

발간등록번호

11-1613000-001137-01

C O₂

배출량

절감율

위한

콘크리트

배합설계

기술개발
최종보고서

2015

국토교통과학기술진흥원

CO₂ 배출량 절감을 위한 콘크리트 배합설계 기술개발 -최종보고서-

2015. 12.

주관연구기관 / 한양대학교

협동연구기관 / 경기대학교

Infrastructure
R&D Report

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구 사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

ISBN 978-89-7218-484-3

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

본 보고서를 “CO₂ 배출량 절감을 위한 콘크리트 배합설계 기술개발” (개발기간 : 2012. 11. 19 ~ 2015. 11. 18)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2015. 12. 28.

주관연구기관명 : 한양대학교 (ERICA) 산학협력단 (대표자) 이 기 형 (인)
협동연구기관명 : 경기대학교 산학협력단 (대표자) 김 응 수 (인)



주관연구책임자 : 한양대학교 태성호
협동연구책임자 : 경기대학교 양근혁

「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제18조 및 「국토교통부 소관 연구개발사업 운영규정」 제38조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	12CCTI-C063 722-01	해 당 단 계 연 구 기 간	2014.08.01. ~2015.11.18	단 계 구 분	(최종단계) / (총3차년도)
연 구 사 업 명	중 사 업 명	건설교통기술촉진연구사업			
	세부 사업명				
연 구 과 제 명	대 과 제 명	CO ₂ 배출량 절감을 위한 콘크리트 배합설계 기술개발			
	세부 과제명	배합설계 DB구축 및 CO ₂ 저감 기반 배합설계 모델식 개발			
연 구 책 임 자	태 성 호	해당단계 참 여 연구원 수	총: 12 명 내부: 12 명 외부: 4 명	해당단계 연 구 개 발 비	정부:119,000천원 민간: 천원 계:119,000천원
		총 연구기간 참 여 연구원 수	총: 14 명 내부: 14 명 외부: 4 명	총 연구개발비	정부:286,000천원 민간: 천원 계:286,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한양대학교 (ERICA) 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위 탁 연 구	연구기관명:			연구책임자:	
▪ 1차년도 - 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 구성재료 - 콘크리트 배합설계 데이터 베이스 구축 ▪ 2차년도 - 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재 - CO₂저감을 고려한 보통중량 콘크리트 배합설계 프로세스정립 및 환경영향평가 ▪ 3차년도 - CO₂ 저감 기반 그린 콘크리트 배합설계 상용 프로그램 개발 - CO₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 환경영향 평가				보고서 면수	

〈 요약 문 〉

		코드번호		D-01	
연구의 목적 및 내용		본 연구는 소비자가 요구하는 목표 CO ₂ 저감율, 목표 슬럼프, 목표 압축강도 및 경제성을 만족시킬 수 있는 전과정 평가에 기반한 저탄소 그린 콘크리트 배합설계 방법을 제시 하고 현장에서 실용적으로 적용 가능한 CO₂ 저감 기반 그린 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 에 관한 연구이다. 이를 통해 그린콘크리트 생산을 위해 CO ₂ 저감을 고려한 혼화재 종류 및 치환율을 쉽게 결정할 수 있는 실무용 설계차트가 제시될 것이다. ▪ 기술적측면 : 콘크리트 산업 및 콘크리트 생산단계에서 CO₂ 절감의 중요성 ▪ 경제·산업적측면 : 환경경영 기반 콘크리트 및 구조물 설계에 대한 개념변화 ▪ 사회·문화적측면 : 환경부하 저감형 건설재료 개발			
연구개발성과		[기술적성과] ▪ 결합재 종류(시멘트, 시멘트+혼화재) 및 현장적용성을 고려한 세계 최초의 탄소저감 콘크리트 배합설계 기술의 정립 ▪ 환경설계를 고려한 성능중심의 철근콘크리트 설계기준 및 시방서에 대응 ▪ 철근콘크리트 부재 및 구조체의 설계단계에서부터 시공단계까지 각 단계에서의 환경설계를 위한 가이드라인으로서 활용 ▪ 발주자가 시공자, 설계자 및 공사감리자에 대해 지속가능 콘크리트 기술제안을 할 경우 이용 [경제·산업적 측면] ▪ ISO 14000 시리즈를 통해 환경과 경제성을 동시에 고려한 지속가능발전 지향 ▪ 국제사회에서 요구하는 환경경영 흐름을 반영하여 기업의 운영뿐만 아니라 재료의 생산단계에서부터 폐기처리 등의 전과정에서 지속가능 활동을 추진할 수 있는 기술 및 가이드라인 개발 ▪ 환경경영 기반 저탄소 콘크리트 생산을 위한 기초 기술의 확립 ▪ 에너지 소비 절감과 온실가스 감축이라는 전 세계적 화두 앞에서 콘크리트 산업에서 시멘트 사용량을 줄이기 위한 환경영향 개선 [사회·문화적 파급효과] ▪ 21세기 한국의 신성장동력인 “저탄소 녹색성장”에 부합되는 건설재료 분야의 지속가능 융합 산업분야 개발로 국가경쟁력 강화 ▪ 콘크리트 생산단계에서 CO₂를 10~20% 저감가능하며 이를 경제적 이익으로 환산하면 연간 약 2000억원의 효과 ▪ 건설 및 콘크리트 산업에서 녹색성장을 위한 기반 구축 철근콘크리트 건축물의 라이프사이클 전체에서의 환경영향 평가를 위한 제도적 인프라로서 활용			
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)		▪ CO₂ 평가가 가능한 지속가능 콘크리트 2차 제품 및 프리캐스트 제품의 제작에 활용 ▪ 탄소저감을 위한 레미콘 공장 및 탄소배출량 평가를 수행하는 에너지 및 환경 국책기관에서의 활용 ▪ 건설관련 학/협회와의 연계를 통한 성과물 활용처 확산 ▪ CO₂ 저감형 콘크리트 배합설계의 개발 및 활용에 따른 정부 및 국가 탄소저감 목표에 기여			
중심어 (5개 이내)		CO ₂ 저감	콘크리트	배합설계	프로그램

< SUMMARY >

				코드번호	D-02
Purpose& Contents	Suggestion of Mix design technique of low car bon green concrete and Development of Mix design technique of concrete for reduction of CO₂ emission. ▪ Technology : Importance of CO₂ reduction in manufacture stage of concrete and concrete structure. ▪ Economical·Industrial : Concept change of plan for concrete and concrete structure based on environmental management ▪ Social·Cultural : Construction material development of environmental load reduction type				
Results	[Technological performance] ▪ Establishment of low car bon concrete Mix design technique considering Type of binding material (cement, cementitious materials) and field applicability ▪ Action for reinforced concrete design criteria and specifications ▪ Application as guideline for environmental design of step from planning to construction of reinforced concrete and structure ▪ Application for the case that customer suggest sustainable concrete [Economical·Industrial] ▪ Aim for sustainable development considering environment and economic by ISO 14000 series. ▪ Technology & Guideline development that possible to carry forward sustainable LCA including from raw-material stage to waste stage. ▪ Technology Establishment for manufacture of low carbon concrete ▪ Environmental effect Improvement to reduce use of cement in concrete industry with reduction of energy consumption and greenhouse gas [Social·economical ripple effect] ▪ Enhancement of national competitiveness by development of sustainable fusion industry of construction material according with low-carbon green growth ▪ Reduction of 10~20% of CO₂ in manufacturing stafe effectiveness of \$200 billion in one year ▪ Use institutionally for LCA of reinforced concrete construction for green growth				
Expected Contribution	▪ Use in production of sustainable concrete secondary manufactures and precast concrete that possible CO₂ assessment ▪ Ready-mixed concrete factory for CO₂ reduction, Energy and environment policy engine conducting carbon emission assessment. ▪ Spread of use by connection with association and institute for contruction ▪ Contribution for national goal of CO₂ reduction				
Keywords	CO ₂ reduction	Concrete	Mix design	Program	

< Contents >

Chapter 1. Brief of research	1
Part 1. Necessity and purpose of R&D	1
1. Purpose of R&D	1
2. Necessity of R&D	2
Chapter 2. Technical development of internal and external	5
Part 1. Technology and industrial trend of internal and external	5
1. Technology and industrial trend of internal	5
2. Technology and industrial trend of external	7
Part 2. Patent and Policy	8
1. Patent trend	8
2. Policy trend	9
3. Over-all conclusion	11
Chapter 3. R&D research contents and results	13
Part 1. Aim and strategy of R&D	13
1. Aim and contents of R&D	13
2. Strategy and method of R&D	17
Part 2. Contents and result of R&D	24
1. Summary of R&D result	24
2. Main contents of R&D	29
Chapter 4. Achievement and contribution	157
Part 1. Achievement	157
Part 2. Contribution for technical development	158
1. Differentiation of R&D	158
2. Aim for link · cooperation possibility of internal and external	159
Chapter 5. Application plan of R&D	161
Part 1. Application plan of R&D	161
1. Application plan of R&D result	161
2. Expectation effectiveness	162
Part 2. Needs for further R&D	163
Part 3. Industrialization progress plan	164
1. Field application plan	164
2. Practical · commercialization plan	164
3. Expected application field and plan	165

Chapter 6. Science technology information of external	167
Chapter 7. Security level of R&D	169
Chapter 8. Research installation and equipment	171
Chapter 9. Safety action fulfillment	173
Chapter 10. Representative Record of research	175
Chapter 11. Others	177
Chapter 12. Reference	179

<Add> Self evaluation opinion

< 목 차 >

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	1
1. 연구개발 목적	1
2. 연구개발 필요성	2
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국내외 기술 및 산업동향	5
1. 국내기술 및 산업동향	5
2. 국외기술 및 산업동향	7
제 2 절 특허 및 정부지원정책 현황	8
1. 특허동향	8
2. 정부지원정책 현황	9
3. 국내외 기술개발 현황 종합결론	11
제 3 장 연구수행 내용 및 결과	13
제 1 절 연구개발 목표 및 추진전략	13
1. 연구개발 목표 및 내용	13
2. 연구개발 추진전략 및 방법	17
제 2 절 연구개발 내용 및 결과	24
1. 연구개발 결과 요약	24
2. 연구개발 주요내용	29
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	157
제 1 절 목표달성도	157
제 2 절 관련분야 기술발전예의 기여도	158
1. 연구개발 과제의 차별성	158
2. 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성연구개발 최종목표	159
제 5 장 연구결과의 활용계획	161
제 1 절 연구성과 활용계획	161
1. 연구성과 활용방안	161
2. 기대효과	162
제 2 절 추가연구의 필요성	163
제 3 절 기업화 추진방안	164
1. 현장적용방안	164
2. 실용화·제품화 방안	164
3. 예상활용분야 및 활용방안	165

제 6 장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	167
제 7 장 연구개발성과의 보안등급	169
제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비현황 ...	171
제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 ...	173
제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구실적	175
제 11 장 기타사항	177
제 12 장 참고문헌	179

<별첨> 자체평가의견서

제 1 장. 연구개발과제의 개요

코드번호

D-03

제 1 절 연구개발 목적 및 필요성

1. 연구개발 목적

본 연구는 소비자가 요구하는 목표 CO₂ 저감율, 목표 슬럼프, 목표 압축강도 및 경제성을 만족시킬 수 있는 전과정 평가에 기반한 저탄소 그린 콘크리트 배합설계 방법(그림 1.1)을 제시하고 실무에서 쉽게 이용 가능한 배합설계 프로그램 개발을 목적으로 한다. 이를 통해 그린콘크리트 생산을 위해 CO₂ 저감을 고려한 혼화재 종류 및 치환율을 쉽게 결정할 수 있는 실무용 설계차트가 제시될 것이다.

- 콘크리트의 주요 구성성분은 결합재, 물, 잔골재 및 굵은골재로 구성되며, 이중 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트 (OPC)와 혼화재 (고로슬래그, 플라이애쉬 및 실리카 폼) 등이 이용됨.
- 현재 레미콘 공장의 콘크리트 배합설계 방법은 초기 슬럼프와 압축강도 중심으로서, 목표 슬럼프, 목표 압축강도 및 사용 골재 직경을 입력 데이터로 하여 그에 따른 단위 시멘트 양, 단위 수량, 단위 잔골재와 굵은골재 양 및 혼화재 양을 결정하는 방식임.

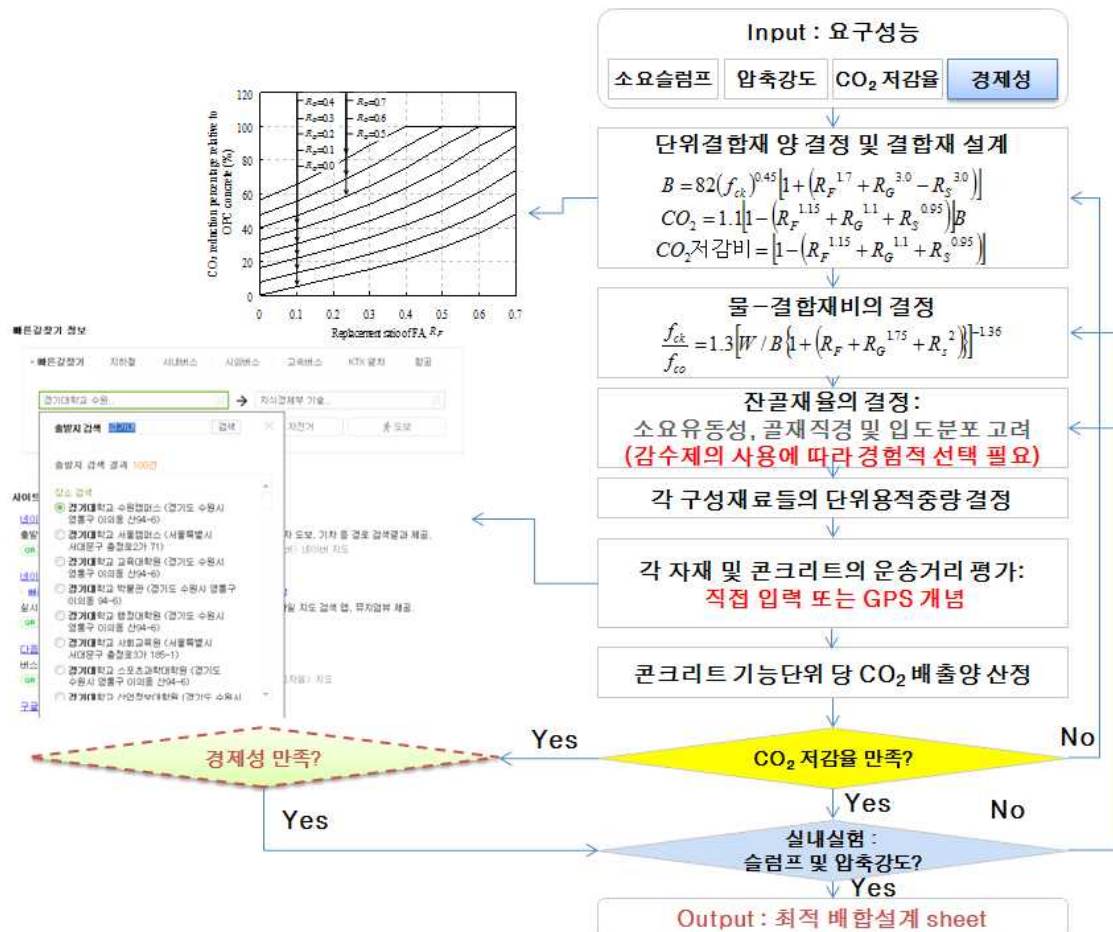


그림 1.2 CO₂ 저감에 기반한 그린 콘크리트 배합설계 알고리즘 개요

2. 연구개발 필요성

콘크리트 산업은 천연자원 소비, 에너지 소비, 온실가스 배출 및 폐기물 발생 등 여러 분야에서 막대한 환경부하에 영향을 미치고 있기 때문에 CO₂ 저감을 반영한 콘크리트 생산기술은 그린 콘크리트 산업의 가장 중요한 원천 기술이며 해당 연구의 필요성이 매우 크다고 사료된다.

가. 기술적 측면

콘크리트 산업 및 콘크리트 생산단계에서 CO₂ 절감의 중요성

- 전과정 평가에 의한 콘크리트의 CO₂ 배출량 평가에서 OPC가 차지하는 CO₂ 배출량은 전체의 약 85%에 해당함 (표 1.1).
- 우리나라의 전과정 평가(life cycle assessment)에 의한 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC)의 CO₂ 배출계수는 0.931 CO₂-kg/kg으로서, 세계 평균인 0.81 CO₂-kg/kg에 비해 약 1.15배 높음.
- 즉, 콘크리트 산업에서 CO₂ 배출량을 줄이기 위해서는 기본적으로 콘크리트 생산을 위해 사용되는 OPC의 사용량을 콘크리트 품질의 저하 없이 줄일 수 있는 배합설계 기술이 요구됨.
- 시멘트 산업에서 CO₂ 저감을 위한 노력으로는 에너지 효율설비 확충, 대체연료 사용증대, 석회석과 같은 시멘트 혼합재의 비율증가, 에너지 저소비형 클링커 제조 및 고로슬래그와 같은 혼화재(supplementary cementitious material, SCM)들의 첨가 등을 들 수 있는데 이들 노력 중 고로슬래그나 플라이애쉬와 같은 산업부산물을 활용한 혼합시멘트의 사용은 일반적으로 현장에서 쉽게 접근할 수 있는 가장 실용적인 방법임.
- 또한 고로슬래그나 플라이애쉬의 사용은 천연자원 보존 및 산업부산물의 재활용이라는 부가적인 효과도 기대할 수 있음.
- 산업부산물을 이용한 혼화재 활용을 고려하여 OPC콘크리트에서의 CO₂배출 저감을 위한 배합설계 기술은 콘크리트 생산단계에서부터 CO₂배출량을 제어할 수 있는 가장 중요하고 원천적인 기술임.

표 1.1 재료, 생산 및 운송단계를 고려한 콘크리트 CO₂ 평가 예 ($f_{ck}=40$ MPa)

Functional Unit (FU) : m ³	Material			Transportation		
	A	B	A · B	D	E	A · D · E
Item	$\frac{kg}{FU}$	$\frac{CO_2 - kg}{kg}$	$\frac{CO_2 - kg}{FU}$	km	$\frac{CO_2 - kg}{kg \cdot km}$	$\frac{CO_2 - kg}{FU}$
OPC	361	0.931	336.1	277	$5.18 \cdot 10^{-5}$	5.18
GGBS	68	0.0265	1.802	339	$5.18 \cdot 10^{-5}$	1.19
FA	23	0.0196	0.451	322	$5.18 \cdot 10^{-5}$	0.38
Sand	805	0.0026	2.093	47	$6.3 \cdot 10^{-5}$	2.38
Coarse	918	0.0075	6.885	37.6	$6.3 \cdot 10^{-5}$	2.17
Water	163	$1.96 \cdot 10^{-4}$	0.032	–	–	–
Admixture	3.1	0.25 ³⁾	0.775	70.6	$2.21 \cdot 10^{-4}$	0.05
	Sum		351.94	–		
Concrete production	2341	0.00768	17.98	30	$\frac{0.674}{m^3 \cdot km}$	D · E = 20.22
				Sum		31.57
Total= 402.09 CO ₂ -kg/FU (= 351.94 + 17.98 + 31.57 CO ₂ -kg)						

나. 경제·산업적 측면

환경경영 기반 콘크리트 및 콘크리트 구조물의 설계에 대한 개념의 변화

- 국제상공회의소(ICC)의 체계적인 환경문제 해결요구에 따라 ISO는 환경경영위원회(ISO/TC207)를 설치하여 관련 표준규격(ISO 14001)을 제정하고 각국에서 ISO 14000 시리즈와 관련된 제도가 시행되고 있으며, 이에 따라 국제사회는 ISO 14000 시리즈를 통하여 환경과 경제성을 동시에 고려한 지속가능발전을 지향하고 있음.
- 건설 및 콘크리트 산업분야에서도 국제사회에서 요구하는 환경경영 흐름을 반영하여 기업의 운영 뿐만 아니라 재료의 생산단계에서부터 폐기처리 등의 전과정에서 지속가능 활동을 추진할 수 있는 기술 및 가이드라인 개발을 위한 노력이 본격화되어야 할 시점임.
- 하지만 콘크리트는 강재와 더불어 건축물 및 사회 인프라구조물 건설에 필수적인 구조재료로서 2010년도 우리나라의 레디믹스트콘크리트 생산량은 약 1억4천만 m³임.
- 콘크리트 산업 전 분야에서 부정적인 환경영향을 최소화하고 가능한 한 긍정적인 영향을 최대한 이용하면서 건설 산업 발전을 유도하기 위해서는 환경경영 기반 저탄소 콘크리트 생산을 위한 기초 기술의 확립은 피할 수 없는 사안임.
- 에너지 소비 절감과 온실가스 감축이라는 전 세계적 화두 앞에서 콘크리트 산업에서 시멘트 사용량을 줄이기 위한 환경영향 개선은 우리나라 녹색성장을 위해서도 필연임.

다. 사회·문화적 측면

환경부하 저감형 건설재료 개발

- 건설공사에서 중요한 재료인 콘크리트는 산업부산물인 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 대량 사용함으로써, 정부의 CO₂ 저감 목표 달성에 적극적으로 기여할 수 있으며, 특히 건설공사에서 CO₂를 대량으로 발생하는 시멘트와 콘크리트 분야에서는 CO₂를 30% 이상 및 에너지 분야에서는 15% 이상 절감 가능.
- 지속가능한 소비 및 생산(Sustainable Consumption & Production)을 위한 건설산업 체계구축을 위한 건설재료 부문의 역할요구.
- 하지만, 현재 국내의 연구실정은 대부분 환경영향 물질 중 온실가스를 대상으로 한 저감 및 평가기술에 관한 연구에 편중되어 있다고 해도 과언이 아니며, 콘크리트 구성재료 및 에너지의 투입비용과 구조재료로서 내구성능을 종합적으로 고려한 평가기술에 관한 연구는 매우 미비한 실정임.
- 콘크리트의 생산과정에서 배출되는 다양한 환경영향 물질이 생태계에 미치는 영향에 대한 중요성은 인식하고 있으나, 환경성을 경제성 및 내구성과 별개의 관점에서 평가해온 것에 기인한 것으로 콘크리트를 지속가능한 개발 관점에서 평가하기 위해서는 지속가능한 개발 개념인 Triple Bottom Line에 근거한 환경성, 경제성, 내구성을 종합적으로 연계한 평가기술이 요구됨
- 콘크리트 산업의 특수성을 고려할 때 환경성 평가의 목적에 따라서는 지구온난화 관점의 제한된 환경성 평가에서 벗어나 자원소모, 산성화, 오존층 영향, 부영양화, 광화학적산화물 생성 등 다양한 환경영향 범주에 대한 평가가 이루어져야하며, 제조단계 이후에 대해서도 환경성 평가가 가능하도록 할 필요가 있음

제 2 장. 국내외 기술개발 현황

코드번호

D-03

제 1 절 국내외 기술 및 산업 동향

1. 국내 기술 및 산업 동향

가. 건축물 및 건설재료 관련 환경영향 저감 기술

- 2012년도부터 대한건축학회(국토교통부 지원)를 중심으로 그린 시방서 개발연구를 진행하고 있으며, 그 주요목표는 구조물 프로젝트를 위한 재료 및 시공단계에서 환경영향을 최소화 하는 것임.
- 세계 콘크리트 설계기준들의 그린화에도 불구하고 우리나라의 그린 콘크리트 대응에 대한 요소기술은 매우 초보적인 단계임.
- 콘크리트 산업에서도 설계기준들의 그린화에 대응할 수 있는 다양한 요소기술들의 마련이 시급하며, 목표 CO₂ 배출량 저감을 만족할 수 있는 콘크리트 배합설계 기술은 선진국들이 추구하는 가장 중요한 기초 원천기술임.

나. 콘크리트 배합설계 기술

- 최근 탄소배출권, ISO 14000 시리즈 및 지속가능 개발에 유연하게 대체하기 위하여 국내실정에 맞는 환경경영 개념을 도입한 콘크리트 설계지침 및 평가 프로그램 개발을 위해 많은 투자를 시작하였지만 아직 매우 미미한 수준임.
- 기존 레미콘사들은 콘크리트 압축강도 20~30 MPa 수준에 대해서는 경험적인 표준 배합표를 구축하고 있으며, 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트 배합에 대해서는 사용자의 요구에 따라 시행착오 (trial-and error) 방법에 의한 실내실험으로부터 결정하고 있음.
- 이러한 기존 콘크리트 배합설계 방법은 사용자의 요구 압축강도 및 슬럼프만을 고려하고 있기 때문에, CO₂ 저감을 포함한 환경영향에 대해서는 지속가능의 개념에 대한 KS 기준 및 인식의 부재로 아직 접근계획조차 없는 실정임.
- 설계요소로서 시간, 가격, 품질만을 고려하는 전통건설방식에서 환경영향, 경제제약 및 사회문화 측면을 고려하는 지속가능 건설로 전환되는 시점에서 CO₂ 저감을 고려한 수치해석에 기반한 콘크리트 배합설계 방식으로의 전환은 필수적임.
- 시멘트 표준도 사양중심에서 성능 중심으로 전환되고 있는 시점에서, 콘크리트 생산단계에서의 CO₂ 저감을 고려하는 성능 중심의 합리적인 배합설계 방법은 미래의 그린 콘크리트 산업의 발전을 위한 초석이 될 것으로 사료됨.

다. 전과정 콘크리트 CO₂ 평가 연구콘크리트 배합설계 기술

- 전과정 평가(life-cycle assessment, LCA)는 크게 3단계로 구분되는데, 첫 번째 단계로 기능단위와 시스템 경계 정의, 두 번째 단계는 에너지 정의와 사용량, 재료소비 및 폐기물량과 CO₂ 배출량 등을 포함하는 원단위(lifecycle inventory, LCI) 데이터가 구축, 세 번째 단계로 이들 데이터를 통해 요구조건에 대해 지구온난화 등 환경영향을 평가하게 됨. 이에 각 단계별 예측, 평가, 저감 및 관리를 위한 연구가 진행되며 관련 요소기술개발의 수요가 증가하고 있음.
- 콘크리트 구조물의 LCA는 구성 재료의 생산 및 운반, 콘크리트 생산 및 운반, 구조물의 시공, 사용연한 및 폐기 등으로 구성됨 (그림 2.1). 따라서 전과정 평가에 의한 콘크리트 CO₂배출량은 그림 2.1에 나타난 모든 요소들을 고려해야 하지만 콘크리트 타설, 사용연한 및 폐기과정에서 배출되는 CO₂양에 대한 원단위 평가는 구조물의 기능/규모에 따라 달라지므로 이에 대한 데이터 구축 및 실제적용은 매우 어려운 실정이며 구체적인 표준적인 평가체계가 요구됨.
- 한편, LCI 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라에 따라 상이하므로, 자국에서 제공되는 원단위를 이용하는 것이 가장 바람직한데, 우리나라는 국토해양부, 환경부와 지식경제부에서 물질 및 부품제조, 가공공정, 수송, 사용 및 폐기활동 등에 대하여 약 400여개의 LCI 데이터베이스를 구축하고 있음. 이 중 건설 활동에 관련된 데이터는 약 60여 개로서 일본이나 유럽 등의 선진국에 비해 매우 적은 상황임.
- 따라서 생산단계에서 CO₂가 저감된 콘크리트의 제조를 위해서는 신뢰할만한 CO₂ 평가 시스템에 나타난 요람에서 시공 전 단계 시스템)을 확립하고 콘크리트 제조에 필요한 모든 재료들의 LCI 데이터가 구축되어야만 함. 이는 그린 콘크리트 산업의 가장 원천적인 요소기술로서 전 세계가 공감대를 형성하고 있는 그린 시방서의 필수 요소임.

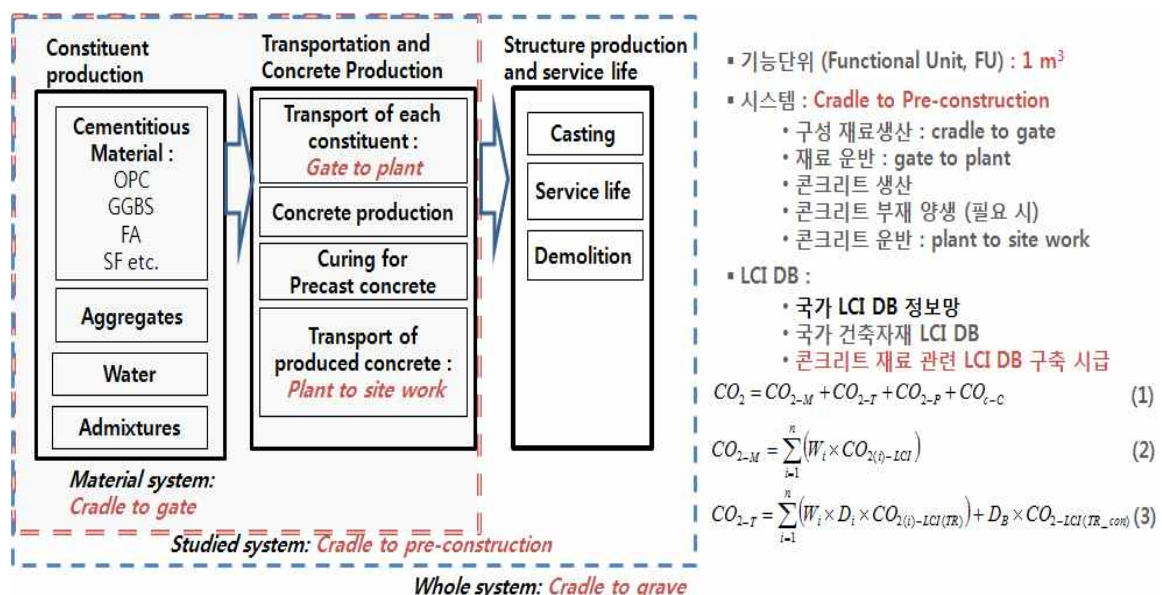


그림 2.1 그린 콘크리트 생산을 위한 전과정 평가 시스템 체계

2. 국외 기술 및 산업 동향

가. 콘크리트 설계기준 친환경 요소기술

- ISO/TC 71에서 요구하는 레미콘 출하 시 관련된 자료에 CO₂ 배출량 표기 등이 예상되지만 이에 대한 자료구축 및 평가프로그램 마련을 위한 지원은 없는 실정임.
- International Code Council은 2010년 International Green Construction Code(IGCC) 공개버전 1.0을 출판하였으며, 2012년에는 버전 2.0의 출판과 함께 정식 모델코드로 채택함.
- 모든 설계기준에 대한 우선권과 사법적 권한을 갖는 IGCC에서는 전과정 평가에 의한 구조물 프로젝트의 CO₂ 배출량이 기존 건축물 대비 20%이상이 절감됨을 증명할 것을 요구함.
- 미국은 2012년도부터 IGCC를 의무적으로 채택하기 시작함.
- 유럽의 Model Code 2010에서는 지속가능성 설계를 향후 중요 설계개념으로 정의하며, 성능범주는 사용성, 구조적 안전성 및 지속가능성에 대해 정의함. 특히 지속가능성의 성능범주는 CO₂ 절감을 포함한 환경영향, 사회에 대한 영향 및 미적 요구조건 등을 요구하고 있음.

나. 콘크리트 설계지침 및 전과정 평가 관련국제동향

표 2.1 지속가능 콘크리트의 설계지침 및 전과정 평가절차의 개발에 대한 국제동향

ISO /국가	추진내용	추진성과 및 전망	건축자재 전과정 평가 프로그램 및 개요
ISO	- TC 207(환경위원회)에서 관련 표준제정 - 콘크리트, 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트에 관련한 표준제정을 위해 TC 71 설치.	- 시멘트, 골재 등 건축제품의 환경성 표시 및 선언에 대한 세부 국제표준으로 발전하고 있음. - 콘크리트 및 콘크리트 구조물의 환경영향을 위해 ISO 13315 시리즈 개발 중.	환경성적 표지제도 및 전과정에 의한 각 건축재료의 CO₂ 평가 절차를 요구하고 있음.
일본	2004년 “환경배려형 철근콘크리트 공사 연구 소위원회” 구성함.	2008년 “철근콘크리트조 건축물의 환경배려 시공지침(안)·동해설”을 출판함.	eco MA - 평가대상 : CO₂, 경제성 - 자재범위 : 콘크리트
미국	- Green Concrete Council 설치함. - IBU 산하의 ICC에서 모델코드 개발을 추진함.	- 지속가능 콘크리트 시방서 출판 (IGCC 등) - 콘크리트의 전과정 평가에 기반하여 시멘트 사용을 줄이기 위한 연구 추진	BEES - 평가대상 : 에너지, 경제성 - 자재범위 : 150여 가지의 건축자재 - 특징 : 환경영향력/경제성평가
유럽	Task Group에 의한 설계지침 개발 추진.	2020년까지 1990년 대비 온실가스 감축목표를 30%로 상향하며 2050년까지 목표 감축량은 80%임. - 성능중심형 콘크리트 시방서 마련 진행 중 (CEN Guide 4 등) - 시멘트사용을 줄이기위한 다양한 연구 추진	Gabi - 평가대상 : 에너지 - 자재범위 : 650여 가지의 건축자재 - 특징 : 다수의 변수 민감도 분석

제 2 절 특허 및 정부지원정책 현황

1. 특허 동향

표 2.2 콘크리트 관련 특허 동향

특허명 (특허번호, 일시)	대상 국가	특허권자 (국적)	특허내용요약	활용 또는 회피방안
고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트 제조방법 (101028011, 20110401)	한국	(주) 삼전건설 (한국)	고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트 제조방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 시멘트 대신에 고로슬래그를 사용하여 콘크리트를 제조하되, 작업성이 용이하고, 충분한 강도를 나타낼 수 있도록 한 고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트 제조 방법	본 연구개발은 무시멘트의 개념이 아니며, 저시멘트 기반 콘크리트 배합설계 자료로 활용
결합재로 폐유리 미분말과 플라이애쉬를 이용한 무시멘트 콘크리트의 제조방법 (1010180090000, 20110221)	한국	한국건설 기술연구원 (한국)	결합재로 폐유리 미분말과 플라이애쉬를 이용한 무시멘트 콘크리트 제조방법	
플라이애쉬와 고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트의 제조방법 (1010180080000, 20110221)	한국	한국건설 기술연구원 (한국)	플라이애쉬와 고로슬래그를 이용한 무시멘트 콘크리트의 제조 방법	
석탄회를 이용한 무시멘트 콘크리트의 제조방법 (1010180070000, 20110221)	한국	한국건설 기술연구원 /한국화학 시험연구원 (한국)	석탄회를 이용한 무시멘트 콘크리트의 제조방법	
무시멘트 알카리 활성 모르터 제조 방법 (심사 취하 처리)	한국	전남대학교 산학협력단 (한국)	고로슬래그, 나트륨계, 수산화칼슘 등을 포함하는 무시멘트 알카리 활성 보강 모르터의 제조방법	
무시멘트 마그네슘계 알칼리 활성결합재, 상기 결합재를 포함하는 무시멘트 마그네슘계 알칼리 활성 모르터, 콘크리트 및 콘크리트2차제품 (1010148680000, 20110208)	한국	전남대학교 산학협력단 (한국)	고로슬래그, 플라이애쉬 및 메타카올린 등 산업부산물에 알칼리성 무기재료를 적정 첨가한 무시멘트 알카리 활성 결합재	

2. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

저탄소 녹색성장기본법의 온실가스 감축정책 중 하나인 온실가스에너지 목표관리 제도의 이행에 필요한 사항들을 규정하는 온실가스에너지 목표관리 운영지침 확장고시(2011.03.16.)

- 2020년 저탄소 녹색사회 구현을 목표로 국가 전체 온실가스 30% 감축 목표 제시
- 부문별·업종별·연도별 국가 온실가스 감축 로드맵 확정
- 주요 부문별·업종별 온실가스 감축목표 확정(2011.07.12.)
- 주요 부문: 18.2%, 수송 34.3%, 건물 26.9%
- 주요 업종별: 건설업 7.1%, 철강 6.5%, 시멘트 8.5%
- 온실가스에너지 목표관리를 실현하기 위한 건설재료부문
(철강, 콘크리트, 시멘트 분야)의 CO₂ 저감 연구개발 최적기

표 2.3 정부 관련법령 및 지원정책

법령명	법조항 내용	담당부처
저탄소 녹색성장기본법	제26조 녹색기술의 연구개발 및 사업화 등의 촉진 제46조 온실가스 에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침제정	환경부 노동위원회
국가표준기본법	제7조 국가표준기본계획의 수립 표준 관련 기술의 연구개발에 관한 사항	지식경제부
건설기술관리법	제23조 건설공사에 소요되는 비용을 절감하고 시설물의 품질을 향상시키기 위하여 시설물의 설계, 건설공사에 사용되는 자재, 부재의 치수 및 시공방법을 표준화 제24조 제25조 품질관리계획과 품질시험계획 등에 관한 사항이 규정, 건설자재·부재의 품질 확보를 위한 규정, 품질검사전문기관 품질검사 대행 근거	국토해양부
주택건설 기준 등에 관한 규정	친환경주택건설기준 및 성능	국토해양부
건축법	제65조(친환경 건축물의 인증 등) - 국토해양부장관과 환경부장관은 지속가능한 개발의 실현과 자원절약형이고 자연친화적인 건축물의 건축 유도를 위해 공동으로 친환경 건축물 인증제도를 수행	국토해양부 건축기획과 국토해양 위원회
건축물의 에너지절약설계 기준	제4조(건축부분의 의무사항) - 외기에 직접 또는 간접 면하는 거실의 각 부위에는 규칙 제21조에 따라 건축물의 열손실방지 조치를 하여야 함 제5조(건축부분의 권장사항) - 건축물 외벽, 천장 및 바닥으로의 열손실을 방지하기 위하여 기준에서 정하는 단열두께보다 두껍게 설치하여 단열부위의 열저항을 높이도록 함 - 외벽 부위는 외단열로 시공	국토해양부 건축기획과 국토해양 위원회

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

- 건설기술의 녹색성장 추진계획(국토교통부)
 - 토목 및 건설 시설물 전단계의 탄소배출량 분석 및 전생애적 관점의 탄소배출량 최소화 추진
 - 건설재료부터 자재, 시공포함 전생애적 관점에서의 온실가스 평가 방법 정립 및 시설물 유형별, 공종별, 건설사업 단계 온실가스 배출량 평가지표, 통계시스템 구축 필요.
- 2010 국토해양 R&D 발전전략 (국토교통부)
 - Post V10 국토해양 R&D 전략으로 녹색기술 향상 및 온실가스 감축달성을 위한 30개의 미래 핵심기술(Green up-30) 선정.
 - CO₂저감 기반 그린콘크리트 관련 건설재료는 미래핵심기술 중 건설재료 분야 유일한 기술분야임.
- 건설재료의 CO₂ 저감 및 재활용 추진 (지식경제부)
 - 시멘트 산업에서도 범지구적인 기후변화 대응 노력에 동참하고 녹색성장을 통한 저탄소 사회 구현을 위하여 업계 자발적으로 지식경제부와 협약을 맺어 2015년까지 이산화탄소 배출량을 2005년도 대비 5% 감축하기로 결의하여 시멘트 톤당 40kg-CO₂를 감축하기로 함.
 - CO₂저감 콘크리트 개발로 건설산업 전반의 온실가스 배출량의 저감 및 관리 연구에 활용가능.
- GR(Good Recycled) 인증제도 (환경부)
 - GR(Good Recycled)인증제도는 2001년 12월 우수재활용제품(GR) 의무구매제도가 의원입법이 통과되면서 시행됨. 대상품목은 현재 순환골재 콘크리트벽돌 등 폐요업 35종, 재활용유리, 대리석 등 폐유리 9종, 재활용플라스틱, 인공어초 등 폐플라스틱 66종 등 총 222종이 있음.
 - 무(저)시멘트 콘크리트도 시멘트 대신에 고로슬래그, 석탄회를 주로 사용하기 때문에 이를 활용하여 개발된 제품은 GR인증 대상 가능.
- 탄소 Labeling 제도 (환경부)
 - 저탄소건설자재에 대한 개념이 명확히 수립되지 않았으나 제품이나 서비스의 탄소배출을 정량화하고 이를 줄이기 위한 탄소성적표지제도가 환경부에 의해 2009년부터 시행중에 있음
 - 탄소성적표지제도는 법적 강제제도가 아니라 자발적 참여에 의한 임의 인증제도로 탄소배출량 인증과 저탄소상품 인증으로 구성됨.
- 녹색건축물 인증제도 (국토교통부)
 - 건축물의 입지, 자재선정 및 시공, 유지관리, 폐기 등 Life cycle을 대상으로 에너지 및 자원의 절약과 오염물질의 배출감소, 쾌적성, 주변환경과의 조화 등 환경에 영향을 미치는 요소에 대한 평가를 통한 건축물의 환경성능 인증.



그림 2.2 탄소성적표지제도 표시방법 및 의미

3. 국내외 기술개발 현황 종합 결론

- 탄소저감형 콘크리트 개발을 위한 원자재(시멘트, 혼화재료 등)에 관한 연구가 수행되고 있으나 현재까지 실용화 단계에 이르지 못하는 못하였으며, 선진국과 비교하여 양적, 질적 수준이 평균에 미치지 못한 것으로 파악됨.
- R&D 인프라가 꾸준히 증가추세에 있지만, 인력인프라는 매우 부족한 상황이며 적극적인 기술도입을 통해 기술경쟁력을 높이는 단계로 파악됨.
- 온실가스 다배출 산업인 콘크리트 산업의 실효적 온실가스 저감을 위한 필수연구로서 연구개발 최적기.
- 환경부하저감형 건축재료 개발을 위한 기반은 구축되어 있으나, 이를 체계적으로 활용하기 위한 시스템 운영방안과 관련업계의 협력 등이 필요함.
- CO₂ 저감 기반 콘크리트 배합설계 관련 기술 수준은 초기단계로 기존 콘크리트 제조 데이터베이스의 분석을 통해 보완, 발전시켜 현장에 적용이 가능한 시스템 개발 필요.

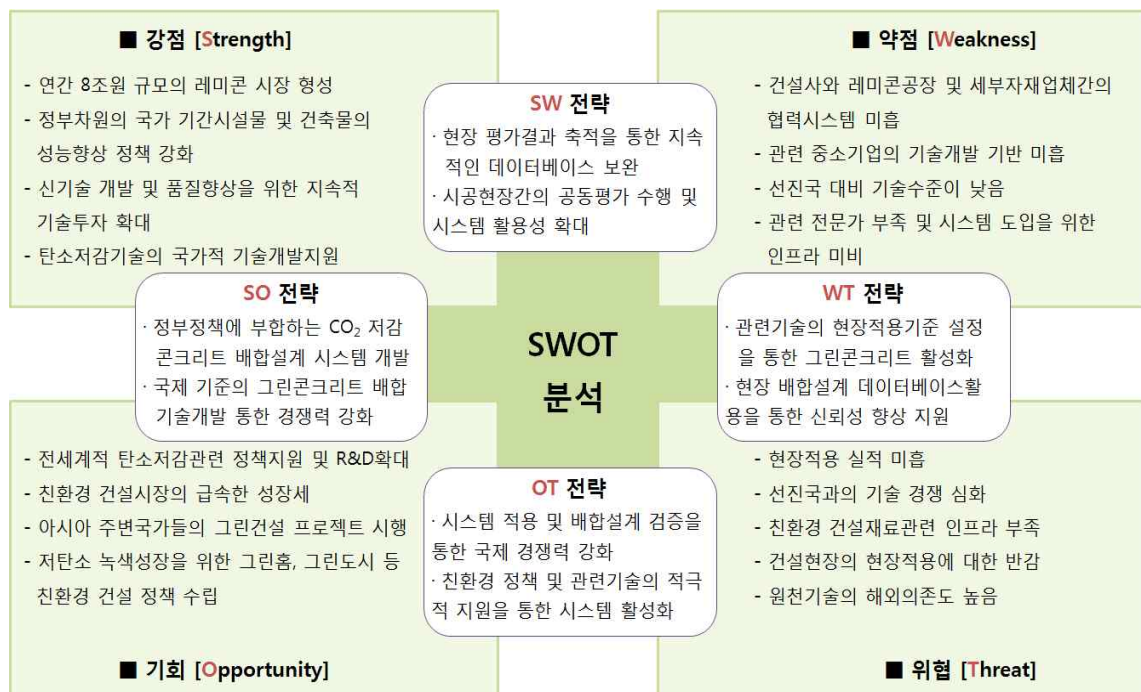


그림 2.3 국내외 기술개발 현황을 통한 SWOT분석

제 3 장. 연구수행 내용 및 결과

코드번호

D-05

제 1 절 연구개발 목표 및 추진전략

1. 연구개발 목표 및 내용

가. 연구개발 최종목표

- 본 연구는 프리캐스트 콘크리트 공장 및 레디믹스트 콘크리트 공장에서 실용적으로 이용할 수 있는 목표 CO₂ 배출 저감율, 슬럼프, 압축강도 및 경제성을 만족시킬 수 있는 CO₂ 배출량 저감 콘크리트 배합설계 알고리즘 및 프로그램의 개발을 목표로 함 (그림 3.1).
- 세부적 목표로서는 1) 콘크리트 생산에 관련된 재료 및 시스템에 대한 LCI DB 구축; 2) 콘크리트 배합설계에 대한 실내실험 및 레미콘 배합실험에 대한 광범위한 데이터베이스 구축; 3) 데이터베이스에 기반 한 CO₂ 저감 콘크리트 배합설계 알고리즘 및 설계용 차트 개발; 4) CO₂ 배출량 저감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발임.
- 그린 콘크리트 산업의 기초 원천기술인 본 연구를 통하여 그린 설계기준 및 시방서에 대응하고 국내 그린 콘크리트 분야의 기술수준을 세계 최고 수준으로 향상시키면서, 그에 따른 산업체의 자발적인 CO₂ 저감에 대한 인식제고는 실용화 측면에서 중요한 기술적 비전임.

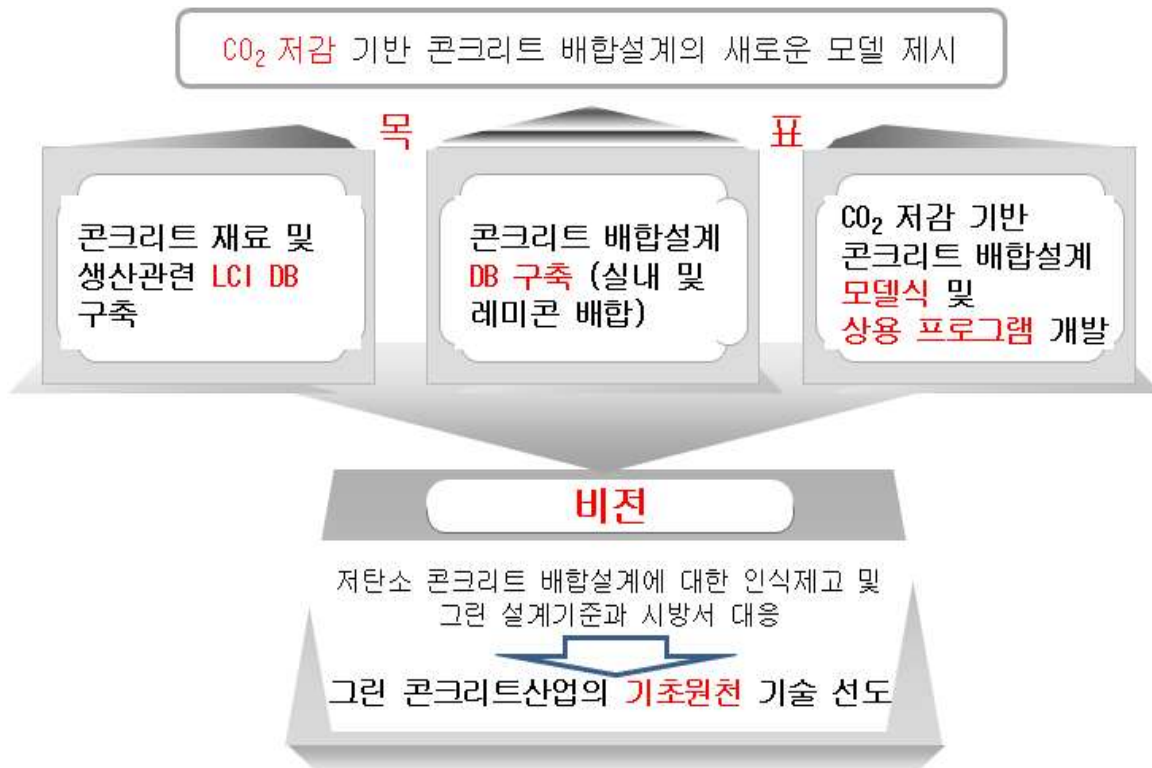
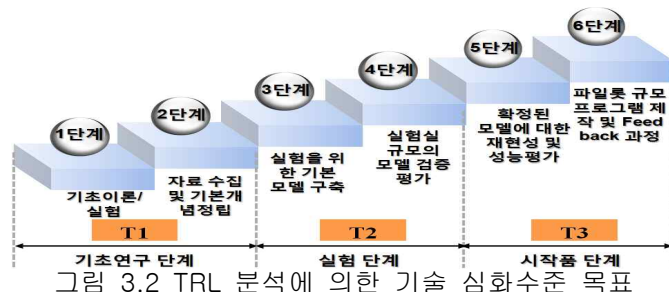


그림 3.1 본 연구의 목표 및 비전

연 도	연구 세부목표	기술심화수준 및 성과물
1차년	· 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 구성재료	- 콘크리트 전과정 CO₂ 평가를 위한 콘크리트 구성 재료의 LCI DB 구축 - 국가 LCI DB에서 아직 구축되지 않은 콘크리트 구성 재료(혼화재)의 LCI DB 구축(국외자료 수집 및 산업연관분석이나 직접적산법에 근거한 LCI DB 구축) - 성과물 : 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카 흙의 LCI - 기술 심화수준 : 콘크리트 혼화재들의 LCI DB 구축은 콘크리트의 전과정(LCA) 평가를 위한 기초자료로서, TRL 단계에서 2단계인 자료수집 및 기본개념 정립단계까지를 목표로 함.
	· 콘크리트 배합설계 DB 구축	- 콘크리트 배합설계에 대한 실내실험 및 레미콘 배합실험 자료 조사 - 성과물 : 콘크리트 배합설계에 대한 데이터베이스 (경량, 보통중량 콘크리트에 대한 데이터 수 : 5,000 data sets 이상 목표) - 본 세부연구는 CO₂ 저감 콘크리트 배합설계를 위한 설계 모델식 개발을 위해 반드시 필요한 자료로서 TRL 단계에서 2단계인 자료수집 및 기본개념 정립단계까지를 목표로 함.
2차년	· 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재	- 콘크리트 전과정 CO₂ 평가를 위한 콘크리트 플랜트와 산업부산물 골재 등에 대한 LCI DB 구축 - 성과물 : 콘크리트 생산 및 양생 시스템과 인공경량골재 및 산업부산물 골재 등의 LCI - 기술 심화수준 : 콘크리트의 전과정(LCA) 평가를 위한 기초자료로서, TRL 단계에서 2단계인 자료수집 및 기본개념 정립단계까지를 목표로 함
	· CO ₂ 저감 보통중량 콘크리트 배합 설계 모델식 개발 및 검증실험	- 콘크리트 CO₂ 평가 지표 개발 - CO₂ 평가 지표를 이용한 CO₂ 저감 보통중량 콘크리트의 최적 배합설계 모델식 개발 및 검증실험 - 성과물 : CO₂ 저감 콘크리트 배합설계 모델 및 설계용 차트 - 설계 모델식 평가지표는 엄격한 신뢰성을 필요로 하므로 TRL 단계에서 5단계인 확정된 모델에 대한 재현성 및 성능평가까지를 목표로 함.
3차년	· CO ₂ 저감 경량 콘크리트 배합설계 모델식 개발 및 검증실험	- 2차년도에 개발된 모델식들의 경량콘크리트로 확대 - TRL 단계에서 5단계인 확정된 모델에 대한 재현성 및 성능평가까지를 목표로 함.
	· CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발	- CO₂ 배출량 저감 콘크리트 배합설계 알고리즘에 기반한 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 - 성과물 : CO₂ 저감 콘크리트 배합설계를 위한 프로그램 - 개발된 CO₂ 저감 콘크리트 배합설계 프로그램은 레미콘 배합실험을 통한 Feed back 과정을 통하여 완성되기 때문에 TRL 단계에서 6단계인 파일럿 규모의 프로그램 제작 단계까지를 목표로 함.



나. 최종목표의 성격 및 설정근거

- 본 연구의 최종목표 성격은 그린 콘크리트 생산을 위한 알고리즘 및 프로그램 개발로서 그 세부 목표에 따른 성격 및 설정근거를 다음에 요약하였음.

연 도	세부 목표	성 격	성과물	설정 근거	
				현단계 기술수준 한계	연구 역량 및 달성수준
1차년	· 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 구성재료	데이터 베이스	LCI 보고서	- 가장 일반적으로 사용하는 혼화재인 고로슬래그, 플라이애쉬 및 실리카폼에 대한 LCI 데이터 없음.	- 우리나라 현실정을 고려한 각종 혼화재의 LCI 데이터 정립 (고로슬래그, 플라이애쉬 및 실리카폼)
	· 콘크리트 배합설계 DB 구축	데이터 베이스	기초자료	- 콘크리트 배합설계에 대한 각 회사별 노하우는 있지만 전반적인 데이터베이스는 없음.	- 배합설계 알고리즘 개발을 위한 기초자료로서 5,000 개 이상의 콘크리트에 대한 실험결과 확보 (경량 및 보통중량 콘크리트)
2차년	· 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재	데이터 베이스	LCI 보고서	- 전과정 평가를 위해 실질적으로 필요한 콘크리트 생산시스템에 대한 LCI 데이터 없음. - 콘크리트의 특성을 좌우하고 70% 이상을 차지하는 골재에 대해서는 단순히 천연골재에 대한 LCI 데이터만 있음.	- 우리나라 현 실정을 고려한 콘크리트 생산시스템과 인공경량 및 산업부산물 골재 등의 LCI 데이터 정립
	· CO ₂ 저감 보통중량 콘크리트 배합설계 모델식 개발	아이디어 개발 / 모델 개발	CO ₂ 평가 절차 확립	- 전과정 평가에 의한 콘크리트 CO ₂ 배출량 평가에 대한 기초자료 미흡.	- 콘크리트 생산에 대한 LCI DB 정립 - 전과정 콘크리트 CO ₂ 평가 절차 확립.
			CO ₂ 평가 지표제시	- CO ₂ 발생량은 이용되는 혼화재 및 단위결합재량에 의해서 현저하게 달라짐. - CO ₂ 발생량 평가를 위한 압축강도는 물-결합재비에 의해서 현저하게 달라짐.	- 압축강도 1 MPa에대한 소요결합재 지수 및 CO ₂ 지수의 모델 제시. - 물-결합재비와 압축강도 관계의 일반화.
			배합설계 모델정립	- CO ₂ 발생량을 고려한 콘크리트 배합설계에 대한 연구 없음.	- CO ₂ 평가지표를 활용한 CO ₂ 저감 배합설계 모델식 개발
3차년	· CO ₂ 저감 경량 콘크리트 배합설계 모델식 개발	아이디어 및 모델 개발	배합설계 모델확장	- CO ₂ 발생량을 고려한 경량콘크리트 배합설계에 대한 연구 없음.	- 2차년도에 개발된 배합설계 모델식을 경량콘크리트로 확대
	· CO ₂ 배출량 절감 콘크리트배합설계 프로그램 개발	프로그램 개발	설계용 차트 프로그램	- 목표 CO ₂ 저감량을 고려한 콘크리트 배합설계 방법 부재 - 환경영향을 고려한 신뢰할만한 콘크리트 배합설계 프로그램의 부재	- 목표 CO ₂ 발생량에 따른 콘크리트 결합재 설계 표 제시 - 콘크리트 CO ₂ 평가의 단순화 - 실무에서 쉽게 이용할 수 있는 환경영향이 고려된 콘크리트 배합설계 프로그램 제시 - Feed back을 통한 프로그램 검증.

다. 총괄(1차년도~3차년도) 성과목표 및 성과 지표

	과제명		성과목표		성과지표		성과검증 기준			가중치	해당 기관
							목표치	측정방법	검증방법		
질적 목표	1	콘크리트 생산관련 생애주기 원단위 (LCI) 데이 터 구축 및 CO ₂ 저 감 콘크리 트 배합설 계 프로그 램 개발	1-1 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가 를 위한 LCI 구축 및 유효 성 검증	①	콘크리트 전과정 CO ₂ 평가지침	1	평가지침 개발 건수	최종 보고서	5%	한양대	
				②	콘크리트 구성재료 LCI DB	5	LCI DB 구축 건수	최종 보고서	10%	한양대	
				③	콘크리트 제조 플랜트 LCI DB	1	LCI DB 구축 건수	최종 보고서	10%	한양대	
		1-2	CO ₂ 배출량 저감 콘크리트 배합설계 프 로그램 개발	①	프로그램(S/W)	1	프로그램 개발건수	연구 보고서	15%	한양대	
				②	프로그램 현장시범적용	3	현장시범적용 건수	최종 보고서	5%	한양대	
	2	콘크리트 배합설계 에 대한 데이터베 이스 구축 및 CO ₂ 저 감 콘크리 트 배합설 계 모델식 개발	2-1	콘크리트의 배합설계에 대한 데이터 베이스 구축	①	Access와 Excel Sheet 를 이용한 실험결과들 의 DB	5,000개 이상	콘크리트 데이터 수	DB 파일	10%	경기대
			2-2	CO ₂ 저감을 고려한 콘크 리트 배합설 계 프로세스 정립 및 환경 영향 평가	①	콘크리트 CO ₂ 평가 지 수 모델 개발	2	실무용 도표 제시 건수	최종 보고서	5%	경기대
					②	경량 및 보통중량 콘크 리트 배합 모델식 개발	1	정립모델 개발 건수	최종 보고서	10%	경기대
					③	혼화재 및 경량골재 사 용에 따른 콘크리트 CO ₂ 및 환경영향 평가	1	평가 보고서	최종 보고서	5%	경기대
					④	CO ₂ 저감을 위한 결합 재 설계를 위한 실무용 도표 제시	1	정립모델 개발 건수	최종 보고서	15%	경기대
		2-3	검증실험	①	제시된 모델식의 검증실험	3	압축강도와 CO ₂ 저감율	성적서	5%	경기대	
계									100%		
양적 목표	사업연계지표				성과지표		목표치	가중치	해당 기관		
					소프트웨어 (S/W) 개발		1	30%	한양대		
					SCI급 학술지 논문 게재		4	10%	한양대 경기대		
					국내외 학술지 논문 게재		6	10%	한양대 경기대		
					국내외 학술발표 논문 게재		9	5%	한양대 경기대		
					특허출원/등록		1	15%	한양대		
					프로그램 등록		1	10%	한양대		
					LCI DB 구축		7	10%	한양대		
					배합설계 DB 구축		1	10%	경기대		
	계									100%	

2. 연구개발 추진전략 및 방법

가. 연구개발 추진전략

(1) 연구개발 추진체계

구 분	주관연구기관	공동연구기관
1차년도	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 구성재료	Access와 Excel Sheet를 이용한 콘크리트 배합설계에 대한 데이터베이스 구축
2차년도	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재	CO ₂ 저감을 고려한 보통중량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 혼화재 치환에 따른 환경영향 평가
3차년도	CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발	CO ₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 혼화재와 경량골재 사용에 따른 환경영향 평가

(2) 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	[한양대학교] ▪ 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 구성재료	▪ 콘크리트 전과정 CO₂ 평가를 위한 콘크리트 구성 재료 분류 및 국가 LCI DB 조사 ▪ 단위공정 및 기준흐름 설정과 데이터 수집 ▪ 콘크리트 전과정 CO₂ 평가를 위한 콘크리트 구성 재료의 LCI DB 구축 ▪ 구축된 LCI DB 전문가 유효성 검토 및 개선
	[경기대학교] ▪ 콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축	▪ 실내실험 및 레미콘 배합설계에 대한 정리 및 실험결과 분석(경량/보통중량 콘크리트) ▪ Access와 Excel Sheet를 이용한 5,000개이상의 실험결과들의 DB (경량/보통중량 콘크리트)
2차년도	[한양대학교] ▪ 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재	▪ 국내 일반적인 콘크리트 제조 플랜트 조사 분석 ▪ 콘크리트 전과정 CO₂ 평가를 위한 콘크리트에 사용되는 산업부산물 조사 : 인공경량골재, 산업부산물골재 등 ▪ 레미콘 업체 및 산업부산물 제조회사 공장방문을 통한 데이터 수집 (설비현황, 에너지 소비 등) ▪ 구축된 LCI DB 전문가 유효성 검토 및 개선
	[경기대학교] ▪ CO ₂ 저감을 고려한 보통중량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 환경영향 평가	▪ 콘크리트 CO₂ 평가 지수 모델 개발 (콘크리트 단위압축강도 1MPa에 대한 환경영향 평가 지수 개발; 결합재 및 CO₂ 지수) ▪ 보통중량 콘크리트배합 모델식개발 (CO₂ 저감을 고려한 결합재량, W/B 및 S/a 결정) ▪ 혼화재 치환에 따른 콘크리트 환경영향 및 경제성 평가 ▪ CO₂ 저감을 위한 결합재 설계를 위한 실무용 도표제시 (목표 CO₂ 및 압축강도에 따른 결합재량 제시) ▪ 제시된 모델식의 검증을 위한 실험
3차년도	[한양대학교] ▪ CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발	▪ 개발된 최적배합설계 모델식과 프로그램의 연동체계 구축 ▪ VBA (visual basic application)를 이용한 상용 프로그램 개발 ▪ 상용 프로그램 교육 및 운영 체계 구축
	[경기대학교] ▪ CO ₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 환경영향 평가	▪ 경량 콘크리트 배합 모델식 개발 (목표 단위용적중량, 목표슬럼프, 목표압축강도 및 목표 CO₂ 저감에 대한 경량골재 비중, 결합재량, W/B 및 S/a 결정) ▪ 혼화재 및 경량골재 사용에 따른 콘크리트 CO₂ 및 환경영향 평가 ▪ CO₂ 저감을 위한 결합재 설계를 위한 실무용 도표제시(목표CO₂, 압축강도 및 단위용적중량에 따른 결합재량 제시) ▪ 제시된 모델식의 검증을 위한 실험

(3) 연차별 세부 추진계획 및 방법

구분	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간(주)	담당기관
1차 년도	■ 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 구성재료	콘크리트 전과정 CO ₂ 평가를 위한 콘크리트 구성재료 분류 및 국가 LCI DB 조사	12	한양대
		단위공정 및 기준흐름 설정과 데이터 수집	12	
		콘크리트 구성재료의 LCI DB 구축	24	
	■ 콘크리트 배합설계에 대한 데이터베이스 구축	콘크리트 배합실험 데이터베이스의 기본 포맷 설정	3	경기대
		콘크리트 배합실험에 대한 논문 및 보고서 자료 조사	12	
		레이콘 배합실험 데이터 확보를 위한 각 레이콘 공장의 협조공문 발송 및 방문 설명	12	
		Access 및 Excel Sheet를 이용한 DB 구축	12	
2차 년도	■ 콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재	국내 일반적인 콘크리트 제조 플랜트 조사/분석	16	한양대
		콘크리트에 사용되는 산업부산물 조사(인공경량골재, 산업부산물골재 등)	12	
		레이콘 업체 및 산업부산물 제조회사 공장방문을 통한 데이터 수집(설비현황, 에너지소비 등)	20	
	■ CO ₂ 저감을 고려한 보통중량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 콘크리트 환경영향 평가	콘크리트 단위 압축강도 1MPa에 대한 콘크리트 환경영향 평가 지수 개발	4	경기대
		실험결과들의 비선형 회귀분석으로부터 결합재 재지수와 CO ₂ 지수의 상관관계 평가	4	
		혼화재 치환에 따른 콘크리트 환경영향 평가	10	
		혼화재 종류에 따라 CO ₂ 저감이 고려된 결합재 설계에 대한 기본차트 제시	10	
		목표 슬럼프, 압축강도 및 목표 CO ₂ 저감에 대한 물-결합재비, 단위결합재량 및 잔골재를 평가 모델식 개발	10	
		제시된 배합설계 프로세스 검증을 위한 실험	10	
3차 년도	■ CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발	개발된 최적배합설계 모델식과 프로그램의 연동체계 구축	12	한양대
		VBA(visual basic application)를 이용한 프로그램 개발	24	
		프로그램 메뉴얼 구축	12	
	■ CO ₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 콘크리트 환경영향 평가	콘크리트의 목표단위용적중량, 목표슬럼프, 목표압축강도 및 목표 CO ₂ 저감에 대한 경량골재 비중, 단위결합재량, W/B 및 S/a 평가모델식 개발	12	경기대
		혼화재 및 경량골재 사용에 따른 콘크리트 CO ₂ 및 환경영향 평가	12	
		혼화재 종류에 따라 CO ₂ 저감이 고려된 결합재 설계에 대한 기본차트 제시	12	
		제시된 배합설계 프로세스 검증을 위한 실험	12	

(4) 연도별 주요 추진 일정

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	성과물 (산출물)	관련 성과목표/지표		소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도				3차년도			
					성과목표	성과지표		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	콘크리트 LCI 데이터 구축 및 CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 (한양대)	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 구성재료	■ 콘크리트 구성 재료 분류 및 국가 LCI DB 조사	콘크리트 전과정 CO ₂ 평가지침	1-1	1-1-①	15	15											
			■ 단위공정 및 기준흐름 설정과 데이터 수집	콘크리트 구성재료 LCI DB	1-1	1-1-②	35			35									
		콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재	■ 국내 일반적인 콘크리트 제조 플랜트 조사 분석	콘크리트 구성재료 LCI DB	1-1	1-1-②	15					20							
			■ 콘크리트에 사용되는 산업부산물 조사	콘크리트 제조 플랜트 LCI DB	1-1	1-1-③	35						13.5						
		CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발	■ 레이콘 업체 및 산업부산물 제조회사 공장 방문을 통한 데이터 수집	콘크리트 배합설계 프로그램	1-2	1-2-①	30									30			
			■ 구축된 LCI DB 전문가 유효성 검토 및 개선	프로그램 현장시범적용	1-2	1-2-②	10											10	
				프로그램 메뉴얼 제언	1-2	1-2-③	10											10	
공동	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축 및 CO ₂ 저감 콘크리트 배합설계 모델식 개발 (경기대)	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축	■ Access와 Excel Sheet를 이용한 실험결과들의 DB 구축	DB 파일	2-1	2-1-①	50	50											
		CO ₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 환경영향 평가	■ 콘크리트 CO ₂ 평가 지수모델 개발	모델식	2-2	2-2-①	10					7.5							
			■ 경량 및 보통중량 콘크리트 배합 모델식 개발	모델식	2-2	2-2-②	25						10			20			
			■ 혼화재 및 경량골재 사용에 따른 콘크리트 CO ₂ 및 환경영향 평가	보고서	2-2	2-2-③	25						10			10			
			■ CO ₂ 저감용 결합재 설계를 위한 실무용 도표 제시	실무용도표	2-2	2-2-④	40							10			15		
		검증 실험	■ 제시된 모델식의 검증실험	성적서	2-3	2-3-①	25							10				15	
계								100 (백만원)				100 (백만원)				100 (백만원)			

(가) 1차년도 추진 일정

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	성과물 (산출물)	관련 성과목표/지표		소요 연구비 (백만원)	1/4			2/4			3/4			4/4		
					성과목표	성과지표		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
주관	콘크리트 LCI 데이터 구축 및 CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 (한양대)	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 구성재료	- 콘크리트 구성 재료 분류 및 국가 LCI DB 조사 - 단위공정 및 기준흐름 설정과 데이터 수집 - 콘크리트 구성 재료의 LCI DB 구축 - 구축된 LCI DB 전문가 유효성 검토 및 개선	콘크리트 전과정 CO ₂ 평가지침	1-1	1-1-①	20	15			5								
				콘크리트 구성재료 LCI DB	1-1	1-1-②	30							10	20				
공동	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축 및 CO ₂ 저감 콘크리트 배합설계 모델식 개발 (경기대)	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축	- 실내실험 및 레이콘 배합설계에 대한 정리 및 실험결과분석 - Access와 Excel Sheet를 이용한 실험결과 들의 DB 구축	결과보고서	2-1	2-1-①	20	10			10								
				DB 파일	2-1	2-1-①	30			5	15			10					
계								30 (백만원)			40 (백만원)			30 (백만원)					

(나) 2차년도 추진 일정

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	성과물 (산출물)	관련 성과목표/지표		소요 연구비 (백만원)	1/4			2/4			3/4	
					성과목표	성과지표		1	2	3	4	5	6	7	8
주관	콘크리트 LCI 데이터 구축 및 CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 (한양대)	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 구성재료 및 제조 플랜트	- 콘크리트 구성 재료 분류 및 국가 LCI DB 조사 - 단위공정 및 기준흐름 설정과 데이터 수집 - 콘크리트 구성 재료의 LCI DB 구축 - 구축된 LCI DB 전문가 유효성 검토 및 개선	콘크리트 구성재료 LCI DB	1-1	1-1-①	20	20							
				콘크리트 제조 플랜트 LCI DB	1-1	1-1-②	13.5					13.5			
공동	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축 및 CO ₂ 저감 콘크리트 배합설계 모델식 개발 (경기대)	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축	콘크리트 CO₂ 평가 지수 모델 개발	정립모델 개발 건수	2-1	2-1-①	7.5	7.5							
			보통종량 콘크리트 배합 모델식 개발	정립모델 개발 건수	2-1	2-1-②	10		10						
			혼화재 치환에 따른 콘크리트 CO₂ 및 환경 영향 평가	평가보고서	2-1	2-1-③	10				10				
			CO₂ 저감을 위한 결합재 설계를 위한 실무용 도표 제시	실무용 도표 제시 건수	2-1	2-1-④	6							6	
계								37.5 (백만원)			23.5(백만원)			6 (백만원)	

(다) 3차년도 추진 일정

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	성과물 (산출물)	관련 성과목표/지표		소요 연구비 (백만원)	1/4			2/4			3/4	
					성과목표	성과지표		1	2	3	4	5	6	7	8
주관	콘크리트 LCI 데이터 구축 및 CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 (한양대)	CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발	▪ 개발된 최적배합설계 모델식과 프로그램의 연동체계 구축 ▪ VBA를 이용한 상용 프로그램 개발 ▪ 상용 프로그램 교육 및 운영 체계 구축	콘크리트 배합설계 프로그램	1-2	1-2-①	40	20							
				프로그램 현장시범적용	1-2	1-2-②	14					13.5			
				프로그램 메뉴얼 제안	1-2	1-2-③	12.5								
공동	콘크리트 배합설계에 대한 DB 구축 및 CO ₂ 저감 콘크리트 배합설계 모델식 개발 (경기대)	검증 실험	▪ 제시된 모델식의 검증실험	성적서	2-3	2-3-①	25	7.5							
									10						
											10				
														6	
계								37.5 (백만원)			23.5(백만원)			6 (백만원)	

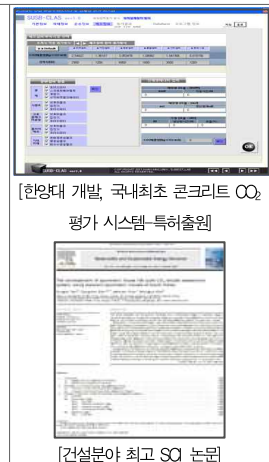
(5) 기타

- 공동연구과제의 연구개발 목표 및 내용, 그리고 기술개발 및 연계성 등에 관한 주요 내용은 다음과 같음.

가. 연구개발 목표 및 내용			
목 표	CO ₂ 저감에 기반한 그린 콘크리트 배합설계 프로그램 개발		
내 용	1차년도	한양대	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 구성재료(GBBS/FA/SF)
		경기대	콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축
	2차년도	한양대	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB구축 및 유효성 검토 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업부산물 골재
		경기대	CO ₂ 저감을 고려한 보통중량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 혼화재 치환에 따른 콘크리트 환경영향 평가
	3차년도	한양대	CO ₂ 배출량 절감 콘크리트 배합설계 프로그램 개발
		경기대	CO ₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 인공경량 골재 사용에 따른 콘크리트 환경영향 평가

나. 연구대상기술의 개발 가능성

- 현재 국내 건축물 및 건설재료의 에너지 및 CO₂ 배출량 분석기술 수준은 미국과 EU에 대비하여 약 65% 수준으로 판단됨
- 그러나 한양대 연구진의 지속적인 분석기술의 개발과 보완으로 기술 격차는 줄어들고 있으며 기술개발 역량은 급속도로 증대되는 추세임
- 한양대 연구진의 축적된 연구기술과 공동 연구진의 DB 활용 및 협력을 통해 세계적 수준의 프로그램 개발이 가능함
 - 한양대 : 콘크리트 전과정 CO₂평가 프로그램(SUSB-CLAS), 건설현장의 콘크리트 압축강도별 CO₂평가 등과 같이 평가 프로그램 개발 및 다수의 SCI 논문 게재를 통해 세계적 수준으로 인정받음
 - 경기대 : 경량 콘크리트의 최적배합표 제시 및 배합설계 시스템 개발연구와 알카리 콘크리트의 CO₂저감성능 평가[국외 SCI논문]등과 같은 다수의 SCI 논문 게재를 통해 세계적 수준으로 인정받음



다. 연구 추진 계획 및 연계성

- 경기대학교는 탄소저감 콘크리트 배합설계 모델식 개발을 위하여 배합설계DB를 수집하는 것이며, 이를 한양대에서 구축한 LCI DB와 기 구축된 LCI DB를 이용하여 탄소배출량 평가를 수행할 예정이므로 탄소배출 저감할 수 있는 배합모델식 및 상용 프로그램(S/W) 개발 예정임. 두 기관의 연구 중간 성과물은 상호간의 필수적으로 활용할 수 있으며 매우 유용하게 이용될 것으로 사료

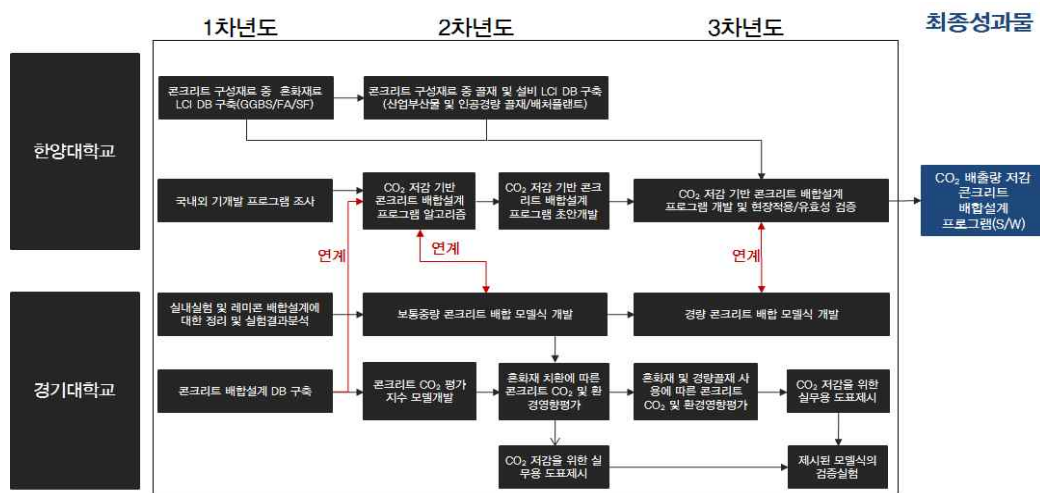


그림 3.3 차년도별 연구 추진 계획

제 2 절 연구개발 내용 및 결과

1. 연구개발결과 요약

가. 1차년도

(1) 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증

- 콘크리트 전과정 CO₂ 평가를 위한 콘크리트 구성 재료 분류 및 국가 LCI DB 구축
- 단위공정 및 기준흐름 설정과 데이터 수집
- 구축된 LCI DB 전문가 유효성 검토 및 개선

정의	■ 건설재료 중 콘크리트 구성재료(GGBS/FA 등)의 생산 시 투입물질 및 배출물질을 지수로 표현하고 목록화한 데이터베이스
목적	■ CO ₂ 배출이 저감된 콘크리트의 배합설계 도출 및 콘크리트에 특화된 CO ₂ 배출량 평가 프로그램 개발 시 적용 예정
성능목표	■ 국내 구축되지 않은 콘크리트 구성재료들의 LCI DB를 개발하여 콘크리트 CO ₂ 배출량 평가 및 배합설계 도출시 신뢰성 향상

A	B	C	D	E
1	발행	데이터범주	전과정목록	
2			물질명	단위
3				양
192	투입물	원/부 자재	sodium pyrosulphite	kg
193	투입물	원/부 자재	sodium sulfate(Na2SO4)	kg
194	투입물	원/부 자재	sodium sulfite(Na2SO3)	kg
195	투입물	원/부 자재	sulfuric acid(H2SO 4.55%)	kg
196	투입물	원/부 자재	sulfuric acid(H2SO 4.6%)	kg
197	투입물	원/부 자재	sulfuric acid(H2SO 4.96%)	kg
198	투입물	원/부 자재	sulfuric acid(H2SO4)	kg
199	투입물	원/부 자재	Sulfuric acid(H2SO4.98%)	kg
200	투입물	원/부 자재	tetra butyl mercaptan	kg
201	투입물	원/부 자재	tetrachloroethylene	kg
202	투입물	원/부 자재	tetrahydrothiophene	kg
203	투입물	용수	water(unspecified)	m3
204	투입물	용수	water, lake	m3
205	투입물	용수	water, river	m3
206	투입물	용수	water, salt, ocean	m3
207	투입물	용수	water, well, in ground	m3
208	투입물	에너지	energy, kinetic (in wind), converted	MJ
209	투입물	에너지	energy, potential (in hydropower reservoir)	MJ
210	투입물	에너지	energy, solar, converted	MJ
211	산출물	제품/부산물	aluminum oxide(Al2O3)	kg
212	산출물	제품/부산물	flyash	kg
213	산출물	대기배출물	1,2-dichlorobenzene	kg
214	산출물	대기배출물	1,2-dichloroethane	kg
215	산출물	대기배출물	1,3-butadiene	kg
216	산출물	대기배출물	1,4-butanediol	kg
217	산출물	대기배출물	1-pentanol	kg
218	산출물	대기배출물	2,4-dichlorophenol	kg
219	산출물	대기배출물	2-aminopropanol	kg
220	산출물	대기배출물	2-chlorotoluene	kg
221	산출물	대기배출물	2-methylbut-2-ene	kg
222	산출물	대기배출물	2-nitrobenzoic acid	kg
223	산출물	대기배출물	acenaphthene	kg
224	산출물	대기배출물	acetaldehyde	kg
225	산출물	대기배출물	acetic acid	kg
226	산출물	대기배출물	acetone	kg
227	산출물	대기배출물	acetonitrile	kg
228	산출물	대기배출물	acetylene	kg
229	산출물	대기배출물	acrolein	kg
230	산출물	대기배출물	acrylic acid	kg

영향범주	영향평가 결과 (특성화)	단위
자원소모	2.231E-04	kg antimony-eq.
지구온난화	3.100E-02	kg CO ₂ -eq.
오존층파괴	3.924E-09	kg CFC ₁₁ -eq.
산성화	1.307E-04	kg SO ₂ -eq.
부영양화	1.105E-03	kg PO ₄ ³⁻ -eq.
광화학산화물생성	6.401E-05	kg C ₂ H ₄ -eq.

고로슬래그미분말 LCI DB 영향평가

영향범주	영향평가 결과 (특성화)	단위
자원소모	3.345E-04	kg antimony-eq.
지구온난화	2.307E-02	kg CO ₂ -eq.
오존층파괴	6.312E-09	kg CFC ₁₁ -eq.
산성화	1.309E-04	kg SO ₂ -eq.
부영양화	2.117E-05	kg PO ₄ ³⁻ -eq.
광화학산화물생성	8.272E-05	kg C ₂ H ₄ -eq.

플라이애쉬 LCI DB 영향평가

(2) 콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축

- 실내실험 및 레미콘 배합설계에 대한 정리 및 실험결과 분석(경량/보통중량 콘크리트)
- Access와 Excel Sheet를 이용한 5,000개이상의 실험결과 DB구축(경량/보통중량 콘크리트)

정의	■ 실내배합과 레미콘 배합설계 및 콘크리트 환경영향 평가 DB 구축
목적	■ 배합설계 알고리즘 개발을 위한 기초자료로 5,000개 이상의 콘크리트 실험 결과의 확보와 콘크리트의 환경영향 평가에 대한 DB구축
성능목표	■ 국내 건설산업에서 사용되는 콘크리트의 전반적인 배합설계 DB구축과 CO ₂ 를 포함한 전과정 환경영향 평가시스템 구축 ■ SQL server를 이용한 DB의 온라인 시스템 구축

다. 3차년도

(1) CO₂ 저감 기반 그린 콘크리트 배합설계 상용 프로그램 개발

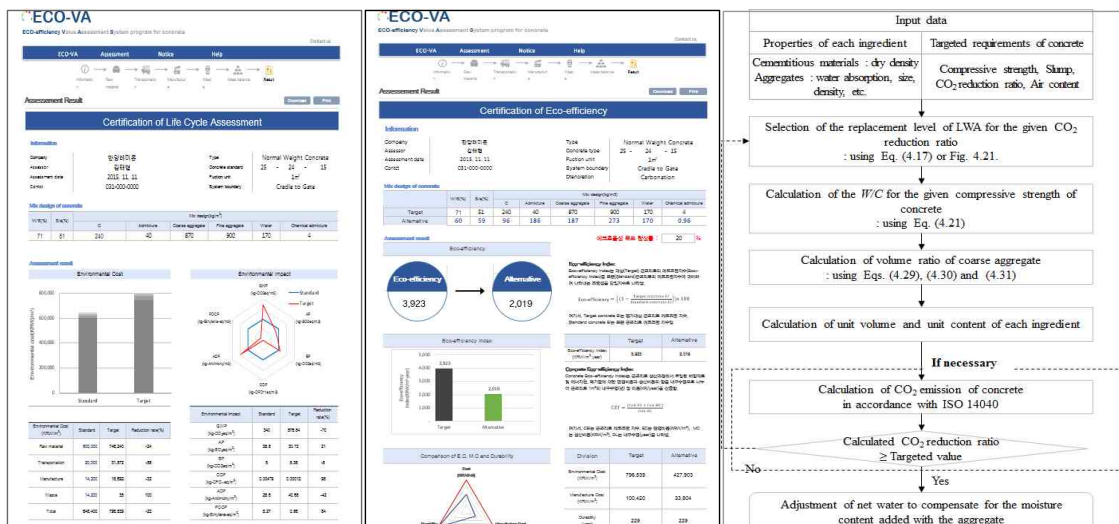
- 사전에 개발 된 최적배합설계 모델식 및 프로그램의 연동체계 구축
- VBA(visual basic application) 이용한 프로그램 개발
- 상용 프로그램 교육 및 운영체계 구축

정의	■ 콘크리트의 친환경성을 평가하는 진보된 개념으로서 환경성 및 경제성, 내구성을 유기적으로 연계한 콘크리트의 지속가능성 지표(Indicator)인 콘크리트 에코효율성(CEI, Concrete Eco-efficiency Index)) 평가방법을 적용한 에코효율성 평가 프로그램
목적	■ 에코효율성 향상 배합설계 모델 식을 이용하여 평가대상(Object) 콘크리트의 배합설계와 동등 내구수명을 만족하면서 비용이 절감된 에코효율성 향상 배합설계를 도출

(2) CO₂ 저감 기반 그린 콘크리트 배합설계 상용 프로그램 개발

- 콘크리트의 목표단위용적중량, 목표슬럼프, 목표압축강도 및 목표 CO₂ 저감에 대한 경량골재의 비중, 단위결합재량, W/B 및 S/a 평가 모델식 개발
- 혼화재 및 경량골재 사용에 따른 콘크리트의 CO₂ 및 환경영향 평가
- 혼화재 종류에 따라 CO₂ 저감이 고려된 결합재 설계에 대한 기본차트 제시
- 제시된 배합설계 프로세스 검증을 위한 실험

연구내용	■ 경량 콘크리트의 CO₂ 배출량 저감 결합재량, W/B 등의 모델식 개발 ■ 실무적으로 적용할 수 있는 CO₂ 배출량 저감 결합재 설계 도표 제안 ■ 혼화재 치환에 따른 경량 콘크리트 배합설계의 환경영향을 평가
------	--



콘크리트 에코효율성 평가 프로그램(ECO-VA) 개발

경량 콘크리트 배합모델 개발결과

2. 연구개발 주요내용

[1차년도]

가. 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증
콘크리트 구성재료(고로슬래그미분말, 플라이애쉬, 실리카흙)

(1) LCI Database 구축 프로세스 조사 및 분석

(가) 참여업체 선정

- 데이터베이스의 대표성을 확보할 수 있도록, 국내 생산량의 50% 이상을 생산하는 업체들을 선정하거나 기술적 대표성이 있을 경우 해당 기술을 사용하는 업체를 선정함.

(나) 데이터수집

- LCI DB를 구축하려는 업체를 방문 또는 업체 담당자에 대한 기본적인 교육을 하고, 이후 각 담당자가 제공하는 제품의 공정별 입출력물질에 대한 데이터를 수집함.

(다) 데이터 검증 및 계산

- 설문지를 통해 수집된 데이터에 대한 물질수지, 물수지 및 에너지수지 분석과 업체 담당자와의 협의를 통해 누락되거나 잘못 기입된 데이터를 수정, 보완하는 작업이며, 사용된 방법론(할당방법, 시스템 경계 설정 방법 등)에 대한 내부 검토를 실시, 이렇게 사용된 방법론에 대한 평가 또한 정밀검토 과정에서 재차 평가함.

(라) 데이터산출

- 데이터 검증 및 계산이 완료되면 업체별로 기능단위당 투입물과 산출물에 대한 공정 데이터인 gate to gate 데이터를 산출함.

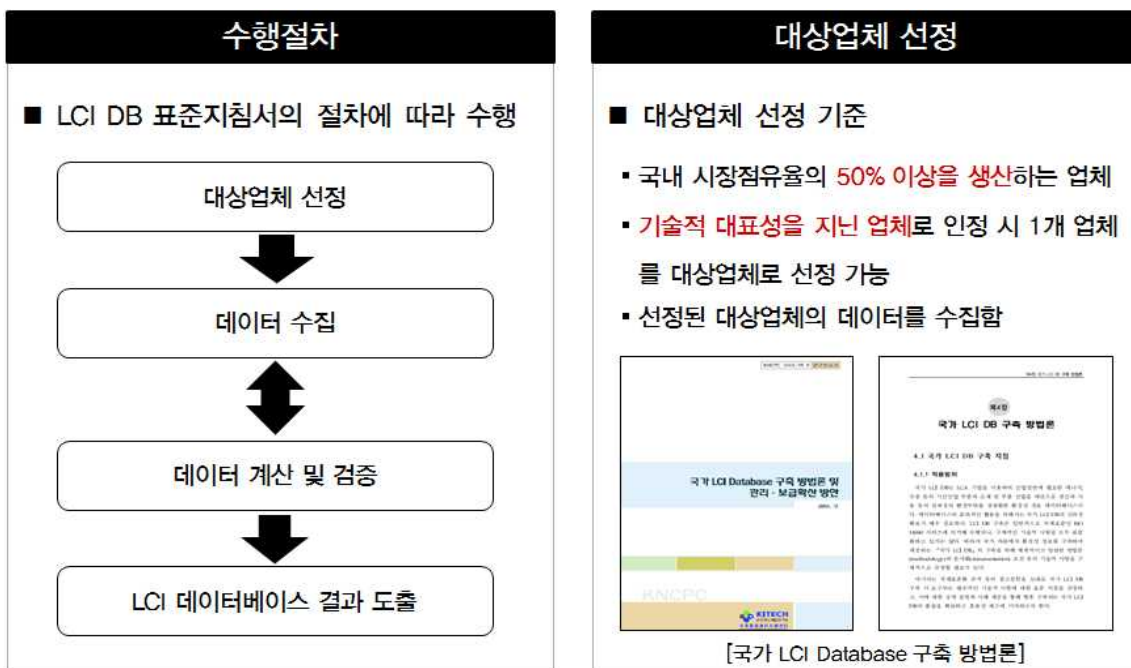


그림 3.4 LCI DB 구축 수행절차 및 대상업체 선정

(바) LCI 데이터베이스 구축

- 참여업체별로 구축된 GtG 데이터는 업체들의 생산량 비를 적용하여 수직법 또는 수평법을 이용하여 데이터를 통합, 이러한 통합 GtG를 LCA 소프트웨어(TOTAL 등)을 사용하여 전과정 목록 데이터를 산출하여 국가 표준 LCI DB의 형태에 맞추어 최종 DB 형태로 완성함.

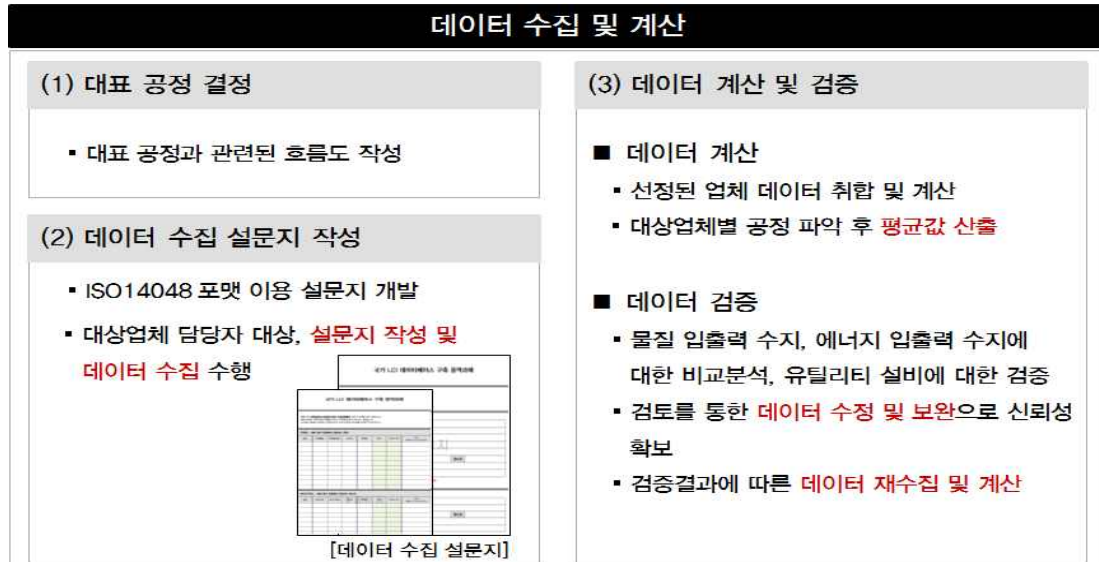


그림 3.5 데이터 수집 및 계산

(2) 고로슬래그미분말 LCI Database 구축 및 유효성 검토

(가) 일반정보

① 제품정보

- 고로슬래그미분말은 제철소에서 선철을 제조할 때 발생하는 용융슬래그를 용광로(고로)에서 꺼내어 물로 급냉시켜 유리질의 작은 모래입자로 만든 다음 분쇄기(Roller Mill)로 분쇄하여 미분말로 제조한 것으로 시멘트와 유사한 화학성분을 지니고 있음.
- 이 화학성분들은 잠재수경성으로 물과 접하면 슬래그입자표면에 치밀한 불투수층의 산성피막이 형성되는데, 이를 강알칼리 자극제를 이용하여 파괴시켜주면 수경성으로 바뀌어 경화가 시작됨.
- 고로슬래그미분말은 잠재수경성으로 장기간에 걸쳐 지속적으로 강도가 증가하고, 보통포틀랜드시멘트보다 우수한 장기강도를 발현함. 고로슬래그미분말은 보통포틀랜드시멘트보다 수화열이 적기 때문에 수화열에 의한 콘크리트 구조물의 균열을 방지할 수 있음.



그림 3.6 고로슬래그미분말 제품

② 대상업체 선정

- 국내 고로슬래그미분말 생산업체 중 (주삼표, 성신양회, 유진기업, 한국기초소재, 고려기초소재, 영진글로벌 등이 연간 고로슬래그미분말 생산량의 50%이상을 제조하고 있는 것으로 조사됨.
- 이 중 표준적인 고로슬래그미분말 생산공정인 업체를 대상으로 선정하여 국가 LCI 데이터베이스에 대한 대표성을 확보함.

(나) LCI Database 구축

① 범위 정의

㉠ 기능 및 기능단위, 기준흐름

- LCI 데이터베이스 구축 단위인 기능단위 및 기준흐름을 설정함.
- 고로슬래그미분말이 혼입된 제품의 형성을 전과정 CO₂ 배출량 평가 수행을 위한 주요기능으로 선정함. 이 기능을 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 편리한 고로슬래그미분말 1kg 생산하는 것을 기능단위로 설정함.

표 3.1 고로슬래그미분말의 기능 및 기능단위

구분	고로슬래그미분말
기능	콘크리트 제조 시 혼입재료로 사용되는 건설재료
기능단위	고로슬래그미분말 1kg 생산
기준흐름	고로슬래그미분말 1kg

㉡ 시스템경계

- 고로슬래그미분말은 제철소에서 선철을 제조할 때 발생하는 용융슬래그를 용광로(고로)에서 꺼내어 물로 급냉 시켜 유리질의 작은 모래입자임.
- 시스템경계는 원료물질 채취·제조로부터 생산품의 출하 직전까지의 공정을 포함하도록 하며 (Cradle to Gate), 열린 고리 재활용 시스템의 경계는 Cut-off 방법론을 적용하여 정의함.
- 고로슬래그미분말 생산에 의한 환경영향은 원재료 채취에 의한 환경영향으로부터 원재료가 수송되어 공정 내에서 제품 형태로 생산되는 단계까지를 포함.
- 다만 기반시설의 유지보수를 위해 사용되는 보조물질의 영향을 포함하여 기반시설 이용의 환경영향을 고려함.

시스템경계 (Cradle to gate)



그림 3.7 고로슬래그미분말 시스템경계

㉔ 데이터 범주

- 고려 데이터범주는 일반원칙에 따라 각 데이터 범주별 투입물과 산출물을 다음과 같이 나타냄.

표 3.2 고로슬래그미분말 데이터 범주

구분		물질명
투입 물	원료물질	고로슬래그, 천연석고
	보조물질	공업용수
	에너지	LNG, 전기
산출물	제품	고로슬래그미분말
	부산물	잡철
	대기배출물	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , SO _x , TSP, PM10, VOC, NH ₃ 등
	수계배출물	방류수
	고형폐기물	폐기물(고상)

㉕ 데이터 품질요건

- 데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)로 구분될 수 있으며, 고로슬래그미분말의 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하여 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 적용하였음.

㉖ 가정 및 제한사항

- 원료물질에 대한 상위흐름 자료에 대해서 최근 5년 이내에 개발된 데이터베이스가 없을 경우, 「LCI 데이터베이스 표준지침서」의 산업별 LCI 데이터베이스 구축 사례에서 적용된 바와 같이 시간적 경계를 확장시켜 최근 10년 이내의 데이터베이스를 적용함.
- 유류 및 LPG 연료 연소에 의한 대기배출물은 업체에서 관리되고 있는 실측치를 우선 적용하였으며, 관리되지 않는 대기배출물의 경우에는 국립환경과학원의 「국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람(2010)」의 배출계수를 적용하여 배출량을 산정함.
- 공정에 투입되는 원료물질에 대한 국내·외 데이터베이스가 존재하지 않는 경우, 해당 물질과 가장 유사한 조성을 갖는 데이터베이스를 연결하였으며 국내 데이터베이스를 우선적으로 활용함.

㉗ 할당

- 고로슬래그미분말 생산 시 부산물로서 잡철이 생산되므로 할당이 발생하였음.

② 전과정 목록분석

㉘ 데이터 수집 준비

- 고로슬래그미분말 데이터베이스의 구축을 위해 실제 생산업체의 생산공정을 바탕으로 업체의 데이터 관리수준을 고려하여 현장데이터 수집단위인 단위공정 및 공정흐름도를 작성하였으며, 단위공정으로 투입되고 산출되는 상·하위흐름을 표현함.
- 그림 3.8은 일반원칙에 따라 세로방향으로는 고로슬래그미분말의 원료물질 및 생산되는 제품에 대한 흐름인 주요흐름(main flow)을 표시하였으며, 가로방향으로는 제조공정으로 투입되는 보조물질, 에너지 및 폐기물 등의 흐름을 나타냄.
- 고로슬래그미분말은 원재료분말, 분쇄공정, 혼입공정, 냉각공정, 포장 및 출하공정을 거쳐 제조됨.

㉔ 데이터 수집

- 고로슬래그미분말의 공정흐름도에 따라 투입·산출물에 대한 현장데이터를 수집함.
- 수집된 데이터의 상위흐름 및 하위흐름 연결은 LCI 데이터베이스를 통해 수행하였으며, 환경부와 지식경제부에서 개발한 국가 LCI 데이터베이스뿐만 아니라, Ecoinvent 등의 해외 데이터베이스들을 수집하여 적용함.

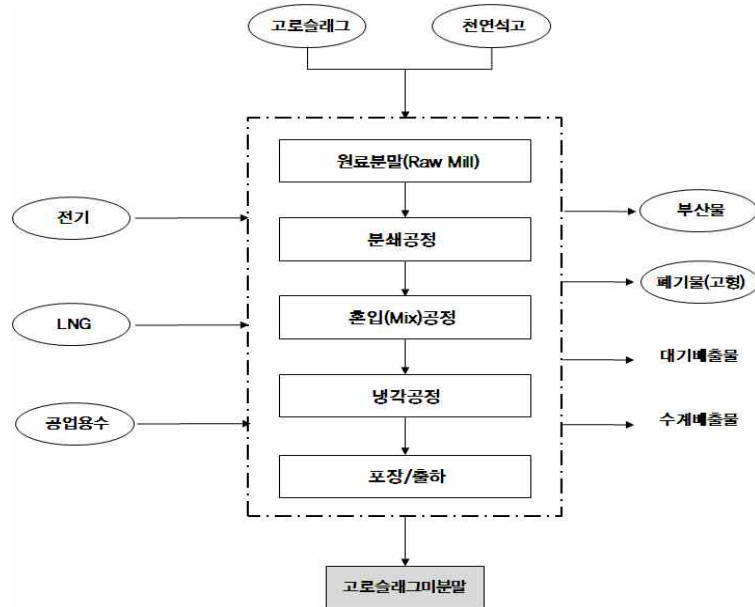


그림 3.8 고로슬래그미분말 제조 공정흐름도

표 3.3 고로슬래그미분말 상위흐름 데이터베이스 출처

구분	파라미터명	DB사용	DB명	출처	연도
투입물	원료물질	고로슬래그	○	Limestone, at mine	Ecoinvent 2010
		천연석고	○	Feldspar, at plant	Ecoinvent 2010
	보조물질	공업용수	○	공업용수_충청권	환경부 2003
	에너지	LNG	○	액화천연가스	환경부 2003
		전기	○	전기	지식경제부 2003
산출물	대기 배출물	CO ₂	-	Elementary flow	-
		CH ₄	-	Elementary flow	-
		N ₂ O	-	Elementary flow	-
		CO	-	Elementary flow	-
		NO _x	-	Elementary flow	-
		SO _x	-	Elementary flow	-
		TSP	-	Elementary flow	-
		PM ₁₀	-	Elementary flow	-
		VOC	-	Elementary flow	-
		NH ₃	-	Elementary flow	-
	수계배출물	방류수	-	Elementary flow	-
	고형폐기물	폐기물	○	지정폐기물 소각	환경부 2003
	부산물	잡철	○		
수송	고로슬래그	○	23.1-25톤 트럭	환경부	2003
		○	외항_벌크선	환경부	2011
	천연석고	○	23.1-25톤 트럭	환경부	2003
	고형폐기물(고상)	○	3.51-5ton 트럭	환경부	2003
	부산물	○	3.51-5ton 트럭	환경부	2003

㉔ 데이터 계산

- 물질수지, 단위공정, 기능단위, 데이터 합산 등은 일반원칙을 따라 계산되었으며, 대상 공정 내부의 이동에 대한 부분은 고려하지 않음. 물질수지는 기본적으로 질량보존의 법칙에 의거하여 계산하였으며, 이에 대한 타당성 검증을 위해 일반지침에 따라 물질수지를 검증함.

③ 전과정 영향평가

- 고로슬래그미분말 1kg의 전과정 영향평가 결과 지구온난화 1.22E+00kgCO₂-eq., 산성화, 부영양화, 오존층파괴, 자원소모, 광화학적산화물생성 으로 도출되었으며, 해외 LCA 수행사례와 거의 유사한 영향을 나타내는 것으로 분석됨.

표 3.4 고로슬래그미분말 영향평가 결과 (특성화)

영향범주	영향평가 결과 (특성화)		단위
	구축 데이터베이스	해외 데이터베이스 ¹⁾	
자원소모	5.46E-03	8.40E-07	kg antimony-eq.
지구온난화	1.22E+00	1.28E+00	kg CO ₂ -eq.
오존층파괴	6.11E-08	2.80E-10	kg CFC ₁₁ -eq.
산성화	1.67E-03	2.65E-03	kg SO ₂ -eq.
부영양화	2.50E-04	2.80E-04	kg PO ₄ ³⁻ -eq.
광화학산화물생성	1.90E-04	1.90E-04	kg C ₂ H ₄ -eq.

(3) 플라이애쉬 LCI Database 구축 및 유효성 검토

(가) 일반정보

① 제품정보

- 플라이애쉬는 연도가스 속에 부유하며, 대부분은 굴뚝으로부터 대기속으로 배출됨. 또한, 신더(cinder, 거친입자) 등과 함께 대기 오염 공해의 원인물질 중의 하나이기 때문에 집진기로 포집하여 대기속으로 배출되지 않도록 주의해야 함.
- 플라이애쉬의 주성분은 SiO₂, Al₂O₃, 유리질이며 구형에 가까운 입자이며, 시멘트와 함께 혼합하여 플라이애쉬 시멘트로 사용되고 있음.
- 전체 석탄회 중 약 75~80%를 차지하며, 시멘트 대체재로 우수한 특성을 지니고 있음.



그림 3.9 플라이애쉬 제품

② 대상업체 선정

- 국내 플라이애쉬 생산업체 중 케이하나시멘트, (주)지너블유코리아, (주)금륜 등이 연간 플라이애쉬 생산량의 50%이상을 제조하고 있는 것으로 조사됨.
- 이 중 표준적인 플라이애쉬 생산공정인 업체를 대상으로 선정하여 국가 LCI 데이터베이스에 대한 대표성을 확보하였음.

(나) LCI Database 구축

① 범위정의

㉠ 기능 및 기능단위

- 여러 기능 중 플라이애쉬가 혼입된 제품의 형성을 전과정 CO₂ 배출량 평가 수행을 위한 주요 기능으로 선정함.
- 이를 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 편리한 플라이애쉬 1kg 생산하는 것을 기능단위로 설정한 후 이 기능단위를 수행하는데 투입되는 플라이애쉬 1kg이 기능흐름이 됨.

표 3.5 플라이애쉬의 기능 및 기능단위

구분	플라이애쉬
기능	콘크리트 제조 시 혼입재료로 사용되는 건설재료
기능단위	플라이애쉬 1kg 생산
기준흐름	플라이애쉬 1kg

㉡ 시스템 경계

- 시스템경계는 원료물질 채취·제조로부터 생산품의 출하 직전까지의 공정을 포함하도록 하며 (Cradle to Gate), 열린고리 재활용 시스템의 경계는 Cut-off 방법론을 적용하여 정의함.
- 플라이애쉬 생산에 의한 환경영향은 원재료 채취에 의한 환경영향으로부터 원재료가 수송되어 공정 내에서 제품의 형태로 생산되는 단계까지를 포함함.

㉢ 데이터 범주

- 본 연구의 고려 데이터 범주는 일반원칙에 따라 각 데이터 범주별 투입물과 산출물을 다음과 같이 나타냄.

표 3.6 플라이애쉬 데이터 범주

구분		물질명
투입물	원료물질	부산물(석탄재)
	보조물질	공업용수
	에너지	LNG, 전기, 유류
산출물	제품	플라이애쉬
	대기배출물	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , SO _x , TSP, PM10, VOC, NH ₃ 등
	수계배출물	폐수
	고형폐기물	-

㉠ 데이터 품질요건

- 데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)로 구분될 수 있으며, 고로슬래그미분말의 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하여 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 적용하였음.

② 전과정 목록분석

㉡ 데이터 수집 준비

- 플라이애쉬 데이터베이스의 구축을 위해 실제 생산업체의 생산 공정을 바탕으로 업체의 데이터 관리수준을 고려하여 현장데이터 수집단위인 단위공정 및 공정흐름도를 작성하였으며, 단위공정으로 투입되고 산출되는 상·하위흐름을 표현함.
- 그림 3.11은 일반원칙에 따라 세로방향으로는 플라이애쉬의 원료물질 및 생산되는 제품에 대한 흐름인 주요흐름(main flow)을 표시하였으며, 가로방향으로는 제조공정으로 투입되는 보조물질, 에너지 및 폐기물 등의 흐름을 나타냄.
- 플라이애쉬는 저장공정, 1차 선별공정, 2차 선별고정, 상차공정, 계량공정, 포장 및 출하공정을 거쳐 제조됨.

㉢ 데이터 수집

- 플라이애쉬의 공정흐름도에 따라 투입·산출물에 대한 현장데이터를 수집함.
- 수집된 데이터의 상위흐름 및 하위흐름 연결은 LCI 데이터베이스를 통해 수행하였으며, 환경부와 지식경제부에서 개발한 국가 LCI 데이터베이스뿐만 아니라, Ecoinvent 등의 해외 데이터베이스들을 수집하여 적용함.

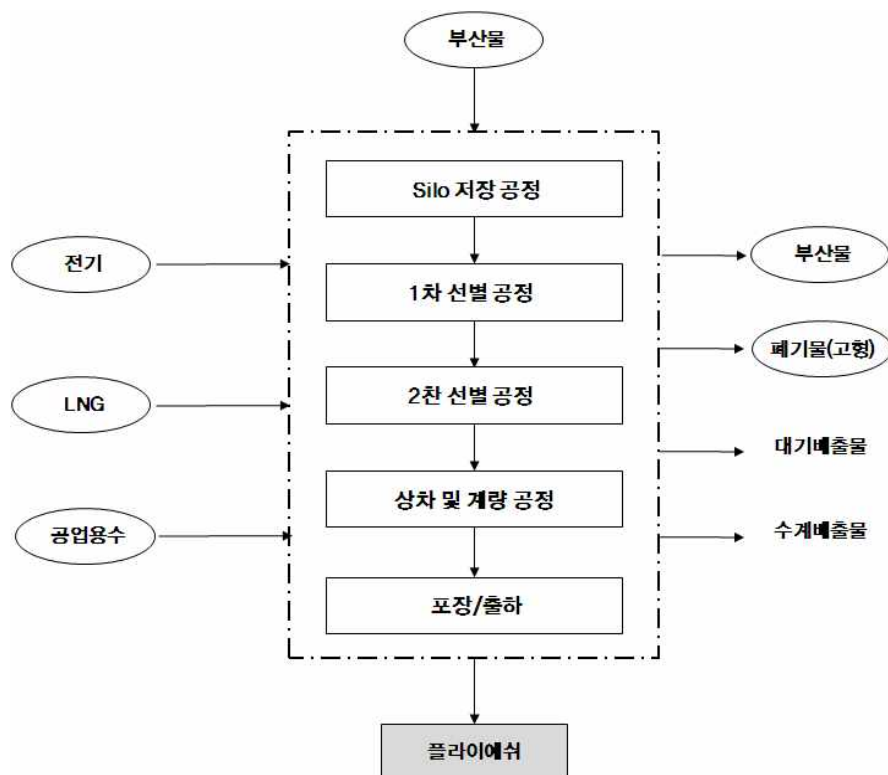


그림 3.11 플라이애쉬 제조 공정흐름도

표 3.7 플라이애쉬 상위흐름 데이터베이스

구분		파라이터명	DB사용	DB명	출처	연도
투입물	원료물질	부산물(석탄재)	○	Limestone, at mine	Ecoinvent	2010
	보조물질	공업용수	○	water_낙동강	환경부	2003
	에너지	LNG	○	Natural gas	환경부	2003
		전기	○	전기	지식경제부	2003
		유류(경유)	○	Light fuel oil	환경부	2003
		유류(등유)	○	Heavy fuel oil	환경부	2003
산출물	제품	플라이애쉬	-		-	-
	대기 배출물	CO ₂		Elementary flow		
		CH ₄	-	Elementary flow	-	-
		N ₂ O	-	Elementary flow	-	-
		CO	-	Elementary flow	-	-
		NO _x	-	Elementary flow	-	-
		SO _x	-	Elementary flow	-	-
		TSP	-	Elementary flow	-	-
		PM10	-	Elementary flow	-	-
		VOC	-	Elementary flow	-	-
NH ₃	-	Elementary flow	-	-		
수송		부산물(석탄재)	○	23.1~25톤 트럭	환경부	2003

㉔ 데이터 계산

- 물질수지, 단위공정, 기능단위, 데이터 합산 등은 일반원칙을 따라 계산되었으며, 대상 공정 내부의 이동에 대한 부분은 고려하지 않음. 물질수지는 기본적으로 질량보존의 법칙에 의거하여 계산하였으며, 이에 대한 타당성 검증을 위해 일반지침에 따라 물질수지를 검증함.

③ 전과정 영향평가

- 플라이애쉬 1kg의 전과정 영향평가 결과 지구온난화 2.31E-02kgCO₂-eq., 산성화, 부영양화, 오존층파괴, 자원소모, 광화학산화물생성 으로 도출되었으며, 해외 LCA 수행사례와 거의 유사한 영향을 나타내는 것으로 분석됨.

표 3.8 플라이애쉬 영향평가 결과 (특성화)

영향범주	영향평가 결과 (특성화)		단위
	국내 데이터베이스	해외 데이터베이스 ¹⁾	
자원소모	3.35E-04	2.06E-05	kg antimony-eq.
지구온난화	2.31E-02	1.05E-02	kg CO ₂ -eq.
오존층파괴	6.31E-09	4.57E-09	kg CFC ₁₁ -eq.
산성화	1.31E-04	1.16E-04	kg SO ₂ -eq.
부영양화	2.12E-05	6.94E-05	kg PO ₄ ³⁻ -eq.
광화학산화물생성	8.27E-05	6.57E-05	kg C ₂ H ₄ -eq.

나. 콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축

(1) 콘크리트 배합설계 데이터 베이스 구축

국내의 건설현장에서 사용되는 콘크리트는 레미콘 회사 또는 연구소 등의 노하우에 의해 설계되고 있으며 콘크리트 배합설계에 대한 전반적인 데이터베이스는 없는 실정이다. 콘크리트 목표 유동성 및 압축강도와 함께 CO₂ 저감을 만족하는 배합설계를 위해 다양한 배합변수들이 콘크리트 목표성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 자료들이 필요함. 본 연구에서는 CO₂저감을 기반한 콘크리트 배합설계 알고리즘 개발을 위해 5,000개 이상의 실험결과 수집을 목표로 국내 논문집 및 레미콘사의 자료를 정리하였다. 실내배합은 대한건축학회, 한국콘크리트학회 및 한국건축시공학회 등의 논문집에서, 레미콘 배합은 삼표, 쌍용양회, 아세아, 아주산업 등의 레미콘 회사를 중심으로 수집하였다. 콘크리트 배합설계는 전국 대표도시의 자료이며, 서울, 경기권과 경상권의 DB가 가장 많았다. 이와 같은 자료정리를 통해 보통중량 콘크리트의 실내배합 4,905개, 경량콘크리트 실내배합 326개, 보통중량 레미콘 배합 7,306개의 DB를 구축하였다. 경량골재 콘크리트의 레미콘 배합은 국내 건설현장에서 사용되지 않아 수집의 한계가 있었다. 콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축 프로세스는 그림 3.12와 같다.

(가) 데이터 베이스 기본 포맷 및 검색창 구성

- 콘크리트 배합상세의 DB를 구축하기 위한 기본 형식을 그림 3.13에 나타냄
- 콘크리트 구성재료들의 정리는 배합Type(실내 또는 공장배합), 위치, 계절, 결합재 [보통포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC), 슬래그 시멘트(slag cement, SC), 고로슬래그(granulated ground blast-furnace slag, GGBS), 실리카흙(silica fume, SF)], 잔골재, 굵은골재, 물 및 혼화제 (종류 및 치환율 포함) 등을 주요 변수로 함.
- 절대용적과 단위용적중량의 배합개념을 적용하기 위하여 데이터베이스는 사용 골재들의 물리적 성질인 흡수율, 비중, 최대직경, 조립률 및 단위용적중량에 대한 정보를 포함함.

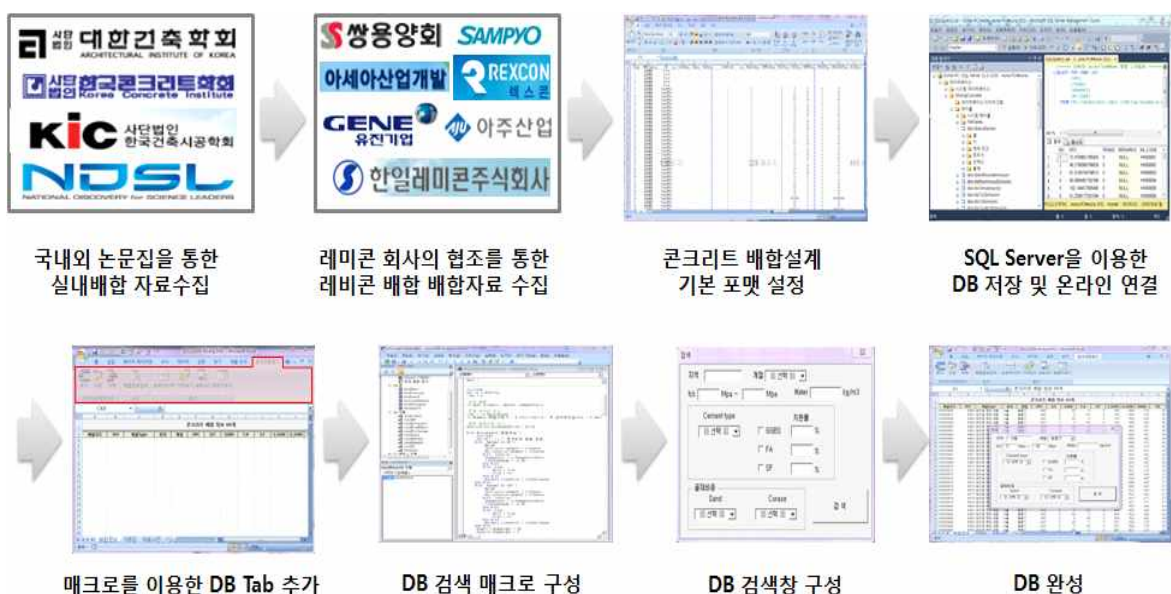


그림 3.12 콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축 절차

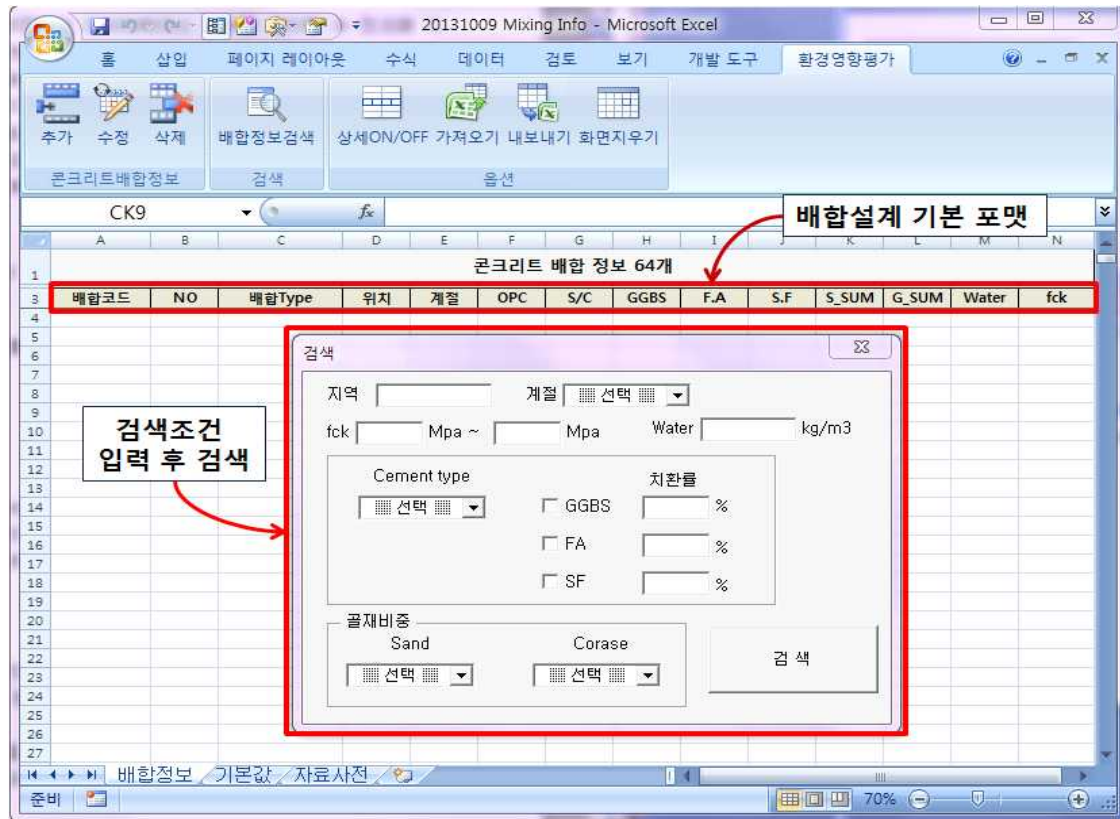


그림 3.13 배합설계 기본 포맷 및 검색창 구성

- 실험결과로서는 기본적으로 제공되는 굳지 않은 콘크리트의 초기 슬럼프와 공기량 그리고 경화 콘크리트의 28일 압축강도를 정리.
- 검색창은 지역, 계절, 콘크리트 압축강도, 단위수량, 시멘트 종류, 혼화재 치환율, 골재비중 등의 총 7가지로 구성함.
- 지역은 사용자가 콘크리트 사용하기 원하는 도시명을 입력하고, 계절은 표준기, 하절기 및 동절기로 구분된 콤보박스를 선택.
- 시멘트 타입은 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 시멘트, 조강 시멘트 등에서 원하는 시멘트를 콤보박스에서 선택.
- 혼화재의 경우에는 검색을 원하는 혼화재를 선택하고 그에 따른 치환율을 입력하며 골재 비중 선택을 통해 경량콘크리트 배합과 보통중량 콘크리트 배합을 검색하도록 함.

(나) 수집한 데이터 저장 및 SQL Server 연결

- DB구축에서 사용된 SQL Server는 각종 자료를 저장하는 데이터베이스 서버를 관리할 수 있으며 저장된 데이터에 대해 사용자의 인터넷 검색기능을 지원하는 프로그램.
- 국내외 논문집과 국내 레미콘 회사의 협조를 통해 구축한 12,537개의 콘크리트 배합DB는 설정한 포맷으로 SQL Server에 저장.
- DB는 기본 프로그램을 Excel로 설정하여 사용자가 별도의 프로그램을 설치할 필요없이 사용이 편리함.
- DB파일 형식은 Excel 파일이며 매크로를 사용하여 DB검색을 위한 별도의 탭을 생성함.

- DB를 검색하면 검색조건에 따라 기본 포맷의 콘크리트 배합설계가 로딩 되도록 설정함.
- SQL Server에 저장된 DB는 지정한 온라인으로 서버에 저장되어 Excel과 연동됨.
- SQL Server를 사용함에 따라 구축된 DB는 관리자의 신규자료의 추가와 기존DB의 수정이 용이하며 수정된 사항은 온라인을 통해 사용자에게 바로 적용되는 시스템을 적용함.

(다) 데이터베이스 Tab 구성

- 본 DB의 탭은 그림 3.14와 같이 콘크리트 배합정보, 검색 및 옵션으로 구성됨.
- 콘크리트 배합정보의 아이콘을 이용하여 DB의 추가, 수정 및 삭제를 할 수 있으며 배합정보 아이콘을 통해 DB를 검색.
- 또한 옵션의 상세 ON/OFF 기능을 통해 기본 포맷 이외의 배합상세를 확인할 수 있으며 가져 오기 기능으로 외부의 콘크리트 배합 DB를 불러올 수 있음.



그림 3.14 데이터베이스에서 Macro를 활용한 Tab 구성

(2) 데이터베이스(DB) 분석

콘크리트의 배합설계는 일반적으로 절대용적법을 기반으로 하며 목표성능(초기 슬럼프 및 28일 압축강도)에 따라 결합재양, 물-결합재비, 잔골재율, 혼화재 종류 및 치환율을 결정한다. 특히 이들 배합변수들의 조건은 지역별 그리고 기후별에 따라 다소 상이하게 나타날 수 있다. 따라서 본 연구의 최종목표인 CO₂ 저감 콘크리트 배합설계 모델식 개발을 위해서는 우선 콘크리트 배합설계에 대한 배합변수들의 분석과 이를 활용한 다양한 지수(결합재 지수 등)들의 개발이 요구된다.

(가) 보통중량 콘크리트

- 실내배합은 대학 연구실과 기업 연구소에서 실시한 콘크리트 실험배합자료로 보통중량 콘크리트는 4,905개, 레미콘 배합은 보통중량 콘크리트 배합 7,306개임.
- 실내배합설계에는 OPC 콘크리트와 혼화재가 치환된 콘크리트로 구분되며 치환된 혼화재의 종류는 FA, GGBS, SF으로 혼화재가 치환된 콘크리트는 3가지 혼화재의 여러 조합으로 구성됨.

① 실내배합과 레미콘 배합

- 보통중량 콘크리트 배합 DB에서 결합재로서 OPC만을 사용한 콘크리트는 실내 3053배합, 레미콘 713배합이며, GGBS가 치환된 콘크리트는 실내 342배합, 레미콘 550배합임.
- 레미콘 배합에서 GGBS 시멘트 2종과 OPC가 혼용된 콘크리트는 346배합이며 FA가 치환된 콘크리트는 실내 1,000배합, 레미콘 1,402 배합, 실리카흄이 치환된 콘크리트 실내배합 700 배합임.

- OPC+FA+GGBS 배합, OPC+FA+SF 배합 및 OPC+SF+GGBS 배합은 다른 배합과 비교하여 그 수가 상대적으로 적음.
- 채령 28일 압축강도의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는 8.4 MPa~150 MPa, 레미콘 배합에서는 16 MPa~52 MPa이며, OPC+GGBS 콘크리트의 경우에는 실내배합에서는 10 MPa~139 MPa, 레미콘 배합에서는 11 MPa~73 MPa(그림 3.15).
- OPC+FA 콘크리트에서 실내배합은 8MPa~90MPa, 레미콘 배합은 10MPa~ 60MPa임.
- OPC+SF 콘크리트는 실내배합에서만 사용되었으며 압축강도의 범위는 20 MPa~ 100 MPa.
- 단위 결합재 양의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는 150 kg/m³~800 kg/m³, 레미콘배합에서는 58 kg/m³~489 kg/m³이며, OPC+GGBS 콘크리트의 경우에는 실내배합에서 236 kg/m³~1,245 kg/m³, 레미콘 배합에서 244 kg/m³~838 kg/m³.
- 일반적으로 레미콘 배합과 실내배합에서 동일 압축강도에 대한 단위 결합재량의 차이는 미비.
- GGBS의 치환율이 단위결합재 양 변화에 미치는 영향이 특별히 없음
- GGBS의 최대 치환율은 실내배합의 경우 80%, 레미콘 배합의 경우 70%.
- 일반적으로 실내배합의 콘크리트 압축강도와 혼화재치환율이 레미콘 배합보다 높음.
- 실내배합은 연구를 위한 실험이 대부분이므로 압축강도의 범위가 비교적 넓은 반면 레미콘 배합의 경우 실제 현장에 주로 사용되는 21MPa~40MPa의 보통강도의 콘크리트이기 때문임.

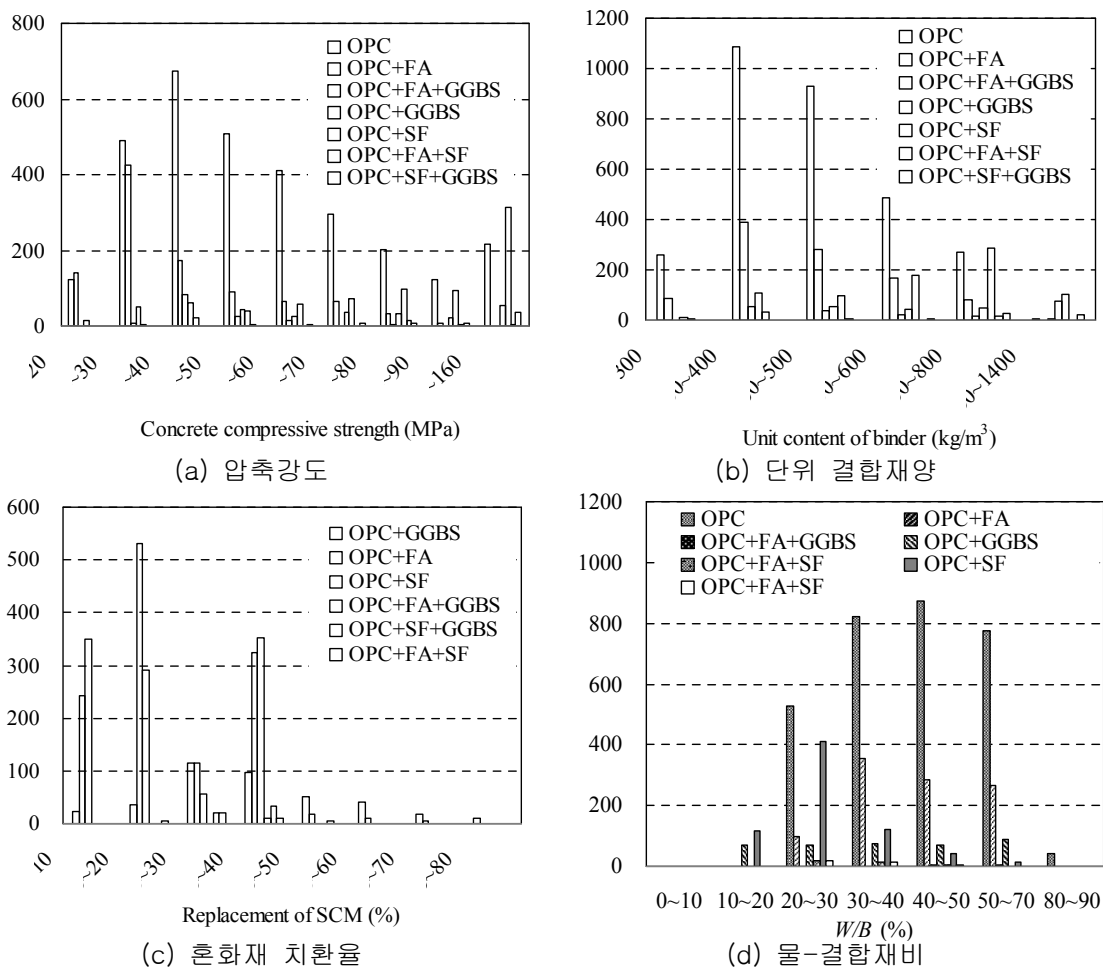


그림 3.15 콘크리트 실내배합에서 각 변수 분포

② 지역과 계절에 따른 콘크리트 배합

- 계절과 지역의 변화가 콘크리트의 환경영향에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내 레미콘사에서 제공한 6,331개의 콘크리트 배합설계 데이터베이스를 정리함.
- 이 데이터베이스에서는 결합재로 시멘트만을 사용한 배합과 혼화재를 치환한 배합을 포함.
- 건설현장에서 일반적으로 사용되는 콘크리트의 압축강도는 24 MPa이며 콘크리트의 배합설계에 따라 혼화재의 치환율은 상이하지만 혼화재를 치환한 콘크리트 배합설계에서는 FA와 GGBS를 복합 치환한 콘크리트 배합설계가 주로 사용됨.
- 계절에 따른 콘크리트 배합은 표준기(3~5월, 9~10월), 하절기(6~8월), 동절기(11~2월)로 구분하였는데, 각 계절별 데이터 수는 각각 1,176배합, 2,931배합, 1,359배합.
- 데이터베이스에서 콘크리트의 재령 28일 압축강도의 범위는 18 MPa~40 MPa.
- 국내 건설현장에서 주로 많이 사용되는 콘크리트 압축강도는 24 MPa, 21 MPa, 18 MPa 순서임.
- 압축강도 35 MPa이상의 콘크리트의 사용은 전체 데이터베이스에서 약 5%임.
- 계절과 지역에 따른 혼화재 치환율을 나타냄.
- 일반적으로 하절기의 혼화재 치환율이 표준기와 동절기의치환율보다 약 10% 높음.
- 지역별로는 서울, 경기권 3,311배합, 강원권 228배합, 충청권 21배합, 전라권 195배합, 경상권 2,823배합임.
- 콘크리트 설계압축강도가 24 MPa일 때 경기권, 전라권, 경상권에서 가장 많이 사용되는 콘크리트 배합설계의 고로슬래그 치환율(R_G)은 30~40%임.
- 서울의 R_G 은 10~20%로 상대적으로 낮음.
- 또한 경기권의 경우 다른 지역과 다르게 압축강도가 증가함에 따라 R_G 가 약 10% 증가.
- 플라이애시의 치환율(R_F)의 경우 압축강도에 큰 영향을 받지 않았으며, 경기권의 R_F 은 경상권과 비교하여 약 10% 정도 높음.
- 반면에 고로슬래그와 플라이애시를 복합 치환한 콘크리트에서는 지역의 차이는 거의 없었지만, 강도가 24 MPa에서 27 MPa로 증가함에 따라 혼화재 치환율이 20% 가량 감소

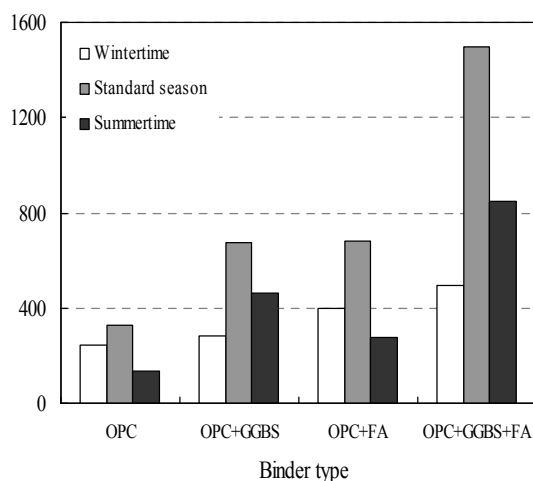


그림 3.16 계절별 혼화재 치환 특성

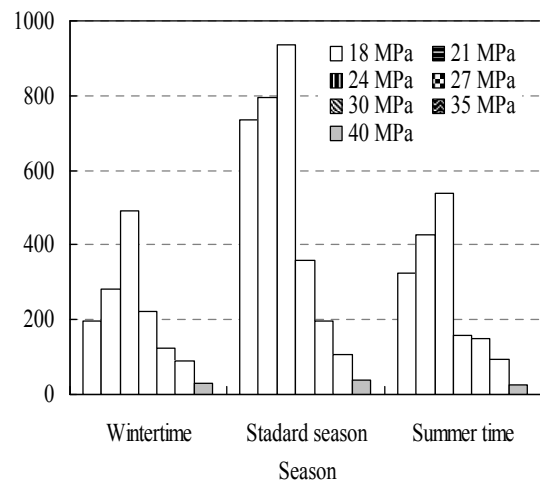


그림 3.17 계절에 따른 압축강도 분포

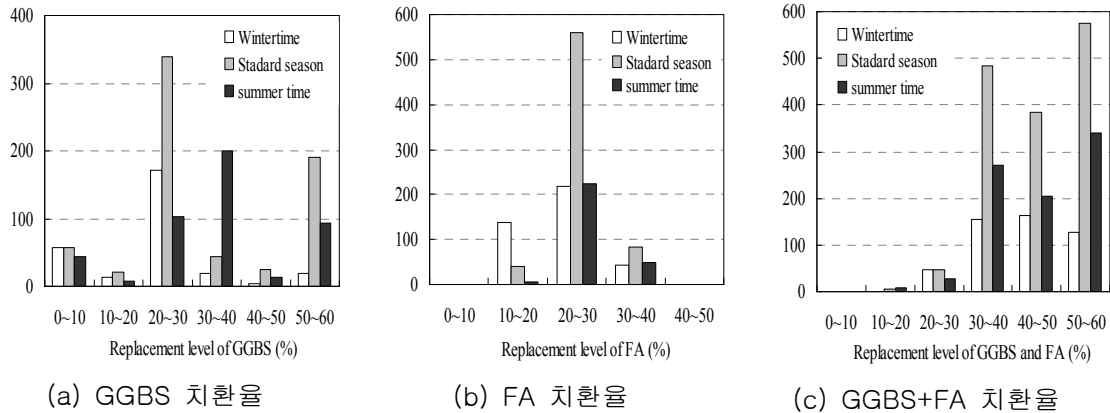


그림 3.18 각 변수별 계절에 따른 콘크리트 배합 분포

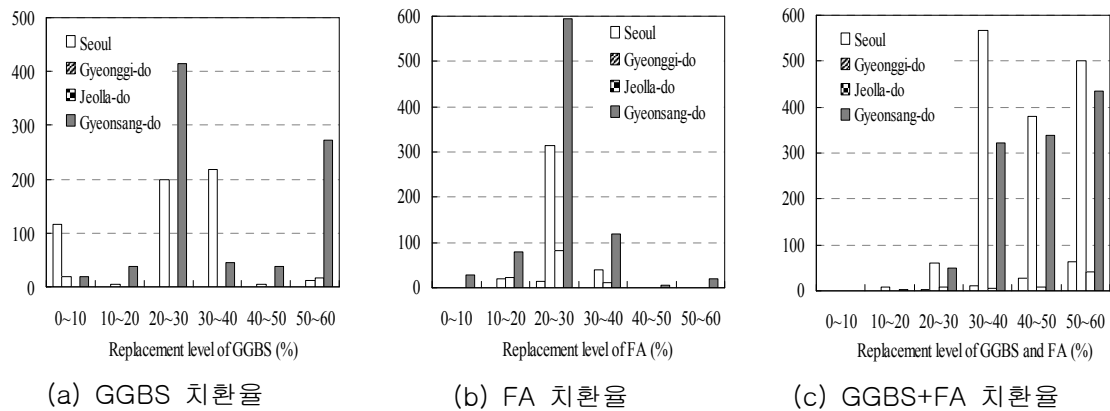


그림 3.19 각 변수별 지역에 따른 콘크리트 배합 포

③ 결합재 지수

- 일반적으로 콘크리트의 압축강도는 단위결합재 양의 증가와 함께 증가하지만 그 증가 기울기는 압축강도 증가와 함께 감소.
- OPC+FA 콘크리트의 경우, 강도가 높아짐에 따라 증가되는 결합재양 차이가 크지 않았으며 OPC+GGBS 콘크리트는 OPC+FA 콘크리트보다 압축강도 증가에 따른 결합재양의 증가율이 높음.
- 콘크리트의 배합종류 별 압축강도의 증가에 따른 결합재 양의 감소기울기는 콘크리트의 배합 종류에 따라 상이하지만 전반적으로 기울기가 수렴하는 경향을 나타냄.
- 한편, 콘크리트 압축강도의 증가는 부재의 크기를 감소시킴.
- 콘크리트 기둥의 예를 들면 동일 하중하과 주철근비에서 콘크리트 압축강도가 24 MPa일 때 500×500 mm 단면의 크기가 필요하지만 콘크리트 압축강도가 50 MPa로 증가하면 425×500 mm 단면의 크기로 감소시킴.
- 따라서 콘크리트 압축강도의 증가는 단위결합재 양의 증가로 CO₂ 배출량이 증가할 수 있지만 부재 단면크기의 감소로 콘크리트 사용물량을 감소시킬 수 있어 CO₂ 배출량을 감소시킴.

- 콘크리트 전과정 CO₂평가는 단위압축강도 1MPa 발현관점에서 이루어질 필요가 있음을 의미.
- 콘크리트 압축강도 1MPa 발현을 위한 단위결합재 양을 결합재 지수($B_i = B/f_{ck}$)로 정의함.
- 결합재 지수는 혼화재 치환여부와 관계없이 압축강도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보임.
- 압축강도 증가에 따라 단위압축강도(1MPa) 발현을 위한 결합재양이 감소될 수 있음을 의미.
- OPC 콘크리트와 OPC+GGBS 콘크리트는 압축강도 20 MPa에서 실내배합의 B_i 는 레미콘 배합의 B_i 보다 1.2배 높았지만 콘크리트 압축강도가 50 MPa를 넘어서면서 실내배합과 레미콘 배합의 B_i 의 차이는 거의 없음.
- 반면에 배합종류에 따라 콘크리트 압축강도와 B_i 는 조금씩 다른 경향을 나타냄.
- OPC+GGBS 콘크리트와 OPC+FA+GGBS 콘크리트에서 B_i 의 감소속도는 f_{ck} 가 약 60 MPa 이상에서 점차 완화되면서 그 값이 약 $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 에 수렴하는 경향을 보임.
- 실내배합과 레미콘 공장배합에 따른 결합재 지수 값의 차이는 뚜렷이 나타나지 않음.
- 실내배합에서 OPC + GGBS 콘크리트의 결합재 지수가 약간 높은 경향을 나타냄.
- OPC+FA 콘크리트는 OPC 콘크리트의 B_i 와 비교하여 B_i 가 1~1.6배 높았으며 B_i 의 감소속도가 가장 높음.
- OPC+SF 콘크리트와 OPC+ SF + GGBS 콘크리트에서는 B_i 의 감소속도가 비교적 낮았으며 B_i 는 f_{ck} 가 약 100 MPa 이상에서 점차 완화됨.

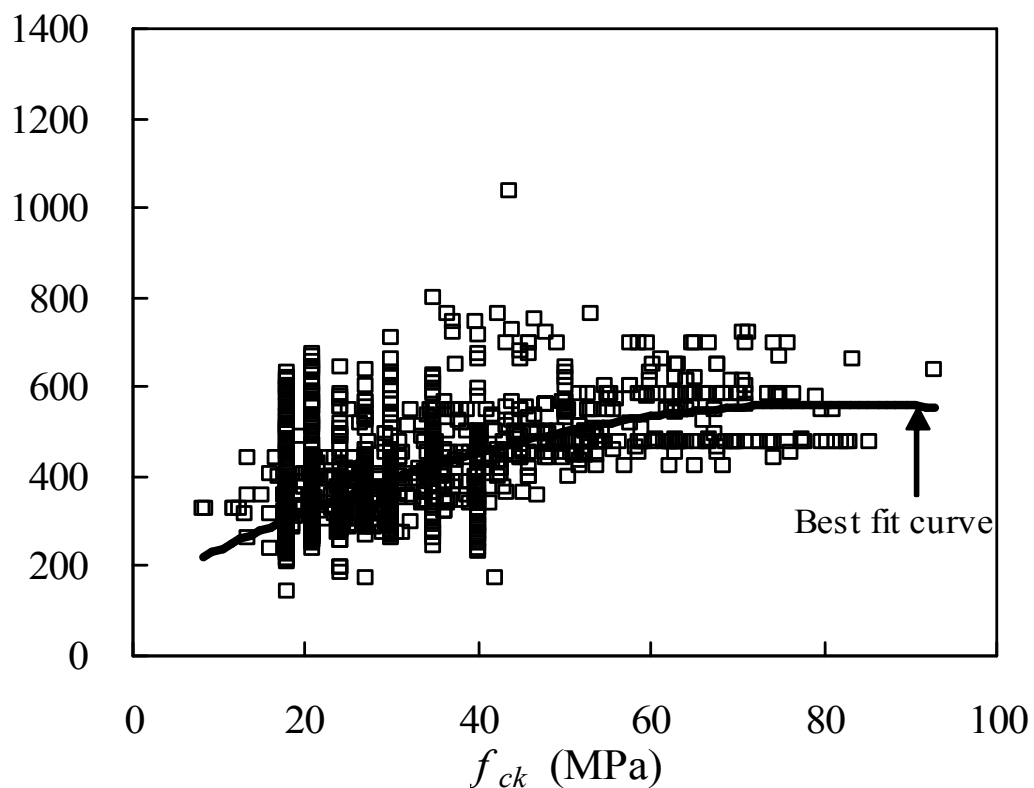
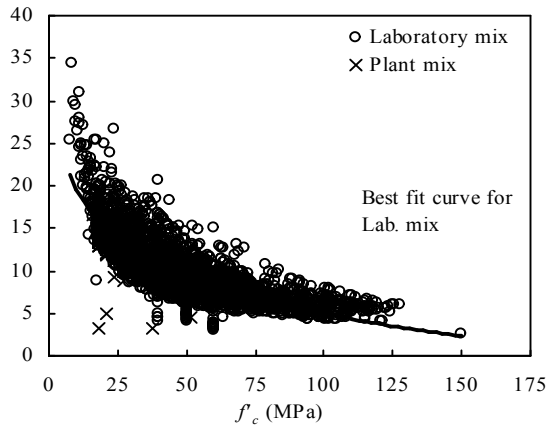
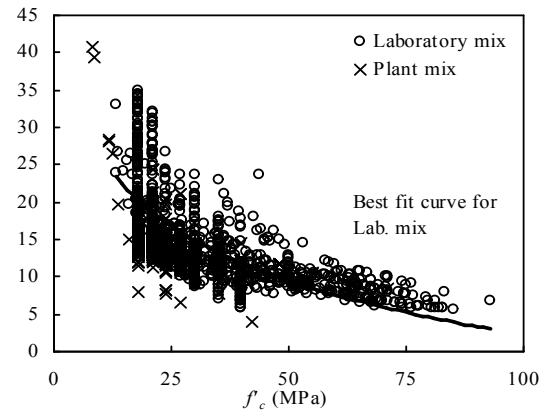


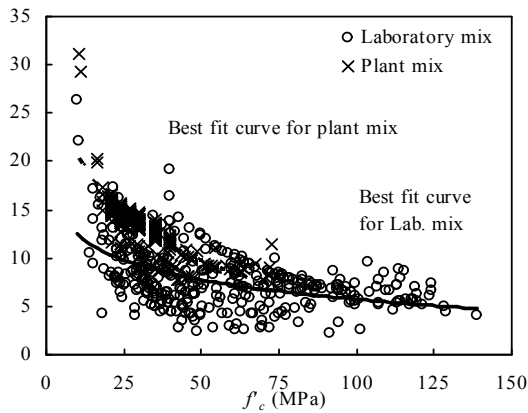
그림 3.20 OPC+FA 콘크리트 배합종류별 압축강도에 따른 결합재 양



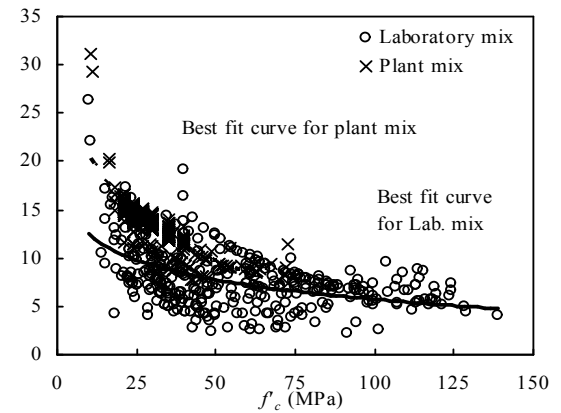
(a) OPC 콘크리트



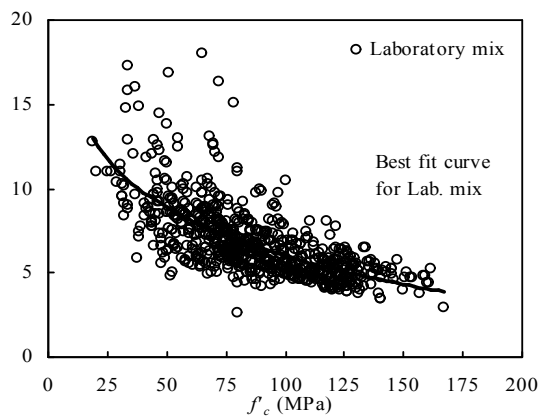
(b) OPC+FA 콘크리트



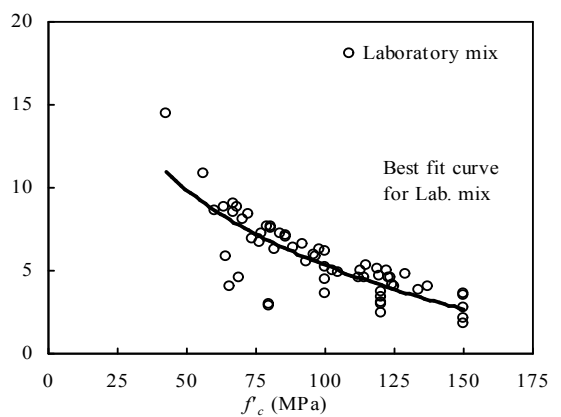
(c) OPC+FA+GGBS 콘크리트



(d) OPC+GGBS 콘크리트



(e) OPC+SF 콘크리트

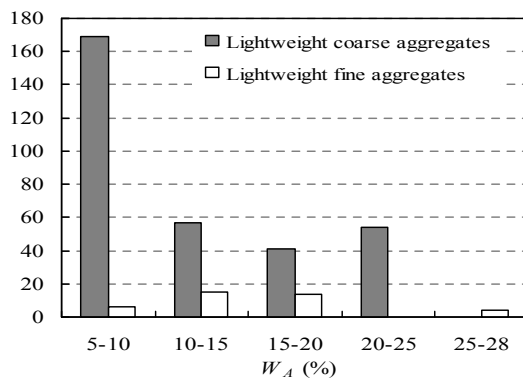


(f) OPC+SF+GGBS 콘크리트

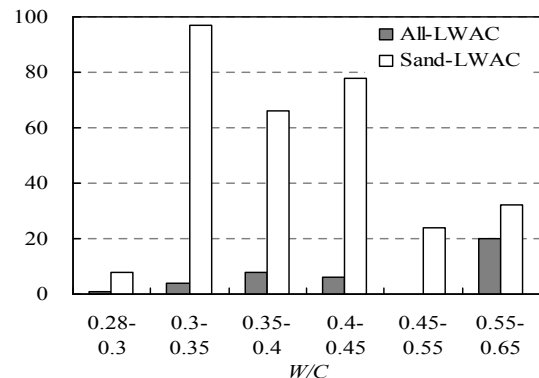
그림 3.21 콘크리트 배합별 압축강도에 따른 결합재 지수

(나) 수집한 데이터 저장 및 SQL Server 연결

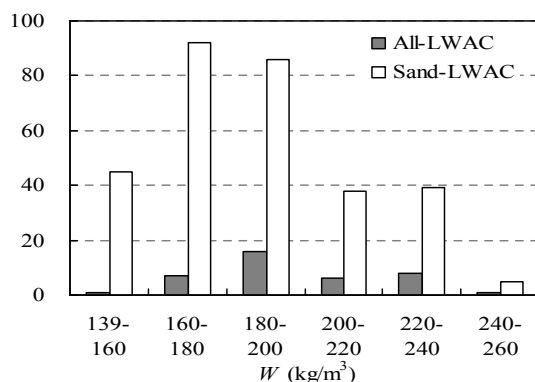
- 경량 콘크리트는 경량 골재를 사용한 콘크리트로 전경량 콘크리트(all-lightweight concrete, ALWC)와 모래경량 콘크리트(sand-lightweight concrete, SLWC)로 구분됨.
- 본 연구에서 구축한 경량 콘크리트 배합 DB는 실내실험에 대한 자료이며 전경량 콘크리트 배합 30개, 모래경량 콘크리트 296개임.
- 경량콘크리트의 배합설계에서는 w/c 와 단위결합재양 뿐만아니라 골재의 흡수율이 중요함.
- 경량골재는 다공성으로 일반 골재보다 흡수율이 상대적으로 높음.
- 경량콘크리트 배합설계에서 경량골재의 과다한 결합수 흡수는 콘크리트의 성능저하를 초래함.
- 경량 굵은 골재의 흡수율은 5~10%가 적정하며 경량 잔골재의 흡수율은 10~20%가 적정함.
- w/c 에 대해 모래경량 콘크리트는 대부분 35~45%이며 전경량 콘크리트는 55~65%임.
- 모래 경량 콘크리트에서 단위수량의 범위는 160~200 kg/m^3 이며 전경량 콘크리트는 주로 180~200 kg/m^3 임.
- 모래경량 콘크리트의 압축강도는 주로 20 MPa~ 40 MPa이며 최대 압축강도는 55 MPa임.
- 전경량 콘크리트의 압축강도는 주로 11 MPa~ 20 MPa, 최대강도는 40 MPa로 모래경량 콘크리트의 압축강도 보다 현저히 낮음.
- 일반적으로 실배합의 콘크리트 압축강도와 혼화재치환율이 레미콘 배합보다 높음.
- 실내배합은 연구를 위한 실험이 대부분이기 때문에 압축강도의 범위가 비교적 넓은 반면 레미콘 배합의 경우 실제 현장에 주로 사용되는 21 MPa~40 MPa의 보통강도의 콘크리트이기 때문임.



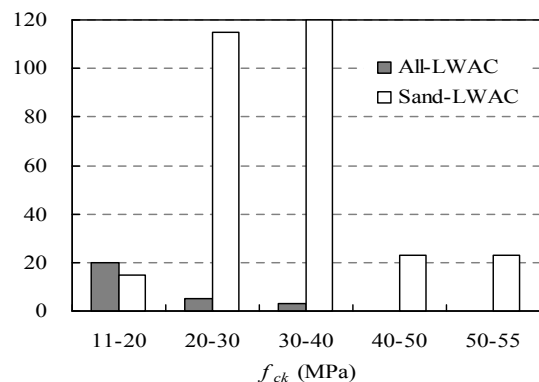
(a) 골재 흡수율



(b) 물-시멘트비



(c) 단위수량



(d) 압축강도

그림 3.22 주요 변수별 경량 콘크리트 분포

[2차년도]

가. 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 콘크리트 구성재료(인공경량골재, 레미콘제조, 슬래그골재)

(1) LCI Database 구축 프로세스 조사 및 분석

(가) 참여업체 선정

- 데이터베이스의 대표성을 확보할 수 있도록, 국내 생산량의 50% 이상을 생산하는 업체들을 선정하거나 기술적 대표성이 있을 경우 해당 기술을 사용하는 업체를 선정.

(나) 데이터수집

- LCI DB를 구축하려는 업체를 방문 또는 업체 담당자에 대한 기본적인 교육을 하고, 이후 각 담당자가 제공하는 제품의 공정별 입출력물질에 대한 데이터를 수집.

(다) 데이터검증 및 계산

- 설문지를 통해 수집된 데이터에 대한 물질수지, 물수지 및 에너지수지 분석과 업체 담당자와의 협의를 통해 누락되거나 잘못 기입된 데이터를 수정, 보완하는 작업이며, 사용된 방법론(할당방법, 시스템 경계 설정 방법 등)에 대한 내부 검토를 실시하며, 이렇게 사용된 방법론에 대한 평가 또한 정밀검토 과정에서 재차 평가함.

(라) 데이터산출

- 데이터 검증 및 계산이 완료되면 업체별로 기능단위당 투입물과 산출물에 대한 공정 데이터인 gate to gate 데이터를 산출함.

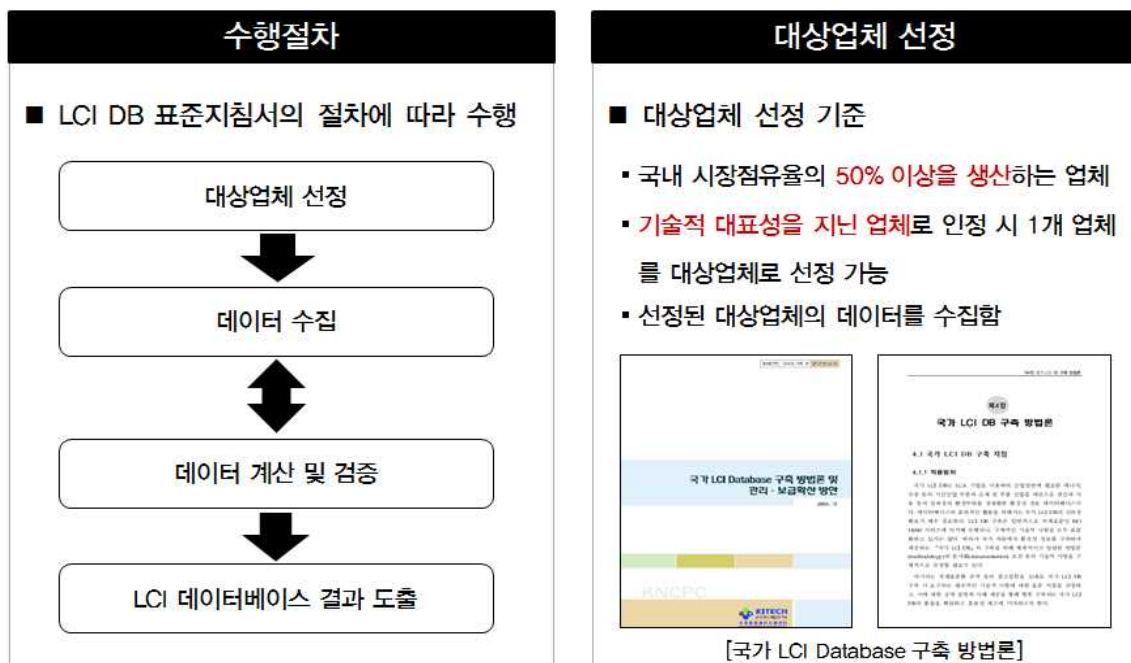


그림 3.23 LCI DB 구축 수행절차 및 대상업체 선정

데이터 수집 및 계산

(1) 대표 공정 결정

- 대표 공정과 관련된 흐름도 작성

(2) 데이터 수집 설문지 작성

- ISO14048 포맷 이용 설문지 개발
- 대상업체 담당자 대상, **설문지 작성 및 데이터 수집 수행**

[데이터 수집 설문지]

(3) 데이터 계산 및 검증

■ 데이터 계산

- 선정된 업체 데이터 취합 및 계산
- 대상업체별 공정 파악 후 **평균값 산출**

■ 데이터 검증

- 물질 입출력 수치, 에너지 입출력 수치에 대한 비교분석, 유틸리티 설비에 대한 검증
- 검토를 통한 **데이터 수정 및 보완**으로 신뢰성 확보
- 검증결과에 따른 **데이터 재수집 및 계산**

그림 3.24 데이터 수집 및 계산

(바) 데이터수집

- 참여업체별로 구축된 GtG 데이터는 업체들의 생산량비를 적용하여 수직법 또는 수평법을 이용하여 데이터를 통합, 이러한 통합 GtG를 LCA 소프트웨어(TOTAL 등)을 사용하여 전과정 목록 데이터를 산출하여 국가 표준 LCI DB의 형태에 맞추어 최종 DB 형태로 완성함.

(2) 인공경량골재 LCI Database 구축 및 유효성 검토

(가) 일반정보

① 제품정보

- 경량골재는 천연경량골재와 인공경량골재로 구분되며 천연경량골재는석, 화산암/재 등을 나타냄. 또한, 인공경량골재는 혈암, 점토, 산업폐기물/부산물 등을 적절한 가공과정을 거쳐 요구되는 물리적 특성에 적합하도록 소성팽창(발포) 하여 제조함.
- 인공경량골재(Lightweight aggregate)는 석탄발전소에서 발생하는 석탄재(Bottom Ash) 등을 1050~1200℃로 소성하여 만든 인공골재로 표면 껍질부는 치밀한 유리질로 이루어지고 내부는 무수한 다공성의 기포가 존재하여 비중이 1.2~1.8에 이르는 인조골재를 지칭하는 제품임.
- 석탄재를 건식으로 처리하는 바텀애쉬를 기계적 에너지를 이용하여 파쇄 및 성형공정을 거쳐 인공경량골재를 생산하며, 압축강도와 휨강도 등이 경량골재 품질기준을 만족하는 것으로 나타남.
- 인공경량골재는 사용목적에 따라서 각각의 요구되는 물리적 특성(용적중량, 압축강도)을 전제하여 내력구조용(경량콘크리트) 및 비 내력구조용 (경량 패널/경량 블록) 등으로 구분하여 광범위한분야로의 적용범위를 갖고 있음.

② 대상업체 선정

- 국내 인공경량골재 생산업체 중 표준적인 인공경량골재 생산 공정을 가진 LCI 데이터베이스에 개발에 대한 대표성을 확보하였음.



그림 3.25 인공경량골재 제조 설비



그림 3.26 인공경량골재 제품

(나) LCI Database 구축

① 범위 정의

㉔ 기능 및 기능단위

- LCI 데이터베이스 구축 단위인 기능단위 및 기준흐름을 설정함
- 인공경량골재 제품의 형성을 전과정평가 수행을 위한 주요기능으로 선정함. 이 기능을 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 편리한 인공경량골재 1kg 생산하는 것을 기능단위로 설정함.

표 3.9 인공경량골재의 기능 및 기능단위

구분	인공경량골재
기능	내력구조 및 비 내력구조용 건설재료 제품 생산 시 천연골재 대체재
기능단위	인공경량골재 1kg 생산
기준흐름	인공경량골재 1kg

㉕ 시스템경계

- 인공경량골재의 시스템경계는 원료물질 채취 및 수송되어 제품 형태로 생산되는 단계까지가 포함됨(Cradle to Gate).

시스템경계 (Cradle to gate)



그림 3.27 고로슬래그미분말 시스템경계

㉔ 데이터 범주

- 고려 데이터범주는 일반원칙에 따라 각 데이터 범주별 투입물과 산출물을 다음과 같이 나타냄.

표 3.10 인공경량골재 데이터 범주

구분		물질명
투입물	원료물질	준설토, 잔사회
	에너지	석탄, 전기, LPG
산출물	제품	인공경량골재
	대기배출물	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , SO _x , TSP, PM10, VOC, NH ₃ 등
	수계배출물	-
	고형폐기물	-

㉕ 데이터 품질요건

- 데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)로 구분될 수 있으며, 인공경량골재의 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하여 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 적용하였음.

㉖ 가정 및 제한사항

- 원료물질에 대한 상위흐름 자료에 대해서 최근 5년 이내에 개발된 데이터베이스가 없을 경우, 「LCI 데이터베이스 표준지침서」의 산업별 LCI 데이터베이스 구축 사례에서 적용된 바와 같이 시간적 경계를 확장시켜 최근 10년 이내의 데이터베이스를 적용함.
- 유류 및 LPG 연료 연소에 의한 대기배출물은 업체에서 관리되고 있는 실측치를 우선 적용하였으며, 관리되지 않는 대기배출물의 경우에는 국립환경과학원의 「국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람(2010)」의 배출계수를 적용하여 배출량을 산정함.
- 공정에 투입되는 원료물질에 대한 국내·외 데이터베이스가 존재하지 않는 경우, 해당 물질과 가장 유사한 조성을 갖는 데이터베이스를 연결하였으며 국내 데이터베이스를 우선적으로 활용.

㉗ 할당

- 인공경량골재 생산 시 부산물은 없음에 따라 할당은 없음.

② 전과정 목록분석

㉘ 데이터 수집 준비

- 인공경량골재의 데이터베이스 수집을 위해 그림 3.28과 같은 실제 생산업체의 생산공정을 바탕으로 현장데이터 수집단위인 단위공정 및 공정흐름도를 작성하였으며, 단위공정으로 투입되고 산출되는 상·하위흐름을 표현함.
- 일반원칙에 따라 세로방향으로는 인공경량골재의 원료물질 및 생산되는 제품에 대한 흐름인 주요흐름(main flow)을 표시하였으며, 가로방향으로는 제조공정으로 투입되는 보조물질, 에너지 및 폐기물 등의 흐름을 나타냄.
- 인공경량골재는 배합공정 및 성형공정, 소성공정을 거쳐 제조됨. 또한, 주원료는 준설토와 잔사회(Bottom Ash)이며, 제조 공정 시 전기, LPG, 석탄 등의 에너지원이 사용됨.

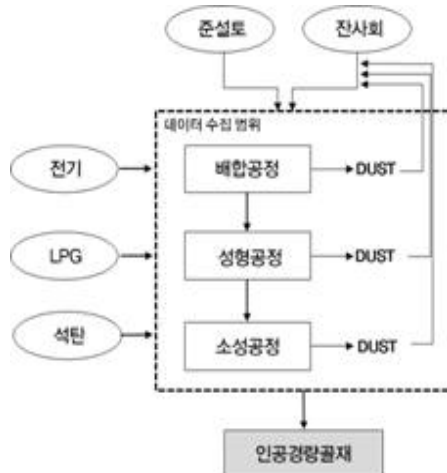


그림 3.28 인공경량골재 제조 공정흐름도



그림 3.29 데이터 수집 설문지

㉠ 데이터 수집

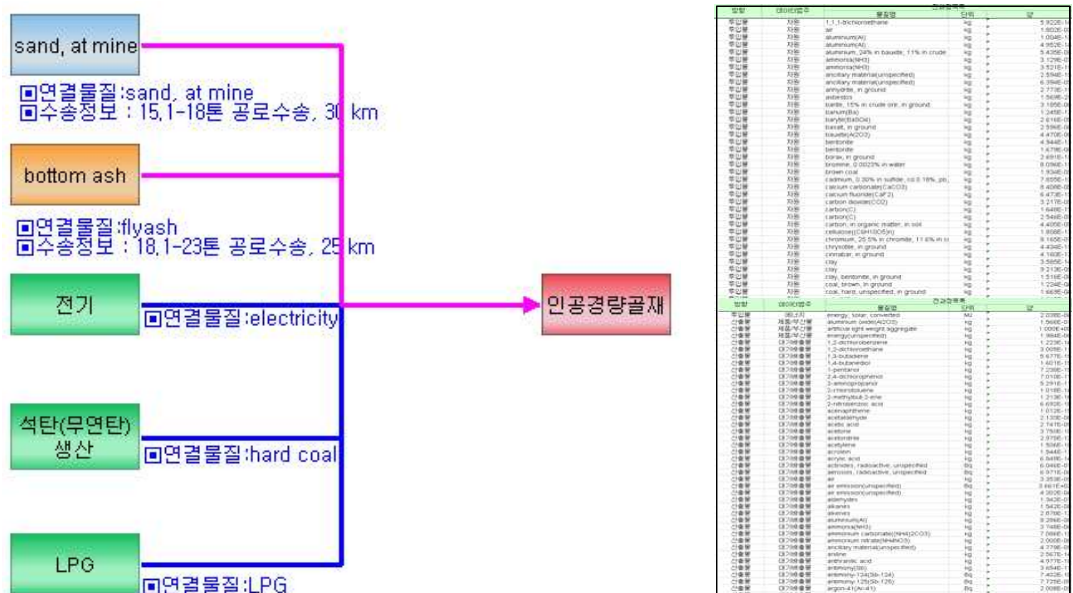
- 인공경량골재의 공정흐름도에 따라 투입·산출물에 대한 현장데이터를 수집함
- 수집된 데이터의 상위흐름 및 하위흐름 연결은 LCI 데이터베이스를 통해 수행하였으며, 환경부와 지식경제부에서 개발한 국가 LCI 데이터베이스뿐만 아니라, Ecoinvent 등의 해외 데이터베이스들을 수집하여 적용함.

㉡ 데이터 계산

- 단위공정, 기능단위, 데이터 합산, 물질수지 분석 등은 일반원칙을 따라 계산되었으며, 대상 공정 내부흐름을 고려하였음. 물질수지는 기본적으로 질량보존의 법칙에 의거하여 계산하였음.

③ 전과정 영향평가

- 수집된 인공경량골재의 GtG 데이터를 TOTAL 프로그램에 입력하여 LCI 데이터베이스를 개발하였으며, 6대 영향범주에 대한 영향평가 결과를 도출하였음.



TOTAL 프로그램 데이터 입력

인공경량골재 LCI 데이터베이스

그림 3.30 인공경량골재 공정흐름도 및 LCI DB 구축 결과

[STEP 1] 투입 및 배출물질 분석

공정명	Input				Output			
	물질명	양	단위	경로	물질명	양	단위	경로
A 배합공정	준설토	33715	kg		Dust	300	kg	IP-A-2
	잔사회	36054	kg	OP-A-1 OP-B-1 OP-C-2				
	전기	2115	kwh					
B 성형공정	전기	940	kwh		Dust	300	kg	IP-A-2
C 소성공정	석탄	6320	kg		인공경량골재	68790	kg	
	LPG	192	kg		Dust	389	kg	IP-A-2

[STEP 2] 내부흐름 삭제

공정명	Input			Output		
	물질명	양	단위	물질명	양	단위
A 배합공정	준설토	33715	kg			
	잔사회	35065	kg			
	전기	2115	kwh			
B 성형공정	전기	940	kwh			
C 소성공정	석탄	6320	kg	인공경량골재	68790	kg
	LPG	192	kg			

[STEP 3] 기능단위 변환

공정명	Input			Output		
	물질명	양	단위	물질명	양	단위
A 배합공정	준설토	0.49011	kg			
	잔사회	0.50974	kg			
	전기	0.03075	kwh			
B 성형공정	전기	0.01366	kwh			
C 소성공정	석탄	0.09187	kg	인공경량골재	1	kg
	LPG	0.00279	kg			

[STEP 4] GtG 작성완료

Input			Output		
물질명	양	단위	물질명	양	단위
준설토	4.90E-01	kg			
잔사회	5.10E-01	kg			
전기	4.44E-02	kwh			
석탄	9.19E-02	kg	인공경량골재	1.0E+00	kg
LPG	2.79E-03	kg			

표 3.11 인공경량골재 영향평가 결과 (특성화)

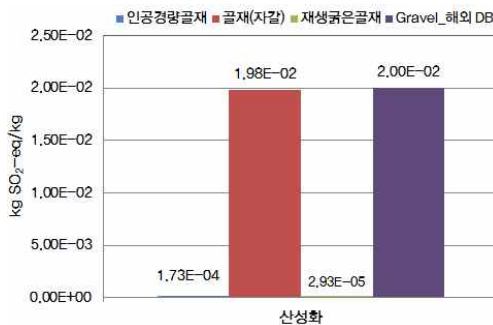
영향범주	영향평가 결과 (특성화)				단위
	인공경량골재	골재(쇄석) ¹⁾	재생굵은골재 ¹⁾	Gravel ²⁾	
자원소모	1.939E-03	1.82E-02	1.60E-05	2.71E-02	kg-antimony eq.
지구온난화	5.160E-02	7.43E-03	2.94E-02	1.08E-02	kg-CO ₂ eq.
오존층영향	4.006E-09	3.06E-08	4.68E-11	9.00E-03	kg-CFC ₁₁ eq.
산성화	1.729E-04	1.98E-02	2.93E-05	2.00E-02	kg-SO ₂ eq.
부영양화	2.802E-05	3.67E-03	5.44E-06	1.09E-02	kg-PO ₄ ³⁻ eq.
광화학산화물생성	9.279E-05	9.41E-05	1.25E-07	1.07E-04	kg-C ₂ H ₄ eq.

④ 국내·외 LCI DB와 비교

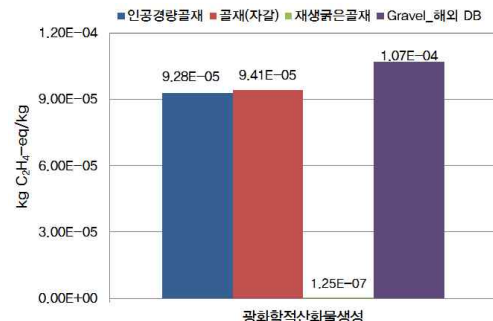
- 인공경량골재의 6대 영향범주 특성화값을 기 개발된 국토교통부 DB·ecoinvent DB와 비교
- 6대 영향범주는 자원소모, 지구온난화, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물생성, 오존층영향으로 구분.



자원소모(Abiotic Depletion Potential)



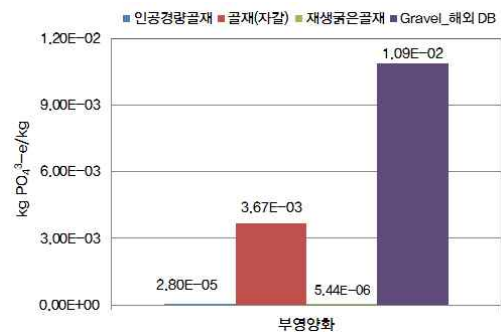
산성화(Acidification Potential)



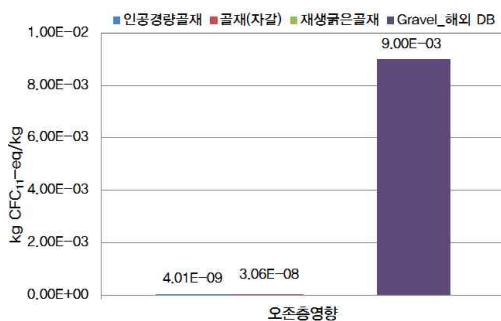
광화학적산화물생성
(Photochemical Ozone Creation Potential)



지구온난화(Global Warming Potential)



부영양화(Eutrophication Potential)



오존층영향(Ozone Depletion Potential)

그림 3.31 인공경량골재의 6대 영향범주별 비교

(3) 레미콘제조 LCI Database 구축 및 유효성 검토

(가) 일반정보

① 제품정보

- 레미콘 제조공정은 재료저장, 운반, 계량, 혼합 공정으로 구성되어 있으며, 저장 공정에서는 시멘트, 혼합수, 굵은골재, 잔골재, 혼화재, 혼화제 등의 원재료가 보관되며, 이를 레미콘 1대 ($6m^3$)당 투입되는 원재의 양을 정확하게 계량하는 공정을 거쳐, 재료가 분리되지 않게 충분히 혼합(Mix)하여 균일하게 배출시키는 혼합공정을 통하여 레미콘을 생산하게 됨.
- 콘크리트 제조 시 에너지가 사용되는 부문은 배처플랜트 등의 제조설비와 실험실과 세륜장 같은 부속시설로 구분하여 분석됨. 레미콘 제조설비는 원재료 하역, 저장, 운송, 혼합단계에서 사용된 주요설비 및 집진기와 부일러 등의 기타설비로 구분됨. 또한, 콘크리트 제조 시 직접적인 연관은 없지만, 생산업체의 필수적인 시설인 세륜장, 실험실 등과 같은 부속시설에 대한 부분도 포함하여 콘크리트 생산 시 에너지가 사용되는 표준 제조공정을 조사하였음.
- 국내 5개 레미콘 생산업체를 대상으로 연간 에너지원별 사용량(전력, 유류, 상수도)와 콘크리트 생산량을 조사하였음. 에너지원별 사용량과 콘크리트 생산량이 표준기(4월-10월), 동절기(11월-3월)에 따라 차이가 있는 것으로 분석되어 이를 절기별로 구분하였음.

② 대상업체 선정

- 본 대상업체(국내 레미콘 5개업체)는 누적시장점유율 50%이상을 차지함으로 표준공정으로서 대표성을 가짐.

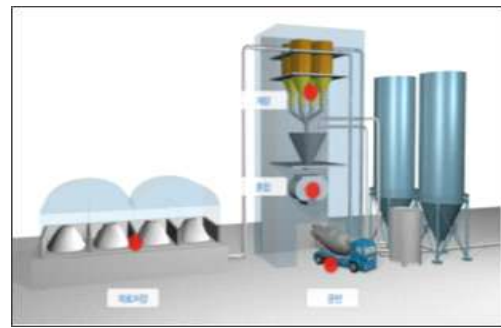


그림 3.32 레미콘 배처플랜트

(나) LCI Database 구축

① 범위정의

㉠ 기능 및 기능단위

- LCI 데이터베이스 구축 단위인 기능 및 기능단위를 설정함
- 제조설비인 배처플랜트를 이용하여 레미콘을 제조하는 공정을 전과정 평가 수행을 위한 주요 기능으로 선정함. 이 기능을 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 편리한 레미콘 제조공정에서 레미콘 $1m^3$ 제조하는 것을 기능단위로 설정함

표 3.12 레미콘 제조설비의 기능 및 기능단위

구분	콘크리트 제조설비(배처플랜트)
기능	배처플랜트 이용한 레미콘 제조
기능단위	$1m^3$ 레미콘 제조

㉔ 시스템 경계

- 레미콘 제조공정의 시스템경계는 원료물질 채취 및 수송을 제외하고 제조공정 단계만을 포함하는 것으로 설정함(Gate to Gate).

시스템경계 (Cradle to gate)



그림 3.33 레미콘제조공정의 시스템경계

㉕ 데이터 범주

- 본 연구의 고려 데이터 범주는 일반원칙에 따라 각 데이터 범주별 투입물과 산출물을 다음과 같이 나타냄.

표 3.13 레미콘 제조설비 데이터 범주

구분		물질명
투입물	에너지	전기, 등유, 경유, 산업용수
산출물	제품	레미콘제조
	대기배출물	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , SO _x , TSP, PM10, VOC, NH ₃ 등
	수계배출물	-

㉖ 데이터 품질요건

- 데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터로 구분될 수 있으며, 레미콘제조공정의 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하여 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 적용하였음.

㉗ 가정 및 제한사항

- 원료물질에 대한 상위흐름 자료에 대해서 최근 5년 이내에 개발된 데이터베이스가 없을 경우, 「LCI 데이터베이스 표준지침서」의 산업별 LCI 데이터베이스 구축 사례에서 적용된 바와 같이 시간적 경계를 확장시켜 최근 10년 이내의 데이터베이스를 적용함.
- 유류 및 LPG 연료 연소에 의한 대기배출물은 업체에서 관리되고 있는 실측치를 우선 적용하였으며, 관리되지 않는 대기배출물의 경우에는 국립환경과학원의 「국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람(2010)」의 배출계수를 적용하여 배출량을 산정함.
- 공정에 투입되는 원료물질에 대한 국내·외 데이터베이스가 존재하지 않는 경우, 해당 물질과 가장 유사한 조성을 갖는 데이터베이스를 연결하였으며 국내 데이터베이스를 우선적으로 활용.

㉘ 할당

- 레미콘 제조공정에서 에너지사용량에 대한 부산물은 없음에 따라 할당은 없음.

② 전과정 목록분석

㉓ 데이터 수집 준비

- 레미콘제조공정의 데이터베이스 수집을 위해 그림 3.34와 같은 실제 생산업체의 생산공정을 바탕으로 현장데이터 수집단위인 단위공정 및 공정흐름도를 작성하였으며, 단위공정으로 투입되고 산출되는 상·하위흐름을 표현함.
- 일반원칙에 따라 세로방향으로는 인공경량골재의 원료물질 및 생산되는 제품에 대한 흐름인 주요흐름(main flow)을 표시하였으며, 가로방향으로는 제조공정으로 투입되는 보조물질, 에너지 및 폐기물 등의 흐름을 나타냄.
- 레미콘 제조공정은 저장공정, 운반공정, 계량공정, 혼합공정을 거쳐 제조됨. 또한, 배치플랜트를 이용한 레미콘 제조 시 전기 및 등유, 경유, 산업용수가 에너지원으로 사용됨.

㉔ 데이터 수집

- 레미콘 제조공정의 공정흐름도에 따라 5개 레미콘업체의 투입·산출물에 대한 현장데이터를 수집함.
- 수집된 데이터의 상위흐름 및 하위흐름 연결은 LCI 데이터베이스를 통해 수행하였으며, 환경부와 지식경제부에서 개발한 국가 LCI 데이터베이스를 적용함.

㉕ 데이터 계산

- 단위공정, 기능단위, 데이터 합산, 물질수지 분석 등은 일반원칙을 따라 계산되었으며, 대상 공정 내부흐름을 고려하였음. 물질수지는 기본적으로 질량보존의 법칙에 의거하여 계산하였음.
- 5개 업체의 에너지 소비량을 수직적 합산방법으로 평균값으로 변환.

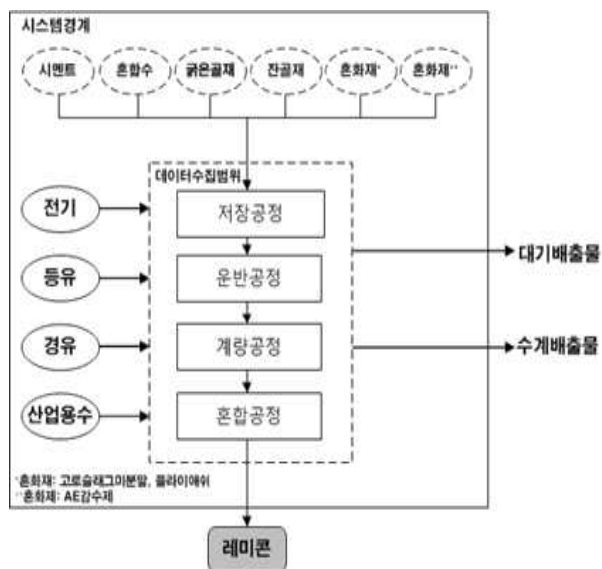


그림 3.34 레미콘 제조 공정흐름도

그림 3.35 데이터 수집 설문지

[STEP 1] 투입 및 배출물질 분석

레이콘 생산업체	에너지소비량			
	전기(kWh/m ³)	등유(L/m ³)	경유(L/m ³)	용수(ton/m ³)
A업체	1.79	0.02	0.37	0.04
B업체	1.83	0.07	0.08	0.04
C업체	2.05	0.02	0.13	0.07
D업체	3.16	0.00	0.27	0.21
E업체	2.30	0.05	0.15	0.19
평균	2.22	0.02	0.20	0.11

[STEP 2] 내부흐름 삭제

* 재활용되는 에너지 사용이 없음으로 내부흐름 삭제를 해주지 않음.

[STEP 3] 기능단위 변환

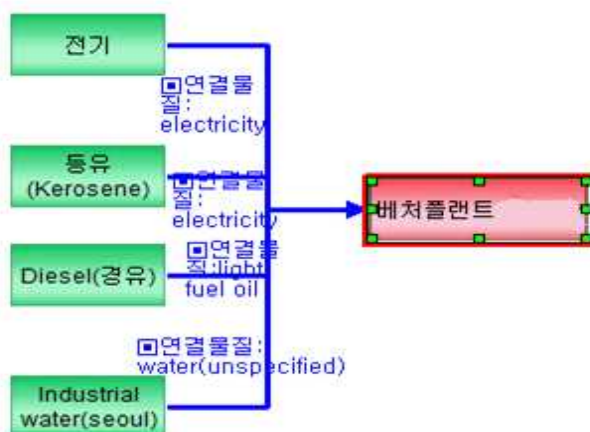
구분	INPUT 에너지원			
	전기(kWh/m ³)	등유(kg/m ³)	경유(kg/m ³)	용수(ton/m ³)
소비량	2.22	0.02	0.18	0.11

[STEP 4] GtG 작성완료

구분	INPUT 에너지원			
	전기(kWh/m ³)	등유(kg/m ³)	경유(kg/m ³)	용수(ton/m ³)
소비량	2.22E+00	1.74E-02	1.84E-01	1.10E-01

③ 전과정 영향평가

- 플라이애쉬 1kg의 전과정 영향평가 결과 지구온난화 2.31E-02kgCO₂-eq., 산성화, 부영양화, 오존층파괴, 자원소모, 광화학적산화물생성 으로 도출되었으며, 해외 LCA 수행사례와 거의 유사한 영향을 나타내는 것으로 분석됨.



TOTAL 프로그램 데이터 입력

구분	데이터베이스	물질명	단위	값
전기	전기	1.7.1-Electricity	kg	2.22E+00
등유	등유	1.7.2-Kerosene	kg	1.74E-02
Diesel	Diesel	1.7.3-Diesel	kg	1.84E-01
Industrial water	Industrial water	1.7.4-Industrial water	kg	1.10E-01

레이콘제조공정의 LCI 데이터베이스

그림 3.36 레이콘제조 공정흐름도 및 LCI DB 구축 결과

표 3.14 레미콘 제조공정 영향평가 결과 (특성화)

영향범주	영향평가 결과 (특성화)	단위
자원소모	1.939E-03	kg-antimony eq.
지구온난화	5.160E-02	kg-CO ₂ eq.
오존층영향	4.006E-09	kg-CFC ₁₁ eq.
산성화	1.729E-04	kg-SO ₂ eq.
부영양화	2.802E-05	kg-PO ₄ ³⁻ eq.
광화학산화물생성	9.279E-05	kg-C ₂ H ₄ eq.

④ 국내·외 LCI DB와 비교

- 6대 영향범주는 자원소모, 지구온난화, 산성화, 부영양화, 광화학산화물생성, 오존층영향으로 구분

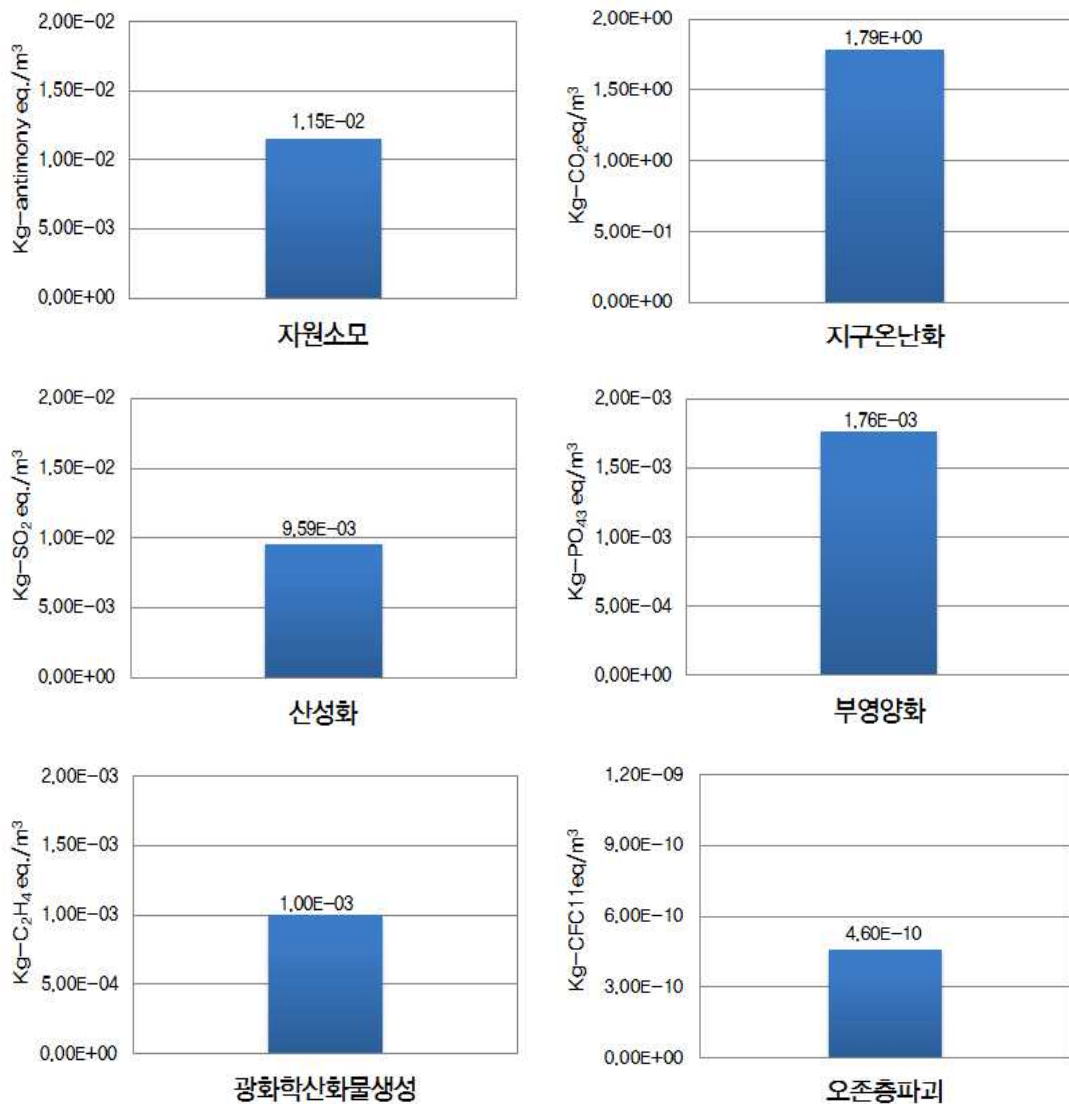


그림 3.37 레미콘 제조공정 영향평가 결과 (특성화)

(4) 슬래그골재 LCI Database 구축 및 유효성 검토

(가) 일반정보

① 제품정보

- 철강슬래그는 공정에 따라 크게 고로슬래그와 제강슬래그로 분류됨. 철강 슬래그는 현재 통계상 100% 재활용되고 있지만, 슬래그의 종류에 따라 재활용용도 및 가치는 큰 차이를 보임.
- 시멘트의 원료로 75% 이상을 재활용하고 있는 고로슬래그가 비교적 고부가가치적으로 활용되고 있는 것과는 달리 제강 슬래그의 대부분은 도로 및 성토용과 같은 저부가가치 이거나 거의 가치가 없는 용도로 사용되고 있어, 좀 더 부가가치가 있는 기술의 개발이 필요한 슬래그임.
- 고로슬래그는 괴재슬래그와 수재슬래그로 구분되며, 괴재슬래그는 용융슬래그가 자연 공냉과 살수에 의해 서서히 냉각되어 결정화된 것임. 또한 수재슬래그는 용융슬래그에 고압의 물을 분사하여 급냉에 의해 모래상태로 유리질화 시킨 것을 말함.
- 슬래그 골재의 제조는 고로슬래그의 고로를 야적장서 살수를 통해 냉각을 시킨 후 채석하여 파쇄공정을 하여 골재가 생산됨.

② 대상업체 선정

- 국내 슬래그골재 생산업체 중 표준적인 슬래그골재 생산공정을 가진 LCI 데이터베이스에 개발에 대한 대표성을 확보하였음.



그림 3.38 슬래그골재 제조 설비



그림 3.39 슬래그골재 제품

(나) LCI Database 구축

① 범위정의

㉔ 기능 및 기능단위

- LCI 데이터베이스 구축 단위인 기능단위 및 기준흐름을 설정함
- 슬래그골재된 제품의 형성을 전과정 평가 수행을 위한 주요기능으로 선정함. 이 기능을 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 편리한 슬래그골재 1kg 생산하는 것을 기능단위로 설정함.

표 3.15 슬래그골재의 기능 및 기능단위

구분	슬래그골재
기능	건설 및 토목공사 시 도로포장 혼입재료로 사용
기능단위	슬래그골재 1kg 생산
기준흐름	슬래그골재 1kg

㉔ 시스템 경계

- 슬래그골재의 시스템경계는 원료물질 채취 및 수송되어 제품 형태로 생산되는 단계까지가 포함됨(Cradle to Gate).

시스템경계 (Cradle to gate)



그림 3.40 슬래그골재 시스템경계

㉕ 데이터 범주

- 본 연구의 데이터 범주는 일반원칙에 따라 각 데이터 범주별 투입물과 산출물을 다음과 같이 나타냄

표 3.16 슬래그골재 데이터 범주

구분		물질명
투입물	원료물질	슬래그
	에너지	전기, 경유
산출물	제품	슬래그골재
	대기배출물	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , SO _x , TSP, PM10, VOC, NH ₃ 등
	수계배출물	-
	고형폐기물	오니

㉖ 데이터 품질요건

- 데이터는 크게 현장데이터와 공개된 일반데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)로 구분될 수 있으며, 슬래그골재의 최종 생산단계에 대해서는 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하여 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름에 대해서는 공개된 일반데이터를 적용하였음.

㉗ 가정 및 제한사항

- 원료물질에 대한 상위흐름 자료에 대해서 최근 5년 이내에 개발된 데이터베이스가 없을 경우, 「LCI 데이터베이스 표준지침서」의 산업별 LCI 데이터베이스 구축 사례에서 적용된 바와 같이 시간적 경계를 확장시켜 최근 10년 이내의 데이터베이스를 적용함.
- 유류 및 LPG 연료 연소에 의한 대기배출물은 업체에서 관리되고 있는 실측치를 우선 적용하였으며, 관리되지 않는 대기배출물의 경우에는 국립환경과학원의 「국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람(2010)」의 배출계수를 적용하여 배출량을 산정함.
- 공정에 투입되는 원료물질에 대한 국내·외 데이터베이스가 존재하지 않는 경우, 해당 물질과 가장 유사한 조성을 갖는 데이터베이스를 연결하였으며 국내 데이터베이스를 우선적으로 활용.

㉘ 할당

- 슬래그골재 생산 시 부산물은 없음에 따라 할당은 없음.

[STEP 1] 투입 및 배출물질 분석

공정명	Input			Output		
	물질명	양	단위	물질명	양	단위
A. 채석공정	슬래그H	7477.35	ton	오니	96	m ³
	물	3000064	L	폐수	2865376	L
	경유	1055	L	슬래그C	7140.63	ton
B. 파쇄공정	슬래그C	7140.63	ton			
	전기	7300	kwh			
	경유	929	L	슬래스골재	7140.60	ton

[STEP 2] 내부흐름 삭제

* 재활용되는 에너지 사용이 없으므로 내부흐름 삭제를 해주지 않음.

[STEP 3] 기능단위 변환

공정명	Input			Output		
	물질명	양	단위	물질명	양	단위
A. 채석공정	슬래그H	1.047	kg	오니	0.235	kg
	물	4.201	kg	폐수	4.013	kg
	경유	0.001	kg	슬래그C	1.000	kg
B. 파쇄공정	슬래그C	1.000	kg			
	전기	0.010	kwh			
	경유	0.001	kg	슬래스골재	1.000	kg

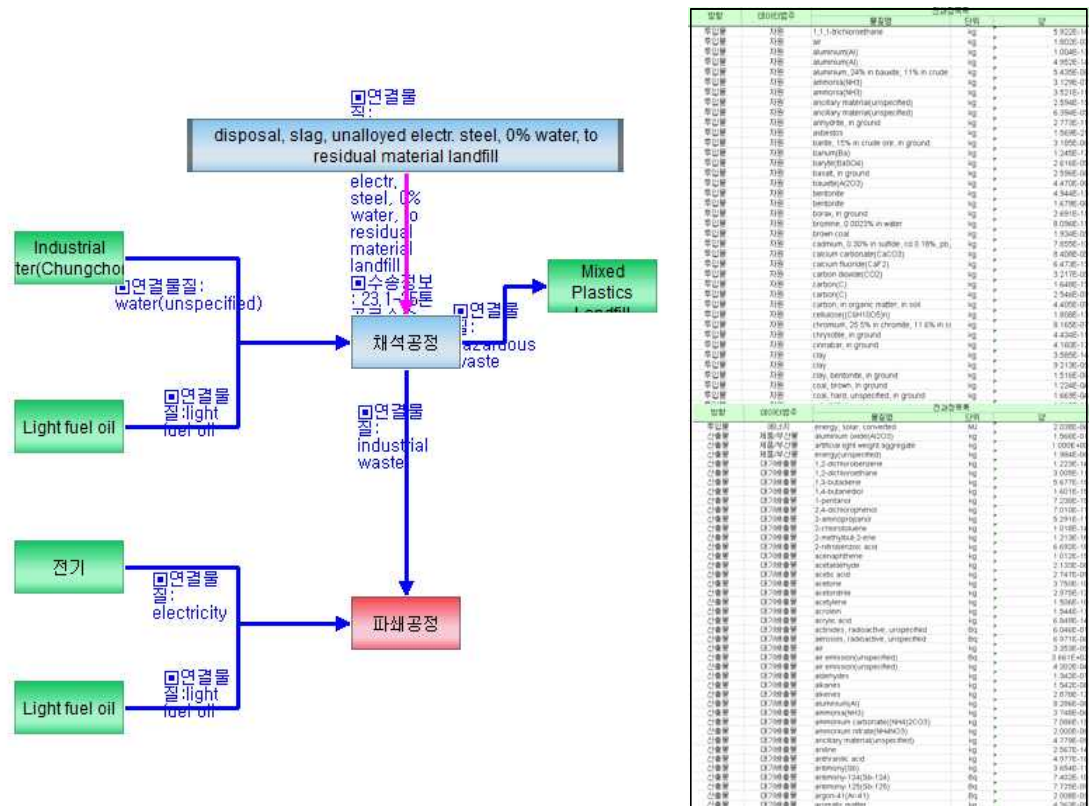
[STEP 4] GtG 작성완료

공정명	Input			Output		
	물질명	양	단위	물질명	양	단위
A. 채석공정	슬래그H	1.05E+00	kg	오니	2.35E-01	kg
	물	4.20E+00	kg	폐수	4.01E+00	kg
	경유	1.00E-03	kg	슬래그C	1.00E+00	kg
B. 파쇄공정	슬래그C	1.00E+00	kg			
	전기	1.00E-02	kwh			
	경유	1.00E-03	kg	슬래스골재	1.00E+00	kg

*슬래그골재 생산 시 재활용되는 물질명이 없으므로 중 내부흐름삭제단계가 없음

③ 슬래그골재 LCI DB 구축 및 전과정 영향평가 결과

- 수집된 슬래그골재의 GtG 데이터를 TOTAL 프로그램에 입력하여 LCI 데이터베이스를 개발 하였으며, 6대 영향범주에 대한 영향평가 결과를 도출하였음.



TOTAL 프로그램 데이터 입력

슬래그골재 LCI 데이터베이스

그림 3.43 슬래그골재 제조 공정흐름도

표 3.17 슬래그골재 영향평가 결과 (특성화)

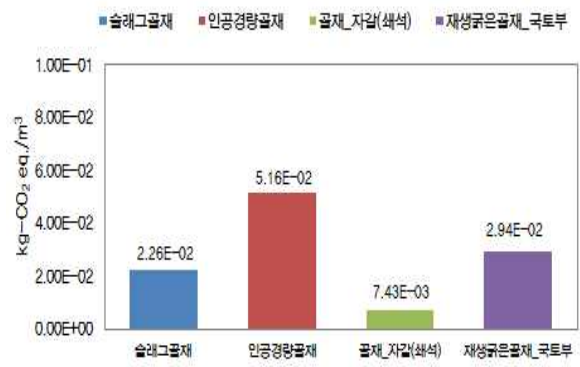
영향범주	영향평가 결과 (특성화)				단위
	슬래그골재	인공경량골재	골재(쇄석)	재생굵은골재	
자원소모	9.08E-05	1.94E-03	1.82E-02	1.60E-05	kg-antimony eq.
지구온난화	2.26E-02	5.16E-02	7.43E-03	2.94E-02	kg-CO ₂ eq.
오존층영향	6.49E-09	4.01E-09	3.06E-08	4.68E-11	kg-CFC ₁₁ eq.
산성화	1.61E-04	1.73E-04	1.98E-02	2.93E-05	kg-SO ₂ eq.
부영양화	1.61E-04	2.80E-05	3.67E-03	5.44E-06	kg-P ₀₄ ³⁻ eq.
광화학산화물생성	2.43E-05	9.28E-05	9.41E-05	1.25E-07	kg-C ₂ H ₄ eq.

④ 국내·외 LCI DB와 비교

- 슬래그 골재의 6대 영향범주 특성화 값을 기 개발된 국내 (국토교통부 DB)·국외(ecoinvet DB)와 비교를 실시.
- 6대 영향범주는 자원소모 및 지구온난화, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물생성, 오존층영향으로 구분됨.



자원소모(Abiotic Depletion Potential)



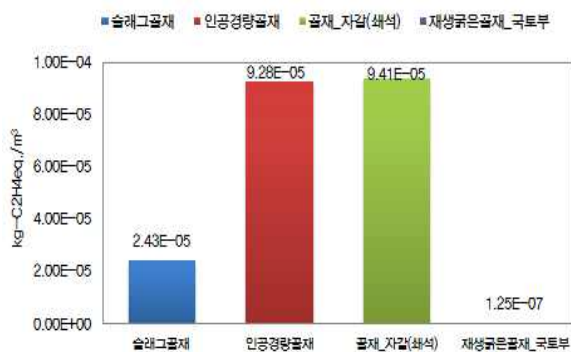
지구온난화(Global Warming Potential)



산성화(Acidification Potential)



부영양화(Eutrophication Potential)



광화학적산화물생성
(Photochemical Ozone Creation Potential)



오존층영향(Ozone Depletion Potential)

그림 3.44 슬래그골재 영향평가 결과 및 국내·외 LCI DB와의 비교

나. 콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축

(1) 콘크리트 CO₂ 배출량 평가지수모델 개발

(가) 시스템경계 설정

- ISO 13315-2는 콘크리트 및 콘크리트 구조물의 CO₂ 평가를 위한 시스템 경계에서 요람에서부터 출구(cradle-to-gate) 또는 요람에서부터 무덤(cradle-to-grave)를 기반으로 다음의 활동들을 포함할 것을 추천하고 있음.
- 콘크리트 구성재료(시멘트, 물, 골재, 혼화재 및 혼화제)들의 생산, 철근의 생산, 콘크리트의 생산, 콘크리트 구조물의 시공, 콘크리트 구조물의 사용, 콘크리트 구조물의 해체, 콘크리트 부재의 재사용, 폐콘크리트의 재활용 및 폐기. 각 공정단계에서 신뢰할 수 있는 전과정 목록이 부족할 경우 콘크리트 생산, 콘크리트 구조물의 시공, 사용, 해체 및 폐콘크리트의 재활용 등을 위한 장비 및 기계의 생산과 관련된 시스템 경계를 반드시 요구하지는 않음.
- 따라서 콘크리트 배합단계에서 CO₂ 평가를 위해 고려해야 하는 시스템 경계는 콘크리트 구성재료들의 생산과 운반 그리고 콘크리트 생산공정을 기본적으로 포함해야함.

(나) 전과정 목록(life-cycle inventory, LCI) 분석

- 전과정 목록분석 과정은 설정한 시스템경계에서 에너지, 원료, 제품, 부산물 등의 투입(input) 요소와 환경오염물 등의 종류와 양의 배출(output) 요소를 기록하여 목록화하는 과정.
- 그림 3.45에 나타난 시스템에서의 세부 재료, 운반, 공정에 대한 각각의 LCI 데이터가 필요.
- 그림 3.45에 나타난 공정에서 이용된 LCI 데이터베이스(DB)를 표 3.18에 요약하였으며 본 전과정 평가의 지역적 경계는 대한민국이므로 각 재료 및 운반에 대한 LCI는 기본적으로 국내 환경부에서 제공하는 데이터를 이용함.
- LCI 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라마다 상이하므로, 자국에서 제공되는 원단위를 이용하는 것이 가장 바람직함.

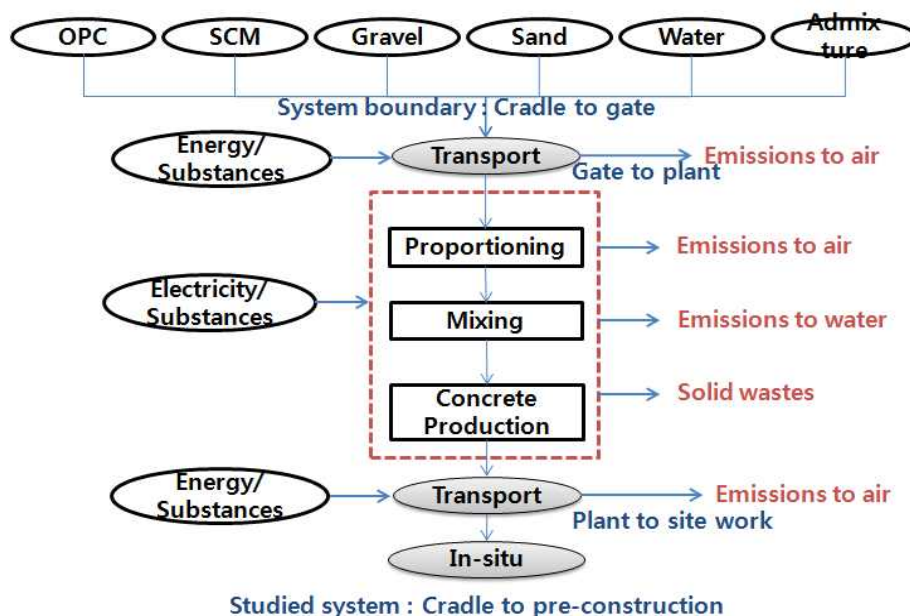


그림 3.45 콘크리트 배합단계에서 CO₂ 평가를 위한 시스템 경계

표 3.18 콘크리트의 CO₂ 발생량 및 환경영향 평가를 위한 LCI 데이터베이스

구성재료	기능 단위 (FU)	환경부하 발생량 (kg/FU)								
		CO ₂	CO	SO _x	NO _x	NH ₃	무연탄	유연탄	천연가 스	원유
시멘트	kg	9.31E-01	8.90E-02	5.64E-04	1.03E-03	4.36E-07	7.44E-03	1.80E-01	7.99E-03	2.42E-02
고로슬래그 시멘트	kg	2.05E-01	1.64E-02	1.92E-04	5.13E-04	1.26E-07	1.37E-03	3.31E-02	2.43E-03	6.31E-03
고로슬래그	kg	2.65E-02	-	8.36E-06	1.02E-06	-	-	-	-	-
잔골재	m ³	2.34E-03	4.19E-06	9.49E-06	1.52E-05	3.83E-08	-	-	-	-
굵은 골재	m ³	3.23E-03	4.52E-06	1.49E-05	1.64E-05	5.15E-08	-	-	-	-
8.1-15 톤 트럭	kg/km	6.30E-05	8.13E-07	2.77E-08	8.63E-07	9.20E-12	1.18E-07	5.99E-08	9.26E-07	2.11E-05
23.1-25 톤 트럭	kg/km	5.18E-05	5.32E-07	2.12E-08	5.69E-07	7.26E-12	9.29E-08	4.73E-08	7.31E-07	1.67E-05
레미콘 공장	kg	7.68E-03	-	3.42E-06	6.51E-05	-	-	-	-	-
믹서 (2.5m ³)*	m ³	6.10E-04	-	1.95E-07	2.40E-07	-	-	-	-	-
레미콘 트럭*	m ³ /km	6.60E-01	2.13E-03	4.30E-08	7.87E-03	1.06E-08	-	-	-	-

(다) 전과정 목록(life-cycle inventory, LCI) 분석

- 콘크리트의 주문과 생산에서 이용되는 단위를 고려하여 본 평가에서 설정된 콘크리트의 기능 단위는 1m³임
- 시스템 경계는 콘크리트 구성요소들인 원재료들의 채취(요람)에서부터 해체 및 재활용단계로 서 구성 재료, 운반, 콘크리트 생산 단계까지 고려함.
- 콘크리트 배합에 대한 데이터 품질로서 시간적 경계는 2012년이며, 지역적 경계는 서울 중심의 한국임. 콘크리트 배합, 시공 및 해체에 대한 기술적 경계는 표준기임(3~5월, 9~11월).
- 따라서 콘크리트만의 영향을 고려한 시스템 경계에서의 구조물 전과정 CO₂ 양(C_{total})은 개별 적산법에 의해 다음 식을 이용하여 산정됨.

$$C_{total} = C_M + C_T + C_P \quad (1)$$

- C_M , C_T , C_P 는 각각 재료, 운송 및 콘크리트 생산단계에서의 발생하는 CO₂ 양을 의미.

(라) 수집한 데이터 저장 및 SQL Server 연결

① 재료단계

- 콘크리트 구성재료(시멘트, 물, 골재, 혼화제 및 혼화제)들에 의한 CO₂ 배출량(C_M)의 시스템 경계는 원료채취에서부터 가공제조 후 출품되는 출구(gate)까지이며 다음 식으로 산정.

$$C_M = \sum_{i=1}^n (W_i \times CO_{2(i)LCI}) \quad (2)$$

- 여기서 i 는 콘크리트 생산을 위해 이용된 각 재료들이며, n 는 이들 재료들의 수이며, W_i 와 $CO_{2(i)LCI}$ 는 각각 재료 i 의 단위용적질량(kg/m³)과 CO₂ 배출 원단위(CO₂-kg/kg).

② 운송단계

- 운송단계 CO₂ 배출량(C_T)에 대한 시스템경계는 콘크리트 구성재료들의 출구에서부터 레미콘공장까지와 생산된 콘크리트의 레미콘 공장에서부터 현장까지로 고려하였으며 운송단계의 CO₂ 배출량 산정은 식(2)와 같음.

$$C_T = \sum_{i=1}^n (W_i \times D_i \times CO_{2(i)LCI_{TR}}) + D_B \times CO_{2LCI_{TR-CON}} \quad (3)$$

- 여기서 D_i 는 재료 i 의 출구에서 레미콘 공장까지의 운반거리(km)이며, $CO_{2(i)LCI_{TR}}$ 은 재료 i 의 운송수단의 CO₂ 원단위(CO₂-kg/km·kg)이며, D_B 는 레미콘 공장에서 시공 현장까지의 운반거리(km)이며, $CO_{2LCI_{TR-CON}}$ 은 레미콘 차량의 CO₂원단위(CO₂-kg/km·m³).
- 운송수단에 대한 정확한 정보가 없는 경우에는 시멘트계 재료는 23 톤 용량의 벌프카를, 골재 및 해체한 콘크리트와 재활용 골재는 15 톤 트럭을, 생산된 콘크리트는 6m³ 용량의 레미콘 트럭의 수단을 기본으로 적용함.

③ 콘크리트 생산단계

- 콘크리트 생산단계에서는 콘크리트 구성재료들의 하역, 저장, 계량, 혼합기로의 운반 및 혼합 등의 5공정을 고려하였으며, 5가지 공정에서 대표적으로 사용되는 기계설비는 콘크리트 구성재료의 저장을 위한 사일로와 재료운반을 위한 컨베이어벨트 설비, 콘크리트 믹서임.
- 콘크리트 생산단계에서의 CO₂ 배출량(C_p)은 각 공정에서의 기계설비로부터 소비되는 에너지 양으로부터 산정. 국내의 레미콘 공장에 대한 자료조사로부터 콘크리트 1m³를 생산하기위해 소비되는 에너지임.

(마) 콘크리트 재료단계에서의 CO₂ 평가 예

- 시스템 경계에서 나타난 재료단계까지의 CO₂ 배출량 산정은 표 3.19와 같음.
- 표 3.19에서 A열은 콘크리트 배합에 관련된 정보로서 각 재료의 단위질량이며, B열은 각 재료의 LCI에서 제공하는 CO₂ 원단위이며, D열은 각 재료의 생산지이며, E열은 각 재료의 생산지 출구에서부터 레미콘 공장까지의 거리이며, F열은 각 재료의 운송수단의 CO₂ 원단위임.

- 따라서 콘크리트 생산을 위한 콘크리트 구성 재료들의 생산에 의한 CO₂ 배출량은 A열과 B열의 곱으로 산정되며, 그 재료들의 운반에 의한 CO₂ 배출량은 A열, E열 및 F열의 곱으로 산정. 레미콘 공장에서 콘크리트 생산단계에서 배출하는 CO₂ 양은 C열의 아래에 별도로 나타냄.
- 콘크리트 설계압축강도 40 MPa에 대해 R사에서 실무적으로 이용하는 배합표에 대해 콘크리트 배합단계에서의 CO₂ 배출량을 산정한 결과 투입되는 재료에 의한 양은 340.2 CO₂-kg/m³이며, 그 재료들의 운반에 의한 양은 11.3 CO₂-kg/m³이며, 콘크리트 생산에 의한 양은 0.71 CO₂-kg/m³.
- 콘크리트 배합단계에서 CO₂ 배출량에 대한 보통포틀랜드 시멘트의 기여 분량은 약 95%를 차지함. CO₂가 저감된 콘크리트 생산을 위해서는 시멘트 양을 최소화할 필요가 있으며, 이는 고로슬래그, 플라이애쉬 및 실리카 폼 등의 혼화재의 치환이 좋은 대안임.
- 혼화재의 치환은 압축강도 및 내구성에 영향을 미치므로 우선목표 CO₂저감에 대해 혼화재의 적절한 치환률을 결정해야 콘크리트 품질을 확보하는 배합설계가 유도됨.

표 3.19 콘크리트 배합단계에서의 CO₂ 평가 예

기능단위 (FU): m³	재료			운송			
	A	B	C = A · B	D	E	F	G = A · E · F
단위 구성재료	kg/FU	CO ₂ -kg/kg	CO ₂ -kg/FU	출구위치	km	CO ₂ -kg/kg · km	CO ₂ -kg/FU
보통시멘트	361	0.931	336.1	담양	277	5.18 × 10 ⁻⁵	5.36
고로슬래그*	68	0.0265	1.802	광양	339	5.18 × 10 ⁻⁵	0.976
플라이애쉬*	23	0.0196	0.451	하동	322	5.18 × 10 ⁻⁵	0.38
모래	805	0.0009	0.725	인천	47	6.3 × 10 ⁻⁵	2.38
굵은골재	918	0.0012	1.102	광주(경기)	37.6	6.3 × 10 ⁻⁵	2.17
물	163	1.12 × 10 ⁻⁴	0.018	Sum			11.3
Sum			340.2	-			
콘크리트생산 (위치: 방배동)	1 m³	0.71 CO ₂ -kg/FU	0.71				
Total= 352.2 CO ₂ -kg/FU(=340.2+0.71+11.3CO ₂ -kg)							

(2) 콘크리트 CO₂ 배출량 평가지수모델 개발

(가) 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집평가 프로세스

- 최근 CBI(Swedish Cement and Concrete Institute)를 중심으로 한 북유럽의 각 콘크리트 연구기관들은 콘크리트 생산단계까지만 고려할 경우 콘크리트의 CO₂ 배출량은 과대평가되며, 구조물의 사용단계에서 탄산화에 의한 CO₂ 포집을 함께 고려할 필요가 있음을 주장함.
- 이런 노력의 일환으로 Pade and Guimaraes는 시멘트 소성과정에서 배출되는 CO₂는 구조물의 100년 생애주기를 고려할 경우 콘크리트의 탄산화에 의해 대부분 포집될 수 있음을 제시.
- 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂포집량은 탄산화모델, 노출환경에 중요한 영향을 받음.
- 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가는 구조물 생산을 위한 각 단계별에서 지역환경 및 일반적 사용 장비 등을 고려한 합리적인 모델들의 정립이 우선 필요.

(나) 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집평가 프로세스

- 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집은 콘크리트 재료 및 생산 등과 같은 물리적인 공정보다는 재료의 화학적 특성에 관계되기 때문에 LCI DB와 같은 자료의 구축이 어려움.
- CO₂ 포집에 대한 시스템경계는 콘크리트 건축물의 사용단계이며, 구조물의 사용수명은 40년을 기준으로 산정.
- 합리적인 CO₂ 포집량 산정을 위해서는 재령에 따른 탄산화 깊이를 가능하면 정확하게 예측할 수 있는 모델정립이 요구되며 이를 적용한 CO₂ 포집량 산정 모델식은 다음과 같음.

$$U_{co2}(t) = a_{co2}(t) \cdot A_{sf} \cdot x_c(t) \quad (g) \quad (4)$$

- 여기서 $a_{co2}(t)$ 는 재령 t 에서 탄산화에 의해 흡수가능한 CO₂ 양(g/cm³)이며, A_{sf} 는 공기중에 노출된 콘크리트 부재의 표면적(cm²)이며, $x_c(t)$ 는 재령 t 에서의 탄산화 깊이(cm).

① 흡수가능한 CO₂ 양

- 콘크리트 탄산화에 의해 흡수가능한 CO₂ 양($a_{co2}(t)$)은 시멘트 페이스트의 수화도와 수화생성물 중에서 탄산화가 가능한 요소의 몰농도에 결정되며 다음 식에 의해 산정될 수 있음.

$$a_{co2}(t) = \alpha_h(t) \cdot M_{ct}(t) \cdot M_{co2} \times 10^{-6} \quad (g/cm^3) \quad (5)$$

- $\alpha_h(t)$ 는 재령 t 에서 시멘트 페이스트의 수화속도, $M_{ct}(t)$ 는 재령 t 에서 콘크리트 단위체적당 페이스트의 탄산화 가능요소의 몰농도 (mol/cm³), M_{co2} (=44 g/mol)는 CO₂의 몰 질량이며, Papadakis et은 수화물의 화학적반응에 기반하여 완전수화 상태에서 $M_{ct}(t)$ 를 결정하기 위한 수학적 모델을 제시.
- $M_{ct}(t)$ 의 값은 재령이 증가함에 따라 점차 감소하며 재령 1년 이후에는 거의 일정한 값으로 수렴하며, 콘크리트 구조물의 사용수명(40년)에서 시멘트 콘크리트에 대한 다양한 배합들로부터 회귀분석한 $M_{ct}(t)$ 의 최종값과 단위시멘트 양의 관계를 그림 3.47에 나타냄.
- 따라서 $M_{ct}(t)$ 는 다음 식에 의해 단순하게 산정될 수 있음.

$$M_{ct}(t) = 8.06 C (\times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3) \quad (6)$$

- Papadakis et al.의 모델을 이용하여 산정한 $M_{ct}(t)$ 를 그림 3.46에 나타내었으며, 탄산화 가능요소들의 몰농도는 시멘트 주요 성분의 몰 질량으로부터 산정되므로 $M_{ct}(t)$ 의 값은 단위시멘트 양에 의해 가장 큰 영향을 받음.
- 재령에 따른 수화도($\alpha_h(t)$)는 극한 수화도(α_∞)에 수렴하는 경향을 나타내며 식 (7)과 같이 몰-시멘트비(W/B)의 함수로 모델링 되며, 또한 사용수명 40년에 대한 콘크리트 구조물의 $\alpha_h(t)$ 과 α_∞ 의 차이는 무시할 만큼 작음.

$$\alpha_h(t) = \frac{t}{2.0 + t} \alpha_\infty \quad (7)$$

$$\alpha_\infty = \frac{1.031 W/C}{0.194 + W/C} \quad (8)$$

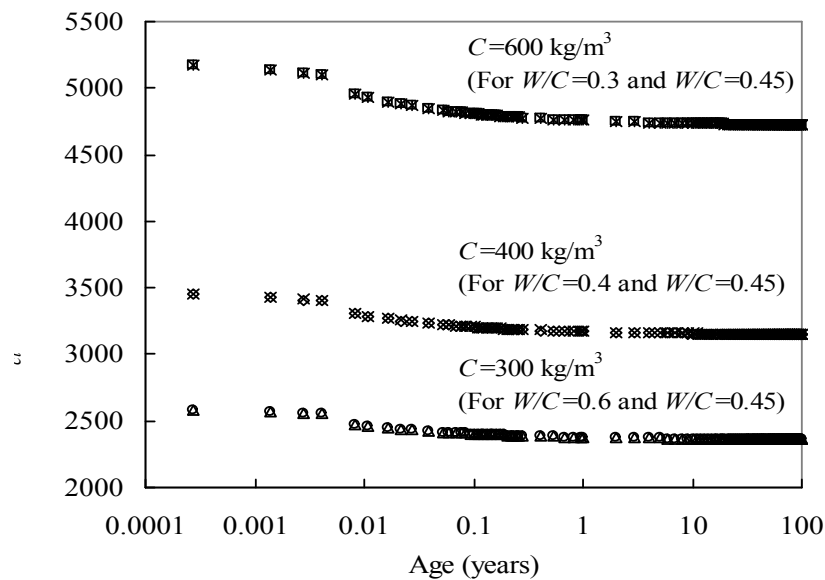


그림 3.46 재령에 따른 콘크리트 단위체적당 페이스트의 탄산화 가능요소의 몰농도

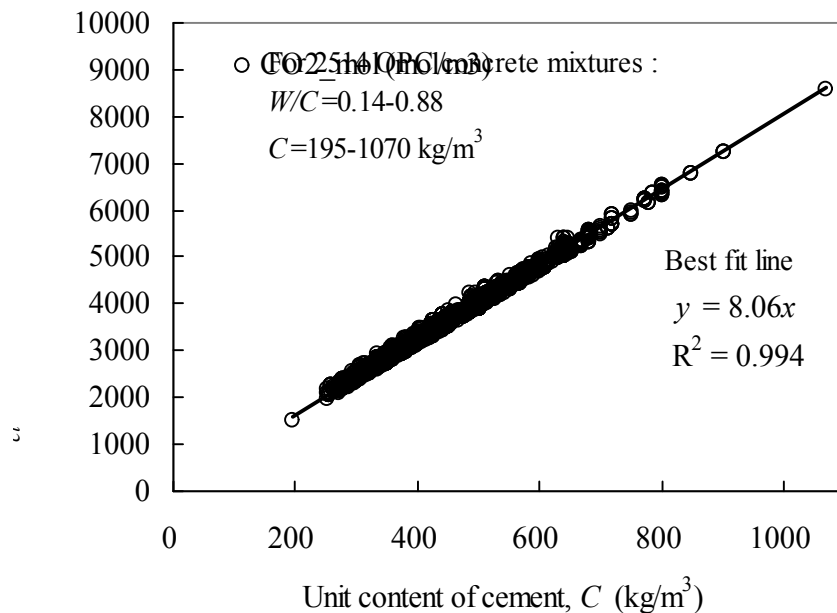


그림 3.47 $M_{ct}(t)$ 의 최종값과 단위시멘트 양의 관계

② 탄산화 깊이 및 CO₂ 확산계수 산정

- 일반적으로 탄산화깊이는 콘크리트 노출면적 및 노출조건(온도, 상대습도, 콘크리트 마감상태 등) 및 CO₂농도에 큰 영향을 받으며 탄산화속도와 시간의 함수로 식 (9)와 같이 일반화됨.

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{co2}(t)}{a_{co2}(t)} \cdot C_{co2} \cdot t} \quad (9)$$

- 여기서 $D_{co2}(t)$ 는 재령 t 에서 CO₂ 확산계수(cm²/day)이며, C_{co2} 는 콘크리트 면에서 CO₂ 질량 농도(g/cm³)이며, CO₂의 부피농도(ppm)는 이상기체이론을 이용하여 질량농도로 환산.
- CO₂ 확산계수는 물-시멘트비, 시멘트 수화도와 같은 재료적 특성뿐만 아니라 콘크리트 노출조건을 고려해야하며 이에 따라 $D_{co2}(t)$ 는 다음과 같이 모델링 됨.

$$D_{co2}(t) = 136.6\beta_s\beta_f\beta_h(a/C)[\epsilon_p(t)]^2 \quad (10)$$

- 여기서 β_s 는 혼화재 치환에 대한 보정계수(표 3.20)이며, β_f 는 마감재에 대한 보정계수(표 3.21)이며, $\beta_h = [(1 - RH/100)^{0.6}]$ 는 상대습도에 대한 보정계수이며, RH 는 상대습도(%)이며, a/C 는 골재-시멘트 질량비이며, $\epsilon_p(t)$ 는 재령 t 에서 시멘트 페이스트의 공극률.
- 시멘트 페이스트의 공극은 수화도와 탄산화의 진행으로 인해 재령증가와 함께 감소하지만, 재령 100일 이후에는 감소기울기는 거의 0에 가까움(Cha 1999). 이를 고려하여 Yang et al.은 $\epsilon_p(t)$ 를 다음과 같이 제시.

$$\epsilon_p(t) = \frac{0.1 + 2.62t \cdot (W/C)^{4.2}}{1.5t \cdot (W/C)^2} \quad (11)$$

표 3.20 혼화재 치환에 따른 보정계수(β_s)

Type	Substitution level of SCMs (%)					
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	60-80
FA	1.05	1.05	1.10	1.10	-	-
GGBS	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30
SF	1.05	1.10	-	-	-	-

FA=fly ash, GGBS=ground granulated blast-furnace slag, and SF=silica fume.

표 3.21 마감재에 대한 보정계수(β_f)

Finishing Condition	Indoor area							Outdoor area			
	No finishing	Plaster	Mortar + plaster	Mortar	Mortar + paint	Tile	Paint	No finishing	Mortar	Paint	Tile
Value	1.0	0.79	0.41	0.29	0.15	0.21	0.57	1.0	0.28	0.8	0.7

(다) 콘크리트 구조물에서 탄산화에 의한 CO₂ 포집량을 고려한 CO₂ 평가 사례분석

① 콘크리트 구조물 CO₂ 평가 방법

- 콘크리트 건축구조물의 CO₂ 평가는 각 부재에 적용되는 콘크리트의 배합설계 및 노출환경 등에 현저히 영향을 받으며 개별적산법에 의해 산정됨.
- 사례분석은 그림 3.48과 같은 아파트 건물의 기준층에서 타일마감이 적용된 내벽에 대하여 따른 CO₂ 평가함.
- 콘크리트 배합설계는 표 3.22와 같으며 기준지역(서울)에서의 CO₂ 농도(실외 300 ppm, 실내 200 ppm)를 적용.
- 탄산화에 의한 CO₂ 포집량을 고려한 CO₂ 평가는 기능단위(1m³)에 대하여 분석함.

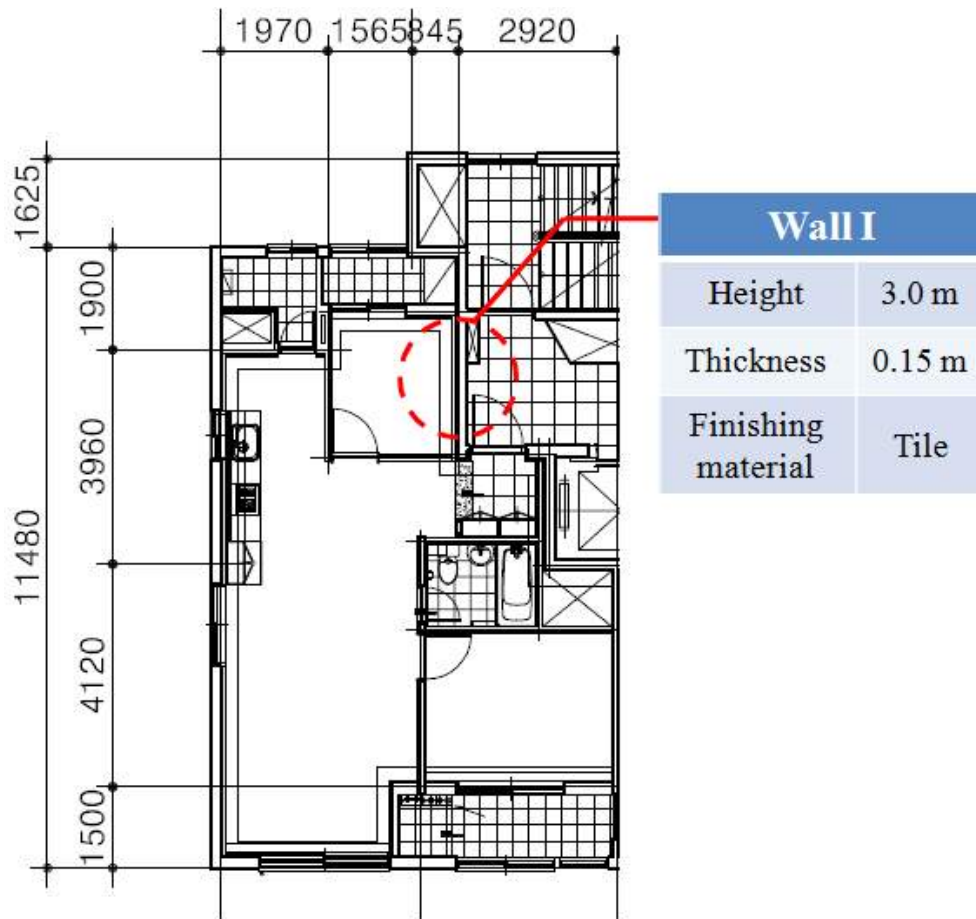


그림 3.48 콘크리트 구조물 내벽의 상세

표 3.22 아파트 내벽의 콘크리트 배합설계 (f_{ck}=24 MPa).

Binder type	Unit weight (kg/m ³)					
	Water	OPC	GGBS	FA	Sand	Gravel
OPC	179	348	—	—	867	923

표 3.23 아파트 내벽에 대한 CO₂ 포집을 고려한 CO₂ 발생량 평가 예시

Material phase						
Functional unit (FU): m³	Constituent			Transportation(gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	A · B	D	E	A · D · E
Unit Item	kg/FU	CO ₂ -kg/kg	CO ₂ -kg/FU	km	CO ₂ -kg/kg · km	CO ₂ -kg/FU
OPC	348	9.31E-01	3.24E+02	277	5.18E-05	4.99E+00
Sand	867	2.34E-03	2.03E+00	47	6.30E-05	2.57E+00
Coarse	923	3.23E-03	2.98E+00	37.6	6.30E-05	2.19E+00
Water	179	1.12E-04	2.00E-02	-	-	-
Sum			329.02	Sum		9.75
Production (Fresh concrete) phase						
Unit Item	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	A · B	D	E	A · D · E
	FU	CO ₂ -kg/m³	CO ₂ -kg/m³	km	CO ₂ -kg/m³ · km	CO ₂ -kg/FU
Facilities	1m³	0.71	0.71	50	5.01E-02	2.51
Sum						3.22
Use phase of structure						
A	B	C	D	E	F	D · E · F
Service life	Type	Finishing material	Exposed surface area (m²)	a_{ox} (g/cm³)	x_c (cm)	CO ₂ uptake (kg/m³)
40 years	Indoor wall	Tile	13.32	0.09	1.87	-23.1
Total = 318.89 [Emission (341.99) - Uptake (23.1)] CO ₂ -kg/m³						

② 사례분석 결과

- 콘크리트 제조 및 운송과정에서 발생한 CO₂의 양은 341.99 CO₂-kg/m³이며 건축물 사용단계 (40년)동안 포집할 수 있는 CO₂ 양은 23.1 CO₂-kg/m³임. 아파트 내벽에 대하여 CO₂ 포집과 발생량을 모두 고려할 때에는 318.89 CO₂-kg/m³의 CO₂가 발생.
- 시멘트의 제조에 따른 CO₂ 발생량은 전체 CO₂ 발생량의 약 95%로 평가되었으며 콘크리트의 생산과 운송단계에서의 CO₂ 발생량 대비 포집량은 약 6.8%를 차지함.

(3) 혼화재 치환에 따른 콘크리트 CO₂ 및 환경영향 평가

보통포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC) 제조과정에 발생하는 CO₂ 양은 콘크리트의 CO₂ 배출량에 대해 약 85% 이상이며 이에 따라 콘크리트의 CO₂ 발생량 및 환경영향 저감을 위해서는 시멘트 사용의 최소화가 요구된다. 이는 고로슬래그(granulated ground blast-furnace slag, GGBS), 플라이애쉬(fly ash, FA) 및 실리카흄(silica fume, SF) 등의 혼화재의 치환이 좋은 대안이다. 하지만 혼화재의 치환은 콘크리트 압축강도 및 내구성에 영향을 미치기 때문에 콘크리트 품질을 확보할 수 있는 적절한 치환율이 결정되어야 한다.

(가) 혼화재 종류 및 치환율에 따른 콘크리트 배합설계 데이터 베이스 분석

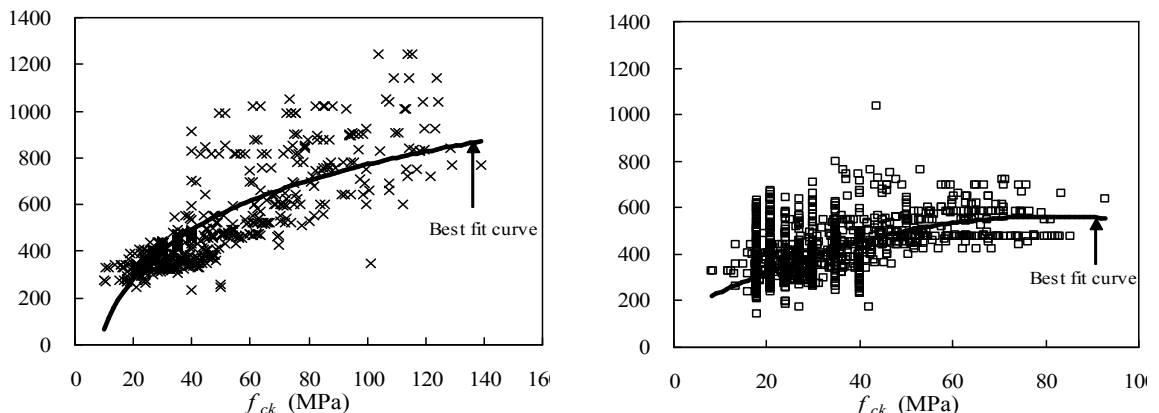
- 혼화재 치환 콘크리트에서 혼화재 종류 및 치환율의 영향을 분석하기 위해 5,230개의 실내배합 데이터와 7,306개의 레미콘 공장 배합데이터를 분석.
- 일반적으로 콘크리트의 압축강도는 단위결합재 양의 증가와 함께 증가하지만 그 증가 기울기는 압축강도 증가와 함께 감소. OPC+FA 콘크리트의 경우에는 강도가 높아짐에 따라 증가되는 결합재량이 큰 차이를 보이지 않았으며 OPC + GGBS 콘크리트는 OPC + FA 콘크리트 보다 압축강도 증가에 따른 결합재량의 증가율이 높음(그림 3.49).
- 콘크리트의 배합종류 별 압축강도의 증가에 따른 결합재 양의 감소기울기는 콘크리트의 배합 종류에 따라 상이하지만 전반적으로 기울기가 수렴하는 경향을 나타냄.

(나) 혼화재 치환 콘크리트의 CO₂ 평가

- 일반적으로 콘크리트는 물-결합재비가 감소함에 따라 압축강도가 증가하므로, 높은 압축강도 발현을 위해서는 많은 양의 결합재가 소비되는 한편, 콘크리트의 압축강도 증가는 구조부재의 단면크기를 줄일 수 있으므로 콘크리트 양의 감소에 의한 CO₂ 저감효과를 기대할 수 있음.
- 콘크리트의 CO₂ 평가는 단순히 1m³에 대한 CO₂ 발생량 평가가 아닌 단위압축강도 (1 MPa)의 발현을 위한 CO₂ 양이 평가될 필요가 있음에 따라서 CO₂ 지수(C_i)는 다음과 같이 정의.

$$C_i = C_d / f_{ck} \quad (12)$$

- C_d 는 콘크리트 1m³에 대한 CO₂ 발생량이며 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도임.



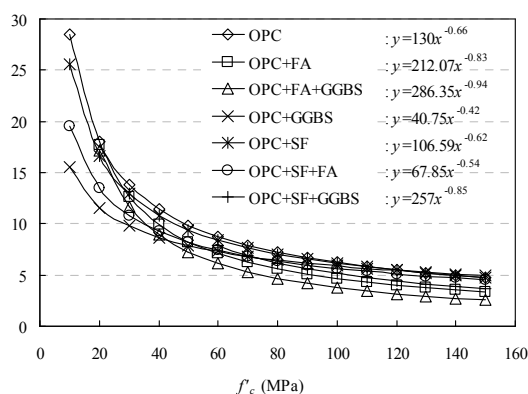
(a) OPC+GGBS 콘크리트

(b) OPC+FA 콘크리트

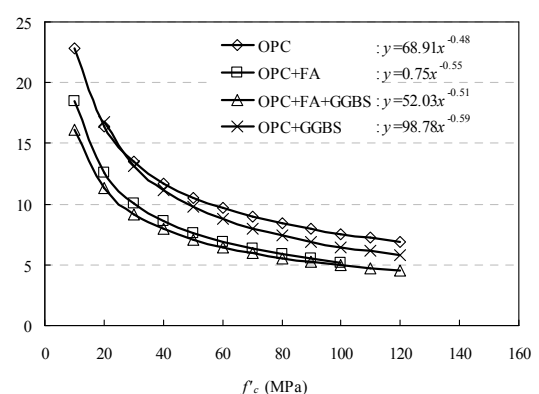
그림 3.49 콘크리트 배합종류와 압축강도에 따른 결합재량

① 혼화재 치환 콘크리트에서 f_{ck} 와 C_i 의 관계

- 압축강도에 따른 혼화재 치환 콘크리트의 C_i 를 평가하기 위해 5,230개의 실내배합 데이터와 7,306개의 레미콘 공장 배합데이터를 분석.
- 콘크리트 압축강도 20 MPa에서 실내배합의 C_i 의 범위는 11.58~18.0 $\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 이며 레미콘 배합은 11.3~16.36 $\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 의 범위에 있었으나 콘크리트 압축강도가 80 MPa로 증가함에 따라 실내배합은 4.66~7.21 으로 레미콘 배합의 범위는 5.56~8.41로 20MPa 대비 약 57% 감소하는 경향을 보임.
- 일반적으로 레미콘 배합과 실내배합 동일 f_{ck} 에 대한 C_i 값의 차이는 미미함.
- 일반적으로 모든 압축강도에서 OPC 콘크리트의 C_i 값은 다른 혼화재 치환콘크리트와 비교하여 현저히 높았으며 OPC+FA+GGBS 콘크리트의 C_i 값이 가장 낮게 나타났으며, 이는 동일 압축강도의 혼화재 치환 콘크리트에서 OPC+FA+GGBS 콘크리트가 CO_2 발생량이 가장 낮은 것을 의미.
- OPC+FA+GGBS 콘크리트는 압축강도가 30 MPa로 증가함에 따라 OPC 콘크리트 대비 C_i 값이 약 12% 감소하였으며 압축강도가 100 MPa로 증가함에 따라 약 48% 감소.
- OPC+FA 콘크리트와 OPC+SF 콘크리트의 경우 압축강도 30 MPa에서 C_i 값이 OPC 콘크리트와 비교하여 약 15~20% 감소하였으며 압축강도가 증가함에 따라 그 감소량은 줄어듦.
- OPC+GGBS 콘크리트는 OPC 콘크리트와 결합재지수 값이 비슷했지만 C_i 값은 비교적 낮음.
- 실내배합과 레미콘배합에서 혼화재 종류 별 압축강도에 따른 C_i 값은 회귀분석을 통해 그림 3.50과 같이 단순화할 수 있음.

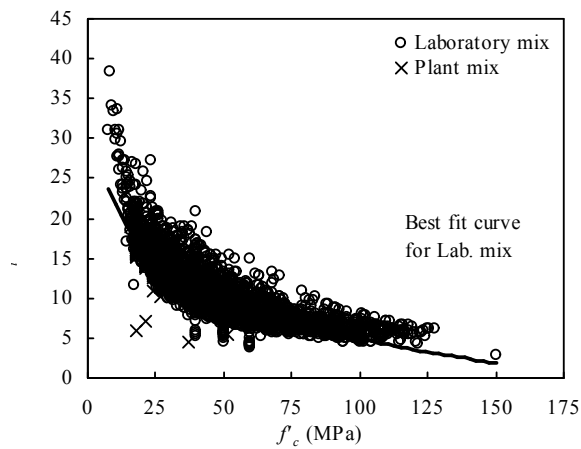


(a) 실내배합

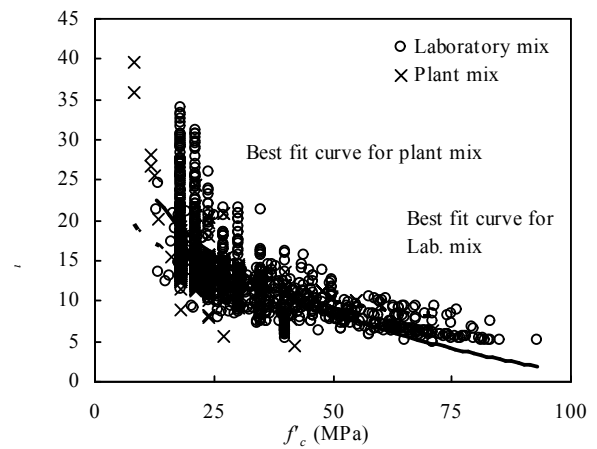


(b) 레미콘 배합

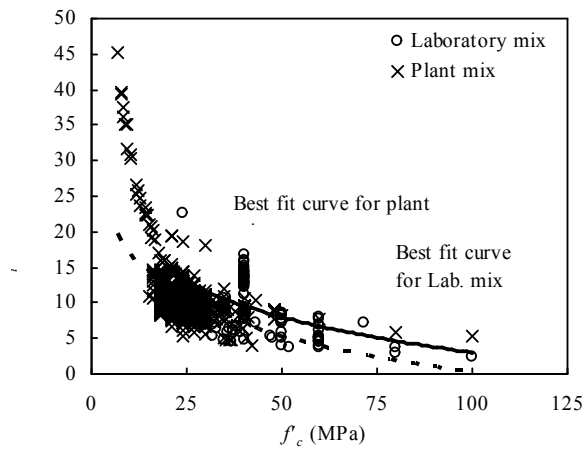
그림 3.50 혼화재 종류 별 콘크리트 압축강도에 따른 CO_2 지수의 단순화



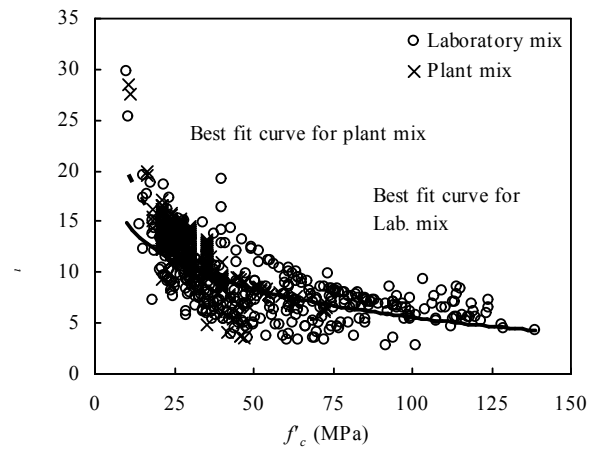
(a) OPC 콘크리트



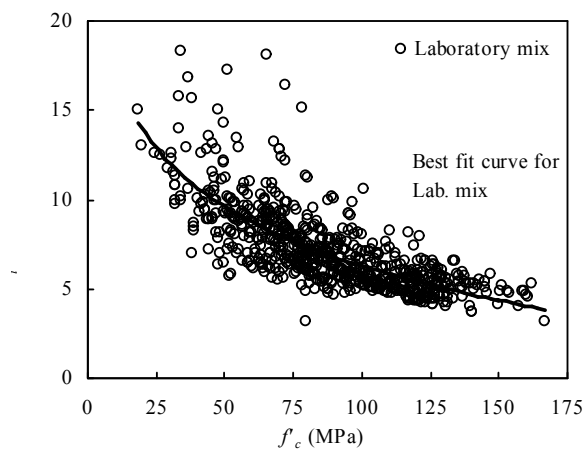
(b) OPC+FA 콘크리트



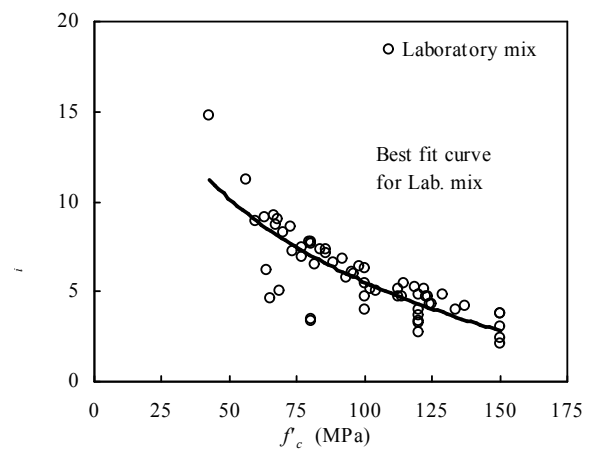
(c) OPC+FA+GGBS 콘크리트



(d) OPC+GGBS 콘크리트



(e) OPC+SF 콘크리트



(f) OPC+SF+GGBS 콘크리트

그림 3.51 콘크리트 배합종류에 따른 압축강도(f'_{ck})와 CO_2 지수(C_i)의 관계

② 혼화재 치환 콘크리트에서 혼화재 종류 및 혼화재 치환율과 C_i 의 관계

- C_i 에 대한 콘크리트 배합종류, 혼화재 치환율, 압축강도의 영향을 분석하기위해 OPC+FA 콘크리트, OPC+GGBS 콘크리트, OPC+SF 콘크리트를 압축강도 23~30 MPa와 60~70 MPa 범위로 나누어 그림 3.52에 나타냄.
- 모든 콘크리트 배합에서 혼화재 치환율 0~15% 범위에서 급격히 C_i 가 감소하였으며 혼화재 치환율이 15~20%를 기점으로 C_i 값이 일정하게 수렴하는 경향을 보임.
- OPC+GGBS 콘크리트의 C_i 는 23~30 MPa에서 다른 콘크리트 배합 대비 모든 범위에서 가장 낮았으며 이는 압축강도 23~30 MPa범위의 콘크리트에서는 CO₂ 발생량 저감에 GGBS의 치환이 가장 유리하다는 것을 의미함.
- 동일한 혼화재치환율에서 C_i 는 혼화재 종류와 관계없이 콘크리트 압축강도에 가장 큰 영향을 받으며 압축강도의 범위가 23~30MPa에서 60~70MPa로 증가함에 따라 C_i 가 30%이상 감소.
- 콘크리트 압축강도 60~70 MPa에서는 혼화재 치환율이 25%를 넘어서면서 OPC+SF 콘크리트의 C_i 가 OPC+FA 콘크리트 보다 낮게 나타남.
- 따라서 혼화재 치환 콘크리트에서는 압축강도와 관계없이 CO₂ 발생량의 저감을 위해서는 FA보 다는 GGBS 또는 SF의 사용이 유리.

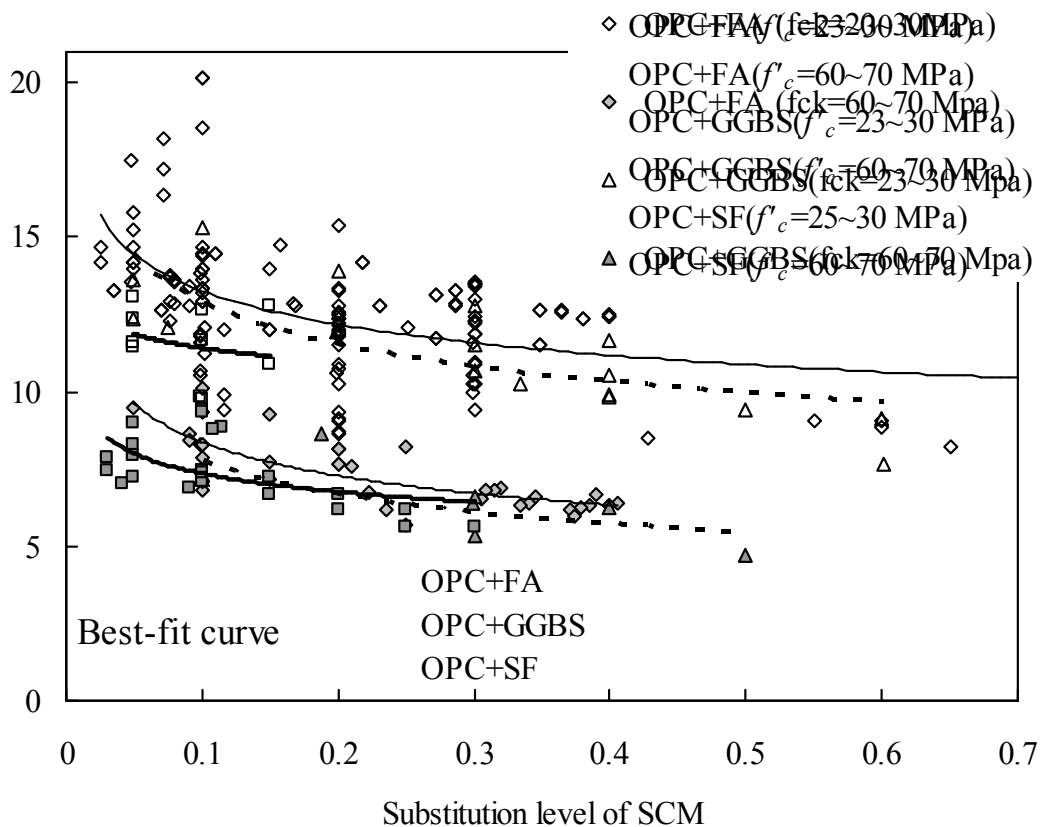


그림 3.52 콘크리트 배합에 따른 C_i 에 대한 혼화재 치환율의 영향

(다) 콘크리트 환경영향 평가 프로세스

- 환경영향평가는 LCI DB 분석결과를 환경에 미치는 영향크기로 전환시키는 과정을 필요함. 하지만 전과정 목록상의 모든 항목과 이것들이 환경에 미치는 영향간의 상관관계를 논리적, 객관적으로 정립하기는 매우 어려우며, 주관적인 측면이 적지 않게 포함.
- 이 주관적인 측면을 최소화하고 환경영향의 크기를 정량적으로 전환하기 위하여 영향평가에서는 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 부여의 과정을 도입.

① 시스템 경계설정 및 전과정 목록(life-cycle inventory, LCI) 분석

- 콘크리트의 환경영향 평가 프로세스에서 시스템 경계설정 방법은 CO₂ 평가와 동일.
- 전과정 목록 분석방법도 CO₂ 평가와 전반적으로 동일하지만 환경영향평가에서는 CO₂ 이외의 8가지의 환경부하물질(유연탄, 무연탄, 천연가스, 원유, 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 암모니아)이 고려.
- 콘크리트 배합에 따른 환경부하량 산정은 콘크리트 구성 재료의 투입량과 해당 LCI DB와의 곱으로 산정(표 3.24).
- 환경부하 목록 중에서 가장 높은 비율을 차지하는 것은 CO₂ 발생이며, 다음으로 유연탄 소비량인데 이는 OPC 생산을 위한 석회석의 소성과정에서 주로 사용되는 것이 유연탄이기 때문임. 세 번째로 발생량이 많은 환경부하는 CO₂임.
- 일반적으로 GGBS 치환율이 증가할수록 각 환경부하량은 감소, 동일 f_{ck} 에서 GGBS 치환율이 0%에서 50%로 증가할 때 CO₂발생량은 41%절감하였으며, 유연탄 소비량은 43.4% 감소.

표 3.24 콘크리트에서 고로슬래그 치환율에 따른 환경부하발생량 ($f_{ck}=30$ MPa)

R_g (%)	단위용적중량 (kg/FU)					환경부하 발생량 (kg/FU)								
	물	시멘트	고로슬래그	잔골재	굵은골재	무연탄	유연탄	천연가스	원유	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	NH ₃
0	220	440	0	660	1025	3.35E+00	7.93E+01	3.58E+00	1.39E+01	4.56E+02	3.93E+01	2.62E-01	9.90E-01	6.51E-02
10	220	396	44	659	1023	3.02E+00	7.14E+01	3.23E+00	1.28E+01	4.17E+02	3.53E+01	2.37E-01	1.00E+00	6.66E-02
20	220	352	88	658	1022	2.69E+00	6.35E+01	2.88E+00	1.18E+01	3.77E+02	3.14E+01	2.13E-01	9.58E-01	6.80E-02
30	220	308	132	657	1020	2.37E+00	5.56E+01	2.53E+00	1.08E+01	3.37E+02	2.75E+01	1.88E-01	9.15E-01	6.95E-02
40	220	264	176	656	1019	2.04E+00	4.76E+01	2.18E+00	9.77E+00	2.98E+02	2.36E+01	1.64E-01	8.71E-01	7.09E-02
50	220	220	220	655	1017	1.71E+00	3.97E+01	1.83E+00	8.75E+00	2.58E+02	1.96E+01	1.40E-01	8.27E-01	7.23E-02

② 분류화 및 특성화

- 분류화는 목록분석에서 도출된 목록항목들을 해당 영향범주로 모으는 과정임.
- 본 연구에서는 환경영향 범주를 표 3.25에 나타난 바와 같이 무생물 자원고갈, 지구온난화, 광화학산화물 생성, 산성화, 부영양화 및 인간독성 등 6가지로 분류.
- 특성화는 목록항목이 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 단계로서 식 (12)에 의해 평가됨.

$$CI_i = \sum_j CI_{i,j} = \sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j}) \quad (12)$$

- 여기서 CI_i 는 영향범주 i 에 포함된 모든 목록항목(j)들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기이며, $CI_{i,j}$ 는 목록항목 j 가 영향범주 i 에 미치는 영향의 크기이며, $Load_j$ 는 j 번째 목록항목의 환경부하량이며, $eqv_{i,j}$ 는 영향범주 i 에 속한 j 번째 목록항목의 특성화 계수 값을 의미하며, 각 목록항목의 특성화 계수는 환경부에서 제시한 값을 이용.

표 3.25 목록항목에 따른 환경영향 기준값 (특성화, 정규화 기준값, 가중치)

영향목록	목록변수	특성화 값 $eqv_{i,j}$	정규화 기준값 N_i	가중치 w_i
무생물 자원고갈	무연탄	4.61E-03 /yr	2.49E+04 g/pr-yr ²	0.231
	유연탄	4.61E-03 /yr		
	천연가스	1.671E-02 /yr		
	원유	2.48E-02 /yr		
지구온난화	CO ₂	1.00E+00g CO ₂ -eq/g	5.53E+06g CO ₂ -eq/pr-yr	0.288
광화학산화물생성	CO	2.70E+02g C ₂ H ₄ -eq/g	1.03E+04g C ₂ H ₄ -eq/pr-yr	0.065
	SO _x	2.80E-02g C ₂ H ₄ -eq/g		
	NO _x	4.80E-02g C ₂ H ₄ -eq/g		
산성화	SO _x	1.00E+00g SO ₂ -eq/g	3.98E+04g SO ₂ -eq/pr-yr	0.036
	NO _x	7.00E-01g SO ₂ -eq/g		
	NH ₃	1.88E+00g SO ₂ -eq/g		
부영양화	NO _x	1.30E-01g PO ₄ ⁻³ -eq/g	1.31E+04g PO ₄ ⁻³ -eq/pr-yr	0.038
	NH ₃	3.50E-01g PO ₄ ⁻³ -eq/g		
인간독성	SO _x	9.60E-02g 1.4DCB-eq/g	1.48E+06g 1.4DCB-eq/pr-yr	0.105
	NO _x	1.20E+00g 1.4DCB-eq/g		

Note] pr=person, yr=year

③ 가중치

- 환경영향범주가 환경전반에 미치는 영향은 상이하기 때문에 영향범주간의 상대적인 중요도를 결정하기 위해서 가중치 부여과정이 필요하며 이는 환경영향평가의 핵심 중 하나임.
- 가중치 값은 각 영향범주들의 가중치에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 서열정보에 기반한 계층 분석법을 이용하여 산정한 환경부 제시값을 이용.

④ 환경영향 평가지표

- 콘크리트의 환경영향 평가는 고려된 시스템 전체에서 i 번째 목록항목의 환경부하가 i 번째 범주에 미치는 환경영향을 하나의 점수로 나타냈으며 환경부에서 제시한 한국형 환경영향 평가지표 방법론 (식 13)을 따라 각 범주들에서 콘크리트의 환경영향 크기(WI_i)를 정량화함.

$$WI_i = \frac{CI_i}{N_i} w_i = \frac{\sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j})}{N_i} w_i \quad (13)$$

- 여기서 N_i 는 영향범주 i 의 정규화 기준값이며, w_i 는 영향범주 i 의 가중치 값이며, 해당지역에서 일정기간 배출되는 영향범주 i 의 잠재적인 환경영향 값인 정규화 기준 및 가중치 값임.
- GGBS 치환율이 40%인 콘크리트의 재료, 운송 및 배합단계에서 모든 목록항목들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기를 그림 3.53에 나타냄.
- 영향크기는 지구온난화, 광화학 산화생성물, 무생물 자원고갈 순으로 나타났는데, 이들 값에서 OPC가 차지하는 비율은 76% 이상이며, 레미콘 플랜트와 운송이 지구온난화 영향크기에서 차지하는 비율은 각각 0.01%와 14.15%, 운송단계의 지구온난화 영향이 높게 나타난 이유는 레미콘 트럭의 LCI DB의 환경부하 계수가 다른 운송수단과 비교하여 현저히 높기 때문임.
- 콘크리트의 전과정 산성화, 부영양화 및 인간독성의 크기는 무시할 만큼 작았으며, 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 환경영향에 대하여 지구온난화, 무생물자원고갈 및 광화학 산화물생성 관점에서 분석.

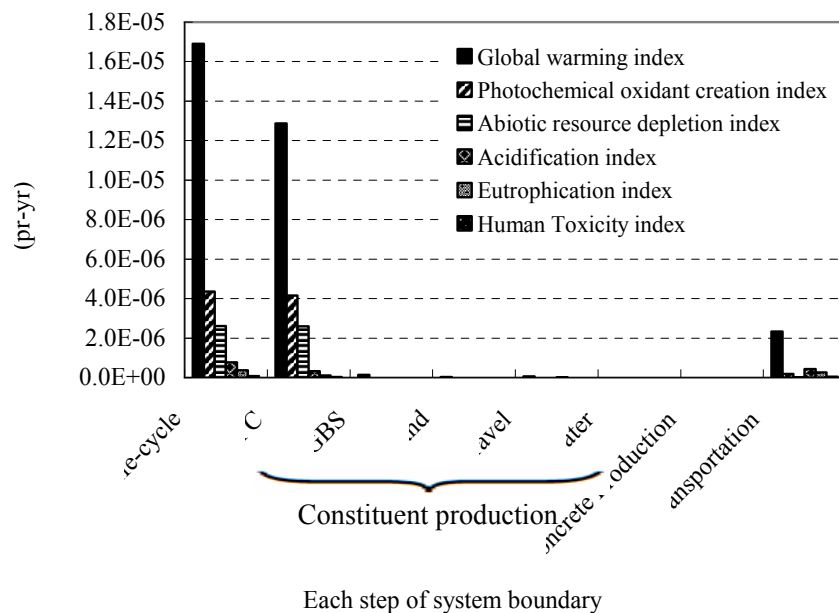


그림 3.53 시스템 경계의 각 단계에서 영향범주별 콘크리트의 환경영향평가

⑤ 환경영향 지수

- 콘크리트의 환경에 대한 효율성은 소요 압축강도 및 내구연한에 대한 전체 결합재 소비측면에서 정의될 필요가 있음.
- 콘크리트의 압축강도 증가는 많은 양의 결합재 소비를 요구하지만 구조부재의 단면크기를 줄일 수 있으므로 콘크리트 양의 감소에 의한 환경영향 크기를 줄일 수 있기 때문임.
- 따라서 콘크리트의 환경영향은 단위 압축강도 (1 MPa)의 발현을 기준으로 평가될 필요가 있으며, 본 연구에서는 각 범주별 환경영향크기 및 총 환경영향크기를 콘크리트 압축강도로 무차원한 환경영향 지수를 다음과 같이 정의함.

$$\lambda_{CO_2} = \frac{WI_{CO_2}}{f_{ck}} \quad (14)$$

$$\lambda_{ARD} = \frac{WI_{ARD}}{f_{ck}} \quad (15)$$

$$\lambda_{POC} = \frac{WI_{POC}}{f_{ck}} \quad (16)$$

$$\lambda_T = \frac{WI_T}{f_{ck}} \quad (17)$$

- 여기서 λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC} 및 λ_T 는 콘크리트 압축강도 1 MPa 발현을 위한 지구 온난화 지수, 무생물 자원고갈 지수, 광화학 산화물생성 지수 및 총 환경영향 지수이며, WI_{CO_2} 는 지구 온난화 영향의 크기, WI_{ARD} 는 무생물 자원고갈 영향의 크기, WI_{POC} 는 광화학 산화생성물 영향의 크기이며, WI_T 는 총 환경영향 크기임.

(라) 혼화재 치환 콘크리트의 환경영향 평가

① GGBS 치환 콘크리트에서 고로슬래그 치환율과 환경영향 지수

- GGBS 치환율(R_G)이 콘크리트의 각 범주별 환경영향 지수 (λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC}) 및 총 환경영향 지수(λ_T)에 미치는 영향을 그림 3.55에 나타냄.
- 일반적으로 R_G 가 증가할수록 각 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 감소하였으며, 이는 OPC에 비해 GGBS의 환경영향 크기가 무시할 만큼 작기 때문.
- GGBS 치환율의 증가에 따른 환경영향 지수의 감소 기울기는 R_G 가 약 30%를 넘어서면서 완만하게 변하였으며, 동일 GGBS 치환율에서 λ_{CO_2} 는 λ_{ARD} 에 비해 약 6배~8배, λ_{POC} 에 비해 약 4배~5배 높았는데, 이 비율은 GGBS 치환율이 증가할수록 다소 증가.
- 결과적으로 λ_{CO_2} 는 콘크리트의 총 환경영향 지수의 66%를 차지하였으며, GGBS 치환율이 증가함에 따라 총 환경영향 지수에서 λ_{CO_2} 이 차지하는 비율은 증가.
- 각 범주별 환경영향지수 및 총 환경영향지수는 레미콘과 실내배합에서의 차이가 매우 미미함.
- 이는 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스에서 나타났듯이 동일 압축강도에서 결합재 사용량이 레미콘 배합과 실내배합에 따른 차이가 매우 작기 때문임.

② GGBS 치환 콘크리트에서 고로슬래그 치환율과 결합재 지수 (B_i)

- 일반적으로 콘크리트의 압축강도는 단위결합재 양의 증가와 함께 증가하지만 그 증가 기울기는 압축강도 증가와 함께 감소하며, 따라서 단위 압축강도 (1 MPa)의 발현을 위한 결합재 양 및 이에 따른 CO₂ 양이 평가하기 위해 결합재 지수(B_i)를 다음과 같이 정의.

$$B_{ck} = B/f_{ck} \quad (18)$$

- B 는 콘크리트 기능단위(1m³)에 대한 결합재 양 (kg/m³)이며, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도임.
- 결합재 지수와 콘크리트 압축강도의 관계를 그림 3.54에 나타내었는데, 결합재 지수는 GGBS 치환에 관계없이 콘크리트 압축강도의 증가와 함께 감소
- 압축강도의 증가에 따라 단위 압축강도(1MPa) 발현을 위한 결합재 양이 감소될 수 있음을 의미.
- 결합재 지수의 감소속도는 f_{ck} 가 약 60MPa 이상에서 점차 완화되면서 약 5 kg/m³ · MPa⁻¹에 수렴하는 경향을 보임

③ GGBS 치환 콘크리트의 환경영향 크기 평가모델

- 콘크리트 환경영향 평가에 대한 쉽고 간단하게 접근할 수 있는 자료 또는 가이드라인의 확립은 실무적 측면에서 다양하게 이용 가능함.
- 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기에 대한 R_G 의 영향은 콘크리트 압축강도 및 이에 따른 단위 결합재 양에 의해 영향을 받음.
- 더구나 재료단계에서의 골재와 혼화제, 그리고 운송단계와 배합단계가 콘크리트의 환경영향 크기에 미치는 영향은 15% 이내로 작음.
- 이를 고려하여 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기를 간단하게 예측하기 위한 모델을 제시하기 위하여 결합재 지수 및 GGBS 치환율을 주요 변수로 다중회귀분석을 수행.

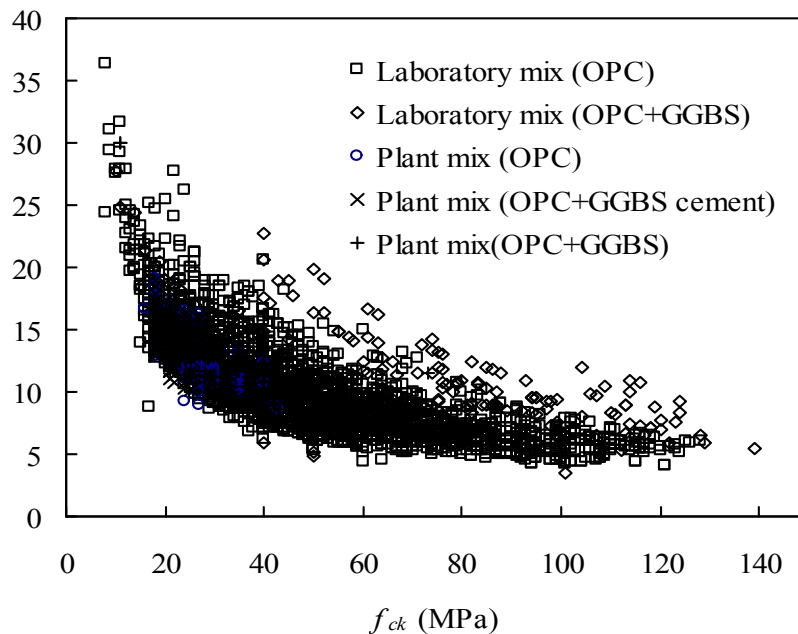
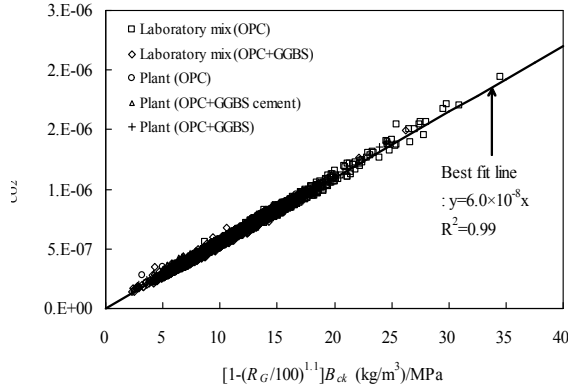
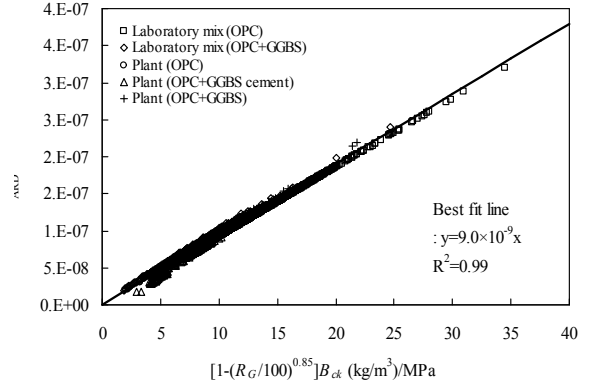


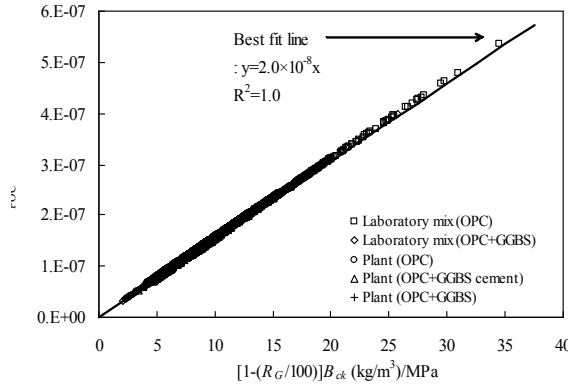
그림 3.54 GGBS 치환 콘크리트에서 f_{ck} 에 따른 B_i



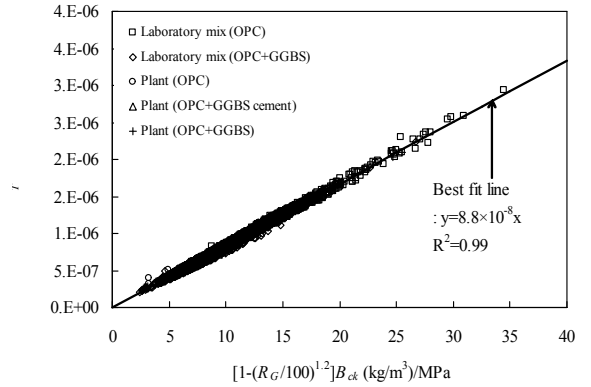
(a) 지구온난화 지표



(b) 무생물자원고갈 지표



(c) 광화학 산화물 생성지표



(d) 총 환경영향지표

그림 3.55 고로슬래그 치환율에 따른 환경영향 지표

- 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기는 GGBS 치환율이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하며 이론적으로 결합재가 없으면 콘크리트의 생산이 불가능하므로 환경영향도 없음. 이와 같은 경계조건을 고려하면, 콘크리트의 범주 i 에서 환경영향 지수(λ_i)와 B_{ck} 의 관계는 다음 식과 같이 모델링될 수 있음.

$$\lambda_i = A_1 [1 - (R_G/100)^{B_1}] B_{ck} \quad (19)$$

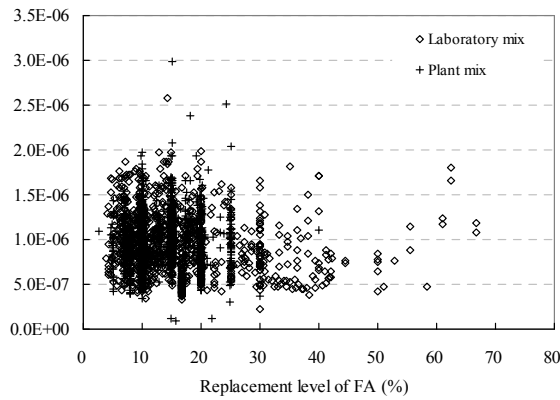
- 여기서 A_1 과 B_1 은 실험상수이며, 회귀분석 결과로부터 A_1 과 B_1 의 값은 각각 λ_{CO_2} 에 대해 6.0×10^{-8} 과 1.1을, λ_{ARD} 에 대해 9.0×10^{-9} 와 0.85을, λ_{POC} 에 대해 2.0×10^{-8} 와 1.0을, 그리고 λ_T 에 대해 8.8×10^{-8} 와 1.2로서 평가.
- 환경영향 지수 λ_i 와 결합재 지수 B_{ck} 는 콘크리트 압축강도로 무차원한 값임을 고려하면 GGBS가 치환된 콘크리트의 주요 범주에서의 환경영향 지표는 다음과 같이 산정.

$$WI_{CO_2} = 6.0 \times 10^{-8} [1 - (R_G/100)^{1.1}] B \quad (20)$$

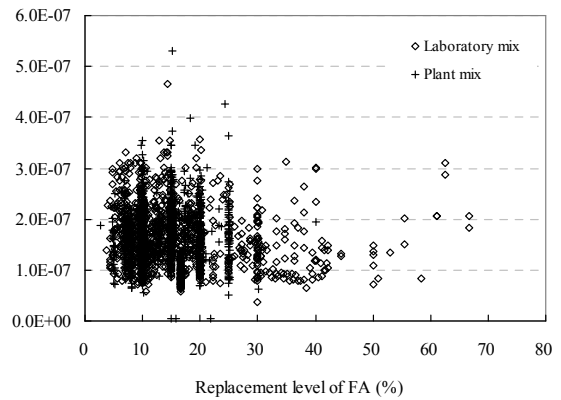
$$WI_{ARD} = 9.0 \times 10^{-9} [1 - (R_G/100)^{0.85}] B \quad (21)$$

$$WI_{POC} = 2.0 \times 10^{-8} [1 - (R_G/100)^{1.0}] B \quad (22)$$

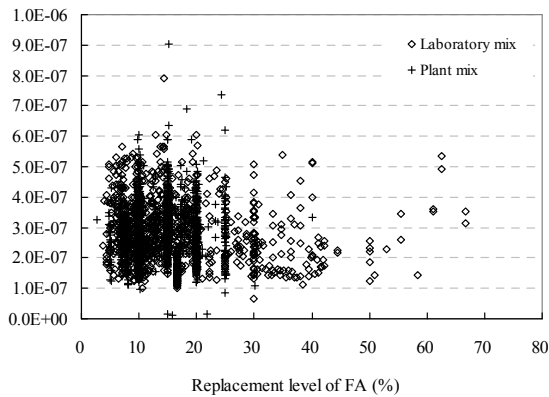
$$WI_T = 8.8 \times 10^{-8} [1 - (R_G/100)^{1.2}] B \quad (23)$$



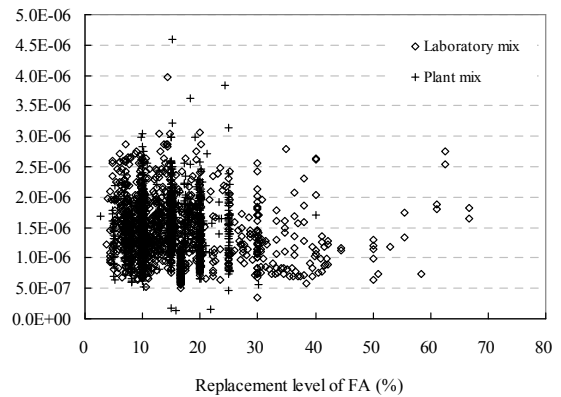
(a) 지구온난화 지표



(b) 무생물자원고갈 지표



(c) 광화학 산화물 생성지표



(d) 총 환경영향지표

그림 3.56 플라이애쉬 치환율에 따른 환경영향 지표

④ FA 치환 콘크리트에서 플라이애쉬 치환율과 환경영향 지수

- 각 범주별 환경영향 지수 (λ_{CO_2} , λ_E , $\lambda_{C_2H_4}$) 및 총 환경영향 지수(λ_T)에 대한 플라이애쉬 치환율(R_F)의 영향은 그림 3.56에 나타냄.
- 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 R_F 가 증가할수록 감소하였으며 고로슬래그와 비교하여 치환율에 따른 범주별 환경영향 지수의 감소율이 비교적 큼.
- 동일 FA 치환율에서 λ_{CO_2} 는 λ_E 에 비해 약 5배~6배, $\lambda_{C_2H_4}$ 에 비해 약 3배~4배 높았으며, λ_T 에서 λ_{CO_2} 가 차지하는 비율은 FA 치환율이 증가할수록 다소 증가.

⑤ FA 치환 콘크리트에서 플라이애쉬 치환율과 결합재 지수 (B_{ck})

- 결합재 지수(B_{ck})와 콘크리트 압축강도의 관계를 그림 3.57 나타내었는데, B_{ck} 는 플라이애쉬 치환에 관계없이 콘크리트 압축강도의 증가와 함께 감소. 이는 압축강도가 증가함에 따라 단위 압축강도 (1 MPa) 발현을 위한 결합재 양이 감소될 수 있음을 의미.
- 결합재 지수의 감소속도도 GGBS 치환율에 따른 분석 결과와 유사하게 f_{ck} 가 약 60 MPa 이상에서 점차 완화되면서 그 값이 약 $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 에 수렴하는 경향을 보임.

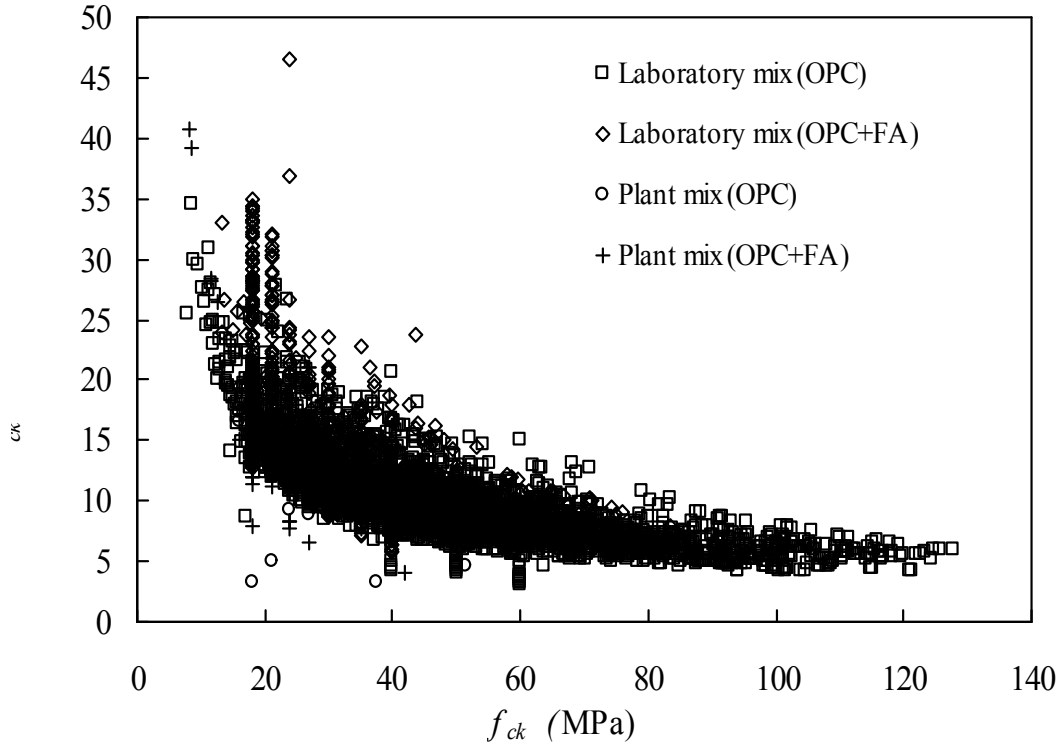


그림 3.57 GGBS 치환 콘크리트에서 f_{ck} 에 따른 B_i

⑥ FA 치환 콘크리트의 환경영향 크기 평가모델

- FA 치환 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기를 간단하게 예측하기 위해 결합재 지수 및 FA 치환율을 주요 변수로 다중회귀분석을 수행. FA 치환율에 따른 콘크리트의 범주 i 에서 환경영향 지수(λ_i)와 B_{ck} 의 관계는 다음 식과 같이 모델링될 수 있음.

$$\lambda_i = A_1 [1 - (R_F/100)^{B_1}] B_{ck} \quad (24)$$

- 여기서 A_1 과 B_1 은 실험상수로 회귀분석 결과로부터 A_1 과 B_1 의 값은 각각 λ_{CO_2} 에 대해 5.0×10^{-8} 과 1.1을, λ_{ARD} 에 대해 1.0×10^{-8} 과 0.85을, λ_{POC} 에 대해 2.0×10^{-8} 과 1.0을, 그리고 λ_T 에 대해 8.0×10^{-8} 과 1.2로서 평가될 수 있었으며, 플라이애쉬가 치환된 콘크리트의 주요 범주에서의 환경영향 크기는 다음과 같이 제시될 수 있음.

$$WI_{CO_2} = 5.0 \times 10^{-8} [1 - (R_F/100)^{1.1}] B \quad (25)$$

$$WI_{ARD} = 1.0 \times 10^{-8} [1 - (R_F/100)^{0.85}] B \quad (26)$$

$$WI_{POC} = 2.0 \times 10^{-8} [1 - (R_F/100)] B \quad (27)$$

$$WI_T = 8.0 \times 10^{-8} [1 - (R_F/100)^{1.2}] B \quad (28)$$

(4) 레미콘 배합을 위한 CO₂저감 및 현장적용형 보통중량 콘크리트 배합방법 개발

보통중량 콘크리트의 배합설계 모델개발을 위해 5,230개의 실내배합 데이터와 7,306개의 레미콘 공장 배합데이터를 분석하였으며 실험결과들의 비선형 회귀분석으로부터 결합재지수와 CO₂ 지수의 상관관계를 분석하였다. CO₂ 저감을 위한 콘크리트 배합설계는 기존의 콘크리트 성능목표(초기 슬럼프, 압축강도, 공기량)를 만족하면서 목표 CO₂ 저감율이 고려된 콘크리트 배합설계이다. 이를 위해서는 콘크리트 배합단계에서 고로슬래그, 플라이애쉬 및 실리카 폼 등의 혼화재 치환율은 목표 CO₂ 저감율을 달성할 수 있도록 결정하여야 한다. CO₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계 모델에 적용된 콘크리트의 CO₂ 평가는 ISO 14040 시리즈에서 제시한 절차와 국내 LCI database를 이용하였다. 시스템경계는 재료 채취 및 가공부터 콘크리트 타설 전단계까지로 고려하였다. 시간적 경계는 1990~2012로, 지역적 경계는 서울로 가정하였으며 콘크리트 CO₂ 평가의 기능단위는 1m³로 설정하였다.

(가) 시스템경계 설정

- CO₂ 저감을 위한 콘크리트배합 비율을 결정하기 위한 콘크리트 체적은 결합재(OPC, GGBS, FA, SF 등)와 물, 굵은 골재, 잔골재 및 공기량의 절대적인 양의 합계로 가정한 절대용적 배합법에 의해 결정.
- 절대용적 배합법을 이용하여 각 구성재료의 단위용적량을 산정하기 위해서는 콘크리트 배합조건에서 물-결합재비(W/B), 결합재량(B), 잔골재율(s/a)과 같은 3가지 이상의 조건이 필요.
- 이에 따라 물-결합재비, 단위결합재량 및 잔골재율은 12,000 여개의 콘크리트 배합설계 데이터 베이스의 비선형 회귀분석을 통해 제시.

① 결합재 지수(B_i)와 CO₂ 지수(C_i) 산정

- 목표 CO₂ 저감율에 대한 혼화재 설계를 위하여 결합재 지수(B_i)와 CO₂ 지수(C_i)는 각각 식 (18)과 식(12)를 통해 산정.
- 콘크리트의 결합재 지수와 CO₂ 지수의 관계를 평가하기 위하여 5,230개의 실내배합 데이터와 7,306개의 레미콘 공장 배합데이터를 분석.
- 콘크리트의 CO₂ 배출량은 콘크리트 압축강도 및 이에 따른 단위 결합재 양과 혼화재 치환율에 의해 영향을 받았으며, 이를 고려하면 콘크리트의 C_i 와 B_i 의 관계는 다음식과 같이 나타낼 수 있음.

$$C_i = 0.97 \left[1 - (R_F^{0.9} + R_G^{1.0} + R_S^{0.5}) \right] B_i \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}) \quad (29)$$

- R_F , R_G , R_S 는 각각 플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카 폼의 치환율을 의미.
- 콘크리트의 B_i 와 C_i 의 정의로부터 콘크리트의 배합단계에서 배출되는 CO₂ 양(C_d)은 다음 해설 식 (29)로부터 간단하게 산정될 수 있음.

$$C_d = 0.97 \left[1 - (R_F^{0.9} + R_G^{1.0} + R_S^{0.5}) \right] B \quad (\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}) \quad (29)$$

② 단위결합재량(B) 산정

- 일반적으로 콘크리트의 배합설계는 설계압축강도에 대해 물-결합재비를 결정하고 유동성 및 건조수축 저감을 고려하여 단위수량을 경험적으로 가정.
- 기존방식은 CO_2 저감을 고려하면 혼화재의 치환율 및 그에 따른 단위수량 결정이 매우 어려움.
- 시멘트는 콘크리트 배합단계에서의 CO_2 배출량의 95%이상을 차지하므로 CO_2 저감을 고려한 콘크리트 배합설계는 혼화재치환율 결정과, 그에 따른 단위결합재량의 합리적 산정이 필요.
- 콘크리트의 단위결합재 양은 CO_2 배출량과 함께 압축강도에 중요한 영향을 미침.
- 콘크리트 압축강도와 결합재 지수의 관계는 5,230개의 실내배합 데이터와 7,306개의 레미콘 공장 배합데이터를 분석하여 평가함

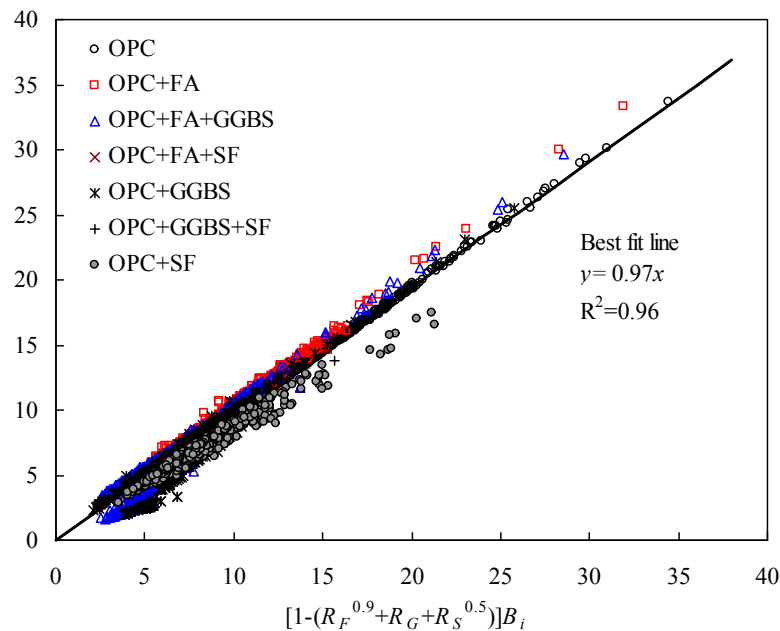


그림 3.58 B_i 와 C_i 의 관계 모델링

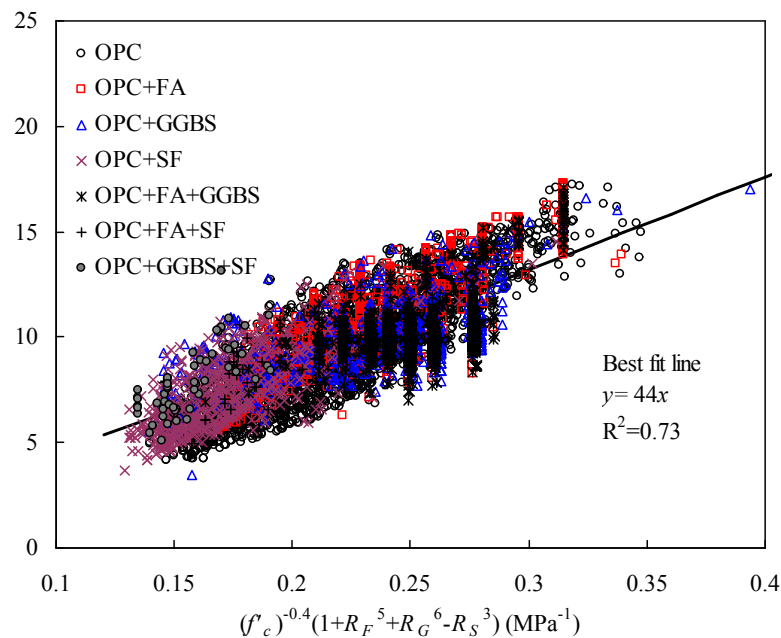


그림 3.59 콘크리트 압축강도와 결합재 지수의 관계

③ CO₂ 저감을 위한 결합재설계를 위한 현장 적용형 도표제시

- CO₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계에서 결합재 설계가 가장 중요한 단계이며 위에서 제시한 바와 같이 식 (32)을 통해 산정될 수 있으나 레미콘 공장과 같은 산업체에서 이 모델 식으로 결합재를 산정하는 것은 어려움이 있을 것으로 판단됨.
- 따라서 본 연구에서는 복잡한 모델식이 아닌 목표 CO₂ 저감률과 사용되는 혼화재 종류에 따라 혼화재의 치환율을 결정할 수 있는 결합재 설계시트를 개발하였음
- 이 도표는 식 (30)와 식 (32)을 이상화한 것으로 그림 3.60과 같음.

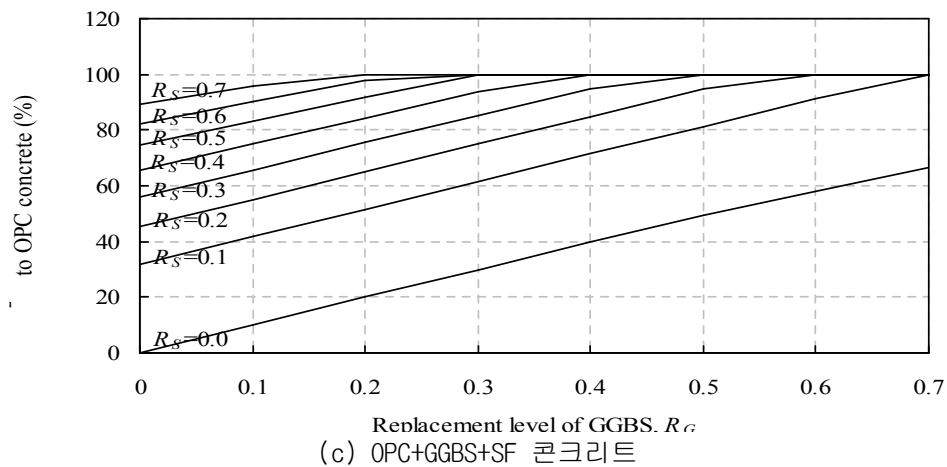
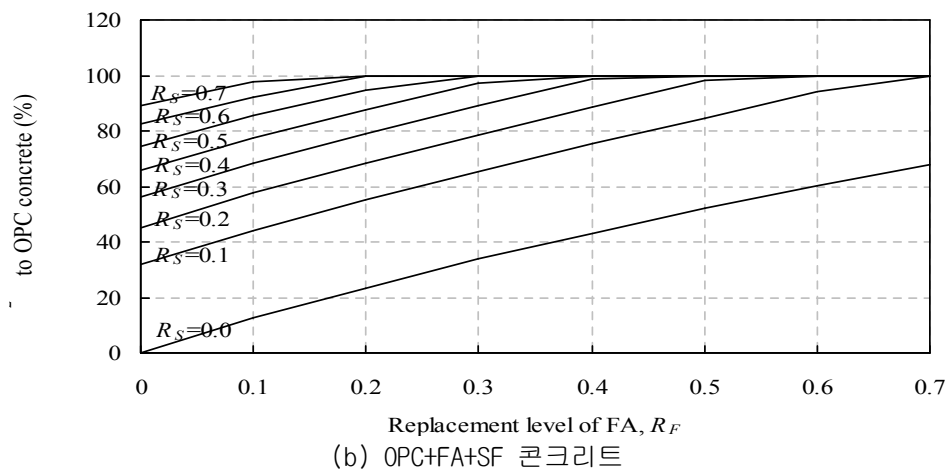
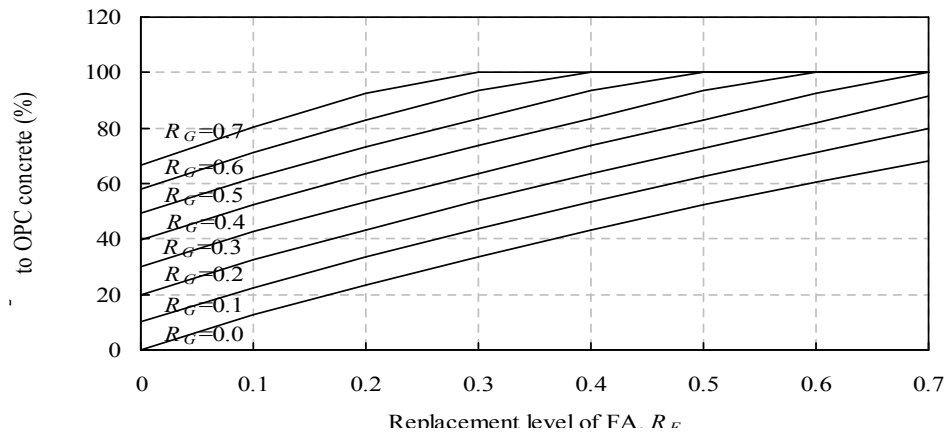


그림 3.60 목표 CO₂저감률에 따른 콘크리트 배합별 결합재 설계시트

④ 물-결합재 비 (W/B) 산정

- 일반적으로 콘크리트의 압축 강도는 물-결합재 비와 공기량에 반비례하며 또한 f_{ck} 에 대한 W/B 의 효과는 혼화재의 종류와 치환율에 영향을 받음.
- 혼화재가 치환된 콘크리트는 동일 압축강도 OPC 콘크리트에 비해 낮은 물-결합재비가 요구됨.
- 이러한 영향 인자들을 고려하여 콘크리트 배합설계 데이터베이스를 기반으로 분석하였으며, 콘크리트의 f_{ck} 에 대한 W/B 는 다음 식 (32)에 의해 결정됨.

$$W/B = 1.11 \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \right)^{0.94} \left[(1 + R_F^2 + R_G^3 - R_S^2)(v_A)^{0.1} \right]^{-1} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (32)$$

- 여기서 f_0 (= 10 MPa)는 콘크리트 압축강도에 대한 참고값이며, v_A 는 목표 공기량임.

⑤ 잔골재율 (s/a) 산정

- 콘크리트의 유동성은 주로 W/B , 단위 수량(W), 골재직경(d_a), 조립률(F_m) 잔골재율(s/a) 및 공기량 등에 의해 결정됨.
- 또한 감수제와 혼화재 종류와 치환율도 콘크리트 유동성에 큰 영향을 주지만 슬럼프에 대한 감수제 또는 혼화재의 영향을 고려하기 위해서는 감수제와 혼화재 종류에 따른 화학적 성분, 투입량 및 배합수의 온도 등 고려해야 할 요인이 광범위함.
- 이에 따라 본 연구에서는 초기 슬럼프 예측모델에서 감수제와 혼화재의 영향을 고려하지 않음.
- 본 연구에서는 콘크리트 배합설계 DB를 기반으로 슬럼프(S_i)와 다양한 영향인자(W/B , W , d_a , F_m)와의 관계를 분석하였으며 다음과 같은 식으로 나타냄.

$$\frac{S_i}{S_0} = -3.825X^2 + 34.895X - 77.433 \quad (34)$$

$$X = \left(\frac{W}{B} \right) \left(\frac{S}{a} \right) + \left(\frac{W}{W_0} \right) + \left(\frac{d_a}{d_0} \right)^{0.2} + (F_m)^{0.1} \quad (35)$$

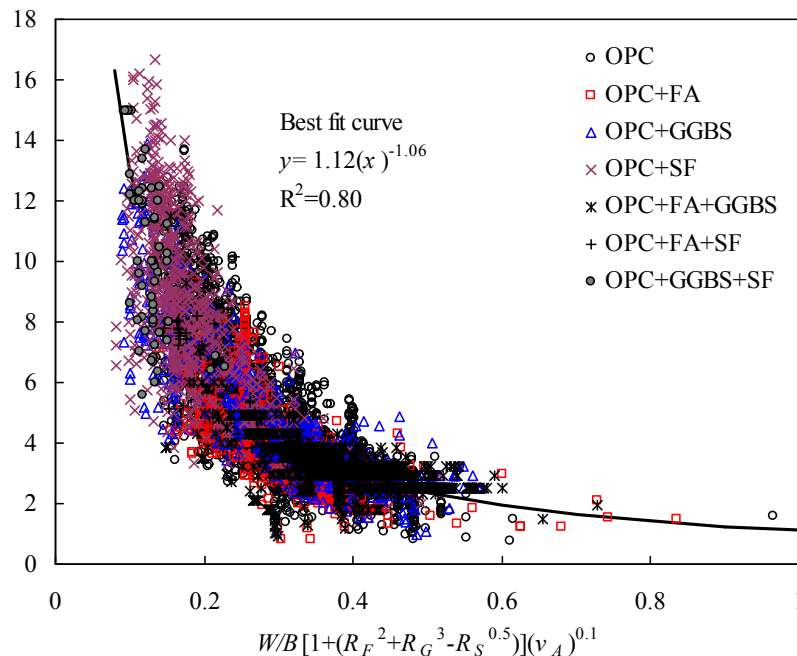


그림 3.61 콘크리트 설계압축강도와 물-결합재의 관계

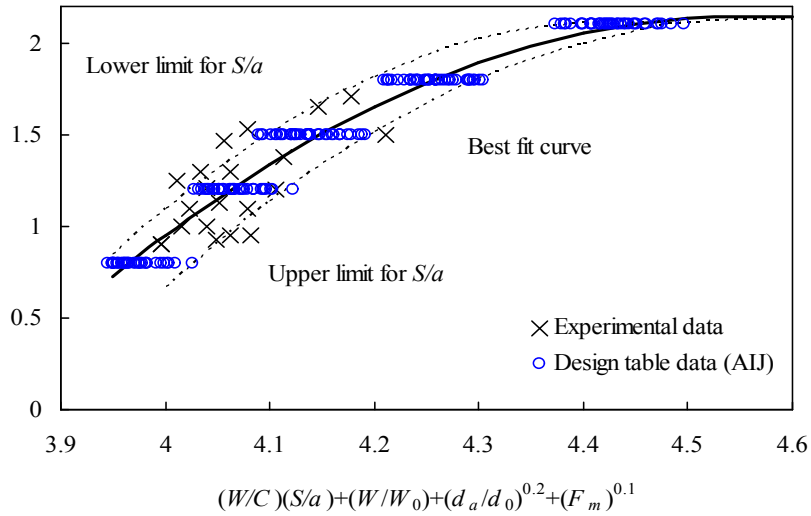


그림 3.62 s/a 에서 예측모델과 실험결과 비교

- 또한 식 (34)에서 산정된 s/a 는 0.25~0.55의 범위로 한정되며 이 경계조건으로 다음과 같은 상한계와 하한계식을 제시.

$$\frac{S_i}{S_0} = -5.309X^2 + 47.154X - 102.58 \quad \text{for lower limit curve} \quad (36)$$

$$\frac{S_i}{S_0} = -4.483X^2 + 40.985X - 91.541 \quad \text{for upper limit curve} \quad (37)$$

- 그림 3.62에는 예측 모델과 실제 실험결과를 분석하였으며 그 결과 실험값이 예측모델의 상한계와 하한계 범위에 위치함을 확인함.

⑥ 콘크리트 배합강도 (f_{cr}) 산정

- 콘크리트 배합강도 (f_{cr})는 배합설계 시 목표 콘크리트 압축강도(f_{ck})를 만족하기위한 보정계수를 곱한 값으로 산정. f_{cr} 산정에 대하여 ACI 318-11에서 제시한 모델(식 38)을 사용.

$$f_{cr} = A_1 f_{ck} + B_1 \quad (38)$$

- A_1 와 B_1 은 계수 값으로 f_{ck} 가 21 MPa이하 일때는 각각 1.0과 7.0이며 f_{ck} 가 21 MPa 이상 35 MPa이하 일때는 1.0과 8.3 그리고 f_{ck} 가 35 MPa이상인 경우에는 1.1과 5.0을 사용함.

(나) 목표 CO₂ 저감률을 만족하는 보통중량 콘크리트 배합설계 프로세스 예시

- CO₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계는 위에서 제시한 각각의 모델을 기반으로 다음과 같은 프로세스로 수행됨.

① Input data 입력

- 이 단계에서는 사용자가 사용하는 콘크리트 구성재료의 물리적 특성을 입력하는 것으로 Input data로는 시멘트계 재료들의 비중 및 골재의 비중, 직경, 흡수율 등이 있으며, 콘크리트의 목표 CO₂ 저감률과 일반적인 목표성능(슬럼프, 콘크리트 압축강도, 공기량)을 설정.

② 결합재 설계

- 목표 CO₂저감률을 만족하기위한 콘크리트 배합설계에서는 결합재 설계단계가 가장 중요하며 결합재 설계를 위해서는 OPC콘크리트 대비 목표 CO₂저감률의 및 사용되는 혼화재를 설정해야 함.
- CO₂ 저감률을 만족하기위한 결합재는 제시한 모델식(식 (32)) 또는 현장적용형 도표(그림 3.63)을 이용.

③ W/B 결정

- W/B는 Input data에서 결정한 f_{ck} 와 결정된 결합재량에 의해 산정.

④ s/a 산정

- s/a는 식 (34)과 식 (35)로 산정하며 산정된 s/a는 0.25이상 0.55이하의 범위에 있어야하며, 산정된 s/a가 이 범위를 벗어날 경우에는 상한계 s/a 또는 하한계 s/a 중 가까운 값으로 결정

⑤ 절대용적 배합방법 검토

- 이전단계에서 결정된 콘크리트 구성재료(시멘트계 재료, 골재, 물, 공기량 등)의 용적의 합이 1m³에 부합하는지 검토함.

⑥ CO₂ 발생량 검토

- 산출된 콘크리트 배합설계의 CO₂ 발생량을 평가하여 목표 CO₂ 발생량에 만족하는지 검토하며 만족하지 않는 경우에는 2단계 결합재 설계부터 재산정.

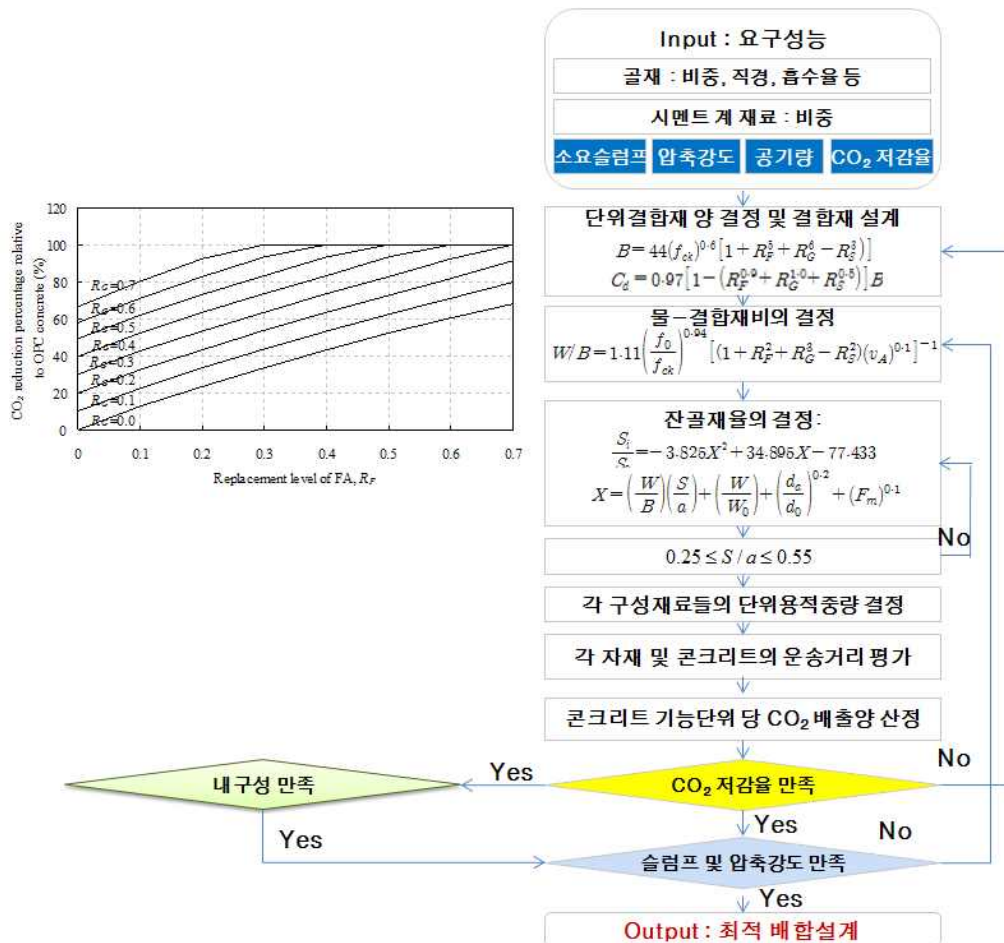


그림 3.63 목표 CO₂ 저감률을 고려한 콘크리트 배합설계 프로세스

[3차년도]

가. CO₂ 저감 기반 그린 콘크리트 배합설계 상용 프로그램 개발

주요 연구분야	최종 성과물	설정 근거		
		문제점		연구내용
(1) 콘크리트 에코효율성 평가방법 개발	콘크리트 에코효율성 평가 가이드라인	콘크리트 생산 시 온실가스 배출량만을 대상으로 하는 평가에 국한되어 있으며, 경제성 및 내구성까지 포함한 통합적 평가 불가능.	➡	온실가스를 비롯해 산성화, 부영양화 등 콘크리트 생산 시 배출되는 환경성, 비용, 내구성을 고려한 통합평가 기술 소유.
(2) 콘크리트 에코효율성 향상 배합설계 기술제안	콘크리트 에코효율성 평가 기술 이론 및 배합설계 기술	콘크리트 생산 시 온실가스 배출량만을 저감하기 위한 시멘트 대체재료 및 배합설계 기술개발에 집중됨.	➡	다양한 환경부하와 경제성 통합으로 콘크리트의 배합설계를 도출할 수 있는 알고리즘 개발.
(3) 콘크리트의 에코효율성평가 프로그램 개발	콘크리트 에코효율성 평가프로그램	전 산업의 제품을 대상으로 ‘탄소배출량 인증’ 시 적용되는 프로그램이 콘크리트의 온실가스평가 및 인증 시에도 적용되며, 콘크리트 전용 온실가스 뿐만 아니라 경제성, 내구성까지 통합적으로 평가할 수 있는 프로그램 부재.	➡	콘크리트에 특화되어 온실가스 및 환경영향평가 프로그램을 개발했을 뿐만아니라 최적기법을 적용하여 콘크리트 생산 시 환경부하와 경제성을 최소화 할 수 있는 알고리즘 개발.

(1) 콘크리트 에코효율성 평가방법 개발

(가) 에코효율성의 개념 및 연구동향

① 에코효율성의 개념

- 에코효율성(Eco-efficiency)은 정부 및 기업, 개인의 지속가능성을 달성하기 위한 구체적인 방법론으로 정의할 수 있음. 이에 기업들이 에코효율성의 잠재적 중요성을 인지하고, 이를 실현하기 위해 세계지속가능발전협의회(이하 WBCSD)가 설립되었다. 각 국에 따라 에코효율성에 대한 개념 정의 및 지수개발 방법론에 있어 다소 차이는 있으나 근본적인 개념은 WBCSD의 정의와 동일.
- 에코효율성은 더 나은 에코효율성을 가진 기업이 환경적으로 지속가능하며 더 나은 환경성적을 가지고 있을 것이라는 논리에 기초하고 있음. 초기의 에코효율성은 자원 투입량 대비 환경적 피해라는 환경효율성을 측정하기 위한 지표로 활용됨. 하지만, 최근의 에코효율성은 더 적은 자원의 투입으로 더 많은 가치를 창출하고자 하는 것으로, 환경적 의미 및 경제적 의미를 내포함.
- 에코효율성은 economic과 ecological의 공통부분인 ‘eco’와 자원의 최적화(optimize) 개념을 나타내는 ‘efficiency’가 결합한 표현으로 환경과 관련된 효율성에서 자원절감에 따른 기술효율성 개념과 오염이 환경에 미치는 영향을 최소화하고자 하는 환경효율성 개념을 포함하고 있을 뿐만 아니라 경제적 효율성의 개념까지 포함한 통합 개념임.

$$\text{에코효율성}(Eco-efficiency) = \frac{\text{경제적가치}(Economic\ Value)}{\text{환경영향}(Environmental\ Impact)} \quad (\text{식 3-1})$$

② 에코효율성 연구동향

기관	지수 유형	지표 종류	
		환경	경제
WBCSD	에코 효율성지수	▪ 총 에너지 사용량 ▪ 원재료 소비량 ▪ 용수 사용량 ▪ 온실가스 배출량 ▪ 오존층고갈물질 배출량	▪ 제품/서비스 양 ▪ 순매출액
ISO (14031)	환경성과지수	▪ 원재료 사용량 ▪ 에너지 사용량 ▪ 재활용 및 재사용된 폐기물량 ▪ 폐기물 유형별 양 ▪ 대기, 수계, 토양 배출물의 양 ▪ 소음, 열, 진동, 방사선	▪ 재무적 성과(환경관련)
GRI	환경성과지수	▪ 총 에너지 사용량 ▪ 총 전력 사용량 ▪ 총 연료 사용량 ▪ 원료 총 사용량 (연료제외) ▪ 총 용수 사용량 ▪ 토양으로 배출된 폐기물량 ▪ 배기가스의 양 ▪ 수계로 배출된 오염물의 양	▪ 임금 ▪ 연금 ▪ 종업원에게 제공하는 기타금액 ▪ 공급자에게 지불하는 금액 ▪ 소비자에게 받는 금액 ▪ 세금 및 기부금
UNCTAD	환경성과지수	▪ 화석에너지 사용량 ▪ 지구온난화 ▪ 오존층고갈 ▪ 고형폐기물 배출량 ▪ 용수 사용량	▪ 매출액 ▪ 부가가치

(나) 콘크리트 에코효율성의 정의 및 평가 프로세스

① 콘크리트 에코효율성의 정의

- 콘크리트의 에코효율성(Eco-efficiency)이란 콘크리트의 친환경성을 평가하는 진보된 개념으로서 콘크리트 생산과정의 환경부하 배출량 및 생산비용 그리고 내구성을 유기적으로 연계한 콘크리트의 지속가능성 지표(Indicator)임.
- 콘크리트의 에코효율성 평가방법은 콘크리트를 생산 시 환경부하 및 생산비용 그리고 콘크리트의 내구수명 평가결과를 기반으로 생태환경에 미치는 환경부하와 생산비용을 최소로 줄이면서 고내구성을 갖는 환경친화형 콘크리트를 생산하기 위한 기법.
- 식 3-1은 콘크리트의 에코효율성(Eco-efficiency Value) 산출방법을 나타냄.

$$CEI = \frac{(EC + MC)}{SL} \quad (\text{식 3-1})$$

- 여기서 C.E.I(Concrete Eco-efficiency Index)는 콘크리트 에코효율성 지수, E.C (Environmental Cost)는 환경비용, M.C(Manufacture Cost)는 생산비용, S.L(Service Life) 은 콘크리트 내구수명을 나타냄.

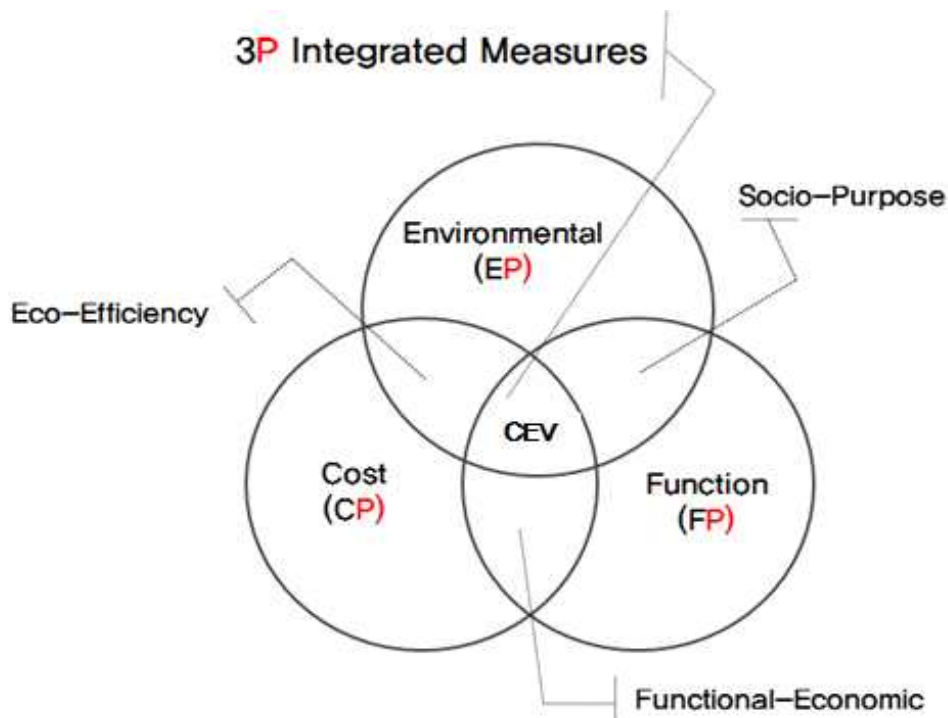


그림 3.64 에코효율성 개념



그림 3.65 콘크리트 에코효율성 평가 프로세스

② 콘크리트 에코효율성 평가 프로세스

- 콘크리트 에코효율성은 그림 3.64와 같이 대상 콘크리트 생산 시(Cradle to Gate) 투입된 배합재료 및 에너지원에 따른 환경성, 경제성, 내구성을 각각 평가함.
- 환경성은 전과정 평가기법(LCA)을 이용하여 생산과정에서 투입된 시멘트 및 골재, 혼화재료, 에너지원 등에 의한 환경부하 배출량을 평가함.
- 이를 위해 그림 3.65와 같이 콘크리트의 전과정을 원재료, 운송, 제조단계로 구분하여 영향평가를 실시함.
- 이때, 영향평가는 환경부하 배출물질이 인간과 생태계에 미치는 정도를 파악할 수 있는 피해 산정형(End-point) 방식을 적용하였으며, 지구온난화와 산성화, 부영양화, 자원소모, 오존층영향, 광화학적산화물 생성 등 6종류의 환경영향을 평가대상으로 선정함.
- 앞서 선정된 6종류의 환경영향 범주에 대해 보호대상인 인간건강 및 사회자산, 동·식물 멸종, 1차 생산에 미치는 정도를 분석하였으며, 이를 각각 비용으로 환산하여 환경성을 나타냄.
- 경제성은 전 과정에 투입된 원재료 및 에너지원(유류/전력) 등의 비용을 합산하여 도출.
- 한국물가정보시스템의 콘크리트 구성재료 및 에너지원별 표준 단가 DB를 이용하였으며, 내구성은 다양한 열화현상 중 탄산화에 대한 예상 내구수명을 평가함.
- 기존 탄산화 예측식 중 일본건축학회에서 제시된 식을 이용하여 콘크리트의 내구수명을 도출.

(다) 콘크리트 에코효율성 평가방법 개발의 필요성 및 목적

① 기존 기술의 문제점

- 최근 국내·외에서 콘크리트의 환경성과 관련된 많은 연구가 진행중에 있지만 경제성 및 내구성을 통합적으로 고려한 연구는 거의 전무한 실정임.
- 현재 대다수의 콘크리트의 환경부하 평가기술은 주로 온실가스 배출량을 대상으로 고려한 기술로서 다양한 환경범주로의 범위 확대가 요구됨.
- 산업계는 콘크리트가 환경적으로 미치는 영향에 대하여 인지 하고 있으나, 비용(경제성)과 내구성 관점을 중요하게 비중을 두고 있는 상황임에 따라 환경성과 경제성, 내구성이 연계되어 종합적으로 평가 가능한 기술이 필요함.

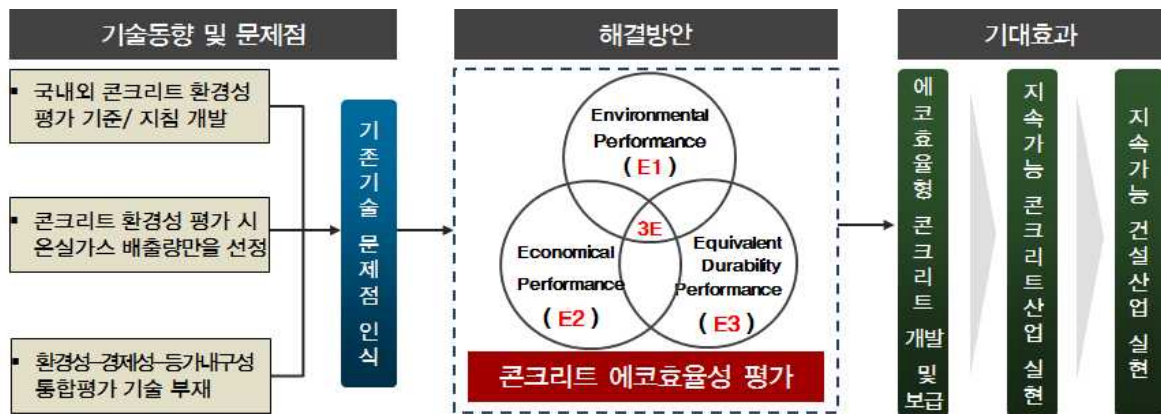


그림 3.66 에코효율성 평가 연구의 흐름도

② 대상 기술의 해결점

- 국내 유일한 콘크리트 대상 환경성, 경제성, 내구성을 통합하여 평가할 수 있는 기술임.
- 콘크리트 생산 시 다양한 환경부하 물질이 배출됨에 따라 본 기술은 온실가스 배출량 뿐 만 아니라 생태계의 산성화, 부영양화, 오존층영향, 자원소모, 광화학적산화물 생성 등을 환경영향범주로 선정하였음.
- 본 기술은 온실가스(환경성)만을 평가 또는 물리적(내구성) 성질만을 평가하는 것을 넘어서 환경성과 경제성, 내구성이 통합된 에코효율성 평가 기술임.

③ 콘크리트 에코효율성 평가방법 개발의 필요성

- 본 연구는 콘크리트의 에코효율성 평가를 위하여 환경부하 배출량(환경성) 및 생산비용(경제성), 내구수명(내구성)을 종합적으로 연계 고려하는 연구로서 기존연구에서 주로 수행된 ‘콘크리트의 전과정 온실가스 배출량 평가 시스템 개발 연구’와는 크게 차별화 됨.
- 2010년 이후 콘크리트를 대상으로 환경부하 평가기술 및 환경부하 저감 배합설계 기술 개발에 관한 연구는 점차 증가하고 있지만, 대부분 온실가스 배출량을 대상으로 하고 있으며 경제성 및 등가내구성까지 함께 연계된 기술개발은 국내 뿐 만 아니라 전 세계적으로 부채상태임.

표 3.26 에코효율성 평가 연구의 차별성

기존연구 동향	본 연구
[환경부하 저감 콘크리트 최적 성능] 콘크리트 온실가스 배출량을 평가/저감 방법을 개발하고, 다른 평가기술 및 시스템 개발에 관한 연구임.	본 연구는 콘크리트 에코효율성 평가 기술 개발 로 콘크리트의 온실가스 배출량 평가 및 저감을 위한 평가 기술 및 시스템을 개발하는 연구와 관련 없음.
[탄소저감형 건설재료 기술] 탄소저감형 결합재를 이용한 고성능 콘크리트, 건설재료의 환경성 평가 방법론 개발에 관한 연구가 이루어지고있음.	본 연구는 콘크리트의 환경성, 경제성, 내구성을 모두 고려한 에코효율성 평가 프로그램 개발 로 단순한 건설재료의 환경성 평가 방법론 구축과는 차별화 됨.
[초고강도 콘크리트의 최적 배합설계 기술 중심] 대부분 초고강도 콘크리트를 제조하기 위한 배합설계 모델에 관련된 연구개발에 제한.	본 연구는 콘크리트의 환경성, 경제성, 내구성을 모두 고려한 에코효율성 평가 프로그램 개발 을 목표로 하며 콘크리트의 강도만을 고려한 기존의 기술 및 연구와 크게 차별화 됨.

기존기술 특징	■ 국내 대표적 건설재료 환경부하 배출량 평가 프로그램은 TOTAL(Tool for Type3 labelling And LCA), PASS(Product Assessment for Sustainable Solutions), COOL 등이 있음. ■ 국외 대표적 건설재료 환경부하 배출량 평가 프로그램으로는 ATHENA Impact Estimator, Gabi built-it, BEES, Eco indicator 99, EPS 등이 있으며 공통적으로 모든 산업제품에 대한 환경부하 배출량 평가를 지원함. ■ 위 프로그램들은 전 산업제품을 대상으로 환경부하 평가가 가능하도록 개발됨에 따라 콘크리트를 평가 시 사용방법이 어려울 뿐 만 아니라 DB 부족 등의 문제점이 나타남. ■ 이로인해 평가결과는 일관성을 갖지 못할 뿐만 아니라 일회적인 평가로 제한될 수 있어 결과를 객관적으로 비교분석하는데 한계가 있는 것으로 분석됨.	
	TOTAL PASS	■ 개 발 국 : 한국 ■ 기 관 : 환경부/지식경제부 ■ 주요특징 : 한국의 LCI 데이터베이스를 이용하여 환경부하 물질이 6개 환경영향 범주에 미치는 영향을 평가하여 환경 성적표지 인증 시 적용 ■ 한 계 점 : 건축자재 대상의 환경부하 배출량만을 대상으로 인간과 생태계에 미치는 영향을 평가하며 내구성 및 제조비용에 대한 부분은 반영안함
	EPS	■ 개 발 국 : 스웨덴 ■ 기 관 : Earth Shift ■ 주요특징 : 유럽 LCI 데이터베이스를 이용하여 건축자재 대상의 환경부하 배출량이 인간과 생태계에 미치는 영향을 단일지수로 산출 ■ 한 계 점 : 건축자재 대상의 환경부하 배출량만을 대상으로 인간과 생태계에 미치는 영향을 평가하며 내구성 및 제조비용에 대한 부분은 반영안함
	LIME	■ 개 발 국 : 일본 ■ 기 관 : 산업환경보건관리협회 ■ 주요특징 : 산업연관분석방식 DB를 이용한 건축자재 대상의 환경부하 배출량이 인간과 생태계에 미치는 영향을 비용 및 단일지수로 산출 ■ 한 계 점 : 건축자재 대상의 환경부하 배출량만을 대상으로 인간과 생태계에 미치는 영향을 평가하며 내구성 및 제조비용에 대한 부분은 반영안함

④ 콘크리트 에코효율성 평가방법 개발의 목적

- 콘크리트 생산과정의 환경부하 배출량 및 생산비용 그리고 내구성을 유기적으로 연계한 콘크리트의 에코효율성 평가방법 개발.
- 에코효율성은 콘크리트의 친환경성을 평가하는 진보된 개념으로서 콘크리트를 생산 시 환경부하 및 생산비용 그리고 콘크리트의 내구수명 평가결과를 기반으로 생태환경에 미치는 환경부하와 생산비용을 최소로 줄이면서 고내구성을 갖는 환경친화형 콘크리트를 생산하기 위한 방법임.
- 효율성이라는 관점에서 결과치가 클수록 효율성이 높은 것이라고 할 수 있으나, 에코효율성 지수는 내구수명대비 비용(원/년)으로 나타내어 비용의 관점에서 그 숫자가 작을수록 효율성이 높은 것으로 판단
- 콘크리트의 지속가능성을 효율적으로 평가하고 이를 제고하기 위한 방안을 모색할 수 있으며, 나아가 진정한 친환경 콘크리트 및 건설 산업의 실현에 기여하는 것이 본 연구의 비전임.

▶ 콘크리트 산업에서 요구하는 성능을 만족 시킬 수 있도록 환경부하(Environmental) 및 경제성(Economic), 등가내구성(Equivalent durability)을 통합적으로 고려한 『콘크리트의 에코효율성 평가 프로그램 개발』을 최종목표로 함.

◎ 세부목표 1: 콘크리트 에코효율성 평가방법 개발

◎ 세부목표 2: 콘크리트 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 기술 제안

◎ 세부목표 3: 콘크리트 에코효율성 평가 프로그램(ECO-VA) 개발

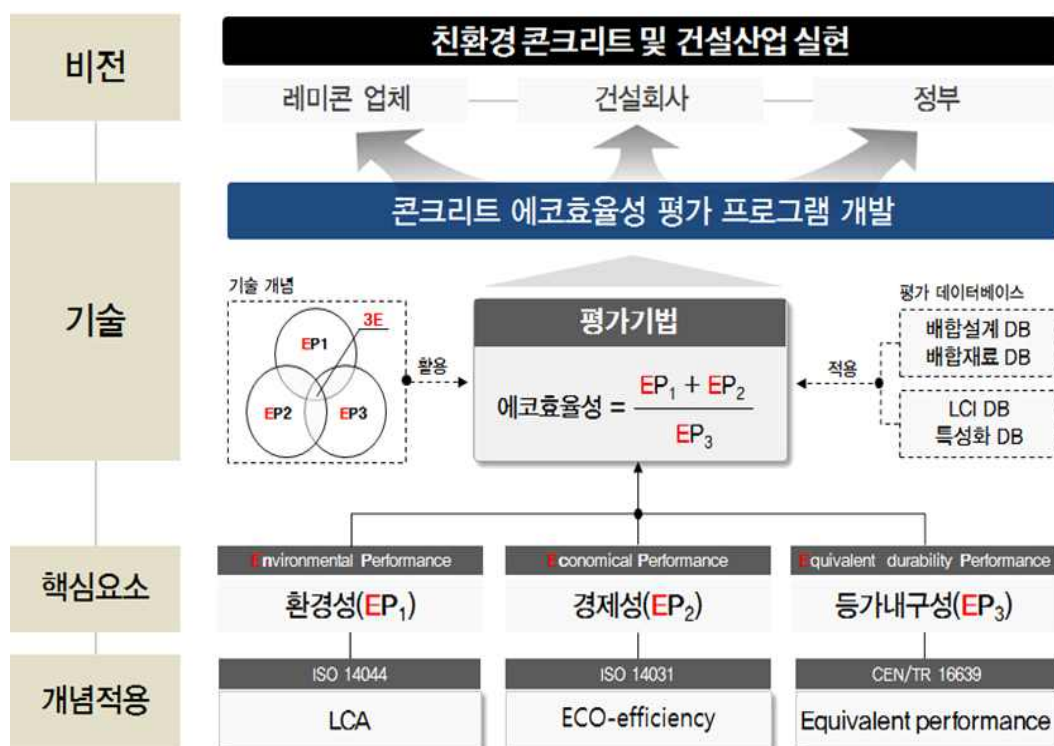


그림 3.67 연구의 목적

(라) 콘크리트 에코효율성 평가방법

① 환경성(Environmental performance)

- 콘크리트 에코효율성 평가를 위한 환경성은 전과정 평가(LCA)기법을 이용.
- 전과정 평가(LCA)는 목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 전과정 결과해석의 4단계로 구성.
- 가운데 LCIA는 LCI 결과를 이용하여 환경영향을 정량적으로 산정함으로써 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 과정으로 평가결과 해석을 위해 가장 중요시되어야 하는 단계임.

② 목적 및 범위정의

- 본 전과정 평가 대상 제품은 일반적인 형태의 콘크리트로 선정하고, 콘크리트의 기능 중 콘크리트 구조물 및 콘크리트 제품의 형성을 주요기능으로 함.
- 표 3.27과 같이 주요기능을 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 편리한 콘크리트 1m³를 기능단위로 함.
- 콘크리트의 전과정 평가를 위한 시스템경계는 그림 3.68와 같이 Product stage of concrete (Cradle to Gate)로 선정.

표 3.27 콘크리트 기능단위

항 목 명	내 용
제 품 명	콘크리트
기 능	콘크리트 구조물 및 콘크리트 제품 형성
기능단위	콘크리트 1m ³

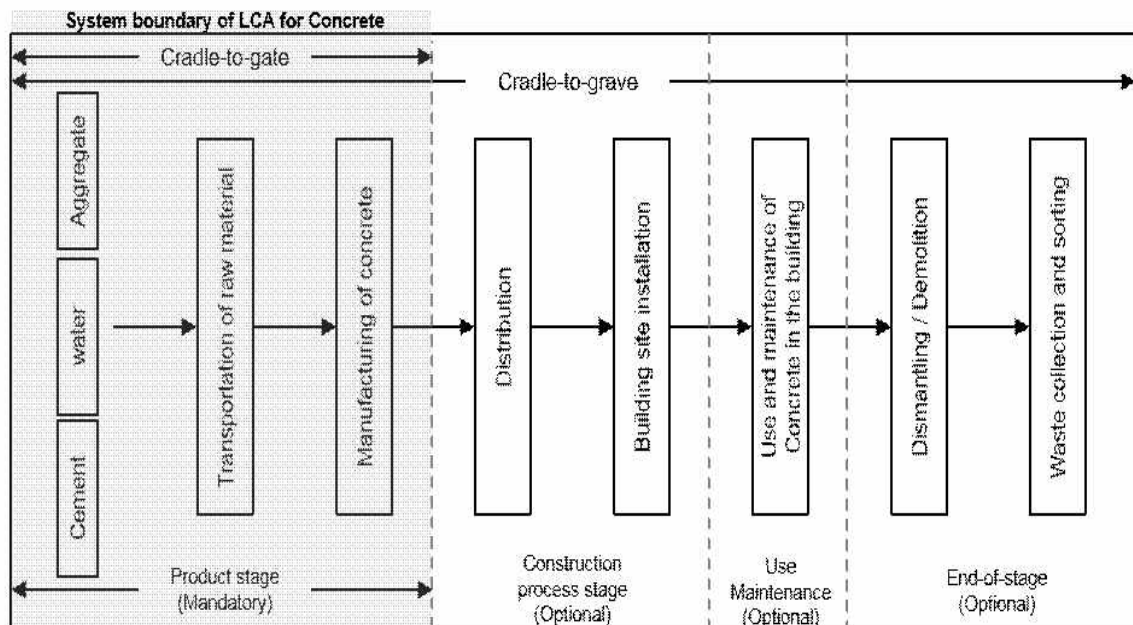


그림 3.68 콘크리트 전과정 환경영향 평가 시스템 경계

㉠ 목적 및 범위정의

- 전과정 목록분석 과정은 시스템 경계(System boundary)를 대상으로 에너지, 원료, 제품, 부산물 등의 투입(input)요소와 환경영향 배출물 종류와 양의 배출(output)요소를 기록하여 목록화하는 과정임.
- 각 공정별 환경영향 물질이 최종제품에 기여하는 정도를 곱한 후 합산한 것이 목록분석 결과임.
- 이 결과는 기능단위 기준으로 제품의 전과정 동안 소모된 자원 사용량과 환경영향 배출량 등을 지표별로 나타냄.
- 콘크리트의 전과정 평가범위를 대상으로 에너지, 원료, 제품, 폐기물 등의 투입(input)요소 및 배출(output)요소를 분석함.
- 이를 위해 표 3.28과 같이 콘크리트 생산 시 투입되는 물질과 에너지원들에 대한 각각의 LCI DB(Life Cycle Index DataBase)를 조사함.
- 본 평가에서 사용된 투입물질 및 에너지원 등에 대한 LCI DB는 한국 국토교통부 및 환경부의 기 구축된 데이터를 이용함.
- 국내의 LCI DB 중 고로슬래그미분말과 플라이애쉬에, 인공경량골재, 슬래그골재, 콘크리트 제조설비에 대한 LCI DB는 구축되어 있지 않기 때문에 본 연구 시 개발하였으며, 혼화제 LCI DB는 국외 ecoinvent의 DB를 활용함.

표 3.28 콘크리트 전과정 환경영향 평가 시 적용 LCI DB

구분	항목	LCI DB	개발국
원료물질	보통시멘트	환경부	한국
	혼합수	환경부	한국
	고로슬래그미분말	본 연구	한국
	플라이애쉬	본 연구	한국
	실리카흙	ecoinvent	스위스
	굵은골재	국토교통부	한국
	순환굵은골재	국토교통부	한국
	잔골재	국토교통부	한국
	순환잔골재	국토교통부	한국
	인공경량골재	본 연구	한국
	슬래그골재	본 연구	한국
	혼화제	ecoinvent	스위스
에너지	전력	환경부	한국
	경유	환경부	한국
	등유	환경부	한국
	공업용수	환경부	한국
수송	트럭	환경부	한국
	철도	환경부	한국
제조	레미콘 제조	본 연구	한국
폐기	슬러지	환경부	한국

㉔ 전과정 영향평가(LCIA, Life Cycle Impact assessment)

- 전과정 영향평가는 목록분석 단계에서 작성된 지표(input/output)들이 환경에 미치는 잠재적인 영향을 평가하는 과정임.
- 전과정 영향평가는 전과정 목록분석(LCI)에서 도출된 목록항목들을 해당 영향범주로 취합하는 분류화(Classification), 영향범주내로 분류된 항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 특성화(Characterization), 영향범주에 미치는 환경영향을 일정지역 또는 기간의 총 환경영향으로 나누는 정규화(Normalization), 영향범주간 상대적인 우위를 결정하는 가중화(Weighting) 단계로 구분됨.
- 이때, ISO 14044에 의하면 분류화 및 특성화는 필수적으로 평가되어야 하는 단계이며, 정규화 및 가중화는 환경성 평가 목적에 따라 선택적으로 평가되는 단계로 규정하고 있음.
- 현재 국내 실정에 맞는 콘크리트의 정규화 및 가중치 부여 인자가 제안되어 있지 않은 이유로 본 연구서는 특성화 단계까지의 환경성을 평가함.
- 콘크리트는 시멘트, 골재, 혼화재료 등의 혼합물로서 시멘트 생산 시 석회석과 점토의 채취 및 클링커의 제조과정에서 다량의 에너지를 소비하게 되며 골재의 채취로 인한 토양침식이나 생태계 파괴 등이 발생할 가능성이 있음.
- 또한, 시멘트 및 골재 등의 재료가 콘크리트 및 콘크리트 제품의 생산업체로 운송되고 제조설비에 의해 제조되는 과정에서 에너지를 소비함에 따라 대기 및 수계, 토양에 다양한 환경부하 물질을 배출하게 됨.
- 이렇듯 기능단위의 콘크리트가 생산되고 사용된 후 폐기되는 생애 주기 관점에서 다양한 환경영향을 발생시키기 때문에 다양한 환경영향 범주를 대상으로 한 평가가 필요하며, 따라서 지구온난화 등의 단일 환경영향에 대한 평가만을 실시할 경우 콘크리트의 환경성에 대한 종합적인 평가에는 한계가 있음.
- 따라서 본 연구에서는 지구온난화 및 자원소모, 산성화, 부영양화, 오존층 영향, 광화학적산화물 생성 등 6가지 환경영향 범주 별 기준물질 및 영향지수에 근거한 콘크리트의 전과정 영향평가(LCIA)를 실시함.
- 환경영향 범주 별 기준물질 및 영향지수는 한국환경산업기술원의 환경성적표지제도에서 채택하고 있는 데이터베이스에 근거하였으며 전과정 목록분석(LCI) 데이터를 이용한 분류화 및 특성화 과정을 기술함.
- 그림 3.69에 피해산정형 모델의 콘크리트 전과정 영향평가(LCIA) 프로세스를 나타내며, 본 연구에서는 분류화, 특성화, 피해평가, 통합화의 3단계로 구성함.

▷ 분류화(Classification)

- 분류화는 환경영향 범주에 따라 영향물질들을 분류 및 취합하는 과정으로 전과정 목록분석(LCI) 데이터에서 도출된 영향물질들을 환경영향 범주에 연결시키고 이를 환경영향 범주 별로 분류하여 각각의 영향물질들이 환경에 미치는 영향의 형태를 파악하는 것임.
- 예를 들어 지구온난화의 영향물질들은 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF_6) 등이며 국내의 국가 LCI 데이터베이스에 근거한 보통시멘트의 분류화 내역은 각각 $9.31\text{E}-01 \text{ kg-CO}_2/\text{kg}$, $8.16\text{E}-04 \text{ kg-CH}_4/\text{kg}$, $6.30\text{E}-07 \text{ kg-N}_2\text{O}/\text{kg}$ 이 됨.
- 표 3.29는 환경영향 범주 별 기준물질 및 콘크리트 전과정 목록분석(LCI) 데이터의 분류화 내역 중 보통시멘트, 굵은골재, 잔골재, 혼합수의 예시를 나타냄.
- 지구온난화 영향지수는 IPCC 가이드라인에 제시된 100년 기준의 영향지수에 근거하여 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O) 등 총 23가지의 오염물질을 영향물질로 규정하고 있으며, 기준물질은 이산화탄소(CO_2)임.
- 자원소모 영향지수는 Guinee가 제시한 기준에 근거하여 원유(Crude oil), 천연가스(Natural gas), 우라늄(U) 등 총 89가지의 자원항목을 고려할 수 있음.
- 산성화 영향지수는 지역적 특성 및 대기환경에 따라 상이하지만 모든 지역에서 적용 가능한 형태로 제시된 Heijung et al, Hauschild & Wenzel의 영향지수를 적용할 수 있으며 이산화황(SO_2), 황화수소(H_2S), 불화수소(HF) 등 총 23가지의 영향물질을 기준물질인 이산화황(SO_2)으로 통합하여 나타냄.
- 부영양화의 영향지수는 산성화 영향지수와 같이 Heijung et al, Hauschild & Wenzel 영향지수를 적용할 수 있으며 인산염(PO_4^{3-}), 암모니아(NH_3), 질소산화물(NO_x) 등 총 11가지의 영향물질에 대해 기준물질인 인산염(PO_4^{3-})으로 표현할 수 있음.

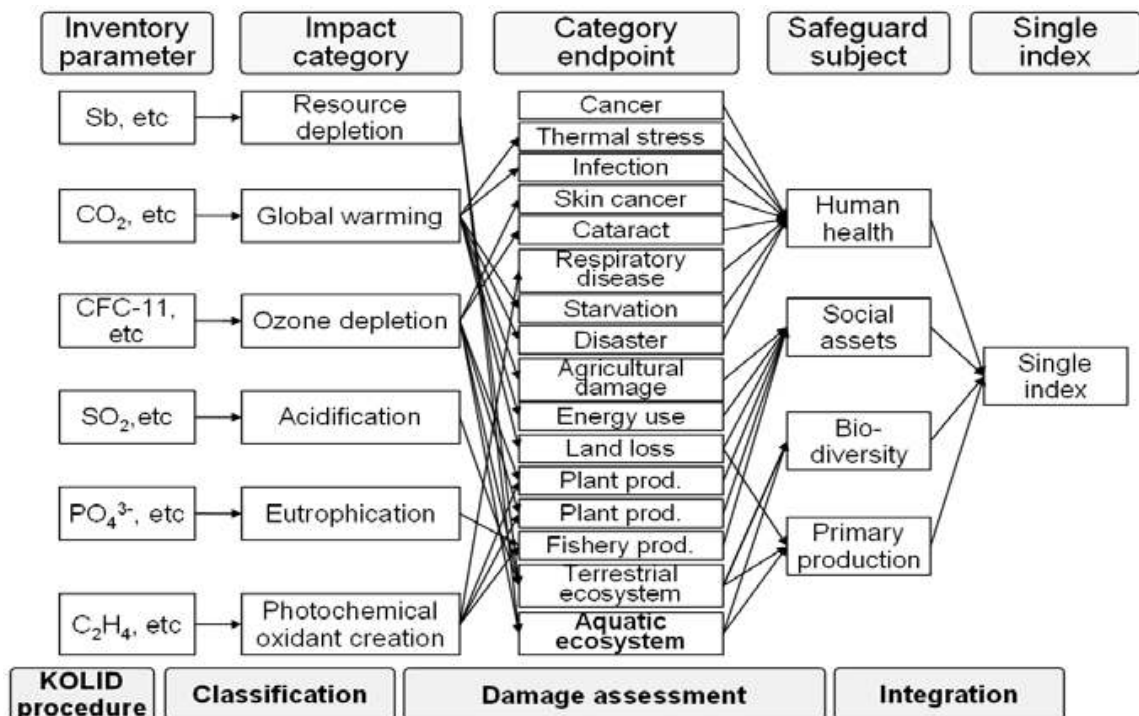


그림 3.69 피해산정형 방식의 환경영향평가 프로세스

- 오존층 영향 영향지수는 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)에서 제시한 영향지수를 통해 트리클로로플루오로메탄(CFC-11), 브롬화삼불화메탄(Halon-1301), 테트라플루오로에탄(CFC-114) 등 총 23가지 영향물질 고려하며 트리클로로플루오로메탄(CFC-11)을 기준물질로 함.
- 광화학적산화물 생성 영향지수는 에틸렌(Ethylene), 비메탄계 휘발성유기화합물(NMVOC), 에탄올(Ethanol) 등 총 128가지의 영향물질에 대해 에틸렌(Ethylene)을 기준물질로 Derwent et al과 Jenkin & hayman가 제시한 영향지수를 적용할 수 있음.

▷ 특성화(Characterization)

- 특성화는 분류화를 통한 영향물질들이 각각의 환경영향 범주에 따라 미치는 환경성을 정량화하는 과정임.
- 분류화에서는 환경영향 범주 별로 상응하는 영향물질들을 파악하고 이를 연결시켰지만, 영향물질 별로 영향지수가 상이함에 따라 영향의 정도를 정량적으로 파악하기에는 한계가 있음.
- 따라서 영향물질의 환경부하량과 환경영향 범주 별 영향지수를 각각 곱하고 이를 모두 합산하는 과정을 통해 콘크리트의 특성화 값을 정량적으로 산출 할 수 있음.
- 이러한 과정을 식 3-2에 나타내었으며 여기서 Cl_i 는 특성화값, $Load_j$ 는 j 영향물질의 환경부하량, $eqvi,j$ 는 i의 환경영향범주에 속한 j 영향물질의 환경영향 가능성(potential) 지수를 나타내며, 보통시멘트의 지구온난화를 예를 들어 기술하면 이산화탄소(CO_2)가 기준물질이 되고 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O) 등을 포함한 3가지의 영향물질이 존재함.
- 지구온난화지수(GWP)는 각각 $1kg-CO_2/kg-CO_2$, $21kg-CO_2/kg-CH_4$, $310kg-CO_2/kg-N_2O$ 임.
- 이와 같이 지구온난화에 영향을 끼치는 3가지 영향물질의 영향지수와 영향물질별 환경부하량을 각각 곱한 후 이를 모두 합산하면 보통시멘트의 지구온난화 환경영향 특성화 값을 산출 할 수 있으며, 콘크리트 생산 시 투입물질의 환경영향 특성화 값을 나타냄.

표 3.29 콘크리트 구성재료의 분류화 예시

영향목록	환경영향범주 구분						콘크리트 구성재료			
	GWP	ADP	AP	EP	ODP	POCP	보통시멘트	굵은골재	잔골재	혼합수
Ammonia(NH_3)	-	-	□	□	-	-	-	6.95E-07	6.83E-06	2.57E-07
Carbon dioxide(CO_2)	■	-	-	-	-	-	9.31E-01	3.40E-01	3.58E-03	1.12E-01
Carbon monoxide(CO)	-	-	-	-	-	□	3.49E+01	1.68E-04	2.01E-03	5.05E-10
CFC-11	-	-	-	-	■	-	2.05E-09	4.02E-13	7.50E-13	-
CFC-114	-	-	-	-	□	-	2.10E-09	4.12E-13	7.68E-13	-
CFC-12	-	-	-	-	□	-	4.40E-10	8.64E-14	1.61E-13	-
Methane(CH_4)	□	-	-	-	-	□	8.16E-04	8.09E-03	2.72E-03	-
Ethanol	-	-	-	-	-	□	2.73E-06	4.34E-07	1.31E-08	-
Sulfur dioxide(SO_2)	-	-	■	-	-	-	1.27E-02	4.42E-04	6.63E-04	-
Halon-1301	-	-	-	-	□	-	3.82E-06	8.68E-10	1.42E-09	2.61E-13
HCFC-22	□	-	-	-	□	-	4.81E-10	9.45E-14	-	-
Hydrogen Chloride(HCl)	-	-	□	-	-	-	1.49E-04	2.18E-07	5.67E-07	1.09E-09
Hydrogen fluoride(HF)	-	-	□	-	-	-	1.01E-05	6.18E-09	6.51E-08	1.06E-06
Hydrogen sulfide(H_2S)	-	-	□	-	-	-	-	5.64E-08	1.19E-06	-

■ : 기준물질, □ : 영향물질, - : 비(非)영향물질

$$CI_i = \sum CI_{i,j} = \sum (Load_i \times eqv_{i,j}) \quad (\text{식 3-1})$$

- 여기서 CI_i 는 환경영향범주 i 에 포함된 모든 영향물질(j)들이 소속된 환경영향범주에 미치는 영향의 크기이며, $CI_{i,j}$ 는 영향물질 j 가 환경영향범주 i 에 미치는 영향의 크기이며, $Load_j$ 는 j 영향물질의 환경부하량, $eqv_{i,j}$ 는 환경영향범주 i 에 속한 j 영향물질의 환경영향 지수임.

표 3.30 콘크리트 구성재료 및 에너지원의 환경영향 범주별 원단위 구축

LCI DB 목록		기능단위	환경영향 범주					
			GWP	AP	EP	ODP	POCP	ADP
보통시멘트		kg	9.48E-01	4.88E-02	7.31E-03	5.70E-06	2.43E-02	1.92E-01
혼합수		kg	1.14E-01	1.94E-04	6.57E-05	3.14E-12	4.86E-07	5.65E-04
고로슬래그미분말		kg	3.10E-02	1.11E-03	1.00E-03	0.00E+00	2.70E-04	5.56E-05
플라이애쉬		kg	1.50E-02	1.16E-04	6.94E-05	0.00E+00	6.57E-05	2.06E-08
실리카흙		kg	2.30E-02	1.31E-04	2.12E-05	6.31E-09	8.27E-05	3.35E-04
굵은골재		kg	5.43E-03	5.98E-04	2.67E-04	3.06E-07	9.41E-04	1.82E-02
순환굵은골재		kg	1.73E-02	2.93E-05	5.44E-06	4.68E-11	1.25E-07	1.60E-05
잔골재		kg	5.43E-03	5.98E-04	2.67E-04	3.06E-07	9.41E-04	1.82E-02
순환잔골재		kg	3.84E-01	6.49E-04	1.21E-04	1.14E-10	2.74E-06	3.41E-04
인공경량골재		kg	5.16E-02	1.73E-04	2.80E-05	4.05E-09	9.28E-05	1.94E-03
슬래그골재		kg	2.26E-02	1.61E-04	1.61E-04	6.49E-09	2.43E-05	9.08E-05
혼화제		kg	1.29E-02	2.48E-05	3.19E-04	0.00E+00	2.09E-04	2.51E-06
전력		kwh	4.88E-01	8.37E-04	1.56E-04	1.37E-11	1.41E-06	8.58E-04
경유	생산	L	3.20E-01	2.96E-03	3.39E-04	1.30E-06	7.50E-03	2.34E-02
	연소	L	2.87E+00	7.90E-03	1.40E-03	·	3.74E-03	·
등유	생산	L	3.89E+05	1.05E+03	1.04E+02	1.40E-01	4.17E+02	4.37E+03
	연소	L	2.19E+00	4.34E-03	7.63E-04	·	7.14E-03	·
레미콘 제조		m³	5.16E-02	1.73E-04	2.80E-05	4.01E-09	9.28E-05	1.94E-03
슬러지		kg	6.05E-06	4.87E-08	9.37E-09	1.34E-12	5.82E-09	5.28E-08

[환경영향범주 단위] GWP : kg-CO_{2eq}/기능단위, AP : kg-SO_{2eq}/기능단위, EP : kg-PO₄³⁻_{eq}/기능단위,
ODP : kg-CFC-11_{eq}/기능단위, POCP : kg-Ethylene_{eq}/기능단위, ADP : kg-Sb_{eq}/단위

▷ 피해평가

- 콘크리트 생산과정 시 배출된 환경영향이 인간 및 생태계의 미치는 피해에 대하여 경제적인 가치비용으로 환산한 것을 환경비용이라 함. 환경비용은 환경영향 범주에 속한 영향물질에 대하여 보호대상별 피해계수 및 피해지표별 경제 가치액을 곱하여 최종적으로 비용으로 산출할 수 있음.

$$D_k = \sum_i \sum_j (Load_{i,j} \times DF_{k,i,j} \times K_c) \quad (\text{식 3-2})$$

- Load_j는 i 라는 영향범주에 속한 j 영향물질의 환경부하량, DF_{k,i,j}는 i 라는 영향범주에 속한 영향물질 j가 보호대상 k에 미치는 피해계수, K_c는 보호대상 k에 해당되는 경제가치액(원)임.

– 피해평가

환경윤리 사상의 시각에서는 환경을 크게 인간과 생태계로 구분하고 있음. 인간의 구성요소는 인체건강과 더불어 농작물과 자원 등 인간사회를 지탱하는 사회자산으로 세분화함. 동식물 등의 생태계에 대해서도 인간과 동등한 권한을 부여해야 한다는 주장에 따라 생태계 역시 구성요소를 생물다양성과 더불어 생물 다양성 유지하는데 필수조건인 일차생산으로 세분화할 수 있음. 이에 따라 본 연구에서는 인체건강, 생물다양성, 사회자산, 일차생산의 4가지를 보호대상(safeguard subject)으로 선정하였음. KOLID는 유럽의 환경 상황을 반영한 Eco-indicator 99 대신에 철학적 논의 및 보호대상 선정 근거 및 이유에 대해 명확하게 기술하고 있는 일본의 LIME을 벤치마킹 함. 실제로 LIME의 보호대상을 결정 시 일본 뿐 만 아니라 전 세계적으로 공통적으로 적용될 수 있도록 환경윤리라는 철학적 바탕에 근거하여 결정되었기 때문에 국내에서도 적용이 가능하였음. 따라서 콘크리트의 환경비용을 산출하기 위하여 기 개발된 KORID의 보호대상을 적용하는 것은 적합하다고 사료됨.

– 피해지표

인체건강의 경우 특정 질병 또는 물리적 요인에 의한 인체건강 손상 정도를 정량화한 값으로 인체건강 손상 정도를 생존년수 손실 개념으로 나타낸 값인 장애보정 생존년수(DALY, Disability Adjusted Life Year)를 사용하였음. DALY는 질병 또는 사고 때문에 일찍 죽는 경우뿐만 아니라 장애가 발생하여 건강하게 살지 못하는 경우를 모두 합해 평가할 수 있음. 예를 들어 1 DALY는 질병, 사고 등의 이유로 죽게 되거나 건강하게 생활하지 못하는 년수가 1년이라는 의미임. DALY는 식 3-3과 같이 질병 또는 사고 때문에 기대수명보다 일찍 죽는 햇수인 ‘기대수명 손실(YLL, Years of Life Lost)’ 과 장애를 안고 살아가는 햇수인 ‘장애기인 손실년수(YLD, Years Lost due to Disability)’ 의 합으로 나타낼 수 있음. 여기서 YLD는 장애 중요도(D), 사망 시 나이의 사회적 가치를 반영하여 도출 할 수 있음. 하지만 본래 DALY에서 고려하고 있는 연령 중요도와 시간 할인을 고려하지 않고 장애 중요도만을 고려하였으며, 사망과 장애를 통합한 손실수명을 나타내는 지표로 사용하였음.

$$DALY = YLL + YLD \quad (\text{식 3-3})$$

여기서, DALY는 장애보정 생존년수, YLL는 기대수명 손실, YLD는 장애기인 손실년수임. 사회 자산은 생물계에 해당하는 ‘생태계 생산능력’ 과 비생물계 요소와 관련된 ‘비생물계 자원’ 으로 구분할 수 있음. 본 연구에서는 생태계 생산능력에 해당되는 삼림자원, 수산자원, 농작물과 비생물계 요소에 해당되는 화석연료, 광물자원 등이 평가범위에 포함됨. 결정된 각 항목별 피해량을 측정하는 지표로는 실제 시장 거래가격을 이용하는 화폐가치 평가방법을 적용함.

생물다양성(biodiversity)을 평가 시 미국의 멸종위기종 보호법(Endangered Species Act), 야생동식물종의 국제거래를 제한한 워싱턴 조약(CITES, Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Flora and Fauna), 국제자연보호연합(IUCN, International Union for Conservation of Nature)이 발행하는 레드데이터북(RDB, Red Data Book) 등에서와 같이, 생물종을 구분하고 구분된 생물종별 수준에서 평가하는 것이 일반적임. 기존 피해산정형 영향평가 방법들도 이러한 현실을 반영하듯이 실제 정량화할 수 있는 생물종에 착안한 평가를 수행하고 있음. 이 연구에서는 보전 생태학에 기초하여 과학적이며, 지표의 의미 해석이 용이할 뿐 아니라 레드데이터북의 데이터와 일치시킬 수 있는 멸종종수의 기대치인 ‘멸종종수 증가분 기대치(EINES, Expected Increase in Number of Extinct Species)’ 를 피해지표로 채택하였다. 환경부하로 인해 발생하는 생물종의 멸종 위험 증가분으로부터 얻을수 있는 EINES는 식 3-4와 같이 나타낼 수 있음.

$$EINES = \sum_s \Delta R_s = \sum_s \left(\frac{1}{T_{a,s}} - \frac{1}{T_{b,s}} \right) \quad (\text{식 3-4})$$

ΔR_s : 환경부하에 의한 생물종 s의 멸종 위험 증가분

$T_{a,s}$: 환경부하 발생 후 멸종시간

$T_{b,s}$: 환경부하 발생 전 멸종시간

일차생산에 미치는 영향을 평가하기 위한 피해지표로서는 총일차생산력(GPP, Gross Primary Production), 순일차생산력(NPP, Net Primary Production), 현재량(plant biomass)을 들 수 있다. 소비자에게 식물의 공급이라는 관점에서 GPP, NPP, 현재량이라는 3가지 지표를 대비하면 일정량 이상의 식물이 확보되어야 한다는 의미에서는 현재량이 최적인 것처럼 보인다. 그러나 일정량의 식물 축적량을 지속적으로 공급한다는 관점에서 보면 특정한 시점에서 축적량이 많은 것만으로는 요건을 만족하지 않으며, 항상 일정이상의 속도로 성장하는 것이 요구된다. 이에 따라 일차생산에 대한 피해계수는 환경부하 단위량당 NPP의 변화량으로 나타낼 수 있다.

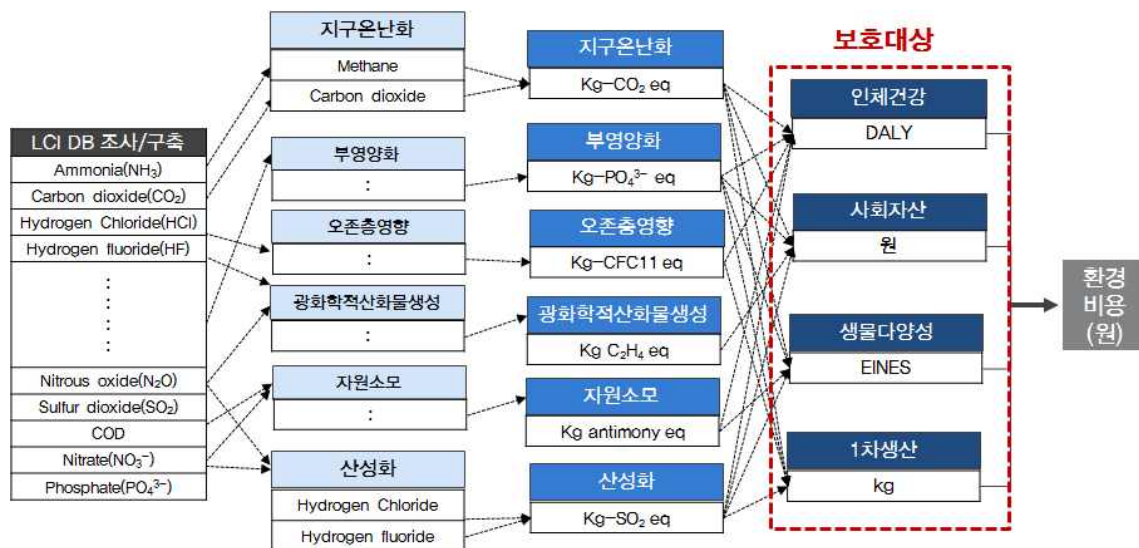
－ 보호대상별 통합화

환경속성 1단위당 한계지불의사액을 토대로 본 연구에서 고려한 4가지 보호대상 단위별로 단위 환산함. 경제가치액이 각 보호대상별 통합화 DB가 됨. 참고로, 단위 환산시 사회자산(=국민경제)의 손실액과 경제적 손실은 동일하다는 가정을 사용하였음.

－ 보호대상별 중요도 결정

컨조인트 분석방법을 이용한 보호대상별 경제적 가치액을 추정하기 위한 설문 수행과 더불어 AHP를 사용하여 결정된 각 보호대상별 중요도를 적용하였음. 이는 컨조인트 분석방법에 의한 환경영향의 화폐 가치화 결과와 AHP를 이용한 환경영향의 단일 수치화 결과의 상호 비교를 통해서 방법론의 타당성을 검증하기 위함임.

설문은 컨조인트 분석을 위한 설문과 동시에 진행하였으며, 환경문제 상위의 영향중 인간에 미치는 영향이 56.9%로 생태계에 미치는 영향 43.1% 보다 높게 나타났음. 하위 항목중에서는 인체 건강에 미치는 영향이 38.66%로 가장 높게 나타났으며 그 다음으로 생물다양성 23.21%, 식물 성장에 미치는 영향 19.89%, 국민경제에 미치는 영향이 18.24%로 나타남. 이를 볼 때 국민들은 환경문제가 인간건강에 미치는 요소를 가장 중요하게 생각하는 것으로 판단할 수 있으며 그 다음으로 생물다양성이 중요한 고려대상인 것으로 나타남.



② 경제성 (Manufacture performance)

- 콘크리트 생산 시 투입된 원재료와 에너지원 등의 제조비용을 산출하기 위하여 한국의 표준 물가정보 DB를 조사하여 적용함.
- 콘크리트 1m³ 생산 시 투입되는 물량에 조사된 보통시멘트와 슬래그시멘트, 천연골재, 순환골재, 슬래그골재, 인공경량골재, 혼화제(고로슬래그미분말, 플라이애쉬), 혼화제(감수제) 등의 원재료 단가(원)와 운송수단 및 제조설비에서 사용되는 경유, 등유, 전력, LNG 등의 에너지원의 단가(원)를 곱하여 제조비용(MC)을 산출.

$$Cost_{Pf} = \sum (Input_{i,j} \times UC_j) \quad (\text{식 3-5})$$

- 여기서 Input_{i,j}는 (i)라는 단계에 투입되는 (j)라는 재료 또는 에너지원, UC_j는 (j)라는 재료의 구매단가(원)임.

표 3.37 콘크리트 배합재료 및 에너지원의 구매단가

투입물질	구매단가	단위	근거
보통시멘트	3,410원	40kg	국가물가정보
슬래그시멘트	2,650원	40kg	생산업체 문의
굵은골재	15,000원	m ³	국가물가정보
순환굵은골재	6,000원	m ³	생산업체 문의
잔골재	13,000원	m ³	국가물가정보
순환잔골재	6,000원	m ³	생산업체 문의
인공경량골재	54,500원	m ³	생산업체 문의
슬래그골재	46,000원	m ³	생산업체 문의
고로슬래그미분말	50,000원	ton	생산업체 문의
플라이애쉬	520원	m ³	생산업체 문의
혼합수	175원	ton	국가물가정보
혼화제(감수제)	1,300원	kg	생산업체 문의
전력	110원	kwh	국가물가정보
LNG	2,200원	m ³	국가물가정보
경유	1,700원	L	국가물가정보
등유	1,400원	L	국가물가정보

③ 내구성(Durability performance)

㉓ 탄산화 내구수명 산정방법

- 콘크리트 내의 탄산화 진행은 대기중 탄산가스와 콘크리트 내 수산화칼슘의 반응에 의해 콘크리트 표면에서부터 탄산화가 진행되며, 이를 경과시간의 함수로 표현한 것이 탄산화 예측식임.
- 탄산화 예측 식은 정상상태에서 탄산가스가 콘크리트 내부 확산에 따라 생긴다는 가정 하에 탄산화 깊이 C는 경과시간 t의 제곱근에 비례하는 식 3-6으로 나타낼 수 있으며, 탄산화 속도계수 A에 따라 탄산화 속도를 예측할 수 있음.
- 속도계수 A는 콘크리트의 물시멘트비, 혼화제 사용유무, 시멘트의 종류, 양생정도, 대기중의 이산화탄소 농도, 온도, 습도 등 여러가지 변수에 의해 결정됨.

$$C = A\sqrt{t} \quad (\text{식 3-6})$$

여기서, C는 탄산화 깊이(mm), A는 탄산화 속도계수, T는 내구수명(년)임.

㉔ 탄산화 내구수명 산정방법

- 물 시멘트비 60% 조건에서 피복두께 30, 40mm의 경우의 탄산화 깊이가 최외측 철근까지 도달했을 경우를 내구수명으로 가정하여 나타냄.
- 내구수명 산정 조건은 연구자마다 고려하는 사항이 다르나, 동일조건으로 계산하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 대해 실외조건으로 한정하여 계산함.
- 예측식별 최대편차는 피복두께 30mm에서 96.8년, 40mm에서 172년으로 피복두께 40mm에서 더 많은 차이를 보이는데 이는 예측식에서 시간의 제곱근에 따라 탄산화 깊이가 진행되므로 사용년수가 늘어날수록 탄산화 깊이는 작아지기 때문에 최외측 철근에 도달할수록 탄산화 깊이가 늦게 침투하기 때문임.
- 콘크리트 표준시방서에는 시방서에서 제안된 식 외에 국내외 검증된 예측식을 사용하여 구조물의 탄산화 속도계수를 예측식에 사용하도록 표기되어 있음.
- 하지만, 많은 편차를 내재한 기존의 탄산화 예측식은 실제 구조물의 탄산화 깊이 판정 및 탄산화의 피해에 따른 내구성 설계 시 혼란을 야기할 수 있음.

표 3.38 탄산화 예측식별 내구수명 산정(W/C 60%)

예측식	피복두께	
	30mm	40mm
고경택	24년	43년
Kishitani	45년	80년
Hamada	65년	115년
Shirayama	93년	165년
KCI, JSCE	104년	186년
Yoda	121년	215년
평균	75년	134년
최대편차	96년	172년

㉔ 콘크리트 내구수명 예측식 산정

- 콘크리트의 내구성을 평가하기 위하여 탄산화 예측식 중 일본 건축학회에서 제시한 식 3-7과 식 3-8을 이용하여 콘크리트의 내구수명을 도출하였음
- AIJ에서는 기존의 제안되었던 Kishitani의 식에 다른 영향인자를 고려하여 각각 인자에 대한 상수를 대입하는 식 3-8을 도출하였는데, 탄산화 속도인자의 대부분의 영향을 고려하고 있으므로, 변형된 식을 내구수명 예측식으로 사용함.

$$Durability_{Pf} T = \left(\frac{C}{A}\right)^2 \quad (\text{식 3-7})$$

$$A = K \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \quad (\text{식 3-8})$$

- T는 내구수명(년), C는 탄산화 깊이(mm), A는 탄산화 속도계수, k는 Kishitani계수(1.72), α_1 은 콘크리트 종류에 의한 계수, α_2 는 시멘트 종류에 의한 계수, α_3 는 물시멘트비(W/C)에 의한 계수, β_1 은 기온에 의한 계수, β_2 는 습도에 의한 계수, β_3 은 CO₂ 농도에 의한 계수임.

표 3.39 콘크리트 종류에 의한 계수(α_1)

콘크리트의 종류	α_1
보통콘크리트	1.0
경량콘크리트 1종	1.2
경량콘크리트 2종	1.4

표 3.40 시멘트 종류에 의한 계수(α_2)

시멘트의 종류	α_2
보통시멘트	1.0
조강시멘트	0.85
고로시멘트	1.25

$$\alpha_3 = w/c - 0.38 \quad (\text{식 3-9})$$

물시멘트비(W/C)에 의한 계수(α_3)표 3.41 기온, 습도, CO₂ 농도에 의한 계수(β_1 , β_2 , β_3)

구분	기온에 의한 계수 (β_1)	습도에 의한 계수 (β_2)	CO ₂ 농도에 의한 계수 (β_3)
서울	1	1	
인천	0.91	0.82	
부산	0.83	0.79	

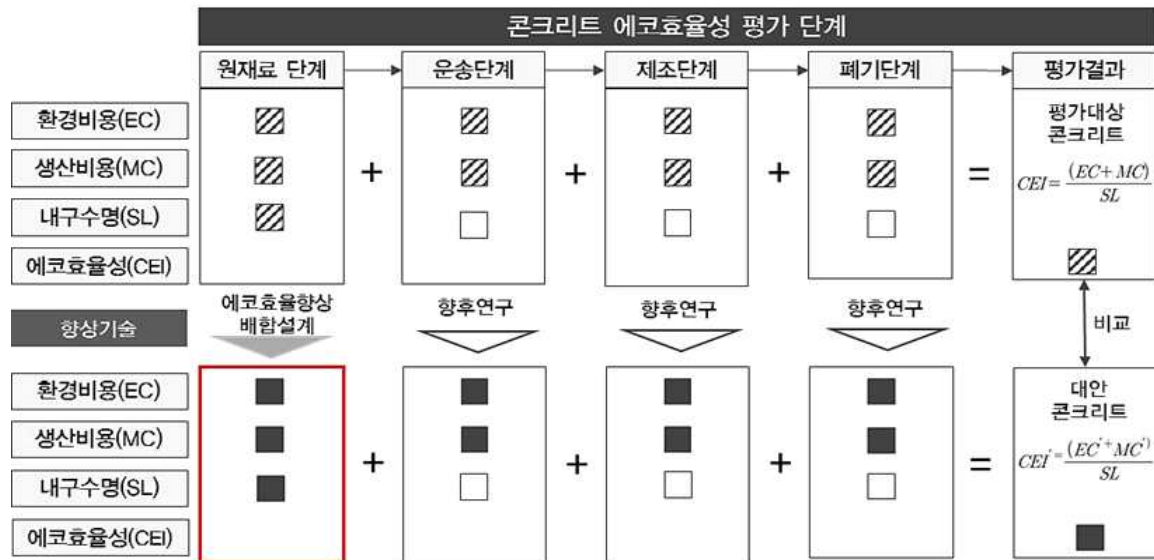


그림 3.70 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 기술 개요

(2) 콘크리트 에코효율성 향상 배합설계 기술 제언

(가) 개요

- 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 기술은 평가단계 중 원재료 단계에서 적용되는 기술임.
- 평가대상 콘크리트의 원재료 단계에서 산출된 비용과 내구수명에 대하여 내구수명을 동등이상으로 만족하며 목표로 하는 비용으로 절감된 배합설계를 도출하기 위함.
- 도출된 에코효율성 향상 배합설계가 적용된 대안 콘크리트의 에코효율성을 기존의 평가대상 콘크리트 에코효율성과 비교할 수 있음.
- 본 기술의 주요특징은 평가대상 콘크리트(Object concrete)의 에코효율성 결과에 대하여 목표(Target concrete)로 하는 향상율(%)을 입력하면 목표 비용 및 내구수명이 산출됨.
- 평가대상 콘크리트와 동일이상으로 내구성을 만족하면서 비용이 저감된 에코효율성 향상 콘크리트(Alternative concrete) 배합설계를 도출 할 수 있음.
- 본 에코효율성 향상 배합설계 알고리즘 개발을 위하여 콘크리트 배합설계를 조사함.
- 또한, 조사된 배합설계를 이용하여 에코효율성 및 비용, 내구수명을 평가함.
- 평가결과를 대표적인 통계분석 프로그램(SPSS: Predictive analytics software)에 적용하여 물-바인더비(%), 바인더량(kg/m³), 혼화제 혼입율(%), 잔골재율(%), 잔골재량(kg/m³)의 회귀분석 관계식을 도출함.

(나) 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 방법

① 에코효율성 향상 배합설계 도출 프로세스

- 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 도출을 위해서 에코효율성 목표 향상율(%)을 입력.
- 목표(Target) 향상율을 입력함과 동시에 목표 에코효율성과 비용, 내구수명이 산출.
- 목표 비용과 내구수명 정보는 구축된 물-바인더비(%) 관계식으로 전달되어 목표비용과 내구수명에 해당되는 물-바인더비가 도출되며, 이는 결합재량(Binder) 관계식으로 전달.
- 물-바인더비를 이용하여 에코효율성 향상 콘크리트의 결합재량(kg/m³)이 도출되며, 혼화제(고로슬래그미분말) 혼입율에 따라 보통시멘트량(kg/m³)과 혼화재량(kg/m³)을 도출시 적용.

② 에코효율성 향상 배합설계 식 제안

㉠ 물바인더비(W/B) 도출

- 본 관계식은 목표로 하는 에코효율성(CEI)의 비용(원/m³) 및 내구수명(년/m³)을 만족하는 물바인더비의 도출을 목표로 하였음.
- 물바인더비를 종속변수로 하고, 비용과 내구수명을 독립변수로 하여 회귀분석 관계식을 도출.
- C(Cost)는 비용이며, L(Service Life)은 내구수명을 나타냄.

$$W/B = 0.52 + (C \times 0.15^{10E-06}) + (L \times -0.1^{10E-03}) \quad (\text{식 4-1})$$

㉡ 결합재량(B) 도출

- 에코효율성의 비용(원/m³) 및 내구수명(년/m³)을 만족하는 결합재량(B)의 도출을 목표로 함.
- 결합재량을 종속변수로 하고, 물바인더비를 독립변수로 하여 회귀분석 관계식을 도출하였음.

$$Binder = 554.5 + (W/B \times -451.1) \quad (\text{식 4-2})$$

㉢ 혼화재 혼입율(GGBS ratio) 도출

- 에코효율성의 비용(원/m³) 및 내구수명(년/m³)을 만족하는 혼화재혼입량의 도출을 목표로 함.
- 이를 위해 혼화재 혼입율을 종속변수로 하고, 물바인더비와 비용, 내구수명을 독립변수로 하여 회귀분석 관계식을 도출하였음.
- 이를 통해 계산된 혼화재 혼입율(%/m³)은 보통시멘트량(kg/m³) 도출을 위해 적용됨.

$$GGBS_{ratio} = 133 + (W/B \times -80.9) + (C \times -0.25^{10E-03}) + (L \times -0.6^{10E-02}) \quad (\text{식 4-3})$$

㉣ 잔골재율(S/a) 도출

- 에코효율성의 비용(원/m³) 및 내구수명(년/m³)을 만족하는 잔골재율(S/a) 도출을 목표로 함.
- 잔골재율을 종속변수로 하고, 물바인더비와 비용, 내구수명을 독립변수로 하여 회귀분석 관계식을 도출

$$S/a = 0.34 + (W/B \times 0.1) + (C \times 0.33^{10E-06}) + (L \times -0.19^{10E-03}) \quad (\text{식 4-4})$$

㉤ 잔골재량(S) 관계식

- 본 관계식은 목표로 하는 에코효율성(CEI)의 비용(원/m³) 및 내구수명(년/m³)을 만족하는 잔골재량(kg/m³)의 도출을 목표로 함.
- 이를위해 잔골재량을 종속변수로 하고, 잔골재율과 비용, 내구수명을 독립변수로 하여 회귀분석 관계식을 도출함.

$$S = 613.7 + (S/a \times 1762.2) + (C \times -0.2^{10E-02}) + (L \times 0.21) \quad (\text{식 4-5})$$

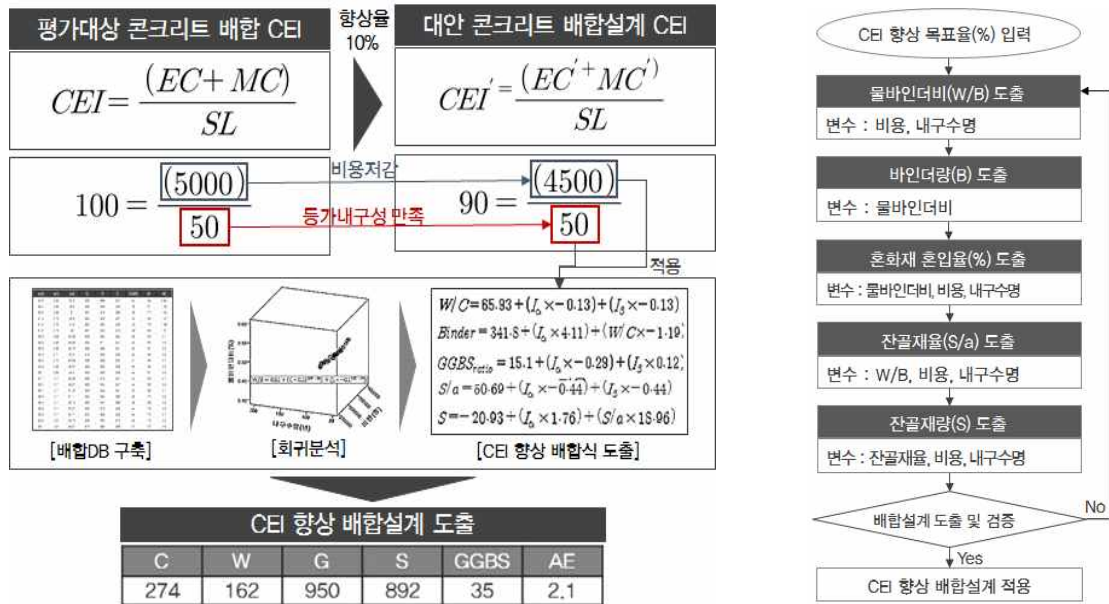


그림 3.71 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 도출 프로세스

(3) 콘크리트 에코효율성 평가 프로그램(ECO-VA) 개발

(가) 개요

- 콘크리트 생산 시 에코효율성을 용이하게 평가할 수 있도록, 앞서 개발된 콘크리트 에코효율성 평가방법 및 에코효율성 향상 배합설계 식 등이 적용된 프로그램(S/W)을 개발.
- 콘크리트 에코효율성 평가 프로그램(이하 ECO-VA)은 Microsoft Excel을 기반으로 개발되었으며, 평가자가 직접 입력한 평가조건에 근거하여 대상 콘크리트의 에코효율성을 평가.
- 평가 프로세스는 프로젝트개요 입력과 정보입력, 평가단계, 평가결과, 평가완료 구성.
- 우선, 프로젝트 개요를 입력 후 정보입력 단계의 기본정보와 콘크리트 정보를 입력.
- 평가대상 콘크리트를 대상으로 원재료 및 운송, 제조, 폐기단계의 정보를 입력함.
- 평가결과 프로세스는 앞서 입력된 평가단계 정보를 통해 전과정 평가 및 에코효율성 평가를 수행하고 평가결과를 도출하는 단계로 진행.

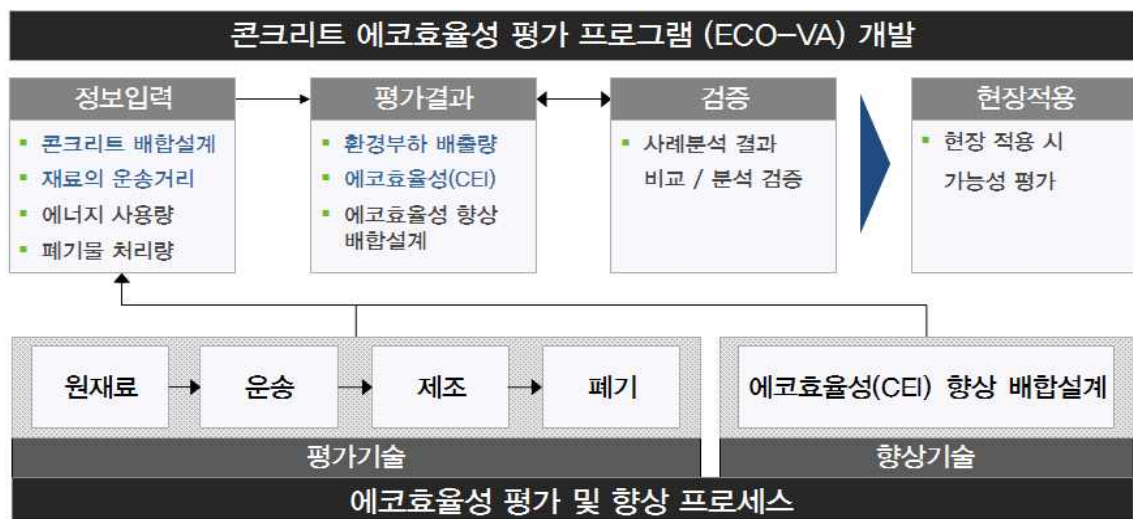


그림 3.73 ECO-VA 평가 프로세스

표 3.44 콘크리트 에코효율성 평가 프로세스 구성

평가 프로세스		세부 평가 항목
프로젝트 개요 입력		프로젝트명 입력
정보입력	기본정보	- 콘크리트 전과정 평가 및 에코효율성 평가 기본정보 - 업체명, 평가자, 평가일시, 연락처
	콘크리트 정보	전과정 평가 : 콘크리트 종류, 콘크리트 규격
		에코효율성 평가 : 열화현상 종류(탄산화, 염해)
평가단계	원재료 단계	- 콘크리트 배합재료 종류 및 배합량 - 제외기준(cut-off criteria) 적용
	운송단계	배합재료별 출발지 및 도착지, 운송수단, 운송거리
	제조단계	- 간이평가 : 표준 에너지사용량(유류, 전력 등) - 상세평가 : 실제 콘크리트 생산량, 에너지 사용량(유류, 전력 등)
	폐기단계	- 간이평가 : 표준 폐기물배출량(폐슬러지, 폐수, 폐골재), 처리방법 - 상세평가 : 실제 콘크리트 생산량, 폐기물 배출량 및 처리방법
평가결과	전과정 평가	- 환경영향 범주별 환경영향 평가결과 - 지구온난화, 산성화, 부영양화 등 - 환경영향 범주별 영향지수의 비용 변환 및 통합화 예) $100 \text{ kg-CO}_2\text{eq/m}^3 \rightarrow 30000\text{원/m}^3$ - 그래프 및 레이더차트 출력
	에코효율성 평가	- 에코효율성 평가결과 - 환경비용, 생산비용, 내구수명 등 - 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계 적용 - 평가대상 콘크리트 및 대안 콘크리트 에코효율성 비교 - 그래프 및 레이더차트 출력
평가완료	결과보고서 출력	- 콘크리트 전과정 평가결과 보고서 - 콘크리트 에코효율성 평가결과 보고서
	평가결과 저장	- 프로젝트 평가결과 데이터베이스 저장 - 사례평가 비교/분석

(나) 프로그램 화면구성

① 정보입력

- 기본정보 입력은 콘크리트의 전과정평가(LCA) 및 에코효율성(Eco-efficiency) 평가를 위한 기본적인 정보를 입력, 기본정보(Basic info.)는 업체명과 평가자, 평가일시, 주소, 연락처 등.
- 콘크리트 정보는 평가대상 콘크리트의 종류 및 압축강도, 굵은골재 크기, 슬럼프 등과 같은 규격을 직접 입력하며 평가목적에 맞게 전과정 평가 또는 에코효율성 평가 항목을 선택함.

The screenshot shows the '기본정보' (Basic Information) input screen of the ECO-VA program. It is divided into three main sections: '평가자 정보' (Evaluator Information), '콘크리트 정보' (Concrete Information), and '평가 목적' (Evaluation Purpose).

평가자 정보 (Evaluator Information):

- 회사명: 한양대학교 (HanYang Univ.)
- 주소: 경기도 안산시 상록구 한양대학교
- 평가자: 김태형 (Kim Tae-hyeong)
- 직책: 연구원 (Researcher)
- 연락처: 031-200-0000
- 이메일: subest@hanyang.ac.kr

콘크리트 정보 (Concrete Information):

- 콘크리트 종류: 보통 콘크리트 (Ordinary Concrete)
- 압축강도: 24 MPa
- 굵은골재 최대치수: 25 mm
- 슬럼프: 150 mm

평가 목적 (Evaluation Purpose):

- 전과정 평가 (Cradle to Gate) [Selected]
- 에코효율성 평가 (Eco-efficiency Evaluation)
- 기본단위: 1m³
- 시스템 경계: Cradle to Gate
- 누적 질량 기여도: 99%

그림 3.74 기본 및 콘크리트 정보 입력화면

② 평가단계

㉠ 원재료단계(Raw material)

- ISO 14040에서 규정하는 ‘제외기준(cut-off criteria)’ 절차에 따라 일반적으로 누적질량 기여도 95-99% 범위에 있는 투입물질들을 기준으로 데이터 수집범위를 정할 수 있음.
- 누적질량기여도 99% 범위의 투입물질들을 기준으로 평가되며, 혼화재는 ‘제외기준(cut-off criteria)’ 과 상관없이 필수적으로 평가에 반영됨.
- 누적질량기여도 99%범위에 포함되는 재료는 ‘Inclusion’ 으로 표시되며, 미포함 재료는 ‘exclusion’ 으로 표시됨.

The screenshot shows the '원재료단계' (Raw Material Stage) input screen of the ECO-VA program. It displays four tables for different raw materials: 시멘트 (Cement), 혼화재 (Binder), 굵은골재 (Coarse Aggregate), and 잔골재 (Fine Aggregate). Each table lists the material name, quantity, and contribution to the total mass.

시멘트	혼화재	굵은골재	잔골재
1. 보통 포틀랜드 시멘트	1. 고품질 슬래그 미분말	1. 자갈	1. 행사
300	49	943	895
11	2	35	93
포함	포함	포함	포함
합계: 300	합계: 49	합계: 943	합계: 895

그림 3.75 원재료단계 입력화면

㉞ 운송단계(Transportation)

- 본 단계는 콘크리트 생산을 위해 투입된 원재료들의 생산업체로부터 콘크리트 제조공장까지 운송과정 동안 사용된 에너지사용량에 따른 환경영향을 평가함.
- 각 원재료들의 출발지, 도착지, 운송수단 및 운송거리 입력 시 프로그램 내에 DB로 구축된 운송수단별 환경영향범주별 특성화값과 연결되어 환경영향(비용), 경제성(비용)이 평가됨.
- 이에 사용자는 보통시멘트 및 골재 등과 같은 콘크리트 원재료들의 생산업체로부터 콘크리트 제조공장까지의 실제 운송거리(km)를 조사하여 직접 입력.
- 하지만, 각 원재료들의 실제 운송거리를 조사하기 용이하지 않은 경우 ‘표준 운송거리’ 기준을 이용하여 국가별 및 지역별 표준 운송거리(km)를 입력할 수 있음.
- 원재료들의 출발지로부터 도착지까지 운송 시 경유지가 있는 상황까지 반영할 수 있도록 함.

ECO-VA
ECO-efficiency Value Assessment System program for concrete

ECO-VA Assessment Notice Help

Information Raw material Transportation Manufacture Waste Mass balance Result

운송단계

* 표준 운송 거리

시멘트	No.	출발지	도착지	운송수단	거리 (km)
보통보통시멘트		대전	수원	Lading Truck (20 ton)	125
		수원	안산	Lading Truck (20 ton)	22

골재	No.	출발지	도착지	운송수단	거리 (km)
크립시멘트골재		원주	안산	Lading Truck (20 ton)	137

과잉골재	No.	출발지	도착지	운송수단	거리 (km)
자갈		인천	안산	Lading Truck (20 ton)	27

잔류재	No.	출발지	도착지	운송수단	거리 (km)
원사		원주	안산	Lading Truck (20 ton)	35

기타재료	No.	출발지	도착지	운송수단	거리 (km)
AS갈수지		광학	안산	Lading Truck (20 ton)	65

그림 3.76 운송단계 입력화면

㉞ 제조단계(Manufacture)

- 본 단계는 콘크리트 제조설비의 에너지사용량에 대한 환경영향을 평가하는 단계이며, 제조단계는 평가목적에 따라서 간이평가 및 상세평가 방식을 선택할 수 있음.
- 간이평가 방식은 평가대상 콘크리트의 제조설비(Batch plant) 에너지사용량 정보를 수집하기 어려운 경우 프로그램 내 DB로 구축된 표준 에너지사용량이 적용.
- 상세평가 방식은 콘크리트 생산업체에서 일정기간 동안 콘크리트 생산량(m^3)과 에너지사용량(유류, 전력 등) 정보를 직접 입력하는 방식임.
- 콘크리트 생산량과 유류, 전력 등의 에너지사용량을 입력하면 프로그램 내에 DB로 구축된 각 에너지원의 환경영향 범주별 특성화값과 연결되어 환경영향(비용), 경제성(비용)이 평가됨.
- 본 평가단계에서 제안한 데이터 할당은 콘크리트 업체에서 생산되는 다양한 콘크리트의 규격별 데이터를 수집하여 평가에 반영하는 것을 의미.
- 이를 위해 콘크리트 압축강도별로 믹서 가동시간(sec) 및 생산능력(Capacity)이 반영되어 에너지사용량이 비율산정에 따라 할당되어 평가 시 적용.



ECO-VA
ECO-efficiency Value Assessment System program for concrete

ECO-VA Assessment Notice Help

Information → Raw material → Transportation → **Manufacture** → Waste → Mass balance → Result

제조단계

간이평가 ☐ 상세평가 ☒

평가 기간: 20140101 ~ 20141231

에너지 사용량

No.	종류	단위	에너지 소비량 (단위/m³)	이산화탄소 발생량 (kg-CO₂eq/m³)
1	전력	kwh	2.22	1.10
2	연료	L	0.26	99.65
3	물	L	0.024	9.20
4	LNG	m³	0	0
5	축열유	L	0	0

공정별 생산량

No.	압력강도	생산량 (m³)	소요시간 (sec)	수출량 (m³)
1	~20 MPa	80	30	3
2	21~30 MPa	36,040	30	3
3	31~40 MPa	15,460	60	3
4	41~50 MPa	1,697	90	3
5	51~60 MPa	348	180	6
6	over 60 MPa	41	180	6
Total		62,000		

그림 3.77 제조단계 입력화면

㉔ 폐기단계(Waste)

- 콘크리트 제조 시 폐기물(고형폐기물, 폐수) 배출량에 대한 환경영향을 평가하는 단계임.
- 폐기단계는 평가목적에 따라서 간이평가 및 상세평가 방식을 선택할 수 있음.
- 간이평가 방식은 평가대상 콘크리트 제조 시 배출된 폐기물량 정보를 수집하기 어려운 경우 프로그램 내 DB로 구축된 표준 배출량과 처리방법이 적용됨.
- 상세평가 방식은 그림 3.78과 같이 콘크리트 생산업체에서 일정기간 동안 시멘트슬러지 및 폐수, 폐골재 배출량과 처리방법, 처리비용 정보를 직접 입력하는 방식임.
- 입력된 폐기물 배출량과 처리방법에 따라 프로그램 내 DB로 구축된 각 처리방법별 환경영향(비용) 및 경제성(비용)이 적용됨.
- 폐기물 처리방법은 실제 콘크리트 생산업체를 대상으로 조사하였으며, 외부용역업체 처리 및 내부 재활용, 외부 재활용 등과 같이 3가지 종류로 구분함.



ECO-VA
ECO-efficiency Value Assessment System program for concrete

ECO-VA Assessment Notice Help

Information → Raw material → Transportation → Manufacture → **Waste** → Mass balance → Result

폐기단계

간이평가 ☐ 상세평가 ☒

평가 기간: 20140101 ~ 20141231

시멘트슬러지

No.	발생량 (kg)	폐기물 처리 방법	처리비용 (KRW)	이산화탄소 배출량 (kg-CO₂eq)
1	20	☒ 매립 ☐ 내부재활용 ☐ 외부재활용	15,000	5.81
2	10	☐ 매립 ☒ 내부재활용 ☐ 외부재활용	0	0

폐수

No.	발생량 (kg)	폐기물 처리 방법	처리비용 (KRW)	이산화탄소 배출량 (kg-CO₂eq)
1	0	☒ 매립 ☐ 내부재활용 ☐ 외부재활용	0	0

비연준슬러지

No.	발생량 (kg)	폐기물 처리 방법	처리비용 (KRW)	이산화탄소 배출량 (kg-CO₂eq)
1	0	☒ 매립 ☐ 내부재활용 ☐ 외부재활용	0	0

미양물재

No.	발생량 (kg)	폐기물 처리 방법	처리비용 (KRW)	이산화탄소 배출량 (kg-CO₂eq)
1	0	☒ 매립 ☐ 내부재활용 ☐ 외부재활용	0	0

그림 3.78 폐기단계 입력화면

(나) 평가결과

① 콘크리트 전과정 평가결과

- 평가대상 콘크리트의 전과정 평가 시 입력한 기본정보 및 콘크리트 정보를 나타냄.
- 또한, 그림 3.79와 같이 평가대상 콘크리트 생산과정 시 투입된 배합재료 및 에너지사용량, 폐기물량 등에 의하여 배출된 환경영향 물질이 생태계의 지구온난화 및 산성화, 오존층 영향, 부영양화, 광화학적산화물생성, 자원소모 등에 미치는 영향을 그래프로 나타냄.
- 6개 환경영향 범주별로 도출된 값에 대하여 환산계수를 적용하여 환경비용(원/m³)으로 산출 하였으며, 환경비용은 원재료 및 운송, 제조, 폐기단계로 구분되어 나타남.
- 평가대상(Object) 콘크리트의 환경비용 평가결과는 대안(Alternative) 콘크리트의 환경비용 의 평가결과와 비교를 통해 저감율(%)이 도출됨.
- 또한, 환경영향 범주별 환경영향 평가결과도 레이더차트 형식으로 나타나며 평가대상 콘크리 트 대비 대안 콘크리트의 환경영향 배출 저감율(%)이 도출됨.



그림 3.79 콘크리트 전과정 환경영향 평가결과

② 콘크리트 에코효율성 평가결과

- 평가대상 콘크리트의 전과정 평가 시 입력한 기본정보 및 콘크리트 정보를 나타냄.
- 그림 3.80과 같이 콘크리트 생산과정 시 투입된 배합재료 및 에너지사용량, 폐기물량 등에 의하여 산출된 환경비용 및 생산비용, 내구수명을 이용하여 에코효율성(원/년)을 나타냄.
- 평가대상(Object) 콘크리트의 배합설계(원재료)에 대하여 에코효율성 목표 향상율을 입력하면, 목표 향상율을 만족하는 대안(Alternative) 콘크리트의 배합설계가 도출되어 표시.
- 또한, 에코효율성 향상 콘크리트 배합설계가 적용된 대안 콘크리트의 에코효율성이 도출.
- 내구수명을 만족하면서 환경비용과 생산비용을 줄여 에코효율성을 향상하기 위한 최적 배합설계 도출을 위한 기초 자료로 사용 할 수 있음.

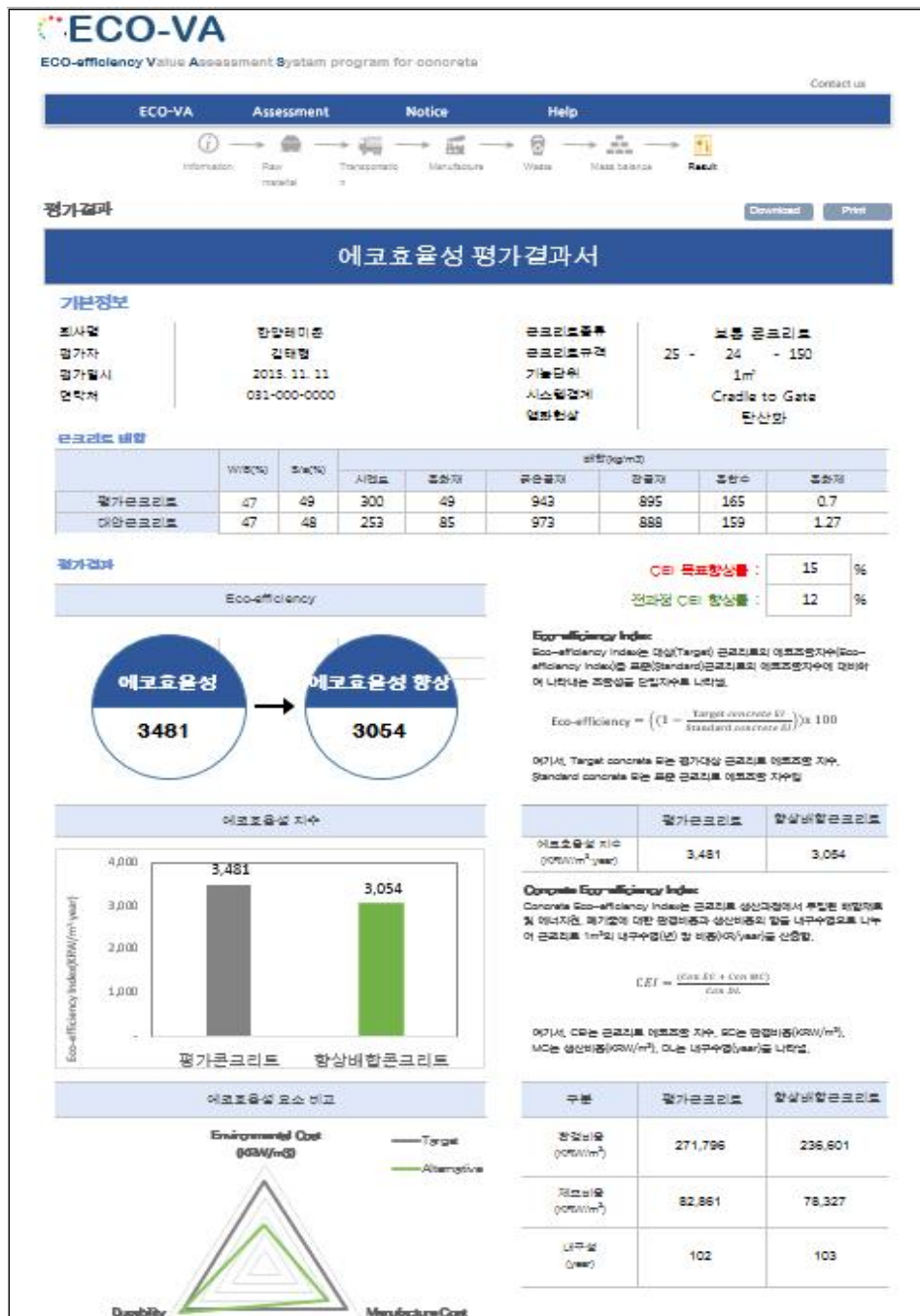


그림 3.80 콘크리트 에코효율성 평가결과

나. CO₂ 배출량 저감을 고려한 경량콘크리트 배합설계 프로세스 정립 및 환경영향 평가

(1) CO₂ 저감 및 현장적용형 경량 콘크리트 배합모델 개발

(가) 경량 콘크리트 데이터베이스 상세

- 경량콘크리트(light weight aggregate concrete, LWAC)에서 천연골재 치환율의 영향을 분석을 위해 기존 문헌의 실험 결과들로부터 379개의 데이터베이스(database, DB)를 구축 함.
- 수집된 DB는 절대 용적방법(굳지 않은 콘크리트의 용적이 시멘트, 굵은골재 및 잔골재, 물, 공기량 등의 각 재료들의 절대용적의 합과 일치함을 가정)을 통한 분석을 실시함.
- 사용된 경량골재는 대부분 플라이애쉬(fly ash, FA) 또는 점토를 팽창해 제조되었으며, 경량 잔골재와 굵은골재의 단위용적 중량은 각각 1,000~1,850 kg/m³와 1,000~1,600 kg/m³임.
- 구축한 경량콘크리트 배합 대한 콘크리트의 재령 28일 압축강도(f_{ck}), 물-시멘트 비 (W/C), 단위수량(W), 굵은 골재 체적밀도에 대한 겉보기 밀도의 비($V_G = \gamma_{GL} v_{GL} / \rho_{GL}$), 기건밀도(γ_{con}), 흡수율(W_A) 및 건조밀도(dry density) 를 그림 3.81에 나타 냄.

(나) 성능평가 지수의 개발

- 콘크리트는 일반적으로 물-결합재비(W/B)가 감소함에 따라 압축강도(f_{ck})가 증가하므로, 높은 f_{ck} 발현을 위해서는 많은 양의 결합재가 소비 됨.
- 콘크리트의 f_{ck} 증가는 구조부재의 단면 사이즈를 줄일 수 있으며, 이에 따라 콘크리트 양의 감소로 CO₂ 저감 효과를 기대할 수 있음.
- 콘크리트의 CO₂ 평가는 단순히 1 m³에 대한 CO₂ 발생량의 평가가 아닌 단위 f_{ck} (1 MPa)의 발현을 위한 CO₂ 발생량이 평가 될 필요가 있음.
- 본 연구는 Dmineli at al.(2010)이 제시한 결합재 지수(B_i)와 CO₂ 지수(C_i) 및 경량골재 지수(V_{G-i})를 이용하여 다음의 식과 같이 결합재의 환경성능을 평가 함.

$$B_i = B/f_{ck} \quad (1)$$

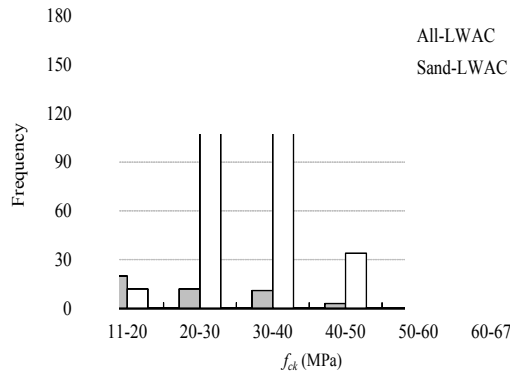
$$C_i = C_d/f_{ck} \quad (2)$$

$$V_{G-i} = V_G/f_{ck} \quad (3)$$

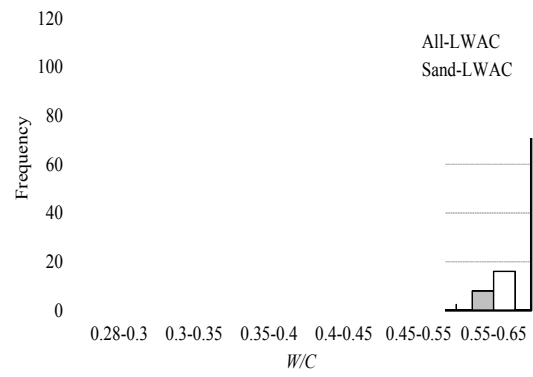
- B , C_d 및 V_G 는 각각 콘크리트 1m³에 대한 결합재 양, CO₂발생량 및 경량굵은골재 용적비임.

표 3.45 경량 콘크리트 배합 데이터 베이스(379개 실험실 배합)

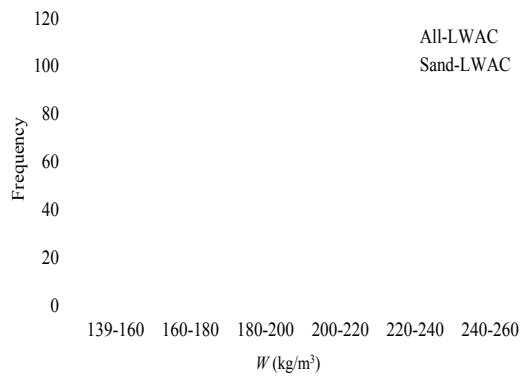
f_{ck}	11-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-67
All-LWAC	20	12	11	3	-	-
Sand-LWAC	12	127	138	34	19	3
W/C	0.28-0.30	0.30-0.35	0.35-0.40	0.40-0.45	0.45-0.55	0.55-0.65
All-LWAC	6	6	13	2	12	8
Sand-LWAC	80	84	92	33	26	16
W	139-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260
All-LWAC	1	7	24	9	5	1
Sand-LWAC	69	96	92	64	8	3
V_G	0.33-0.45	0.45-0.50	0.50-0.55	0.55-0.60	0.60-0.65	0.65-0.82
All-LWAC	-	2	12	9	7	1
Sand-LWAC	7	24	99	82	27	31
γ_{con}	1200-1500	1500-1600	1600-1700	1700-1800	1800-1900	1900-2024
All-LWAC	2	1	3	-	3	5
Sand-LWAC	7	4	12	23	145	53
W_A	3-10	10-15	15-20	20-25	25-28	
All-LWAC	24	26	22	1	4	-
Sand-LWAC	154	46	35	52	4	-
Dry density	1000-1150	1150-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1700	1700-1850
All-LWAC	13	-	20	22	16	6
Sand-LWAC	65	42	113	40	2	29



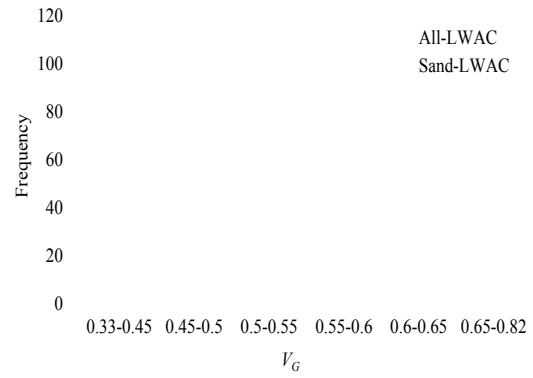
(a) Range of f_{ck}



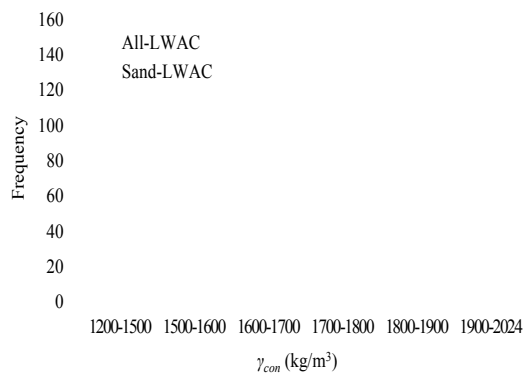
(b) Range of W/C



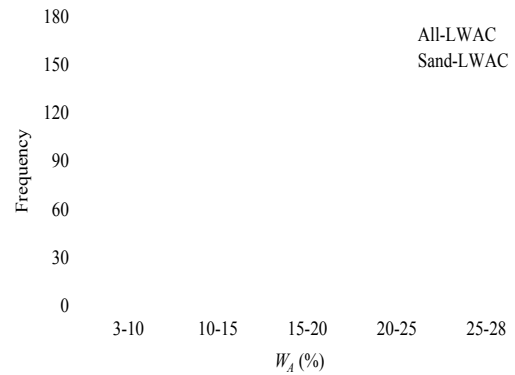
(c) Range of W



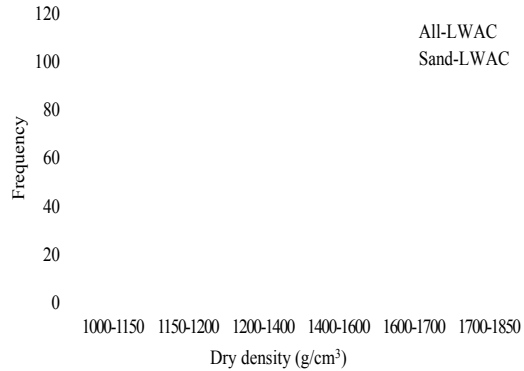
(d) Range of V_G



(e) Range of γ_{con}



(f) Range of W_A



(g) Dry density

그림 3.81 경량 콘크리트 데이터베이스에서 각 변수들의 분포

① 경량 굵은골재 지수(V_{G-i})

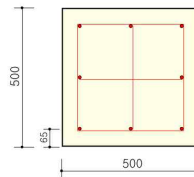
- LWAC에서 경량 굵은골재 양이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 식 3과 같이 V_{G-i} 를 제시하였으며, 그림 3.82에 f_{ck} 와 V_{G-i} 의 관계를 나타 냄.

표 3.46 Example for environmental impact assessment in RC columns.

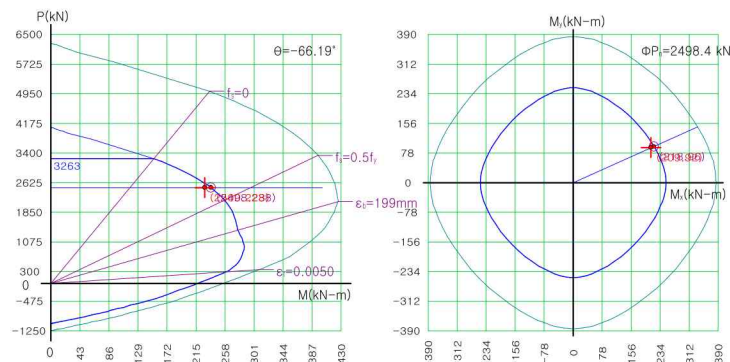
f_{ck} (MPa)	H (m)	Section (mm)	P_u (kN)	M_u (kN-m)	Ratio	Concrete (m^3)	CO ₂ (kg)
24	3.5	500x500	2500	170	0.96	0.875	282.6
40	3.5	435x435	2500	170	0.97	0.662	273.1

1. Geometry and Materials

Design Code : KCI-USD07
 Stress Profile : Equivalent Stress Block
 Material Data : $f_{ck} = 24$ MPa ($\beta_1 = 0.850$)
 $f_y = 400$, $f_{ys} = 400$ MPa
 Section Dim. : 500×500 mm
 Effective Len. : $KL_u = 3500$ mm
 Steel Distribut. : 8 - 3 - D22 ($d_c = 65$ mm)
 Total Steel Area $A_{st} = 3097$ mm² ($\rho_{st} = 0.0124$)



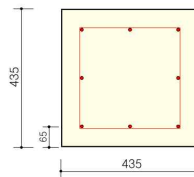
$P_u = 2500.0$ kN
 $M_{ux} = 170.0$, $M_{uy} = 0.0$ kN-m
 $\delta_x M_{ux} = \delta_x \cdot M_{ux} = 209.4$ kN-m
 $\delta_y M_{uy} = \delta_y \cdot \text{MAX}[M_{uy}, P_u e_{min}] = 92.4$ kN-m



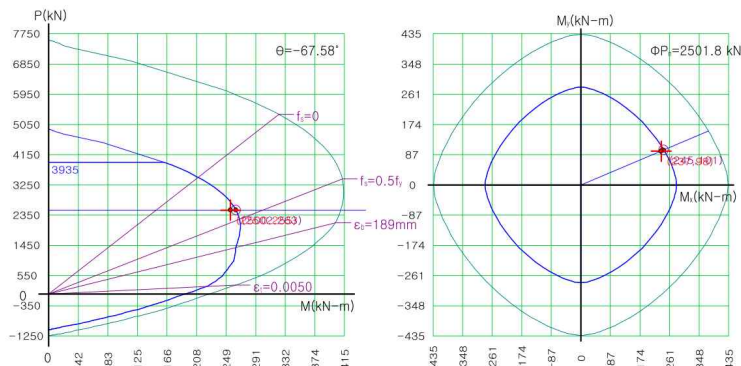
(a) 24 MPa (500x500)

1. Geometry and Materials

Design Code : KCI-USD07
 Stress Profile : Equivalent Stress Block
 Material Data : $f_{ck} = 40$ MPa ($\beta_1 = 0.766$)
 $f_y = 400$, $f_{ys} = 400$ MPa
 Section Dim. : 435×435 mm
 Effective Len. : $KL_u = 3500$ mm
 Steel Distribut. : 8 - 3 - D22 ($d_c = 65$ mm)
 Total Steel Area $A_{st} = 3097$ mm² ($\rho_{st} = 0.0164$)



$P_u = 2500.0$ kN
 $M_{ux} = 170.0$, $M_{uy} = 0.0$ kN-m
 $\delta_x M_{ux} = \delta_x \cdot M_{ux} = 237.1$ kN-m
 $\delta_y M_{uy} = \delta_y \cdot \text{MAX}[M_{uy}, P_u e_{min}] = 97.8$ kN-m



(b) 40 MPa (435x435)

그림 3.82 RC 기둥에서의 환경영향 저감 효과 예시.

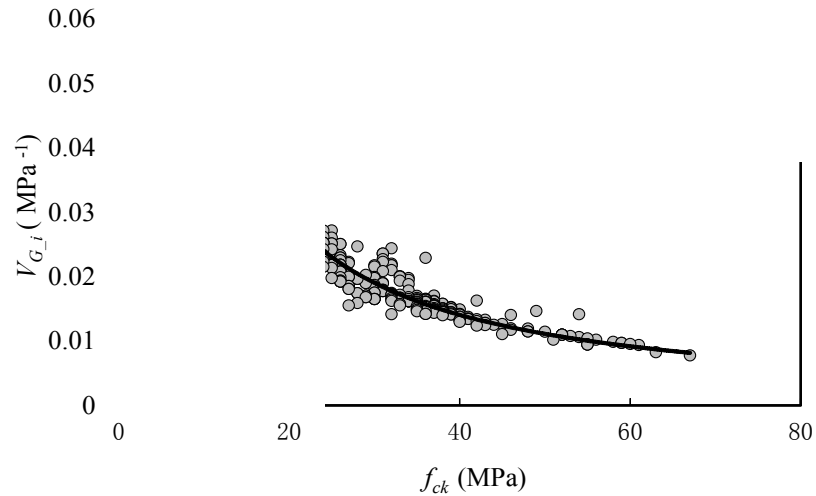


그림 3.83 f_{ck} 와 V_{G-i} 의 관계

② CO₂ 지수(C_i)

- f_{ck} 와 C_i 의 관계를 그림 3.84에 나타 냄.
- C_i 는 f_{ck} 의 증가와 함께 감소하였으며, 감소속도는 대체적으로 경량 V_{G-i} 와 유사한 경향을 나타 냄.

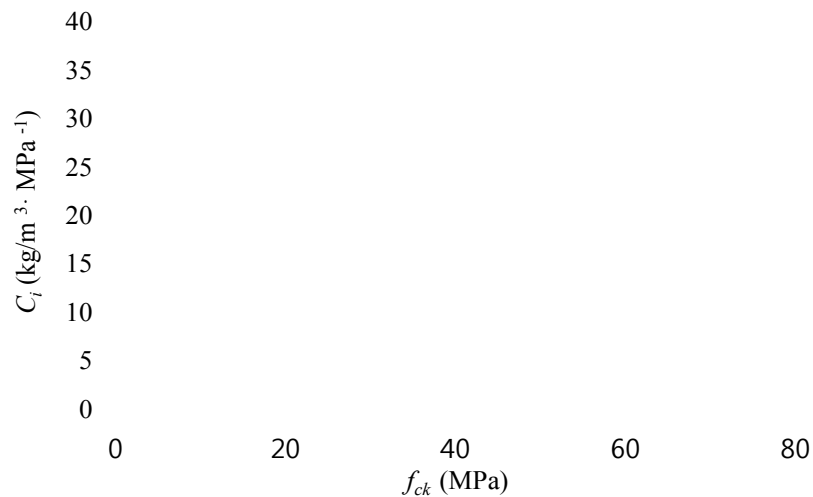


그림 3.84 f_{ck} 와 C_i 의 관계

(다) CO₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계를 위한 모델

① 천연모래 치환율(R_{FS})의 결정

- 시멘트(ordinary portland cement, OPC)는 콘크리트 배합단계에서의 CO₂ 배출량의 95% 이상을 차지 함.
- 따라서, f_{ck} 와 CO₂ 저감을 고려한 LWAC 배합설계는 R_{FS} 의 결정과 그에 따른 단위 결합재 양의 합리적인 산정방법이 필요함.
- f_{ck} , 경량 굵은골재 양 및 CO₂ 배출량의 상호 관계는 V_{G-i} 및 C_i 지수의 개념을 도입하여 설명이 가능 함.

- V_{G-i} 가 존재하지 하지 않으면, 경량골재의 치환율은 의미 없음.
- 경량골재 사용량이 없더라도, CO₂ 배출량은 발생함.
- C_i 는 경량골재 치환율에 따라 결정됨(골재 각기다른 전과정목록을 가짐)

- 이와 같은 경계조건을 고려하여 V_{G-i} 와 C_i 의 관계는 식 (4)와 같이 모델링 될 수 있음.

$$C_i = A_1 \left[(B_1 - R_{FS})^{C_1} \times V_{G-i} \right] + D_1 \quad (4)$$

- 여기서 $R_{FS} (= \frac{v_{FS}}{v_{FS} + v_{FA}})$ 는 콘크리트 단위용적당 전체 잔골재 체적에 대한 천연모래 체적 (v_{FS})의 비이며, v_{FA} 는 경량 잔골재 단위용적 임.
- A_1 , B_1 , C_1 및 D_1 은 실험상수로서 실험결과의 회귀분석으로부터 각각 67, 3, 1.7 및 12로 결정 함.
- 분석결과 비교적 낮은 상관계수를 보였는데, 이는 콘크리트 배합 자료들의 제공처(source)의 차이로 인해 사용 골재들의 함수율, 강도 및 입도분포와 양생온도 및 습도 등이 각 배합에 따라 상이하기 때문인 것으로 판단 됨.
- 따라서, V_{G-i} 와 C_i 의 관계는 다음 식 (5)과 같이 나타낼 수 있음.

$$C_i = 67 \left[(3 - R_{FS})^{1.7} \times V_{G-i} \right] + 12 \quad (5)$$

- V_{G-i} 와 C_i 의 정의로부터 LWAC의 배합단계에서 배출되는 CO₂ 양(C_d)은 다음 식 (6)로서 간단하게 산정될 수 있음.

$$C_d = 67 \left[(3 - R_{FS})^{1.7} \times V_G \right] + 12 f_{ck} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (6)$$

- f_{ck} 와 결합재 지수의 관계는 그림 3.85와 같이 실험 데이터의 분석을 통하여 평가 함.

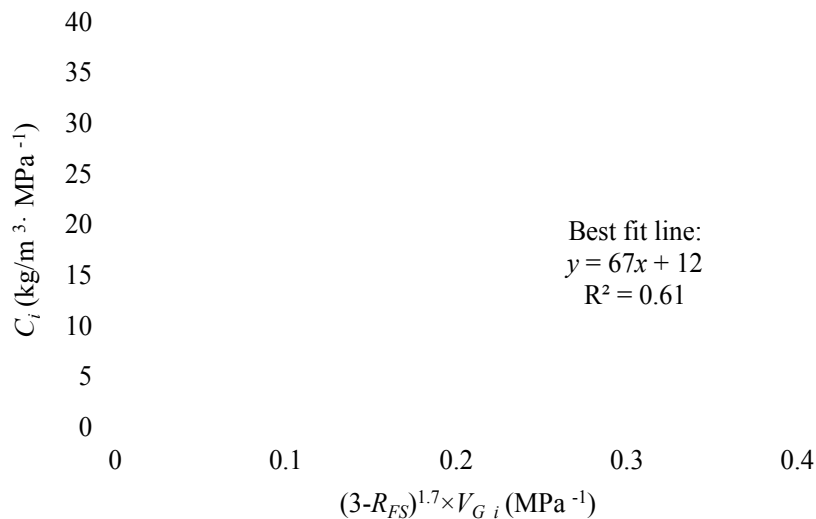


그림 3.85 C_i 와 V_{G-i} 의 관계

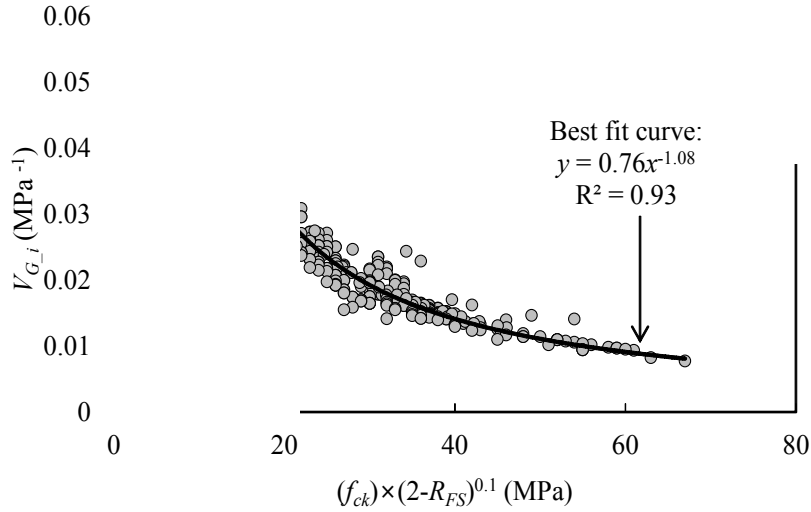


그림 3.86 f_{ck} 와 V_{G-i} 의 관계

- 분석결과를 통해 목표 CO₂ 배출 저감율과 설계 압축강도를 만족시키기 위한 V_G 설계 모델식을 개발함.
- V_G 와 f_{ck} , CO₂ 저감률의 관계는 다음 식 (7) 및 (8)과 같이 나타낼 수 있음.

$$V_{G-i} = 0.76(f_{ck})^{-1.08}(2 - R_{FS})^{-0.108} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (7)$$

- V_{G-i} 의 정의로부터 위의 식은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있음.

$$V_G = 0.76(f_{ck})^{-0.08}(2 - R_{FS})^{-0.108} \quad (8)$$

- CO₂ 저감을 고려한 LWAC 배합설계에서는 경량골재량의 설계가 가장 중요한 단계로서, 위에서 제시한 식 (8)를 통해 산정 될 수 있음.
- 본 연구에서는 레미콘 공장과 같은 산업체에서의 간편한 사용을 위하여 단순화 된 골재 설계 시트를 개발 함.
- 그림 3.86은 단순화 된 골재 설계 시트로서 식 (6)과 (7)을 이상화 함.

② 물-시멘트비(W/C)의 결정

- 경량 골재를 이용한 콘크리트의 경우 일반 천연골재 함유량에 따라 f_{ck} 와 γ_{con} 이 증가 함.
- 경량골재 콘크리트의 f_{ck} 는 동일 W/C 에서 γ_{con} 의 증가와 함께 증가하였는데, 이는 γ_{con} 이 낮은 LWAC는 f_{ck} 를 얻기 위해서는 더 낮은 W/C 가 필요할 수 있음을 의미함.
- LWAC의 f_{ck} 에 대한 각 영향변수들을 회귀분석한 결과 다음 식을 얻음.

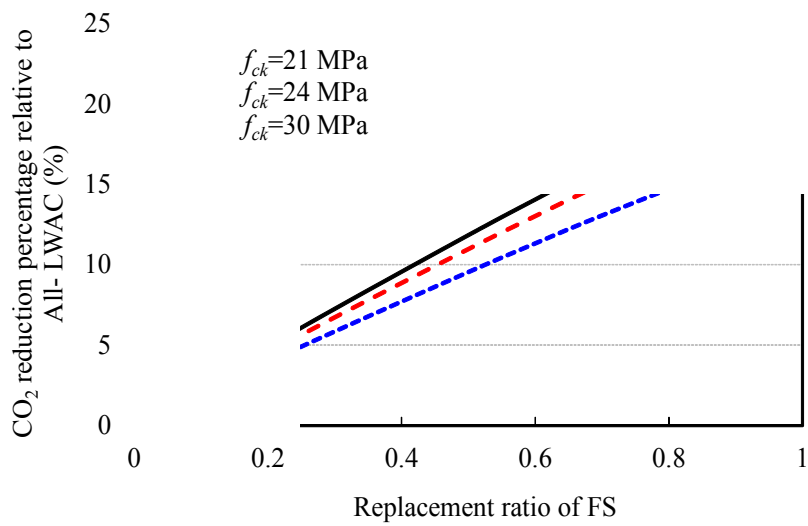


그림 3.87 CO₂ 저감을 고려한 골재 설계

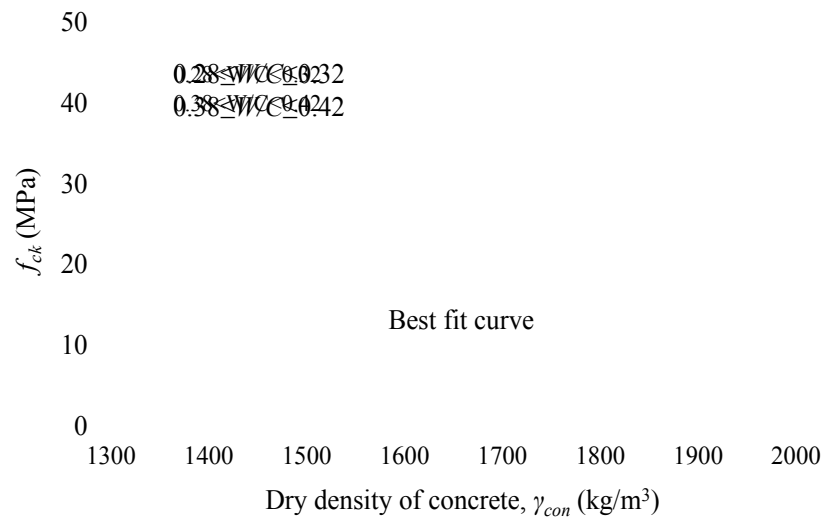


그림 3.88 γ_{con} 가 콘크리트 f_{ck} 에 미치는 영향

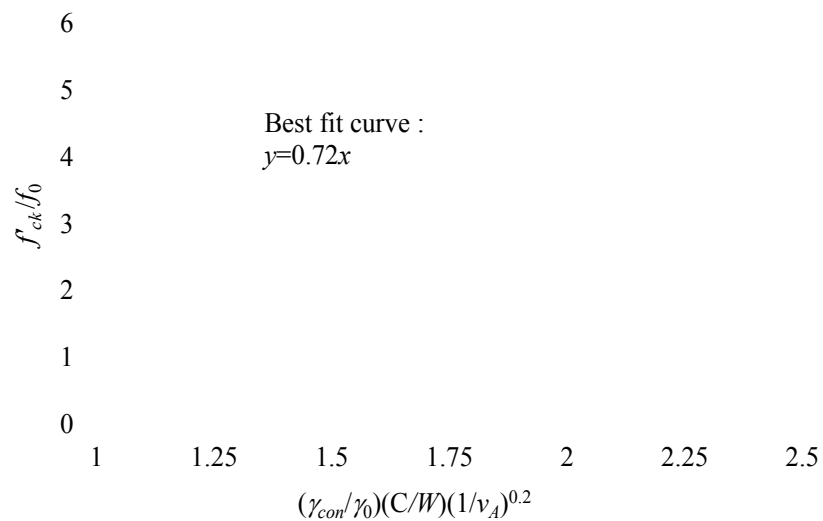


그림 3.89 LWAC의 f_{ck} 에 대한 각 영향변수의 회귀분석 결과

$$\frac{f_{ck}}{f_0} = 0.72 \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \frac{C}{W} \right) \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \quad (9)$$

- 여기서, f_0 (=10 MPa)는 콘크리트 압축강도의 참고값이며, γ_0 (=2300 kg/m³)는 콘크리트 기건밀도의 참고 값, v_A 는 LWAC의 공기량임.
- 식 (9)로부터 목표 성능(f_{ck} , γ_{con} 및 v_A)에 대한 소요 W/C 는 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$W/C = 0.72 \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \right) \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \quad (10)$$

③ 단위수량(W)의 결정

- 목표 슬럼프(S_i)를 얻기 위한 콘크리트의 단위수량(W)은 굵은골재의 최대크기, 조립률 및 함유량과 공기량, 감수제의 종류 및 첨가량 등에 의해 영향을 받음.
- 감수제는 콘크리트의 구성을 위한 필수 재료가 아니며, 감수제 첨가가 콘크리트 슬럼프 변화에 미치는 영향을 일반화하는 것은 관련 자료들의 부족으로 비현실적임.
- 따라서, 본 연구는 감수제가 첨가되지 않은 LWAC를 대상으로 슬럼프 평가모델을 제시 함.
- LWAC의 S_i 는 동일 배합조건에서 일반잔골재 대신 경량잔골재 함유량이 증가할수록 증가 함.
- 이는 경량 잔골재의 형상이 일반 잔골재에 비해 표면이 매끄러운 구형이며, 배합 전 침수에 따른 함유량이 다소 높기 때문임.
- 이들의 영향변수들의 회귀분석으로부터 LWAC의 S_i 는 다음과 같이 제시 될 수 있음.

$$\frac{S_i}{S_0} = (2 - R_{FS})^{0.2} \left(V_G \frac{W}{W_0} \right)^2 (v_A)^{0.4} \quad (11)$$

- 여기서 S_0 (=300 mm)는 슬럼프의 참고값이며, W_0 (=100 kg/m³)은 단위수량의 참고값이며, R_{FS} ($= \frac{v_{FS}}{v_{FS} + v_{FL}}$)는 콘크리트 단위용적당 전체 잔골재 체적에 대한 천연모래 체적(v_{FS})의 비이며, v_{FL} 는 경량 잔골재 단위용적 임.
- ACI 211.2-98(1998)에서 제시하는 절차를 통하여 결정된 단위 수량을 사용하였을 때 콘크리트의 슬럼프는 목표값과 2배 이상의 오차를 보임.
- 따라서, 본 연구에서 제시한 식 (11)은 LWAC의 최초 시험배합을 위해 목표 슬럼프 및 배합 조건에 따른 단위수량의 결정에 적절히 이용 될 수 있음.
- 식 (11)로부터 LWAC의 목표 S_i 에 대한 W 은 다음과 같이 나타 낼 수 있음.

$$W = \frac{W_0}{V_G} \left(\frac{1}{2 - R_{FS}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (12)$$

④ V_G 의 결정

- ACI 211.2-98(1998)은 굵은골재 크기 및 조립률에 따라 s_i 에 대해 V_G 값의 경험적인 설계표를 제시하고 있으나, 식 (11)에 나타난 바와 같이 LWAC의 유동성은 V_G 뿐만 아니라 W , R_{FS} 및 v_A 등의 다양한 변수들에 의해서도 영향을 받음.
- LWAC 배합을 위한 V_G 의 결정은 사용되는 골재의 물리적 특성 및 설계압축강도 하에서 목표 γ_{con} 이 달성 될 수 있는지 고려해야 함.

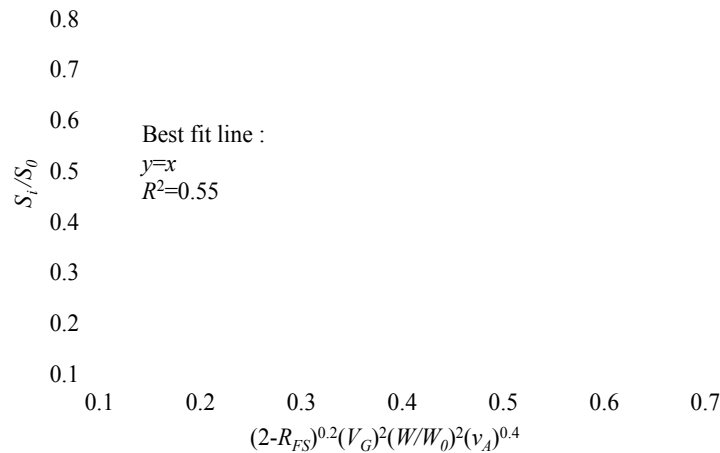


그림 3.90 초기 s_i 의 회귀분석 결과

- 따라서, 본 연구에서는 V_G 값의 결정에서 이들 변수의 영향을 고려하기 위하여 두 가지 경계 조건 하에서 수학적 모델을 설정함.
- 첫 번째 경계조건으로서 배합에 사용된 각 재료의 단위용적중량과 γ_{con} 의 상관관계를 적용함.
- 콘크리트의 수화 반응을 위한 최소 물의 양은 시멘트 양의 20~25% 범위에 있으며 수분의 증발 후 γ_{con} 은 투입재료들의 단위용적 중량과 직접적인 관계가 있음.(Neville, 1995, ALJ, 1999)
- 위와 같은 관계를 파악하기 위하여 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 LWAC의 γ_{con} 은 배합 설계로부터 다음 식 (11) 같이 평가함(그림 3.91).

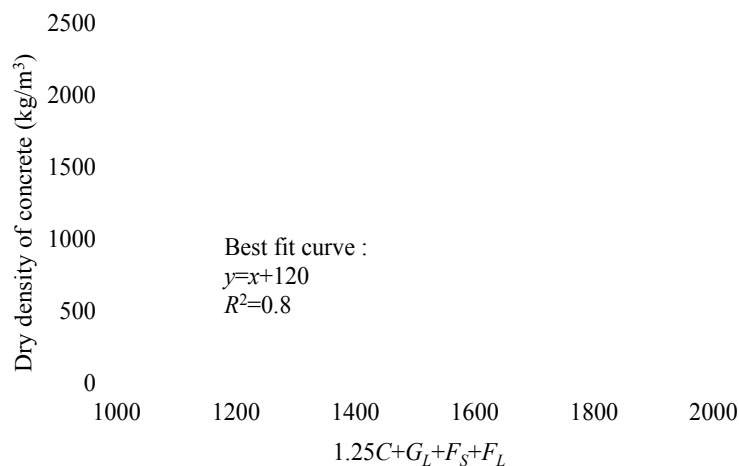


그림 3.91 콘크리트의 γ_{con} 회귀분석 결과

$$\gamma_{con} = 1.25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (13)$$

- 여기서 C , G_L , F_S 및 F_L 은 각각 콘크리트 단위체적 당 시멘트의 양, 경량 굽은골재의 양, 천연모래 및 경량 잔골재의 양을 나타냄.
- 두 번째 경계조건으로서 식 (14)와 같이 절대용적 개념을 이용함.

$$v_W + v_C + v_{GL} + v_{FS} + v_{FL} + v_A = 1 \quad (14)$$

- 여기서, v_W , v_C , v_{GL} , v_{FS} 및 v_{FL} 은 각각 콘크리트 단위체적 당 물, 시멘트, 경량 굽은골재, 천연모래 및 경량 잔골재의 체적을 나타냄.
- 식 (12) 및 R_{FS} 와 V_G 에 대한 정의로부터 식 (14)는 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\frac{A_1}{\gamma_W V_G} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1 V_G} + \frac{\rho_{GL} V_G}{\gamma_{GL}} + \frac{v_{FL}}{1 - R_{FS}} + v_A = 1 \quad (15)$$

$$A_1 = W_0 \left(\frac{1}{2 - R_{FS}} \right)^{0.1} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0.5} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (16)$$

- 여기서, X_1 은 W/C 의 값이며, γ_W 와 γ_C 는 각각 물과 시멘트의 밀도 임.
- 콘크리트 단위체적 당 골재의 양은 골재의 밀도와 단위부피의 곱으로 나타낼 수 있으므로 식 (13)은 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$1.25 \frac{A_1}{X_1 V_G} + \gamma_{GL} v_{GL} + \gamma_{FS} v_{FL} \left(\frac{R_{FS}}{1 - R_{FS}} \right) + \gamma_{FL} v_{FL} + 120 - \gamma_{con} = 0 \quad (17)$$

- 여기서, γ_{FS} 와 γ_{FL} 은 각각 천연모래와 경량 잔골재의 겉보기 밀도 임.
- 식 (15)를 v_{FL} 에 대해 정리하고 식 (17)에 대입하면 다음과 같은 V_G 의 2차 함수를 얻을 수 있음.

$$q_1 V_G^2 + q_2 V_G + q_3 = 0 \quad (18)$$

$$q_1 = \left[-\rho_{GL} + \frac{\gamma_{FL}(1 - R_{FS})\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \right] \left[\frac{1}{R_{FS}\gamma_{FS}} \right] + \frac{\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \quad (19.a)$$

$$q_2 = \frac{\gamma_{con} - \gamma_{FL}(1 - R_{FS})(1 - v_A) - 120}{R_{FS}\gamma_{FS}} + v_A - 1 \quad (19.b)$$

$$q_3 = \frac{\left[\gamma_{FL}(1 - R_{FS})A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} \right) - \frac{1.25A_1}{X_1} \right]}{R_{FS}\gamma_{FS}} + \frac{A_1}{\gamma_W} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1} \quad (19.c)$$

- 전 경량골재 콘크리트($R_{FS} = 0$)의 경우 식 (19.a)~(19.c)에서 나타낸 $q_1 \sim q_3$ 는 다음 식 (20.a) ~ (20.c)에 의해 산정 됨.

$$q_1 = \rho_{GL} \left(\frac{1}{\gamma_{GL}} - \frac{1}{\gamma_{FL}} \right) \quad (20.a)$$

$$q_2 = \frac{\gamma_{con} - 120}{\gamma_{FL}} + v_A - 1 \quad (20.b)$$

$$q_3 = A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} - \frac{1.25}{\gamma_{FL} X_1} \right) \quad (20.c)$$

⑤ 목표 기전밀도(γ_{con}) 설정

- LWAC 배합설계 절차로부터 설계강도와 임의의 V_G 값에 대해 다음 식에 의한 W/C 값($=X_1$) 이 결정되면 식 (13)에 의해 γ_{con} 을 평가할 수 있음.

$$p_1 X_1^2 + p_2 X_1 + p_3 = 0 \quad (21)$$

$$p_1 = f_{ck} \gamma_0 \quad (22.a)$$

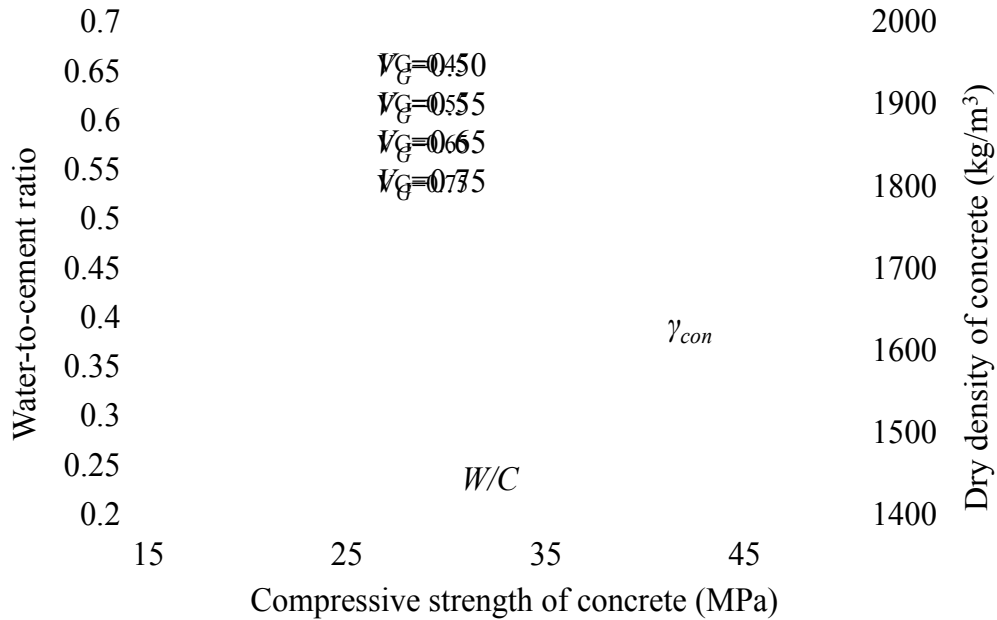
$$p_2 = -0.72 f_0 \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \times [\rho_{GL} V_G + \gamma_{FS} R_{FS} \xi + \gamma_{FL} (1 - R_{FS}) \xi + 120] \quad (22.b)$$

$$p_3 = 0.72 f_0 \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0.2} \times \left[\left(\frac{A_1}{\gamma_C V_G} \right) (-1.25 \gamma_C + \gamma_{FS} R_{FS} + \gamma_{FL} (1 - R_{FS})) \right] \quad (23.c)$$

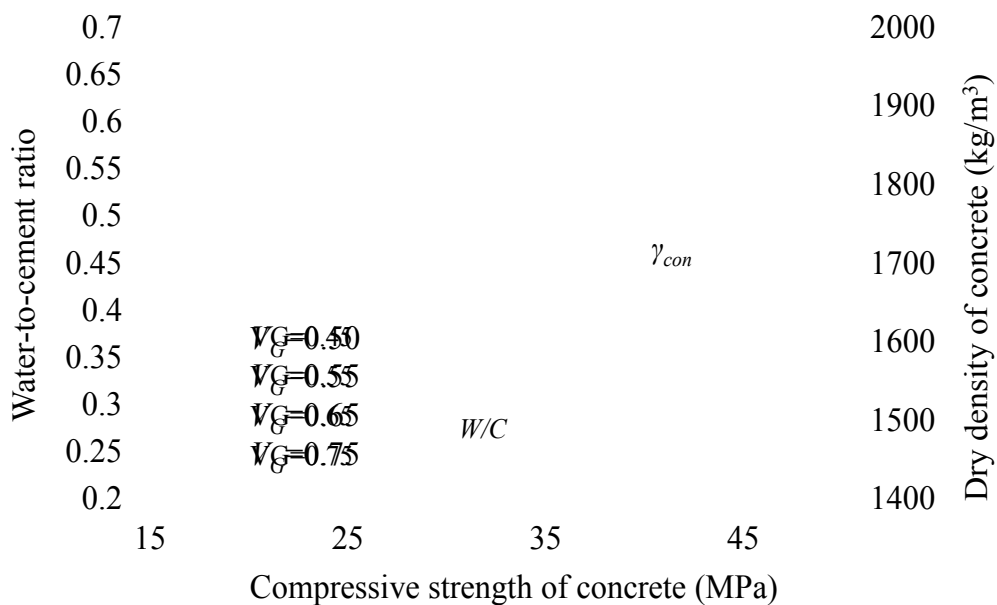
$$\xi = (1 - v_W - v_{GL} - v_A) \quad (24.d)$$

- 위 식을 바탕으로 임의의 V_G 값에 대한 f_{ck} , W/C 및 γ_{con} 의 관계를 나타 냄(그림 3.92).
- 이는 ,LWAC의 간편한 설계용 도표의 일례로서 목표 f_{ck} 에 대해 콘크리트 구성요소들의 단위 용적중량을 결정하기 위한 소요 γ_{con} 의 선택 및 W/C 를 결정하고 그에 따른 V_G 값을 결정하는데 이용될 수 있음.
- 일반적으로 목표 f_{ck} 에 대한 W/C 및 γ_{con} 은 V_G 값이 증가할수록 감소하는데, 이 경향은 콘크리트 강도의 증가와 함께 그리고 모래 경량골재 콘크리트($R_{FS} = 1$)보다는 전 경량골재 콘크리트($R_{FS} = 0$)에서 현저하였음.
- LWAC의 설계강도에 대해 목표 γ_{con} 의 범위를 설정하기 위해 이용될 수 있는데, 일반적으로 콘크리트에서 V_G 값이 0.5~0.75임을 고려하면 설계강도가 30 MPa인 전 경량골재 콘크리트(all light weight aggregate concrete, All-LWAC)에서 목표로 설정할 수 있는 γ_{con} 의 범위는 1,580~1,700 kg/m³이 적절 함.

- 경량골재 콘크리트의 배합설계를 위한 목표성능은 재령 28일 f_{ck} , 초기 S_i , v_A 및 γ_{con} 임.
- 일반적으로 LWAC에서 v_A 는 0.035 ± 0.015 가 추천되므로(ACI 211.2-98), 공기량에 대한 특별한 요구조건이 없을 경우 그 값은 0.035를 이용함.
- 배합 시 함수량 및 사용되는 골재들의 물리적 성능도 입력요소로서 고려되어야 함.
- 목표성능 및 골재의 물리적 성능에 대해 식 (10) 이용하여 W/C 값을 결정하고 식 (18) 의해 V_G 값을 결정하면 콘크리트 구성요소들의 단위용적중량은 다음에 의해 산정할 수 있음.



(a) All-lightweight aggregate concrete



(b) Sand-lightweight aggregate concrete

그림 3.92 압축강도 변화에 따른 W/C 및 γ_{con} ($S_i=150$ mm).

$$W = A_1 / V_G \quad (25)$$

$$C = A_1 / X_1 V_G \quad (26)$$

$$G_L = \rho_{GL} V_G \quad (27)$$

$$F_L = \gamma_{FL}(1 - R_{FS})[1 - (v_W + v_C + v_{GL} + v_A)] \quad (28)$$

$$F_S = \gamma_{FS} R_{FS}[1 - (v_W + v_C + v_{GL} + v_A)] \quad (29)$$

- 여기서 w_{GL} , w_{FL} , w_{FS} 는 각각 경량 굽은골재, 경량 잔골재 및 천연모래의 흡수율 임.
- 일반적으로 경량골재는 배합 시 부유에 의한 재료분리를 방지하기 위하여 사전에 충분히 침수 시키기 때문에, 식 (27)~(29)에서 산정한 각 골재의 단위용적 중량은 골재의 함수량을 고려해야 함.

⑥ 경량 콘크리트 배합설계 프로세스

- 목표 CO₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트 배합설계는 위에서 제시한 각각의 모델을 기반으로 그림 3.93과 같은 프로세스로 수행 됨.

1) Input data 입력

사용자가 사용하는 콘크리트 구성재료의 물리적 특성을 입력하는 것으로 Input data로는 시멘트계 재료들의 비중 및 골재의 비중, 직경, 흡수율 등이 있음. 또한 콘크리트의 목표 CO₂ 저감률과 일반적인 목표성능(슬럼프, 콘크리트 압축강도, 공기량)을 설정 함.

2) 경량골재 설계

목표 CO₂ 저감률을 만족하기 위한 경량 콘크리트 배합설계에서는 경량골재 설계단계가 가장 중요 함. 경량골재 설계를 위해서는 전경량 콘크리트 대비 목표 CO₂ 저감률의 설정과 천연모래 치환율을 결정해야 함. CO₂ 저감률을 만족하기 위한 천연모래 치환율은 제시한 모델식(식 6) 또는 현장 적용형 도표를 이용함

3) W/C 결정

W/C는 Input data에서 결정한 f_{ck} 와 천연모래 치환율에 의해 식 (10)으로 산정.

4) 굽은골재 용적비 산정

식 (19)과 식 (20)으로부터 굽은골재 용적비를 산정하기 위한 각각의 변수들을 산정 함.

5) 각 재료들의 단위용적 및 단위중량을 계산.

각 재료들의 단위중량은 골재의 흡수율을 고려하여 포화된 중량측면에서 계산되어야 함.

6) CO₂ 발생량 검토

산출된 콘크리트 배합설계의 CO₂ 발생량을 평가하여 목표 CO₂ 발생량에 만족하는지 검토해야 하고, 만족하지 않는 경우에는 2단계 결합재 설계부터 재산정함.

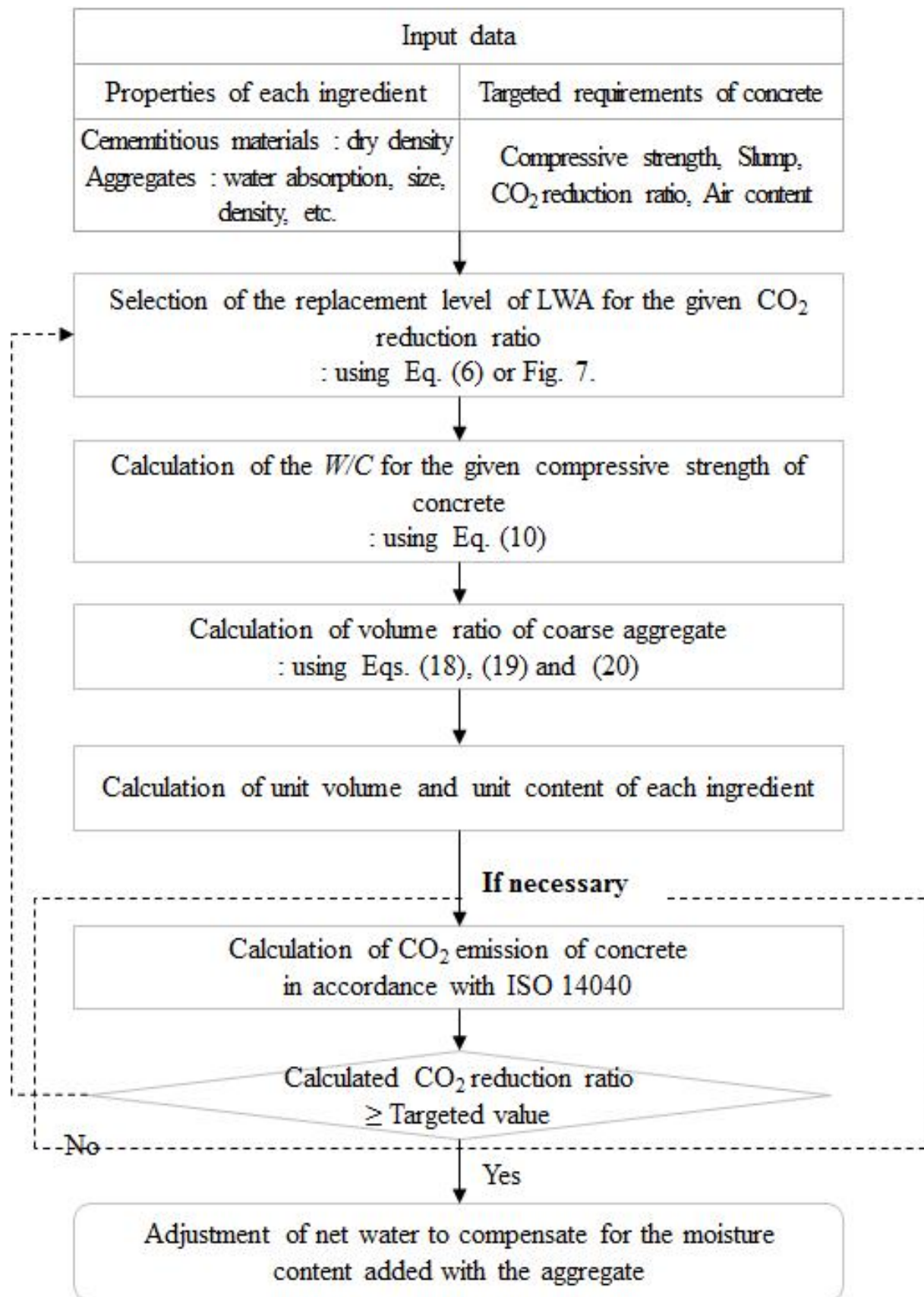


그림 3.93 CO₂ 저감을 고려한 경량 콘크리트의 배합설계 절차

(2) 혼화재 및 경량골재 사용에 따른 CO₂ 및 환경영향 평가

(가) 범위설정

- 콘크리트의 환경영향평가는 ISO 14040 시리즈에서 제시하는 전과정 평가 프로세스를 기반으로 하였으며, 환경영향평가지표는 환경부에서 제시한 ‘한국형 환경영향평가지수 방법론’에 근거.
- 경량콘크리트 배합에 대한 데이터베이스(379개의 실험실 배합)를 바탕으로 콘크리트 CO₂ 배출량 및 전과정 환경영향(지구 온난화, 광화학 산화물생성 및 무생물 자원고갈) 평가를 실시함
- 혼화재(supplementary cementitious materials, SCM) 치환 LWAC의 경우 본 연구에서 제시된 LWAC 배합설계모델에 따라 도출된 전 경량콘크리트(All-LWAC) 및 모래경량콘크리트(Sand-LWAC) 배합을 각각 1개씩 선정하였으며, 이를 바탕으로 SCM 치환에 따른 CO₂ 배출량 및 환경영향(지구 온난화, 광화학 산화물생성 및 무생물 자원고갈) 평가를 실시함.
- 콘크리트의 기능단위는 1m³이며, 시스템 경계는 콘크리트 구성요소들인 원재료들의 채취(요람)에서부터 현장 타설 직전까지 단계로서 구성재료, 운반, 콘크리트 생산 등으로부터의 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 배출물 등을 고려함.
- 시스템 경계를 고려한 콘크리트 공정 흐름도는 그림 3.94 같이 정의 될 수 있음.
- 콘크리트 배합에 대한 데이터 품질로서 시간적 경계는 1990년~2012년이며, 지역적 경계는 서울 중심의 한국으로 함.
- 콘크리트 생산 공정기술의 경계는 표준기의 레미콘 생산 공정을 적용하였으며, 운반단계에서의 환경영향을 산정하기 위하여 레미콘 공장의 위치는 서울 방배동으로 가정하였음.
- OPC는 전남 담양, 굵은 골재는 경기도 광주, 잔골재는 인천, 경량 잔골재 및 굵은 골재는 각각 경기도 광주, 고로슬래그(blast furnace slag, GGBS)는 전남 광양, FA는 경남 하동, 혼화제는 평택에서 운송됨을 가정 함.

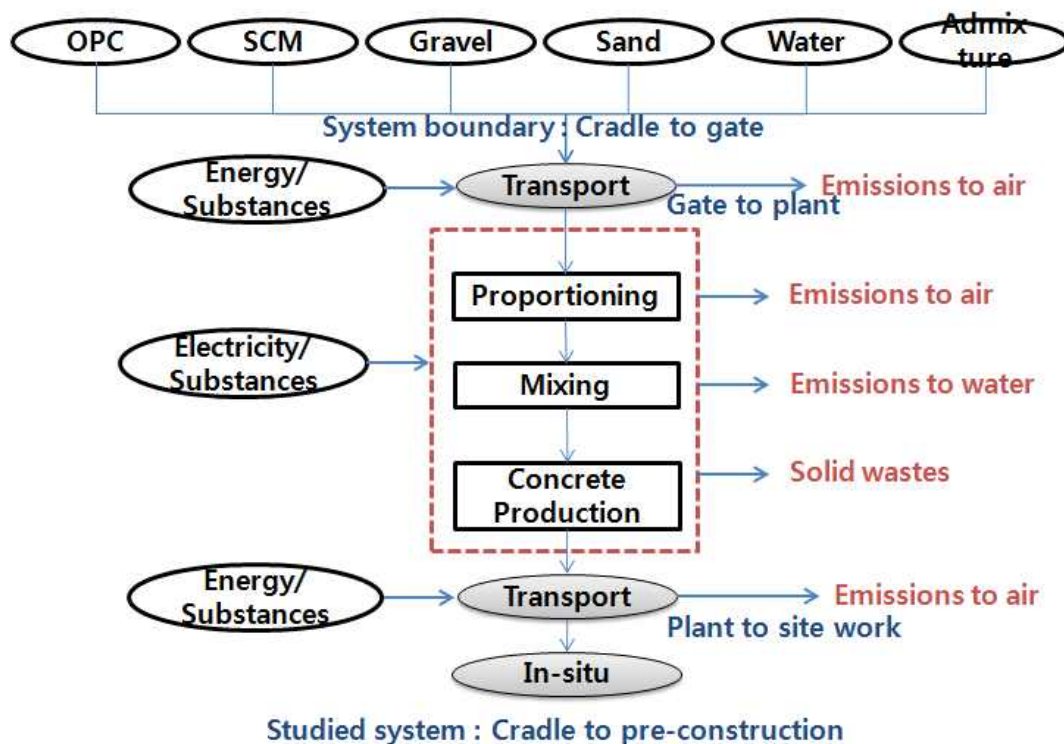


그림 3.94 콘크리트의 공정 흐름도

- 물은 상수도를 통해 조달되므로 운송에서의 투입과 배출을 무시 함.
- 콘크리트 구성 재료들의 운송에서는 시멘트, 고로슬래그와 같은 시멘트계 재료들은 23 톤 용량의 벌크카, 경량 굵은골재 및 잔골재와 같은 골재는 15톤 트럭, 감수제와 같은 혼화제는 1.5톤 트럭을 적용하였고, 생산된 콘크리트는 6m³ 용량의 레미콘트럭에 의해 현장까지 운반됨을 가정함.

(나) 환경영향 평가

① 분류화 및 특성화

- 환경영향 범주를 표 3.47에 나타난 바와 같이 무생물 자원고갈, 지구 온난화, 광화학산화물 생성, 산성화, 부영양화 및 인간독성의 6개로 분류함
- 특성화는 목록항목이 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 단계로 식 (30)에 의해 평가 됨.

$$CI_i = \sum_j CI_{i,j} = \sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j}) \quad (30)$$

- 여기서, CI_i 는 영향범주 i 에 포함된 모든 목록항목(j)들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기이며, $CI_{i,j}$ 는 목록항목 j 가 영향범주 j 에 미치는 영향의 크기이며, $Load_j$ 는 j 번째 목록항목의 환경부하량이며, $eqv_{i,j}$ 는 영향범주 i 에 속한 j 번째 목록항목의 특성화 계수 값임.

표 3.47 환경영향 범주

Impact category	Inventory parameter	Characterization factor	Normalization reference	Weighting factor
Abiotic resource depletion	Anthracite coal	4.61E-03 /yr	2.49E+04 g/pr-yr ²	0.231
	Bituminous coal	4.61E-03 /yr		
	Natural gas	1.671E-02 /yr		
	Crude oil	2.48E-02 /yr		
Global warming	CO ₂	1.00E+00g CO ₂ -eq/g	5.53E-06g CO ₂ -eq/pr-yr	0.288
Photochemical oxidant creation	CO	2.70E+02g C ₂ H ₄ -eq/g	1.03E+04g C ₂ H ₄ -eq/pr-yr	0.065
	SO _x	2.80E-02g C ₂ H ₄ -eq/g		
	NO _x	4.80E-02g C ₂ H ₄ -eq/g		
Acidification	SO _x	1.00E+00g SO ₂ -eq/g	3.98E+04g SO ₂ -eq/pr-yr	0.036
	NO _x	7.00E-01g SO ₂ -eq/g		
	NH ₃	1.88E+00g SO ₂ -eq/g		
Eutrophication	NO _x	1.30E-01g PO ₄ ⁻³ -eq/g	1.31E+04g PO ₄ ⁻³ -eq/pr-yr	0.038
	NH ₃	3.50E-01g PO ₄ ⁻³ -eq/g		
Human toxicity	SO _x	9.60E-02g 1.4DCB-eq/g	1.48E+06g 1.4DCB-eq/pr-yr	0.105
	NO _x	1.20E+00g 1.4DCB-eq/g		

[Note] pr=person, yr=year

② 가중치

- 가중치 부여는 각 영향범주들이 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 영향범주간에 상대적인 우위(중요도)를 결정하는 과정임. 따라서, 가중치 부여는 환경영향평가의 핵심항목 중 하나임.
- 가중치 부여는 과학적인 사실보다는 환경영향에 대한 사회적, 정치적, 윤리적 기준 등에 따라 결정되므로, 국가 및 문화 그리고 시간에 따라 다름.
- 가중치부여는 전문가집단에 의한 Delphi-like방법, 비용으로 환산하는 방법 및 Distance-to-target 등의 다양한 방법에 의해 산정 가능함.
- 이 연구에서는 각 영향범주들의 가중치에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 서열정보에 기반한 계층분석법을 이용하여 산정한 환경부 제시 값을 이용함.

③ 환경영향 평가지표

- 환경영향의 평가는 시대적 상황 및 사회적·정치적 요구사항을 함께 고려해야함. 따라서, 제품설계 시 사용되는 재료, 공정, 운송 및 폐기 등의 환경성을 하나의 점수로 지표화하는 노력이 이루어지고 있음.
- 콘크리트의 환경영향 평가에서도 고려된 시스템 전체에서 j 번 째 목록항목의 환경부하가 i 번째 범주에 미치는 환경영향을 하나의 점수로 나타낼 필요가 있음.
- 이 연구에서는 환경부에서 제시한 한국형 환경영향 평가지표 방법론(식 (31))을 따라 각 범주들에서 콘크리트의 환경영향 크기(WI_i)를 정량화 함.

$$WI_i = \frac{CI_i}{N_i} w_i = \frac{\sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j})}{N_i} w_i \quad (31)$$

- 여기서, N_i 는 영향범주 i 의 정규화 기준값이며, w_i 는 영향범주 i 의 가중치 값임. 해당지역에서 일정기간 배출되는 영향범주 i 의 잠재적인 환경영향 값인 정규화 기준 및 가중치에 대해 환경부에서 제시하는 값들을 표 3.47 에 요약함.

④ 환경영향 지수

- 콘크리트의 환경에 대한 효율성은 소요 압축강도 및 내구년한에 대한 전체 결합재 소비측면에서 정의될 필요가 있음.
- 높은 f_{ck} 를 갖는 콘크리트 부재의 제작을 위해서는 낮은 f_{ck} 의 콘크리트 부재 제작에 비하여 많은 양의 결합재 소비를 필요로 함.
- 하지만 구조부재 콘크리트의 f_{ck} 증가로 인하여 단면 크기를 감소시킬 수 있음.
- 따라서, 단위면적당 사용 콘크리트 양의 감소는 환경영향 크기를 줄일 수 있는 이점이 있음.
- 본 연구에서는 각 범주별 환경영향크기 및 총 환경영향크기를 f_{ck} 로 무차원한 환경영향 지수를 다음과 같이 정의함.

$$\lambda_{CO_2} = \frac{WI_{CO_2}}{f_{ck}} \quad (32)$$

$$\lambda_{ARD} = \frac{WI_{ARD}}{f_{ck}} \quad (33)$$

$$\lambda_{POC} = \frac{WI_{POC}}{f_{ck}} \quad (34)$$

$$\lambda_T = \frac{WI_T}{f_{ck}} \quad (35)$$

- 여기서 λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC} 및 λ_T 는 콘크리트 압축강도 1 MPa 발현을 위한 지구 온난화 지수, 무생물 자원고갈 지수, 광화학 산화물생성 지수 및 총 환경영향 지수이며, WI_{CO_2} 는 지구 온난화 영향의 크기, WI_{ARD} 는 무생물 자원고갈 영향의 크기, WI_{POC} 는 광화학 산화물생성물 영향의 크기이며, WI_T 는 총 환경영향 크기임.

(다) CO₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계를 위한 모델

① CO₂ 지수(C_i)

- 분석에 이용된 데이터베이스(379 개의 실험실)는 모두 일반 굵은 골재를 대신하여 경량 굵은 골재를 사용한 경우로서, 결합재로서는 OPC만을 사용 함.
- R_{FS} 에 따라 평가된 재령 28일 f_{ck} 를 기준으로 C_i 를 나타내었음.
- 경량 콘크리트 압축강도 20 MPa에서 All-LWAC의 C_i 의 범위는 20.9~28.2 kg/m³ · MPa-1이며, Sand-LWAC 배합의 C_i 는 16.8~20.6 kg/m³ · MPa-1의 범위에 있었음.
- 일반적으로 동일 f_{ck} 에 대해서는 All-LWAC의 C_i 가 Sand-LWAC 경우에 비해 비교적 더 높음.
- 콘크리트의 f_{ck} 가 40 MPa 이상으로 증가함에 따라 All-LWAC는 13.4~15.2 kg/m³ · MPa-1로, Sand-LWAC의 경우 12.8~13.47 kg/m³ · MPa-1로 20 MPa 대비 약 35% 감소하는 경향을 나타냄.
- 평가 결과 All-LWAC 및 Sand-LWAC 배합의 f_{ck} 에 따른 C_i 의 변화를 그림 3.96과 같이 단순화 하여 나타낼 수 있음.

② 경량 콘크리트(LWAC)에서 천연모래의 치환율(R_{FS})과 환경영향 지수

- R_{FS} 이 콘크리트의 각 범주별 환경영향 지수 (λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC}) 및 총 환경영향 지수 (λ_T)에 미치는 영향을 그림 3.97에 나타냄.
- 일반적으로 R_{FS} 가 증가할수록 각 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 감소함. 이는 경량 잔골재 사용에 비해 천연모래의 환경영향 크기가 더 작기 때문임.

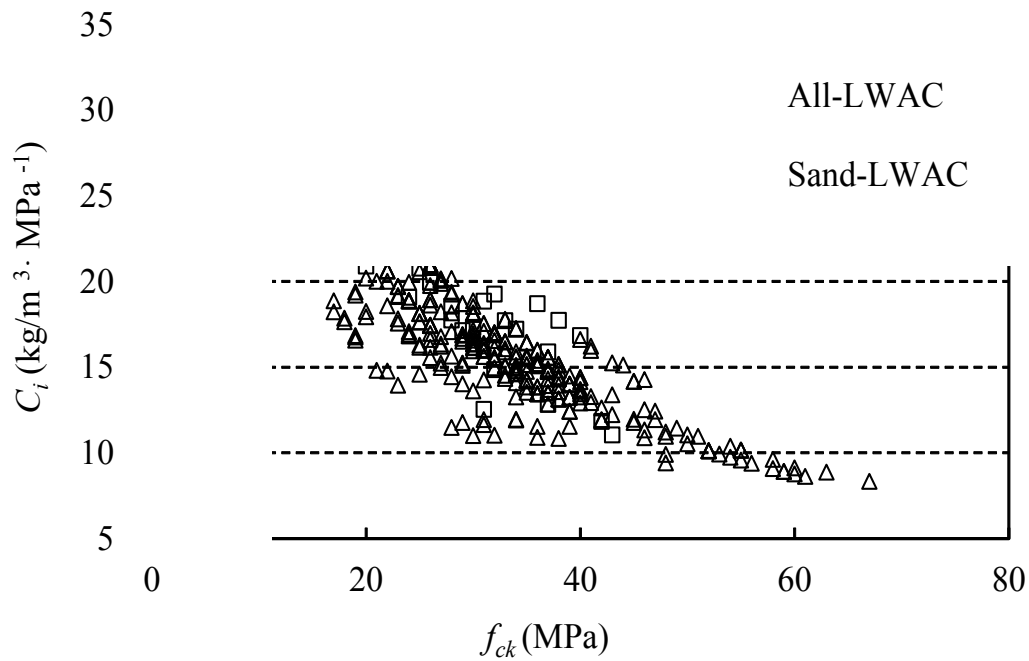


그림 3.95 All-LWAC 및 Sand-LWAC의 f_{ck} 에 따른 C_i

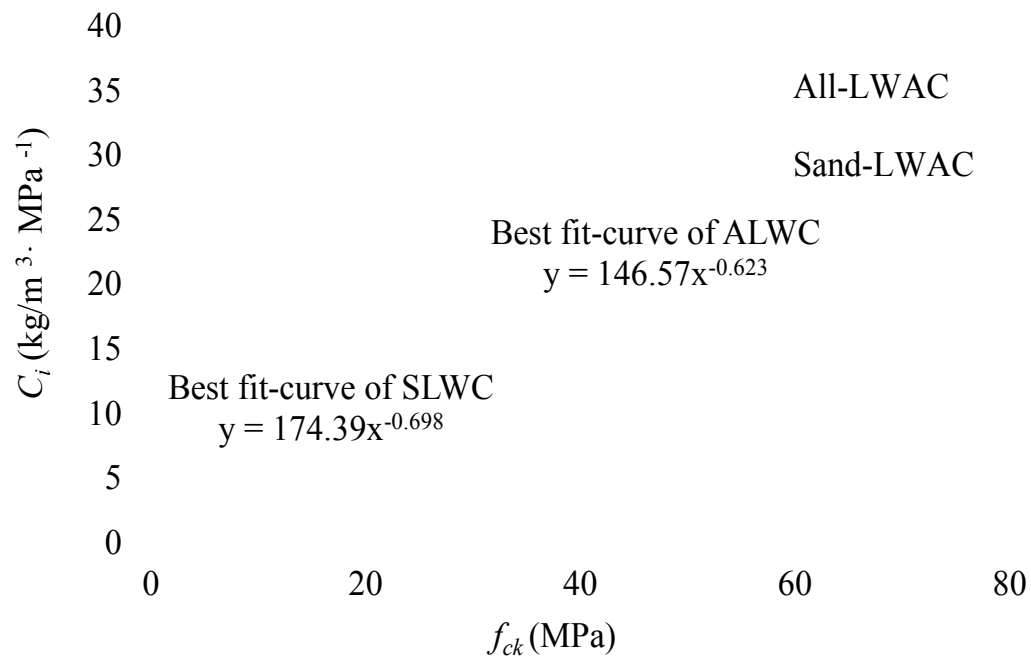


그림 3.96 All-LWAC 및 Sand-LWAC의 f_{ck} 에 따른 C_i 의 단순화 모델

- 결과적으로 λ_{CO_2} 는 콘크리트의 총 환경영향 지수의 66%를 차지하였으며, 경량잔골재의 치환율 증가함에 따라 총 환경영향 지수에서 λ_{CO_2} 이 차지하는 비율은 증가함.

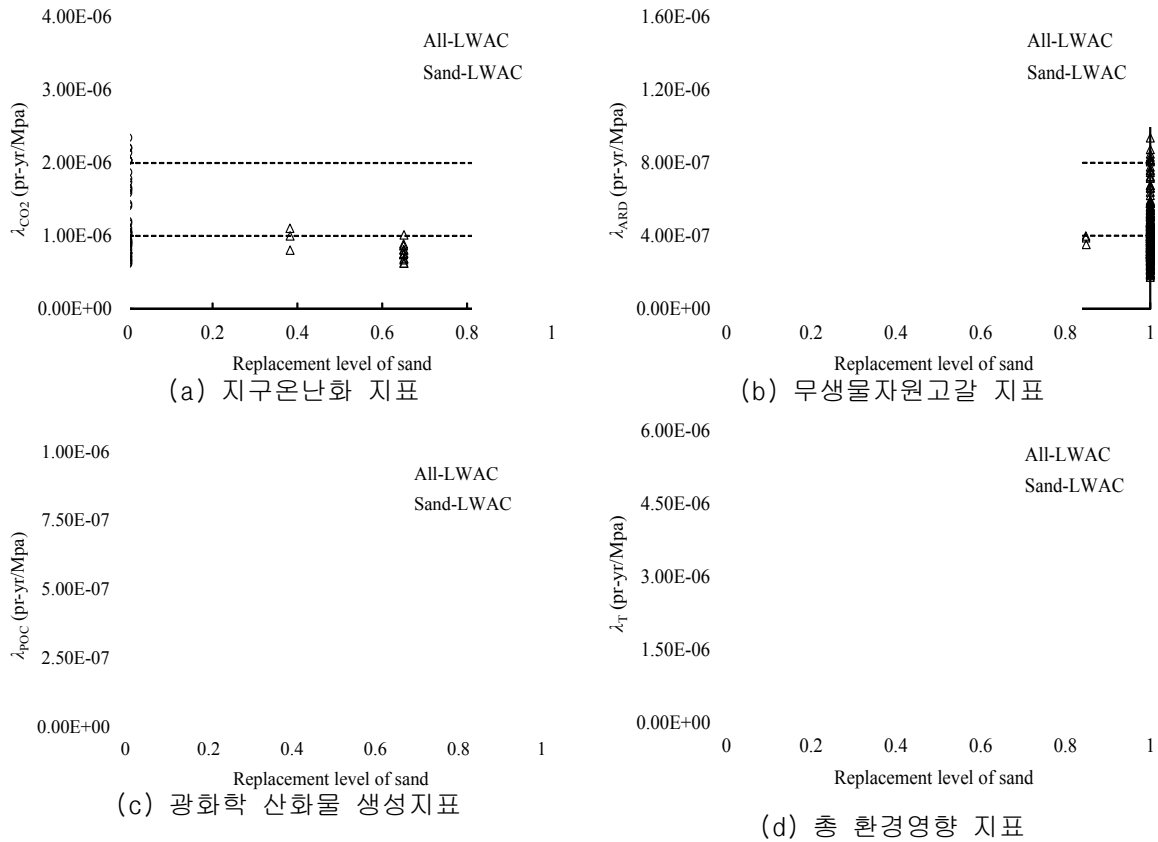


그림 3.97 R_{FS} 변화에 따른 환경영향 지표

(라) 혼화재 치환 경량 콘크리트의 CO₂ 배출량 및 환경영향 평가

- SCM 치환 LWAC의 CO₂ 배출량 및 환경영향 평가를 실시하기 위하여 본 연구에서 제안된 경량 콘크리트 배합 설계모델에 따라 All-LWAC 및 Sand-LWAC 배합($f_{ck}=24$ MPa, $v_A=3.5\%$, $S_i=180$ mm, $\gamma_{con}=1700$ kg/m³)을 각각 1개씩 선정하였으며, 이를 바탕으로 혼화재 종류 및 치환율에 따라 배합표를 도출하였음.
- 모든 배합의 단위 결합재량(kg/m³) 및 물-결합재비는 동일하게 가정하였으며, 단위 결합재량에서 혼화재 치환에 따른 압축강도의 감소를 반영하였음.
- 고로슬래그, 플라이 애쉬 등의 혼화재 치환비율은 결합재 대비 10~60%으로 가정하였으며, 최대 3성분계 혼합 배합의 CO₂ 배출량 및 환경영향평가를 실시하였음.

① CO₂ 지수(C_i)

- SCM 치환 LWAC의 CO₂지수(C_i)를 그림 3.98에 나타냄.
- All-LWAC의 경우 C_i 는 13.48~23.86 kg/m³ · MPa-1의 범위에 있었으며, Sand-LWAC의 경우 17.52~31.75 kg/m³ · MPa-1의 범위에 있었음.
- All-LWAC 및 Sand-LWAC 배합 모두 f_{ck} 변화에 따른 C_i 는 OPC+FA 배합의 경우가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 OPC+GGBS 배합 및 OPC+FA+GGBS 배합 순이었음.

- f_{ck} 증가에 따른 C_i 의 증가 기울기는 OPC+FA+GGBS 배합의 경우가 가장 크게 나타남.
- 혼화재 치환 종류에 관계없이 LWAC의 f_{ck} 가 24MPa인 경우 All-LWAC에 비해 Sand-LWAC의 C_i 는 약 24% 낮게 나타났는데, 이는 천연모래 사용에 따른 CO₂ 배출량 감소결과로 평가 됨.
- SCM 치환 종류에 관계없이 f_{ck} 증가에 따른 C_i 의 증가는 SCM의 치환비율이 60%에서 10%로 감소한 결과임.
- 따라서, f_{ck} 증가에 따른 C_i 의 증가는 SCM의 치환율 감소에 따른 영향이며, SCM 사용량의 감소로 인한 CO₂ 배출량의 증가로 평가 될 수 있음.
- SCM 치환 종류별 f_{ck} 변화에 따른 C_i 를 단순화 하여 그림 19에 나타 냄.

② 환경영향 지수

- Sand-LWAC 및 All-LWAC에서 SCM의 치환율이 콘크리트의 각 범주별 환경영향 지수 (λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC}) 및 총 환경영향 지수(λ_T)에 미치는 영향을 그림 19 및 20에 나타냄.
- 일반적으로 SCM의 치환율이 증가할수록 각 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 감소함. 이는 OPC 사용에 비해 혼화재의 환경영향 크기가 더 작기 때문임.

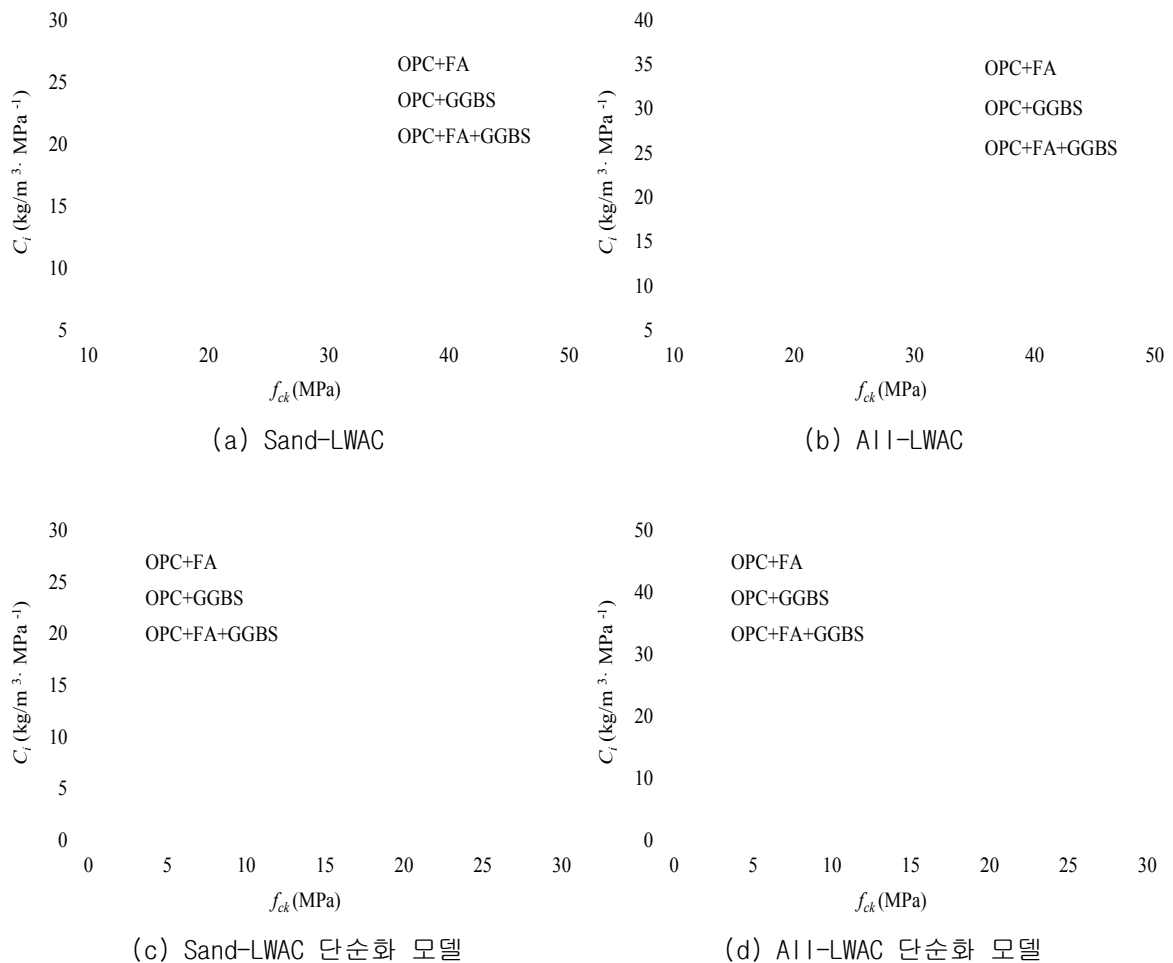
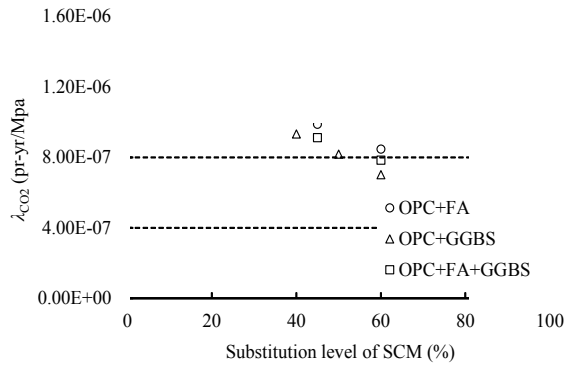
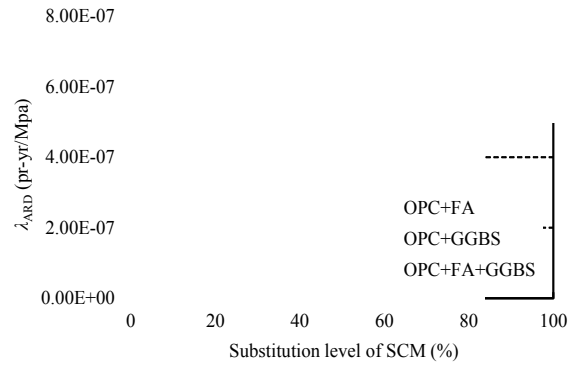


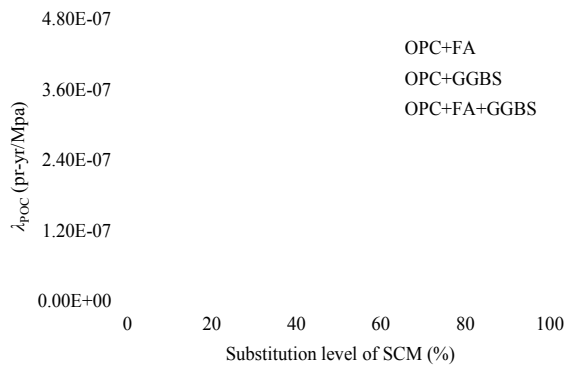
그림 3.98 SCM 치환 종류 별 LWAC의 f_{ck} 변화에 대한 C_i 및 단순화 모델



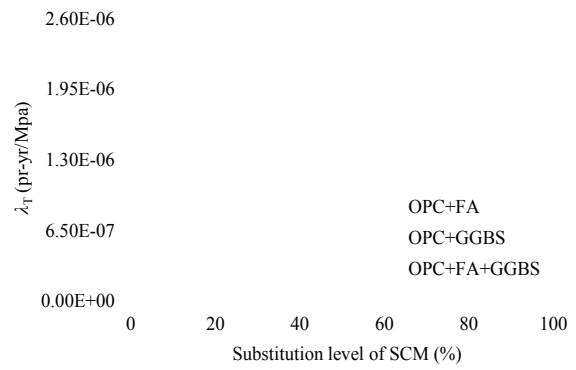
(a) 지구온난화 지표



(b) 무생물자원고갈 지표

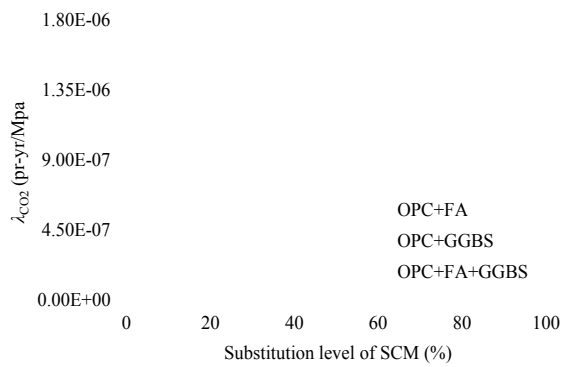


(c) 광화학 산화물 생성지표

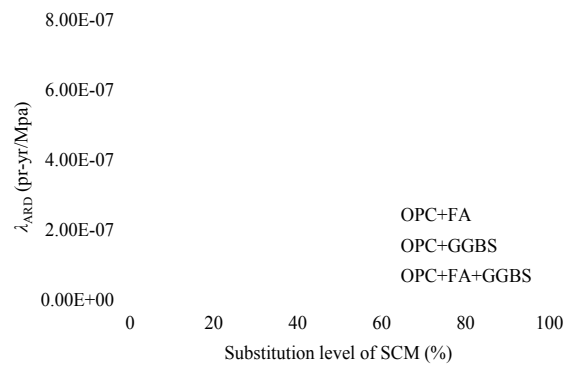


(d) 총 환경영향 지표

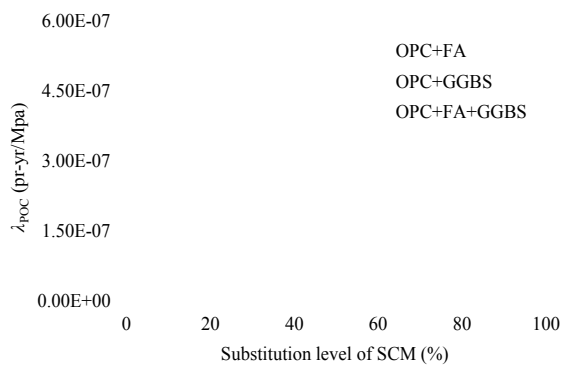
그림 3.100 Sand-LWAC의 SCM 치환비율에 따른 환경영향 지표



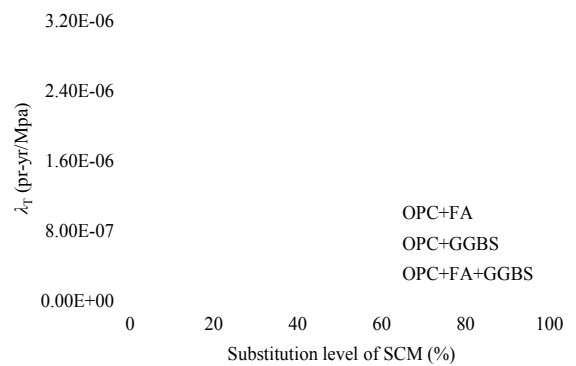
(a) 지구온난화 지표



(b) 무생물자원고갈 지표



(c) 광화학 산화물 생성지표



(d) 총 환경영향 지표

그림 3.101 Sand-LWAC의 SCM 치환비율에 따른 환경영향 지표

(3) CO₂ 저감 결합재 설계를 위한 현장적용 도표 제시

(가) 데이터베이스(database, DB)

- 현장적용 도표제시를 위하여 사용된 데이터베이스는 5231개의 실험실 배합 및 7306개의 레미콘 배합이며, 배합환경에 따라 구성 재료의 혼합비율 차이는 존재 하지 않음.
- 6066개의 OPC 배합, 2,421개의 OPC+FA 배합, 1,424개의 OPC+GGBS 배합, 700개의 OPC+SF 배합, 4,118개의 OPC+FA+GGBS 배합, 60개의 OPC+FA+SF 배합 및 60개의 OPC+GGBS+FA 배합이 이용 됨.
- 2성분계 결합재를 이용한 배합의 경우 SCM 치환율은 FA가 3~67%, GGBS가 3~80%, SF가 3~40% 이었으며, 3성분계 결합재를 이용한 배합의 경우 FA의 치환율은 3~10%, GGBS의 치환율은 3~80% 범위에 있었음.

(나) CO₂ 저감에 기반한 콘크리트 배합설계

- CO₂ 저감 결합재 설계를 위한 콘크리트의 혼합비율 산정은 절대 체적법(콘크리트의 용적은 구성 재료의 체적의 합과 동일)가정에 근거 함.
- 절대 체적 법을 이용한 각 성분의 단위 함량을 계산하는 단계는 콘크리트 배합 정보중 적어도 물-결합재 비(W/B), 결합재(B) 및 잔골재율(S/a)의 3가지 요소를 필요로 함.
- 콘크리트 생산시 CO₂ 배출량을 줄이기 위한 SCM의 적절한 혼합비율을 제시하는 것으로서, 목표로 하는 CO₂ 배출량의 산정은 콘크리트의 초기 S_i , f_{ck} 및 ν_A 의 영향을 받음.
- CO₂ 배출량 평가를 위한 평가 절차는 ISO 14040 시리즈에서 제시하고 있는 LCA 전과정 평가 절차를 기반으로 개발 된 방법에 따름.
- 콘크리트 제작과정에서 필요한 원재료들의 제조, 운송 및 플랜트 설비는 국내의 LCI 데이터 베이스를 따름.
- 콘크리트의 기능단위는 1m³이며, 시스템경계는 콘크리트 구성요소인 원재료채취(요람)에서부터 현장타설 직전까지 단계로서 구성재료, 운반, 콘크리트 생산 등으로부터의 영향을 고려함.
- 일반적으로 콘크리트의 CO₂ 배출은 주로 시멘트 사용량의 증감에 따라 영향을 받는데, 이 결과 CO₂ 배출량은 SCM의 치환 증감에 따라 영향을 받는 것으로서도 표현이 가능함.
- 즉, 목표 f_{ck} 를 위한 결합재의 CO₂ 발생량은 SCM 치환율의 영향이 큼.
- 따라서, CO₂ 배출 감소수준 결정에 있어 단위 결합재량 및 다양한 SCM의 치환수준을 결정하는 것은 필수적임.

표 3.48 데이터베이스에서 각 변수들의 분포 (a)

	Mixing type	Type of binder	Range of B (kg/m ³)									Total
			50-250	250-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-1,000	1,000-1,400	
B (kg/m ³)	Laboratory mix	OPC	10	179	1,050	876	612	248	43	23	1	3,042
		OPC+FA	—	89	361	318	169	44	24	—	1	1,006
		OPC+GGBS	2	9	120	67	40	33	30	53	21	375
		OPC+SF	—	3	31	92	180	152	126	92	24	700
		OPC+FA+GGBS	—	2	5	3	—	—	—	—	—	10
		OPC+FA+SF	—	—	2	8	10	8	8	2	—	38
		OPC+GGBS+SF	—	—	—	—	3	7	18	29	3	60
	Plant mix	OPC	29	184	458	42	—	—	—	—	—	713
		OPC+FA	64	426	741	152	30	2	—	—	—	1,415
		OPC+GGBS	25	135	646	223	16	2	—	1	—	1,048
		OPC+FA+GGBS	321	1,547	1,989	217	26	4	4	—	—	4,108
		OPC+FA+SF	—	—	—	18	2	2	—	—	—	22
f_{ck} (MPa)	Mixing type	Type of binder	Range of f_{ck} (MPa)									Total
			7-20	20-30	30-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-170	
	Laboratory mix	OPC	121	487	601	978	498	224	105	9	1	3024
		OPC+FA	110	322	168	281	109	9	—	—	—	999
		OPC+GGBS	15	50	67	73	68	45	27	7	—	352
		OPC+SF	1	4	21	95	170	176	116	94	23	700
		OPC+FA+GGBS	2	3	5	—	—	—	—	—	—	10
		OPC+FA+SF	—	—	3	8	20	4	1	2	—	38
		OPC+SF+GGBS	—	—	—	3	13	14	12	13	5	60
	Plant mix	OPC	116	505	86	6	—	—	—	—	—	713
		OPC+FA	315	907	124	57	4	—	—	—	—	1,407
		OPC+GGBS	104	641	217	71	12	—	—	—	—	1,045
		OPC+FA+GGBS	1,025	2,613	388	71	1	1	1	—	—	4,100
		OPC+FA+SF	—	—	20	—	—	2	—	—	—	22

표 3.49 데이터베이스에서 각 변수들의 분포 (b)

	Mixing type	Type of binder	Range of W/B (%)								Total	
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80		80-90
W/B (%)	Laboratory mix	OPC	—	2	407	944	871	585	197	40	5	3,051
		OPC+FA	—	2	93	341	293	237	39	—	1	1,006
		OPC+GGBS	—	73	69	65	72	80	11	—	1	371
		OPC+SF	—	81	437	124	40	9	5	—	—	696
		OPC+FA+GGBS	—	—	9	22	65	35	6	—	—	137
		OPC+FA+SF	—	2	21	11	4	—	—	—	—	38
		OPC+GGBS+SF	—	30	27	2						59
	Plant mix	OPC	—	—	1	9	199	335	149	17	3	713
		OPC+FA	—	—	20	81	408	616	254	28	7	1,414
		OPC+GGBS	—	1	8	127	413	378	109	13	—	1,049
		OPC+FA+GGBS	—	—	24	169	863	1,611	875	48	28	3,618
		OPC+FA+SF	—	—	2	12	8	—	—	—	—	22

	Mixing type	Type of binder	Range of S/a (%)								Total	
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80		80-90
S/a (%)	Laboratory mix	OPC	1	6	18	757	1,987	208	65	—	9	3,051
		OPC+FA	2	1	10	210	674	106	—	—	3	1,006
		OPC+GGBS	3	3	61	99	194	8	1	—	—	369
		OPC+SF	6	10	92	357	186	18	27	—	—	696
		OPC+FA+GGBS	—	—	—	1	108	28	—	—	—	137
		OPC+FA+SF	—	—	—	14	14	10	—	—	—	38
		OPC+SF+GGBS	—	—	21	35	4	—	—	—	—	60
	Plant mix	OPC	—	—	34	81	387	210	1	—	—	713
		OPC+FA	—	—	—	—	1,023	391	—	—	—	1,414
		OPC+GGBS	—	—	—	—	756	561	2	—	30	1,349
		OPC+FA+GGBS	—	—	—	15	2,138	1,444	12	—	9	3,618
		OPC+FA+SF	—	—	—	—	22	—	—	—	—	22

표 3.50 데이터베이스에서 각 변수들의 분포 (c)

R_G (%)	Mixing type	Type of binder	Range of R_G (%)									Total
			3-10	0-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-100	
R_G (%)	Laboratory mix	OPC+GGBS	24	37	103	96	51	40	16	8	-	375
	Plant mix	OPC+GGBS	77	175	430	183	20	154	5	4	-	1,048
R_F (%)	Mixing type	Type of binder	Range of R_F (%)									Total
			3-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_F (%)	Laboratory mix	OPC+FA	243	532	114	325	19	10	6	-	-	1,249
	Plant mix	OPC+FA	6	1,269	138	1	1	-	-	-	-	1,415
R_S (%)	Mixing type	Type of binder	Range of R_S (%)									Total
			3-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_S (%)	Laboratory mix	OPC+SF	348	293	56	3	-	-	-	-	-	700
R_F+R_G (%)	Mixing type	Type of binder	Range of R_F+R_G (%)									Total
			9-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_F+R_G (%)	Laboratory mix	OPC+FA+GGBS	2	3	5	-	-	-	-	-	-	10
	Plant mix	OPC+FA+GGBS	-	59	331	971	796	1,279	643	21	-	4,100
R_S+R_G (%)	Mixing type	Type of binder	Range of R_S+R_G (%)									Total
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_S+R_G (%)	Laboratory mix	OPC+SF+GGBS	-	-	19	26	9	5	1	-	-	60
R_F+R_S (%)	Mixing type	Type of binder	Range of R_F+R_S (%)									Total
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_F+R_S (%)	Laboratory mix	OPC+FA+SF	1	6	20	11	-	-	-	-	-	38
	Plant mix	OPC+FA+SF	-	20	2	-	-	-	-	-	-	22

① 결합재 지수(B_i) 및 CO_2 지수(C_i)

- 수집된 콘크리트 배합에서 SCM 치환에 따른 실험결과의 분석을 통해 f_{ck} 와 B_i 의 관계를 나타냄(그림 3.102).
- B_i 는 f_{ck} 의 증가함에 따라 감소하며, 이는 f_{ck} 가 증가함에 따라 단위 압축강도(1 MPa) 발현을 위한 결합재 양의 설계가 감소됨을 의미 함.
- B_i 의 감소속도는 SCM 치환에 관계없이 f_{ck} 가 약 60 MPa 이상에서 점차 완화되어 약 4~5 $\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}$ -1에 수렴하는 경향을 보임.
- GGBS가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 OPC 콘크리트와 매우 비슷한 값을 보임.
- SF가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 f_{ck} 가 약 40 MPa 이하에서 OPC 콘크리트보다 낮음.
- 반면 FA가 치환된 콘크리트의 B_i 값은 동일 f_{ck} 의 OPC 콘크리트보다 다소 높았는데, 이는 FA가 치환된 콘크리트에서는 결합재 양이 OPC 콘크리트보다 다소 증가하고 있음을 의미 함.
- 수집된 콘크리트 배합에서 SCM 치환에 따른 실험결과의 분석을 통해 f_{ck} 와 C_i 의 관계를 그림 3.103에 나타 냄.
- f_{ck} 변화에 관계없이 SCM이 치환된 콘크리트의 C_i 값은 OPC 콘크리트와 비교하여 비교적 낮게 나타남.
- 동일 f_{ck} 에서 SF가 치환된 콘크리트의 C_i 값이 가장 낮게 나타났으며, FA가 치환된 콘크리트는 GGBS가 치환된 콘크리트에 비해 다소 낮은 C_i 을 보임.

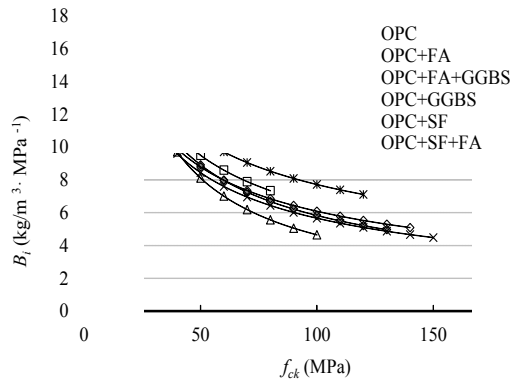


그림 3.102 B_i 와 압축강도의 관계

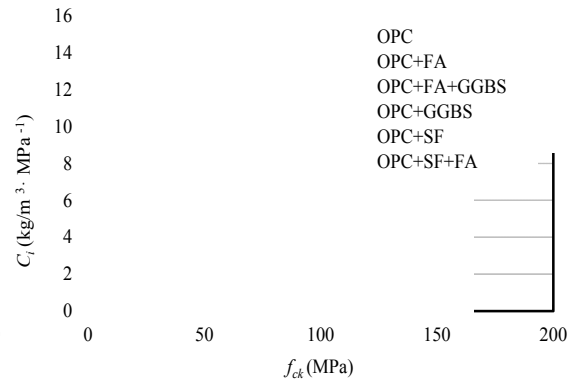


그림 3.103 C_i 와 압축강도의 관계

② 결합재량 및 SCM의 치환 비율 결정

- 콘크리트의 CO_2 저감을 위한 효율적인 결합재 사용은 단위 f_{ck} 를 만족하는 최소 OPC 비율과 단위 결합재 양의 관점에서 검토되어야 함.
- 콘크리트 f_{ck} , 결합재 양 및 CO_2 배출량의 상호 관계는 B_i 및 C_i 의 개념을 도입하여 설명이 가능하며, 이들 지수(B_i , C_i)의 관계를 유도하기 위해서 다음 조건을 고려한 분석이 필요함.
 - 결합재 양이 0이면 CO_2 배출량은 0으로 간주 함.
 - C_i 는 SCM의 종류와 치환율에 따라 결정됨. 이는 각각의 SCM은 각기 다른 전과정 목록을 가지며, 콘크리트의 CO_2 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 OPC 양이기 때문.
 - 각 SCM은 고유의 CO_2 원단위를 가지고 있으므로 FA, GGBS 및 SF의 치환에 따른 콘크리트 CO_2 저감은 개별적산법으로 산정됨.

- 이와 같은 경계조건을 고려하면 B_i 와 C_i 의 관계는 다음 식과 같이 모델링 될 수 있음

$$C_i = 0.94 \left[1 - (R_G^{1.06} + R_F^{1.1} + R_S^{0.92}) \right] B_i \quad (36)$$

- 여기서 R_G , R_F , R_S 는 각각 GGBS, FA 및 SF의 치환율 임.
- 위 식에서 $(R_G^{1.06} + R_F^{1.1} + R_S^{0.92})$ 는 OPC 콘크리트에서 SCM 치환 정도에 따른 CO_2 저감 비(γ_{CO_2})를 나타냄.
- 따라서, 콘크리트의 목표 CO_2 저감율, SCM의 종류 및 치환율의 결정은 위의 식 (36)을 통해 선택 될 수 있음.
- 일반적으로, 결합재 증가에 따라 f_{ck} 의 증가율은 점차적으로 감소 함.
- 또한, SCM의 종류와 치환율에 따라 결합재량이 변화하는데, OPC 콘크리트와 동일한 f_{ck} 를 갖기 위해 SF를 사용하는 콘크리트는 약간 적은 양의 결합재를 사용해야 하고, FA나 GGBS를 이용하는 콘크리트의 경우 더 많은 결합재량을 필요로 함.
- 이 결과, B_i 는 SCM의 개별적인 사용량을 고려하여야 하며, 제시된 f_{ck} 값과 목표 CO_2 저감율로서 나타 낼 수 있음.

$$B_i = 44(f_{ck})^{-0.4} [1 + R_G^5 + R_F^6 - R_S^3] \quad (37)$$

- B_i 의 정의로부터, 위의 식은 다음과 같이 정리 할 수 있음.

$$B = 44(f_{ck})^{0.6} [1 + R_G^5 + R_F^6 - R_S^3] \quad (38)$$

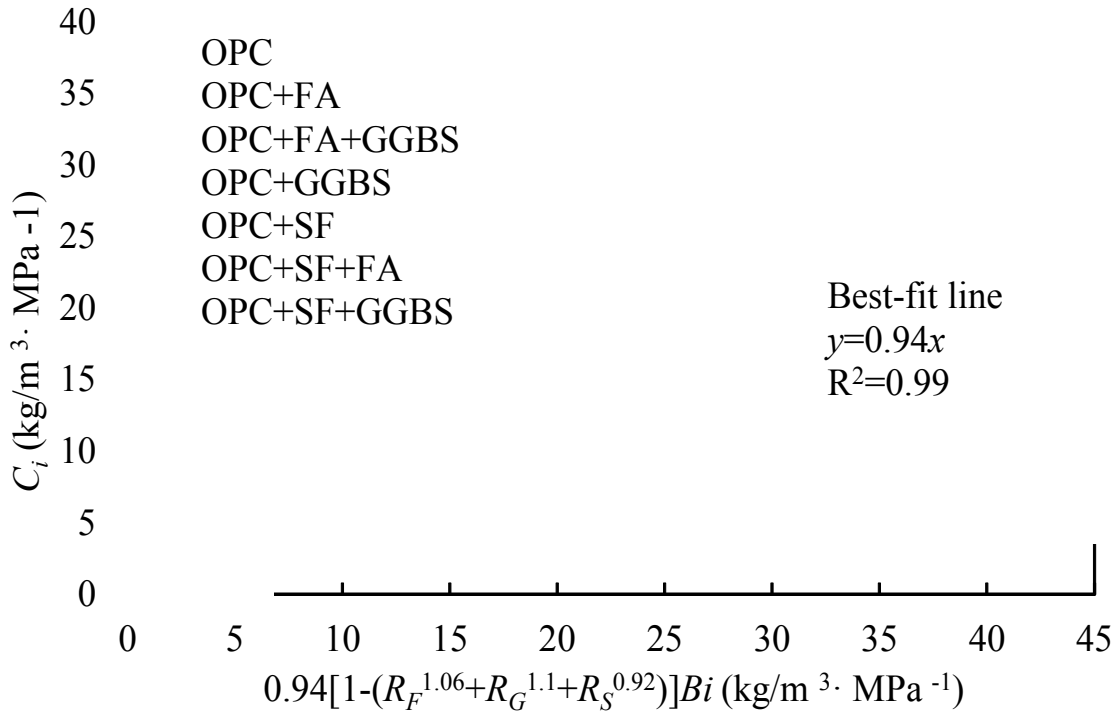


그림 23. B_i 와 C_i 의 관계

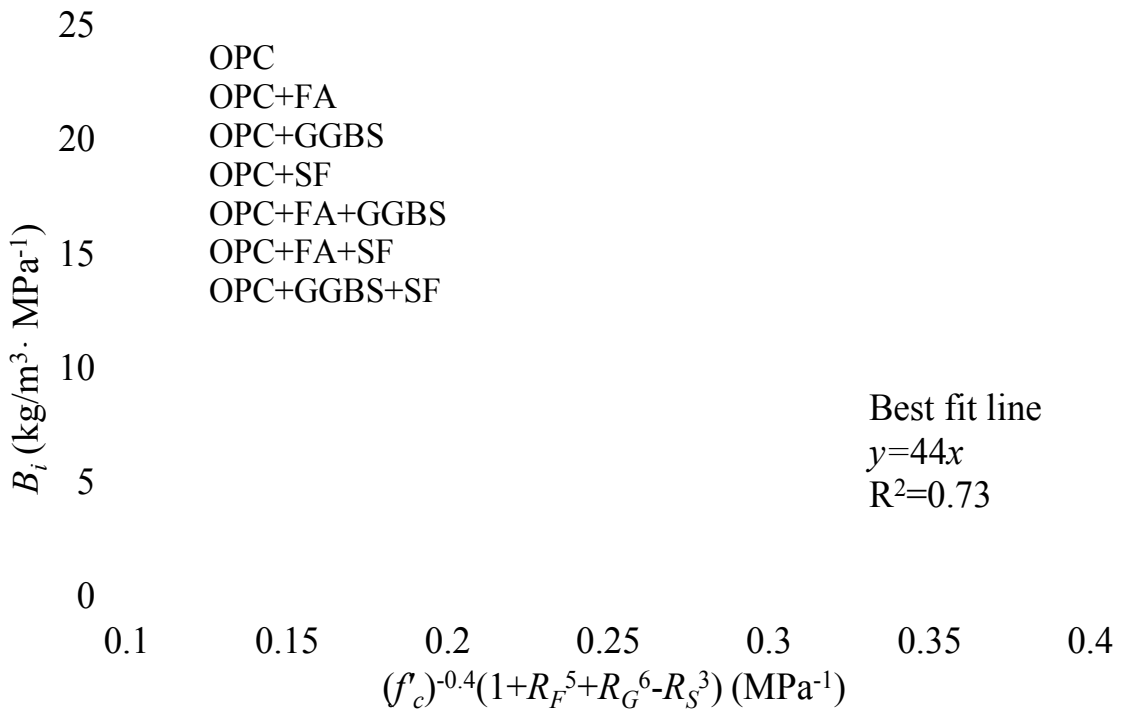


그림 3.105 콘크리트 압축강도에 따른 결합재 선정 모델

③ W/B 의 결정

- 일반적으로 콘크리트의 f_{ck} 는 W/B 와 ν_A 의 영향을 받음.
- W/B 에 따른 f_{ck} 변화는 SCM의 종류 및 치환비율에 따라 상이하며, OPC 콘크리트와 동일한 f_{ck} 를 얻기 위해 SCM 콘크리트는 낮은 W/B 를 필요로 함.
- DB의 분석을 통해 f_{ck} 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있음.

$$\frac{f_{ck}}{f_0} = 1.12 \left[W/B (1 + R_G^2 + R_F^3 - R_S^2) (\nu_A)^{0.1} \right]^{-1.06} \quad (39)$$

- 여기서 f_0 (=10 MPa)는 콘크리트의 재령 28일 f_{ck} 에 대한 참고 값임.
- SCM의 치환율은 식 (36)을 통해 목표 CO_2 저감율을 고려하여 미리 결정 될 수있음. 따라서 식 (39)로부터 W/B 는 다음 식과 같이 결정 될 수 있음.

$$\frac{W}{B} = 1.11 \left(\frac{f_0}{f_{ck}} \right)^{0.94} \left[(1 + R_G^2 + R_F^3 - R_S^2) (\nu_A)^{0.1} \right]^{-1} \quad (40)$$

④ S/a 의 결정

- 콘크리트의 유동성은 감수제종류, 혼입양 뿐만아니라 SCM의 종류, 치환율에도 영향을 받음.
- 유동성 향상에 대한 SCM의 기여도는 GGBS와 SF가 FA에 비해 상대적으로 낮음.
- 하지만, 콘크리트의 S_i 에 대한 감수제와 SCM 종류에 따른 화학적 성분, 투입량 및 배합수의 온도 등 고려해야할 요인이 광범위하므로 목표 S_i 에 대한 S/a 의 영향을 평가하기 위해서는 감수제 및 SCM이 콘크리트 유동성에 미치는 영향을 배제할 필요가 있음.

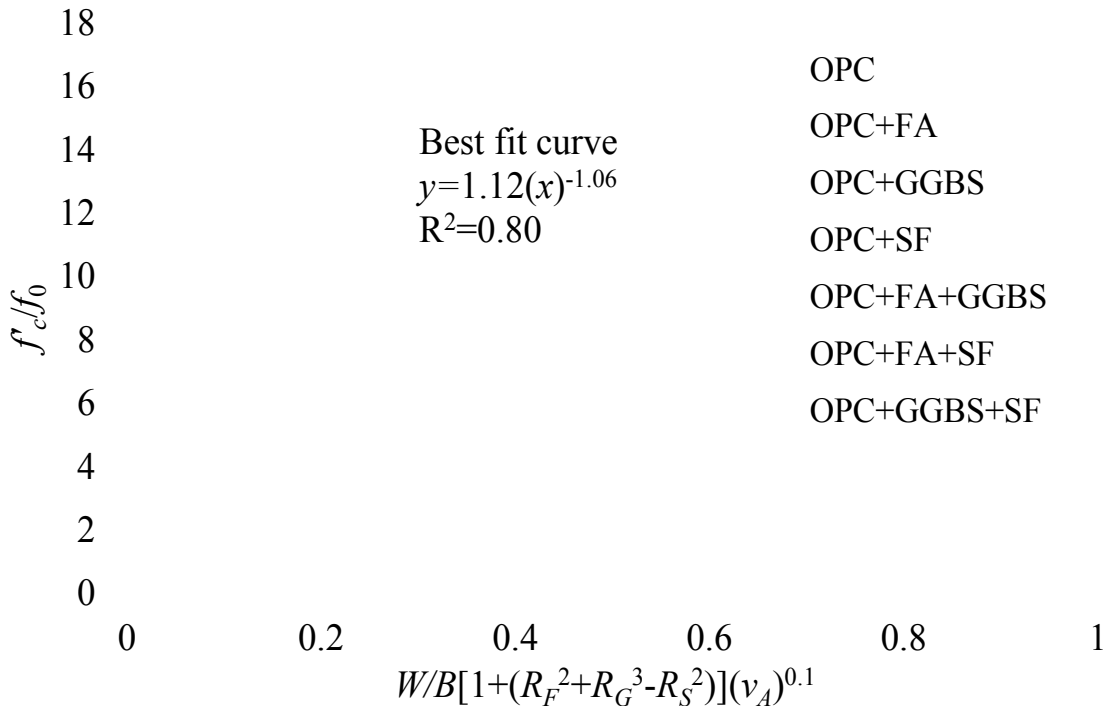


그림 3.106 회귀 분석을 통한 콘크리트의 압축강도 예측모델

- 즉, 콘크리트 목표 S_i 에 대해 결정되는 S/a 는 초기 배합실험을 위한 참고 값으로 활용될 수 밖에 없는 한계가 존재 함.
- 감수제를 사용하지 않은 콘크리트의 유동성은 주로 W/B , 단위수량(W), 골재직경(d_a), 조립률(F_m), S/a 및 v_A 등에 의해 결정 됨.
- W 는 결합재와 골재비, 잔골재의 입도분포, 초기 S_i 에 대해 독립적인 것으로 가정될 수 있음.
- 수분 함량 및 다른 혼합비율이 고정되는 경우, 유동성은 골재직경(d_a), 조립률(F_m) 그리고 골재의 양에 의해 지배됨.
- W , W/B , S/a , d_a 및 F_m 과 같은 요인들이 콘크리트 유동성에 미치는 영향은 상호의존적이므로, 이러한 요인들이 콘크리트 유동성에 미치는 영향을 정확히 확인하기에는 어려움이 따름.
- 감수제와 SCM을 사용하지 않은 콘크리트의 초기 S_i 와 다른 영향 인자의 관계를 분석하였으며, 그 결과 콘크리트 배합단계에서 목표 S_i 에 대한 S/a 의 초기 값 결정을 위한 최적값, 상한값 및 하한값을 제시함으로써 임의의 범위 내에서 설계자가 선택 할 수 있도록 함.

$$\frac{S_i}{S_0} = -3.825X^2 + 34.895X - 77.433 \text{ for optimum curve} \quad (41a)$$

$$\frac{S_i}{S_0} = -4.48X^2 + 40.99X - 91.54 \text{ for upper limit curve} \quad (41b)$$

$$\frac{S_i}{S_0} = -5.31X^2 + 47.15X - 102.58 \text{ for lower limit curve} \quad (41c)$$

$$X = \left(\frac{W}{B}\right)\left(\frac{S}{a}\right) + \left(\frac{W}{W_0}\right) + \left(\frac{d_a}{d_0}\right)^{0.2} + (F_m)^{0.1} \quad (42)$$

- 여기서 S_0 (= 100mm), W_0 (= 100kg/m³에서), 및 d_0 (= 25mm)는 각각 콘크리트의 슬럼프값, 단위수량 및 골재의 최대직경에 대한 참고값을 의미 함.
- 식 (41)에서 결정된 X 값에 대해 W/B 및 W 는 식 (40)과 식(41)을 이용하여 결정하면, 소요 S_i 에 대한 S/a 를 얻을 수 있음.
- 즉, 소요 S_i 에 대한 S/a 값은 식 (41)을 이용하여 상한값과 하한값 사이에서 사용자가 적절하게 결정해야 함.

⑤ 콘크리트 배합강도(f_{cr})의 결정

- 콘크리트 배합강도(f_{cr})는 콘크리트 배합 설계시 목표 콘크리트 f_{ck} 를 만족하기 위한 보정계수를 곱한 값으로 산정됨.
- 본 연구에서는 f_{cr} 산정에 대하여 ACI 318-11에서 제시한 모델을 사용함(식 43).

$$f_{cr} = A_1 f_{ck} + B_1 \quad (43)$$

- 여기서, A_1 과 B_1 은 계수 값으로 f_{ck} 가 21 MPa 이하일 때는 각각 1.0과 7.0이며, f_{ck} 가 21 MPa이상 35 MPa 이하일 때는 1.0과 8.3 그리고 f_{ck} 가 35 MPa 이상인 경우에는 1.1과 5.0을 사용함.

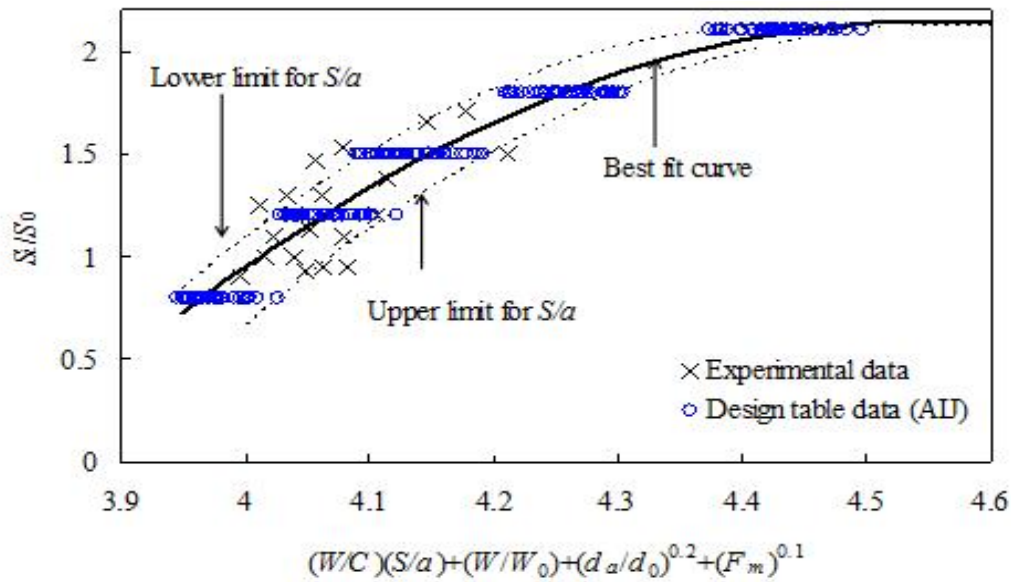


그림 3.107 콘크리트의 초기 S_i 예측 모델

⑥ 저탄소 콘크리트의 배합설계 프로세스

- 목표 CO₂ 저감을 고려한 콘크리트 배합설계는 위에서 제시한 각각의 모델을 기반으로 다음과 같은 프로세스로 수행될 수 있음.

1) 입력 데이터

이 단계에서는 사용자가 사용하는 콘크리트 구성재료의 물리적 특성 및 목표 성능(슬럼프, 콘크리트 압축강도, 공기량 및 CO₂ 저감율)을 입력함. 콘크리트 구성재료들의 물리적 특성으로는 시멘트계 재료들의 비중 및 골재의 비중, 직경, 흡수율 등임.

2) 결합재 설계

목표 CO₂ 저감율을 만족하기 위한 결합재 설계를 위해서는 사용되는 SCM과 그 치환율을 결정해야 함. 이 결합재 설계는 식 (1)을 이용함. 식 (1)과 식 (3)을 통해 그림 3.108과 같이 간편한 설계용 도표를 작성 할 수 있음.

3) W/B 결정

결정된 결합재 양에 대해 목표 압축강도를 만족시키기 위한 W/B는 식 (5)에 의해 산정 함.

4) S/a 산정

목표 슬럼프에 대한 초기 S/a 값은 식 (6)과 식 (7)로 산정하는데, 산정된 S/a는 최소 값인 0.25와 최대 값인 0.55이하의 범위에 있도록 함.

5) 절대용적 배합방법 검토

이전 단계에서 결정된 콘크리트 구성재료(시멘트계 재료, 골재, 물, 공기량 등)의 용적의 합이 1m³에 부합하는지 검토 함.

6) CO₂ 발생량 검토

산출된 콘크리트 배합설계에 대해 CO₂ 발생량을 평가하고 목표 CO₂ 저감율의 만족여부를 검토함. 만일 목표 CO₂ 저감율을 만족하지 않는 경우에는 2단계 결합재 설계에서 SCM 종류와 치환율을 재설계 함.

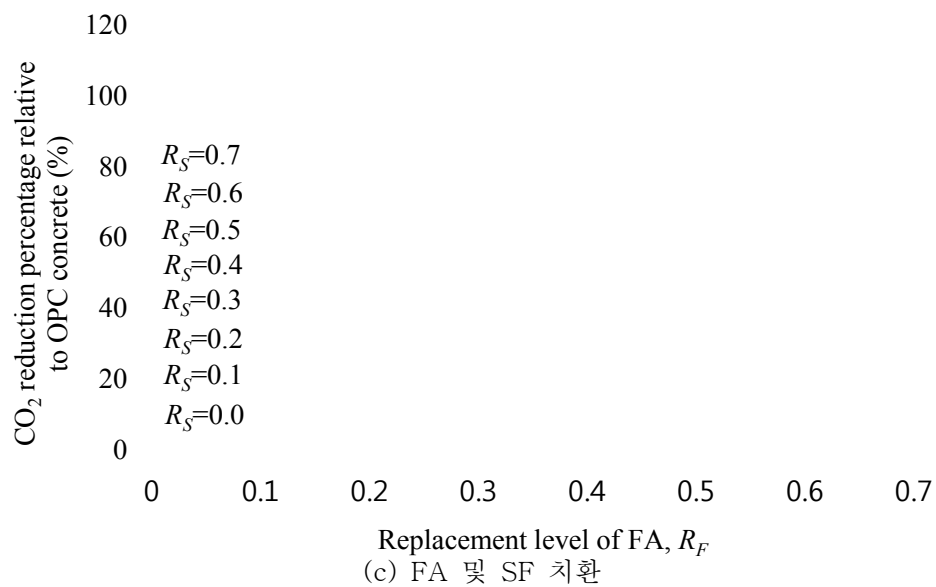
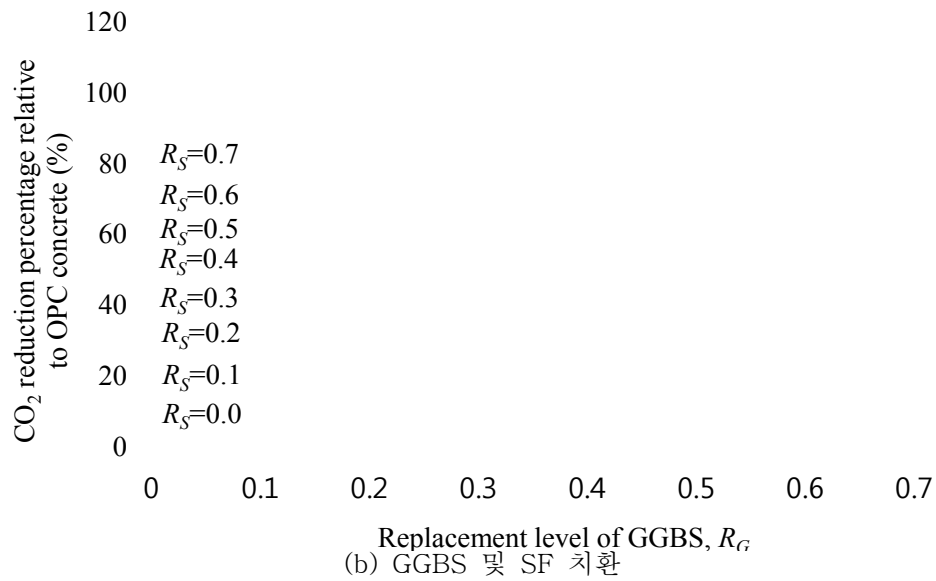
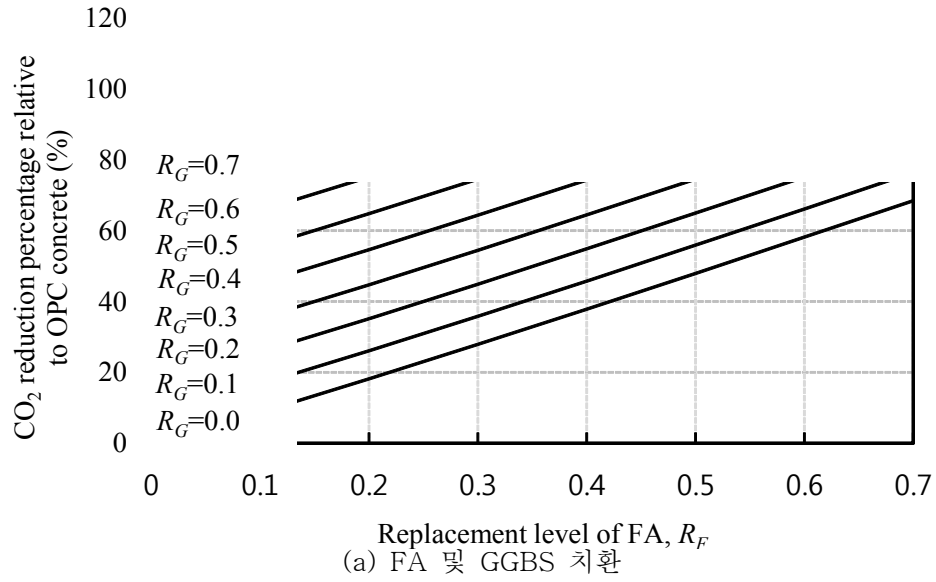


그림 3.108 SCM 치환비율 결정을 위한 도표

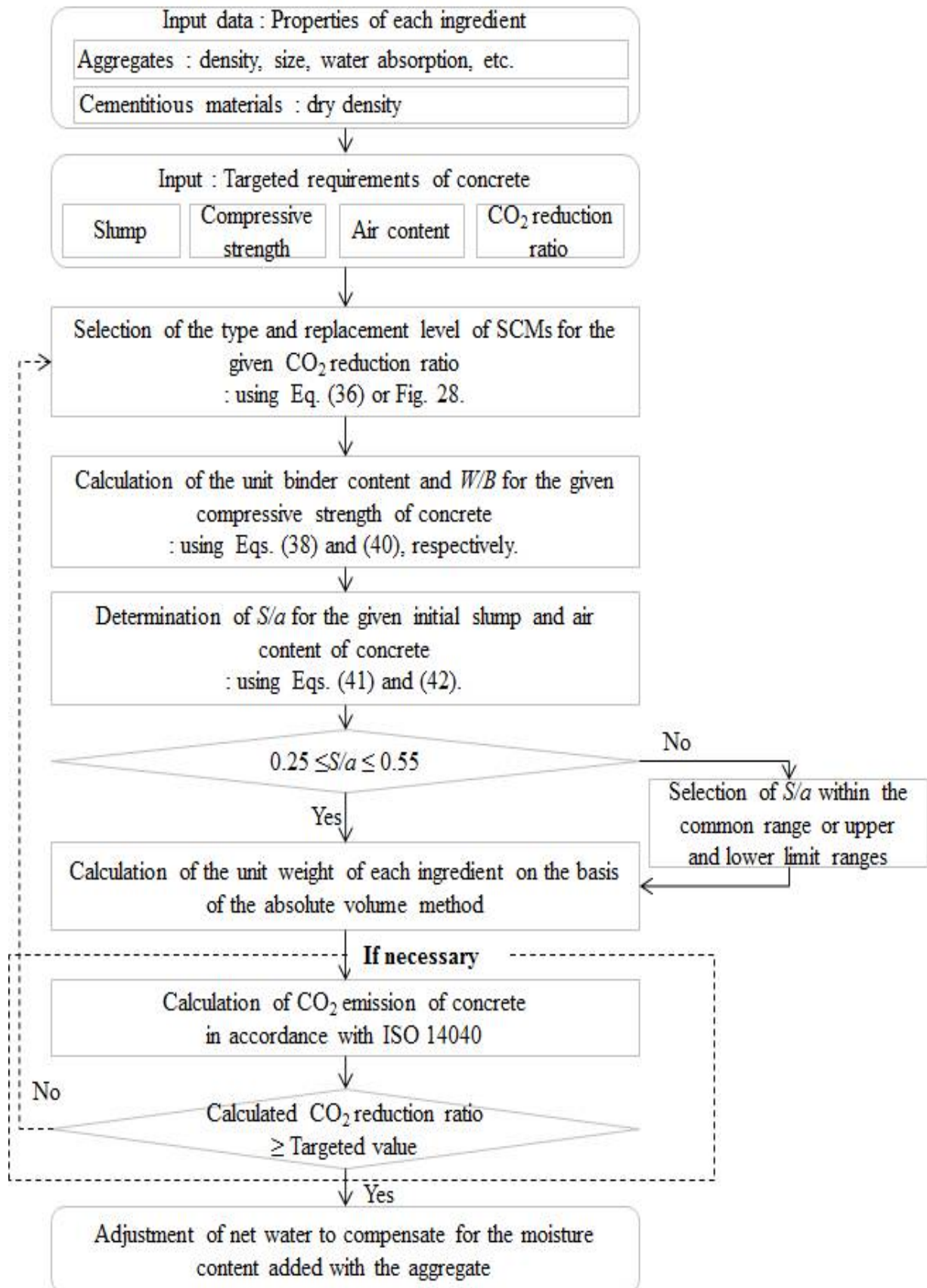


그림 3.109 CO₂ 저감형 결합재 설계를 위한 절차

(4) 제시된 모델식의 검증에 위한 실험

(가) 실험 계획 및 변수 설정

① 보통중량 콘크리트

- 2차년도 연구결과 도출된 보통 중량 콘크리트의 CO₂ 저감형 배합설계 모델의 검증을 위하여 실증 실험을 실시함(표 3.51).
- 보통 중량 콘크리트 배합설계 모델의 연구결과 제시되었던 모델식에 따라 γ_{CO_2} 변화에 따른 배합표를 선정하였음.
- 보통 중량 콘크리트의 기본적인 목표 성능은 $f_{ck}=24$ MPa, $v_A=3.5\%$ 및 $S_i=180$ mm 으로 하였으며, 이를 바탕으로 γ_{CO_2} 을 0%에서 75%로 변화하였음.
- γ_{CO_2} 을 고려한 SCM 치환은 GGBS 및 FA를 혼입한 3성분계로 선정함.
- 모델식에 따른 배합모델 산정결과 GGBS의 치환율(R_G)은 0~60%의 범위였으며, FA의 치환율의 경우 0~20% 었음.
- FA 치환율에 비하여 GGBS 치환율이 비교적 높게 선정하였음.
- 이는 FA의 CO₂ 배출 원단위가 GGBS보다 높으며, 각각 동일한 치환율 적용시 GGBS를 치환한 경우의 콘크리트 f_{ck} 감소가 더 작기 때문임.
- 보통 중량 콘크리트의 배합상세는 표 3.52와 같음.

표 3.51 보통 중량 콘크리트 배합의 목표 특성

No	f_{ck} (MPa)	v_A (%)	S_i (mm)	R_G (%)	R_F (%)	γ_{CO_2} (%)
1	24	3.5	180	0	0	0
2				16	10	25
3				33	20	50
4				60	20	75

표 3.52 보통 중량 콘크리트 배합상세

No	W/B	S/a	Water (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	γ_{CO_2} (%)
1	0.47	0.43	177	373	0	0	992	747	0
2	0.47	0.43	174	276	37	60	985	743	25
3	0.44	0.43	165	177	75	122	989	746	50
4	0.38	0.43	147	80	78	232	1002	756	75

② 경량 콘크리트

- 경량 콘크리트 배합설계 모델의 연구결과 제시된 모델식에 따라 R_{FS} 변화에 따른 배합표를 선정하였음(표 3.53).
- 보통 중량 콘크리트의 기본적인 목표 성능은 $f_{ck}=27$ MPa, $v_A=3.5\%$ 및 $S_i=180$ mm 및 $\gamma_{con}=1700$ (kg/m³) 으로 하였으며, 이를 바탕으로 γ_{CO2} 은 0%에서 40%로 변화하였음.
- 배합 산정결과 W/B 는 R_{FS} 에 관계없이 배합 모두 0.37로 일정 하였으며, V_G 는 0.43~0.76 으로 변화하였음.
- 보통 중량 콘크리트의 배합상세는 표 3.54와 같음.

(나) 사용 재료 및 측정 항목

① 사용재료

㉠ 시멘트계 재료

- 시멘트계 재료로서 OPC, GGBS 및 FA가 사용되었으며, 각 재료의 물리적 특성 및 화학적 조성비는 표 3.55 및 표 3.56과 같음.

표 3.53 경량 콘크리트 배합의 목표 특성

No	f_{ck} (MPa)	v_A (%)	S_i (mm)	γ_{con} (kg/m ³)	R_{FS} (%)	γ_{CO2} (%)
1	27	3.5	180	1,700	0	0
2					25	13
3					50	25
4					75	35
5					100	40

표 3.54 경량 콘크리트 배합표

No	W/B	R_{FS} (%)	Water (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	G_L (kg/m ³)	F_L (kg/m ³)	F_S (kg/m ³)	V_G	γ_{CO2} (%)
1	0.37	0	331	893	311	153	0	0.43	0
2	0.37	25	289	781	361	159	84	0.49	13
3	0.37	50	243	655	437	126	198	0.60	25
4	0.37	75	213	575	507	62	293	0.69	35
5	0.37	100	198	536	556	0	354	0.76	40
Note] G_L=경량 굵은 골재, F_L=경량 잔골재, F_S=천연모래									

㉔ 사용 골재

- 보통 중량 콘크리트 및 경량 콘크리트 배합에 사용된 재료의 물리적 특성은 표 3.57과 같음.
- 경량골재는 팽창점토와 혈암을 주요성분으로 하여 팽창소성한 것으로 표면은 매끈한 구형임.
- 경량 굵은 골재의 비중은 1.21 이며, 경량 잔골재의 비중은 1.65였음.
- 이는 채석의 약 45%, 천연모래의 약 63% 수준이었음.
- 경량 굵은 골재의 흡수율은 18.96%로 채석보다 약 30 배 이상 컸는데, 이는 경량 굵은 골재 내부에는 2.0~2.0 μm 크기의 무수히 많은 공극이 존재하기 때문임.
- 경량 골재의 경우 배합시 시멘트 페이스트 표면으로 떠오름을 방지하기 위하여, 배합 전 24 시간 동안 침수하여 사용하였음.

표 3.55 시멘트계 재료의 물리적 특성

Materials	Density (g/cm ³)	Blain (cm ² /g)	pH
OPC	3.15	3,150	13
GGBS	2.91	4,000	7
FA	2.21	3,300	10

표 3.56 시멘트계 재료의 화학적 조성

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	LOI
OPC	19.60	5.10	62.80	3.90	2.90	0.18	0.89	2.50	2.64
GGBS	57.70	34.07	13.10	44.60	4.38	0.11	0.74	0.48	0.95
FA	57.70	28.60	4.70	0.67	5.08	1.53	0.57	0.68	0.10

표 3.57 골재의 물리적 특성

Type		d_a (mm)	Unit volume weight (kg/m ³)	Specific gravity	Water adsorption (%)	Moulus of fineness
Lightweight aggregate	Coarse aggregate	19	729	1.21	18.96	6.56
	Fine aggregate	4	832	1.65	13.68	4.34
Natural normal-weight aggregate	Coarse aggregate	19	1700	2.65	0.62	6.05
	Fine aggregate	5	1750	2.6	1.82	2.51

② 실험 방법 및 측정항목

㉠ 배합방법

- 보통 중량 콘크리트 및 경량 콘크리트의 배합은 KS F 2425에 준하여 콘크리트 믹서를 이용하여 제작하였음.
- 모델식 검증을 위한 콘크리트의 압축강도 측정을 위하여 KS F 2403 방법에 준하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 시험체를 제작하였음.

㉡ 슬럼프 측정

- 보통 중량 및 경량 콘크리트의 목표 s_i (180 mm)의 성능을 검증하기 위하여 KS F 2402 방법에 준하여 굳지 않은 콘크리트의 s_i 를 측정 함.

㉢ 공기량 측정

- 배합 설계시 선정한 목표 v_A (3.5%) 성능을 검증하기 위한 방법으로 KS F 2421에 준하는 공기량 측정기 이용함.

㉣ 압축강도 및 절건밀도 측정

- 보통 중량 및 경량 콘크리트의 γ_{CO_2} 변화 및 경량콘크리트의 R_{FS} 변화에 따른 재령 28일 f_{ck} 의 평가를 목적으로 함.
- 경량 콘크리트의 경우 배합설계시 목표로 한 $\gamma_{con}=1700$ (kg/m³)의 검증을 위하여 20 °C, 습도 65% 환경에서 72시간 동안 건조 후 밀도를 측정함.

(다) 실험결과 및 분석

① 보통 중량 콘크리트

㉠ 슬럼프 및 공기량

- 보통 중량 콘크리트 배합의 s_i 및 v_A 측정 결과를 표 3.58에 나타냄.
- s_i 는 175~186 mm 범위로, 배합설계 목표성능인 180 mm에서 최대 3.5%의 오차를 보였음.
- SCM의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 s_i 는 감소하였는데, 이는 SCM 치환율 증가로 인한 f_{ck} 의 감소를 고려한 W/B 의 감소 영향으로 판단됨.
- v_A 는 2.9~3.6% 범위로, 목표 성능인 3.5%에서 최대 17%의 오차를 보였음.

㉡ 압축강도

- 재령 28일에서의 f_{ck} 는 SCM을 치환하지 않은 배합의 경우 29.8 MPa로 가장 높았으며, GGBS 및 FA를 각각 60% 및 20%로 치환한 배합의 경우 25.4 MPa로 가장 낮게 나타남
- SCM 치환비율 증가에 따라 f_{ck} 가 감소하는 경향을 보였으나, 모든 배합에서 목표 f_{ck} 이상의 강도가 발현된 것으로 평가 됨.



(a) 굵은골재 투입



(b) 잔골재 투입



(c) 건비빔



(d) 결합재 투입



(e) 시멘트 건비빔



(f) 물 투입 및 습비빔



(g) 공기량 측정



(g) 슬럼프 측정

그림 3.110 보통 중량 콘크리트의 제작



(a) 경량 골재 투입



(b) 천연모래 투입



(c) 골재의 건비빔



(d) 시멘트 투입



(e) 건비빔



(f) 물 투입 및 습비빔



(g) 공기량 측정



(g) 슬럼프 측정

그림 3.111 경량 콘크리트의 제작

① 경량 콘크리트

㉠ 슬럼프 및 공기량

- LWAC 배합의 S_i , v_A 및 γ_{con} 의 측정 결과를 표 3.59에 나타냄.
- S_i 는 204~185 mm 범위로, 배합 설계 목표 성능인 180 mm에서 최대 14%의 오차를 보였음.
- R_{FS} 의 치환율이 0%인 경우 S_i 는 185 mm로 목표 성능을 만족하였지만, R_{FS} 가 증가할수록 S_i 가 증가하였음.
- 이는, R_{FS} 의 증가에 따른 V_G 증가 영향으로 S_i 가 감소한 것으로 판단됨.
- v_A 는 3.6~4.2% 범위로, 목표 성능인 3.5%에서 최대 17%의 오차를 보였음.

㉡ 압축강도

- 재령 28일에서 LWAC의 f_{ck} 는 R_{FS} 가 100%인 경우 42.0 MPa로 가장 높았으며, R_{FS} 가 0%인 경우 36.9 MPa로 가장 낮았음.
- R_{FS} 증가에 따라 f_{ck} 가 증가하는 경향을 보였으며, 모든 배합에서 목표 f_{ck} 이상의 강도가 발현된 것으로 평가 됨.

㉢ 기전밀도

- 재령 28일 이후 LWAC 시험체의 γ_{con} 측정 결과 R_{FS} 가 0%인 경우 1,570 kg/m³이었으며, R_{FS} 가 100%인 경우 1,760 kg/m³이었음(표 9).
- R_{FS} 증가에 따라 γ_{con} 이 증가하는 경향을 보였으며, 모든 배합에서 목표 성능($\gamma_{con}=1,700$ kg/m³)과는 큰 차이를 보이지 않았음.

표 3.58 보통 중량 콘크리트 배합의 실험결과

No	R_G (%)	R_F (%)	γ_{CO2} (%)	v_A (%)	S_i (mm)	f_{ck} (MPa) at 28 days
1	0	0	0	2.9	186	29.8
2	16	10	25	3.2	183	27.7
3	33	20	50	3.1	178	28.3
4	60	20	75	3.6	175	25.4

표 3.59 경량 콘크리트 배합의 실험결과

No	R_{FS} (%)	V_G	γ_{CO2} (%)	v_A (%)	S_i (mm)	f_{ck} (MPa) at 28 days	γ_{con} (kg/m ³)
1	0	0.43	0	4.2	204	36.9	1570
2	25	0.49	13	4.1	200	37.3	1650
3	50	0.60	26	3.4	192	38.2	1710
4	75	0.69	35	3.5	187	40.1	1760
5	100	0.76	40	3.6	185	42.0	1760

제 4 장. 목표달성도 및 관련분야 기여도

		코드번호		D-06											
제 1 절 목표달성도															
개발내용		구 분	연 구 개 발 기 간												진도 (%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1차년도	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 구성재료	LCI Database 구축 프로세스 조사 및 분석													100%
		고로슬래그미분말 LCI DB 구축 및 유효성 검토													100%
		플라이애쉬 LCI Database 구축 및 유효성 검토													100%
		실리카흄 LCI Database 구축 및 유효성 검토													100%
	콘크리트 배합설계 DB 구축	콘크리트 배합설계 데이터베이스 구축													100%
		데이터베이스(DB) 분석													100%
2차년도	콘크리트 전과정 CO ₂ 배출량 평가를 위한 LCI DB 구축 및 유효성 검증 : 콘크리트 플랜트와 인공경량 및 산업 부산물 골재	LCI DB 구축 프로세스 조사 및 분석													100%
		인공경량골재 LCI DB 구축 및 유효성 검토													100%
		레미콘제조 LCI DB 구축 및 유효성 검토													100%
		슬래그골재 LCI DB 구축 및 유효성 검토													100%
	CO ₂ 저감 보통중량 콘크리트 배합 설계 모델식 개발 및 검증실험	콘크리트 CO ₂ 배출량 평가지수모델 개발													100%
		콘크리트 탄산화에 의한 CO ₂ 흡수량 평가지수 모델 개발													100%
		혼화재 치환에 따른 콘크리트 CO ₂ 및 환경영향평가													100%
		레미콘 배합을 위한 CO ₂ 저감 및 현장적용형 보통중량 콘크리트 배합방법 개발													100%
3차년도	CO ₂ 저감 경량 콘크리트 배합설계 모델식 개발 및 검증실험	콘크리트 에코효율성 평가방법 개발													100%
		콘크리트 에코효율성 향상 배합설계 기술 제안													100%
		콘크리트 에코효율성 평가 프로그램 개발													100%
	CO ₂ 저감 기반 그린 콘크리트 배합 설계 상용 프로그램 개발	CO ₂ 저감 및 현장적용형 경량콘크리트 배합모델 개발													100%
		혼화재 및 경량골재 사용에 따른 CO ₂ 및 환경영향 평가													100%
		CO ₂ 저감 결합재 설계를 위한 현장적용 도표 제시													100%
		제시된 모델식의 검증을 위한 실험													100%
총 진도율														100%	

제 2 절 관련분야 기술발전예의 기여도

1. 연구개발 과제의 차별성

- 본 연구는 콘크리트 배합설계의 제조특성 분석을 통한 탄소배출량 평가 및 저감기술 개발이며 모든 콘크리트 및 구조물에 적용될 수 있는 반면, 유사한 일부과제의 연구내용은 특정재료 한정의 자체적인 품질·환경성능관련 기술개발 연구이며 본 연구와는 차별성이 있음.
- 본 연구의 차별성 및 독창성은 실무에서 이용할 수 있는 사용자 요구성능 중심의 그린 콘크리트 배합설계 기술로서 환경중심 콘크리트 연구의 세계적 흐름을 선도할 수 있음.

표 4.1 연구개발과제 및 대상기술의 차별성

기존 기술	기존연구 과제 중복도	차별성 및 연계 방안
탄소저감형 건설재료 기술개발	없음	• 본 과제는 탄소저감형 결합재를 이용하여 고성능 콘크리트, 단열능력이 우수한 내외장재 개발, 건설재료의 LCI DB구축에 관한 연구임. • 단순히 건설재료에 대한 LCI DB만을 구축하며, <u>콘크리트 제조 시 생산, 운송 등을 고려한 전과정 평가에 대한 연구와는 관련 없음.</u>
Smart 고로슬래그 미분말을 혼입한 저탄소 콘크리트의 초기재령 압축강도 향상기술개발	없음	• 본 과제는 고로슬래그 미분말 결합재를 이용하여 OPC 대비 압축강도 및 경제성이 향상시킬 수 있는 기술개발에 관한 연구임. • 단순히 소요성능만을 평가하였으며, <u>CO₂ 저감을 위한 배합설계에 대한 연구와는 관련없음.</u>
콘크리트 산업 환경부하(CO ₂) 최적설계 및 예측시스템 개발	없음	• 본 과제는 향후 건설현장에 사용될 콘크리트 물량을 예측하고 이에대한 CO₂ 배출량을 평가하는 기술개발에 관한 연구임. • <u>CO₂ 배출량 저감을 위한 배합설계 기술과는 관련없음.</u>
100MPa 초고강도 콘크리트의 최적배합설계모델 개발에 관한 연구	없음	• 본 과제는 100 MPa 초고강도 콘크리트를 제조하기 위한 배합설계 모델에 관한 연구임. • <u>CO₂ 저감을 위한 배합설계 기술과는 관련없음.</u>
1. 탄소를 저감시킬 수 있는 결합재를 이용하여 콘크리트의 역학적 특성을 향상시킬 수 있는 기술 개발에 중점을 둠. 2. 콘크리트 고강도화 및 그린 결합재 개발에 대한 연구들로서, 콘크리트 생산에서 CO ₂ 배출량을 줄이기 위한 배합설계에 대한 연구내용은 없음. 3. 대부분 탄소 저감에 대한 정량적인 목표를 제시하고 있지만, 기술개발에 따라 저감되는 탄소의 배출량에 대한 합리적이고 신뢰성 있는 근거를 제시하고 있지 않음.		

본 연구개발과 중복 가능한 과제는 없음. 즉, 사용자가 요구하는 CO₂ 저감율, 슬럼프 및 압축강도를 만족시킬 수 있는 시멘트 콘크리트 배합설계 기술인 본 연구는 세계 최초의 실용적이면서 독창적인 연구임.

2. 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성연구개발 최종목표

가. 콘크리트 생산 관련 원단위 보완 및 콘크리트 전과정 CO₂ 평가체계 정립

- 건축재료 환경성정보 평가관련 동향 분석 및 대상 재료 선정 연구는 구축이 되었으나, 건설재료 생산 분야 CO₂ 저감 및 평가 관리 기술 개발 연구는 아직 구축이 되지 않은 상태임.
- ISO 14040s 및 기존 산업제품부문 전과정 CO₂ 평가에 활용.
- 특히 콘크리트 부문의 배합설계수준의 CO₂ 평가관련 원단위 구축연구는 미비한 수준이며, 본 과업에서는 생산관련 생애주기 원단위 분석 및 보완을 수행하여 콘크리트 부문 CO₂ 배출 원단위 개발.

나. 보통중량 및 경량 콘크리트 배합설계에 대한 광범위한 데이터베이스 구축

- 콘크리트 특성별(보통, 경량) 성능중심의 설계기준 및 시방서에 대응 가능.
- 결합재 종류(시멘트, 시멘트+혼화재)에 따른 현장적용사례별 데이터베이스 축적 및 분석을 통해 지속적으로 요구성능을 만족하는 그린콘크리트의 유지관리가 가능함.
- 콘크리트 전반의 배합설계 모델식 개발 및 프로세스 정립을 통해 보통중량콘크리트의 성능개선 연구 활용가능.

다. CO₂ 저감 콘크리트 (보통중량 및 경량) 배합설계 모델식 및 상용 프로그램

- 탄소저감형 건설재료들간의 연계체계 수립을 통해 시공현장 적용사례의 프로젝트 분석연구에 활용. 이를 위하여 BIM 기반 데이터베이스형식으로 연계하여 정보처리 프로세스를 통해 건설 프로젝트에 대한 통합적인 친환경성 평가시스템 활용 가능 .
- 건축물의 친환경성능을 평가하기 위한 주요항목으로 온실가스배출량에 대한 평가연구가 활발하며, 건설자재별 CO₂ 배출 원단위의 데이터베이스 구축사업이 진행되고 있음. 현재 콘크리트의 배합설계 및 특성에 따른 체계적인 원단위가 구축되어 있지 않으며 본 연구를 통해 구축될 콘크리트 CO₂ 배출 원단위가 활용 될 것으로 사료됨.

제 5 장. 연구결과의 활용계획

코드번호

D-07

제 1 절 연구성과 활용계획

1. 연구성과 활용방안

가. 활용방안

콘크리트 배합설계 DB는 대학연구실 및 연구소의 실내배합과 레미콘 회사의 배합자료를 포함한 콘크리트 배합설계의 전반적인 데이터를 제공한다. DB 프로그램은 구축된 기존 자료의 수정 및 신규자료의 추가가 간단하며 이는 온라인을 통해 실시간으로 업데이트되는 시스템이다. 이에 따라 레미콘 회사, 콘크리트 2차 제품제조 회사와 건설회사 등에 DB를 배포하여 콘크리트 배합설계의 참고자료로 이용될 수 있다. 또한 연구소와 학계에서 콘크리트 배합설계 알고리즘 및 최적배합 설계연구 등의 기초자료로 사용될 수 있다.

- 탄소저감을 위한 레미콘 배합 (레디믹스트콘크리트 공장)
- CO₂ 평가가 가능한 지속가능 콘크리트 2차 제품 및 프리캐스트 제품의 제작에 활용
- 탄소배출량 평가를 수행하는 정책기관 및 에너지 한국 환경산업기술원 등
- 프로그램 사용 지침의 제시 및 관련업체 교육
- 관련업체들에 대한 무상 프로그램 제공
- 해외 건설기술 수출사 및 연구소
- 건설관련 학·협회와의 연계를 통한 성과물 활용처 확산 모색
- CO₂ 저감형 콘크리트 배합설계의 개발 및 활용에 따른 정부 및 국가 탄소저감 목표에 기여

나. 타 연구와의 연계방안

- 차년도별로 수행된 본 연구는 타 연구과제와 많은 연계성을 지니고 있음에 따라 도출된 성과물을 적절히 활용할 수 있을 것으로 사료됨.
- 구축된 콘크리트 구성재료 및 플랜트 LCI Database 및 알고리즘, 개발될 프로그램은 타 부처인 국토교통부에서 현재 수행 중인 다수의 과제들과 매우 밀접하게 연계되어 있음.
- 본 연구의 성과물 중 “콘크리트 구성재료 및 플랜트 설비 LCI Database”를 이용하여 국내 약 900개 레미콘 공장에서 생산하는 콘크리트의 환경부하(CO₂)배출량을 평가 및 예측기능.
- 환경부하 저감 최적설계 기술 적용에 따른 환경부하(CO₂)배출량 저감성능을 평가 할 수 있으며, 이를 DataBase로 구축하고 구축된 DB는 국가 건축부문 온실가스 감축목표에 활용 가능.
- “탄소저감형 콘크리트 시방서 및 설계지침”의 기초자료 및 이를 지원하는 시스템으로 연계.

2. 기대효과

가. 기술적측면

- 전과정 평가(LCA)에 의한 콘크리트의 CO₂ 배출량 평가에서 OPC가 차지하는 CO₂ 배출량은 전체의 약 85%에 해당함.
- 특히, 우리나라의 전과정 평가 (life cycle assessment, LCA)에 의한 보통 포틀랜드 시멘트 (ordinary portland cement, OPC)의 CO₂ 배출계수는 0.931 CO₂-kg/kg으로서, 세계 평균인 0.81 CO₂-kg/kg에 비해 약 1.15배 높음.
- 즉, 콘크리트 산업에서 CO₂ 배출량을 줄이기 위해서는 기본적으로 콘크리트 생산을 위해 사용되는 OPC의 사용량을 콘크리트 품질의 저하 없이 줄일 수 있는 배합설계 기술이 요구됨.
- 콘크리트 에코효율성 평가기술을 관련업체를 대상으로 교육하고, 무상으로 상용프로그램을 제공함으로써 콘크리트의 에코효율성에 대한 의식을 고취시킬 뿐만 아니라 콘크리트 산업체들의 지속가능 경영 지원을 가능하게 함.
- 천연자원 사용의 최소화, 에너지 소비 최소화, 환경부하 배출 최소화, 제조비용최소화, 재활용 최대화, 내구수명 최대화 할 수 있을 것으로 예상됨에 따라 콘크리트 제조업체의 환경과파에 따른 사회적 갈등요소 및 비용발생을 근본적으로 해결할 수 있음.
- 콘크리트의 에코효율성 평가방법 및 결과물이 현장실무에서 적합함과 동시에 요구되는 방향성과 일치하도록 하며, 이를 바탕으로 상용 프로그램을 구성 및 개발하여 현장에서 적용하고 활용함으로써 관련된 콘크리트 생산자, 건축설계자, 건설시공자 등의 업무지원에 효과적으로 작용할 수 있음.
- 콘크리트 에코효율성 평가 상용프로그램을 활용하게 되었을 시에, 콘크리트를 제조 할 때의 환경부하 배출량 및 비용에 대한 예측이 가능하여 투입 원 재료량과 에너지 사용 감량 등 구체적인 목표 설정과 관리가 가능하게 됨.

나. 경제 · 산업적측면

- 국제상공회의소(ICC)의 체계적 환경문제 해결요구에 ISO는 환경경영위원회(ISO/TC207)를 설치하여 관련 표준규격(ISO 14001)을 제정하고 각국에서 ISO 14000 시리즈와 관련된 제도가 시행되고 있으며, 이에 따라 국제사회는 ISO 14000 시리즈를 통하여 환경과 경제성을 동시에 고려한 지속가능발전을 지향하고 있음.
- 건설 및 콘크리트 산업분야에서도 국제사회에서 요구하는 환경경영 흐름을 반영하여 기업의 운영뿐만 아니라 재료의 생산단계에서부터 폐기처리 등의 전과정에서 지속가능 활동을 추진할 수 있는 기술 및 가이드라인 개발을 위한 노력이 본격화되어야 할 시점임.
- 하지만 콘크리트는 강재와 더불어 건축물 및 사회 인프라구조물 건설에 필수적인 구조재료로서 2010년도 우리나라의 레디믹스트콘크리트 생산량은 약 1억4천만 m³임.
- 콘크리트 산업 전 분야에서 부정적인 환경영향을 최소화하고 가능한 한 긍정적인 영향을 최대한 이용하면서 건설산업 발전을 유도하기 위해서는 환경경영 기반 저탄소 콘크리트 생산을 위한 기초 기술의 확립은 피할 수 없는 사안임.
- 에너지소비 절감과 온실가스(CO₂) 배출량 감축이라는 전세계적인 화두에서 콘크리트 산업의 시멘트 사용량을 줄이기 위한 환경영향 개선은 우리나라 녹색성장을 위해서도 필연적인 것임.

제 2 절 추가 연구의 필요성

1. 한계점 및 향후 연구

가. 콘크리트 내구성(내구수명) 평가요소 확대

본 연구에서는 콘크리트의 내구성 평가 요소로 열화현상 중 중성화만을 고려하였다. 콘크리트의 중성화에 따른 내구수명을 평가 할 수 있는 식을 적용하였으며, 열화현상 중 염해, 동결융해 등에 대한 내구성은 반영 되지 않았다. 콘크리트의 내구수명은 열화현상에 따라 상이하기 때문에 동일한 콘크리트를 대상으로 에코효율성 평가 시 차이가 생길 것으로 사료된다. 중성화만을 평가 시 혼화재(GGBS) 혼입에 따라 콘크리트 내구수명은 다소 감소하나, 염해의 경우 혼화재 혼입에 따라 콘크리트 내구수명이 증가되기 때문이다. 따라서 열화현상 종류에 따라 동일한 배합을 가진 콘크리트의 내구수명이 상이해짐에 따라 이에 따른 에코효율성도 달라질 것이다. 따라서, 향후 연구 시 콘크리트의 중성화 및 염해 등의 열화현상이 함께 고려된 내구수명을 평가하고 적용하도록 할 것이다

나. 에코효율성 향상 배합설계 모델 식 실험적 검증

에코효율성 향상 배합설계 모델 식을 제안하였으며, 다양한 종류의 콘크리트를 대상으로 수치적 검증은 하였다. 하지만, 도출된 배합설계를 대상으로 실제 물리적 내구성 만족여부에 대한 실험적 검증이 필요할 것으로 사료된다. 도출된 배합설계를 대상으로 압축강도 및 중성화 촉진실험 등의 실험적 검증 후 보완을 통해 더욱 신뢰성 있는 모델 식으로 제안 할 것이다.

다. 고강도(40MPa 이상) 콘크리트의 에코효율성 평가 방안 개발

내구성 평가 시 적용된 내구수명 산출 식이 대부분 물바인더비 60%~40% 내 콘크리트에서 유효한 결과가 나왔으며, 물바인더비가 40% 이하인 고강도 콘크리트에서는 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 고강도 콘크리트의 경우도 복합열화에 대한 내구수명을 평가할 수 있는 산출 식의 개발이 요구된다.

라. 기타 후속연구 추진방안

- 건설재료의 전과정 CO₂를 비롯한 환경성 정보 평가 기술 적용을 위한 프로그램 개발 및 사업화를 위한 연구
- 환경성 정보 평가기술의 시장성 확보를 위한 사용자 편의 시스템화 연구
- 시멘트 및 콘크리트 산업의 온실가스 인벤토리(원단위) 제시로 국가적인 온실가스 감축 계획 수립 및 관리
- 탄소저감형 건설재료 평가방법의 국가 표준화 및 국제 표준화
- 탄소저감형 건설재료 개발을 위한 배합설계방법의 개발
- 콘크리트 생산 전반에 걸친 온실가스 배출 저감 기술 개발
- 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출량 저감을 위한 프로토콜 정립
- CO₂발생량 저감을 위한 시멘트 제조 방식, 콘크리트 배합 개선

제 3 절 기업화 추진방안

1. 현장적용 방안

- 국가 LCI 종합정보망 개선
- 기존의 LCI DB 정보 제공 방식을 통해 웹 기반 건설재료의 LCI 네트워킹 구축에 활용
- 환경성 정보 인증제도 개발 및 환경경영체제 가이드 개발
- 전생애 CO₂ 제조업에 국한되어 사용 건설 및 건설자재에 활용하기 어려움, 건설 산업 실정에 적합한 환경경영시스템 모델 개발 접근 방식 활용
- 현장적용에 의해 각 성과물들의 현장성능분석, 시공성, 공사비용 등의 현장적용성을 평가·보완하여 실용화에 필요한 최종결과물을 도출

표 5.1 현장적용성과물 및 적용방안

현장적용 성과물	현장적용방안
- 온실가스 배출량 산정지침 - 온실가스 배출계수 - LCI DB 활용 소프트웨어 - 건설재료별 CO₂ 배출원단위, 환경성정보DB - 건설재료 탄소라벨링 인증제도(안) - 탄소저감형 콘크리트 시공기술 가이드 - 탄소저감형 건설재료 현장적용 기준/시방서	- 웹 기반 건설재료의 LCI 네트워킹 구축 정보 활용방안 적용 검토 - 국토해양부 및 환경부와의 온실가스 배출량 산정지침 및 탄소라벨링 인증제도의 적용방안 검토 - 실증하우스의 현장적용시 현장적용 시방서의 활용 및 검토

2. 실용화 · 제품화 방안

- 국가 LCI 종합정보망 개선
- 실용화·제품화는 위하여 특허출원 및 등록, 제품개발, 현장적용 결과 실용화 타당성여부, 기술이전방식, 상용제품 생산 가능성을 고려하여 추진함
- LCA 및 LCI DB구축 평가프로그램의 사용
- 건설재료 LCI 평가프로그램에 활용 및 실용화 가능
- 평가프로그램 개발 및 환경성 정보 네트워킹 구축
- LCI DB 정보를 제공하는 방식을 통해 인터넷 기반 건설재료의 LCI 네트워킹 구축에 활용

표 5.2 실용화 방안

과제구분	연구기관	실용화검토	실용화 주체기관
건설재료의 LCCO ₂ 평가 및 탄소배출저감관리	한양대	- 특허출원, 등록 - 현장적용 결과에 의한 실용화 타당성 검토	국토해양부
건설자재 LCI DB 및 CO ₂ 통합관리시스템 구축	한국건설기술연구원		국토해양부
탄소저감형 건설재료 활용을 위한 녹색시방기준 개발	한국 콘크리트 학회		국토해양부, 한국콘크리트학회

3. 예상활용분야 및 활용방안

가. 산업분야 활용방안

- 건축설계업체 : 일반적으로 건축물의 구조적인 관점(내구성)에서 만족하는 콘크리트 대신 에코효율형 콘크리트를 설계에 반영함에 따라서 동일한 내구성을 가지면서 친환경적이며, 경제적인 건축설계의 제시가 가능할 것임.
- 콘크리트업체 : 건설현장에 납품할 콘크리트 제조 시 동일한 규격과 내구성능을 발휘하면서 환경성, 경제성을 고려한 콘크리트 생산가능. 지속가능경영을 통하여 콘크리트 업체는 영업이익 및 이윤을 증대 및 동종업체들 사이의 경쟁력 강화 가능.
- 건설시공업체 : 자사의 건설시공 현장에 에코효율형 콘크리트를 타설함에 따라 동일한 내구성능을 만족하면서 환경성 관점도 반영된 진정한 친환경적인 건축물로서 홍보함으로써 기업가치 상승 할 것임.
- 정부관련기관 : 현재 녹색건축물 인증제도 및 환경성적표지인증제도 등과 같이 환경성 관점을 포함하여 향후 에코효율성의 개념이 반영된 정책개발 및 제도개선을 하기 위한 기본 배경연구로 활용됨.
- 관련 학협회 : 향후 콘크리트의 표준시방서(ksf 4009) 또는 콘크리트구조물의 녹색시방서, 건축공사표준시방서에 내구성능을 만족하면서 환경적이고 경제적인 에코효율형 콘크리트의 제조방법에 관한 내용 포함을 위한 기초적 이론으로 선정가능.

나. 기타 활용방안

- 기존 연구에서 개발되는 기술은 건설재료 LCI평가기술에 활용가능이 큼
- 건설자재의 개발제품은 전과정 특성분석, 건설제품의 탄소배출평가를 통한 환경영향 평가활용
- 개별 마감자재의 환경성정보 및 마감부재의 조합별 인벤토리를 체계적으로 구축하여 사용자들이 환경 친화적인 자재를 우선적으로 사용할 수 있도록 유도
- 건설재료 탄소라벨링 제도의 통합적 모델 제시 및 시스템의 표준화 활용
- CO₂ 배출량 평가지침으로 건설재료에 특화된 환경성정보 인증제도(PEF) 개발 지원
- CO₂ 배출 저감형 건설재료 평가기술 표준화를 통한 친환경 건설재료 상용화 기반 구축 및 친환경 건설재료의 경쟁력 강화
- 건설재료에 특화된 환경성 정보 인증제도(PEF) 실시를 통한 건설업체의 친환경 경영 유도



그림 5.1 산업분야 활용방안

제 6 장. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

코드번호

D-08

■ 국외기술 및 산업동향

1. 콘크리트 설계기준 그린화 요소기술

- ISO/TC 71에서 요구하는 레미콘 출하 시 관련된 자료에 CO₂ 배출량 표기 등이 예상되지만 이에 대한 자료구축 및 평가프로그램 마련을 위한 지원은 없는 실정임.
- International Code Council (ICC)는 2010년도에 International Green Construction Code (IGCC)를 공개버전 1.0을 출판하였으며, 2012년도에는 버전 2.0의 출판과 함께 정식 모델코드로 채택하였음.
- 모든 설계기준에 대한 우선권과 사법적 권한을 갖는 IGCC에서는 전과정 평가에 의한 구조물 프로젝트의 CO₂ 배출량이 기존 비슷한 규모의 건축물 대비 20% 이상이 절감됨을 증명할 것을 요구하고 있음.
- 유럽의 Model Code 2010에서는 지속가능성 설계를 향후 중요 설계개념으로 정의하고 있으며, 성능범주는 사용성, 구조적 안전성 및 지속가능성에 대해 정의하고 있음. 특히 지속가능성의 성능범주는 CO₂ 절감을 포함한 환경영향, 사회에 대한 영향 및 미적 요구조건 등을 요구함.

2. 콘크리트 설계지침 및 전과정 평가 관련국제동향

표 2.1 지속가능 콘크리트의 설계지침 및 전과정 평가절차의 개발에 대한 국제동향

ISO /국가	추진내용	추진성과 및 전망	건축자재 전과정 평가 프로그램 및 개요
ISO	■ TC 207(환경위원회)에서 관련 표준제정 ■ 콘크리트, 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 관련 표준제정을 위해 TC71 설치.	- 시멘트, 골재 등 건축제품의 환경성 표시 및 선언에 대한 세부 국제표준으로 발전하고 있음. - 콘크리트, 콘크리트 구조물 환경영향을 위해 ISO 13315 시리즈 개발 중.	- 환경성적 표지제도 및 전과정에 의한 각 건축재료의 CO₂ 평가 절차를 요구하고 있음.
일본	■ 2004년 “환경배려형 철근콘크리트 공사 연구 소위원회” 구성함.	- 2008년 “철근콘크리트조 건축물의 환경배려 시공지침(안)·동해설”을 출판함.	eco MA - 평가대상 : CO₂, 경제성 - 자재범위 : 콘크리트
미국	■ Green Concrete Council 설치. ■ IBU 산하의 ICC에서 모델코드 개발을 추진함.	- 지속가능콘크리트시방서 출판(IGCC 등) - 콘크리트의 전과정 평가 기반의 시멘트 사용을 줄이기 위한 연구추진	BEES - 평가대상 : 에너지, 경제성 - 자재범위 : 150가지 건축자재 - 특징 : 환경영향력/경제성평가
유럽	■ Task Group에 의한 설계지침 개발 추진.	- 2020년까지 1990년 대비 온실가스 감축목표를 30%로 상향하며 2050년까지 목표 감축량은 80%임. - 성능중심형 콘크리트 시방서 마련 진행 중 (CEN Guide 4 등) - 시멘트 사용을 줄이기 위한 다양한 연구 추진	Gabi - 평가대상 : 에너지 - 자재범위 : 650여 가지의 건축자재 - 특징 : 다수의 변수 민감도 분석

제 7 장. 연구개발결과의 보안등급

코드번호	D-09
○ 해당사항 없음.	

제 8 장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

					코드번호	D-10		
구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록번호

제 9 장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적

코드번호	D-11
○ 해당 연구기관별 안전조치 규정을 이행함.	

제 10 장. 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국 가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/인 용횟수 등)
1	논문	Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete	경기대학교	연구 책임자	Journal of Cleaner Production	3.844	2015.09.15	단독	SCI
2	논문	Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Korea's green building index certification system	한양대학교	연구원	Renewable and Sustainable Energy Reviews	5.901	2015.11.10	단독	SCI
3	논문	Life Cycle CO2 Emission Assessment for Non-Steam Curing Precast Concrete	한양대학교	연구원	Advanced Materials Research		2014.09	단독	비 SCI
4	논문	목표 탄소배출량 저감을 고려한 콘크리트 구조물의 설계 절차	경기대학교	연구원	한국건설순환 자원학회 논문집		2015.06.26	단독	비 SCI
5	특허	콘크리트의 성능평가를 이용한 환경 부하 예측 방법	한양대학교	연구원	대한민국		2015.10.05		10-1559698

제 11 장. 기타사항

코드번호

D-13

○ 해당사항 없음.

제 12 장. 참고문헌

	코드번호	D-14
[1] International Energy Agency (IEA). Energy technology perspectives 2010, OECD/IEA, 2010.		
[2] 노승준, 태성호, 김태형, 김낙현. A Study on the Comparison of Characterization of Environmental Impact of Major Building Material for Building Life Cycle Assessment, 대한건축학회, 2014;29:93-100.		
[3] 김태형, 태성호, 노승준, 김낙현, Life Cycle Assessment for Carbon Emission Impact Analysis of Concrete Mixing Ground Granulated Blast-furnace Slag(GGBS), 대한건축학회 논문집, 2013;29:75-84.		
[4] 김태형, 태성호, 최원영, 양근혁, Development of the Eco-efficiency evaluation method for Concrete, 한국콘크리트학회학술대회, 2015;35:437-438.		
[5] 김태형, 태성호, 콘크리트 환경성능 지수 개발에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을학술대회, 2014;26:651-652		
[6] Park JH, Tae SH, Kim TH. Life Cycle CO ₂ Assessment of Concrete by compressive strength on Construction site in Korea. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012;16:2940-2946.		
[7] 국토교통부, 건축자재 환경성정보 국가D/B 구축사업 최종보고서, 2008.		
[8] Found online at: http://www.edp.or.kr/edp/edp_intro.asp		
[9] Found online at: http://www.ecoinvent.org/database		
[10] Korea Price Information(2014), http://www.kpi.or.kr/		
[11] 콘크리트 표준 시방서, 한국콘크리트학회, 2009.		
[12] 최연왕, 박만석, 최병걸, 강현진, 김현택, 이도현, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 내구 특성에 관한 연구, 한국건설순환자원학회지, 2013;13:222-225.		
[13] 이성철, Maria, Q. Feng, 권성준, 탄산화에 노출된 콘크리트 구조물의 배합설계에 대한 연구-유전자 알고리즘 적용성 평가, 한국콘크리트학회, 2010;22:335-343.		
[14] T.H. Kim, S.H. Tae, S.J. Roh, Assessment of the CO ₂ emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system, Renewable Sustainable Energy Rev. 2013;25:729-741.		
[15] 기문당, 콘크리트 구조물의 환경영향 및 CO ₂ 평가, 한국콘크리트학회, 2013.		
[16] 김태형, 태성호, “콘크리트 생산에 의한 CO ₂ 배출량 평가 시스템 개발에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 2010;22:787-796.		
[17] Gartner, E., “Industrially Interesting Approaches to “Low-CO ₂ ” Cements”, Cement and Concrete Research, Vol.34, 2004, pp.1489-1498.		
[18] Yang, K. H., Seo, E. A., Jung, Y. B., and Tae, S. H., “Effect of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on Life-Cycle Environmental Impact of Concrete”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.26, No.1, 2014, pp.13-21.		
[19] ACI Committee 318-11, Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, 2008.		

- [19] Cha SW. Modeling of hydration process and analysis of thermal and hygral stresses in hardening concrete [PhD Dissertation]South Korea: Seoul National University; 1999.
- [20] Damineli BL, Kemeid FM, Aguiar PS, John VM. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cem Concr Compos* 2010;32(8):555-62.
- [21] Damtoft JS, Lukasik J, Herfort D, Sorrentino D, Gartner EM. Sustainable development and climate change initiatives. *Cem Concr Res* 2008;38(2):115-27.
- [22] Gajda J. Absorption of atmospheric carbon dioxide by Portland cement. Chicago: PCA R&D; 2001.
- [23] Habert G, de Lacaillerie JB d'E, Roussel N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *J Clean Prod* 2011;19(11): 1229-38.
- [24] ISO 14040. Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. International Standards Organization; 2006 [Swiss].
- [25] IgCC Public Comment Hearing Committee, USA, 2010. International Green Construction Code. International Code Council Inc.