

# 생애주기비용 예측 기반 건물재료 경제성 평가 및 선정

## Evaluation and Selection of Building Materials based on Life Cycle Cost Prediction

안정환<sup>1)</sup>, 임진강<sup>2)</sup>, 오민호<sup>3)</sup>, 이재욱<sup>4)</sup>  
Ahn, Junghwan<sup>1)</sup> · Lim, Jinkang<sup>2)</sup> · Oh, Minho<sup>3)</sup> · Lee, Jaewook<sup>4)</sup>

Received June 1, 2015 / Accepted June 28, 2015

**ABSTRACT:** As buildings become larger and more complicated, construction costs have increased with a considerable effect on buildings' Life Cycle Cost (LCC). However, there has been little consideration on economic aspects in the selection of construction materials due to limited information on the materials and dependency in architects' experience and inefficiency in cost estimation, causing design changes, increase in maintenance cost, difficulty in budgeting, and decrease in building performance. To solve these problems, this study proposed a BIM-based material selection model which reflects the comprehensive economic efficiency of building materials. Our cost prediction model can estimate the material-related cost during the entire building life cycle. Furthermore, we implemented the proposed model in connection with BIM, which can analyze and compare LCC by material. Through the validation of the model, we could confirm the necessity of LCC-based material selection in comparison with the conventional cost-centered material selection.

**KEYWORDS:** BIM, Building Material, Life Cycle Cost, Material Selection, Cost Prediction

**키워드:** BIM, 건물재료, 생애주기비용, 재료선정, 비용예측

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 건설 산업의 발전과 함께 건물의 규모가 커지고, 복잡해지면서 건물을 구성하는 재료의 종류 및 수량이 방대해지고 있다. 이는 재료로 인해 발생하는 비용의 증가를 의미하며, 건물 생애주기비용에도 많은 영향을 미치고 있다. 하지만 실제 재료 선정이 이루어지는 설계단계에서는 재료의 경제적 측면이 제대로 반영되지 못하고, 재료의 생산업체가 제공하는 정보나 설계자의 경험에 의존한 재료의 물리적 특성과 시공성을 중요시하고 있다(de Freitas, 2013). 이는 예산부족에 따른 설계변경, 예산편성의 어려움, 건물 준공 후 유지관리 업무 및 비용의 증가 등 다양한 문제를 발생시키며, 건물의 성능감소나 수명저하의 원인이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 건물재료선정 과정에서 재료의 종합적

인 경제성 평가를 위하여 재료의 생애주기비용 산정방법을 정의하고, 정확한 비용 산출결과를 도출하기 위하여 BIM(Building Information Modeling)과 생애주기비용 예측모델을 결합한 건물재료선정 방안을 제안하였다. 이를 바탕으로 건물재료선정에 필요한 경제적인 의사결정을 지원하고자 한다.

#### 1.2 연구의 범위 및 방법

건물재료선정 과정은 객관적이어야 하며, 개인의 주관적 판단을 최소화할 수 있는 시스템을 사용해야 한다(Jee, 2000). 이에 본 연구는 건물재료선정의 객관적 지표로서 재료의 생애주기비용을 활용하였다. 또한, 건물 생애주기비용에 영향을 미치는 건물재료를 대상으로 비용의 대부분을 차지하는 시공, 유지관리, 해체단계를 연구 범위로 한정하였다.

연구 수행 절차는 크게 4단계로 선행연구 고찰, 방법 정의, 방안 구현, 검증으로 진행하였다.

<sup>1)</sup>학생회원, 세종대학교 건축공학과 석사과정 (naajh@naver.com)

<sup>2)</sup>학생회원, 세종대학교 건축공학과 석사과정 (jwlsrkd@naver.com)

<sup>3)</sup>정회원, (주)에코시안 주임연구원 (minho7349@ecosian.com)

<sup>4)</sup>정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사 (jaewook@sejong.ac.kr) (교신저자)

세부적인 수행 절차는 다음과 같다.

첫째, 건물의 생애주기비용과 건물재료선정에 관한 선행연구 고찰을 통해 연구현황, 문제 및 한계점을 분석한다.

둘째, 재료의 종합적인 경제성을 반영하기 위한 선행 연구로서, 재료의 생애주기비용을 산정하기 위한 조건들을 도출하고, 생애주기단계별 비용 산정방법을 정의한다.

셋째, 재료의 생애주기비용 산정방법과 조건들을 기반으로 BIM을 활용하여 비용 산출 및 정보 제공을 위한 비용 산출프로그램을 구축한다.

넷째, 건물 설계과정에서의 재료선정을 가정하여 재료별 생애주기비용을 산출하고, 그 값의 비교, 분석을 통해 경제성 반영의 타당성을 확인한다.

## 2. 선행연구 현황분석

### 2.1 건물 생애주기비용 관련 선행연구

건물 생애주기비용과 관련하여 국내외 AEC산업에서 다양한 연구가 진행되고 있다(Table 1). 국외의 경우 BIM 정보를 통합, 활용하여 생애주기비용 예측하고, 설계 프로세스를 지원하기 위한 시스템을 제안(Whyte, 2010), 기존 사례를 바탕으로 건물의 생애주기비용에 냉, 난방 요소가 미치는 영향을 분석하여 최적의 열관리 모델 구축 연구(Morrissey, 2011) 등이 있다. 또한, 국내의 경우 지붕방수공법의 선정(Choi, 2011)이나 최적화된 교량설계(Park, 2010) 등과 관련하여 생애주기비용을 분석, 평가하는 연구가 진행되고 있다.

국내의 생애주기비용 관련 연구들은 주로 여러 분야에서 발

생하는 문제점 해결과 개선을 위해 생애주기비용을 분석하여 활용하고 있다.

Table 1 Life Cycle Cost-related Previous Studies

| Researcher       | Subject  |
|------------------|--|
| Whyte (2010)     | Life-cycle costing analysis to assist design decisions: beyond 3D building information modelling |
| Morrissey (2011) | Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings          |
| Choi (2011)      | Comparisons of Selection Methods in Roof Waterproofing   |
| Park (2010)      | Optimal Life Cycle Cost Design of a Bridge   |

### 2.2 건물재료선정 관련 선행연구

건물재료선정과 관련된 기존 연구들은 크게 기능 및 성능, 경제성, 친환경 측면으로 분류할 수 있다(Table 2).

#### 2.2.1 기능 및 성능 측면

기능 및 성능 측면의 선행연구를 살펴보면 건물의 예상성능 및 요구사항의 중요성을 분석하고, 그 결과를 반영한 재료선정 방법을 제안(Alibaba, 2004), 재료선정에 필요한 요구사항과 조건을 동시에 고려한 복합적 의사결정을 제안하고, 재료의 여러 가지 대안을 분석하여 재료를 선정(Zavadskas, 2008)할 수 있도록 하는 연구 등이 진행되고 있다. 또한 재료별 특성이나 성능 지수에 대한 가중계수를 평가하여 다양한 재료의 요구사항을 동시에 고려한 재료선정 시스템 개발(Jee, 2000), 환경 요인을

Table 2 Classification of Previous Studies Relating to the Selection of Building Materials

| Aspect                   | Researcher              | Subject  |
|--------------------------|-------------------------|--|
| Function and Performance | Alibaba (2004)          | A Building Elements Selection System for Architects  |
|                          | Zavadskas (2014)        | Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals                                    |
|                          | Jee (2000)              | A Method for optimal material selection aided with decision making theory  |
|                          | Giudice (2005)          | Materials selection in the Life-Cycle Design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice  |
| Economic                 | Rahman (2009)           | A knowledge-based decision support system for roofing materials selection and cost estimating: A conceptual framework and data modelling |
|                          | Perera (2002)           | Cost Modelling for Roofing Material Selection  |
|                          | Do (2008)               | AHP Based-Optimal Selection of Concrete Patching Repair Materials Considering Qualitative Evaluation Criteria                            |
|                          | Park (2009)             | Economic Analysis of Box Mechanical Behavior Materials Using LCC Analysis  |
| Green                    | Castro-Lacouture (2008) | Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia                            |
|                          | Yang (2013)             | A Multi-Criteria Decision Support System for the Selection of Low-Cost Green Building Materials and Components                           |
|                          | Song (2005)             | Development on the Selection of Green Construction Materials for Residential Safety  |

최소화한 기능 및 성능 중심의 재료선정 방안(Giudice, 2005) 등이 있다. 이처럼 건물의 요구 성능 및 조건을 충족시키기 위해 재료의 기능 및 성능을 고려한 연구가 활발히 진행되고 있다.

### 2.2.2 경제성 측면

경제성 측면의 연구로는 최적의 지붕재료를 선정하기 위한 지식 기반 의사결정 지원 시스템 개발(Rahman, 2009), 사용목적과 기간을 고려한 지붕재료선정의 의사결정 지원 비용모델 제안(Perera, 2009) 등과 같이 지붕재료를 선정하기 위한 비용 분석 관련 연구들이 진행되고 있다. 또한 콘크리트 단면복구 재료선정방법 제안(Do, 2008)이나 생애주기비용 분석을 통한 재료선정(Park, 2009) 등 경제적 측면에서 보다 합리적인 재료선정방법을 제안하였다. 하지만 대부분의 연구들은 특정 재료, 제한적인 비용분석과 같은 한계점이 있다.

### 2.2.3 친환경 측면

친환경 측면의 선행연구를 살펴보면 LEED 기반 에너지 및 환경 디자인 평가 시스템의 신뢰성을 높이는 동시에 정해진 예산에 따른 제약을 고려한 재료선정 모델 제안(Castro-Lacouture, 2008), 설계자가 필요한 조건을 입력하여 조건에 부합되는 최적의 비용을 가진 친환경 재료를 선정방법(Yang, 2013) 등과 같은 연구가 있다. 또한 친환경 건축자재의 환경기준 및 품질기준을 DB화하고 친환경 건축물의 요구 성능에 적합한 재료를 선정하기 위한 시스템의 구축(Song, 2005) 연구가 진행되고 있다. 이처럼 친환경 건물에 대한 관심이 증가하면서 건물재료선정에도 많은 영향을 미치고 있으며, 관련 연구도 활발히 진행되고 있다.

## 2.3 선행연구의 한계점과 해결방안

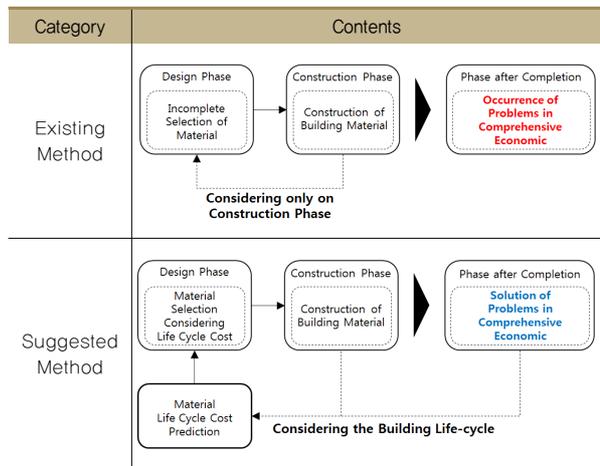
생애주기비용 관련 기존 연구들은 설계 및 시스템의 개선이나 의사결정을 지원하기 위해 생애주기비용을 활용한다. 하지만 유사 건물의 사례를 바탕으로 생애주기비용을 산정하여 그 결과 값의 정확성이 부족하고, 특정 재료나 공법 선정에 초점을 맞춘 비용 예측으로 제한적인 경제성 평가를 수행하고 있다.

건물재료선정 관련 선행연구들은 재료의 물리적 특성, 건물의 요구사항, 환경 요인의 영향을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 기본적으로 재료성과 건물의 요구사항을 비교함으로써 설계자의 의사결정을 지원하고 있다. 하지만 대부분의 연구는 특정 재료에 국한된 재료선정방법을 제안하거나 재료 자체가 건물의 성능 및 환경에 미치는 영향과 재료비 및 시공비를 주로 다루고 있어 건물 유지관리나 해체로 인해 발생하는 비용에 대한 고려가 미흡하다. 이러한 비용들은 정확히 예측하기 어려우며, 설계자는 제한적인 정보를 바탕으로 불완전한 재료선정을 수행하고 있다.

따라서 본 연구에서는 건물 재료선정과과정에서 경제성 측면의 기존 연구들의 문제와 한계점을 해결하기 위하여 재료의 생애주기비용을 반영한 종합적인 경제성 평가 방법을 제안하였다.

Table 3은 기존 재료선정 방식과 본 연구에서 제안하는 방식의 차이를 나타낸다. 대부분 시공단계만을 고려한 기존 건물재료선정 방식과 달리 제안하는 방식은 재료의 생애주기비용을 예측하여 설계과정에 반영한다. 이에 따라 건물 준공 후 경제적으로 발생할 수 있는 다양한 문제들을 해결하고자 한다.

**Table 3 Differences between Existing and Newly Suggested Material Selection Methods**



## 3. 재료의 생애주기비용 산정방법

### 3.1 재료의 생애주기비용 산정조건

#### 3.1.1 건물의 내용 연수

재료의 생애주기비용을 산정하기 위해서는 건물의 수명, 즉 건물의 내용 연수를 예상하고 적용해야 한다. 하지만 모든 내용 연수를 고려한 객관적인 수명을 추정하기는 어렵다. 이에 본 연구에서는 건물재료의 경제적 측면을 고려하여 자산적 가치가 포함되어 있는 법인세법 시행규칙의 ‘건축물 등의 기준내용연수 및 내용연수범위표(제15조 제3항관련)’을 적용하였다(Table 4).

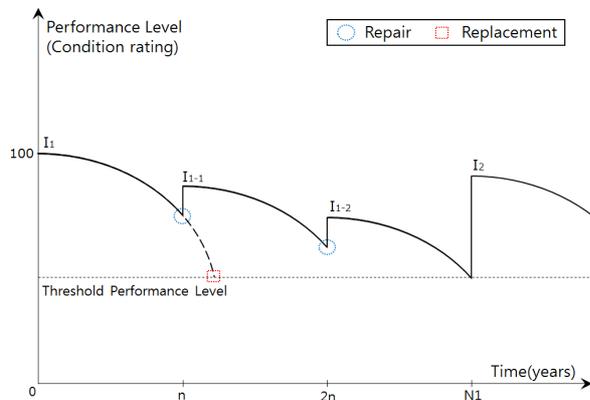
이 기준은 건물의 구조 또는 자산명으로 구분하여 기준내용연수 및 내용연수범위를 명시하고 있다.

#### 3.1.2 수선 및 수선율

건물의 유지관리는 일반적으로 건물의 준공 후 기능이나 성능을 보전하기 위한 사전점검, 보수, 개량 및 수선 등의 활동을 의미한다. 이는 사전에 유해요인을 제거하고 손상부분을 복원하여 사용자의 편의와 안전을 도모한다. 이처럼 건물의 기능 및 성능을 유지하기 위해서는 지속적인 건물요소의 수선과 교체가 이루어져야 한다.

**Table 4 Building Standard Service Life and Service Life Range Table (Enforcement Rule of the Corporate Tax Act, 2011)**

| Standard Service Life and Service Life Range (Lower Limit–Upper Limit) | Structure or Assets   |
|--|---|
| 5 years (4–6 years)  | Vehicle and transportation equipment (excluding the vehicles and transportation equipment used in transportation business, machine & equipment and lease of consumable goods), tools and movable fixtures   |
| 12 years (9–15 years)  | Vessel and airplane (excluding ships and airplanes used for fishing, transport business, machine & equipment, vessels used in the lease of consumable goods)  |
| 20 years (15–25 years)   | Brick structure, block structure, concrete structure, chamber, earthen wall structure, wooden structure, timber-framed mortar structure and all other buildings (including auxiliary facilities)            |
| 40 years (30–50 years)   | All buildings (including auxiliary facilities) of steel-framed & reinforced concrete structure, reinforced concrete structure, stone structure, stone brick structure and reinforced structure and fixtures |



**Figure 1 Building Performance Level Curve (Hong, 2007)**

Figure 1은 시간 경과에 따른 수선 및 교체주기와 건물 성능 수준을 나타낸다(Hong 2007).

건물의 준공 직후의 성능을 100%라고 가정했을 때, 물리, 환경 등 다양한 영향요인으로 인해 성능수준은 점차 저하된다. 저하된 성능수준을 회복하고 일정성능을 유지하기 위해서 반복적인 수선이 요구되지만, 수선을 반복하더라도 이전 성능수준을 초과해서 회복하지는 못한다. 또한 기능이 일정수준의 성능저하가 발생할 경우에는 교체가 이루어져야 한다. 그러나 수선을 하지 않아 성능수준의 한계점에 도달할 경우에는 교체주기가 빨라진다. 이러한 수선과 교체는 건물의 수명이 완료되는 시점까지

반복되며, 이 과정에서 소요되는 비용을 예측하기 위해서는 수선과 교체시점을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 하지만 건물의 재료는 다종다양하고, 그 수는 방대하기 때문에 모든 재료의 수선과 교체시점을 정확히 예측하는 것은 어렵다. 이에 본 연구에서는 재료의 유지관리비용을 산정하기 위해 주택법 시행규칙 ‘장기수선계획의 수립기준’을 활용하였다(Table 5). 설계자는 재료의 시공방법을 선택함에 따라 수선주기와 수선율, 교체주기를 예상하고, 이를 통해 재료의 유지관리비용을 예측할 수 있다.

**Table 5 Long-term Repair Planning Standards (Enforcement Rule of Housing Act, 2012)**

| Category | Construction Type            | Repair Method   | Repair Cycle (Years) | Repair Rates (%) |
|----------|------------------------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Envelope | (1) Mortar finishing         | Partial repair  | 8                    | 15               |
|          |                              | Complete repair | 20                   | 100              |
|          | (2) Artificial stone laying  | Partial repair  | 10                   | 5                |
|          |                              | Complete repair | 20                   | 100              |
|          | (3) Artificial stone washing | Partial repair  | 8                    | 15               |
|          |                              | Complete repair | 30                   | 100              |
|          | (4) Tile laying              | Partial repair  | 8                    | 10               |
|          |                              | Complete repair | 30                   | 100              |
|          | (5) Stone laying             | Partial repair  | 25                   | 5                |
|          | (6) Water painting           | Complete repair | 5                    | 100              |

### 3.1.3 폐기물처리 기준

건설폐기물의 경우 발생원에 따라 그 종류가 다양하고 처리 방법과 비용도 다르다. 폐기물관리법상 건설폐기물은 대부분 일반폐기물에 포함되며, 폐유나 석면 등은 특정폐기물로 분류하고 있다.

폐기처리비용 산정을 위하여 본 연구에서는 환경부(폐자원관리과)의 환경부고서 ‘지정폐기물 공공처리시설 반입수수료’에서 명시하고 있는 폐기물 반입수수료를 기준으로 하였다. 환경부에서 제시하고 있는 폐기물처리비용은 소각대상, 매립대상으로 나누어 폐기물의 종류와 구분에 따라 톤당 처리비용을 제공하고 있다(Table 6).

### 3.1.4 실질 할인율

생애주기비용은 미래에 발생할 수 있는 가치로서, 현재의 가치와 같지 않으므로 환산할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 미래가치를 현재가치로 환산하기 위하여 할인율(Discunt Rate)을 적용하였다.

할인율은 물가상승률 고려하지 않은 명목 할인율(Nominal Discount Rate)과 물가상승률을 고려한 실질 할인율(Real Discount Rate)로 구분할 수 있으며, 생애주기비용 예측에는 일반적으로 실질 할인율이 사용된다.

실질 할인율은 명목 할인율에 물가상승률을 뺀 근사치이다. 실질 할인율은 한국은행의 예금은행 수신금리(명목 할인율)와 소비자 물가 상승률을 참고하였으며, 최근 7년간 실질 할인율을 산출하였다(Table 7).

**Table 6 Specified Waste Fee Needed to Place the Waste into Public Disposal Facilities (Announced by Ministry of Environment, 2012)**

| Facility            | Type of Waste   | Category                       | Cost (KRW)     |
|---------------------|---|--------------------------------|----------------|
| Landfill Facilities | Slag, dust, waste foundry sand, sandblast waste, waste refractories, ceramic pieces, incineration residue, solid waste, waste catalysts, waste absorbents, sludge | Buried in person               | 65,410-85,400  |
|                     |   | specific gravity 0.8 or higher | 68,480-89,400  |
|                     | Waste resin, waste rubber, waste asbestos   | 0.6 - less than 0.8            | 77,210-100,800 |
|                     |   | Less than 0.6                  | 92,910-121,300 |
|                     | Waste acid, waste alkali  | Solid                          | 65,410-85,400  |

**Table 7 Real Discount Rates for the Past Seven Years**

| Category | Deposit Interest | Consumer Price Index (2010=100) | Inflation | Real Discount Rate |
|----------|------------------|---------------------------------|-----------|--------------------|
| 2007     | 5.07             | 90.3                            | 2.5       | 2.57               |
| 2008     | 5.71             | 94.5                            | 4.7       | 1.01               |
| 2009     | 3.26             | 97.1                            | 2.8       | 0.46               |
| 2010     | 3.19             | 100                             | 3         | 0.19               |
| 2011     | 3.69             | 104                             | 4         | -0.31              |
| 2012     | 3.43             | 106.3                           | 2.2       | 1.23               |
| 2013     | 2.73             | 107.7                           | 1.3       | 1.43               |
| average  | 3.87             | 99.99                           | 2.93      | 0.94               |

### 3.2 생애주기단계별 비용 산정방법 정의

재료의 경제성 평가를 통해 설계단계의 재료선정에 필요한 의사결정을 지원하기 위해서는 정확한 비용 예측이 선행되어야 한다. 앞서 도출한 생애주기비용 산정 조건을 바탕으로 건물 생애주기 단계별 비용 산정 방법에 대해서 정의하였다.

비용 산정에 직접적으로 재료의 영향을 받지 않는 기획 및 설계단계를 제외한 시공, 유지관리, 해체단계를 범위로 한정하

고, 각 단계별 비용 산정방법에 대해서 정의하였다. Table 8은 본 연구에서 정의한 생애주기단계별 산정 비용 및 기준이다. 건물 재료를 중심으로 발생할 수 있는 비용을 각 단계와 산정비용, 산정기준으로 나누어 정의하였다.

**Table 8 Estimation Costs and Standards by Life Cycle Stage**

| Stage          | Estimation Cost            |   | Estimation Standards  |   |
|----------------|----------------------------|---|---|---|
| Construction   | Construction Costs         |   | Price information<br>Construction standard estimating system  |   |
| Main-tenance   | Repair Costs               | Partial Construction Cost   | Price information<br>Real discount rate<br>Construction standard estimating system<br>Long-term repair planning standards |   |
|                |                            | Partial Decommissioning Cost  | Real discount rate<br>Construction standard estimating system<br>Long-term repair planning standards                      |   |
|                |                            | Partial Disposal Cost   | Real discount rate<br>Specified waste fee needed to place the waste into public disposal facilities                       |   |
|                | Main-tenance Costs         | Complete Construction Cost  | Complete Construction Cost  | Price information<br>Real discount rate<br>Construction standard estimating system<br>Long-term repair planning standards |
|                |                            |   | Complete Decommissioning Cost   | Real discount rate<br>Construction standard estimating system<br>Long-term repair planning standards                      |
|                |                            | Replacement Costs   | Complete Decommissioning Cost   | Real discount rate<br>Construction standard estimating system<br>Long-term repair planning standards                      |
|                |                            |   | Complete Disposal Cost  | Real discount rate<br>Construction standard estimating system   |
|                | Decommissioning & Disposal | Decommissioning Costs   |   | Real discount rate<br>Construction standard estimating system   |
| Disposal Costs |                            | Real discount rate<br>Specified waste fee needed to place the waste into public disposal facilities |   |   |

#### 3.2.1 시공단계

시공비(CC)는 재료비, 노무비, 경비의 합산으로 산정되며, 이 비용 요소들은 선정된 재료의 시공방법과 시공면적에 의해 결정된다. 즉 선정된 재료에 따라서 시공비는 크게 변동될 수 있다.

본 연구에서는 재료별 시공비를 산정하기 위하여 건축 표준품셈에 의한 원가 계산을 근거로 하였으며, 재료로 인해 발생하는 순수 시공비를 산정하기 위해 운송비, 비품비 등으로 소요되는 공통경비는 시공비 산정에서 제외하였다. 시공비 산정식은 식 (1)과 같다.

$$CC = (CA \times MCpA) + (CA \times ICpA) \quad \text{식 (1)}$$

- Construction Cost(CC) : 시공비용 (원)
- Construction Area(CA) : 시공면적 (m<sup>2</sup>)
- Material Cost per Area(MCpA) : 단위면적당 재료별 단가 (원/m<sup>2</sup>)
- Installation Cost per Area(ICpA) : 단위면적당 설치노무비용 (원/m<sup>2</sup>)

우선 시공면적에 단위면적당 재료별 단가를 곱하여 시공에 필요한 재료비를 산정한다. 그리고 시공면적에 단위면적당 시공별 설치노무비를 곱하여 총 설치 노무비를 계산한다. 산정된 두 값을 합산하여 시공에 소요되는 총 시공비를 예측한다.

### 3.2.2 유지관리단계

재료로 발생되는 유지관리비(MiC)를 수선비(RrC)와 교체비(RtC)로 식 (2)와 같이 구분하며, 각 비용들의 산정방법을 정의하였다. 산정 방법은 건축 표준품셈에서 제공하는 시공 및 해체의 비용 산정방식을 적용하였다. 수선 및 교체 활동 이외의 일반관리비, 운용지원비 등의 공통 경비는 제외하였다.

$$MiC = RrC + RtC \quad \text{식 (2)}$$

- Maintenance Cost(MiC) : 유지관리비용 (원)
- Repair Cost(RrC) : 수선비용 (원)
- Replacement Cost(RtC) : 교체비용 (원)

수선비와 교체비는 건물의 수명에 따라 예측이 가능한 재료의 수선 및 교체횟수를 산출하여 산정식에 대입하며, 각 산정식은 식 (2-1), 식 (2-2)와 같다.

$$RrC = [(CC \times Rr/100) + (DeC \times Rr/100) + (DiC \times Rr/100)] / (1 + RDr/100)^{RrCy} \quad \text{식 (2-1)}$$

- Repair Cost(RrC) : 수선비용 (원)
- Construction Cost(CC) : 시공비용 (원)
- Decommissioning Cost(DeC) : 해체비용 (원)
- Disposal Cost(DiC) : 폐기처리비용 (원)
- Rate of Repairing level(Rr) : 수선율 (%)
- Real Discount rete(RDr) : 실질 할인율 (%)
- Repair Cycle(RrCy) : 수선주기 (년)

수선비는 건물요소의 일부를 수선하는 데 소요되는 비용이

며, 부분 시공, 해체 및 폐기처리 작업을 수행한다. 건물의 총 수선비는 수선 주기별로 소요되는 시공, 해체, 폐기처리 비용을 계산하고, 주기별 실질 할인율을 적용한 현재가치를 환산한다. 수선 작업별 소요 비용은 장기수선계획의 수립기준에 명시된 수선율을 적용하였다.

$$RtC = (CC + DeC + DiC) / (1 + RDr)^{RtCy} \quad \text{식 (2-2)}$$

- Replacement Cost(RtC) : 교체비용 (원)
- Construction Cost(CC) : 시공비용 (원)
- Decommissioning Cost(DeC) : 해체비용 (원)
- Disposal Cost(DiC) : 폐기처리비용 (원)
- Real Discount rete(RDr) : 실질 할인율 (%)
- Replacement Cycle(RtCy) : 교체주기 (년)

교체비의 경우 수선율에 따라 변동되는 수선비용과 달리 교체주기마다 전면적인 시공, 해체, 폐기처리 작업이 요구된다. 각 비용들의 합은 교체주기별 소요 비용을 나타내며, 수선비와 동일하게 실질 할인율을 적용하여 현재가치로 환산한다.

### 3.2.3 해체단계

해체단계에서 발생하는 해체 및 폐기비용(DDC)은 건물 해체에 필요한 해체비(DeC)와 해체로 인해 발생하는 폐기물의 처리비용(DiC)으로 나뉜다. 해체 및 폐기처리비용은 해체비용과 폐기처리비용의 합이며, 공통 경비인 운송비는 비용 산정에서 제외하였다. 해체 및 폐기처리비의 산정식은 식 (3)과 같다.

$$DDC = DeC + DiC \quad \text{식 (3)}$$

- Decommissioning and Disposal Cost(DDC) : 해체 및 폐기비용 (원)
- Decommissioning Cost(DeC) : 해체비용 (원)
- Disposal Cost(DiC) : 폐기처리비용 (원)

해체비용과 폐기처리비용의 산정식은 각각 식 (3-1)과 식 (3-2)와 같다.

$$DeC = (DA + DCpA) / (1 + RDr)^{DeCy} \quad \text{식 (3-1)}$$

- Decommissioning Cost(DeC) : 해체비용 (원)
- Decommissioning Area(DA) : 해체면적 (m<sup>2</sup>)
- Decommissioning Cost per Area(DCpA) : 단위면적당 해체노무비용 (원/m<sup>2</sup>)

- Real Discount rate(RDr) : 실질 할인율 (%)
- Decommissioning Cycle(DeCy) : 해체주기 (년)

해체비는 해체면적에 단위면적당 해체노무비를 곱하여 해체 작업에 소요되는 비용을 산출하고, 실질 할인율을 적용하여 현재가치로 환산한다.

$$DiC = (DA \times SG \times MT \times DiCpT) / (1 + RDr)^{DeCy}$$

식 (3-2)

- Disposal Cost(DiC) : 폐기처리비용 (원)
- Decommissioning Area(DA) : 해체면적 = 시공면적 (m<sup>2</sup>)
- Specific Gravity(SG) : 재료 비중 (g/cm<sup>3</sup>)
- Material Thickness(MT) : 재료 두께 (cm)
- Disposal Cost per Ton(DiCpT) : 톤당 폐기처리비용 (원/ton)
- Real Discount rate(RDr) : 실질 할인율 (%)
- Decommissioning Cycle(DeCy) : 해체주기 (년)

폐기처리비용은 해체로 발생되는 폐기물의 종류에 따라 그 중량을 예측하고 지정폐기물 공공처리 시설 반입 수수료에 대입하여 산정한다. 또한 실질 할인율을 적용하여 현재가치로 환산한다.

#### 4. BIM 기반 건물재료선정 방안 구현

##### 4.1 BIM을 활용한 생애주기비용 예측모델 적용

재료의 생애주기비용을 예측하기 위해서는 방대한 양의 재료 정보가 요구되고 생애주기 단계별로 상이한 차이가 있는 비용 산정 방법을 적용해야 한다. 이러한 문제점을 개선하고 효과적으로 비용을 산출하기 위하여 BIM을 활용한 생애주기비용 예측 모델 적용을 제안하였다. BIM은 객체별 속성정보의 추출이 용이하고 정확한 물량 산출과 타 프로그램과의 연동이 원활하다. 또한 설계저작도구로서 실시간 재료 변경 및 정보 확인이 가능하다. BIM을 활용한 주요 요인은 설계 진행과정에서 재료의 생애주기비용 예측이 가능하고 즉각적인 경제성 반영이 가능하다는 장점 때문이다.

Figure 2는 BIM을 활용한 생애주기비용 예측모델의 적용방법을 나타낸다. 앞서 정의한 생애주기비용 산정방법을 기반으로 재료 DB와 비용 산정알고리즘을 구축하고, 이를 적용한 비용 산출프로그램을 개발하였다. 이 비용 산출프로그램은 BIM과 직접적으로 연동하여 재료의 생애주기비용을 예측한다.

우선 BIM 모델러를 통해 생성된 건물모델은 비용 산정에 필

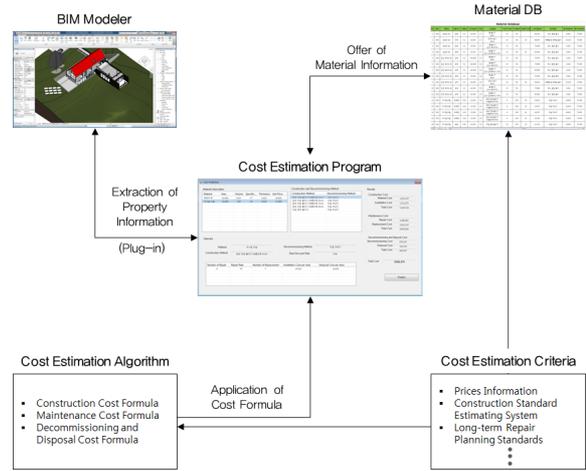


Figure 2 Configuration of BIM-based LCC Prediction Model

요한 시공면적, 부피 등의 건물요소별 속성정보를 제공한다. 이 속성정보를 활용하여 필요 정보의 정의, 추출, 관리가 용이하도록 하였다.

비용 산출프로그램은 설계자가 재료의 생애주기비용을 산정하고 비교, 분석하기 위한 비용정보를 제공한다. 또한, BIM 모델러와 직접 연계하여 비용 산정에 필요한 건물요소의 속성정보를 추출하기 때문에 기존 비용 산정 방식과 달리 신속하고 정확하다는 장점이 있다.

##### 4.1.1 재료 DB

재료 DB는 생애주기비용 산정에 필요한 재료정보를 효과적으로 추출 및 적용하기 위해 Figure 3과 같이 분류하여 구축하였다. 재료의 물가정보와 특성, 건축표준품셈의 데이터를 종합하여 생애주기비용 산출에 필요한 요소를 정의한 것으로 재료의 종류, 재료명, 건물요소, 두께, 단가, 비중과 같은 재료별 정보(a), 시공방법 선택에 따른 재료별 수선주기, 수선율, 교체주기, 시공 노무비의 요소정보(b), 해체 방법 다른 재료별 비용 정보(c), 재료 종류에 따른 톤당 폐기처리비용 정보(d)로 분류하였다.

| Material Database |     |      |        |                       |     |                 |         |        |         |                        |            |                        |        |
|-------------------|-----|------|--------|-----------------------|-----|-----------------|---------|--------|---------|------------------------|------------|------------------------|--------|
| 번호                | 재료명 | 건물요소 | 두께(mm) | 단가(원/m <sup>3</sup> ) | 비중  | 시공방법            | 수선주기(년) | 수선율(%) | 교체주기(년) | 노무비(원/m <sup>3</sup> ) | 폐기방법       | 폐기비(원/m <sup>3</sup> ) |        |
| 1                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (습식)      | 25      | 5%     | -       | 89,242                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |
| 2                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 인양제 불기 (습식)     | 10      | 5%     | 20      | 68,087                 | 다중 및 다중 불기 | 33,110                 | 75,405 |
| 3                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (간식-양제불기) | 25      | 5%     | -       | 70,996                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |
| 4                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (간식-양제불기) | 10      | 5%     | 20      | 85,994                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |
| 5                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (간식-양제불기) | 25      | 5%     | -       | 70,976                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |
| 6                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (간식-양제불기) | 25      | 5%     | -       | 70,996                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |
| 7                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (간식-양제불기) | 25      | 5%     | -       | 85,994                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |
| 8                 | 석재  | 외장벽  | 21     | 32,354                | 2.7 | 물 불리기 (습식)      | 25      | 5%     | -       | 70,976                 | 믹스, 장만 불기  | 2,918                  | 75,405 |

Figure 3 Development of Material Database (a) Material Information (b) Material Information by Construction Method (c) Material Information by Decommissioning Method (d) Waste Disposal Cost by Material

#### 4.1.2 비용 산출프로그램

비용 산출프로그램은 재료의 생애주기비용을 산출하기 위한 응용 프로그램이다. C언어를 통해 개발하였으며, 비용 산정알고리즘과 재료 DB를 기반으로 구동된다. 비용 산정알고리즘은 앞서 정의한 생애주기비용 산정방법 통해 구축하였고, 비용 산출 프로그램에 적용하였다. 또한, 비용 산정기준 및 재료정보를 바탕으로 구축된 재료DB로부터 생애주기비용 예측에 필요한 정보를 추출한다. 이 프로그램은 BIM 모델러와 직접 연계가 가능하며, BIM 모델로부터 비용 산정에 필요한 속성정보를 추출한다.

Figure 4는 BIM 모델러(Revit)와 응용 프로그램간의 연동 화면을 나타낸다. 설계자는 BIM 모델러를 통해 직접 비용 산출 프로그램(a)을 실행하고, 건물요소를 선택한다. 비용 산출에 필요한 건물요소의 면적, 두께, 부피, 종류 등의 속성정보(b)를 추출하며, 재료 데이터베이스의 정보와 비용 산정 알고리즘을 통해 재료의 생애주기비용을 산정한다.

Figure 5는 구축된 비용 산출프로그램의 UI(User Interface)이다. 비용 산출프로그램은 건물요소의 재료 정보(a), 시공 및 해체 방법(b), 재료별 시공 및 해체방법에 따른 결과와 생애주기 비용 산정 비용요소(c)를 제공하며, (d)는 생애주기비용 산정결과 값을 나타낸다.

비용 산출프로그램의 생애주기비용 산출과정은 다음과 같다.

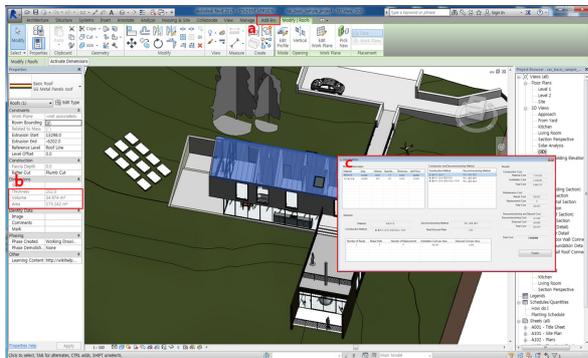


Figure 4 Linkage between BIM Modeler and Cost Estimation Program (a) Revit Plug-in (b) Building Material Attributes (c) Cost Estimation Program

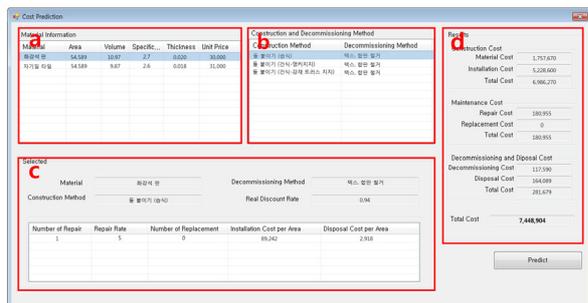


Figure 5 Cost Estimation Program UI (a) Material Information (b) Construction & Demolition Information (c) Results of the Selection (d) LCC Results

1) 재료의 선택, 2) 재료의 시공 및 해체방법 선택, 3) 생애주기비용 산출. 우선 BIM 모델에서 발주자 및 설계자가 경제성 평가를 원하는 건물요소를 선정하면 비용 산출프로그램은 재료DB로부터 추출된 건물요소별 재료 정보를 불러온다. 그리고 선택한 재료의 시공 및 해체 방법을 결정하여 재료의 수선 및 교체 주기, 노무비, 철거비 등을 확인한다. 최종적으로 3장에서 정의한 각 비용의 산정방법에 따라 시공비, 유지관리비, 해체 및 폐기처리 비용을 산출하게 된다. 이처럼 산출된 생애주기비용의 결과 값을 통해 설계자는 각 재료별 비용을 비교, 분석하여 선택한 재료의 경제성을 평가한다. 최종적으로 비용 산출프로그램은 설계자가 경제적인 측면을 고려한 재료선정이 가능하도록 비용 정보를 제공한다.

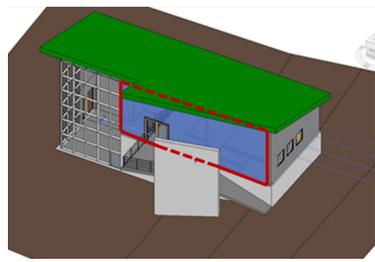
### 5. BIM 기반 건물재료선정 방안 검증

#### 5.1 검증 개요

##### 5.1.1 검증 환경 구축

건물재료선정 방안에 대한 검증은 설계단계에서 건물 외부 외벽의 재료선정을 가정하여 진행하였다. BIM 모델러를 통해 지하 1층, 지상 2층 규모의 건물모형을 생성하고, 건물 외벽 면적을 확인하였다(Table 9).

Table 9 BIM Building Model Information

| Category           | Description   |
|--------------------|---|
| BIM Model          |  |
| Size               | 2-story building with basement  |
| Structure          | Reinforced concrete structure   |
| Facade Area        | 58,859m <sup>2</sup>  |
| Expected Life Span | 40 years  |

외벽 면적은 약 59m<sup>2</sup>이며 건물은 철근콘크리트 구조로 앞서 정의한 기준내용연수에 따라 예상수명을 40년으로 한정하였다.

#### 5.1.2 생애주기비용 평가대상 선정

본 평가는 건물 외벽에 사용되는 재료의 생애주기비용 산정을 가정하여 실시하며, 두 재료를 평가 대상으로 선정하였다. 두 재료의 생애주기비용을 비교, 분석하여 설계자가 더 경제적인 재료를 선택하도록 하는 것을 목적으로 한다. 평가 대상으로

**Table 10 Targets for LCC Assessment**

| Category                   | Granitic Slab | Porcelain Tile |
|----------------------------|---------------|----------------|
| Type                       | stone         | stone          |
| Thickness (m)              | 0.020         | 0.018          |
| Specific Gravity (g/cm)    | 2.7           | 2.6            |
| Unit (KRW/m <sup>2</sup> ) | 30,000        | 31,000         |

선정한 두 재료의 정보는 Table 10과 같다.

두 재료의 경제성 측면을 비교, 분석하기 위하여 유사한 종류의 재료를 선정하였고, 선정된 두 재료는 화강석 판과 자기질 타일이다. 이 두 재료는 동일한 종류의 외장재이며, 두께와 비중, 재료단가는 차이가 미비하다.

**5.1.3 생애주기비용 평가조건 선정**

두 재료의 생애주기비용을 산정하기 위해 재료별 시공 및 해체 방법을 선정하였다. 생애주기비용을 비교, 분석하기 위한 평가조건으로서, 유사한 조건을 적용하기 위하여 건축 표준품셈에서 가장 저렴한 시공 및 해체방법을 선정하였다. 두 재료의 시공 및 해체방법과 소요비용은 Table 11이다.

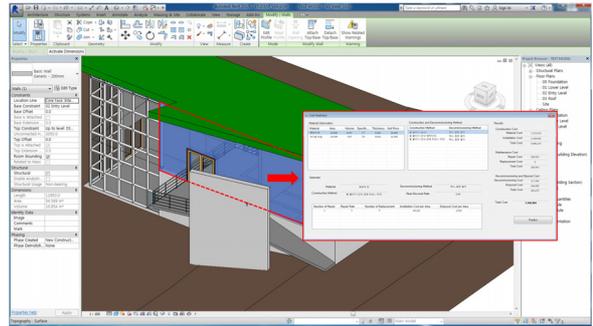
**Table 11 Construction and Decommissioning Method and Related Costs by Material**

| Category                                | Granitic Slab               | Porcelain Tile      |
|---|-----------------------------|---------------------|
| Construction Method                     | Wet construction            | Compressioning      |
| Construction Cost (KRW/m <sup>2</sup> ) | 119,242                     | 2,918               |
| Decommissioning Method                  | Removal of plywood and weer | Removal of the tile |
| Demolition Cost (KRW/m <sup>2</sup> )   | 46,815                      | 16,833              |

시공 및 해체방법의 선택에 따라 '장기수선계획의 수립기준'에 명시된 수선주기와 수선율을 적용하고, '기준내용연수표'에 명시된 철근 콘크리트 건물의 예상수명인 40년을 적용하여 유지관리단계에서 재료의 수선 및 교체횟수를 예측하였다(Table 12). 건물의 예상수명을 40년으로 적용한 결과, 화강석 판의 경우

**Table 12 Repair & Replacement Frequency by Material**

| Category                         | Granitic Slab | Porcelain Tile |
|----------------------------------|---------------|----------------|
| Repair Cycle (years)             | 25            | 8              |
| Repair Rates by Repair Cycle (%) | 5             | 10             |
| Replacement Cycle (years)        | -             | 30             |
| Number of Repair                 | 1             | 4              |
| Number of Replacement            | -             | 1              |



**Figure 6 Estimation of BIM-based LCC**

교체작업이 없고 수선주기가 비교적 길어 1회의 수선이 발생한다. 반면, 수선주기가 짧은 자기질 타일의 경우 4회의 수선과 1회의 교체작업이 요구된다.

**5.2 검증 결과**

**5.2.1 재료별 생애주기비용 예측결과**

BIM 기반 생애주기비용 예측모델을 활용하여 두 재료의 생애주기비용을 산정하고, 결과 값을 도출하였다. 산출된 화강석 판과 자기질 타일의 생애주기비용의 결과 값은 Table 13과 같다. 그 결과, 시공비는 화강석 판이 약 2배 높은 반면 유지관리비용은 자기질 타일이 약 30배 높다. 그리고 해체 및 폐기비용은 자기질 타일이 3배정도 높게 나타났다.

**Table 13 LCC Results by Material**

|   |  | Estimation Cost (KRW)          | Granitic Slab | Porcelain Tile |
|---|--|--------------------------------|---------------|----------------|
| Con-<br>struction<br>Costs                    | Material Costs                         |                                | 1,757,670     | 1,816,259      |
|   | Installation Costs                     |                                | 5,228,600     | 1,512,475      |
|   | Total Construction Costs               |                                | 6,986,270     | 3,328,734      |
| Maintenance<br>Costs                          | Repair<br>Costs                        | Partial Construction Costs     | 170,935       | 1,094,663      |
|   |  | Partial Decommissioning Costs  | 4,183         | 324,325        |
|   |  | Partial Disposal Costs         | 5,837         | 67,994         |
|   |  | Total Repair Costs             | 180,955       | 1,486,982      |
|   | Replacem<br>ent Costs                  | Complete Construction Costs    | -             | 2,514,086      |
|   |  | Complete Decommissioning Costs | -             | 744,867        |
|   |  | Complete Disposal Costs        | -             | 156,158        |
| Total Replacement Cost                        | -                                      | 3,415,110                      |               |                |
| Total Maintenance Costs                       |  | 180,955                        | 4,902,092     |                |
| Decomm<br>issioning<br>&<br>Disposal<br>Costs | Decommissioning Costs                  |                                | 117,590       | 678,337        |
|   | Disposal Costs                         |                                | 164,089       | 142,210        |
|   | Total Decommissioning & Disposal Costs |                                | 281,679       | 820,547        |
| Life Cycle Costs                              |  |                                | 7,448,904     | 9,051,373      |

### 5.2.2 재료별 생애주기비용 평가

Figure 7은 재료별 생애주기비용을 분석한 그래프이다. 화강석 판은 시공비 > 해체 및 폐기처리비 > 유지관리비 순이며, 자기질 타일은 유지관리비 > 시공비 > 해체 및 폐기처리비 순으로 높게 나타났다. 단일 재료의 경우, 화강석 판은 초기 시공비에 비해 유지관리와 해체 및 폐기처리비는 매우 낮았다. 반면 자기질 타일은 낮은 시공비에 비해 유지관리와 해체 및 폐기처리비는 높은 것을 알 수 있다.

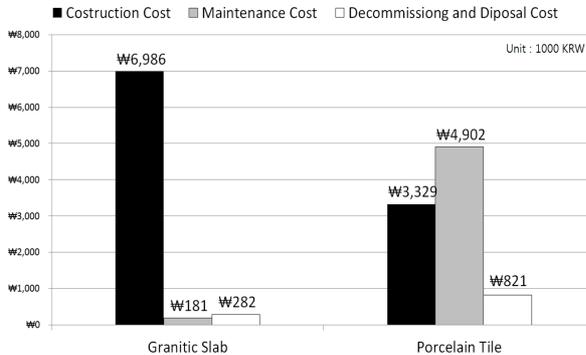


Figure 7 LCC Analysis Graphs by Material

Figure 8은 두 재료의 전 생애주기 동안에 발생하는 비용을 비교한 누적 그래프이다. 초기 시공비는 화강석 판이 더 높지만, 유지관리비를 포함한 생애주기비용은 수선 및 교체주기가 짧아서 유지관리비가 자주 투입되는 자기질 타일이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

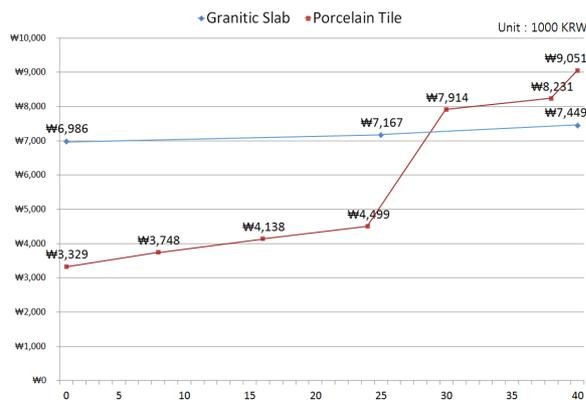


Figure 8 LCC Cumulative Graphs by Material

### 5.2.3 실질 할인율과 내용연수 변화에 따른 민감도 분석

생애주기비용 예측의 주요 고려변수로 실질 할인율과 내용연수를 변화시켜 민감도 분석을 실시하고, 그 변화를 확인하였다.

건물의 내용연수를 40년으로 한정하고 실질 할인율을 0%에서 2%까지 적용한 재료별 생애주기비용을 산출하였다(Table

14). 화강석 판은 할인율이 증가하여도 비용 변화가 적었고, 상대적으로 수선 및 교체 작업이 많이 발생하는 자기질 타일의 경우 할인율의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

Table 14 Sensitivity Analysis by Changes in Real Discount Rates

| Real Discount Rate (%) | Life Cycle Cost (Unit ; 1000 KRW) |                |
|------------------------|-----------------------------------|----------------|
|                        | Granitic Slab                     | Porcelain Tile |
| 0.0                    | 7,766                             | 10,852         |
| 0.5                    | 7,648                             | 9,827          |
| 0.94                   | 7,449                             | 9,051          |
| 1.0                    | 7,550                             | 8,954          |
| 1.5                    | 7,467                             | 8,210          |
| 2.0                    | 7,397                             | 7,575          |

실질 할인율을 0%로 적용하고 내용연수를 최소 20년에서 최대 80년으로 한정하여 생애주기비용의 변화를 확인하였다 (Table 15). 내용연수 40년을 기준으로 내용연수가 증가할수록 자기질 타일의 소요비용이 더 많이 발생하였다.

Table 15 Sensitivity Analysis by Changes in Service Life

| Service Life (year) | Life Cycle Cost (Unit ; 1000 KRW) |                |
|---------------------|-----------------------------------|----------------|
|                     | Granitic Slab                     | Porcelain Tile |
| 20                  | 7,396                             | 4,318          |
| 30                  | 7,766                             | 5,400          |
| 40                  | 7,766                             | 9,051          |
| 50                  | 7,766                             | 11,304         |
| 60                  | 8,135                             | 11,756         |
| 70                  | 8,135                             | 16,730         |
| 80                  | 8,505                             | 17,183         |

## 6. 결론

본 연구의 목적은 재료의 생애주기비용을 기반으로 건물재료 선정의 의사결정을 지원하는 데 있다. 이를 위해 기존 건물재료 선정과 관련된 선행연구들을 분석하여 문제와 한계점을 도출하고 개선방안을 제안하였다. 우선 재료의 생애주기비용 산정 기준 및 방법을 정의하고, BIM을 활용하여 생애주기비용 예측모델을 적용하였다. 이 모델을 통해 건물재료를 대상으로 생애주기비용을 예측하고 비교, 분석을 수행하였다.

본 연구에서 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 선행연구 현황 분석 결과, 재료선정 관련 기존 연구들은 크게 기능 및 성능, 경제성, 친환경 측면 위주로 진행되고 있다. 하지만 제한적인 재료 정보로 인해 종합적인 경제성을 반영하지 못한 재료선정이 이루어지고 있다. 이를 해결하기 위해 재료의 생애주기비용의 변화를 확인해야 한다.

- 재료의 생애주기비용을 각 단계별로 세분화하고 산정 방법을 정의하였다. 단계별 비용은 크게 시공비, 유지관리비, 해체 및 폐기처리비로 구분되며, 비용 산정조건과 기준을 통해 각 비용의 산정방법을 정의하였다.
- 건물재료선정 방안의 구현방법으로 BIM을 활용하여 생애주기비용 예측모델을 적용하였다. 이 예측모델은 신속하고 정확한 비용 산출과 정보제공이 가능하였다.
- 건물재료선정 방안에 대한 검증은 건물 외벽에 사용되는 두 재료를 대상으로 생애주기비용을 예측 및 비교, 분석하여 수행하였다. 이를 통해 재료로 인한 잠재적 발생 비용을 예측하고, 생애주기비용을 반영한 재료선정이 가능함을 확인하였다.

이와 같이 본 연구에서 제안한 건물재료선정 방안은 재료선정과정에서 요구되는 다양한 의사결정 요소 중 재료의 경제적인 요소를 반영한 비용정보를 제공한다. 이는 초기 설계단계에서의 건물재료선정에 유용한 정보로 활용될 것으로 판단되며, 이를 통해 건물의 성능향상과 비용 절감을 기대할 수 있다.

재료를 선정하기 위해서는 복잡하고 다양한 요구조건이 반영되어야 한다. 따라서 향후 연구로서 경제적인 측면과 함께 기능 및 성능, 환경요소 등을 포함한 복합적인 의사결정 요소의 반영이 요구된다. 또한, 재료의 생애주기비용 산정에 중요한 요소인 시공 및 해체 방법 선정에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 도시건축 연구 개발사업(No. 13-도시건축-C3)과 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2014R1A2A1A11051772)을 받아 수행되었음.

## References

Alibaba H, Z, Özdeniz M, B (2004), "A building elements selection system for architects", *Building and environment*, Vol. 39 No. 3, pp. 307-316.

Castro-Lacouture D, Sefair J, A, Flórez L, Medaglia A, L (2009), "Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia", *Building and Environment*, Vol. 44, No. 6, pp. 1162-1170.

Choi, O-Y(2011), "Comparisons of Selection Methods in Roof Waterproofing", Masters Thesis, Kyonggi University.

de Freitas V, P, Delgado J, M (2013), "Durability of building

materials and components", Springer.

Do, J-Y, Song, H, Soh, Y-S (2008), "AHP Based-Optimal Selection of Concrete Patching Repair Materials Considering Qualitative Evaluation Criteria", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 1, pp. 965-968.

Giudice F, La Rosa G, Risitano A (2005), "Materials selection in the life-cycle design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice", *Materials & Design*, Vol. 26, No. 1, pp. 9-20.

Hong T, Han S, Lee S (2007), "Simulation-based determination of optimal life-cycle cost for FRP bridge deck panels", *Automation in Construction*, Vol. 16, No. 2, pp. 140-152.

Jee, D-H, Kang, K-J (2000), "A method for optimal material selection aided with decision making theory", *Materials & Design*, Vol. 21, No. 3, pp. 199-206.

Morrissey J, Home R, E (2011), "Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 4, pp. 915-924.

Park, J-h, Yung, S-S (2010), "Optimal Life Cycle Cost Design of a Bridge", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 25, No. 6, pp. 115-122.

Park, Y-M, Kim, S-Y (2009), "Economic Analysis of Box Mechanical Behavior Materials Using LCC Analysis", *Journal of the Korea Institute of Construction Engineering and Management*, Vol. 10, No. 6, pp. 40-47.

Perera R, S, Fernando U, L, A, S, B (2002), "Cost modelling for roofing material selection", *Built-Environment*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-24.

Rahman S, Perera S, Odeyinka H, Bi Y(2009), "A knowledge-based decision support system for roofing materials selection and cost estimating: A conceptual framework and data modelling", 25th Annual ARCOM Conference, pp. 7-9.

Song, H, Chung, W-Y (2005), "Development on the Selection of Green Construction Materials for Residential Safety", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 20, No. 4, pp. 63-70.

Whyte A, Scott D (2010), "Life-cycle costing analysis to assist design decisions: beyond 3D building information modelling", 2010 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering and XVII Workshop on Intelligent Computing in Engineering.

Yang J, Ogunkah I, C, B (2013), "A multi-criteria decision

support system for the selection of low-cost green building materials and components”, Journal of Building Construction and Planning Research, Vol. 1, No. 4, p.89.  
Zavadskas E, K, Kaklauskas A, Turskis Z, Tamošaitiene J

(2008), “Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals”, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 14, No. 2, pp. 85–93.