

R&D / 16CTAP-C114806-01

공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발

최종보고서

2018. 09. 10.

주관연구기관 / 한양대학교 에리카산학협력단
공동연구기관 / (주)이에이엔테크놀로지

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

16
CTAP-
C1148
06-01

공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발
최종보고서

2018

국토교통과학기술진흥원

주의

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.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발’(연구개발 기간 : 2016. 06. 22. ~ 2018. 06. 21.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 09. 10.

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단 (대표자) 좌 용 호



공동연구기관명 : (주)이에이엔테크놀로지 (대표자) 신 지 웅

주관연구기관책임자: 태 성 호

공동연구기관책임자: 신 지 웅

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C114806-01	해당 단계 연구 기간	2016.06.22. ~2018.06.21.	단계구분	2/2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발			
연구책임자	태 성 호	해당단계 참여 연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 220,000 천원 기업: 74,000 천원 정부 외: 천원 계: 294,000 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 16 명 내부: 16 명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 400,000 천원 기업: 134,000 천원 정부 외: 천원 계: 534,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 에리카산학협력단 (주)이에이엔테크놀로지			참여기업명	(주)이에이엔테크놀로지
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수: 152	
○ 연구목표 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술(SB-PR0) 개발					
○ 연구내용 1. 확률기반의 공동주택 지속가능성 매개변수 라이브러리 구축 2. 확률기반의 공동주택 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 개발 3. 확률기반의 공동주택 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발					
○ 연구개발성과 1. 확률기반의 공동주택 지속가능성 매개변수 라이브러리 2. 확률론적 분석방법을 이용한 지속가능성 평가 시스템 시작품(SB-PR0) 3. 결정론적 분석방법을 이용한 지속가능성 평가 시스템 시작품(SB-DET) 4. 공동주택 간이 에너지소비량 평가기술 시작품(iBEST-Home) 5. 확률기반의 공동주택 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼					
○ 정량적 성과 1. 논문게재: SCI 논문 8편, 비SCI 논문 3편 2. 지적재산권: 특허출원 2건, 특허등록 2건, SW등록 3건 3. 학술발표: 3건 4. 인력양성: 6명					
○ 활용계획 녹색건축물 관련 국가 경쟁력 제고를 위해 정부, 건축설계 사무소 및 친환경건축 컨설팅사무소, 시행사 및 시공사 등의 지속가능성 평가 및 의사결정 지원도구로 활용					

〈 국 문 요 약 문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구는 공동주택의 설계요소별 건축자재 투입량 및 에너지소비량에 대한 확률기반의 매개변수 라이브러리(PSP)를 구축하고 이를 몬테카를로 시뮬레이션과 연계하여 공동주택의 지속가능성을 확률기반으로 평가하는 원천기술 및 시작품(PSA), 그리고 본 평가기술을 이용한 이해관계자의 의사결정을 확률기반으로 지원하는 실무 매뉴얼(PSM) 개발을 포함하는 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술(SB-PRO) 개발을 최종 목표로 한다. ■ 주요 연구개발 내용 ① 확률기반의 공동주택 지속가능성 매개변수 라이브러리(PSP) 구축 ② 확률기반의 공동주택 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품(PSA) 개발 ③ 확률기반의 공동주택 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼(PSM) 개발				
연구개발성과	■ 연구개발성과 ① 확률기반의 공동주택 지속가능성 매개변수 라이브러리 • 확률론적 분석방법을 이용한 공동주택 지속가능성 평가 시스템(SB-PRO)의 기초 자료로 활용되는 주요 건축자재 투입물량 및 에너지소비량의 확률분포 모형 ② 확률론적 분석방법을 이용한 공동주택 지속가능성 평가 시스템 시작품(SB-PRO) • 확률론적 분석방법(몬테카를로 시뮬레이션)을 이용하여 공동주택의 지속가능성을 평가하는 Excel 기반 시스템 시작품 ③ 결정론적 분석방법을 이용한 공동주택 지속가능성 평가 시스템 시작품(SB-DET) • 결정론적 분석방법을 이용하여 공동주택의 지속가능성을 평가하는 Web 기반 시스템 시작품 ④ 공동주택 간이 에너지소비량 평가기술 시작품(iBEST-Home) • 공동주택의 지속가능성을 평가하기 위해 공동주택의 에너지소비량을 용이하게 예측하는 Web 기반 시스템 시작품 ⑤ 확률기반의 공동주택 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 • 확률론적 분석방법을 이용한 공동주택 지속가능성 평가 시스템(SB-PRO)의 실무 매뉴얼 ■ 정량적 성과 ① SCI 논문: 8편 ② 비SCI 논문: 3편 ③ 특허출원: 2건 ④ 특허등록: 2건 ⑤ SW등록: 3건 ⑥ 학술발표: 3건 ⑦ 인력양성: 6명				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	녹색건축물과 관련한 국가의 경쟁력 제고를 위해 정부, 건축설계 사무소 및 친환경건축 컨설팅사무소, 시행사 및 시공사 등에서 공동주택의 전과정 지속가능성을 평가하여 의사결정을 지원하는 도구로서 활용				
핵심어 (5개 이내)	공동주택	지속가능성	전과정	확률	평가기술

< SUMMARY >

Purpose & Contents	This study aims the development of Sustainable Building-PRObability (SB-PRO) including establishment of the probabilistic sustainability parameter library (PSP) for the amount of building materials and energy consumption in design component of apartment buildings, the probabilistic sustainability assessment technique (PSA) making a connection with Monte Carlo Simulation and the probabilistic sustainability decision making implementation manual (PSM) using the Assessment technique. ■ Main Research ① Establishment of a probabilistic sustainability parameter library (PSP) for apartment buildings ② Development of a probabilistic sustainability assessment technology and trial system (PSA) for apartment buildings ③ Development of a probabilistic Sustainability decision making implementation manual (PSM) for apartment buildings				
Results	■ Research Results ① Probabilistic sustainability parameter library for apartment buildings • The probabilistic distribution model of major building materials and energy consumption for SB-PRO. ② Sustainable Building Evaluation Tool - Probabilistic Approach (SB-PRO) • An excel based trial system to evaluate sustainability of apartment buildings using probabilistic analysis method (Monte Carlo Simulation) ③ Sustainable Building Evaluation Tool - Deterministic Approach (SB-DET) • An web based trial system to evaluate sustainability of apartment buildings using deterministic analysis method ④ Integrated Building Energy Simulation Tool - Home Version (iBEST-Home) • A web based trial system to predict the energy consumption of apartment buildings to evaluate sustainability. ⑤ Probabilistic Sustainability decision making implementation manual for apartment buildings • An implementation manual for the SB-PRO. ■ Quantitative Research Results ① International Journal Paper (SCI): 8 ② Korean Journal Paper (KCI): 3 ③ Patent Application: 2 ④ Patent Registration: 2 ⑤ Software Registration: 3 ⑥ Conference Proceeding: 3 ⑦ Workforce Development: 6				
Expected Contribution	Use as a sustainability assessment system and decision making support tool of apartment buildings in the government, architect office, green building consulting office, developer, and constructor to improve national competitiveness of green building.				
Keywords	Apar tment Housing	Sustainability	Life Cycle	Probability	Assessment Technology

< Contents >

1. Introduction of R&D project	9
2. Status of domestic and overseas technology development	17
3. Research content and achievements	21
4. Achievement of goal and contribution to related field	121
5. Plan to utilize R&D achievements	125
6. Information on overseas technology obtained in the period or research	127
7. Security rating of R&D achievement	137
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	139
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks ..	141
10. Representative research achievements of R&D project	143
11. Others	145
12. Reference	147

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	9
2. 국내외 기술 개발 현황	17
3. 연구 수행 내용 및 성과	21
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	121
5. 연구개발성과의 활용 계획	125
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	127
7. 연구개발성과의 보안등급	137
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	139
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	141
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	143
11. 기타 사항	145
12. 참고 문헌	147

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 최종 목표

■ 본 연구는 공동주택의 설계요소별 건축자재 투입량 및 에너지소비량에 대한 확률기반의 매개변수 라이브러리(PSP)를 구축하고 이를 몬테카를로 시뮬레이션과 연계하여 공동주택의 지속가능성을 확률기반으로 평가하는 원천기술 및 시작품 개발(PSA), 본 평가기술을 이용한 이해관계자의 의사결정을 확률기반으로 지원하는 실무 매뉴얼(PSM) 개발을 포함하는 **공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술(SB-PRO) 개발을 최종 목표로 함.**

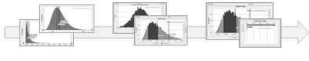
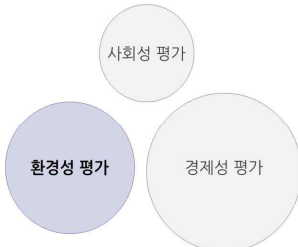
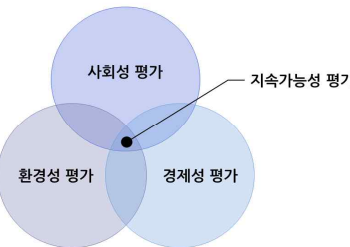
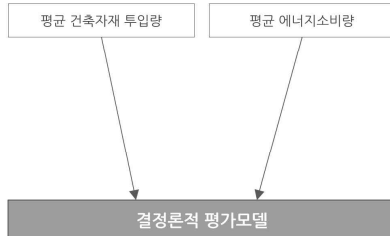
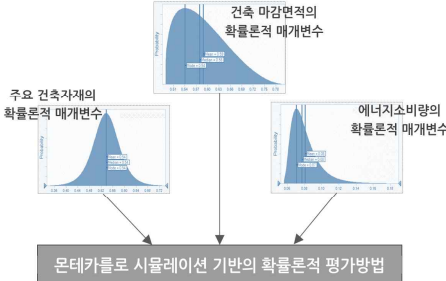
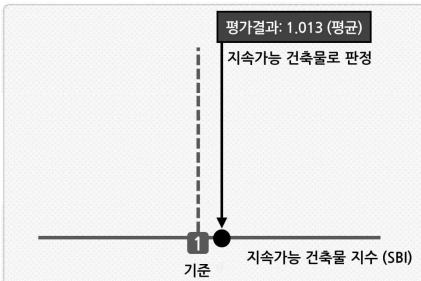
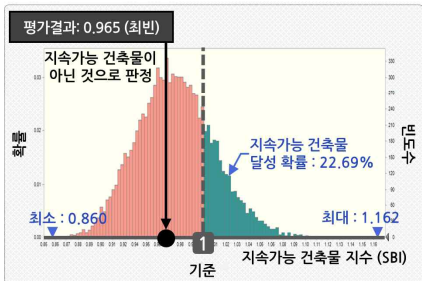
연구개발 목표	공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발 [기초원천 기술 TRL 2 → 4]																														
창의·도전성	창의성 건축물 지속가능성 평가와 확률론적 방법 접목 [세계 최초]	도전성 건축물 전과정 지속가능성 평가 신개념 정립 [국내 최초]	기초 원천성 미래 국제 시장의 선도가 가능한 건축물 지속가능성 평가 원천기술																												
부합·중요성	부합성 국토교통 중장기 R&D 전략인 녹색건축물 보급·확산을 위한 전략적 핵심 기술	시의성 제1차 녹색건축물 기본계획 내 기반구축 과제로 2018년 기술개발 완료 가능	중요성 녹색건축물 계획과 실현을 위한 지식기반의 실용적 핵심 기술																												
연구 내용	① 확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리 구축	② 확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 개발	③ 확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발																												
	한양대 주요 건축자재의 확률론적 매개변수라이브러리구축	한양대 확률기반의 전과정 지속가능성 평가 원천기술 개발	한양대 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발																												
	EAN 에너지 소비량의 확률론적 매개변수라이브러리구축	한양대 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 시작품 개발	EAN 확률기반의 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발																												
	① 확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리	② 확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품	③ 확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼																												
최종 성과물	<table><tr><th>구분</th><th>분석지표</th><th>투입분량 및 미검역 특성 분석 변수</th><th>확률론적 모델</th></tr><tr><td rowspan="2">세미콘</td><td rowspan="2">배덕면적</td><td>(R=0.986)</td><td>투입 분량 (㎡)</td><td>Beta 분포</td></tr><tr><td>(R=0.942)</td><td>투입 분량 (ton)</td><td>Lognormal 분포</td></tr><tr><td rowspan="2">철근</td><td rowspan="2">전용면적</td><td>(R=0.922)</td><td>투입 분량 (㎡)</td><td>Lognormal 분포</td></tr><tr><td>(R=0.889)</td><td>투입 분량 (ton)</td><td>Lognormal 분포</td></tr><tr><td rowspan="2">단열재</td><td rowspan="2">배덕면적</td><td>(R=0.915)</td><td>투입 분량 (㎡)</td><td>Weibull 분포</td></tr><tr><td>(R=0.898)</td><td>투입 분량 (ton)</td><td>Logistic 분포</td></tr></table> 30개 단지 (342개동) 콘크리트벽돌 유리 창호	구분	분석지표	투입분량 및 미검역 특성 분석 변수	확률론적 모델	세미콘	배덕면적	(R=0.986)	투입 분량 (㎡)	Beta 분포	(R=0.942)	투입 분량 (ton)	Lognormal 분포	철근	전용면적	(R=0.922)	투입 분량 (㎡)	Lognormal 분포	(R=0.889)	투입 분량 (ton)	Lognormal 분포	단열재	배덕면적	(R=0.915)	투입 분량 (㎡)	Weibull 분포	(R=0.898)	투입 분량 (ton)	Logistic 분포	대표 성과물 [SB-PRO 시작품]  	
	구분	분석지표	투입분량 및 미검역 특성 분석 변수	확률론적 모델																											
세미콘	배덕면적	(R=0.986)	투입 분량 (㎡)	Beta 분포																											
		(R=0.942)	투입 분량 (ton)	Lognormal 분포																											
철근	전용면적	(R=0.922)	투입 분량 (㎡)	Lognormal 분포																											
		(R=0.889)	투입 분량 (ton)	Lognormal 분포																											
단열재	배덕면적	(R=0.915)	투입 분량 (㎡)	Weibull 분포																											
		(R=0.898)	투입 분량 (ton)	Logistic 분포																											
원천특허 출원 2건, 특허 등록 1건, SCI(E)급 학술지 게재 7편, 일반학술지게재 4편, 소프트웨어 등록 3건																															
기대 효과	기술적 신개념의 건축물 전과정 지속가능성 평가 원천기술 확보	경제적 원천기술 확보로 인한 기술자립 및 기술이전 확대 가능	사회적 녹색건축물 보급·확산을 위한 지속가능성 평가기술 활용 가능																												

그림 1.1 연구개발 개요

나. 핵심 개념

■ 본 연구는 그 간 제한적인 평가범위와 평가결과의 불확실성으로 인해 실무에서 활용이 저조하였던 **결정론적 전과정 지속가능성 평가기술에 대한 근본적인 문제점을 해결하는 기초 원천기술**로서 지속가능한 건축물의 실현 잠재력이 가장 높은 건축사업 초기단계에서 공동주택의 전과정 지속가능성을 확률론적으로 평가하고 지속가능한 공동주택의 설계와 이해관계자의 의사결정을 지원할 수 있는 독창적인 기술임.

표 1.1 연구개발 핵심 개념

구 분	기존 기술	본 연구개발 기술
	환경성, 경제성, 사회성 평가가 분리된 개별적 평가	환경성, 경제성, 사회성 평가가 조화롭게 통합된 지속가능성 평가
평가 범위		
	결정론적 평가방법	확률론적 평가방법
	과거 건설된 공동주택에서 수집된 건축자재 및 에너지소비량의 평균값 적용	공동주택의 특성을 반영한 주요 건축자재 및 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 적용
평가 방법		
	결정론적 평가결과	확률론적 평가결과
	① 결정론적 평가결과 (평균값)	① 확률론적 평가결과 (최빈값) ② 지속가능 건축물 달성 확률 ③ 지속가능성 최대/최소값
평가 결과		
주요 특징	평가결과가 단일 값으로만 산출됨에 따라 불확실성을 내포하며, 정확한 의사결정 지원에 한계가 있음.	확률론적으로 가장 가능성이 높은 최빈값과 지속가능 건축물 달성 확률을 동시에 제공하여 평가결과의 불확실성 해소하고 보다 정확한 의사결정을 지원함.

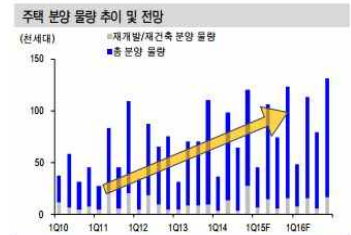
2. 연구개발의 필요성

가. 국내 환경변화

- 최근 지속가능한 건축시장 규모가 확대되고, 지속가능성을 고려한 공동주택의 분양 물량이 증가함에 따라 **다각적인 관점에서 공동주택의 전과정 지속가능성을 평가하는 기초원천 기술이 요구되고** 있음.

■ 지속가능성을 고려한 공동주택 분양물량 증가

- 국내 건축시장 중 공동주택 사업이 1/3 이상을 차지함에 따라 **공동주택의 지속가능성 확보가 전체 건축시장에 막대한 영향**을 미침.
- 현재, 그린홈 100만호 사업을 포함한 주택공급 및 신도시 개발 사업이 진행 중이며, **앞으로 80만호 이상의 그린홈 공동주택 공급이 이뤄질** 전망이다.
- 이에 **공동주택의 지속가능성 평가 및 설계지원에 대한 기초 원천기술 개발이 현시점에서 반드시 필요한 실정임.**



[국내 공동주택 공급 실적 및 전망]

※ 참조 : 국토교통부, 신한금융투자

■ 한국 G-SEED, 건축물 전과정 평가 인증기준 신설

- 국내 녹색건축인증제도인 G-SEED는 2016년 9월 인증기준을 개정·고시하면서 **건축물 전과정 관점의 환경영향을 평가하는 인증기준을 신설**함.
- 이에 녹색건축인증을 취득하고자 하는 공공 및 민간 **건축물에 대한 전과정 평가 수요가 급격히 증가되고 있는 실정임.**
- 또한, 건축물의 전과정 평가 인증기준을 지원하는 **평가기술이 시급히 요구되고** 있음.



[국내 녹색건축인증제도(G-SEED)]

■ 공동주택의 전과정 지속가능성 평가 기초원천 기술 필요

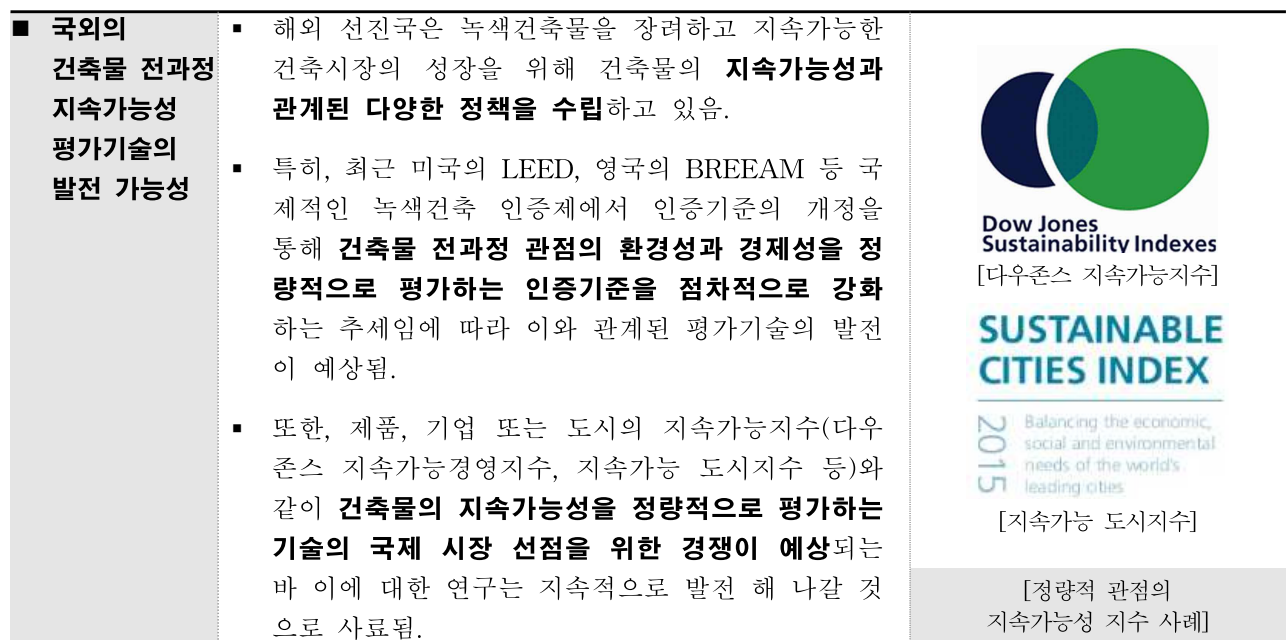
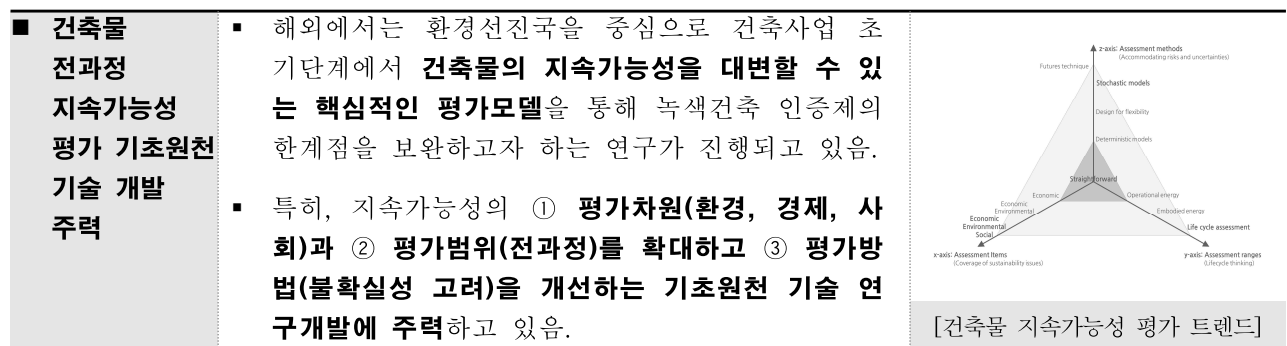
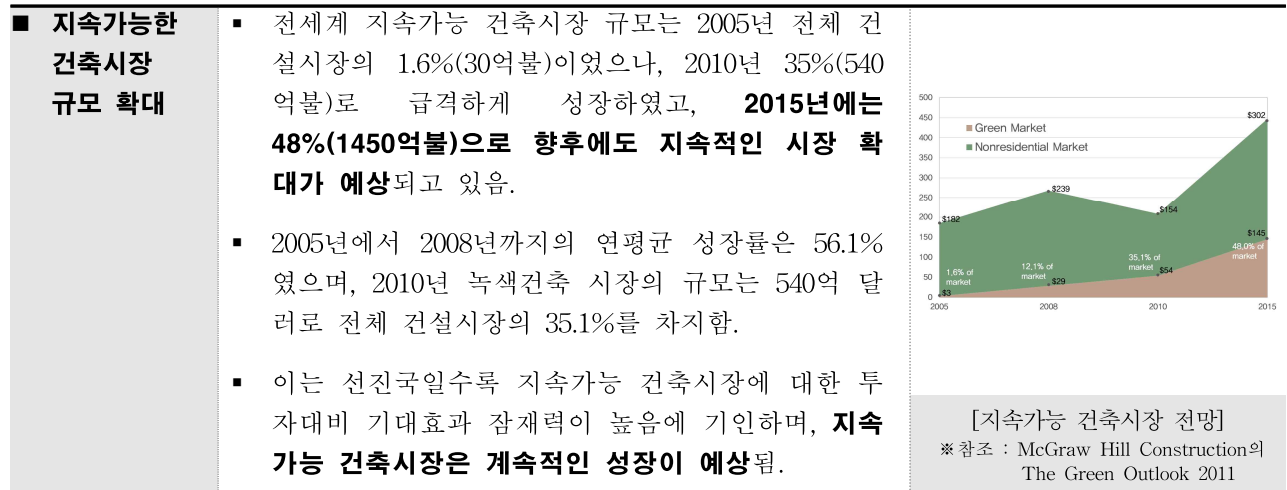
- 현재 공동주택의 지속가능성 평가는 녹색건축 인증제인 G-SEED에만 의존하고 있는 실정으로 공동주택의 설계초기단계에서부터 **지속가능성을 정량적으로 평가하는 기초연구와 공동주택의 설계를 지원하는 원천기술 개발이 절실히 요구되는** 시점임.
- 특히, 국내 실정에 부합하는 **한국형 공동주택의 지속가능성 평가기술 개발이 요구되며**, 기존 기술 수준의 차원을 넘어 **국제 시장의 우위를 선점할 수 있는 다각적인 관점에서의 기초 원천기술 개발이 시급함.**



[건축물 지속가능성 개념]

나. 국외 환경변화

■ 국외에서도 지속가능한 건축시장 규모가 확대되고, 지속가능한 건축물의 필요성이 요구됨에 따라 **건축물 전과정 지속가능성을 평가하는 인증기준이 점차적으로 강화되고 있으며**, 다양한 연구진들이 이를 위한 **기초원천 기술 개발에 주력하고 있음**.



다. 연구개발의 중요성

(1) 미래 핵심원천기술로서 국토교통 중장기전략과의 부합성

- 본 연구는 녹색건축물을 위한 지속가능성 평가기술 개발 연구로써 정부가 **국토교통 R&D 중장기 전략으로 추진 중인 4대 전략 및 10대 정책 방향과 부합**되며, 특히 녹색건축물 활성화와 보급·확산을 위한 녹색건축물 기술 개발 전략에 필수불가분의 과제임.
- 본 연구과제는 국토교통 R&D 중장기 전략으로 추진 중인 녹색건축물 활성화 분야에 부합되며, 향후 정부/지자체의 녹색건설 개발 사업에 있어 공동주택의 환경성/경제성/사회성을 고려한 확률론적 DB 구축과 이를 지속가능성으로 평가하는 기술로서 활용 및 파급 효과가 매우 우수함.

(2) 기초연구 및 원천기술 개발의 시의성

- 본 연구는 국토교통부의 “제1차 녹색건축물 기본계획(2014년 12월)”에 따라 2018년까지 추진 중인 녹색건축물 기반구축에 부합되는 기초 연구과제로써 정부가 녹색건축물 확대를 위해 목표로 하는 **국가차원의 환경부하 저감형 녹색건축물 개발을 위해 시급히 수행되어야 하는 연구임**.
- 본 연구를 통해 개발되는 원천기술은 정부가 추진 중인 녹색건축물의 조성과 지속가능한 개발의 이념을 실천하기 위해 시급히 요구되는 필수불가결한 기술로서 시의성이 매우 높으며, **공동주택의 지속가능성을 새로운 개념으로 평가하는 세계 수준의 원천기술 확보가 필요한 연구임**.

(3) 기초연구 및 원천기술 개발의 중요성

- 본 연구는 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 한국형 공동주택의 지속가능성 평가기술의 확보와 더불어 기존 기술 수준의 차원을 넘어 **국제 시장 선점과 기술적 우위를 확보할 수 있는 중요한 원천기술임**.

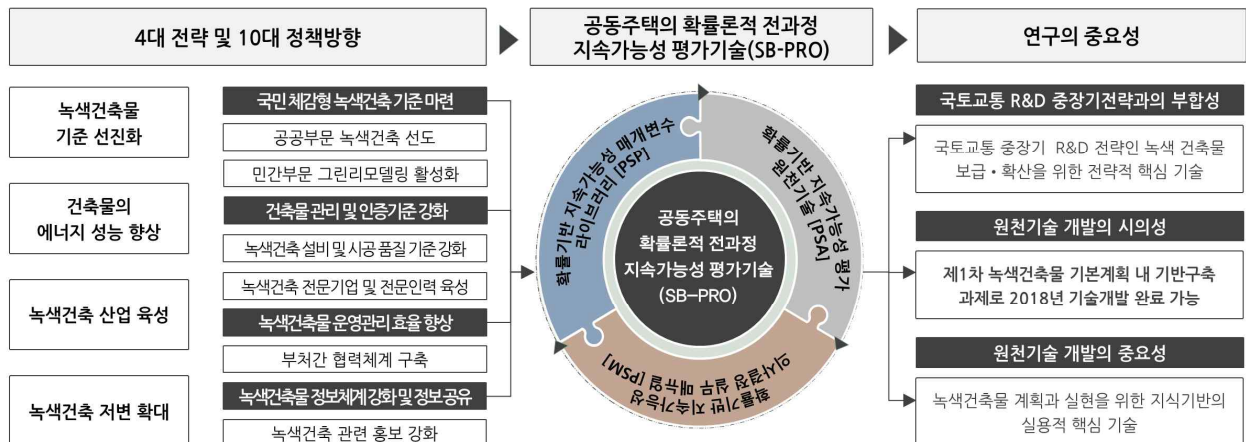


그림 1.2 연구개발의 중요성

3. 연구개발 범위

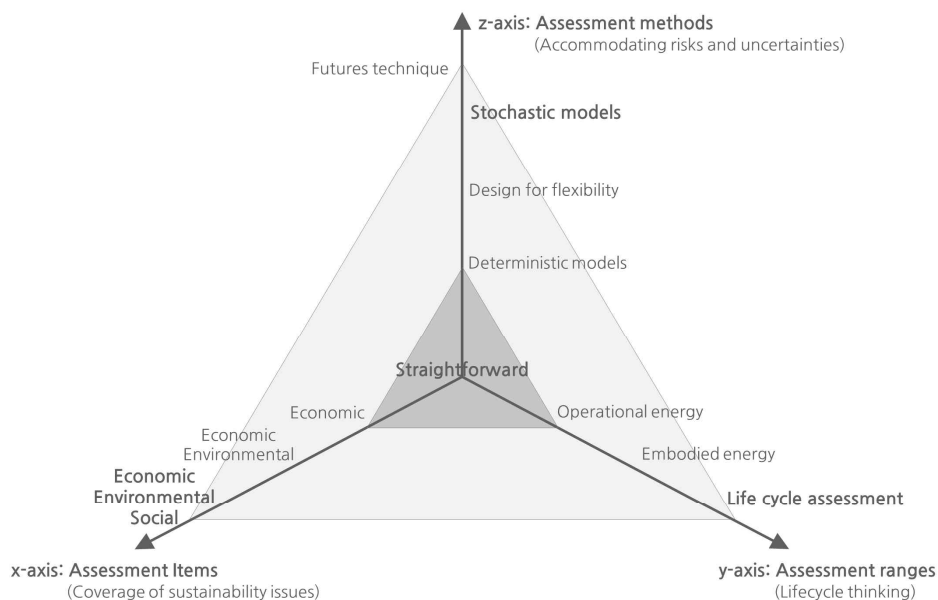
■ 본 연구는 **공동주택을 대상으로 한 전과정 지속가능성 평가 원천 기술 개발** 연구로서 연구 수행 전 **TRL 2단계**(기술적 개념정립 단계)의 기술 수준을 **TRL 4단계**(실험실 성능평가 단계) + **@**(TRL 5단계 진입을 위한 시작품 초안)로 발전시키는 것을 개발 범위로 함.

가. 연구대상: 공동주택

- 본 연구는 건축물의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술에 관한 기초원천 기술개발 연구로서 **국내 건축물 중 건설 비중이 가장 높고 형태가 비교적 정형화된 공동주택**을 대상으로 하며, 향후 다른 용도의 건축물도 동일한 기술적 방법을 통해 확대·발전될 수 있을 것으로 판단됨.

나. 연구범위: 전과정 지속가능성 평가

- 본 연구에서 추구하는 공동주택의 전과정 지속가능성 평가 기술은 UNEP에서 제안된 전과정 지속가능성 평가 기법을 준용한 것으로서 전 세계적으로 진행되고 있는 정량적 관점의 건축물 지속가능성 평가에 부합되는 연구임.
- 즉, 본 기술은 현재 국내에서 일반적인 수준으로 건설되는 기준 공동주택과 비교하여 평가 공동주택이 전체 수명기간동안 야기할 수 있는 6가지 환경영향범주, 비용, 그리고 거주자에게 미치는 사회영향을 종합적으로 평가하며, 그 세부 내용은 아래와 같음.



Georgiadou MC et al., Energy Policy, 2012

This figure was reconstituted by author on the basis of existing literature

그림 1.3 건축물 전과정 지속가능성 평가 연구 방향

(1) 지속가능성 평가차원

- 지속가능한 발전의 개념은 1987년 환경 및 발전에 관한 세계위원회(WCED)를 통해 환경적, 경제적, 사회적 측면으로 제시되었고, 1994년 John Elkington에 의해 TBL(Triple Bottom Line)의 개념으로 정의됨.
- 이러한 지속가능성 개념의 발전 과정에 따라 건축분야에서도 건축물의 환경적, 경제적, 사회적 측면을 평가하고자 하는 다양한 연구가 시도되었고 **ISO TC59/SC17와 EN TC350을 통해 건축물의 지속가능성 평가방법이 표준화되고 있음.**
- 하지만 건축물의 지속가능성을 종합적으로 평가하는 세부적인 평가방법과 데이터베이스 등의 부재로 인해 건축물의 경제적 측면 또는 환경적 측면만을 단편적으로 평가하는 연구가 주로 수행되었음.
- 따라서 건축물의 지속가능성을 종합적으로 평가하기 위해서는 **일련의 체계적인 방법론을 통해 지속가능성을 구성하는 3가지 기둥(Pillar)인 환경적 측면, 경제적 측면, 사회적 측면을 모두 포함하는 평가방법이 구축되어야 함.**

(2) 지속가능성 평가범위

- 과거의 건축 산업에서는 건축물의 운영 에너지소비량의 절감만을 고려한 연구가 주로 수행되었고, 그 결과로서 현재 운영 에너지소비량을 획기적으로 절감하는 에너지절약형 건축물인 3-litter house, 2000-watt house, Zero energy building 등이 단계적으로 상용화되고 있음.
- 하지만 이와 같이 운영 에너지소비량만을 고려한 에너지절약형 건축물은 건축자재의 생산, 운송, 시공, 폐기과정 등에서 발생하는 내재 환경영향을 증가시킬 수 있음.
- 에너지절약형 건축물에서는 일반적으로 고효율 단열재, 고효율 창호 등 내재 환경영향의 증가가 우려되는 **건축자재의 추가적인 투입이 이뤄지기 때문**이며, 이는 과거에 건설된 기존 건축물과 비교하여 **운영 에너지소비량이 50% 이상 절감됨에 따라 건축물의 전과정 관점에서 내재 환경영향의 비율은 운영 환경영향의 비율을 넘어서고 있음.**
- 따라서 건축물의 지속가능성을 종합적으로 평가하기 위해서는 **건축물의 전과정 단계인 생산단계부터 시공단계, 운영단계, 폐기단계까지를 모두 포함하는 지속가능성 평가가 이뤄져야 하며, 이를 위한 평가모델이 개발되어야 함.**

(3) 지속가능성 평가방법

- 건축물의 지속가능성에 대한 개선 잠재력이 가장 높은 건축사업 초기단계에서는 모든 의사결정이 불확실성 하에서 이뤄짐에 따라 보다 과학적인 방법으로 미래에 발생하게 될 불확실한 결과를 예측하는 것이 중요함.
- 하지만 과거의 건축물 지속가능성 평가 연구에서는 그 평가결과에 대한 불확실성 분석의 필요성과 중요성을 인식하고 있음에도 불구하고 **많은 시간과 비용, 인력이 소모되고 불확실성을 고려한 확률론적 분석도구가 부재하다는 이유로 인해 결정론적 분석방법을 사용해 왔음.**
- 이러한 결정론적 분석방법은 모든 조건이 확정된 상태를 전제로 함에 따라 건축사업의 특성에 따른 불확실한 조건을 반영하기 어렵고, 분석결과에 대한 기댓값을 산출할 수

없다는 한계점이 있다. 또한, 비대칭 구조의 변수를 반영함에 있어 ‘평균의 함정(The flaw of averages)’이 발생될 수 있다는 수학적 한계도 내포하고 있음.

- 따라서 건축사업 초기단계에서 의사결정에 따른 위험부담을 최소화할 수 있도록 **건축물의 지속가능성을 보다 객관적으로 평가하고 그 불확실성을 정량화하는 확률론적 평가 모델의 제시가 요구됨.**

다. 기술범위: TRL 4단계(실험실 성능평가 단계) + @

- 본 연구는 **TRL 2단계로 시작**하여 실험실 성능평가 단계인 TRL 4단계, 그리고 TRL 5단계 진입을 위한 시작품 초안 개발(**TRL 4 +@ 단계**)까지를 기술개발 범위로 정의함.
- 즉, 본 연구 착수시점의 기술개발 성숙도는 기존의 건축물 전과정 평가 기술의 개념을 응용하여 건축물 전과정 지속가능성 평가기술에 확률론적 분석방법을 접목하는 기술적 개념 및 아이디어 정립 단계로서 기초연구 단계인 TBL 2단계임.
- 본 연구를 통해 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 매개변수 라이브러리를 구축하고, 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 및 실무 매뉴얼을 개발하였으며, 본 기술 전반에 대한 성능평가 및 신뢰성 시험과 검증을 통해 기술개발의 성숙도를 TRL 4단계 수준까지 향상시킴.
- 또한, 최종성과물을 시작품 초안으로 개발하여 TBL 5(시작품 단계) 진입을 위한 기반을 구축함.

표 1.2 기술개발 성숙도

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

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술 개발 현황

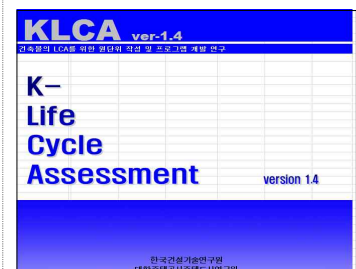
- 국내에는 2000년 중반 결정론적 방식의 건축물 CO₂ 배출량 평가기술(프로토타입)이 일부 개발되었으나 기술수준, 데이터베이스, 평가범위 및 방법 등의 한계로 인해 실무에서 사용되지 못하고 녹색건축 인증제인 G-SEED를 통해 정성적인 지속가능성의 평가가 부분적으로 이뤄지고 있는 실정으로 지속가능성을 정량적으로 평가하는 기초원천 기술 연구 개발이 시급히 필요한 실정임.

- **SUSB-LCA**
- SUSB-LCA는 한양대학교 친환경건축 연구센터에서 2010년에 독자적으로 개발한 독립 어플리케이션 기반의 건축물 전과정 환경부하 평가 프로그램임.
 - 이는 산업연관분석방식의 원단위를 기반으로 하여 건축물의 전과정 에너지소비량, CO₂ 배출량, 비용을 종합적으로 평가할 수 있으며 친환경건축 요소기술의 적용에 따른 평가 건축물과 대안 건축물의 효과적 상호 비교가 가능함.



[SUSB-LCA]

- **K-LCA**
- K-LCA는 건축물의 전과정 평가를 국내 건설 전 분야에 적용 및 활용하고자 2004년 건설교통부(현 국토해양부)의 주관 하에 한국건설기술연구원에서 개발한 프로그램임.
 - 이는 EXCEL 워크시트 기반으로 개발되었으며 산업연관분석방식으로 분석된 건축자재의 CO₂ 배출 원단위에 기초하여 건축자재에서의 환경오염 물질을 정량적으로 평가한다. 또한, 운영과정에서는 '건축물 에너지설계기준'의 에너지성능지표(EPI)에 근거한 CO₂ 배출량의 평가가 가능함.



[K-LCA]

- **ECO-Pia**
- ECO-Pia는 2009년 삼성물산 건설부문에서 개발한 건축물 전과정 환경부하 평가 프로그램으로 주 평가 대상 및 범위는 공동주택의 전과정 에너지소비량과 CO₂ 배출량임.
 - 이는 산업연관분석방식으로 도출된 원단위를 기반으로 평가 대상 건축물의 전과정 환경부하를 평가하며 실측 및 통계적 자료에 근거한 추계모델방식을 통해 대부분의 세부 평가단계를 평가하게 됨.
 - 또한, 신재생에너지의 적용에 따른 환경부하를 용이하게 평가할 수 있다는 특징을 가짐.



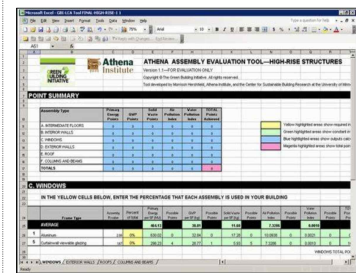
[ECO-Pia]

2. 국외 기술 개발 현황

- 국외 환경선진국에서는 친환경 건축물 인증제도(LEED, BREEAM 등) 이외에도 건축물의 사업초기단계에서 비교적 간단한 방법으로 건축물 환경성과 경제성을 평가하고 다양한 건축요소의 변화에 따른 대안평가 기술을 개발하여 실무에서 적극적으로 사용하고 있으며, 현재는 사회성까지 고려된 정량적 관점의 **지속가능성 평가에 관한 기초원천 기술 확보를 위해 연구개발에 주력**하고 있음.

■ ATHENA

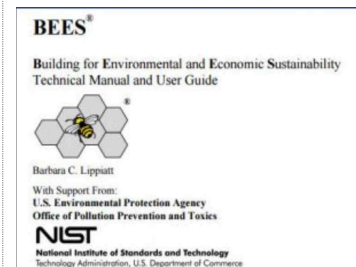
- 캐나다에서 개발한 프로그램으로서 평가 초점은 LCI DB가 세부적으로 제시되어 양적인 데이터로 사용되도록 상업적, 공공적, 주거건물 등 5계층으로 구성됨.
- 상세한 LCI 산출결과는 그래프이나 표 형식으로 요약되어 보여주고 있으며, 생태적 자원 획득과 타입별 내재에너지의 입력, 잠재된 온실효과, 수자원과 공기의 독성정도 측정, 고형폐기물을 평가함.
- 현재 스틸, 나무, 콘크리트로 한정되어 있지만 피복 금속, 점토벽돌, 석고보드 등 다른 제품들에 관한 연구가 진행되어 다양한 DB가 구축될 예정임.



[ATHENA]

■ BEES

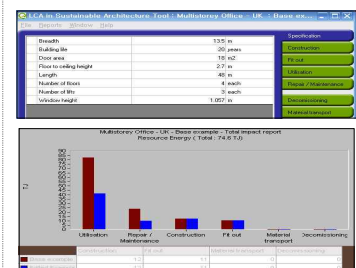
- 현재 미국의 대표적인 LCA tool로서 미국정부가 친환경적인 건축자재의 선택을 지원하기 위해 1994년 미국 NIST에 의뢰하여 개발한 프로그램임.
- 건축산업에 대해서 산업연관분석을 이용하여 에너지량 산출을 행하였으며, 적산방식에 의해서도 종이, 선철, 동, 합판 등 건축부분의 자재에 대한 조사를 통해 DB를 구축함.
- 환경성뿐만 아니라 경제성을 동시에 고려할 수 있도록 고안된 기법으로 건축주 및 정부의 투자 우선순위 의사결정을 위한 지원도구 개발을 목적으로 하고 있으며, 온실효과/산성화/화석연료감소/자연자원고갈/공기오염기준 등을 평가항목으로 함.



[BEES]

■ LISA

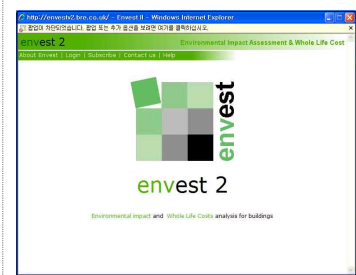
- LISA는 호주의 BHP 연구소가 2003년에 개발한 건축물 전과정 환경부하 평가 프로그램으로서 건축가 및 산업 전문가들을 대상으로 친환경적인 건축물의 설계지원을 목적으로 함.
- 이는 독립 어플리케이션 기반으로 개발되었으며 개별적산방식인 LCI 원단위 데이터베이스를 통해 전과정 평가 관점에서 에너지소비량, CO₂ 배출량, 수자원, NOX, SOX 등의 환경부하량을 평가함.



[LISA]

■ ENVEST2

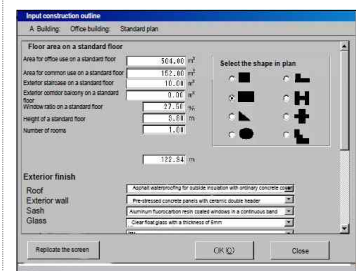
- ENVEST2는 영국 BRE에서 2003년에 Web 기반으로 개발한 건축물 전과정 환경성능 평가 프로그램임.
- 이는 건축설계자들이 기획 및 설계초기단계에서 건축물의 전과정 평가를 수행 할 수 있도록 개발되었으며 주요 평가대상은 사무소 건축물임.
- 본 프로그램의 평가 및 결과는 환경영향의 평균 측정값을 통해 도출한 ENVEST의 고유지표인 Eco-Point로 산출되는 특징을 가짐.



[ENVEST2]

■ GEM-21

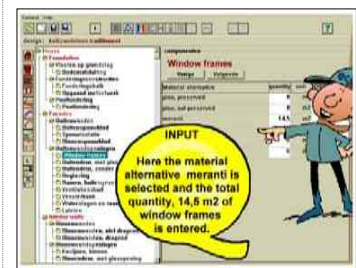
- GEM-21은 일본 시미즈건설에서 2008년도에 개발한 건축물 전과정 CO2 배출량 평가 프로그램으로서 평가 대상은 단독주택, 공동주택, 사무소, 학교, 상점, 호텔, 복합건물 등임.
- 이는 시미즈건설의 실적자료를 통해 구축된 데이터 베이스를 기반으로 유사 건축물의 CO₂ 배출량을 평가하게 되며, 특히 평가정보의 입출력이 단시간 내에 가능하여 설계단계에서의 CO₂ 배출 저감 성과와 복수안의 검토가 가능함.



[GEM-21]

■ Eco-Quantum

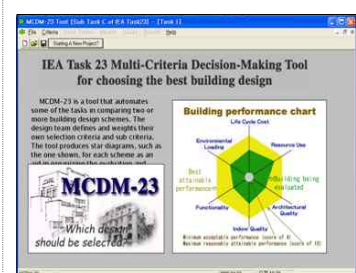
- Eco-Quantum은 1996년 암스테르담 대학의 IVAM Environmental Research에서 개발한 최초의 건축물 전과정 환경부하 평가 프로그램임.
- 이는 독립 어플리케이션으로 개발되었으며, 에너지소비에 따른 환경영향과 운영단계에서의 유지보수, 건축물의 수명에 영향을 미치는 건축자재의 내구성 차이 등과 함께 선택적 해체, 재생 및 재활용에 관한 사항을 평가의 범위로 함.
- 특히, Eco-Quantum은 온실효과, 원자재 고갈 및 생태독성 등 환경영향에 따른 11가지의 정량적인 전과정 평가 점수로 구성된 환경 프로파일 데이터베이스와 건축물의 구성요소에 따른 세분화된 데이터베이스에 근거하여 평가가 진행됨.



[Eco-Quantum]

■ LCA-MCDM

- LCA-MCDM은 1999년 IEA에서 개발한 종합설계 평가 및 비교 프로그램으로 전과정 비용, 전과정 자원 부하, 전과정 환경부하, 건축미학요소, 건축환경 요소, 건축기능요소 등 6가지의 평가 항목으로 구성됨.
- 특히, 이는 제반 환경 요인에 의한 영향을 정량적으로 통합 비교 할 수 있도록 구성되었으며 모든 LCA-MCDM Worksheet의 입력을 통해 평가 및 대안 건축물의 전과정 통합성능 평가결과를 Star Diagram 형태로 제공함.



[LCA-MCDM]

[국내 · 외 건축물 전과정 지속가능성 평가기술 비교 분석]

기술 특징	국내 건축물 전과정 지속가능성 평가 기술				국외 건축물 전과정 지속가능성 평가 기술			
	SUSB-LCA	K-LCA	ECO-pia	본 과제 제안 [SB-PRO]	Athena	BEES	LISA	ENVEST2
개발기관	친환경 건축연구센터	건설기술연구원	삼성물산	한양대학교 + EAN 테크놀로지	SMI [캐나다]	NIST [미국]	The university of Newcastle [호주]	BRE [영국]
개발연도	2010	2004	2009	2018	2002	2009	2003	2003
평가범위	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성	환경성 경제성 사회성
DB구축	• 산업연관분석	• 산업연관분석	• 산업연관분석	• LCI DB • 조달청 시설자재 및 시장시공 가격 • 사회영향 DB	• LCI DB	• LCI DB • 미국 시장가격	• LCI DB	• LCI DB • 영국 시장가격
평가항목	• CO ₂ 배출량	• CO ₂ 배출량	• CO ₂ 배출량	• 전과정 환경영향 (6가지) • 전과정 비용 • 전과정 사회영향 • 전과정 지속가능성	• 전과정 환경영향 (6가지)	• 전과정 환경영향 (7가지)	• 전과정 환경영향 (3가지)	• 전과정 환경영향 (13가지)
평가기기	실시설계 (물량산출서 필요)	실시설계 (물량산출서 필요)	실시설계 (물량산출서 필요)	건축사업 초기단계 (물량산출서 불필요)	기획, 설계 (물량산출서 불필요)	기획, 설계 (물량산출서 불필요)	기획, 설계 (물량산출서 불필요)	기획, 설계 (물량산출서 불필요)
평가방식	결정론적 평가방식	결정론적 평가방식	결정론적 평가방식	확률론적 평가방식 [세계 최초기술]	결정론적 평가방식	결정론적 평가방식	결정론적 평가방식	결정론적 평가방식

그림 2.1 국내·외 건축물 전과정 지속가능성 평가기술 비교 분석

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구개발 목표

구분	내용	
최종 목표	본 연구는 공동주택의 설계요소별 건축자재 투입량 및 에너지소비량에 대한 확률기반의 매개변수 라이브러리(PSP) 를 구축하고 이를 몬테카를로 시뮬레이션과 연계하여 공동주택의 지속가능성을 확률기반으로 평가하는 원천기술 및 시작품 개발(PSA) , 본 평가기술을 이용한 이해관계자의 의사결정을 확률기반으로 지원하는 실무 매뉴얼(PSM) 개발을 포함하는 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술(SB-PRO) 개발을 최종 목표로 함.	
세부 목표	1세부 (한양대)	확률기반의 공동주택 지속가능성 평가기술 개발
	2세부 (EAN)	확률기반의 공동주택 에너지소비량 예측방법 및 의사결정 실무 매뉴얼 개발
연구 개발 범위	공동주택	본 연구개발 과제는 건축물의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술에 관한 기초원천 기술개발 연구로서 국내 건축물 중 건설 비중이 가장 높고 형태가 비교적 정형화된 공동주택을 우선적으로 접근하며, 향후 다른 용도의 건축물도 동일한 기술적 방법을 통해 확대·발전될 수 있음.
	지속 가능성	본 연구개발 과제에서 제안하는 지속가능성은 UNEP에서 제안된 전과정 지속가능성 평가(Life Cycle Sustainability Assessment) 기법을 통해 현재 일반적인 수준으로 건설되는 기준 공동주택과 비교하여 전체 수명기간동안 6가지 환경영향의 정량적인 발생량이 적고 비용이 적게 투입되며, 공동주택의 건설이 거주자에게 미치는 긍정적인 사회영향이 높은 정도를 의미함.
주요 연구 내용	[1] PSP	확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리 구축 한양대 + EAN
		공동주택의 지속가능성 평가에 요구되는 주요 건축자재 투입물량 및 에너지소요량 등에 대한 확률기반의 매개변수 라이브러리 구축
	[2] PSA	확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 개발 한양대
		공동주택의 지속가능성을 평가하는 전과정 환경영향, 전과정 비용, 사회영향 평가기술과 확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리와 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하는 확률기반의 지속가능성 평가기술 개발
	[3] PSM	확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 한양대 + EAN
		지속가능성 평가결과에 기초하여 공동주택의 설계와 의사결정을 효과적으로 지원하는 확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발
최종 성과물	[1] 확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리	
	[2] 확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 [대표성과물]	
	[3] 확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼	

SB-PRO : Sustainable Building-PRObability

PSA : Probabilistic Sustainability Assessment technique

PSP : Probabilistic Sustainability Parameter library

PSM : Probabilistic Sustainability decision making implementation Manual

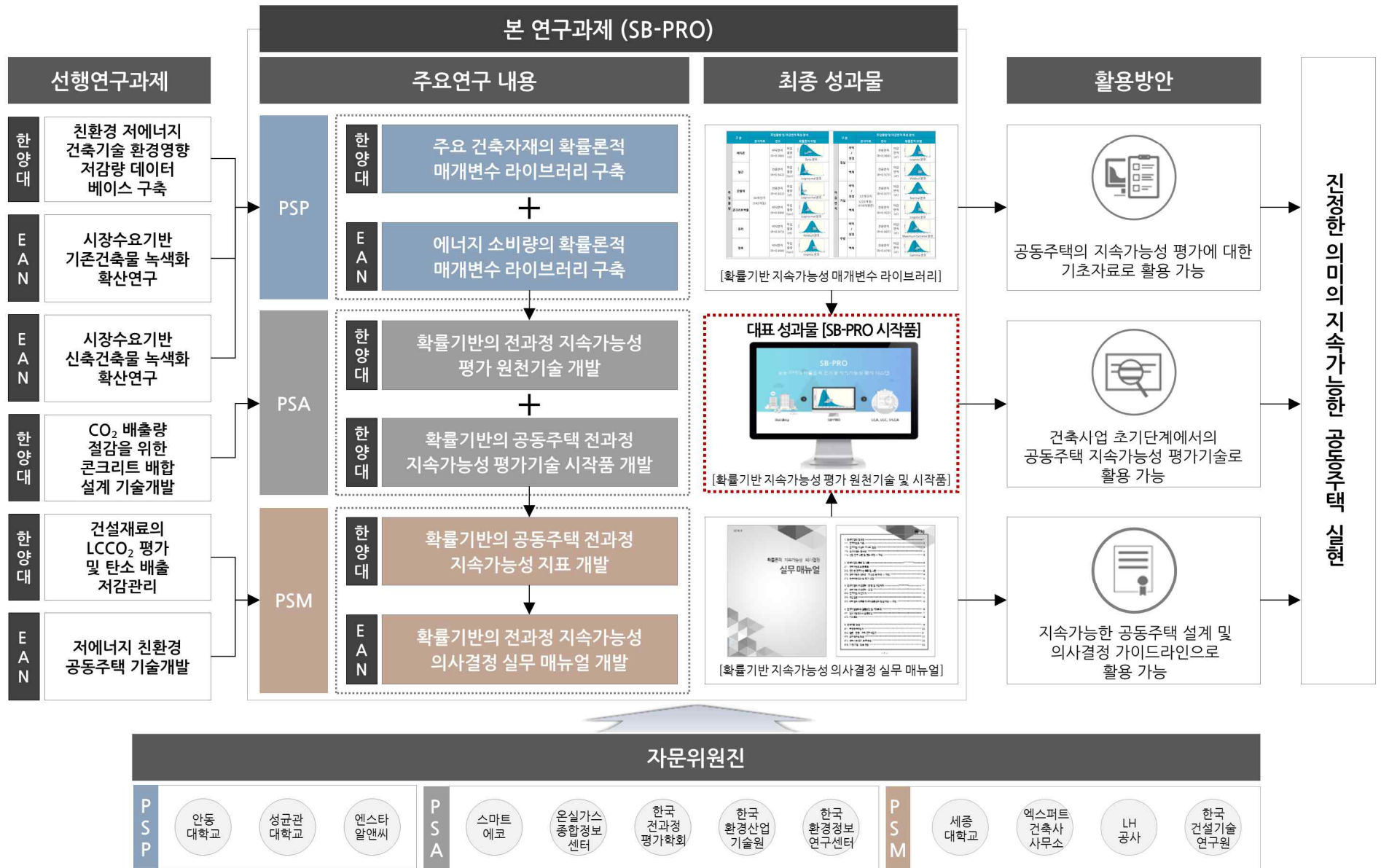
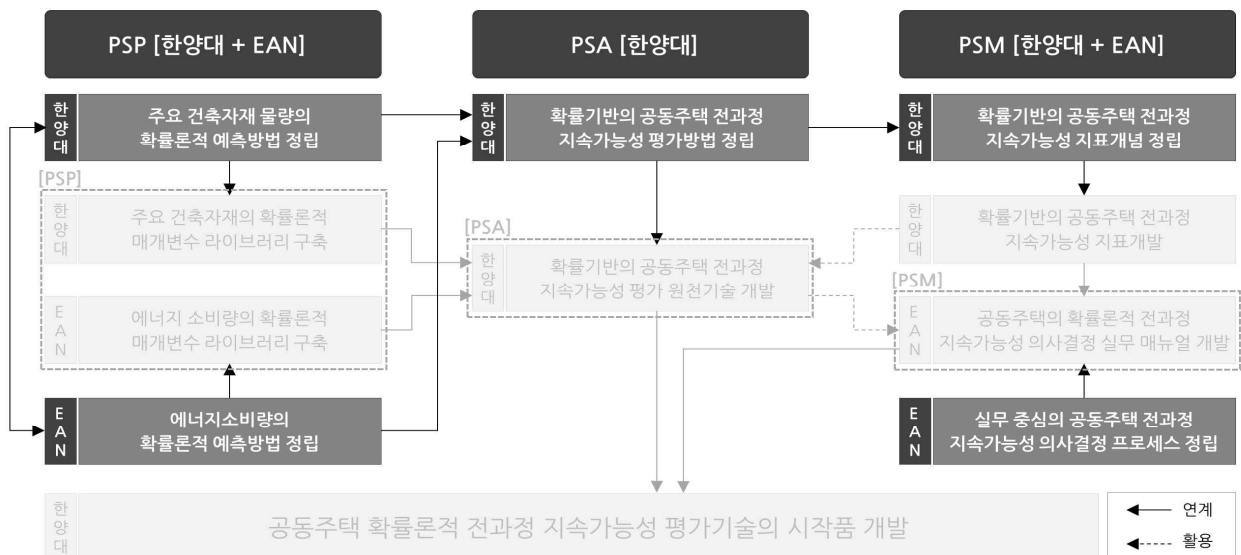


그림 3.1 연구개발의 전체 구성도

2. 연차별 연구개발 내용

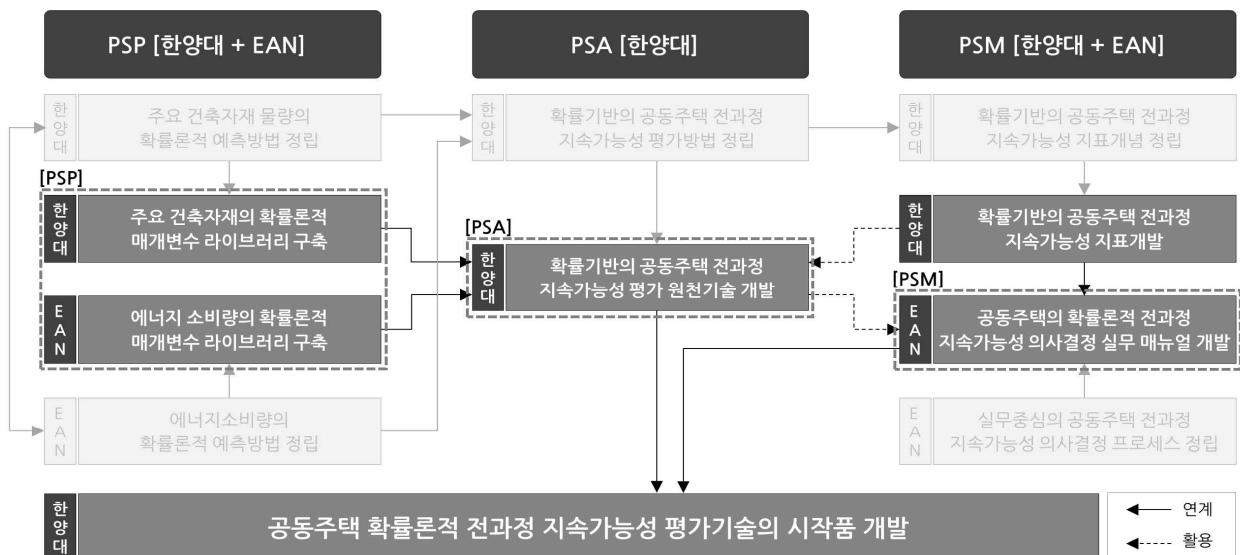
가. 1차년도

구 분	1세부 [한양대]	2세부 [EAN]
1차 년도 최종 목표	공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가방법 정립 및 증명 TBL 2단계 → TBL 3단계	
1차 년도 세부 목표	확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법 정립 및 증명	확률기반의 공동주택 에너지소비량 예측방법 정립 및 증명
연구 개발 주요 내용	PSP 공동주택 설계요소별 주요 건축자재 물량의 확률론적 예측방법 정립 ① 공동주택 주요 건축자재 도출 및 설계요소간 상관관계 분석 ② 공동주택 설계요소별 주요 건축자재 물량의 확률론적 예측방법 정립 ③ 공동주택 설계요소별 주요 건축자재 물량의 확률론적 예측방법 증명	공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 예측방법 정립 ① 공동주택 설계요소와 에너지소비량간의 상관관계 분석 ② 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 예측방법 정립 ③ 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 예측방법 증명
	PSA 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법 정립 ① 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기준 분석 ② 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법 정립 ③ 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법 증명	-
	PSM 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개념 정립 ① 전과정 지속가능성 지표 분석 ② 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개념 정립 ③ 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개념 증명	실무 중심의 공동주택 전과정 지속가능성 의사결정 프로세스 정립 ① 실무 중심의 공동주택 전과정 지속가능성 의사결정 프로세스 정립 ② 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 시범적용



나. 2차년도

구 분	1세부 [한양대]	2세부 [EAN]
2차 년도 최종 목표	공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발 및 성능평가 TBL 3단계 → TBL 4단계+α	
2차 년도 세부 목표	확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발	확률기반의 공동주택 에너지소비량 예측기술 및 의사결정 실무 매뉴얼 개발
연구 개발 주요 내용	PSP 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축	공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축
	① 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 ② 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 성능평가 ③ SB-PRO 시작품 개발 지원	① 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 ② 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 성능평가 ③ SB-PRO 시작품 개발 지원
	PSA 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발	-
	① 확률론적 매개변수 라이브러리 및 의사 결정 실무 프로세스와의 연계기술 개발 ② 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발 ③ SB-PRO 시작품 개발	
	PSM 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발	공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발
	① 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발 ② 확률론적 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 지원 ③ SB-PRO 시작품 개발 지원	① 공동주택의 확률기반 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 ② 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 시범적용



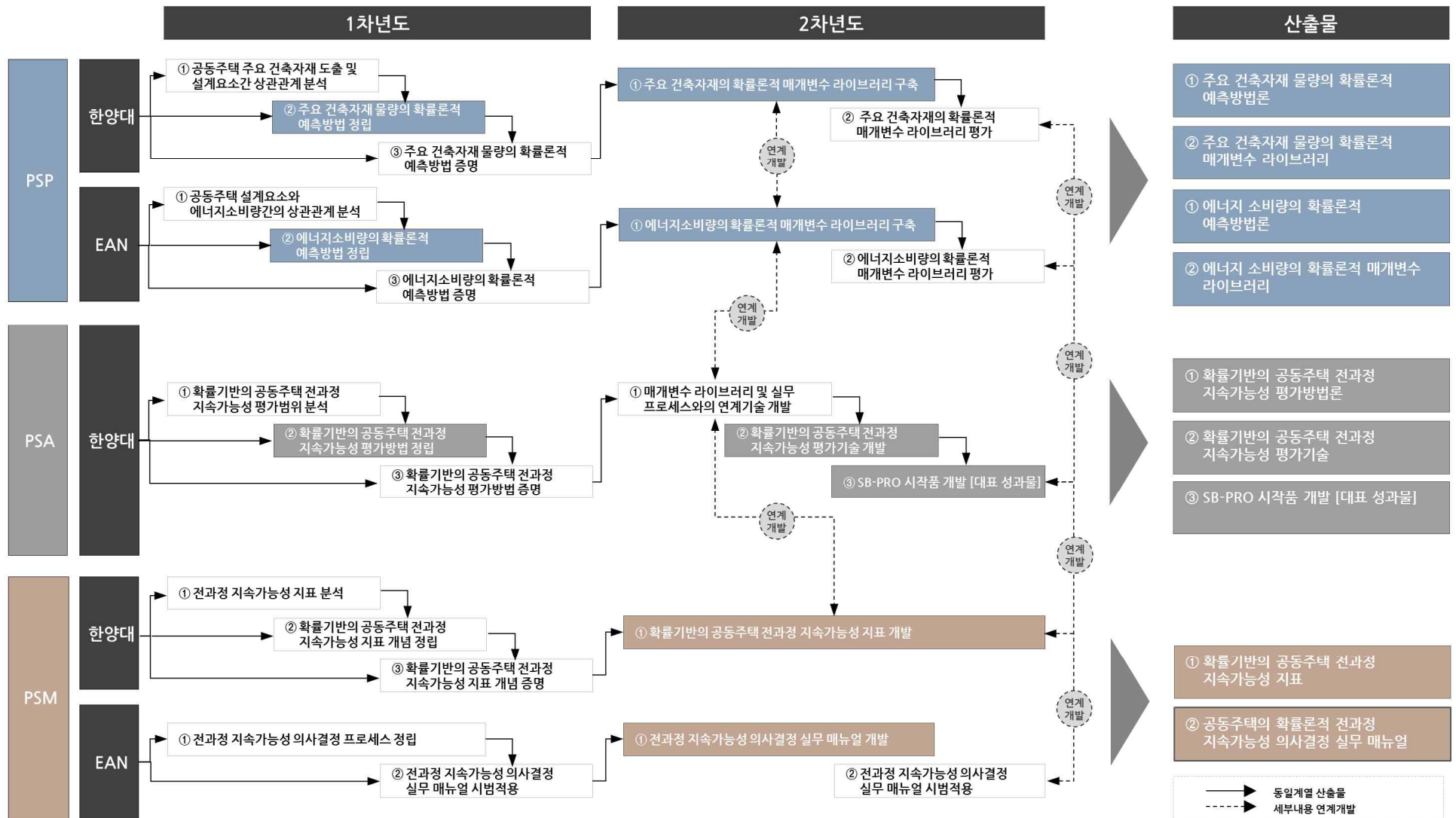


그림 3.2 연구개발 추진전략

3. 연구개발 결과

1 세부

확률기반의 공동주택 지속가능성 평가기술 개발

한양대학교

가. 연구목표

■ 최종목표	확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발
■ 구체적인 연구목표	(1) 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 (2) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발 (3) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발

나. 주요 연구내용 및 결과

(1) 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축	
(가) 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 (나) 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 성능평가 (다) SB-PRO 시작품 개발 지원	(가) ① 공동주택 주요 건축자재 분석 ② 주요 건축자재 물량의 확률분포 Matrix 구축 ③ 주요 건축자재 10종에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 (나) ① 주요 건축자재 목록 검토 ② 확률론적 예측방법 검토 (다) SB-PRO 시작품 개발 지원
(2) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발	
(가) 확률론적 매개변수 라이브러리 및 의사 결정 실무 프로세스와의 연계기술 개발 (나) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발 (다) SB-PRO 시작품 개발	(가) 연계기술 개발 (나) ① 확률기반 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발 (다) ① SB-DET 시작품 개발 ② SB-PRO 시작품 개발
(3) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발	
(가) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발 (나) 확률론적 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 지원 (다) SB-PRO 시작품 개발 지원	(가) ① 전과정 지속가능성 지표 분석 ② 전과정 지속가능성 지표 개발 (나) 확률론적 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 지원 (다) SB-PRO 시작품 개발 지원

(1) 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축

(가) 공동주택 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축

① 공동주택 주요 건축자재 분석

- 공동주택의 전과정 지속가능성을 용이하게 평가하기 위한 기술적인 접근의 일환으로 공동주택의 **건축공사에서 투입되는 건축자재를 대상으로 환경적 측면과 경제적 측면에서의 주요 건축자재를 분석함.**

■ 분석대상

- 국내에서 건설된 철근콘크리트 구조의 공동주택 6개 단지 (벽식구조, 라멘구조, 무량판구조별 2개 공동주택 단지) (표 3.1 참고)

표 3.1. 분석대상 공동주택

구 분	벽식구조		라멘구조		무량판구조	
	WS-1	WS-2	RS-1	RS-2	FS-1	FS-2
착공일	2009년 01월	2009년 10월	2012년 01월	2012년 01월	2011년 10월	2011년 06월
준공일	2011년 01월	2011년 09월	2014년 06월	2014년 06월	2014년 06월	2013년 12월
대지면적(m ²)	10,780	40,424	75,115	56,336	72,608	108,163
건축면적(m ²)	2,513	10,210	19,480	16,320	14,172	18,658
연면적(m ²)	83,883	68,612	227,466	208,393	190,866	267,015

■ 분석조건 및 방법

- 주요 건축자재를 도출함에 있어 가설공사에 투입되는 가설자재(거푸집, 동바리, 안전 시설재 등)는 사용 이후 전량 회수되어 다른 건축물의 건설현장에서 재사용됨에 따라 시스템 경계에서 제외함.
- 기능단위는 공동주택으로서 최소 기능을 나타내는 단위 연면적(m²)으로 설정하였고 데이터의 제외기준은 적용하지 않았음.
- 최종 산출물로 단일의 공동주택만이 건설됨에 따라 환경영향 평가의 결과를 물리적 또는 경제적 관점으로 배분하는 할당은 발생하지 않는 것으로 판단함.
- 공동주택은 착공시점에서 작성된 물량산출내역에 따라 건축자재의 종류와 수량이 변경되지 않고 건축물에 전량 투입되는 것으로 가정하였으며, 건축자재의 할증률로 인한 건설폐기물의 발생과 재활용에 따른 환경영향은 고려하지 않는 것으로 설정함.

[환경적 측면]

- 환경적 측면의 주요 건축자재를 도출하기 위해 공동주택의 생산단계를 범위로 한 전과정 환경영향 평가를 수행하고, 그 평가결과에 기초하여 주요 환경영향 범주(지구온난화지수(GWP), 산성화지수(AP), 부영양화지수(EP), 오존층영향지수(ODP), 광화학적산화물생성지수(POCP), 자원사용지수(ADP))의 95% 이상을 야기하는 공동주택 생산단계에서의 주요 건축자재를 도출함.
- 이를 위해 공동주택의 물량산출내역에 기재된 건축자재에 따라 동종 또는 유사 건축자재의 환경영향 원단위를 연결한 후 공동주택 생산단계의 전체 환경영향을 평가하고 환경영향 범주별로 95% 이상을 야기하는 주요 건축자재를 도출함.

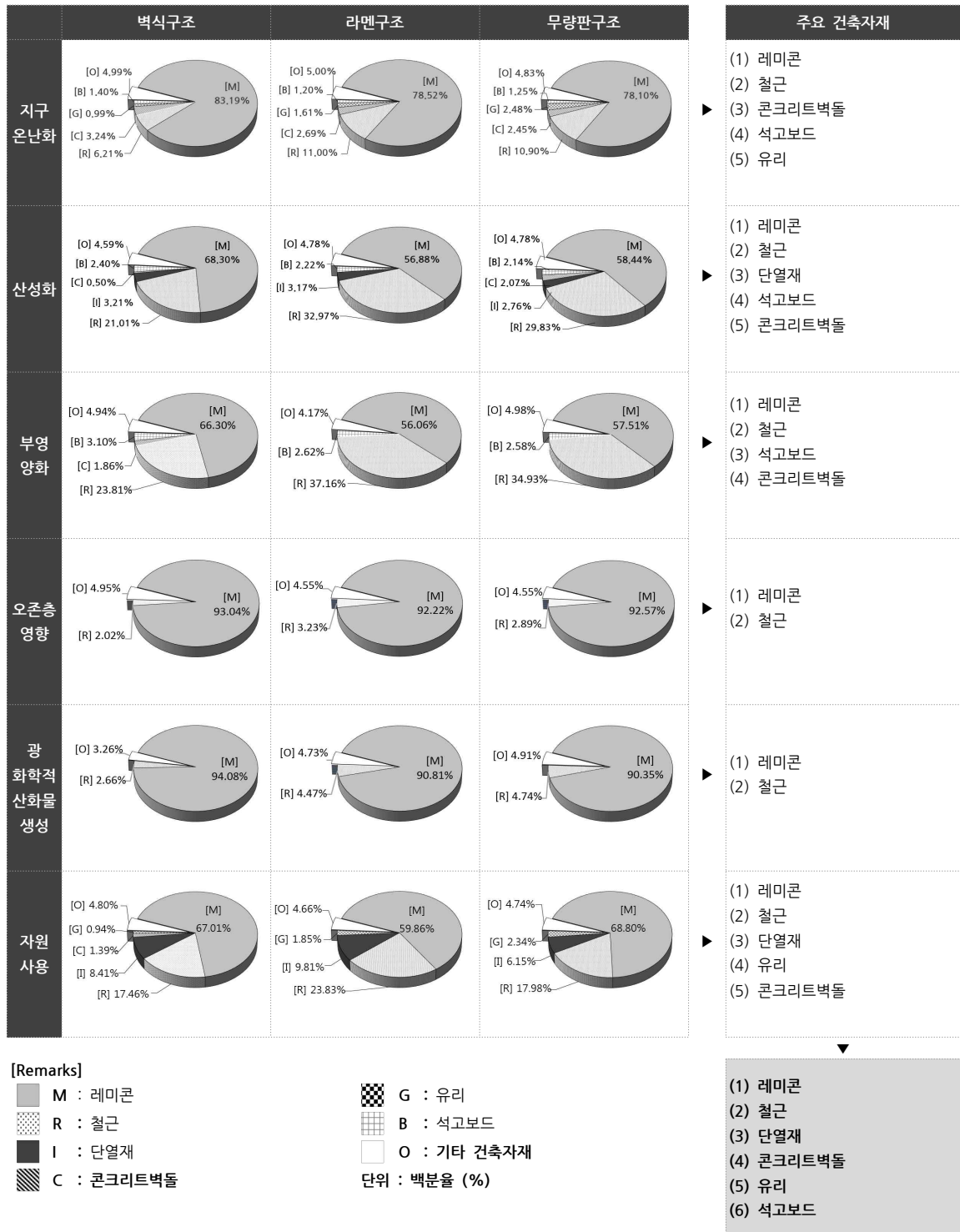
[경제적 측면]

- 경제적 측면의 주요 건축자재를 도출하기 위해 공동주택에 대한 물량산출내역 기준의 직접공사비를 분석하고, 그 분석결과에 기초하여 직접공사비의 누적기여도 95% 이상을 차지하는 주요 건축자재를 도출함.
- 이를 위해 공동주택의 물량산출내역에 기재된 건축자재에 따라 조달청에서 공시한 2016년 하반기 시설공사(건축분야) 가격정보를 적용하였음.
- 또한, 공동주택 직접공사비에 대한 총 비용을 평가하고 누적기여도 95% 이상을 차지하는 주요 건축자재를 도출하였음.

■ 분석결과

[환경적 측면]

- 환경적 측면의 주요 건축자재를 분석한 결과, 지구온난화(GWP)를 야기하는 상위 95%의 주요 건축자재는 레미콘, 철근, 콘크리트벽돌, 석고보드, 유리인 것으로 분석되었고, 벽식구조, 라멘구조, 무량판구조에서 모두 레미콘의 환경영향 기여도는 약 80%인 것으로 도출되었음.
- 산성화(AP)에서는 레미콘, 철근, 단열재, 석고보드, 콘크리트벽돌을 포함하는 5가지의 건축자재가 상위 95% 이상의 환경영향을 차지하였고, 부영양화(EP)에서는 레미콘, 철근, 석고보드, 콘크리트벽돌이 주요 건축자재로 도출되었음.
- 한편, 오존층영향(ODP)과 광화학적산화물생성(POCP)은 벽식구조, 라멘구조, 무량판구조에서 모두 레미콘의 환경영향이 90% 이상인 것으로 분석되었고 레미콘과 철근의 환경영향만으로도 95% 이상을 차지하는 것으로 분석되었음.
- 자원사용(ADP)에서는 레미콘, 철근, 단열재, 유리, 콘크리트벽돌이 환경영향의 95% 이상을 차지하는 것으로 분석되었음.
- 특히, 모든 공동주택에서 레미콘의 환경영향이 50% 이상을 기여하였고, 레미콘과 철근만으로도 80~95% 정도의 환경영향을 차지하는 것으로 분석되었음.
- 따라서 6가지 주요 환경영향지수의 95% 이상을 종합적으로 야기하는 공동주택의 6가지 주요 건축자재로서 **레미콘, 철근, 단열재, 콘크리트벽돌, 유리, 석고보드**를 도출하였음.



[경제적 측면]

- 경제적 측면의 주요 건축자재를 분석한 결과, 공동주택 직접공사비의 누적기여도 95% 이상을 차지하는 10가지 주요 건축자재로써 **레미콘, 철근, 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드, 창호, 석재, 타일, 페인트**를 도출되었음.
- 특히, 벽식구조, 라멘구조, 무량판구조로 건설된 모든 공동주택에서 철근의 직접공사비가 30% 이상을 차지하였고, 레미콘과 철근만으로도 직접공사비의 50% 이상을 차지하는 것으로 분석되었음.

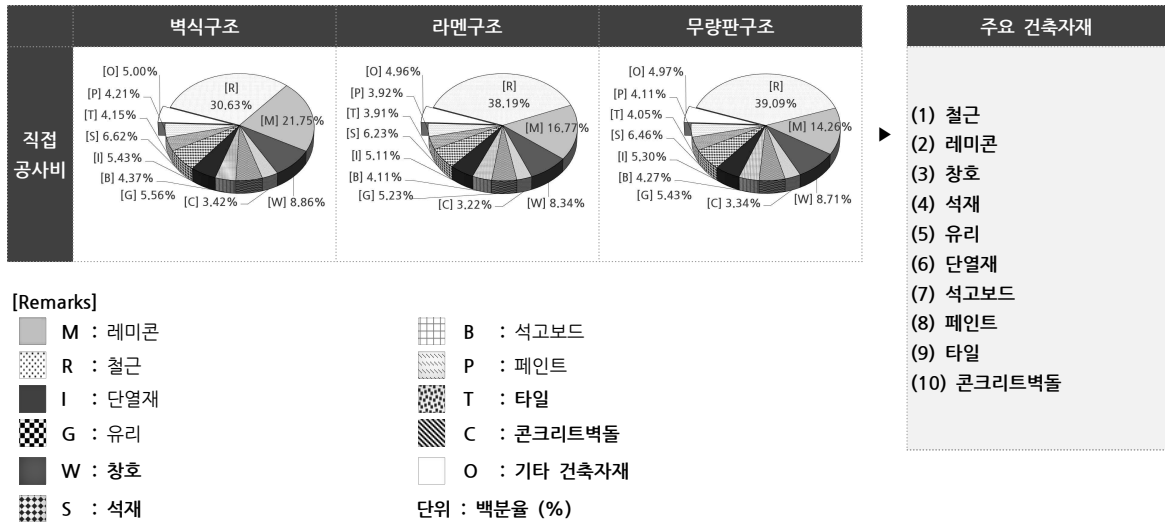


그림 3.4 경제적 측면의 주요 건축자재 분석결과

[종합분석]

- 공동주택의 건축공사에 투입되는 건축자재 중 6가지 환경영향범주와 직접공사비의 누적기여도 95% 이상을 종합적으로 차지하는 **10가지 주요 건축자재(레미콘, 철근, 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드, 창호, 석재, 타일, 페인트)**가 도출되었음.

② 주요 건축자재 물량의 확률분포 Matrix 구축

- 6가지 환경 및 경제적 측면의 공동주택 **주요 건축자재 10종과 공동주택의 건축사업 초기단계에서 결정되는 설계요소(면적정보, 설계년도, 구조형식, 세대조합 등)간의 상관관계 및 민감도를 분석하고, 확률분포 Matrix를 구축함.**

■ 구축방법

- 본 연구에서 입수한 67개 공동주택 단지를 구성하는 725개의 주거동, 154개의 부속동, 67개의 지하주차장을 대상으로 건축사업 초기단계에서 결정되는 설계변수 (표 3.2 참고)를 중심으로 상관관계 분석을 위한 변수를 도출하였음.
- 주거동의 경우 구조형식, 평면형태, 주호조합, 지상층수, 건축면적, 전용면적, 바닥면적, 세대수로 구성되는 총 8가지의 특징을 변수로 설정하였고, 부속동은 지상층수와 바닥

면적의 2가지 변수, 그리고 지하주차장은 지하층수, 지하연면적, 세대수의 총 3가지 특징을 변수로 설정하였음.

- 이때, 상관계수는 Pearson 상관계수를 이용하였음. Pearson 상관계수는 두 변수 간의 값이 $-1 \leq R \leq 1$ 의 값을 갖으며, 그 값에 따라 상관계수의 상관성을 확인할 수 있음. 즉, Pearson 상관계수가 0.0~0.1이면 이들의 상관관계가 없음을 의미하고 0.1~0.2는 약한 양의 상관관계, 0.2~0.4는 보통의 양의 상관관계, 0.4~0.6은 비교적 강한 양의 상관관계, 0.6~0.8은 강한 양의 상관관계, 0.8~1.0은 매우 강한 양의 상관관계를 나타냄.
- 이렇게 분석된 주요 건축자재와 공동주택 설계요소간 상관관계 분석결과를 기준으로 공동주택의 주거동을 구성하는 주요 건축자재에 대한 확률분포 Matrix를 구축하였음.
- 본 연구는 상관계수를 분석함에 있어 주거동은 본 연구에서 도출된 10종의 주요 건축자재를 모두 포함하여 분석하였고 부속동과 지하주차장은 세부적인 물량산출서 입수의 한계로 인해 주요 건축자재 중 가장 영향력이 높은 레미콘과 철근만을 대상으로 하였음. 또한, 상대적으로 표본 수가 적은 무량판구조의 공동주택에 대해서는 세부적인 구조 형식으로 구분하지 않고 무량판구조 전체에 대한 단일의 확률분포로 구성하였음.

표 3.2 상관관계 분석을 위한 변수 분류

구 분	변수 분류
주거동	① 구조형식, ② 평면형태, ③ 주호조합, ④ 지상층수, ⑤ 건축면적, ⑥ 전용면적, ⑦ 바닥면적, ⑧ 세대수
부속동	① 지상층수, ② 바닥면적
지하주차장	① 지하층수, ② 지하연면적, ③ 세대수

■ 상관관계 분석 결과

- 표 3.3에 의하면 주거동에 투입되는 주요 건축자재의 물량은 주거동의 전용면적과 상관관계가 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한, **레미콘과 철근은 구조형식과 주거동의 평면형태과도 상관관계가 높은 것을 확인**하였으며, 콘크리트벽돌과 석고보드는 주거동의 평면형태에 따라 그 물량이 달라지는 것으로 분석되었음.
- 한편, 표 3.4와 표 3.5에 의하면 **부속동에 투입되는 레미콘과 철근은 모두 바닥면적과 상관관계가 높은 것으로 분석되었고, 지하주차장에 대한 레미콘과 철근의 물량은 지하연면적과 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었음.**

표 3.3 주거동의 상관관계 분석결과

구분	구조형식	평면형태	주호조합	지상층수	건축면적	전용면적	바닥면적	세대수	...
구조형식	1.000								
평면형태	0.436	1.000							
주호조합	0.336	0.569	1.000						
지상층수	0.411	0.387	0.209	1.000					
건축면적	0.302	0.314	0.266	0.669	1.000				
전용면적	0.288	0.309	0.294	0.703	0.698	1.000			
바닥면적	0.269	0.293	0.342	0.706	0.745	0.977	1.000		
세대수	0.328	0.402	0.673	0.673	0.632	0.765	0.806	1.000	
레미콘	0.866	0.876	0.348	0.647	0.635	0.977	0.954	0.768	
철근	0.841	0.902	0.387	0.615	0.684	0.913	0.910	0.758	...
콘크리트벽돌	0.741	0.861	0.258	0.652	0.598	0.907	0.890	0.696	
석고보드	0.744	0.836	0.263	0.695	0.614	0.972	0.947	0.740	
창호	0.762	0.789	0.279	0.676	0.633	0.958	0.932	0.739	
석재	0.742	0.763	0.254	0.687	0.721	0.957	0.931	0.716	
타일	0.706	0.774	0.301	0.692	0.699	0.995	0.972	0.766	
유리	0.725	0.723	0.304	0.665	0.719	0.963	0.938	0.744	
단열재	0.746	0.744	0.283	0.614	0.714	0.897	0.881	0.683	
페인트	0.766	0.734	0.304	0.697	0.722	0.998	0.976	0.770	

표 3.4 부속동의 상관관계 분석결과

구분	지상층수	바닥면적	레미콘	철근
지상층수	1.000		1.000	1.000
바닥면적	0.657	1.000		
레미콘	0.438	0.966		
철근	0.526	0.948	0.926	1.000

표 3.5 지하주차장의 상관관계 분석결과

구분	지하층수	지하연면적	세대수	레미콘	철근
지하층수	1.000		1.000	1.000	1.000
지하연면적	0.501	1.000			
세대수	0.387	0.865			
레미콘	0.422	0.945	0.653	1.000	1.000
철근	0.356	0.938	0.703	0.922	

■ Matrix 구축 결과

- 표 3.6은 주요 건축자재별 공동주택 설계요소의 상관관계를 반영하여 본 연구에서 구축된 **주요 건축자재 물량의 확률분포 Matrix**를 나타냄.
- 주요 건축자재의 확률분포별 변수는 공동주택 단지의 구성 건축물(주거동, 부속동, 지하주차장)별로 상관관계가 가장 높은 설계요소를 반영하여 주거동은 전용면적, 부속동은 바닥면적, 지하주차장은 지하연면적으로 설정함.
- 즉, 주거동에 투입되는 모든 주요 건축자재의 변수는 주거동의 전용면적이며, 레미콘과 철근은 구조형식과 평면형태에 따라 각각 7개의 확률분포, 콘크리트 벽돌과 석고보드는 평면형태별로 각각 3개의 확률분포, 유리 및 단열재는 전체 주거동에 대해 각각 1개의 확률분포를 갖는 Matrix로 구성하였음.
- 부속동에 투입되는 레미콘과 철근의 변수는 부속동의 바닥면적이며, 전체 부속동에 대해 각각 1개의 확률분포를 갖는 Matrix로 구성하였음.
- 지하주차장에 투입되는 레미콘과 철근의 변수는 지하주차장의 지하연면적이며, 전체 지하주차장에 대해 각각 1개의 확률분포를 갖는 Matrix로 구성하였음.

표 3.6 주요 건축자재 물량의 확률분포 Matrix

구분	주거동							부속동	지하 주차장
	벽식구조			라멘구조			무량판 구조		
	판상형	탑상형	복합형	판상형	탑상형	복합형			
레미콘	PDF-01	PDF-02	PDF-03	PDF-04	PDF-05	PDF-06	PDF-07	PDF-27	PDF-29
철근	PDF-08	PDF-09	PDF-10	PDF-11	PDF-12	PDF-13	PDF-14	PDF-28	PDF-30
콘크리트벽돌	PDF-15	PDF-16	PDF-17	PDF-15	PDF-16	PDF-17	PDF-15	-	-
석고보드	PDF-18	PDF-19	PDF-20	PDF-18	PDF-19	PDF-20	PDF-18	-	-
창호	PDF-21							-	-
석재	PDF-22							-	-
타일	PDF-23							-	-
유리	PDF-24							-	-
단열재	PDF-25							-	-
페인트	PDF-26							-	-

③ 주요 건축자재 10종에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 구축

- 주요 건축자재의 확률분포 Matrix에 따라 구조형식, 평면형태, 전용면적, 바닥면적, 지하연면적의 변수를 갖는 주요 건축자재에 대한 **확률론적 매개변수 라이브러리 30개를 구축함.**

■ 분석방법

- 본 연구는 분포 적합 도구로 크리스탈 볼(Crystal Ball)을 활용하였고 본 도구에서 제공하는 적합도 검정에 따른 적합 통계량의 산출 결과를 통해 확률분포를 결정하였음.
- 적합도 검정 방법은 현업에서 가장 많이 사용되는 **Anderson-Darling 검정의 적합 통계량을 기준으로** 확률분포를 결정하였고, 본 연구에서 대상으로 한 주요 건축자재의 물량은 다른 주요 건축자재의 물량에 종속되지 않는 독립변수로 가정하였음.

■ 분석결과

- 공동주택 주요 건축자재의 확률분포 Matrix에 따라 표 3.7과 같이 **주요 건축자재에 대한 30개의 확률론적 매개변수 라이브러리를 구축함.**
- 본 연구에서 분석된 확률론적 매개변수 라이브러리에 대한 Anderson-Darling 통계량은 1.50 이하로서 확률분포의 적합성과 유의성을 수학적으로 확인하였음.

표 3.7 공동주택 주요 건축자재에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리

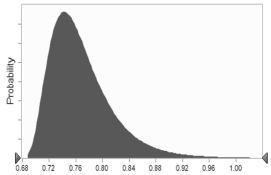
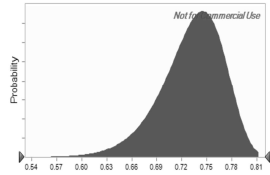
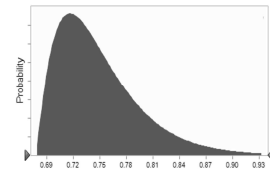
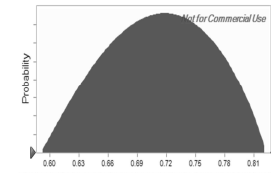
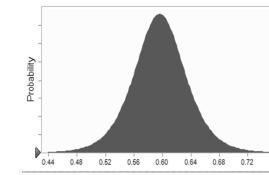
구 분		PDF-01	PDF-02	PDF-03	PDF-04	PDF-05
건축자재		레미콘	레미콘	레미콘	레미콘	레미콘
세부 구분	건축물	주거동	주거동	주거동	주거동	주거동
	구조형식	벽식구조	벽식구조	벽식구조	라멘구조	라멘구조
	평면형태	판상형	탑상형	복합형	판상형	탑상형
확률분포						
		Lognormal distribution	Weibull distribution	Gamma distribution	Beta distribution	Logistic distribution
A-D 검정 통계량		0.807	0.544	0.428	0.192	1.139
변수		전용면적	전용면적	전용면적	전용면적	전용면적
단위		m ³ /m ²	m ³ /m ²	m ³ /m ²	m ³ /m ²	m ³ /m ²
평균값		0.77 m ³ /m ²	0.73 m ³ /m ²	0.75 m ³ /m ²	0.71 m ³ /m ²	0.60 m ³ /m ²
중앙값		0.76 m ³ /m ²	0.74 m ³ /m ²	0.74 m ³ /m ²	0.71 m ³ /m ²	0.60 m ³ /m ²
최빈값		0.74 m ³ /m ²	0.74 m ³ /m ²	0.72 m ³ /m ²	0.72 m ³ /m ²	0.60 m ³ /m ²

표 3.7 공동주택 주요 건축자재에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 (계속)

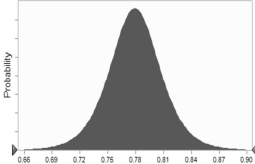
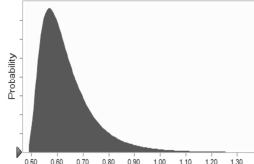
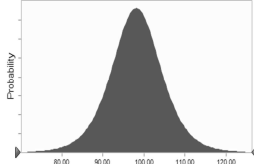
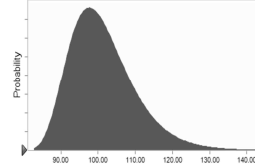
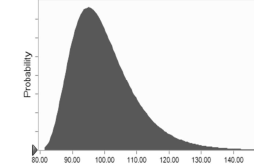
구 분		PDF-06	PDF-07	PDF-08	PDF-09	PDF-10
건축자재		레미콘	레미콘	철근	철근	철근
세부 구분	건축물	주거동	주거동	주거동	주거동	주거동
	구조형식	라멘구조	무량판구조	벽식구조	벽식구조	벽식구조
	평면형태	복합형	전체	판상형	탑상형	복합형
확률분포						
		Logistic distribution	Lognormal distribution	Logistic distribution	Lognormal distribution	Lognormal distribution
A-D 검정 통계량		0.654	0.351	0.727	0.432	0.404
변수		전용면적	전용면적	전용면적	전용면적	전용면적
단위		m ³ /m ²	m ³ /m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
평균값		0.78 m ³ /m ²	0.64 m ³ /m ²	98.13 kg/m ²	101.35 kg/m ²	99.92 kg/m ²
중앙값		0.78 m ³ /m ²	0.61 m ³ /m ²	98.13 kg/m ²	100.07 kg/m ²	98.14 kg/m ²
최빈값		0.78 m ³ /m ²	0.57 m ³ /m ²	98.13 kg/m ²	97.68 kg/m ²	94.94 kg/m ²

표 3.7 공동주택 주요 건축자재에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 (계속)

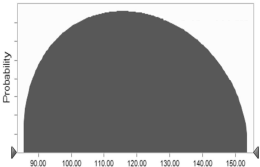
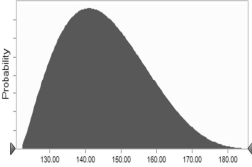
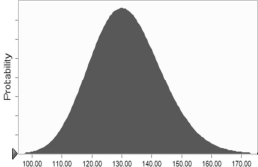
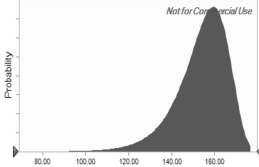
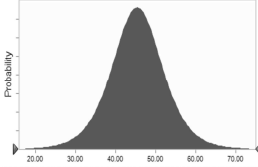
구 분		PDF-11	PDF-12	PDF-13	PDF-14	PDF-15
건축자재		철근	철근	철근	철근	콘크리트벽돌
세부 구분	건축물	주거동	주거동	주거동	주거동	주거동
	구조형식	라멘구조	라멘구조	라멘구조	무량판구조	전체
	평면형태	판상형	탑상형	복합형	전체	판상형
확률분포						
		Beta distribution	Beta distribution	Lognormal distribution	Weibull distribution	Logistic distribution
A-D 검정 통계량		0.136	0.483	1.101	0.865	0.875
변수		전용면적	전용면적	전용면적	전용면적	전용면적
단위		kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	each/m ²
평균값		118.34 kg/m ²	145.26 kg/m ²	131.55 kg/m ²	153.81 kg/m ²	45.33 each/m ²
중앙값		118.03 kg/m ²	144.20 kg/m ²	131.01 kg/m ²	155.82 kg/m ²	45.33 each/m ²
최빈값		115.64 kg/m ²	140.98 kg/m ²	129.95 kg/m ²	159.31 kg/m ²	45.33 each/m ²

표 3.7 공동주택 주요 건축자재에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 (계속)

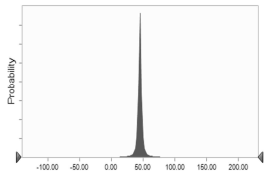
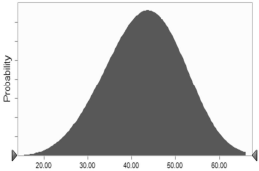
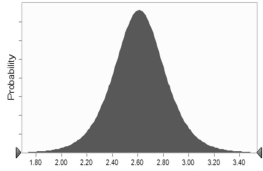
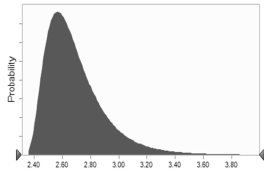
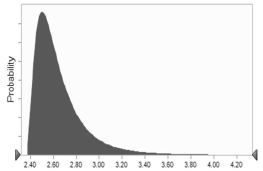
구 분		PDF-16	PDF-17	PDF-18	PDF-19	PDF-20
건축자재		콘크리트벽돌	콘크리트벽돌	석고보드	석고보드	석고보드
세부 구분	건축물	주거동	주거동	주거동	주거동	주거동
	구조형식	전체	전체	전체	전체	전체
	평면형태	탑상형	복합형	판상형	탑상형	복합형
확률분포						
		Student's t distribution	Weibull distribution	Logistic distribution	Lognormal distribution	Lognormal distribution
A-D 검정 통계량		0.669	0.781	0.635	0.721	0.569
변수		전용면적	전용면적	전용면적	전용면적	전용면적
단위		each/m ²	each/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
평균값		44.85 each/m ²	42.91 each/m ²	2.61 kg/m ²	2.69 kg/m ²	2.65 kg/m ²
중앙값		44.85 each/m ²	43.11 each/m ²	2.61 kg/m ²	2.65 kg/m ²	2.59 kg/m ²
최빈값		44.85 each/m ²	43.71 each/m ²	2.61 kg/m ²	2.57 kg/m ²	2.50 kg/m ²

표 3.7 공동주택 주요 건축자재에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 (계속)

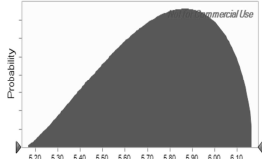
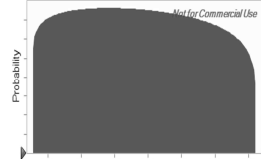
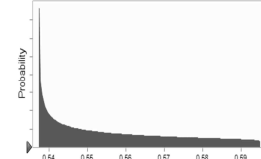
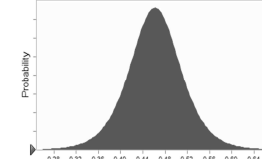
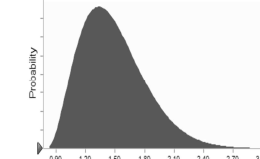
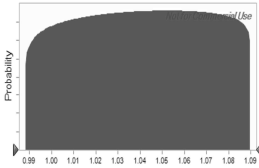
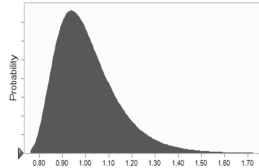
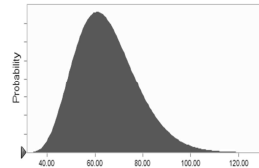
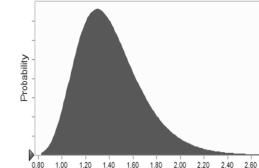
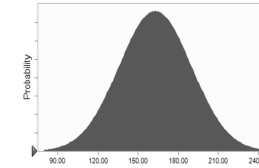
구 분		PDF-21	PDF-22	PDF-23	PDF-24	PDF-25
건축자재		창호	석재	타일	유리	단열재
세부 구분	건축물	주거동	주거동	주거동	주거동	주거동
	구조형식	전체	전체	전체	전체	전체
	평면형태	전체	전체	전체	전체	전체
확률분포						
		Beta distribution	Beta distribution	Beta distribution	Logistic distribution	Beta distribution
A-D 검정 통계량		0.686	0.473	0.685	0.573	0.472
변수		전용면적	전용면적	전용면적	전용면적	전용면적
단위		kg/m ²	m ² /m ²	m ² /m ²	m ² /m ²	kg/m ²
평균값		5.76 kg/m ²	0.14 m ² /m ²	0.56 m ² /m ²	0.46 kg/m ²	1.48 kg/m ²
중앙값		5.78 kg/m ²	0.14 m ² /m ²	0.55 m ² /m ²	0.46 kg/m ²	1.44 kg/m ²
최빈값		5.87 kg/m ²	0.13 m ² /m ²	0.54 m ² /m ²	0.46 kg/m ²	1.34 kg/m ²

표 3.7 공동주택 주요 건축자재에 대한 확률론적 매개변수 라이브러리 (계속)

구 분		PDF-26	PDF-27	PDF-28	PDF-29	PDF-30
건축자재		페인트	레미콘	철근	레미콘	철근
세부 구분	건축물	주거동	부속동	부속동	지하주차장	지하주차장
	구조형식	전체	-	-	-	-
	평면형태	전체	-	-	-	-
확률분포						
		Beta distribution	Lognormal distribution	Beta distribution	Lognormal distribution	Normal distribution
A-D 검정 통계량		0.549	0.762	0.931	0.425	0.769
변수		전용면적	전용면적	전용면적	전용면적	전용면적
단위		ℓ / m^2	m^3 / m^2	kg / m^2	m^3 / m^2	kg / m^2
평균값		1.04 ℓ / m^2	1.01 m^3 / m^2	64.95 kg / m^2	1.41 m^3 / m^2	162.81 kg / m^2
중앙값		1.04 ℓ / m^2	0.98 m^3 / m^2	63.64 kg / m^2	1.37 m^3 / m^2	162.81 kg / m^2
최빈값		1.05 ℓ / m^2	0.94 m^3 / m^2	60.88 kg / m^2	1.30 m^3 / m^2	162.81 kg / m^2

(나) 공동주택 설계요소별 주요 건축자재의 확률론적 매개변수 라이브러리 성능평가

① 주요 건축자재 목록 검토

- 본 연구에서 선정된 환경영향 관점의 주요 건축자재 6종과 직접공사비 관점의 주요 건축자재 10종에 대한 타당성을 분석하기 위해 **국내외 기존 연구에서 분석한 환경적 측면, 경제적 측면, 중량 기준의 주요 건축자재 목록을 조사하였고 이를 비교함.**

■ 분석방법

[환경적 측면]

- 본 연구에서 도출된 환경영향 관점의 주요 건축자재는 지구온난화지수를 포함한 6가지의 환경영향 범주(지구온난화지수, 산성화지수, 부영양화지수, 오존층영향지수, 광화학적산화물생성지수, 자원사용지수)를 모두 고려한 6가지의 건축자재(레미콘, 철근, 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드)임.
- 하지만 국내외 기존 연구에 대한 조사 결과, 본 연구에서와 같이 다양한 환경영향 범주를 고려하여 주요 건축자재를 도출한 연구는 전무한 것으로 판단되어 건축자재의 탄소배출량(또는 지구온난화지수)만을 고려하여 건축물의 주요 건축자재를 분석한 국내외 기존 연구결과와 목록을 비교함.

[경제적 측면]

- 본 연구에서 도출된 직접공사비 관점의 주요 건축자재는 총 10종의 건축자재(레미콘, 철근, 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드, 창호, 석재, 타일, 페인트)로써 LH공사에서 직접공사비를 기준으로 분석한 주요 건축자재와 목록을 비교함.

[중량 기준]

- 제품을 중심으로 한 전과정 평가(LCA)에서는 일반적으로 평가대상 물질의 범위를 설정하기 위해 중량기준에 의한 제외기준(Cut-off criteria)을 사용하고 있음.
- 이에 본 연구에서는 SH공사에서 공동주택에 투입되는 건축자재의 중량을 기준으로 분석한 주요 건축자재와도 목록을 비교함.

■ 분석결과

[환경적 측면]

- 본 연구에서 도출된 환경적 측면의 주요 건축자재 6종은 국내 공동주택을 대상으로 기존 연구에서 탄소배출량 중심으로 도출된 **6종의 건축자재 중 4종의 건축자재(레미콘, 철근, 콘크리트벽돌, 단열재)가 일치**하는 것으로 분석되었음.
- 또한, 해외의 기존 연구에서 포르투갈의 공동주택과 호주의 복합건축물의 탄소배출량을 중심으로 도출된 주요 건축자재와도 각각 6가지 건축자재 중 5가지(레미콘,

철근, 유리, 콘크리트벽돌, 석고보드), 6가지 건축자재 중 4가지의 건축자재(레미콘, 철근, 유리, 석고보드)가 일치함을 확인하였음.

[경제적 측면]

- LH공사에서 분석한 주요 건축자재인 철근, 레미콘, 창호, 유리, 단열재, 석고보드, 타일, 석재는 본 연구에서의 직접공사비 관점에서 도출한 **주요 건축자재에 모두 포함** 되는 것으로 분석되었음.

[중량 기준]

- SH공사에서 건축자재의 중량을 기준으로 분석한 주요 건축자재는 레미콘, 콘크리트벽돌, 철근, 시멘트, 유리, 타일 등으로 조사되었고 이 중 레미콘, 콘크리트벽돌, 철근, 유리, 타일의 5가지 건축자재가 본 연구의 주요 건축자재와 공통됨을 확인하였음. 이를 통해 본 연구에서 도출된 주요 건축자재의 유효성과 적합성을 확인하였음.

표 3.8 다양한 관점의 주요 건축자재 목록

구분	본 연구		신성우 외	Pacheco-Torgal 외	Biswas 외	LH공사	SH공사
	환경영향	직접공사비	탄소배출량			직접공사비	중량
	공동주택	공동주택	공동주택	공동주택	복합건축물	공동주택	공동주택
	국내	국내	국내	포르투갈	호주	국내	국내
레미콘	■	■	■	■	■	■	■
철근	■	■	■	■	■	■	■
유리	■	■	-	■	■	■	■
콘크리트벽돌	■	■	■	■	-	-	■
단열재	■	■	■	-	-	■	-
석고보드	■	■	-	■	■	■	-
창호	-	■	■	■	■	■	-
석재	-	■	-	-	-	■	-
타일	-	■	-	-	■	■	■
페인트	-	■	■	-	-	-	-
시멘트	-	-	-	-	-	-	■

② 확률론적 예측방법 검토

- 본 연구는 확률분포를 이용한 주요 건축자재의 물량값인 최빈값에 대한 타당성을 검토하고자 주거동에 대한 임의의 표본을 추출한 후 그 표본의 물량산출내역에 근거한 레미콘의 실제 물량 분포와 철근의 물량 분포를 분석하고 기존 결정론적 방식의 평가에서 주로 사용되는 물량의 평균값과 본 연구에서 분석된 **확률분포로부터 도출된 최빈값에 대한 표준편차(Standard deviation)를 서로 비교함.**

■ 분석방법

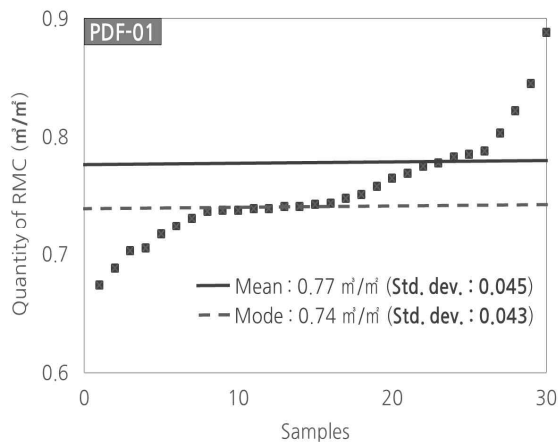
- 본 연구에서 구축한 725개의 주거동(총 67개 공동주택 단지)을 모집단으로 설정하고 확률 표본 추출법(Probabilistic sampling)의 일종인 층화추출법(Stratified sampling)을 통해 구조형식 및 평면형태에 따라 무작위로 30가지 주거동을 추출하였음. 여기서 층화추출법이란 모집단이 서로 겹치지 않는 여러 동질 집단으로 구성되어 있는 경우 동질 집단을 각각의 층(Strata)으로 구분하고 각 층에 대한 표본을 무작위 추출하는 것을 의미함.
- 또한, 추출된 주거동에 따라 물량산출내역 기준의 레미콘과 철근의 단위 전용면적당 물량을 나열하였고 확률분포 중 해당 층(Strata)의 평균값과 최빈값의 이격도가 높은 PDF-01, PDF-03, PDF-07, PDF-09, PDF-10, PDF-12, PDF-14를 대상으로 평균값과 최빈값에 대한 표준편차를 표 3.9와 같이 산출하였음.

■ 분석결과

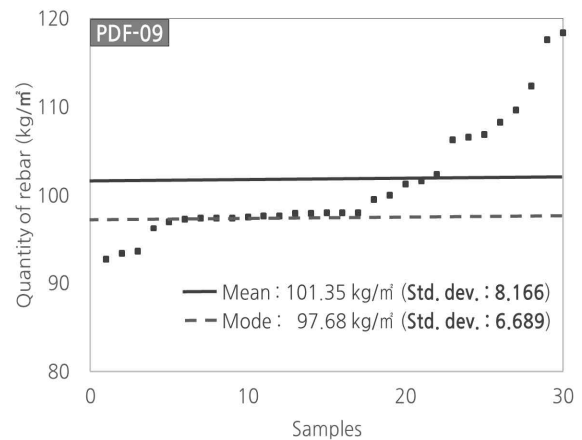
- 30개 표본의 실제 단위 전용면적당 물량값을 기준으로 산출한 확률분포의 최빈값에 대한 표준편차는 평균값에 의한 표준편차와 비교하여 상대적으로 작은 값이 산출됨을 보였음.
- 이는 그림 3.5에 나타낸 PDF-01과 PDF-09에 대한 사례와 같이 확률분포에서 도출된 최빈값은 무작위로 추출된 표본의 물량에 대한 발생빈도가 가장 높은 값으로써 평균값과 같이 편차가 큰 표본의 물량을 포함하지 않는 것에 기인한 것으로 판단됨.
- 이를 통해 본 연구에서 분석한 주요 건축자재의 확률분포와 이를 대표하는 최빈값에 대한 유의성을 확인하였으며, 평가대상 건축물에 대한 정확한 정보의 입수가 어려운 건축사업 초기단계에서 건축물의 전과정 지속가능성 평가를 위해 기존의 방식과 같이 건축자재의 평균값을 적용하는 것 보다 본 연구에서 제시하고 있는 **최빈값을 적용하는 것이 확률적으로 유용한 평가결과로 산출될 수 있다는 가능성을 확인**하였음.

표 3.9 주요 건축자재 물량 예측방법별(평균, 최빈) 표준편차

구분	건축자재	샘플 수	평균값		최빈값	
			투입량	표준편차	투입량	표준편차
PDF-01	레미콘	30	0.77 m ³ /m ²	0.045	0.74 m ³ /m ²	0.043
PDF-03	레미콘	30	0.75 m ³ /m ²	0.036	0.72 m ³ /m ²	0.031
PDF-07	레미콘	30	0.64 m ³ /m ²	0.076	0.57 m ³ /m ²	0.061
PDF-09	철근	30	101.35 kg/m ²	8.166	97.68 kg/m ²	6.689
PDF-10	철근	30	99.92 kg/m ²	9.652	94.94 kg/m ²	8.365
PDF-12	철근	30	145.26 kg/m ²	8.632	140.98 kg/m ²	8.465
PDF-14	철근	30	153.81 kg/m ²	7.658	159.31 kg/m ²	7.254



(a) PDF-01



(b) PDF-09

그림 3.5 최빈값에 대한 유의성 검토결과

(다) SB-PRO 시작품 개발 지원

- SB-PRO 시작품 개발을 지원하기 위해 본 연구에서 구축된 공동주택의 주요 건축자재에 대한 30개의 확률론적 매개변수 라이브러리를 제공하고, Excel 기반의 SB-PRO 시작품에서 원활하게 구현될 수 있도록 협력함. 세부 내용은 SB-PRO 시작품 개발 부분에 통합하여 기술함.

㉔ 전과정 시나리오 구축

- ISO 21931-1에 따르면 건축물의 전과정 단계는 그림 3.7과 같이 생산단계, 시공단계, 운영단계, 폐기단계로 구분되며, 생산단계를 제외한 시공단계, 운영단계, 폐기단계에서 전과정 지속가능성 평가를 위한 시나리오가 요구되어 짐.
- 본 연구에서는 그림 3.8과 같이 공동주택의 전과정 지속가능성을 평가하기 위해 생산단계를 제외한 **건축물 전과정 단계별 시나리오를 구축**하였음.

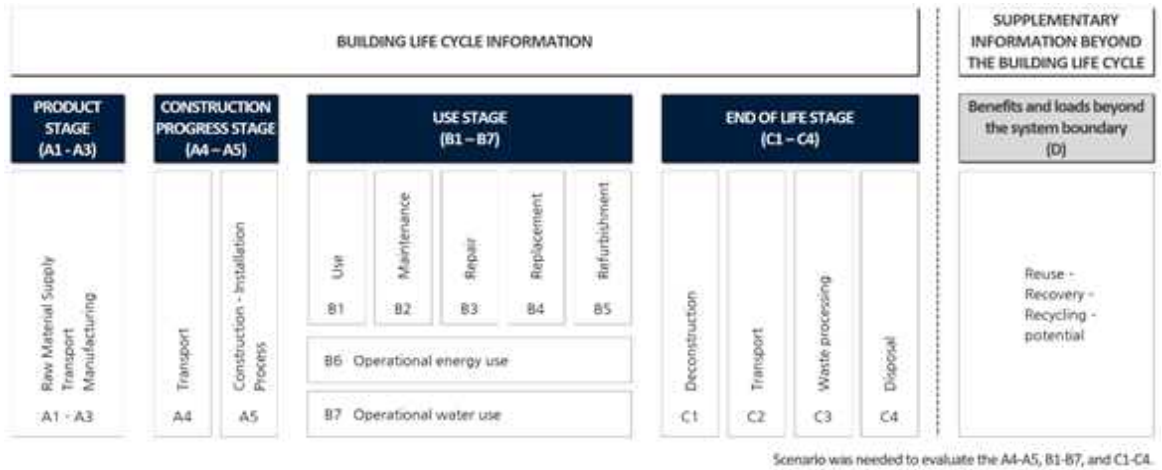


그림 3.7 건축물 전과정 단계

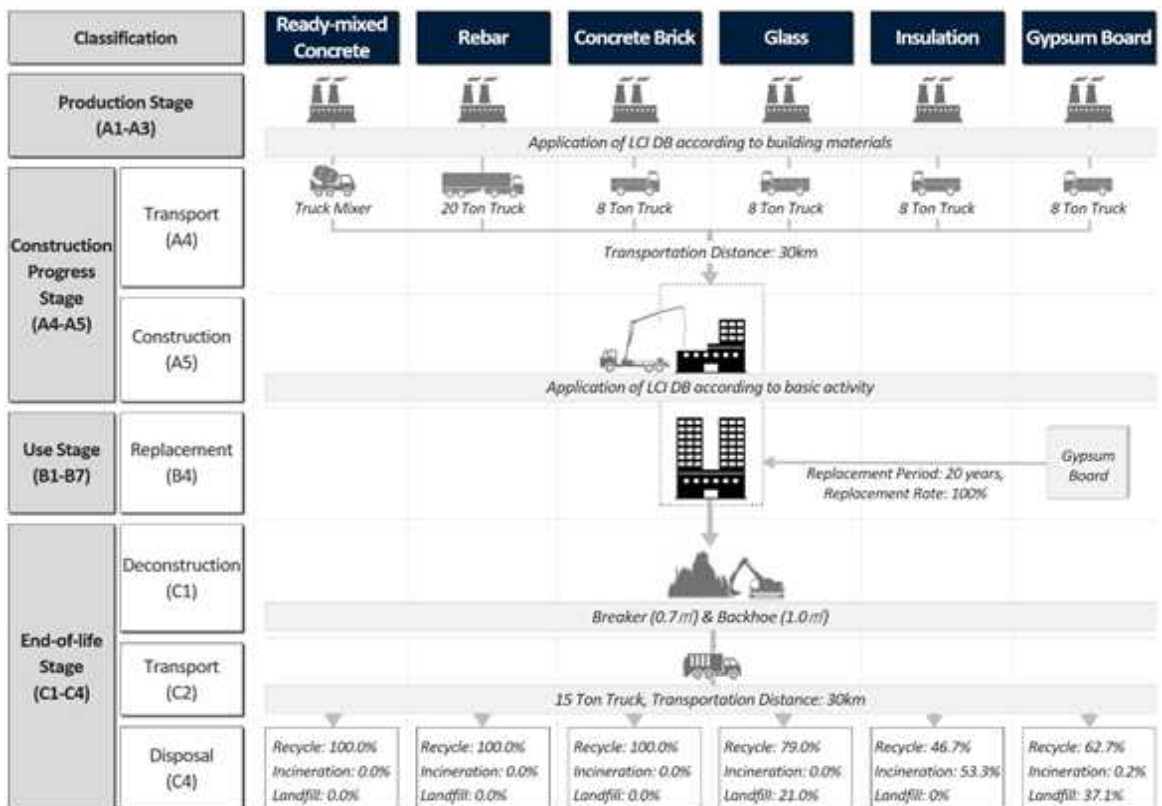


그림 3.8 건축물 전과정 시나리오

■ 시공단계

- 시공단계는 운송과정과 시공과정으로 구분될 수 있음.
- 운송과정은 건축물에 투입되는 건축자재를 시공현장까지 운송하는 과정에 대한 환경영향을 평가함. 이에 건축공사 표준품셈에 근거하여 건축자재별로 주로 사용되는 운송차량의 종류를 조사하였음. 그 결과, 레미콘 수송에는 레미콘 믹스트럭이 사용되고 철근과 형강 수송에는 20ton 트럭이 주로 사용되었음. 또한, 그 외의 건축자재는 8ton 트럭이 사용되었고 모든 건축자재는 30km 이내의 건축자재 업체에서 조달받는 것으로 설정하였음.
- 시공과정은 건축물의 시공과정에서 장비의 사용과 현장사무소의 운영 등으로 인한 환경영향을 평가함. 본 연구에서는 시공과정의 에너지소비량 도출을 위해 지구별 예산내역서와 일위대가에 근거하여 공동주택 시공과정의 에너지소비량을 간접적으로 도출한 기존 연구 자료(건축공종 29건, 토목공종 22건, 조경공종 22건, 전력소비량 36건)와 최근 준공된 공사현장(공동주택 5건)의 전력소비 실측량과 공사일보를 분석하였음. 특히, 건설장비의 에너지소비량은 공사일보에 명시된 장비 사용현황과 근로기준법의 일일 근로시간인 8시간을 적용하여 건설장비별 총 사용시간을 분석하였고 건축표준품셈의 건설장비별 연비를 적용하여 에너지소비량을 산출하였음. 표 3.10은 본 연구에서 도출한 공동주택 시공과정의 에너지소비량을 나타냄.

표 3.10 공동주택 시공과정의 에너지소비량

경유 (ℓ/m^2)	프로판가스 (kg/m^2)	등유 (ℓ/m^2)	전기 (kWh/m^2)
2.023	0.008	0.270	10.635

■ 운영단계

- 운영단계는 에너지의 사용과정과 유지관리과정으로 구분될 수 있음.
- 공동주택의 운영단계에서 발생하는 환경영향을 평가하기 위해서는 건축물 수명(Service life)의 설정이 필요하며, 건축물의 수명은 그 목적과 판단기준에 따라 표 3.11과 같이 물리적 수명, 기능적 수명, 사회적 수명, 경제적 수명, 법적 수명으로 구분될 수 있음. 본 연구에서는 건축사업 초기단계에서 건축물의 환경영향을 평가하고 그 결과를 비교하기 위한 방안으로 국내 법인세법에서 규정하고 있는 법적 수명인 40년을 동일하게 적용하는 것으로 시나리오를 구축하였음.
- 한편, 유지관리과정에서는 건축물의 개보수를 위해 신규로 투입되는 건축자재에 대한 환경영향을 평가함. 이에 주택법에서 제시하는 건축자재별 수선주기와 수선율에 기초한 환경영향 평가 방법을 적용하였음.

표 3.11 건축물의 수명 분류

구분	내용
물리적 수명	염해, 중성화 등 건축물의 물리적인 노후화에 의해 결정되는 수명
기능적 수명	당초의 기능을 충분히 달성하지 못함으로서 결정되는 수명
사회적 수명	사회적으로 사용가치가 현저히 떨어지는 것에 의해 결정되는 수명
경제적 수명	지가의 상승, 기술의 발달로 인해 경제성이 저하되는 것에 의해 결정되는 수명
법적 수명	공공의 안전, 세금의 계산 등을 위해 법적으로 정해 놓은 수명

■ 폐기단계

- 폐기단계는 건축물의 해체과정, 폐건축자재의 운송과정, 폐건축자재의 매립과정으로 분류될 수 있음.
- 해체과정은 건축물의 해체작업에 투입되는 장비에 기인한 환경영향을 평가함. 이때, 해체과정에서는 폐건축자재의 양이 산출되는데 본 연구에서는 폐건축자재의 양과 생산단계에서 투입된 건축자재의 수량이 동일하다고 설정하였음. 또한, 해체장비는 기존 연구의 결과에 따라 해체과정에서 일반적으로 사용되는 Backhoe (1.0m³) + Giant Breaker (0.7m³)로 설정하였음.
- 운송과정은 발생된 폐기물을 처리장까지 운송하는 과정에서의 환경영향을 평가함. 이때, 운송차량은 건설표준품셈에 따라 15ton 트럭이 사용되는 것으로 조사되었으며, 운송거리는 시공단계의 운송과정과 동일하게 30km로 설정하였음.
- 매립과정은 폐건축자재를 매립하는 과정에서 발생하는 환경영향을 평가함. 본 연구에서는 폐건축자재 재활용과정의 환경영향은 재활용업체에서 부담하는 Cut-off method를 적용하였고 재활용되지 못한 폐건축자재에 대한 매립과정에서의 환경영향만을 고려하였음. 이때, 매립장비는 Dozer (D8N, 15 PL, 6 PL) + Compactor (32ton)로 설정하였고, 폐기물통계연감에 따라 건축자재별 폐기물 처리현황을 조사하였음. 그 결과, 레미콘은 모두 재활용되고 유리는 79.0%가 재활용되는 것으로 조사되었음. 또한, 석고보드는 62.7%의 재활용이 이뤄지고 나머지는 대부분 매립되는 것으로 분석되었음. 한편, 철근, 형강은 모두 재활용되는 것으로 조사되었음. 표 3.12는 본 연구에서 설정한 해체 및 매립장비의 에너지소비량을 나타냄.

표 3.12 공동주택 해체 및 매립장비의 에너지소비량

구분	장비조합	경유 소비량 (ℓ/ton)
해체	Backhoe (1.0m ³) + Giant Breaker(0.7m ³)	3.642
매립	Dozer (D8N, 15 PL, 6 PL) + Compactor (32ton)	0.150

㉔ 공동주택 전과정 환경영향 평가방법론 구축

- 건축물의 환경적 전과정 평가방법 정립을 위해서는 건축물에 투입되는 건축자재와 에너지, 건축물로부터 배출되는 폐기물 등의 **환경영향을 분석하기 위한 기준 설정이 필요함**.
- 이에 본 연구에서는 다양한 전과정 영향평가 방법론의 현황과 장단점을 비교하여 본 연구에서 적용될 전과정 영향평가 방법을 선정하였고, 이를 준용하여 **공동주택의 전과정 환경영향 평가방법론을 구축**하였음.

■ 전과정 영향평가 방법 선정

- 전과정 영향평가(LCIA)의 방법은 그 접근방식에 따라 그림 3.9와 같이 문제비교형 모델(Mid-point model), 피해산정형 모델(End-point model)로 구분됨.
- 문제비교형 모델은 환경영향 물질별로 각 물질에 대한 특성화값을 곱하여 평가하는 기법이며, 이는 전과정 영향평가 과정에서 자연과학적 연구 성과를 반영하지 않은 단순한 평가결과로만 도출된다는 한계점을 가짐. 환언하면 문제비교형 모델로 도출된 평가결과만으로는 환경부하가 인간과 생태계에서 미치는 영향을 직접적으로 파악하기 어려울 뿐만 아니라 10가지 이상의 환경영향 범주에 주관적인 가중치가 반영되어 단일 지표화됨에 따라 환경문제를 통해 발생하는 피해 파악이 불가능하고 개선방안을 제시하기에도 어려움이 있음.
- 피해산정형 모델은 환경부하 목록으로부터 발생하는 환경문제를 자연과학적 연구 성과를 이용하여 인간 또는 생태계에 미치는 피해지표로 평가하는 모델이며, 이는 LCIA 과정에서 주관적 가치판단을 가능한 한 배제한 평가모델이며, 비교항목인 보호대상은 4가지 이하로써 비교항목수가 적고 환경문제를 통해 발생하는 피해의 파악과 이를 포함한 범주의 파악이 가능하다는 장점이 있음. 이러한 장점으로 인해 최근에는 환경영향 범주의 통합과정과 평가결과와의 해석이 어려운 문제비교형 모델과 비교하여 보다 과학적이고 평가결과와의 해석이 용이한 피해산정형 모델이 사용되고 있는 추세임.

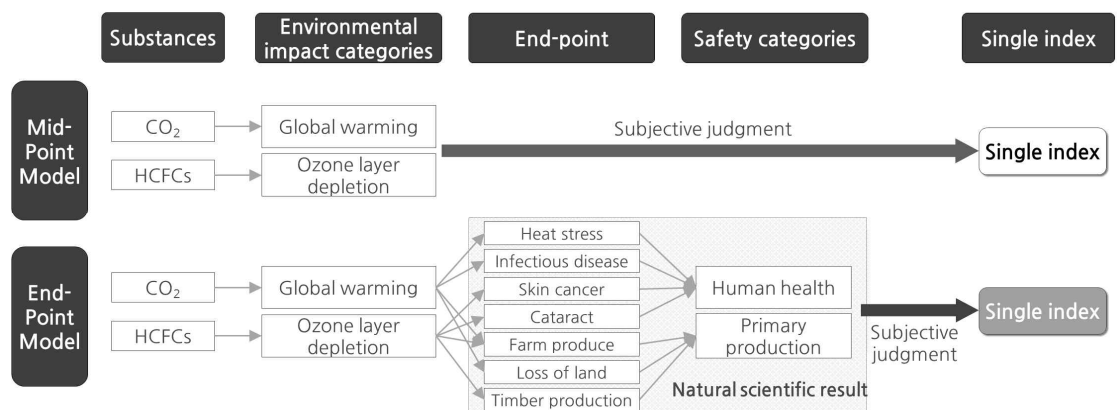


그림 3.9 문제비교형 모델과 피해산정형 모델 개념

- 대표적인 피해산정형 모델로는 표 3.13과 같이 스웨덴의 EPS 2000, 네덜란드의 Eco Indicator, 일본의 LIME, 한국의 KOLID가 있으며 자국에 적합한 보호대상을 규정하고 있음.
- 본 연구에서는 LCIA 방법의 선정에 있어 지역적 상관성을 고려하고자 국내 **환경부에서 개발된 피해산정형 모델인 KOLID(KOrean Life cycle Impact assessment method based on a Damage oriented modeling)**를 적용하였음.
- KOLID는 그림 3.10과 같이 지구온난화, 산성화, 부영양화, 오존층파괴, 광화학적산화물, 자원고갈의 6가지 환경영향 범주를 통해 암, 감염증, 백내장, 영양부족, 토지유실, 농업생산 등 16가지 종말점에 대한 피해를 정량적으로 산출하고 이를 인체건강, 사회자산, 생물다양성, 1차 생산의 4가지 보호대상(Safety guard)으로 평가하며, 화폐가치로써 단일의 최종 평가결과를 도출함. 이때, KOLID의 인체건강에서는 사망 또는 사망에 이르지 않는 장애와 질환의 기간(Year)을 의미하는 DALY를 피해지표로하고 사회자산은 농작물, 수산자원, 삼림자원, 광물자원, 화석연료 억제 및 고갈에 대한 경제적인 비용(원)을 의미함. 또한, 생물다양성은 유관속식물과 수생생물의 멸종종수에 대한 기대치인 EINES를 피해지표로 평가하며, 1차 생산은 육상식물과 해양 플랑크톤의 광합성에 의한 유기물의 양(kg/m²·yr)을 평가하는 NPP를 피해지표로 함.
- 식 3.1은 통합화 과정을 통해 시스템 전체의 환경영향을 산출하는 개념식을 나타내며, 표 3.14와 표 3.15는 각각 환경영향 범주의 기준물질별 피해계수와 KOLID의 보호대상별 경제가치 비용을 나타냄.

표 3.13. 피해산정형 모델 종류별 특징

구 분			EPS 2000	Eco Indicator	LIME	KOLID
개발국가			스웨덴	네덜란드	일본	한국
개발년도			2001년	1999년	2005년	2009년
보 호 대 상	인 간 생 활	인체 건강	수명손실년수 (YOLL)	장애보정 생존년수 (DALY)	장애보정 생존년수 (DALY)	장애보정 생존년수 (DALY)
		사회 자산	비생물자원, 생태계 생산력	자원	화폐(엔)	화폐(원)
	생 태 계	생물 다양성	생물다양성 (NEX)	생태계의 질 (PAF, PDF)	기대멸종종수 (EINES)	기대멸종종수 (EINES)
		1차 생산	-	-	순 1차 생산량 (NPP)	순 1차 생산량 (NPP)
	최종 평가결과		단일지수	단일지수	화폐가치 (엔)	화폐가치 (원)

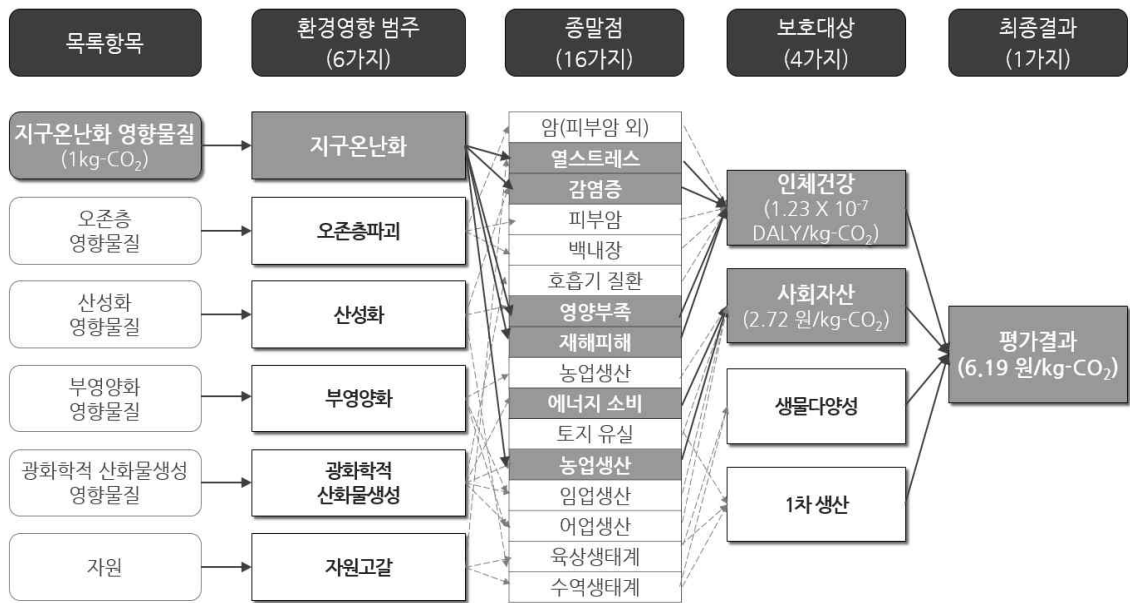


그림 3.10 KOLID의 구조

$$TI = \sum_k I_k = \sum_k (D_k \times IF_k) = \sum_k \sum_i \sum_j (Load_{i,j} \times DF_{k,i,j} \times IF_k) \dots\dots\dots \text{식 3.1}$$

여기서 TI는 통합화를 통한 시스템 전체의 환경영향, Dk는 보호대상 k로 분류된 모든 목록항목들이 해당 보호대상에 미치는 영향크기, IFk는 보호대상 k의 통합화 계수, Load_{i,j}는 영향범주 i로 분류된 목록항목 j의 환경부하량, DF_{k,i,j}는 영향범주 i로 분류된 목록항목 j가 보호대상 k에 미치는 피해계수, Ik는 보호대상 k의 환경영향을 나타냄.

표 3.14 환경영향 범주의 기준물질별 피해계수

환경영향 범주	기준 물질	보호대상	종말점		지표	피해계수
GWP	CO ₂	인체건강	열·한랭 스트레스	열·한랭 스트레스로 인한 사망 피해	손실수명	1.23×10 ⁻⁷ DALY/kg-CO ₂
			감염증	말라리아·냉기열에 의한 사망 피해		
			재해 피해	홍수, 태풍 증가에 의한 사망 피해		
			영양 부족	영양부족에 의한 사망피해		
		사회자산	농업 생산	잠재 생산량의 감소 수량	농작물 생산량	2.72 원/kg-CO ₂
			에너지소비	냉방증가·난방감소에 의한 에너지 소비량의 변화	에너지 소비량	
			해수 상승	수물 피해	토지가격	
AP	SO ₂	인체건강	호흡기질환	천식·호흡기 질환 등에 의한 피해	손실수명	2.38×10 ⁻⁴ DALY/kg-SO ₂
		사회자산	목재 생산	잠재 생산량의 감소 수량	목재 생산량	5,094.81 원/kg-SO ₂
		1차 생산	육역생태계	육상식물 1차 생산량 감소 수량	1차 생산량	26.26 kg/kg-SO ₂
EP	PO ₄ ³⁻	사회자산	수역생태계	어업생산 감소량	어업 생산량	2,314.00 원/kg-PO ₄ ³⁻
ODP	CFC-11	인체건강	피부암	악성흑색종, 기저세포함, 유극세포함에 의한 피해	손실수명	1.35×10 ⁻³ DALY/kg-CFC -11
			백내장	피질형·핵형 백내장 피해		
		사회자산	농업 생산	잠재 생산량의 감소 수량	농작물·목재 생산량	1,295.43 원/kg-CFC-11
			목재 생산	잠재 생산량의 감소 수량		
		1차 생산	육역생태계	육상식물 1차 생산량 감소 수량	1차 생산량	279.48 kg/kg-CFC-11
			수역생태계	식물 플랑크톤 1차 생산량 저하		
POCP	C ₂ H ₄	인체건강	호흡기질환	급성사망, 천식·호흡기 질환 등에 의한 피해	손실수명	3.22×10 ⁻⁵ DALY/kg-C ₂ H ₄
		사회자산	농업 생산	잠재 생산량의 감소 수량	농작물 생산량	823.30 원/kg-C ₂ H ₄
			목재 생산	잠재 생산량의 감소 수량	목재 생산량	
		1차 생산	육역생태계	육상식물 1차 생산량 감소 수량	1차 생산량	26.40 kg/kg-C ₂ H ₄
ADP	Sb	사회자산	고갈성자원	자원 매장량의 감소	사용자비용	14.21 kg/kg-Sb
		생물다양성	육역생태계	식물종 구성의 변화	종변화	1.53×10 ⁻¹ EINES/kg-Sb
		1차 생산	육역생태계	토지변화 및 토지 이용 중의 잠재적인 NPP 저하	1차 생산량	8.90×10 ⁻¹⁴ kg/kg-Sb

표 3.15. KOLID의 보호대상별 경제가치 비용

보호대상	내용	단위	경제가치비용 (원/단위)
인체건강	사망 또는 사망에 이르지 않는 장애와 질환	장애보정 생존년수 (DALY)	2.82E+7
사회자산	농작물, 수산자원, 삼림자원, 광물자원, 화석연료	화폐 (원)	1.00E+0
생물다양성	유관속식물과 수생생물의 멸종	기대멸종종수 (EINES)	5.69E+5
1차 생산	육상식물과 해양 플랑크톤	순 1차 생산량 (NPP)	4.93E+4

■ 공동주택 전과정 환경영향 평가방법론 구축

- 앞서 도출된 연구결과를 이용하여 공동주택의 전과정 환경영향 평가방법론을 그림 3.11과 같이 구축함. 본 방법론은 목적 및 범위정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 전과정 영향평가, 전과정 해석으로 구성되며, 세부 내용은 아래와 같음.

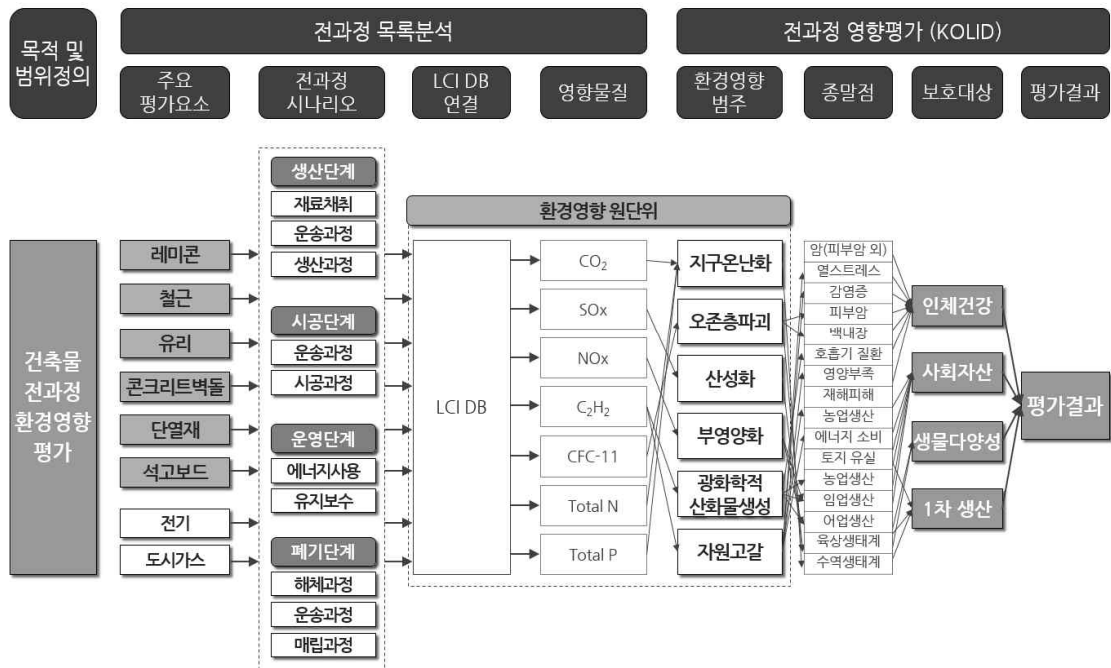


그림 3.11 전과정 환경영향 평가방법론 개념도

- 목적 및 범위정의

- 본 평가방법론의 궁극적인 목적은 건축사업 초기단계에서 건축물의 전과정 환경영향 평가를 체계적으로 수행하는 것임.
- 적용분야는 건축사업 초기단계에서 공동주택의 환경성능을 판단하기 위한 이해관계자의 의사결정 지원으로 설정하였고 목표청중은 건축주, 시행사, 건축

사, 시공사 등 건축사업에 대한 의사결정권을 지닌 이해관계자로 정의하였음. 또한, 동일 건축사업 내 다수의 대안 공동주택에 대한 환경성능의 비교가 가능하도록 정의하였음.

- 기능단위는 공동주택으로서 최소의 주거 기능을 나타내는 단위 전용면적(m^2)으로 설정하였고 데이터의 제외기준은 적용하지 않았음.
- 시스템 경계는 건축물의 생산단계, 시공단계, 유지관리과정, 폐기단계 등에서 발생하는 간접적 환경영향인 내재 환경영향과 운영단계에서 소비되는 에너지원에 기인한 운영 환경영향을 포함한 전과정 환경영향으로 설정함. 이때, 제품 시스템 내 경계는 본 연구에서 제외기준(Cut-off)을 통해 도출한 주요 건축자재 6가지와 운영단계 40년 동안에 대한 에너지원별 소비량 등을 포함하며, 폐건축자재의 재활용과정은 재활용업체에서 부담하는 Cut-off method를 적용하고 재활용되지 못한 폐건축자재의 매립과정만을 포함하였음.
- 또한, 본 평가기술에서는 본 연구에서 주요 환경영향 범주로 선정한 6가지 환경영향 범주(GWP, AP, EP, ODP, POCP, ADP)를 평가대상으로 정의함.
- 한편, 건축사업에서는 최종 산출물로 단일의 공동주택만이 생산됨에 따라 환경영향 평가의 결과를 제품 시스템간의 경계를 물리적 또는 경제적 관점으로 배분하는 할당(Allocation)은 발생하지 않는 것으로 설정함.

- 전과정 목록분석(LCI)

- 전과정 목록분석(LCI) 단계에서는 앞서 평가대상 공동주택의 시스템 경계로 설정된 건축물의 전과정 단계에 걸쳐 투입되는 주요 건축자재와 에너지원에 대한 종류 및 수량 정보를 수집해야 하며, 이를 공동주택의 기능단위인 단위 전용면적(m^2) 당에 대한 정보로 환산하도록 설정하였음.
- 공동주택의 생산단계에서는 본 연구에서 도출한 주요 건축자재인 레미콘, 철근, 단열재, 콘크리트벽돌, 유리, 석고보드에 대한 정보는 물량산출서 또는 BIM의 일람표 기능 등을 통해 수집할 수 있으며, 운영단계의 연간 에너지소비량은 에너지 시뮬레이션을 통해 입수 가능함.
- 시공단계와 폐기단계에서의 에너지소비량 정보는 전과정 시나리오를 통해 수집이 가능함. 이때 최종 산출물로 단일의 공동주택만이 생산되며, 건설폐기물의 발생과 재활용에 따른 환경영향은 고려하지 않는 것으로 가정하였음.

- 전과정 영향평가(LCIA)

- 전과정 영향평가(LCIA) 단계는 중간점(Mid-point) 수준의 주요 환경영향 범주 평가와 종말점(End-point) 수준의 보호대상 평가로 구분되며, 중간점 수준의 주요 환경영향 범주 평가는 전과정 목록분석(LCI) 단계에서 작성된 GtG 데이터와 구축한 환경영향 원단위를 이용하여 평가 가능함. 종말점 수준의 보호대상 평가는 중간점 수준의 평가결과와 KOLID를 이용하여 평가 가능하며, 최종 평가결과는 경제적 가치를 나타내는 단일의 평가결과로써 표현할 수 있음.

- 전과정 해석

- 전과정 해석 단계는 ISO 14040 시리즈에서 명시된 사항에 따라 LCI 단계와 LCIA 단계로부터 도출된 평가결과를 분석하고 LCA에 대한 최종 결론과 환경영향을 저감하기 위한 개선방안을 도출하는 것으로 설정하였음. 또한, 주요 인자를 규명하고 연구결과에 대한 신뢰성 평가 등이 진행될 수 있음.

㉔ 공동주택 전과정 비용 평가방법론 구축

- 본 연구에서는 전과정 비용 평가를 위한 주요 비용 범주를 선정하였고 직접공사비 기준의 주요 건축자재를 이용하는 **현가분석방법에 기초한 전과정 비용 평가방법론**을 구축하였음.

■ 주요 비용 범주 선정

- 표 3.16과 같이 건축물 전과정 비용은 초기투자비용, 운영비용, 철거비용, 기타비용으로 구성되며, 세부적으로 기획·설계비, 직접공사비, 운영 에너지 비용, 유지보수비용, 일반관리비용, 철거비용 등으로 구분됨.
- 본 연구는 **주요 비용범주로 직접공사비(재료비+노무비+경비), 운영 에너지 비용, 유지보수비용을 선정**하였음. 이때, 다양한 전과정 비용 범주 중 건축물에 물리적으로 종속되지 않는 기획·설계비, 일반 관리비용, 지원금은 주요 비용 범주에서 제외하였고, 철거비용은 건축물에 물리적 비용으로 종속되나 이를 사전에 파악하기 어렵고 건축물의 전과정 비용에서도 차지하는 비율이 미미한 것으로 조사되어 평가범위에서 제외하였음.

표 3.16 전과정 비용 범주

대분류	초기투자비용					운영비용						철거비용		기타
중분류	기획·설계비		직접공사비			에너지 비용		유지보수비용		일반관리비용		철거비용		지원금
소분류	기획비	설계비	재료비	노무비	경비	전기 요금	가스 요금	수리 부품비	교체비	세금	보험료	철거비	잔존 가치	각종 지원금

■ 전과정 비용 산출식 정립

- 본 연구에서는 전과정 비용을 평가하기 위해 현가 분석방법을 준용한 산출식을 정립하였음. 현가 분석방법은 사업초기에 투입되는 초기비용, 매년 동일하게 발생하는 반복비용과 간헐적으로 발생하는 비반복비용으로 구성됨. 이에 직접공사비는 초기비용, 연간 에너지 비용은 반복비용, 유지보수비용은 비반복비용으로 설정하였음.
- 한편, 환경적 전과정 비용평가에서는 종래의 전과정 비용을 의미하는 사적비용과 전과정 환경영향을 비용으로 환산한 외부비용을 함께 평가해야 함에 따라 본 연구에서는 전과정 비용 산출식을 식 3.2와 같이 제안하였음.

$$ELCC = (PC_C + EC_C) + \sum_{n=1}^{40} \frac{(PC_E + EC_E) \times (1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} + \sum_{k=1}^k \frac{(PC_M + EC_M)}{(1+i)^{ak}} \dots\dots\dots \text{식 3.2}$$

여기서 PC_C 와 EC_C 은 직접공사비(사적비용)와 생산단계 외부비용, PC_E 와 EC_E 는 연간 에너지소비에 대한 사적비용과 외부비용, PC_M 과 EC_M 은 유지보수에 대한 사적비용과 외부비용을 의미하며, i 는 실질이자율, n 은 건축물 수명, k 는 건축물 수명 40년 동안 건축자재의 수선 횟수, a 는 수선주기를 나타냄.

- **사적비용**의 평가를 위해서는 직접공사비, 운영 에너지 비용, 유지보수비용을 산출해야 함. 직접공사비는 앞서 도출된 10가지 주요 건축자재의 투입량과 단가의 곱을 통해 산출 가능하며, 에너지 비용은 연간 에너지 소비량과 단가, 유지보수비용은 건축자재의 투입량과 수선을 그리고 단가의 곱을 통해 식 3.3, 식 3.4, 식 3.5와 같이 평가할 수 있다.
- **외부비용**은 환경경제학에서 정립된 환경영향의 경제 가치화 이론을 전과정 영향평가에 접목하여 비용으로 환산 가능함. 국내의 경우, 종말점 수준의 피해산정 방법을 통해 4가지 **보호대상(인체건강, 사회자산, 생물다양성, 1차 생산)의 가치를 한계지불 의사비용으로 분석**한 KOLID의 **경제가치비용**을 이용하여 식 3.6, 식 3.7, 식 3.8과 같이 외부비용을 산출할 수 있음.

$$PC_C = \sum_{i=1}^{10} (Q_{m,i} \times U_{c,i}) \dots\dots\dots \text{식 3.3}$$

$$PC_E = \sum_{i=1}^n (Q_{e,i} \times U_{e,i}) \dots\dots\dots \text{식 3.4}$$

$$PC_M = \sum_{i=1}^{10} (Q_{m,i} \times U_{c,i} \times R_i) \dots\dots\dots \text{식 3.5}$$

여기서 PC_C 와 PC_E 는 직접공사비와 연간 에너지소비량의 사적비용, $Q_{m,i}$ 와 $U_{c,i}$ 는 주요 건축자재 (i)의 물량과 직접공사 단가, $Q_{e,i}$ 와 $U_{e,i}$ 는 에너지원 (i)의 연간 소비량과 에너지원 (i)의 단가, R_i 는 주요 건축자재 (i)의 수선율을 의미함.

$$EC_C = \sum_{i=1}^6 (Q_{m,i} \times I_{m,i} \times F_{ec}) \dots\dots\dots \text{식 3.6}$$

$$EC_E = \sum_{i=1}^n (Q_{e,i} \times I_{e,i} \times F_{ec}) \dots\dots\dots \text{식 3.7}$$

$$EC_M = \sum_{i=1}^6 (Q_{m,i} \times I_{m,i} \times F_{ec} \times R_i) \dots\dots\dots \text{식 3.8}$$

여기서 EC_C 와 EC_E 는 직접공사비와 연간 에너지소비량의 외부비용, $Q_{m,i}$ 와 $Q_{e,i}$ 는 주요 건축자재 (i)의 물량과 에너지원 (i)의 연간 소비량, $I_{m,i}$ 와 $I_{e,i}$ 는 주요 건축자재 (i)와 에너지원 (i)의 환경영향에 따른 보호대상별 피해규모 원단위, F_{ec} 는 KOLID의 경제가치 비용, R_i 는 주요 건축자재 (i)의 수선율을 의미함.

- 한편, 전과정 비용 평가의 외부비용은 앞서 구축된 환경적 전과정 평가의 보호대상별로 산출된 환경영향의 평가결과를 단순히 비용으로 환산하는 과정이며, 이를 전과정 지속가능성 평가(LCSA)에 반영하기 위해서는 중복계산(Double-counting)에 유의해야 함. 이는 전과정 지속가능성 평가(LCSA) 과정에서 산출된 전과정 환경영향 평가의 결과가 전과정 환경영향 평가와 전과정 비용 평가에 중복되어 반영되기 때문임.
- 따라서 본 연구에서는 전과정 비용 평가의 활용 용도에 따라 표 3.17과 같은 외부비용의 적용 원칙을 정립하였음. 즉, 전과정 지속가능성 평가에서 건축물 전과정 평가의 결과가 전과정 비용 평가의 외부비용으로 통합되어 적용되는 경우 건축물 전과정 평가결과는 포함하지 않고 각 평가기술의 결과가 서로 다른 목적에 의해 분리되어 적용되는 경우 전과정 비용 평가의 외부비용 평가결과는 고려하지 않는 것으로 설정하였음.

표 3.17 외부비용 적용 원칙

구분	원칙
전과정 지속가능성 평가를 위해 전과정 평가와 환경적 전과정 비용 평가가 동시에 적용되는 경우	외부비용을 적용하지 않고, 전과정 평가결과를 반영함.
전과정 평가와 환경적 전과정 비용 평가가 서로 다른 목적에 의해 분리되어 적용되는 경우	외부비용을 적용하여 사적비용과 합산하여 평가함.

■ 공동주택 전과정 비용 평가방법론 구축

- 앞서 도출된 연구결과를 이용하여 공동주택의 전과정 비용 평가방법론을 그림 3.12와 같이 구축함. 본 기술은 목적 및 범위정의, 전과정 목록분석, 전과정 해석, 보도 및 검토로 구성되며, 세부 내용은 아래와 같음.

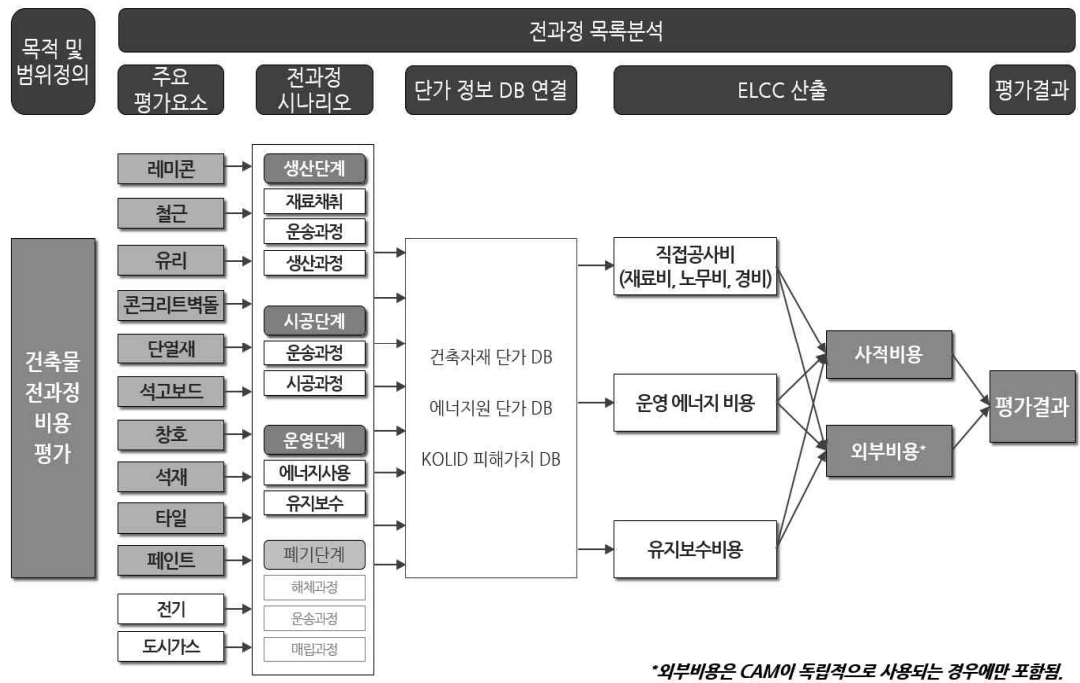


그림 3.12 전과정 비용 평가방법론 개념도

- 목적 및 범위 정의

- 본 평가방법론의 궁극적인 목적은 건축사업 초기단계에서 외부비용을 고려한 건축물의 전과정 비용 평가를 체계적으로 수행하는 것임.
- 적용분야는 건축사업 초기단계에서 환경적 외부비용을 포함한 공동주택의 경제적 성능을 판단하는 이해관계자의 의사결정 지원으로 설정하였고 목표청중과 비교주장 여부는 전과정 환경영향 평가방법과 동일하게 정의하였다.
- 기능단위는 공동주택으로서 최소 주거기능을 나타내는 단위 전용면적(m^2)으로 설정하였고 데이터의 제외기준은 적용하지 않는 것으로 정의하였음.
- 시스템 경계는 건축물의 생산단계에서부터 시공단계, 운영단계까지로 설정하였고 본 연구의 연구결과로 도출된 주요 건축자재 10가지에 근간한 직접공사비와 건축물의 법적 수명인 40년 동안의 총 운영 에너지비용 및 유지보수비용을 평가범위로 설정하였음.
- 이때, 사적비용은 반드시 평가결과에 포함되어야 하며, 외부비용은 “4.4.2 외부비용”에 기술한 외부비용의 적용 원칙(Table 4-3 참고)에 따라 그 포함 여부를 결정할 수 있도록 구축하였다.

- 전과정 목록분석(LCI)

- LCI 단계에서는 평가대상 공동주택의 시스템 경계로 설정된 건축물의 전과정 단계에 걸쳐 투입되는 주요 건축자재와 에너지원에 대한 종류 및 수량 정보를 수집해야 하며, 이를 공동주택의 기능단위인 단위 전용면적(m^2) 당에 대한 정보로 환산하도록 설정하였음.

- 공동주택의 생산단계에서는 본 연구에서 도출한 주요 건축자재인 레미콘, 철근, 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드, 창호, 석재, 타일, 페인트에 대한 정보는 물량산출서 또는 BIM의 일람표 기능 등을 통해 수집할 수 있으며, 운영단계의 연간 에너지소비량은 에너지 시뮬레이션을 통해 입수 가능함.
- 이때, 본 연구에서는 최종 산출물로 단일의 공동주택만이 생산되며, 건설폐기물의 발생과 재활용에 따른 환경영향은 고려하지 않는 것으로 가정함.
- 한편, 이렇게 수집된 단위 전용면적(m^2) 당 건축자재와 에너지원에 대한 정보는 GtG 데이터(Gate to gate data)로 표현이 가능함. 여기서 사적비용은 조달청에서 공시한 시설공사(건축분야) 가격정보, 에너지원별 단가 및 10년 평균의 실질이자율 정보를 통해 평가될 수 있으며, 외부비용은 건축물 전과정 환경영향 평가방법을 이용하여 산출될 수 있음.

- 전과정 해석

- 전과정 해석단계는 SETAC의 “Environmental Life Cycle Costing”과 “Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice”를 준용하여 전과정 목록분석(LCI) 단계로부터 산출된 환경적 전과정 비용의 평가결과를 분석하고 이에 대한 최종 결론과 개선방안을 도출하는 것으로 설정하였음. 또한, 본 평가결과에 대한 주요 인자의 규명과 함께 일관성, 완전성, 민감도 분석 등을 통한 신뢰성 평가 등이 진행될 수 있음.

- 보고 및 검토

- 보고 및 검토단계는 SETAC의 “Environmental Life Cycle Costing”과 “Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice”를 준용하여 목적 및 범위, 기능단위, 시스템 경계, 할당 절차 및 방법, 할인율 적용 방법, 그리고 최종 결론 등에 대한 유효성을 검토하는 것으로 설정하였음.

㉔ 공동주택 사회영향 평가방법론 구축

- 본 연구는 미국의 LEED, 영국의 BREEAM, 한국의 G-SEED 등 현재 각 국에서 운영되고 있는 **녹색건축 인증제도와 같이 건축물의 사회영향을 구성하는 전문분야에 따라 건축물의 성능을 평가하는 방법으로 구성**하였음.
- 이때, 사회영향 평가항목과 세부기준은 첨단도시개발사업 시장수요 기반 녹색건축물 실용화 분야(녹색건축물 활성화를 위한 온실가스 배출량 평가 및 통합인증시스템 구축) 연구에서 제시된 평가기준을 준용하였음.
- 특히, 본 연구는 상기 평가기준을 토대로 건축물의 사회영향을 나타내하는 전문분야를 생태(Ecology), 건강(Health), 기능(Function), 에너지 효율(Energy Efficiency), 자원 효율(Resource Efficiency)로 구분하였고, 표 3.18과 같이 총 49가지의 세부 평가기준을 구축하였음.

- 이러한 세부 평가항목의 점수를 합산하여 평가 대상 공동주택의 사회영향을 평가할 수 있음.

표 3.18 사회영향 평가항목

구분		평가항목	배점		가중치
생태	생태	연계된 녹지축 조성	2	20	23
		생태면적률	6		
		비오톱 조성	4		
		기존대지의 생태학적 가치	2		
		자연지반 녹지율	4		
		토사유출량 최소화	2		
건강	공기	실내공기오염물질 저방출 자재의 사용	6	36	22
		자연환기성능 확보 여부	3		
		곰팡이 방지	2		
		CO2, 실내오염물질 모니터링, 제어	2		
		실간 경계벽의 차음 성능	2		
		경량,중량 충격음차단성능	4		
		화장실 급배수 소음	2		
		일조확보	4		
		오존층보호를 위한 특정물질의 사용금지	3		
	음환경	교통소음에 대한 실내.외 소음도	2		
	빛환경	건물의 향에 대한 영향	2		
		빛공해 저감	2		
		일조권 간섭방지 대책의 타당성	2		
기능	유지 운영	환경을 고려한 현장관리계획의 합리성	1	22	12
		운영/유지관리 문서/지침 제공의 타당성	2		
		TAB 및 커미셔닝실시	2		
		수리용이성	2		
		실내 자동온도조절장치 채택 여부	2		
		세대관리를 위한 사용자 매뉴얼 제공	1		
		녹색건축전문가의 참여	2		
	성능	대지내 자전거 보관소 설치여부	2		
		생활편의시설의 근접성	2		
		단지내의 대안적 교통수단의 설치 여부	2		
		대중교통에의 근접성	2		
		혁신적인 디자인 도입	2		

표 3.18 사회영향 평가항목 (계속)

구분		평가항목	배점		가중치
에너지 효율	에너지	에너지 효율향상	12	24	25
		신·재생에너지 이용	3		
		외피 열교방지	2		
		에너지모니터링 및 관리지원 장치	2		
		고효율 가전기기	1		
		열섬효과	2		
		차양설치	2		
자원 효율	자원	자원재활용을 위한 친환경인증제품 사용여부	3	35	18
		재활용 가능자원의 분리수거	2		
		주요 구조부 재사용으로 재료 및 자원의 절약	7		
		음식물쓰레기 저감	2		
		생활용가구재 사용억제 대책의 타당성	3		
		가변성	3		
		재료의 탄소배출량 정보 표시	2		
	수자원	우수부하 절감대책의 타당성	3		
		생활용 상수 절감 대책의 타당성	4		
		우수 이용	3		
		중수도 및 하폐수 처리수 재이용	3		

㉮ 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법론 구축

- 앞서 구축된 공동주택의 전과정 환경영향 평가, 전과정 비용 평가, 사회영향 평가방법론을 통합하여 **공동주택의 전과정 지속가능성 평가방법론을 구축**하였음.

■ 목적 및 범위정의

[목적 정의]

- 목적 정의에서는 전과정 지속가능성 평가를 구성하는 건축물 전과정 환경영향 평가, 전과정 비용 평가, 사회영향 평가에 대한 공통의 목적을 정의해야 함. 이에 본 연구는 건축물 전과정 지속가능성 평가의 체계적인 수행을 목적으로 정의하였음.
- 적용분야는 건축물의 전과정 지속가능성을 정량적으로 판단하기 위한 이해관계자의 의사결정 지원이며, 목표청중은 건축주, 건축사를 비롯한 건축사업의 이해관계자로 정의하였음. 또한, 동일 건축사업 내 다수의 대안 건축물과 평가결과의 비교가 가능하도록 정의하였음.

[범위 정의]

- 전과정 지속가능성 평가 시 시스템 경계가 통일되는 것이 이상적이나 본 연구에서는 건축물의 환경적, 경제적, 사회적 관점에 따라 중요하게 다뤄지는 평가 범주가 달라지

는 것을 고려하여 시스템 경계를 다음과 같이 설정하였음.

- 전과정 환경영향 평가는 주요 환경영향 범주로 선정된 6가지 환경영향 범주를 대상으로 6가지 주요 건축자재와 운영단계 40년 동안의 에너지소비량에 의한 내재 환경영향과 운영 환경영향을 평가하도록 정의하였음.
- 전과정 비용 평가는 건축물의 생산단계, 시공단계, 운영단계를 평가하며, 10가지 주요 건축자재와 운영단계 40년 동안의 에너지소비량에 의한 직접공사비, 운영 에너지비용, 유지보수비용의 사적비용과 외부비용을 평가하도록 정의하였음.
- 사회영향 평가는 건축물이 계획된 생태, 건강, 기능, 에너지 효율, 자원 효율 측면에서 획득한 각 항목별 점수를 합산하여 평가하는 것으로 정의하였음.

■ 전과정 목록분석

- 전과정 목록분석(LCI) 단계는 시스템 경계로 설정된 건축물의 전과정 단계에 따라 투입되는 주요 건축자재와 에너지원의 투입량 정보를 수집하고, 이를 기능단위인 단위 전용면적(m^2)으로 나누어 GtG 데이터(Gate to gate data)를 작성하는 것으로 설정하였음. 이때, 주요 건축자재의 투입량과 연간 에너지소비량 정보는 각각 건축물의 물량산출서와 에너지 시뮬레이션을 통해 수집할 수 있으며, 시공단계와 폐기단계의 에너지소비량 정보는 본 연구에서 구축한 전과정 시나리오를 통해 수집이 가능함.
- 한편, 본 건축물 전과정 지속가능성 평가방법에서 건설폐기물의 발생과 재활용에 따른 영향은 고려하지 않는 것으로 가정하였음. 이렇게 수집된 단위 전용면적(m^2) 당 건축자재와 에너지원의 정보는 GtG 데이터로 작성되어 전과정 환경영향 평가(또는 전과정 비용 평가의 외부비용)를 위해 환경영향 원단위와 연결될 수 있으며, GtG 데이터와 조달청의 시설공사 가격정보, 에너지원별 단가, 실질이자율 등을 이용하여 전과정 비용 중 사적비용을 평가할 수 있음.

■ 전과정 영향평가

- 전과정 영향평가(LCIA) 단계는 ISO 14044를 준용하여 LCI 단계에서 수집된 데이터를 중심으로 제품 시스템에 대한 잠재적인 지속가능성(전과정 환경영향, 전과정 비용, 사회영향)을 평가하는 것으로 설정하였음.
- 특히, 전과정 환경영향 평가는 LCI 단계에서 작성된 GtG 데이터와 국가 LCI DB 등을 이용한 환경영향 원단위를 이용하여 최종 평가결과를 산출하며, 사회영향 평가는 건축물이 계획된 생태, 건강, 기능, 에너지 효율, 자원 효율 측면에서 획득한 각 항목별 점수를 합산하여 평가하는 것으로 설정하였음.

■ 전과정 해석

- 전과정 해석 단계는 UNEP의 “Towards a Life Cycle Sustainability Assessment”와 ISO 14040에서 제시한 사항에 따라 LCI 단계와 LCIA 단계로부터 도출된 평가결과를 분석하고 전과정 지속가능성 평가에 대한 최종 결론과 지속가능성을 제고하기 위한 개선방안을 도출하는 것으로 설정하였음.

㉞ 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발

- 본 연구는 앞서 정립한 전과정 지속가능성 평가방법에 확률론적 분석 방법을 결합한 확률론적 방식의 공동주택 지속가능성 평가기술을 개발하였음.
- 본 연구에서 정의한 확률론적 분석 방법이란 건축물 특성에 따른 주요 건축자재의 투입량에 대한 확률분포를 이용하여 주요 건축자재별로 전과정 환경영향, 전과정 비용을 평가하고 건축물의 계획 및 설계수준에 따라 사회영향을 평가한 후, 몬테카를로 시뮬레이션을 기술적 도구로서 활용하여 이들을 결합한 건축물 관점의 최종 평가결과를 확률분포로써 도출하는 분석방법을 의미함.
- 본 연구에서 정립된 **확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술은 입력단계(STEP 1), 연산단계(STEP 2), 출력단계(STEP 3)로 구성됨**. 표 3.19는 확률기반 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술의 개요를 나타냄.

표 3.19 확률기반 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개요

구 분		전과정 지속가능성								
		환경적 측면				경제적 측면		사회적 측면		
입력 단계	목표설정	표준 건축물의 환경적, 경제적, 사회적 수준								
	기본정보	연면적, 바닥면적, 전용면적 등을 포함한 건축개요								
	건축자재	주요 건축자재 10종의 투입량								
	에너지	연간 운영 에너지원별 소비량								
연산 단계	생산단계	● 주요 건축자재 6종 생산				● 주요 건축자재 10종의 구입과 건축시공		● 건축물의 계획 및 설계수준에 따른 생태, 건강, 기능, 에너지 효율, 자원 효율 측면의 사회영향		
	시공단계	● 주요 건축자재 6종 운송 ● 건축물 시공								
	운영단계	● 40년 동안 운영 에너지원 소비 ● 주요 건축자재 6종의 유지보수				● 40년 동안 운영 에너지원 소비 ● 주요 건축자재 10종의 유지보수				
	폐기단계	● 건축물의 해체 ● 폐건축자재의 운송 ● 폐건축자재의 매립				·				
	평가결과	전과정 환경영향				전과정 비용				사회영향
		인체 건강	사회 자산	생물 다양성	1차 생산	사적비용	외부비용	사회영향		
	출력 단계	평가지표	P-EI				P-CI		P-SI	
P-SBI										

■ STEP 1: 입력단계

- 입력단계는 기준 건축물에 대한 환경적, 경제적, 사회적 측면의 수준을 설정하고 평가 건축물의 전과정 지속가능성 평가를 위해 요구되는 정보를 입력하는 단계임. 이때, 건축 설계도서를 바탕으로 평가 건축물의 기본정보와 에너지 시뮬레이션 도구를 통해 평가된 연간 운영 에너지소비량을 에너지원별로 구분하여 입력함.

■ STEP 2: 연산단계

- 연산단계에서는 상기 입력단계에서 확보한 건축물의 정보를 통해 본 연구에서 구축된 주요 건축자재 10종(레미콘, 철근, 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드, 창호, 석재, 타일, 페인트)에 대한 확률분포를 도출함.
- 이때, 주거동의 레미콘과 철근은 벽식구조, 라멘구조, 무량판구조의 구조형식과 판상형, 탑상형, 복합형의 건축물 형태에 따라 전용면적당 건축자재 투입량의 확률분포가 도출됨. 유리, 콘크리트벽돌, 단열재, 석고보드, 창호, 석재, 타일, 페인트도 전술한 레미콘 및 철근과 동일한 방식으로 연산됨. 또한, 부속동의 레미콘과 철근 투입량은 부속동의 바닥면적에 따라 그 확률분포를 도출할 수 있으며, 지하주차장의 레미콘과 철근은 공동주택 단지에 대한 총 세대수에 따라 전용면적당 건축자재 투입량의 확률분포가 결정됨.
- 이와 같이 도출된 건축자재의 투입량에 대한 확률분포는 건축물의 생산단계를 평가하기 위한 물량 정보로 활용되며, 전과정 시나리오를 통해 시공단계, 폐기단계 등을 평가하기 위한 에너지소비량과 건축자재의 물량을 도출하게 됨. 이렇게 도출된 건축자재의 물량과 에너지소비량 정보에 기초하여 건축물의 전과정 환경영향과 전과정 비용을 순차적으로 평가하게 됨. 또한, 건축물의 계획 및 설계수준에 따라 사회영향을 평가하며, 최종적으로 몬테카를로 시뮬레이션을 도구로 이용한 평가를 수행하게 됨.

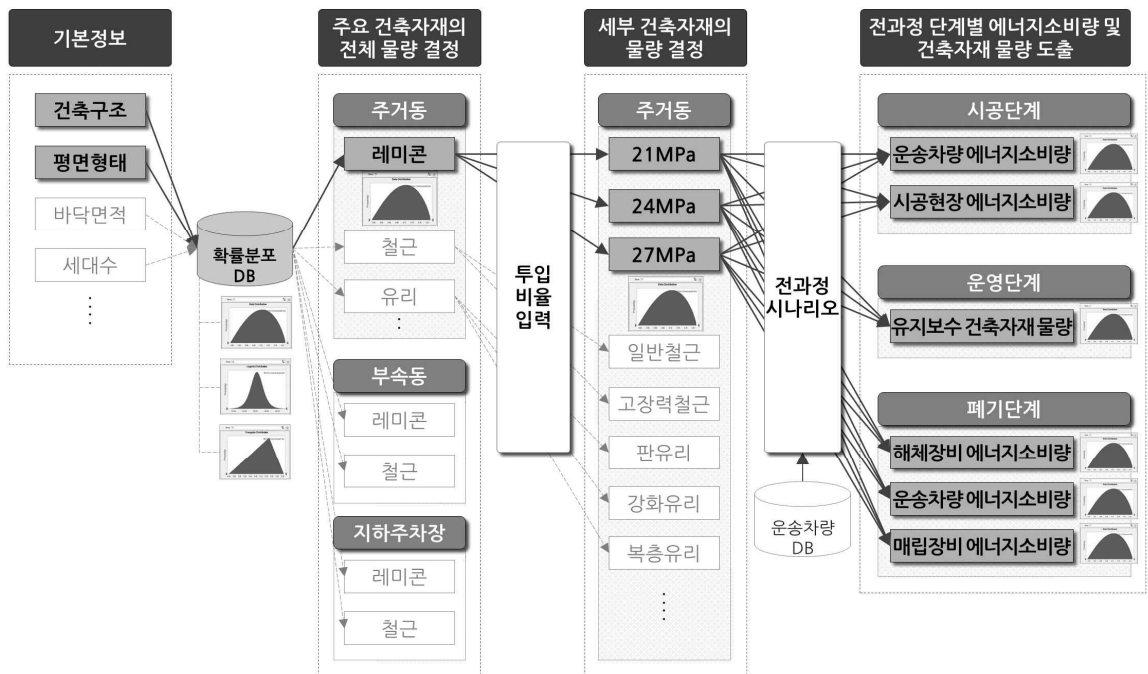


그림 3.13 주요 건축자재 물량 및 에너지소비량 도출 개념

■ STEP 3: 출력단계

- 출력단계에서는 연산단계에서 산출된 평가 건축물의 확률론적 전과정 환경영향, 확률론적 전과정 비용, 사회영향 평가결과 등을 확률모형 형태의 지속가능성 평가결과(확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표)로 종합하여 출력함.

(다) SB-PRO 시작품 개발

① SB-DET 시작품 개발

- 본 연구는 공동주택의 전과정 환경영향 평가, 전과정 비용 평가, 사회영향 평가를 통해 **지속가능성 평가를 결정론적 분석방법으로 지원할 수 있는 웹 기반의 지속가능성 평가 시스템 시작품(SB-DET)**을 개발함.

■ 프로그램 특징

- 전과정 환경영향 평가, 전과정 비용 평가, 사회영향 평가 모듈을 탑재함.
- 지속가능성 평가를 위해 요구되는 전문적인 입력 변수를 최소화하여 대안평가를 위한 실무에서의 활용도를 제고함.
- 에너지소비량 평가는 본 연구에서 개발된 iBEST-Home의 평가결과를 이용할 수 있도록 구성함.

■ 프로그램 주요기능

- 건축물 전과정 환경영향 평가
- 건축물 전과정 비용 평가
- 건축물 사회영향 평가
- 건축물 전과정 지속가능성 평가

■ 프로그램 UI

- 메인화면

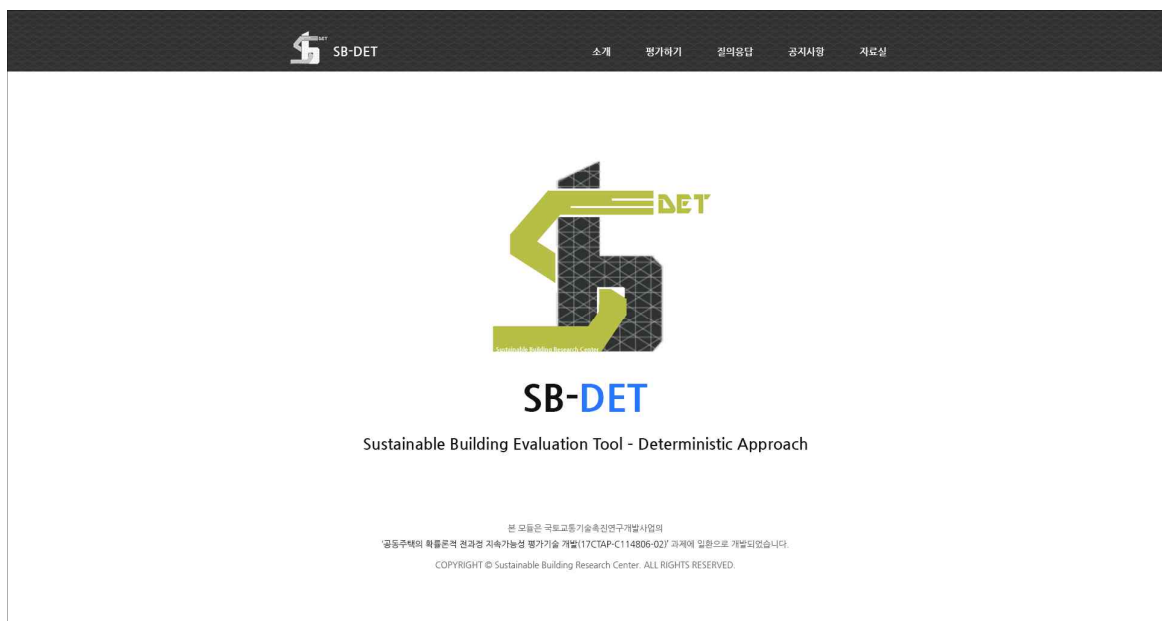


그림 3.14 SB-DET 메인화면

- 소개화면



그림 3.15 SB-DET 소개화면

- 데이터 입력화면

- (1) 기본정보: 프로젝트의 사업명, 지역정보, 구조, 규모, 면적정보 등을 입력함.
- (2) 환경영향: 공동주택에 투입되는 주요 건축자재 수량 및 에너지소비량을 입력함.
- (3) 비용: 공동주택 프로젝트에 대한 견적과 연간 에너지비용을 입력함.
- (4) 사회영향: 건축설계안에 따라 각 평가항목별 수준을 선택 또는 입력함.

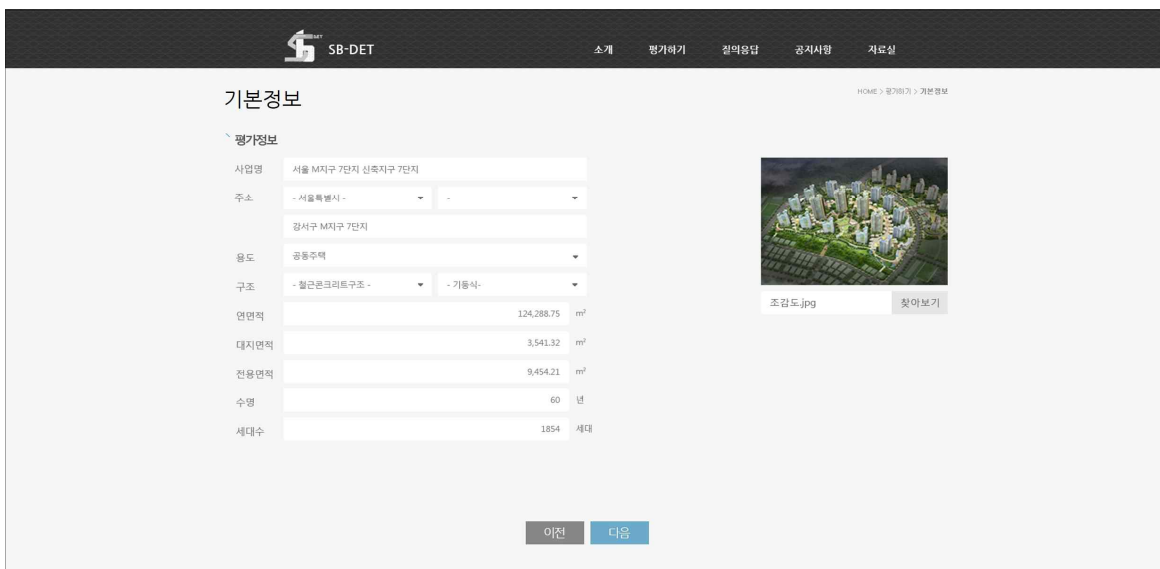


그림 3.16 기본정보 입력화면

환경영향 평가

NO	주요 자재 정보				선택
	자재명	세부자재명	단위	수량	
1	레미콘	18MPa 이하	m³		O
		21MPa	m³		O
		24MPa	m³		O
		27MPa	m³		O
		30MPa	m³		O
		35MPa	m³		O
		40MPa	m³		O
		45MPa	m³		O
2	철근콘크리트용봉강	철근콘크리트용 봉강	ton		O
3	형강	ㄱ형강, C형강, H형, I형, T형, Z형, TSC보	ton		O
4	유리	판유리, 얇은유리, 접합유리, 석유리, 반사유리	ton		O
		강화유리, 강화포이유리	ton		O
		복층유리, 복층포이유리	ton		O
5	콘크리트벽돌	콘크리트벽돌	천매		O
6	단열재	기포단열재, 우레탄판	ton		O
		글라스울(유리면), 미네랄울(암면)	ton		O
		발포폴리스티렌판, 압출발포폴리스티렌판, 관용규산합성판	ton		O
7	석고보드	방수보드, 방화보드, 섬유	ton		O

그림 3.17 환경영향 평가화면 (건축자재 입력)

비용 평가

표준건축물

구분	단위	소비량	비용(원)
초기공사비용			
에너지원별 연간 에너지 비용	전력	kWh/m², 년	
	도시가스	kWh/m², 년	
	지역난방	kWh/m², 년	
유지관리 비용			
폐기단계 비용			

평가건축물

구분	단위	소비량	비용(원)
초기공사비용			
에너지원별 연간 에너지 비용	전력	kWh/m², 년	
	도시가스	kWh/m², 년	
	지역난방	kWh/m², 년	
유지관리 비용			
폐기단계 비용			
탄소배출권 거래 수익*			

그림 3.18 비용 평가화면

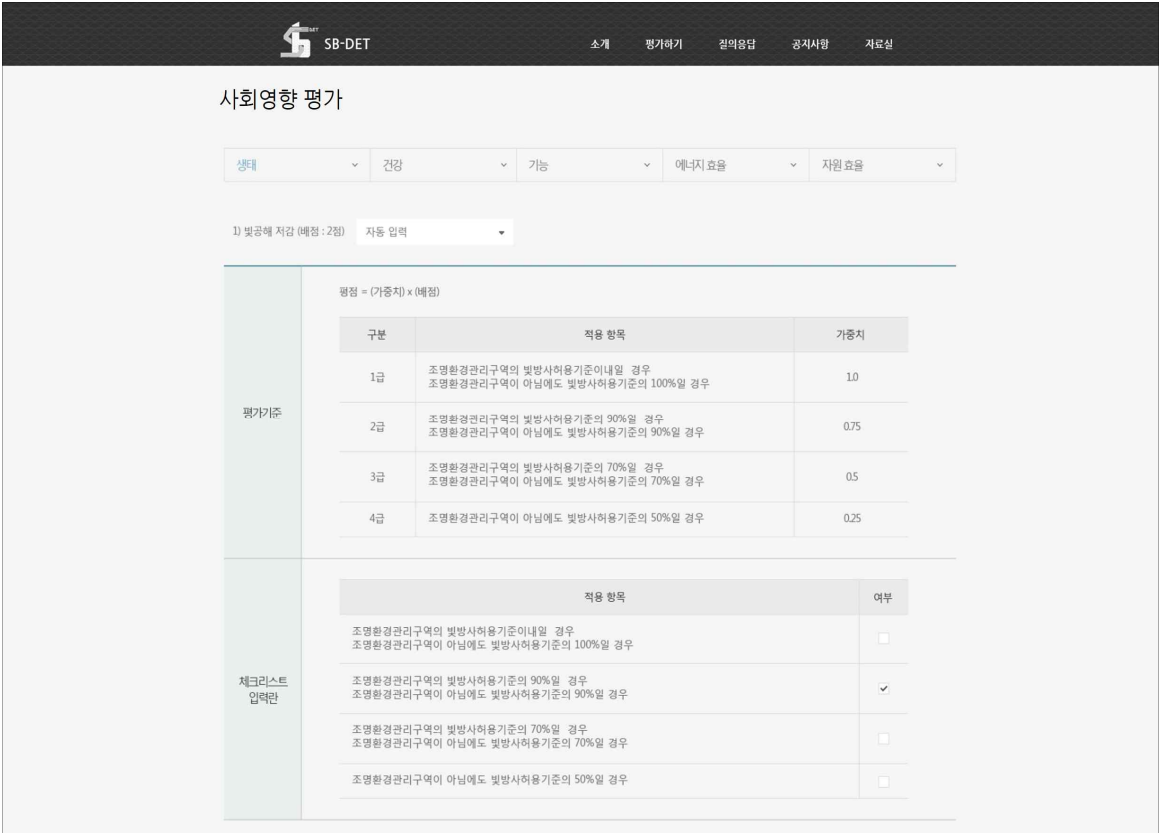


그림 3.19 사회영향 평가화면

- 평가결과



그림 3.20 평가결과 화면

② SB-PRO 시작품 개발

- 본 연구는 공동주택의 전과정 환경영향 평가, 전과정 비용 평가, 사회영향 평가를 통해 **지속가능성 평가를 확률론적 분석방법으로 지원할 수 있는 Excel 기반의 지속가능성 평가 시스템 시작품(SB-PRO)**을 개발함.

■ 프로그램 특징

- 전과정 환경영향 평가, 전과정 비용 평가, 사회영향 평가 모듈을 탑재함.
- 지속가능성 평가를 위해 요구되는 전문적인 입력 변수를 최소화하여 대안평가를 위한 실무에서의 활용도를 제고함.
- 에너지소비량 평가는 본 연구에서 개발된 iBEST-Home의 평가결과를 이용할 수 있도록 구성함.
- 상용 프로그램인 크리스탈 볼을 연계하여 공동주택의 전과정 지속가능성을 확률론적 분석방법으로 산출되도록 구성함.

■ 프로그램 주요기능

- 건축물 전과정 환경영향 평가
- 건축물 전과정 비용 평가
- 건축물 사회영향 평가
- 건축물 전과정 지속가능성 평가

■ 프로그램 UI

- 메인화면

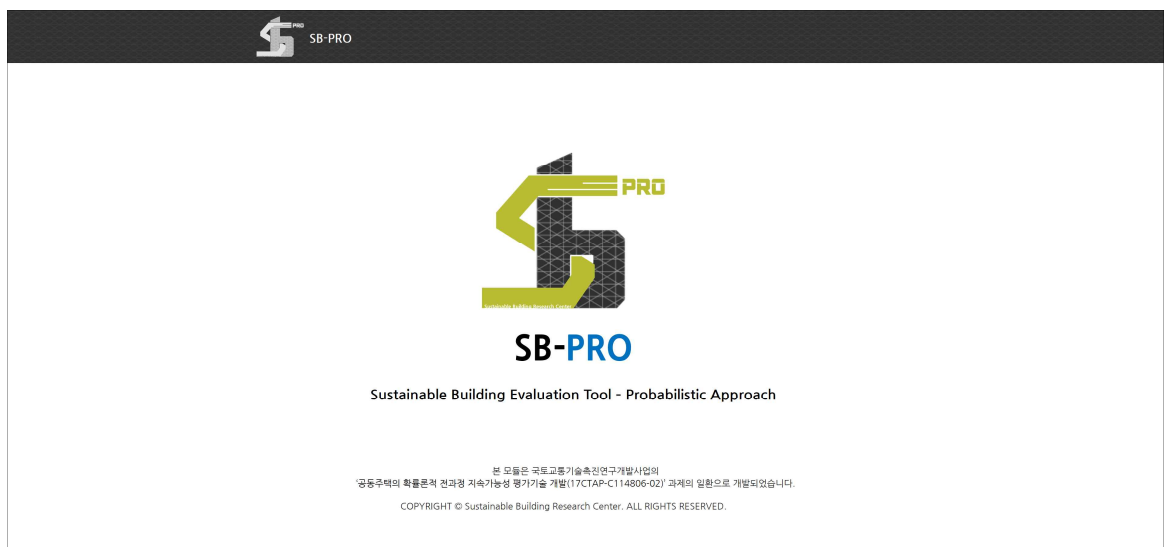
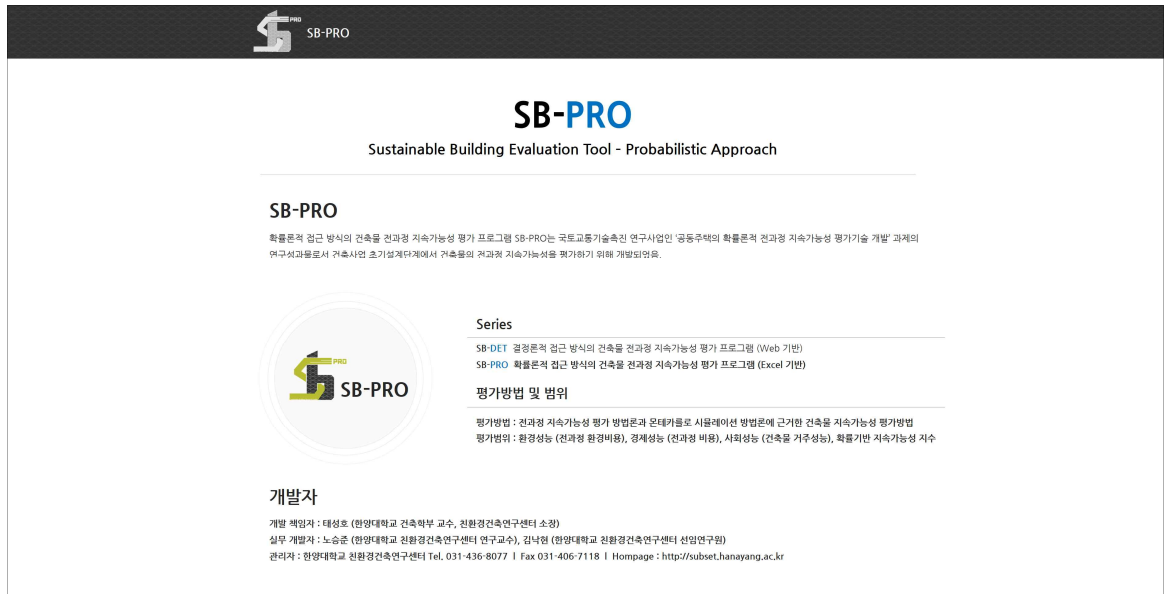


그림 3.21 SB-PRO 메인화면

- 소개화면



The image shows the introduction page of the SB-PRO tool. At the top, there is a header with the SB-PRO logo. Below the header, the title "SB-PRO" is prominently displayed, followed by the subtitle "Sustainable Building Evaluation Tool - Probabilistic Approach". The main content area includes a description of the tool, a series of related tools (SB-DET, SB-PRO), and a list of evaluation methods and their scope. The page also mentions the developer, HanYang University, and provides contact information.

SB-PRO
Sustainable Building Evaluation Tool - Probabilistic Approach

SB-PRO
확률론적 접근 방식의 건축물 전과정 지속가능성 평가 프로그램 SB-PRO는 국토교통기술혁신 연구사업인 '공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발' 과제의 연구성과를 토대로 구축한 초기입계단계에서 건축물의 전과정 지속가능성을 평가하기 위해 개발된 도구.

Series
SB-DET 결정론적 접근 방식의 건축물 전과정 지속가능성 평가 프로그램 (Web 기반)
SB-PRO 확률론적 접근 방식의 건축물 전과정 지속가능성 평가 프로그램 (Excel 기반)

평가방법 및 범위
평가방법: 전과정 지속가능성 평가 방법론과 문제해결 방법론에 근거한 건축물 지속가능성 평가방법
평가범위: 환경성능 (에너지 환경비용), 경제성능 (전과정 비용), 사회적성능 (건축물 거주가능성), 복원가능 지속가능성 지수

개발자
개발 책임자: 태성호 (한양대학교 건축학부 교수, 친환경건축연구센터 소장)
실무 개발자: 노승준 (한양대학교 친환경건축연구센터 연구교수), 김낙형 (한양대학교 친환경건축연구센터 선임연구원)
관리자: 한양대학교 친환경건축연구센터 Tel. 031-436-8077 | Fax 031-406-7118 | Homepage: <http://subest.hanYang.ac.kr>

그림 3.22 SB-PRO 소개화면

- 기본정보 입력화면: 프로젝트의 사업명, 지역정보, 구조, 규모, 면적정보 등을 입력함.



The image shows the basic information input form of the SB-PRO tool. The form is titled "기본정보" (Basic Information) and contains several sections for inputting project details. The sections include: Evaluation Stage (Preparation), Evaluation Information (Project Name, Location, Use, Area, etc.), and Evaluator Information (Evaluator Name, Institution, etc.). The form is designed to be user-friendly with clear labels and input fields.

기본정보

■ 평가단계: 예비인중

■ 평가정보

• 사업명: 서울 마곡지구 7단지 아파트 신축공사

• 주소: 서울특별시 | | 강서구 마곡동 마곡택지개발지구 7단지

• 용도: 공동주택

• 구조: 철근콘크리트구조 | 기동식

• 연면적: 208,393.00 m²

• 대지면적: 51,184.00 m²

• 전용면적: 95,002.00 m²

• 수명: 40 년

■ 평가자 정보

• 평가자: 노승준

• 소속/직책: 한양대학교 suBest Lab. / 연구원

• 연락처: 031-436-8125

• E-MAIL: sjroh@outlook.com

다 음

그림 3.23 기본정보 입력화면

- 데이터 입력화면

- (1) 환경영향: 주요 건축자재 및 에너지원의 환경영향 원단위를 검토함.
- (2) 비용: 주요 건축자재 및 에너지원의 단가정보를 검토함.
- (3) 사회영향: 건축설계안에 따라 각 평가항목별 점수를 입력함.

SB-PRO				
데이터 입력				
■ 사회영향				
구분		평가항목	배점	특점
생태	생태	연계된 녹지축 조성	2	
		생태연적률	6	
		비오톱 조성	4	
		기존대지의 생태학적 가치	2	
		자연지반 녹지율	4	
건강	공기	토사유출량 최소화	2	
		실내공기오염물질 저방출 자재의 사용	6	
		자연환기성능 확보 여부	3	
		곰팡이 방지	2	
		CO ₂ 실내오염무질 모니터링, 제어	2	
		실간 경계벽의 차음 성능	2	
		경향,중랑 충격음차단성능	4	
		화장실 급배수 소음	2	
		일조확보	4	
		오존층보호를 위한 특정물질의 사용금지	3	
	음환경	교통소음에 대한 실내 외 소음도	2	
	빛환경	건물의 향에 대한 영향	2	
		빛공해 저감	2	
		일조권 간섭방지 대책의 타당성	2	
		환경을 고려한 현장관리계획의 합리성	1	
		운영/유지관리 문서/지침 제공의 타당성	2	
유지/운영	유지/운영	TAB 및 커미셔닝실시	2	
		수리용이성	2	
		실내 자동온도조절장치 채택 여부	2	

그림 3.24 데이터 입력화면 (사회영향)

- 평가결과



그림 3.25 평가결과 화면

(3) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발

(가) 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표 개발

① 전과정 지속가능성 지표 분석

㉠ 타분야(산업, 경영 등)의 지속가능성 지표 관련 선행연구 분석

- 본 연구는 확률기반의 지속가능성 지표를 보다 효율적인 관점에서 개발하기 위해 타분야에서 기존에 연구 및 개발된 지속가능성 지표 관련 선행연구를 분석하였음.

■ 환경지속성지수(ESI, Environmental Sustainability Index)

- 환경지속성지수는 현재의 환경·사회·경제조건을 바탕으로 지속가능한 성장을 할 수 있는 국가역량을 계량화·비교하는 국제평가지수임.
- 환경지속성지수는 각 국의 역량을 순서화하여 비교하는 것이므로, 특정 국가가 다른 국가에 비해 역량이 상대적으로 양호하다는 것을 보여줄 뿐 절대적으로 불리하다고 보기는 어려움.
- 평가기관은 미국의 예일대학교와 컬럼비아대학교이며, 세계경제포럼(WEF)이 후원하고 있음.
- 평가요소는 5개 분야, 21개 지표, 67~76개 변수로 구성되며, 표 3.20과 같이 소관 변수의 평균으로 지표의 전체 값을 산출함.

표 3.20 환경지속성지수 산출 예

변 수	지 표	→	종합점수
76개	21개		100점 기준
Z-score	소관변수 Z-score의 평균	Z-score를 백분위화	백분위화된 21개 지표의 단순평균

- Z-score : 모든 자료들을 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만드는 가장 보편적인 표준화 방법임. 자료의 수치가 그 분포의 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도나 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타냄.

$$Z\text{-score} = \frac{\text{Actual value [측정치]} - \text{Mean [평균]}}{\text{Standard deviation [표준편차]}}$$

- Z-score는 검사의 결과를 해석할 때 측정 단위가 다른 것과 환산하여 직접적인 비교를 가능케 하는 방법의 하나. 표준편차를 단위로서 보았을 때 측정치가 평균에서 얼마만큼 이탈하였는가를 보는 것으로 평균과 표준편차를 사용하여 구함

- 표준편차 : 표준편차가 0일 때는 관측값의 모두가 동일한 크기이고 표준편차가 클수록 관측값 중에는 평균에서 떨어진 값이 많이 존재한다. 따라서 표준편차는 관측값의 산포(散布)의 정도를 나타냄.

■ 환경성과지수(EPI, Environmental Performance Index)

- 환경성과지수는 2006년 세계경제포럼 연례총회에서 발표된 지수임.
- 기존 환경관련 지수들(환경지속성지수 : ESI 포함)이 지나치게 광범위하여 정책수립과 집행에 구체적인 도움을 줄 수 있도록 환경지속성지수를 보완함.
- 환경성과지수는 건강에 미치는 환경영향을 감소시키고(환경건강목표), 생태계의 쇠퇴 자연자원의 감소를 억제(생태계활력목표)정도를 측정하는데 주안점을 둠.
- 환경성과지수의 평가분야는 총 6개로서 환경보건(environmental health) / 대기질(air quality) / 수자원(water resource) / 생물다양성(biodiversity and habitat) / 자연자원(productive natural resource) / 지속가능에너지(sustainable energy)이며, 평가항목은 총 16개의 지표로 구성됨.
- 변수별로 일정한 목표치 설정해 목표치로부터의 거리를 100~0으로 환산하여 그 달성도를 평가하고, 각 분야별 점수비중은 환경보건 50%, 나머지 분야는 각 10%임.
- EPI의 16개 각 지표에서 측정된 값들을 목표달성도인 0~100까지의 이론적 범위인 값으로 비교하기 위해서는 전환이 필요하며, 측정된 값을 목표 달성도로 전환하기 위한 계산식은 $100 - \{((\text{측정값} - \text{목표값}) / (\text{하위값} - \text{목표값})) \times 100\}$ 임.

$$\text{목표달성도} = 100 - \frac{\text{측정값} - \text{목표값}}{\text{하위값} - \text{목표값}} \times 100$$

- 이때, 하위5%의 값을 제거하고 95%값을 사용하는 통계기법을 이용하며, 전문가의 의견을 바탕으로 하는 주성분분석(Principal Component Analysis)을 이용하여 각 지표를 환경보건, 지속가능 에너지, 생물다양성 분야로 그룹화 하였음.
- 그 외에 나머지 분야인 대기질, 수자원, 자연자원 분야는 주성분 분석의 결과와 명확한 관계를 발견하지 못했기 때문에 분야별 전문가의 의견과 기존문헌 검토를 통해 지표를 그룹화하고 분야별 점수가중치를 두어 최종 EPI값을 산정함.

■ 인간개발지수(HDI, human development index)

- 인간개발지수는 야마타야 센이 제시한 ‘삶의 질’ 개념을 토대로 UNDP(유엔개발계획)가 개발함.
- 이는 소득, 교육, 빈곤, 실업, 환경, 건강, 종교 등 인간의 생활과 관련된 여러 가지 기본 요소들을 기초로 사회생활에서 느끼는 행복감을 측정하는 것으로 일종의 행복지수이며, 1인당 국민총생산으로는 국가 간 개발 정도나 생활상을 비교하는 데 한계가 있어 여러 가지 요소들을 감안해 산출하는 새로운 지수임.
- 인간개발지수는 인간다운 생활수준을 가늠하기 위해 개발된 복합적 지수로 지난 90

년부터 각국의 평균 수명과 교육수준, 1인당 국민 소득 등 모두 206개 지표를 토대로 작성됨.

- 1인당소득을 넘어 삶의 기대, 교육정도, 여성, 유아정책, 환경, 그리고 복지 등을 평가하여 랭킹을 매기는데, 1점 만점에 0.8까지가 상위그룹, 0.5까지가 중간그룹, 그 이하가 하위그룹으로 분류됨.

[산정과정]

- HDI는 기본적으로 건강부문, 교육부문 및 생활수준 부문의 세 영역으로 구분, 이를 위해 예상수명(life expectancy, X_1), 성인문맹률(adult literacy rate, X_2) 및 실질 일인당 국내 총생산(real GDP per capita, X_3)를 구성요소로 하고 있으며, 산정방식이 발전함에 따라 구성요소가 약간씩 변화
- 1단계 : 각 국가의 구성요소 실제치를 최대값 또는 최저값과 비교하여 X_1' , X_2' , X_3 에 관한 빈곤의 정도(measure of deprivation)를 측정하고 각 국가의 수준에 따라 0부터 1까지로 구분. 즉, I_{ij} 를 빈곤지표(deprivation indicator)라고 하면, I_{ij} 는 j 국가의 i 구성요소에 대한 빈곤지표인데 이는 다음과 같이 산정.

$$I_{ij} = \frac{(\text{actual } X_{ij}\text{value} - \text{minimum } X_{ij}\text{value})}{(\text{maximum } X_{ij}\text{value} - \text{minimum } X_{ij}\text{value})}$$

- 2단계 : 평균빈곤지표(average deprivation indicator) I_j 를 규정하는 단계, 지표는 단순평균으로 산정
- 3단계 : HDI 산정 단계, HDI는 (1-평균빈곤지표)로 구함. $(HDI)_j = (1 - I_j)$

㉠ 유사분야(토목, 도시 등)의 지속가능성 지표 관련 선행연구 분석

- 본 연구는 공동주택의 확률기반 지속가능성 지표를 보다 효율적인 관점에서 개발하기 위해 유사분야에서 기존에 연구 및 개발된 지속가능성 지표 관련 선행연구를 분석하였음.

■ 환경압력지수(Environmental Pressure Index)

[방법론]

- 공간적 규모(지역적, 국가적, 국제적, 지구적 규모)를 가진 환경 문제들 중 9가지 문제를 선정(지구온난화문제, 성층권오존고갈문제, 산성화문제, 부영양화문제, 독성물질배출문제, 자원고갈문제, 광화학스모그문제, 생물다양성상실문제, 소음진동악취문제)
- 환경문제들을 일으키는 인자들을 선정
- 가중치 값으로 통합하여 9가지 문제 각각에 대해 환경문제지수값 정산

- 90년 값으로 표준화
- 델파이법 (쌍체비교법)을 통해 비교
- Satty의 계층분석과정(Alytic Hierarchy Process: AHP)기법으로 분석, 통합하기 위한 가중치 정산
- 가중합 기법을 통해 통합 후 전국치와 상대적 비교
- 대표적인 아홉가지 개별 환경문제들 (지구온난화, 성층권오존고갈, 산성화, 부영양화, 독성물질배출, 자원고갈, 광화학스모그, 생물다양성상실, 소음·진동·악취)를 선정하여 지수를 개발함.
- 단순 지표가 아닌, ‘종합환경지수’로서 환경오염과 관련된 상황에 대한 부분적인 정보를 주는 BOD나 이산화탄소(CO₂)배출량과 같은 인자들 중에서 일정한 선정과정을 거쳐, 이 선정된 인자들을 표준화하여 통합한 값을 의미함. 이 값을 통해 전체환경시스템의 변화와 관련된 정보를 알기 쉽고 간단하게 제공받는다. 여기에는 ‘환경압력지수’, ‘환경상태지수’, ‘환경대응지수’가 있음.

[산정과정]

- 공간적 규모를 가진 9가지 문제를 선정(국제 환경문제 분류체계에서 사용하는 대표적인 환경문제들)
- 환경문제들을 일으키는 인자들을 선정
- 가중치 값으로 통합하여 9가지 문제 각각에 대해 환경문제지수값 정산

$$\text{*연도별 서울의 온난화문제 지수값} = \frac{\text{각연도별 CO}_2 \text{ 환산 총 배출량}}{\text{1990년의 CO}_2 \text{ 환산 총 배출량}} * \frac{\text{서울인구수}}{\text{전국인구수}}$$

- 환경문제 지수값을 경제지수와 같이 90년을 기준으로 하기 위해 86년부터 95년까지 10년간의 값을 90년 값으로 표준화
- 환경전문가들에게 델파이법(쌍체비교법)을 통해 아홉 가지 환경문제들을 두 개씩 비교

$$\text{*비료사용량가중치} = \frac{\text{비료사용량점수합산치}}{(\text{비료사용량점수합산치} + \text{폐수배출량점수합산치})}$$

$$\text{*폐수배출량가중치} = \frac{\text{폐수배출량점수합산치}}{(\text{비료사용량점수합산치} + \text{폐수배출량점수합산치})}$$

- Satty의 계층분석과정(Alytic Hierarchy Process : AHP)기법으로 분석, 통합하기 위한 가중치 정산
- 정산된 가중치로 9가지 환경문제지수값을 연도별로 가중합기법을 통해 통합하여 90

년을 기준으로 서울의 환경압력 지수를 86년부터 95년까지 정산 후 전국치와 상대적인 비교

$$*Ai = \frac{\text{각연도별 항목 } i \text{의 배출량(사용량)}}{\text{1990년의 항목 } i \text{의 배출량(사용량)}}$$

*연도별 부영양화지수값 = $\sum WiAi$ (Wi : 항목 i 에 대한 전문가가중치, $\sum Wi=1$)

■ 개별건물의 지속가능한 개발지표

[내용 및 범위]

- 개별건물이 환경과의 상호영향을 나타내는 지표는 개별건물의 공간적 측면, 에너지 측면, 수자원 측면 등에서 접근할 수 있음. 이것은 다시 지구환경보전적 측면, 지역 커뮤니티 형성측면, 실내주거환경 측면 등으로 구분할 수 있음.
- 개별건물의 사전평가단계에 대해 개별건물의 사전평가 유형과 내용을 제시
- 건물의 사용·유지관리단계에서 에너지 소비지표와 에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출지표를 작성
- 수자원 환경측면에서 급수, 상수 등의 수자원 소비지표 작성

[방법론]

- 문헌고찰을 통한 환경과의 상호영향 지표 추출·정리
- 개별 건물 단위의 지속가능성 설명 관련 지표 조사·정리
- 조사된 지표를 정량적·정성적으로 구분한 뒤 측정방법, 측정단위, 측정내용을 작성
- 공동주택단지의 개별건물의 정량적 모형 작성을 통해 지표를 설명

[접근방법]

- 건물의 주변환경에 미치는 영향 측면
- 에너지·자원저감 측면
- 물질 순환 측면
- 자연·도시 생태계 보전·회복 측면
- 쾌적한 거주환경 측면

[결과]

- 기존 환경 지표 : 안전성 측면, 보건성 측면, 이용편의성 측면, 쾌적성 측면, 기타 문화와 개성 측면에서 접근
- 환경보전 측면의 지속가능한 개발지표를 중심으로 분석하여 크게 공간적 측면, 에너지 측면, 수자원 측면, 쓰레기/폐기물 저감측면, 생태계 측면, 물순환 측면 등의 6가지로 구분
- 에너지 소비와 이산화탄소 배출, 수자원 소비특성
 - * 선형회귀식을 이용

$Y = a_0 + b_1X$, (여기서 Y : 에너지 소비량(Mcal), 이산화탄소 배출량(kg-c), 수자원 소비량(톤))

X : 관리면적(평) 혹은 관리세대수(세대)

* 선형회귀식을 이용하여 분석한 결과 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타남에 따라 에너지 소비와 이산화탄소 배출, 수자원 소비 지표를 작성

$$INDEX = 100 - \frac{100}{1 + \exp[-\lambda * (E - \chi)]}$$

여기서 INDEX : 에너지 소비지표, 이산화탄소 배출지표, 수자원 소비지표

λ : 모수(parameter), E : 지표평가 기준 (조사대상표본의 평균값을 이용)

㉔ 건축물 지속가능성 지표 관련 선행연구 분석

- 본 연구는 공동주택의 확률기반 지속가능성 지표를 보다 효율적인 관점에서 개발하기 위해 국내외 녹색건축 인증제도에서 활용되고 있는 건축물 지속가능성 지표 관련 선행연구를 분석하였음.
- 지속가능성을 결정짓는 대부분의 의사결정권자는 지속가능성 평가 분야의 비전문가로서 이들이 보다 평가결과를 용이하게 이해하고 올바른 의사결정을 할 수 있도록 지원하는 것이 중요함. 이에 건축물의 지속가능성을 평가하는 녹색건축물 인증제에서도 건축물 지속가능성 지표를 표 3.21과 같이 적용하고 있음. 이러한 건축물 지속가능성 지표는 그 표현방식에 따라 단순 가중합 방식, 상대적 효율성 방식, 상호 관계성 방식으로 구분될 수 있음.

■ 단순 가중합 방식

- 단순 가중합 방식은 다수의 평가기준에 대한 점수와 가중치를 곱한 후 이를 합산하여 하나의 지표로 통합하는 방식으로써 대부분의 녹색건축물 인증제(미국 LEED, 영국 BREEAM, 말레이시아 GBI, 한국 G-SEED 등)에서 이를 채택하고 있음.
- 이는 평가기준에 대한 점수 예측과 지속가능성에 대한 등급판정이 용이하다는 장점이 있지만 정량적 지속가능성을 평가하기 어렵다는 한계점이 있음.

■ 상대적 효율성 방식

- 상대적 효율성 방식은 평가기준을 지표로 통합하는 과정에서 긍정적 지표의 합을 부정적인 지표의 합으로 나누어 그 효율성을 평가하는 방식임.
- 이에 대한 대표적인 사례는 일본 CASBEE의 환경성능 지표인 BEE(Building Environmental Efficiency)와 바레인에서 개발된 SBI Model임. 여기서 BEE는 건축물의 실내 환경, 서비스, 옥외 환경, 에너지, 자원·재료, 부지 외 환경을 평가하여 건축물의 거주성능을 나타내는 Q(Quality)와 환경부하를 나타내는 L(Load)의 비율

로 구성됨. 바레인의 SBI는 지속가능 건축물을 촉진하는 9개의 요소(경제적 이득, 보조금, 기업의 사회적 책임 등)와 이를 저해하는 15가지 요소(초기투자비, 환경 및 생태적 영향, 공사기간 등)의 점수에 대한 비율로 구성됨.

- 이러한 상대적 효율성 방식은 지표 자체가 효율성을 나타내어 그 평가결과의 이해도가 가장 높다는 장점이 있지만 다수의 평가기준이 결합되면 그 의미가 퇴색될 수 있다는 한계점을 갖음.

■ 상호 관계성 방식

- 상호 관계성 방식은 평가기준을 지표로 통합하는 과정에서 평가기준을 사전에 특성화하고 이들의 상관관계가 반영된 지표를 산정하는 방식임.
- 이에 대한 대표적인 사례는 국내에서 ‘저탄소 녹색건축 통합 인증시스템 구축’ 과제를 통해 제안된 GBI임. GBI는 건물거주성 지수, 탄소배출량 지수, 탄소경제성 지수로 구성됨.
- 상호 관계성 방식은 가장 과학적인 지수로써 다양한 평가기준을 체계화하여 이들의 관계성을 유기적으로 고려한다는 장점이 있지만 복잡한 평가방법으로 인해 평가결과의 예측이 어렵다는 한계점이 있음.

표 3.21 지속가능한 건축물 지표별 특징

구분		지표	특징
단순 가중합 방식	GBI (Malaysia)	$SBI = \sum_i^n (C_i \times W_i)$ <i>C: Credit, W: Weighting factor</i>	- 평가기준의 점수 예측과 지속가능성의 등급판정이 용이함. - 정량적 관점의 지속가능성 평가가 어려움.
	CASBEE (Japan)	$BEE = \frac{Q}{L}$ <i>Q: Quality, L: Load</i>	- 상대적 효율성 지수를 도입한 최초의 녹색건축물 인증제임. - 지수 자체가 효율성을 나타냄에 따라 평가결과에 대한 이해도가 가장 높음. - 다수의 평가기준이 결합되면 그 의미가 퇴색될 수 있음.
	SBI (Bahrain)	$SBI = \frac{\sum_i^n (D_x)_n}{1.125 \sum_i^n (B_x)_n}$ <i>D: Drivers element's score B: Barriers element's score</i>	- 지수 자체가 효율성을 나타냄에 따라 평가결과에 대한 이해도가 가장 높음. - 다수의 평가기준이 결합되면 그 의미가 퇴색될 수 있음.
상호 관계성 방식	GBI (Korea)	$GBI = \frac{HI}{CI} \times EI$ <i>HI: Building habitability index CI: Carbon emission index EI: Carbon economic index</i>	- 다양한 평가기준을 체계화하여 이들의 관계성을 유기적으로 고려함. - 복잡한 평가방법으로 인해 평가결과의 예측이 어려움.

② 전과정 지속가능성 지표 개발

- 본 연구에서는 **UNEP에서 제시된 단순 가중합 방식의 전과정 지속가능성 평가 개념식 구성과 상대적 효율성 지수의 장점을 결합**하여 건축물 전과정 지속가능성의 최종 결과를 확률기반의 단일 평가지표로써 판단할 수 있는 지속가능 건축물 지수(P-SBI, Probabilistic Sustainable Building Index)와 이를 구성하는 건축물 전과정 환경영향 지수(P-EI), 전과정 비용 지수(P-CI), 사회영향 지수(P-SI)를 개발함.

■ 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지수

- 본 연구는 건축물 전과정 지속가능성의 최종 결과를 확률기반의 단일 평가지표로써 판단할 수 있는 지속가능 건축물 지수(P-SBI, Probabilistic Sustainable Building Index)를 식 3.9와 같이 정립하였음. 여기서 α , β , γ 는 각각 P-EI, P-CI, P-SI의 가중치를 나타냄.

$$P-SBI = \alpha P-EI + \beta P-CI + \gamma P-SI \dots\dots\dots \text{식 3.9}$$

- 이때, P-SBI를 구성하는 전과정 환경영향 지수(P-EI), 전과정 비용 지수(P-CI), 사회영향 지수(P-SI)를 하나의 지수로 표현하기 위해 최근 발표된 지속가능성 평가 연구에서 적용하고 있는 환경적, 경제적, 사회적 측면에 대한 가중치를 표 3.22와 같이 조사한 결과, 가중치는 지속가능성 평가의 대상과 목적에 따라 환경적, 경제적, 사회적 측면별로 상이한 가중치가 적용되고 있는 것을 확인하였음. 이들 가중치의 평균값은 **환경적, 경제적, 사회적 측면에 따라 0.319, 0.339, 0.342로 분석**되어 상기 3가지 측면에 대한 중요도가 비교적 균형을 이루고 있음을 확인하였음

표 3.22 지속가능성 평가를 위한 가중치

구분	국가	대상	발표연월	가중치		
				환경	경제	사회
Dow Jones Sustainability Indexes	국제	기업	-	0.200	0.350	0.450
IN-STREAM	국제	제품	2011.07	0.383	0.283	0.333
Maltese S et al.	이탈리아	건축물 (Refurbishment)	2013.06	0.333	0.333	0.333
German Sustainable Building Council	독일	건축물	2013.07	0.225	0.225	0.550
Villarinhorosal et al.	브라질	건축물	2013.08	0.430	0.430	0.140
Markelj J et al.	슬로베니아	건축물	2014.12	0.344	0.411	0.245
평균				0.319	0.339	0.342

- 이에 본 연구는 전과정 환경영향, 전과정 비용, 사회영향에 대한 균형을 유지하기 위한 전제조건으로 P-EI, P-CI, P-SI와 연결된 가중치를 각각 1/3로 설정하였음.

단, 가중치는 향후 평가대상 건축물의 특성과 건축주체의 성향에 따라 조정 될 수 있을 것으로 판단됨. 단, α, β, γ 의 총 합은 $1(\alpha+\beta+\gamma=1)$ 로 고정되어야 함.

■ 확률기반의 공동주택 전과정 환경영향 · 비용 · 사회영향 지수

- P-SBI를 구성하는 전과정 환경영향 지수(P-EI), 전과정 비용 지수(P-CI), 사회영향 지수(P-SI)는 상대적 효율성 방식을 도입하여 기준 건축물의 전과정 환경영향, 전과정 비용, 사회영향과 평가 건축물의 전과정 환경영향, 전과정 비용, 사회영향 평가결과를 서로 비교할 수 있도록 식 3.10, 식 3.11, 식 3.12와 같이 제안하였음.

$$P-EI = \frac{R_{EAM, R}}{PR_{EAM, E}} \dots\dots\dots \text{식 3.10}$$

$$P-CI = \frac{R_{CAM, R}}{PR_{CAM, E}} \dots\dots\dots \text{식 3.11}$$

$$P-SI = \frac{PR_{SAM, E}}{R_{SAM, R}} \dots\dots\dots \text{식 3.12}$$

여기서 P-EI, P-CI, P-SI는 각각 환경영향 지수, 비용 지수, 사회영향 지수를 나타내며, $R_{EAM, R}$, $R_{CAM, R}$, $R_{SAM, R}$ 는 기준 건축물의 평가결과, $PR_{EAM, E}$, $PR_{CAM, E}$, $PR_{SAM, E}$ 는 각각 주요 건축자재의 확률분포와 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 산출된 평가 건축물에 대한 확률론적 방식의 평가결과를 의미함.

- 이때, 전과정 환경영향과 전과정 비용은 그 평가결과가 적은 값일수록 좋은 성능을 나타냄에 따라 P-EI와 P-CI에서 평가 건축물의 전과정 환경영향, 전과정 비용의 평가결과를 분모에 위치시켰고 기준 건축물의 평가결과는 분자에 위치시켰음. 한편, 사회영향 평가결과는 건축물의 사회적 성능을 나타내며, 평가결과와 건축물의 사회적 성능이 비례의 경향을 나타냄에 따라 평가 건축물에 대한 사회영향 평가결과를 분자에 위치시켰고 기준 건축물의 평가결과는 분모에 위치시켰음.
- P-EI, P-CI, P-SI의 확률분포가 각각 1을 기준으로 이를 초과한 영역에 위치한 부분의 면적은 평가 건축물의 환경적, 경제적, 사회적 수준이 기준 건축물 보다 높을 확률을 의미하며, 1 미만에 위치한 부분의 면적은 그 수준이 낮을 확률을 나타냄. 이러한 관점에서 P-SBI도 1을 초과한 영역에 위치한 부분의 면적은 평가 건축물에 대한 지속가능성의 수준이 표준 건축물 보다 높을 확률을 의미하며, 1 미만에 위치한 부분의 면적은 그 수준이 낮을 확률을 나타냄.
- 단, 전과정 환경영향과 전과정 비용에 대한 평가 건축물과 기준 건축물의 확률론적 평가결과는 모두 비율척도 기반으로 산출됨에 따라 P-EI, P-CI는 기준 건축물 대비 평가 건축물에 대한 성능의 비율을 의미하지만 P-SI는 등간척도에 기반한 사회영향의 평가결과로써 평가 건축물과 기준 건축물의 성능에 대한 절대적 비율을 의

미하지 않고 성능의 상대적인 높고 낮음을 나타냄.

■ 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표

- 본 연구는 전술한 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지수를 이용하여 지속가능성 지표를 그림 3.26과 같이 개발하였음. 이때, 건축물의 특성을 반영하여 확률론적인 관점에서 빈도수가 가장 높은 최빈값을 적용하였고, 이는 건축사업 초기단계에서 보다 유용한 전과정 지속가능성 평가가 가능함.
- 이는 기존 결정론적 방식의 평가모델에서 산출되지 않았던 기댓값과 확률론적으로 보정된 평균값, 최소값과 최대값을 동시에 제공함에 따라 의사결정자로 하여금 보다 유용한 정보를 제공하고 의사결정을 효과적으로 지원할 수 있음.
- 이 중 기댓값은 평가 초기 설정한 기준 건축물의 값에 대한 **목표 달성 가능성을 확률로서 파악 가능**하며, 평가결과의 범위와 구간별 그 기댓값을 파악할 수 있어 의사결정 지원에 효과적인 정보를 제공함.
- 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법은 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 반복 시행된 평가결과를 바탕으로 한 **확률론적으로 보정된 평균값을 제공**하여 기존 결정론적 방식의 평가모델에서 주로 적용되었던 평균값 관점의 평가결과 보다 유의미한 평가결과를 제공할 수 있음.
- 또한, 최소값과 최대값을 제공하며, 건축사업 초기단계에서 본 평가 건축물의 건설을 통해 전과정 지속가능성 관점에서 발생될 수 있는 최대의 리스크와 최대 기대치에 대한 정보도 제공 가능함. 이를 통해 본 연구에서 개발된 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법에 대한 유효성과 실용성을 확인하였고 건축사업 초기단계에서 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법의 적용에 대한 타당성과 적합성을 확인하였음.

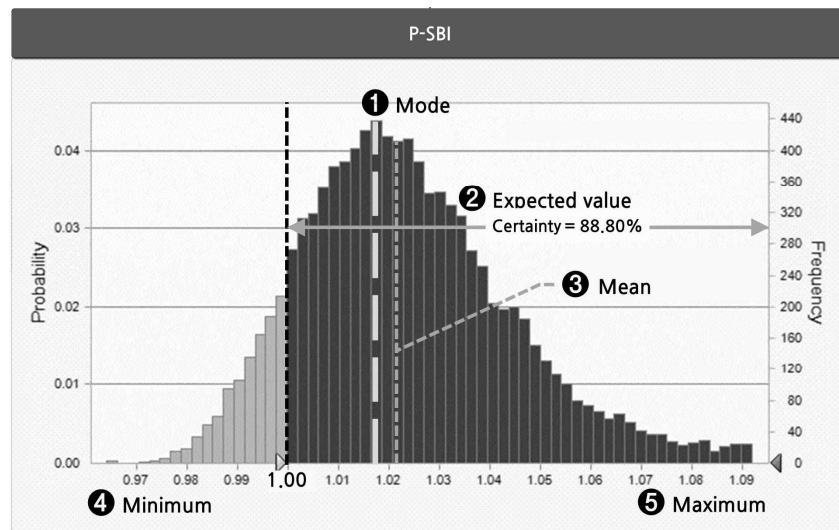


그림 3.26 확률론적 평가결과의 유의성

(나) 확률론적 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 지원

- 본 연구에서 개발된 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표가 실무 매뉴얼에 적용될 수 있도록 본 지표의 개념과 특징 등을 실무 매뉴얼에 수록함.

(다) SB-PRO 시작품 개발 지원

- 본 연구에서 개발된 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 지표가 SB-PRO 시작품에 원활히 적용할 수 있도록 전과정 환경영향, 전과정 비용, 사회영향 지수와 이를 통합한 지속가능성 지수의 산출식을 제공함.

가. 연구목표

■ 최종목표	· 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 평가기술 개발 및 성능평가
■ 구체적인 연구목표	(1) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 (2) 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발

나. 주요 연구내용 및 결과

(1) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축	
(가) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 (나) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 성능평가 (다) SB-PRO 시작품 개발 지원	(가) ① 공동주택의 에너지사용량 데이터 수집을 위한 웹크롤링 ② 빅데이터 분석 ③ 기술통계분석 ④ 공동주택 표준모델 선정 ⑤ 회귀분석을 통한 냉난방부하 회귀식 도출 ⑥ 경년변화에 따른 단열성능 검토 (나) ① 공동주택 설계요소별 에너지소비량 예측방법 검토 ② 회귀식을 통한 시뮬레이션 수행 (다) SB-PRO 시작품 제작을 위한 에너지 부분 UI 제안
(2) 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발	
(가) 공동주택의 확률기반 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 (나) 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 시범적용	(가) ① 공동주택 간이 에너지소비량 평가기술 시작품(iBEST-Home) 개발 ② 공동주택의 확률기반 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 (나) 의사결정 매뉴얼 시범적용

(1) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축

(가) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축

① 공동주택의 에너지사용량 데이터 수집을 위한 웹크롤링

- 공동주택의 실제 에너지사용량의 빅데이터 구축을 위하여 웹 크롤링 방식을 사용함. 특히, 빅 데이터수준의 모집단 구성으로 데이터 분석결과의 유의성 신뢰성을 확보하고, 데이터 웹 크롤링을 위한 크롤러 개발을 통해 시간의 변화에 따른 신규데이터를 지속적으로 누적 시킬 수 있음으로 향후 DB 추이변화에 대응 할 수 있는 유연성을 확보함.

■ 데이터 수집 방법론

- 본 연구의 데이터 수집 범위는 거주자의 건물 에너지 소비 성향에 따른 불확실성이 업무용에 비해 상대적으로 강한 주거건축물을 대상으로 함. 연구대상은 수집의 효율을 높이기 위해 개인주택을 제외한 공동주택 범위로 함. 공동주택 범위는 대단지 아파트부터 주상복합건물과 주거용도로 활용되는 오피스건물까지 개인주택을 제외한 공동주거방식 범위가 모두 포함됨.
- 본 연구는 기존의 일반적인 통계자료 설정인 연구대상 모집단에서 추출(Sampling)된 표본데이터 분석 방법이 아닌 **자료 수집 가능한 연구대상 전체를 수집하여 모집단(Population)을 분석**하는 방식을 채택함.
- 모집단 수집방법은 웹 크롤링 방식을 사용하여 수집함. 웹 크롤링은 Java, R, Python 등 프로그래밍 언어를 사용하여 HTML 형식의 웹 데이터를 미리 설정한 규칙에 따라 수집 가능함.
- **빅데이터는 이러한 크롤링 방식을 통해 구축가능**하며, 공공데이터포털과 같은 사이트를 통해 정부차원에서 민간에 개방하고 있음. 공데이터 포털에서는 현재시점을 기준으로 2,329 건의 Open API를 제공하고 있으며, 이는 타 언어의 추가 작업 없이 R 언어에서 직접적인 수집도 가능함.
- 공공 데이터 포털에서는 Open API 활용 가이드 또한 제공되고 있어 필요로 하는 데이터 가공의 편의를 높여 줌.
- 공공 데이터 포털요청코드에 따른 응답메시지 내용까지 상세한 정보를 제공해주고 있음.

```

122 String emdQuery = "SELECT DONG_NAME FROM TB_BJDCODE WHERE SI_CODE = '11' ";
123 emdQuery += "AND GUNGU_CODE = '" + ((String) sggObject.get("CODE")).trim() + "' ";
124 emdQuery += "AND DONG_CODE = '" + ((String) emdObject.get("CODE")).trim() + "' ";
125 ps2 = conn.prepareStatement(emdQuery);
126 rs2 = ps2.executeQuery();
127 String dongName = "";
128 if(rs2.next()) {
129     dongName = rs2.getString("DONG_NAME");
130 }
131 ps2.close();
132 rs2.close();
133
134 obj = new URL("http://www.k-apt.go.kr/kaptinfo/getKaptList.do?bjdc_code=11"+sagOne+emdOne+"&search_date=201512"); // 아파트목록 조회
135 con = (URLConnection) obj.openConnection();
136 con.setRequestMethod("GET");
137 in = new BufferedReader(new InputStreamReader(con.getInputStream(), "UTF-8"));
138 String line3;
139 while((line3 = in.readLine()) != null) { // response를 차례대로 출력
140     jsonInfo3 = line3;
141 }
142
143 jsonParser = new JSONParser();
144 jsonObject = (JSONObject) jsonParser.parse(jsonInfo3);
145 JSONArray kaptArray = (JSONArray) jsonObject.get("resultList");
146 System.out.println("===== 아파트목록 갯수: "+kaptArray.size());
147 for(int x=0; x<kaptArray.size(); x++){
148     if(x == kaptArray.size()) break;
149     JSONObject kaptObject = (JSONObject) kaptArray.get(x);
150     System.out.println("kaptInfo: KAPT_CODE==>"+kaptObject.get("KAPT_CODE"));
151     String kaptCode = (String) kaptObject.get("KAPT_CODE");
152
153     obj = new URL("http://www.k-apt.go.kr/apiinfo/openCostMonthUseAve.do?viewType=1&searchDate=2015&bjdcCode=11"+sagOne+emdOne+"&ka
154     con = (URLConnection) obj.openConnection();
155     con.setRequestMethod("GET");

```

Problems Tasks Properties Servers Console Search Synchron... Coverage Bookmarks Javadoc SVN Rep... SQL Res... Executio... DBIO Se... Query Re... SVN Pro... History

<terminated> Main [Java Application] C:\Program Files (x86)\Java\jre1.8.0_121\bin\javaw.exe (2017. 5. 18. 오후 1:35:35)

```

3. Connection Pooling completed !!!
===== 시군구 갯수: 25
sggInfo: CODE_VALUE==>???
===== 읍면동 갯수: 14
===== 아파트목록 갯수: 19
kaptInfo: KAPT_CODE==>A13593901
kaptInfo: KAPT_CODE==>A13593908
kaptInfo: KAPT_CODE==>A13524006
kaptInfo: KAPT_CODE==>A13580602
kaptInfo: KAPT_CODE==>A13524009

```

그림 3.27 Data scraping Code

표 3.23 공공데이터 포털 건축물 에너지 사용량 요청메시지 명세

항목명 (영문)	항목명 (국문)	항목크기	항목구분	샘플 데이터	항목설명
sigunguCd	시군구코드	VARCHAR2(5)	1	11680	행정표준코드
bjdongCd	법정동코드	VARCHAR2(5)	1	10300	행정표준코드
bun	번	VARCHAR2(4)	1	0012	번
ji	지	VARCHAR2(4)	1	0000	지
useYm	사용년월	VARCHAR2(6)	1	201501	YYYYMM
numOfRows	리스트수	VARCHAR2(3)	0	10	페이지당 목록 수
pageNo	페이지번호	VARCHAR2(3)	0	1	페이지번호

표 3.24 공공데이터 포털 건축물 에너지 사용량 응답메시지 명세

항목명(영문)		항목명(국문)	항목크기	항목구분	샘플데이터	항목설명
Items				1..n		
	rnum	순번	NUMBER(8)	0	1	순번
	useYm	사용년월	VARCHAR2(6)	1	201501	사용년월
	platPlc	대지위치	VARCHAR2(500)	1	서울특별시 강남구 개포동 12-4번지	대지위치
	newPlatPlc	도로명대지위치	VARCHAR2(400)	0	서울특별시 강남구 개포로109길 21	도로명대지위치
	sigunguCd	시군구코드	VARCHAR2(5)	1	11680	행정표준코드
	bjdongCd	법정동코드	VARCHAR2(5)	1	10300	행정표준코드
	platGbCd	대지구분코드	VARCHAR2(1)	0	0	0:대지 1:산 2:블록
	bun	번	VARCHAR2(4)	0	0012	번
	ji	지	VARCHAR2(4)	0	0000	지
	naRoadCd	새주소도로코드	VARCHAR2(12)	0	116804166040	새주소 도로코드
	naUgrndCd	새주소지상지하 코드	VARCHAR2(1)	0	0	새주소 지상지하코드
	naMainBun	새주소본번	NUMBER(5)	0	21.0	새주소본번
	naSubBun	새주소부번	NUMBER(5)	0	0.0	새주소부번
	useQty	사용량	NUMBER(22)	1	1112466.0	사용량(KWh)

표 3.25 요청응답 메시지 태그 확인

REST(URI)
http://apis.data.go.kr/1611000/BldEngyService/getBeElctyUsgInfo?sigunguCd=11680&bjdongCd=10300&bun=0012&ji=0000&useYm=201501&ServiceKey=인증키 (단, 익스플로러에서 확인시 파라미터 입력이 한글인 경우 utf-8로 인코딩 필요)
응답 메시지
<pre> <response> <header> <resultCode>00</resultCode> <resultMsg>NORMAL SERVICE.</resultMsg> </header> <body> <items> <item> <bjdongCd>10300</bjdongCd> <bun>0012</bun> <ji>0000</ji> <naMainBun>21.0</naMainBun> <naRoadCd>116804166040</naRoadCd> <naSubBun>0.0</naSubBun> <naUgrndCd>0</naUgrndCd> <newPlatPlc>서울특별시 강남구 개포로109길 21</newPlatPlc> <platGbCd>0</platGbCd> <platPlc>서울특별시 강남구 개포동 12번지</platPlc> <rnum>1</rnum> <sigunguCd>11680</sigunguCd> <useQty>1112466.0</useQty> <useYm>201501</useYm> </item> </items> <numOfRows>10</numOfRows> <pageNo>1</pageNo> <totalCount>1</totalCount> </body> </response> </pre>

② 빅데이터 분석

- 웹 크롤링을 활용하여 **공동주택의 에너지소비량에 대한 빅데이터를 구축하여 기술통계를 수행할 수 있도록 데이터 프레임을 가공함.**

■ 분석 방법 및 목적

- 연구의 방법은 수집된 모집단을 기술통계 분석하여 상관도가 예상되는 변수를 추가하여 모집단 재구성을 반복함.
- 상관도 유무를 판별하여 에너지 소비량과 관련된 건축설비 외적(사회환경적) 특성의 강도를 정량 수치로 제시 하는 것이 연구수행의 흐름으로 요약됨.
- 본 연구 단계에서 모집단 조사방법은 국토교통부와 한국감정원에서 제공된(2016년 기준) 5,414개 아파트단지 및 공동주거형식의 건물 데이터를 수집함.
- 수집된 모집단 중 에너지 사용량 월별 누락데이터가 없이 연간 에너지 사용량 수집이 가능한 1,307개 단지로 데이터 프레임을 재구성 함.
- 2016년 연간에너지 사용량 수집이 가능한 단지 1,307개 단지를 기준으로 에너지 사용수준별 특성을 그룹화 하여 에너지 사용수준과 상관도가 높을 것으로 추측되는 변수(백터)를 추가하여 데이터 프레임을 재구성 함.
- 추가된 변수로 재구성된 데이터에 대한 변수와 에너지 사용수준과의 상관분석을 수행하며, 추측된 변수에 대한 검증을 실시함.
- 상관분석 통계적 검증을 통해 귀무가설을 기각하고 연구가설이 채택되면 추가된 변수를 불확실성을 정의하는 에너지 소비수준 판단 요소로 규정하여 정량수치화 함.
- 에너지사용량과 상관도가 확인되어 정량 수치화된 변수는 실제 사용량을 가늠할 수 있는 기존 시뮬레이션 값의 보정계수 산출시 활용 가능함.

■ 데이터 분석 환경

- 데이터 분석은 오픈 소스 R 프로그래밍 언어를 사용하였다. R 은 AT&T 벨 연구소의 릭 베커(Rick Becker) 존 챔버스(John Chambers) 앨런 윌크스(Allan Wilks)가 개발한 S 언어에서 유래되었으며, S 언어는 그래픽과 통계모형 적합 능력이 결합된 전문 통계 프로그래밍 언어였음. S의 상업적 통계분석 프로그램으로 S-PLUS 가 개발되었으나, 너무 비싼 비용으로 인해 라이선스를 구입하기에 어려움이 있어 뉴질랜드 오클랜드 대학의 통계학자인 로스 이하카(Ross Ihaka)와 로버트 젠틀맨(Robert Gentleman)이 새로운 S 버전을 개발하였음. 이것을 개발자 이름의 앞글자만 따 R 로 명명하였으며 2000년 2월 29일 버전 1.0.0이 최초로 배포되었음.
- 본 연구에서 전기에너지 비용을 반응변수(Response variable)로 설정하고 나머지 설명변수(Explanatory variable) 간의 상관분석을 위해 R에서 기본 제공되는 통계패키지와 시각화 라이브러리를 활용하였음.

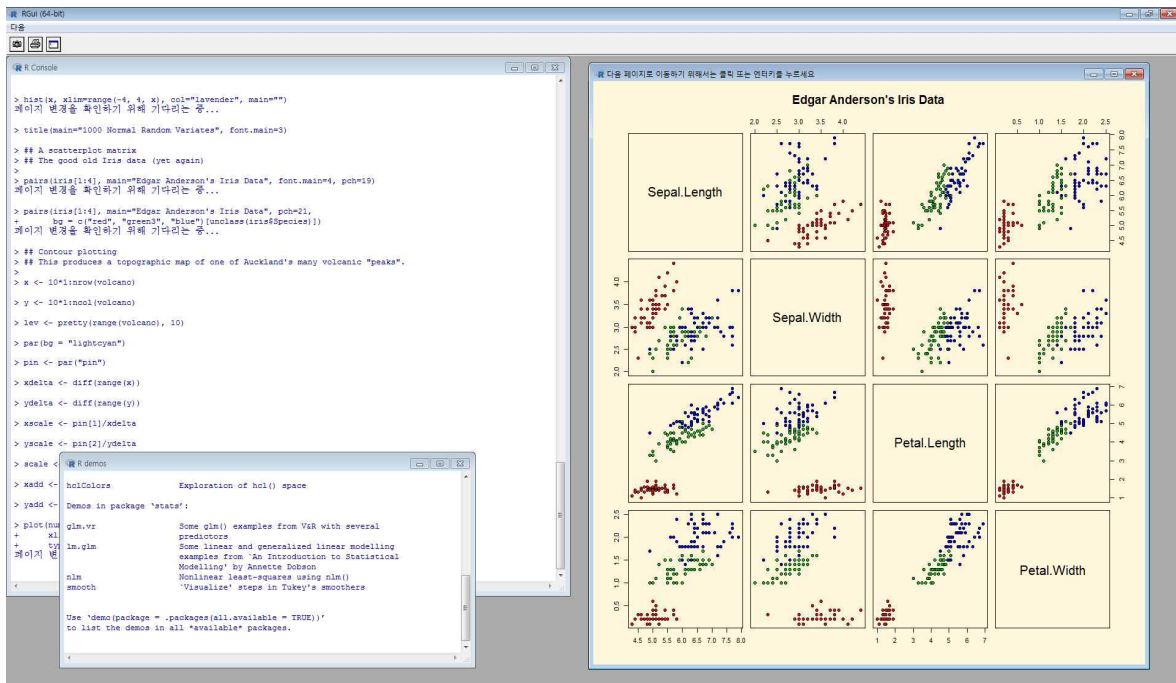


그림 3.28 R GUI

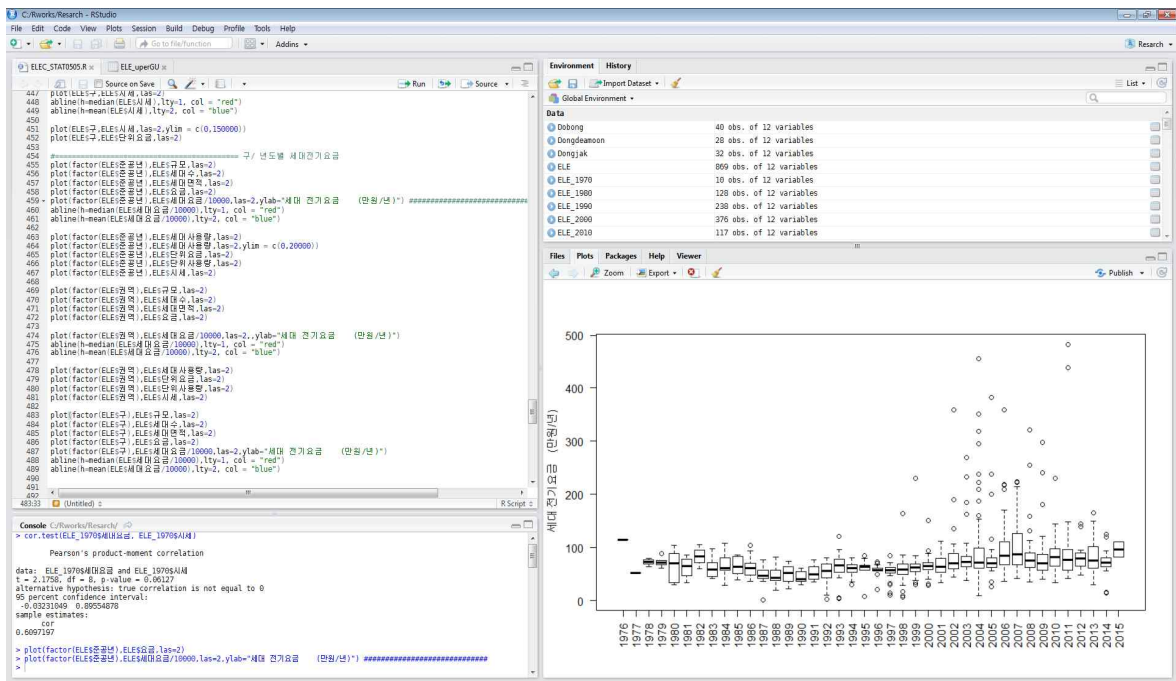


그림 3.29 R programming integrate develop language editor RStudio

③ 기술통계분석

- 서울시내 공동주택의 1차 수집 벡터는 **구, 동, 단지명, 준공년도, 규모(주거용면적), 세대수, 단지 전기사용요금, 전기사용량(kWh/yr)**을 수집하였음. 단위세대의 면적 평형타입을 별도로 조사하지 아니하고 규모를 세대수로 나누어 단지별 단위세대 구성의 대표성을 가지도록 평균적 단위세대규모로 치환하였음. 치환된 단위세대면적을 기준 값과 단지 전기사용요금으로 세대별 요금, 단위면적당 요금을 추가로 산출 하여 변수로 설정하였음. 세대별 사용량과 단위면적당 에너지사용량 또한 세대요금 산출 방식과 같은 방법으로 추가변수로 설정하였음.
- 세대별로 전기요금을 많이 납부하는 강남구, 서초구, 용산구의 세대별 면적에 대한 통계분석 결과는 수집된 모집단에서 평균 $83.96m^2$ 으로 분석되었고, 각 구별 세대면적 평균은 강남구 $90m^2$ 용산구 $85m^2$ 서초구 $97m^2$ 으로 분석되었음. 세대면적의 평균 분석결과에서 주거면적의 편차가 크지 않음으로 본 연구에서는 단지전체의 거주면적규모를 세대수로 나누어 단지별 단위세대 구성의 대표성을 가지도록 평균적 단위세대규모로 치환하여 데이터를 분석하였음. 따라서 Boxplot의 세대전기요금은 단위세대규모의 오차가 제거된 값임으로 세대전기요금수준을 판단하기에 적합함.

■ 준공년도별 전기에너지 요금

- 그림 3.30은 준공 년도별로 구분되어 세대별 연간 전기사용 요금을 나타냄. 2000년대 초반부터 현재까지 공동주택의 년도별 boxplot의 상위 25% 1분위 범위와 4분위 범위에서 벗어난 이상치(outlier)값이 서울시내 공동주택 전기에너지 요금의 평균값(Mean) 및 중위값(Median)을 크게 넘어섬.
- 지속가능성이 화두가 되기 시작하며 정부차원에서 건축물에서 에너지절약을 위한 건축기준이 강화되기 시작한 시점과 맞물려 있음. 이러한 결과로 비추어 볼 때, 주거건축물에서 실제 에너지소비량은 건물의 노후화, 법규정책에 따른 건물에너지 성능요소 향상과는 선형관계성이 없음.
- 1977년부터 2000년 이전 공동주택 가정의 전기에너지 요금은 서울시 전체 평균요금에 미치지 못하는 분포를 보임. 그러나 1976년 준공된 단지 중위값이 모든 년도의 중위값을 상회하는 값으로 나타났음. 이는 강남구 압구정동 H 아파트 단지의 가정 전기요금임.

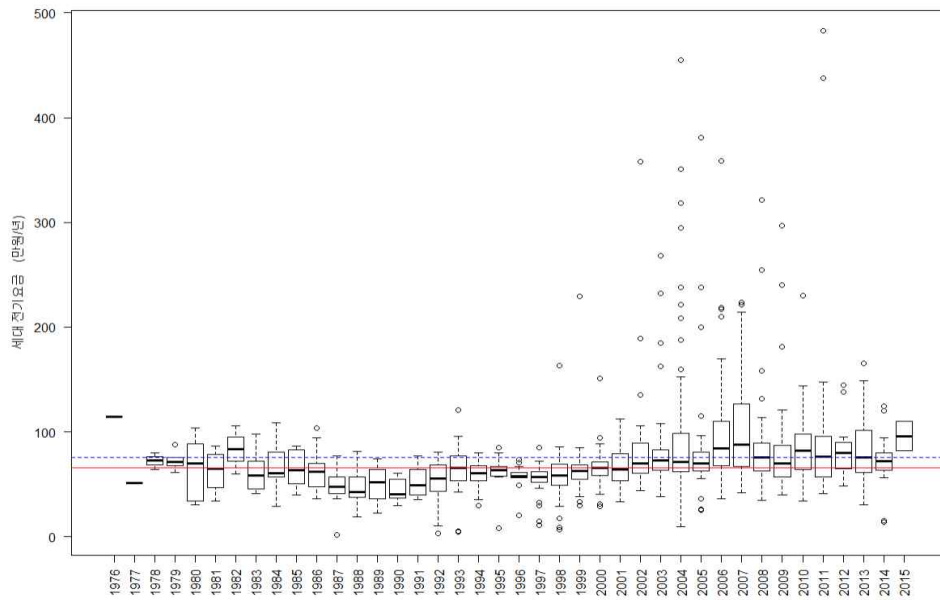


그림 3.30 Annual electric energy fee in household

■ 권역별 에너지 에너지 사용요금

- 서울 권역별 사용요금은 그림 3.34에서 같이 강남권역과 도심권역에서 전기사용요금의 평균치를 상회하였음.

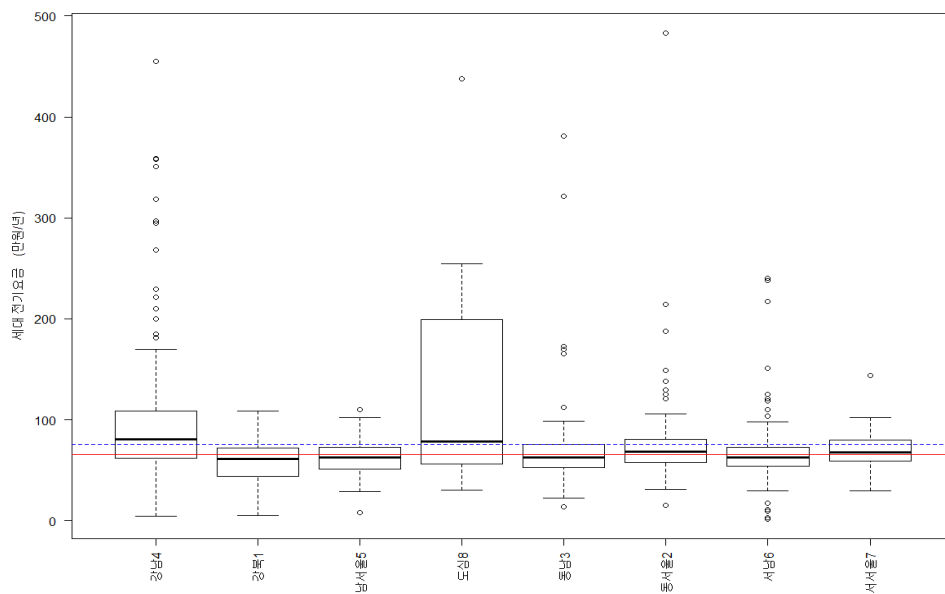


그림 3.31 Annual electric energy fee by region classification

■ 서울시 구별 세대당 에너지 사용요금

- 그림 3.32의 구별 사용요금에서도 권역별 전기사용요금의 결과와 마찬가지로 강남권역의 강남구와 서초구 그리고 도심권역의 용산구 3개구가 서울시 전체의 평균과 중위값을 상회하는 분포로 나타났으며 나머지 22개 구는 서울시 평균에 미치지 못하였음.

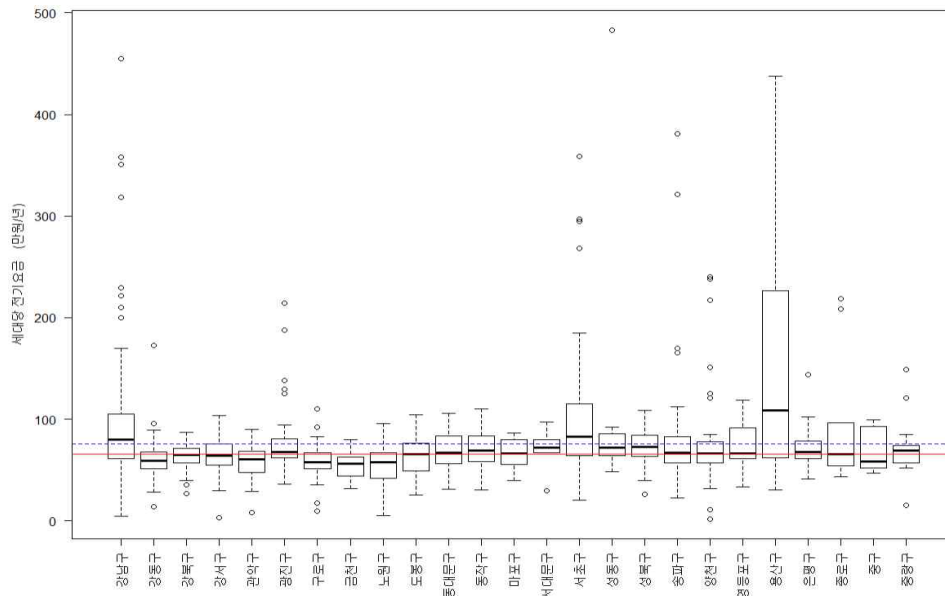


그림 3.32 Annual electric energy fee by Gu

- 그림 3.33에서 강남구와 서초구 용산구 3개구의 세대 전기요금을 확대 표현하였음. 강남구의 경우 상위 25% 범위는 낮으나 상위 범위에서 벗어난 이상치 빈도가 높게 나타났으며 용산구의 경우 전체적으로 높은 범위로 나타남.

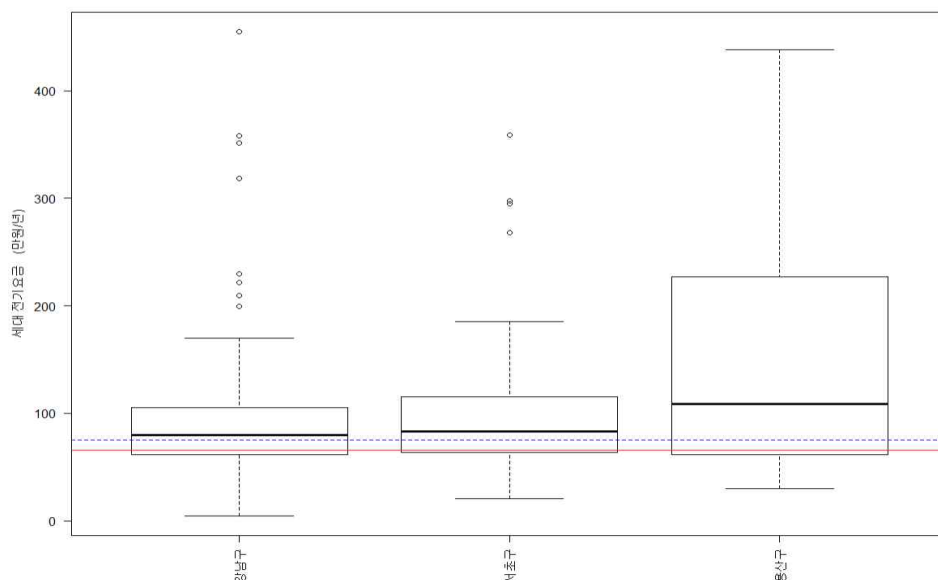


그림 3.33 Annual electric energy fee by energy high usage area in Seoul

■ 강남구 동별 세대당 에너지 사용요금

- 강남구의 동별 세대의 전기요금은 세곡, 수서, 일원동 3개 동을 제외하고 동별 중위값이 서울시 평균을 상회함. 특히, 도곡동의 경우 전기에너지 사용요금 상위 50% 이상 수치가 절대수치로 크게 상회하며, 대치동과 압구정동은 세대전기요금 사용량 하위 25% 또한 서울시 평균을 상회함.

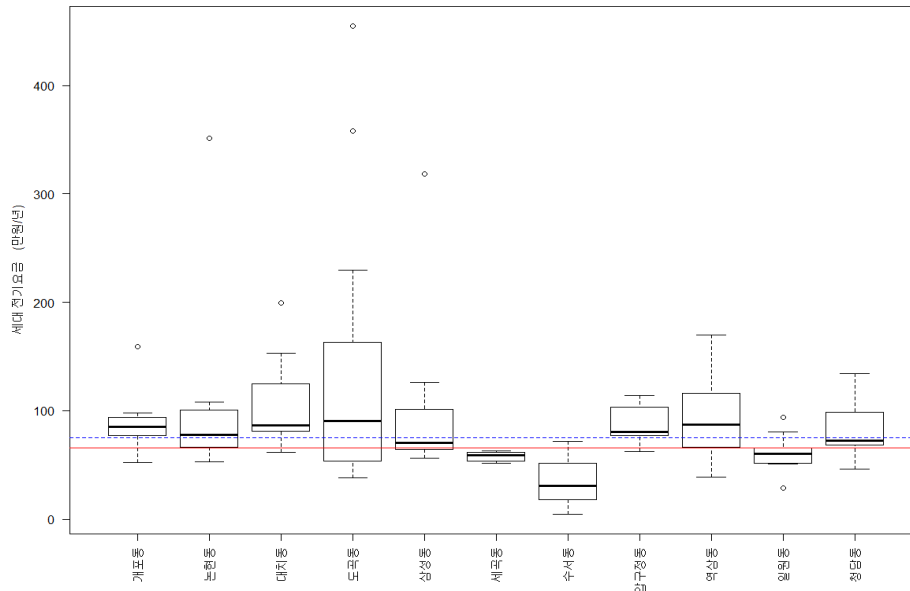


그림 3.34 Annual electric energy fee by Dong of GangnamGu

■ 서초구 동별 세대당 에너지 사용요금

- 서초구의 동별 세대의 전기요금은 반포, 방배, 서초동과 신원 우면 잠원동간의 세대 전기요금 수준의 양극화가 뚜렷하게 나타남.

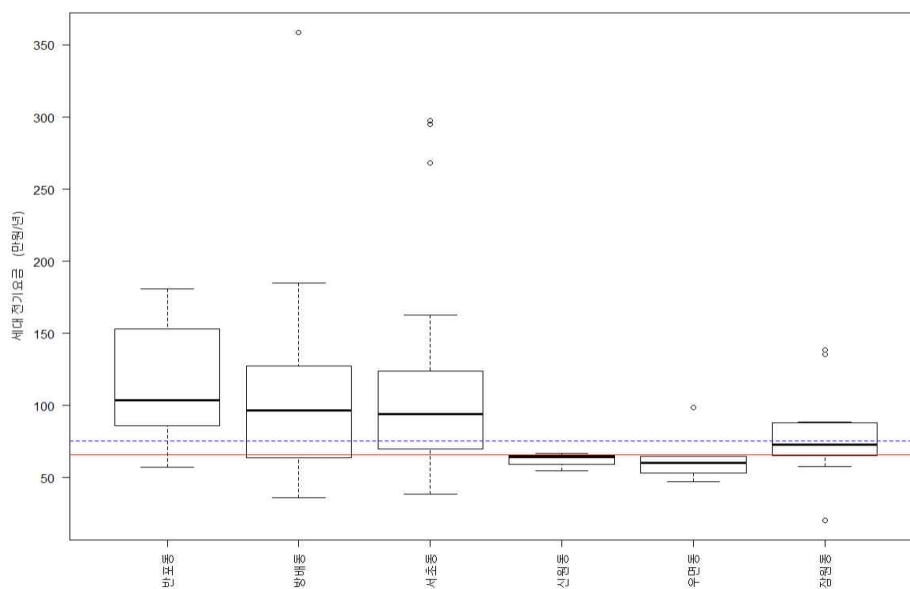


그림 3.35 Annual electric energy fee by Dong of SeochoGu

■ 용산구 동별 세대당 에너지 사용요금

- 용산구의 동별 세대의 전기요금은 다음 그림 3.36에서 보이는 바와 같음. 용산구의 경우 신천동, 후암동, 원효로4가를 제외한 모든 동에서 서울시 평균값을 크게 상회함. 강남구 도곡동의 경우 일부 이상치 단지에서 연간 세대전기요금이 200만원을 상회 하였지만, 용산구의 경우 동별 분석결과 한남동, 한강로 1가의 분석 모집단 모두 연간 세대전기요금이 200만원을 상회하였음. 특히, 한남동에서 공동주택 형식 거주자의 연간전기요금은 400만원 이상 지불되고 있음. 서울시 공동주택 평균 전기사용요금은 본 연구의 모집단에서 75만4148원으로 분석되었음. 모집단 전체 평균 전기요금에 비해 한남동과 대치동 일부의 공동주택 단지는 서울시 공동주택 연간 전기사용요금의 5배 이상 지불되고 있음.

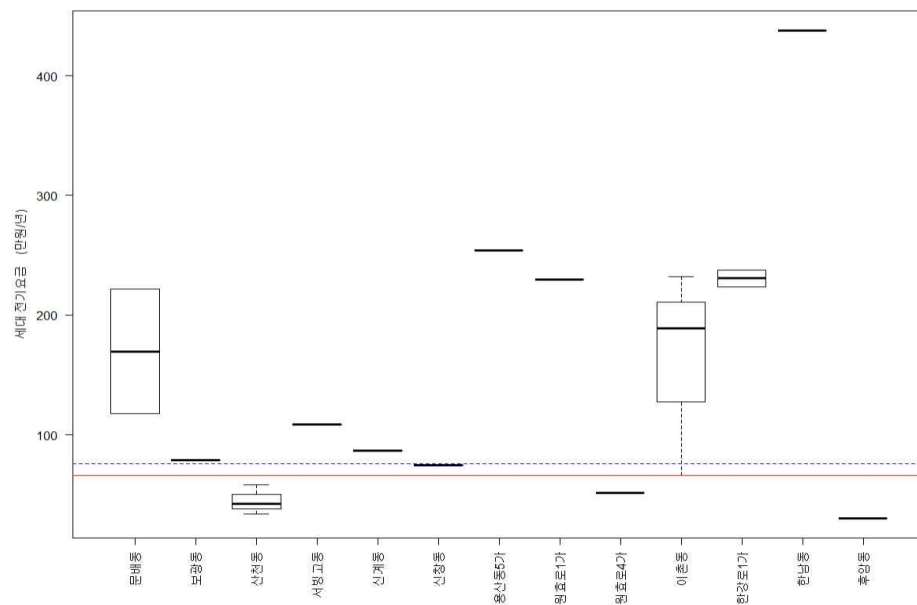


그림 3.36 Annual electric energy fee by Dong of YongsanGu

④ 공동주택 표준모델 선정

- 공동주택의 회귀분석을 수행하기 위해 사례분석을 통한 표준모델을 선정함.

■ 표준모델 및 변수선정

- 주거용 건축물의 회귀분석을 위한 에너지 시뮬레이션을 수행하기 위해 H사의 H아파트의 사례분석을 수행하여 바닥면적 별로 출현 빈도수가 높은 3개의 Type(59m², 84m², 130m²)을 표준모델로 선정함.

표 3.26 분석대상 공동주택 면적

구 분	Type A	Type B	Type C
바닥면적(m ²)	59	84	130
외벽면적(외기에 직접 면함)(m ²)	27.22	37.54	46.86
외벽면적(외기에 간접 면함)(m ²)	33.25	32.35	31.48
높이(m)	2.4		

- 이후 회귀분석을 수행하기 위한 다수의 시뮬레이션 Case를 만들기 위해 다음과 같이 시뮬레이션 변수를 조합하여 288개의 Case를 생성함.
 - 지역: 중부, 남부, 제주
 - 실 타입: Type A, Type B, Type C
 - 주입면 방위: 동, 서, 남, 남동, 남서, 북, 북동, 북서
(남향은 180°기준, 동향은 90°기준)
 - 열관류율: Level1, Level2, Level3, Level 4
- 벽체 및 창호의 열관류율 Level 은 분석한 사례를 바탕으로 네 단계로 나누어 다음과 같이 구분함.

표 3.27 벽체 및 창호 열관류율(W/m2K)

지역	요소	Level1	Level2	Level3	Level4
중부	외벽(외기에 직접 면함)	0.36	0.29	0.22	0.14
	외벽(외기에 간접 면함)	0.49	0.39	0.29	0.20
	창호	2.10	1.80	1.40	1.30
	문	2.80	2.70	1.80	1.70
남부	외벽(외기에 직접 면함)	0.45	0.37	0.29	0.22
	외벽(외기에 간접 면함)	0.63	0.52	0.41	0.29
	창호	2.40	2.10	1.80	1.40
	문	3.10	2.70	1.80	1.70
제주	외벽(외기에 직접 면함)	0.58	0.48	0.39	0.29
	외벽(외기에 간접 면함)	0.85	0.70	0.55	0.41
	창호	3.10	2.40	2.10	1.80
	문	3.70	2.70	1.80	1.70

- 중부지방 Type A의 시뮬레이션 변수의 조합을 통해 생성된 Case는 다음과 같음.

표 3.28 중부지방 시물레이션 생성

번호	지역	바닥면적(m ²)	방위(°)	열관류율	창호 면적비
1	중부	59	0	Level1	0.29
2	중부	59	0	Level2	0.29
3	중부	59	0	Level3	0.29
4	중부	59	0	Level4	0.29
5	중부	59	45	Level1	0.29
6	중부	59	45	Level2	0.29
7	중부	59	45	Level3	0.29
8	중부	59	45	Level4	0.29
9	중부	59	90	Level1	0.29
10	중부	59	90	Level2	0.29
11	중부	59	90	Level3	0.29
12	중부	59	90	Level4	0.29
13	중부	59	135	Level1	0.29
14	중부	59	135	Level2	0.29
15	중부	59	135	Level3	0.29
16	중부	59	135	Level4	0.29
17	중부	59	180	Level1	0.29
18	중부	59	180	Level2	0.29
19	중부	59	180	Level3	0.29
20	중부	59	180	Level4	0.29
21	중부	59	225	Level1	0.29
22	중부	59	225	Level2	0.29
23	중부	59	225	Level3	0.29
24	중부	59	225	Level4	0.29
25	중부	59	270	Level1	0.29
26	중부	59	270	Level2	0.29
27	중부	59	270	Level3	0.29
28	중부	59	270	Level4	0.29
29	중부	59	315	Level1	0.29
30	중부	59	315	Level2	0.29
31	중부	59	315	Level3	0.29
32	중부	59	315	Level4	0.29
33	중부	84	0	Level1	0.29
34	중부	84	0	Level2	0.29
35	중부	84	0	Level3	0.29
36	중부	84	0	Level4	0.29
37	중부	84	45	Level1	0.29
38	중부	84	45	Level2	0.29
39	중부	84	45	Level3	0.29
40	중부	84	45	Level4	0.29
41	중부	84	90	Level1	0.29
42	중부	84	90	Level2	0.29
43	중부	84	90	Level3	0.29
44	중부	84	90	Level4	0.29
45	중부	84	135	Level1	0.29
46	중부	84	135	Level2	0.29
47	중부	84	135	Level3	0.29
48	중부	84	135	Level4	0.29

표 3.28 중부지방 시물레이션 생성 (계속)

번호	지역	바닥면적(m ²)	방위(°)	열관류율	창호 면적비
49	중부	84	180	Level1	0.29
50	중부	84	180	Level2	0.29
51	중부	84	180	Level3	0.29
52	중부	84	180	Level4	0.29
53	중부	84	225	Level1	0.29
54	중부	84	225	Level2	0.29
55	중부	84	225	Level3	0.29
56	중부	84	225	Level4	0.29
57	중부	84	270	Level1	0.29
58	중부	84	270	Level2	0.29
59	중부	84	270	Level3	0.29
60	중부	84	270	Level4	0.29
61	중부	84	315	Level1	0.29
62	중부	84	315	Level2	0.29
63	중부	84	315	Level3	0.29
64	중부	84	315	Level4	0.29
65	중부	130	0	Level1	0.29
66	중부	130	0	Level2	0.29
67	중부	130	0	Level3	0.29
68	중부	130	0	Level4	0.29
69	중부	130	45	Level1	0.29
70	중부	130	45	Level2	0.29
71	중부	130	45	Level3	0.29
72	중부	130	45	Level4	0.29
73	중부	130	90	Level1	0.29
74	중부	130	90	Level2	0.29
75	중부	130	90	Level3	0.29
76	중부	130	90	Level4	0.29
77	중부	130	135	Level1	0.29
78	중부	130	135	Level2	0.29
79	중부	130	135	Level3	0.29
80	중부	130	135	Level4	0.29
81	중부	130	180	Level1	0.29
82	중부	130	180	Level2	0.29
83	중부	130	180	Level3	0.29
84	중부	130	180	Level4	0.29
85	중부	130	225	Level1	0.29
86	중부	130	225	Level2	0.29
87	중부	130	225	Level3	0.29
88	중부	130	225	Level4	0.29
89	중부	130	270	Level1	0.29
90	중부	130	270	Level2	0.29
91	중부	130	270	Level3	0.29
92	중부	130	270	Level4	0.29
93	중부	130	315	Level1	0.29
94	중부	130	315	Level2	0.29
95	중부	130	315	Level3	0.29
96	중부	130	315	Level4	0.29

■ 회귀식 산출

- Excel의 데이터분석 기능 중 회귀분석 기능을 이용.
- 일곱 개의 독립변수(바닥면적, 방위, 외기에 직접면하는 외벽의 열관류율, 외기에 간접면하는 외벽의 열관류율, 창호열관류율, 문열관류율, 창면적비) 및 288개 시뮬레이션 Case와 그에 따른 시뮬레이션 수행 결과(난방부하, 냉방부하) 수치를 사용.
- 지역별(중부, 남부, 제주) 회귀식 산출결과는 다음 표와 같음.

표 3.30 지역별 난방부하 및 냉방부하 회귀식

지역	바닥면적(m ²)	회귀식
중부	난방부하	$y_h = 3.892 + 0.030x_1 - 0.022x_2 + 1.940x_3 + 0.839x_4 + 0.019x_5 + 0.082x_6 - 5.291x_7$
	냉방부하	$y_c = -2.208 + 0.034x_1 + 0.003x_2 + 0.173x_3 + 0.161x_4 + 0.000x_5 + 0.004x_6 + 7.702x_7$
남부	난방부하	$y_h = 3.098 + 0.024x_1 - 0.018x_2 + 1.598x_3 + 0.731x_4 + 0.006x_5 + 0.059x_6 - 4.858x_7$
	냉방부하	$y_c = -1.960 + 0.033x_1 + 0.002x_2 + 0.266x_3 + 0.197x_4 + 0.000x_5 + 0.010x_6 + 7.263x_7$
제주	난방부하	$y_h = 2.309 + 0.018x_1 - 0.014x_2 + 1.256x_3 + 0.622x_4 - 0.008x_5 + 0.037x_6 - 4.424x_7$
	냉방부하	$y_c = -1.725 + 0.032x_1 + 0.001x_2 + 0.358x_3 + 0.234x_4 + 0.000x_5 + 0.016x_6 + 6.823x_7$

y_h : 난방부하(MWh)

y_c : 냉방부하(MWh)

x_1 : 바닥면적(m²)

x_2 : 주 입면 방위(°)

x_3 : 외기에 직접 면하는 외벽의 열관류율(W/m²K)

x_4 : 외기에 간접 면하는 외벽의 열관류율(W/m²K)

x_5 : 창호 열관류율(W/m²K)

x_6 : 문 열관류율(W/m²K)

x_7 : 창면적비

- 회귀식 계수의 절대값의 크기는 결과에 대한 해당변수의 영향도와 비례함.
- 해당 계수들을 검토한 결과, 냉난방 부하에 대한 영향도가 가장 큰 요소는 창면적비이며, 그 다음으로 외기에 직접면하는 외벽의 열관류율과 외기에 간접면하는 외벽의 열관류율의 영향도가 가장 큼.

표 3.31 회귀식 계수

지역	바닥면적 (㎡)	계수의 절대값						
		바닥면적	주 입면 방위	외벽 열관류율 (외기직접)	외벽 열관류율 (외기간접)	창호 열관류율	문 열관류율	창면적비
중부	난방부하	0.030	0.022	1.940	0.839	0.019	0.082	5.291
	냉방부하	0.034	0.003	0.173	0.161	0.000	0.004	7.702
남부	난방부하	0.024	0.018	1.598	0.731	0.006	0.059	4.858
	냉방부하	0.033	0.002	0.266	0.197	0.000	0.010	7.263
제주	난방부하	0.018	0.014	1.256	0.622	0.008	0.037	4.424
	냉방부하	0.032	0.001	0.358	0.234	0.000	0.016	6.823

⑥ 경년변화에 따른 단열성능 검토

- 에너지 시뮬레이션 결과에 경년변화에 따른 단열성능의 저하를 반영하기 위해 단열성능 저하곡선 및 준공연도에 따른 열관류율 기준 도입.

■ 단열성능 저하곡선

- 냉난방부하에 영향을 미치는 요소 중 영향도가 가장 큰 요소는 창면적비는 시간경과에 따라 쉽게 변경되는 요소가 아님.
- 이에 따라 본 연구에서는 그 다음으로 영향도가 큰 외기에 직접 면하는 외벽의 열관류율의 경년변화에 따른 성능변화를 우선적으로 검토함.
- 류승희(공공건축물 외벽의 단열성능 측정 및 경년변화 분석에 의한 단열 리모델링 시기 산정 연구, 경북대학교 석사학위 논문, 2015.)는 실제 열관류율 측정 가능 한 대상 지 10곳을 선정하여 경년변화에 따라 외벽의 단열성능이 우하향으로 저하되는 식 3.13을 도출함.
- x는 벽체준공 이후 경과된 년수를 의미.

$$y = 0.2655e^{0.0521x} \dots\dots\dots \text{식 3.13}$$

- 식 3.13에서는 외벽의 준공시기의 열관류율(x = 0 일 경우 y의 값)을 0.2655로 가정함.
- 본 연구에서는 해당 상수를 준공시기당시 외벽의 열관류율 k라고 가정함.
- 준공 이후 초기 열관류율이 k였던 외벽에 대해 x년이 지난 외벽의 열관류율 값 y는 식 3.14와 같이 유추할 수 있음.

$$y = ke^{0.0521x} \dots\dots\dots \text{식 3.14}$$

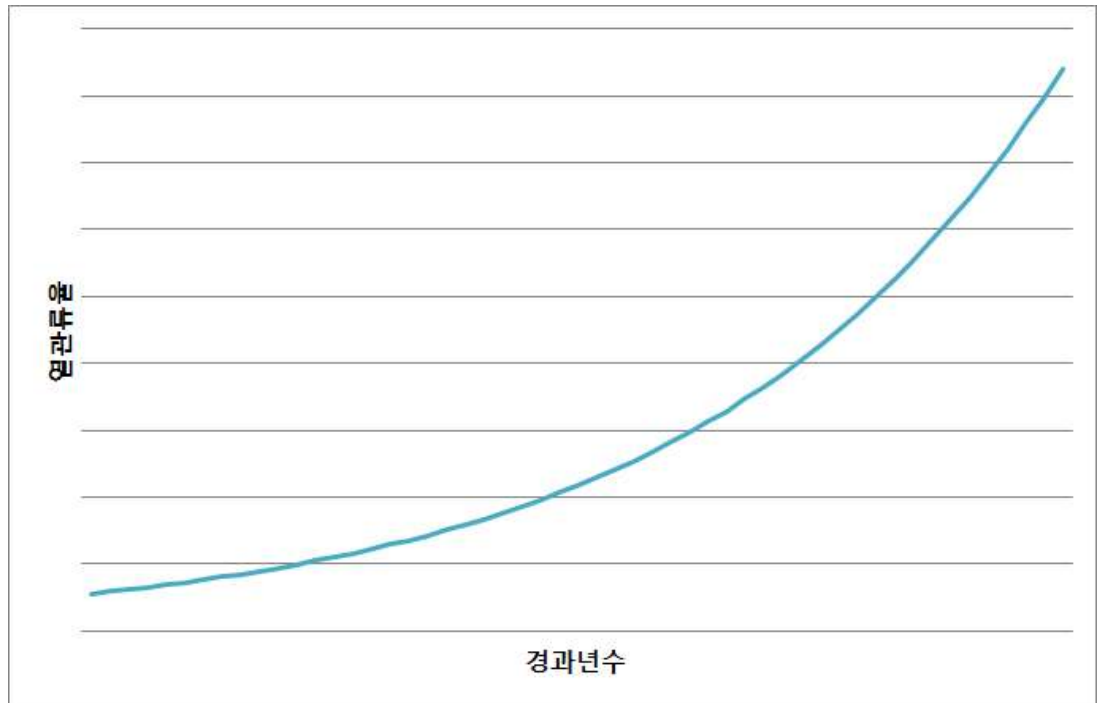


그림 3.38 단열성능 저하산식에 따른 경과년수와 열관류율 관계도

■ 준공연도에 따른 열관류율 기준

- 본 연구에서는 사용자가 열관류율 값을 정확히 산정하기 어려운 비전문가로 가정하고, 사용자의 편의성을 고려하여 설계도서 기반 계산 값 혹은 실제 측정값 대신 해당 연도의 법적기준에 해당하는 열관류율을 사용함.
- 국토교통부는 에너지 절약 설계기준을 통해 지역별 건축물 부위의 열관류율의 기준을 제시하고 있음.
- 1979년부터 1987년까지 주거용 건축물의 부위별 열관류율 기준은 다음과 같음.

표 3.32 주거용 건축물의 부위별 열관류율 기준(1979~1987)

개정연도	지역구분	부위별 단열기준(열관류율: kcal/m ² h℃)				
		외벽	최하층 바닥	최상층 반자 또는 지붕	공동주택 측벽	외기에 면하는 창
1979.9	-	0.9	0.9	0.9	-	2.2
1980.12	-	0.5	1.0	0.5	-	3.0
1984.12	제주도 이외	0.5	0.5	0.5	0.4	3.0
	제주도	1.0	1.0	1.0	0.8	3.0
1987.7	중부	0.5	0.5	0.35	0.4	2.9
	남부	0.65	0.65	0.45	0.6	3.1
	제주도	1.0	1.0	0.65	0.7	5.0

- 1979년부터 1980년까지의 열관류율 기준의 경우 지역구분이 나누어져 있지 않아, 동일한 기준을 적용함.
- 2008년부터 2017년까지 주거용 건축물 기준 외기에 직접 면하는 부위별 열관류율 기준은 다음과 같음(2008년부터 2017년까지 에너지절약 설계기준의 경우 열관류율 기준을 산정하는 데 있어, 그 분류가 세분화되고 양이 많으므로 본 보고서에서는 외기에 직접 면하는 경우의 열관류율만을 기재함).
- 상기 기준은 개정년도를 기준으로 정리가 되어 있기 때문에, 건축물의 준공연도가 개정년도에 해당하지 않는 경우, 이전년도의 기준을 사용함.
- 예를 들어, 준공연도가 2009년인 경우에는 2008년 기준을 사용하며, 1985년인 경우에는 1984년도 기준을 사용함.

표 3.33 주거용 건축물의 부위별(외기직접) 열관류율 기준(2008~2017)-1

개정연도	지역구분	부위별 단열기준(열관류율: W/m ² K)				
		외벽	최하층 바닥 (바닥난방)	최상층 반자 또는 지붕	충간바닥 (바닥난방)	외기에 면하는 창
2008.7	중부	0.47	0.35	0.29	0.81	3.00
	남부	0.58	0.41	0.35	0.81	3.30
	제주도	0.76	0.47	0.41	0.81	4.20
2010.11	중부	0.36	0.30	0.20	0.81	2.10
	남부	0.45	0.35	0.24	0.81	2.40
	제주도	0.58	0.35	0.29	0.81	3.10
2013.03	중부	0.27	0.23	0.18	0.81	1.50
	남부	0.34	0.28	0.22	0.81	1.80
	제주도	0.44	0.33	0.28	0.81	2.60
2013.10	중부	0.27	0.23	0.18	0.81	1.50
	남부	0.34	0.28	0.22	0.81	1.80
	제주도	0.44	0.33	0.28	0.81	2.60
2017	중부	0.21	0.18	0.15	0.81	1.20
	남부	0.26	0.22	0.18	0.81	1.40
	제주도	0.36	0.29	0.25	0.81	2.00

(나) 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 매개변수 라이브러리 성능평가

① 공동주택 설계요소별 에너지소비량 예측방법 검토

- 본 연구는 공동주택 설계요소별 에너지소비량의 확률론적 예측방법의 유효성과 적용가능성을 검토하기 위해 본 연구에서 수집 및 구축된 **공동주택의 에너지소비량의 상관도를 분석함**. 이때, 준공년도 스케일별 유의성 검증 수행 후 상관분석을 수행함.

■ 상관성 척도

- 연구조사의 목적과 자료의 종류에 따라 상관정도를 평가하는 기준은 상이하나 사회과학 분야에서 사용되는 일반적 기준은 다음 표 3.34와 같음.

표 3.34 Criteria for evaluation of correlation coefficient

Value	Level of Agreement
0 ~ 0.2	None
0.2 ~ 0.4	Weak
0.4 ~ 0.6	Moderate
0.6 ~ 0.8	Strong
Above. 0.8	Almost perfect

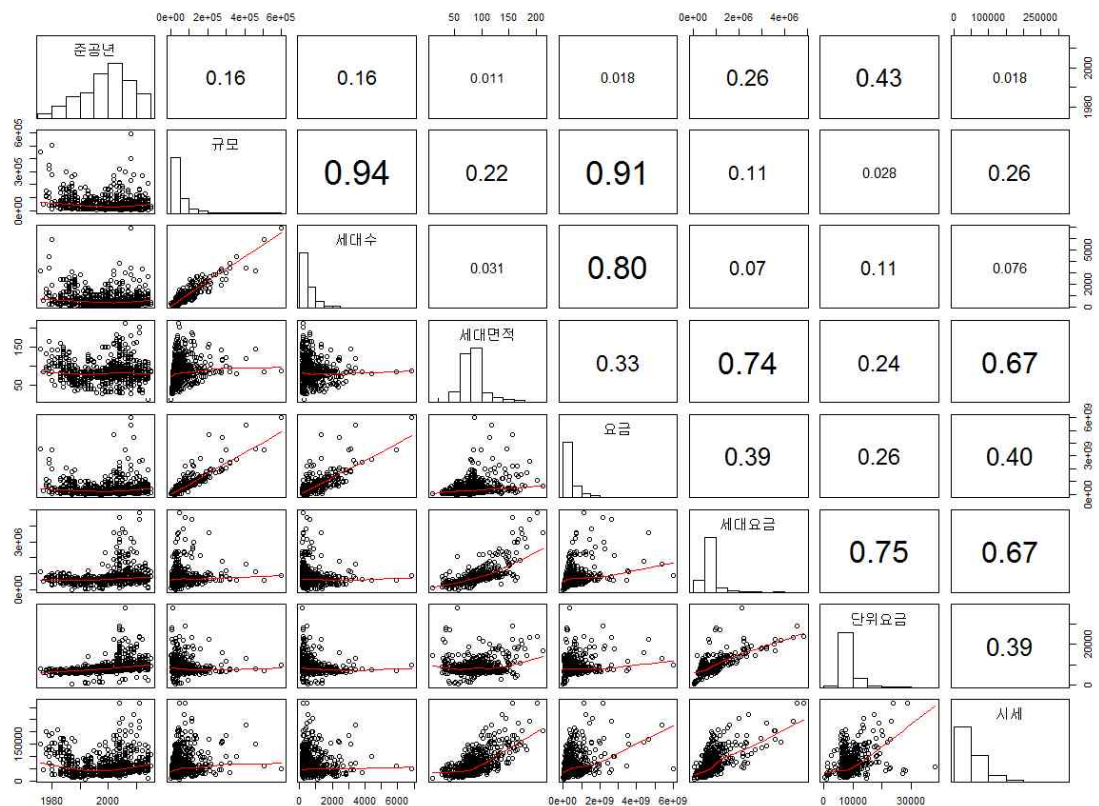


그림 3.39 상관계수 도표

- 선형의 양의 상관 분포를 나타내는 결과에 따라 상관계수 분석을 수행하였음. 수행과정은 분석 스케일에 따라 전체 상관도가 오염될 가능성을 고려하여 년도 구간별 검정통계량을 산출하여 상관의 유의성을 검증하였음.
- 유의성 검증을 위한 가설 설정은 다음과 같음.
연구가설 : 매매시세와 세대전기사용량 간에는 선형관계가 있다.
귀무가설 : 매매시세와 세대전기사용량 간에는 선형관계가 없다.
- 년도 구간 스케일별 산출된 피어슨의 상관계수(cor)와 자유도(DF)에 따라 검정통계량 t값을 임계치와 비교하면, 검정통계량 t값이 우측임계치보다 스케일 구분별 케이스에서 모두 크기 때문에 귀무가설을 기각하고 연구가설을 채택함. 따라서 매매시세와 세대전기사용량의 상관계수 값으로 산출된 값은 유의수준(α) 0.05에서 검정한 결과 통계적으로 유의함. 그러나 1970~1979 년도 스케일의 p-value 값은 0.05 이하임으로 통계적 유의성에 대해 재검증이 필요함.

표 3.35 Significance Verification by Yearly range scale for Correlation analysis

Scale	p-value	DF	t-test	cor
1970~1979	0.06127	8	2.175	0.609
1980~1989	2.20E-16	126	13.338	0.765
1990~1999	1.67E-13	236	7.828	0.454
2000~2009	2.20E-16	374	22.754	0.761
2010~2015	2.20E-16	115	15.418	0.820

- 1980년 이전 준공된 단지는 그림 3.40의 상관분석 그래프에서 보이는바와 같이 매매 시세와 세대별 전기요금간의 상관도는 0.61의 강한 상관도를 보임. 그러나 선형성을 판단하였을 때 일부 모집단의 케이스에서 이상치를 나타냈음. 이는 재건축 예정 단지의 경우 매매가는 높으나, 임대가는 낮은 경향을 보임. 따라서 실거주자가 임대거주일 비율이 높은 단지의 경우 매매가와 에너지 사용패턴이 선형적이지 않은 결과가 나올 가능성이 높음. 본 연구에서는 매매시세와 에너지 사용량의 관계를 분석함. 일반적으로 매매가와 임대가는 선형관계를 보임으로 매매시세와 임대시세를 동일한 성향의 변수로 가정함. 그러나 재건축 예정단지의 경우 매매가와 임대가가 선형관계를 보이지 않음으로 1970년대 모집단을 분석에서 제외시킴.

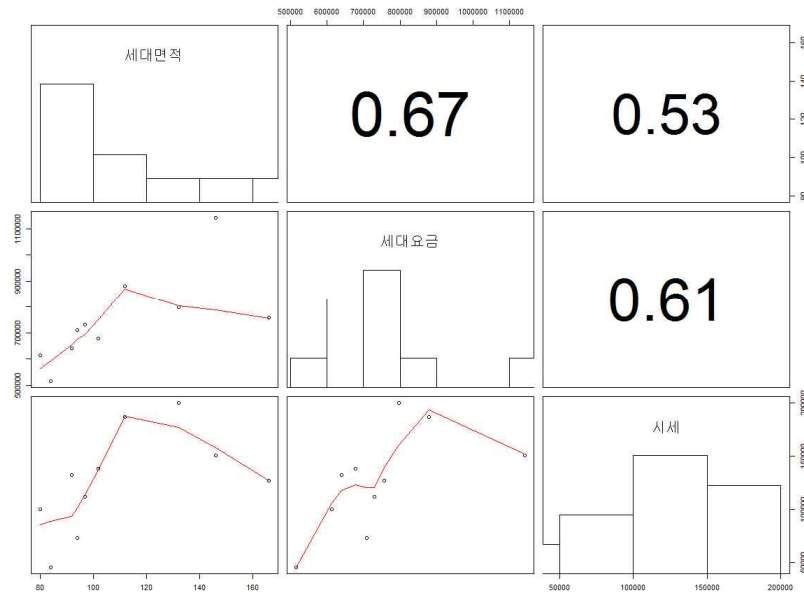


그림 3.40 1970~1979 range scale of Correlation analysis between market price and Annual electric energy fee

- 1970년대 모집단이 제거된 상관분석 결과는 그림 3.44과 같음. 매매시세와 세대전기요금의 상관계수는 0.69로 강한 상관관계로 되었음.

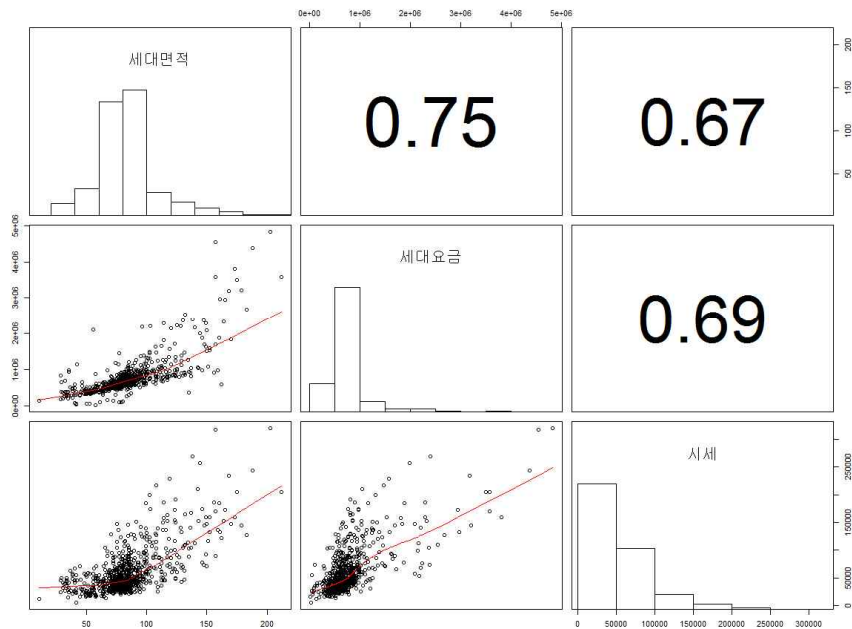


그림 3.41 1980~2015 range scale of Correlation analysis between market price and Annual electric energy fee

- 그림 3.42에서와 같이 2010년 이후 모집단의 상관계수는 0.82로 매매시세와 전기사용요금간의 거의 완벽한 상관관계를 나타냄.
- 이 수치는 매매시세와 세대면적의 상관도가 0.71이며, 세대면적과 전기에너지 사용량 상관도가 0.79로 나타남과 비교하였을 때, 단위면적당 에너지사용량과 평당 매매단가보다, 매매시세와 전기사용량이 오히려 깊은 상관도를 나타내는 것임.
- 단위면적당 에너지 사용량을 원단위로 사용하여 면적에 따른 에너지 사용량을 유추하는 방법은 일반적으로 통용되는 에너지 사용량 산출방법임. 또한 거주 평수가 높을수록 주택 매매 시세는 높아지는 것이 일반적으로 수용되는 상식임.
- 그러나 2010년 이후 준공된 공동주택에서는 세대면적과 매매시세의 상관도 그리고 세대면적과 에너지사용량의 상관도보다 매매시세와 전기사용량의 상관도가 가장 높게 분석된 결과로 나타남. 물리적 범위의 상관요소보다 오히려 인문사회적 범위의 상관요소가 더욱 깊은 상관성을 보이는 것으로 해석됨.

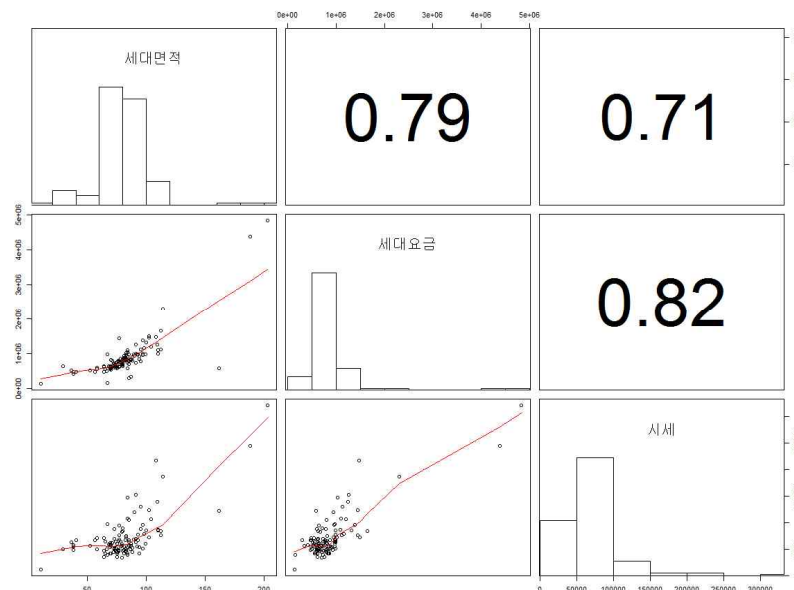


그림 3.42 2010~2015 range scale of Correlation analysis between market price and Annual electric energy fee

② 회귀식을 통한 시뮬레이션 수행

○ 상기 구축 라이브러리의 성능을 평가하기 위한 방법론을 정립하고 시뮬레이션 수행

■ 경년변화를 고려한 회귀분석 기반 분석 방법론

- 본 연구의 경년변화를 고려한 공동주택 건축물의 냉난방 부하를 도출하기 위한 시뮬레이션 알고리즘은 다음과 같음. 이는 외벽의 경년변화 및 리모델링 전후의 에너지 성능변화를 비교하는 분석방법을 나타냄.
- 사용자는 초기 입력 데이터로 준공연도, 지역, 바닥면적, 방위, 창면적비를 입력할 수 있음.

- 외벽의 열관류율의 경우 건축물을 한 번도 리모델링하지 않았다고 가정하고, 사용자가 입력한 준공연도를 기준으로 다음과 같이 세 가지 종류로 구분됨.
 - 준공연도 기준 열관류율: 준공연도, 법적기준의 열관류율
 - 경년변화를 고려한 열관류율: 준공연도 법적기준의 열관류율 수치를 경년변화에 따른 외벽의 단열성능 저하산식에 도입하여 보정한 열관류율

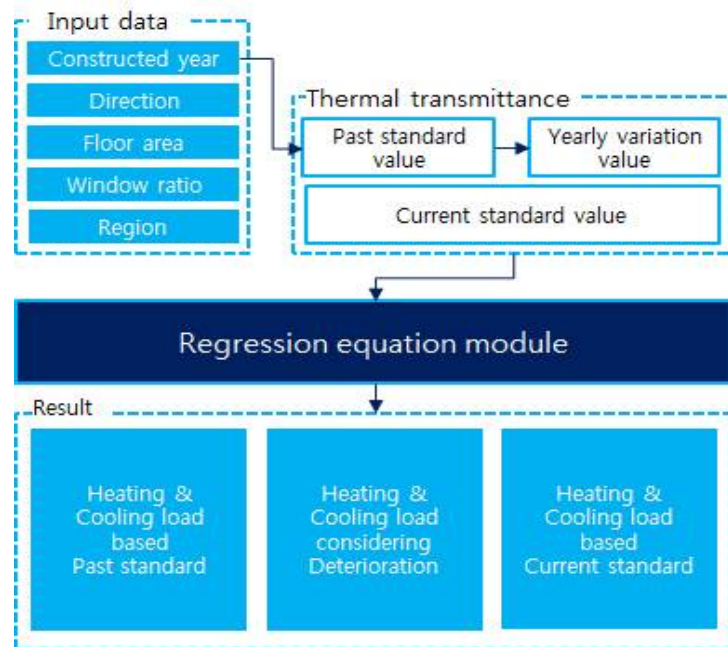


그림 3.43 시물레이션 알고리즘

■ 시물레이션 수행

- 상기 제시한 분석방법을 이용하여 시물레이션을 수행.
- 준공연도는 2008년, 중부지방에 위치, 남향, 바닥면적 59m², 창면적비 29%로 가정.

표 3.36 시물레이션을 위한 건축물의 가정 요소

지역	중부지방
준공연도	2008
방위(°)	180
바닥면적(m ²)	59
창면적비(%)	29

표 3.37 열관류율(W/m²K) 입력데이터

구 분	준공연도 당시 기준 열관류율	경년변화를 고려한 열관류율	현재 기준 열관류율
외벽(외기에 직접 면함)	0.47	0.79	0.21
외벽(외기에 간접 면함)	0.64	1.08	0.26
창호	3		1.2
문	3		1.2

- 준공연도 기준 열관류율은 2008년 중부지방 기준을 사용하였으며, 현재년도 기준 열관류율은 2018년 중부지방 기준을 사용함. 한편, 경년변화에 따른 단열성능 저하산식을 통해 계산된 경년변화를 고려한 외벽의 열관류율 산출과정은 다음과 같음.
 - 외기에 직접면하는 외벽의 열관류율(W/m^2k): k값은 2008년 중부지방의 외기에 직접면하는 외벽의 열관류율 0.47을 사용하였으며, 경과년도 x값은 2018년을 기준으로 10년이 지난 것으로 간주하여 10을 사용함. 이에 따라, $0.47 \times e^{0.0521 \times 10} \approx 0.79$ 로, 경년변화를 고려한 외기에 직접면하는 외벽의 열관류율은 0.79.
 - 외기에 간접면하는 외벽의 열관류율(W/m^2k): x값은 직접면하는 경우와 동일하며, k값은 2008년 중부지방의 외기에 간접면하는 외벽의 열관류율 0.64를 사용함. 이에 따라, $0.64 \times e^{0.0521 \times 10} \approx 1.08$ 로, 경년변화를 고려한 외기에 직접면하는 외벽의 열관류율은 1.08.

표 3.38 시뮬레이션 결과(MWh)

구 분	냉난방 부하		
	준공연도 당시 기준 열관류율 사용	경년변화를 고려한 열관류율사용	현재 기준 열관류율 사용
난방부하	1.937	2.927	0.932
냉방부하	2.787	2.913	2.674
총계	4.724	5.840	3.606

- 경년변화를 고려한 건축물의 냉난방 부하는 준공연도 대비 냉난방 부하의 약 23% 증가했으며, 현재년도 기준에 맞추어 단열성능을 개선할 경우 경년변화를 고려한 건축물 대비 냉난방 부하가 38% 감소할 것으로 예측됨.
- 또한 다음과 같이, 실 타입에 따른 바닥면적만 증가시킬 경우 준공연도 기준 대비 경년변화를 고려한 냉난방부하의 증가율과 경년변화 대비 현재년도 기준 대비 냉난방 부하 감소율 모두 감소하는 경향을 보임.

표 3.39 냉난방부하 감소율 및 증가율

구 분	준공연도 당시 기준 열관류율 사용 > 경년변화를 고려한 열관류율사용 (감소율)	경년변화를 고려한 열관류율사용 > 현재 기준 열관류율 사용 (증가율)
Type A	23%	38%
Type B	15%	30%
Type C	11%	22%

(다) SB-PRO 시작품 개발 지원

- SB-PRO, SB-DET, iBEST-Home 등 각 시작품들의 실무 활용도를 제고하기 위해 각 시작품들을 분리하여 개발함에 따라 본 연구에서는 SB-PRO 시작품 구현에 필요한 에너지 부분 입력화면의 사용자화면(UI)을 구성하고 이를 제안함.

(2) 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발

(가) 공동주택의 확률기반 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발

① 공동주택 간이 에너지소비량 평가기술 시작품(iBEST-Home) 개발

- 본 연구는 공동주택의 전과정 지속가능성 평가를 지원하기 위해 건축사업 초기단계에서 **공동주택의 에너지소비량을 간단하게 예측할 수 있는 웹 기반 에너지소비량 평가 기술 시작품(iBEST-Home)을 개발함.**
- 특히, 본 iBEST-Home의 개발과정에서 사용자의 편의성을 고려하여 기존 에너지시물레이션 툴의 전문적인 입력 변수를 최소화하기 위해 다중회기분석 기법과 경년변화를 고려한 열관류율 자동계산 모듈을 도입하여, 다양한 설계안에 대한 용이한 대안평가가 가능하도록 구성함.

■ 프로그램 특징

- 비전문가의 편의성을 고려하여 기존 에너지시물레이션 툴의 전문적인 입력 변수 최소화함.
- 다중회기분석 기반 에너지 시물레이션 모듈을 탑재함.
- 경년변화를 고려한 열관류율 데이터 자동 계산 기능을 부여함.
- 에너지효율등급인증제도 운영규정에 따른 국내 지역별 기상데이터를 적용함.
- 에너지 요구량 및 소요량을 난방에너지, 급탕에너지, 조명에너지로 나누어 산출되도록 구성함.

■ 프로그램 주요기능

- 주거건축물에 대한 월별 난방에너지 요구량, 1차에너지 소요량, 2차에너지 소요량 산출.

■ 프로그램 사용방법

- 컴퓨터의 키보드와 마우스를 이용한 기본정보 입력 및 클릭을 통한 지역/난방·급탕열원/조명종류 선택으로 웹상 프로그램의 모든 기능을 작동·제어.

■ 프로그램 UI

- 메인화면

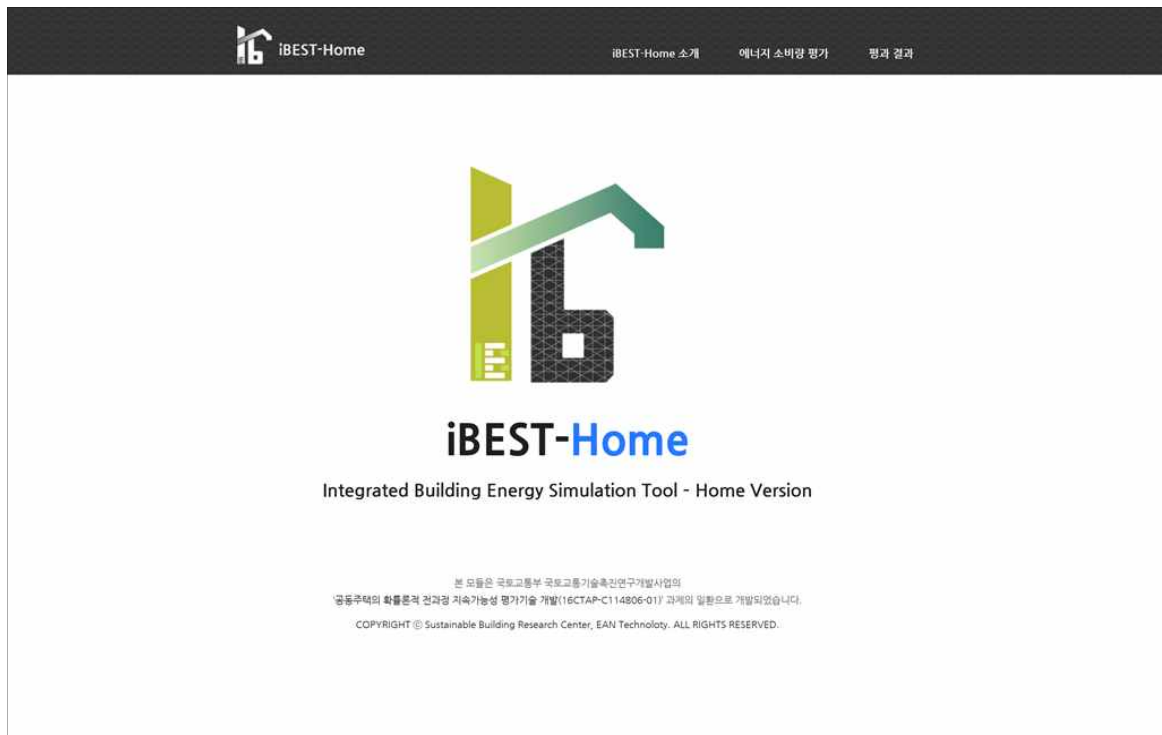


그림 3.44 iBEST-Home 메인 화면

- 소개화면

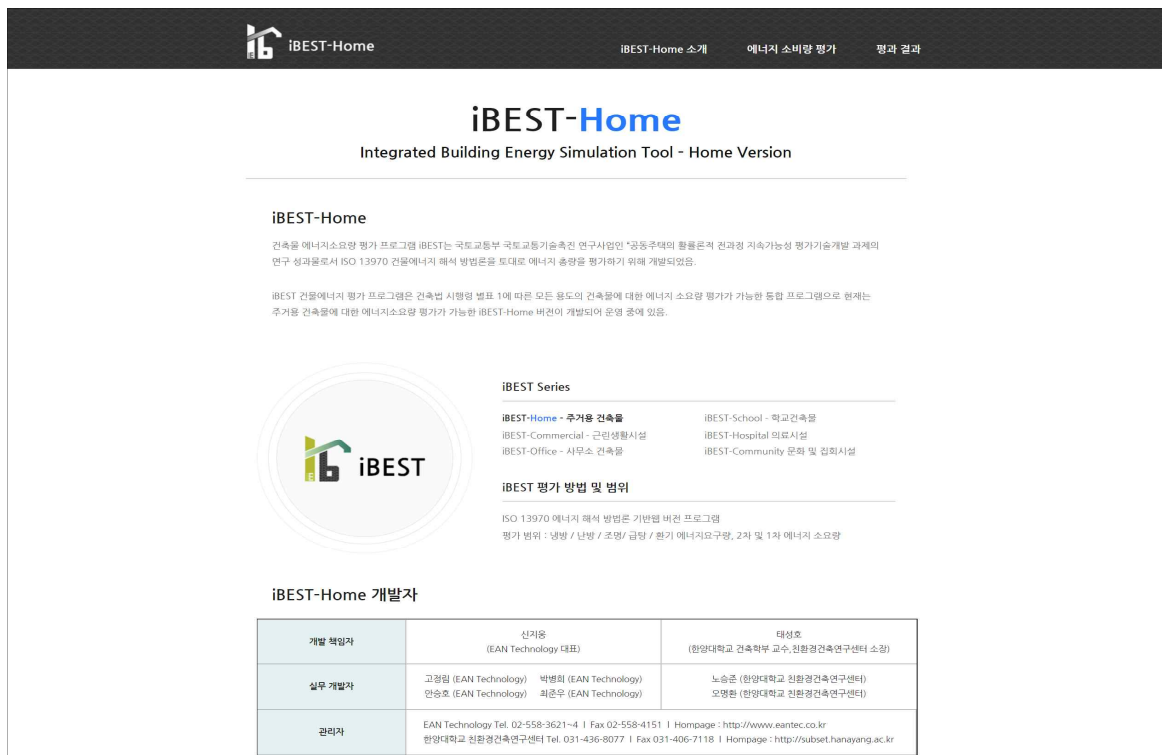


그림 3.45 iBEST-Home 소개 화면

- 데이터 입력화면

- (1) 기본정보: 프로젝트의 사업명, 지역정보, 구조, 규모, 면적정보 등을 입력함.
- (2) 평가자 정보: 평가자의 성명, 소속, 직책 및 연락처 등을 입력함.
- (3) 건물외피 정보: 공동주택의 방위별로 외피면적과 창호면적을 입력하고, 외벽과 창호의 열관류율을 입력함.
- (4) 설비 정보: 프로젝트의 난방열원, 급탕열원, 조명 종류를 선택하고, 난방시스템 및 급탕시스템의 효율을 입력함.

iBEST-Home

iBEST-Home 소개
에너지 소비량 평가
평가 결과

기본 정보

· 사업명

· 기상정보 서울 ▼ · 대기위치

· 지역지구

· 건축종도 공동주택 ▼ · 구조 철근콘크리트구조 ▼

· 건축규모

지상	0 층	· 건물용	0.00 %
지하	0 층	· 용적률	0.00 %
· 연면적		· 건축면적	0.00 m ²
지상	0.00 m ²	· 대지면적	0.00 m ²
지하	0.00 m ²	· 전용면적	0.00 m ²
합계	0.00 m ²		

· 세대수 0 세대

파일선택 업로드

평가자 정보

· 평가자

· 소속 · 직책

· 연락처 · E-MAIL

건물외피 정보

1. 건물외피 면적 정보

	남	남동	남서	동	서	북동	북서	북
· 외피면적(m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
· 창호면적(m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2. 건물외피 성능 정보

· 외벽 성능 정보	1층바닥 열관류율	0.00 W/m ² K	· 창호 성능 정보	열관류율	0.00 W/m ² K
	외벽 열관류율	0.00 W/m ² K		SHGC	0.00
	지붕 열관류율	0.00 W/m ² K			

설비 정보

· 난방열원 연료(가스, 석유) ▼ · 난방시스템 효율 0.00 %

· 급탕열원 연료(가스, 석유) ▼ · 급탕시스템 효율 0.00 %

· 조명종류 LED ▼

계산수행

그림 3.46 iBEST-Home 데이터입력 화면

- 111 -



그림 3.47 iBEST-Home 평가결과

② 공동주택의 확률기반 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발

○ 건축물의 지속가능성 평가를 위해 비전문가를 위한 사용자 의사결정 매뉴얼을 개발함.

■ 의사결정 매뉴얼

건축물의 방위 판단	창면적비 계산																								
◎ 주요평가방법 건축물의 주입면과 팔 방위를 비교하여 건축물의 향을 결정한다. 1. 평가방법 - 건축물 주입면의 각도와 팔 방위(동(E), 서(W), 남(S), 남동(SE), 남서(SW), 북(N), 북동(NE), 북서(NW))를 비교하여 가까운 방위로 건축물의 향을 결정한다. ※ 건물주입면 : 주요실이 인접해 있는 입면 중 면적이 가장 큰 입면 ※ 주요실 : 업무시간 동안 상주인원이 가장 많은 실 - 건축물의 주입면이 다른 건물물로 인해 가려져 있을 경우, 대로변에 인접한 입면을 주입면으로 대치한다. - 건축물 주입면과 팔 방위표와의 관계는 다음 그림과 같다. - 건축물 주입면이 팔 방위 중 두 방위 사이에 한 가운데 위치해 향을 판단하지 못하는 경우, 시계방향의 방위를 우선하여 결정한다. ■ : 주요실 — : 정면	◎ 주요평가방법 입면도를 통해 건축물의 창면적비를 계산한다. 1. 평가방법 • 창면적비 = (창호 및 문의 면적 / 외벽면적) X 100 - 외벽면적은 창호 및 문을 포함하는 벽체면적을 의미하며, 지붕과 바닥면적을 제외한다. - 창호 및 문의 면적은 프레임을 포함한다. 2. 평가예시 - 도면을 통해 창면적비 계산 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">북측 (정면도)</th> <th colspan="2">서측 (우측면도)</th> </tr> <tr> <th>입면적(m²)</th> <th>창호 및 문 면적(m²)</th> <th>입면적(m²)</th> <th>창호 및 문 면적(m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>221</td> <td>76</td> <td>321</td> <td>89</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">남측 (배면도)</th> <th colspan="2">동측 (좌측면도)</th> </tr> <tr> <th>입면적(m²)</th> <th>창호 및 문 면적(m²)</th> <th>입면적(m²)</th> <th>창호 및 문 면적(m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>221</td> <td>38</td> <td>338</td> <td>60</td> </tr> </tbody> </table>	북측 (정면도)		서측 (우측면도)		입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)	입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)	221	76	321	89	남측 (배면도)		동측 (좌측면도)		입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)	입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)	221	38	338	60
북측 (정면도)		서측 (우측면도)																							
입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)	입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)																						
221	76	321	89																						
남측 (배면도)		동측 (좌측면도)																							
입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)	입면적(m ²)	창호 및 문 면적(m ²)																						
221	38	338	60																						

그림 3.51 의사결정 매뉴얼

창호종류 확인-1

◎ 주요평가방법

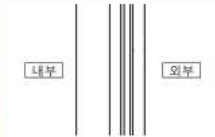
창호의 종류를 확인하고 열관류율표와 비교한다.

1. 평가방법1

- 유리장수판단: 평가방법2의 유리재원 및 단면형태 확인을 통해 유리의 장수 판단

2. 평가방법2

- 창호의 속성을 확인하여 열관류율 판단
- 창호에서 확인해야 하는 속성: 유리 장수, 로이 여부, 중공층 두께, 프레임 재질
 - 유리 장수: 라이터 불꽃의 간상개수를 확인하거나 도면을 통해 확인

라이터 불꽃의 간상개수 확인	도면의 단면상세도를 통해 판단	유리의 재원을 통해 확인
		
라이터를 유리에 가까이 비춰 보았을 때 보이는 불꽃의 개수를 2로 나눈 것이 창문을 구성하는 유리의 장수이다.	복층유리: 유리 2장	창호에 기재되어 있는 KS L 2003은 복층유리 관련 인증이다.

※ A종 U1: 단일복층유리(중공층 6mm)
 ※ A종 U2: 단일복층유리(중공층 12mm)
 ※ B종 U3-1: 로이 단일복층유리(중공층 6mm 이중 제각)
 ※ B종 U3-2: 로이 단일복층유리(중공층 12mm 이중 제각)
 ※ C종 E-4, E-5: 태양열차폐복층유리

단면 형태에 따른 유리 장수 (통상적으로 유리 1장의 두께는 5mm로 가정)

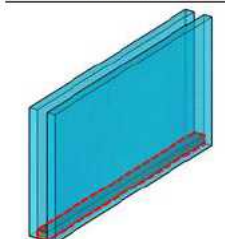
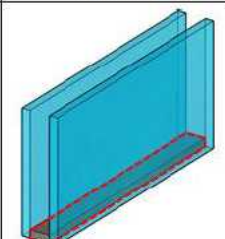
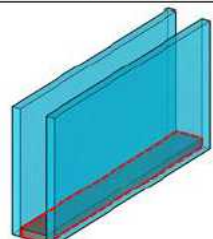
1장	2장	3장	4장
			

창호종류 확인-2

- 로이 유리 여부: 라이터의 불꽃의 색을 확인하거나 유리의 재원을 통해 확인

라이터 불꽃색을 통해 확인	유리의 재원을 통해 확인
	
라이터를 유리에 가까이 비춰 보았을 때 보이는 불꽃의 색이 하나가 다른 경우, 해당 유리면에 로이코팅이 되었음을 확인 할 수 있다.	창호에 기재되어 있는 KS 로고가 B종 혹은 U3-1, U3-2 이면 로이 유리이다.

- 중공층 두께: 간봉의 크기로 확인

6mm 간봉	12mm 간봉	16mm 간봉
		

- 프레임 재질: 육안으로 확인

금속 (알루미늄)	목재	플라스틱(PVC)
		

※ 금속의 경우 창호 단면을 확인해 열교차단재 프레임 삼인 유무를 확인해야 하나, 이는 외관상으로 확인이 어려움으로 창호 프레임에 적혀있는 제조사의 홈페이지 및 견화를 통한 확인이 필요하다.

그림 3.51 의사결정 메뉴얼 (계속)

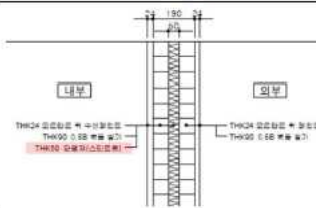
벽체 단열성능 확인-1

◎ 주요평가방법

벽체 단열재의 두께 혹은 노후화를 고려한 열관류율로 확인한다.

1. 평가방법1: 벽체 단열재의 두께로 판단

- 육안 및 단면상세도를 통해 판단

육안을 통해 판단	단면상세도를 통해 판단
	
파손 및 노출 부위를 통해 단열재의 두께 측정	단면상세도의 단열재 두께 확인

- 단열재의 종류에 따른 육안특징

비드법 1종 단열재	비드법 2종 단열재	압출법 보온판
		
경질우레탄폼 보온재	미네랄울	그라스울, 암면
		

벽체 단열성능 확인-2

2. 평가방법2: 노후화에 따른 손실률을 고려한 열관류율(W/m²K) 계산

- 열관류율 산정법 1: 준공연도에 따른 지역별 외벽 열관류율 기준 확인

개정년도 (준공연도)	1979	1980	1984	1987	1992	2001	2008	2010	2013
범적기준	건축법시행규칙				건축물의 설비 기준 등에 관한 규칙				에너지절약 설계기준
중부지역	2.09	0.58	0.58	0.58	0.58	0.47	0.47	0.36	0.27
남부지역	2.09	0.58	0.58	0.76	0.76	0.58	0.58	0.45	0.34
제주지역	2.09	0.58	1.16	1.16	1.16	0.76	0.76	0.58	0.44

- 열관류율 산정법 2: 열관류율 직접 계산

- 외벽 열관류율 = 1/(외벽 실외표면 열전달저항(외기직접) + 외벽을 구성하는 재료들의 열관류저항의 합 + 외벽 실내표면 열전달저항)

- 실외표면 열전달저항 및 실내표면 열전달저항은 다음과 같다.4)

건물 부위	열전달저항 실내표면열전달저항Ri [단위: m²·K/W] (괄호 안은 m²·h·°C/kcal)	실외표면열전달저항Ro [단위: m²·K/W] (괄호 안은 m²·h·°C/kcal)	
		외기에 간접 면하는 경우	외기에 직접 면하는 경우
거실의 외벽 (측벽 및 창, 문 포함)	0.11(0.13)	0.11 (0.13)	0.043 (0.050)
최하층에 있는 거실 바닥	0.086(0.10)	0.15 (0.17)	0.043 (0.050)
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	0.086(0.10)	0.086 (0.10)	0.043 (0.050)
공동주택의 층간 바닥	0.086(0.10)	-	-

- 벽체를 구성하는 재료의 열전도율에 대해서는 [4장 벽체를 구성하는 재료의 열전도율]을 참조한다.

- 한국 패시브 협회에서 제공하는 열관류율 계산 사이트 이용

- http://www.phiko.kr/u_calc/phiko_u_calc.php

열관류율 계산 출력여지표

주 소 재: 중간 부재:

단위: 단위: 단위:

번호 소재 이름 열전도율 (W/mk) 두께 (mm) 열관 부재 열전도율 (W/mk) 비율 열저항 (m²·K/W)

1	실외표면 열전달저항					
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
	실내표면 열전달저항					

그림 3.51 의사결정 메뉴얼 (계속)

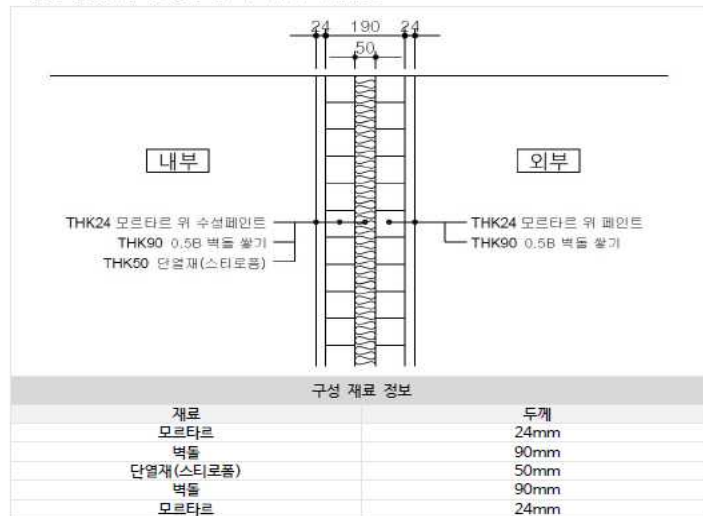
벽체 단열성능 확인-3

- 경년변화에 따른 열관류율 변화
 - 경년변화에 따른 열관류율 = 준공당시 열관류율 X 단열재 종류와 경년변화에 따른 상수
 - 단열재 종류와 경년변화에 따른 상수: 최현중 외 4명(2003)의 경년변화에 따른 단열재 열전도율 값을 참조하여, 경과년수에 따라 증가하는 벽체 열관류율의 변화율을 기준으로 작성
 - 단열재의 종류에 따른 상수는 다음과 같다.

단열재 종류	단열재 경과년수							
	5년	10년	15년	20년	25년	30년	35년	40년
비드법	1.03	1.05	1.06	1.08	1.10	1.11	1.13	1.14
유리면	1.02	1.05	1.07	1.09	1.12	1.14	1.16	1.19
암면	1.03	1.05	1.06	1.08	1.09	1.11	1.13	1.14
경질우레탄폼	1.20	1.68	1.98	2.12	2.19	2.21	2.22	2.23
압출법보온판	1.56	2.01	2.17	2.21	2.22	2.23	2.23	2.23

3. 평가예시

- 1단계: 단면상세도를 통해 재료의 종류와 두께 판단



벽체 단열성능 확인-4

- 2단계: [4장 벽체를 구성하는 재료의 열전도율]을 참조하여 재료별 열관류율 저항 확인

분류	Materials 별 열전도율표	
	재료명	열전도율
단열재	비드법보온판 1종 1호	0.036
건축자재	시멘트 모르타르 (1:3)	1.4
	시멘트 벽돌	0.6

- 3단계: 열관류저항 계산

No	재료명칭	두께 (mm)	열전도율 (W/mK)	열관류저항 (m²K/W)
1	시멘트모르타르	24	1.4	0.017
2	벽돌쌓기	90	0.6	0.150
3	비드법보온판 1종 1호	50	0.036	1.389
4	벽돌쌓기	90	0.6	0.150
5	시멘트모르타르	24	1.4	0.017

- ① 열관류저항 (m²K/W) = 두께(m) / 열전도율(W/mK)
- ※ 비드법 보온판 1종 1호 열관류저항: 0.05 / 0.036 = 1.389(m²K/W)
 - ※ 시멘트모르타르 열관류저항: 0.024 / 1.4 = 0.017(m²K/W)
 - ※ 벽돌쌓기 열관류저항: 0.090 / 0.6 = 0.150(m²K/W)

- 4단계: 실외표면 열전달저항 및 실내표면 열전달저항 확인 및 열관류저항과 합산

건물 부위	실내표면열전달저항 Ri (단위: m²·K/W) (괄호 안은 m²·h·°C/kcal)	실외표면열전달저항 Ro (단위: m²·K/W) (괄호 안은 m²·h·°C/kcal)	
		외기에 간접 면하는 경우	외기에 직접 면하는 경우
거실의 외벽 (측벽 및 창, 문 포함)	0.11(0.13)	0.11 (0.13)	0.043 (0.050)
최하층에 있는 거실 바닥	0.086(0.10)	0.15 (0.17)	0.043 (0.050)
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	0.086(0.10)	0.086 (0.10)	0.043 (0.050)
공동주택의 층간 바닥	0.086(0.10)	-	-

- ① 열관류저항 합계 (m²K/W) = 외벽 실외표면 열전달저항(외기직접) + 외벽을 구성하는 재료들의 열관류저항의 합 + 외벽 실내표면 열전달저항
- ※ 외벽 실외표면 열전달저항(외기직접) : 0.043
 - ※ 외벽을 구성하는 재료들의 열관류저항의 합 : 0.017+0.150+1.389+0.150+0.017 = 1.723
 - ※ 외벽 실내표면 열전달저항 : 0.110
 - ※ 열관류저항의 합계: 0.043+1.723+0.110 = 1.876

그림 3.51 의사결정 메뉴얼 (계속)

설비성능 확인

◎ 주요평가방법

내구연한 경과년수를 확인하거나 보일러 효율 감소율을 계산한다.

1. 평가방법1: 내구연한 경과년수 계산

- 보일러 경과년수 = 현재년도 - 난방설비 제조년도
- 보일러 명판을 통해 종류 및 제조년도 확인



① 보일러 종류
연관식 보일러
② 보일러 제조년도
1992년
③ 최대연속증발량(정격증발량)
2500kg/hr
④ 연료 소비량
180Nm³/hr

- 난방설비 내구연한은 법정 내구연한(일본) 및 병원설비 협회(일본)을 기준으로 한다.

단위: 년

구분	법정 내구연한 (일본)	병원설비 협회 (일본)	건설협회 (예방 사후보전) (일본)	ASHRAE Handbook 1980 (Median)	ASHRAE Journal 1978	VDI 2067
보일러	수관식	15	15	18.9(6.2)	24(30) 26(중기) 23(중수)	20
	연관식	15	15	21.1(5.6)	25(25) 25(중기) 24(중수)	20
	주철제		10		35(30)	30
	전기		15			15

2. 평가방법2: 보일러 효율 감소율(%) 계산

- 보일러 효율 감소율 = 1 - (현재 보일러 효율 / 초기 보일러 효율)

- 현재 보일러 효율 = (-0.0175 x 보일러 경과년수) + 초기 보일러 효율⁸⁾
- 초기 보일러 효율 = 보일러용량 / (연료소비량 x 고위발열량)⁹⁾
- 보일러 용량(kcal/hr) = 정격증발량(kg/hr) x 539(kcal/kg)
- LNG 고위발열량 = 10,550(kcal/Nm³)

신재생 에너지설비 확인

◎ 주요평가방법

건축물에 설치된 신·재생 에너지설비 적용 종류 개수를 확인

1. 평가방법

- 신·재생 에너지설비 적용 종류 개수 파악
- 주요한 신재생 에너지설비는 크게 태양광시스템, 태양열시스템, 지열시스템으로 나뉜다.
- 대상 건축물에 적용된 시스템의 개수를 파악한다.

- 태양광시스템 종류

옥상 (지붕)	단순거치형		
	부착형		
	일체형 (BIPV)		
입면	부착형		
	일체형 (BIPV)		
기타	부착형		
	차양		

그림 3.51 의사결정 매뉴얼 (계속)

(나) 공동주택의 확률론적 전과정 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 시범적용

- 본 연구는 앞서 개발된 **확률론적 전과정 지속가능성 평가기술과 실무 매뉴얼의 적용 가능성 검토**를 목적으로 동일한 평가 대상을 토대로 각 모델로부터 산출된 전과정 지속가능성 평가결과를 서로 비교하였음. 또한, 이를 통해 확률론적 방식의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술이 건축사업 초기단계에서 건축물의 전과정 지속가능성을 평가하는 **모델로서의 타당성과 적합성을 분석**하였음.

■ 평가 대상

- 평가대상 건축물은 서울에 건설된 철근콘크리트 라멘구조의 공동주택 단지임. 이는 총 13개의 주거동으로 구성되며, 판상형, 탑상형, 복합형의 모든 평면 형태를 포함함. 표 3.40과 표 3.41은 각각 평가대상 건축물의 개요와 구성을 나타냄.

표 3.40. 평가대상 개요

	사업명	서울 M지구 7단지
	용도	공동주택
	구조	철근콘크리트구조
	바닥면적	208,393 m ²
	대지면적	51,184 m ²
	전용면적	95,002 m ²
	수명	40 년

표 3.41 평가대상 구성

구분	지상 층수(층)	평면형태	바닥면적(m ²)	전용면적(m ²)	세대수(세대)
701동	15	탑상형	7,462	5,693	78
702동	15	탑상형	7,452	5,679	78
703동	16	판상형	6,444	5,000	58
704동	15	판상형	8,781	6,813	75
705동	15	복합형	17,055	13,298	130
706동	16	복합형	17,722	13,751	129
707동	16	탑상형	5,971	4,633	43
708동	15	판상형	4,163	3,230	29
709동	16	복합형	9,940	7,576	78
710동	16	복합형	9,940	7,576	78
711동	16	복합형	10,868	8,283	78
712동	15	복합형	8,027	6,118	56
714동	15	탑상형	8,811	6,837	94

■ 평가 방법

- 본 연구는 건축사업 초기단계에서 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법의 적용에 대한 타당성과 적합성을 확인하고자 표 3.42와 같이 **물량산출내역을 이용한 결정론적 평가, 공동주택 전체 표본의 평균물량을 이용한 종래의 결정론적 평가, 본 연구에서 개발된 주요 건축자재의 확률분포를 이용한 확률론적 평가**로 구분하여 건축물의 전과정 지속가능성 평가를 진행하였음.

표 3.42 평가 방법

구분	결정론적(실제) 평가	결정론적(종래) 평가	확률론적 평가
결정론적(실제) 평가	실제 물량산출서 이용	평균 물량 이용	확률분포

■ 평가 결과

- 표 3.43과 그림 3.52에 평가결과를 나타내었음. 표 3.43에 의하면, 물량산출내역을 기준으로 한 결정론적 방식의 전과정 지속가능성 평가결과, 전과정 환경영향, 전과정 비용, 전과정 사회영향은 각각 146,000원/m², 802,000원/m², 73점/m²인 것으로 도출되었고, 기준 건축물과의 상대효율성을 나타낸 전과정 환경영향 지수, 전과정 비용 지수, 전과정 사회영향 지수, 전과정 지속가능성 지수는 각각 1.013, 1.056, 1.026, 1.045인 것으로 분석되어 지속가능성의 정량적 평가가 가능하였음.
- 다만, 동 평가대상의 투입되는 주요 건축자재의 물량을 기존 사례에서 취합한 평균물량을 투입하여 평가하였을 때, 환경영향, 비용, 사회영향, 지속가능성에 대한 오차는 각각 6.1%, 8.9%, 4.9%, 6.3%로 도출되었으며, 기준 건축물과 비교하여 그 수준이 변화함을 나타내었음.
- 반면, 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법을 이용한 평가결과에서는 그 최빈값을 기준으로 0.6%, 2.5%, 1.6%, 0.9%의 오차가 발생하였고, 상기 결정론적 방식의 평가결과와 비교하여 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있었음.
- 또한, 기준건축물과의 수준에 대한 평가결과도 물량산출서와 동일하게 1을 상회하는 것으로 확인하였음.

표 3.43 평가 결과

구분	환경영향	비용	사회영향	EI	CI	SI	SBI
결정론적 평가 (물량산출서 기준)	146,000원	802,000원	0.61점	1.013	1.056	1.017	1.03
결정론적 평가 (평균 물량 이용)	157,000원	873,000원	0.58점	0.955	0.970	0.967	0.96
확률론적 평가 (최빈값 기준)	143,000원	821,000원	0.64점	1.020	1.030	1.020	1.05

- 한편, 본 연구에서 개발된 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법은 그림 3.52와 같이 건축물의 특성을 반영하여 확률론적인 관점에서 빈도수가 가장 높은 최빈값의 적용으로 인해 건축사업 초기단계에서 보다 유용한 전과정 지속가능성 평가가 가능함.
- 특히, 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법은 기존 결정론적 방식의 평가모델에서 산출되지 않았던 기댓값과 확률론적으로 보정된 평균값, 최소값과 최대값을 동시에 제공함에 따라 의사결정자로 하여금 보다 유용한 정보를 제공하고 의사결정을 효과적으로 지원할 수 있음.
- 이 중 기댓값은 평가 초기 설정한 기준 건축물의 값에 대한 목표 달성 가능성을 확률로서 파악 가능하며, 평가결과의 범위와 구간별 그 기댓값을 파악할 수 있어 의사결정 지원에 효과적인 정보를 제공함.
- 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법은 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 반복 시행된 평가결과를 바탕으로 한 확률론적으로 보정된 평균값을 제공하여 기존 결정론적 방식의 평가모델에서 주로 적용되었던 평균값 관점의 평가결과 보다 유의미한 평가결과를 제공할 수 있음.
- 또한, 최소값과 최대값을 제공하며, 건축사업 초기단계에서 본 평가 건축물의 건설을 통해 전과정 지속가능성 관점에서 발생될 수 있는 최대의 리스크와 최대 기대치에 대한 정보도 제공 가능함. 이를 통해 본 연구에서 개발된 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법에 대한 유효성과 실용성을 확인하였고 건축사업 초기단계에서 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가방법의 적용에 대한 타당성과 적합성을 확인하였음.

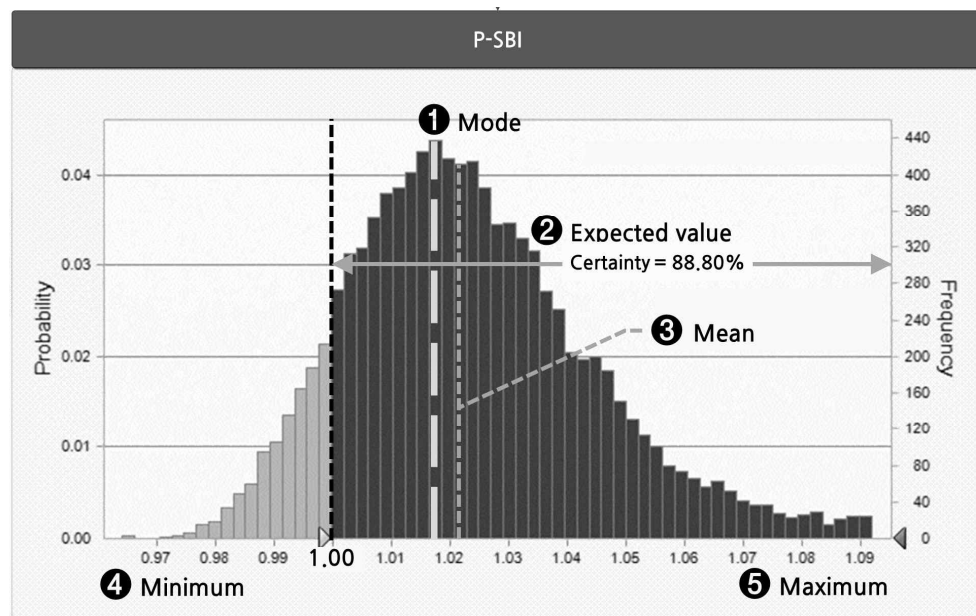


그림 3.52. 확률론적 평가결과

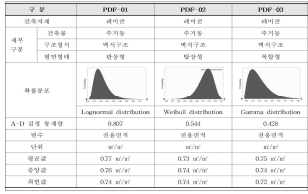
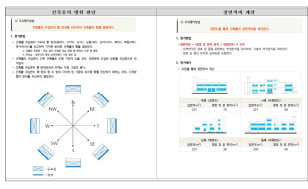
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구개발 성과

■ 본 연구는 당초 핵심 연구목표로 계획된 “확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리”, “확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품”, “확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼” 등의 연구개발 성과를 모두 달성함.

표 4.1 연구개발 성과 및 목표 달성도

핵심 연구목표	연구개발 주요 성과	달성도(%)
확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리 구축	■ 주요 건축자재 10종에 대한 30가지의 확률론적 매개변수 라이브러리 구축 ■ 공동주택의 에너지사용량 데이터 수집 및 기술통계분석을 통한 공동주택 설계요소별 에너지소비량 예측방법 구축  [매개변수 라이브러리]	100
확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 개발	■ 확률기반 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 개발 ■ 확률기반 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술 성능평가 수행 ■ 결정론적 분석방법을 이용한 공동주택 지속가능성 평가 시스템 시작품 (SB-DET) 개발 ■ 확률론적 분석방법을 이용한 공동주택 지속가능성 평가 시스템 시작품 (SB-PRO) 개발  [SB-DET]  [SB-PRO]	100
확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발	■ 공동주택 간이 에너지소비량 평가기술 시작품(iBEST-Home) 개발 ■ 확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발 ■ 의사결정 매뉴얼 시범적용  [iBEST-Home]  [실무 매뉴얼]	100

나. 정량적 성과

- 본 연구는 **당초 계획된 연구성과 보다 우수한 연구개발성과** (SCI 논문 8편, 비SCI 논문 3편, 특허등록 2건, 특허출원 2건, SW 등록 3건, 학술발표 3건, 인력양성 6명)를 달성함.
- 특히, SCI 논문은 당초 계획을 모두 만족하였고, 비SCI 논문 1편을 **SCI 논문 1편으로 상향 달성하여 연구개발성과의 질적 수준을 제고**함.
- 또한, 당초에 계획되지 않은 **특허등록 1건, 학술발표 3건, 인력양성 6명을 추가적으로 달성**하여 연구개발성과의 **양적 수준도 향상하여 달성**함.

(1) 정량적 성과 총괄표

표 4.2 정량적 성과 총괄표

구분	성 과 지 표	목표건수	달성건수	비 고
확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리 구축	SCI 논문	3	3	목표달성
	비SCI 논문	1	1	목표달성
	SW등록	2	1	당초 DB 구축으로 계획된 연구내용을 발전시켜 시작품 개발까지 연구를 수행함에 따라 당초 계획된 SW등록 2건 중 1건을 매뉴얼 개발 연구부분에서 달성함.
확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 개발	특허출원	1	1	목표달성
	특허등록	1	1	목표달성
	SCI 논문	3	4	정량적 성과의 질적 수준 제고를 위해 일반 학술지 논문 1편을 SCI(E)급 논문으로 대체하여 달성함.
	비SCI 논문	1	0	
	SW등록	1	1	목표달성
확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발	특허출원	1	1	목표달성
	특허등록	0	1	초과달성
	SCI 논문	1	1	목표달성
	비SCI 논문	2	2	목표달성
	SW등록	0	1	당초 라이브러리 연구부분에서 계획된 SW등록건
총괄	SCI 논문	7	8	성과의 질적 수준 제고를 위해 일반 학술지 논문 1편을 SCI(E)급 논문으로 대체하여 달성함.
	비SCI 논문	4	3	
	특허출원	2	2	목표달성
	특허등록	1	2	초과달성
	SW등록	3	3	목표달성
	인력양성	0	6	당초 계획되지 않은 추가성과
	학술발표	0	3	당초 계획되지 않은 추가성과

(2) 정량적 성과 달성목록

성과명	목표	달성	번호	제목	게재·등록정보	비고
논문	SCI	7	8	1 Evaluating the embodied environmental impacts of major building tasks and materials of apartment buildings in Korea	RSER	단독사사
				2 An integrated assessment system for managing life cycle CO ₂ emissions of a building	RSER	단독사사
				3 Integrated building life-cycle assessment model to support South Korea's green building certification system (G-SEED)	RSER	단독사사
				4 Development of low carbon durability design for green apartment buildings in South Korea	RSER	단독사사
				5 Analysis of Heating and Cooling Loads of Electrochromic Glazing in High-Rise Residential Buildings in South Korea	SUST	단독사사
				6 Analysis of Embodied Environmental Impacts of Korean Apartment Buildings Considering Major Building Materials	SUST	단독사사
				7 Development of a Streamlined Environmental Life Cycle Costing Model for Buildings in South Korea	SUST	단독사사
				8 Developing a Green Building Index (GBI) Certification System to Effectively Reduce Carbon Emissions in South Korea's Building Industry	SUST	단독사사
	비SCI	4	3	1 공동주택에 적용 가능한 친환경 건축기술의 경제효율성 지표 제안	AIK	단독사사
				2 주거용 건물의 에너지 실사용량의 불확실성을 내포한 설명변수 인자에 대한 빅데이터 분석 기반의 정량화 방법	KIEAE	단독사사
				3 외벽의 단열성능 저하를 고려한 냉난방부하 간이 분석방법론 개발	KIEAE	단독사사
특허	출원	2	2	1 확률론적 분석 방법을 이용한 건축물 전과정 지속가능성 평가 장치, 방법 및 그 방법을 기록한 기록매체	KIPO	-
				2 지수를 이용한 건축물 전과정 지속가능성 평가 장치, 방법 및 그 방법을 기록한 기록매체	KIPO	-
	등록	1	2	1 확률론적 분석 방법을 이용한 건축물 전과정 지속가능성 평가 장치, 방법 및 그 방법을 기록한 기록매체	KIPO	-
				2 지수를 이용한 건축물 전과정 지속가능성 평가 장치, 방법 및 그 방법을 기록한 기록매체	KIPO	-
S/W	등록	3	3	1 공동주택의 물리환경적 특성 DB와 에너지사용량과의 상관성 분석 가치화 모듈	KCC	단독사사
				2 공동주택의 전과정 지속가능성 평가 시스템	KCC	단독사사
				3 공동주택의 지속가능성 평가를 위한 건축물 에너지소요량 간이평가 프로그램	KCC	단독사사
기타	인력 양성	0	6	- 박미연 / 이종건 / 최원영 / 김지훈 / 이나운 / 임효진	-	-
	학술 발표	0	3	1 건축물의 지속가능성 평가를 위한 전과정 관점의 사회성 평가범주 도출에 관한 연구	AIKc	단독사사
				2 학교건축물의 전과정 평가를 위한 주요 건축자재 분석에 관한 연구	KIEAEc	단독사사
				3 주거용 건물의 에너지 실사용량의 불확실성을 내포한 설명변수 인자에 대한 빅데이터 분석 기반의 정량화 방법에 관한 연구	KIEAEc	단독사사

RSER: Renewable & Sustainable Energy Reviews; SUST: Sustainability; AIK: 대한건축학회; KIEAE: 한국생태환경건축학회; KIPO: 한국특허청; KCC: 한국저작권위원회

2. 관련 분야 기여도

■ 본 연구개발 성과는 정부의 **녹색건축물 기본계획 목표 실현**과 **국제적 수준의 건축물 지속가능성 평가기술 확보**, **경제적·합리적인 공동 주택 계획/설계 유도**와 함께 공동주택의 **지속가능성 관련 정책 개발 및 운영의 기초자료**로서 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

가. 기술적 측면

지속가능성 평가에 대한 국제적 수준 이상의 기술력 확보에 기여	
국가적 원천기술 및 기초과학기술 확보	국제적 지속가능 건축시장의 성장과 정책의 변화에 대응할 수 있는 공동주택 지속가능성 평가기술에 대한 국가적 원천기술 및 기초 과학기술 확보에 기여
선진국 수준의 지속가능성 평가기술	현재 선진국 대비 상대적으로 저조한 국내 건축물 지속가능성 평가기술력을 선진국 보유기술력 이상의 수준으로 발전에 기여
국내 건축설계 사무소 기술 경쟁력 강화	건축물 설계초기단계에서의 지속가능성 평가에 대한 국제적인 수준 이상의 기술력 확보로 인한 국내 건축설계 사무소의 기술경쟁력 강화에 이바지

나. 경제·산업적 측면

지속가능성 목표수립과 지원을 통한 다양한 산업의 경제적 파급효과 견인에 이바지	
경제적·합리적인 공동주택 계획/설계 유도	공동주택 설계초기단계에서 이해관계자간의 지속가능성 목표 수립과 의사결정 지원을 통해 경제적으로 합리적인 공동주택의 계획과 설계 유도 가능
평가기술의 해외진출 및 수출 증가	국내 공동주택 지속가능성 평가기술에 대한 개발도상국들의 관심 증대로 인한 국내 건설기업의 해외진출 및 수출의 증가에 기여
기술자립/이전 저변 확대 및 관련 산업육성	국내 공동주택 지속가능성 평가기술의 원천기술 확보를 통한 기술자립과 기술이전 저변확대 및 관련 산업 육성 추진에 기여

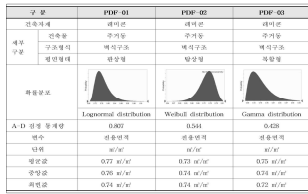
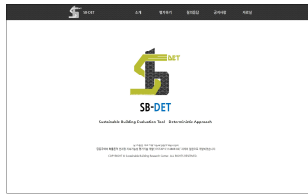
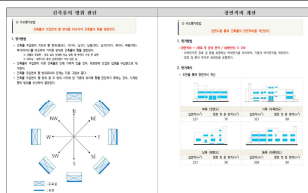
다. 사회적 측면

지속가능성 평가기술의 국제 시장 주도에 기여	
지속가능한 국가 이미지 제고	국제적으로 지속가능한 국가 이미지를 제고하기 위한 기술력 바탕으로 대외적 홍보에 기여
관련 정책 개발 및 운영의 기초자료	지속가능한 국가 발전에 필수불가결한 건축물의 지속가능성 평가기술 및 결과를 통해 관련정책 개발과 운영, 심의 등의 기초자료로 활용 가능
기술전문가 양성	공동주택 지속가능성 평가기술 확대에 따른 전문가 양성을 위한 전문자격 운용 프로그램의 개발 가능성이 있음

제5장. 연구개발성과의 활용 계획

- 본 연구에서 개발된 건축물 지속가능성 평가기술은 **공동주택의 초기계획 및 설계 단계에서의 중장기적인 지속가능성을 검토하는 기술로의 활용이 가능**하며, 추후 기술의 심화 연구 및 응용기술 개발을 통해 공동주택 관련 민간기업(건설회사, 설계사무소 등) 및 정부에서 사용 가능한 기술적/제도적 시스템으로 활용 가능할 것으로 사료됨.

표 5.1 연구개발성과 활용 계획

핵심 연구목표	연구개발 주요 성과	활용계획
확률기반의 지속가능성 매개변수 라이브러리 구축	매개변수 라이브러리 	■ 공동주택 주요 건축자재의 물량과 에너지소비량을 예측하기 위한 자료로 활용 ■ 공동주택 주요 건축자재의 물량과 에너지소비량을 절감하기 위한 방안 도출의 기반자료로 활용
확률기반의 지속가능성 평가 원천기술 및 시작품 개발	SB-DET  SB-PRO 	■ 공동주택의 지속가능성을 평가하는 심화 연구 및 응용기술 개발 연구의 기반기술로 활용 ■ 건축사업 초기단계에서 공동주택의 지속가능성을 다각적인 측면에서 검토하고, 이를 제고하기 위한 기술로 활용 ■ 공동주택의 지속가능성을 평가하는 심화 연구 및 응용기술 개발 연구의 기반기술로 활용 ■ 건축사업 초기단계에서 공동주택의 지속가능성을 보다 과학적인 관점에서 평가하고, 이를 제고하기 위한 기술로 활용
확률기반의 지속가능성 의사결정 실무 매뉴얼 개발	iBEST-Home  실무 매뉴얼 	■ SB-PRO, SB-DET과 함께 연계하거나 혹은 개별적으로 공동주택의 에너지소비량을 용이하게 예측하기 위한 기술로 활용 ■ 건축사업 초기단계에서 공동주택의 에너지소비량을 용이하게 예측하고, 이에 기초한 의사결정을 진행하기 위한 실무 기술로 활용 ■ 건축사업 초기단계에서 SB-PRO, iBEST-Home 등을 이용하여 공동주택의 지속가능성을 판단하고, 이에 기초한 의사결정을 진행하기 위한 실무 매뉴얼로 활용

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. TBL 개념의 지속가능성 평가기준

- 존 엘킹턴(John Elkington, 1994)은 TBL(Triple Bottom Line)은 기업의 성과를 경제적, 사회적, 환경적 척도에 의해 평가하고 보고하는 토대라고 정의하고, 넓은 의미에서 **지속가능한 기업 활동에 따른 경제적, 사회적, 환경적 가치를 창출**하기 위해 제기해야 할 가치, 이슈, 과정이라 정의하였음.
- 즉, TBL은 지속가능성을 측정할 수 있는 객관적 지수의 개발. 재무적 지속가능성, 환경적 책임성, 그리고 사회적 책임성을 모두 포괄하여 기업의 지속가능성과를 객관적으로 평가할 수 있는 평가기준으로 활용되고 있음.

가. 환경적 측면

- TBL개념의 기존 녹색성장관련 평가지수체계 중 대표적인 사례로 OECD KEI, GCI, ESI, 기업 지속가능성 지수, 녹색역량지수, 저탄소 녹색성장 종합평가 지수, 개별건물의 지속가능성 지표 등 7가지의 지속가능성 지수를 선택하였고, 탄소배출을 중심으로 환경부하 관련 평가항목들을 수집하였음.
- 수집된 항목들의 검토결과 표 6.1과 같이 온실가스, 에너지, 수자원, 폐기물, 생태계, 대기질, 종 다양성, 토양, 지구환경, 녹화면적의 총 7가지 키워드로 종합하였음.

나. 경제적 측면

- TBL개념의 기존 녹색 경제관련 평가지수체계 중 대표적인 사례로, 기업 지속가능성 지수, 녹색역량지수, 저탄소 녹색성장 종합평가지수, 개별건물의 지속가능성 지표를 선택하여 그 항목들을 분석하였고, 표 6.2와 같이 수익성, 유지관리비용, 투자, 기업 활성화, 탄소배출권 총 5가지 키워드로 종합하였음.

다. 사회적 측면

- TBL개념의 기존 녹색성장관련 평가지수체계 중 대표적인 사례로 GCI, ESI, 기업 지속가능성 지수, 녹색역량지수 등 6가지의 지속가능성 지수를 선택하였고, 사회성을 중심으로 삶의 질 관련 평가항목들을 검토하였음.
- 각 평가항목들의 지표 출현빈도 검토결과 표 6.3과 같이 대외가치, 기능, 환경 거버넌스, 교통, 건강, 안전, 법/제도, 쾌적성의 8가지 키워드로 종합하였음.

표 6.1 TBL 개념의 녹색지수의 환경부하 관련 항목 선정 키워드로 종합

OECD KEI ¹⁾	GCI ²⁾	ESI ³⁾	기업 지속가능성 지수 ⁴⁾	녹색역량 지수 ⁵⁾	저탄소 녹색성장 종합평가 지수 ⁶⁾	개별건물의 지속가능성 지표 ⁷⁾	지표 빈도	선정 키워드
기후변화	온실가스 (CO2)	온실가스 배출		전력당 CO2 배출	온실가스	탄소배출	6/7	온실가스
에너지 자원	에너지			화석에너지 소비	에너지 투입	신재생에너지	5/7	에너지
수질,물 자원	물	수질 오염			수질	수자원	5/7	수자원
폐기물	폐기물	폐기물과 소비		가정폐기물량	폐기물		5/7	폐기물
생태계		생태계 부하			생태계		3/7	생태계
	대기질	대기오염			대기질		3/7	대기질
		종다양성			생물다양성		2/7	종다양성
	토지이용	토양보전					2/7	토 양
			지구 환경보전	유해환경노출 지수			2/7	지구환경
				녹화면적확대		녹화비율	2/7	녹화면적

1) OECD KEI (Key Environmental Indicators) : OECD 환경부, 2011
 2) GCI (Green City Index): EIU (Economist Intelligence Unit)
 3) ESI (Environmental Sustainable Index): 예일대학교, 1999-2005
 4) 기업 지속가능성 지수 : 삼성지구환경연구소, 홍종호, 2005

5) 녹색역량지수: 삼성경제연구소(SERI)
 6) 저탄소 녹색성장 종합평가지수: 과학기술정책연구원 (STEP), 2009
 7) 개별 건물의 지속가능성 지표: 한국 건설기술 연구원, 1999-2000.11

표 6.2 TBL 개념의 녹색지수의 경제성 관련 평가항목 분석

기업 지속가능성 지수 ¹⁾	녹색역량지수 ²⁾	저탄소녹색성장 종합평가지수 ³⁾	개별건물의 지속가능성지표 ⁴⁾	지표 빈도	선정키워드
수익성	에너지효율	국민총생산	장수명구조	4/4	수익성
주식시장		소득분배			
지배구조		환경세제	리모델링고려		
	휘발유 가격		유지관리비용	2/4	유지관리비용
			리모델링고려		
투자		녹색투자		2/4	투자
안정성					
	기업환경 경영능력	녹색기업활성화		2/4	기업활성화
		탄소배출권		1/4	탄소배출권

1) 기업 지속가능성지수: 삼성지구환경연구소, 홍종호, 2005
 2) 녹색역량지수: 삼성경제연구소(SERI)

3) 저탄소 녹색성장 종합평가지수: 과학기술정책연구원 (STEP), 2009
 4) 개별 건물의 지속가능성 지표: 한국 건설기술 연구원 1999-2000.11

표 6.3 TBL개념의 녹색지수 사회성 관련 평가항목 분석

GCI ¹⁾	ESI ²⁾	기업 지속가능성 지수 ³⁾	녹색역량 지수 ⁴⁾	저탄소 녹색성장 종합평가 지수 ⁵⁾	개별건물의 지속가능성 지표 ⁶⁾	지표 빈도	선정키워드
	국제협력참여	대외관계	정부효용성	사회적 투입	지역성 조화	5/6	대외가치
		경영철학	지역의제21	교육수준			
	민간영역대응	직장문화	시민정치유도	녹색시민자각			
	과학기술		과학기술	과학기술산출		3/6	기능
			환경기술혁신	과학기술역량			
				지식집약서비스			
			환경개선지원	지식흐름			
환경거버넌스	환경거버넌스		환경거버넌스			3/6	환경거버넌스
교통			대중교통이용	농업 및 수송		3/6	교통
위생	환경보건수준					2/6	건강
	자연재해취약성				범죄예방	2/6	안전
	타국가오염부담						
			법의지배, 규제의 질	녹색 법/제도		2/6	법/제도
건물	기본생활조건				일조권	3/6	쾌적성
					소음		
	연구부하				공간가변성		

1) GCI (Green City Index): EIU (Economist Intelligence Unit)

2) ESI (Environmental Sustainable Index): 예일대학교, 1999-2005

3) 기업 지속가능성지수: 삼성지구환경연구소, 홍종호, 2005

4) 녹색역량지수: 삼성경제연구소(SERI)

5) 저탄소 녹색성장 종합평가지수: 과학기술정책연구원 (STEP), 2009

6) 개별 건물의 지속가능성 지표: 한국 건설기술 연구원 1999-2000.11

2. 국내외 녹색건축인증제도

■ 본 연구에서 건축물의 지속가능성을 평가하는 다양한 **국내외 녹색건축인증제도의 평가체계와 평가항목을 분석**하여 확률기반의 공동주택 전과정 지속가능성 평가기술에서 고려해야 할 평가항목 정보를 수집함.

가. 평가체계

- 국내외 인증제도는 모두 동일하게 통합지수개념이며, 일본의 CASBEE는 품질과 부하의 점수합계방식인 반면 그 외의 인증기준은 분야별 점수합계방식을 적용하고 있음.
- 모든 국가의 지속가능성 평가등급은 3개~5개로 분류하고 있으며 일본의 CASBEE와 SBTTool을 제외한 인증기준에서는 필수항목을 설정하여 최소점수 이상 획득하게 하거나 점수와 상관없이 충족하도록 하고 있음.
- 평가체계는 크게 2가지의 형태로 나뉘고 있으며, 국내인증기준, LEED, BREEAM, Green Star와 같은 건축물의 용도에 따른 평가체계와 CASBEE, SBTTool과 같이 광범위한 지역에 대한 포괄적 적용을 목적으로 단일평가체계를 구축한 형태로 분류됨.
- 또한 일본의 CASBEE와 호주의 Green Star, 그리고 SBTTool은 인증서에 분야별 점수를 제시하고 있으나 그 외 인증기준에서는 평가등급과 총점만을 제시하고 있어 분야별 성능을 판단하기 어려움이 있음.

나. 평가분야

- 일본의 CASBEE 및 SBTTool을 제외한 국내외 인증기준의 분야별 비중은 에너지, 실내환경, 재료 및 자원 분야로 동일하게 구성되어 있음.

표 6.4 국내외 녹색건축물 인증제도 평가체계 비교

구분	G-SEED	LEED	BREEAM	Green Star	CASBEE	SBTool
평가 체계	통합지수개념 (분야별 점수 합계 방식)	통합지수개념(분 야별 점수 합계 방식)	통합지수개념(분 야별 점수 합계 방식)	통합지수개념(분 야별 점수 합계 방식)	통합지수개념(품 질/부하 점수합계방식)	통합지수개념(분 야별 점수 합계 방식)
	9개 분야별 합계점수에 가중치 적용하여 전체 합계로 지수화	7개 분야별 합계점수에 가중치 적용하여 전체 합계로 지수화	8개 분야별 점수 합계	9개 분야별 분야별 합계점수에 가중치 적용하여 전체 합계로 지수화	6개 분야별 합계점수를 환경품질과 환경부하로 구분, 1:1 비중으로 합산하여 지수화	7개 분야별 분야별 합계점수에 가중치 적용하여 전체 합계로 지수화
평가 점수	100점 만점으로 환산	110% 만점	110점 만점	100점 만점으로 환산	5점 만점	5점 만점
평가 등급	4개 등급	5개 등급	4개 등급	3개 등급	5개 등급	5개 등급
필수 항목	에너지 외 5개 분야에 6~7개 항목 설정-최소점 수 획득	에너지 외 6개 분야에 14개 항목 설정-평가등급별 최소점수 구분	전체 분야별 필수항목 포함(전체 13개 항목)-점수와 무관	에너지 외 2개 분야에 2개 항목 설정-점수와 무관	없음	없음
인증서	평가등급	평가등급	평가등급	· 분야별 점수 · 평가등급	· 총점(BEE) · 분야별 점수 · LCCO2 지수	· 분야별 점수 · 평가등급
분야별 성능판 단가능	불가	불가	불가	가능	가능	가능

표 6.5 국내외 녹색건축물 인증제도 평가분야 비교

G-SEED		LEED			BREEAM			CASBEE			Green Star			SBTool	
분야	가중치 및 비중	분야	배점	비중	분야	가중치	비중	분야	가중치	비중	분야	가중치	비중	분야	가중치 및 비중 (예시 ¹⁾)
토지 이용	5	지속 가능한 대지	10	9	토지 이용과 생태	10	9	-	-	-	부지 계획 및 생태 환경	6	6	토지 복원과 개발, 도시 계획과 구조	23.6
생태 환경	10	-	-	-	-	-	-	실외 환경	40	20					
교통	5	입지와 교통	16	15	교통	8	7	-	-	-	교통	8	8	환경 부하	22.8
환경 오염	5	에너지 및 대기	33	30	오염	10	9	부지 외 환경	30	15	오염원 배출	6	6		
에너지	25				에너지	19	17	에너지	30	15	에너지	25	24	에너지 와 자원 소비	37.3
재료 및 자원	15	재료 및 자원	13	12	재료	12.5	11	자원 · 재료	40	20	자재	14	12		
					폐기물	7.5	7				수자원	12	11		
수자원	10	수자원 효율성	11	10	수자원	6	6								
유지 관리	7	-	-	-	유지 관리	12	11	서비스 성능	30	15	유지 관리	9	9	서비스 질	3.7
실내 환경	18	실내 환경의 질	16	15	건강과 복지	15	14	실내 환경	30	15	실내 환경	20	19	실내 공기질	7.4
-	-	디자인 혁신성	6	5	혁신성	10	9	-	-	-	혁신성	5	5	-	
-	-	지역 우선 항목	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	통합 프로 세스	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
														비용, 경제적 측면	4
														사회, 문화, 지각적 측면	1.1
	100%		110	100%		110	100%		200	100%		105	100%		100%

1) SBTool은 가중치가 정해져있지 않고 대상건물의 국가 및 지역에 따라 가중치를 설정하게 되어 있음

3. 전과정 지속가능성 평가방법

■ 본 연구에서 핵심적으로 기술적 방법론(Technical methodology)으로 적용되는 전과정 지속가능성 평가방법에 대한 이론적인 방법론과 연구동향을 수집함.

가. 전과정 지속가능성 평가방법론

- 전과정 지속가능성 평가(LCSA, Life Cycle Sustainability Assessment)는 제품 시스템의 전과정에 걸친 환경적, 경제적, 사회적인 영향(Impact)과 혜택(Benefit)을 정량화하고 이를 하나의 지표로써 종합하여 제품 시스템의 지속가능성을 판단하는 기법임.
- 전과정 지속가능성 평가는 2008년 Klöpffer에 의해 지속가능성을 대표하는 3가지 평가모델(환경적 전과정 평가(ELCA), 환경적 전과정 비용 평가(ELCC), 사회적 전과정 평가(S-LCA))의 평가결과를 합산하는 개념적인 식($LCSA = ELCA + ELCC + S-LCA$)으로 제안되었고, 2012년 UNEP/SETAC에서 발간된 “Towards a Life Cycle Sustainability Assessment”를 통해 전과정 지속가능성 평가의 시스템 경계를 포함한 세부적인 평가방법과 체계가 발표되었음. LCSA는 전과정 지속가능성 평가, ELCA는 환경적 전과정 평가, ELCC는 환경적 전과정 비용 평가, S-LCA는 사회적 전과정 평가를 나타냄.

$$LCSA = ELCA + ELCC + S-LCA \dots\dots\dots \text{식 6.1}$$

- 전과정 지속가능성 평가의 평가체계는 그림 6.2와 같이 목적 및 범위정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 전과정 해석의 4단계로 구성됨.
- 즉, 목적 및 범위 정의단계에서는 전과정 지속가능성 평가를 구성하는 환경적 전과정 평가(ELCA), 환경적 전과정 비용 평가(ELCC), 사회적 전과정 평가(S-LCA)에 대한 공통의 목적과 대상 시스템의 범위를 정의함. 이때, 환경적 전과정 평가(ELCA), 환경적 전과정 비용 평가(ELCC), 사회적 전과정 평가(S-LCA)의 기능단위는 반드시 통일되어야 하며, 시스템 경계 또한 일치되는 것이 이상적임.
- 전과정 목록분석(LCI) 단계에서는 목적 및 범위 정의단계에서 설정된 제품 시스템의 시스템 경계 및 기능단위에 적합한 데이터를 수집함.
- 전과정 영향평가(LCIA) 단계에서는 ISO 14044를 준용하여 LCI 단계에서 수집된 데이터를 중심으로 제품 시스템에 대한 잠재적인 지속가능성을 평가함. 이때, 분류화와 특성화를 수행하여 반드시 제품 시스템의 지속가능성을 정량화해야 한다. 한편, LCIA 단계는 전과정 지속가능성 평가의 의무사항은 아니나 3가지 평가모델로 구성되는 전과정 지속가능성 평가의 특성 상 일반적으로 가중화를 통한 평가결과의 단일지수화가 수행됨.

- 전과정 해석 단계에서는 LCI 단계와 LCIA 단계로부터 도출된 평가 결과를 분석하며, 전과정 지속가능성 평가에 대한 최종 결론과 지속가능성을 제고하기 위한 개선방안을 도출함. 또한, 주요 인자를 규명하고 외부의 전문가와 이해관계자에 의한 연구 결과의 신뢰성 평가 등이 진행될 수 있음.

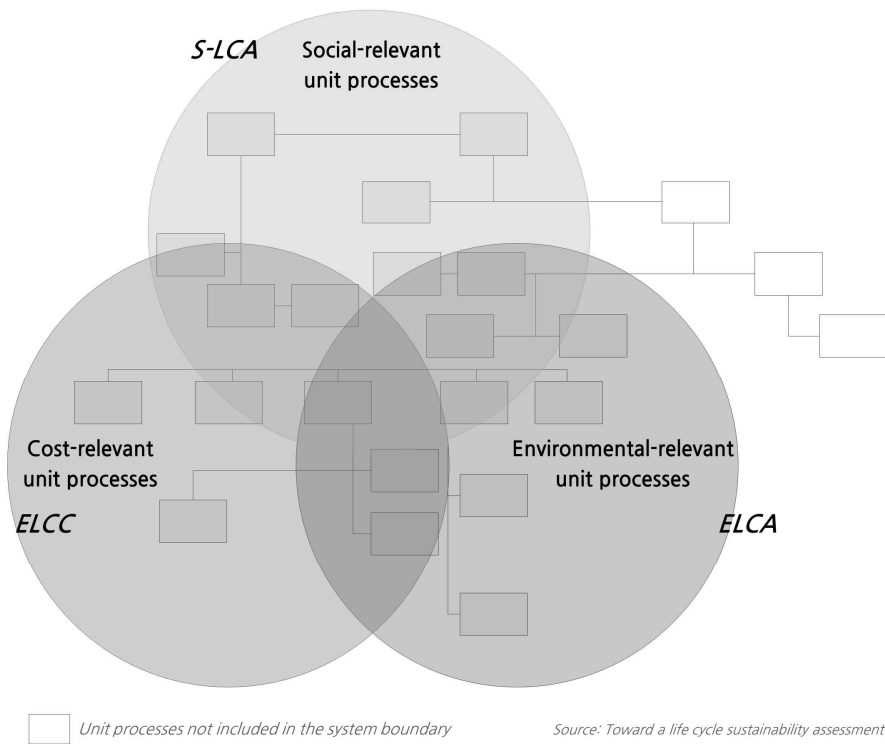


그림 6.1 전과정 지속가능성 평가의 시스템경계

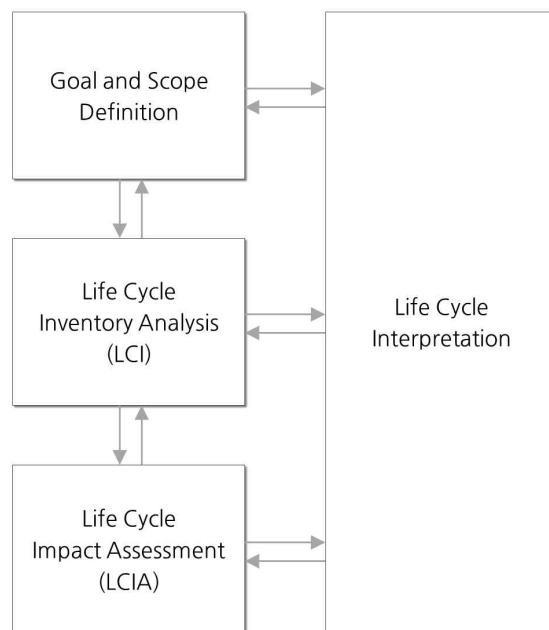


그림 6.2 전과정 지속가능성 평가체계

나. 연구동향

- 전과정 지속가능성 평가의 개념은 2003년 Klöpffer에 의해 최초로 제시되었으며, 다시 2008년 Klöpffer에 의해 환경적 전과정 평가(ELCA), 환경적 전과정 비용 평가(ELCC), 사회적 전과정 평가(S-LCA)의 평가결과를 합산하는 개념적인 식으로 구체화되었음.
- 또한, 이는 2012년 UNEP/SETAC의 “Towards a Life Cycle Sustainability Assessment”를 통해 전 세계적으로 공표되었고, 2011년에는 전과정 지속가능성을 단일의 통합 모델로 평가하자는 Life Cycle Sustainability Analysis의 개념이 Guinée et al.를 통해 제안되었지만 그 체계는 현재까지 개념적인 수준에 머물러 있는 것으로 조사되었음.
- 한편, 전과정 지속가능성 평가도 그 역사가 매우 짧은 평가기법으로써 환경적 전과정 평가(ELCA), 환경적 전과정 비용 평가(ELCC), 사회적 전과정 평가(S-LCA)를 모두 고려한 전과정 지속가능성 평가 관련 연구는 아직까지 미미한 실정이며, 단지 콘크리트의 재활용(Concrete recycling), 폴리에틸렌 용기(PET, Polyethylene terephthalate)의 폐기, 폐식용유(Cooking oil waste)의 관리 등 일부의 제품 또는 서비스를 대상으로 한 사례분석 중심의 연구가 진행된 것으로 조사되었음.
- 따라서 최근에는 다양한 제품 시스템을 대상으로 한 전과정 지속가능성 평가의 방법과 그 체계를 구축하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있는 추세임. 또한, 전과정 지속가능성 평가는 환경적 측면, 경제적 측면, 사회적 측면의 3가지 관점(Dimension)으로 구성됨에 따라 이에 대한 평가결과를 적절하게 통합하여 지속가능성으로 나타내고자 하는 연구도 함께 진행되고 있음.
- 이에 대한 대표적인 사례로써 Hofstetter et al.은 지속가능성을 구성하는 3가지 관점에 대한 가중화 방법인 LCST(Life Cycle Sustainability Triangle)를 제안하였고 Traverso는 전과정 지속가능성 평가결과를 나타내는 LCSD(Life Cycle Sustainability Dashboard)를 제안한 바 있음.

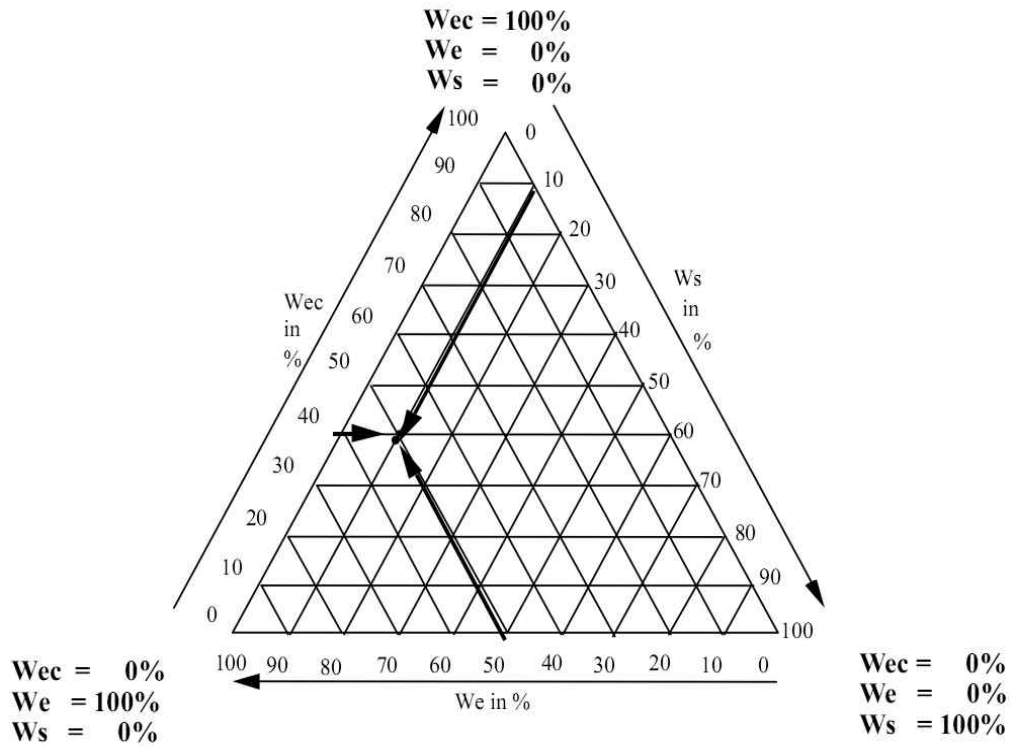


그림 6.3 Life Cycle Sustainability Triangle (LCST)

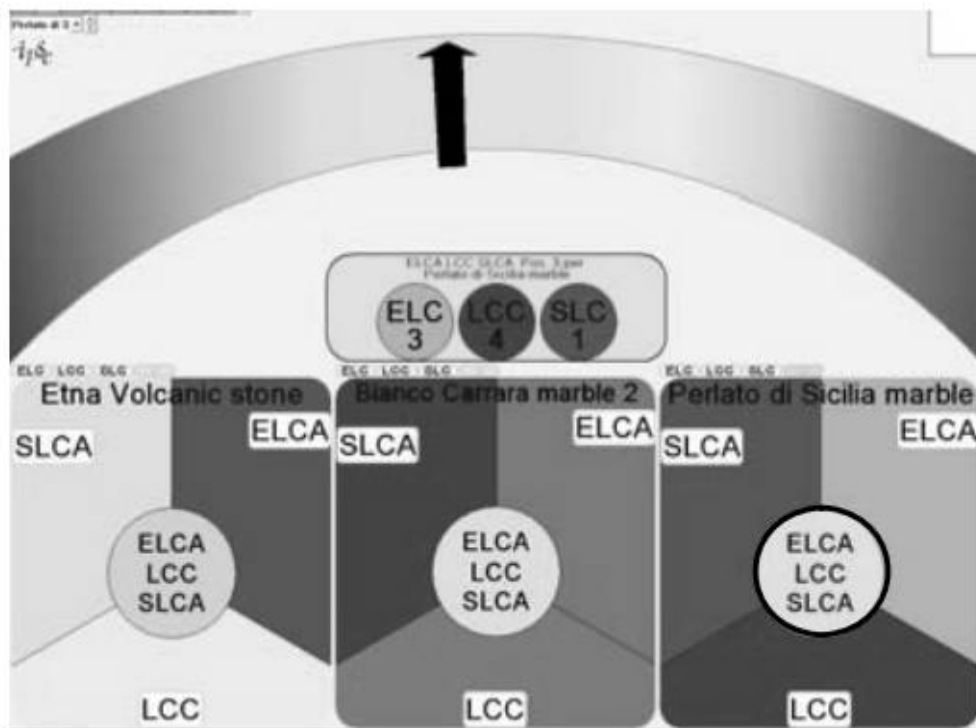


그림 6.4 Life Cycle Sustainability Dashboard (LCSD)

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 (천원)	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.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Evaluating the embodied environmental impacts of major building tasks and materials of apartment buildings in Korea	한양 대학교 에리카 산학 협력단	제1 저자	Renewable & Sustainable Energy Reviews	9.184	2017.06.30.	단독 사사	SCI 인용: 8회
2	논문	An integrated assessment system for managing life cycle CO2 emissions of a building	한양 대학교 에리카 산학 협력단	제1 저자	Renewable & Sustainable Energy Reviews	9.184	2017.06.30.	단독 사사	SCI 인용: 5회
3	논문	Analysis of Embodied Environmental Impacts of Korean Apartment Buildings Considering Major Building Materials	한양 대학교 에리카 산학 협력단	제1 저자	Sustainability	2.075	2018.05.23.	단독 사사	SSCI
4	특허	확률론적 분석 방법을 이용한 건축물 전과정 지속가능성 평가 장치, 방법 및 그 방법을 기록한 기록매체	한양 대학교 에리카 산학 협력단	발명자	대한민국	-	2017.12.26.	단독 사사	-
5	특허	지수를 이용한 건축물 전과정 지속가능성 평가 장치, 방법 및 그 방법을 기록한 기록매체	한양 대학교 에리카 산학 협력단	발명자	대한민국	-	2018.02.12.	단독 사사	-

제11장. 기타 사항

- 본 연구는 그 간 제한적인 평가범위와 평가결과의 불확실성으로 인해 실무에서 활용이 저조하였던 **결정론적 전과정 지속가능성 평가기술에 대한 근본적인 문제점을 해결하는 기초 원천기술 개발 연구**로서 지속가능한 건축물의 실현 잠재력이 가장 높은 건축사업 초기단계에서 **공동주택의 전과정 지속가능성을 확률론적으로 평가하고 지속가능한 공동주택의 설계와 이해관계자의 의사결정을 지원할 수 있는 독창적인 원천기술을 개발**하였음.
- 특히, 본 연구는 **TRL 2단계로 시작**하여 실험실 성능평가 단계인 TRL 4단계, 그리고 TRL 5단계 진입을 위한 시작품 초안 개발(**TRL 4 +@ 단계**)까지를 기술개발 범위로 정의하였고, 본 연구를 통해 기술개발 범위 내에서 확률기반의 공동주택 지속가능성 평가기술을 위한 주요 자재 매개변수 라이브러리 구축 등 질적 성과 및 IF 9.0 이상 SCI급 논문 4건(총 SCI 8건) 등 양적 성과 목표를 달성하였음.
- 향후에는 본 연구에서 개발된 원천기술을 **객관적인 관점에서 검증 및 보완하는 심화 연구와 아래 명기된 내용들이 반영된 응용기술 개발 연구 등을 수행**하고, 이들의 성과를 **실용화 및 시장 활용 단계까지 발전하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료**됨.
 - 단지 특성별, 주택 노후도별(리모델링 시기, 재건축 시기 등) 확장된 연구
 - 기계설비, 전기 및 정보통신설비, 조경 및 토목설비 등 각종 자료를 접목할 수 있는 연결고리 개발 및 적용

제12장. 참고 문헌

1. Seinre E, Kurnitski J, Voll H. Building sustainability objective assessment in Estonian context and a comparative evaluation with LEED and BREEAM. *Building and Environment* 2014;82:110-20.
2. Ali HH, Nsairat SFA. Developing a green building assessment tool for developing countries - Case of Jordan. *Building and Environment* 2009;44:1053-64.
3. Ye L, Cheng Z, Wang Q, Lin W, Ren F. Overview on Green Building Label in China. *Renewable Energy* 2013;53:220-9.
4. Lee WL, Burnett J. Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED. *Building and Environment* 2008;43:1882-91.
5. Koo SH. BREEAM. Eco-friendly building certification system of BRE. *Korea Green Building Council* 2012;13:62-8.
6. Alshamrani OS, Galal K, Alkass S. Integrated LCA-LEED sustainability assessment model for structure and envelope systems of school buildings. *Energy and Buildings* 2014;80:61-70.
7. Lee WL. A comprehensive review of metrics of building environmental assessment schemes. *Energy and Buildings* 2013;62:403-13.
8. Scofield JH. Efficacy of LEED-certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings. *Energy and Buildings* 2013;67:517-24.
9. Heinonen J, Säynäjoki A, Junnonen J, Pöyry A, Junnila S. Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance indicator?. *Building and Environment* 2016;95:116-25.
10. Lin B, Liu H. CO₂ mitigation potential in China's building construction industry: A comparison of energy performance. *Building and Environment* 2015;94:239-51.
11. Laprise M, Lufkin S, Rey E. An indicator system for the assessment of sustainability integrated into the project dynamics of regeneration of disused urban areas. *Building and Environment* 2015;86:29-38.
12. Bagheri A, Hjorth P. Planning for Sustainable Development: a Paradigm Shift Towards a Process-Based Approach. *Sustainable Development* 2007;15:83-96.
13. International Energy Agency (IEA). *Energy technology perspectives 2010*, OECD/IEA, 2010.
14. Li X, Yang F, Zhu Y, Gao Y. An assessment framework for analyzing the embodied carbon impacts of residential buildings in China. *Energy Build* 2014;85:400-9.
15. Basbagill J, Flager F, Lepech M, Fischer M. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment* 2013;60:81-92.

16. Häkkinen T, Kuittinen M, Ruuska A, Jung N. Reducing embodied carbon during the design process of buildings. *J. Building Engineering* 2015;4:1–13.
17. Kreiner H, Passer A, Wallbaum H. A new systemic approach to improve the sustainability performance of office buildings in the early design stage. *Energy and Buildings* 2015;109:385 – 96.
18. Bribián IZ, Usón AA, Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: state-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Build Environ* 2009;44:2510–20.
19. Urge-Vorsatz D, Koeppl S, Mirasgedis S. Appraisal of policy instruments for reducing buildings' CO₂ emissions. *Building Research & Information* 2007;35:458–77.
20. Asdrubail F, Baldassarri C, Fthenakis V. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings* 2013;64:73–89.
21. Seinre E, Kurnitski J, Voll H. Quantification of environmental and economic impacts for main categories of building labeling schemes. *Energy and Buildings* 2014;70:145–58.
22. Ramesh T, Prakash R, Shukla KK. Life cycle energy analysis of buildings, an overview. *Energy and Buildings* 2010;42(10):1592–600.
23. Rogers M, Ryan R. The Triple Bottom Line for Sustainable Community Development. *Local Environ* 2001;6:279–89.
24. Hacking T, Guthrie P. A framework for clarifying the meaning of Triple Bottom-Line, Integrated, and Sustainability Assessment. *Environ Impact Assess. Rev.* 2008;28:73–89.
25. Braganca L, Mateus R, Koukkari H. Building Sustainability Assessment. *Sustainability* 2010;2:2010–23.
26. Khasreen MM, Banfill PFG, Menzies GF. Life cycle assessment and the environment impact of buildings: a review. *Sustainability* 2009;1(3):674–701.
27. Dixit MK, Fernández-Solís JL, Lavy S, Culp CH. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2012;16:3730–43.
28. Robichaud LB, Anantatmula VS. Greening project management practices for sustainable construction. *J. Manage Eng* 2010;27(1):48–57.
29. Zuo J, Zhao ZY. Green building research-current status and future agenda: a review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2014;30:271–281.
30. Georgiadou MC, Hacking T, Guthrie P. A conceptual framework for future-proofing the energy performance of buildings. *Energy Policy* 2012;47:145–55.
31. Skouloudis A, Evangelinos K, Kourmousis F. Development of an Evaluation Methodology for Triple Bottom Line Reports Using International Standards on Reporting. *Environ Manage* 2009;44:298–311.
32. Ng ST, Chen Y, Wong J. Variability of building environmental assessment tools on evaluating carbon emissions. *Environ Impact Assess Rev* 2013;38:131–41.

33. Sev A. A comparative analysis of building environmental assessment tools and suggestions for regional adaptations. *Civil Engineering and Environmental Systems* 2011;28:231-45.
34. Sadineni SB, Madala S, Boehm RF, Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renewable Sustainable Energy Rev* 2011;15:3617-31.
35. Iddon CR, Firth SK, Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK, *Energy Build* 2013;67:479-88.
36. Acquaye AA, Duffy AP, Basu B, Stochastic hybrid embodied CO₂-eq analysis: An application to the Irish apartment building sector. *Energy Build* 2011;43:1295-1303.
37. ISO, ISO 21931-1: Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works – Part 1: Buildings. 2010.
38. Kylili A, Fokaides PA. European smart cities: The role of zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society* 2015;15:86-95.
39. Zabaneh GA, Zero net house: Preliminary assessment of suitability for Alberta, *Renewable Sustainable Energy Rev* 2011;15:3237-42.
40. Iban-Mohammed T, Greenough R, Taylor S, Ozawa-Meida L, Acquaye A, Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends, *Energy Build* 2013;66:232 - 45.
41. Sun S, Kensek K, Noble D, Schiler M. A method of probabilistic risk assessment for energy performance and cost using building energy simulation. *Energy Build* 2016;110:1-12.
42. Maurice B, Frischknecht R, Coelho V, Hungerbühler. Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plants. *J. Clean Product* 2000;8:95-108.
43. Jeong YS, Lee SE, Huh JH, Estimation of CO₂ emission of apartment buildings due to major construction materials in the Republic of Korea, *Energy and Buildings* 2012;49:437 - 42.
44. Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 2008;40(3):394-398.
45. Takao A, Winter S, Hughes M, Linkosalmi L. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment* 2014;79:20-30.
46. ISO, ISO 14040: Environmental management – life cycle assessment – Principles and framework. 2006.
47. Hunkeler D, Lichtenwort K, Rebitzer, Ciroth A, Huppers G, Klopffer W, Rudenauer I, Steen B, Swarr T. Environmental Life Cycle Costing. SETAC. New York. 2008.
48. UNEP. Guideline for Social Life Cycle Assessment of Products. UNEP. 2009.
49. UNEP. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. UNEP. 2011.

50. SETAC. A Technical Framework for Life-Cycle Assessment. SETAC. 1991.
51. Liu T, Wang Q, Su B. A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2016;53:68–79.
52. AIA. AIA guide to building life cycle assessment in practice, 2010.
53. Haapio A, Viitaniemi P. A critical review of building environmental assessment tools. *Environ Impact Assess Rev* 2008;28:469–82.
54. Chau CK, Leung TM, Ng WY. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy* 2015;143:395–413.
55. Roh SJ, Tae SH, Shin SW, Woo JH. Development of an optimum design program (SUSB-OPTIMUM) for the life cycle CO₂ assessment of an apartment house in Korea. *Build Environ* 2014;73:40–54.
56. Haapio A, Viitaniemi P. A critical review of building environmental assessment tools. *Environ Impact Assess Rev* 2008;28:469–82.
57. Kulahcioglu T, Dang J, Toklu C. A 3D analyzer for BIM-enabled Life Cycle Assessment of the whole process of construction. *HVAC&R Research* 2012;18(1–2):283–293.
58. Lee KH, Tae SH, Shin SW. Development of a life cycle assessment program for building (SUSB-LCA) in South Korea. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2009;13:1994–2002.
59. International Code Council, International Green Construction Code, 2010.
60. Baek CH, Park SH, Suzuki M, Lee SH. Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase. *Energy Build* 2013;61:275–287.
61. Swarr T. Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice. SETAC. 2011.
62. Reich MC. Economic assessment of municipal waste management systems—case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC). *J. Clean Product* 2005;13:253–63.
63. Norris GA. Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA. *Int. J. Life Cycle Assess* 2001;6(2):118–20.
64. Norris GA. Integrating Economic Analysis into LCA. *Environ Quality Manage* 2001;10(3):59–64.
65. Safaei A, Freire F, Antunes CH. A life cycle multi-objective economic and environmental assessment of distributed generation in buildings. *Energy Conversion and Management* 2015;97:420–7.
66. Cellura M, Guarino F, Longo S, Mistretta M. Different energy balances for the redesign of nearly net zero energy buildings: An Italian case study, *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015;45:100–12.
67. Finkbeiner M, Schau EM, Lehmann A, Traverso M. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* 2010;2(10):3309–22.

68. Rebitzer G, Hunkeler D, Jolliet O. LCC–The Economic Pillar of Sustainability: Methodology and Application to Wastewater Treatment. *Environ Progress* 2003;22(4):241–9.
69. Schmidt WP. Life Cycle Costing as Part of Design for Environment. *Int. J. Life Cycle Assess* 2003;8(3):167–74.
70. Anderson B, Maria CD. Abatement and Allocation in the Pilot Phase of the EU ETS. *Environmental and Resource Economics* 2011;48(1):83–103.
71. Hintermann B. Allowance price drivers in the first phase of the EU ETS. *Journal of Environmental Economics and Management* 2010;59(1):43–56.
72. Blyth W. Coevolution of policy, market and technical price risks in the EU ETS. *Energy Policy* 2011;39(8):4578–4593.
73. Norris GA. Social impact in product life cycles: towards life cycle attribute assessment. *Int. J. Life Cycle Assess* 2006;11(1):97–104.
74. Dreyer LC, Hauschild MZ, Schierbeck J. A Framework for Social Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. Life Cycle Assess* 2006;11(2):88–97.
75. Hunkeler D. Societal LCA methodology and case study. *Int. J. Life Cycle Assess* 2006;11(6):371–82.
76. Roh SJ, Tae SH, Shin SW. Development of building materials embodied greenhouse gases assessment criteria and system (BEGAS) in the newly revised Korea Green Building Certification System (G-SEED). *Renewable Sustainable Energy Rev* 2014;35:410–421.
77. Roh SJ, Tae SH, Suk SJ, Ford G, Shin SW. Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Korea's green building index certification system. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2016;53:954–965.
78. Jeong K, Ji C, Koo C, Hong T, Park HS. A model for predicting the environmental impacts of educational facilities in the project planning phase. *J. Clean Product* 2015;107:538–49.
79. Feschet P, Macombe C, Garrabe M, Loeillet D, Saez AR, Benhmad F. Social impact assessment in LCA using the Preston pathway. *Int. J. Life Cycle Assess* 2013;18:490–503.
80. Aparcana S, Salhofer S. Application of a methodology for the social life cycle assessment of recycling system in low income countries: three Peruvian case studies. *Int. J. Life Cycle Assess* 2013;18:1116–28.
81. Zamagni A, Pesonen H, Swarr T. From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: Concept, practice and future directions. *Int. J. Life Cycle Assess* 2013;18:1637–41.
82. Klöpffer W. Life cycle sustainability assessment of products. *Int. J. Life Cycle Assess* 2008;13(2):89–95.
83. Klöpffer W. Life-Cycle Based Methods for Sustainable Product Development. *Int. J. Life Cycle Assess* 2003;8(3):157–9.

84. Guinée JB, Heijungs R, Huppes G, Zamagni A, Masoni P, Buonamici R, Ekvall T, Rydberg T. Life cycle assessment: past, present, and future. *Environ Sci Technol* 2011;45:90-6.
85. Hu M, Kleijn R, Bozhilova-Kisheva KP, Maio FD, An approach to LCSA: the case of concrete recycling. *Int. J. Life Cycle Assess* 2013;18:1793-1803.
86. Foolmaun RK, Ramjeawon T, Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Int. J. Life Cycle Assess* 2013;15:783-806.
87. Kruse SA, Flysjo A, Kasperczyk N, Scholz A. Socioeconomic indicators as a complement to life cycle assessment - an application to salmon production system. *Int. J. Life Cycle Assess* 2009;14:8-18.
88. Vinyes E, Oliver-Solà J, Ugaya C, Rieradevall J, Gasol CM, Application of LCSA to used cooking oil waste management. *Int. J. Life Cycle Assess* 2013;18:445-455.
89. Hofstetter P, Braunschweig A, Mettier T, Müller-Wenk R, Tietje O, The Mixing Triangle: Correlation and Graphical Decision Support for LCA-based Comparisons. *J. Ind. Ecol.* 1993;3:97-115.
90. Traverso M, Finkbeiner M, Life Cycle Sustainability Dashboard. Proceedings of the 4th International Conference on Life Cycle Management 2009.