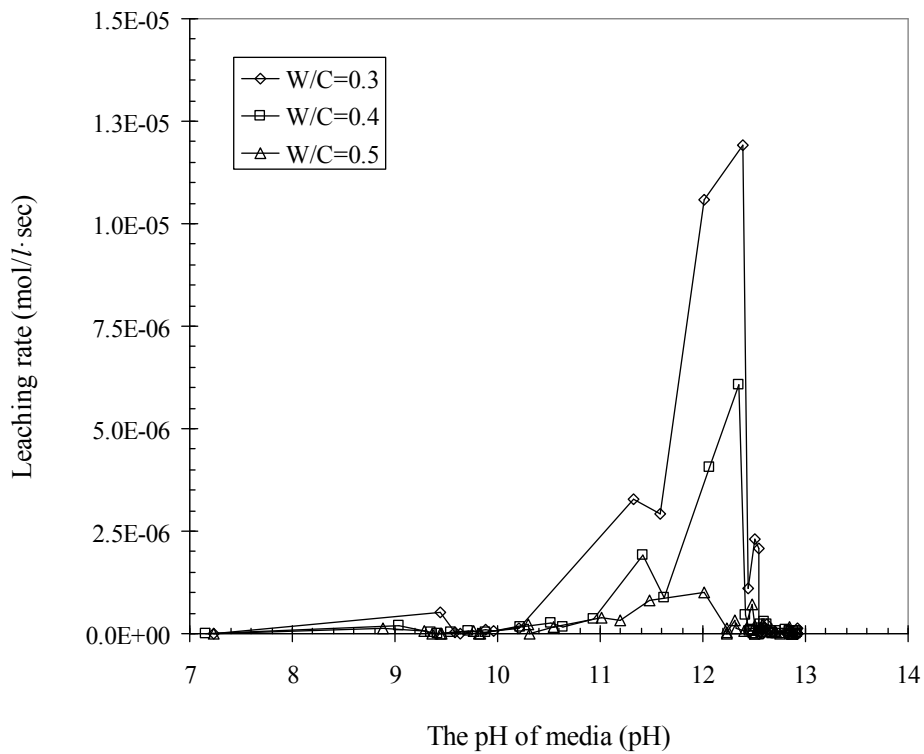


<그림 3.39> 결합재에 따른 시멘트 경화체 내 용액의 pH 변화

pH 모니터링 결과를 이용하여 시간경과에 따른 침출된 수산화이온의 농도 변화를 그림 3.40에 나타내었다. 침출되는 수산화이온의 농도는 0.083 mol/L로 물-시멘트 비가 0.4인 경우 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 800 mL의 물에 약 1.13 g의 수산화이온이 함유되어 있는 것이다. 물-시멘트 비가 다른 경우에 최종 농도는 다소 차이가 있으나 최종 농도에 도달하는데 걸린 시간은 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 접촉된 용액의 pH에 영향을 미치는 침출 이온량은 차이가 있을지라도 이러한 이온이 이동하는데 걸리는 시간은 큰 차이가 없기 때문이라 보여진다. 또한 각각의 pH에서 수산화이온의 침출속도를 pH모니터링 결과를 이용하여 그림 3.41에 나타내었다. 물-시멘트 비에 대해 약 pH 12 정도에서 유사하게 최대 침출속도를 갖는 것으로 나타난다. 또한 물-시멘트 비가 낮은 경우에 그 속도 또한 높게 나타났다. 물-시멘트 비가 0.3인 경우에 0.4인 경우와 비교하여 침출속도가 약 2배 정도 빠른 것으로 측정되었다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 단위시멘트량의 상대적인 증가로 물-시멘트 비가 낮은 경우에 침출속도가 높아졌다고 판단된다. 또한 pH 12에서 이온화되어 침출에 큰 영향을 미치는 수산화칼슘양의 증가와도 연관 지을 수 있다.



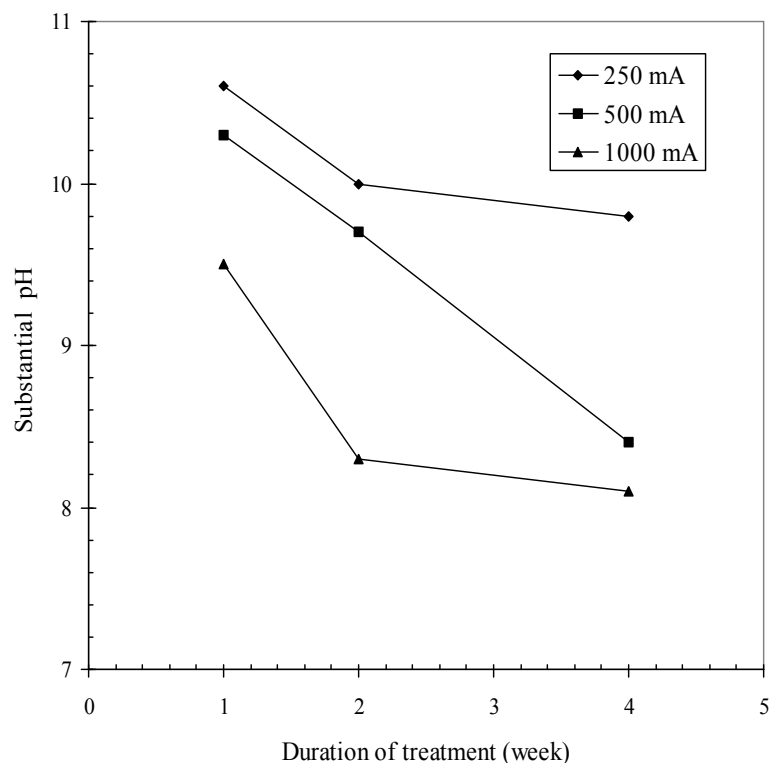
<그림 3.40> 물-시멘트 비에 따른 시멘트 pH 침출능



<그림 3.41> 물-시멘트 비에 따른 시멘트 pH 침출속도

2차년도에서는 콘크리트 중의 알칼리이온 침출 저감을 위하여 전류량, 전위 가압기간을 변수로 설정하여 최적의 전하상태를 정의하여 전기화학적 기법개발에 관한 연구를 수행하였다.

전기화학적 기법을 이용하여 콘크리트 표면에 전기이중층을 형성함으로써 콘크리트를 통한 이온의 이동을 방지함으로써 알칼리이온의 침출 및 침투를 제어하는 방식이다. 콘크리트 양생 후 직류전류를 콘크리트 내부의 철근과 표면의 전도층간에 통전하였다. 전류는 250, 500, 1000 mA/m²를 전기회로 상의 저항을 조절함으로써 공급하였으며 기본전압은 콘크리트 내의 철근의 보호를 위해 초기에는 5.0 V로 하여 최대 20.0 V이하로만 하였다. 통전기간, 전류량 모두 알칼리화 된 전해질용액의 환원에 영향을 미치는데 그림 3.42에서 보는 바와 같이 전류량이 작은 250 mA/m²의 경우, 통전기간의 증가에 따라 최종 pH 농도가 감소하기는 하나 실제로 2주 이상의 통전기간부터는 감소폭이 상당히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 다만 500 mA/m²인 경우에는 통전기간에 따라 최종 pH 농도가 급격히 감소하였다. 그러나 1000 mA/m²와 같이 높은 전류량에 대해서도 2주이상의 통전기간에서는 pH농도의 감소폭이 감소하였다. 이는 전해질용액 상에 존재하는 알칼리이온들이 이미 충분히 침전되었으므로 추가적인 pH감소가 없기 때문으로 판단된다.

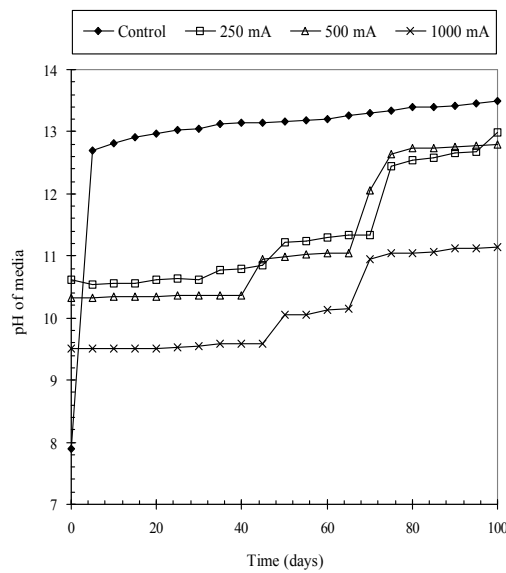


<그림 3.42> 통전기간 및 전류량에 따른 전해질용액의 최종 pH 농도

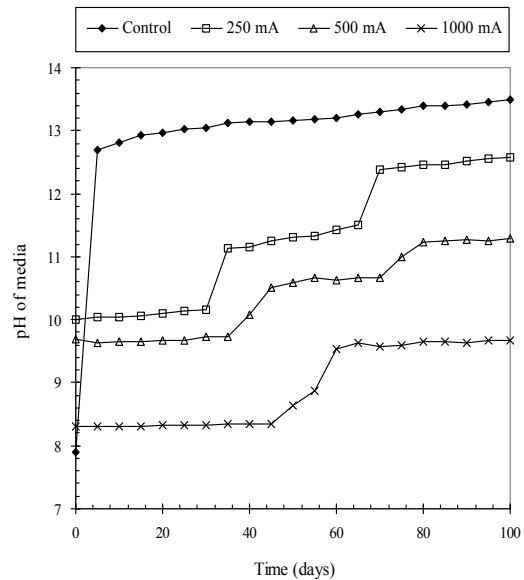
그림 3.43은 전기화학적 처리기법을 적용 후 100일간 알칼리이온 침출량을 조사하기 위해 전해질 용액을 제거한 후 증류수를 투입하여 pH농도의 변화추이를 모니터링하였다.

또한 전기화학적 처리기법의 효용성을 정량화하기 위해 기본 콘크리트 (Control) 시편의 알칼리이온의 침출량 또한 비교하여 모니터링 하였다. Control은 초기 5일 이내에 알칼리이온의 침출에 의해 pH 농도가 12.5까지 증가하였으며 이후 서서히 증가하여 최종 100일에는 약 13.5까지 나타났다. 그러나 전기화학적 처리기법을 한 경우에는 초기에는 전기화학적 기법에 의해 감소된 pH농도를 유지하다가 계단형의 모양으로 서서히 pH 농도가 증가함을 확인하였다.

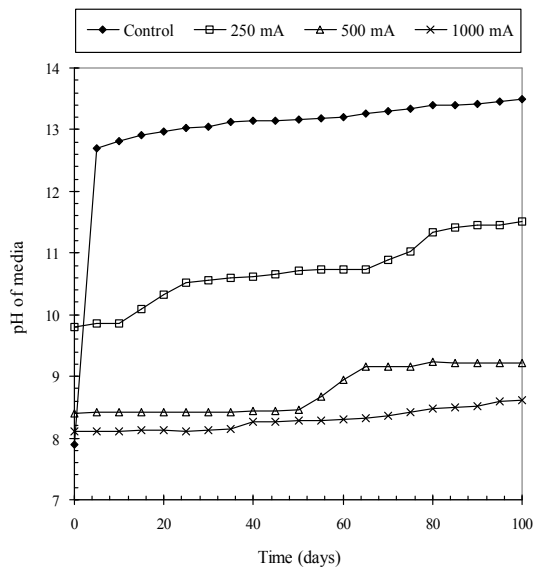
(A) 1 week



(B) 2 weeks



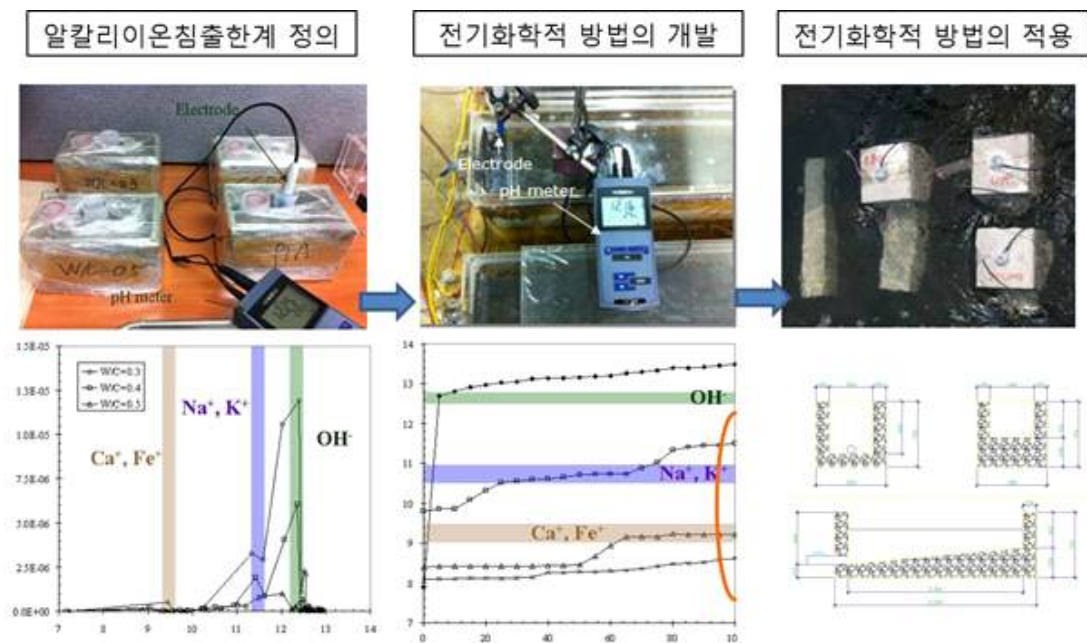
(C) 4 weeks



<그림 3.43> 전기화학적 처리기법 이후의 알칼리이온 침출에 따른 pH 농도변화

또한 알칼리이온의 침출은 콘크리트의 결합재에 따라 상이한데, 예를 들면 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 경우 침출속도나 침출량은 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비해 낮게 나타났으나 침출로 인해 콘크리트 내의 수산화이온 농도분포에 있어서는 콘크리트 피복의 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 특히 알칼리이온의 침출은 용매의 pH 12이상일 때 급격히 증가하는데 이는 알칼리이온의 주체인 수산화이온의 침출이 시작됨으로 인해 발생함을 확인하였다.

콘크리트의 알칼리이온 침출은 상기 언급한 바와 같이 콘크리트의 구조적, 공학적 성능의 저하 뿐만 아니라 환경공학적으로도 매우 지대한 영향을 미친다. 그러나 알칼리이온의 침출의 양, 침출속도 등과 같은 측정방법이 기존에 존재하지 않으므로 본 연구에서는 침출에 관한 정량적 측정을 위한 시험법 개발에서부터 연구는 단계적으로 이루어져 왔다. 이와 같은 연구의 방향은 그림 3.44에서 보는 바와 같이 (1) 콘크리트의 알칼리이온 침출능의 정의, (2) 침출저감을 위한 전기화학적 기법 개발 그리고 (3) 전기화학적 방법의 현장적용성 검토의 단계를 통해 이루어진다.



<그림 3.44> 선행연구 및 3차년도 연구방향 개요 (알칼리이온 침출)

특히 알칼리이온의 침출은 노출된 수서환경의 알칼리도에 따라 금속이온의 침출이 먼저 이루어지고 이후 수산화이온의 침출이 수반됨을 확인하였으며 본 연구에서 개발한 밀폐형, 개방형 시험법을 통해 콘크리트의 최대 알칼리이온 침출정도 및 자연정화능력 또한 검증하였다. 그러나 개방형 시험을 통해 콘크리트의 알칼리이온 침출은 초기 자연정화 작용에 의해 어느 정도 수서환경의 복원이 가능하나 완전히 중화된 수서환경을 재생할 수

없음을 확인하였다.

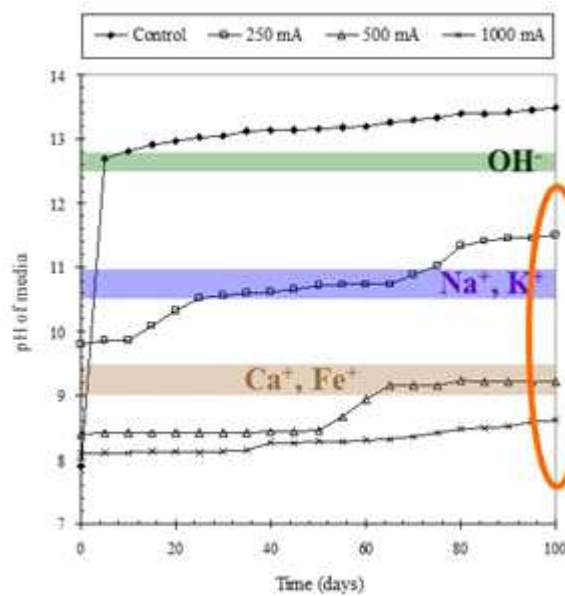
이에 따라 초기 콘크리트 표면에서 알칼리이온의 침출을 방지 내지는 저감시키고자 전기화학적 기법을 적용하였다. 화학적 혼화재 또는 기타 화학적 처리기법을 통해 콘크리트의 알칼리도를 저감시킬 수 있으나 이럴 경우 콘크리트의 화학적 성능저하로 인해 철근부식 등과 같은 내구성능에 악영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 제외하였다. 전기화학적 기법은 콘크리트 표면부의 화학적 균형을 재조정하여 표면부의 알칼리이온의 침전(Precipitation)을 유도함으로써 콘크리트 표면부와 수서환경 간에 전기이중층을 형성하게 된다. 이에 따라 콘크리트 내부에 존재하는 여러 형태의 이온의 침출, 침입이 방지됨으로써 콘크리트의 화학적 상태를 유지할 수 있도록 한다.

전기화학적 기법의 실험실에서의 성공을 실제 구조물에 적용가능한지의 여부를 판단하기 위해 실제 콘크리트의 수서환경 노출조건에서 실험 및 적용을 통해 검증하였다. 이와 같은 현장적용성은 콘크리트에서 침출된 알칼리이온의 측정을 통해 이루어 지는데 콘크리트 표면부의 알칼리도의 프로파일링 기법과 동시에 침출량을 비교, 검토하였다. 또한 결과물로서 현재 표준화된 시험기법의 부재로 열 사용자들의 불편을 해소하고자 정량화된 형태의 시험법을 국내외적으로 표준화하기 위한 시험법을 제안하였다.

3.4.3 콘크리트의 알칼리이온 침출 연구내용

(1) 알칼리이온 침출에 따른 pH 프로파일링

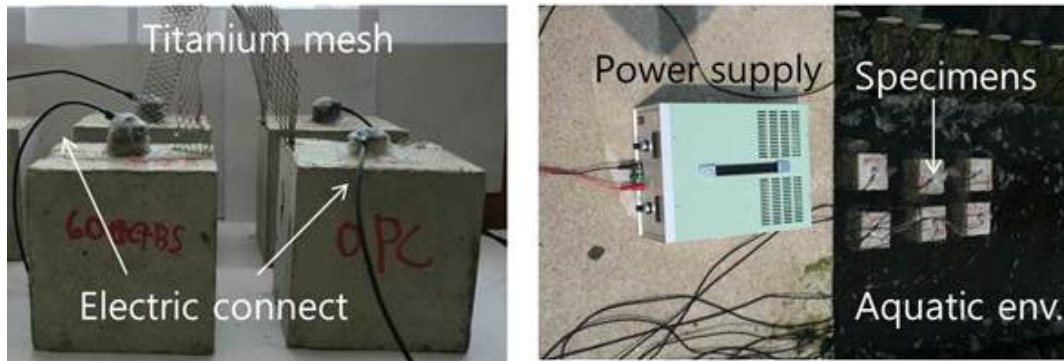
전기화학적 기법의 알칼리이온 침출억제를 현장적용 시 효과를 검토하기 위한 실험에서 콘크리트의 배합은 가장 기본적인 배합인 W/B 0.4, 결합재량 350 kg/m^3 , 잔골재를 40 %로 하였다. 결합재로는 보통포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland cement; OPC)외에 고로슬래그미분말 (Ground granulated blast furnace slag; GGBS)를 60% 혼입한 콘크리트 및 Loess 콘크리트의 적합성 검토를 위해 20%의 미분말화 한 Loess첨가제를 콘크리트 배합에 사용하여 3가지 종류의 배합을 실시하였다. 전기화학적 기법의 적용에 있어 전기적인 흐름을 원활히 하기 위해 콘크리트 시편 ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$) 중앙에 직경 20 mm의 철근을 배치하여 전기회로를 완성하였다. 전류량은 제2차년도 연구에서의 결과를 활용하여 500 mA/m^2 를 4주간 통전하여 콘크리트 표면부에서의 수화물 침전을 유도하였다. 그림 3.45에서 보는 바와 같이 전류량이 1000 mA/m^2 인 경우 통전이 종료된 이후에도 알칼리이온의 침출이 방지되나 통전기간이 4주 이상일 경우 500 mA/m^2 의 전류량으로 충분히 침전된 수화물의 분포를 유지할 수 있고 통전에 따른 부가적인 부작용, 예를 들면 철근의 부착강도 감소, 수소가스의 발생을 피하고자 낮은 전류량을 선택하였다.



<그림 3.45> 전기방식법의 전류량에 따른 알칼리이온 침출효과 (제2차년도)

콘크리트 시편은 그림 3.46에서 보는 바와 같이 제작 직후 양생을 거쳐 수서 노출환경인 하수처리장의 최종 처리기지에 침지한 후 4주간 통전을 실시하였다. 대개의 전기화학적 기법에서는 콘크리트 경화도에 따라 일정량의 전류를 확보하기 위해 Galvanostatic application을 실시하는 경우가 많으나 본 연구에서는 전기방식법의 주요 목적이 철근부식의 복원이나 방지가 아니라 콘크리트 표면부의 화학적 침전이므로 Potentiostatic application을 실시하였다. Potentiostatic의 경우 콘크리트 경화도에 따라 실제 통전 전류량이 초기에 적절량이 공급되나 콘크리트 경화도에 따라 실제 전달되는 전자의 수가 감소하게 된다. 이와 같은 불균형을 억제하기 위해 양생기간을 초기에 28일간 실시함으로써 Potentiostatic의 한계를 극복하였다.

통전 종료이후에는 전기이중층의 존재유무를 확인하기 위해 콘크리트 표면의 전위를 측정하여 0.0 mV이상일 경우에만 시험에 계속적 진행을 하였으며 그렇지 않은 경우에는 재통전을 실시하였다. 또한 통전기간에 발생할 수 있는 전기적 연결의 결함을 방지하고자 주기적으로 통전량 및 통전여부를 검토하였으며 문제가 발생한 경우에는 전기연결의 교체를 통해 재통전하여 시험을 진행하였다.



〈그림 3.46〉 알칼리이온 침출능 측정을 위한 시편제작 및 노출시험

본 연구에서는 콘크리트 시편을 수서환경 중 하수처리장 최종유수지로 선택하였다. 대개의 수서환경인 하천의 경우 본 실험을 통한 불필요한 알칼리침출이 발생할 수 있으며 하수처리장의 경우 그림 3.47에서와 같이 pH가 6.07-6.55정도의 약산성을 보임으로써 알칼리이온의 침출을 촉진할 수 있는 유리한 점을 가지고 있다. 실제로 하수처리장의 규모에 비해 본 연구에서 사용한 콘크리트 시편의 양이 적기 때문에 수서환경의 pH모니터링은 무의미할 수 있어 콘크리트 표면에서의 알칼리이온의 침출량을 측정하였다.



〈그림 3.47〉 알칼리이온 침출 시험을 위한 노출환경 검증 (pH: 약산성)

콘크리트 중의 알칼리이온 침출량은 콘크리트 표면에서 2.0 mm 간격으로 14.0 mm 까지 분말을 채취하여 각 깊이별 pH를 프로파일링하여 계산하였다. 초기 수서환경에서 콘크리트 시편을 채취한 뒤 표면수의 건조에 따른 알칼리이온의 왜곡현상을 방지하기 위해 분말채취는 수서환경에서 꺼낸 후 30분이내에 종료토록 하였다. 이후 그림 3.46에서 보는 바와 같이 채취된 분말은 증류수 45 ml에 대해 2.0 mg의 콘크리트 분말을 혼합하여 교반 과정을 거쳐 suspension화하였다. 교반은 10분간 전자기 stirrer를 통해 실시하였으며 이

후 30분간의 standing time을 두었다. 이후 필터링을 통해 suspension에서의 용액만을 채취한 후 pH meter를 통해 각 깊이별 pH 분포를 조사하여 프로파일화 하였다.



<그림 3.48> pH 프로파일링을 위한 표면분말 채취, Suspension 제조 및 pH 측정

(2) 인공수로실험을 통한 자연정화능력 평가

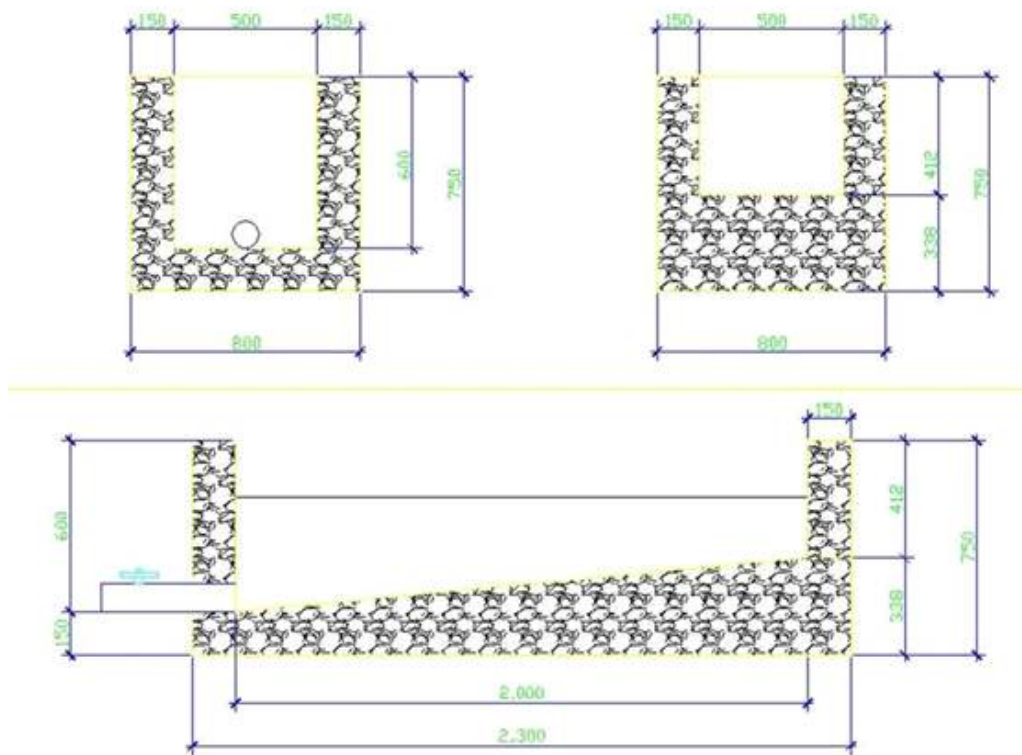
전기화학적 기법의 알칼리이온 침출억제효과와 더불어 실제 수서환경에서의 알칼리이온 침출에 따른 pH 증가 시 자연정화능력을 동시에 검토하기 위해 인공수로 폭로시험을 실시하였다. 인공수로 제작에 사용된 콘크리트 배합은 하수처리장에서 실시한 수서환경 폭로시험과 같은 배합으로 하였다. 결합재로는 OPC 외에 60% GGBS, 20% Loess 콘크리트를 제작하였다. 그림 3.49에서 보는 바와 같이 인공수로의 사양은 길이 2300 mm, 높이 750 mm, 폭 800 mm로 한 직육면체형으로 내부는 2000×412-600×600 mm의 경사형으로 이루어진다. 이와 같은 경사형 수로는 공급된 용수의 흐름을 특별한 기계적 장치 없이 유수를 유도함으로써 이때 발생하는 알칼리이온의 침출을 용이하게 하고자 함이다.

[표 3.10] 인공수로 실험의 사양

Type	Mix	Waterflow	Remark
I	Control	Control	N/A
II	GGBS	Control	Concrete mix
III	Loess	Control	Concrete mix
IV	Control	Control	Electrochemical treatment
V	Control	Stepwise	Extension of surface area

제작된 인공수로는 총 5종류로 OPC를 결합재로 한 기본사양 (Control) 외에 60% GGBS 및 20% Loess 콘크리트에 대해서는 전기화학적 기법을 적용하지 않고 알칼리이온의 침출량을 모니터링 하도록 하였다. 또한 알칼리이온의 침출을 극대화 하기 위해 하나의 인공수로에 대해서는 계단형으로 수로를 제작함으로써 콘크리트의 비표면적을 증가시켰으

며 동시에 콘크리트 표면에 Chipping작업을 통해 최대한의 이온침출을 유도하였다.



<그림 3.49> 인공수로를 통한 알칼리이온 침출시험을 위한 시편 모식도



<그림 3.50> 인공수로 제작과정 및 제작완성 후 모습

인공수로 모형실험체의 제작은 그림 3.50에서 보는 바와 같이 거푸집제작, 콘크리트 타설, 양생, 기기장치 설치의 과정으로 하였다. 본 연구에서는 콘크리트의 이온침출과 같은

재료적 관점에서 실시함으로 무근콘크리트로 하였다. 콘크리트 타설 후 7일 후 거푸집을 제거한 후 양생포로 덮고 기건양생 21일을 실시하였다. 다만, 전기화학적 처리기법을 실시한 시편의 경우 콘크리트 타설 시 표면에 이중타설 토록 하였다. 인공수로에서 물의 흐름을 원활히 하기 위해 50리터의 수통을 수로하단부에 설치하였고 집적된 유수는 다시 펌프를 통해 수로에 재공급하는 형태로 제작하여 추가적인 유수의 공급을 자제하였다. 다만 일련의 과정에서 발생하는 증발로 인한 유수의 감소는 추가적인 유수공급으로 보상토록 하였다.

(3) Loess 첨가제 사용에 따른 적합성 평가 및 전기화학적 방식에 의한 경제성분석

본 연구에서는 콘크리트의 3대 환경 유해원으로 중금속이온, 알칼리이온 및 CO₂ 가스를 저감하고자 하는 목표를 설정하고 있다. 이 중에서 중금속이온과 알칼리이온은 수서환경에서 침출하는 반면 CO₂ 배출은 시멘트 및 각종 건설재료 생산, 운송과정에서 발생함으로써 연원 자체가 다르다. 따라서 중금속이온과 알칼리이온은 동시에 침출될 수 있으므로 각각의 저감기법에 있어 상호간의 역효과 내지는 효능의 감소가 발생하는지 여부를 확인하기 위한 적합성 검토를 실시하였다. 중금속이온 침출 방지를 위해서 본 연구에서는 Loess 첨가제를 개발하였으며 이를 콘크리트 제작에 시멘트 대체제로 20% 치환하였다. 이와 같이 제작된 콘크리트에 전기화학적 기법을 도입하였을 경우 알칼리이온의 침출저감 효과를 확인함으로써 적합성 검토를 실시하였다.

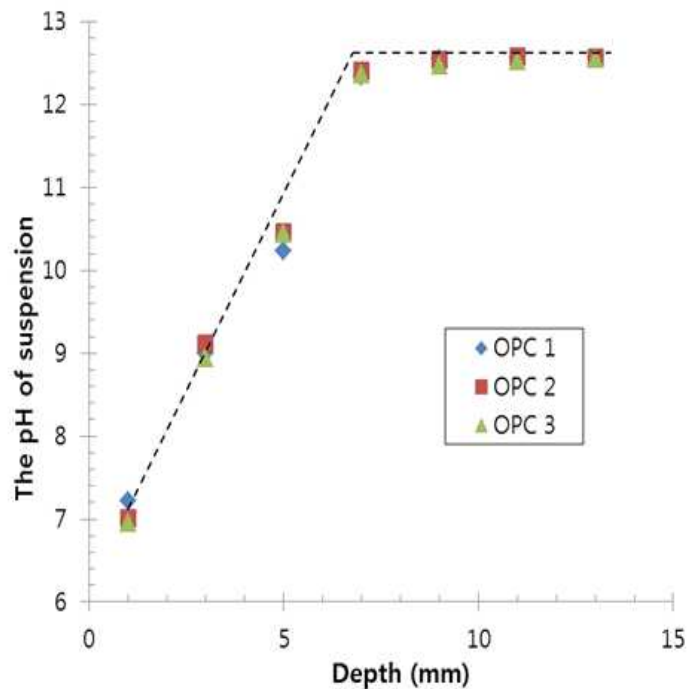
또한 전기화학적 기법의 경제성 검토를 위해서 실제로 알칼리이온 침출을 할 수 있는 기존의 방법으로는 표면도장 외에는 존재하지 않다. 그러나 표면도장의 경우 유수지에서 초기에 도장 이후 개보수가 불가능하며 다만 공기 노출면에 대해서만 유지관리가 가능하다. 즉 표면도장에 대해서도 실제로 알칼리이온의 침출억제는 불가하므로 전기화학적 기법과 비교한 경제성 분석은 불가능할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 전기화학적 기법을 실 구조물에 적용할 경우 발생하는 소요비용에 대한 계산을 실시하였다.

뿐만 아니라 알칼리이온 침출량 정의에 관한 시험법이 현재 국내외적으로 존재하지 않음으로 인해 발생하는 측정의 어려움을 극복하고자 본 연구에서 개발한 시험법에 대해 정량적 수치를 도출할 수 있도록 수정보완토록 하였다. 시험법은 알칼리이온의 침출의 경우 공기중에 노출 시 자연정화가 가능하기 때문에 개방형의 수서환경에 노출된 콘크리트 시편에 관한 알칼리이온의 침출시험과 동시에 콘크리트가 가지고 있는 최대 침출농도를 측정하기 위해 밀폐형 시험법 또한 개발토록 하였다.

3.4.4 콘크리트의 알칼리이온 침출 연구결과

(1) 전기방식법을 통한 알칼리이온 침출저감

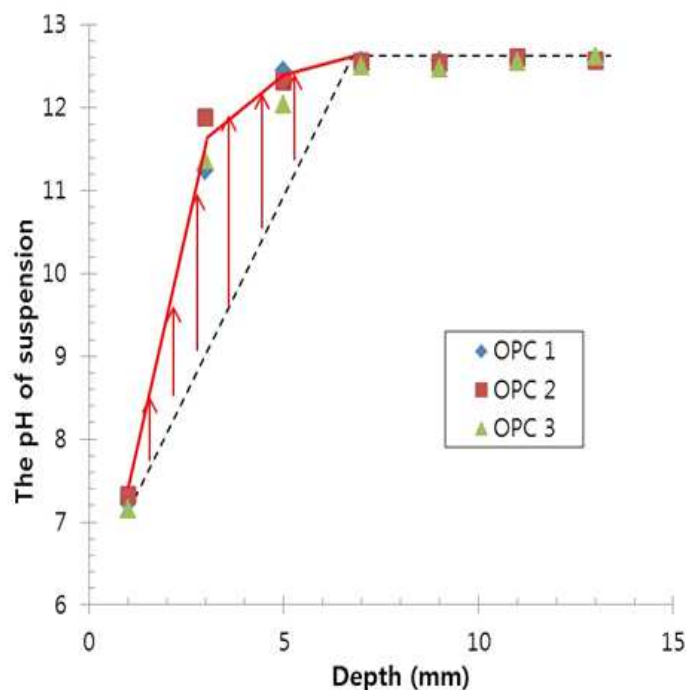
콘크리트의 알칼리이온 침출저감을 위한 전기화학적 기법의 효과를 검증하기 위한 실험은 약산성의 하수처리장 최종저류지에서 실시하였다. 본 연구에서는 각 시편에 재현성을 위해 각 3개의 시편을 제작하여 알칼리이온의 침출량을 측정하였다. 알칼리이온의 침출량은 콘크리트 표면에서 2.0 mm 간격으로 14.0 mm까지 콘크리트 분말의 채취 후 각 깊이 별 pH를 water extraction법을 통해 측정함으로써 pH 프로파일을 도출하였다.



<그림 3.51> OPC 콘크리트의 침지 90일 후의 pH 프로파일

그림 3.51은 전기화학적 기법을 사용하지 않은 OPC콘크리트의 pH 프로파일을 보여주고 있다. 콘크리트 표면부는 약 7.0 정도의 pH를 보여주고 있는데 이는 콘크리트의 알칼리이온의 침출로 인한 것으로 판단된다. 다만 실제 노출된 수서환경의 pH가 6.07-6.55 정도임을 감안할 때 상대적으로 높은 값을 나타내는데 이는 콘크리트 내에 잔류하는 수화 침전물에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 이후 콘크리트 내부에서는 급격한 pH의 증가가 보인다. 이는 콘크리트 표면부에서 발생한 알칼리이온의 침출이 콘크리트 내부까지 전달되는 과정으로 주로 이온의 침출 또는 침입이 수서환경 노출 시에는 확산에 의해 이루어짐을 고려할 때 정상류의 흐름을 가지고 있음을 시사한다. 이와 같은 급격한 pH의 증가는

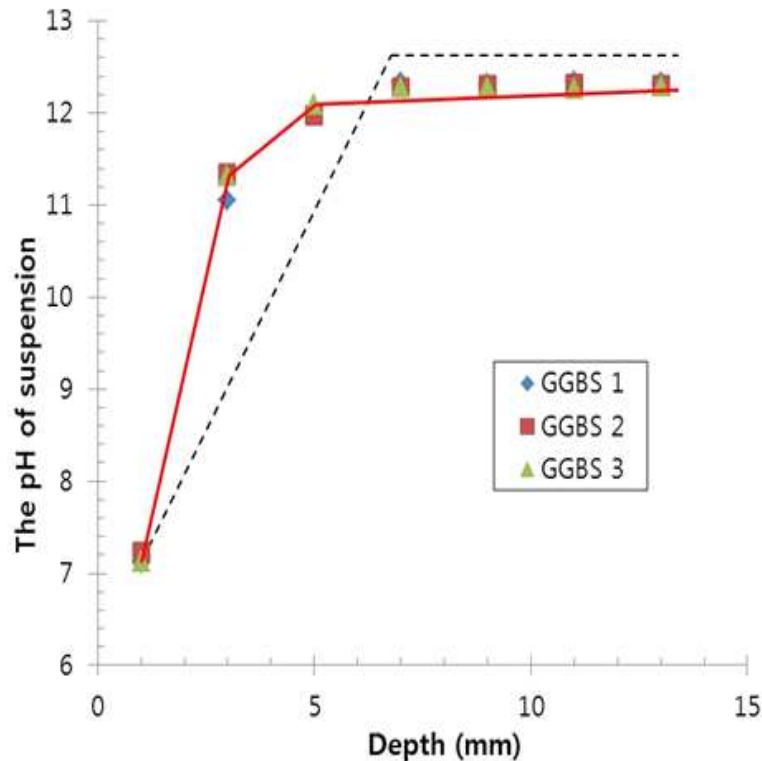
콘크리트 표면부 8.0 mm 이후 거의 변화가 없는데 이를 콘크리트의 이온침출 한계깊이로 간주해야한다. 즉, 8.0 mm 이후에는 콘크리트의 이온침출이 실제로 불가능하며 추가적인 이온 침출을 위해서는 장기적인 노출이 필요하게 된다. 이와 같은 장기적인 노출을 계산하기 위해서는 알칼리이온의 침출에 대한 확산속도를 계산한 후 추가적인 노출기간과의 상관관계를 도출함으로써 가능하나 본 연구에서는 제외하였다. 실제로 알칼리이온의 침출은 단일 이온이 아닌 수산화이온 외에 각종 금속이온이 수서환경의 pH에 따라 순차적으로 침출됨으로써 실제환경에 적용하기에는 계산상 거의 불가능할 것으로 보인다.



<그림 3.52> 전기방식을 적용한 OPC 콘크리트의 알칼리이온 침출저감 효과 (90일 침지)

그림 3.52-3.54에서는 콘크리트의 각 결합재별로 전기화학적 처리기법을 적용했을 경우의 알칼리이온 침출에 따른 pH 프로파일을 나타내고 있다. 그림 3.52에서 도출된 전기방식법을 적용하지 않은 경우의 pH 프로파일 추세선을 이용하여 전기방식법의 효율을 비교검토 하였다. OPC 콘크리트의 경우 전기방식법을 적용하였을 때 그림 3.50에서 보는 바와 같이 콘크리트 표면부에서 높은 pH를 보여주고 있다. 그러나 콘크리트의 최외부 표면부에서는 실제로 pH의 증가를 관찰 할 수 없는데 이온의 침출은 수서환경에 직접적으로 노출 될 경우 이온 간의 상호 이동에 의해 이루어지기 때문에 전기방식법이 효용성이 없다. 즉 최외측 콘크리트 표면부인 2.0 mm까지의 pH는 전기화학적 처리기법을 사용하지 않은 경우와 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 이후 4.0 mm 이후의 깊이에서는 상대적으로 급격한 pH의 증가가 관찰된다. 이는 전기화학적 처리기법에 의해 알칼리이온의 침출이 현저하게 억제되고 있음을 보여준다. 특히 4.0 mm에서부터 pH는 11.0이상을 상회하며

알칼리이온의 침출이 거의 이루어지지 않고 있음을 보여준다. 또한 알칼리이온의 침출한계 깊이가 또한 6.0 mm이하로 전기화학적 처리기법을 사용하지 않은 경우 보다 콘크리트 표면부에 존재하고 있음을 나타낸다.

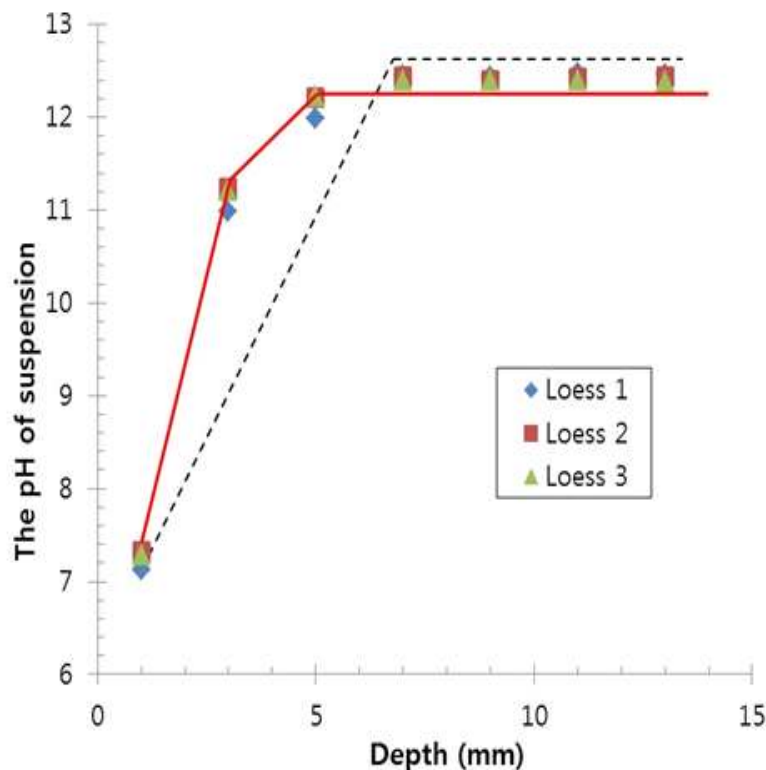


<그림 3.53> 전기방식을 적용한 GGBS 콘크리트의 알칼리이온 침출저감 효과 (90일 침지)

그림 3.53에서는 60% GGBS 콘크리트의 경우 전기화학적 처리기법을 사용하였을 때의 pH 프로파일을 나타낸다. OPC 콘크리트와 마찬가지로 콘크리트 최외부 표면부에서는 pH가 매우 낮은 값을 나타내고 있으나 이후 pH의 급격한 증가를 통해 전기화학적 기법에 의한 알칼리이온의 침출억제를 확인할 수 있다. 특히 알칼리이온 침출한계깊이 또한 6.0 mm 이내로 판단된다. 그러나 침출한계깊이 이후 OPC 콘크리트와 비교할 때 상대적으로 낮은 pH를 보인다. 이는 한계깊이 이후 알칼리이온의 침출이라기 보다는 GGBS 콘크리트가 가지고 있는 특성 중의 하나인 약알칼리성의 성질 때문으로 판단된다. 즉, 보통의 OPC 콘크리트의 공극수 pH는 약 12.5-13.5의 매우 강한 알칼리성을 띄게된다. 그러나 GGBS 콘크리트는 상대적으로 낮은 pH의 범위인 9.5-12.0 정도를 가지게 된다. 그러므로 GGBS 콘크리트의 경우 중성화의 위험에 노출되게 된다. 본 연구에서는 GGBS 콘크리트의 상대적으로 낮은 알칼리도에 대해 제1차년도 연구에서 이미 진행된 바 있다.

Loess 콘크리트를 사용할 경우 전기화학적 처리기법의 알칼리이온 침출억제 효과는

OPC 콘크리트와 비교하여 비슷한 경향을 가지는 것으로 보인다. 그림 3.54에서 보는 바와 같이 콘크리트 표면부를 제외하고 모든 깊이에서 전기화학적 처리기법을 사용하지 않은 경우 보다 높은 pH를 보이고 있다. 다만 한계침출 깊이 이후에 OPC 콘크리트 보다 상대적으로 낮은 pH범위를 가지게 되는데 이는 GGBS 콘크리트와 마찬가지로 Loess 자체가 가지는 상대적으로 낮은 알칼리도에 기인한 것으로 판단된다. 한계침출깊이는 전기화학적 처리기법을 사용한 경우 모두 약 6.0 mm정도로 보이며 뿐만 아니라 최외측 표면을 제외하고 모든 깊이에서 매우 높은 pH, 즉 매우 낮은 알칼리이온의 침출을 나타냄으로써 전기화학적 처리기법이 매우 실효적인 침출저감 방법인 것으로 판단된다.

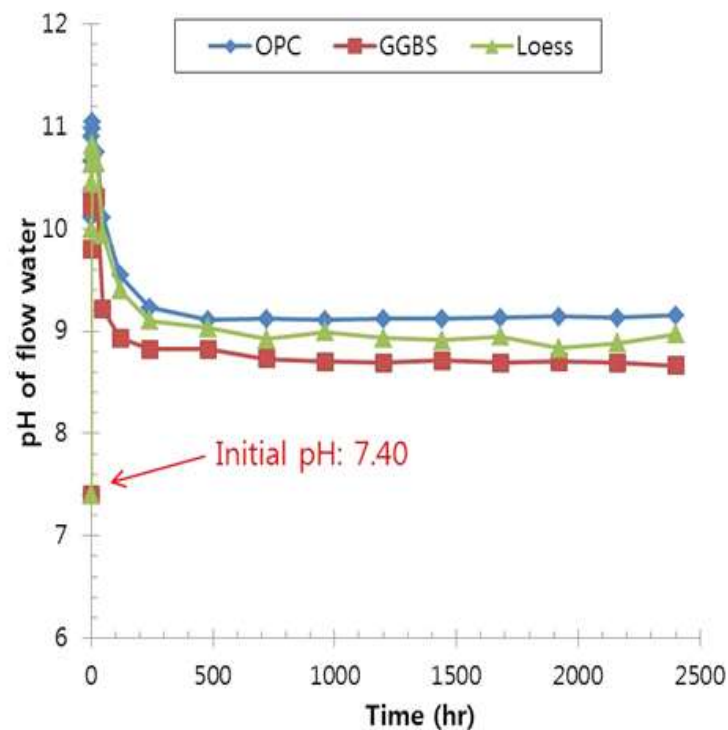


<그림 3.54> 전기방식을 적용한 Loess 콘크리트의 알칼리이온 침출저감 효과 (90일 침지)

(2) 자연정화능력에 의한 알칼리이온 침출 저감

모형 인공수로 실험을 통한 콘크리트의 알칼리이온 침출 및 자연정화능력에 의한 복원 실험을 실시하였다. 결합재의 종류는 OPC 외에 GGBS 및 Loess 콘크리트를 통해 측정, 모니터링 하였다. 유수화 직전 사용한 수돗물의 pH를 측정한 결과 7.40의 중성을 나타내었으며 이후 유수화 하기 시작한 이후 초기 1시간 간격으로 5시간 측정후 24시간 간격으로 측정 한 이후 10일 이후부터는 매 10일 간격으로 측정토록 하였다. 그림 3.55는 각 결

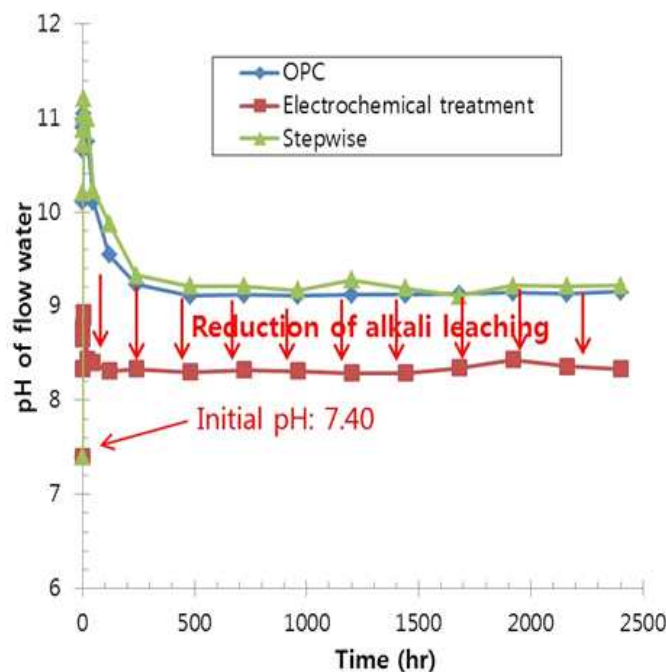
합재별로 콘크리트 인공수로 실험에서 100일간의 pH 모니터링을 통한 알칼리이온 침출량을 측정한 결과이다. 결합재에 관계없이 초기 5시간안에 pH가 최대 11.0까지 급격히 증가한 이후 서서히 감소하여 10일 이후에는 8.61에서 9.15의 pH를 유지하였다. 이는 수서환경에 노출된 직후 급격한 알칼리이온의 침출이 발생하며 이후 침출량이 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 알칼리이온의 침출감소는 유수의 pH가 이미 증가한 상태라 이온의 침출 경로 (Driving force)인 확산에 의한 침출에 한계가 있기 때문으로 판단된다. 그러나 실제 구조물의 경우 지속적으로 유수가 공급될 경우 pH가 지속된다고 하더라도 알칼리이온의 침출은 반복된다고 할 수 있다. 이와 같은 알칼리이온의 침출패턴은 결합재에 따라 약간의 차이가 있는데 OPC의 경우 가장 높은 pH 값인 9.15의 값을 나타낸 반면 GGBS 콘크리트의 경우 8.61의 낮은 값을 나타내었다. 이는 상기 언급한 바와 같이 GGBS가 가지고 있는 약알칼리도의 특성에 기인한 것으로 보인다. 그러나 여전히 초기 유수의 pH가 7.40임을 감안할 때 GGBS 콘크리트라 할지라도 지속적인 알칼리이온의 침출이 발생하고 있으며 이는 자연정화에 의해 일정부분 보상이 되긴 하나 절대적으로 알칼리이온 침출에 의한 pH 상승은 복원될 수 없음을 시사한다. 다만 pH복원을 위해서는 유수의 양이 콘크리트 비표면적 또는 콘크리트가 함유하고 있는 알칼리이온의 농도보다 매우 높아야만 가능할 것으로 판단된다.



<그림 3.55> 인공수로 실험을 통한 알칼리이온 침출 및 자연복원 효과 (Binder)

인공수로의 사양 (비표면적의 증가), 전기화학적 처리기법에 따른 인공수로에서의 pH

모니터링의 결과는 그림 3.56에 나타내었다. 콘크리트 배합은 모두 OPC 콘크리트로 제작하였다. 콘크리트 인공수로의 유수면적을 증가시키기 위해 계단형의 수로를 사용한 경우에도 비표면적의 증가에 의한 pH의 증가는 매우 미미한 것으로 나타난다. 다만, 전기화학적 처리기법을 사용한 경우 정상류 상태에서의 pH가 8.3 정도의 상대적으로 매우 낮은 값을 나타낸다. 또한 초기 침출에 의한 pH의 최고치 또한 기존의 11.0 이상보다 현저하게 낮은 9.0 이하로 알칼리이온의 침출억제효과가 뚜렷함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 위에서 언급한 바와 같이 전기화학적 처리기법을 사용할 경우 콘크리트 최외각 표면에서만 알칼리이온의 침출이 발생하여 침출가능한 수산화이온이나 금속성 이온의 공급에 한계가 있어 상대적으로 매우 낮은 알칼리이온 침출을 나타내는 것으로 판단된다.



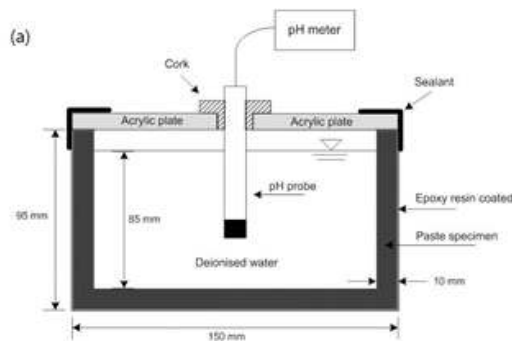
<그림 3.56> 인공수로 적용 시 전기방식법의 알칼리이온 침출저감 효과

(3) Loess 첨가제와의 적합성 및 표준시험법 개발

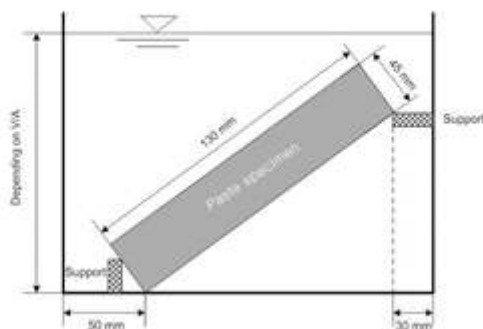
본 연구에서 중금속이온의 침출억제를 위해 개발한 Loess 첨가제는 콘크리트 또는 시멘트 중에 존재하는 6가크롬의 침출억제를 위한 것이다. 6가크롬 또한 수서환경을 통해서만 침출가능하기 때문에 동시에 알칼리이온의 침출과 동반하게 된다. 그러므로 수서환경의 보호를 위해서는 알칼리이온의 침출 6가크롬의 침출 모두를 동시에 제어해야 하며 각각 개발된 처리기법 상에 상호 부작용이 발생해서는 안된다. 본 연구에서는 6가크롬 침출억제제인 Loess첨가제를 사용하여 제작한 콘크리트 시편에 대해 전기화학적 처리기법을 통하여 알칼리이온의 침출 억제효과를 동시에 검토하였다. 결과로서 그림 3.55에서 보는 바와

같이 Loess 자체가 가지는 약알칼리성의 특성으로 인해 한계침출깊이 이후의 pH가 상대적으로 낮게 나타나고 있으나 콘크리트 표면부에서의 알칼리이온의 침출억제는 현저하게 감소시킴을 알 수 있다. 또한 이렇게 전기화학적 처리기법을 가할 경우 6가크롬이 침출능은 무기화학적으로 침전 된 이후에는 전기분해 반응이 발생하지 않기 때문에 본 연구에서는 제외하였다.

또한 기존에 없던 알칼리이온의 콘크리트 침출시험법에 대해 본 연구에서는 다루었다. 콘크리트 주의 알칼리이온침출은 그림 3.57에서 보는 바와 같이 밀폐형, 개방형으로 나누었다. 밀폐형의 경우 콘크리트가 가지고 있는 최대 침출능에 대한 정의를 할 수 있는 시험법으로 일정시간동안 pH의 모니터링을 통해 침출된 수산화이온의 농도를 측정할 수 있는 방법으로 콘크리트의 배합에 따른 침출능의 평가가 가능하게 된다. 또한 개방형의 경우 침출능에 따라 침출된 알칼리이온이 공기 중에 노출될 경우 정화작용을 통해 일정부분 pH가 다시 감소되는 현상을 확인 할 수 있으며 자연정화의 한계를 정량화할 수 있다. 이와 같은 두 가지 형태의 시험법은 현재 국내표준에 상정하여 심사대기 중이다.



(a) 밀폐형



(b) 외기 개방형

시멘트 경화체의 알칼리 이온 침출 시험 방법
(Laboratory test method of determination of alkali leaching)

1. 적용범위

이 규격은 수중 환경에 노출된 콘크리트의 알칼리 이온 침출 측정을 위한 시험 방법에 대하여 규정한다.

침출 작용이란 고체물질에서 용해성을 가진 용매에 의해 이온물질이 추출되는 것을 말한다.

이 규격은 해수, 라천 및 우수 등의 형태로 물과 접촉하게 되는 콘크리트 구조물에 대하여 적용 할 수 있다.

2. 인용규격

다음에 나타내는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정 일부를 구성한다. 이들 인용 규격 중에서 발효 연도를 부기하고 있는 것은 기재 연도의 편만이 이 규격의 규정을 구성하는 것으로, 그 후의 개정판·수록에는 적용하지 않는다. 발효 연도를 부기하지 않은 규격은 그 최신판(수록을 포함)을 적용한다.

KS B 5302: 유리제 온도계 (원제 답금)

KS F 4007: 콘크리트 양생용 시트재

KS M 7602: 거름종이(화학 분석용)

KS M ISO 3696: 분석 실험용 물 - 규격 및 분석 방법

KS M ISO 6975: 플라스티크 - 페놀 수지 - pH 측정

KS M 0011: 수용액의 pH 측정 방법

3. 용어

콘크리트의 생산에 주로 사용되는 포틀랜드 시멘트는 산화칼슘 (CaO)이 주성분이다. 산화칼슘이 수화작용 동안에 물과 접촉하여, 규산화물 (3CaO·SiO₂, 2CaO·SiO₂)과 수산화칼슘 [Ca(OH)₂]이 생성된다. 수화작용 동안 생성된 수산화칼슘은 콘크리트의 공극수의 알칼리도를 약 12.5로 유지한다. 또한 콘크리트의 알칼리 이온의 침출은 공극수를 통해서 이루어지며, 알칼리 이온의 침출로 인해 주변의 물의 알칼리도를 상승시킨다.

알칼리도의 계산방법은 아래와 같다.

$$pH = -\log[H^+], pOH = -\log[OH^-]$$

$$[H^+][OH^-] = 1 \times 10^{-14} \text{ mol/L}$$

$$pH + pOH = 14 \rightarrow pOH = 14 - pH$$

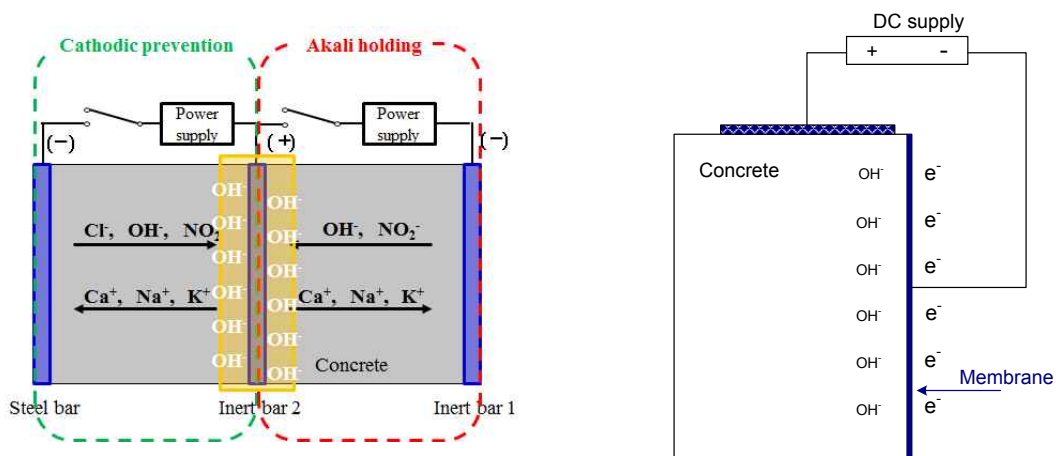
이 시험방법은 콘크리트가 일배된 환경과 노출된 환경에서의 알칼리 이온의 침출량에 대한 시험법이다.

<그림 3.57> 알칼리이온 침출 시험법의 국내외 표준화를 개념도 및 국내표준 제안

(4) 전기방식법의 현장적용성 검토

콘크리트의 알칼리이온의 침출억제를 위한 대책으로 콘크리트 표면에 도장을 실시하여 내부의 알칼리이온 침출을 억제하는 방법인 표면도장 및 멤브레인 코팅이 있다. 그러나, 장기간 수중환경에 노출 시 콘크리트와 도장(coating)의 부착강도가 저하 될 뿐만 아니라, 파도 등에 의해 국부적으로 도장된 부분이 파손되어 그 부분에서 알칼리이온의 침출 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 알칼리이온의 침출억제를 위한 기존기술의 문제점을 해결하기 위해 전기방식법을 적용하였다. 본 연구에서 활용된 전기방식법은 부식 환경에서 콘크리트 철근을 보호하기 위하여 사용되고 있으며 철근부식의 원인에 따라 음극방식법(Cathodic protection), 재알칼리화(Realkalisation), 탈염기법(Electrochemical chloride extraction)으로 나눌 수 있다. 음극방식법은 부식의 원인에 관계없이 철근에 방식전류를 직접적으로 공급함으로써 부식을 복원하는 방식인 반면 재알칼리화 및 탈염기법은 각각 중성화 및 염소이온에 의한 부식에 대한 방식법이다. 재알칼리화의 경우 강알칼리이온을 콘크리트 중에 전기적인 흐름을 이용하여 철근깊이까지 공급함으로써 부식을 치유하는 방법이고 탈염기법은 전기적인 흐름에 의해 음이온을 띠고 있는 염소이온을 철근에서 제거하는 방법이다. 전기화학적 처리기법은 콘크리트 내부에 있는 철근부식 방식법으로만 널리 이용되고 있으나, 그림 3.58에 나타난 바와 같이 콘크리트에 전류를 가압할 경우, 이온의 이동 및 새로운 분자의 발생이 야기된다. 염소이온과 같은 유해이온은 철근에서 이탈시킬 수 있으나, 철근 근처에서의 수소가스 발생 및 수산화이온의 해리가 야기 될 수 있으므로 직류전류를 통전시킴으로써 철근 주변부로 이동한 칼슘이온이 철근 콘크리트 계면에서 발생된 수산화이온과의 반응에 의해 수산화칼슘막을 형성시키고, 수산화칼슘은 12.6의 높은 pH를 형성하고 pH감소에 저항하는 완충력이 있으므로 알칼리이온 침출이 저감된다.

따라서, 본 연구에서 활용된 전기방식법은 현장적용 시 기존 철근부식 방지를 위한 전기방식법과 연계하여 해양환경 및 수서환경에서 전기방식법을 통한 이온의 이동 억제와 precarbonation 기법을 통한 표면처리를 함으로써 콘크리트의 중금속 이온 및 알칼리이온을 제어하는데 효과적이라 판단된다.



<그림 3.58> 콘크리트의 알칼리이온 침출 억제를 위한 전기방식법 모식도

3.4.5 알칼리이온 침출저감을 위한 전기방식법의 적용성

본 연구에서는 콘크리트의 알칼리이온의 침출억제를 위해 전기화학적 처리기법을 개발하였다. 개발된 기법은 현장적용성의 검토를 위해 실제 유수지 및 유수지를 모사한 인공수로 시험을 통한 검증하였으며 동시에 중금속 침출억제제와의 상호 적합성에 대해서도 검토하였다. 이에 대한 연구결과는 다음에 요약하였다.

(1) 실제 유수지로 선정한 하수처리장에서의 시험결과 콘크리트에 전기화학적 처리기법을 통한 알칼리이온의 침출억제 효과는 매우 높은 것으로 나타났다. 즉 콘크리트 표면부에서는 유수와 콘크리트 표면에 있는 이온 간의 상호작용에 의한 침출이 발생하나 이후 4.0 mm 깊이이후에서는 알칼리이온의 침출이 급격히 감소하고 있으며 알칼리이온 침출한 계깊이 또한 6.0 mm이하로 기존의 8.0 mm 보다 감소함을 확인하였다. 그러나 다만, GGBS 또는 Loess 콘크리트의 경우 재료의 약알칼리성의 특성으로 인해 OPC 콘크리트보다 상대적으로 낮은 알칼리이온 침출량을 나타내었다.

(2) 인공수로 실험을 통한 알칼리이온의 침출 및 자연정화능력은 100일간의 pH 모니터링을 통해 실시하였다. 결과로서 유수접촉 초기 5시간 이내에 콘크리트이 알칼리이온의 침출이 급격히 이루어지다가 이후 알칼리이온의 침출이 감소한다. 그러나 알칼리이온의 침출은 유수에 따라 계속적으로 진전되며 콘크리트의 결합재에 따라 침출량의 차이가 있었다. 또한 전기화학적 처리기법을 적용할 경우 침출량이 급격히 감소한다. 자연정화능력에 있어서는 일정부분 알칼리이온의 침출에 대한 pH증가 가 다시 감소하나 원래 유수의 pH까지는 감소하지 않음을 확인하였다.

(3) 중금속 저감제인 Loess 첨가제와 전기화학적 처리기법의 상호 적합성에 대해서 알칼리이온 침출에 대해서는 이온침출저감효과 문제가 없음을 확인하였다. 그러나 전기화학적 처리기법을 적용할 경우 중금속의 침출은 본 연구에서는 확인하지 않았다. 이는 이미 침전된 수화물의 경우 전기화학적 반응에 의해 분해되거나 이동이 되지 않기 때문이다.

3.5 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 발생

3.5.1 개요

시멘트 산업은 막대한 양의 석회석 채굴에 따른 산림자원 파괴와 생산과정에서 1,450℃ 소성에 따른 에너지 고비용문제, CO₂ 배출, 석회석 분쇄에 따른 CaO + CO₂ 과다 발생 등으로 인해 지구 온난화 및 기후변화의 심각한 환경유해 산업으로 인식되고 있다 (엄윤성 등 2004; 에너지관리공단, 2004). 시멘트 생산에 필요한 에너지원은 대개 석탄, 석유등의 화석연료에만 절대적으로 의존하고 있어 자원고갈문제와도 직접적으로 연결된다 (한국건설기술연구원, 2008). 또한 2005년 2월에 발표된 교토의정서에 의해 2013년부터는 우리나라 역시 온실가스 감축의무 이행국으로 선정되어 시멘트 산업도 심각한 어려움을 겪을 것으로 예상되고 있다. 그리고 2009년 12월 우리 정부의 녹색성장위원회에서 우리나라 온실가스 감축 목표로서 2020년까지 국가 온실가스 총 배출량을 배출전망치 (Business As Usual, BAU) 대비 30% 감축 (또는 2005년 대비 4% 감축)하기로 결정하였다 (녹색성장위원회, 2009).

그럼에도 불구하고 현재 국내 시멘트 산업의 경우 시멘트 제조 공정의 신규 설비 투자는 크게 이루어지지 않고 녹색성장을 위해서 고려되는 기술은 고려중이나 공정 적용의 기술적인 어려움, 최종 제품인 시멘트의 물리특성 저하 및 KS 표준 등의 제약으로 한계가 있다. 한편 CCS (Carbon Capture and Storage)와 같은 CO₂ 발생 후처리 기술은 선진국에도 실제로 공정상에 설치·적용된 기술이 아니며, 국내에서도 이론적인 검토만 수행되고 있다. 한편 국내에서는 시멘트 생산 시 사용되는 에너지로 인한 CO₂ 배출량 뿐 아니라 주요 제품인 클링커 생산 시 탈탄산반응에 따른 CO₂ 배출량이나 배출저감을 위한 규제 및 가이드라인이 부족하며, 시멘트 생산공정에서 CO₂ 배출을 감소하기 위한 기술은 한정적으로 보고되고 있다 (이승현, 2011).

본 연구는 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출량 산정 및 평가에 관한 것으로 시멘트 제조, 콘크리트 배합, 레미콘 제조 및 운송과정 등 콘크리트 생산 전 과정에서 발생하는 CO₂ 발생 프로토콜 제정 및 CO₂ 저감을 위한 최적의 공정에 관한 연구를 수행하였다. 1차년도에는 콘크리트 생산공정별 CO₂ 가스 배출량 산정에 관하여 시멘트 생산에 필요한 에너지원에 따른 CO₂ 배출량 현장조사, 레미콘제조 및 운송에 따른 CO₂ 배출량 현장조사, 콘크리트 생산현장별 CO₂ 배출량에 대한 편차조사 및 프로토콜을 마련에 관한 연구를 수행하였다. 2차년도에는 CO₂ 가스저감을 위한 최적의 콘크리트 생산공정 정의에 관하여 콘크리트 사용에 따른 총 CO₂ 가스배출 15~20% 저감을 위한 시멘트제조방식, 콘크리트 배합에 따른 생산공정을 확립하였으며, 콘크리트 사용에 따른 총 CO₂ 가스배출 15~20% 저감을 위한 골재채취, 레미콘 생산방식 및 운송에 따른 CO₂ 배출 생산공정을 확립에 관한 연구를 수행하였다. 3차년도에는 콘크리트 생산공정에 따른 CO₂ 발생량에

관한 매뉴얼 제정에 관하여 최소 CO₂ 배출을 위한 최적의 콘크리트 생산공정에 관한 프로토콜 정립, 콘크리트 생산방식에 따른 예상 CO₂ 배출량에 관한 모델정립에 관한 연구를 수행하였다.

연구 결과를 바탕으로 콘크리트 구조물 건설에 관련한 전 공정에 대한 CO₂ 배출 경로 규명을 통해 시멘트의 종류, 콘크리트 배합특성, 골재채취 및 레미콘의 운송과 같은 공정별로 제어하여 콘크리트의 강성, 내구성 및 작업조건에 영향을 미치지 않는 범위에서 15~20%의 CO₂ 발생 저감하였다. 그리고 콘크리트 생산과정 중 시멘트 제조방식, 시멘트 종류의 다양화, 콘크리트 배합의 개선, 골재채취, 효율적인 레미콘의 운송 등의 공정을 바탕으로 각 공정별로 프로토콜화를 통해 콘크리트 생산방식에 따른 예상 CO₂ 발생량을 제공할 수 있는 가이드라인을 제시하였다.

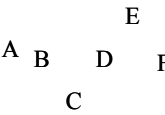
3.5.2 선행연구 및 연구방향

선행연구로서 1차년도 연구에서는 시멘트 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량 저감을 위하여 시멘트 제조 공정분석, 원료 및 연료 사용현황, 시멘트 생산에 따른 에너지 소모량 및 비용, CO₂ 배출특성 및 배출인자를 조사하여 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량을 정량화 하였다. 또한 CO₂ 저감방안으로 시멘트 제조 시 킬른 내에서 석회석의 탈탄산 과정에서의 석회석 손실량을 최소화 하여 콘크리트의 물리적 특성도 향상시키고, 포졸란계 혼화재의 사용으로 CO₂ 배출량 저감을 위한 방안을 제시하였다.

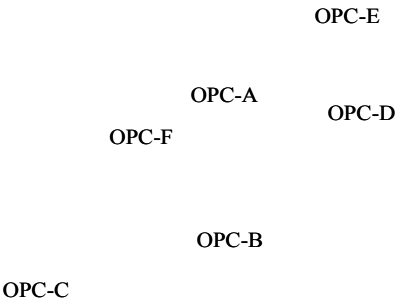
주요 연구결과로 국내 6개사의 시멘트 소성공정에서의 CO₂ 배출인자인 석회석, 전기, 화석연료에 대한 CO₂ 배출량을 그림 3.59에 나타내었다. 시멘트 1ton 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량은 회사별로 729 - 911 kg으로 산정되었으며, 6개사 평균은 822 kg으로 나타났다. 시멘트의 CO₂ 배출인자로 킬른 내에서 석회석의 탈탄산에 따른 CO₂ 배출량이 평균 579 kg으로 전체 CO₂ 배출량의 67.5%를 차지하였다. 또한 킬른 온도를 일정하게 유지하기 위한 화석연료의 연소에 따른 CO₂ 배출량이 195 kg으로 전체 CO₂ 배출량의 26.7%, 설비에서의 전력 사용에 따른 CO₂ 배출량이 47 kg으로 전체 CO₂ 배출량의 5.8%를 차지하였다. 이상 3가지 배출원은 본질적으로 상호 독립적이며, 배출원 중 석회석 탈탄산은 시멘트 제조 공정에서 배출되는 CO₂ 의 가장 큰 비율을 차지함을 확인하였다.

시멘트 소성공정에서 발생하는 CO₂ 배출량은 시멘트 중의 CaO 생성에 비롯되며, 소성공정에서 발생하는 CO₂ 배출에 대한 영향성을 그림 3.60에 나타내었다. 그림에 나타나듯이 CaO 생성효율이 23.62%에서 5.69%로 감소됨에 따라 손실되는 원재료로 인해 추가

적인 소성과정을 거치게 되어 CO₂ 배출량은 911 kg에서 729 kg으로 증가하였으며, 시멘트 제조 시 CO₂ 배출에 영향성이 높음을 확인하였다.



<그림 3.59> 시멘트 제조 시 에너지원 및 재료에 의한 CO₂ 배출량



Ratio of CaO lost in production (%)

<그림 3.60> 시멘트 제조 시 CaO 손실에 따른 CO₂ 배출량

포졸란계 혼화재의 사용에 따른 압축강도와 CO₂ 배출량과의 관계를 파악한 결과를 그림 3.61에 나타내었다. 56일 재령의 압축강도는 OPC < 30% PFA < 60% GGBS 순으로 나타났으며, CO₂ 배출량은 60% GGBS < 30% PFA < OPC 순으로 확인됨에 따라 강성 및 환경영향성 측면에서 포졸란계 혼화재를 첨가한 시험체가 우수함을 확인하였다. 60% GGBS의 경우 강도는 약 21% 증가한 반면 CO₂ 배출량은 OPC의 50% 정도 수준이었다. 30% PFA는 강도증진 14%, CO₂ 배출 감소율은 28%로 우수하였다.

2

| |

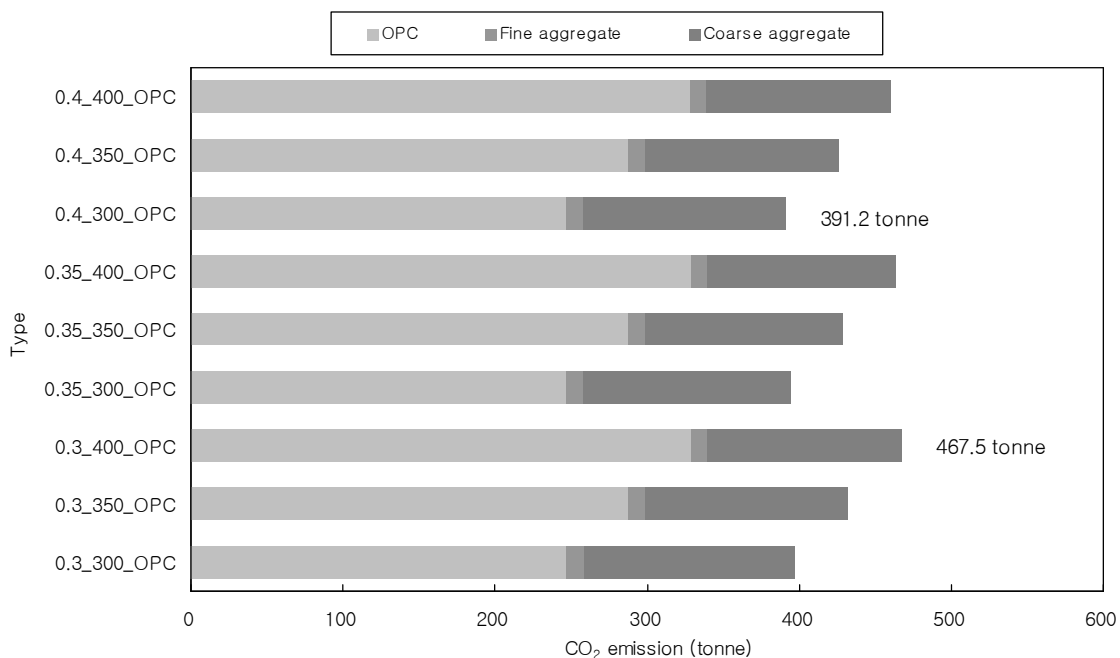
〈그림 3.61〉 포졸란계 혼화재의 CO₂ 배출저감 효과

제2차년도 연구에서는 콘크리트 생산과정에서의 CO₂ 배출 저감을 위한 최적의 생산 공정 개발을 최종 목적으로 하여 콘크리트 생산공정에 따른 최소 CO₂ 배출량을 산정하였다. 또한 골재채취, 레미콘생산 및 운송에 따른 최소 CO₂ 배출량을 산정하여 최종적으로 CO₂ 저감을 위한 최적의 공정 확립 및 Web 기반형 데이터베이스 구축에 초점을 두고 수행하였다. 수행한 내용은 다음과 같다.

콘크리트의 공학적 성능유지 범위에서의 시멘트 제조 방식, 콘크리트 배합에 따른 최소 CO₂ 배출량을 산정하였다. 물-결합재비(%) 0.3, 0.35, 0.4 및 단위시멘트량 300, 350, 400 kg/m³의 콘크리트의 배합에 따른 단위면적 1,000 m²에 대한 CO₂ 배출량을

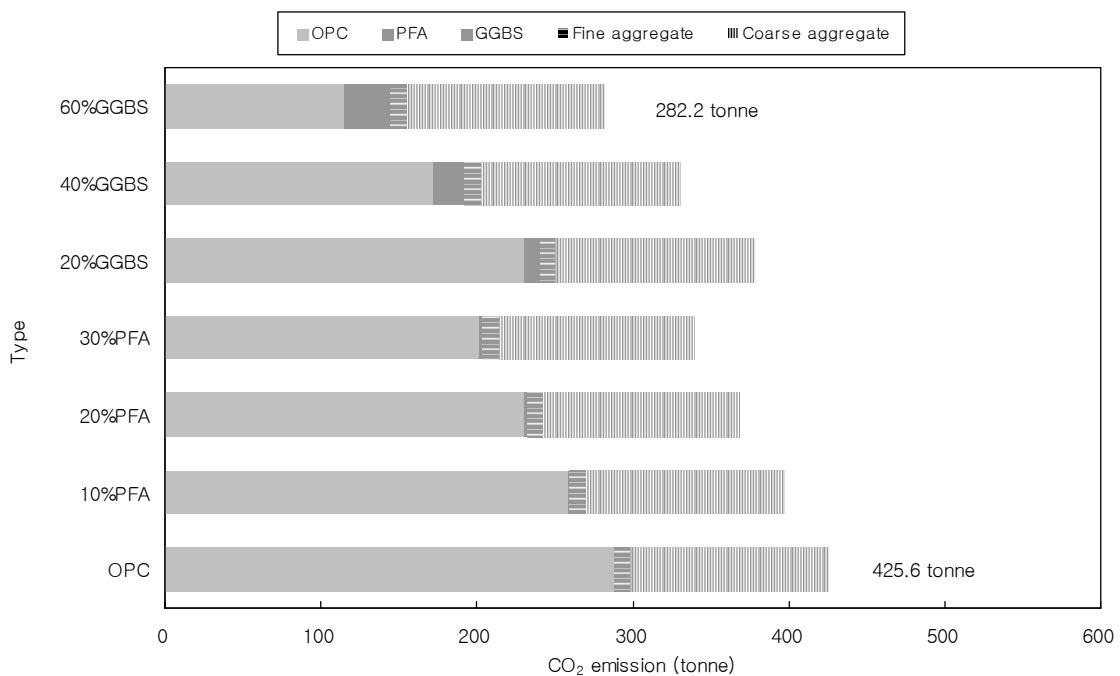
그림 3.62에 나타내었다. 콘크리트 재료별 CO₂ 배출량은 0.4_300_OPC의 경우 시멘트에서 발생하는 CO₂ 배출량이 328.8 ton으로 전체 CO₂ 배출량의 70.3%, 잔골재가 10.8 ton으로 2.3%, 굵은골재가 127.9 ton으로 27.4%로 나타났다.

동일한 물-결합재비(%) 0.4에서 단위시멘트량이 400 kg/m³에서 300 kg/m³으로 감소할수록 CO₂ 배출량은 467.5 ton에서 396.7 ton으로 감소되었으며, 감소율은 15.1%로 나타났다. 단위시멘트량이 감소됨에 따라 시멘트에 의한 CO₂ 배출량은 82.2 ton 감소되었으나, 잔골재 및 굵은골재에 의한 CO₂ 배출량은 각각 0.9 ton, 10.6 ton 증가하였다. 또한 단위시멘트량 300 kg/m³에서 물-결합재비(%)가 0.4에서 0.3으로 감소할수록 CO₂ 배출량은 391.2 ton에서 396.7 ton으로 증가하였으며, 증가율은 1.4%로 나타났다. 물-결합재비(%)가 감소됨에 따라 시멘트에 의한 CO₂ 배출량은 일정하였고, 잔골재 및 굵은골재에 의한 CO₂ 배출량은 각각 0.4 ton, 5.1 ton 증가하였다. 항목별 CO₂ 배출량은 0.4_300_OPC의 CO₂ 배출량이 391.2 ton으로 가장 낮았고, 0.3_400_OPC의 CO₂ 배출량이 467.5 ton으로 가장 높게 나타났다. 각각의 편차는 76.3 ton으로 감소율은 16.3%로 나타났다. 이는 물-결합재비(%)의 감소와 단위시멘트량의 증가에 따라 시멘트 사용량이 증가함으로써 시멘트 사용으로 인한 CO₂ 배출량이 증가하였기 때문이라고 판단된다. 따라서 물-결합재비(%) 및 단위시멘트량이 CO₂ 배출량을 상승시키는데 영향을 미치는 것으로 확인되었다.



<그림 3.62> 콘크리트 배합에 따른 CO₂ 배출량

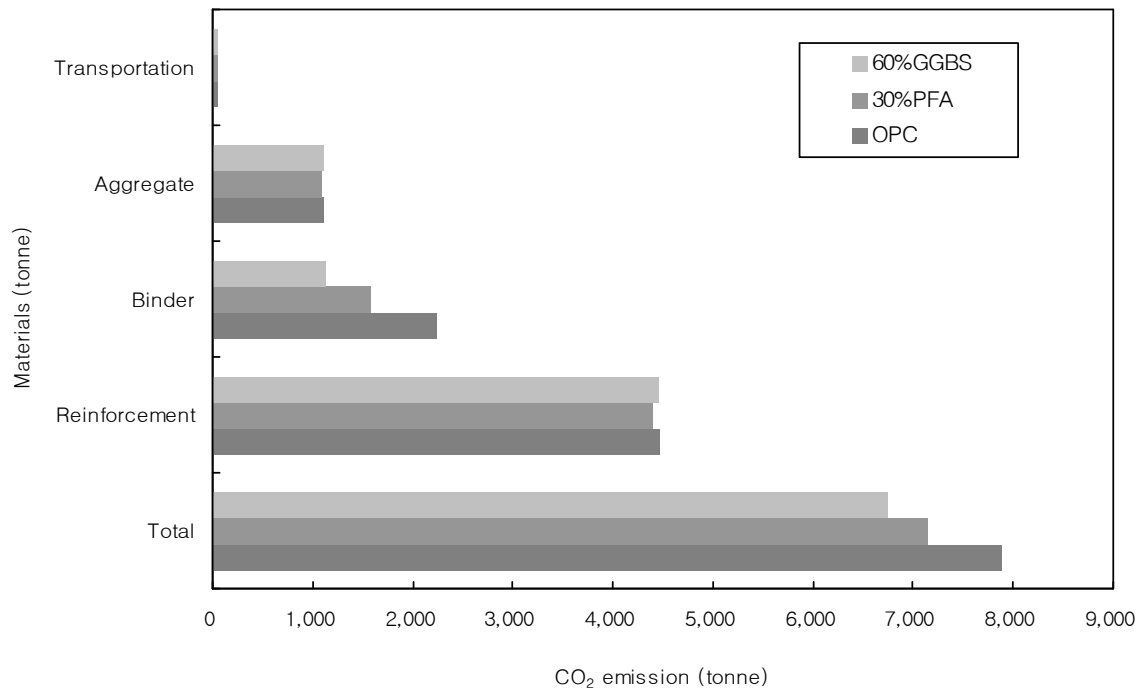
포졸란계 혼화재인 PFA, GGBS를 사용한 콘크리트 배합에 따른 CO₂ 배출량을 그림 3.63에 나타내었다. 물-결합재비(%) 0.4, 단위시멘트량이 350 kg/m³에서의 OPC, 10% PFA, 20% PFA, 30% PFA, 20% GGBS, 40% GGBS, 60% GGBS의 CO₂ 배출량을 산정하였다. OPC콘크리트의 CO₂ 배출량은 425.6 ton으로 나왔으며, PFA를 10, 20, 30%로 치환한 콘크리트의 CO₂ 배출량은 각각 396.9 ton, 368.2 ton, 339.5 ton으로 OPC 콘크리트와 비교하여 10%의 치환율에 대해 28.7 ton씩 감소하였으며 감소율은 6.7%로 나타났다. GGBS를 20, 40, 60%로 치환한 콘크리트의 CO₂ 배출량은 각각 377.8 ton, 330 ton, 282.2 ton으로 OPC 콘크리트와 비교하여 20%의 치환율에 대해 47.8 ton씩 감소하였으며 감소율은 11.2%로 나타났다. 이는 PFA, GGBS의 단위 CO₂ 배출량이 각각 27, 143 kg으로 OPC에 비하여 3.2%, 17.4% 정도 밖에 되지 않으므로 치환율이 증가할수록 시멘트량이 감소하였기 때문이라고 판단된다. 포졸란계 혼화재의 경우 환경성과 더불어, 경제성 및 일부 문제점이 있긴 하지만 OPC 콘크리트에 비해 장기강도가 높으며, 해수에 포함되어 있는 염소이온의 화학적 침식, 콘크리트 중의 강재 부식 등에 대한 저항성이 증가함에 따라 내구성까지 확보할 수 있는 수단이므로 공학적 특성이 저하되지 않을 정도까지 포졸란계 혼화재의 치환율을 높이는 것이 바람직한 것으로 확인되었다.



<그림 3.63> 결합재에 따른 콘크리트의 CO₂ 배출량

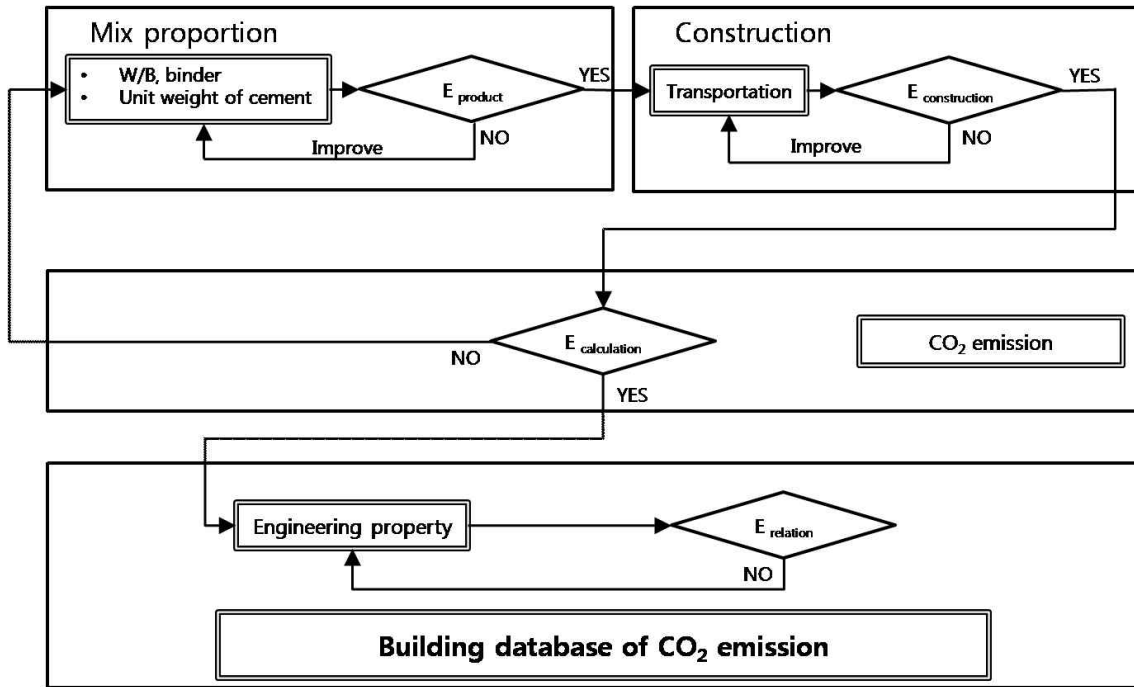
골재채취, 레미콘생산 및 운송에 따른 최소 CO₂ 배출량을 산정하여 최종적으로 CO₂ 저감을 위한 최적의 공정 확립에 대하여 콘크리트 교량 건설 시 건설재료 및 운송에서 배출되는 CO₂ 배출량을 그림 3.64에 나타내었다. 설계강도 45 MPa, 50 MPa, 55 MPa에 따라 OPC, 30% PFA, 60% GGBS에 대한 전체 CO₂ 배출량을 산정하였다. CO₂ 배

출량은 60% GGBS < 30% PFA < OPC 순으로 나왔다. 교량 건설 시 철근에 의한 CO₂ 배출량이 가장 높았으나 배합설계에서도 철근 소모량은 큰 차이를 보이지 않으므로, 실질적으로 CO₂ 배출을 감소시킬 수 있는 방안은 결합재의 사용에 있는 것으로 나타났다. OPC와 비교하여 CO₂ 배출량은 30% PFA는 9.4%, 60% GGBS는 14.5% 감소됨에 따라 60% GGBS의 사용이 CO₂ 배출 저감 및 강도 증진 측면에서 가장 유리한 것으로 확인되었다.



<그림 3.64> 콘크리트 생산에 필요한 총 CO₂ 배출량

시멘트 제조단계 중 탈탄산 시 석회석에 포함되는 유기탄소의 연소, 킬른 온도를 일정하게 유지하기 위한 연료의 연소, 분쇄설비와 같은 설비에서의 전력 사용에 근거하여 투입량에 대한 단위(1 ton)시멘트 제조 시의 에너지 사용량과 CO₂ 배출량이 도출되도록 제작된 Web 기반형 프로그램 (프로그램명: CDOCP4UC - Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Unit Cement)을 개발하였다. 또한 이를 바탕으로 축적된 시멘트의 단위 CO₂ 배출량을 기본으로 하였다. 물-결합재비(%), 단위시멘트량, 혼화재 사용에 근거하여 콘크리트 배합설계 시의 CO₂ 배출량이 도출되도록 하였다. 또한 시공현장에 따른 운송에 대한 CO₂ 배출량도 산정함으로써 전반적인 콘크리트 제조 공정의 CO₂ 배출량을 산정할 수 있는 프로그램을 개발하기 위한 그림 3.65과 같은 coding 작업을 하였다.



〈그림 3.65〉 Web 기반형 데이터베이스 모식도

1,2차 연구내용을 바탕으로 3차년도에서는 “콘크리트 생산공정에 따른 CO₂ 발생량에 관한 매뉴얼 제정”에 관하여 경제성, 공학적성능, 시공성이 포함된 콘크리트 생산방법에 따른 CO₂ 배출 3각기법 검증, Web 기반형 database 구축 및 최소 CO₂ 배출 제공과 관련된 CO₂ 배출 모니터링을 위한 프로토콜 및 패키지 개발, 최소 CO₂ 배출을 위한 최적의 콘크리트 생산공정 및 실측치와의 비교를 위하여 실구조물 건설을 이용한 CO₂ 배출 검증을 실시하였다. 선행연구 및 3차년도 연구방향에 대한 개요를 그림 3.66에 나타내었다.



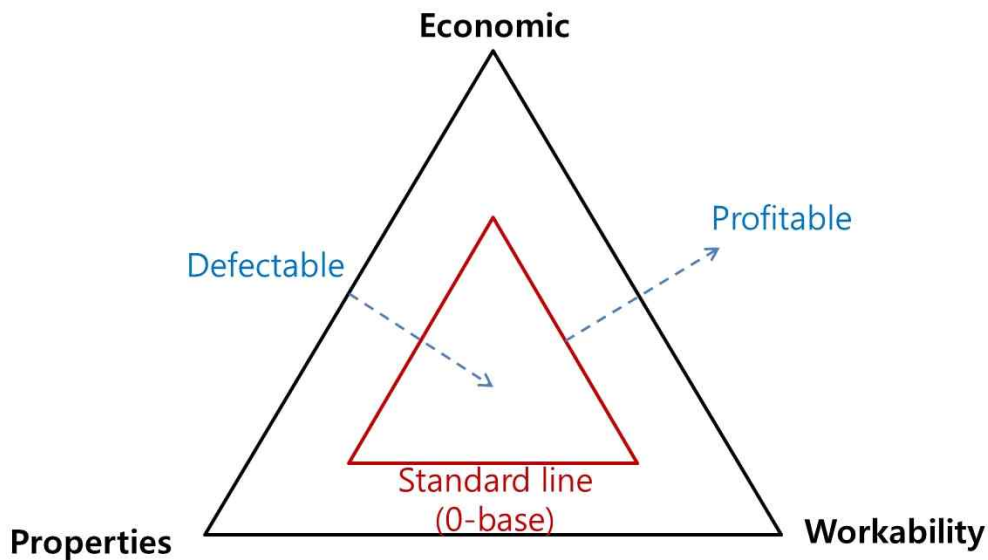
〈그림 3.66〉 선행연구 및 3차년도 연구방향 개요

3.5.3 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출저감 연구내용

콘크리트 생산에 따른 경제성, 공학적성능, 시공성, 환경성이 포함된 CO₂ 배출 3각기법 검증, Web 기반형 database 구축 및 최소 CO₂ 배출 제공과 관련된 CO₂ 배출 모니터링을 위한 프로토콜 및 패키지 개발, 최소 CO₂ 배출을 위한 최적의 콘크리트 생산공정 및 실측치와의 비교를 위하여 실구조물 건설을 이용한 CO₂ 배출 검증을 실시하였다.

(1) 콘크리트 생산방법에 따른 CO₂ 배출 3각기법 검증

본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 콘크리트의 기본재료인 시멘트 및 포졸란계 혼화재 등의 결합재와 골재, 철근에 대한 CO₂ 배출량을 산정하여 그림 3.67처럼 경제성, 시공성, 공학적성능, 환경성에 관한 3각기법을 실시하였다.



<그림 3.67> 콘크리트 구성재료에 따른 3각기법 검증개념

3각기법을 적용하기위한 콘크리트 재료별 단위 CO₂ 배출량 및 산정식을 표 3.11에 나타내었다. 결합재로는 보통포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland cement; OPC), 고로슬래그 미분말 (Ground granulated blast furnace slag; GGBS), 플라이애시 (Pulverised fuel ash; PFA)를 적용하였고, 골재로는 모래, 부순골재, 강자갈을 적용하였으며 철근은 일반철근, 고장력철근, 형강을 적용하여 단위 CO₂ 배출량을 활용하여 콘크리트 재료 및 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량을 정량화하였다.

[표 3.11] 건설재료별 CO₂ 배출량 및 산정식

Type			CO ₂ emission (kg/ton)	Remark
Materials	Binder	OPC	822	± 100kg/ton
		PFA	27	
		GGBS	143	Grinding
	Aggregate	Coarse agg.	46	
		Crushed stone	107	Further treatment
		Riversand	14	
	Reinforcement	Normal steel	3,500	
		High–strength steel	3,465	
		Section shape	4,950	
Transportation		General	Equation 1*	Distance, truck
		Concrete	Equation 2**	

Equation 1*:

$$E_{trans} = L + C_{remi} + n_{con}$$

E_{trans} : 운송 단계에서의 CO₂ 배출량 (kg)

C_{remi} : 레미콘트럭의 CO₂ 단위배출량 (표 3.3 참조, kg/대)

L : 운송거리 (km)

n_{con} : 레미콘 이용 대수 (대)

Equation 2**:

$$E_{trans} = L \times \Sigma (C_{trans} \times n_{trans})$$

E_{trans} : 운송 단계에서의 CO₂ 배출량 (kg)

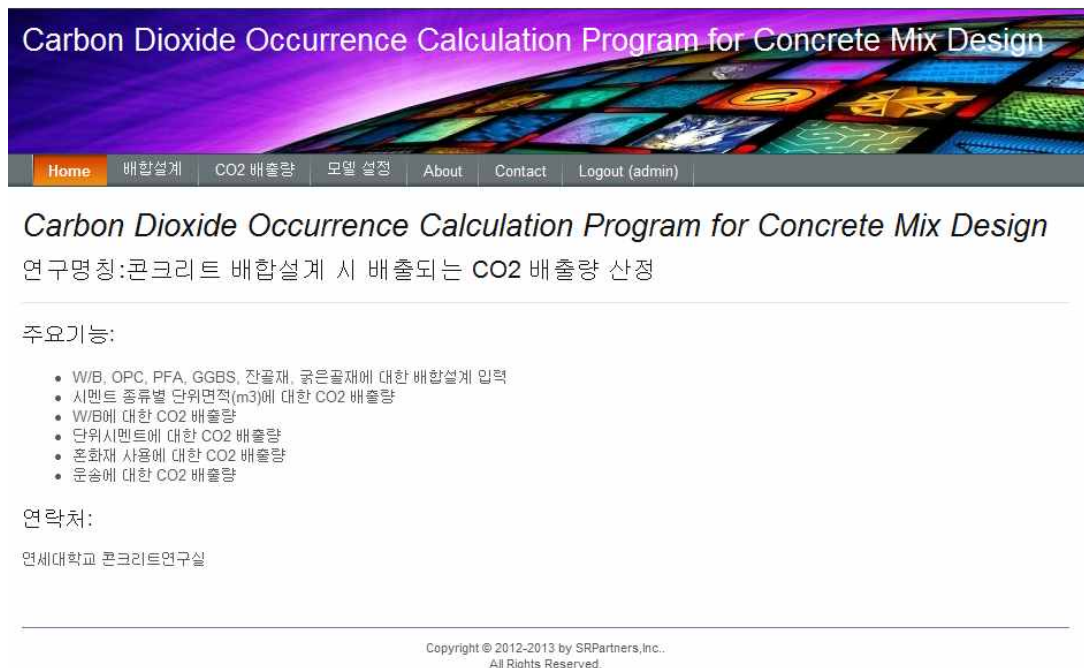
C_{trans} : 용량별 트럭의 CO₂ 단위배출량 (kg/대)

L : 운송거리 (km)

n_{trans} : 트럭 이용 대수 (대)

(2) CO₂ 배출 모니터링을 위한 프로토콜 및 패키지 개발

본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 개발된 시멘트 및 콘크리트 제조 시 발생하는 CO₂ 프로그램인 CDOCP4UC (Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Unit Cement)와 CDOCP4MPC (Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Mix Proportion of Concrete)를 활용하여 Web 기반형 데이터베이스를 개발하였다. 본 프로그램은 콘크리트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량에 대하여 시멘트 및 콘크리트에 대하여 통합적인 시스템 및 네트워크가 운영되며, 그림 3.68에 나타난 mc.cdop.kr에서 사용 가능하다.



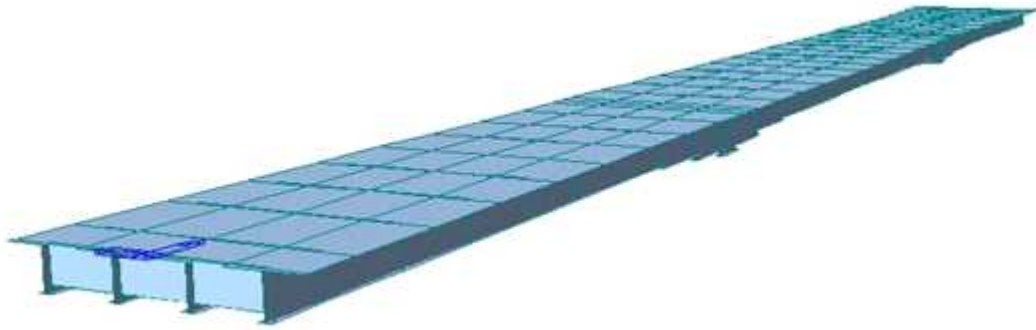
<그림 3.68> CO₂ 배출량에 대한 통합형 프로그램

시스템 활용 시 시멘트 생산에 관하여 원료 및 연료, 전력량에 기인한 시멘트 종류별 CO₂ 배출량 산정이 가능하다. 콘크리트에 대하여 시멘트 및 결합재 종류별, 물-시멘트 비, 단위시멘트량, 혼화재, 운송에 대하여 입력값에 따라서 자동적으로 CO₂ 배출량의 산정에 대한 프로세스를 실시하였다.

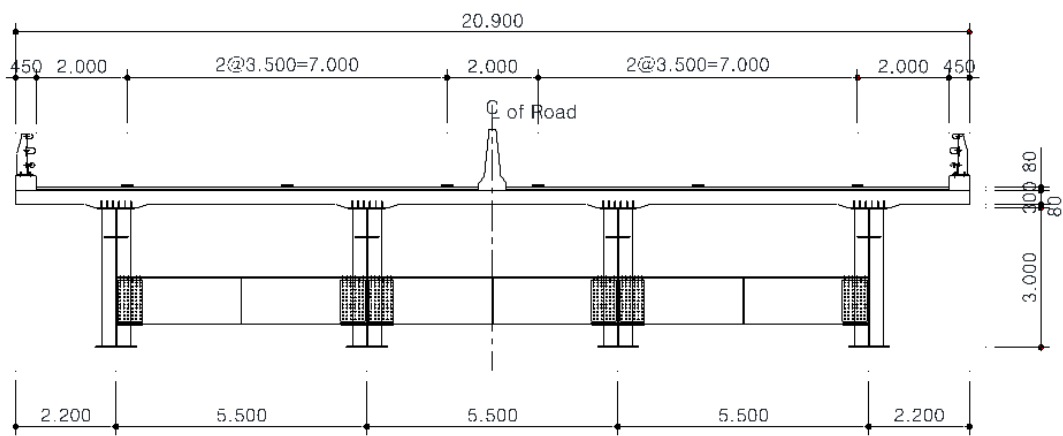
(3) 실구조물 건설을 이용한 CO₂ 배출 검증

본 연구에서는 최소 CO₂ 배출을 위한 최적의 콘크리트 생산공정 및 실측치와의 비교를 위하여 교량 설계를 통한 실구조물 건설을 이용한 CO₂ 배출 검증을 실시하였다. CO₂ 배출량은 단위시멘트량, 물-시멘트 비, 시멘트 대체재료 등의 배합설계와 및 철근량에

따른 변수를 두어 교량 건설 시 발생하는 CO₂ 배출량을 비교하였다.

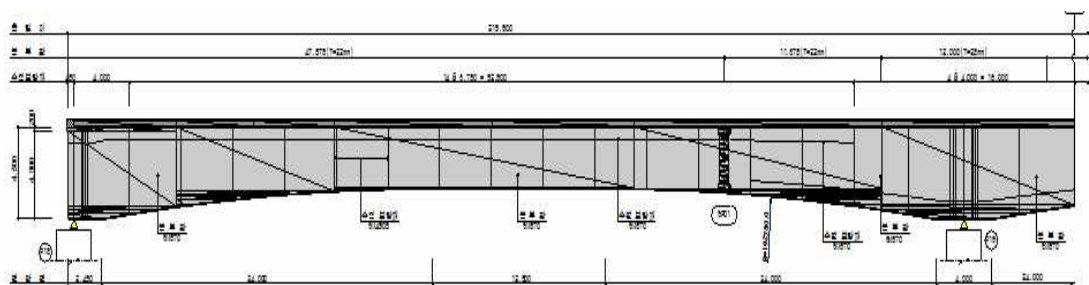


(a) 상부구조 모식도(MIDAS CIVIL 사용)



(b) 횡단면도

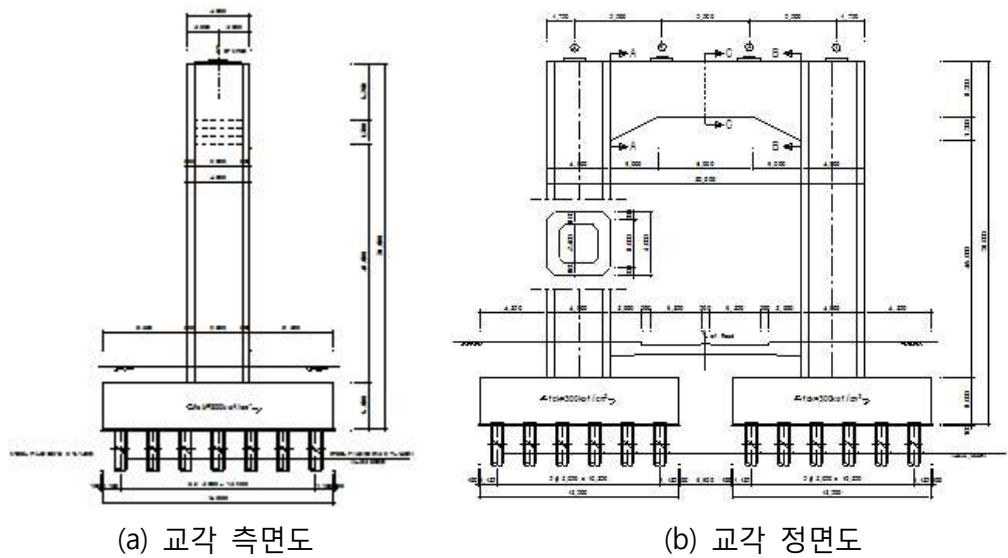
<그림 3.69> 상부구조 모식도 및 횡단면도



<그림 3.70> 상부구조 측면도 및 상부 철근배치도

여기서, 교량의 설계 및 물량산출은 MIDAS CIVIL 활용하여 설계강도 $f_{ck} = 30Mpa$, 폭 20.9 m, 길이 219 m(한 경간 길이: 21.9 m), 교대 및 교각 길이 54 m로 상부구조와 하부구조로 나누어 설계하였다. 설계된 교량의 상부구조 모식도 및 횡단면도는 그림 3.69,

측면도 및 상부 철근배치도는 그림 3.70, 하부구조 측면도 및 정면도를 그림 3.71에 나타내었다.



〈그림 3.71〉 하부구조 측면도 및 정면도

(가) 교량 건설시 사용된 콘크리트 물량 산출

교량 건설시 사용된 콘크리트의 물량 산출을 위하여 상부와 하부구조로 나누어서 산출하였다. 상부구조의 경우 그림 3.66, 3.67에 나타난 바와 같이 슬래브 및 캔틸레버부를 고려하여 1,665 m³의 콘크리트가 사용되었다. 하부구조의 경우 그림 3.70에 나타난 바와 같이 20,420 m³의 콘크리트가 사용되었다. 설계에 사용된 기준 콘크리트 배합설계를 표 3.12에 나타내었다.

[표 3.12] 콘크리트 배합설계

단위: kg/m³

Type	W/B	Water	OPC	PFA	GGBS	Fine aggregate	Coarse aggregate
OPC	0.50	150	300	0	0	772	1,199
10% PFA		150	270	30	0	768	1,192
20% PFA		150	240	60	0	764	1,186
30% PFA		150	260	90	0	743	1,154
10% GGBS		150	270	0	30	771	1,198
20% GGBS		150	240	0	60	771	1,196
30% GGBS		150	210	0	90	770	1,195

40% GGBS		150	180	0	120	769	1,194
50% GGBS		150	150	0	150	768	1,193

(나) 교량 건설시 사용된 철근 물량 산출

교량 건설 시 사용된 철근의 물량 산출을 위하여 상부와 하부구조로 나누어서 산출하였다. 상부구조에 사용된 철근량은 캔틸레버부와 중앙지간부의 상·하면, 내부지점부로 나누어서 산출한 결과, 캔틸레버부 8,683 cm³, 중앙지간부 상면 10,454 cm³, 중앙지간부 하면 8,683 cm³, 내부 지점부 20,999 cm³이며 총 48,819 cm³이 사용하였으며 이는 표 3.13에 나타내었다.

[표 3.13] 상부구조 철근량 및 무게

위치	캔틸레버부	중앙지간부		내부지점부
		상면	하면	
사용철근량(cm ³)	8,683	10,454	8,683	20,999
무게(ton)	6.82	8.21	6.82	16.50

하부구조에 사용된 철근량은 인장철근과 전단철근으로 나누어서 산출한 결과, 인장철근 678,249 cm³, 전단철근 37,1200 cm³이며 총 681,961 cm³로 무게로 환산 시 각각 532.43, 2.91 ton이 사용되었으며, 이는 표 3.14에 나타내었다.

[표 3.14] 하부구조 철근량 및 무게

응력	인장철근	전단철근
사용철근량(cm ³)	678,249	3,712
무게(ton)	532.80	2.92

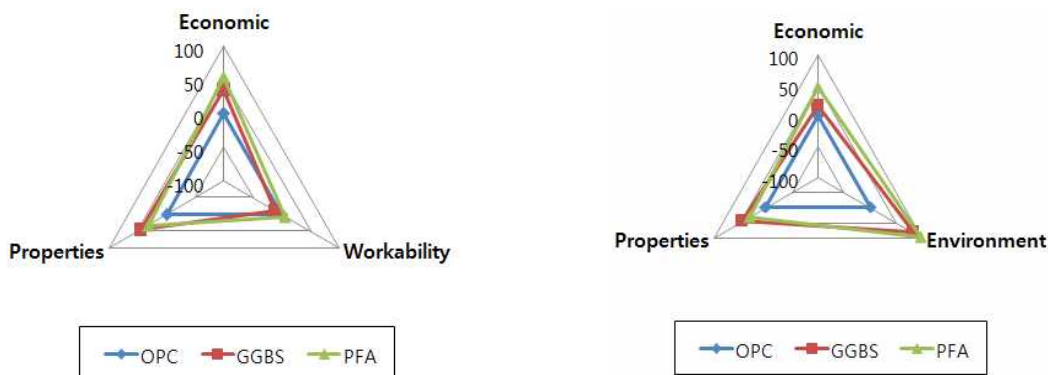
3.5.4 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출저감 연구결과

본 연구에서는 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출 및 방법에 따른 CO₂ 배출 및 3각기법을 통하여 경제성, 공학적성능, 시공성, 환경성을 검증하였고, Web 기반형 database를 바탕으로 CO₂ 배출 모니터링을 실시하였으며, 교량 설계를 통해 실구조물 건설을 이용한 CO₂ 배출 감증을 실시하였다.

(1) 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출 및 3각기법

본 연구에서는 콘크리트의 기본재료인 시멘트 및 포졸란계 혼화재 등의 결합재, 골재, 철근에 대한 CO₂ 배출량을 산정하여 그림 3.69처럼 경제성, 시공성, 공학적성능, 환경성에 관한 3각기법을 실시하였다. 3각기법을 적용하기위한 콘크리트 재료별 단위 CO₂ 배출량 및 산정식을 표 3.11에 나타내었다. 결합재로는 보통포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland cement; OPC), 고로슬래그 미분말 (Ground granulated blast furnace slag; GGBS), 플라이애시 (Pulverised fuel ash; PFA)를 적용하였고, 골재로는 모래, 부순골재, 강자갈을 적용하였으며 철근은 일반철근, 고장력철근, 형강을 적용하여 단위 CO₂ 배출량을 활용하였다.

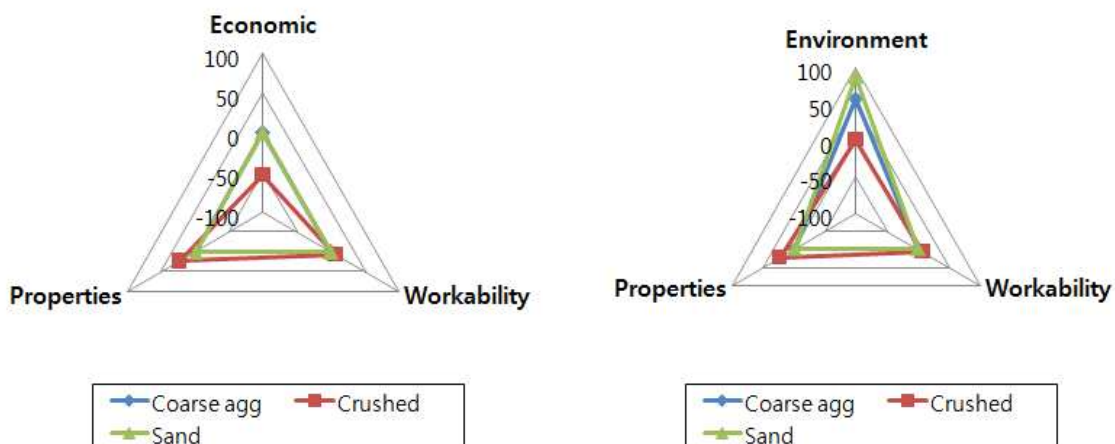
콘크리트 결합재 OPC, GGBS, PFA에 관한 3각기법 검증결과를 그림 3.72에 나타내었다. 경제성, 시공성, 공학적성능을 비교한 결과 GGBS, PFA의 경우 OPC와 비교하여 시공성은 큰 차이가 없었으나, 경제성 및 공학적 성능이 우수한 것으로 나타났다. 또한 환경영향성은 OPC와 비교하여 GGBS 82%, PFA 96% 향상된 것으로 나타났다. 따라서 GGBS, PFA는 OPC와 시공성이 동일하게 유지되는 범위내에서 경제성, 환경성, 그리고 일부 문제점이 있지만 공학적성능까지 확보할 수 있는 것으로 판단된다.



<그림 3.72> 결합재에 관한 3각기법 검증

GGBS, PFA의 치환에 따라 콘크리트에 관한 3각기법 검증결과를 그림 3.73에 나타내었다. 시공성은 거의 동일하였으나, 비용에 따른 경제성 및 장기강도와 같은 공학적 성능은 OPC < 30% PFA < 60% GGBS 순으로 나타났다. CO₂ 배출량에 대한 환경성은 60% GGBS < 30% PFA < OPC 순으로 확인됨에 따라 공학적성능 및 환경성 측면에서 포졸란계 혼화재를 첨가한 시험체가 우수함을 알 수 있다. 60% GGBS의 경우 OPC와 비교하여 경제성은 13%, 공학적성능은 22%, 환경성은 33% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 30% PFA는 OPC와 비교하여 경제성은 17%, 공학적성능은 11%, 환경성은 20% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 경제성 측면에서 30% PFA가 60% GGBS보다 우수한 것으로 나타났으나 이는 정제과정 및 혼입율에 따라 크게 변할 것으로 예상되며 기본적으로 OPC와 비교해서 60% GGBS 경제적인 것으로 판단된다.

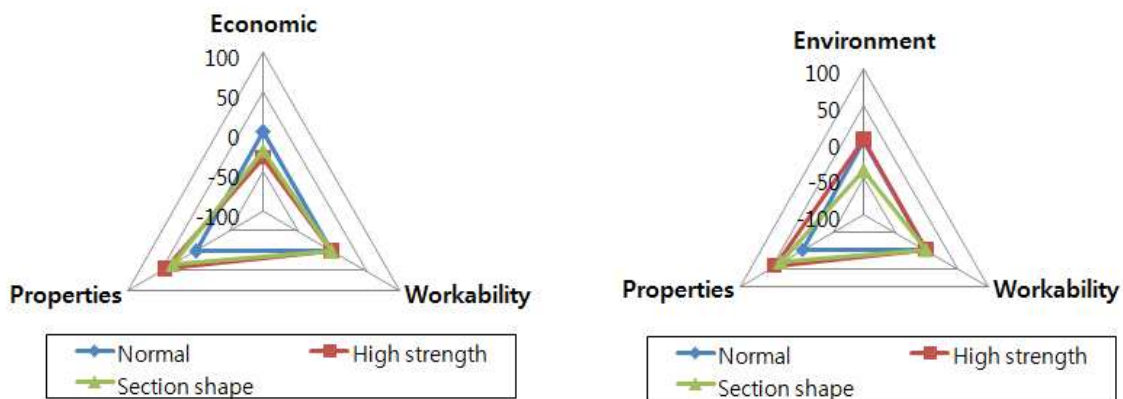
콘크리트용 골재 중 모래, 부순골재, 강자갈에 관한 3각기법 검증결과를 그림 3.70에 나타내었다. 시공성의 경우 모래, 부순골재, 강자갈은 거의 동일하였다. 제조비용에 따른 경제성은 부순골재의 경우 모래 및 강자갈에 비하여 낮은 것으로 나타났다. 이는 부순골재 제조 시 파쇄 및 분체 시 설비에 따른 화석연료 및 전력의 사용으로 경제성 및 환경성에 대한 효율성은 낮은 것으로 판단된다. 그러나 재료적인 밀도와 시멘트 경화체의 강도 및 내구성에 기인한 공학적 성능은 천연골재에 비해 높은 것으로 나타났다. 골재는 콘크리트 용적에 70-80%를 차지하기 때문에 콘크리트 제조 시 골재의 밀도가 대단히 중요하다. 따라서 부순골재의 경우 미립자가 모래 및 강자갈에 비해 많으므로 상대적으로 공기량이 줄어들기 때문에 공학적 성능은 천연골재에 비해 우수한 것으로 판단된다.



<그림 3.73> 골재에 관한 3각기법 검증

일반철근, 고장력철근, 형강에 관한 3각기법 검증결과를 그림 3.74에 나타내었다. 철

근의 경우 단면형태 및 철근의 강도에 따라 일반철근, 고장력철근, 형강로 나뉘며 주로 건축공사에서 고장력철근이 사용되고, 토목공사는 일반철근 및 형강이 사용된다. 일반철근 및 고장력철근의 경우 항복강도는 서로 다르지만 같은 직경의 경우 철근의 단위중량은 모두 동일하므로 시공성은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 다른 직경의 경우 고장력철근 및 형강은 일반 철근에 비해 항복강도가 높으므로 공학적성능은 우수하나, 철근 제조 시 재료의 투입량 및 설비에 따른 전력량에 따라 일반철근이 경제성 및 환경성에 대해 효율성이 높은 것으로 나타났다.



<그림 3.74> 철근에 관한 3각기법 검증

(2) CO₂ 배출 패키지의 구성

본 프로그램은 Web 기반형 프로그램으로 콘크리트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량에 대하여 시멘트 및 콘크리트에 대하여 통합적인 시스템 및 네트워크가 운영되며, mc.cdcp.kr에서 사용 가능하다. 프로그램의 명칭은 “Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Concrete Mix Design” 으로 "콘크리트 배합설계 시 배출되는 CO₂ 배출량 산정" 프로그램이다.

주요기능은 다음과 같다.

- W/B, OPC, PFA, GGBS, 잔골재, 굵은골재에 대한 배합설계 입력
- 시멘트 종류별 단위면적(m³)에 대한 CO₂ 배출량
- W/B에 대한 CO₂ 배출량
- 혼화재 사용에 대한 CO₂ 배출량
- 운송에 대한 CO₂ 배출량

시스템 운영을 위한 메뉴 아이콘은 Home, 배합설계 (관리), CO₂ 배출량, 모델 설정, About, Contact, Log-in, Log-out으로 구성되어 있다.

콘크리트 제조 시 CO₂ 배출량 산정을 위한 시스템 운영 및 CO₂ 배출량에 대한 결과는 다음과 같다. 선행연구를 바탕으로 통계적 추론을 통해 산정된 단위 CO₂ 배출량에 기인한 총 6종의 보통포틀랜드 시멘트를 선택한다.



<그림 3.75> 시멘트 설정

W/B, OPC, PFA, GGBS, 잔골재, 굵은골재에 대한 배합설계에 대하여 저장된 설계를 선택하거나 새로운 배합설계를 입력한다.

시멘트 6종에 대한 동일 배합에 시멘트, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량을 표기하였다. OPC-A의 경우 시멘트, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량은 각각 252.60, 11.67, 138.46 ton으로, 총합계 402.73 ton으로 나타났다.

Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Concrete Mix Design

Home 배합설계 CO2 배출량 모양 설정 About Contact Logout (admin)

Manage Resolves

You may optionally enter a comparison operator (<, <=, >, >=, <=, >= or =) at the beginning of each of your search values to specify how the comparison should be done.

Advanced Search

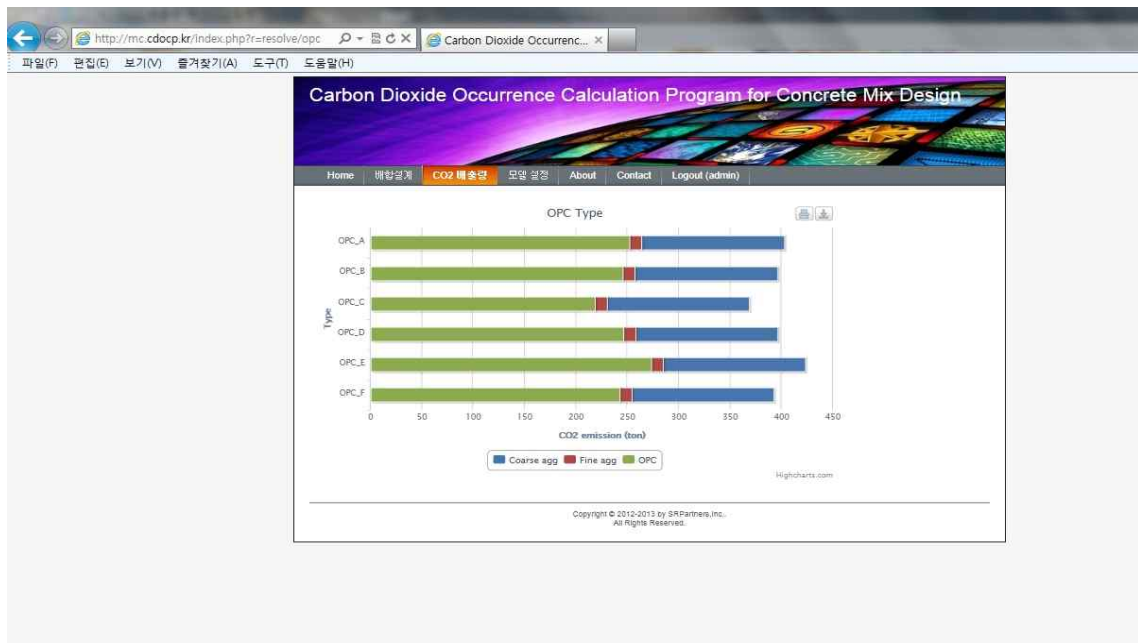
Displaying 1-10 of 54 results.

Name	Kg Aggr	Kg Fine Aggr	Kg Coarse Aggr	Co2 Opc	Co2 Pla	Co2 Ogbs	Co2 Fine Aggr	Co2 Coarse Aggr	Co2 Total	Co2 Ton Total
0.3_300_OPC_A	813.85	325.54	488.31	252,800.00	0.00	0.00	11,673.62	138,460.14	402,733.75	403
0.3_350_OPC_A	782.82	313.13	469.89	294,700.00	0.00	0.00	11,222.54	133,180.76	439,103.30	439
0.3_400_OPC_A	751.79	300.72	451.08	336,800.00	0.00	0.00	10,777.76	127,902.45	475,480.21	475
0.35_300_OPC_A	798.85	319.54	479.31	252,800.00	0.00	0.00	11,452.28	135,908.19	399,890.47	400
0.35_350_OPC_A	765.32	306.13	459.19	294,700.00	0.00	0.00	10,971.86	130,204.02	435,875.88	436
0.35_400_OPC_A	731.79	292.72	436.08	336,800.00	0.00	0.00	10,491.04	124,496.85	471,790.89	472
0.4_300_OPC_A	783.85	313.54	470.31	252,800.00	0.00	0.00	11,237.24	133,956.24	397,193.48	397
0.4_350_OPC_A	747.82	296.13	448.89	294,700.00	0.00	0.00	10,720.78	127,226.21	432,646.99	433
0.4_400_OPC_A	711.79	284.72	427.08	336,800.00	0.00	0.00	10,204.32	121,097.25	458,101.57	458
0.3_300_OPC_B	813.85	325.54	488.31	248,000.00	0.00	0.00	11,673.62	136,450.14	396,133.78	396

Go to page: < Previous 1 2 3 4 5 6 Next >

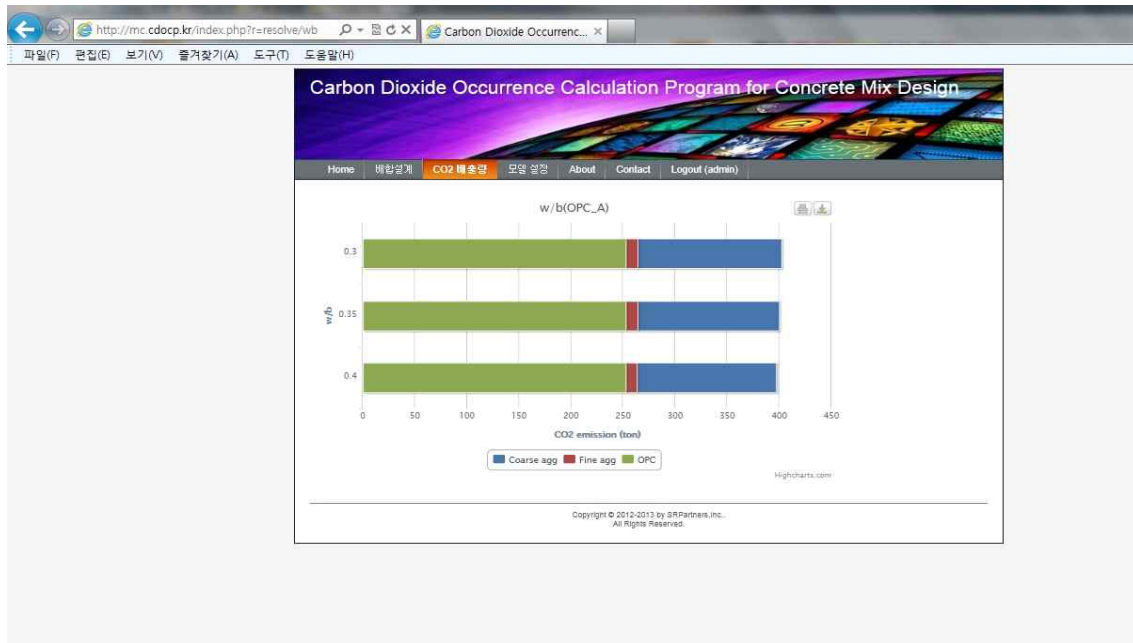
Copyright © 2012-2013 by SRPartners, Inc. All Rights Reserved.

<그림 3.76> 배합설계



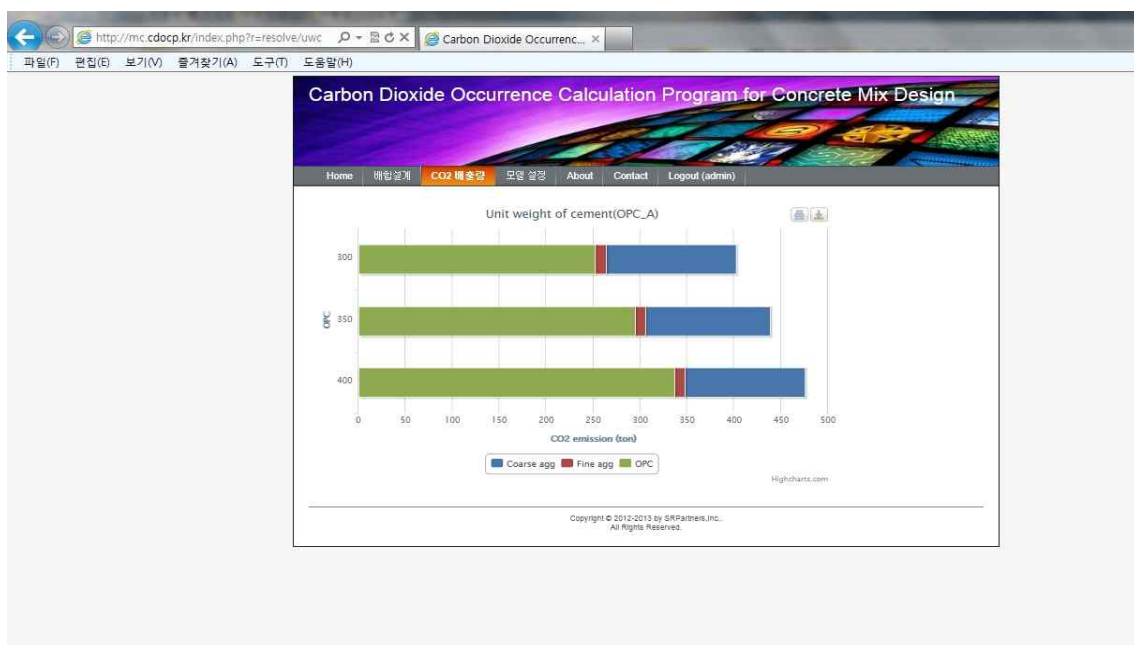
<그림 3.77> 시멘트에 따른 CO₂ 배출량

W/B 0.3, 0.35, 0.4에 대하여 시멘트, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량을 표기하였다. W/B 0.3의 경우 시멘트, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량은 각각 252.60, 11.67, 138.46 ton으로, 총합계 402.73 ton으로 나타났다.



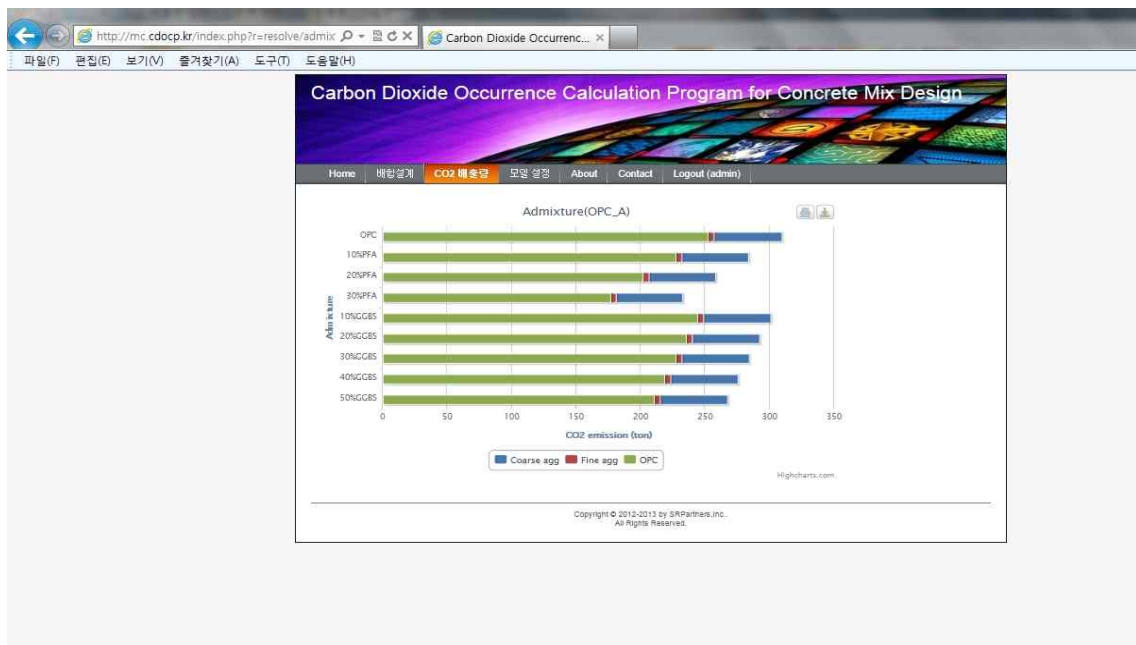
<그림 3.78> W/B에 따른 CO₂ 배출량

단위시멘트량 300, 350, 400에 대하여 시멘트, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량을 표기하였다. 단위시멘트량 400의 경우 시멘트, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량은 각각 336.80, 10.78, 127.90 ton으로, 총합계 475.48 ton으로 나타났다.

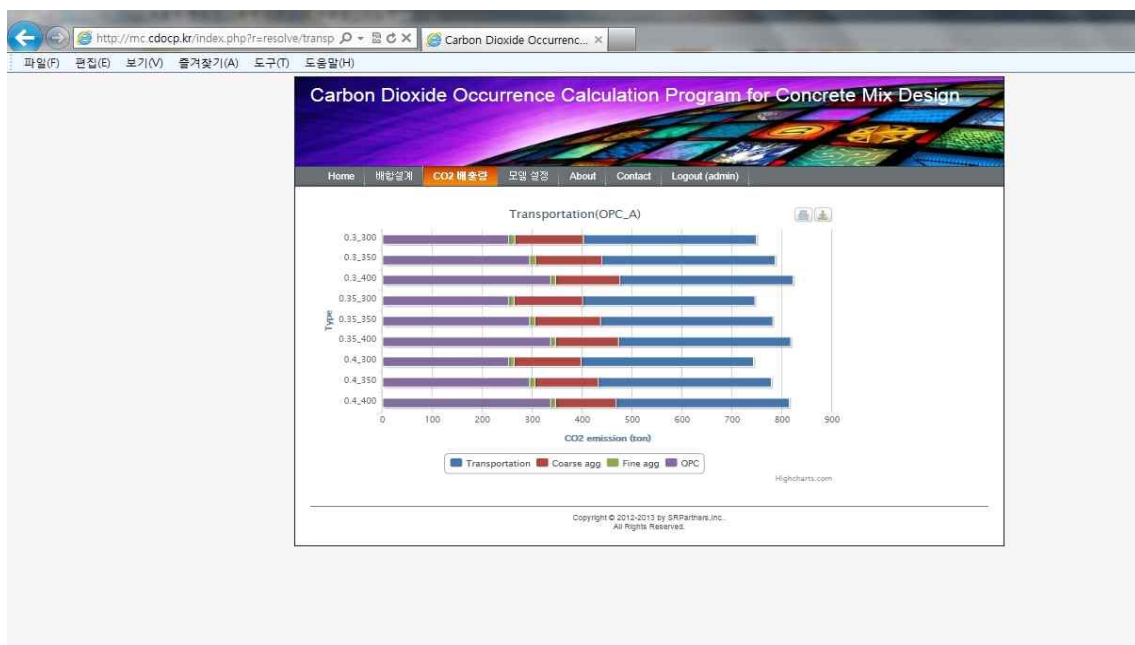


<그림 3.79> 단위시멘트량에 따른 CO₂ 배출량

OPC, PFA, GGBS등 혼화재 사용 및 치환율에 대하여 결합재, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량을 표기하였다. 50% GGBS의 경우 결합재, 잔골재, 굵은골재에 대한 CO₂ 배출량은 각각 201.50, 4.55, 52.17 ton으로, 총합계 258.22 ton으로 나타났다.



<그림 3.80> 혼화재 사용에 따른 CO₂ 배출량



<그림 3.81> 운송에 따른 CO₂ 배출량

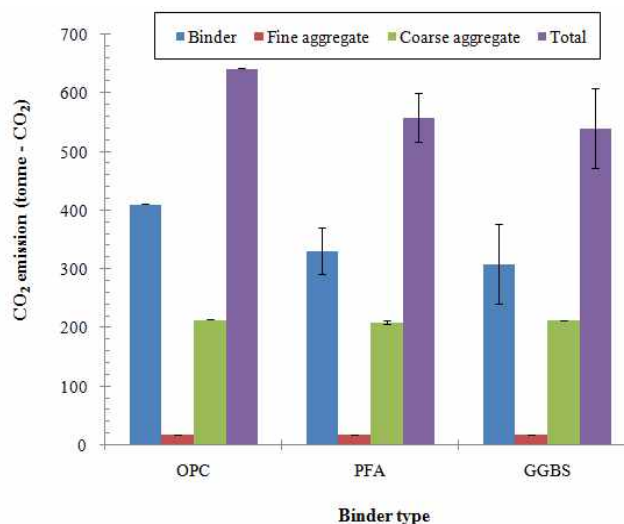
운송 및 콘크리트 제조에 대한 전체적인 CO₂ 배출량을 표기하였다. W/B 0.4, 단위 시멘트량 400의 경우 결합재, 잔골재, 굵은골재, 운송에 대한 CO₂ 배출량은 각각 336.80, 10.20, 121.10, 346.00 ton으로, 총합계 814.10 ton으로 나타났다.

(3) 실구조물 CO₂ 배출량 계산

본 연구에서는 물-결합재비 0.5, 단위시멘트량 300kg/m³을 기준으로하여 대표적인 포졸란계 혼화재인 GGBS, PFA의 치환율에 따라 배합설계를 하였다. 교량설계 시의 설계 강도를 고려하여 PFA의 치환율은 10, 20, 30%로 GGBS는 10, 20, 30, 40, 50%로 적용하였다. 선행연구결과를 바탕으로 단위 CO₂ 배출량은 OPC: 0.822, PFA: 0.027, GGBS: 0.143, 잔골재: 0.014, 굵은골재: 0.107, 철근: 3.5 CO₂ -ton/ton을 적용하였다.

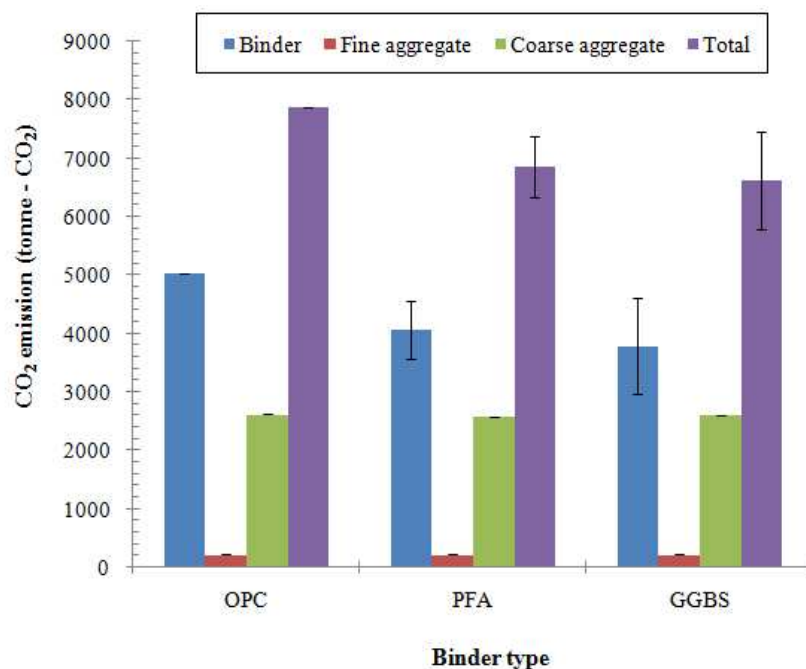
(가) 교량 건설 시 사용된 콘크리트에 대한 CO₂ 배출

교량 건설 시 사용된 콘크리트의 물량 산출을 바탕으로 상부와 하부구조로 나누어서 CO₂ 배출량을 정량화하였다. 상부구조의 경우 슬래브 및 캔틸레버부에 대하여 1,665 m³의 콘크리트가 사용되었다. 상부구조 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량을 그림 3.82에 나타내었다. 전반적으로 결합재를 제외한 잔골재 및 굵은골재의 CO₂ 배출량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. OPC 콘크리트의 경우 전체 CO₂ 배출량은 624 ton으로 나타났다. PFA 콘크리트는 10, 20, 30%의 치환율에 따라 CO₂ 배출량은 601, 560, 514 ton으로 나타났다. GGBS 콘크리트는 10, 20, 30, 40, 50%치환율에 따라 CO₂ 배출량은 608, 573, 539, 505, 471 ton으로 나타났다.



<그림 3.82> 상부구조 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량

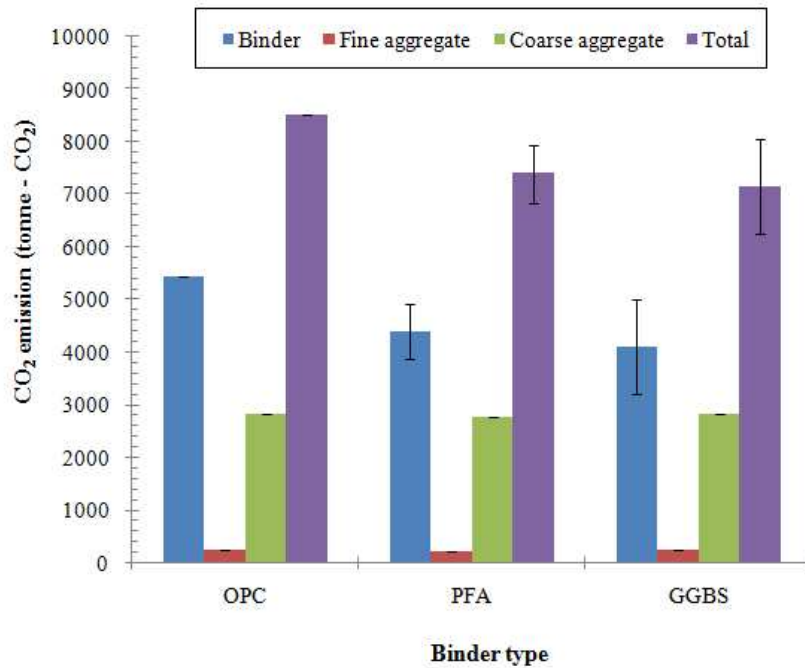
하부구조의 경우 20,420 m³의 콘크리트가 사용되었다. 하부구조 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량을 그림 3.83에 나타내었다. 상부구조와 마찬가지로 결합재를 제외한 잔골재 및 굵은골재의 CO₂ 배출량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. OPC 콘크리트의 경우 전체 CO₂ 배출량은 7,875 ton으로 나타났다. PFA 콘크리트는 10, 20, 30%의 치환율에 따라 CO₂ 배출량은 7,372, 6,870, 6,307 ton으로 나타났다. GGBS 콘크리트는 10, 20, 30, 40, 50%치환율에 따라 CO₂ 배출량은 7,456, 7,038, 6,619, 6,200, 5,782 ton으로 나타났다.



<그림 3.83> 하부구조 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량

상부구조 및 하부구조 전체 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량을 그림 3.84에 나타내었다. OPC 콘크리트의 경우 전체 CO₂ 배출량은 8,517 ton으로 나타났다. PFA 콘크리트는 10, 20, 30%의 치환율에 따라 CO₂ 배출량은 7,372, 6,870, 6,307 ton으로 나타났다. GGBS 콘크리트는 10, 20, 30, 40, 50%치환율에 따라 CO₂ 배출량은 7,456, 7,038, 6,619, 6,200, 5,782 ton으로 나타났다.

따라서 혼화재 치환에 따른 CO₂ 배출량은 50% GGBS < 30% PFA < OPC 순으로 확인됨에 따라 강성 및 환경영향성 측면에서 포졸란계 혼화재를 첨가한 시험체가 우수함을 알 수 있다. 50% GGBS의 경우 CO₂ 배출량은 OPC의 73.3%, 30% PFA의 CO₂ 배출량은 OPC의 80.1%로 나타났다.



<그림 3.84> 전체 콘크리트의 CO₂ 배출량

(나) 교량 건설 시 사용된 철근에 대한 CO₂ 배출

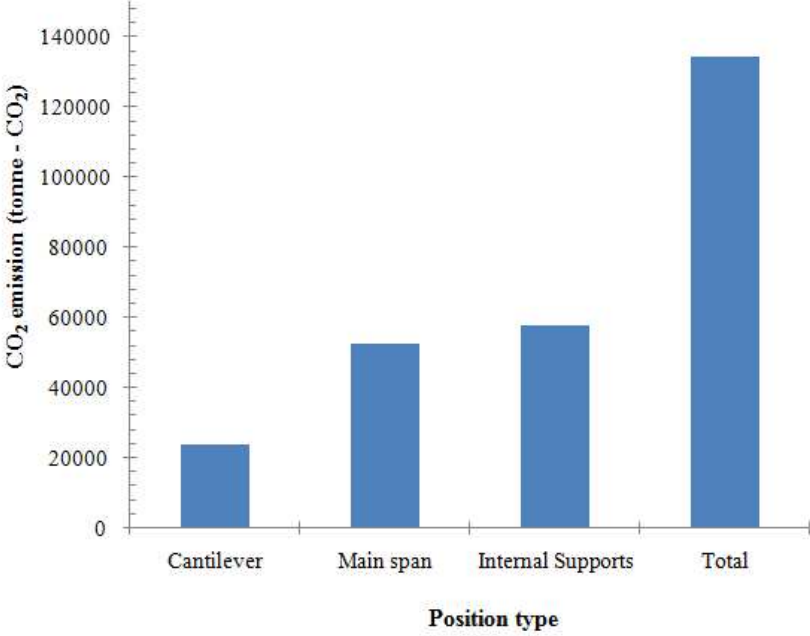
하부구조에 사용된 철근량은 인장철근과 전단철근으로 나누어서 산출한 결과, 인장철근 678,249 cm³, 전단철근 37,120 0cm³이며 총 681,961 cm³로 무게로 환산 시 각각 532.43, 2.91 ton이 사용되었다. 교량 건설 시 사용된 철근의 물량 산출을 바탕으로 상부와 하부구조로 나누어서 CO₂ 배출량을 정량화하였다.

상부구조의 경우 캔틸레버부 6.82 ton, 중앙지간부 15.03 ton, 내부지점부 16.50 ton의 철근이 사용되었다. 상부구조 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량을 그림 3.82에 나타내었다. 상부구조 콘크리트의 위치별 CO₂ 배출량은 캔틸레버부 23,873, 52,615, 57,735 ton으로 전체 CO₂ 배출량은 134,223 ton으로 나타났다.

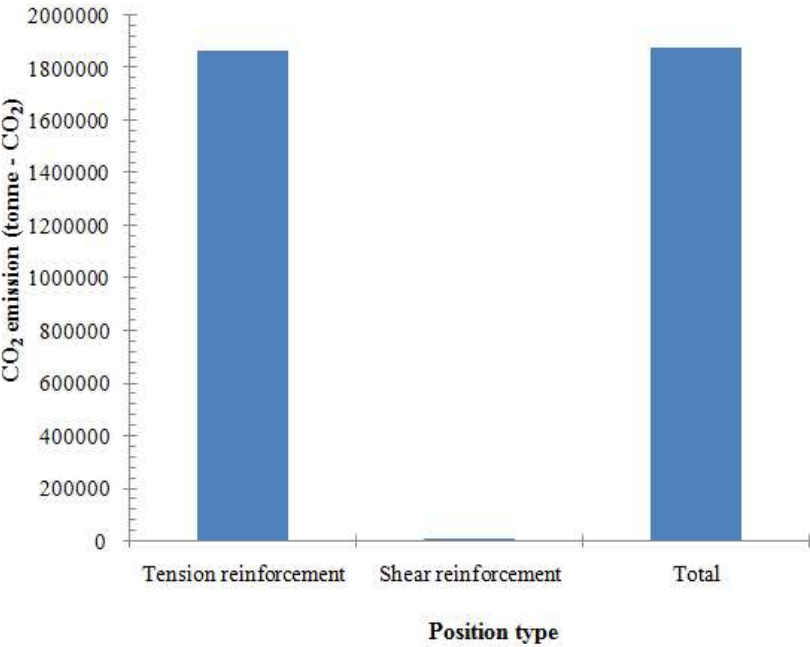
하부구조의 경우 인장철근 532.80 ton, 전단철근 2.92 ton이 사용되었다. 하부구조 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량을 그림 3.83에 나타내었다. 하부구조 콘크리트의 CO₂ 배출량은 인장철근 1,864,800, 전단철근 10,118 ton으로 전체 CO₂ 배출량은 18,749,183 ton으로 나타났다.

교량 설계 시 철근에 의한 CO₂ 배출량이 가장 높았으나 배합설계에서도 철근 소모량은 큰 차이를 보이지 않으므로, 실질적으로 CO₂ 배출을 감소시킬 수 있는 방안은 결합재의 사용에 있는 것으로 나타났다. OPC와 비교하여 CO₂ 배출량은 30% PFA는 19.1%,

50% GGBS는 26.7% 감소됨에 따라 50% GGBS의 사용이 설계강도를 유지하는 범위 내에서 CO₂ 배출 저감에 가장 유리하다 할 수 있다.



<그림 3.85> 상부구조 철근량에 대한 CO₂ 배출량



<그림 3.86> 하부구조 철근량에 대한 CO₂ 배출량

3.5.5 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출저감 패키지 적용성

본 연구에서는 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출 및 방법에 따른 CO₂ 배출 및 3각기법을 통하여 경제성, 공학적성능, 시공성, 환경성을 검증하였고, Web 기반형 database를 바탕으로 CO₂ 배출 모니터링을 실시하였으며, 교량 설계를 통해 실구조물 건설을 이용한 CO₂ 배출 감증을 실시하였다. 이에대한 세부적인 결론은 다음과 같다.

(1) GGBS, PFA의 치환에 따라 콘크리트에 관한 3각기법 검증결과 시공성은 거의 동일하였으나, 비용에 따른 경제성 및 장기강도와 같은 공학적성능 및 환경성은 GGBS 치환 시 가장 효율성인 높은 것으로 나타났다. 60% GGBS의 경우 OPC와 비교하여 경제성은 13%, 공학적성능은 22%, 환경성은 33% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 30% PFA는 OPC와 비교하여 경제성은 17%, 공학적성능은 11%, 환경성은 20% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 경제성 측면에서 30% PFA가 60% GGBS보다 우수하였으나 이는 정제과정 및 혼입율에 따라 크게 변할 것으로 예상되며 기본적으로 OPC와 비교해서 60% GGBS 경제적인 것으로 판단된다.

(2) Web 기반형 (mc.cdopc.kr) CO₂ 배출에 관한 통합형 프로그램 “Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Concrete Mix Design”을 통하여 콘크리트 제조 시 CO₂ 배출량에 관한 모니터링을 한 결과 시멘트 및 콘크리트에 대하여 통합적인 시스템 및 네트워크가 정상적으로 운영됨을 확인하였다.

(3) 교량 설계 시 철근에 의한 CO₂ 배출량이 가장 높았으나 배합설계에서도 철근 소모량은 큰 차이를 보이지 않으므로, 실질적으로 CO₂ 배출을 감소시킬 수 있는 방안은 결합재의 사용에 있는 것으로 나타났다. OPC와 비교하여 CO₂ 배출량은 30% PFA는 19.1%, 50% GGBS는 26.7% 감소됨에 따라 50% GGBS의 사용이 설계강도를 유지하는 범위 내에서 CO₂ 배출 저감에 가장 유리하다 할 수 있다.

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

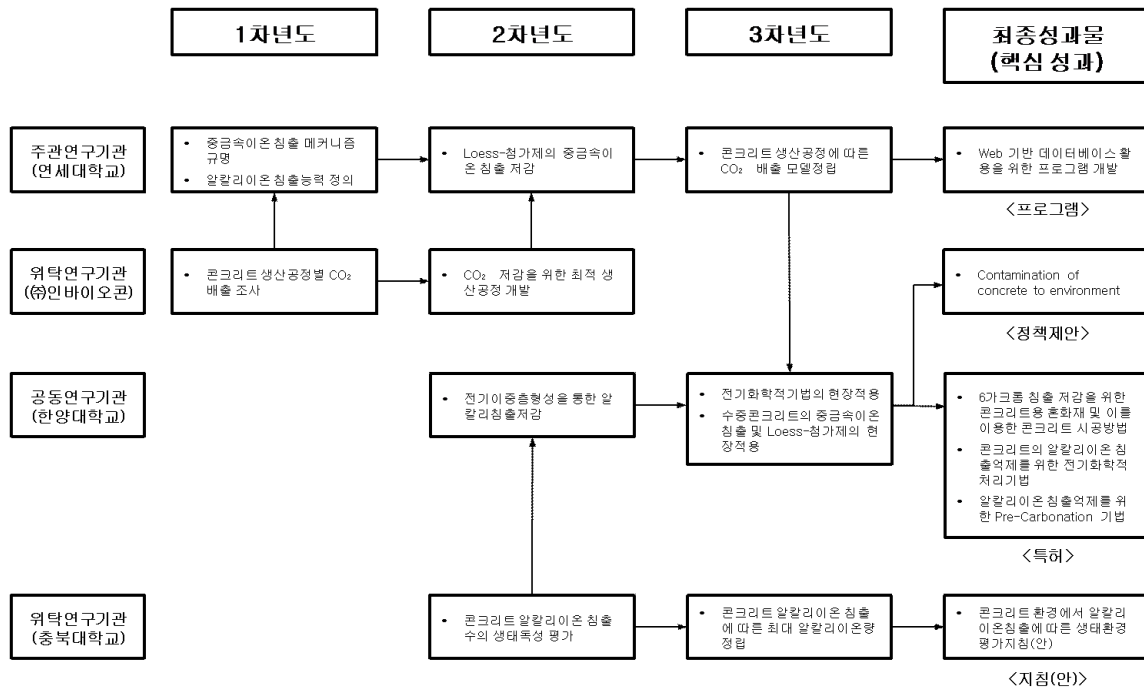
4.1 연구개발목표의 달성도

4.2 관련분야 기술발전 기여도

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

4.1 연구개발목표의 달성도

본 연구의 연차별 연구내용 및 핵심성과에 대한 성과로드맵을 그림 4.1에 나타내었다.



<그림 4.1> 성과로드맵

본연구의 정성적 연구개발성과를 표 4.1에 나타내었으며, 성과목록을 정리하였다.

[표 4.1] 정성적 연구개발성과

핵심성과	성과지표	성과결과
수중 콘크리트의 중금속이온 침출 비교조사, 첨가제의 침출억제 및 현장적용	현장조사를 통한 중금속이온 침출, 침적, 자정에 따른 중금속이온량 산정	수서환경에서의 6가크롬 침출량 측정 - 콘크리트: 166 mg/kg-cement - 모르타르: 142 mg/kg-cement
	Loess-첨가제의 현장적용 및 효율성평가	해양환경에서의 6가크롬 침출량 측정 (중크롬산칼륨 1,000 mg 함유) ◆ OPC - Befere: 932 mg/kg-cement - Leaching: 698 mg/kg-cement ◆ Loess - Befere: 322 mg/kg-cement - Leaching: 224 mg/kg-cement ◆ Ternary - Befere: 345 mg/kg-cement - Leaching: 271 mg/kg-cement
	중금속 침출에 관한 매뉴얼 및 국내/국제표준 Committee Draft 제정	시멘트 및 시멘트 경화체의 6가크롬, 알칼리 이온 침출법 국제표준 상정, - New Work Item Proposal(NWIP) 결성 - ISO TC 71 SC8 (국제표준화기구, 콘크리트 환경 관련위원회)
생태보존을 위한 최대 알칼리이온 침출량에 대한 정의 및 현장적용	하천, 해양환경에서의 콘크리트 구조물의 알칼리이온의 침출량 조사	수서환경에서의 알칼리이온 침출량 측정 (2-14mm pH프로파일) - Befere: pH 7.07 After: pH 12.54
	전기화학적 기법의 현장적용	수서환경에서의 알칼리이온 침출량 측정 (침출한계깊이 6mm) ◆ OPC - Befere: pH 7.25 After: pH 12.60 ◆ GGBS - Befere: pH 7.14 After: pH 12.36 ◆ Loess - Befere: pH 7.22 After: pH 12.43
	알칼리이온 침출에 따른 생태환경영향성에 관한 지침제정	콘크리트 환경에서 알칼리이온 침출에 따른 생태환경 평가 지침(안) 제안 콘크리트 알칼리 침출수의 TU 허용 기준은 2 이하가 적절할 것으로 제시
콘크리트 생산공정에 따른 CO ₂ 발생량에 관한 매뉴얼 제정	최소 CO ₂ 배출을 위한 최적의 콘크리트 생산공정에 관한 프로토콜 정립	시멘트 제조, 콘크리트 배합, 건설재료 생산, 운송에 대한 CO ₂ 배출 최소화를 위한 최적 공정 제시
	콘크리트 생산방식에 따른 예상 CO ₂ 배출량에 관한 모델정립	Web 기반형 데이터베이스 (CDOCP4UC: Carbon Dioxide Occurrence Calculation Program for Unit Cement) 구축

본연구의 정량적 연구개발성과를 표 4.2에 나타내었으며, 성과목록을 정리하였다.

[표 4.2] 정량적 연구개발성과

성과내용	달성건수
국제표준안 (Ad-hoc group 결성)	1
국제논문 (SCI, SCIE)	4
학술지논문	5
국제학술발표	5
국내학술발표	8
특허출원	3
KS 및 지침	4
소프트웨어(S/W)	1
현장적용	4

국제표준

- Ki Yong Ann (2012) ISO TC 71 SC8: Ad-hoc group Chair, Contamination of Concrete to environment, The 19th Plenary meeting for TC 71, San Jose, Costa Rica.

국제논문 (SCI, SCIE)

- F.H. Cui., I.H. Song. and M.I. Kim. (2012) Simultaneous Organic Removal and Nitrification Using Calcium Dosed Aerobic Granular Sludge During SBR Start-up, Advanced Science Letters, Vol. 19, No. 11, pp. 3400-3404.
- J.W. Her., N.G. Lim., S.W. Jung. and K.Y. Ann. (2012) Properties of cement-free concrete cast by finely grained nanoslag with the NaOH-based alkali activator, Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 557-563.
- J.P. Hwang., H.B. Shim., S.Y. Lim. and K.Y. Ann. (2013) Enhancing the durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 1, pp.155-163.
- J.P. Hwang., M.S. Jung., C.K. Lee., S.H. Jin. and K.Y. Ann. (2014) Risk of environmental contamination arising from concrete structures, Part 1: CO₂ emission, KSCE Journal of Civil Engineering, Accepted.
- M.S. Jung., J.P. Hwang., J.H. Kim. and K.Y. Ann. (2014) Leaching Capacity and Rate of Alkali Ions from a Concrete Depending on Concrete Mix Design, Part 2: alkali ions

leaching, KSCE Journal of Civil Engineering, Accepted.

- M.S. Jung., J.P. Hwang., J.H. Kim. and K.Y. Ann. (2014) Leaching Capacity Hexavalent Chromium in the Cement Hydration, Part 3: hexavalent chromium ions leaching, KSCE Journal of Civil Engineering, Accepted.
- M.S. Jung. and K.Y. Ann. (2014) Determination of hexavalent chrome in cement, in preparation.
- J.P. Hwang. and K.Y. Ann. (2014) Research on chloride ion leaching from concrete depending on current amount, in preparation.
- J.P. Hwang., M.S. Jung., S.W. Pack., K.Y. ann. and D.G. Heo. (2012) Benefits of pozzolanic materials for Portland cement in reducing the CO₂ emission, Advanced Science Letters, Accepted.
- K.Y. Ann., H.B. Shim. and M.S. Jung., (2012) Rate of alkali leaching from a concrete substrate depending on concrete mix, International Conference on Agricultural, Journal of Nano-Bio Materials, Accepted.
- J.H. Kim., M.S. Jung and K.Y. Ann. (2012) Resistance of calcium aluminate cement to steel corrosion in concrete, International Conference on Agricultural, Advanced Science Letters, Accepted.
- K.Y. Ann. and M.S. Jung., (2012) Immobilisation capacity of cement hydration against the hexavalent chromium, International Conference on Agricultural, Journal of Nano-Bio Materials, Accepted.

학술지논문

- J.B. Choi., S.M. Bae., T.Y. Shin., K.Y. Ann. and S.D. Woo. (2013) Evaluation of Daphnia magna for the Ecotoxicity Assessment of Alkali Leachate from Concrete, International Journal of Industrial Entomology, Vol. 26, No. 1, pp.41-46.
- K.Y. Ann., J.H. Kim. and M.S. Jung. (2013) Electrochemical treatment to mitigate alkali leaching from concrete to an aquatic environment, Applied Mechanics and Materials, Vol. 316-317, pp. 41-46.
- 김상호, 황준필 (2013) 시멘트 생산과정에 따른 CaO 함량과 CO₂ 의 발생량, 한국콘크리트 학회. Vol. 25, No. 4, pp.365-370.
- 심현보, 황준필, 안기용 (2014) 시멘트 경화체의 알칼리이온 침출능 및 침출속도, 한국구조물진단유지관리공학회, Vol.18, No. 1, pp.111-118.
- 정민선, 황준필, 홍성인, 안기용 (2014) 시멘트의 수화에 따른 6가 크롬의 고정화 특성, 한국구조물진단유지관리공학회, Vol. 17, No. 6, pp.088-094.
- 전기화학적 처리기법을 통한 콘크리트 알칼리이온 침출억제 효과 (2013), 한국구조물진단유지관리공학회, Submitted.
- 삼각기법에 따른 콘크리트의 CO₂ 배출량 평가 (2013), 한국구조물진단유지관리공학회, Submitted.

국제학술발표

- K.Y. Ann, J.H. Kim and M.S. Jung (2013) Electrochemical treatment to mitigate alkali leaching from concrete to an aquatic environment, International Conference on Energy Engineering and Environmental Engineering, ICEEEE 2013, Hangzhou, China, CD Rom.
- K.Y. Ann, M.S. Jung, C.-G. Cho and C.-G. Lee (2012) Leaching out of Hexavalent Chromium from Concrete in a Liquid Environment, The 5th International Conference of Asian Concrete Federation, ACF 2012, Pattaya, Thailand, CD Rom.
- J.H. Kim, M.S. Jung, M.I. Kim and K.Y. Ann (2012) Rate of Alkali Leaching from a Concrete Substrate Depending on Concrete Mix, The 5th International Conference of Asian Concrete Federation, ACF 2012, Pattaya, Thailand, CD Rom.
- J. Kim, S.Y. Song, J.W. Park and K.Y. Ann (2012) Effect of Calcium Aluminate Cement in Mitigating the Corrosion of steel in Concrete, The 5th International Conference of Asian Concrete Federation, ACF 2012, Pattaya, Thailand, CD Rom.
- J.P. Hwang, S.H. Kim, K.S. Park and S.H. Jin (2012) The influence of CaO in Cement oxide on the emission of CO₂ gas in the process of cement manufacture, The 5th International Conference of Asian Concrete Federation, ACF 2012, Pattaya, Thailand, CD Rom.

국내학술발표

- 황준필, 김상호 (2012) 콘크리트 배합설계에 따른 이산화탄소 배출 특성, 한국콘크리트학회 2012 가을 학술대회 논문집.
- 정민선, 안기용, 황준필 (2012) 콘크리트의 알칼리이온 침출에 따른 생태독성평가, 한국콘크리트학회 2012 가을 학술대회 논문집.
- 전상혁, 홍성인, 박준우, 안기용 (2013) 전기방식법에 의한 철근콘크리트의 부착강도에 관한 연구, 한국구조물진단유지관리공학회 2013년 봄 학술발표회 논문집, Vol.17, No.1, pp. 548~550.
- 김재환, 황준필, 정민선, 안기용 (2013) 부식 측정방법에 따른 알루미나 시멘트 콘크리트의 철근 부식 저항성 평가, 한국구조물진단유지관리공학회 2013년 봄 학술발표회 논문집, Vol.17, No.1, pp. 580~583.
- 김재환, 정민선, 황준필, 안기용 (2013) 알루미나 시멘트 콘크리트 염분이동 특성, 한국구조물진단유지관리공학회 2013년 봄 학술발표회 논문집, Vol.17, No.1, pp. 589~591.
- 정민선, 황준필, 전상혁, 안기용 (2013) Loess 첨가제 사용에 따른 6가크롬 고정화 특성, 한국콘크리트학회 2013 봄 학술대회 논문집.
- 황준필, 김재환, 전상혁, 안기용 (2013) 전기화학적 기법을 통한 콘크리트의 알칼리이온 침출 저감, 한국콘크리트학회 2013 봄 학술대회 논문집.
- 황준필, 김재환, 홍성인, 안기용 (2013) 콘크리트 배합설계에 따른 환경성 및 경제성 평가, 한국콘크리트학회 2013 봄 학술대회 논문집.

특허출원

- 안기용, 정민선, 황준필 (2013) 6가크롬 침출 저감을 위한 콘크리트용 혼화재 및 이를 이용한 콘크리트의 시공방법, 10-2013-0069982.
- 안기용, 황준필, 김재환, 전상혁 (2013) 콘크리트의 알칼리이온 침출억제를 위한 전기화학적 처리기법, P201303780P.
- 안기용, 황준필, 김재환, 전상혁 (2013) 알칼리이온 침출억제를 위한 Pre-Carbonation 기법, P201303780P.

KS 및 지침

- 시멘트 경화체의 산가용성 6가크롬 침출 측정법, KS.
- 시멘트 경화체의 산-가용성 6가크롬 함유량 측정법, KS.
- 시멘트 경화체의 알칼리이온 침출 시험 방법, KS.
- 콘크리트 환경에서 알칼리이온 침출에 따른 생태환경 평가, 지침(안).

소프트웨어

- 황준필, 안기용 (2013) CDOCP4MPC [콘크리트 배합설계 시 배출되는 이산화탄소 (CO₂) 배출량], 제 C-2013-008704 호.

시험현장 적용

- 중금속이온 침출저감제 현장적용(2013), 현장명: 공주시 우성면 우성 농공단지 배수로 보수사업.
- 중금속이온 침출저감제 현장적용(2013), 현장명: 광주 기성법천 청사 신축.
- 전기화학적 기법 현장적용(2013), 현장명: 안산시 하수처리장.
- 콘크리트 인공수로 시작품(2013), 현장명: 한양대학교.

4.2 관련분야 기술발전 기여도

본 연구를 수행함에 있어 획득한 연구결과의 해당분야의 기술발전 내용 및 기여도를 각 연구주제별로 표 4.3에 정리하였다.

[표 4.3] 관련분야 기술발전 기여도

연구주제	기여내용
Loess계 첨가제를 이용한 콘크리트 중의 중금속이온 고정화 및 수중 콘크리트의 중금속 침출능력 정의	■ 시멘트 내 중금속이온 침출 저감 방법 (Loess계 첨가제) 제안 ■ Loess 첨가제 사용으로 인한 중금속 이온 고정화 메커니즘에 대한 기술자료 확보 ■ 수서환경에서의 콘크리트의 중금속 침출에 대한 정량적인 정보 제공
콘크리트 중의 알칼리이온 침출에 따른 환경영향성 평가 및 전기화학적 기법에 의한 침출저감	■ 콘크리트 중의 알칼리이온 침출 방지를 위한 전기화학적 기법 제안 ■ 생물학적 검증을 통한 생태독성-pH 관계 정립 및 알칼리이온 생태 영향성 자료 제시 ■ 해양환경의 알칼리이온 침출량 조사에 따른 기술자료 확보
CO ₂ 배출저감을 위한 최적의 콘크리트 생산공정에 대한 정의 및 프로토타입을 이용한 Web 기반 데이터베이스 구축	■ CO₂ 배출저감 공정확립을 통한 CO₂ 저감 개선 친환경 콘크리트 생산성 향상 ■ 콘크리트 생산 공정모델 확립 ■ 콘크리트 생산 공정의 CO₂ 배출모델의 web 기반형 데이터베이스 구축을 통한 시멘트 산업의 CO₂ 저감 개선

제5장 연구개발결과의 활용계획

5.1 현장적용

5.2 표준화

5.3 학문적 활용

제5장 연구개발결과의 활용계획

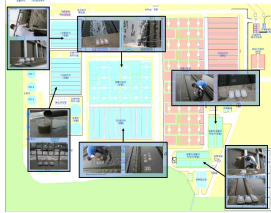
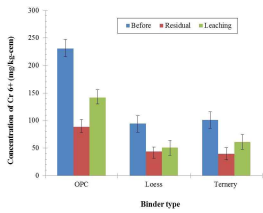
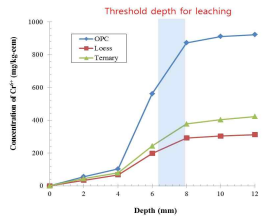
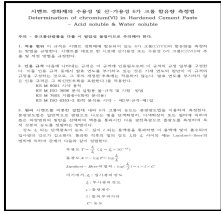
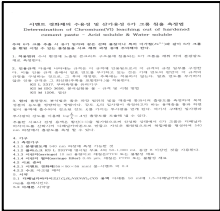
본 연구과제는 ‘친환경 화학처리기술을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감 및 환경영향성 평가’에 대한 연구로 기존의 건설재료에 대한 부정적 인식 및 문제점에 대한 해결방안을 제시하고자 하였다. 현재 국내외적으로 환경오염에 대한 인식이 증가하게 되면서 건설시장에서도 친환경적 재료 사용 및 CO₂ 배출 저감을 위한 노력이 활발하게 진행되고 있으며, 본 연구에서도 이러한 부분에 중점을 두어 연구를 실시하였다. 각 세부연구를 크게 3가지로 나누어 살펴보면, 콘크리트 중의 발생될 수 있는 중금속이온의 침출 저감을 위한 기술개발, 콘크리트로부터 침출될 수 있는 알칼리이온의 침출 저감기술 개발 및 콘크리트/시멘트 생산과정에서 발생될 수 있는 CO₂ 배출 저감을 위한 기술 개발로 나눌 수 있으며, 추가적으로 중금속이온 및 알칼리이온 침출에 관한 생태영향성 평가를 실시하였다. 본 연구에서 제시된 건설재료 및 기술은 기존의 재료 및 기술과 연계되어 친환경적인 건설기술로 토목/건축 구조물 건설 및 공용에 대한 새로운 방안을 제시하고자 한다. 또한 세계적인 홍모 및 이미지메이킹 컨설팅업체인 Fleshmen Hillards Korea와 연계하여 본 연구에서 개발된 기술 및 관련 연구업적에 국제적 홍보작업을 통한 해외시장에서의 인지도를 제고하며 이에 따른 경제적 이익을 창출하고자 한다.

5.1 현장적용

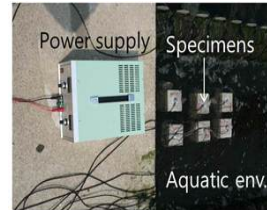
콘크리트는 대표적인 건설재료로 작업의 용이성, 경제성 등의 여러 이유로 건설부분에서 다양하게 사용되고 있다. 그 중에서 시멘트는 콘크리트의 구조/내구성능을 발휘하는 필수적인 재료임에도 불구하고 환경오염에 대한 관심이 증가하면서 부정적 인식 및 문제점이 부각되고 있는 실정이다. 이에 대한 대안으로 시멘트 대체재로 고로슬래그나 플라이애시와 같은 산업부산물을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있고, 구조 및 내구성능 발현에도 효과적인 것으로 나타나고 있다. 하지만 본 연구에서 제시한 바와 같이 중금속/알칼리이온과 같은 유해물질 침출 및 생태영향성 평가에서는 일부에서만 효과가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 건설재료로서 현장적용성을 확보하기 위해서 공학적 성능 발현뿐만 아니라 경제적인 측면 또한 고려되어야 한다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 공학적 성능 발현 및 경제성을 고려한 최적의 방안으로 유해물질 저감기술로 Loess를 이용한 중금속이온 침출 저감 기술 및 전기화학적 전기방식 적용에 따른 알칼리이온 침출 저감 기술을 제시하였고, 효율성에서는 본 연구결과에 기술하였다. 또한 세계적인 이슈인 CO₂ 배출로 인한 온난화는 건설분야에서는 콘크리트/시멘트 생산시 배출되는 CO₂가 상당부분 차지하고 있기 때문에, 이에 대한 대책으로 CO₂ 배출 저감을 위한 최적 방안을 제시하였다. 본 연구에서 개발된 기술에 대한 활용 방안에 대해서 다음 표 5.1에서와 같이 연구결과물과 그에 따른 활용방안에 대해서 제시하였다.

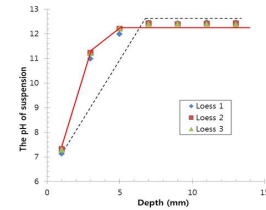
[표 5.1] 연구 결과물에 따른 활용방안

연구내용	결과물	활용방안
중금속이온 침출 저감 기술	  — 수서환경에서의 Loess를 첨가한 콘크리트에 대한 6가크롬이온에 대한 침출양 측정 및 결과	• 건축/토목 구조물 중 수서/해양환경에서 건설되는 구조물의 경우 친환경적인 요소를 고려한 건설재료로 선택가능 • 친환경적 재료 사용을 통한 콘크리트 및 건설에 대한 부정적 이미지 해소를 위한 홍보자료 제시 • 해양/수서환경에서 콘크리트로부터 침출된 중금속이온 측정 제품 개발을 위한 기초자료 제시 • 친환경적 재료인 Loess의 건설재료 사용을 위한 사업화 • 경량재료로서의 Loess를 이용한 대형 건설 구조물 및 해양 부유식 구조물의 이용 가능 • 국내 기준을 바탕으로 한 해외 건설시장에서의 적용성 확보
	  — 해양환경에서의 Loess를 첨가한 콘크리트에 대한 6가크롬이온에 대한 침출양 측정 및 결과	
	  — 시멘트/시멘트 경화체에 대한 산가용성 6가크롬 이온 측정법에 관한 국내표준	

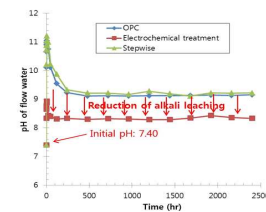
알칼리이온 침출
저감 기술



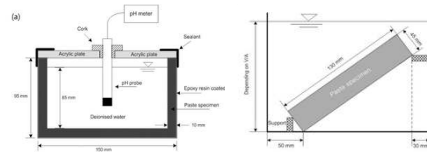
전기방식법 적용 및 적용 후 콘크리트의 알칼리이온 침출
저감 결과



자연정화를 통한 알칼리이온 침출 저감 및 전기 방식 적용
후의 결과



- 콘크리트 전기화학적 표면 처리 공법에 관한 국/내외 특허 등록 및 사업화를 위한 기초 자료 제시
- 친환경적 재료 사용을 통한 콘크리트 및 건설에 대한 부정적 이미지 해소를 위한 홍보자료 제시
- 콘크리트 전기화학적 표면 처리 공법을 이용한 구조물의 성능 강화에 활용
- 전기화학적 표면 처리공법 적용을 이용한 콘크리트 구조물의 보수/보강방법 연구 확대를 위한 기초 자료 제시



시험용 알칼리이온 침출 시험 방법 (Laboratory test method of determination of alkali leaching)

1. 목적
본 시험은 콘크리트 구조물의 알칼리이온 침출을 측정하기 위한 시험 방법이다.

2. 시험 방법
2.1. 시험편의 준비
2.2. 시험편의 측정
2.3. 시험편의 보관

3. 결과
3.1. 결과의 해석
3.2. 결과의 기록

4. 참고 문헌
4.1. 관련 규정
4.2. 관련 문헌

— 알칼리이온 침출 시험법의 국내외 표준화를 개념도 및
국내표준 제안

- 수중 내 알칼리이온 규제 관련 지침 마련을 위한 측정 기준 제시
- 국내 표준을 바탕으로 한 국제 표준화의 기초 자료

CO ₂ 배출 저감 기술	The left chart compares OPC (blue), 60GGBS (red), and 30PFA (green). The right chart compares Coarse agg (blue), Crushed (red), and Sand (green). Both charts show values on a scale from -100 to 100 for each of the four categories. – 3각기법을 이용한 CO₂ 배출량 산정에 따른 효율성 평가	• CO₂ 발생량을 저감하는 시멘트 제조 방식 , 콘크리트 배합 개선 등 각 공정별 원천기술 국내·외 특허 등록 및 사업화 • 콘크리트 생성 과정에서의 최소 CO₂ 배출을 위한 프로토콜 개발, 실제 콘크리트 제작 과정에 적용
	The screenshot shows the homepage of the program, including a navigation menu, a title, a brief description, and a list of features. – Web 기반형 프로그램으로 콘크리트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량 프로그램	• 지속적인 실시간 Web기반 데이터베이스를 활용한 CO₂ 배출량 모니터링 활용 • CO₂ 발생량을 저감하는 다양한 시멘트를 제조, 신산업 창출 가능성을 위한 자료 제시 • 콘크리트 개발 내 CO₂ 발생량에 대한 관련지침 개발 및 국가/국제 표준 개발을 위한 기초 자료 제시

5.2 국제/국내표준 제정

본 연구진은 실제로 핵심적 목표 중 하나인 국제/국내표준 및 가이드라인 제시가 더욱 시급할 것으로 판단되어 제18차 ISO 총회 (TC 71, SC 8)에서 콘크리트의 환경영향성에 대한 중요성을 제안하여 Ad-hoc group을 결성하게 되었다. 실제로 2011년 2월에 ISO 위원회에 본 연구를 통해 얻은 결과를 이용한 국제표준 상정을 위해 New Work Item Proposal (NWIP)를 작성한 후, ISO 전문위원에게 조언, 감수 및 자문을 통해 수정작업을 거쳐 “Leaching of materials from concrete”라는 제목으로 NWIP를 기술표준원을 대리로 하여 공식안건으로 국제표준을 위한 설명회를 개최하였다. 이후 ISO본부 및 Technical committee 71에서는 제19차 ISO 총회에서 ad-hog group에 대해 우리나라가 위원장국을, 미국이 부위원장 (대표자: Liv Hasselbach), 참가국으로 브라질로 결성되어 차기 회의에서 2개국이상의 동의를 얻을 경우 ISO 표준화에 성공하게 된다.

(a)



(b)



<그림 5.1> 국제표준제정을 위한 (a) 제18차 ISO 총회 (Hong Kong, June 2011), (b) 제19차 ISO 총회 (San Jose, Costa Rica, June 2012) 에서의 제안 및 Ad-hoc group 결성에 대한 최종발표

또한 본 연구를 통해 연구성과물 중 하나인 콘크리트이 중금속이온, 특히 6가크롬에 대해 (1) 산가용성 6가크롬의 농도, (2) 6가크롬의 침출농도의 측정법, 그리고 (3) 알칼리이온의 침출속도의 측정에 관한 시험법에 대해 Technical specification으로 상정하여 내년 제20차 ISO 총회에서 논의 될 예정이다. 특히 상기의 3가지 국제표준 Technical specification은 국내표준과도 동시에 진행함으로써 국내의 표준이 곧 국제표준이 되는 쾌거를 이룰수 있을 것으로 예상된다.

5.3 학문적 활용

본 연구의 방향은 콘크리트 구조물 환경 영향성 평가 및 친환경 인자를 활용한 유해물질 저감 기술 개발로 토목 분야뿐만 아니라 다양한 공학 분야에 대한 연구가 접목 되었고, 그에 대한 학문적 활용도에 있어서도 다양하다고 할 수 있겠다. 학문적 활용에 대해서는 본 연구에서 제시된 결과를 바탕으로 다음과 같이 나타내었다.

(1) 콘크리트의 중금속 이온 침출 저감 기술 개발

－ 중금속이온 침출저감제 Loess

Loess의 경우 재료 구성 물질 특성상 중금속이온을 고정화시키는 능력이 탁월한 재료로서 확인하였고, 이에 대한 건설재료로서의 활용가능성에 대한 추가적인 구조성능 분야에서의 다양한 연구가 진행 될 것을 예상된다.

－ 6가크롬이온 농도 측정에 관한 국내표준

기존의 경우 6가크롬이온의 농도는 수용성 상태에서만 측정이 가능하였고, 다양한 환경에서 건설되는 토목구조물에서는 이를 적용하는데 한계가 있다는 것을 본 연구에서 확인 하였다. 본 연구결과를 바탕으로 한 6가크롬의 농도 측정법에 관한 기준 제시는 토목 및 다양한 재료들에 존재하는 6가크롬의 농도를 일괄적으로 정량화할 수 있으므로 이에 대한 연구에 기본 바탕이 될 것으로 보인다.

(2) 콘크리트의 알칼리이온 침출 저감 기술 개발

－ 전기화학적 표면 처리 기법

전기화학적 표면 처리 기법은 알칼리이온 침출 저감 시킬 수 있는 표면도장 이외의 새로운 방식의 기법으로 토목 건설 분야에서 다양한 학문적 접근이 가능하다. 본 연구에서 제시되는 전기화학적 표면 처리 기법의 경우 지속적인 콘크리트 구조물의 유지관리에 유용한 기술로 이에 따른 콘크리트 보수/보강 분야에 대한 연구에 중요한 기초 자료를 제시 할 수 있을 것으로 판단된다.

- 콘크리트의 알칼리이온 침출

환경적인 측면에서는 기존 연구에서 콘크리트 내에 존재하는 알칼리이온의 경우 콘크리트 내구성능을 유지시켜주는데 유용하다고 알려져 있지만, 본 연구를 통하여 콘크리트 내에 존재하는 알칼리이온이 침출되었을 때의 환경 생태에 악영향을 미칠 수 있으며 이에 대한 기준을 제시하였다. 이와 관련된 환경관련 분야와 접목하여 기존 재료 및 추후 개발될 수 있는 친환경 재료에 대한 연구에 기준을 제시 할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 콘크리트/시멘트 생산시 최소 CO₂ 배출 프로토콜 정립

- 실시간 Web 기반 데이터베이스

콘크리트 CO₂ 배출량 산정에 있어서 기존의 연구는 예상 값이나 특정 대상에 대한 연구가 일반적으로 이루어졌지만, 본 연구에서 구축한 실시간 Web 기반 데이터베이스는 지속적인 자료를 축적함으로써, 이에 대한 활용도는 더욱 높아지게 될 것이며, CO₂ 배출과 관련된 다양한 분야의 연구에 기초자료를 제시 할 수 있을 것으로 예상된다.

제6장 결론



제6장 결론

본 연구는 “환경 친화적 화학처리기술을 적용한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감기술 개발”을 최종목표로 콘크리트에 의한 환경오염인자를 중금속이온(6가크롬), 알칼리이온, CO₂로 나누어 유해물질의 발생의 원인 규명, 침출 방지 기술 개발 및 현장적용성 평가를 통하여 건설에서 발생하는 환경부하를 조절하는 것으로 3차년도에 걸쳐 연구를 수행하였고 이에 대한 연구결과는 아래와 같이 요약하였다.

(1) 콘크리트의 중금속이온 침출 저감 기술 개발

- 수용성 6가크롬의 경우 시멘트 수화에 따라 농도가 변화하였지만, 산 가용성 6가크롬의 경우 시멘트 수화의 영향은 거의 없었다. 이는 시멘트 수화과정에서 발생하는 수화물과 6가크롬 간의 상호 화학적, 물리적 반응에 기인한 것으로 판단된다. 특히, 산가용성 6가크롬의 경우 화학적 반응에 의한 결정화라기 보다는 물리적 흡착에 의한 것으로 보인다.
- 6가크롬 고정화를 평가에서 중금속 침출 저감제로 사용한 Loess는 주요 광물인 Quartz, Calcite 성분으로 인해 중금속의 침출량을 저감하는 것을 확인하였고, Loess 20%를 치환한 시멘트 경화체의 6가크롬 침출량은 평균 2.157 mg/m³으로써 시멘트만 사용한 시멘트 경화체에서 침출되는 6가크롬의 80% 이상을 저감시키는 것을 확인할 수 있다. 250, 500, 750, 1000 mg/kg-cem의 6가크롬을 인위적으로 함유시켜 측정한 6가크롬의 침출량은 Loess의 사용으로 65~80% 정도 침출이 감소되는 것을 확인할 수 있었다.
- Loess 콘크리트의 중금속이온 침출 저감 효과를 평가하기 위하여 현장적용성 평가를 수서환경/해양환경으로 나누어 실시하였다. 보통 포트랜드 시멘트 콘크리트의 경우 다른 배합(Loess; 20% Loess, Ternary; 20% Loess + 40% GGBS)에 비해서 침출량이 월등히 많을 것을 알 수 있다. 이는 Loess 나 Ternary에 혼입한 중금속침출 저감제인 Loess에 의한 고정화 효과에 기인한 것으로 판단되며, 수서환경/해양환경에서 우수한 성능을 보였다.

(2) 콘크리트의 알칼리이온 침출 저감 기술 개발

- 알칼리이온의 침출은 용매의 pH농도에 의해 결정되며 각 pH에 따라 일차적으로 철이온 및 칼슘이온 (pH 9.0-9.5), 나트륨 및 칼륨이온 (pH 10.8-11.2) 그리고 마지막으로 수산화이온 (pH 12.5이상)이 침출됨을 확인하였다. 또한 알칼리이온의 침출은 콘크리트의 결합재에 따라 상이한데, 예를 들면 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 경우 침출속도나 침출량은 보통 포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트에 비해 낮게 나타났으나 침출로 인해 콘크리트 내의 수산화이온 농도분포에 있어서는 콘크리트 피복의 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 특히 알칼리이온의 침출은 용매의 pH 12이상일 때 급격히 증가하는데 이는 알칼리이온의 주체인 수산화이온의 침출이 시작됨으로 인해 발생함을 확인하였다.
- 알칼리이온의 침출이 수서환경의 생태학적 영향에 대해 표본생물중의 하나인 물벼룩에 대한 환경영향성 평가를 통해 알칼리이온의 침출이 치명적임을 확인하였다. 더불어 전기화학적 기법이 기존의 내구성 증진 내지는 보수보강의 의미 외에도 알칼리이온의 침출억제를 가능하게 하는 순기능의 역할이 있음을 확인하였다. 특히 이와 같은 전기화학적 기법은 전류량이 500-1000 mA/m² 이상 일 경우에 확연하게 드러나며 특히 4주 이상 적용할 경우에는 전기화학적 기법이 종료된 이후에도 화학적 상평형상태가 유지되어 알칼리이온의 추가적인 침출이 방지됨을 확인하였다.
- 실제 유수지로 선정된 하수처리장에서의 시험결과 콘크리트에 전기화학적 처리기법을 통한 알칼리이온의 침출억제 효과는 매우 높은 것으로 나타났다. 즉 콘크리트 표면부에서는 유수와 콘크리트 표면에 있는 이온 간의 상호작용에 의한 침출이 발생하나 이후 4.0 mm 깊이이후에서는 알칼리이온의 침출이 급격히 감소하고 있으며 알칼리이온 침출한계깊이 또한 6.0 mm이하로 기존의 8.0 mm 보다 감소함을 확인하였다. 또한 인공수로 실험을 통한 알칼리이온의 침출 및 자연정화능력은 100일간의 pH 모니터링을 통해 실시한 결과 유수접촉 초기 5시간 이내에 콘크리트이 알칼리이온의 침출이 급격히 이루어지다가 이후 알칼리이온의 침출이 감소한다. 그러나 알칼리이온의 침출은 유수에 따라 계속적으로 진전되며 콘크리트의 결합재에 따라 침출량의 차이가 있었다. 또한 전기화학적 처리기법을 적용할 경우 침출량이 급격히 감소한다. 자연정화능력에 있어서는 일정부분 알칼리이온의 침출에 대한 pH증가 가 다시 감소하나 원래 유수의 pH 까지는 감소하지 않음을 확인하였다.

(3) 콘크리트/시멘트 생산시 최소 CO₂ 배출 기술 개발

- 시멘트 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량 저감을 위하여 시멘트 제조 공정분석, 원료 및 연료 사용현황, 시멘트 생산에 따른 에너지 소모량 및 비용, CO₂ 배출특성 및 배출인자를 조사하여 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량을 정량화 하였다. 또한 CO₂ 저감방안으로 시멘트 제조 시 킬른 내에서 석회석의 탈탄산 과정에서의 석회석 손실량을 최소화 하여 콘크리트의 물리적 특성도 향상시키고, 포졸란계 혼화재의 사용으로 CO₂ 배출량 저감을 위한 방안을 제시하였다.
- CO₂ 배출량의 증가는 시멘트 사용량의 증가에 기인한 것으로 확인되었으며, 이를 위해서 물-결합재비(%) 및 단위시멘트량이 CO₂ 배출량을 조절이 필요하는 것을 확인 하였으며, 콘크리트 구조물 건설 시 철근에 의한 CO₂ 배출량이 가장 높았다. 결합재, 철근, 골재 및 운송 중 배합설계에 따라 물량을 조절하여 CO₂ 배출을 저감할 수 있는 것은 오직 결합재에 의해 좌우 되는 것을 알 수 있었다.
- GGBS, PFA의 치환에 따라 콘크리트에 관한 3각기법 검증결과 시공성은 거의 동일하였으나, 비용에 따른 경제성 및 장기강도와 같은 공학적 성능은 OPC < 30% PFA < 60% GGBS 순으로 나타났다. CO₂ 배출량에 대한 환경성은 60% GGBS < 30% PFA < OPC 순으로 확인됨에 따라 공학적성능 및 환경성 측면에서 포졸란계 혼화재를 첨가한 시험체가 우수함을 알 수 있다. 60% GGBS의 경우 OPC와 비교하여 경제성은 13%, 공학적성능은 22%, 환경성은 33% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 30% PFA는 OPC와 비교하여 경제성은 17%, 공학적성능은 11%, 환경성은 20% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 경제성 측면에서 30% PFA가 60% GGBS보다 우수한 것으로 나타났다. 이는 정제과정 및 혼입율에 따라 크게 변할 것으로 예상되며 기본적으로 OPC와 비교해서 60% GGBS 경제적인 것으로 판단된다.

제7장 참고문헌



제7장 참고문헌

- Alonso C. (2012) Personal Communication, Spain.
- Broomfield J.P. (2012) Personal Communication, U.K.
- BS EN 480-12 (2005) Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods, Part 12 : Determination of the alkali content of admixtures, British Standard.
- Directive 2003/53/EC (2003) Restrictions on the marketing and use of certain dangerous substances and preparations (nonylphenol, nonylphenol ethoxylate and cement).
- EPA (1978) Criteria and rational for decision making in aquatic hazard evaluation, aquatic hazard of pesticides task group, American Institute of biological science, Arlington, Virginia, pp.16.
- Flower D.J.M., Sanjayan J.G. (2007) Greenhouse gas emission due to concrete manufacture, International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.12, pp.282-288.
- Fregert S., Gruvberger B. (1973) Factors decreasing the content of water-soluble chromate in cement, American Contact Dermatitis, Vol.53, pp.267-270.
- Fregert S., Gruvberger B., Sandahl E. (1979) Reduction of chromate in cement by iron sulfate, Contact Dermatitis, Vol.5, pp.39-42.
- Fontas C., Queralt I., Hidalgo M. (2006) Novel and selective procedure for Cr (VI) determining by X-ray fluorescence analysis after membrane concentration, Spectrochem Acta Part B: Atomic Spectroscopy Vol.61, pp.407-413.
- Gartner E (2004) Industrially interesting approaches to low CO₂ cements, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1489-1498.
- Geankoplis C. (2003) Transport processes and deparation process principles, Prentice Hall, Upper Saddle River, U.S.
- Global Insight (2011) Trend of construction market.
- GreenBiz (2009) World's largest cement firms slow CO₂ emissions despite production growth.
- Hills L., Johansen V.C. (2007) Hexavalent chromium in cement manufacturing: literature review, PCA R&D Serial No. 2983.
- Ismail M., Ismail M.E., Muhammad B. (2011) Influence of elevated temperatures on physical and compressive strength properties of concrete containing palm oil fuel ash, Construction and Building Materials, Vol.25, pp.2358-2364.

- Jain N., Garg M. (2008) Effect of Cr (VI) on the hydration behavior of marble dust blended cement: solidification, leachability and XRD analysis, *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp.1851-1856.
- Josa A., Aguado A., Heino A., Byars E., Cardim A. (2003) Comparative analysis of available life cycle inventories in the EU, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1313-1320.
- Kamali S., Moranville M., Leclerc S. (2008) Materials and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modeling, *Cement and Concrete Research*, Vol.38, pp.575-585.
- Kuehl M. (2006) It's all in the chemistry, *World Cement Magazine*, Vol.9, pp.95-98.
- Li L., Nam J., Hartt W.H. (2005) Ex situ leaching measurement of concrete alkalinity, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp.277-283.
- Magistri M., D'Arcangelo M. (2007) World Cement research: Stannous sulfate, Mapei SpA, Italy.
- Pade C, Guimaraes M (2006) The CO₂ uptake of concrete during a 100 year perspective. In: *Advances in Cement and Concrete Sustainability*, Davos, Switzerland, pp.114-119.
- Potgieter S.S., Panichev N., Potgier J.H., Panicheva S. (2003) Determination of hexavalent chromium in South African cements and cement-related materials with electrothermal atomic absorption spectrometry, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp.1589-1593.
- Schiopu N., Tiruta-Barna L., Jayr E., Mehu J., Moszkowicz P. (2009) Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions, *Science of the Total Environment*, Vol.11, pp.1613-1630.
- The Research Council of Norway (2010) Combustion Residue Lowers Carbon Dioxide Emissions in Concrete.
- Trezza MA, Ferraiuolo MF (2003) Hydration study of limestone blended cement in the presence of hazardous wastes containing Cr(VI), *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No.7, pp.1039-1045.
- 국립환경과학원, <http://www.biowet.or.kr>, 생태독성관리제도.
- 김인경 (2001) 물벼룩의 심장박동을 이용한 독성 실험 방법, 경남대학교 석사논문.
- 류성민 (2003) 환경시료의 생태독성 평가를 위한 Microtox 물벼룩 Tandem Bioassay, 인제대학교 석사논문.
- 송재민, 한무영, 정태학 (2001) 정수처리에서 전기응집과 화학응집의 처리효율 비교, 상하수도학회지, Vol.18, No.5, pp.689-692.
- 양근혁 (2011) 전력부산물의 현황 및 재활용, 콘크리트와 환경 심포지움,

pp.100-122.

오마이뉴스 (2012) 낙동강 8개보에 들이붓는 시멘트의 '진실'.

이상현, 이성복, 이한승 (2009) 콘크리트의 탄산화 관점에서 CO₂ 배출량-흡수량 평가에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.21, pp.85-92.

이승민 (2008) 하수 재이용을 위한 전기응집공정의 적용, 서울시립대학교 석사학위논문.

이승헌 (2011) 시멘트 산업에서 CO₂의 저감, 콘크리트와 환경, pp.32-46.

정종식, 이재복 (2002) 튜브형 전극을 이용한 전기화학적 산화에 의한 질소제거에 관한 연구, 상하수도학회지, Vol.18, No.5, pp.580-585.

하헌중, 김성태, 최종욱, 민선홍, 장태연, 김건흥 (1995) 물벼룩과 형광성 박테리아를 이용한 중금속의 급성독성평가, Korea journal of Limnology, Vol.28, No.3, pp.369-376.

한국건설기술연구원 (2008) 시멘트 ZERO 콘크리트 개발 및 활용.

한국세라믹기술원 (2006) 시멘트중 중금속 함량조사 연구.

한국양회공업협회 (2009) 년도별 시멘트 생산 및 국내출하 실적.

한국환경산업기술원 (2011) 국가 LCI 데이터베이스정보망 (<http://www.edp.or.kr>).

환경부 (2008) 시멘트 등 중금속 민관 합동조사 결과.

황광률 (2002) 플라이애시를 활용한 콘크리트의 기술현황, 한국콘크리트학회지, Vol.14, pp.96-103.

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술연구 개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.