

R&D / 18CTAP-C129766-02

무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발

최종보고서

2019. 03. 29.

주관연구기관 / 한양대학교 에리카산학협력단

2018

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형
시멘트 제조 원천기술 개발 최종보고서

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발’ (연구개발
기간 : 2017. 04. 01. ~ 2018. 12. 31.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 03. 29.

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단

(대표자) 박 태 준 (직인)



주관연구기관책임자 : 태 성 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129766-02	해당 단계 연구 기간	2017.04.01.~ 2018.12.31.	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발			
연구책임자	태 성 호	해당단계 참여연구원 수	총: 8명 내부: 6명 외부: 2명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 8명 내부: 6명 외부: 2명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 에리카산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 한국세라믹기술원			연구책임자: 송훈	
요약 본 연구는 “무기계 건설폐기물(타일, 유리, 벽돌, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO ₂ 를 다량 포함한 무기계 건설폐기물)의 재자원화 기술”을 이용한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 “환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발”을 목적으로 함. 1. 무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 [RT] 무기계 건설폐기물 별 화학적 특성 분석 및 재자원화 DB 구축과 국내 무기계 건설폐기물 발생량 예측 기술 개발 연구 2. 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 [MT] 무기계 건설폐기물 재자원화 DB를 이용한 최적의 환경 배려형 시멘트 배합/제조 원천기술 개발과 성능평가 연구 3. 환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술 [AT] 무기계 건설폐기물 및 환경 배려형 시멘트의 환경성능 분석을 통한 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 및 품질 관리 가이드라인 개발 연구 본 연구는 제1종 보통 포틀랜드시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 환경 배려형 시멘트 개발을 위한 기초원천 기술 개발 연구로서 연구개발 성과물은 다음과 같음 [1] 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB [2] 환경 배려형 시멘트 배합설계 및 제조 원천기술 [3] 환경 배려형 시멘트 품질 관리 가이드라인					보고서 면수 155

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구는 “무기계 건설폐기물(타일, 유리, 벽돌, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO₂를 다량 포함한 무기계 건설폐기물)의 재자원화 기술”을 이용한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 “환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발”을 목적으로 함. 1. 무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 [RT] 무기계 건설폐기물 별 화학적 특성 분석 및 재자원화 DB 구축과 국내 무기계 건설폐기물 발생량 예측 기술 개발 연구 2. 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 [MT] 무기계 건설폐기물 재자원화 DB를 이용한 최적의 환경 배려형 시멘트 배합/제조 원천기술 개발과 성능평가 연구 3. 환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술 [AT] 무기계 건설폐기물 및 환경 배려형 시멘트의 환경성능 분석을 통한 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 및 품질 관리 가이드라인 개발 연구				
연구개발성과	본 연구는 제1종 보통 포틀랜드시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 환경 배려형 시멘트 개발을 위한 기초원천 기술 개발 연구로서 연구개발 성과물은 다음과 같음 [1] 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB [2] 환경 배려형 시멘트 배합설계 및 제조 원천기술 [3] 환경 배려형 시멘트 품질 관리 가이드라인				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	활용방안 건설 폐기물 처리업계와 시멘트 업계의 연계로 인한 친환경적 자원순환 고리의 생성 및 건설업계에서 다량 활용되는 시멘트의 친환경적 보급 및 활용 기대효과 무기계 건설폐기물의 매립 및 소각에 기인한 “환경파괴 및 온실가스 배출량 절감” 과 무기계 건설 폐기물의 시멘트 원료로의 재 자원화를 통한 “시멘트 생산비 절감” 효과 기대				
핵심어 (5개 이내)	무기계 건설폐기물	재자원화	환경 배려형	시멘트	품질관리

< SUMMARY >

Purpose & Contents	The purpose of this study is to develop an original technique for environmental friendly cement satisfied with the quality standard of ordinary portland cement type 1 (KS L 5201) using recycling technology of inorganic construction wastes (Inorganic construction wastes included a large amounts of CaO and SiO₂ such as tile, glass, ALC, gypsum board, waste concrete powder, and etc). 1. Recycling technology of inorganic construction wastes [RT] Construction the recycling database and analysis of chemical characteristic by inorganic construction wastes, and development of precast technology for inorganic construction wastes quantity 2. Manufacturing technology of environmental friendly cement [MT] Development and performance assessment of an original technique for mix design and manufacture of the optimal environmental friendly cement using the recycling database of inorganic construction wastes 3. Assessment/management technology of environmental friendly cement [AT] Development of quality control guideline and assessment of environmental impact for environmental friendly cement by analysing the environmental performance of inorganic construction wastes and environmental friendly cement				
Results	This study is to develop an original technique for environmental friendly cement satisfied with the quality standard of ordinary portland cement type 1 (KS L 5201). The development results of this research are as follows. [1] Chemical characteristic database for recycling of inorganic construction wastes [2] Original technique for mix design and manufacture of environmental friendly cement [3] Quality control guideline for environmental friendly cement				
Expected Contribution	Application Plan ▪ Creation of environmental friendly resource circulation based on Connection of construction waste treatment industry and cement industry ▪ Diffusion and utilization of environmental friendly cement used widely in the construction industry Expected Contribution ▪ Reducing the environmental destruction and greenhouse gas emissions caused by landfill and incineration of inorganic construction waste. ▪ Reducing the cement production cost through recycling of inorganic construction waste as cement raw material				
Keywords	Inorganic Construction Waste	Recycling Technology	Environmental Friendly	Cement	Quality Control

< Contents >

1. Introduction of R&D project	1
2. Status of domestic and overseas technology development	7
3. Research content and achievements	9
4. Achievement of goal and contribution to related field	89
5. Plan to utilize R&D achievements	91
6. Information on overseas technology obtained in the period or research	93
7. Security rating of R&D achievement	107
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	109
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks	111
10. Representative research achievements of R&D project	113
11. Others	115
12. Reference	117
[Appendix]	120

< 목 차 >

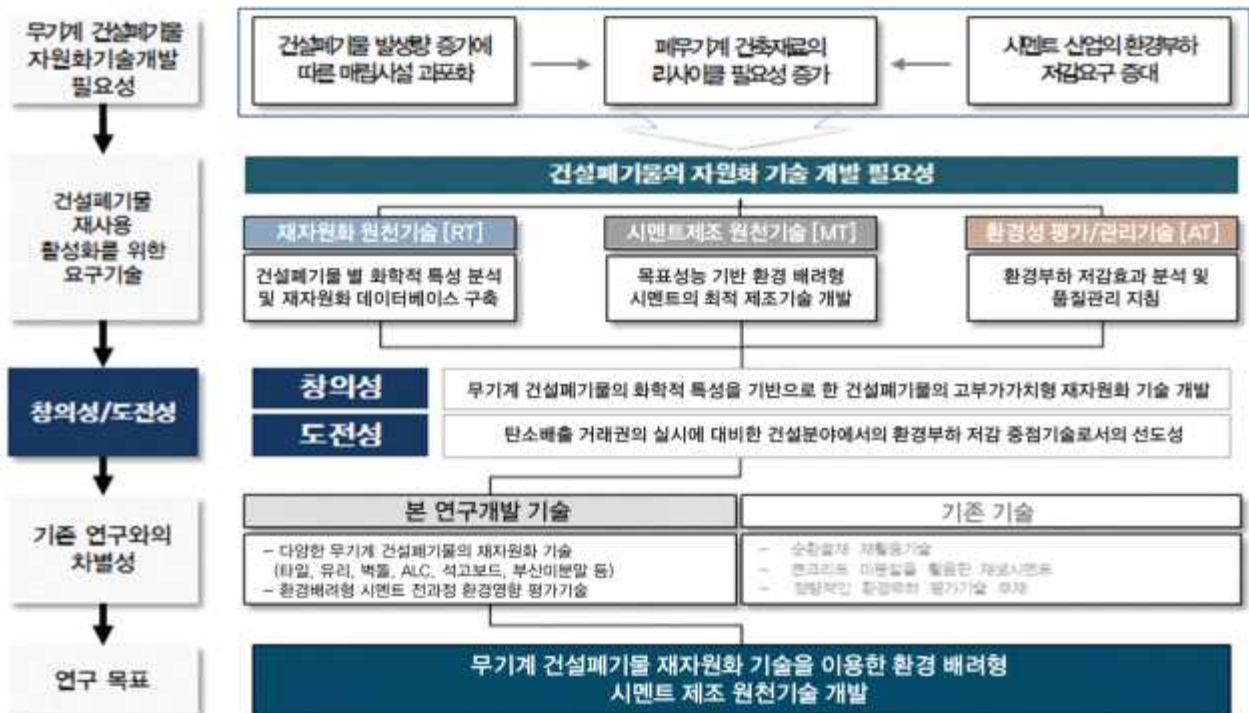
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	7
3. 연구 수행 내용 및 성과	9
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	89
5. 연구개발성과의 활용 계획	91
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	93
7. 연구개발성과의 보안등급	107
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	109
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	111
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	113
11. 기타 사항	115
12. 참고 문헌	117
[부록] 환경 배려형 시멘트의 품질관리 가이드라인	120

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 최종 목표

- 본 연구는 “**무기계 건설폐기물**(타일, 유리, 벽돌, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO₂를 다량 포함한 무기계 건설폐기물)의 **재자원화 기술**”을 이용한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 “**환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발**”을 목적으로 함.
- 기존 단순 노반재로서 활용되던 건설폐기물 재사용 방식에서 벗어나 **건설폐기물의 화학적 특성을 기반으로 한 고부가가치 연구로서 실용적 가치가 크며**, 무기계 건설폐기물을 활용하는 측면에서 학술적 가치와 연구의 독창성이 있음.



무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 개발을 이용한 환경배려형 시멘트 생산공정 프로세스



그림1.1 무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술개발 전체 개요도

나. 핵심 개념

- 본 연구는 “**무기계 건설폐기물**(타일, 유리, 벽돌, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO₂를 다량 포함한 무기계 건설폐기물)의 **재자원화 기술**”을 이용한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 “**환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발**”을 목적으로 함.
- 본 연구는 **건설폐기물의 화학성분이 시멘트의 화학성분과 유사한 것에 착안하여, 건설폐기물의 화학적 특성을 토대로 고부가가치형 재자원화기술의 개발이라는 공학적 접근**과 함께 공정 개발의 측면에서, **환경 배려형 시멘트를 제조를 위해 환경 배려형 프로세스로 최적화 하는 친환경 제품 설계(EfD, Environmental for Design)를 고려**한 측면에서 크게 차별화 됨.
- 이를 위해 본 연구는 무기계 건설폐기물 분류 및 성분분석 DB 구축을 통해 고품질 시멘트의 생산을 지원하는 「**무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 [RT]**」, 무기계 건설폐기물의 배합 및 재생프로세스의 최적화 연구를 토대로 한 「**환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 [MT]**」, 환경 배려형 시멘트 개발에 따른 환경부하 저감효과 분석 및 품질관리 가이드라인개발을 수행하는 「**환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술 [AT]**」으로 구성됨.

구 분	기존 기술	본 연구개발 기술
적용대상	순환골재의 재생과정에서 생성되는 폐 콘크리트 미분말	타일, 유리, 벽돌, 블록, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO₂를 다량 포함한 다종의 무기계 건설폐기물
주요특징	- 순환골재를 통한 건설폐기물의 재활용은 불활성 충전재로 국한되어 부가가치가 떨어짐. - 폐콘크리트 미분말을 활용한 재생 시멘트의 경우, 재생시멘트의 압축강도 성능이 기존 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 50% 미만의 성능이 구현되어 재생재료의 저품질화	- 콘크리트의 효율 극대화를 위하여 자재생산과정의 환경부하 발생량 축소 및 폐기시점의 재활용 기술 적용 - 다종의 무기계 건설폐기물을 대상으로 배합 및 재생프로세스의 최적화를 통한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 품질 기준 만족 - 환경부하 배출량 평가/관리기술을 통한 친환경 건축재료 공법 개발 기술의 기술력 확보

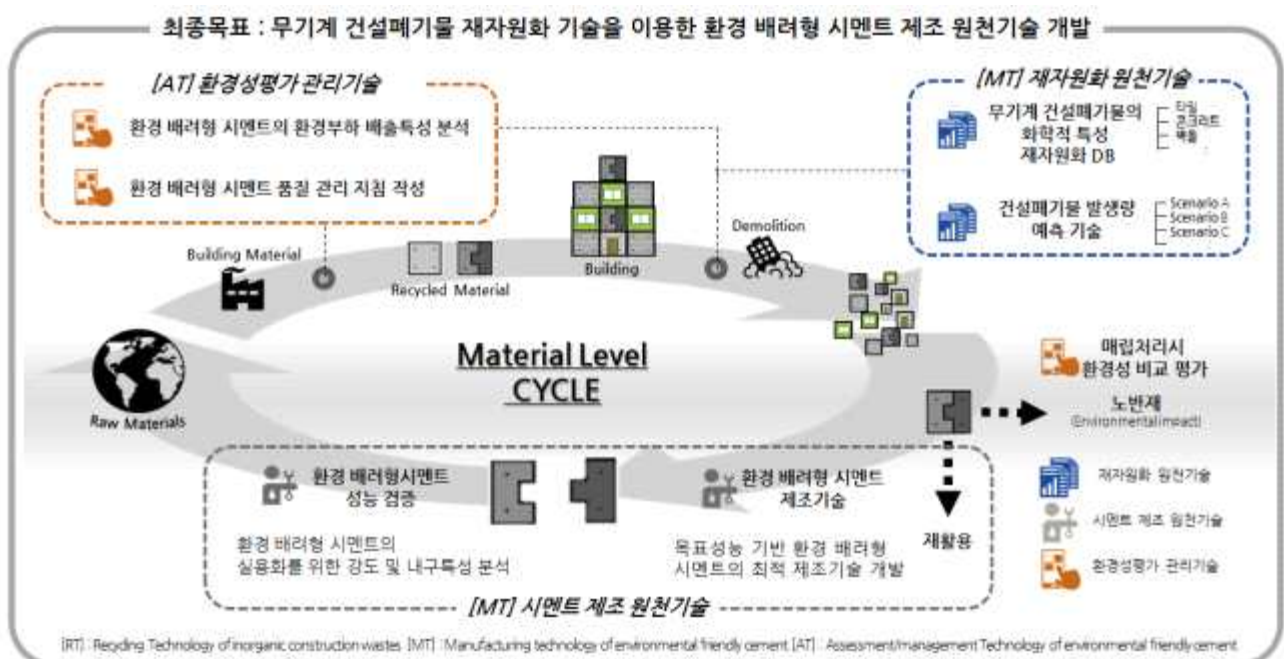


그림1.2 무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개념

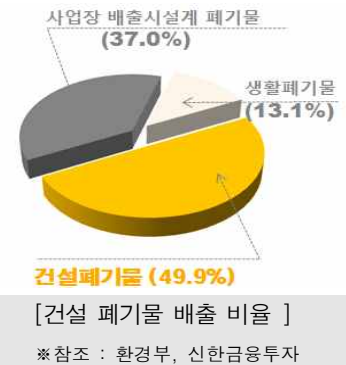
2. 연구개발의 필요성

가. 국내 환경변화

■ 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률제정(1994년)에 따라 건설폐기물을 일정량 재활용이 의무화 되어 있으나, 부가가치가 낮은 폐콘크리트를 활용한 재생 굵은골재의 제조기술 및 실용화 방안에 관한 연구개발에 치중되어 있으며, 건설폐기물의 90%를 차지하는 무기계 건설폐기물의 재활용 기술에 관한 연구는 전무한 상태임.

■ 폐기물 발생량 증가에 따른 폐기물 최종 처리장 포화

- 전체 산업 폐기물의 약 49.9%가 건설산업에서 발생하고 있으며, 건설폐기물 최종 처리장은 포화상태임건축물의 재개발 및 재건축로 인한 천문학적 규모의 건설폐기물 발생이 예측됨.
- 건설폐기물의 90% 이상을 차지하고 있는 무기계 건설폐기물에 대한 건설폐기물 처리관련 환경문제는 적절한 해답을 찾지 못한 채 심각한 사회적 문제로 대두되고 있음.



■ 건설폐기물 저감을 위한 정부정책강화

- 2차 건설폐기물 재활용 기본계획[환경부]에 따르면, 건설 폐기물 재활용 확산을 추진하기 위해 재활용 자재의 의무사용을 기존 15%이상에서 2016년 30%~40%으로 확대 추진
- 제3차 과학기술기본계획[미래창조과학부]이 수립됨에 따라 건설폐기물 발생 억제 및 재활용 촉진, 기타 건설 폐기물 재활용 기술개발에 대한 집중 투자를 진행하고 있음.
- 국토교통 R&D 중장기전략[국토교통부]이 수립됨에 따라 2019년 이후 중장기 연구주제로 건설재료 개발 및 활용기술 부문 건설재료 해체/분해/재자원화 시스템 기술개발 요구가 높아짐.



* 2차 건설폐기물 재활용 기본계획, 환경부, 2013
* 3차 과학기술기본계획, 미래부, 2015

[국내 건축물 CO₂ 배출량 평가기술]

■ 미활용 건설폐기물의 실질적인 재활용 방안의 요구증대

- 산업 폐기물의 건설재료로의 재활용에 대한 일부 연구가 수행된바 있으나, 건설폐기물의 재활용율을 높이는 폐 콘크리트 및 순환골재 사용 활성화에 국한되어 연구가 이루어짐.
- 매년 발생량이 크게 증가하는 폐석고보드, 폐석회, 폐유리, 등의 무기계 건설폐기 재활용 방안에 대한 연구는 전무한 실정임.



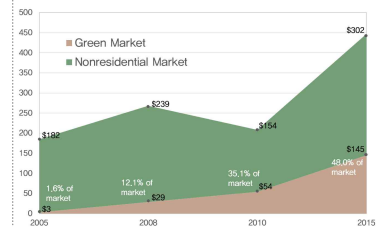
[국내 건축물 CO₂ 배출량 평가기술]

나. 국외 환경변화

■ 국외의 환경선진국에서는 건설폐기물을 저감 관리하기 위해 미분혼합용 시멘트용 혼화재, 지반개량용 고화재 등을 실용화하고 있으며, 건설분야에서 재자원화의 더욱 적극적인 활용을 위해 최근 미국의 LEED, 영국의 BREEAM 등 국제적인 녹색건축 인증제 기준개정을 통해 친환경 재활용 건설재료 적용을 강화하는 추세임.

■ 친환경 건설산업 규모 확대

- 전세계 친환경 건설산업 규모는 2005년 전체 건설시장의 1.6%(30억불)이었으나, 2010년 35%(540억불)로 급격하게 성장하였고, 2015년에는 48%(1450억불)으로 지속적인 시장 확대를 예상하고 있음.
- 2005년에서 2008년까지의 연평균 성장률은 56.1%였으며, 2010년 친환경 건설산업의 규모는 540억 달러로 전체 건설시장의 35.1%를 차지함.
- 이는 선진국일수록 친환경 건설산업 시장에 대한 투자대비 기대효과 잠재력이 높음에 기인하며, 친환경 건축시장은 계속적으로 성장할 것으로 예상됨.

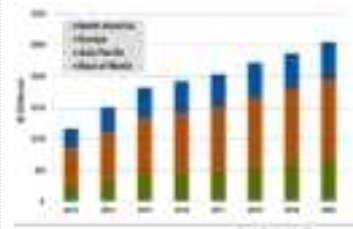


[친환경 건축시장 전망]

※참조 : McGraw Hill Construction의 The Green Outlook 2011

■ 재활용 건설재료 실용화 영역 확대

- 일본, 유럽, 캐나다의 경우 2000년부터 시급문제로 간주하여 연구개발 활발, 미분혼합용 시멘트용 혼화재, 지반개량용 고화재, 아스팔트 필러 등 친환경 건설재료의 실용화 단계에 있음.
- 대체재료가 부족한 시멘트의 핵심원료인 석회석 부족문제를 해결할 수 있는 신규 건설재료 시장 개척
- 재생시멘트의 생산으로 관련 업계의 국제적 기술집약적 주력상품 효과와 고부가가치형 기술로 인식 보급 건설구조물 기술력 확보.



[재활용 건설재료시장 전망]

※참조 : Navigant Research 2013

■ 자원순환형 건설재료 사용요구 증대

- 해외 선진국은 녹색건축물을 구현하기 위한 친환경 건설재료 산업의 성장을 위해 친환경 건설재료에 관계된 다양한 정책을 수립하고 있음.
- 특히, 최근 미국의 LEED, 영국의 BREEAM 등 국제적인 녹색건축 인증제에서 인증기준의 개정을 통해 친환경 재활용 건설재료 적용을 점차적으로 강화하는 추세임.
- 이에 따라 국내 녹색건축인증제도(G-SEED)에서도 2016년 9월에 “3.재료 및 자원-자원순환 자재의 사용” 부문을 정규항목으로 채택하여 자원 순환 자재 사용을 장려하고 있음.



[LEED, BREEAM, G-SEED 인증내 자원순환형 건설재료 사용요구 증대]

다. 연구개발의 중요성

미래 핵심원천기술 국토교통 중장기 전략과의 부합성	본 연구과제는 국토교통 R&D 중장기전략으로 추진 중인 <u>건설재료 해체/분해/재자원화 시스템 기술개발 부문에 부합</u> 되며, 향후 정부/지자체의 자원순환형 <u>도시건설 개발 사업에 있어 녹색건설재료 보급·확산을 위한 전략적 핵심원천기술</u> 임.
기초연구 및 원천기술 개발의 시의성	“국토교통부 제1차 녹색건축물 기본계획” 내 기반구축 과제로 녹색건설산업 조성과 자원순환형 지속가능의 이념을 실천하기 위해 시급히 요구되는 필수불가결한 기술로서 <u>시의성이 매우 높으며 1단계 완료 시점인 2018년에 기술개발 완료</u> 가 가능함.
기초연구 및 원천기술 개발의 중요성	<u>자원순환형 건설산업 실현을 위한 지식기반의 실용적 원천기술</u> 로서 연구가 완료된 무기계 건설폐기물의 재자원화 기술을 통해 환경 배려형 시멘트 개발이 가능한 <u>원천기술 확보가 가능한 연구</u> 임.

○ 미래 핵심원천기술로서 국토교통 중장기전략과의 부합성

- 본 연구과제는 녹색건축물을 위한 지속가능성 평가기술 개발 연구로써 정부가 국토교통 R&D 중장기 전략으로 추진 중인 4대 전략 및 10대 정책 방향과 부합되며, 특히 녹색건설산업 활성화와 보급·확산을 위한 녹색건설재료 기술 개발 전략에 필수불가분의 과제 임.
- 본 연구과제는 국토교통 R&D 중장기 전략으로 추진 중인 건설재료 해체/분해/재자원화 시스템 기술개발 부문에 부합되며, 향후 정부/지자체의 자원순환형 도시건설 개발 사업에 있어 녹색건설재료 보급·확산을 위한 전략적 핵심원천기술로서 활용 및 파급 효과가 매우 우수 함.

○ 기초연구 및 원천기술 개발의 시의성

- 본 연구과제는 국토교통부의 “제1차 녹색건축물 기본계획(2014년 12월)”에 따라 2018년까지 추진 중인 녹색건축물 기반구축에 부합되는 기초 연구과제로서 정부가 녹색건축물 확대를 위해 목표로 하는 국가 차원의 환경부하 저감형 녹색건축물 개발을 위해 시급히 처리되어야 할 과제 임.
- 본 연구과제를 통해 개발되는 원천기술은 정부가 추진 중인 녹색건축물의 조성과 지속가능한 개발의 이념을 실천하기 위해 시급히 요구되는 필수불가결한 기술로서 시의성이 매우 높으며, 향후 2년 뒤 공동주택의 지속가능성을 새로운 개념으로 평가하는 세계 수준의 원천기술 확보가 가능한 연구임.

○ 기초연구 및 원천기술 개발의 중요성

- 본 연구과제는 국내 지속가능 건축시장의 성장을 촉진하고 국제적 정책 변화에 효과적으로 대응할 수 있는 공동주택의 전과정 지속가능성 평가 및 설계지원에 관한 원천기술임.
- 또한, 국내 건축 환경 및 실정에 부합하는 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 확보와 더불어 기존 기술 수준의 차원을 넘어 국제 시장 선점과 기술적 우위를 확보할 수 있는 중요한 원천기술임.

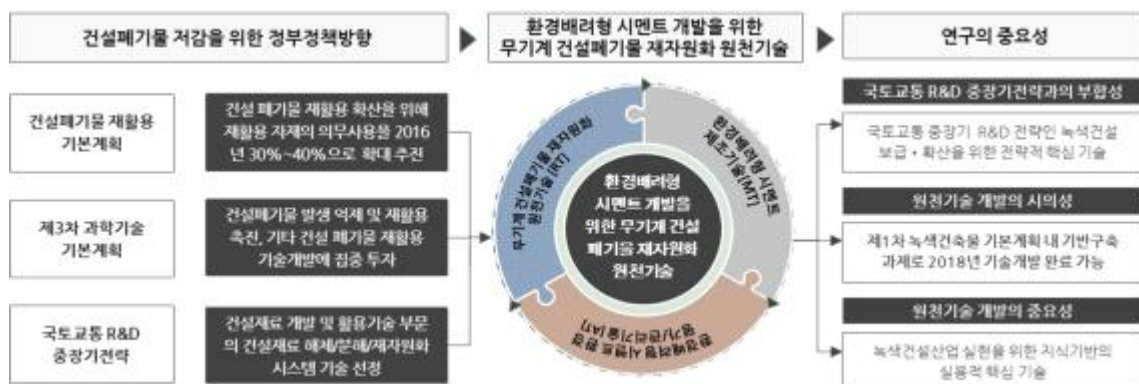


그림 1.3 환경 배려형 시멘트 개발을 위한 무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 연구개발의 중요성

3. 연구개발 범위

- 본 연구는 환경 배려형 시멘트 개발을 위한 무기계 건설폐기물의 재자원화를 위한 원천 기술 개발 연구로서 연구 수행 전 TRL 2단계(기술적 개념정립 단계)의 기술 수준을 TRL 4단계(실험실 성능평가 단계) + @ (TRL 5단계 진입을 위한 시작품 초안)로 발전시키는 것을 개발 범위로 함.

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

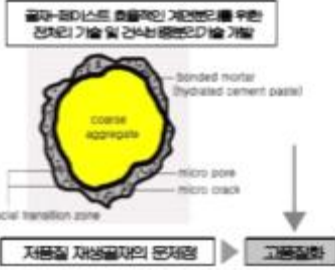
- 본 연구과제의 1차년도에서는 무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 및 환경 배려형 시멘트 기술 정립 및 증명을 통해 원천기술의 전체적인 체계를 구축하여 본 기술 개념을 기술적으로 구현하고 기본적인 성능의 검증을 통해 TRL 3단계 수준까지 향상시킴.
- 2차년도에서는 무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 및 환경 배려형 시멘트 기술 개발 및 성능평가 를 완료 하고 본 기술 전반에 대한 성능평가 및 신뢰성 시험과 검증을 통해 기술개발의 성숙도를 TRL 4단계 수준까지 증대시킴.

연구기간	연구 착수시점	1차년도 연구과제 (2017.04 ~ 2017.12)	2차년도 연구과제 (2018.01 ~ 2018.12)
기술개발 성숙도	TRL 2단계 (2017년 02월 기준)	TRL 3단계 (2017년 12월 기준)	TRL 4단계 + α (2018년 12월 기준)
기술수준	기술적 개념 및 아이디어 정립 단계	기술 개념 구현 및 기본적인 성능 검증 단계	연구실 환경에서의 성능평가 및 신뢰성 시험과 검증 단계
연구개발 범위	-	본 기술의 개념 구현을 위한 폐기물 화학조성 DB 구축, 제조기술 연구 를 유기적으로 병행하여 신속히 전체적인 개발체 계를 구축하고 기본적인 성능검증을 연구개발 범 위로 함.	전체적인 평가체계를 발 전시켜 환경 배려형 시멘 트 기반의 시작품으로 개 발하고 다양한 사례분석과 검증을 통해 본 기술의 성 능과 신뢰성을 검증은 연 구개발 범위로 함.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술 개발 현황

■ 국내에는 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률제정(1994년)에 따라 건설폐기물을 일정량 재활용이 의무화 되어 있으나, 부가가치가 낮은 폐콘크리트를 활용한 재생 굵은골재의 제조기술 및 실용화 방안에 관한 연구개발에 치중되어 있으며, **건설폐기물의 90%를 차지하는 무기계 건설폐기물의 재활용 기술에 관한 연구는 전무한 상태임.**

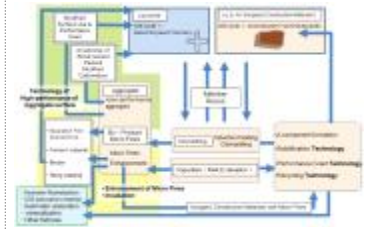
■ 시멘트 및 시멘트 관련 제품 구성재료의 재생 기술 분야	- 폐기콘크리트를 활용한 재생 굵은골재의 제조기술 및 실용화 방안에 관한 연구개발 활발 - 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 제정 (1994년) : 건설폐기물을 일정량 재활용 의무화 - 폐콘크리트계 미분말(폐콘크리트 20% 이상 차지)의 처리기술에 관한 연구는 전무한 상태	 [자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률]
■ 시멘트 및 시멘트 관련 제품 CO₂ 저감 기술 분야	- 시멘트 및 콘크리트의 제조 장치의 효율성 향상의 기술개발이 주를 이룸. - 콘크리트 제조시에 CO₂ 발생 원단위가 작은 고로슬래그 미분말 등을 혼입 - 구조물의 사용기간 중에 콘크리트의 탄산화 반응에 의해 공기 중의 CO₂를 대량 고정화시키는 방법	 [계면분리를 위한 전처리 기술]
■ 국내 건설폐기물 재활용 관련 산업 동향	- 현재 국내에서는 폐콘크리트 미분말의 자원으로 사용 유상매각 및 재생재료에 관한 시장이 전무함. - 일부 시멘트 제조회사에서 연구용으로 적용 중 - 향후, 친환경건축 인증제 및 폐기물 처리에 대한 법적 조세적 측면의 우선제도가 생길 경우, 급속도로 관련 산업의 발전 및 성장이 예상됨. - 주요 관련 업체는 부산원료 생산자(공급자)로서 폐콘크리트 처리업 및 제철공장(고로슬래그)과 화력발전소 (플라이애쉬, 바텀애쉬)가 있음. - 재생재료 생산자로서 시멘트 제조회사가 있음.	 [재활용 건설재료 관련 인증제, 녹색건축인증제 및 환경성적표지제도]

2. 국외 기술 개발 현황

- 국외의 환경선진국에서는 건설폐기물을 저감 관리하기 위해 미분혼합용 시멘트용 혼화재, 지반개량용 고화재 등을 실용화하고 있으며, 골재 회수형 완전 리사이클 콘크리트 기술의 개발 및 폐건설재료를 재생건설재료로 개발한 연구가 다수 존재함. 건설분야에서 재자원화의 더욱 적극적인 활용을 위해 **콘크리트의 완전 재자원화를 도모하는 기초원천 기술 확보 국책 프로젝트**를 대학과 국가연구기관을 중심으로 연구개발에 주력하고 있음.

■ 일본의 자원순환형 시멘트 연구개발 기초원천 기술

- 일본의 경우 1980년대 중반부터 건설폐기물 대책의 일본 건설성의 「리사이클 플랜 21」 발표하여, 3가지 대책 부산물의 발생억제, 리사이클 추진, 부산물의 적정관리를 시행해옴.
- 2000년대 중반부터 건설분야에서 재자원화의 더욱 적극적인 활용을 위해 **골재 회수형 완전 리사이클 콘크리트 기술의 개발등 콘크리트의 완전 재자원화를 도모하는 기초원천 기술 확보 국책 프로젝트**를 대학과 국가연구기관을 중심으로 연구개발에 주력하고 있음.



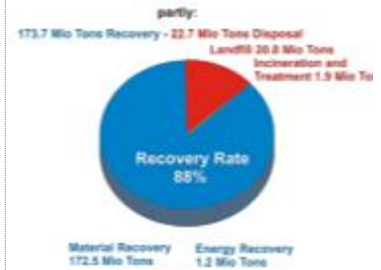
[완전 리사이클 기술개요도]

※참조 : 骨材回収型完全リサイクルコンクリート技術の開発に関する研究, 2005

■ 유럽의 건설 폐기물 재활용 관련 기술 동향

- 유럽의 경우 독일, 영국, 네덜란드, 덴마크를 중심으로 건설폐기물 재활용 산업이 활발히 추진 중임.
- 이 가운데 독일의 경우 건설폐기물 재활용 산업 규모가 가장 크며, 1951년에 건설폐기물 재활용 추진대책을 마련하여 폐벽돌을 콘크리트용 골재로 재활용 산업의 기틀을 마련함.
- 2002년 폐콘크리트를 시멘트 원료의 석회석으로 재생하는 기술 개발을 시작으로 각각의 폐건설재료를 재생건설재료 (재생 시멘트, 재생 기와, 재생 경량기포콘크리트, 재생 석고보드 등)로 개발한 연구가 다수 존재함.

Construction and Demolition Waste 2006
(including road demolition waste)
Total: 196.4 Mio Tons



[독일 건설폐기물 재활용 비율 및 고부가가치 활용내역]

※참조 : Bundesministerium fuer Umwelt (BMU), Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2006

■ 미국의 건설 폐기물 재활용 관련 기술 동향

- 미국의 경우 대표적으로 도로기층, 기초의 지지층, 지하 배수관 주변의 필터층, 아스팔트혼합물 및 콘크리트용 골재 등으로 사용되고 있음.
- 최근 연구 및 지침 등을 통하여 콘크리트용, 아스팔트콘크리트용, 프리캐스트 제품용, 바닥층 기초용, 관거공사용, 제방용 등의 다양한 용도로 확대하고 있는 실정임.

Characterization of Municipal Solid Waste in the United States



[미국 주단위 재활용콘크리트 재자원화 사용 실적]

※참조 : FHWA, Federal Highway Administration, 2003

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구개발 목표

구분	내용	
최종 목표	본 연구는 “무기계 건설폐기물(타일, 유리, 벽돌, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO ₂ 를 다량 포함한 무기계 건설폐기물)의 재자원화 기술”을 이용한 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 품질기준(KS L 5201)을 만족하는 “환경 배려형 시멘트 제조 원천 기술 개발”을 목적으로 함.	
연구개발 범위	본 연구개발 과제는 환경 배려형 시멘트 개발을 위한 무기계 건설폐기물의 재자원화 기술에 관한 기초원천 기술개발 연구로서 시멘트 관련 재료가 사회 간접자본 및 도시의 근간을 이루는 재료임을 감안하여 개발대상을 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 우선적으로 접근하며, 향후 다른 Type의 시멘트도 동일한 기술적 방법을 통해 확대·발전될 수 있음.	
주요 연구 내용	[RT] 재자원화 기술	무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술
		무기계 건설폐기물 별 화학적 특성 분석 및 재자원화 DB 구축과 국내 무기계 건설폐기물 발생량 예측 기술 개발 연구
		① 무기계 건설폐기물 및 시멘트 화학적 조성 분석 ② 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB 구축 ③ 무기계 건설폐기물 추정 프로세스 제시
	[MT] 제조기술	환경 배려형 시멘트 제조 원천기술
		무기계 건설폐기물 재자원화 DB를 이용한 최적의 환경 배려형 시멘트 배합/제조 원천기술 개발과 성능평가 연구
		① 건설폐기물 수화성 회복을 위한 최적 재생프로세스 제시 ② 환경 배려형 시멘트 최적 원료 배합 공정 구축 ③ 환경 배려형 시멘트의 압축강도 발현 및 물리적/화학적 성능 검증
	[AT] 평가기술	환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술
		무기계 건설폐기물 및 환경 배려형 시멘트의 환경성능 분석을 통한 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 및 품질 관리 가이드라인 개발 연구
		① 환경 배려형 시멘트의 환경부하 배출 원단위 DB 구축 ② 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 ③ 환경 배려형 시멘트의 품질 관리 가이드라인 작성
최종성과물	[1] 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB	
	[2] 환경 배려형 시멘트 배합설계 및 제조 원천기술	
	[3] 환경 배려형 시멘트 품질 관리가이드라인	

RT : Recycling Technology of inorganic construction wastes

MT : Manufacturing technology of environmental friendly cement

AT : Assessment/management Technology of environmental friendly cement

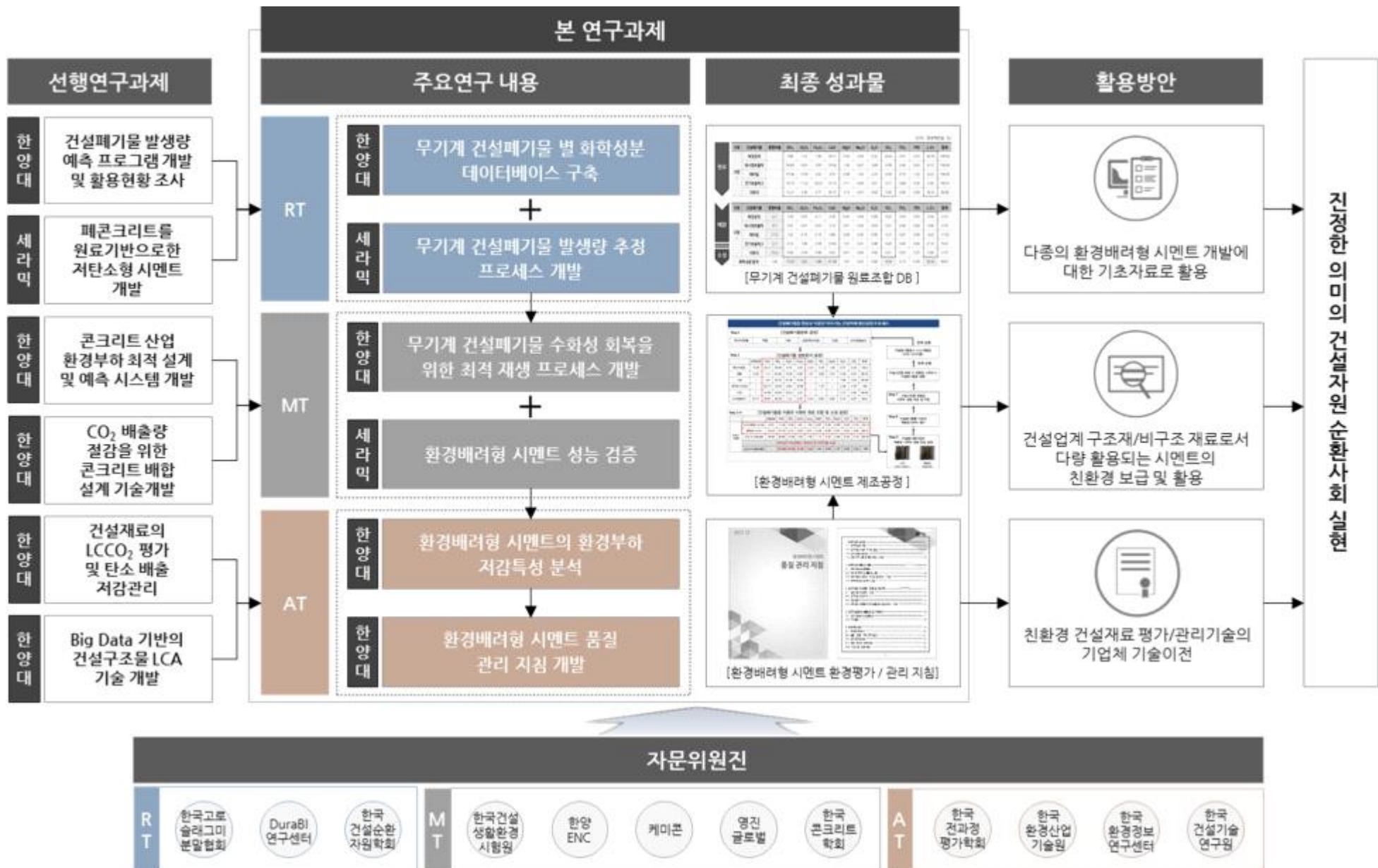


그림 3.1 연구개발의 전체 구성도

2. 연차별 연구 수행 내용

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2017)	1세부 (한양대학교)	무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 및 환경 배려형 시멘트 기술 정립 및 증명		
		무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 정립	① 무기계 건설폐기물 화학적 성분 이론적 고찰 ② 시멘트 화학적 인자 구성요소 분석 및 무기계 건설폐기물 화학성분 분석	① 무기계 건설폐기물 분석대상 8종 자재 선정 ② 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB 구축
		환경 배려형 시멘트 제조기술 정립	① 환경배려형 시멘트 배합 분석 ② 환경배려형 시멘트 제조 ③ 환경배려형 시멘트 특성 분석	① 시멘트 원료 대체율(25%, 20%, 15%) 배합 도출 ② 환경배려형 시멘트 클링커 제조 및 소성 ③ Free CaO, X선회절분석, 광학현미경 분석을 통한 화합물 생성 및 KS 기준 만족여부 판별
	[무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발]	환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술 정립	① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축 ② 환경배려형 시멘트 환경성능 평가	① 무기계 건설폐기물 환경영향 평가 프로세스 및 환경영향 LCA 데이터베이스 구축 ② 환경 배려형 시멘트 제조에 따른 6대 환경 영향 별 기회저감량 평가
		무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 및 환경 배려형 시멘트 기술개발 지원		
	위탁기관 (한국세라믹기 술원)	무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 개발지원	① 무기계 건설폐기물 분말화 및 형광 X선 분석 및 강열감량 분석지원	① 무기계 건설폐기물 성분분석을 통한 화학적 특성 재자원화 DB 구축 지원
		환경 배려형 시멘트 제조기술 개발지원	① 무기계 건설폐기물을 이용한 클링커 제조 및 소성	① 무기계 건설폐기물을 이용한 클링커 제조 및 소성

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2018)	1세부 (한양대학교)	무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 및 환경 배려형 시멘트 기술개발 및 성능평가		
		RT	무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술 개발 및 성능평가	① 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스 ② 재자원화 대상 무기계 건설폐기물 발생량 데이터베이스 구축
		MT	환경 배려형 시멘트 제조기술 개발 및 성능평가	① 재자원화 대상 무기계 건설폐기물 예측기법구축 시공단계 / 해체단계 ② 재자원화 대상 무기계 건설폐기물 발생량 데이터베이스 구축
	[무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발]	MT	① 환경배려형 시멘트 최적 원료 배합 공정 개발 ② 최적배합 사례 환경배려형 시멘트 제조 ③ 환경배려형 시멘트 특성 분석	① 보그 식을 이용한 환경 배려형 시멘트 조합 분석 및 OPC 성능을 만족하는 최적 배합 제시 ② 최적배합 사례 환경배려형 시멘트 클링커 제조 및 소성 ③ 압축강도를 비롯한 물리적/화학적 성능 KS 기준 만족여부 판별
		AT	환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술개발 및 성능평가	① 무기계 건설폐기물 재자원화 기술정보 제공 ② 환경배려형 시멘트 생산을 통한 환경영향 배출량 추정 방법 제공
		AT	① 환경배려형 시멘트 품질관리 요구사항 ② 환경배려형 시멘트 환경평가 요구사항	
위탁기관 (한국세라믹기 술원)	무기계 건설폐기물의 재자원화 기술 및 환경 배려형 시멘트 기술개발 지원			
	[환경 배려형 시멘트 개발 및 성능평가]	MT	환경 배려형 시멘트 제조기술 개발지원	① 최적배합 사례 무기계 건설폐기물을 이용한 클링커 제조 및 소성
		AT	환경 배려형 시멘트 환경유해성 평가	① 환경배려형 시멘트 환경 유해성 평가 분석

3. 세부연구 수행 내용

[RT] 무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술

- 본 핵심성과의 연구목표, 연구내용 및 연차별 세부수행방법은 다음과 같음.

연구 목표	무기계 건설폐기물 별 화학적 특성 분석 및 재자원화 DB 구축 과 국내 무기계 건설폐기물 발생량 예측 기술개발을 통한 고품질 시멘트의 생산을 위한 지원기술 개발 연구							
연구 내용	1.무기계 건설폐기물 및 시멘트 화학적 특성 분석 2.무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB 구축 3.무기계 건설폐기물 추정 프로세스 제시							
연구 프로 세스	1차년				2차년			
	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기
	1.무기계 건설폐기물 및 시멘트 화학적 특성 분석							
		2.무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB 구축						
					3.무기계 건설폐기물 발생량 추정 프로세스 제시			
수행 방법	연차	주요 연구활동			세부 수행 방법			
	1차 년도 기술 정립 및 증명	① 무기계 건설폐기물 화학적 성분 이론적 고찰			▪ 무기계 건설폐기물 분석대상 8종 자재 선정 (타일, 유리, 벽돌, ALC, 석고보드, 콘크리트미분말 등 CaO 및 SiO ₂ 를 다량 포함한 건설폐기물) ▪ 건설폐기물의 고품질 재활용 을 위한 각국의 수집, 처리, 재생 시스템의 조사			
		② 시멘트 화학적 인자 구성요소 분석 및 무기계 건설폐기물 화학적 성분 분석			▪ 무기계 건설폐기물의 재령 및 종류와 성분분석(XRF 분석)에 따른 건설폐기물별 화학 조성 DB 구축 ▪ 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB 구축			
	2차 년도 기술 개발 및 성능 평가	③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스			▪ 무기계 건설폐기물의 발생시점(구조물 폐기시점)에 따른 구성 화학성분의 변화분석을 통한 최적 순환 목표 및 프로세스 설정 ▪ 무기계 건설폐기물의 재령 및 종류와 성분비에 따른 건설폐기물별 화학적 특성의 DB 구축			
		④ 재자원화 대상 무기계 건설폐기물 발생량 데이터베이스 구축			▪ 시공통계 데이터 및 건축물 내구수명 예측식 을 통하여 건설폐기물별 발생량 예측 DB 구축 ▪ 무기계 건설폐기물 매립감소량 예측 ▪ 무기계 건설폐기물 마다의 자원활용 DB 및 최종처리정보 DB 구축			

■ 환경배려형 시멘트의 필요성 및 접근방법

- 시멘트산업은 제조과정상 원료 및 연료로부터 기인하는 CO₂ 문제로 다배출 산업으로 구분되어 환경문제로 대두되고 있음. 재료적 측면에서 살펴보면 석회석의 탈탄산으로 인한 CO₂ 배출과 탄산화를 통한 CO₂의 흡수과정을 거치게 되며 콘크리트 구조물이 수명을 다하는 경우 폐콘크리트로 배출되며, 건물이 철거되는 과정에서 다양한 건설폐기물이 발생함.
- 아직까지는 이에 대한 인식이 높지 않고 건설폐기물 처리시설에서 다시 시멘트 제조공장으로 이송해야만 하기 때문에 물류비가 발생하여 경제적으로 타당하지 않지만 CO₂ 순환의 관점에서 꼭 새롭게 다루어져야 할 문제임에는 틀림없는 것으로 사료됨. 재활용률을 쉽게 높일 수 있는 폐콘크리트를 중심으로 다양한 연구가 이루어지고 있지만 폐시멘트 블록, 폐석고보드 등의 건설폐기물을 활용한 연구는 미비한 실정임. 건설폐기물을 이용하여 저탄소 녹색성장의 대응이 가능한 시멘트로서 활용하기 위하여 기존의 불활성 충전재로서의 활용에서 벗어나 원료 전처리 및 원료 최적 배합설계를 통해 환경배려형 시멘트를 개발하고자 함. 건설폐기물을 원료기반으로 하는 시멘트 제조를 위해 건설폐기물의 화학적 특성을 분석하여 활용 가능성에 대해 검토하고 활용방안을 찾고자 함.

■ 시멘트 화합물 구성

- 시멘트를 구성하는 원재료인 석회질, 점토질 등의 광물은 시멘트의 주요 화학성분인 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃로 이루어져 있으며 이들은 적절한 혼합비율로 조합되어 구성되고 시멘트 제조 공정 가운데 1450℃ 이상 되는 로터리 킬른(Rotary Kiln)의 소성 공정에서 화학적 결합에 의해 단단한 새로운 광물(클링커, Clinker)로 결합되어 조성됨. 이 때 생성되는 클링커는 알라이트(Alite), 벨라이트(Belite), 알루미네이트(Aluminate), 페라이트(Ferrite)의 성분들로 구성되며 이들은 C₃S(3CaO·SiO₂), β-C₂S(2CaO·SiO₂), C₃A(3CaO·Al₂O₃), C₄AF(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)로 표기됨.
- 한편, 포틀랜드 시멘트의 주요 화학성분 값을 알면 이론적으로 시멘트의 중간제품인 클링커의 광물조성비를 예측할 수 있는데 이 때 사용되는 것이 보그(Bogue)식임. Bogue식은 1920년대에 로버트 보그(Robert Herman Bogue)에 의해 고안된 식으로 해외에서는 널리 사용되고 있으며, 미국시험재료학회의 ASTM 및 국내 KS기준(KS L 5201)에 명시되어 있음. 그 밖에 시멘트 제조 및 클링커의 제조 관리를 위한 특성치로는 석회포화도(LSF:Lime Saturation Factor), 규산률(SM:Silica Modulus), 철률(IM:Iron Modulus)을 추가적으로 고려하여 각각의 값을 산정함. 석회포화도는 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃와 반응할 수 있는 CaO의 양을 가늠하는 것으로 전형적인 값은 0.92~0.96이며, 규산률은 소성공정에서 용액상의 양과 관련이 있으며 규산률은 높으면 용액량은 적어지고 클링커 형성이 충분히 일어나지 않아 킬른 중에 가루상태로 날아다니고 맘. 마지막으로 철률은 용액이 형성되는 온도를 조절하는데 대략 1.6일 때 용액형성온도가 가장 낮아지며 클링커 화합물 생성, 덩어리 형성에 가장 좋음.

■ 클링커 광물의 조성과 구조

- 포틀랜드 시멘트를 화학분석하면 그 집합체의 평균 화학조성을 구할 수 있음. 이 값은 어디까지나 평균적 화학조성이고 결합상태는 언급하고 있지 않기 때문에 이것만으로는 시멘트의 성질을 알 수 없음. 그러나 최고의 품질 관리하에 제조된 시멘트라면 그 평균조성으로부터 그 성질을 대체로 판단할 수 있음. 국내에서 시판되는 포틀랜드 시멘트의 화학조성을 표 3.1에 나타냄. 표 3.1의 화학조성에서 강열감량, 불용해 잔분, CaSO_4 양을 공제하면 클링커 조성으로 환산할 수 있음. 보통 포틀랜드 시멘트 클링커의 조성에서 CaO 는 전체의 약 2/3, SiO_2 는 CaO 의 약 1/3, Al_2O_3 는 SiO_2 의 1/4, Fe_2O_3 는 Al_2O_3 의 약 1/2로 되어 있음. 조강 시멘트에서는 CaO 를 1% 증가시키고 그 분량만큼 SiO_2 및 그 밖의 성분을 감소시키고 또한 중용열 시멘트에서는 Al_2O_3 를 1% 감소시키고 SiO_2 및 그 외의 성분을 증가시킴.
- 표 3.2는 표 3.1의 클링커 조성으로부터 시멘트 화합물 조성으로 환산한 것으로 시멘트 특정 성분의 1% 전후의 증감이 시멘트 화합물의 양을 크게 변화시키고 있다는 것을 알 수 있음. 즉 조강시멘트 클링커 중의 CaO 1% 증가는 단기 강도가 큰 C_3S 의 증대를 초래하고 중용열 시멘트 클링커의 CaO 와 Al_2O_3 의 약 2% 감소는 수화열이 큰 C_3S 및 C_3A 의 감소를 초래함.

표 3.1 포틀랜드 시멘트의 화학조성 예

(단위 : %)

구 분	LOI	Insol. R	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	계
보통시멘트 (클링커 환산치)	0.6	0.1	22.0	5.3	3.0	64.9	1.3	1.9	99.1
	-	-	23.0	5.6	3.2	66.8	1.4	-	100.1
조강시멘트 (클링커 환산치)	0.8	0.2	21.0	5.0	2.7	65.5	1.1	2.7	99.6
	-	-	22.5	5.4	2.9	68.0	1.2	-	100.0
중용열시멘트 (클링커 환산치)	0.8	0.3	23.5	4.0	3.7	64.7	0.9	1.9	99.8
	-	-	24.6	4.2	3.9	66.4	0.9	-	100.0

표 3.2 클링커 중의 시멘트 화합물 조성 예

(단위 : %)

구 분	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
보통 시멘트	50	26	9	9
조강 시멘트	67	9	8	8
중용열 시멘트	48	30	5	11

- 그림 3.2은 포틀랜드시멘트 클링커 단면의 반사현미경 사진임. 약 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 크기의 각진 결정이 alite(주성분 C_3S), $15 \sim 30\mu\text{m}$ 크기의 둥근 모양을 지니는 결정이 belite(C_2S)라 불리는 클링커 광물임.

① 무기계 건설폐기물 화학성분 이론적 고찰

- 이러한 alite와 belite의 결정간을 채우고 있는 미결정을 간극상이라고 부르고 그 중에서도 현미경 하에서 밝게 보이는 부분은 C_4AF 의 조성으로 대표되는 C_2A-C_2F 계 고용체로 이것을 간단히 ferrite상이라고 부르고 한편 어둡게 보이는 부분은 C_3A 를 주성분으로 하는 결정으로 이것을 간단히 aluminat상이라고 부름. 급냉한 클링커의 ferrite상에는 상당한 유리상이 함유되어 있음. 시멘트 클링커 중에 약 반을 차지하는 무색의 각진 결정임. 주성분은 C_3S 이지만 순수하지는 않고 어느 정도 다른 성분이 고용되어 있음.

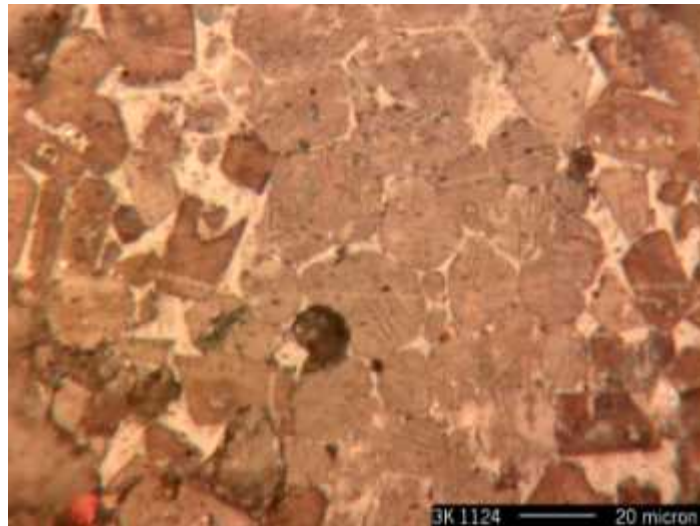


그림 3.2 클링커의 반사현미경 사진

- C_3S 의 안정영역은 $1250 \sim 2070^\circ\text{C}$ 로 1250°C 이하에서는 C_2S 와 CaO 로 분해하게 되지만 그 분해속도는 대단히 느리기 때문에 실제로 C_3S 는 상온까지 냉각됨. 또한 alite에서는 CaO , SiO_2 두 성분 이외의 성분이 꽤 공존해 있기 때문에 C_3S 의 안정 영역은 상태도에 나타낸 것보다도 낮아질 것임. C_3S 는 1300°C 까지의 사이에 적어도 5개의 발열피크가 보이고 냉각할 때도 대부분이 가역적으로 발열 피크가 되어 많은 변태가 존재한다는 것을 알 수 있음. 즉 C_3S 는 삼사정의 TI, TII, TIII 및 단사정의 MI, MII, MIII, 능면체 R의 7종 변태가 알려져 있음. 순수한 C_3S 를 가열하면 다음과 같은 전이가 일어남. 냉각하면 반대 방향으로의 전이가 일어나 본래의 삼사정으로 되돌아 감.



- C_3S 에 불순성분이 미량 고용하면 전이가 도중에서 멈추고 고온변태가 상온에서 얻어짐. 불순물로서 MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 3성분이 C_3S 에 고용한 경우 고온변태가 어느 정도 안정되는가를 나타낸 것이 표 3.3임. MgO 를 포화량까지 고용시키면 MI를 상온까지 냉각할 수가 있지만 고용량이 적으면 TI 또는 TII로 변화함.

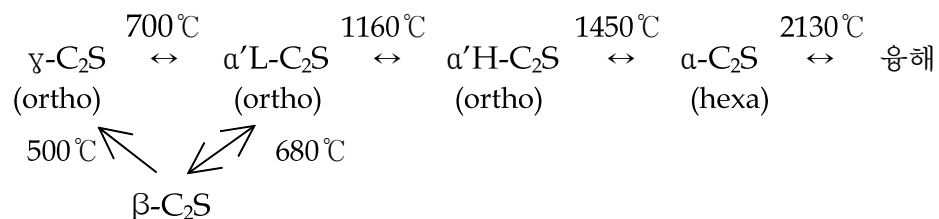
- Al_2O_3 , Fe_2O_3 는 각각 단독으로는 MI의 안정화에 효과는 없지만 MgO 와 조합하여 첨가하면 MI를 안정화 시킬 수 있음. 포틀랜드 시멘트 클링커 중의 alite는 MI, MIII가 주체이고 드물게 R, T가 함유되어 있음.
- Belite의 기본 성분은 C_2S 이지만 C_3S 와 같이 어느 정도 다른 성분이 미량 고용되어 있음. C_2S 의 융점은 2140°C 로 C_3S 의 분해융점 2070°C 보다 높음.

표 3.3 C_3S 의 안정화에 필요한 stabilizer의 첨가량

(단위 : %)

Stabilizer	TI	TII	MI
MgO	0 ~ 0.55	0.55 ~ 1.45	1.45 ~ 2.0
Al_2O_3	0 ~ 0.45	0.45 ~ 1.0	—
Fe_2O_3	0 ~ 0.9	0.9 ~ 1.1	—
$\text{Al}_2\text{O}_3(1\%)+\text{MgO}$	—	0 ~ 0.8	0.8 ~ 2.2
$\text{Fe}_2\text{O}_3(1\%)+\text{MgO}$	—	0 ~ 1.0	1.0 ~ 2.2
$\text{MgO}(2\%)+\text{Al}_2\text{O}_3$	—	—	0 ~ 1.0
$\text{MgO}(2\%)+\text{Fe}_2\text{O}_3$	—	—	0 ~ 1.1

- 그러나 C_2S 조성보다 조금이라도 SiO_2 성분이 많으면 1464°C 이상에서는 언제나 액상을 함유하는 것도 사실이고, 실제의 클링커에서는 그 외의 성분도 상당량이 공존하기 때문에 액상 생성온도는 상태도에서 나타내고 있는 것보다도 꽤 낮아질 것이라고 생각됨. C_2S 는 소성 냉각과정을 거치면서 구조의 전이가 발생하게 됨. 이 화합물의 다형은 고온형부터 α , α' , β , γ 의 43종의 변태가 알려져 있음. α' 는 또한 $\alpha'H$, $\alpha'L$ 로 나눌 수 있지만 이들 사이의 구조상의 차이는 매우 적음. C_2S 의 전이관계는 다음과 같이 정리할 수 있음.



- C_2S 의 변태 중에서 γ 상만이 Mg_2SiO_4 형이고 그 외는 모두 $\beta\text{-K}_2\text{SiO}_4$ 형에 속하기 때문에 γ 상으로 변화할 때에 큰 체적 팽창이 일어남. 이것이 dusting 형상으로 클링커는 붕괴하여 미분화됨. Belite 중에 미량 고용하여 β 에서 γ 로의 전이를 방지하는 효과를 높이는 성분으로는 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$, Na_2O , B_2O_3 , BaO , Cr_2O_3 , MnO_2 , P_2O_5 등이 알려져 있음.

① 무기계 건설폐기물 화학성분 이론적 고찰

- Belite 결정립의 표면 및 단면을 현미경으로 관찰하면 어떤 각도에서 교차하고 있는 평행선상의 줄무늬 모양이 관찰됨. 이러한 줄무늬 모양은 belite의 냉각과정에서 α 에서 α' 전이에 관계가 있다고 말해짐. 즉 α 상에 비해 α' 상은 Al_2O_3 , Fe_2O_3 등의 불순 성분의 고용량이 작기 때문에 농축, 포화에 도달한 불순물이 α 상과 α' 상의 경계면에 석출함. 더욱이 냉각해가면서 α' 에서 β 로의 전이가 일어나 경계에 불순물 층은 그대로 남게 되어 줄무늬 모양으로 되는 것임. 이 경우 β 상의 b축과 α 상의 c축이 일치함. 클링커의 소성온도가 낮든지 소성시간이 짧다든지 하면 α 상의 불순성분 고용량은 적게 되고 충분히 소성하면 고용량은 증대되어 결정립의 크기도 크게 됨.

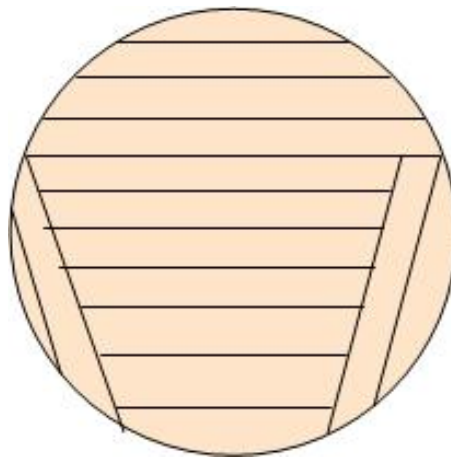


그림 3.3 Belite 입자의 lamella 구조

- α 에서 α' 로 전이되는 경우 서냉하면 고용하고 있던 불순성분은 석출하여 belite는 옅은 황색에서 갈색으로 되지만 급냉하면 불순성분은 고용한 그대로 α' 를 거쳐 β 상으로 되기 때문에 무색 투명한 belite가 얻어짐. 이경우의 β 상은 α' 에서 β 로의 전이에 의해 구조는 흐트러져 내부에 변형을 지니게 되어 수화성이 커짐. 이와 같이 belite 결정립의 입경 및 색조는 시멘트의 품질을 결정하는 중요한 인자가 되고 있음. 즉 고강도의 시멘트를 제조하기 위해서는 클링커를 고온에서 충분히 소성하여 일단 결정성이 높은 고온형을 만들고 급냉하여 변형이 큰 불안정한 저온형으로 하는 것임.
- 클링커 중의 액상 생성량은 1300°C 부근에서 급증함. 이때의 고상은 주로 alite와 belite이고 액상 성분은 CaO , Al_2O_3 및 Fe_2O_3 등임. 액상을 냉각해 가면 우선 C_3A 를 주성분으로 하는 aluminat상이 다음에 C_4AF 를 주성분으로 하는 ferrite상이 각각 alite와 belite의 대형 결정의 간극에 미소 결정으로서 석출하여 간극상을 형성함. SiO_2 성분도 함유하고 있기 때문에 최종 석출상은 glass 상으로 될 가능성도 있음.
- 간극상의 결정은 크기도 미소하고 투명도도 낮기 때문에 현미경 관찰은 힘들. 그래서 간극상과 똑같은 조성의 용액을 만들어 이것을 적당한 조건에서 냉각하여 그 결정석출 과정 및 생성물의 성질을 조사하는 연구가 많이 행해지고 있음.

표 3.4 알루미네이트의 화학 조성

(단위 : %)

구 분		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
보통시멘트 클링커	1	4.6	27.2	11.4	53.0	2.2	0.0	1.5	0.1
	2	7.1	27.5	6.0	53.4	2.2	0.0	2.0	1.8
	3	5.8	28.7	5.3	54.8	2.2	0.0	1.7	0.8

- 클링커 중의 aluminate상은 C₃A를 주성분으로 하고 여기에 알칼리가 미량 고용되고 있음. 즉 클링커 중에서도 Na₂O, K₂O가 각각 0.1 ~ 1.0% 정도 함유되어 있어서 그 일부는 황산알칼리로 존재하고, 나머지는 클링커 광물에 고용하게 됨. 그래서 고용된 알칼리는 간극상 중에서도 aluminate 상에 많이 함유되어 있고, 이것에 의해 C₃A의 결정구조가 변화하게 됨.
- 클링커로부터 분리된 aluminate 상의 화학조성에는 표 3.4에서와 같이 CaO 및 Al₂O₃의 2성분 외에도 불순 성분으로 SiO₂, Fe₂O₃, MgO 및 알칼리가 존재 함.
- 클링커 중의 Na₂O 및 K₂O는 원료 및 연료로부터 들어오는 SO₃와 결합하여 황산염을 만들지만 나머지의 대부분은 C₃A에 고용되어 여분의 알칼리 성분이 적으면 입방정 고용체, 많을 때는 사방정 고용체를 만든다고 알려져 있음. 또한 실제로는 알칼리 성분 이외의 SiO₂ 및 Al₂O₃도 고용되어 있어서 고온 변태의 사방정 고용체를 상온까지 냉각하는 것을 용이하게 함.
- 미량의 Na₂O 및 K₂O는 $\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow 2\text{Na}^+$ (혹은 2K^+)와 같은 치환고용을, 한편 Fe₂O₃는 AlO₄ 사면체 중심의 Al³⁺가 Fe³⁺와 치환 고용을 각각 일으키는 것에 의해 사방정 C₃A로 변화 함. 특히 C₃A에는 단위격자 내에 8개소의 양이온 위치가 공극으로 되어 있기 때문에 $\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow 2\text{Na}^+$ 의 치환 때 남은 Na⁺는 이 공극에 들어가는 것의 안정화에 기여함. 즉 $\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow 2\text{Na}^+$ 에서는 치환량에도 한계가 있지만 SiO₂ 성분이 공존하면 $\text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{Si}^{4+}$ 의 치환이 일어나고 알칼리의 작용 이외에 C₃A의 AlO₄ 사면체의 일부가 SiO₄ 사면체로 변화하는 것에 의해 안정효과를 높임. C₃A에 대한 Fe₂O₃의 고용 범위에 대해서는 2CaO·Al₂O₃와 2CaO·Fe₂O₃를 잇는 선상에 조성이 연속적으로 변화하는 완전고용임. 고온에서 클링커 중에 생성한 액상으로부터 냉각에 의해 최종적으로 석출하는 것은 ferrite상임. 이 상의 주 성분은 보통 C₄AF로 표현되는 C₂A-C₂F계의 고용체임. 클링커 중의 ferrite상의 조성도 생성조건에 의해 상당히 달라지겠지만 많은 것이 C₆AF₂ ~ C₆A₂F의 사이에 존재임. Methanol-Salicylic acid 처리에 의해 클링커로부터 분리된 ferrite 상의 화학분석 결과는 표 3.5와 같음. 표 3.5에서와 같이 C₄AF를 구성하는 CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ 이외에도 SiO₂와 MgO가 상당량 함유되어 있음을 확인할 수 있음.

표 3.5 페라이트 상의 화학 조성

(단위 : %)

구 분		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
보통시멘트 클링커	1	4.3	25.1	20.0	45.5	4.2	0.0	0.6	0.3
	2	3.0	24.6	22.2	44.9	4.3	0.0	0.6	0.5
	3	4.3	24.3	22.1	44.5	4.2	0.0	0.3	0.3

- 포틀랜드 시멘트 클링커를 구성하는 광물의 특징은 클링커 생성 과정에서의 열적 이력이나 분위기 등의 여러 조건에 의해 다양하게 변화하며 시멘트의 품질에도 관여하고 있음. 즉 클링커 광물에는 정확하게 파악되어 있지 않은 킬른, 쿨러 등의 공정을 이해하거나, 시멘트의 품질을 관리·향상시키기 위해 필요한 수많은 중요한 정보를 포함하고 있음. 이러한 암호화 된 정보를 해독하려면 구성 광물의 특성이 나타내는 의미를 이론적으로 해석함과 동시에 적절한 특성 분석 방법을 구축하는 것이 필수적임. 또, 이것을 공업적으로 활용하려면 특성과 조업 조건 및 품질과의 상호관계를 체계적으로 정리하는 것이 중요함.
- 클링커 광물의 특성은 원료 및 연료의 특성에 따라서도 크게 변화함. 최근 시멘트 업계에 친환경적 사업으로의 전환을 위한 recycle 자원(산업 폐기물)의 유효 활용 여부에 따라 클링커 광물의 생성 및 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 예상되고 있으며, 따라서 산업폐기물이 클링커 특성에 미치는 영향과 품질과의 관계를 명백히 해 두는 것도 시멘트의 품질을 유지하면서 recycle 자원을 적극적으로 이용하기 위한 중요한 전제가 될 것임. 또한 시멘트 품질의 대부분은 시멘트를 소재로 한 모르타르 및 콘크리트의 물성으로 평가하는 것이 일반적이므로 결과를 얻는데 긴 시간을 필요로 함. 따라서 클링커 특성과 같은 단시간에 측정할 수 있는 품질관련 인자를 이용해 시멘트의 품질을 예측하는 것도 필요함. 이를 통해 종래의 안정화만을 지향하는 경험적, 통계적인 품질 관리에서부터 품질의 설계와 더불어 공정 조건의 적정화 등을 포함한 이론적, 능동적인 관리로의 전환도 가능하게 될 것으로 기대됨. 대표적 현미경 관찰법인 Polished Section의 광학 현미경 관찰은 미세 구조(micro structure)의 관찰이 가능하고, 클링커 형성 history를 파악할 수 있다는 장점이 있음. 그러므로 대부분의 현미경 관찰은 분말에 의한 방법보다는 잘 연마된 클링커를 주로 사용함. 이는 raw material의 특성, 소성 공정 및 냉각 조건 등을 적절하게 파악할 수 있는 방법으로 클링커를 관찰하는 주된 방법으로 이용되고 있음. 관찰하고자 하는 적정 크기의 클링커를 2개 내지 3개 정도 시료 컵에 넣은 후 경화액과 에폭시를 적당량 혼합한 혼합액을 시료 컵에 채워 경화시킴. 경화가 완료된 후 grinding과 polishing 처리를 충분히 행하고 현미경을 관찰함. 관찰까지의 시간은 어느 정도 소요되나 분말법보다 넓은 범위를 관찰할 수 있으며, 미세 구조를 정확하게 판단할 수 있다는 장점을 가지고 있음.

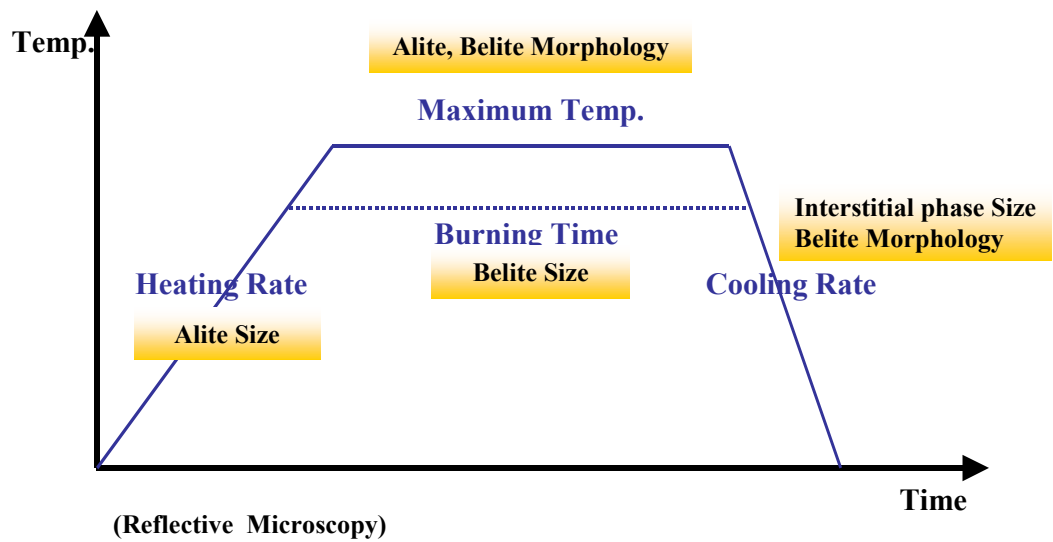


그림 3.4 소성 공정별 영향 인자

- 그림 3.4에서와 같이 반사 현미경을 통한 일반 시멘트 제조공정 평가는 주로 생성 광물의 크기, 분해정도, 간극상의 결정화 정도에 따라 구분할 수 있음. 즉 승온속도는 alite의 크기에, 고온에서의 유지시간은 belite의 크기에 주로 영향을 주며, 냉각속도는 aluminates의 결정화 및 belite의 분해에 주로 영향을 주는 것으로 알려져 있음. 이러한 광물들의 특성에 따라 소성 공정을 평가해 줄 수 있으며, 평가 결과에 따라 공정에 feed back 될 수 있는 장점을 가지고 있음.
- 일반 제조공정에서는 raw mix가 약하게 소성 되는 경우는 드물며, 이는 주로 raw material이 탈탄산 영역에서 소성대로 overflow되는 경우에 발생함. 이 경우, 소성대의 온도는 급격히 낮아지고 material의 통과시간은 짧아지며, 배출된 클링커는 큰 변형 없이 클링커 형성시의 초기 조직을 가짐. 일반 공장의 킬른은 매일 운영되지만, 소성 조건의 변동에 의해 클링커의 소성 정도는 poor, soft, well, hard burning으로 변화함. 소성 정도에 따른 각 클링커의 조직 비교로부터 조직의 생성과정에 대한 설명은 다음과 같음.

■ 소성과 기공의 수축

- Poor burnt 클링커의 VW(volume weight)은 $VW \leq 1.00\text{kg/l}$ 이고 기공율은 $0.25 \sim 0.35\text{cc/cc}$ 임.
- Poor burnt 클링커의 기공율은 충전된 모래의 interface 및 구의 interface 간극과 대략 비슷한 수준임. 많은 종류의 모래는 보통 기공율이 $0.42 \sim 0.47$, 구의 최밀 충전시의 기공율은 0.26 이며, 입방체의 기공율은 0.48 임. 클링커 형성의 초기단계에서 클링커의 주요 입자는 모래의 충전과 같은 방법으로 접촉되며 소성 정도의 증가에 따라 충전 방법은 구의 충전 형태로 변화하여 감.

- 일반 클링커의 $VW=1.20\sim 1.25\text{kg}/\ell$ 이고 기공율은 $0.13\sim 0.16\text{cc/cc}$ 수준임. 기공율은 poor burnt 클링커의 약 절반 수준이고, 클링커가 연속 공정으로 제조될때, 클링커 내에 존재하는 기공은 클링커 내부로 분산되어짐. 일례로 3차원 입방체내에 있는 단위세포의 무질서한 모델에서는 기공 분포가 continuous한 상태에서 discontinuous한 상태로 변화하며, 이 경계 점은 기공율이 0.2보다 작거나 같은 경우($VW\geq 1.14$)임.

표 3.6 클링커의 조성 정도와 조직 형성

Burning degree	No.	C2S aggregate	Alite %	Belite %	f.CaO %	Porosity	V.W.
Poor	a1	ball	37	51	12	0.35	0.93
	a2	ball	50	43	8	0.28	1.03
	a3	bubble	35	40	25	0.34	0.94
	a4	bubble	40	45	16	0.34	0.94
	a5	combine	57	31	11	0.27	1.04
	a6	combine	66	25	10	0.26	1.06
	mean		48	39	14	0.31	0.99
Medium	a7	spindle	55	39	6	0.10	1.29
	a8	elongate	74	26	0	0.14	1.23
	mean		65	33	3	0.12	1.26
Well	a9	disperse	76	24	0	0.09	1.30
	a10	disperse	83	17	0	0.09	1.30
	a11	disperse	90	10	0	0.04	1.37
	mean		93	17	0	0.07	1.32

■ 포틀랜드 시멘트 성분분석

- 포틀랜드 시멘트의 주성분은 산화칼슘(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3) 순으로 이루어져 있으며 이러한 성분을 함유한 원료들이 적당한 비율로 혼합되고 일부가 용융·소성된 클링커(Clinker)에 적당량의 석고가 가해져 분말의 형태로 된 것이 시멘트임.
- 본 연구에서는 무기계 건설폐기물의 화학성분이 시멘트의 주성분과 유사한 점을 착안하여 시멘트 원료의 대체 재료로서 이용 가능한지 분석을 실시함.
- 포틀랜드 시멘트 종류별 주성분은 표 3.7과 같음.

표 3.7 포틀랜드 시멘트 종류별 주성분표

(단위 : 중량백분율, %)

시멘트 구분	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
I	63.8	22.1	5.0	3.0
II	63.6	23.3	3.9	3.9
III	64.9	20.8	4.5	2.8
IV	63.0	25.9	3.0	2.8
V	65.0	22.4	3.4	4.4

- 관련 선행연구에서 분석된 다양한 무기계 건설폐기물의 화학성분을 수집하여 각각의 화학성분을 분석함.
- 분석된 화학성분들을 살펴보면 폐석고보드의 경우 SiO_2 의 함량이 적고 시멘트에서 가장 중요한 성분인 CaO성분을 다량함유하고 있어 시멘트의 주원료인 석회석(천연)의 대체 재료로서 가장 유용하게 이용될 것으로 분석됨.
- 또한 시멘트 원료 중에서 CaO 이외 중요한 SiO_2 와 Al_2O_3 성분은 대부분 점토질 원료에서 공급을 받음. 통상 점토속의 실리카는 65%이상 함유되어 있는 것을 사용하는 것으로 알려져 있으며 기존 문헌 고찰을 통해 본 연구에서 수집된 무기계 건설폐기물 중에서는 페타일, 폐벽돌이 대체 가능할 것으로 분석됨.

■ 무기계 건설폐기물 화학성분 이론적 고찰

- 규산질 원료는 점토질 원료의 SiO_2 성분이 부족할시 보충 원료로 사용되며 SiO_2 와 Al_2O_3 성 분비가 6:1이상이고 SiO_2 성분의 함유량이 80% 이상인 것이 사용됨.
- 본 연구에서는 폐유리, 폐벽돌, 폐콘크리트 미분말 등이 활용 가능할 것으로 분석됨. 또한 산화철 원료를 대체할 수 있는 무기계 건설폐기물은 적절한 것으로 판단되는 부분이 없어 철광 산업에서의 산업부산물인 전로슬래그 등을 통해 보충되어야 할 것으로 분석됨.
- 전체적으로 무기계 건설폐기물은 시멘트의 주성분으로 이루어져 있어 적절히 혼합된다면 시멘트 원료의 대체 활용이 가능할 것으로 사료되나, 시멘트의 원재료와는 다르게 불순물들이 다수 포함되어있어 무기계 건설폐기물만을 순수 100% 활용한 시멘트의 제조에는 한계가 있을 것으로 판단되어 천연자원인 석회석을 혼합이 수반이 요구됨.

표 3.8 무기계 건설폐기물 화학성분 이론적 고찰

(단위 : 중량백분율, %)

건설폐기물 종류	폐타일	폐유리	폐벽돌	폐ALC	폐 석고보드	폐콘크리트 미분말
SiO_2	61.4	71	64.34	48.3	1.6	45.5
Al_2O_3	17.43	1.47	24.1	3.69	0.69	11.9
Fe_2O_3	1.73	0.07	4.81	1.88	0.22	1.9
CaO	8.8	8.91	0.57	28.1	54.32	29.8
MgO	1.13	4.04	1.13	1.59	0.1	1.9
Na_2O	0.68	13.1	0.78	0.26	0.46	-
K_2O	1.27	0.83	2.89	0.62	0.23	3
SO_3	-	0.24	-	1.66	41.47	1.4
TiO_2	0.36	-	1.09	-	0.49	-
기타	6.61	-	-	13.3	-	2.3

시멘트의 원재료	원재료의 화학성분	건설폐기물
석회질 원료	CaO	폐석회, 폐석고보드
점토질 원료	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$	폐(점토)벽돌
실리카질 원료	SiO_2	폐타일, 폐유리
산화철 원료	Fe_2O_3	공통 함유성분
+ 석고	+ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	+ 폐석고보드

그림 3.5 무기계 건설폐기물 분석대상 자재 선정

■ 시멘트 화학적 인자 분석

- 다양한 무기계 건설폐기물을 이용하여 고부가가치의 재생시멘트를 개발하기 위해 먼저 시멘트 제조에 관한 여러 화학적 인자들에 대한 고찰을 실시함.
- 시멘트를 구성하는 원재료인 석회질, 점토질 등의 광물은 시멘트의 주요 화학성분인 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃로 이루어짐.
- 주요 광물은 적절한 혼합비율로 조합되어 구성되고 시멘트 제조 공정 가운데 1450℃ 이상 되는 로터리 킬른(Rotary Kiln)의 소성 공정에서 화학적 결합에 의해 단단한 새로운 광물(클링커, Clinker)로 결합되어 조성됨.
- 이 때 생성되는 클링커는 알라이트(Alite), 벨라이트(Belite), 알루미네이(Aluminate), 페라이트(Ferrite)의 성분들로 구성되며 이들은 C₃S(3CaO·SiO₂), β-C₂S(2CaO·SiO₂), C₃A(3CaO·Al₂O₃), C₄AF(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)로 표기함.
- 포틀랜드 시멘트의 주요 화학성분 값을 알면 이론적으로 시멘트의 중간제품인 클링커의 광물조성비를 예측할 수 있는데 이 때 사용되는 것이 Bogue formula임.
- Bogue formula는 1920년대에 로버트 보그(Robert Herman Bogue)에 의해 고안된 식으로 해외에서는 널리 사용되고 있으며, ASTM 및 국내 시멘트 관련 KS기준(KS L 5201)에 명시됨.
- ASTM 및 KS 기준에 따르면 시멘트의 화학성분가운데 산화알루미늄(Al₂O₃)과 산화제이철(Fe₂O₃)의 함량비 (Al₂O₃(%)/Fe₂O₃(%))에 따라 다음 표 3.9와 같이 예측됨.
- 보그(Bogue)식에 의해 계산되는 시멘트 내 각 광물의 전형적인 수치는 대략 C₃S(3CaO·SiO₂)가 55%, β-C₂S(2CaO·SiO₂)가 10%, C₃A(3CaO·Al₂O₃)가 10%, C₄AF(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)가 10%로 구성됨.

표 3.9 Bogue formula

구분	광물 예측식	
$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} > 0.64$	C ₃ S 규산삼석회	$= [4.071 \times CaO(\%)] - [7.600 \times SiO_2(\%)] - [6.718 \times Al_2O_3(\%)] - [1.430 \times Fe_2O_3(\%)] - [2.852 \times SO_3(\%)]$
	C ₂ S 규산이석회	$= [2.867 \times SiO_2(\%)] - [0.7544 \times C_3S(\%)]$
	C ₃ A 알루민산삼석회	$= [2.650 \times Al_2O_3(\%)] - [1.692 \times Fe_2O_3(\%)]$
$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} < 0.64$	C ₃ S 규산삼석회	$= [4.071 \times CaO(\%)] - [7.600 \times SiO_2(\%)] - [4.479 \times Al_2O_3(\%)] - [2.859 \times Fe_2O_3(\%)] - [2.852 \times SO_3(\%)]$
	C ₂ S 규산이석회	$= [2.867 \times SiO_2(\%)] - [0.7544 \times C_3S(\%)]$
	C ₃ A 알루민산삼석회	$= [2.100 \times Al_2O_3(\%)] - [1.702 \times Fe_2O_3(\%)]$

■ 석회포화도를 통한 시멘트 및 클링커의 제조 관리

- 석회포화도(LSF)는 클링커의 정상적인 소성 및 냉각시 산성성분인 이산화규소(SiO_2), 산화알루미늄(Al_2O_3), 산화제이철(Fe_2O_3) 성분들과 결합 가능한 최대 산화칼슘(CaO)량으로 표시됨. 또한 클링커 소성도의 가늠으로서 미반응 CaO 즉, 유리석회의 양이 사용되는데 유리석회의 양이 적으면 소성반응이 그만큼 잘 진행된 것으로 예상함.
- 석회 포화도가 낮을 경우 킬른(Kiln)내에서 소성은 잘 이루어지나 C_3S 의 감소로 초기강도가 감소되는 우려가 있음.
- 반대로, 석회포화도가 높을 시에는 소성온도를 높이거나 소성시간을 길게 하더라도 소성이 어렵고 항상 유리석회가 남을 수 있음. 하지만, C_3S 증가로 인해 초기강도가 증가하는 부분이 있음.
- C_3S 량이 많은 시멘트를 제조하기 위해서는 LSF가 높아야됨. 석회포화도의 적정 계수범위로 0.92~0.96이며, 좋은 품질의 클링커내 유리 석회량은 1.0~1.5%임.

■ 규산률을 통한 시멘트 및 클링커의 제조 관리

- 규산률(SM)은 클링커를 소성하는 로터리킬른(Rotary Kiln)내의 혼합물 거동과 클링커 품질에 영향을 미치는 중요한 수치임.
- 규산률이 높아지면 원료혼합물의 소성이 어려워지기 때문에 덩어리 형성이 충분히 이루어지지 않으며, 킬른(Kiln) 중에 가루 상태로 날아다님.
- 또한, 소성반응 진행도 어려워져 그만큼 소성과정에서 고온의 열이 필요하게 되고 동시에 연료소비가 증가하게 되며 안정된 품질의 시멘트 제조가 어려움.
- 마지막으로 킬른의 내화물을 침식시키고 소성되는 시멘트는 C_2S 가 많기 때문에 강도발현이 늦어짐. 규산률의 적정한 계수 범위는 2.3~2.8임.

■ 철률을 통한 시멘트 및 클링커의 제조 관리

- 철률(IM)은 산화알루미늄(Al_2O_3)과 산화제이철(Fe_2O_3)의 양적인 관계를 표시하는 비율로서, 철률이 낮은 원료혼합물은 낮은 소성온도에도 클링커의 생성이 용이하게 됨.
- 또한, 철률이 낮으면 시멘트의 C_3A 가 작고 C_4AF 가 많아져 초기강도가 낮아지지만 수화열이 작고 화학저항성이 크게 됨.
- 반대로 철률이 높은 원료혼합물은 소성이 어려워지기 때문에 규산률이 높을 때와 같이 연료소비가 증가하게 되며, 단단한 경질의 클링커가 생성되어 클링커를 분쇄시 많은 에너지가 소모되어 생산원가가 높아지는 결과를 가져오게 됨.
- 이러한 철률의 적절한 범위는 1.6~2.0임.

② 시멘트 화학적 인자 구성요소 및 무기계 건설폐기물 화학성분 분석

표 3.10 시멘트 클링커 제조관리를 위한 특성치

구분	석회포화도 LSF, Lime Saturation Factor	규산률 SM, Silica Modulus	철률 IM, Iron Modulus
예측식	$\frac{1.00 CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$
적정범위	0.92~0.96	2.3~2.8	1.6~2.0

■ 무기계 건설폐기물 화학성분 분석

- 건설현장과 중간처리, 최종처리 및 재활용 업체를 방문하여 페타일, 폐천장재, 폐시멘트블럭 등 총 8종의 건설폐기물을 수집함. 또한, 순수 무기계 건설폐기물로는 재생시멘트 의 제조에 있어 그 한계가 있을 것으로 판단되어 시멘트 제조회사와 산업부산물 취급장으로부터 석회석과 전기로슬래그를 입수함.



(a) 실험실(분쇄작업)



(b) 건조기



조크러셔(조쇄)



삼상유도전동기(분쇄)



진동볼밀(미분쇄)



체가름 작업 (분말크기 90 μm)

그림 3.6 무기계 건설폐기물 화학성분 분석 프로세스

② 시멘트 화학적 인자 구성요소 및 무기계 건설폐기물 화학성분 분석

- 수집된 8종의 폐천장재, 폐석고보드, 폐시멘트블럭, 폐콘크리트 미분말, 페타일, 폐점토벽돌, 전기로 슬래그, 석회석을 대상으로 자재별 조쇄-분쇄-미분쇄작업을 실시하였으며, 체가름 작업을 통해 분말 크기 분말크기 $90\ \mu\text{m}$ 시료를 그림3.7과 같이 준비함.
- 준비된 폐자재의 성상분석을 위해 원소단위측정이 가능한 형광 X선 분석기(XRF)를 이용하여, 화학성분을 분석함. 또한, 시멘트 제조 공정 가운데 1450°C 이상 되는 로터리 킬른(Rotary Kiln)의 소성 공정을 감안하여 각 폐자재별 강열감량 분석을 실시함.



(a) 폐콘크리트 미분말 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(b) 페타일 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(c) 폐시멘트 블럭 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(d) 폐천장재 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(e) 폐석고보드 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(f) 폐시멘트 벽돌 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(g) 폐벽돌 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료



(h) 석회석 및 $90\ \mu\text{m}$ 시료

그림 3.7 무기계 건설폐기물 시료

② 시멘트 화학적 인자 구성요소 및 무기계 건설폐기물 화학성분 분석

- 본 연구에서 분석된 무기계 건설폐기물의 화학성분은 선행연구에 의해 수집된 건설폐기물과 유사한 화학성분들로 조성 되어있어 크게 차이가 없는 것으로 분석됨.
- 폐천장재와 폐석고보드의 경우 기존 선행연구된 것과 같이 시멘트 제조에 있어 산화칼슘(CaO)을 대체하는데 주요한 대체원이 될 것으로 예상되며 폐타일, 폐점토벽돌 역시 규산질의 원료를 대체하는데 주요하게 사용 될 수 있을 것으로 사료됨.
- 페시멘트와 페콘크리트 미분말은 산화칼슘(CaO)성분을 포함하지만 그 양이 소량이며, 이산화규소(SiO_2)의 비율이 많은 것으로 보아 모래성분이 다량 함유 되어있어 성분조절 대체재로 소량 활용될 것으로 예상됨.



그림 3.8 형광 X선 분석(XRF) 실험



그림 3.9 강열감량(lg.loss) 실험

표 3.11 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 데이터베이스

(단위 : 중량백분율, %)

번호	건설폐기물	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	기타	L.O.I*	합계
1	폐천장재	5.84	1.10	1.06	39.21	0.54	0.00	0.32	24.62	0.41	0.52	26.39	100.00
2	폐석고보드	0.91	0.32	0.30	36.42	0.22	0.30	0.12	39.29	0.03	0.13	21.96	100.00
3	페시멘트 블럭	50.69	10.01	3.93	19.56	1.26	0.67	3.69	0.99	0.46	0.63	8.12	100.00
4	페콘크리트 미분말	55.46	10.28	3.42	22.35	1.16	0.92	3.77	1.20	0.37	0.71	0.37	100.00
5	폐타일	57.46	15.95	2.62	9.55	0.48	1.02	2.23	0.44	0.72	1.32	8.22	100.00
6	폐점토벽돌	63.05	21.00	5.80	2.13	0.71	1.33	3.49	0.02	0.74	0.50	1.24	100.00
7	전기로 슬래그	16.19	11.22	36.32	23.10	2.71	0.00	0.07	0.21	0.84	9.36	0.00	100.0
8	석회석	12.21	2.40	0.77	44.75	2.15	0.01	0.64	0.00	0.00	0.00	36.55	99.48

*L.O.I(Loss On Ignition) : 강열감량

■ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스 분석 개요

- 본 연구는 건설공사에서 발생하는 건설폐기물의 발생현황을 면밀하게 분석하여 발생된 폐기물 중 환경배려형 시멘트로 활용 가능한 무기계 건설폐기물을 재활용하기 위한 기반 구축을 위하여, 국내외 건설폐기물 발생량 예측/관리 프로그램 조사분석을 통해 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스를 구축하고자 함.
- 이를 위하여 폐기물 발생량 평가 관리에 기술적 권위를 가지고 있는 일본건설산업계를 조사 대상으로 설정하여 기존에 개발된 국내 폐기물 평가 관리 프로그램과의 비교 분석을 실시함.

■ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스 분석 대상

- 건설폐기물 발생량의 예측 및 관리에 대한 기술적 권위를 지니는 일본을 대상으로 하여 사전 조사를 실시함. 사전조사대상은 국내외 도급순위 10대 건설회사와, 연구소, 학회, 대학을 대상으로 함.
- 본 연구에서는 국내 프로그램 2건, 일본의 기업 프로그램 2건, 연구소 프로그램 1건, 학회 프로그램 1건, 대학프로그램 1건을 분석 대상으로 설정하여, 조사대상이 된 일본의 폐기물 예측 프로그램과 국내의 폐기물 예측 프로그램을 폐기물 평가 범위, 폐기물 평가 지표, 폐기물 평가 프로세스를 중심으로 하여 비교 분석을 실시함.

표. 3.12 국내외 건설 폐기물 예측 프로그램 구축 현황

No	개발기관		명칭	개발년도	개발분야	평가항목	개발환경	비고
국내	1	아주대	폐기물 전산 관리 시스템(개발 중)	2013	건축	LCW/LCC	Excel	대학
	2	진주산업대	공동주택 건설폐기물 산정 프로그램	2011	건축	Waste	Application	대학/연구소
	3	한국건설기술연구원	분별 해체공사 간이 산정 프로그램	2009	건축	Waste	Application	연구소
국외	4	鹿島建設(카지마건설)	집합주택의 간이 LCA 평가 프로그램	2003	건축(주택)	LCW/LCA	Excel	건설회사 ¹⁾ (일본10대 건설회사)
	5	大成建設(다이세이건설)	E-DAM	2000	건축/토목	LCW	Application	
	6	大林組(오바야시구미)	×(없음)					
	7	清水建設(시미즈건설)	GEM 21	1993	건축	LCW/LCA	Application	
	8	竹中工務店(타케나카공무점)	×(없음)					
	9	長谷工コーポレーション	×(없음)					
	10	大東建託	×(없음)					
	11	三井住友建設	×(없음)					
	12	前田建設工業	×(없음)					
	13	戸田建設	×(없음)					
	14	국토기술정책종합연구소	건축물의 건설폐기물발생량 산정 툴 ²⁾	2007	건축	LCW	Web	연구소
	15	국토기술정책종합연구소	BEAT-Bldg	2007	건축	LCW/LCA	Application	
	16	일본건축학회	AIJ LCA&LCW v 4.05	2005	건축	LCW/LCA	Excel	학회
	17	동경대학	ECO-MA	2003	건축/토목	LCW/LCA	Algorithm	대학

1) 일본건설회사는 도급순위 10대 건설회사를 조사 대상으로 함.

2) 「지속가능한 사회구축을 목표로 한 건축성능평가·대책기술의 개발」 검토회-LCW 검토부회

■ 국내 건설폐기물 발생량 예측 프로그램

해체공사 건설폐기물 발생량 예측프로그램

(1) 개요

- 본 프로그램은 공동주택의 해체공사에서 발생하는 폐기물을 대상으로 하여 경남과학기술대와 한국토지주택공사에서 개발하였음. 평가지표는 폐기물 원단위로서 공동주택의 폐기물 발생량을 다양한 재료별로 예측이 가능할 수 있는 폐기물 발생 원단위 모델을 개발하였음.

(2) 평가 범위

- 공동주택의 대상으로 평가를 실시함. 폐기물 종류는 건설폐기물 22종이며, 간접추계방식으로 경남과학기술대와 한국토지주택공사가 제안한 폐기물 원단위를 사용하여 평가함.

표. 3.13 해체공사 건설폐기물 발생량 예측프로그램 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	×	×	—
	폐기물발생량	×	×	○
배출	재 자원화량	×	×	×
	최종 처분량	×	×	×

(3) 평가 지표

- 본 프로그램에서 개발한 원단위 모델은 간접추계방식으로 제안된 폐기물 원단위를 MCS기법을 적용한 원단위 회귀모델로서 22종의 단위면적당의 재료별 원단위를 제시하였음.



그림 3.10 원단위 시뮬레이션 순서도



그림 3.11 원단위 MCS시뮬레이션

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

- 현재 해체 대상이 되고 있는 공동주택의 도면을 실측하여 공동주택을 구성하는 공간을 통계 분석하였으며, 분석대상은 표 2와 같이 바닥면적별로 구분하여 10개 단지 33개의 도면을 부위별, 재료별로 구분하여 분석하였음. 도면 분석을 통하여 구성자재의 종류별 발생 가능한 자재의 종류는 모두 22종류로 구분하였음.

표. 3.14 공동주택 폐기물 원단위 1차 모델

구분	년도	바닥면적(m ²)									
		33.3	36.63	43.29	46.62	49.95	56.61	73.26	79.92	83.25	89.91
5층 RC 라멘조	1978	○	○	○	○			○	○		
	1979	○	○	○	○			○	○		○
	1980	○	○	○	○						○
	1982	○	○	○	○					○	
	1983			○	○						
	1982							○			
	1983		○				○				
	1984		○					○		○	
	1985				○	○					

■ 회귀분석 수행

세대별 면적과 재료별 해체물량을 구분 하여 MCS 분석 방법을 선택하여 분석하고, 회귀 모형 및 계수들의 유의성을 통해 추정된 회귀식을 통하여 세대별 재료의 해체물량 평가가 가능하도록 하였음. 제시된 폐기물 발생량에 관한 원단위 선형 회귀모형식은 표3.15와 같음.

표. 3.15 폐기물 원단위

종류		단위	원단위 회귀식	R ²
철근콘크리트		m ³	y = 5.045 + 0.2553x	94.2%
무근콘크리트		m ³	y = 0.2537 + 0.02118x	90.2%
벽돌류	블록/벽돌	m ³	y = 2.262 + 0.1307x	92.5%
	내화벽돌	m ³	y = 2.246 + 0.02940x	86.8%
타일		m ³	y = 0.1206 + 0.007495x	93.2%
아스팔트방수		m ³	y = 0.06982 + 0.005309x	96.5%
목재류	각재	m ³	y = 0.2001 + 0.003743x	91.7%
	합판	m ³	y = 0.07520 + 0.002696x	90.5%
전등류		m ³	y = 0.01316 + 0.00007x	28.8%
철근		kg	y = 1030 + 13.5x	75.0%
유리		m ²	y = 0.0219 + 0.000193x	83.2%
집성보드		m ³	y = 0.00907 + 0.004190x	93.4%
장판지		m ²	y = 0.004799 + 0.000301x	96.4%
기타 고재류	형동줄눈	m	y = 0.562 + 0.06626x	35.5%
	고무줄눈	m	y = 0.07266 + 0.002272x	33.0%
알루미늄		kg	y = 0.000086 + 0.000001x	48.3%
모르타르		m ³	y = 1.073 + 0.01711x	90.4%
인조석		m ³	y = 5.905 + 0.02517x	31.6%
스치로폼		m ³	y = 0.02309 + 0.002373x	93.0%
철재	철재출입문	m ³	y = 0.000933 + 0.000004x	45.3%
	물탱크출입문	m ²	y = 0.06661 + 0.000518x	46.3%
	난간통	m	y = 3.974 + 0.2278x	75.3%

■ 폐기물량 산출

본 모델의 적용은 다음 식과 같이 산출된 재료별 원단위 회귀 식에 세대면적을 곱해서 세대별 물량을 산출함.

$$\text{세대별 예상 해체물량} = \text{회귀모형} \times \text{세대면적} \quad (1)$$

$$\text{동별 예상 해체물량} = \text{회귀모형} \times \text{세대면적} \times \text{세대수} \quad (2)$$

■ 중량/체적 환산계수

본 모델을 적용한 폐기물량은 부피를 기준으로 하고 있어, 이를 다시 무게와 해체 후의 발생량을 예측하기 위해서는 재료별 중량환산계수, 부피환산계수가 필요함. 표3.16의 환산계수는 거제도 A아파트 시험시공 결과(대한주택공사, 2004)를 적용하였으며, 본 시험의 주요 내용은 시험시공 인력에 의한 내장재 철거 시에 발생한 내장재의 종류별 단위 중량을 산출을 위한 체적의 측정은 계량을 위한 운반차량의 적재함에 내장재 종류별 적재 높이를 고려하여 현장에서 직접 측정하였음.

표. 3.16 대한주택공사 중량/체적 환산계수

구분		체적환산계수			중량환산계수		
		A동	B동	평균	A동	B동	평균
수지류	장판지	2.966		2.966	0.286		0.286
	스티로폼	0.179	0.185	0.182	0.138	0.143	0.141
	유리섬유	2.578		2.578	1.396		1.396
전등류	형광등, 전등류, 소켓류	5.267	5.636	5.452	0.538	0.569	0.553
철제류	철제 출입문, 철제난간	3.279	2.601	2.940	0.608	0.482	0.545
황동류	황동줄눈, 난방분배기	1.567		1.567	0.898		0.898
비철류	알루미늄새시	2.100	2.158	2.129	0.599	0.615	0.607
스테인리스	싱크대 (스테인리스부분)	1.329		1.329	0.625		0.625
목재류	문/문틀, 창/창틀 등	4.678	4.554	4.616	1.112	1.082	1.097
유리류	창/문	1.855		1.855	0.801		0.801
콘크리트류	철근콘크리트	-	1.697	1.697	-	1.073	1.073
	모르타르	-	1.551	1.551			
	조적류	-	1.549	1.549			
	자갈류	-	1.254	1.254			
	타일류	-	2.065	2.065			
	평균	-	1.623	1.623			

(4) 폐기물 평가 프로세스

■ 입력 화면

공동주택의 개요로써 공사명, 공사기간, 특징 등을 입력하고, 원단위 회귀분석 탭에서 연면적 관련 값(세대별 평형, 세대수) 입력항목을 입력함.

The screenshot shows the '원단위 회귀분석' (Unit-level Regression Analysis) tab. It includes input fields for '공사명' (Project Name), '공사기간' (Construction Period), and '특징' (Features). Below these is a large table with multiple columns for regression coefficients, likely for different types of construction waste.

그림 3.12 입력 화면

■ 평가 결과

물량결과 탭에서 단해체단계의 공동주택 동별 건설폐기물 발생량, 평형별 건설폐기물 발생량을 수치로 나타냄.

The screenshot shows the '물량결과' (Quantity Result) tab. It displays a table with columns for '건물종류' (Building Type), '세대수' (Number of Units), '평형' (Floor Area), and '발생량' (Generation Quantity). The table lists data for various building types and their corresponding waste generation amounts.

그림 3.13 평가 화면

■ 한국건설기술연구원 분별 해체공사 건설폐기물 발생량 간이 산정 프로그램

(1) 개요

- 본 프로그램은 건설폐기물의 재활용을 유도할 수 있는 분별해체현장용 건설폐기물 발생량 예측을 목적으로, 평가 지표를 분별 해체 건설폐기물 분류별 원단위 및 표준품셈 원단위로 설정하여 한국건설기술연구원이 개발하였음.

(2) 평가 범위

- 건설폐기물을 건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률 시행령 및 시행규칙에서 제시하는 분류에 따라 건설폐기물, 가연성폐기물, 불연성폐기물, 폐금속류, 혼합폐기물의 5종으로 구분하여, 분별 해체공사 폐기물 발생량과 일반 해체공사 폐기물 발생량을 평가함.
- 평가 대상 건축물은 철근콘크리트조, 철골조, 철골철근콘크리트조, 조적조, 목조의 5종류의 구조형식의 건축물과 사무소, 공동주택, 교육시설, 공장, 창고, 단독주택의 6종류의 건축물 용도별로 평가가 가능함. 또한, 각 해체공사의 해체비용, 처리비용을 간단하게 산정할 수 있음.

표 3.17 분별 해체공사 건설폐기물 발생량 간이 산정 프로그램 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	X	X	-
배출	폐기물발생량	X	X	○
	재 자원화량	X	X	○
	최종 처분량	X	X	○

(3) 평가 지표

- 폐기물 평가 지표는 해체단계의 폐기물 원단위로 일반 해체 건설폐기물 분류별 원단위와 분별 해체 건설폐기물 분류별 원단위로 구성되어 있음. 일반 해체 건설폐기물 분류별 원단위의 경우는 기존에 개발된 해체단계의 폐기물 원단위를 적용 하였으며, 분별 해체 건설폐기물 분류별 원단위는 간접추계방식과 직접계측방식 두 가지를 활용하여 폐기물 원단위를 제시하였음.
- 실시한 폐기물 원단위 조사 방식은 설계 당시 산출된 물량에 따른 발생원단위 산출 분석, 재 개발 현장 발생예측량 분석, 분별해체 현장 조사 및 구조별 해체현장 발생량 분석, 일본의 분별해체 원단위 분석 등을 복합적으로 실시하여 폐기물 원단위를 제시하였음. 조사에 따른 발생 건설폐기물 분류는 가능한 국내 건설폐기물의 분류에 맞추어 5종의 분류체계로 조사를 실시하였음. 제시된 분별 해체 건설폐기물 분류별 원단위는 표 3.18과 같음.

표. 3.18 분별해체공사 폐기물 원단위 제안

(단위 : kg/m²)

구분	구조 용도	S조	SRC조	RC조	조적조	목조
건설폐재류	사무소	945	1,653	1,499	1,354	
	공동주택	840	1,041	1,562		
	교육시설	1,300	1,427	1,434		
	공장	1,386	1,312	1,249		
	창고	1,031	998	1,438		
	주택				1,412	587
가연성 폐기물	사무소	7	4	9	12	
	공동주택	16	5	13		
	교육시설	11	11	9		
	공장	7	4	4		
	창고	9	3	9		
	주택				12	28
불연성 폐기물	사무소	27	20	22	16	
	공동주택	24	13	23		
	교육시설	37	17	21		
	공장	40	16	19		
	창고	30	12	21		
	주택				17	11
폐금속류	사무소	96	83	61	31	
	공동주택	68	68	60		
	교육시설	130	86	62		
	공장	74	97	96		
	창고	83	97	53		
	주택				32	27
혼합폐기물	사무소	22	15	19	13	
	공동주택	24	6	18		
	교육시설	18	18	16		
	공장	18	36	11		
	창고	17	13	11		
	주택				14	25
합계	사무소	1,070	1,755	1,588	1,425	
	공동주택	948	1,120	1,653		
	교육시설	1,459	1,542	1,521		
	공장	1,485	1,449	1,360		
	창고	1,140	1,111	1,511		
	주택				1,486	677

(4) 평가 프로세스

■ 입력 화면 : 기본정보

건축물의 개요로써 공사명, 공사기간, 현자위치, 발주처, 특징을 기입하고, 해당 건축물의 구조, 용도와 해체비용 및 처리비용 산정을 위한 항목인 운반거리, 인력 또는 기계철거 구분, 지붕, 천정, 벽, 바닥 및 수장에 대하여 해당 구분을 설정함. 건축물의 개요입력 이후에는 건축물의 바닥 면적과 벽 면적 등을 입력하여 부위별 폐기물 배출량 평가가 가능하게 함.

그림 3.14 기본화면

■ 입력 화면 : 세부 정보

건축 세부정보 입력화면으로 세부분류 폐기물 원단위와 일반폐기물 원단위, 중량환산계수, 폐기물 처리비의 항목으로 구성되어 있음. 표 3.18에 본 프로그램에 제안된 폐기물 원단위가 적용되며, 중량환산계수, 폐기물 처리비용은 표준품셈 및 기존의 연구자료를 근거로 하여 설정되어 있음.

그림 3.15 원단위 입력화면

[illegible]

그림 3.16 처리비용 입력화면

■ 평가 결과

상기의 건축물 데이터를 입력하고 계산 버튼을 선택하면 해체건설폐기물 발생량이 표와 그래프로 표현되며, 이에 따른 재활용률과 최종처분량도 함께 구분되어 나타남. 이 발생량에 대하여 건축물 해체 비용과 처리비용이 결과적으로 제시됨.

[illegible]

그림 3.17 폐기물 발생량 평가결과

■ 국외 건설폐기물 발생량 예측 프로그램

▣ 일본건축학회 AIJ-LCA&LCW v4.05

(1) 개요

- 본 프로그램은 건물 LCA 관점에서 CO₂ 배출량 평가 및 자원순환성 평가가 가능한 소프트웨어로 2000년부터 2004년까지 「자원 순환 형태 주택기술개발 프로젝트」의 일환으로서 개발되었음. 일본 건축학회는 「건물의 LCA지침」에 근거하는 「건물의 LCA계산 소프트웨어」 AIJ-LCA를 기본으로 한 자원 순환성을 평가하는 엑셀 기반의 프로그램을 개발했음. 1995년 산업 연관표 DB를 활용한 AIJ-LCA ver3.0을 개발하고, 추후 자원 순환성 평가기능을 추가한 「건축 물건의 LCA툴」을 AIJ-LCA& LCW ver.4.0을 개발했음. 건축물의 설계, 자재생산, 시공으로부터 해체 폐기까지의 산정을 통한, 에너지 소비, CO₂ 배출, SO_x 배출, NO_x 배출의 4개의 인벤토리 분석이 가능하며, 또한, 4개의 인벤토리에 근거하는, 오존층 파괴(Ozone Depletion Potential, ODP), 지구온난화(Global Warming Potential, GWP), 산성화 지수(Acidification Potential, AP), 인간보건(Human Health (HH) Criteria Air-Mobile), 에너지 고갈(Fossil Fuel Consumption)의 환경영향 평가가 가능함. 본 보고서에서는 건설폐기물 발생량 예측과 관련된 자원 순환성의 평가 LCR(Life Cycle Resource)와 폐기물의 발생을 평가하는 LCW(Life Cycle Waste)에 대한 내용을 중심으로 분석함.

(2) 평가 범위

- 단독주택, 공동주택, 공장, 호텔 등의 모든 건축물들을 대상으로 평가를 실시하며, LCE, GWP(NO_x, SO_x, CO₂), LCC의 평가가 가능하며, ver 4.0부터는 LCW, LCR의 평가도 제공하고 있음. 폐기물 분류체계는 일본환경부 폐기물처리지침에 따라 분류하여 평가하며, 폐기물 종류는 총 8종의 중분류와 54종의 세분류로 된 폐기물을 평가 함. 비산업폐기물, 산업폐기물(안정형/관리형). 일반폐기물의 경우는 평가에서 제외하였음.

표 3.19 AIJ-LCA&LCW v4.05 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	○	○	—
배출	폐기물발생량	○	○	○
	재 자원화량	○	○	○
	최종 처분량	○	○	○

(3) 평가 지표

- 건설폐기물의 평가 LCR의 지표와 폐기물의 발생을 평가하는 LCW의 지표를 통해 평가를 실시함. 건물의 전 과정에 대한 자원 투입과 폐기물 발생, 재사용, 재활용의 모식도를 나타냄. 여기에 나타내는 사이클 중에서, 건물의 전 과정(이하 LC)로의 LCR 지표로서 LC 자원 투입량, LC 순수 자원 투입량이라고 하는 2가지의 지표를 적용했음. LCR에서는 재활용 자재 활용에 의한 순수 자원의 소비를 절감하는 것을 평가하고 있음. LCW 지표로서, LC폐재 발생량, LC폐기물 발생량, LC최종 처분량이라고 하는 3개의 지표를 적용했음. 각각의 지표는 본 프로그램에 내장되어 있는 복합원단위에 기입이 되어 있음.

(4) 평가 프로세스

① 「입력-1」 시트 : 기본정보

- 「입력-1」 시트는, 건물의 기본 정보를 입력하는 시트로 건물의 용도, 구조의 형태, 연면적, 평가 기간, 재건축 주기, 신축공사보정(물가보정치수)를 입력하게 되어있음.
- 본 프로그램은 기준안과 대책안의 2안 비교를 전제로 하고 있음. 기준안과 대책 안을 비교 평가할 때에, 공통의 평가 기간을 설정하고 있음. 구체적으로는, 유효기간 35년의 건물과 유효기간 100년의 건물을 비교할 때에 100년의 평가 기간을 설정했을 경우, 유효기간 35년의 건물은 100년간의 문에 2회 개축함으로써 LCA를 평가하는 것이 일반적인 평가 방법임. 그러나 AIJ-LCA/LCW에서는, LCR나 LCW의 평가의 관점으로부터, 건물의 건설로부터 해체 폐기까지의 1 사이클 근처의 값(kg/m²)과 유효기간 근처의 값(kg/m²)을 구별해 평가할 수 있도록 하기 위하여, 대안마다 평가 기간=유효기간으로 설정하는 것을 가능하게 했음. 그 예로, 유효기간 35년은 35년의 평가 기간을 설정하고, 유효기간 100년의 건물은 100년의 평가 기간을 설정하는 것으로써, 개축을 생각하지 않는 평가가 가능하게 됨. 한편, 본 프로그램에 내장된 산업 연관표는 1995년의 것을 이용하고 있음. 계산 연차에 맞추어 물가 보정을 할 필요가 있음. 2007년까지의 건설자재에 대한 가격을 적용할 수 있도록 구성하였으며, 필요에 따라서, 「물가지수 연보」 등을 참고하여 직접 입력도 가능함.

입력-1시트 基本情報			
建物名	集合住宅モデル		
建物用途	集合住宅		
主要構造	RC造		
延床面積	7280.85 m ²		
評価期間	基準案	対策案	
建替周期	100	100	年
新築工事補正	基準案	対策案	
建築	1	1	
電気設備	1	1	
空調設備	1	1	
衛生設備	1	1	
昇降機設備	1	1	
設備工事分析			
統計データを利用する場合:0を選択 資機材重量を入力する場合:1を選択			
0			
設計監理料率			
新築工事	3%	←	6000m ² 建物
改修工事	5%	←	3%
物価補正(1995年=1.0)			
計算年次	2006年	←	2006年
消費税	1.05	←	1.05
建築	0.834	←	0.834
電気設備	0.871	←	0.871
空調設備	0.924	←	0.924
衛生設備	0.921	←	0.921
昇降機設備	0.776	←	0.776
設計監理	0.865	←	0.865
維持管理	0.862	←	0.862
廃棄処分	0.922	←	0.922
維持管理費補正			
基準案	0.2	←	0.2
対策案			

그림 3.18 기본정보 입력 시트

② 「입력-2」 시트 : 건축공사 데이터

- 「입력 1」 시트는, 기준안과 대책안의 2개의 케이스에 대응한 건축주 요점 자재를 입력하는 시트로, 기본적으로는, 건축 공사와 관계되는 주요한 건설자재의 데이터를 입력함. 프로그램에 내장되어 있는 「분류코드」 및 「사양」을 이용하는 경우에는, 갱신 주기, 수선 비율을 재검토하고, 그 사양마다의 연면적 당 물량을 입력함. 필요에 따라서 비교를 기입함. 연면적 당 물량의 참고가격이 표시되고 있지만, 다른 용도에서는 크게 다른 경우가 있으므로 주의가 요구됨. 시공단계의 폐기물 발생량을 「복합 원단위」에 「손실률」 설정을 통해 산정 가능함.
- 「복합 원단위」 시트에 준비되어 있는 사양을 선택하고, 추가하는 것이 가능함. 「분류코드」 및 「사양」이 추가되면, 필요에 따라서 「공사 특성」을 기재함. 갱신 주기, 수선 비율, 연면적 당 물량, 비교를 입력함.

③ 「발생 품목별 분석」 시트 : 재사용/재활용 데이터

- 「발생 품목별 분석」 시트에서는, 「건축공사」 시트에서 지정한 건축 공사에 관련하는 자재에 의한 폐기물의 발생 품목과 품목 코드의 상세한 조건이 설정되어 있음.
- 기준안과 대책 안에 대해서, 폐재의 재활용 비율과 폐기물 처리되는 경우의 처리 방법, 재활용 처리되는 경우의 처리 방법을 코드로 설정하고 있음.
- 재활용되지 않는 나머지의 2%는, 기타 콘크리트 파편으로 가정하고, 「421 : 혼폐 선별 매립」으로서 폐기물매립 된다고 설정함.

入力-2シート 建築工事データ									
		評価年度 = 1001.1001 年	基準面積 = 1001.1001 ㎡		延床面積内消費量 = 1000.00 ㎡		1999年消費税率 = 1.00%		
		建築年度 = 1001.1001 年	建築年度 = 1001.1001 年		建築年度 = 1001.1001 年		建築年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 = 1001.1001 年		
		建築計画年度 = 1001.1001 年	建築計画年度 = 1001.1001 年		建築計画年度 =				

④ 「폐기물 처리별 분석」 시트 : 폐기단계 데이터

- 「폐기물투기별 분석」 시트에서는, 「발생 품목별 분석」 시트로 지정한 폐기물투기 코드와 재활용 처리 코드의 조건이 설정되어 있음.
- 각 폐기물 처리 코드에 대해서, 폐재 수송 1(폐재 발생 현장으로부터 폐기물처리장까지의 수송)과 폐재 수송 2(폐기물처리장으로부터 최종 처분 장소까지의 감량 후의 수송)이라고 하는 2종류의 수송으로 나누고, 거리와 적재율의 설정을 가능하게 했음.
- 또한, 각 재활용 처리 코드에 대해서, 폐재 수송 1(발생 폐재의 현장으로부터 재활용 처리 시설 또는, 일차 집적 장소까지의 수송)으로 폐재 수송 2(일차 집적 장소로부터 2차 집적 장소(재활용 시설)까지의 수송)라고 하는 2 종류의 수송으로 나누고, 거리와 적재율의 설정을 가능하게 했음.

⑤ 평가 결과

- 평가가 완료된 폐기물 배출량을 건축업협회에서 조사한 해체공사실태조사 의 폐기물 발생 원 단위와 비교할 수 있도록 구성되어 있음. LCR과 LCW의 평가 결과는 자원투입량, 손실자원 투입량, 폐재발생량, 폐기물발생량 산출되며, 기준안과 대책안의 투입 물량을 사용자가 직접 변동한 투입물량 값의 차이에 따라 평가 결과 값이 산정되는 간단한 형태임. 본 보고에서는 AIJ-LCA&LCW의 평가 결과를 철근 콘크리트조 공동주택으로 적용된 평가결과를 바탕으로 표시하였음.

■廃棄物処理別の分析					廃材輸送1 × 発生量		廃材輸送2 × 処分量	
処理 コード	対象 分類	対象	処理方法	備考	片道 距離 km	積 載 率	片道 距離 km	積 載 率
直接廃棄物処理								
111	1	発生土	残土処分		30	1		
211	2	汚泥(泥水)	脱水・埋立		30	1		
212	2	汚泥(泥土)	直接埋立		30	1		
311	3	木くず	直接埋立		30	0.6		
312	3	木くず	焼却・埋立		30	0.6	10	1
411	4	コンクリートがら	直接埋立		30	1		
412	4	アスファルト・コンクリート塊	直接埋立		30	1		
413	4	その他がれき類	直接埋立		30	1		
611	6	ガラス・陶器くず(安定型)	直接埋立		30	0.6		
612	6	ガラス・陶器くず(管理型)	直接埋立		30	0.6		
1011	10	廃油	焼却		30	0.6	10	1
混廃→廃棄物処理								
321	3	木くず	混廃・選別・埋立		30	0.6		
322	3	木くず	混廃・選別・焼却・埋立		30	0.6	10	1
421	4	コンクリートがら	混廃・選別・埋立		30	1		
422	4	アスファルト・コンクリート塊	混廃・選別・埋立		30	1		
423	4	その他がれき類	混廃・選別・埋立		30	1		
521	5	金属くず	混廃・選別・埋立		30	1		
621	6	ガラス・陶器くず 安定型	混廃・選別・破砕・埋立		30	1		
622	6	ガラス・陶器くず 管理型	混廃・選別・破砕・埋立		30	1		
721	7	廃プラスチック類	混廃・選別・破砕・埋立		30	0.4		
821	8	紙くず	混廃・選別・焼却・埋立		30	0.4	10	1
921	9	繊維くず	混廃・選別・焼却・埋立		30	0.4	10	1
1121	4	その他 管理型	混廃・選別・埋立		30	0.6		

그림 3.20 폐기단계 데이터 입력 시트

■ BEAT-bldg

(1) 개요

- 「적산표준서식 기반의 전과정 폐기물량 산출 시스템」은 국토교통성 산하의 국토기술정책종합연구소가 개발한 「건축물의 라이프 사이클 CO₂와 폐기물의 배출량 산출 수법·지원 툴, Building LCCO₂ and LCW Calculation Methods and Design Support Tools, Building Environmental Assessment Tool(이하 BEAT-bldg)」의 일부분을 구성하고 있는 어플리케이션 형태의 프로그램임. BEAT-bldg는 건설리사이클법에 대응하기 위해 건축물의 자원 소비나 폐기물 저감을 위한 평가를 목적으로 하여 건축물의 자재 투입량을 추계 파악하여, 해당 건축물의 폐기물 발생량을 평가에 범용적 사용이 가능한 평가툴로서 개발 되었음. 프로그램의 활용도를 고려하여 BIM 설계 툴인 Revit Architecture와의 연동도 고려되었음. 본 보고에서는 BEAT-bldg에서 다루고 있는 투입 자원량과 폐기물 배출량 예측 부분을 중심으로 작성 하였음.

(2) 평가 범위

- 물질순환에 관한 환경부하(투입 자원량과 폐기물 배출량 산출, 건재·설비의 Embodied CO₂), 운용 시 에너지 소비에 따른 환경부하(운용 시 에너지 소비와 CO₂ 배출) 폐기물 분류체계는 일본환경부 폐기물 처리지침에 따라 분류함. 폐기물량은 건설(또는 해체)현장에 있어서 배출되는 건설폐기물(고체에 한함)로 함. 건설시에 발생하는 폐기물(잔토등)은 제외로 하고 있음.

표. 3.20 BEAT-bldg 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체 단계
투입	자재 투입량	○	○	-
	폐기물발생량	○	○	○
배출	재 자원화량	○	○	○
	최종 처분량	○	○	○

(3) 평가 지표

■ 복합원단위

건축물에 의한 환경 부하는, 물질 순환에 관련사항과 에너지 소비에 의하는 것으로 구분 됨. 이 중, 물질 순환에 관한 평가는 복합 원단위의 세부 수치 설정을 통하여 가능함. 본 프로그램의 복합 원단위에는 일본표준보과, 일위대가 및 시방서에 따라 1,500개의 주요자재에 대한 DB가 구축되어 있음. 복합원단위에서는 자재별 투입물량 설정, 자재별 손실율, 중량환산계수, 건축 자재의 수선·갱신에 대한 대책을 강구했을 경우의 LCW 산출에 필요한, 공용 연수, 부분별 계획 갱신 연수를 설정함. 한편, 폐기물에 의한 환경부하의 계산은, 부재와 내장재에 대해서는 시공단계, 유지보수단계, 폐기단계를 각각 계산함.

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

工号	工名	仕様	材料	材料								
				数量	単位	換算係数	質量換算係数	質量単位	産物分類	産物分類	産物発生段階	
11301		床タイル張り 磁器質タイル 無釉100角 圧着張り 塗り目地	㎡	タイル モルタル	102 0.0090	枚/㎡ m³/㎡	0.077 0.077	0.26 10.00	kg/枚 kg/m³	D-2 B-1	D-2 D-2	F F
11302		床タイル張り モザイクタイル(磁器質) 無釉25角 圧着張り 塗り目地	㎡	タイル モルタル	11.5 0.0090	枚/㎡ m³/㎡	0.111 0.111	1.00 10.00	kg/枚 kg/m³	D-2 B-1	D-2 D-2	F F
11303		床タイル張り セット器質タイル 無釉100角 圧着張り 塗り目地	㎡	タイル モルタル	11.2 0.0090	枚/㎡ m³/㎡	0.091 0.091	1.71 10.00	kg/枚 kg/m³	D-2 B-1	D-2 D-2	F F
11304		床タイル張り セット器質タイル 無釉100角 圧着張り 1本目地	㎡	タイル モルタル	11.2 0.0090	枚/㎡ m³/㎡	0.091 0.091	1.71 10.00	kg/枚 kg/m³	D-2 B-1	D-2 D-2	F F
11305		内装壁タイル張り 内装タイル(磁器質) 無釉100角 (粒地片サイズ) 接着剤張り	㎡	タイル 接着剤 セメント	11.5 1.00 1.00	枚/㎡ ㎡ ㎡	0.167 0.167 0.167	0.92 0.08 0.12	kg/枚 kg/㎡ kg/㎡	D-2 E-6 A	D-2 D-2 A	F F F
11306		内装壁タイル張り モザイクタイル(磁器質) 無釉25角(粒地片サイズ) マスク張	㎡	タイル モルタル	11.5 0.0035	枚/㎡ m³/㎡	0.143 0.143	1.05 10.00	kg/枚 kg/m³	D-2 B-1	D-2 D-2	F F

그림 3.21 BEAT-bldg 복합원단위

■ 폐기물 분별 재자원화 시나리오

본 프로그램에 있어서 건설폐기물의 표준적인 취급방법을 정하는 「분별·재자원화시나리오」의 책정에 필요한 1500종의 건축자재마다의 케이스에 대해서 각각 건축자재마다의 다른 처리 관한 조사결과를 근거로 건설폐기물의 현장에서의 분별, 현장에서의 배출, 중간처리, 재자원화에 이르는 자재별 회수율을 제안하였음. 폐기물에 의한 환경부하(폐기물의 양과 처리시의 에너지 소비, CO₂ 배출)의 계산에는 4 단계의 분별 시나리오를 설정하여, 건설리사이클법, 건설부산물 적정처리 추진요강을 준수하는 수준으로부터 완전 분별까지의 분별 대책의 정도에 따른 계산이 가능하게 구성되어 있음. 각각의 시나리오는 다음과 같음.

- 시나리오Ⅰ : 건설 리사이클법에 대응하는 정도의 수치
- 시나리오Ⅱ : 시나리오Ⅰ + 추가적 분별
- 시나리오Ⅲ (시공단계 폐기물) : 시나리오Ⅱ + 광역 재생 이용 자재를 분별 2)
- 시나리오Ⅲ (해체단계 폐기물) : 시나리오Ⅱ + 해체단계 추가적 분별
- 시나리오Ⅳ : 완전 분별 처리



그림 3.22 폐기물 분별 재자원화 시나리오 적용 개념도

(4) 평가 프로세스

■ 프로그램 전체의 흐름

설계지원시스템(BEAT-Bldg)는 기존의 LCA툴인 구건축연구조소의 BEAT 및 자립순환형주택에서 개발된 단독주택판의 BEAT(가칭 BEAT-House)의 일부를 활용, 대폭으로 개정한 것임. BEAT-Bldg는 CAD 출력 데이터를 LCA와 연결한 프로그램임. CAD로 그려진 Object는 주요부재나 내장재의 Inventory data와 연동하고 CAD에서 도면작성부터 빠른 LCA계산이 가능하게 되어 있음. 본 프로그램은 좌측에 언급된 수치를 입력하면, 건물 조건에 따라서 Life Cycle의 각 단계에서 생기는 에너지 소비, CO2 배출량, 폐기물을 계산하고, 우측의 형식으로 출력하도록 되어 있음. (입력항목과 출력 대응관계는 대표적인 것만을 표시하여 나타내었음.)

① 입력화면 1. : 메인 메뉴

BEAT-Bldg은 다음과 같은 메인 메뉴로 구성되어 있으며, 1번 항목에서 7번 항목까지의 각 입력본 단계에서 분기하고, 임의 순으로 입력을 실시할 수 있음.

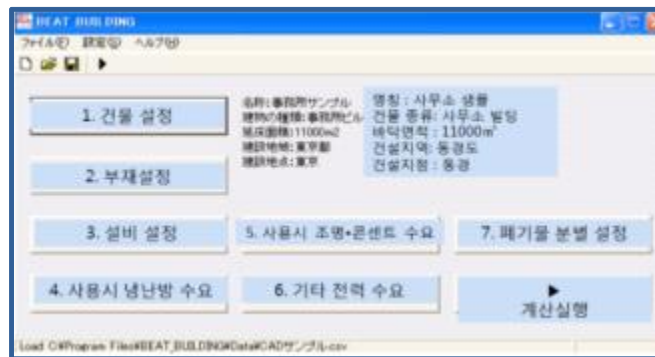


그림 3.23 메인 메뉴

② 입력화면 1. : 건물의 설정

건물명칭, 건설지의 설정, 구법, 바닥면적, 코어 위치, 공조 perimeter 면적, 공조인테리어 면적, 지상층수, 지하층수, 임대면적비, 건물의남향면적도 입력이 실행됨. CAD에 의한 입력결과를 가져올수 있으며, CAD 데이터를 가져오지 않는 경우에도 이 화면에서 입력이 가능함. 또, 부재·내장재 량 이외에 대해서는 본 단계에서 수정입력이 가능함.

건설지점은 전국 840개소의 지점에서 선택함. 이는 태양광발전의 태양복사량을 결정하기 위해 이용됨.

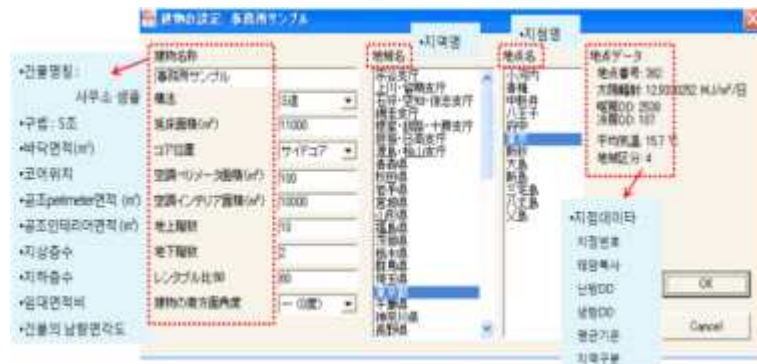


그림 3.24 건물의 설정

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

③ 입력화면 2: 부재의 설정

여기에서는 제조시의 부재·내장재량을 입력함. CAD에 의한 입력결과와 Import가 가능하며, 또, CAD 데이터가 없는 경우에도 여기에서 입력할 수 있도록 되어 있음. 그 경우는 새롭게 등록해서 어느 명칭의 부재를 선택해서 그 중량, 체적, 대수 등의 단위로 입력함. 또, 대부분의 항목에 대해서는 CAD에서 입력이 가능하지만, 부재리스트의 「기타」 등 일부에 대해서는 CAD 입력에 의하지 않고 리스트에서 직접, 수치를 입력함.

아래와 같은 입력화면에서 「부재」와 「내장재」에 대해서 화면을 바꾸고, 건물의 건설에 사용된 재료 수량, 중량 등을 입력함. 입력 종료 후, 「확인」 버튼을 누르면, 이하의 그림 3.25와 같이 화면에 바뀌어, 각각의 부재, 실내재 및 설비의 사용량에 응한, 건설시와 수선갱신시의 에너지와 CO₂ 배출량의 계산 결과를 일람 할 수 있음. 덧붙여 이 「확인」 작업은 각 입력 화면에서도와 같이 가능함. (일부의 화면에서는, 계산 화면 안에 최초부터 계산 결과를 나타내도록 하고 있음. 이 경우에서도 확인 버튼으로 계산 결과를 확인할 수 있게 되어 있음.)

각부재의 데이터로서 그림 3.26에 나타내는 단위 사용량 근처의 에너지 투입량, CO₂ 배출량, 폐기시의 구분별 처리 방법이 구축되어 있어 이것들을 입력치와 곱하는 것으로 각각의 부하량의 계산이 가능함. 하기의 그림에서는 해체 폐기물의 일부 열을 표시하였음.

④ 입력화면 3-6 : 설비설정-기타전력수요

에너지 사용량에 따른 환경부하 평가 화면으로 본 보고 분석 항목에서는 제외하였음.

그림 3.25 입력 화면 2 부재의 설정 및 확인 화면

그림 3.26 부재의 설정에 의해 계산을 실시하기 위한 데이터

⑤ 입력 화면 7 : 폐기물 분별의 설정

그림 3.27과 같은 입력화면에 의해 폐기물 분별의 설정을 실시함. 폐기물분별 시나리오에 대해서는 1~4 중에서 하나를 선택함. 「시나리오에 의한 분별의 확인」에서 건설시, 수선갱신 시, 해체 시의 각 단계에 관해서 실제의 폐기에 관한 계산결과를 표시하는 것이 가능함. 시나리오의 내용은 다음과 같음. 제조시의 부재와 내장재의 입력 일람에 관해서는 각 시나리오에 따라서 해체시의 해체배분 비율이 부여되기 때문에 빠르게 폐기물 처리의 계산이 가능할 수 있도록 하였음.

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스



그림 3.27 폐기물 분별의 설정

⑥ 평가 결과 1

메인 메뉴에서 「계산실행」을 클릭하면, 즉시 LCA 계산이 실행되고, 결과는 그림 3.28과 같이 표시됨. 계산기간은 자유롭게 설정할 수 있고, 기간 중의 LCA 계산을 실시해서 계산을 표시함. 계산 결과는 부재 제조시, 시공시, 개수시, 폐기시의 합계별로 각 단계에서의 에너지 투입량, CO₂ 배출량, 폐기물발생량으로 표시됨.

그래프 표시는 「계산내용」의 풀다운 메뉴에서 선택, 이하 10종류에 대해서 표시가 가능함.

- 1) 에너지(MJ/년), 2) 에너지(MJ/m²/년), 3) CO₂(kg-CO₂/년), 4) CO₂(kg-CO₂/m²/년),
- 5) 최종처분량(kg), 6) 최종처분량(kg/m²), 7) 재자원화량(kg), 8) 재자원화량(kg/m²),
- 9) 혼합폐기물(kg), 10)혼합폐기물량(kg/m²)



그림 3.28 계산실행 화면

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

⑥ 평가 결과 2 : 상세표

「상세표」를 클릭하면 그림 3.29와 같이 상세한 계산 내용을 볼 수 있음.

화면으로 얻어진 내용을 CSV 파일로 출력해서 엑셀등 다른 프로그램에서 편집하는 것도 가능함. 폐기물에 대해서는 최종처분량, 재자원화량, 혼합폐기물을 1년당 kg으로 표시함. 여기에서 폐기물발생량=최종처분량+재자원화량이며, 혼합폐기물은 분별되는 각종 폐기물의 대표로서 표시됨. 폐기물처리란의 에너지와 CO₂는 폐기물 운송과 처리에 필요한 에너지투입량과 CO₂배출량을 나타냄.



그림 3.29 상세 계산 결과

⑥ 평가 결과 3 : 시나리오 평가 결과

앞서 설명한 I ~ IV의 4단계 시나리오별 평가 별로 시공단계, 유지관리단계, 폐기단계의 재자원화량과 최종처분량의 단위 면적당 폐기물 발생량을 비교 분석할수 있음. 단, 폐기물 발생량의 총량에는 변화가 없으며, 재자원화량과 최종처분량의 밸런스가 변함. 그림 3.30은 RC조 건물-1의 50년 사용 시 시나리오별 평가 결과를 나타냄.

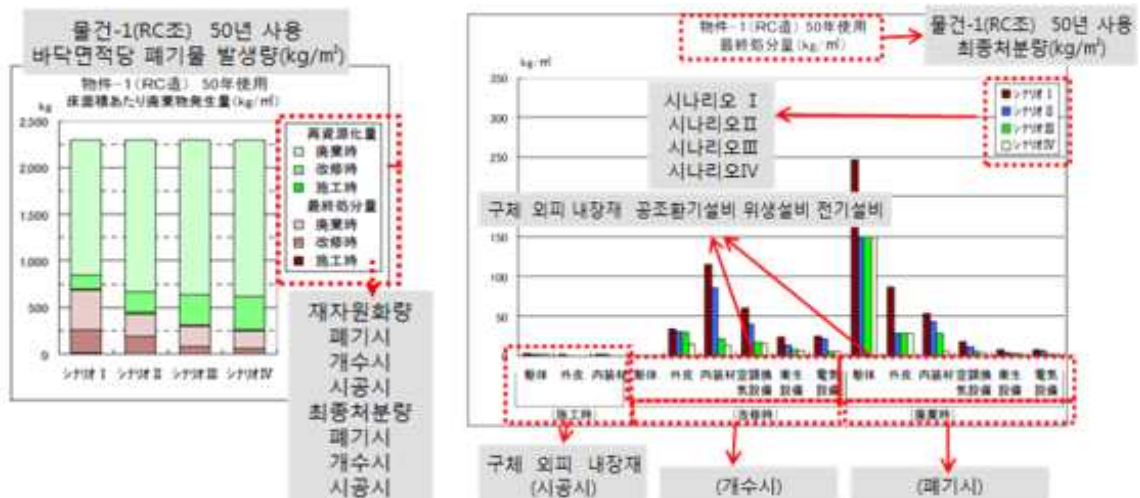


그림 3.30 시나리오 평가 결과

3.3 GEM-21

(1) 개요

GEM-21(Global Environmental Model / Management 21)은 시미즈 건설에서 개발한 건축물 전과정 평가 프로그램으로서 GEM-21은 건축공사를 대상으로 평가를 하며, GEM-21C는 토목공사를 대상으로 평가를 함. 본 보고에서는 건축공사를 대상으로 하는 GEM-21을 중심으로 폐기물 예측 평가 부분을 분석함. 건설부터 해체, 폐기까지의 전 생애 폐기물 및 환경부하를 종합적으로 산출가능한 프로그램임. 폐기물 및 환경부하를 저감검토 가능하며, Tree구조 방식의 간이평가 기술로 단기간 내에 대안 평가 가능한 어플리케이션 형태의 프로그램임.

(2) 평가범위

평가 대상 건축물은 단독주택, 공동주택, 사무소, 학교, 상점, 호텔, 복합건물이 대상이며, 기획과 기본설계단계의 한정된 정보로 건물의 전 생애에 발생하는 LCCO₂, LCNO_x, LC_{SO_x}, LCE, COD(Chemical Oxygen Demand), LCW를 산출함. 폐기물의 평가 범위는 시공단계의 자재 투입량 및 폐기물 발생량, 유지관리단계의 자재 투입량 및 폐기물 발생량, 해체단계의 폐기물 발생량을 평가 할 수 있으며, 재활용/재이용에 의한 재자원화량과 최종처분량의 평가는 불가함. 한편, 전과정 평가와 함께 개략의 라이프사이클 코스트(LCC)도 산출할 수 있어, 환경부하와 코스트를 동시에 비교하며 검토가 가능함.

표 3.21 GEM-21 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	○	○	-
	폐기물발생량	○	○	○
배출	재 자원화량	X	X	X
	최종 처분량	X	X	X

(3) 평가지표

폐기물 평가 지표는 GEM-21에 시미즈 건설에서 자체적으로 구축한 DB임. 본 프로그램에서 시미즈 건설에서 구축한 DB의 성질에 대해 정확히 공개하고 있지 않으나, 일본건축학회의 DB를 공유하고 있으며, 기준층 정보(전용면적, 공용면적, 옥외계단 면적, 외부 발코니 면적, 개구부 비율, 층고, 방수, 외주 길이), 부위별 외부 마감재사양 설정을 통해 자동적으로 물량이 산정되는 과정을 통해 유추해볼 때 재료별 손실률을 통한 폐기물량을 예측하고 있다고 사료됨.

(4) 평가프로세스

① 프로그램 전체의 흐름

각 공정과 공법에 대한 물량 및 환경부하 데이터가 탑재되어 있어 공정별 건설공사의 공법(ex. 방수공법의 종류 등)과 재료(ex. 유리창의 종류 등)를 선택 입력하는 것만으로 폐기물 및 환경부하가 산출됨. GEM-21 프로그램의 흐름은 건축/구조/기계설비/전기설비/ 시공 및 해체정보의 개요를 입력하고 LCC관련 항목을 입력하고 환경부하 및 폐기물 저감 메뉴를 선택하여 LCW를 비롯한 환경부하 평가 결과를 산정함. 한편, 건축공사, 기계설비공사, 전기설비공사에 대한 공정과 공법의 물량 산출은 재단법인 건설물가조사회에서 발간한 “건설공사표준 단위물량”을 이용하였음.

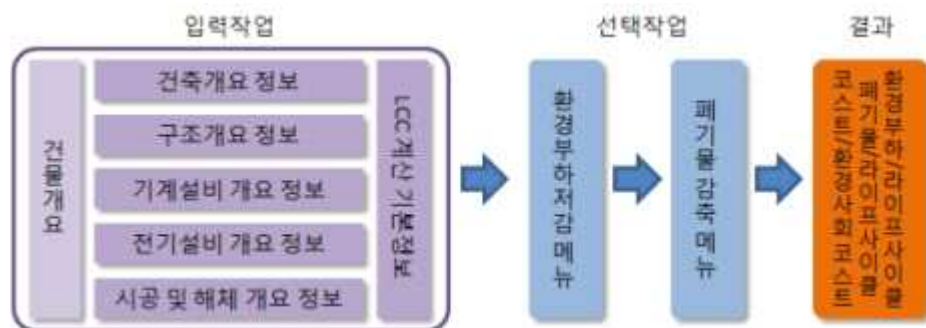


그림 3.31 GEM-21 평가프로세스

② 입력 화면 : 기본정보

GEM-21은 건축물의 설계 정보가 매우 제한적인 기본설계 단계에서의 평가가 가능하도록 기준층 정보의 면적 및 비율입력, 외부 마감재별 공법재료 선정, 건축물의 평면의 설정만으로 것만으로 간이평가가 가능함.

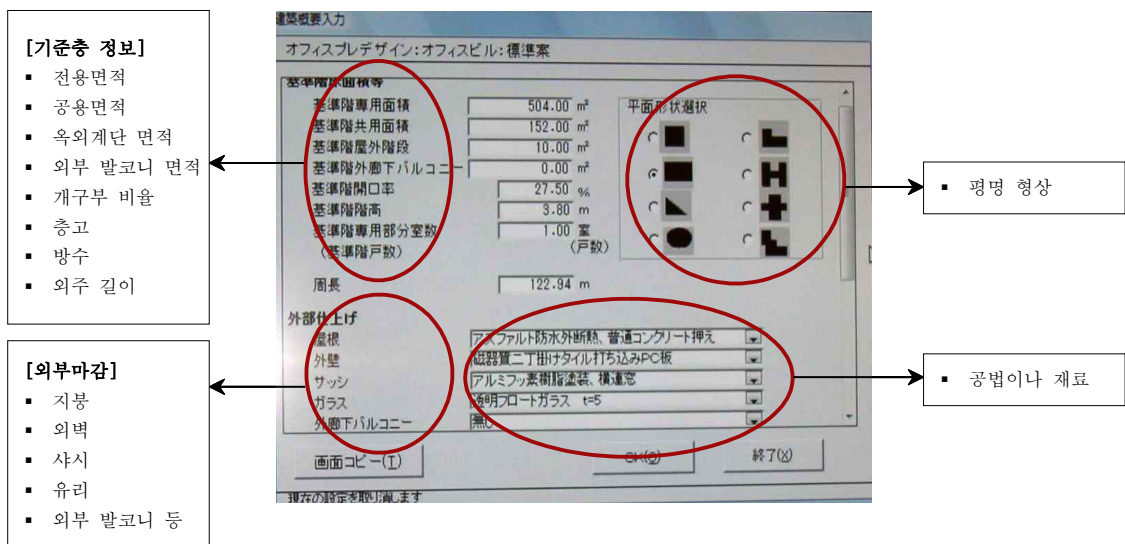


그림 3.32 기본화면

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

③ 입력 화면 : 상세정보

보다 정밀한 결과치를 얻기 위해서 상세 데이터를 선택할 수 있으며, 상세 입력데이터는 계획 건물의 의장, 구조, 설비, 전기 및 시공, 해체에 관하여 합계 100여개의 항목의 세부 데이터로 구성되어 있음. 예를 들어 용도, 규모, 구조형식 등의 주요한 건물개요 이외에 각종 친환경 기술의 채택여부와 종류, 건설부산물 처리 대책의 수준, 공사용 중기계와 운반 차량의 대수 등을 포함하여 구체적으로 입력 가능함.

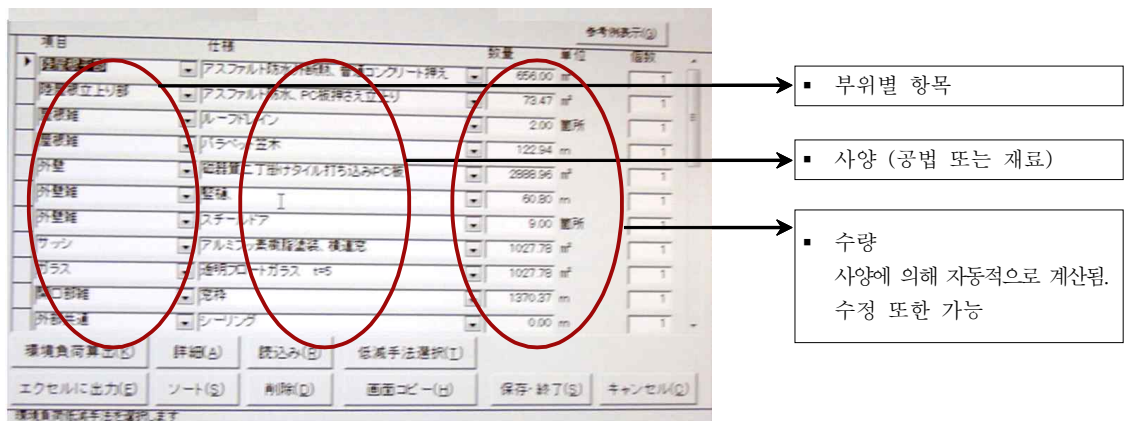


그림 3.33 상세입력화면

④ 입력 화면 : 폐기물의 계산과 감축

6개의 폐기물 저감 기술별 삭감률을 사용자가 직접 수치를 입력하는 방식으로 구성되어 있으며, 제시된 폐기물 저감 기술은 철근선가공에 따른 현장폐기물 최소화, 현장반입 자재 포장지 최소화, 배관절단 정확도 상승, UBR (Unit Bath Room) 화장실 적용, 거푸집 전용횡수 증가, 현장 치기 콘크리트 재이용이 있음. 건물의 건설, 운용, 해체 시의 폐기물량은 물론 사무실로부터 배출되는 사무 쓰레기의 연간 양을 미리 입력하는 것에 의해 LCW(라이프사이클 폐기물)을 계산이 가능함.

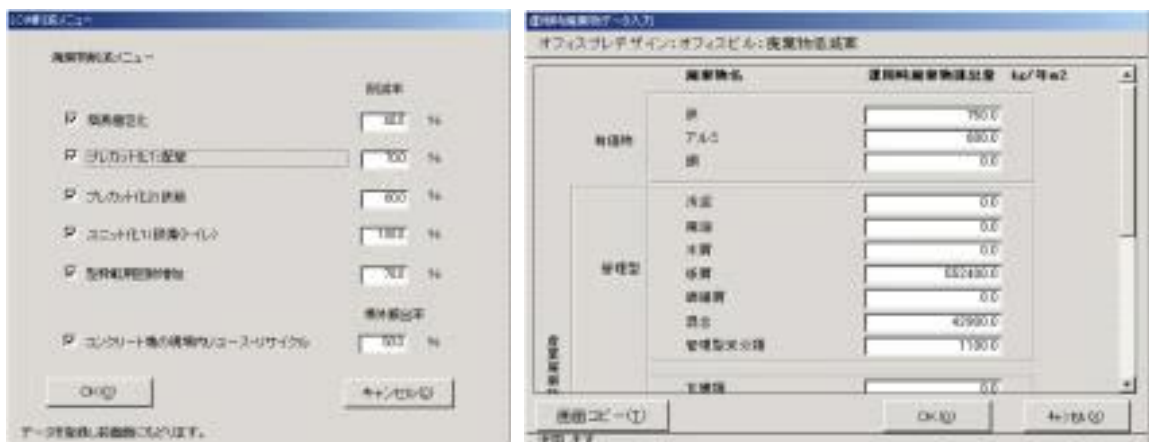


그림 3.34 LCW 감축 메뉴

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

⑤ 평가 결과 : 환경부하의 계산과 저감

LCCO₂와 LCNO_x, LCSO_x, LCEnergy 등, 건물의 건설부터 운용, 해체에 이르기까지 각종 환경부하를 계산하여 평가함. 메뉴화 된 약 160 종류의 환경부하저감기술을 이용하여 저감하기 위한 개선책 검토를 제공하며, 유리 종류나 차양 등의 효과를 확인하면서 비교검토 가능함. 또한, 각각의 환경부하저감 수법의 단가를 입력하여 LCC 평가에 반영할 수 있음.



그림 3.35 환경부하 저감안

⑥ 평가 결과 : 환경사회 비용의 계산

건물의 환경부하와 환경대책의 도입에 의한 부하저감 효과를 금액으로 환산하는 기능을 탑재 LCA의 계산 결과인 CO₂, NO_x, SO_x, COD, 폐기물 발생량에 대한 피해금액(인간의 건강 피해 등)을 통계데이터(생명표, 연령분포데이터, 물질 당 피해량)를 바탕으로 계산하여 이것을 함께 함으로서 금액평가가 가능함.



그림 3.36 라이프사이클 환경사회 비용

3.4 집합주택 간이 LCA 평가프로그램

(1) 개요

건설리사이클 법의 시행에 따라 분별 해체 및 재자원화 등의 의무부여가 되는 등의 구체적 시책이 추진되고 있음. 이에 카지마 건설은 건설리사이클 법에 능동적으로 대처하기 위하여 기존에 구축된 건축물 LCA평가 기법에 건설폐기물 발생량 예측 기법을 보완한 집합주택 간이 LCA 평가 프로그램을 개발하였음. 본 평가 프로그램은 엑셀 기반의 평가 툴로서 일본 건축학회 AIJ-LCA & LCW와 유사한 형태의 프로그램임.

(2) 평가 범위

공동주택을 대상으로 평가를 실시하며, LCW, LCE, LCNox, LCSox, LCCO₂의 평가가 가능함. 폐기물은 비산업 폐기물, 건설폐기물중 안정형 산업폐기물, 관리형 산업폐기물로 분류하여 평가 하며 평가폐기물의 종류는 비산업 폐기물, 안정형 산업 폐기물(폐기와, 폐석재류 폐유리·도자기류, 폐플라스틱류, 폐금속, 폐고무) 관리형 산업 폐기물(진흙계, 폐유리·도자기류, 폐플라스틱류, 폐금속, 폐목재, 폐지, 폐합성섬유, 폐유류)임. 부위별 분류는 콘크리트 구조체(콘크리트, 철근, 거푸집), 철골, 공용부 내외장, 공용부설비, 내장, 내설비로 나누어져 폐기물량 산정이 가능함.

표 3.22 집합주택 간이 LCA 평가프로그램 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	○	○	-
배출	폐기물발생량	○	○	○
	재 자원화량	○	○	○
	최종 처분량	○	○	○

(3) 평가 지표

① 복합원단위

LCW 평가는 복합 원단위의 세부 수치 설정을 통하여 가능함. 각 자재의 코드 사양의 정리를 위해 코드번호가 설정되어 있음. 사용부위가 다른 동일 사양에 관해서는 사양의 일람을 추가적으로 작성할 수 있게 구성하였음.

② 치수

자재량, 폐기물량의 산출에 있어서 치수는 중요한 요소이기 때문에 일람에 게재된 사양의 치수를 Default값으로 하고, 필요로 하는 자재가 Default값과 다른 경우는 치수차 등의 보정값을 산정해서 입력함. 이를 통해 치수가 실제로 사용되는 자재와의 대비가 가능하도록 하였음.

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

③ 사양

사양은 건축공사 및 건설자재 가격정보잡지에 게재되어있는 세목 또는 카지마 건설의 자재정보 사양을 설정함. 가격정보지는 가격산정을 목적으로 하고 있기 때문에, 색상, 마감, 가격에 영향을 주는 차이가 있다면 다른 사양으로서 정리되어 있음. 본 툴에서는 투입자재의 종류와량, 건설시, 해체시의 폐기물의 종류 및 그 량을 파악하기 위한 툴이기 때문에 색, 텍스처, 치수, 형상 다른 사양에 대해서는 동일하게 평가했음.

④ 재료명

자재별 사양을 구성재료로 분해하고 투입자재량, 폐기물발생량 산출에 필요한 데이터를 정리하였음. 본 툴에서 관리하는 자재는 원칙으로 해서 표준보과(=일위대가, 어떤 작업을 수행할 경우의 단위수량 혹은 어떤 일정 공사에 요구되는 작업 노동력 및 작업일수를 수치화한 것)로 확인 가능한 자재명으로 함.

⑤ 수량 및 단위

각 재료의 기입된 단위당 투입수량, '표준보과'나 표준 시방서, 특기시방서, 제품카달로그를 근거로 기입함. 시방서나 제품카달로그 값이 파악할 수 없는 경우는 Zeroemi 툴의 값을 대용함.

⑥ 환산 계수

본 툴에서는 관리하는 사양 수를 한정하기 위해서 디폴트의 치수를 정하고, 검토대상이 되는 재료의 치수를 입력하는 것으로 하였음. 여기에서는 각자재의 입력된 치수에 있어 투입자재량 산출을 위한 디폴트값에 대한 보정계수가 기입되어 있음. 「수량 및 단위」로 나타내 보인 질량 및 단위로 표시된 각 재료의 단위마다 수량 및 단위는 “매”, “장”이나 “개”등 질량 이외의 단위인 것도 많음. 이 때문에 사양서, 카다로그, 비중추계 등에서 자재의 단위당 중량을 산출한 값이 기입되어 있음. 사양서나 카다로그로 값을 파악할수 없는 경우는 Zeroemi 툴의 값을 적용함.

⑦ 손실율

수량적산기준이나 표준보과등에 설정되어 있는 시공상 필요한 단재를 손실율로 설정하였음. 로스율은 물량환산치와는 분별해서 관리하는 것으로 하였음.

예: “로스율”이 “2%”의 경우, 투입량은 100에 대해서 로스는 2. 시공시에 필요한 자재량(발주량)은 102임.

또한, 적산기준류에서 호용하고 있는 로스율은 생산자가 각각 상정한 물량과는 차이가 있을 경우가 있음. 또한, 로스율은 단재등으로써 발생하는 비율로 넣고, 포장재나 가설재 등에 의한 발생물은 평가에서 제외 하였음.

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

[illegible]

그림 3.37 집합주택 개요 LCA 평가 프로그램 통합원단위 구성(기준/대책안)

(4) 평가프로세스

① 입력 화면 : 기본정보

집합주택 간이 LCA 평가프로그램은 기준안과 대책안에 대한 정보를 입력하여 평가가 진행됨. 기본정보 단계에서 입력하는 항목은 평가안별로 연면적과, 내구수명, 자재 회수율을 입력함. 자재별 재사용율, 재활용율 수치 설정은 콘크리트, 철근, 거푸집, 철골 4개 항목이 대상이며, 콘크리트의 경우는 세부 자재로 구분하여 재사용율, 재활용율 수치를 적용함. 각각의 수치 설정은 프로그램에 내장되어 있는 대응 시나리오 별로 설정함.

■ 建物の基本情報						
	基準案	対策案	備考	コメント		
ケース名称	H1-RC 集合住宅	Z-RC-RCバルコ 集合住宅		柱の配置などで、基準案と対策案の床面積が微妙に異なるが、本試算では、同一として扱った。		
建築面積	1,239	1,239	m ²			
法定延床面積	25,622	25,622	m ²			
占有延床面積	19,551	19,551	m ²			
住戸数	240	240	戸			
住戸面積	87	87	m ²			
■ 建物のライフサイクル設定 (耐用年数、修繕率)						
	基準案	対策案	備考	コメント		
建物の耐用年数	35	100	年			
部位毎の更新周期	[入カー2]より、個別部位ごとに設定					
年あたりの修繕率						
躯体	0%	0%				
共用部外装	1%	1%				
共用部内装	1%	1%				
共用部設備	1%	1%				
住戸内装	1%	1%				
住戸内建築種	1%	1%				
住戸内設備	1%	1%				
注) 部位ごとの更新回数 = INT { (建物の耐用年数 - 1) / 部位ごとの更新周期 } で推定する						
■ 基本材料のリサイクル設定 (躯体)						
材料	基準案			対策案		
	構成材のリサイクル率	リユース率	廃材のリサイクル率	構成材のリサイクル率	リユース率	廃材のリサイクル率
コンクリート	注1)	0%	80%	注1)	0%	85%
鉄筋	90%	0%	90%	90%	0%	90%
型枠	0%	0%	80%	0%	0%	80%
鉄骨	0%	0%	90%	0%	0%	90%
注1) コンクリートの構成材のリサイクル率は[組合原単位]のデフォルト値を変更する。 注2) 内外装・設備のリサイクル設定は[組合原単位]のデフォルト値を変更する。						
■ 廃棄物処理方法の基本選択						
対応グレード	基準案	対策案	← 廃棄物処理方法のグレード			
コード	標準的	積極的	消極的	標準的	積極的	
	2	3	1	2	3	
			建設リサイクル法非対応 有価物を主にリサイクル	建設リサイクル法に対応	石膏ボードのメーカー 再利用などの積極的な 取り組み	

그림 3.38 입력화면

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

② 입력 화면 : 건설자재의 입력 화면

건설자재의 입력: 구조체, 내외마감재, 설비공사에 대한 제품사양별 단위면적당 투입물량, 수선율수선주기를 입력하며, 건설폐재의 운송거리, 건설폐재의 평균 적재율을 입력함.

자재의 수정사항이 있을 경우 복합 원단위 탭을 통하여 투입자재 세부 재료 구분, 회수율, 수선율, 수선주기, 발생품목코드& 처리코드 : 투입자재별 폐기물 품목코드 구분, 미사용자재 발생품목코드 지정이 가능함.

■建設資材の概算値の入力					
基準案	HI-RC集合住宅	耐用年数	35 年		
	仕様	更新 周期 年	修繕 率 %/年	設計数量 /延床面積	備考
躯体	杭			(資材量)	
	普通コンクリート Fc35N/mm2	35	0%	0.12 m3/m2	
	地下・基礎 普通コンクリート Fc42N/mm2	35	0%	0.20 m3/m2	
	地上 普通コンクリート 平均Fc50N/mm2	35	0%	0.47 m3/m2	
	鉄筋	35	0%	122 kg/m2	
	型枠	35	0%	1.88 m2/m2	転用回数を考慮
	鉄骨	35	0%	0 kg/m2	
共用部外装	雑鉄骨	35	0%	193 kg/m2	鉄骨階段(49.4t×52本+47.5t×50本)
				(施工面積)	
	屋根防水(A-PF) 内断熱歩行防水	35	1%	0.04 m2/m2	
	屋根防水(A-TF) 外断熱露出防水	35	1%	0.00 m2/m2	
	外壁ALC t125	50	1%	0.24 m2/m2	
	外壁PC	50	1%	0.02 m2/m2	ALC下部PC
	外床 磁器タイル	50	1%	0.03 m2/m2	外装+内装
	外天井 岩綿吸音板仕上	35	1%	0.02 m2/m2	
	バルコニー隔て板	35	1%	0.02 m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
共用部内装			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
	内部防火区画 ALC t100	50	1%	0.32 m2/m2	
	内壁 スチールパネル	50	1%	0.04 m2/m2	
	床 ソフトタイル	18	1%	0.03 m2/m2	
	床 長尺シート	18	1%	0.00 m2/m2	
	床 タイルカーペット	18	1%	0.09 m2/m2	
	壁仕上 PB 9.5	35	1%	0.42 m2/m2	
	壁仕上 ビニールクロス	35	1%	0.18 m2/m2	
	壁・天井 GW t50	35	1%	0.02 m2/m2	
	天井 PB 9.5	35	1%	0.11 m2/m2	
	天井 ビニールクロス	35	1%	0.11 m2/m2	
	断熱材 スタイロフォーム t30	35	1%	0.03 m2/m2	
	住戸間仕切	50	1%	0.23 m2/m2	
共用部設備	共用部窓	50	1%	0.00 m2/m2	
	住戸部窓	50	1%	0.13 m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
住戸 内装				(延床面積)	
	集合住宅 共用部 電気設備工事	18	1%	1 -	
	集合住宅 共用部 衛生設備工事	18	1%	1 -	
	集合住宅 共用部 換気設備工事	18	1%	1 -	
	集合住宅 共用部 昇降機設備工事	35	1%	1 -	
				(施工面積)	
	住戸内 床 フローリング	18	1%	0.69 m2/m2	
	住戸内 床 合板	18	1%	0.30 m2/m2	
	住戸内 床 パーティクルボード	18	1%	0.30 m2/m2	
	住戸内 床 クッションフロア	18	1%	0.06 m2/m2	
	住戸内 壁・天井 壁紙	18	1%	2.93 m2/m2	
	住戸内 壁・天井 PB	18	1%	3.45 m2/m2	
	住戸内 壁・天井 乾漆	18	1%	0.96 m2/m2	
	住戸内 収納 合板	18	1%	0.41 m2/m2	
	住戸内 室間壁	18	1%	0.14 m2/m2	
	住戸内 玄関壁	35	1%	0.02 m2/m2	
	住戸内 人工大理石	18	1%	0.02 m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	
			1%	m2/m2	

그림 3.39 건설자재 입력화면

③ 무기계 건설폐기물 발생량 예측 프로세스

② 평가 결과화면

폐제품목별 / 전생애주기별 폐기물 발생량 분석이 가능하며(비산업폐기물, 안정형산업폐기물, 관리형 산업폐기물) 폐기물 저감시나리오에 따른 (소극적, 표준적, 적극적) 적용에 따른 폐기물 발생량 분석이 가능함. 그림 3.41은 폐제품목별/전생애주기별 폐기물 발생량 평가 결과 화면을 나타냄.

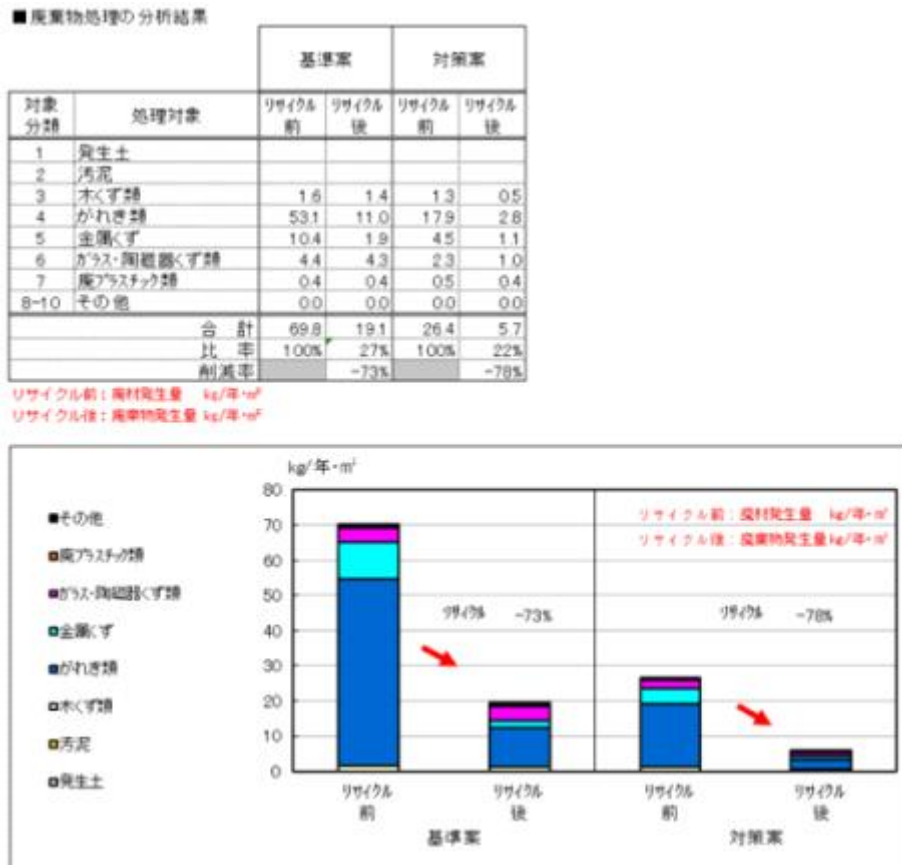


그림 3.40 저감 시나리오별 평가결과

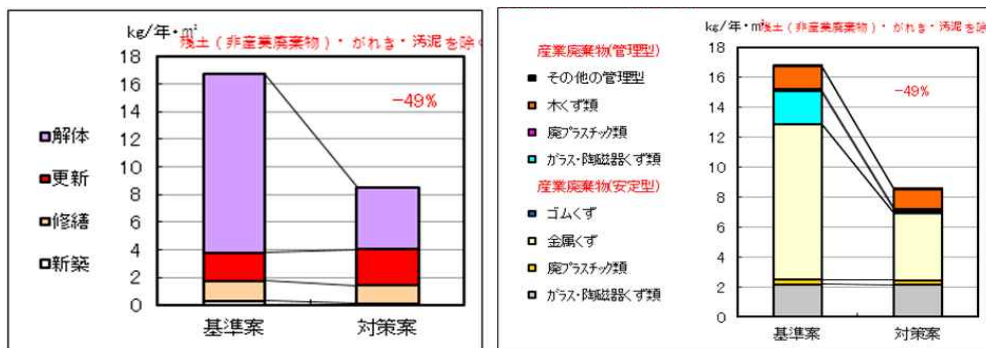


그림 3.41 폐제품목별/전생애주기별 평가 결과

4. 국내의 건설폐기물 발생량 예측 프로세스 분석

구 분		해체공사 건설폐기물 발생량 예측프로그램				분별 해체공사 건설폐기물 발생량 간이 산정 프로그램				AIJ LCA&LCW				BEAT-Bldg				GEM-21				집합주택 간이 LCA 평가프로그램			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
평가 범위	시공 단계	X	X	X	X	X	X	X	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	X	○	○	○	○
	유지관리 단계	X	X	X	X	X	X	X	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X	X	○	○	○	○
	폐기 단계	-	○	X	X	-	○	○	○	-	○	○	○	-	○	○	○	-	○	X	X	-	○	○	○
개요	형태, 연도	Application, 2011년				Application, 2009년				Microsoft Excel, 2005년				Application, 2007년				Application, 1998년				Microsoft Excel, 2003년			
	개발 기관	경남과학기술대 한국토지주택공사				한국건설기술연구원				일본건축학회				국토기술정책종합연구소				시미즈 건설				카지마 건설			
	평가 대상	공동주택				건축물과 사무소, 공동주택, 교육시설, 공장, 창고, 단독주택				모든건축물(단독주택은 별도프로그램으로 산정)				공동주택, 사무소				단독주택, 공동주택, 사무소, 학교, 상점, 호텔, 복합건물				공동주택			
	평가 목적	공동주택의 해체공사에 특화된 해체공사 폐기물 예측 시스템				건설폐기물의 재활용을 유도하는 분별해체공사 폐기물 예측 시스템				건축물 전과정 환경부하 평가				건설 리사이클법에 대응하는 설계지원시스템				건축물 전과정 환경부하 평가				건설 리사이클법에 대응하는 설계지원시스템			
지표	폐기물 분류	공동주택 건설폐기물 22종 분류				건설폐기물 5종 분류				일본환경성 폐기물처리법에 따른 분류, 54종				주요 건축 자재를 47종의 폐기물로 분류				일반폐기물, 건설폐기물 (고형폐기물에 한함)				비산업 폐기물, 안정형 산업 폐기물, 관리형 산업 폐기물로 분류, 폐기물 종류는 11종			
	예측 근거	간접추계법-원단위방식				직간접 혼합분석법을 적용한 분별해체 폐기물 원단위 방식				간접추계법-투입자재 손실률				간접추계법-투입자재 손실률				시미즈 건설의 내부 DB 사용으로 추측됨.				간접추계법-투입자재 손실률			
	원단위	공동주택 도면실측을 통한 1차 분석과 MSC기법을 적용한 2차 분석적용한 회귀모델 제안				분별해체 현장 조사 및 일보원단위 분석을 통한 분별해체공사 원단위 제안				복합원단위 적용 건축업협회 실태조사 원단위를 통한 예측 비교수치 제공				복합원단위 적용				시미즈 건설의 내부 DB 사용으로 추측됨.				복합원단위 적용			
입력	입력 과정	건물개요>연면적 입력				건물개요>부위별 연면적입력> 폐기물 처리비용 입력				건물개요>물량내역서입력> 세부조건설정				건물개요>물량내역서입력>수선통, 회수율입력				건물개요>건축구조설비개요>시공및해체조개요>LCC조건설정				건물개요>물량내역서입력>복합원단위 입력>운송거리 적재를 입력			
	기본 정보	건물 동수, 세대수, 연면적 입력				용도, 구조, 운반거리, 철거방식, 건축물 부위 및 수장 구분설정 연면적·외벽 및 내벽 면적				용도, 구조, 연면적, 평가기간, 재건축, 신축보정				용도, 구조, 연면적, 공용연수				기준층정보, 평면형상, 마감별 공법 재료 선정				연면적(기준안/대책안), 내구수명(기준안/대책안), 자재 회수율			
	세부 정보	한국토지주택공사의 중량/체적환산계수 적용				건설폐기물 원단위(분별해체공사 / 일반해체공사 건폐법 세부분류), 중량환산계수, 폐기물 처리비				자원순환조건(재사용율, 재활용율), 운송거리, 적재율				부분별 계획 갱신연수, 환산계수(Zeroemi), 손실률, 회수율				세부 공법 재료 선정, 폐기물 저감 기술 설정				제품사양별 단위면적당 투입물량, 수선율수선주기, 건설폐제 운송거리, 건설폐제 평균적재를			
결과	평가 영역	해체단계 폐기물 발생량				해체단계 폐기물 발생량, 해체비용, 처리비용				LCW, LCR, LCCO ₂ , LCE, LCC				LCW, LCCO ₂ , LCE				LCW, LCCO ₂ , LCE, COD				LCW, LCCO ₂ , LCE			
	평가 유형	평형별 폐기물 발생량 표 동별 폐기물 발생량 표				그래프, 표, 자재목록				그래프, 표, 자재목록				그래프, 표, 폐기물 군별목록				그래프, 표, 자재목록				그래프, 표, 폐기물 부위별 종류별목록			
	저감 방안	없음				재활용을 입력				자원순환기술 적용 따른 대안비교				4단계의 재자원화 시나리오 비교				6가지 폐기물 저감 기술 적용에 따른 폐기물 총량 저감				3단계의 재자원화 시나리오 비교			

A. 자재 투입량 B. 폐기물 발생량 C. 재 자원화량 D. 최종 처분량

• LCW : Life Cycle Waste • LCR : Life Cycle Resource • LCCO₂ : Life Cycle CO₂ • LCE : Life Cycle Energy • LCC : Life Cycle Cost • COD : Chemical Oxygen Demand

[MT] 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술

- 본 핵심성과의 연구목표, 연구내용 및 연차별 세부수행방법은 다음과 같음.

연구 목표	무기계 건설폐기물 재자원화 DB를 이용한 최적의 환경 배려형 시멘트 배합/제조 원천기술 개발과 성능평가 연구
----------	---

연구 내용	1. 건설폐기물 수화성 회복을 위한 최적 재생프로세스 제시 2. 환경 배려형 시멘트 최적 원료 배합 공정 구축 3. 환경 배려형 시멘트의 압축강도 발현 및 내구성능 검증
----------	--

연구 프로 세스	1차년				2차년			
	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기
	1.건설폐기물 수화성 회복을 위한 최적 재생프로세스 제시							
			2.환경 배려형 시멘트 최적 원료 배합 공정 구축					
					3.환경 배려형 시멘트의 압축강도 발현 및 물리적/화학적 성능 검증			

수행 방법	연차	주요 연구활동	세부 수행 방법
	1차 년도 기술 정립 및 증명	1.무기계건설폐기물 수화성 회복을 위한 최적 재생 프로세스 제시	▪ 무기계 건설폐기물의 소성온도에 따른 XRD분석 및 F-CaO 분석을 통한 물성 분석 ▪ 각 소성온도에서의 내부 구성화합물의 분해 특성 분석 ▪ 환경 배려형 시멘트의 화학적 성능 분석과 물리적 성능 분석을 통한 1종 보통 포틀랜드 시멘트 KS L 5201 품질 기준을 만족여부
	2차 년도 기술 개발 및 성능 평가	2.환경 배려형 시멘트 최적 원료 배합 공정 구축	▪ 무기계 건설폐기물의 조합을 폐기물의 화학특성을 토대로 최적 혼합 공정 도출 ▪ 원료물질의 소성프로세스를 토대로 한 원료배합 및 재생 프로세스의 최적화 연구
		3.환경 배려형 시멘트의 압축강도 발현 및 물리적/화학적 성능 검증	▪ 원료물질의 화학적 특성 및 환경부하 배출량, 소성시 시멘트 화합물 생성량을 목적함수로 하는 최적 배합 알고리즘 구축 ▪ 무기계 건설폐기물의 소성조건과 폐기시점에 따른 품질 오차 평가 및 검토

■ 환경 배려형 시멘트 조합별 건설폐기물 배합 설정

- 환경 배려형 시멘트를 제조하기 실제 발생하는 무기계 건설폐기물을 수집 및 각 화학성분을 분석 데이터베이스를 통해 시멘트 및 클링커 제조 관리를 위한 예측식에 값을 대입하고 환경 배려형 시멘트의 배합을 분석함. 한편, 클링커의 광물 성분비는 명확히 명시되어 있는 기준이 없으며 국내 각 시멘트 제조사마다 그 기준이 조금씩 차이가 있음.
- 이에 본 연구에서는 국내 S시멘트 제조사에서 기준으로 하는 1종 포틀랜드 시멘트 광물의 화합물 구성비(C₃S : 52%, C₂S : 24%, C₃A : 9%, C₄AF : 9%)를 입수하고 이를 기준으로 조성된 화학성분을 Bogue식에 대입하여 이후 생성되는 클링커 광물의 성분비를 예측 및 분석하였으며 표 3.23 과 같이 원료들을 조합함. 그림 3.42, 3.43, 3.44는 각 조합별 도출된 배합비에 의한 이론적 클링커 광물의 화합물 구성비 예측 방법을 나타냄.

표 3.23 환경 배려형 시멘트 조합별 건설폐기물 배합표

(단위 : 중량백분율, %)

건설폐기물	조합 1 (시멘트 원료의 25% 대체)	조합 2 (시멘트 원료의 20% 대체)	조합 3 (시멘트 원료의 15% 대체)
페타일	4.1	4.4	4.8
페시멘트블럭	0.7	0.5	0.3
폐천장재	17.5	12.4	7.2
석회석	75.0	80.0	85.0
전기로슬래그	2.7	2.7	2.7
합계	100.0	100.0	100.0

(단위 : 중량백분율, %)

구분	건설폐기물	혼합비율	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	L.O.I	합계
원료	폐천장재	-	5.84	1.10	1.06	39.21	0.54	0.00	0.32	24.62	0.41	0.52	26.39	100.00
	페시멘트블럭	-	50.69	10.01	3.93	19.56	1.26	0.67	3.69	0.99	0.46	0.63	8.12	100.00
	페타일	-	57.46	15.95	2.62	9.55	0.48	1.02	2.23	0.44	0.72	1.32	8.22	100.00
	전기로슬래그	-	16.19	11.22	36.32	23.10	2.71	0.00	0.07	0.21	0.84	9.36	0.00	100.01
	석회석	-	12.21	2.40	0.77	44.75	2.15	0.01	0.64	0.00	0.00	0.00	36.55	99.48
배합	폐천장재	4.1	2.36	0.65	0.11	0.39	0.02	0.04	0.09	0.02	0.03	0.05	0.34	4.10
	페시멘트블럭	0.7	0.35	0.07	0.03	0.14	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.06	0.70
	페타일	17.5	1.02	0.19	0.19	6.86	0.09	0.00	0.06	4.31	0.07	0.09	4.62	17.50
	전기로슬래그	2.7	9.16	1.80	0.58	33.56	1.61	0.01	0.48	0.00	0.00	0.00	27.41	74.61
	석회석	75.0	0.44	0.30	0.98	0.62	0.07	0.00	0.00	0.01	0.02	0.25	0.00	2.70
소성	화학성분 합계	100	13.33	3.02	1.88	41.58	1.81	0.05	0.66	4.34	0.13	0.40	32.42	99.61
클링커	강열감량(L.O.I) 제외		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	L.O.I	합계
	조합 1		19.76	4.48	2.78	61.64	2.68	0.08	0.97	6.43	0.19	0.60	0.00	99.61
	기준 : 1종 포틀랜드 시멘트		17~25	3~8	0.5~6	60~67	5.0이하	-	-	3.5이하	-	-	5.00이하	-

그림 3.42 환경 배려형 시멘트 건설폐기물 배합에 따른 원료/배합/클링커 단계별 물성표 (조합 1)

① 환경배려형 시멘트 배합 분석

(단위 : 중량백분율, %)

원료	구분	건설폐기물	혼합비율	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	L.O.I	합계
원료	조합 2	폐천장재	-	5.84	1.10	1.06	39.21	0.54	0.00	0.32	24.62	0.41	0.52	26.39	100.00
		페타일	-	57.46	15.95	2.62	9.55	0.48	1.02	2.23	0.44	0.72	1.32	8.22	100.00
		페시멘트블록	-	50.69	10.01	3.93	19.56	1.26	0.67	3.69	0.99	0.46	0.63	8.12	100.00
		전기로슬래그	-	16.19	11.22	36.32	23.10	2.71	0.00	0.07	0.21	0.84	9.36	0.00	100.01
		석회석	-	12.21	2.40	0.77	44.75	2.15	0.01	0.64	0.00	0.00	0.00	36.55	99.48
배합	조합 2	폐천장재	12.4	0.72	0.14	0.13	4.86	0.07	0.00	0.04	3.05	0.05	0.06	3.27	12.40
		페타일	4.4	2.53	0.70	0.12	0.42	0.02	0.04	0.10	0.02	0.03	0.06	0.36	4.40
		페시멘트블록	0.5	0.25	0.05	0.02	0.10	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.50
		전기로슬래그	2.7	0.44	0.30	0.98	0.62	0.07	0.00	0.00	0.01	0.02	0.25	0.00	2.70
		석회석	80.0	9.77	1.92	0.62	35.80	1.72	0.01	0.51	0.00	0.00	0.00	29.24	79.58
소성	화학성분 합계		100	13.71	3.11	1.86	41.80	1.89	0.06	0.67	3.08	0.11	0.38	32.91	99.58
	강열감량(L.O.I) 제외														
	조합 2			20.48	4.65	2.78	62.44	2.82	0.08	1.00	4.60	0.16	0.57	0.00	99.58
클링커	기준 : 1종 포틀랜드 시멘트			17~25	3~8	0.5~6	60~67	5.0이하	-	-	3.5이하	-	-	5.00이하	-

그림 3.43 환경 배려형 시멘트 건설폐기물 배합에 따른 원료/배합/클링커 단계별 물성표 (조합 2)

(단위 : 중량백분율, %)

원료	구분	건설폐기물	혼합비율	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	L.O.I	합계
원료	조합 3	폐천장재	-	5.84	1.10	1.06	39.21	0.54	0.00	0.32	24.62	0.41	0.52	26.39	100.00
		페타일	-	57.46	15.95	2.62	9.55	0.48	1.02	2.23	0.44	0.72	1.32	8.22	100.00
		페시멘트블록	-	50.69	10.01	3.93	19.56	1.26	0.67	3.69	0.99	0.46	0.63	8.12	100.00
		전기로슬래그	-	16.19	11.22	36.32	23.10	2.71	0.00	0.07	0.21	0.84	9.36	0.00	100.01
		석회석	-	12.21	2.40	0.77	44.75	2.15	0.01	0.64	0.00	0.00	0.00	36.55	99.48
배합	조합 3	폐천장재	7.2	0.42	0.08	0.08	2.82	0.04	0.00	0.02	1.77	0.03	0.04	1.90	7.20
		페타일	4.8	2.76	0.77	0.13	0.46	0.02	0.05	0.11	0.02	0.03	0.06	0.39	4.80
		페시멘트블록	0.3	0.15	0.03	0.01	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.30
		전기로슬래그	2.7	0.44	0.30	0.98	0.62	0.07	0.00	0.00	0.01	0.02	0.25	0.00	2.70
		석회석	85.0	10.38	2.04	0.65	38.04	1.83	0.01	0.54	0.00	0.00	0.00	31.07	84.56
소성	화학성분 합계		100	14.15	3.22	1.85	42.00	1.97	0.06	0.69	1.80	0.09	0.36	33.39	99.56
	강열감량(L.O.I) 제외														
	조합 3			21.28	4.84	2.78	63.19	2.96	0.09	1.03	2.71	0.13	0.54	0.00	99.56
클링커	기준 : 1종 포틀랜드 시멘트			17~25	3~8	0.5~6	60~67	5.0이하	-	-	3.5이하	-	-	5.00이하	-

그림 3.44 환경 배려형 시멘트 건설폐기물 배합에 따른 원료/배합/클링커 단계별 물성표 (조합 3)

- 원료들의 조합 및 클링커 화합물의 예측 분석 결과, 표 3.24~25에서 나타난 바와 같이 초기강도에 있어 큰 역할을 하는 C₃S에 대해서는 시멘트 제조사의 기준 대비 조합 3(51.27%)이 가장 근접한 값으로 예측됨. 이 외 두 조합(조합1 : 48.38%, 조합2 : 50.23%)에서도 기준 값(52%)과 유사하게 분석됨.
- 원료들의 조합 및 클링커 화합물의 예측 분석 결과, 그림 3.45에서 나타난 바와 같이 초기강도에 있어 큰 역할을 하는 C₃S에 대해서는 시멘트 제조사의 기준 대비 조합3(51.27%)이 가장 근접한 값으로 예측됨.

표 3.24 Prediction of chemical composition ratio by case

(단위 : 중량백분율, %)

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	L.O.I*	합계
조합 1 (시멘트 원료의 25% 대체)	19.76	4.48	2.78	61.64	2.68	0.08	0.97	6.43	0.19	0.60	0.00	100.00
조합 2 (시멘트 원료의 20% 대체)	20.48	4.65	2.78	62.44	2.82	0.08	1.00	4.60	0.16	0.57	0.00	100.00
조합 3 (시멘트 원료의 15% 대체)	21.28	4.84	2.78	63.19	2.96	0.09	1.03	2.71	0.13	0.54	0.00	100.00

표 3.25 Prediction of clinker compounds by case

(단위 : 중량백분율, %)

구분	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	LSF	SM	IM
OPC	52.00	24.00	9.00	9.00	0.92~0.92	2.3~2.8	1.6~2.0
조합 1 (시멘트 원료의 25% 대체)	48.38	20.15	7.15	8.47	0.99	2.72	1.61
조합 2 (시멘트 원료의 20% 대체)	50.23	20.82	7.61	8.47	0.97	2.76	1.67
조합 3 (시멘트 원료의 15% 대체)	51.27	22.34	8.12	8.46	0.94	2.79	1.74

- 이 외 두 조합(조합1 : 48.38%, 조합2 : 50.23%)에서도 기준 값(52%)과 유사하게 분석됨. 또한, 초기강도 보다는 장기강도 발현에 크게 기여하고 반응속가 낮으며 발열량이 낮은 C₂S의 경우는 세 조합(조합1 : 20.15%, 조합2 : 20.82%, 조합3 : 22.34%) 모두 기준에 미치지 못함.
- 화합물에 있어 반응속도가 빠르고 발열량이 매우 높은 C₃A와 C₄AF도 조합 3이 기준대비 가장 근접한 값으로 예측됨.
- 석회포화도(LSF)와 철률(IM)에 있어서도 조합3 (LSF : 0.94, IM : 1.74)이 세 조합 가운데 기준 값에 가장 근접한 값으로 예측되었으며, 반대로 규산률(SM)은 조합1 (SM : 2.7)이 가장 근접하게 예측됨.
- Bogue식에 의한 화합물의 구성비 예측 결과, 전체적으로 세 조합 모두 기준 기준값과 유사한 화합물의 구성비가 분석 되었으며 특히 조합 3에서 초기강도와 장기강도 발현에 각각 영향을 미치는 C₃S와 C₂S가 가장 유사하게 예측 및 분석되어 기준으로 하는 1종 포틀랜드 시멘트에 가장 이상적인 조합으로 분석됨.
- 한편, 폐천장재는 앞서 언급한바와 같이 석회석(천연자원)과 비교했을 때 동등 수준의 CaO를 포함함. 하지만, 삼산화황(SO₃) 성분이 다른 무기계 건설폐기물에 비해 다량 함유되어있어 Bogue식에 의한 광물의 화합물의 구성비를 예측할 시 변수로 적용되어 석회석을 대체 하는데 많은 양이 고려되지 못함.

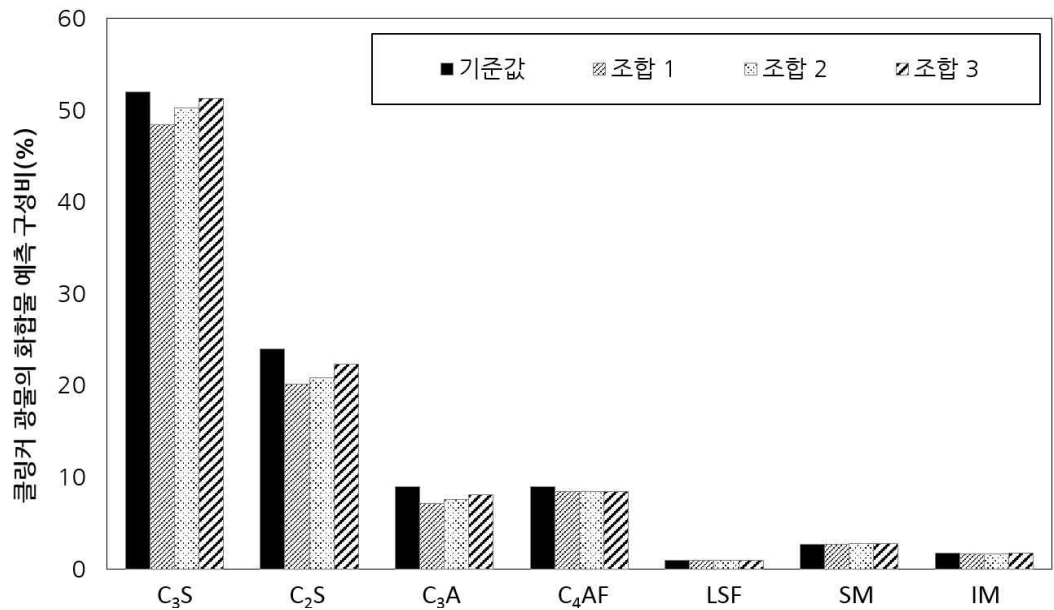


그림 3.45 Composition ratio estimation of chemical composition of clinker

■ 원료의 특성 분석 및 실험 계획

- 본 연구에서는 앞의 연구내용에서와 같이 기준 OPC를 기준으로 도출된 조합비에 따라 시멘트 원재료의 주원료인 석회석과 부원료인 기타 광물을 대신하여 무기계 건설폐기물을 대체하여 원료들을 배합함.
- 이 때 CaO 원으로서 천연자원인 석회석(석회질)을 사용하였으며 이를 보충하기 위한 무기계 건설폐기물로서 폐천장재를 사용함. 또한, SiO₂ 원으로는 점토질 및 규산질의 천연 광물 대신 무기계 건설폐기물인 페타일과 페콘크리트블록을 사용함.
- 마지막으로 산화철질의 주 화학성분인 Fe₂O₃ 원으로는 무기계 건설폐기물들의 화학성분을 분석한 결과 적절히 대체 될 만한 폐기물이 분석되지 않아 철광산업에서의 산업부산물로서 발생하는 전기로 슬래그를 사용하여 시멘트 클링커를 제조함. 제조된 클링커는 무수석고를 첨가하여 함께 분쇄 및 시멘트를 제조함.
- 시멘트 클링커 제조에 사용된 각 원료의 배합량은 1kg의 시멘트를 제조하기 위해 투입된 각 원료들의 사용량으로 표 3.26과 같으며 표 3.27은 시멘트 제조 이후 실험 수준과 인자를 나타냄.

표 3.26 환경 배려형 시멘트 배합량

(단위:g/1kg 시멘트 생산)

조합	환경 배려형 시멘트 배합량					소성 온도 (℃)	소성 시간 (hr:m)	석고 첨가
	폐기물 투입량				석회석			
	A	B	C	D				
조합1	259.0	10.4	60.7	40.0	1109.8	1450	7:15	59.2
조합2	184.8	7.5	65.6	40.2	1192.4			59.7
조합3	108.1	4.5	72.1	40.5	1276.1			60.1

표 3.27 실험 수준 및 인자

인자	조합	시멘트 모르타르		화학적특성	
		W/C(%)	C:S	Free-CaO	비중
수준	조합 1/2/3	50	1:3	1%이하	3.15
수준수	3	1	1	1	1

표 3.28 Experiment list and criteria

시험명	기준
X선 회절분석	KS M 0043
광학현미경 분석	-
Free CaO 분석	KS L 5120

■ 클링커 제조 및 소성

- 앞서 조합비대로 배합된 원료들은 볼밀을 이용하여 장시간 혼합하였으며 혼합이 끝난 원료는 적절한 양의 증류수를 이용하여 $12.0 \pm 2.0\text{g}$ 의 성형(구형)체로 제작함.
- 이는 실제 시멘트 클링커 제조시 Rotary Kiln에서의 소성 공정 이후 생성되는 클링커와 유사한 환경을 조성하기 위함이며 제조된 성형체는 건조기에서 75°C 로 24시간 건조함.
- 건조된 성형체는 클링커 제조를 위해 그림 3.46과 같은 프로그램으로 전기로($5 \sim 10^\circ\text{C}/\text{min}$)에서 1450°C 까지 소성한 후 1시간 동안 Holding하여 꺼내어 공기 중에서 급랭함. 제조된 클링커는 일부 상분석과 광물특성 분석을 하였고, 석고(4%)를 첨가하여 조크러셔 및 볼밀을 이용해 분쇄하여 시멘트를 제조함.
- 제조된 시멘트에 대하여 화학적 특성평가를 실시함. 그림 3.47은 클링커 제조 과정을 나타내는 모습이며 표 3.28은 각 화학적, 물리적 특성평가의 실험항목 및 기준을 타나냄.

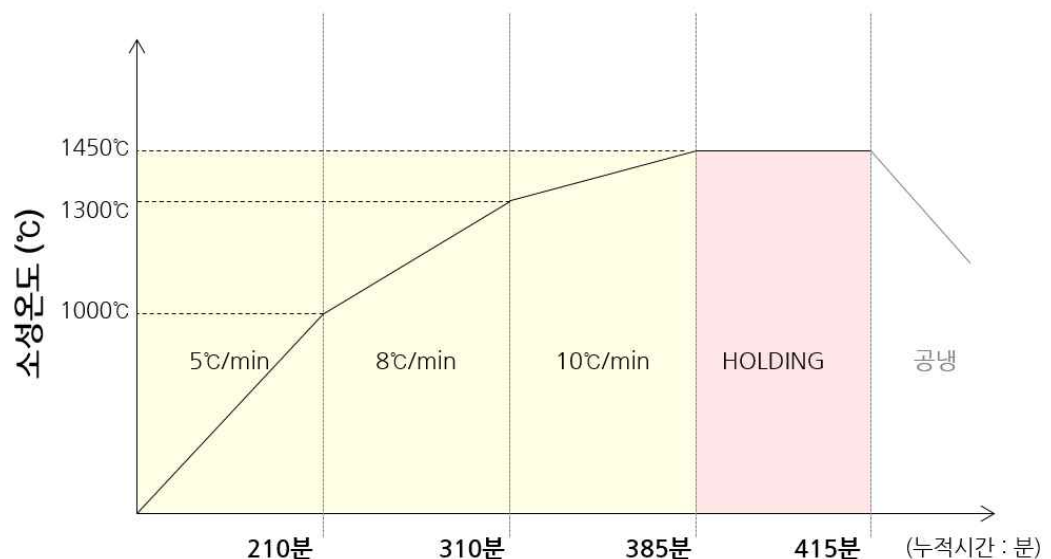


그림 3.46 전기로 가동시간 별 온도 범위 및 Holding 시점



그림 3.47 시멘트 클링제 제조 프로세스

■ Free-CaO(유리석회) 측정

- 본 연구에서는 개발된 시멘트 클링커의 화학적 특성을 평가하기 위해 소성도 및 상분석을 실시하였으며 가장 먼저 소성도를 예측할 수 있는 Free-CaO(유리석회)의 함량을 분석함. Free lime이라고도 불리는 Free-CaO는 시멘트 제조에서 소성이 불충분하여 석회분이 유리 상태로 남은 상태를 말하는데 본 연구에서는 KS 기준의 화학분석 방법에 준하여 각 조합별 Free-CaO의 함량을 분석함.
- Free-CaO 측정은 미분쇄된 시멘트 클링커를 1.0000g으로 소수점 4째 자리까지 측정하여 준비하고 삼각 플라스크에 앞서 준비된 시료와 에틸렌 글리콜(Ethylene glycol) 50ml를 혼입함. 이 후 대략 80℃의 항온수조에서 30분 동안 유지하면서 5분마다 1회 삼각 플라스크를 흔들어서 진탕시킴.
- 다음으로 필터링을 위해 여과액(에탄올)을 사용하여 여과시킨 후 분말형태의 지시약 BCG(Brom Cresol Green) 0.3g을 준비하여 에탄올 100ml에 섞어 여과액에 혼입함.

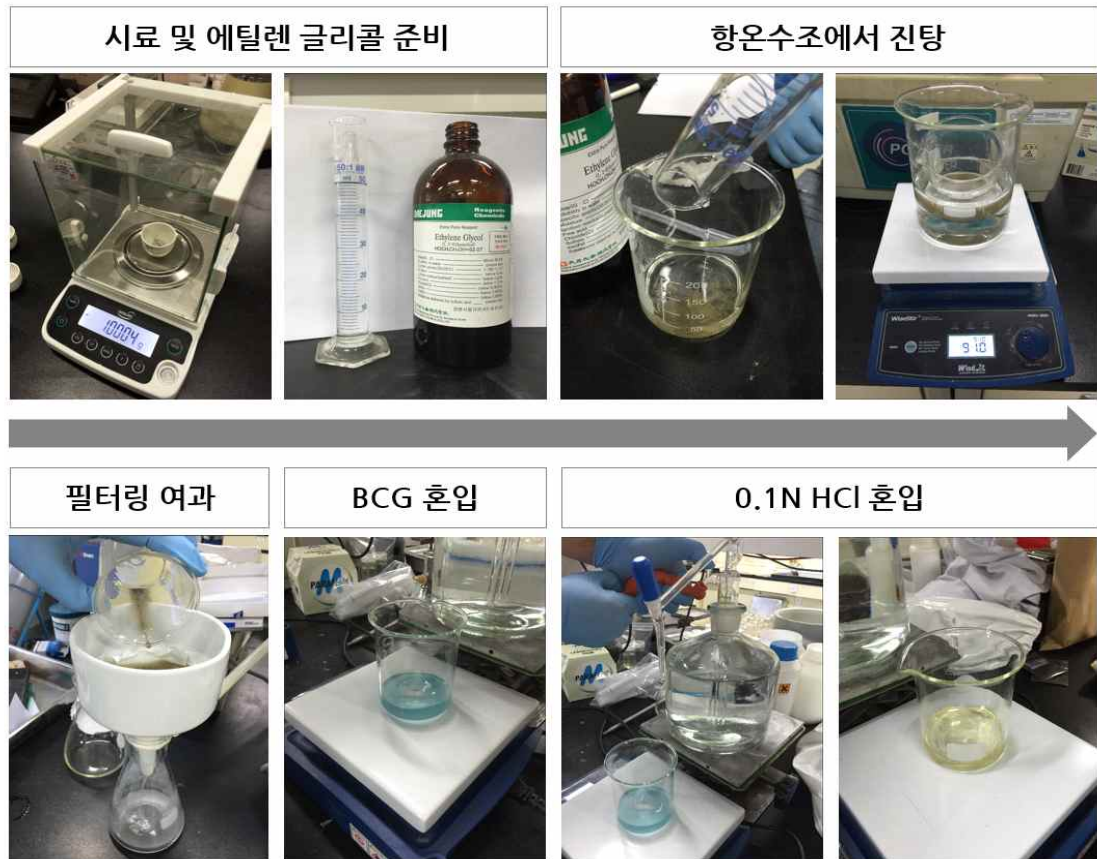


그림 3.48 클링거 광물의 Free-CaO 분석 프로세스

- 이 때 스테어링(Stirring)이 필요하며 한 두 방울 혼입하면 여과액의 색이 점점 파란색으로 변함. 이 후 미리 준비한 적정액 0.1N HCl를 적정액 뷰렛 등으로 한 방울씩 넣어주며 종말점 (파란색에서 노란색으로 변하는 시점)을 확인하여 측정함.
- 측정 이후 결과는 하기의 식을 이용하여 계산하였으며 그림 3.48와 표 3.29는 Free-CaO의 측정 과정과 분석결과를 나타냄.

$$F-CaO = \frac{0.0028 \times F \times 0.1N HCl (ml)}{1.0000 (g)} \times 100$$

- 측정 결과, 세조합 모두 유리석회의 양이 1종 포틀랜드 시멘트의 기준값인 1%이하의 함량이 분석됨. 이는 1450℃의 전기로 소성중에 CaO에 의한 C2S와의 C3S 생성이 원활히 이루어졌기 때문이라 사료됨.

표 3.29 Free-CaO 함유량 분석결과

구분	조합 1	조합 2	조합 3	기준값
Free-CaO (%)	0.42	0.59	0.50	1.0 이하

■ 상분석(광학현미경 분석, X선회절 분석)

- 클링커 광물의 화합물에 대한 상분석으로는 고배율의 광학현미경과 Rigaku diffraction社의 X선 회절분석(XRD, X-Ray Diffractometer)장비를 활용함. 제조된 클링커를 에폭시에 1시간 굳히고, 제조한 클링커의 단면을 폴리싱(Polishing)작업을 실시함.
- 그림 3.49는 무기계 건설폐기물을 혼입하여 제조한 클링커의 단면을 광학현미경으로 촬영 분석한 것임.
- 광학현미경을 통해 200, 500배 확대하여 클링커의 단면을 촬영 분석한 결과, XRD분석에서와 같이 제조된 클링커 조합 모두에서 20~50 μ m 크기의 각진 대형 결정인 C_3S 와 15~20 μ m 크기의 둥근형태의 C_2S 가 분석되었으며 두 결정 사이를 채우고 있는 간극 물질인 C_3A , C_4AF 도 함께 분석됨.

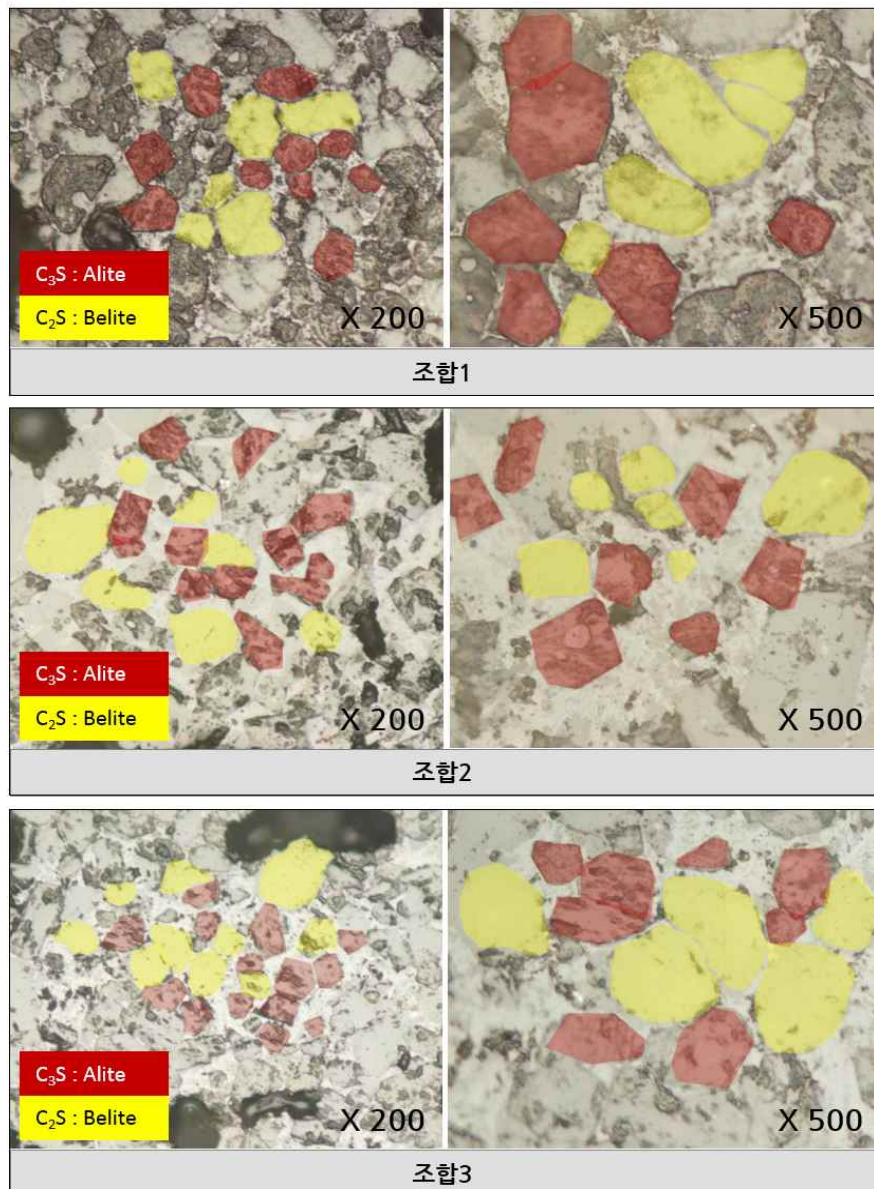


그림 3.49 Sectional analysis of clinker

- XRD분석에서는 시멘트의 4가지 주요 화합물(C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF)을 나타내는 피크 (Peak)의 Intensity가 분석됨.
- 또한, XRD분석에서의 Intensity는 화합물의 결정상태 정도를 나타내는 것으로 세 조합 모두에서 대체적으로 주요 광물에 대한 Intensity가 분석됨.

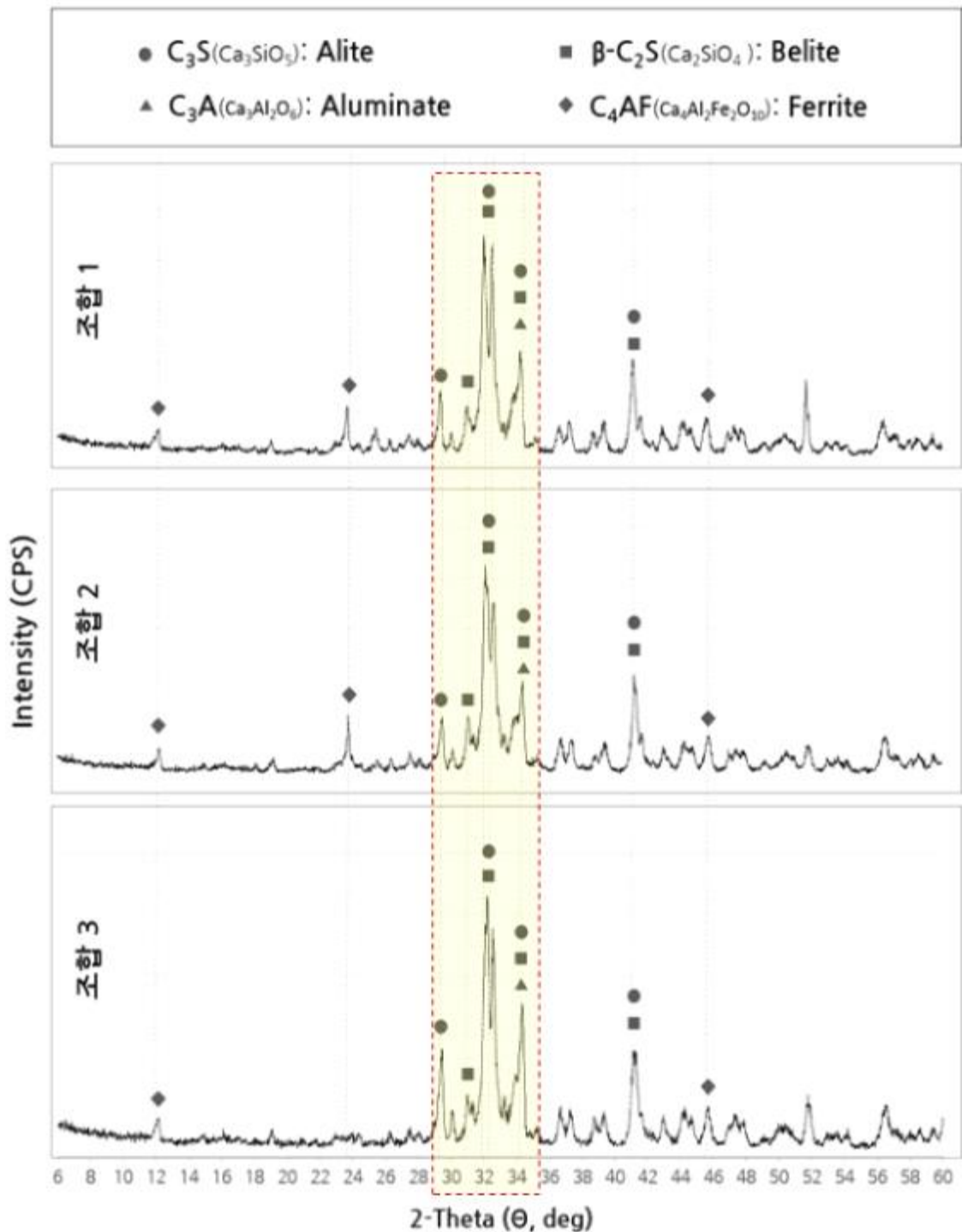


그림 3.50 XRD analysis pattern of cement clinker

■ 시멘트의 수화

- 시멘트 화합물 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 는 반응성이 높은 무수화물에서 물과 반응하여 용해도가 낮은 안정한 수화물을 생성함. 시멘트 화합물이 물과 반응하여 경화하는 능력에 관해서는 많은 설이 있지만 구조중의 Ca^{2+} 배위수와 관계해서 논의 되는 것이 많음. Ca^{2+} 는 그 이온반경이 $0.99\text{\AA}$ 으로 비교적 크지만, 전하가 작기 때문에 결합력은 그다지 크지 않음. 한편, 고온으로 되면 O^{2-} 열진동으로 팽창하기 때문에 Ca^{2+} 의 배위수는 6이하의 불안정한 상태에 놓이는 경우가 많음. 따라서 그곳으로 물이 접촉하면 OH기와 H_2O 분자를 받아들여 저온에서 안정한 6또는 9 배위수를 갖으려고 하는 경향이 있음. 게다가 Ca^{2+} 를 중심으로 하는 O^{2-} 다면체의 비대칭성도 크게 영향을 끼치는 것으로 알려져 있음.
- 시멘트 수화기구에는 2가지 고찰방향이 있음. 하나는 시멘트 화합물이 일단 용해되어서 그 과포화 용액으로부터 수산화 규산염이 침전된다는 설이고 또 하나는 시멘트를 물과 혼합해도 액상중의 SiO_2 성분과 Al_2O_3 성분의 농도는 꽤 낮으므로 시멘트 화합물이 직접 물과 토포케미칼 (topochemical) 반응을 하여 시멘트 입자 표면에 수화물 층을 형성한다고 하는 설임. 전자는 시멘트의 초기 수화과정을 후자는 장기수화과정을 지배한다고 되어 있음.

■ C_3S 의 수화

- C_3S 는 시멘트 화합물 중에서 가장 많은 것으로 물과 반응하면 곧바로 수산화칼슘 ($Ca(OH)_2$)과 규산칼슘 수화물($C-S-H$)을 생성함. 즉, 물과 반응하면 곧 Ca^{2+} 가 용출되고, 액상은 높은 알칼리성이 되며, 과포화상태에 이르면 수산화칼슘 결정이 석출됨. 동시에 $(SiO_4)^{4-}$ 는 수산화 규산 이온 $(Si(OH)_6)^{2-}$ 으로 되고 C_3S 입자 주위에 Ca^{2+} 와 결합하여 규산칼슘 수화물($C-S-H$)가 생성됨. 이 수화물은 수화 정도에 따라 화학조성이 변화하는 겔상태의 저결정질임.
- C_3S 의 수화반응식은 다음과 같음.



- C_3S 의 수화과정에 생기는 열량 변화를 나타내 보면, 두개의 발열 단계가 있는 것이 보이고 있음. 처음의 발열은 물과 접촉하여 생기는 수분 이내에 시작하는 급속한 수화반응을 나타내고 또 다른 하나의 발열은 유도기가 지나 수시간 후에 일어나는 완만한 수화반응임.

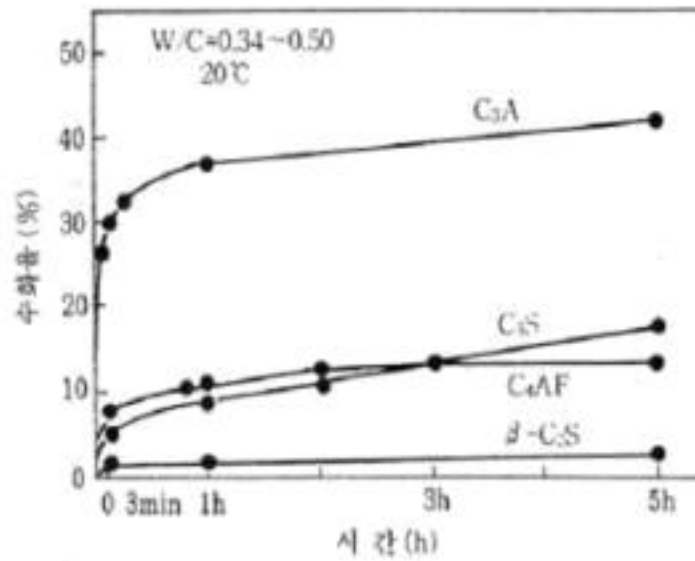


그림 3.51 시멘트 화합물의 수화속도(1)

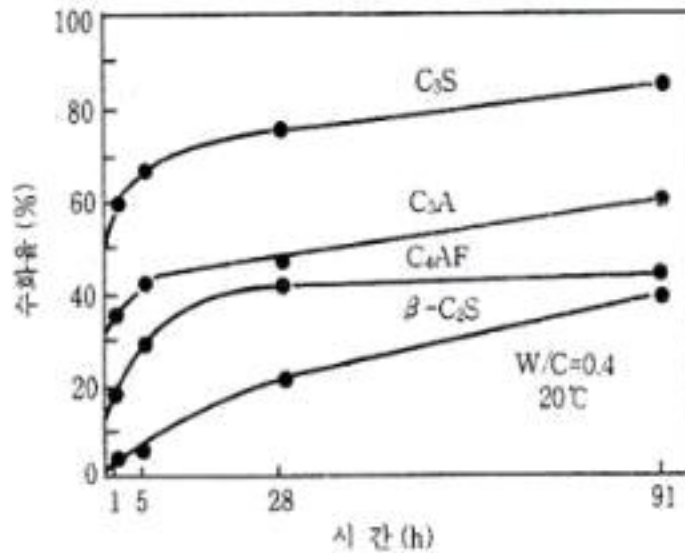


그림 3.52 시멘트 화합물의 수화속도(2)

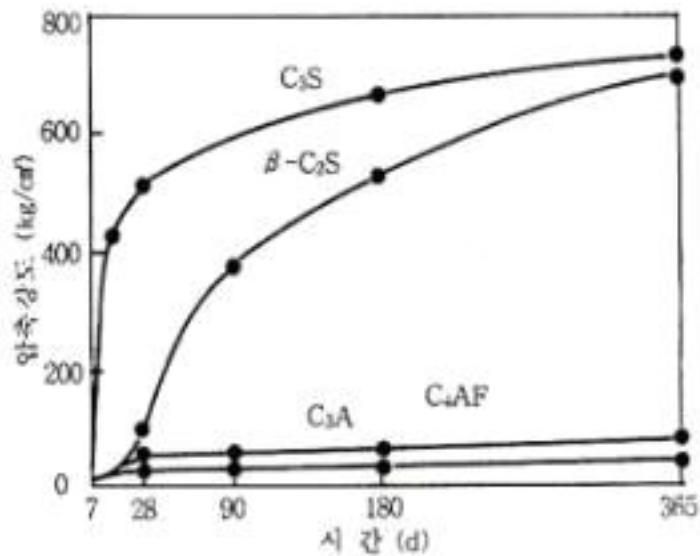
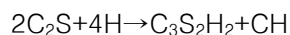
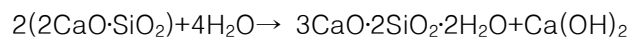


그림 3.53 시멘트 화합물의 수화에 의한 강도발현

- 수화 초기에 있어서는 불안정한 과포화 용액으로부터 불안정한 C-S-H 상과 Ca(OH)_2 가 생성되고, 수화 후기에 있어서는 미수화 C_3S 입자를 둘러싼 C-S-H 막중에서 $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+}$ 의 상호 확산이 행해져 C-S-H 층은 내부층의 두께를 증가시키면서 내부의 C_3S 를 침식시킨다고 하는 것이 가장 타당하다고 생각됨.
- CSH(II)는 tobermorite gel 이라고 불리는 섬유상 수화물로서, 수화 28일 후에는 직경 0.1, 길이 $1\mu\text{m}$ 정도의 크기로 성장하여 이들이 서로 엉키어 결국에는 쇠사슬 상의 규산이온 등이 결합하는 것에 의해 강도발현을 한다고 함.
- 일단 C_3S 를 완전히 수화시키는 데는 적어도 1년 이상의 시간이 필요하다고 함. 그러나 ball mill 안에서 과잉의 물과 혼합시키면서 수화시키면 C_3S 입자 표면에 생성하는 C-S-H 상은 연속적으로 사라져 버려, 1~2일 간에 완전히 수화는 끝남. 최초의 수화물은 CaO/SiO_2 비가 1.5이상의 불안정한 CSH(II)이지만 7일 이내에 Afwillite $\text{C}_3\text{S}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 로 결정화됨. C_3S 변태와 수화속도의 관계에 대해서는 W/C에 관계없고 Rhombohedral, Triclinic, Monoclinic 상들에 따라서도 큰 차이는 보이지 않음.

■ C_2S 의 수화

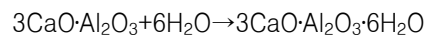
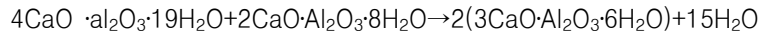
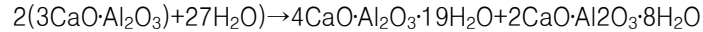
- 포틀랜드 시멘트에 존재하는 C_2S 는 대부분 β 형으로 시멘트의 구성화합물중 가장 수화가 느림. 수화반응은 C_2S 와 같이 Ca(OH)_2 와 겔 상태의 C-S-H를 생성하면서 진행되며 Ca(OH)_2 의 양은 C_3S 때보다 적음.
- C_2S 의 수화반응식은 다음과 같음.



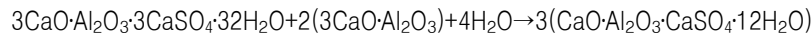
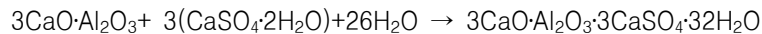
- γ 상 이외의 C_2S 는 belite로서 $\text{B}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ 등의 미량 성분의 고용에 의해 고온변태가 상온에서 안정화 되므로 이들 수화속도와 경화체의 강도는 안정제의 종류와 성질에 따라 현저한 영향을 받음. 수화열의 크기는 $\gamma < \beta < \alpha' < \alpha$ 순으로 된다고 알려져 있으며 C_2S 중 CaO 분의 일부는 K_2O 에 의해 옮겨져 $\text{K}_2\text{O} \cdot 23\text{CaO} \cdot 12\text{SiO}_2$ 를 구성하지만 이 화합물의 수화는 C_2S 보다 빠르는데 과잉의 물을 섞으면 1~2일 후에는 C-S-H gel과 Ca(OH)_2 로 변화함.

■ C₃A의 수화

- C₃A는 시멘트 화합물 중에서 가장 수화가 빠른 화합물로서, 물과 반응을 하여 곧 준안정 상태의 C₄AH₁₉와 C₂AH₈을 생성하고, 이어서 안정한 C₃AH₆로 됨.



- C₃A는 석고가 존재하면 에트링가이트가 생성되어 수하는 현저히 억제되며, 특히 Ca(OH)₂-CaSO₄ 포화 용액중에서 석으면 C₃A는 큰 수화 억제 효과가 있음.
- 석고가 소비되고 나면 고헥산염인 에트링가이트와 C₃S가 반응하여 저황산염형의 수화물이 됨. 용해도가 큰 C₃A의 과포화 상태로부터 급속히 정출하기 때문에 비표면적이 큰 형태로써 침상결정 (육각주상)이 성장하는 것임. 이 생성반응은 다음 식으로 나타냄.



- 석고가 공존하면 monosulfate로 되는 것보다는 ettringite로 되기 쉬우며 ettringite는 쉽게 미수화 C₃A와 반응해 monosulfate로 바뀜. 또 C₄AH₁₉도 석고와 반응해서 ettringite를 생성하지만 C₃AH₆은 용해도가 작아서 반응이 늦음.
- CaSO₄와 Ca(OH)₂를 포함하는 C₃A페이스트의 수화과정을 살펴보면 반응은 3단계로 일어남. 제 1단계는 C₃A와 CaSO₄와의 반응에 의한 ettringite의 생성, 다음 2단계는 액상 중 SO₄²⁻가 소비될 때 미수화 C₃A와 ettringite 반응에 의한 monosulfate로의 변화, 제 3단계는 monosulfate와 C₃A·Ca(OH)₂·12H₂O와의 고용체 생성임. 석고의 양이 많으면 제 1단계 반응이 길어져 ettringite 양이 많아지고 조직을 팽창시켜 강도의 발현을 방해함. 한편 석고가 적어지면 1단계 반응이 길어져 ettringite의 monosulfate화가 신속히 진행되어 액상 중 Ca(OH)₂ 농도를 저하시킴. 보통 포틀랜드시멘트는 13~26시간에 석고가 모두 소비되어 저황산염으로 바뀜.

■ C₄AF의 수화

- 포틀랜드 시멘트 중 ferrit상은 C₄AF일 필요는 없고 C₆AF₂~C₄AF~C₆C₄AF의 범위에 들어있는 고용체로 그 수화속도는 Al₂O₃ 함유량이 높은 만큼 빠름. 따라서 C₄AF는 C₃A 같은 급속한 수화는 되지 않음. C₄AF paste를 수화시키면 곧 gel상 수화물 층이 생성되어 C₄AF 입자를 감싸지만 이 층은 실제로 미소한 육각판사 결정의 응집체로 변화함. 물과 반응하면 C₃AH₆와 C₃FH₆의 고용체 C₃(A,F)H₆와 겔상의 칼슘페라이트 수화물이 생성됨. 석고가 공존하면 C₄AF는 C₃A와 같은 반응을 해서 ettringite를 생성하고 계속하여 monosulfate로 바뀌는 성질이 있지만 C₃A와 같이 신속한 반응성은 보이지 않음.

■ 환경배려형 시멘트의 물리적 특성

- 제조된 시멘트의 특성을 알아보기 위하여 물리적 특성을 알아보았으며 분석을 실시한 항목은 아래 표와 같음.

시험 항목	기 준 값	관련 시험 규격
진 비 중	3.15 ± 3	KS L 5110
분 말 도	2,800cm ² /g 이상	KS L 5106
비카트 시험 (초결, 종결)	초결 : 60분 이상	KS L 5108
	종결 : 10시간 이하	KS L 5108
플로우	190~210 mm	KS L 5111
압축 강도	3일 : 12.5MPa 이상	KS L ISO 679
	7일 : 22.5MPa 이상	
	28일 : 42.5MPa 이상	

■ 진비중

- 시멘트의 비중은 불순물이 혼입되거나 저장 중에 수분과 탄산가스를 흡수하여 풍화하면 그 수치가 낮아지며 이에 따라 콘크리트의 강도도 낮아짐. 따라서 시멘트의 불순물 혼입 정도와 풍화정도 및 콘크리트의 강도를 확보하기 위해서는 비중시험을 실시해야함. 본 연구에서는 KS기준(KS L 5110)에 준하여 분석하였으며 다음 식에 의해서 비중값을 산출하였음. 시멘트의 비중값은 풍화정도 뿐만 아니라 기타 성분(불순물제외)의 차이에 따라 여러 가지 값을 갖게 됨.

- 즉 포틀랜드 시멘트의 평균 비중값인 3.15보다 큰 값의 성분이 들어가면 비중값이 커지게 되고 작은 값의 성분이 들어가면 비중값이 적어지게 됨. 이와 같이 시멘트의 비중은 많은 인자에 영향을 받으므로 비중 만으로서는 시멘트의 품질을 판정할 수는 없음. 그러므로 KS기준 에서는 시멘트 비중에 관한 규격이 없고 다만 시험방법만 제정되어있어 비중시험을 요구할 경우에 한하여 시험하고 있는 실정임. 본 연구에서 분석된 각 조합별 시멘트의 비중은 표 3.30과 같이 분석되었으며 기준값인 3.15에서 ± 2 의 값으로 분석되었으며 특히, 조합 3이 3.15의 값으로 기준값과 동일한 것으로 분석되었음.

$$\text{시멘트의 비중} = \frac{\text{시료시멘트의 무게}(g)}{\text{비중병 입기의 차}(cc)}$$

표 3.30 분말도 측정결과

구분	조합 1	조합 2	조합 3	기준값
비중시험	3.17	3.13	3.15	3.15

■ 분말도

- 본 연구에서의 비표면적 측정은 KS L 5106(분말도 시험)에 적합하게 제작된 장비로서 Blaine Tester(HJ-1105, Heungjin사, 한국)를 이용하였음. 그림 3.54는 측정 순서를 나타냄. 분석결과, 전체적으로 4,000cm²/g이상의 비표면적 값이 분석 되었으며 이는 OPC 대비 KS 기준인 2,800cm²/g 이상을 만족함. 하지만 시판되는 OPC에 비해 다소 높은 분말도로서 이는 시멘트 클링커의 분쇄과정에서 조정이 가능할 것으로 사료됨. 표 3.31는 비표면적도 분석결과를 나타내며 조합3, 조합2, 조합1의 순으로 크게 측정 및 분석되었음.

표 3.31 분말도 측정결과

구분	조합 1	조합 2	조합 3	기준값
분말도시험(cm ² /g)	4,000 $\pm$ 300	4,300 $\pm$ 300	4,500 $\pm$ 300	2,800이상



그림 3.54 분말도 측정

■ 시멘트 플로우(Flow) 시험

- 시멘트 모르타르의 반죽 질기를 결정하기 위해 플로우 시험을 실시하며, 그림 3.55과 표 3.32은 측정 과정과 분석결과를 나타냄. 플로우 측정 결과, 조합 1, 2, 3의 순으로 크게 측정 되었으며 플로우 값이 차이를 나타내는 이유는 시멘트 분말도가 조합 1, 2, 3의 순으로 분말도의 값이 높아짐에 따라 초기에 물의 흡수가 빨라져 나타난 결과로 사료됨.



그림 3.55 분말도 측정

표 3.32 분말도 측정결과

구분	조합 1	조합 2	조합 3	기준값
플로우시험(mm)	206	183	172	190~210

■ 압축강도 시험

- 압축강도 시험은 KS L ISO 679에 준하여 조합별 40mm×40mm×160mm 사이즈의 각 주형 공시체를 제조하였으며 재령일은 3, 7, 28일로 하여 각 조합별 공시체를 2개씩 제작하였음. 제조된 공시체는 양생수조의 수온 $20\pm1^{\circ}\text{C}$ 조건에서 수중 양생하였으며 그림 3.56와 표 3.33는 압축강도 시험 과정과 측정결과를 나타냄. 그림 3.57과 같이 조합별 각 재령(3, 7, 28일)에서의 압축강도는 조합 3, 조합 1, 조합 2의 순으로 크게 분석되었으며 이 때 KS기준(KS L 5201, 포틀랜드 시멘트) 대비 상회하여 분석된 조합은 무기계 건설폐기물이 15% 대체된 조합 3으로 분석되었음.

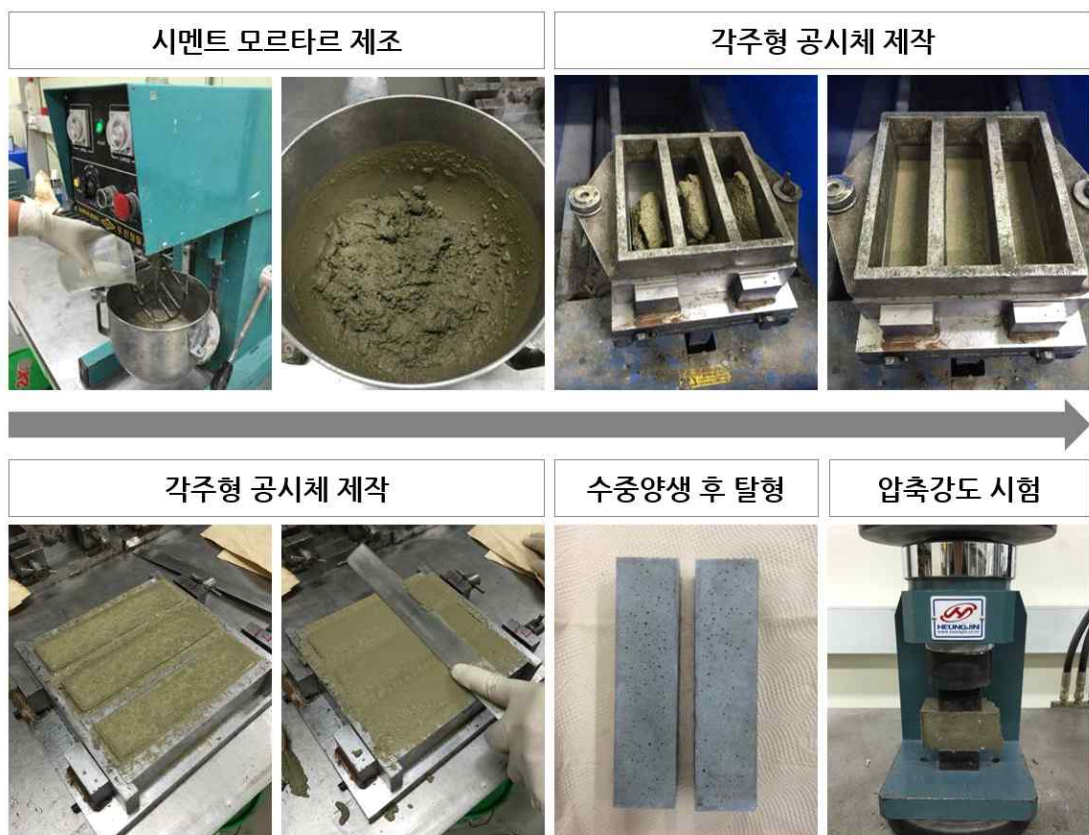


그림 3.56 분말도 측정

표 3.33 압축강도 측정결과

구분		조합 1	조합 2	조합 3	기준값
압축강도 (N/mm ²)	3일	10.3	8.3	19.2	12.5
	7일	19.7	17.7	31.9	22.5
	28일	38.9	35.9	48.6	42.5

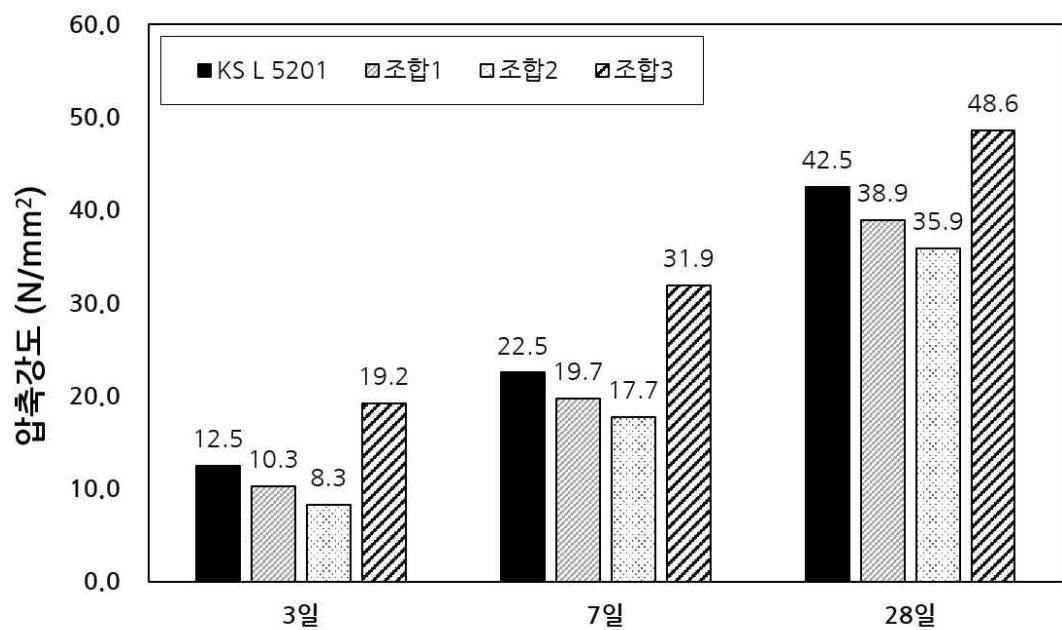


그림 3.57 조합별 압축강도 분석 결과 (3, 7, 28 Days)

- 본 핵심성과의 연구목표, 연구내용 및 연차별 세부수행방법은 다음과 같음.

연구 목표	무기계 건설폐기물 및 환경 배려형 시멘트의 환경성능 분석을 통한 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 및 품질 관리 가이드라인 개발 연구
----------	---

연구 내용	1. 환경 배려형 시멘트의 환경부하 배출 원단위 DB 구축 2. 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 3. 환경 배려형 시멘트의 품질 관리 가이드라인 작성
----------	---

연구 프로 세스	1차년				2차년			
	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기
	1.환경 배려형 시멘트의 환경부하 배출 원단위 DB 구축							
				2.환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가				
					3.환경 배려형 시멘트의 품질 관리 가이드라인 작성			

수행 방법	연차	주요 연구활동	세부 수행 방법
	1차 년도	1.환경 배려형 시멘트의 환경부하 배출 원단위 DB 구축	■ 환경 배려형 시멘트 원료물질의 환경부하 배출 원단위 DB 구축 ■ 보통포틀랜드시멘트 원료의 원료생산 및 제조프로세스에 따른 환경부하 배출 원단위 DB 구축
	기술 정립 및 증명	2.환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가	■ 건설재료 분야 국제표준 환경성평가 방법론(ISO 21930 및 EN 15804) 분석 ■ 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가를 위한 시스템경계 설정
	2차 년도	2.환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가	■ 무기계 건설폐기물 예측 발생량에 따른 시멘트의 환경 배출특성의 분석 ■ 시멘트 생산량 감소에 따른 내제에너지 저감 효율성 분석 ■ 건설폐기물 감소 대비 시멘트의 내제에너지 저감 효율성 분석
	기술 개발 및 성능 평가	3.환경 배려형 시멘트 품질 관리 가이드라인 작성	■ 무기계 건설폐기물의 소성성 및 수화특성메커니즘을 바탕으로 품질특성 분석 ■ 고품질 환경 배려형 시멘트의 품질관리 가이드라인(안) 작성

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

■ 목적 및 범위 정의

- 본 연구의 환경영향평가 범위는 그림 3.58과 같이 원료공정, 소성공정 및 제품생산 공정으로 이어지는 시멘트의 제조공정 가운데 원료공정의 원료 채광 및 생산을 대상으로 함. 소성 공정 및 제품 생산공정은 동일하다고 가정함.
- 표 3.34와 같이 주요 기능을 바탕으로 데이터 관리 및 활용이 용이한 시멘트 1kg을 기능단위로 설정함.

표 3.34 평가대상 기능단위

항 목 명	내 용
제 품 명	시멘트
기 능	시멘트 1kg 제품 형성을 위한 원료공정 투입자재
기능단위	시멘트 1kg

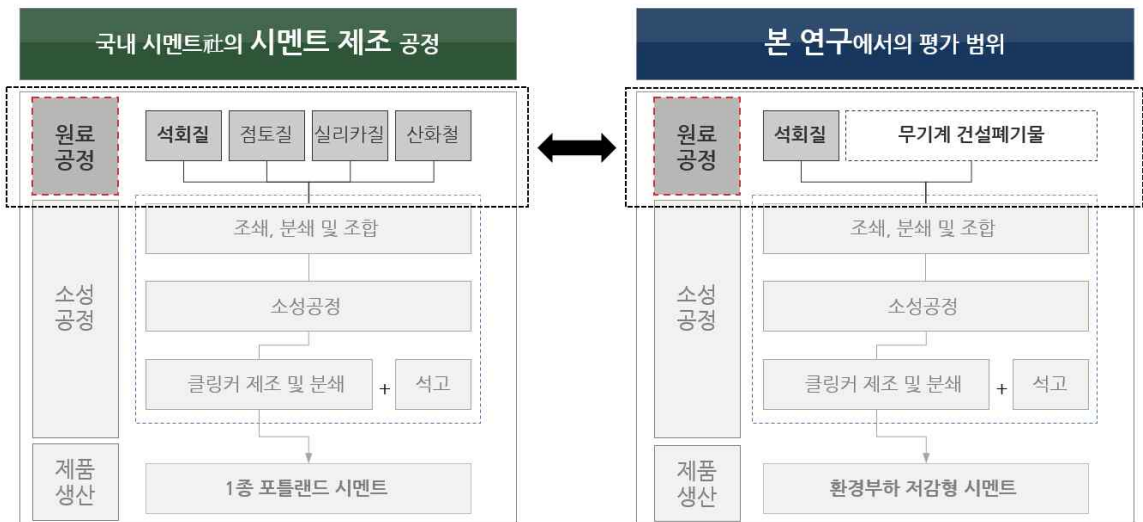


그림 3.58 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가 목적 및 범위 정의

■ 전과정 목록분석

- 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.
- 시멘트의 전과정 평가범위를 대상으로 원료 투입요소를 분석함. A시멘트 제조사의 원료별 평균 사용량을 표 3.35와 같이 조사하고 표 3.36 같이 본 연구에서 제조된 시멘트(조합 3)의 원료 사용량과 비교분석하여 이들을 대상으로 지구온난화(GWP), 자원고갈(ADP),

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

- 오존층파괴(ODP), 산성화(AP), 부영양화(EP), 광화학적산화물(POCP) 등 6대 환경영향 범주별 환경영향 값을 분석함.
- 이를 위해 시멘트의 각 원료에 해당되는 국내·외 LCI DB(Life Cycle Inventory Database)를 수집하고 환경영향범주별 기준물질 및 영향지수를 분석하였으며 목적 및 범위설정, 목록분석, 영향평가, 결과해석으로 이어지는 전과정평가에서 영향평가 단계의 분류화 및 특성화 값을 산정함. 시멘트의 각 원료에 투입되는 물질에 대한 각각의 LCI DB(Life Cycle Index DataBase)를 조사함.
- 본 평가에서 사용된 투입물질 및 에너지원 등에 대한 LCI DB는 국토교통부 및 환경부의 기 구축된 데이터를 이용함.

표 3.35 클링커 생산을 위한 시멘트 원료 사용량

(단위 : 톤/년)

원료	2011	2012	2013	평균
석회석	3,975,395	3,917,559	3,930,112	3,941,022
점토질	253,514	248,358	243,579	248,484
규산질	113,918	111,921	100,057	108,632
산화철질	91,799	90,136	78,977	86,971
석 고	88,277	89,403	99,046	92,242
클링커출하량	2,834,000	2,802,000	2,816,000	2,817,333

표 3.36 환경배려형 시멘트의 원료 배합

(단위 : kg/1kg시멘트생산)

원료	OPC	조합 3
석회석	1.399	1.276
점토질	0.088	0.225 무기계 건설폐기물 대체
규산질	0.031	
산화철질	0.039	
석 고	0.033	0.060

■ 전과정 영향평가 - 분류화

1) 지구온난화 (GWP, Global Warming Potential)

- 이산화탄소(CO₂)는 범지구적으로 표면의 평균온도를 상승시키고 토양 또는 수계의 생태계 변화와 해수면 상승에 기인한 해안선 변화 등을 야기 시키며 지구온난화 현상을 발생시키는 주범으로 손꼽히고 있음. 본 연구에서의 지구온난화 영향지수는 기준물질인 Carbon dioxide(CO₂)을 포함한 Methane(CH₄) Nitrous oxide(N₂O) 등 총 42가지의 오염물질을 영향물질로 규정하고 있는 IPCC 가이드라인의 100년 기준의 영향지수에 근거함. 표 3.37는 지구온난화의 기준물질 및 영향지수를 나타냄.

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

표 3.37 Reference substance and influence index of GWP

지구온난화 [GWP]		
영향물질(42가지)	영향지수	기준단위
Carbon dioxide(CO ₂)	1	kg-CO _{2eq} /kg
Methane(CH ₄)	25	
Nitrous oxide(N ₂ O)	298	
CFC-11	4,750	
CFC-13	14,400	
Halon-1301	7,140	
HCFC-22	1,810	
:	:	

2) 자원고갈 (ADP, Abiotic Depletion Potential)

- 인구 증가와 산업 발달 및 생활수준 향상 등으로 인한 자원의 소비량이 폭발적으로 증가됨에 따라 전 산업분야에서의 자원고갈은 지구적 차원에서 매우 심각한 문제로 대두되고 있으며 이는 지나친 자원 개발 및 소비에 따른 생태계의 균형파괴와 함께 다양한 환경오염의 원인으로 작용되고 있음. 본 연구에서의 자원고갈 영향지수는 Guinee(1995)가 제시한 방법론에 근거하여 Crude oil, Natural gas, Uranium(U) 등 총 89가지의 자원항목을 고려하였으며 표 3.38은 자원고갈의 기준물질 및 영향지수를 나타냄.

표 3.38 Reference substance and influence index of ADP

자원고갈 [ADP]		
영향물질(89가지)	영향지수	기준단위
Crude oil	0.0201	kg/kg
Hard coal	0.0134	
Soft coal	0.00671	
Natural gas	0.0187	
Lead ore	0.000677	
Led(Pb)	0.01352	
Uranium(U)	0.002868	
:	:	

3) 산성화 (AP, Acidification Potential)

- 산성화는 주로 이산화황(SO₂), 암모니아(NH₃), 질소산화물(NOx) 등 대기 오염물질에 의해 강이나 하천 또는 토양이 산성으로 바뀌는 환경문제를 일컫음.

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

- 이 는 중금속의 용출량을 증대시키며 어류, 식물 및 동물들의 영양공급이나 먹이제공 등 생태계에 악영향을 끼침. 본 연구에서의 산성화 영향지수는 지역적 특성 및 대기환경에 따라 상이하지만 모든 지역에서 적용 가능한 형태로 제시된 CML 2002의 영향지수를 적용하였으며, Sulfur dioxide(SO₂), Hydrogen sulfide(H₂S), Hydrogen fluoride(HF) 등 총 36가지의 영향물질을 기준물질인 이산화황(SO₂)으로 통합하여 나타냄. 표 3.39은 산성화의 기준물질 및 영향지수를 나타냄.

표 3.39 Reference substance and influence index of AP

산성화 [AP]		
영향물질(36가지)	영향지수	기준단위
Sulfur dioxide(SO ₂)	1	kg-SO _{2eq} /kg
Ammonia(NH ₃)	1.88	
Hydrogen chloride(HCl)	0.88	
Hydrogen fluoride(HF)	1.6	
Hydrogen sulfide(H ₂ S)	1.88	
Nitric acid(HNO ₃)	0.51	
Nitrogen oxides(NO _x)	0.7	
:	:	

4) 부영양화 (EP, Eutrophication Potential)

- 부영양화는 화학 비료나 오수의 유입 등 영양분의 과잉공급으로 인해 수중생태계의 영양물질이 증가하여 조류가 급속히 증식하는 현상으로 적조를 유발시키며, 기준 물질은 인산염(PO₄³⁻)임. 본 연구에서의 부영양화(EP) 영향지수는 산성화(AP)와 마찬가지로 CML 2002 영향지수에 근거하며 Phosphate(PO₄³⁻)을 기준물질로 하고 Ammonia(NH₃), Nitrogen oxides(NO_x) 등 총 39가지의 영향물질을 근거로 함. 표 3.40은 부영양화의 기준물질 및 영향지수를 나타냄.

표 3.40 Reference substance and influence index of EP

부영양화 [EP]		
영향물질(39가지)	영향지수	기준단위
Phosphate(PO ₄ ³⁻)	1	kg-PO ₄ ³⁻ _{eq} /kg
Ammonia(NH ₃)	0.35	
COD	0.022	
Nitrate(NO ₃ ⁻)	0.1	
Nitric acid(HNO ₃)	0.1	
Nitrogen oxides(NO _x)	0.13	
Nitrogen(N ₂)	0.42	
:	:	

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

5) 오존층파괴 (ODP, Ozone Layer Depletion Potential)

- 오존층 파괴는 지상으로부터 15~30km 높이의 성층권에 있는 오존층의 오존이 파괴되어 그 밀도가 낮아지는 현상임. 주요 원인은 염화플루오린화탄소(CFCs)이며 이는 자외선의 증가로 인한 피부암 등을 유발시킴. 본 연구에서의 오존층파괴 영향지수는 World Metrological Organization(WMO)에서 제시한 영향지수를 근거로 하였으며 트리클로로플루오로메(CFC-11)을 기준 물질로 하여 Halon-1301, CFC-114 등 총 23가지 영향물질을 고려함. 표 3.41은 오존층파괴의 기준물질 및 영향지수를 나타냄.

표 3.41 Reference substance and influence index of ODP

오존층파괴 [ODP]		
영향물질(23가지)	영향지수	기준단위
CFC-11	1	kg-CFC-11 _{eq} /kg
CFC-114	0.85	
CFC-12	0.82	
Halon-1301	12	
HCFC-22	0.034	
Methyl Chloride	0.02	
:	:	

6) 광화학적 산화물(POCP, Photochemical Oxidation Potential)

- 광화학적 산화물은 공기 중의 오염물질이 태양빛과 반응하여 오존(O₃)과 같은 화학적 화합물을 생성하는 반응을 지칭하며 기준물질은 에틸렌(Ethene)임. 여기에서 생성된 화학적 화합물들은 인체건강 및 농작물 발육과 같은 생태계에 악영향을 끼쳐 손실을 야기 시킴. 본 연구에서의 광화학적산화물 영향지수는 Derwent et al(1998)과 Jenkin & hayman(1999)가 제시한 영향지수를 근거로하여 기준물질인 Ethylene을 포함하여 NMVOC, Ethanol 등 총 128가지의 영향물질을 근거로 함. 표 3.42는 광화학적 산화물의 기준물질 및 영향지수를 나타냄.

표 3.42 Reference substance and influence index of POCP

광화학적 산화물 [POCP]		
영향물질(128가지)	영향지수	기준단위
NMVOC	1	kg-Ethylene _{eq} /kg
Benzene	0.218	
Carbon Monoxide(CO)	0.027	
Methane(CH ₄)	0.006	
Methanol(CH ₃ OH)	0.14	
:	:	

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

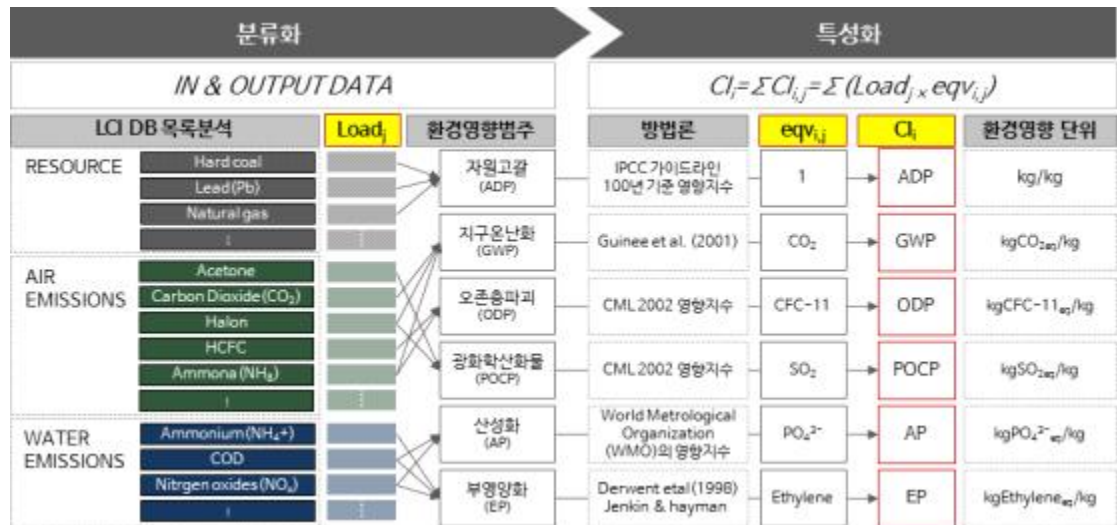


그림 3.59 환경배려형 시멘트의 전과정 영향평가 프로세스

표 3.43 시멘트 구성재료의 분류화 예시

영향목록	환경영향범주 구분						시멘트 구성재료		
	GWP	ADP	AP	EP	ODP	POCP	석회석	점토질	규산질
Ammonia(NH ₃)	-	-	□	□	-	-	-	6.95E-07	6.83E-06
Carbon dioxide(CO ₂)	■	-	-	-	-	-	9.31E-01	3.40E-01	3.58E-03
Carbon monoxide(CO)	-	-	-	-	-	□	3.49E+01	1.68E-04	2.01E-03
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
HCFC-22	□	-	-	-	□	-	4.81E-10	9.45E-14	-
Hydrogen Chloride(HCl)	-	-	□	-	-	-	1.49E-04	2.18E-07	5.67E-07
Hydrogen fluoride(HF)	-	-	□	-	-	-	1.01E-05	6.18E-09	6.51E-08
Hydrogen sulfide(H ₂ S)	-	-	□	-	-	-	-	5.64E-08	1.19E-06

■ : 기준물질, □ : 영향물질, - : 비(非)영향물질

■ 전과정 영향평가 - 특성화

- 본 연구에서 특성화(Characterization)는 전과정평가에서 목록 데이터를 특정 환경 영향 범주 및 범주지표들과 연관시킴으로써 이들의 영향을 이해하고 해석단계에 정보를 제공하는 영향평가에 해당되는 것으로 상기 표 3.43에서 수행한 분류화 작업을 6대 환경영향 범주에 연계시키는 단계임.

① 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가를 위한 평가 프로세스 및 데이터베이스 구축

- 이 는 주로 LCI 데이터베이스에서 도출된 영향물질들을 문헌상 알려진 사실에 입각하여 환경영향범주에 연결시키고 이를 환경영향범주별로 취합하여 각각의 영향물질들이 환경에 미치는 영향의 형태를 비교적 명확하게 파악 할 수 있게 됨.
- 특성화는 영향물질들이 각각의 환경영향범주에 미치는 환경영향을 정량화하는 과정으로 하기의 식과 같이 영향물질의 환경부하량과 영향지수간 곱들의 총합으로 특성화 환경영향을 산출 할 수 있음.

$$CI_i = \sum CI_{i,j} = \sum (Load_j \times eqv_{i,j})$$

- 여기서 CI_i 는 특성화 환경영향의 크기, $Load_j$ 는 j^{th} 영향물질의 환경부하량, $eqv_{i,j}$ 는 i 의 영향범주에 속한 j^{th} 영향물질의 영향지수 값을 나타냄.
- 표 3.44은 본 연구에서 산정한 시멘트 제조시 사용되는 각 원료의 특성화 데이터베이스 환경영향 내역을 나타냄.

표 3.44 시멘트 제조시 각 원료별 특성화 데이터베이스 예시

LCI DB	단위	환경영향 범주별 특성화 값					
		GWP (kgCO ₂ eq/ 단위)	ADP (kg/단위)	ODP (kgCFC-11 _o / 단위)	AP (kgSO ₂ eq/ 단위)	EP (kgPO ₄ ³⁻ eq/ 단위)	POCP (kgEthylene _o / 단위)
석회석 (lime stone)	A kg	2.53E-03	1.51E-05	3.32E-10	6.42E-05	1.21E-05	6.49E-06
clay, at mine	B kg	2.91E-03	1.81E-05	3.62E-10	2.85E-05	5.20E-06	2.64E-06
규사 (silica sand)	A kg	2.19E-02	1.44E-04	9.40E-11	8.37E-05	1.30E-05	2.08E-05
iron ore, 46%	B kg	2.02E-03	1.18E-05	2.37E-10	4.46E-05	8.67E-06	3.75E-06
gypsum, mineral	B kg	4.68E-03	2.64E-05	4.82E-10	1.31E-04	2.64E-05	1.07E-05

A : 국가 LCI DB, B : 해외 LCI DB(유럽)

② 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가

- 본 연구에 앞서 분석된 시멘트 제조시 사용된 원료의 사용량을 보면 시멘트의 주원료인 석회석 사용에 있어서 본 연구에서 제조된 시멘트는 그림 3.60과 같이 석회석의 사용량이 OPC 대비 9.0% 절감되어 사용된 것으로 분석되었으며 부원료의 경우 천연광물인 점토질, 규산질, 산화철질 대신 무기계 건설폐기물로 100% 대체되어 사용된 것으로 분석함.
- 한편, 국내 건설폐기물은 2014년을 기준으로 하루에만 약 3천톤 가량의 건설폐기물이 다량 매립되고 있으며 이러한 매립과정에서도 환경부하가 발생됨.

② 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가

- 이에 본 연구에서는 매립과정에서 발생하는 환경영향을 환경부하 저감의 기획 저감량으로 간주하여 환경영향범주별 분석하였으며 1kg의 시멘트를 생산하는데 각 환경영향범주별 기획 저감량을 산정함. 세부 내역은 표 3.45와 같음.

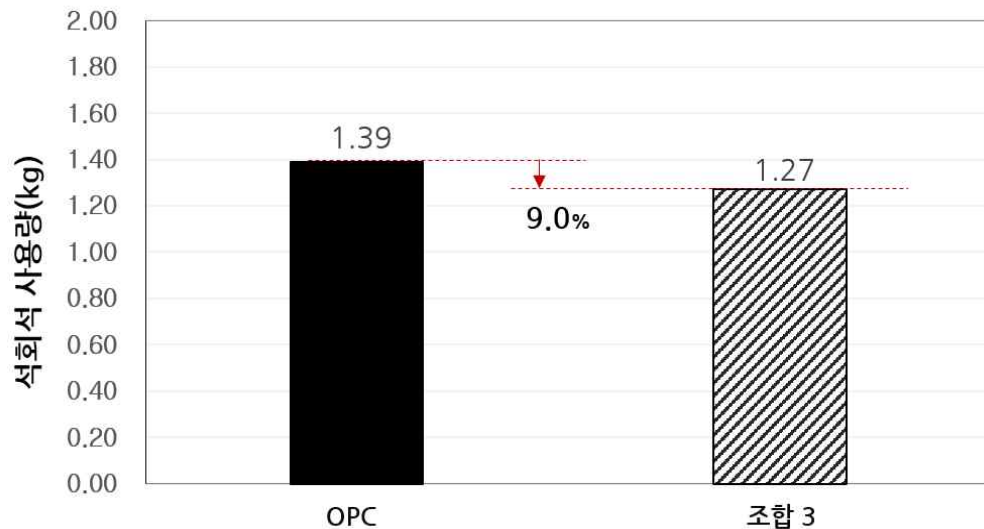


그림 3.60 환경 배려형 시멘트의 석회석 사용량

표 3.45 환경 배려형 시멘트의 환경영향범주별 기획 저감량

구분	환경영향 값	단위
GWP	1.12E-02	kgCO2eq/kg
ADP	9.27E-10	kg/kg
ODP	2.27E-12	kgCFC-11eq/kg
AP	1.57E-05	kgSO2eq/kg
EP	2.42E-06	kgPO43-eq/kg
POCP	4.08E-06	kgEthyleneeq/kg
FAETP	6.37E-05	DCBeq/kg
HTP	1.92E-03	DCBeq/kg
MAETP	3.39E-01	DCBeq/kg
TETP	1.63E-06	DCBeq/kg

- 최종적으로 그림 3.61은 기준 OPC 대비 본 연구에서 제조된 환경 배려형 시멘트(조합 3)의 6대 환경영향 범주별 환경부하 절감율을 분석한 결과를 나타냄. 전체적으로 OPC 대비 본 연구에서 제안한 조합 3에서 6대 환경영향이 모두 감소하는 경향으로 나타남.
- 특히 자원고갈(ADP)에서 29.32%로 가장 큰 절감율이 분석되었으며, 다음으로 지구온난화(GWP)가 27.73%로 저감율이 높은 것으로 분석됨.
- 이 때 자원고갈이 가장 크게 절감된 이유로는 시멘트의 원료인 석회질, 점토질, 규산질, 산화철질을 대신하여 무기계 건설폐기물이 대체되어 재료 생산에 따른 환경영향 값이 제외되었기 때문이라 사료됨.

② 환경배려형 시멘트의 환경영향 평가

- 지구온난화의 경우 실제 시멘트 제조시 지구온난화의 주요인자인 CO₂가 다량 배출되는 석회석의 사용이 절감된 것이 주요한 절감요인으로 분석됨.
- 그 외 POCP(15.66%), ODP(13.48%), AP(11.30%), EP(10.49%)순으로 환경부하 절감율이 크게 분석됨.
- 이상과 같이 시멘트 제조 원료에 무기계 건설폐기물을 대체하여 OPC 제조 및 유사한 성능의 환경영향 범주별 환경부하가 저감된 시멘트 제조가 가능한 것으로 분석 되었으며 이는 건설폐기물의 매립지 부족현상과 그 외 자원고갈 및 지구온난화 등의 6대 환경영향 등에서 환경영향이 전체적으로 저감되는 확인함.

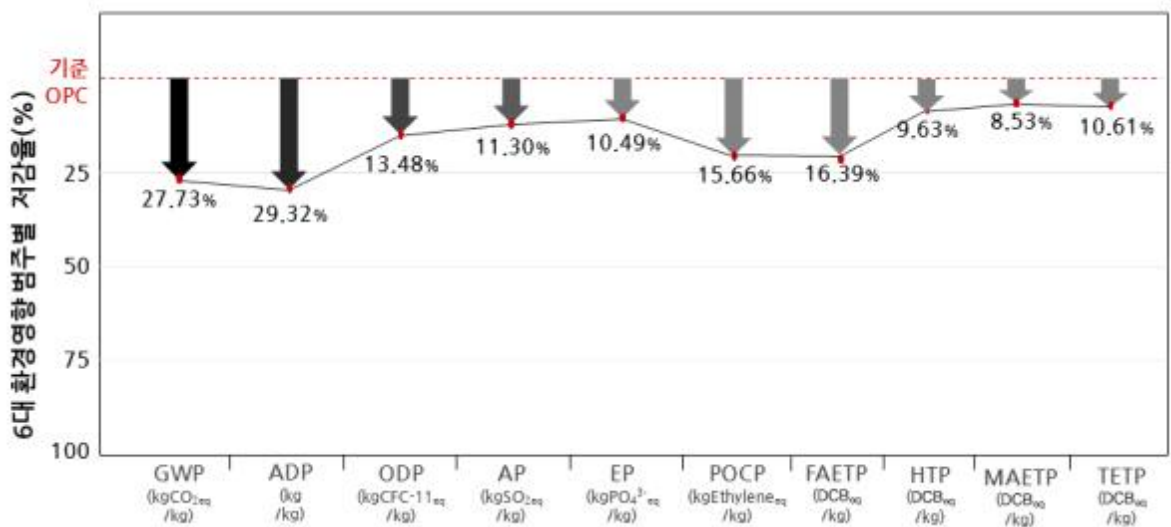


그림 3.61 Environmental impact assessment by environmental impact category

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

W

■ 본 연구는 당초 핵심 연구목표로 계획된 “[RT] 무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술”, “[MT] 환경 배려형 시멘트 제조 원천기술”, “[AT] 환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리 기술” 등의 연구개발 성과를 모두 달성함.

표 4.1 연구개발 성과 및 목표 달성도

핵심 연구목표	연구개발 주요 성과	달성도(%)
무기계 건설폐기물 재자원화 원천기술	■ 무기계 건설폐기물의 화학적 특성 재자원화 DB ■ 무기계 건설폐기물 발생량 추정 프로세스  [무기계 건설폐기물의 재자원화 DB]	100
환경 배려형 시멘트 제조 원천기술	■ 무기계 건설폐기물 수화성 회복을 위한 최적 재생 프로세스 유효성 ■ 환경 배려형 시멘트 최적 원료 배합 공정 ■ 환경 배려형 시멘트의 압축강도 발현 및 화학적 물리적 검증  [환경 배려형 시멘트 제조공정]	100
환경 배려형 시멘트 환경성 평가/관리기술	■ 환경 배려형 시멘트의 환경성능 평가 ■ 환경 배려형 시멘트 품질 관리 가이드라인  [환경 배려형 시멘트 품질 관리가이드라인]	100

2. 관련 분야 기여도

최종 기여성과		환경 배려형 시멘트의 현장적용을 통한 녹색건설산업 활성화	
주요 기여성과	기술 측면	- 환경 배려형 시멘트 개발 - 무기계 건설폐기물 발생량 및 배합 DB	- 녹색재활용 건설재료 활용활성화 - 건설 전산업 부문 사용가능한 재활용 재료 개발
	경제 측면	- 재활용 활성화 및 자원낭비 방지 - 재활용 프로세스 개발	- 건축폐기물 절감, 국가자원낭비 예방 - 건설단계 별 에너지소비량 저감
	산업 측면	녹색 재활용 재료 분야 신규 시장 개척	건설부문 고용창출효과 및 재활용 재료 분야 시장 활성화
	사회 측면	녹색성장 필요성 인식	미래지향적 녹색성장 기틀마련

(1) 기술적 측면

- 건설재료 생산단계, 폐기물 최종 처분단계, 재생단계에서의 환경부하 저감이 가능한 고부가가치 재활용 건설재료 개발 제안이 가능하며 이를 통해 녹색 성능기반의 건설 전 분야 재활용 재료 활성화 기여
- 탄소배출 거래권의 실시에 대비한 주요 환경부하 배출산업인 건설분야에서의 선도적인 환경부하 저감 중점 기술로서 적용 가능

(2) 경제적 측면

- 빈번한 자원낭비, 폐기물 과다발생에 의한 건축폐기물 처리비용의 절감 및 환경부하 저하 효과를 통해 간접적으로 국가자원 낭비를 예방함
- 건설산업 녹색 재활용 건설재료 기술 개발 및 적용으로 건설산업부문의 재활용 재료 사용성 및 재료개발에 소비되는 에너지사용량의 절감 및 관리 가능

(3) 산업적 측면

- 환경 배려형 시멘트의 생산으로 관련 업계의 국제적 폐기물 자원화 관련 기술집약적 주력상품 효과
- 기존의 재활용 수요가 없던 무기계 건설폐기물을 시멘트 생산에 재활용함으로써 매립비용의 저감 및 총 건설폐기물의 매립량 감소로 인한 매립지 수명 증대 예상

(4) 환경 및 사회적 측면

- 친환경사회 구축에 대한 노력을 범국가적으로 경주하고 있는 현시점에서 건설산업의 부정적 이미지 개선 효과
- 환경 배려형 시멘트 개발에 따른 환경부하 발생량 개선을 통하여 건설재료개발 부문 국가 온실가스 감축 목표달성의 현실화 가능



그림 4.1 기대성과 및 파급효과

제5장. 연구개발성과의 활용 계획

- 본 연구개발 성과는 국가/정책적, 산업/기술적, 환경/경제적 등의 분야에서 활용 할 수 있으며, 이들을 통해 국민인식 수준 및 친환경 재이용 자재 관련 국제 경쟁력 제고를 위하여 하기와 같이 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

(1) 국가/정책적 측면 : 국정 기조에 부합하는 건설 폐기물 재활용분야 정책의 전개

- 건축물에서 온실가스 발생 주요자재를 재활용 건설재료로 활용함으로써 **건설 산업부문의 온실가스 배출량 저감 유도**와 함께 **환경부 및 국토부가 5년마다 개정하고 있는 “생태환경보전 및 자원순화성 강화 인프라구축을 위한 건설폐기물 재활용 기본계획”**내의 재활용 건설 재료적용에 따른 효율적인 인센티브 제도 제정을 위한 발판 제공
- 재활용 건설재료 사용에 따른 **에너지 소비량 저감과 환경오염물질의 배출저감**

(2) 산업/기술적 측면 : 국제 경쟁력이 있는 한국형 친환경 건설 녹색 건설재료로 활용

- 녹색 재활용 건설재료 산업을 위한 **건설폐기물의 화학적 성질을 고려한 시멘트 제반 성능과 친환경성을 목표로 하는 최적의 재생프로세스의 개발**
- 환경 배려형 시멘트를 사용한 성능기반형 배합설계 및 제조기술을 개발하여 **레이콘산업, 콘크리트 2차 제품 제조업체에 보급함으로써 환경 배려형 시멘트의 광범위한 적용 가능**
- 환경 배려형 친환경 재생시멘트의 생산으로 관련 업계의 국제적 기술집약적 주력상품 효과

(3) 환경/경제적 측면 : “자원순환형 사회”로의 이행을 통한 환경/경제적 이익 창출

- 건설재료 원자재 파동에 대비한 **대체재료 개발 및 건설재료 생산단계, 폐기단계, 재활용 단계에서의 건설재료 Level의 전과정 환경부하 발생을 최소화 하는 기술 개발**
- 자원 소비형 사회(대량생산-대량소비-대량폐기)에서 자원순환형 건축으로의 변화과정에서 본 연구를 통해 향후 국내 건축물 중 17.45%를 차지하는 해체대상물에서 발생할 심각한 건설폐기물 발생량을 저감시키고 아울러 **자원의 절약과 국가경제에도 기여하는 시스템 구축**

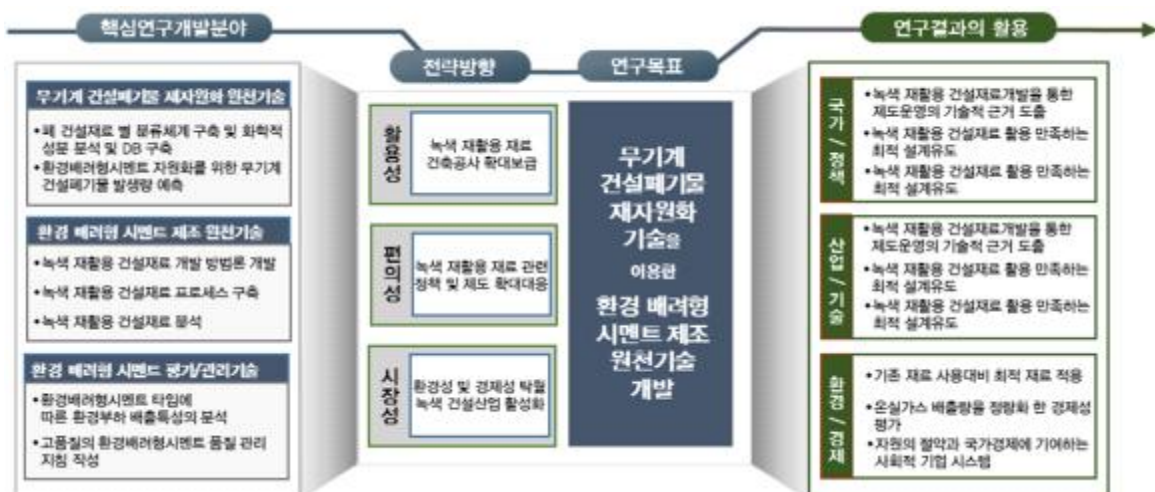


그림 5.1 연구결과의 관련 분야 기여도

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 건설폐기물 종별 재자원화 예측 시스템

가. 일본건축학회 AIJ-LCA&LCW v4.05

(1) 개요

본 프로그램은 건물 LCA 관점에서 CO₂ 배출량 평가 및 자원순환성 평가가 가능한 소프트웨어로 2000년부터 2004년까지 「자원 순환 형태 주택기술개발 프로젝트」의 일환으로서 개발되었다. 일본 건축학회는 「건물의 LCA지침」에 근거하는 「건물의 LCA계산 소프트웨어」 AIJ-LCA를 기본으로 한 자원 순환성을 평가하는 엑셀 기반의 프로그램을 개발했다. 1995년 산업 연관표 DB를 활용한 AIJ-LCA ver3.0을 개발하고, 추후 자원 순환성 평가기능을 추가한 「건축 물건의 LCA툴」을 AIJ-LCA& LCW ver.4.0을 개발했다. 건축물의 설계, 자재생산, 시공으로부터 해체 폐기까지의 산정을 통한, 에너지 소비, CO₂ 배출, SOx 배출, NOx 배출의 4개의 인벤토리 분석이 가능하며, 또한, 4개의 인벤토리에 근거하는, 오존층 파괴(Ozone Depletion Potential, ODP), 지구온난화(Global Warming Potential, GWP), 산성화지수(Acidification Potential, AP), 인간보건(Human Health (HH) Criteria Air-Mobile), 에너지 고갈(Fossil Fuel Consumption)의 환경영향 평가가 가능하다. 본 보고서에서는 건설폐기물 발생량 예측과 관련된 자원 순환성의 평가 LCR(Life Cycle Resource)와 폐기물의 발생을 평가하는 LCW(Life Cycle Waste)에 대한 내용을 중심으로 분석하였다.

(2) 평가 범위

단독주택, 공동주택, 공장, 호텔 등의 모든 건축물들을 대상으로 평가를 실시하며, LCE, GWP(Nox, Sox, CO₂), LCC의 평가가 가능하며, ver 4.0부터는 LCW, LCR의 평가도 제공하고 있다. 폐기물 분류체계는 일본환경부 폐기물처리지침에 따라 분류하여 평가하며, 폐기물 종류는 총 8종의 중분류와 54종의 세분류로 된 폐기물을 평가 한다. 비산업폐기물, 산업폐기물(안정형/관리형). 일반폐기물의 경우는 평가에서 제외 하였다.

표. 6.1 AIJ-LCA&LCW v4.05 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	○	○	—
배출	폐기물발생량	○	○	○
	재 자원화량	○	○	○
	최종 처분량	○	○	○

(3) 평가 지표

건설폐기물의 평가 LCR의 지표와 폐기물의 발생을 평가하는 LCW의 지표를 통해 평가를 실시한다. 건물의 전 과정에 대한 자원 투입과 폐기물 발생, 재사용, 재활용의 모식도를 그림 11에 나타낸다. 여기에 나타내는 사이클 중에서, 건물의 전 과정(이하 LC)로의 LCR 지표로서 LC 자원 투입량, LC 순수 자원 투입량이라고 하는 2가지의 지표를 적용했다. LCR에서는 재활용 자재 활용에 의한 순수 자원의 소비를 절감하는 것을 평가하고 있다. LCW 지표로서, LC폐재 발생량, LC폐기물 발생량, LC최종 처분량이라고 하는 3개의 지표를 적용했다. 각각의 지표는 본 프로그램에 내장되어 있는 복합원단위에 기입이 되어 있다.

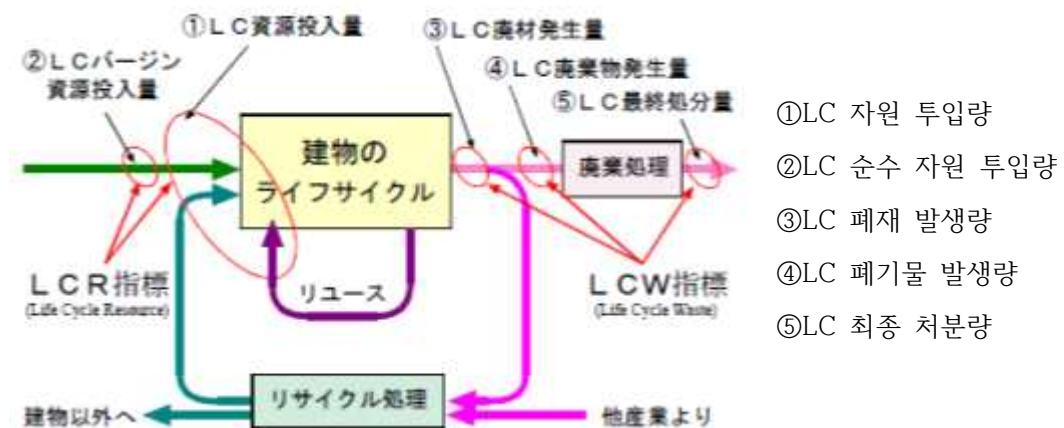


그림 6.1 폐기물 평가 지표 개념 모식도

① LC 자원 투입량

LCR의 지표이다 ①LC자원 투입량은 건물의 모든 부재를 건설~운용~수선~갱신~해체라고 하는 전 과정에 투입되는 자원량이다. Upstream의 Material Flow는, 건설을 위한 직접적인 자원 투입(건축 자재)를 다루고 있지만, 건축 자재의 제조 단계에서의 간접적인 자원 소비(예를 들면, 제철에 있어서의 철광석의 소비 등)나, 에너지 사용에 관련하는 화석연료의 소비 등은 고려하고 있지 않다.

$$Q_{input} = \sum_k \sum_m (Q_{input}^{k,m}) \quad (1)$$

Q_{input} : 전 과정의 단계 k에서 건물의 부재 m 관한 자재 양 (kg)
(Material input in each phase)

$\sum_k$ 는 건물의 건설~운용~수선~갱신~폐기라고 하는 전 과정에 있어서의 누적 값을 나타낸다.

$\sum_m$ 는 건물의 각 부재에 대한 누적 값을 나타낸다.

② LC 순수 자원 투입량

LC 자원 투입량으로부터 다른 건물 등에서 재사용 된 것을 공제하고, 더욱 건설자재 그것에 함유 되는 재활용 자원을 산정한다.

$$Q_{p-input} = \sum_k \sum_m [Q_{input}^{k,m} \times (1-R_{i-reuse}^{k,m}) \times (1-R_{i-recycle}^{k,m})] \quad (2)$$

$Q_{p-input}$: 전 과정의 단계 k에서 건물의 부재 m 관한 자재 양 (kg)
(Material input in each phase)

$R_{i-reuse}$: 전 과정의 단계 k에서 건물의 부재 m 관한 자재의 재사용 비율 (%)
(다른 건물 등에서의 자재의 재사용, i-reuse 는 Upstream 단계의 재사용을 나타낸다)
(Input material reuse rate from another building)

$R_{i-recycle}$: 전 과정의 단계 k에서 건물의 부재 m 에 관한 자재의 재활용 비율 (%)
(건설자재에 포함된 재활용 성분의 비율, i-recycle 는 Upstream 단계의 재활용을 나타낸다)
(Recycled component rate in input construction material)

$\sum_k$ 는 건물의 건설~운용~수선~갱신~폐기라고 하는 전 과정에 있어서의 누적 값을 나타낸다.

$\sum_m$ 는 건물의 각 부재에 대한 누적 값을 나타낸다.

③ LC 폐재 발생량

일반적으로는 전 과정에서는 자원 투입량과 폐재 발생량은 건물의 전 과정 폐기물 배출량으로 산정하고 있다. 이 때문에, 자원 투입량으로부터 타건물 등에 재사용하는 물량을 공제한 양이 LC폐재 발생량이 된다. 그러나 지하 굴착에 의한 잔토, 말뚝박기공사로 발생하는 진흙은 자재 투입이 없으나 폐기물로서 발생한다. 이 때문에, 본 프로그램에서는 잔토 진흙등도 폐재로서 집계하는 것으로 했다. 다만, 잔토의 현장내의 재이용은, 재사용으로서 취급하고, 폐재에 가산하지 않는 것으로 하고 있다.

$$\begin{aligned} W_{generate} &= \sum_k \sum_m (W_{generate}^{k,m}) + S_{generate} \times (1-R_{s-reuse}) \\ &= \sum_k \sum_m [Q_{input}^{k,m} \times (1-R_{w-reuse}^{k,m})] + S_{generate} \times (1-R_{s-reuse}) \end{aligned} \quad (3)$$

$W_{generate}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 폐재의 발생량 (kg)
(Waste generation in each phase)

$S_{generate}$: 건설단계에 있어서의 잔토 등의 발생 (kg)
(자재 투입이 없는데, 현장에서 발생하는 폐재: Surplus soil in construction phase)

$R_{s-reuse}$: 잔토 등의 현장 내 재이용의 비율(-)
(Surplus soil reuse rate in own site, s-reuse)

$R_{w-reuse}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 폐재의 재사용율(%)
(Waste reuse rate to another building, w-reuse)

$\sum_k$ 는 건물의 건설~운용~수선~갱신~폐기라고 하는 전 과정에 있어서의 누적 값을 나타낸다.

$\sum_m$ 는 건물의 각 부재에 대한 누적 값을 나타낸다.

일반적인 건설 잔토는, 「폐기물의 청소에 관한 법률」 (이하, 폐기물처리법)의 대상이 아니고, 법적인 “폐기물”은 아니지만, 자원 순환의 평가에는 고려해야 할 항목으로서 취급하고 있다. 현장 조성의 말뚝 시공 시에 발생하는 오니는 폐기물처리법에서는 “폐기물” 된다. 이러한 잔토나 오니는, 대규모 건물에서는 대량으로 발생하지만 일반적인 “폐기물”의 개념과 다소 다르기 때문에 결과의 분석이나 해석에 있어서 건설 잔토와 오니의 처리에 대하여 고려할 필요가 있다.

④ LC 폐기물 발생량

LC폐재 발생량으로부터 재활용분을 공제한 폐기물 발생량이다.

$$W_{treatment} = \sum_k \sum_m [W_{generate}^{k,m} \times (1 - R_{w-recycle}^{k,m})] \quad (4)$$

$W_{treatment}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 재활용분을 공제한 폐기물 발생량 (kg)
(Waste generation in each phase)

$W_{generate}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 폐재의 발생량 (kg)
(Waste generation in each phase)

$R_{w-recycle}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 폐재의 재활용 비율 (%)
(Waste recycling rate, $w-recycle$)

$\sum_k$ 는 건물의 건설~운용~수선~갱신~폐기라고 하는 전 과정에 있어서의 누적 값을 나타낸다.

$\sum_m$ 는 건물의 각 부재에 대한 누적 값을 나타낸다.

⑤ LC 최종 처분량

매립에 의한 토지 점거(landfill)가, 직접적인 환경 부하로서 평가되는 것이 많다. 본 프로그램에서는 소각 등의 폐기물 처리에 의한 용적 축소화를 고려하고, 최종적으로 매립할 수 있는 경우의 체적(m^3)으로 환산해 LC최종 처분량으로 산정하였다.

$$V_{landfill} = \sum_k \sum_m (W_{treatment}^{k,m} \times R_{w-reduce}^m \div \gamma_{landfill}^m) \quad (5)$$

$W_{generate}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 폐재의 발생량 (kg)
(Waste generation in each phase)

$W_{treatment}$: 전 과정의 단계 k 로의 건물의 부재 m 에 관한 재활용분을 공제한 폐기물 발생량 (kg)
(Waste generation in each phase)

$R_{w-reduce}$: 건물의 부재 m 에 관한 폐기물 처리에 의한 용적 축소화율 (%)
(Waste reduction rate by treatment, $w-reduce$)

$\gamma_{landfill}$: 건물의 부재 m 에 관한 폐기물의 매립의 비중 양 (kg/m^3)
(Weight volume ratio in case of landfill)

(4) 평가 프로세스

① 「입력-1」 시트 : 기본정보

「입력-1」 시트는, 건물의 기본 정보를 입력하는 시트로 건물의 용도, 구조의 형태, 연면적, 평가 기간, 재건축 주기, 신축공사보정(물가보정치수)을 입력하게 되어있다. 본 프로그램은 기준안과 대책안의 2안 비교를 전제로 하고 있다. 기준안과 대책 안을 비교 평가할 때에, 공통의 평가 기간을 설정하고 있다. 구체적으로는, 유효기간 35년의 건물과 유효기간 100년의 건물을 비교할 때에 100년의 평가 기간을 설정했을 경우, 유효기간 35년의 건물은 100년간의 문에 2회 개축함으로써 LCA를 평가하는 것이 일반적인 평가 방법이다. 그러나 AIJ-LCA/LCW에서는, LCRI나 LCW의 평가의 관점으로부터, 건물의 건설로부터 해체 폐기까지의 1 사이클 근처의 값(kg/m²)와 유효기간 근처의 값(kg/m²)을 구별해 평가할 수 있도록 하기 위하여, 대안마다 평가 기간=유효기간으로 설정하는 것을 가능하게 했다. 그 예로, 유효기간 35년은 35년의 평가 기간을 설정하고, 유효기간 100년의 건물은 100년의 평가 기간을 설정하는 것으로서, 개축을 생각하지 않는 평가가 가능하게 된다. 한편, 본 프로그램에 내장된 산업 연관표는 1995년의 것을 이용하고 있다. 계산 연차에 맞추어 물가 보정을 할 필요가 있다. 2007년까지의 건설자재에 대한 가격을 적용할 수 있도록 구성하였으며, 필요에 따라서, 「물가지수 연보」 등을 참고하여 직접 입력도 가능하다.

入力-1シート 基本情報

建物名: 集合住宅モデル

建物用途: 集合住宅

主要構造: RC造

延床面積: 7280.85㎡

評価期間: 基準案 100年, 対策案 100年

建替周期: 基準案 50年, 対策案 100年

新築工事補正: 基準案 1, 対策案 1

電気設備: 基準案 1, 対策案 1

空調設備: 基準案 1, 対策案 1

衛生設備: 基準案 1, 対策案 1

昇降機設備: 基準案 1, 対策案 1

設備工事分析: 統計データを利用する場合: 0を選択, 資機材重量を入力する場合: 1を選択 (0)

設計監理料率: 新築工事 3%, 改修工事 5%

物価補正(1995年=1.0): 2006年 消費税 1.05, 建築 0.834, 電気設備 0.871, 空調設備 0.924, 衛生設備 0.921, 昇降機設備 0.776, 設計監理 0.865, 維持管理 0.862, 廃棄処分 0.922

維持管理費補正: 基準案 0.2, 対策案 0.2

그림 6.2 기본정보 입력 시트

② 「입력-2」 시트 : 건축공사 데이터

「입력-2」 시트는, 기준안과 대책안의 2개의 케이스에 대응한 건축주 요점 자재를 입력하는 시트로, 기본적으로는, 건축 공사와 관계되는 주요한 건설자재의 데이터를 입력한다. 프로그램에 내장되어 있는 「분류코드」 및 「사양」을 이용하는 경우에는, 갱신 주기, 수선 비율을 재검토하고, 그 사양마다의 연면적 당 물량을 입력한다. 필요에 따라서 비교를 기입한다. 연면적 당 물량의 참고가격이 표시되고 있지만, 다른 용도에서는 크게 다른 경우가 있으므로 주의가 요구된다. 시공단계의 폐기물 발생량을 「복합 원단위」에 「손실률」 설정을 통해 산정 가능하다.

「복합 원단위」 시트에 준비되어 있는 사양을 선택하고, 추가하는 것이 가능하다. 「분류코드」 및 「사양」이 추가되면, 필요에 따라서 「공사 특성」을 기재한다. 갱신 주기, 수선 비율, 연면적 당 물량, 비고 입력

특수한 입력으로서는, 아래와 같은 「고로시멘트 이용 등에 의한 공기연장 할증」과 「재건축 시 해체 시의 말뚝 기초의 재이용율의 설정」이 있다. 「포틀랜드고로슬래그시멘트 이용 등에 의한 공기연장 비율증가」는 건설 코스트의 공통비에 반영된다.

「재건축 시 해체 시의 말뚝 기초의 재이용율의 설정」은 해체에 임하여 말뚝이나 기초를 남겨 둠으로서, Downstream 때의 재건축에 적용 가능하다. 또한, 재건축 시의, 굴착(잔토)이나 말뚝공사에 진흙의 발생도, 본단계에서 설정한 재이용율로 절감할 수 있는 것으로 설정하였다.

入力-2シート 建築工事データ											
		評価期間→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	
		建設年度→		1991-1994年		基準年度		1995年		評価年度	

■発生品目コード表			基準率			対応率		
発生品目分類名	発生品目コード	発生品目	廃材 リサイクル 率	廃棄 処理 コード	リサイクル 処理 コード	廃材 リサイクル 率	廃棄 処理 コード	リサイクル 処理 コード
非産業廃棄物	100	非産業廃棄物						
	101	建設発生土	100%	111	141	100%	111	141
	102	砂・砂利・砕石	100%	111	141	100%	111	141
	109	土壌系 その他	100%	111	141	100%	111	141
産業廃棄物(安定型)	200	産業廃棄物(安定型)						
	210	がれき類						
	211	コンクリート塊	98%	421	441	98%	421	441
	212	コンクリート製品	98%	423	433	98%	423	433
	213	アスファルト・コンクリート塊	98%	422	432	98%	422	432
	219	その他がれき類		423	433	50%	423	433
	220	ガラス・陶磁器くず類(安定型)						
	221	ガラス		621	644	90%	621	644
	222	陶磁器・タイル		621	433	50%	621	433
	223	ブロック類		621	433	98%	621	433
	224	ALC		621	643	98%	621	643
	225	アスベスト含有セメント系製品		612			612	
	226	岩綿吸音板(端材)		621	642	80%	621	642
	227	ガラスクロス		621			621	
	228	グラスウール		621	631		621	631
	229	耐火被覆吹付材, ロックウール		621			621	
	230	耐火ボード		621			621	
	239	陶磁器くず(安定型) その他		621		50%	621	433
	240	廃プラスチック類(安定型)						
	241	タイヤカーペット	10%	721	731	50%	721	731
	242	床仕上材(長尺シート, ビニル・ゴム・タイル)	10%	721	731	50%	721	731
	243	発泡断熱材	10%	721	731	50%	721	731
	244	プラスチック管(塩ビ管を含む)	10%	721	741	50%	721	741
	245	発泡スチロール		721	742		721	742
	246	FRP製品		721	631		721	631
	249	廃プラスチック類(安定型) その他	10%	721	731	50%	721	731
	250	金属くず(安定型)						
	251	仮設鋼材・山鋼鋼材	91%	521	541	91%	521	541
	252	鉄骨くず	91%	521	541	91%	521	541
	253	鉄筋くず, 溶接金網	91%	521	541	91%	521	541
	254	鋼管	91%	521	541	91%	521	541
	255	ステンレス	91%	521	542	91%	521	542
	256	雑鉄くず	91%	521	541	91%	521	541
	257	アルミ合金	85%	521	543	85%	521	543
	258	アルミ製品	85%	521	533	85%	521	533
	259	銅管, 銅線	91%	521	532	91%	521	532

그림 6.4 재사용/재활용 데이터 입력 시트

④ 「폐기물 처리별 분석」 시트 : 폐기단계 데이터

「폐기물투기별 분석」 시트에서는, 「발생 품목별 분석」 시트로 지정한 폐기물투기 코드와 재활용 처리 코드의 조건이 설정되어 있다.

각 폐기물 처리 코드에 대해서, 폐재 수송 1(폐재 발생 현장으로부터 폐기물처리장까지의 수송)과 폐재 수송 2(폐기물처리장으로부터 최종 처분 장소까지의 감량 후의 수송)이라고 하는 2종류의 수송으로 나누고, 거리와 적재율의 설정을 가능하게 했다.

또한, 각 재활용 처리 코드에 대해서, 폐재 수송 1(발생 폐재의 현장으로부터 재활용 처리 시설 또는, 일차 집적 장소까지의 수송)으로 폐재 수송 2(일차 집적 장소로부터 2차 집적 장소(재활용 시설)까지의 수송)라고 하는 2 종류의 수송으로 나누고, 거리와 적재율의 설정을 가능하게 했다.

■廃棄物処理別の分析					廃材輸送1 ×発生量		廃材輸送2 ×処分量	
処理 コード	対象 分類	対象	処理方法	備考	片道 距離 km	積 載 率	片道 距離 km	積 載 率
直接廃棄物処理								
111	1	発生土	残土処分		30	1		
211	2	汚泥(泥水)	脱水・埋立		30	1		
212	2	汚泥(泥土)	直接埋立		30	1		
311	3	木くず	直接埋立		30	0.6		
312	3	木くず	焼却・埋立		30	0.6	10	1
411	4	コンクリートがら	直接埋立		30	1		
412	4	アスファルト・コンクリート塊	直接埋立		30	1		
413	4	その他がれき類	直接埋立		30	1		
611	6	ガラス・陶器くず(安定型)	直接埋立		30	0.6		
612	6	ガラス・陶器くず(管理型)	直接埋立		30	0.6		
1011	10	廃油	焼却		30	0.6	10	1
混廃→廃棄物処理								
321	3	木くず	混廃・選別・埋立		30	0.6		
322	3	木くず	混廃・選別・焼却・埋立		30	0.6	10	1
421	4	コンクリートがら	混廃・選別・埋立		30	1		
422	4	アスファルト・コンクリート塊	混廃・選別・埋立		30	1		
423	4	その他がれき類	混廃・選別・埋立		30	1		
521	5	金属くず	混廃・選別・埋立		30	1		
621	6	ガラス・陶器くず 安定型	混廃・選別・破砕・埋立		30	1		
622	6	ガラス・陶器くず 管理型	混廃・選別・破砕・埋立		30	1		
721	7	廃プラスチック類	混廃・選別・破砕・埋立		30	0.4		
821	8	紙くず	混廃・選別・焼却・埋立		30	0.4	10	1
921	9	繊維くず	混廃・選別・焼却・埋立		30	0.4	10	1
1121	4	その他 管理型	混廃・選別・埋立		30	0.6		

그림 6.5 폐기단계 데이터 입력 시트

⑤ 평가 결과

평가가 완료된 폐기물 배출량을 건축업협회에서 조사한 해체공사실태조사 의 폐기물 발생 원단위와 비교할 수 있도록 구성되어 있다. LCR과 LCW의 평가 결과는 자원투입량, 손실자원투입량, 폐재발생량, 폐기물발생량 산출되며, 기준안과 대책안의 투입 물량을 사용자가 직접 변동한 투입물량 값의 차이에 따라 평가 결과 값이 산정되는 간단한 형태이다. 본 보고에서는 AIJ-LCA&LCW의 평가 결과를 철근 콘크리트조 공동주택으로 적용된 평가결과를 바탕으로 표시하였다.

▪ 사례 평가 개요

도쿄 근교의 RC조 판상형 9층 88세대 규모의 공동주택을 대상으로 폐기물 저감 및 자원순환에 기여하는 친환경 대안(기초 말뚝 Reuse, 재생골재 이용, 장수명 콘크리트 적용; 기준안 50년, 대안 100년)이 적용된 평가를 실시하였으며 LCR과 LCW의 평가 결과를 작성하였다.

▪ LCR 평가 결과

본 프로그램의 LCR 평가 결과는 신축공사 투입 자원량과, 전과정 관점에서의 자원량으로 구분되어 표현되며 각각의 폐기물 발생단위는 kg/m^2 , $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{year}$ 으로 표현된다. 사례 평가 결과 신축공사의 투입 자원량 10% 증가하였으며, 전과정 관점에서는 장수명화에 의해 기준안에 비해 30% 감소하였다. 순수 자원투입량의 경우는 기존말뚝 재이용, 재생골재, 장수명화 등에 의해 신축, 전과정 관점 모두 큰 폭으로 감소 한 것으로 나타났다.

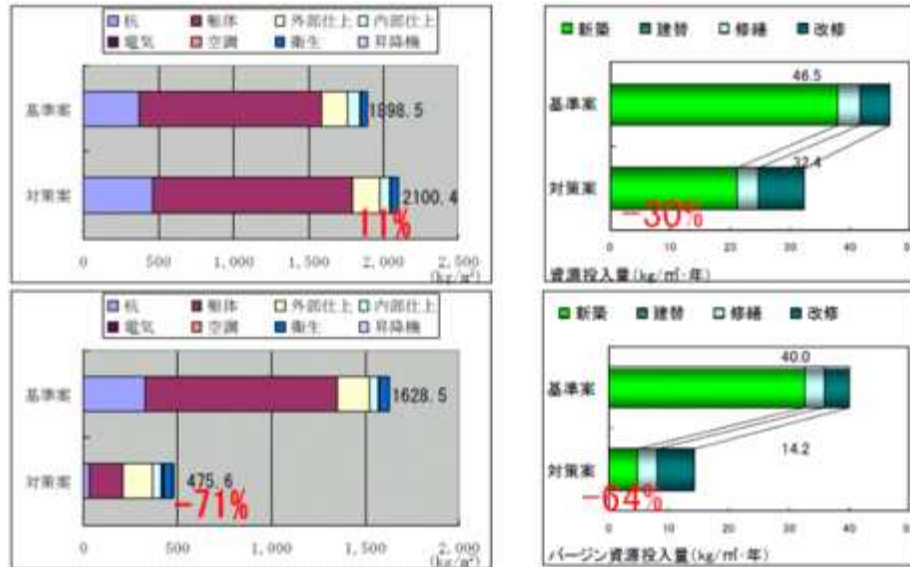


그림 6.6 LCR 평가 결과

▪ LCW 평가 결과

LCW 평가 결과는 해체공사 발생 폐기물량과, 전과정 관점에서의 폐기물량으로 구분되어 표현되며 각각의 폐기물 발생단위는 kg/m^2 , $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{year}$ 으로 표현된다. 사례 평가 결과 폐재 발생량은 해체공사의 해체 시 말뚝재이용으로 15%감소, 전과정 관점에서는 50%감소하였다. 폐기물 발생량은 해체 시 50%감소, 전과정 관점에서는 65%감소 한 것으로 나타났다.

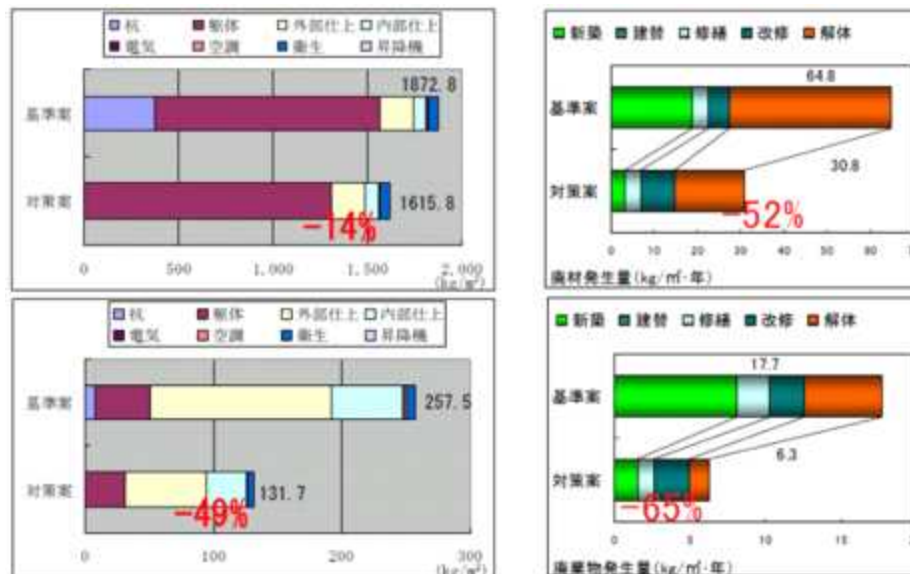


그림 6.7 LCW 평가 결과

나. eco-MA(Multi-Agent-System)

(1) 개요

eco-MA(Multi-Agent-System)는 동경대에서 개발한 자재생산 폐기 및 재활용 건설자재의 자원순환 시뮬레이션을 통한 의사결정 지원도구이다. 일본에서 제공하고 있는 다양한 건설폐기물 예측 및 재활용 시책들은 건설의 몇몇 단계에만 초점이 맞추어져 있는 형태의 시책이기 때문에 건설 산업에, 나아가 사회 전체에 어떤 영향을 미치는지, 환경 배려형 사회 형성에 어떻게 기여했는지가 불분명한 문제점이 존재한다. 기존의 건물 단위의 폐기물 예측 평가가 아닌 지역 기반의 폐기물 예측 시스템이다. 지역에 따라서 시간요인, 지리적요인, 사회적요인에 대한 복합적인 분석을 제공한다. eco-Ma는 시스템 알고리즘 형태로 구성되어 있다.

(2) 평가 범위

평가 대상의 폐기물은 건축공사에서 발생하는 폐콘크리트와 도로공사에서 발생하는 폐아스팔트 콘크리트의 2종의 폐기물을 평가 한다.

표. 6.2 eco-MA 폐기물 평가 범위

		시공단계	유지보수단계	해체단계
투입	자재 투입량	○	X	—
배출	폐기물발생량	○	X	○
	재 자원화량	○	X	○
	최종 처분량	○	X	○

(3) 평가 지표

평가 지역의 레미콘, 골재, 순환골재등의 각종 건설자재 공장의 실측데이터와 시공통계 데이터와 내구수명 예측식을 통하여 폐기물 발생 특성을 평가 한다. 또한, 건설계기에 미치는 영향을 고려하여 환경세, 정부보조금, 건설투자동향을 평가 지역에 사회적 복합요인으로 설정하여 평가한다. 사회적 복합 요인 평가는 Multi-Agent-System을 이용하여 평가한다.

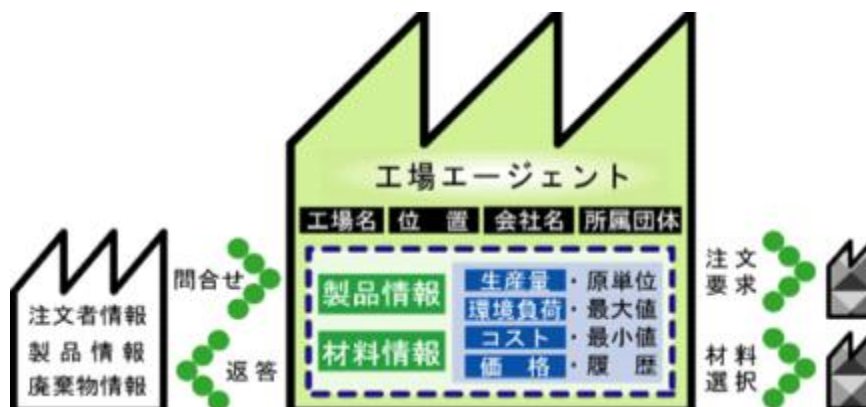


그림 6.8 Multi-Agent-System 개념도

(4) 평가프로세스

① 프로그램 전체의 흐름

eco-MA의 평가 프로세스는 대상 지역의 건축물의 수요 · 소비 · 폐기 · 재이용 형태 (라이프 사이클) 및 유통 (자료 흐름)을 실태에 맞게 시계열로 모델링한다. 모델 된 건설 관련 산업의 지리적 조건, 관습, 건축물의 수명주기, 재료 흐름에 따라 대상 지역의 시뮬레이션을 통해 환경 부하가 감소되는 건설 관련 산업의 모습, 건축물의 수명주기, 재료 흐름의 방향을 제시한다. 상기의 항목을 범용적인 건설 재료로 달성하는 것을 목표로, 우선 건설 재료로 사용량이 많은 콘크리트를 대상으로, 관련 산업을 중심으로 한 지역으로 환경 부하 경감을 평가한다.

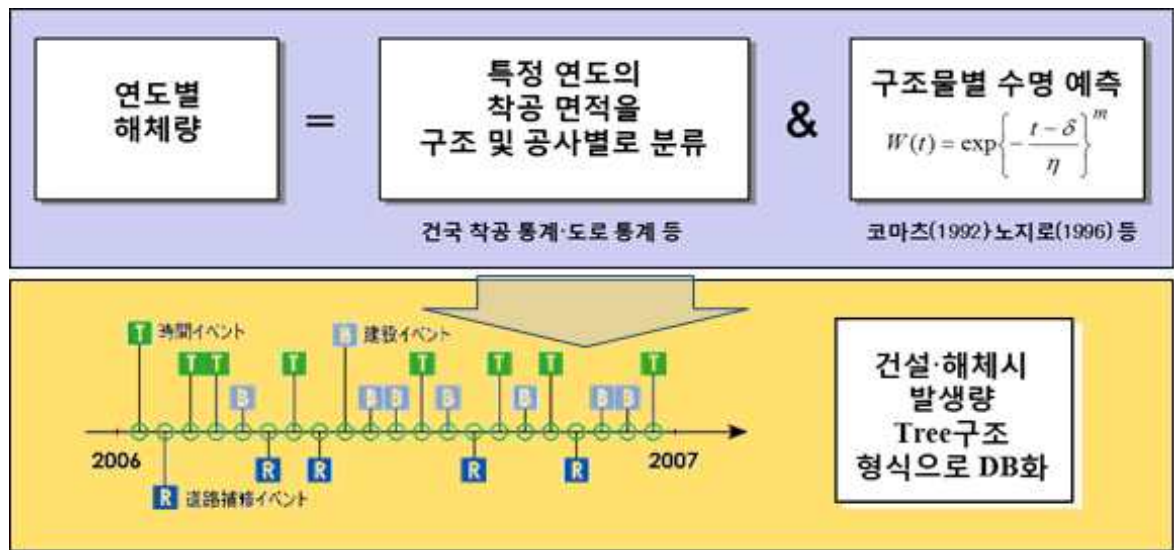


그림 6.9 eco-MA 평가 프로세스

② 입력화면 : 기본정보

대상 지역의 건설 관련 산업의 지리적 조건 및 관습을 실태에 맞게 모델링 하며, 대상 지역의 건축물의 수요 · 소비 · 폐기 · 재이용 형태 (라이프 사이클) 및 유통 (자료 흐름)을 실태에 맞게 시계열로 모델링 한다.

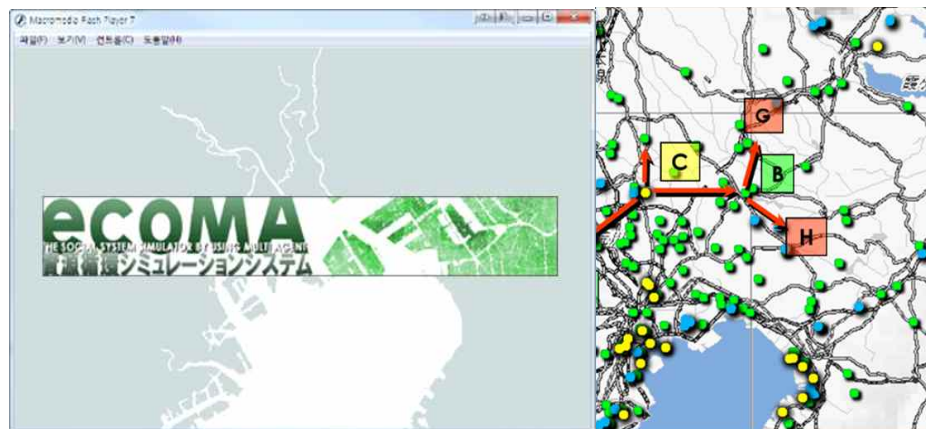


그림 6.10 지역 입력화면

③ 입력화면 : 상세정보

평가 지역의 각 관련 단체의 실태 조사를 수행하고 정보를 구현한다. 상세정보 수집 내역은 현행 규제 산업 유도 시책적용, 산업 업태 · 상관습의 지역 특성 확인, 지리적 조건확인, 건설 구조물의 수명을 고려한 폐 콘크리트의 배출량 분석, 생산물의 시간적 변화 (과거 · 현재 · 미래), 생산 활동의 투입 자원 · 에너지, 폐기물 분석과 같은 항목이다.



그림 6.11 평가지역 산업분석

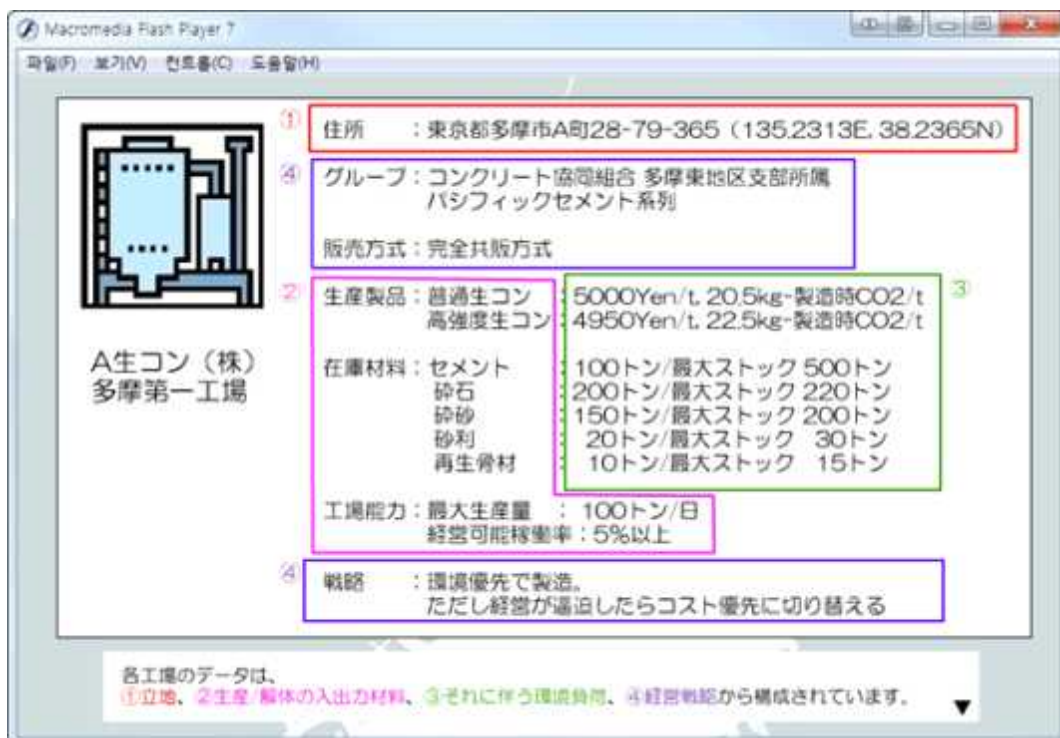
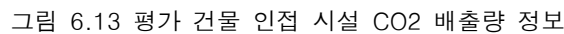


그림 6.12 공장 특성 분석

ecoMA에서는 공장 단위의 평가, 공장 종류 단위의 평가, 지역 규모의 평가를 제공한다. ecoMA의 공장을 선택하여 각 공장의 환경 평가를 할 수 있음. 이는 지역 중 하나의 공장이 어떤 역할을 하는지 또는 자신의 공장이나 도시 시설이 어떤 상황에 있는지 등을 확인하는 데 적합하다. 또한, 하나의 공장 뿐만 아니라 같은 종류의 제조 공장과 도시 시설의 환경 평가도 가능하다. 이는 지역에서 그 업체가 어떤 상태에 있으며, 차후 자원순환과 관련하여 어떤 활동이 최적인가에 대해 평가하는데 적합함



⑤ 결과화면 : 시계열의 평가

ecoMA의 주요특징 중 하나는 예측/정책의 효과를 평가할 수 있다. "환경개선의 방법을 적극적으로 도입했을 시와 도입하지 않았을 시"라는 예상 시나리오를 소개하고 미래를 예측 할 수 있다. 또한, 시나리오는 새로운 조례를 도입함으로써 조례의 영향효과를 확인할 수 있다. 예를 들어 콘크리트 건축물로 대상을 선정하고, 모든 관계 기업이 원자재 조달·수송 비용을 최소화하도록 거래 공장·재료를 선정한다하면 50년 후까지의 콘크리트 폐기 물량을 시뮬레이션을 실시한다. 기본적으로 어떤 수요가 발생 하는지를 시계열로 미리 입력 할 수 있기 때문에, 15년 후 재해 복구 수요가 커지거나 건축물의 수요가 해마다 줄어들거나 하는 경향을 이벤트로 입력 후 이러한 수요 변화에 따라 폐기 물량이 어떻게 변하는 지 볼 수 있다. 이러한 조건 설정에 따라 시뮬레이션을 하면 ecoMA 내부에서는 공장들이 거래 기업을 바꾸거나, 재료를 비용이 저렴한 재활용 재료로 확대하거나 반대로 천연 소재로 변환하거나 다양한 노선 전환이 가능하다. 그 결과 그림 47과 같이 예상되는 지역의 장수명화 콘크리트를 적용할 경우 폐기 물량이 어떻게 되는지, 비용 절감이 지역의 환경에 어떤 효과가 있는지를 확인 할 수 있으며, 이와는 대조적으로, 모든 관련 기업이 가격보다 환경 성능을 최소화하도록 설정할 경우 지역의 콘크리트 폐기 물량은 하기와 같다.

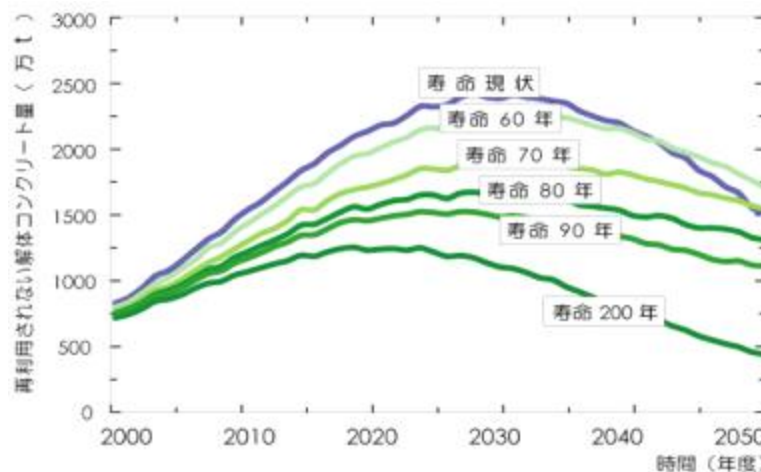


그림 6.15 장수명화 기술에 의한 폐기물 저감 효과의 평가

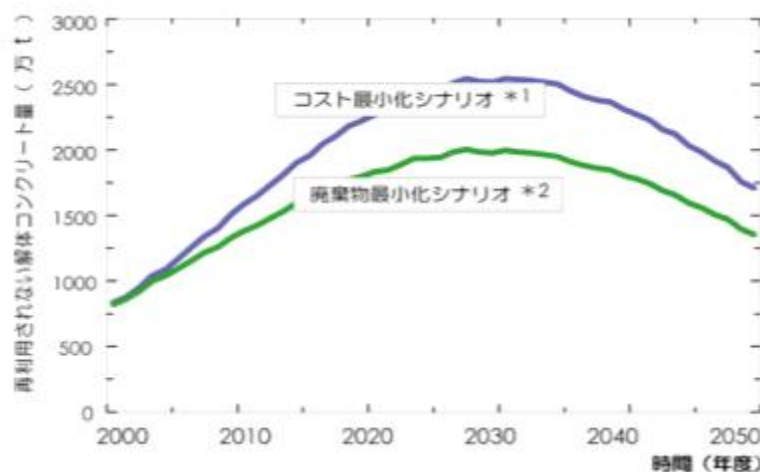


그림 6.16 시나리오별 폐기물 저감 효과의 평가

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유		

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수 량	구입 연월일	구입 가격 (천 원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
----------	----------------	-------------	--------	-----------	----------------	---------------	------------------	-----------------

해당사항 없음.

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전점검

■ 본 연구를 수행함에 있어 연구실의 안전을 유지관리하기 위해 『연구실 안전 환경 조성
에 관한 법률』에 의거하여 **연구실내 안전관리조직체계를 정비하고 주기적으로 안전점검
을 실시함.**

가. 연구실 일상 점검

- 연구시작 전 각 연구실 책임자는 육안으로 장비 및 시설을 매일 점검함.

나. 연구실 정기 점검

- 과학기술분야 연구실의 일반안전, 산업위생, 전기안전, 소방안전, 화공안전, 가스안전, 기계안전 등의 전문분야 점검
- 매월 각 연구실을 주기적으로 점검함.

다. 연구실 정밀안전진단

- 산업안전보건법 제39조에 의거 유해인자를 취급 연구실
- 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
- 매년 1회 이상 외부 전문기관에 의뢰하여 실시 후 중대결함이 발견될 경우, 교육과학기술
부에 보고

2. 교육 훈련

■ 『연구실 안전 환경 조성에 관한 법률』에 의거하여 실험실의 환경안전교육이 의무화됨
에 따라 **연구 관련자 전원은 환경안전교육을 의무적으로 수강함.**

가. 개요

- 연구실 안전 확보 및 종사자의 건강보호, 실험 및 연구활동에 기여, 안전환경조성에 관한
법률 의거 연구실의 환경안전교육이 의무화 목표수립.

나. 교육대상

- 교수, 대학원생, 소속연구원, 전문직원, 실험참여 학부생 등

다. 교육실시

- 1학기 - 법정 교육시간인 6시간을 온라인 및 집합교육으로 실시함.
- 2학기 - 법정 교육시간인 6시간을 온라인 교육으로 실시함.



그림 9.1 주관기관 안전교육 정보망



그림 9.2 주관기관 안전교육 이수증명서

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	저널명/기관명	영향력 지수	일자	비고
1	논문	A Study on the characteristic analysis of CO ₂ emissions by work type in the apartment housing construction process	한양 대학교 에리카 산학 협력단	제1 저자	Sustainability	2.075	2018.01	SSCI
2	논문	Analysis of Worker Category Social Impacts in Different Types of Concrete Plant Operations: A Case Study in South Korea	한양 대학교 에리카 산학 협력단	제1 저자	Sustainability	2.075	2018.10	SSCI
3	논문	Theoretical Study on the Production of Environment-Friendly Recycled Cement Using Inorganic ConstructionWastes as Secondary Materials in South Korea	한양 대학교 에리카 산학 협력단	제1 저자	Sustainability	2.075	2018.11	SSCI
4	논문	Mineral' s creation of recycled cement utilizing inorganic construction wastes	한양 대학교 에리카 산학 협력단	발명자	International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development	-	2018.12	-
5	특허	무기계 건설폐기물을 이용한 재생시멘트 개발 알고리즘	한양 대학교 에리카 산학 협력단	발명자	대한민국	-	2018.12	

제11장. 기타 사항

○ 해당사항 없음.

제12장. 참고문헌

1. 김광우 외, 재생콘크리트의 강도특성상의 문제점, 콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제7권, 1992.
2. 김기철 외, 재생골재의 품질 따른 재생 콘크리트의 특성 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제18권 제1호, 1998. 4, pp.923-928.
3. 김무한 외, 재생골재 콘크리트의 구조체 적용성 관한 기초적 연구(I), 대한건축학회 논문집, 제9권 제8호, 1993. pp.201-211.
4. 김무한, 재생골재의 현황 및 재활용방안, 콘크리트학회지, 제9권 6호, 1997. 12, pp.15.
5. 김무한, 건설폐기물 및 재생골재 콘크리트, 콘크리트학회지, 제10권 6호, 1998. 12, pp.52-60.
6. 김문섭 외, 재생골재 콘크리트의 역학적 특성, 대한건축학회 논문집, 13권 9호, 1997. 9, pp.305-312.
7. 김석원 외, 양생조건 따른 재생골재 콘크리트의 강도 특성 관한 실험적 연구, 콘크리트학회, 가을 학술 발표회 논문집, 1996, pp.24-30.
8. 김효구 외, 폐콘크리트의 품질이 재생골재 및 재생모르타의 특성 미치는 영향, 대한건축학회 학술발표논문집, 제18권 제2호, 1998. 10, pp.551-556.
9. 박승범, 폐콘크리트의 재활용 및 처리기술개발, 충남대학교, 1997.
10. 송하원 외, 폐콘크리트로부터 재생된 골재의 합리적 평가 관한 연구, 콘크리트학회논문집, 제12권 5호, 2000. 10., pp.3-12.
11. 오상근, 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 수화성 회복 관한 연구, 대한건축학회논문집(구조계) 18권 10호, pp.53-60, 2002. 10.
12. 오상근 외, 재생골재 콘크리트의 내구성 미치는 미분말의 영향, 대한건축학회 학술발표논문집, 제16권 제1호, 1996. 4, pp.563-566.
13. 이봉학 외, 재생 폐콘크리트의 성능향상 관한 연구, 콘크리트학회지, 제7권 2호, 1995, pp.136-145.
14. 이현 외, 폐콘크리트 재활용 기술개발 대하여, 폐기물, 1997. 9, pp.163-170.
15. 이진용 외, 폐콘크리트 재활용 기술 관한 연구, 콘크리트학회, 1996, pp.186-191.
16. 이진용 외, 재생콘크리트의 강도발현 및 건조수축 특성연구, 콘크리트학회지, 제9권 6호, 1997, pp.217-223.
17. 탁현철, 폐콘크리트계 미분말의 재생시멘트 활용방안 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문, 2002
18. 한국유기성폐자원학회, KOWREC 환경총서 제6권, 건설폐기물의 재활용, 동화기술, 1999.
19. 환경부, 2000 전국 폐기물발생및 처리현황(환경부행정간행물11-1480000 - 000533-102001, 2001)
20. 森永 繁 監修, コンクリートの熱的性質, 祈報當出版, 1983
21. 小野義徳 外 4人, Fundamental Properties of Concretes with Recycled Powders for waste of concretes, 秩 父小野田研究報告, Vol. 46, No. 129, 1995, pp. 90~97.

22. 吳相均・, 安宰徹 外, 韓國での建廢棄物の發生量とリサイクルに關する考察, 日本建築學會大會學術講演梗概 集, 2002年8月, pp.991-992.
23. 吳相均・, 安宰徹 外, セメントモルタルの加熱粉碎による再生セメントへの再利用, 日本建築學會大會學術講演 梗概集, 2002年8月, pp.993-994.
24. 友澤史紀 外 4人, 完全リサイクルコンクリート(エココンクリート)の研究, 日本建築學會大會學術講演梗概 集 A-1, pp.341-342, 1994.
25. 原田 有, 建築耐火構法, 工業調査會, 1973.
26. 田村雅紀 外, 建築構造物のライフサイクル計に包含されるコンクリートの材料計手法, 日本建築學會大會 學術講演梗概集 A-1, pp.893-894, 2002. 08.- 54
27. 田村雅紀, コンクリート構造物のライフサイクル計における材料保存ストラテジー, 東京大學博士 學位 論文, 2003. 03.
28. Bell. J. R., G. A. Leonards and W. L. Dolch, Determination of Moisture Content of Hardened Concrete and Its Dielectric Properties, proc. of ASTM, vol.63, pp.996-1007, 1963
29. Bian Qinghan, Zhang Hong, Zhao Jijun and Chen Zhengrong, Effect of Zeolite on the Performance of Alkali-Activated Blastfurnace Slag Binder, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1992, pp.601-614
30. Brindley, G.W., and Nakahira, M., The Kaolinite-Mullite Reaction - series I. A survey of outstanding problems, Journal of American Ceramic Society, vol 57, 1959, pp.311-314
31. Brindley, G.W., and Nakahira, M., The Kaolinite-Mullite Reaction - series II. Metakaolin, Journal of American Ceramic Society, vol 57, 1959, pp.315-318
32. Buck, A.D., Recycled Concrete, Highway Research Record 430, 1973.
33. Buck, A.D., Recycled Concrete as a Source of Aggregate, ACI Journal, Vol. 74, No.5, 1977, pp.212-219.
34. F.Tomosawa and T.Noguchi, Towards completely recyclable concrete ; Concrete Technology the century of environment, Proceeding of internation workshop Hakodate, Intergrated design and environment issues in concrete technology, E&FN SPON, 1996
35. Geradu, J.KA., and Hendriks, C.F., Recycling of road pavement materials in the Netherlands, Rijkswaterstaat Communication No. 38, the Hague, 1985.
36. Hansen, T.C., Recycling of Demolished Concrete and Masonry, RILEM Report6, E&FN SPON, 1992.
37. Hasaba, S., Kawamura, M., Toriik, K., Drying Shrinkage and Durability of Concrete Aggregate, Translation of the Japan Concrete Institute, No. 3, 1981, pp.55-60.
38. Itoh, T. and Frondistou-Yannas, S., Ec-onomic Feasibility of Concrete Recycling, Asce Journal of the Structural Division, Vol.103, April, 1977.

39. Karra, T., Evaluation Technique des Possibilities D'emplois des Dechets Aans la Construction., Rechrche Experimentale Applique au Cas de Beton Fabrique a Partier de Ganulats de Betons Recycles, 1986.
40. Mielenz, R.G., White, L.P., and Glantz, O.J., Effect of calcination on natural pozzolanas, Am. Soc. Testing Mat. Spec. Techn. Publ. 99, 1950, pp.43-91
41. Proposed Standard for the Use of Recycled Aggregate Concrete, Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, 1977.
42. Ravindraraja, R.S., and Tam,T.C. Pro-perties of Concrete Made with Crushed Concrete as coarse aggregate, Magazine of Concrete Research, 37, No. 130. 1985.
43. Schneider. U., Diederichs. u., WeiB. R., Hochtemperatur Verhalten von Festbeton(High Temperature Behaviour of Concrete), Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten Von Bauteilen, Arbeitsbericht 148, Braunschweig, 1977
44. Schneider. U., Diederichs. U., Rosenberg. W., WeiB. R., Hochtemperatur Verhalten von Festbeton (High Temperature Behaviour of Concrete), Sonderfor- schungsbereich 148, Arbeitsbericht 1978/80. Teil II, B3-1/142/ Technical University of Braunschweig, 1980
45. Seaman. J. G. W. Wash, Variation of Mortar and Concrete Properties with Temperature, ACI Journal, vol.54 no.5, 1957. 11.

국토교통기술촉진 연구사업 - 무기계 건설폐기물 재자원화 기술을 이용한
환경 배려형 시멘트 제조 원천기술 개발

환경 배려형 시멘트의 품질관리 가이드라인

2018.12



한양대학교 에리카산학협력단

목 차

1장 서론	1
1.1 환경배려형 시멘트의 정의	1
1.2 환경배려형 시멘트의 특성	2
1.3 용어 정의	4
2장 환경배려형 시멘트의 구성 재료	8
2.1 일반 사항	8
2.2 무기계 건설폐기물	8
2.3 성분조정재	9
3장 환경배려형 시멘트의 물성	12
3.1 환경배려형 시멘트의 수화반응	12
3.2 환경배려형 시멘트의 유동특성 및 강도특성	14
4장 제 조	18
4.1 일반 사항	18
4.2 최적화를 통한 원료조합비 도출	18
5장 검사	22
5.1 일반 사항	22
5.2 재료의 검사	22
5.3 제조설비의 검사	22
5.4 환경배려형 재생시멘트를 사용한 콘크리트의 검사	22
6장 유지관리	24

제1장 서론

1.1 환경배려형 시멘트의 정의

1.2 환경배려형 시멘트의 특성

1.3 용어 정의

제1장 서론

1.1 환경배려형 시멘트의 정의

❖ 환경배려형 시멘트란, 무기계 건설폐기물을 시멘트의 주원료인 석회석의 대체재료로 활용하여 화학적 특성 및 수화성 회복 프로세스를 개발한 시멘트이다.

무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 시멘트는 타일, 유리, 벽돌, 블록, ALC, 석고보드, 콘크리트 미분말 등 CaO 및 SiO₂를 다량 포함한 폐기물을 재생시멘트의 주원료인 석회석의 대체재료로 활용하여 제조한 시멘트로써 화학적 특성을 토대로 과학적인 최적 원료 조성을 실시하고 최적의 수화성 회복 프로세스를 개발하여 제조한 시멘트이다.

무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 시멘트를 재료로 이용하여 콘크리트와 유사한 물리적·화학적 특성을 얻을 수 있으며, 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하면 시멘트의 제조과정에서의 탈탄산 반응 억제에 따른 CO₂ 발생량을 저감할 수 있다. 또한, 자원(석회석) 절감 및 폐기물을 저감하는 등의 환경 보존에도 기여할 수 있으나, 유사한 입도 및 입형에 의해 완전히 분리배출되지 못한 폐미분말 및 건설폐기물이 악영향을 미칠수 있으니 폐기물 수급에 의한 품질 관리에 유의해야 한다.



그림 1.1 환경배려형 시멘트 개념

1.2 환경배려형 시멘트의 특성

- ❖ 무기계 건설폐기물을 주원료로 활용하며 보통 포틀랜드 시멘트와 제조 및 사용방법이 동일하다.

리사이클재료인 폐미분말을 시멘트의 주 원료로 활용한 재생시멘트는 환경부하의 저감이 가능하며, 보통 포틀랜드 시멘트와 제조 및 사용방법 등이 동일하다. 단, 무기계 건설폐기물 중 폐미분말로부터 완전히 분리·배출하지 못한 잔골재미분말의 혼입율에 따라 강도특성, 유동특성이 상이하다.

(1) 환경부하 측면에서의 환경배려형 시멘트

무기계 건설폐기물의 화학조성이 현장별 배합 및 재령에 따라 상이하기 때문에 사용 무기계 건설폐기물에 따라 재생시멘트의 주원료로 사용되는 비율이 다르지만, 통상적으로 전체 시멘트 원료조합비의 약 25%이상을 무기계 건설폐기물이 차지할 수 있다. 무기계 건설폐기물의 사용량만큼 석회석의 사용량은 줄어들기 때문에 자원고갈 및 재료생산을 위한 에너지 및 온실가스 발생량을 저감시킬 수 있다. 또한 시멘트 산업에서 발생하는 온실가스량 중 약 83%가 시멘트 제조 소성공정에 의한 것으로 석회석에 의한 탈탄산 반응에 기인한 것으로 폐미분말을 석회석 대체원료로 사용함으로써 탈탄산 반응에 기인한 온실가스 배출이 줄어들어 시멘트 산업에서 발생하는 온실가스량이 최대 50%이상 저감이 가능하다.

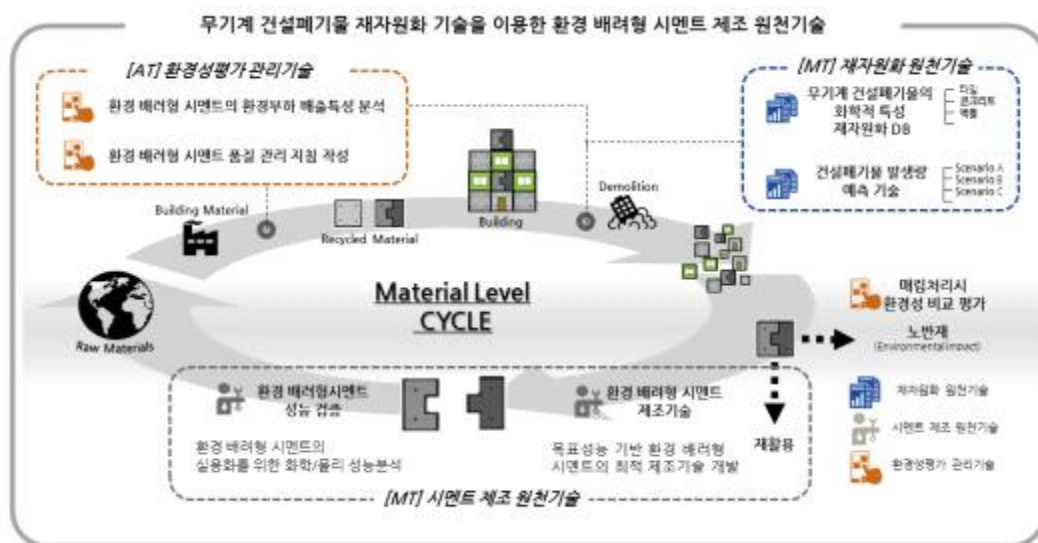


그림 1.2 재료 라이프사이클 관점의 재생시멘트의 환경부하 감축

(2) 제조방법 측면에서의 환경배려형 시멘트

원료준비 단계에서 폐콘크리트로부터 굵은골재 및 잔골재를 제거하여 폐미분말을 추출 및 무기계 건설폐기물의 분말화 공정이 추가되며, 이후 OPC를 제조하는 과정과 동일한 설비와 방법에 의해 제조할 수 있다.

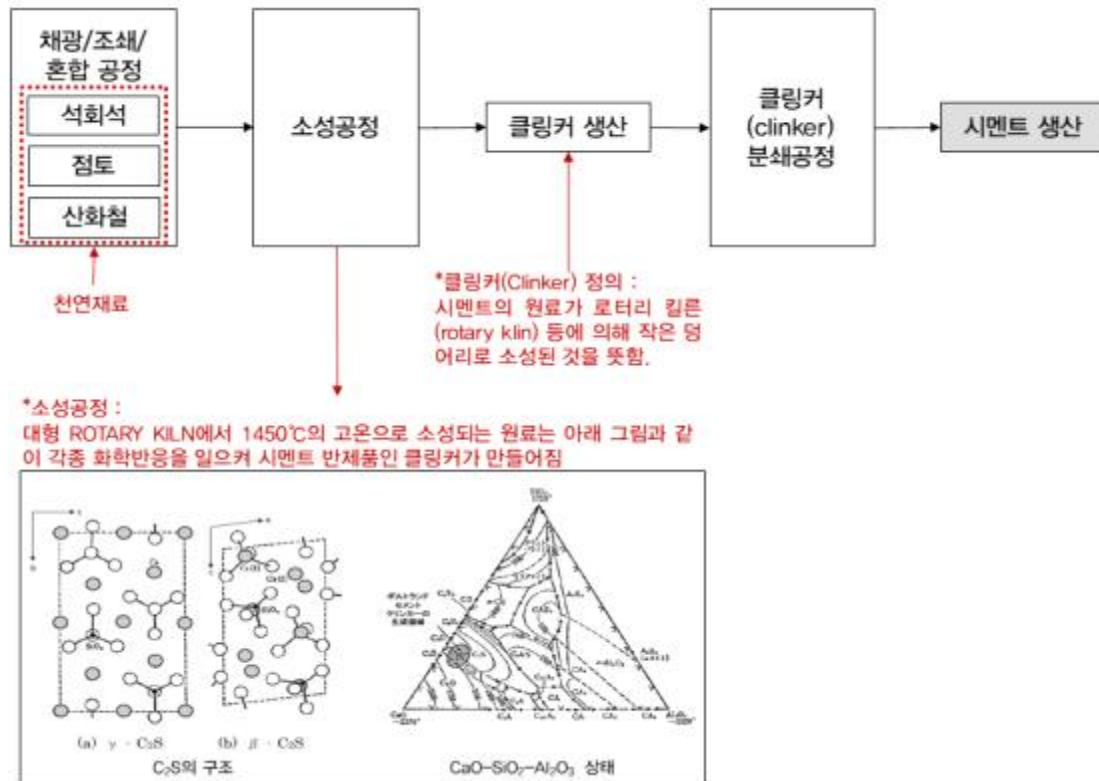


그림 1.3 기존 보통시멘트 제조공정

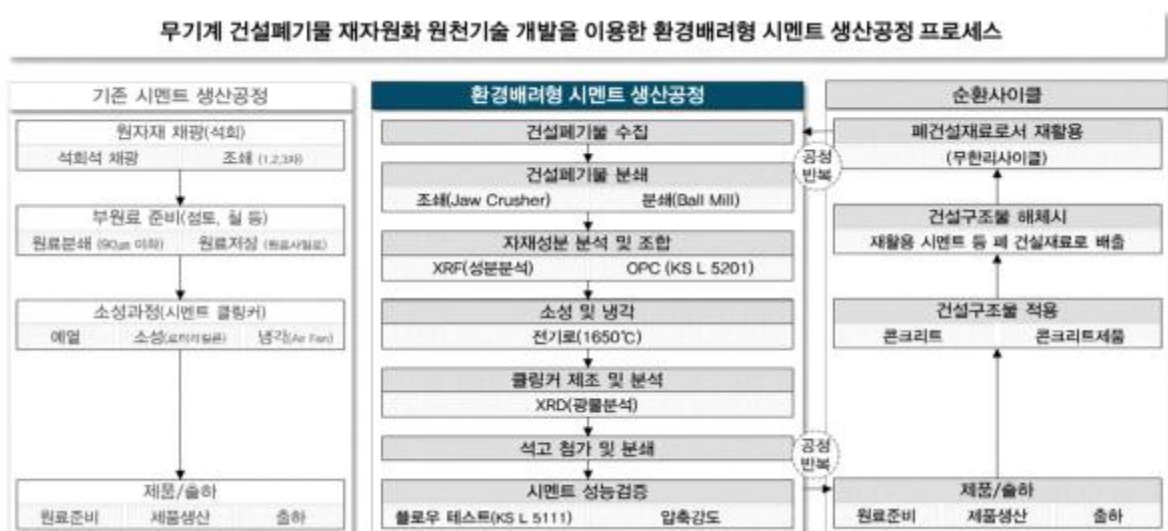


그림 1.4 환경배려형 시멘트 제조공정

(3) 성능 측면에서의 환경배려형 시멘트

무기계 건설폐기물을 활용한 재생시멘트는 폐미분말 내 잔골재미분이 모두 제거된 경우 OPC와 상당히 유사한 강도특성, 유동특성을 가지지만, 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 Quartz 결정형태의 규산질에 의해 성능저하를 야기한다.

(4) 시멘트의 구성화합물 생성기작

그림 3과 같이, 제강슬래그를 함유되어 있는 수산화칼슘이 물에 용해되어 고로슬래그 미분말을 알칼리 자극하여 비정질상의 Si, Al, Ca 등의 원소가 수화 반응하여 경화한다. 또한 플라이애시를 첨가하는 경우에는 플라이애시가 Ca와 반응(포졸란반응)하여 경화가 촉진된다. 이러한 반응을 촉진하기 위하여 소석회, 시멘트 등의 알칼리 자극재를 필요에 따라 첨가한다.

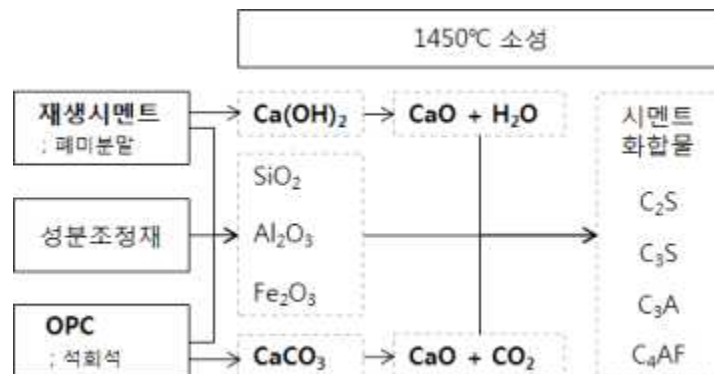


그림 1.5 재생시멘트 및 OPC 구성화합물 생성기작

1.3 용어 정의

- ❖ 환경배려형 시멘트 재료의 최적배합비를 도출하기 위하여 화합물, 화학성분, 원료조합비를 Bogue 계산식을 사용하였으며, 기타 용어에 대한 정의를 기술하였다..

(1) Bogue의 계산식

시멘트의 화학분석치로부터 시멘트의 성질을 추측할 수 있는 수치로서 가장 널리 사용되고 있는 계산식이다. 이 계산식을 통해 얻어진 값은 시멘트 원료의 조합관리 및 시멘트 클링커의 성분관리에 이용된다.

비율, 계수는 다음식과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 구한 시멘트 화합물 조성파 시멘트의 비율 및 계수를 비교한 것은 표 1.1과 같다.

$$HM(\text{수경율}) = \text{CaO} - 0.7\text{SO}_3 / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$LSD(\text{석회포화도}) = \text{CaO} - 0.7\text{SO}_3 / (2.8\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$SM(\text{규산율}) = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$IM(\text{철율}) = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

표 1.1 포틀랜드시멘트의 비율·계수와 Bogue 조성(%)

시멘트	H.M	S.M	I.M	A.I	L.S.D	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄
보통	2.10	2.7	1.7	4.2	0.91	52	24	9	9	3
조강	2.22	2.7	1.9	4.2	0.96	62	14	9	8	4
중용열	2.03	3.0	1.1	5.9	0.87	47	32	4	11	3

(2) free-CaO

실제 페미분말 내 다량 혼입되어있는 잔골재 미분말에서 기인한 Quartz 결정형태의 규산질에 의해 kaolinite, halloysite, montmorillonite 등의 결정형태를 가지는 규산질보다 소성성이 다소 떨어지기 때문에 시멘트 구성화합물이 Bogue 계산값에 의한 결과와 다소 다를 우려가 있으므로 재생시멘트 제조시 반드시 점검해야한다. 이는 시멘트 품질관리 지수로 $1 \pm 0.2\%$ 를 사용하며 측정방법은 하기와 같다.

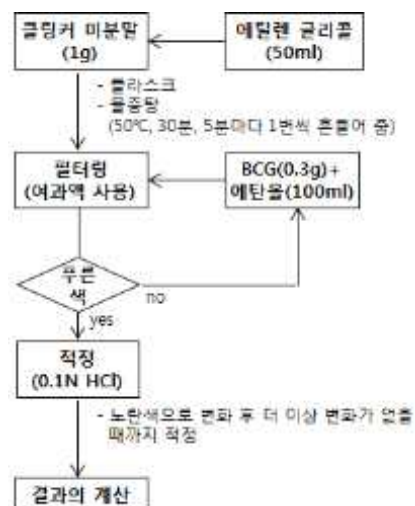


그림 1.4 free-CaO함량 측정

(3) 시멘트 킬른 더스트 (cement kiln dust, CKD)

CKD는 특히 킬른시스템에서 나오는 부분 하소된 CKD로써, 롱드라이 및 습식 킬른 시스템 먼지제거 유닛에서 부분 하소된 상태로 배출되는 킬른 투입원료 등이 해당된다. 특히 저알칼리 클링커 제조의 경우, CKD와 우회 먼지를 추출해 제거하면 지나친 투입 요소의 순환(알칼리, 유황, 염소)을 통제할 수 있다. ‘CKD’는 우회 시스템 등을 포함하여 시멘트 킬른에서 배출되는 모든 더스트를 지칭하기도 한다.

(4) 대체 연료 (alternative fuels)

열 에너지원으로 사용되면서 재래 연료로 분류되지 않는 연료 물질이나 제품. 시멘트 산업에서는 플라스틱, 용제, 폐유, 폐타이어 등의 산업 폐기물과 다양한 종류의 혼합 연료 또는 순수 바이오매스 연료가 사용된다.

제2장

무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 시멘트의 구성 재료

2.1 일반사항

2.2 무기계 건설폐기물

2.3 성분조정재

제2장 무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 시멘트의 구성 재료

2.1 일반사항

- ❖ 포틀랜드 시멘트는 포틀랜드 시멘트 클링커에 적당량의 석고 및 분쇄 조제를 가하여 분말로 한 것이다. 다만, 고로슬래그, 포졸란, 플라이 애시 중 한 종류를 시멘트의 5% 이내 그리고 석회석을 시멘트의 5% 이내에서 혼합 분쇄 또는 단독 분쇄 후 혼합할 수 있다.
- ❖ 클링커 : 규소, 알루미늄, 철, 칼슘 등을 포함하는 원료를 적절한 비율로 혼합하고 그 일부가 용융할 때까지 소성하여 얻어진 것으로 한다.

시멘트의 원료로써 규소, 알루미늄, 철, 칼슘 등을 포함하여야 하고 이를 적절한 비율로 혼합한 후 그 일부가 용융할 때까지 소성하여 얻어진 것을 클링커, 이에 KS L 5313 및 KS L 9005에서 규정하는 석고 또는 이에 준한 것을 첨가 한 것을 시멘트로 한다.

2.2 무기계 건설폐기물

- ❖ 무기계 건설폐기물 가운데, 환경배려형 시멘트 생산에 유리한 무기계 건설폐기물은 폐천장재, 폐시멘트블럭, 폐타일이다.
- ❖ 폐콘크리트 미분말은 재생골재를 생산하는 과정에서 발생하는 미분말로 시멘트 원료 사용하기 위해서는 잔골재 함량을 줄이는 것이 유리하다.

포틀랜드 시멘트의 주성분은 산화칼슘(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3) 순으로 이루어져 있으며 이러한 성분을 함유한 원료들이 적당한 비율로 혼합되고 일부가 용융·소성된 클링커(Clinker)에 적당량의 석고가 가해져 분말의 형태로 된 것이 시멘트이다. 시멘트 원료의 대체 재료로서 이용 가능한지 분석하였으며, 이를 위해 다양한 무기계 건설폐기물의 화학성분을 수집하여 각각의 화학성분을 분석하였다. 분석된 화학성분들을 살펴보면 폐석고보드의 경우 SiO_2 의 함량이 적고 시멘트에서 가장 중요한 성분인 CaO 성분을 다량함유하고 있어 시멘트의 주원료인 석회석(천연)의 대체 재료로서

가장 유용하게 이용될 것으로 분석되었다. 또한 시멘트 원료 중에서 CaO 이외 중요한 SiO₂와 Al₂O₃성분은 대부분 점토질 원료에서 공급을 받는다. 통상 점토속의 실리카는 65%이상 함유되어 있는 것을 사용하는 것으로 알려져 있으며 기존 문헌 고찰을 통해 본 연구에서 수집된 무기계 건설폐기물 중에서는 페타일, 폐벽돌이 대체 가능할 것으로 분석되었다. 규산질 원료는 점토질 원료의 SiO₂ 성분이 부족할시 보충 원료로 사용되며 SiO₂와 Al₂O₃성분비가 6:1이상이고 SiO₂ 성분의 함유량이 80% 이상인 것이 사용된다. 본 연구에서는 폐유리, 폐벽돌, 폐콘크리트 미분말 등이 활용 가능할 것으로 분석 되었다. 마지막으로 산화철 원료를 대체할 수 있는 무기계 건설폐기물은 적절한 것으로 판단되는 부분이 없어 철광 산업에서의 산업부산물인 전로슬래그 등을 통해 보충되어야 한다.

표 2.1 무기계 건설폐기물의 화학성분

(단위 : 중량백분율, %)

번호	건설폐기물	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	L.O.I	합계
1	폐천장재	5.84	1.10	1.06	39.21	0.54	0.00	0.32	24.62	0.41	0.52	26.39	100.0
2	폐석고보드	0.91	0.32	0.30	36.42	0.22	0.30	0.12	39.29	0.03	0.13	21.96	100.0
3	폐시멘트블럭	50.69	10.01	3.93	19.56	1.26	0.67	3.69	0.99	0.46	0.63	8.12	100.0
4	폐콘크리트 미분말	55.46	10.28	3.42	22.35	1.16	0.92	3.77	1.20	0.37	0.71	0.37	100.0
5	페타일	57.46	15.95	2.62	9.55	0.48	1.02	2.23	0.44	0.72	1.32	8.22	100.0
6	폐점토벽돌	63.05	21.00	5.80	2.13	0.71	1.33	3.49	0.02	0.74	0.50	1.24	100.0

*L.O.I(Loss On Ignition) : 강열감량

2.3 성분 조정재

- ❖ 석회석을 성분조정재로 사용하는 것이 클링커의 화학조성을 맞추기에 가장 효율적이며 SiO₂ 함량이 낮은 전로슬래그를 사용하였다.

포틀랜드 시멘트의 주원료인 석회석을 성분조정재로 사용하는 것은 클링커의 화학조성을 맞추기에 가장 효율적이며, Bogue 계산식 중 IM(철율)의 조정을 용이하게 하고 SiO₂와 CaO가 주성분을 이루는 고로슬래그, 전로 슬래그 등의 사용이 가능하나 SiO₂의 함량이 낮고 Fe₂O₃의 함량이 높은 전로슬래그의 사용이 보다 효율적일 것이다.

표 2.3 성분 조정재의 화학조성

조성재	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	Sum
석회석	6.00	1.42	0.82	48.20	2.84	0.08	0.42	39.90	99.68
고로 슬래그	33~35	14~18	2.0	38~45	4~8	-	-	0.00	100
전로 슬래그	14.90	2.74	38.40	31.80	6.99	0.06	0.05	0.11	95.05

제3장

무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 시멘트의 물성

3.1 환경배려형 시멘트의 수화반응

3.2 환경배려형 시멘트의 유동특성 및
강도특성

제3장 무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 시멘트의 물성

3.1 환경배려형 재생시멘트의 수화반응

❖ 수화에 따른 free-CaO, XRD의 분석결과 OPC와 유사한 성능을 나타내는 것으로 나타났다.

3.1.1 Free-Cao

- OPC 및 폐미분말 잔골재 미분말 혼입을 별 재생 시멘트 클링커의 F-CaO 측정값은 모두 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준인 $1 \pm 0.2\%$ 내에 부합하는 것으로 나타남
- 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 F-CaO량이 증가하다 특히, S30의 경우 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준 범위 내에 속하기는 하나 다소 높은 수준으로 나타남
- 이는 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 잔골재에서 기인한 Quartz 결정형태로 다량 함유된 SiO₂의 CaO와의 반응성이 떨어지기 때문, 즉 C₂S, C₃S의 클링커 주요 화합물로의 소성성이 떨어지기 때문인 것으로 추정됨
- 그러나 모든 타입의 유리 석회량은 OPC품질기준을 상회하는 결과로 상당히 우수한 소성성을 가진다고 평가할 수 있음

3.1.2 XRD

- 모든 배합에서 보통 포틀랜드시멘트 클링커 광물상인 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF가 검출되는 것을 확인할 수 있었으며 잔골재 혼입율이 낮을수록 피크 값이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수가 있음
- 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 52°부근에서 검출되는 C₃S의 피크값이 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 잔골재 혼입율의 증가는 C₃S의 합성에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있음

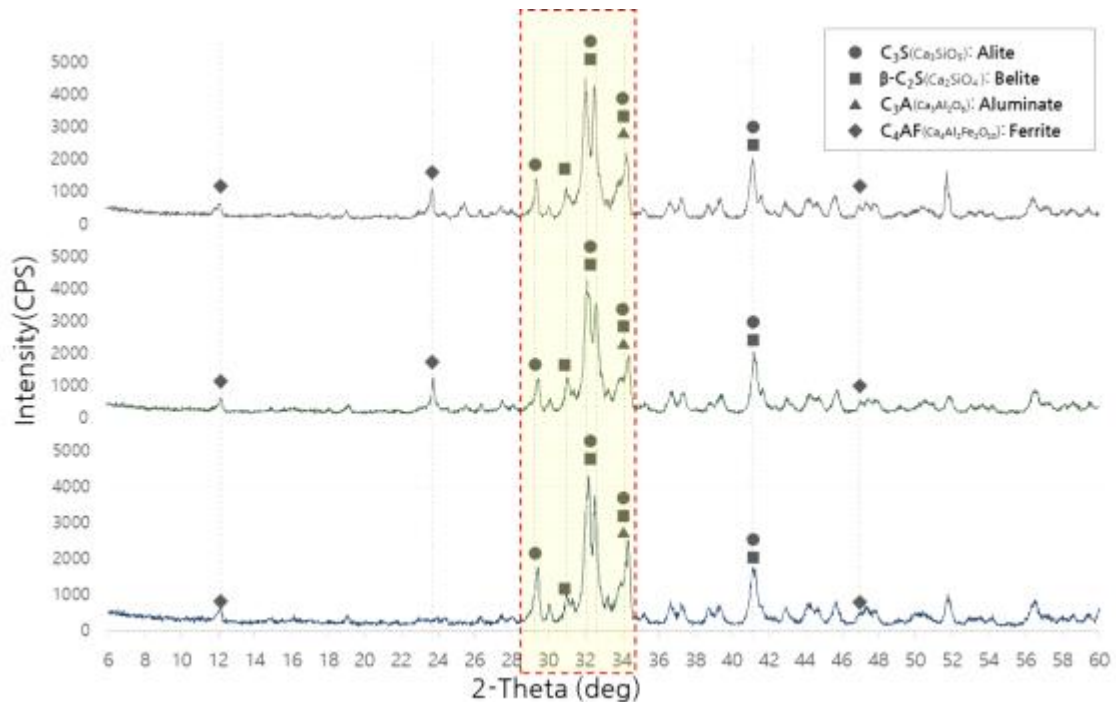


그림 3.1. OPC 및 재생시멘트의 XRD 곡선

- S30에서 37°부근에서 CaO가 일부 검출되었는데 이는 잔골재 혼입율이 가장 높은 배합으로 Quartz성분의 SiO₂가 다량 혼입되면서 CaO와의 합성이 완전히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 추정됨
- OPC와 상당히 유사한 수준의 강도 및 형상을 나타내고 있기 때문에 여러 제반 물성 및 내구 특성 또한 OPC보다 다소 낮으나 상당히 유사할 것으로 예측됨

3.1.3 주요화합물량

- 모든 배합에서 재령이 증가할수록 CH함유율은 증가하고 있으며, 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 CH함유율 증가폭이 커지는 것으로 나타남
- 이는 다목적 최적화의 결과로 폐미분말 내 잔골재 혼입율의 증가에 따라 SM이 다소 커지면서 C3S 및 C3A의 함유량이 감소하고 C2S의 함유량이 증가하기 때문인 것으로 판단됨
- 또한 폐미분말 내 잔골재 미분말의 혼입율이 증가할수록 Ca(OH)₂ 함유율, 즉 수화율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 잔골재 내 함유되어 있는 낮은 소성성의 Quartz 결정형태의 SiO₂의 증가에 의한 것으로 추정됨

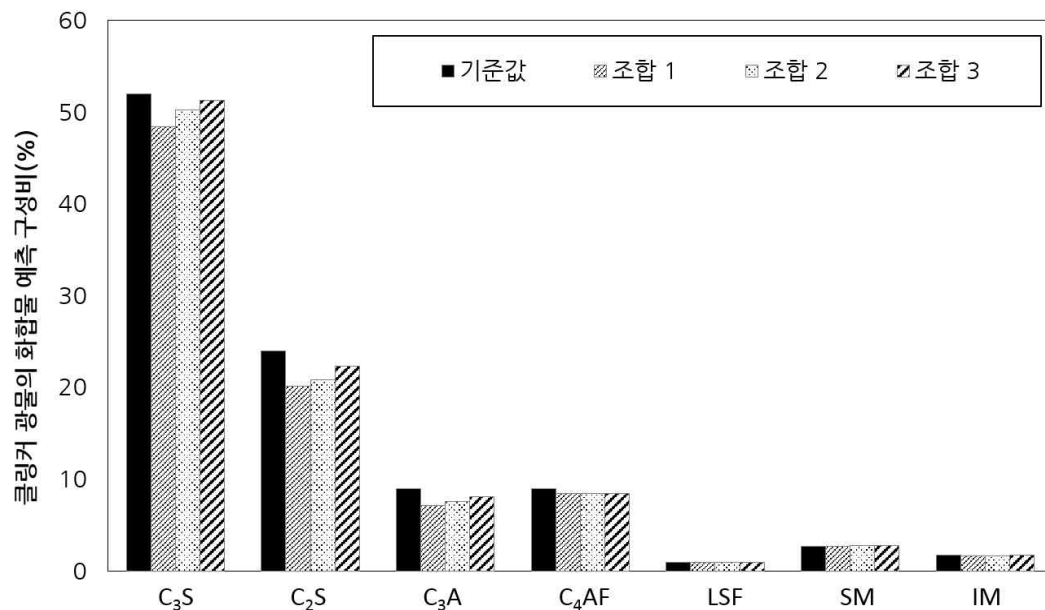


그림 12. Composition ratio estimation of chemical composition of clinker

그림 3.4. 폐미분말 내 잔골재 혼입율에 따른 재생시멘트 주요 화합물량

3.2. 환경배려형 재생시멘트의 유동특성 및 강도특성

3.2.1 환경배려형 재생시멘트의 유동특성

① 시험체 제작

시험체는 KS F 2403:2014에 준하여 제작한다.

② 슬럼프 플로우 시험

표 3.2 OPC 및 재생시멘트 몰탈의 슬럼프 플로우 측정결과

구분	조합 1	조합 2	조합 3	OPC
플로우시험(mm)	206	183	172	190~210

- S0 및 S10의 경우 OPC보다도 높은 유동특성을 가지는 것으로 나타났으나, S20 및 S30의 경우 급격히 플로우 값이 감소하는 것을 확인할 수 있음
- 이는 폐미분말 내 혼입되어 있는 잔골재에서 기인한 SiO₂(Quarz) 성분으로 인하여 재생시멘트 내 유리석회의 소화(消和) 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 유동성이 저하하는 것으로 판단됨

- 또한 OPC에 비해 W/C의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며 이는 강도 및 내구성 조정에 큰 이점으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 모든 타입의 재생시멘트가 시공성 관련 요구성능을 만족하며 가장 낮은 유동성을 나타낸 S30의 경우에도 OPC의 90%이상의 유동성을 나타냄
- 따라서 OPC 수준의 현장적용성이 가능할 것으로 판단됨

3.2.2 환경배려형 재생시멘트의 강도특성

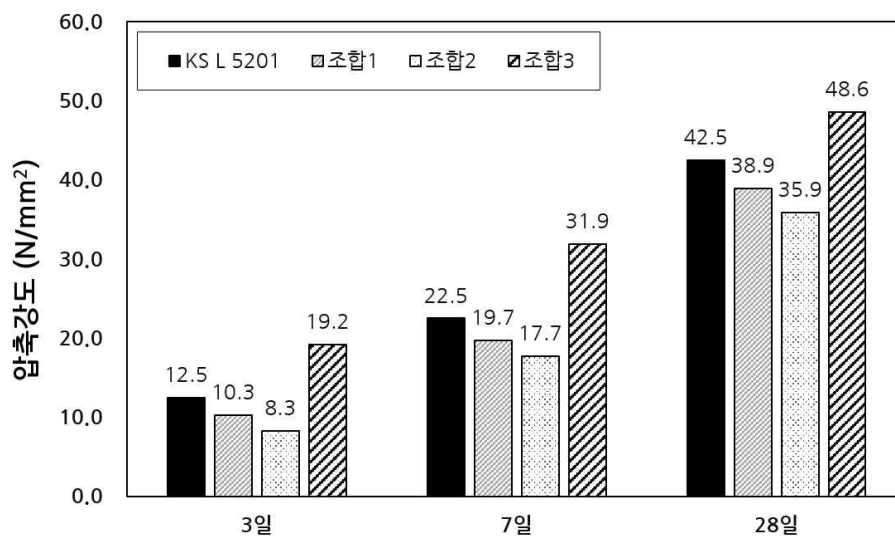


그림 3.9. OPC 및 재생시멘트 몰탈의 강도특성 (3, 7, 28 Days)

- OPC 및 환경배려형 재생시멘트의 압축강도를 측정해 본 결과 OPC 대비 75.40~100.74%에 상응하는 수준으로 높은 것으로 나타남
- 특히 S0의 W/C 40%의 재령 28일 압축강도의 경우 81.85MPa로 동일 조건에서의 OPC (81.25MPa) 보다도 높은 것으로 나타남
- 이는 소성성 향상을 위해 분말도를 4000으로 다소 높였기 때문에 수화반응이 활발히 일어날 수 있었기 때문인 것으로 생각됨
- 또한 다목적 최적화를 통한 화학적 성질을 토대로 시멘트 주요화합물 조성비를 미리 예측하여 조합원료의 최적배합비를 도출하였기 때문인 것으로 추정됨
- 그럼에도 불구하고 폐미분말 내 잔골재 혼입율이 증가할수록 압축강도가 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞절에서 확인한 수화율과 관련하여 폐미분말 내 잔골재 미분에서 기인한 Quartz 결정형태의 SiO₂의 낮은 소성성때문인 것으로 생각됨

- 그러나 KS L 5201 「포틀랜드 시멘트」에서 제안하는 물리 성능 규정을 모두 만족하는 것으로 나타나 포틀랜드 시멘트의 수준으로 실용화가 가능할 것으로 판단됨.

표 3.2 포틀랜드 시멘트의 물리 성능

항목		종류				
		1종	2종	3종	4종	5종
압축강도 MPa (N/mm ²)	1일	-	-	10.0 이상	-	-
	3일	12.5 이상	7.5 이상	20.0 이상	-	10.0 이상
	7일	22.5 이상	15.0 이상	32.5 이상	7.5 이상	20.0 이상
	28일	42.5 이상	32.5 이상	47.5 이상	22.5 이상	40.0 이상
	91일	-	-	-	42.5 이상	-

* 1종 : 보통 포틀랜드 시멘트

2종 : 중용열 포틀랜드 시멘트

3종 : 조강 포틀랜드 시멘트

4종 : 저열 포틀랜드 시멘트

5종 : 내황산염 포틀랜드 시멘트

제4장 제 조

4.1 일반 사항

4.2 최적화를 통한 원료조합비 도출

제4장 제 조

4.1 일반 사항

포틀랜드 시멘트와 동일하게 클링커(Clinker)에 적당량의 석고 및 분쇄 조제를 가하여 분말로 한 것을 한다. 다만, 고로슬래그, 포졸란, 플라이 애시 중 한 종류를 시멘트의 5% 이내 그리고 석회석을 시멘트의 5% 이내에서 혼합 분쇄 또는 단독 분쇄 후 혼합 할 수 있다.

4.2 최적화를 통한 원료조합비 도출

재생시멘트를 만들기 위해 사용되는 각 원료의 화학조성분석 값을 KS L 5120 「포틀랜드 시멘트의 화학분석 방법」에 따라 구한 값을 토대로 원료조합비를 도출하여 시멘트 구성화합물 비를 맞추어야 시멘트로써의 성능을 발휘할 수 있다. 특히, 시멘트 구성화합물은 KS L 5201 「포틀랜드 시멘트」의 규정에 따라야 하며, 원료조합비 도출은 아래와 같은 순서로 수행된다.

표 4.1 포틀랜드 시멘트의 화학성분 규정

항목		종류				
		1종	2종	3종	4종	5종
MgO	%	5.0 이하	5.0 이하	5.0 이하	5.0 이하	5.0 이하
SO ₃	%	3.5 이하	3.0 이하	4.5 이하	3.5 이하	3.0이하
강열 감량	%	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
C ₃ S	%	-	50 이하	-	-	-
C ₂ S	%	-	-	-	40 이상	-
C ₃ A	%	-	8.0 이하	-	6.0 이하	4.0 이하

(1) 목표값 설정

화학 성분의 계산으로부터 얻을 수 있는 시멘트 화합물 조성인 LSD(lime saturation degree), SM(silica modulus) IM(iron modulus)을 통하여 시멘트의 성질을 파악할 수 있

으며 주로 일반 시멘트 제조 시 원료 조합의 관리나 성분 관리에 이용된다. C3S, C2S, C3A, C4AF 및 LSD, SM, IM가 보통 포틀랜드시멘트의 관리 기준에 최대한 유사하도록 Excel Solver를 적용 하여 배합비를 구하고자 한다.

(2) 조건설정

시멘트 제조공정에서의 CO₂발생량 감소를 극대화하기 위해 석회석 사용량 비율을 최소값으로 지정한 후 Excel Solver 프로그램을 이용하여 다목적최적화의 최종 결과값인 성분의 조합비를 찾으며 각 원료의 화학조성을 이용하여 LSD, SM, IM의 기준에 부합하는지 검토 및 확인한다.

Excel Solver는 그림 4.1과 같이 구성되어 있으며 그림 4.2와 같이 Excel Solver 모델 설정을 통하여 해를 찾는다. 해 찾기 모델 설정은 먼저 석회석 사용량을 최소로 하는 것을 목표 셀로 지정하였으며 LSD의 허용범위 90~100, SM의 허용범위 2.41~2.8, IM의 허용범위인 1.48~1.73을 제한조건으로 수식을 세웠다. 이 기준은 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 성분 관리기준에 근거하였다.

(3) 원료조합비 도출

표 4.5와 같은 형태로 원료조합비 결과를 구한다.

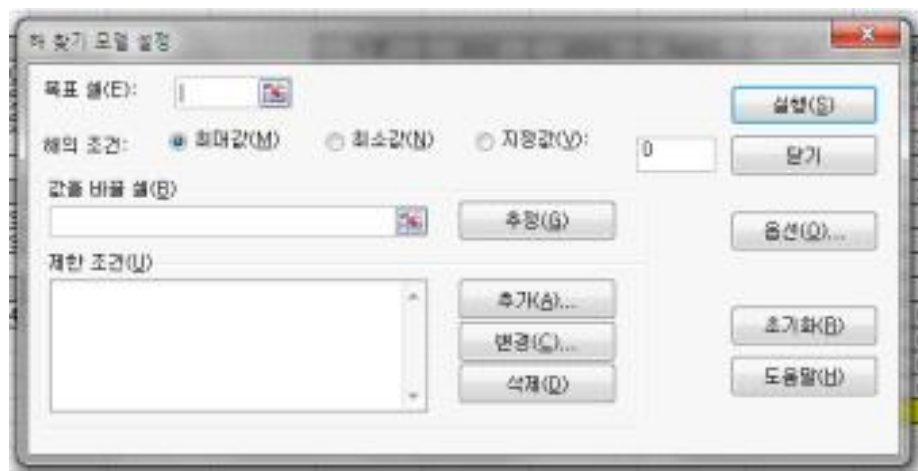


그림 4.1 Excel Solver의 기본 구성



그림 4.2 석회석 최소량에 따른 Excel Solver의 적용

표 4.2 Excel Solver를 이용한 재생시멘트 원료조합비 도출

	구분	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	65%	70%	80%	90%	100%	플랑크 성분관리 기준		
		(S0)	(S10)	(S20)	(S30)	(S40)	(S50)	(S60)	(S65)	(S70)	(S80)	(S90)	(S100)	보통	조강	중용열
조합비	천로슬래그	0.00	0.20	1.13	1.09	1.07	1.05	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02			
	석회석	34.08	76.30	85.25	89.09	91.25	92.64	93.61	93.99	94.32	94.87	95.30	95.65			
	폐미분말무열	65.92	23.50	13.61	9.82	7.68	6.30	5.35	4.97	4.64	4.10	3.67	3.33			
성분관리기준	LSF	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90~100		
	SM	2.66	2.57	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41~2.8	2.65	2.80
	IM	1.55	1.73	1.53	1.56	1.57	1.58	1.59	1.59	1.60	1.60	1.61	1.61	1.48~1.73	1.69	1.00
	C ₃ S	50.13	48.73	48.41	48.27	48.19	48.14	48.10	48.09	48.07	48.05	48.04	48.02	50	67	48
	C ₂ S	26.11	26.70	26.24	26.34	26.39	26.43	26.45	26.46	26.47	26.48	26.49	26.50	26	9	30
	C ₃ A	7.96	9.12	8.48	8.65	8.75	8.81	8.85	8.87	8.88	8.91	8.93	8.94	9	8	5
	C ₄ AF	10.00	9.60	10.93	10.81	10.74	10.69	10.66	10.65	10.64	10.62	1.60	10.59	9	8	11

제5장 검 사

5.1 일반 사항

5.2 재료의 검사

5.3 제조설비의 검사

5.4 환경배려형 재생시멘트를 사용한
콘크리트의 검사

제5장 검 사

5.1 일반 사항

폐미분말을 활용한 환경배려형 재생시멘트가 필요한 성능을 만족하고 있는가를 확인할 수 있도록 합리적이고 경제적인 검사계획을 정하여 제조의 각 단계에서 필요한 검사를 수행해야 한다.

검사는 재생시멘트가 필요한 성능을 만족하고 있는가를 결정하는 기준이 되기 때문에 시험방법이나 합격의 판정은 객관적이어야 한다.

5.2 재료의 검사

필요한 성능을 만족하는 재생시멘트를 제조하기 위해서는 화학성분분석을 통해 검증된 폐미분말 및 성분조정재를 사용하여야 한다. 특히 폐미분말의 경우 현장별 배합 및 재령에 따른 기본적인 화학조성뿐만 아니라 전처리 과정에 따른 잔골재 혼입율에 따른 화학조성이 재생시멘트의 품질에 상당한 영향을 미칠 수 있으며 원료조합비 자체에 지대한 영향을 미치므로 철저한 화학조성 검사 및 관리가 요구된다.

5.3 제조설비의 검사

제조설비의 검사는 「콘크리트 표준시방서」에 정하고 있으며, 재생시멘트도 이에 준한다.

5.4 환경배려형 재생시멘트를 사용한 콘크리트의 검사

재생시멘트의 굳지 않은 상태나 시공 후 구조물이 필요한 성능을 만족하는가를 판단하기 위하여 검사를 수행해야 한다. 검사 결과, 필요한 성능을 만족하지 못하는 경우에는 적절한 처리를 실시하고 그 원인을 명확히 하여 이후 제조를 개선해야 한다,

재생시멘트의 굳지 않은 상태나 시공 후 구조물의 검사 항목, 시기, 회수는 구조물의 중요도와 공사의 규모에 따라 변할 필요가 있기 때문에 적절히 결정한다.

제6장 유지관리

제6장 유지관리

무기계 건설폐기물을 활용한 환경배려형 재생시멘트는 현재까지 얻어진 시험 결과에서 보통 포틀랜드 시멘트와 동등한 각종 물리적·화학적 특성 및 내구성능을 가지는 것으로 판단되지만, 실제로 사용된 환경에서의 장기에 걸친 내구성능은 향후 확인할 필요가 있다.

이를 위해서는 제조된 재생시멘트체가 필요로 하는 성능을 만족하는지를 적절한 시기에 적절한 방법으로 점검하여 확인하는 것이 중요하다. 구체적으로는 재생시멘트를 사용한 콘크리트로 시공된 구조물을 정기적으로 육안 확인 등 콘크리트 구조물과 동일한 점검을 실시하는 것이 바람직하다.

구조물로서 유지관리가 예정된 경우에는 이를 포함하여 유지관리를 실시하는 것이 바람직하다.

이상과 같은 연구 및 조사를 향후 축적하여 재생시멘트에 대한 신뢰성을 보다 높이는 것이 가능하다.

주 의

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