

## 교육시설물의 수선교체비용에 대한 확률론적 분석 연구

### A Probabilistic Analysis on the Repair and Replacement Cost of Educational Facilities

유 영 진\*      손 기 영\*\*      김 지 명\*\*\*      김 태 희\*\*\*\*  
Yu, Yeong-jin      Son, Kiyoung      Kim, Ji-Myong      Kim, Taihui

#### Abstract

Educational facilities are more uncertain about maintenance costs due to their comprehensive and long life-cycle compared to commercial buildings. In addition, maintenance of the existing post management system can not maintain the original function of education facilities continuously and economically. In order to overcome this problem, it is necessary to analyze the repair and replacement cost for the uncertainty factor in maintenance. This study propose a model to determine repair and maintenance cost and cycle of educational facility based on probabilistic estimation concept. For the analysis, Monte Carlo simulation, a probabilistic analysis method, was applied based on the repair and maintenance history data of the educational facilities in Florida. The results of this study can be used as a guideline for quantitative facility management and facility management research.

키워드 : 교육시설물, 수선교체비용, 사고원인분석, 리스크 정량화

Keywords : Educational Facility, Repair and Replacement Cost, Accident Cause Analysis, Risk Quantification

## 1. 서론

### 1.1 배경

교육시설은 시설의 성능 수준에 따라 교육 수준의 질에 영향을 준다. 이에 교육 시설물을 운영하는데 있어 교육 및 연구의 질적 수준에 긍정적인 영향을 미치는 수준의 시설확보와 유지관리가 요구된다. 하지만 이는 재정적 측면에서 인건비와 함께 상당한 부담으로 작용된다. 이를 해

결하기 위해선 교육 시설물의 구조나 설비부터 실험실습 기자재 및 비품까지 구분되는 다양한 유형의 자산을 효율적으로 관리하는 것이 필요하다.

이에 최근 산업계에서는 시설경영관리시스템(Facility management system, FMS)을 구축하여 교육시설물 운영을 지원하는 통합적 관점에 초점을 두고 있다. FMS는 건물 기능의 저하를 막고, 완공 후 다양한 요인에 의해 발생된 설계 및 시공 상의 오류가 커지거나, 건물의 잘못된 사용 및 관리로 건물의 노후화를 가속시키는 요인을 제한하는 작용을 한다. 하지만 기능불능이나 시설 시스템의 부분적인 성능의 저하가 다른 기능의 저하로 연결될 불확실성이 존재하며, 기존의 사후관리방식의 유지관리 형태는 건물본래의 기능을 지속 경제적으로 유지할 수 없다. 이를 위해선 건물 시스템의 부위 및 구성부품의 불확실 요소에 대한 수선교체를 사전에 대비할 수 있어야 한다. 하지만 이러한 불확실한 현상에 대한 추정엔 건축물의 Life cycle동안 발생하는 수선교체이력에 대한 방대한 자료와 장기간의 연구가 요구되어 어려운 실정이다.

이러한 이유로 FM의 중요성에 대해 많은 연구자와 실

\* M.S Student, School of Architectural Engineering, Univ. of Ulsan., Korea

\*\* Assistant Professor, Ph.D., School of Architectural Engineering, Univ. of Ulsan., Korea

\*\*\* Ph.D., Dept. of Construction Science, Texas A&M Univ. College station, USA

Corresponding Author,

Tel: 82-10-3025-6180, E-mail: jimy6180@gmail.com

\*\*\*\* Associate Professor, Ph.D., Dept. of Achitectural Engineering, Mokpo National Univ., Korea

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2017R1C1B1003386).

무자 간에 의견이 일치하지만 FM을 수행하기 위한 수선 교체 비용 평가 측면에 대한 연구는 상대적으로 부족하다 (Dilanthi, 2000). 더욱이, FMS의 수선 및 교체 시기는 시설, 장비의 노후뿐만 아니라 인적 또는 자연적 현상으로 인한 수선교체를 포함하고 있다. 또한, 일반적인 유지관리 품목과 비교해 건물의 종합적이고 긴 Life cycle로 인해 불확실성이 증가해 건물의 특성을 반영하기 어렵다.

이에 본 연구에서는 플로리다 주의 교육시설물에 대한 수선교체 자료를 토대로 수선교체비용에 대한 확률론적 분석을 수행하고자 한다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 방법은 다음과 같다. 첫째, 교육시설물의 시설관리 개념과 국내외 연구동향을 고찰하였다. 둘째, FICURMA 데이터를 토대로 지난 10년간 발생된 교육시설 운영 중 발생된 수선교체이력 데이터를 수집한다. 셋째, 수집된 데이터를 토대로 규모별, 위치별, 계절별로 나누어 수선교체 주요 원인을 분석한다. 넷째, 확률누적분포를 통해 수선교체의 발생 확률과 발생 강도를 분석하여 원인에 따라 추정된 수선교체비용을 비교 분석한다. 최종적으로 몬테카를로 시뮬레이션을 토대로 추정된 사고원인별 모수를 활용하여 원인별 수선교체 비용의 확률분포 특성을 분석한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 교육시설물의 FM

본 연구는 교육시설물 FM 중 유지관리, 수선교체의 분석을 수행하고자 한다. 특히, 시설물의 유지관리는 준공 후 시설·설비의 마모의 발생으로 생기는 노후화와 기능저하 억제를 목표로 하고 있다. 이를 대응할 유지관리가 없이는 내구성, 안전성, 기능성 등의 성능이 현저히 감소하며 이는 교육의 질에 대한 문제로 이어진다. 이에 교육시설물의 유지관리에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 건물의 유지관리 수행 시 발생하는 수선교체 원인의 불확실성에 대해 연구자들의 논의가 지속되고 있다. 이러한 이유에 대해 김종록(2010)에 따르면 수선교체주기는 다음과 같은 불확실성이 존재한다(김종록, 2010).

- 1) 건축 프로젝트의 수행을 위한 목적물은 동일한 제품 이더라도 그 생산방식에 따라 품질에 대한 신뢰성의 차이가 있다.
- 2) 수선교체주기를 설정 시 최소 기능을 상실하지 않고

기회손실비용을 발생시키지 않는 시기를 가지며, 사회 현상으로 인한 조기교체가 유리한 판단으로 작용할 수 있다.

- 3) 수선교체가 발생 시 수선과 교체에 대한 불확실성이 있다.

따라서 수선교체 비용의 추정은 미래 교육시설에 대한 투자금 분석으로 불완전한 조건하에 이루어진다. 이런 불확실성에 대해 일부 FM에 대한 연구는 결정론적 방법을 토대로 비용을 산출하고 있다. 하지만 이는 제한된 수치에 한정시켜 정확한 수치를 파악하기 어렵고 변화에 민감하지 못하다. 이에 본 연구에서는 건축물의 수선교체 비용을 분석할 때, 기존의 결정론적인 분석방법에 잠재된 불확실성을 극복하기 위하여 시뮬레이션을 통한 확률론적 분석방법을 통하여 비용의 확률분포 특성을 도출하고자 한다.

또한, 확률론적 분석방법을 수행할 경우, 시뮬레이션을 이용한 분석 방법은 모델 최적화에 많은 시간과 비용이 소모되어 이를 극복하기 위한 방법으로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 분석 기법이 많이 활용되고 있다(이성수 외, 2007). 이에 본 연구에서는 체계적이고 용이한 분석을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 연구방법으로 선정하였다.

### 2.2 연구동향

교육시설물의 FM 수행에 관한 연구는 건설 산업에서 다양하게 수행되어져 왔다. 일반적인 교육 시설의 FM에 대한 연구는 FM의 성능과 교육의 질은 인과관계가 있는 것으로 여기고 있다. 또한, 교육 및 시설 이용의 차원에서 투자의 극대화 및 교육의 효용성을 높이는데 FM의 역할이 널리 인정되고 있다.

예를 들어 Kaplan and Norton(1996)이 제안한 것으로 FM의 평가 방법으로 balanced scorecard를 이용하여 재정, 경영, 사용자, 학습과 성장의 네 가지 관점을 토대로 단기 운영전략에서 장기적인 비전과 성과로 연결하고자 했다(Kaplan 외, 1996). Amaratunga and Baldry(2000)는 고등 교육의 특성과 연관된 시설 성능 평가 접근법에 관한 연구를 제시하였으며, 이를 위해 balanced scorecard를 토대로 한 프레임워크 개발에 대해서 논하였다(Amaratunga 외, 2000). 또한, Kok and Omta(2009)는 교육을 수행하는 환경에서 FM 활동으로 인한 시설의 기능뿐만 아니라 교육적인 성취에 서비스와 효과에 대해 literature review를 토대로 연구하였으며, 그 결과 FM의 질과 성능이 교육적 성취에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 이를 활용하여 시설 유형화로 수준별 교육성과를 제안하였다(Kok 외, 2009).

하지만 Lavy and Bilbo(2009)의 연구에 따르면, 학생들이 교육시설의 유지관리를 위한 투자가 부족하다고 여기고 있는 것으로 나타났다(Lavy 외, 2009).

이와 같이, 선행 연구들은 교육시설물의 FM 수행을 위한 시설의 성능평가 접근 방법에 대한 측면에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 하지만, 교육시설에 적용 가능한 정확한 FM 비용을 평가하기 위해선 교육시설물 계획 단계에서 발생 가능한 수선교체 원인에 대한 피해를 사전에 예측하여 효율적으로 차년도 예산편성이 가능하도록 체계적인 연구가 필요하다.

### 3. 데이터 수집

#### 3.1 데이터 수집

본 연구에서 사용된 데이터는 FICURMA(Florida Independent Colleges and Universities) 가입자의 수선교체 금액 데이터를 표본추출 하였다. FICURMA란 미국 플로리다 주에 설립된 다양한 교육시설들의 사업 수행 중 발생하는 리스크 관리를 위한 보험 등의 업무를 서비스하기 위해 특별히 설립된 비영리 회사를 말한다.

교육시설물의 수선교체이력의 데이터 분석이 필요할 경우, 장기간의 데이터 수집기간이 요구될 뿐만 아니라 수선교체를 담당하는 기구가 별도로 없기 때문에 일괄적인 관리가 되고 있지 않아 균질성 있는 데이터를 기대하기 어렵다. 하지만 FICURMA는 플로리다 주의 대학들이 자체적으로 돈을 모아서 자금기구를 만든 경우이며, 플로리다 주의 대부분의 대학교의 수선교체이력에 대한 관리를 지속적으로 해왔고 해당하는 모든 학교에서 구체적인 데이터를 공개하고 있다.

또한, 플로리다는 미국 남동부에 위치해 반도를 구성하고 있으며, 북부, 중부 지역에서는 온난 습윤 기후, 남부에서는 열대 몬순 기후와 사바나 기후가 나타난다. 따라서 플로리다 전반적인 기후는 여름에 온도와 습도가 높고 겨울에는 온도와 습도가 모두 낮은 형태를 띤다. 따라서 리스크를 일으키는 기후적 특성이 시설의 노후뿐만 아니라 인적, 자연적 수선교체 원인을 야기하며, 그 특징이 국내 리스크 발생 원인과 유사하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 샘플 수집의 용이성과 균질성을 위해 플로리다 주 내의 대학 교육시설물만을 대상으로 하였으며, 지난 10년간 FICURMA에서 수집한 교육시설물의 수선교체 데이터를 활용하였다.

본 연구에서 활용된 교육시설은 Table 1과 같이 13개

대학시설의 수선교체이력 데이터를 활용하였으며, 본 연구에서 각 대학 교육시설물의 위치나 규모 등의 자료는 미국정부의 교육 시설에 대한 통계 포털인 NCES(National Center for Education Statistics)의 기준을 토대로 하였다.

Table 1. Educational Facilities

University	Established	Location
Nova Southeastern University	1964	Fort Lauderdale
Lynn University	1962	Boca Raton
Barry University	1940	Miami
Jacksonville University	1934	Jacksonville
Webber International University	1927	Babson Park
Florida Institute of Technology	1958	Melbourne
Palm Beach Atlantic University	1968	West Palm Beach
Southeastern University	1935	Lakeland
Ringling College of Art and Design	1931	Sarasota
University of Tampa	1931	Tampa
St. Leo University	1889	Saint Leo
Clearwater Christian College	1966	Clearwater
St. Edwards University	1885	Austin

이렇게 선정된 가입 시설의 데이터는 모두 보험의 약관에 따라 보상받았으며, 이러한 시설 운영 중 발생한 300개의 다양한 수선교체 데이터를 수집하였다. 각 대학에서 발생한 수선교체 발생 원인은 Table 2와 같이 자연재해로 인한 수선교체, 시설 설비의 문제로 인한 수선교체, 사용자에 의한 수선교체, 마지막으로 보상하지 않는 수선교체에 포함하지 않는 모든 수선교체로 각 금액을 분석할 수 있다. 각 4개의 그룹은 실제 발생한 원인을 총 14가지의 지표로 나누어 분류하였다.

타당성이 있는 지표를 얻기 위해 다음과 같이 일부 데이터를 제외시켰다. 첫째, 모수 추정에 오류를 발생시키는

Table 2. Repair and replacement causes classification

group	Level 1	Level 2
Artificiality	Crime	stolen, burglary, falsify
	Vandalism	crush, struck
	Vehicle	car, bus, boat, cart
Nature	Fire	fire damage
	Weather event	hurricane, severe weather, etc
	Lightening	lightening damage
Facility	Mold	mold damage
	Leakage	plumbing, pipe, heater, etc
	Mechanical failure	chiller, elevator, etc
	Overflow	toilet, drain pan, sink, etc
	Power failure	pump, circuit breakers, etc
	Sprinkler	head, heat sensor, etc
etc	Structure failure	bulkhead, ceiling, deck, etc
etc	etc	artwork damaged

수선교체 원인의 발생 수가 2건 미만의 지표, 둘째, 동일한 사고로 여러 수선교체원인이 발생된 경우나 하나의 수선교체의 원인이 다른 원인을 발생시켜 각 데이터간의 독립성이 훼손된 지표 등을 모두 제외하였다(Yu 외, 2017).

### 3.2 데이터 특징

기존의 연구는 교육시설물에서 수선교체이력에 대한 데이터의 문서보존 연한 및 보안에 따라 제한이 된다는 이유로 전문가 자문 및 설문조사 분석방법 등 정성적인 분석 방법이 주로 활용되어왔다. 이와 비교해 보험사의 데이터는 빅데이터의 활용으로 정량적인 분석이 가능하고, 현장에 적용이 가능하다는데 장점이 있다. 하지만 본 연구에선 보험이 적용된 데이터를 활용하여 취약점도 있다. 사용자가 유지관리비용을 투입하는 시점을 기준으로 작성되었기 때문이다. 이는 수선교체 원인의 불확실성으로 일반적인 사전진단과 체계적인 계획에 의해 이루어진 작업뿐만 아니라 사후대처에 기인한 데이터로 발생할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 균질한 데이터를 얻기 위해 다음의 경우는 제외하고 분석한다.

- 1) 피해 원인의 응급성이 적어 보수를 보류한 경우
- 2) 피해 부분이 대수선, 리모델링 등 재건축 작업에 포함되어 보수비용을 청구할 필요가 없는 경우
- 3) 응급성과 관계없이 정해진 법령 및 유지관리계획 아래 수선교체주기의 시기에 포함된 경우

### 3.3 연도별 분석 조건

시설 운영중 피해로 인한 수선교체 비용을 분석할 경우 실질비용을 도출하기 위한 조사가 선행될 필요가 있다. 따라서 Table 3과 같이 미국의 연도별 물가상승률을 이용하

Table 3. Repair and replacement cost for each year: inflation rate

year	past value(\$)	inflation(%)	present value(\$)
2004	3,017	2.7	3,098
2005	166,514	3.4	172,175
2006	52,769	3.2	54,458
2007	20,831	2.8	21,414
2008	91,855	3.8	95,345
2009	62,729	-0.4	62,478
2010	53,903	1.6	54,765
2011	84,845	3.2	87,560
2012	48,777	2.1	49,801
2013	66,640	1.5	67,640
2014	53,498	1.6	54,354
2015	55,317	0.1	55,372

여 평균 수선교체 비용을 2016년을 기준으로 현재 가치로 환산하였다.

## 4. 수선교체 원인 분석

### 4.1 개요

본 장에서는 확률론적 분석하기에 앞서 수집한 데이터의 특성을 분석하기 위해 교육시설물의 특징별로 분류하여 분석하고자 한다. 수선교체이력의 원인 분석을 위해 각 특징별 수선교체 원인을 빈도와 심도로 분석하였으며, 각 원인은 빈도와 심도의 수치로 수선교체원인에 따른 대응방법을 고려할 수 있다.

- 1) 빈도가 낮지만 피해가 큰 수선교체 원인의 경우, 비교적 발생시 손실 최소화에 대한 노력이 필요하다.
- 2) 빈도가 높지만 피해가 작은 수선교체 원인의 경우, 비교적 상시 해당 원인에 대한 주의가 필요하다.
- 3) 빈도와 피해가 모두 높은 수선교체 원인의 경우, 비교적 우선순위의 대처가 요구된다.

이런 대응방법을 이끌어내기 위해 본 연구에서는 수집한 데이터를 교육시설물의 특징인 원인별, 규모별, 위치별, 월별로 구분하여 원인 분석을 수행하였다.

### 4.2 수선교체 발생 원인별

각 수선교체 발생 원인을 자연재해로 인한 수선교체 원인으로 3) Fire, 4) Weather event, 6) Lightning, 8) Mold를, 시설 설비의 문제로 인한 수선교체 원인은 5) Leakage, 7) Mechanical failure, 9) Overflow, 10) Power failure, 11) Sprinkler, 12) Structure failure로 구분하였으며, 사용자에 의한 수선교체 원인은 1) Crime, 13) Vandalism, 14) Vehicle로 분류하여 각 피해를 Figure 1과 같이 분석하였다.

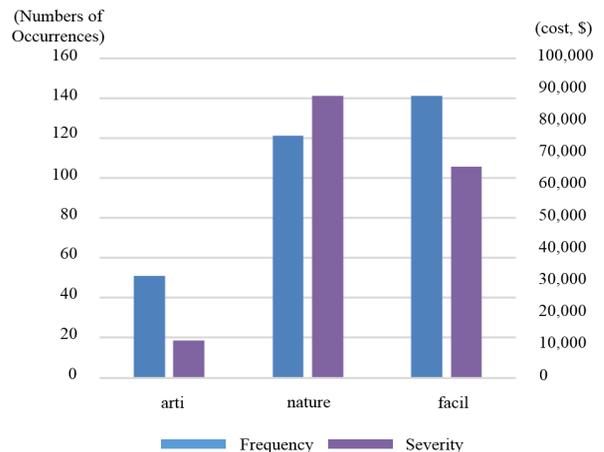


Figure 1. Frequency and severity analysis by accident cause

분석결과, 자연재해, 시설 설비 노후, 사용자에 의한 피해를 순서로 수선교체 비용이 큰 것으로 나타났다. 특히 인적 요인에서 피해는 전체의 2.87%로 거의 비중이 없는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 수선교체 원인별로 분류하였을 때는 Weather event(31.1%), Overflow(16.4%), Leakage(14.5%), Sprinkler(7.3%)가 주요 요인으로 나타났다. 특히 Weather event와 Overflow는 빈도와 심도가 모두 상대적으로 수선교체 비용에 높은 편에 속해 대응을 위해서는 주목해야할 요인으로 판단할 수 있다. 또한, Leakage는 수선교체가 발생하는 빈도는 높지만 평균적인 심도는 낮아 상시 조심해야할 요인이며, Sprinkler는 빈도는 낮지만 평균 심도가 높아서 발생시 손실최소화에 대한 대책과 노력이 필요하다고 판단된다.

### 4.3 규모별

각 대학 교육시설물의 규모는 NCES의 기준으로 하였으며, 각 학교의 면적을 100arce를 기준으로 Large, Small 두 가지로 나누어 Figure 2와 같이 수선교체에 따른 비용 차이를 분석하였다.

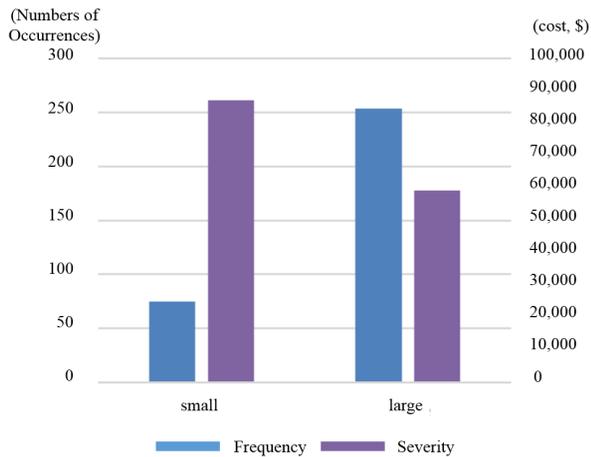


Figure 2. Frequency and severity analysis by size

분석결과, 규모가 Large인 시설물에서 총 수선교체 비용의 69.71%가 발생된 것으로 나타났다. 비교적 규모가 큰 경우 수선할 필요가 요구될 수 있는 시설이 많기 때문에 수선교체 발생 빈도가 크게 차이나는 것으로 판단할 수 있다. 특히, 전체 수선교체 비용 중 Weather event, Overflow, Leakage, Fire가 각각 26.3%, 21.7%, 17.5%, 8.0%의 큰 비율을 차지하는 것으로 분석되어 이에 대한 대응방안 모색이 요구된다.

Small 시설물의 경우엔 빈도는 낮지만 발생하는 평균 수선교체 발생 비용이 큰 것으로 나타난다. 또한, 주요 원인

은 Weather event(42.3%), Sprinkler(14.2%), Mold(9.5%), Leakage(7.5%)로 분석된다. 상기 분석과 비교해 Mold에 대한 비중이 높아서 규모가 Small인 교육시설물에서는 이러한 요인에 대해 주목할 필요가 있다.

### 4.4 위치별

교육시설물의 위치도 또한 NCES의 기준을 이용하여 각 시설물의 위치를 city와 suburb로 나누어 분석하였다. 여기서 city와 suburb의 기준은 시설물의 위치가 있는 지역의 변화한 정도를 나타낸다.

Figure 3에 나온 것과 같이 분석한 결과, city에 위치한 교육시설물의 수선교체 비용이 57.93%를 차지하여 상대적으로 더 높은 것으로 분석된다. 특히, Weather event, Overflow, Leakage, Mold가 주요 요인으로 총 수선교체 비용이 각각 25.7%, 23.7%, 18.9%, 11.0%로 나타났다. 또한, 이를 빈도와 심도로 분석해보면, Leakage와 Overflow의 경우, 심도는 낮지만 빈도가 크게 높아 시설물의 설비의 내구성에 대한 초기 대안을 마련할 필요성이 있으며, Mold의 경우, 빈도에 비해 심도가 높아 곰팡이 등이 생겼을 경우 대처할 수 있는 방안에 대한 효율화를 고려하는 것이 유리하다고 판단할 수 있다.

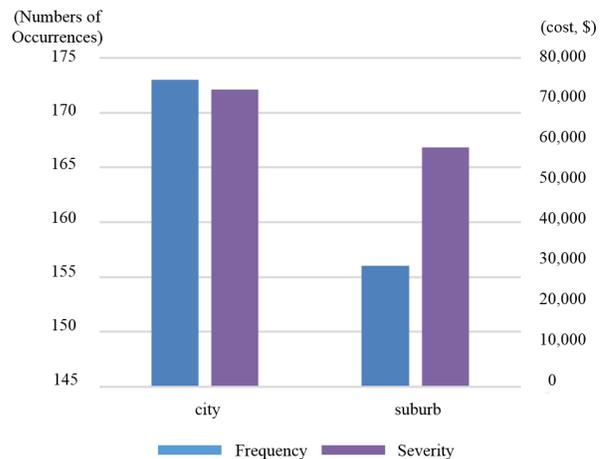


Figure 3. Frequency and severity analysis by location

suburb에 위치한 시설물의 경우에는 Weather event, Fire, Sprinkler, Leakage 순서대로 38.6%, 12.8%, 10.4%, 8.3%로 나타났다. 특히 기후로 인한 피해에서 city에 있는 시설물에 비해서 빈도수가 증가하였으며, 상시 이에 대한 안전대비가 요구된다. 또한, suburb에 있는 시설물은 city와 다르게 Fire와 Sprinkler도 심도가 크게 나타나서 화재와 스프링클러 고장에 대한 능률적으로 대처할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

#### 4.5 계절별

본 연구에서 분석 수행하고자 하는 교육시설물은 플로리다를 기반으로 하고 있으며, 시설물의 총 수선교체 비용은 상기 분석에 따라 Weather event에 가장 큰 영향을 받고 있다. 이는 플로리다의 지역 기후와 관계가 있다고 판단할 수 있다. 플로리다는 지역의 특징상 여름에는 온도가 높고, 지속적인 우기로 인해 습도가 높다. 또한, 겨울엔 건기로 온습도가 모두 낮게 나타난다. 따라서 Figure 4와 같이 수선교체가 발생했던 시기를 우기와 건기로 분류하여 비교분석하였다.

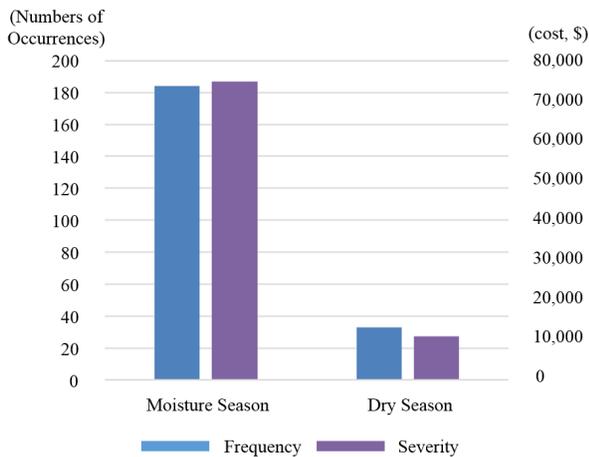


Figure 4. Frequency and severity analysis by season

분석한 결과, 우기에 발생한 교육시설물의 총 수선교체 비용은 97.46%로 거의 모든 피해가 우기에 발생한다고 판단할 수 있다. 또한, 빈도와 심도가 모두 높아 교육시설물 운영에 있어 우기엔 건축물의 피해에 대한 대응방안을 고려할 필요가 있다. 특히, wether event의 경우 우기기간동안에 발생하는 총 수선교체 비용 중 34.70%를 차지해 매우 큰 비중을 차지하고 있으며, 낮은 심도에 비해 높은 빈도로 발생하기 때문에 항상 해당 원인으로 인한 수선교체에 대한 대처할 필요가 있다. 그 뒤로 Overflow, Mold, Sprinkler가 각각 18.52%, 10.62%, 10.48%를 차지하고 있으며, 건기에 비해 수선교체 비용이 높게 발생하는 원인들이다. 건기 중 수선교체의 주요 요인은 Weather event (26.51%), Leakage(23.72%), Etc(14.96%), Fire(9.18%)순서대로 크게 나타난다.

이와 같이, 수집한 데이터를 빈도와 심도에 따라 사고원인별 분석을 수행하였지만, 상기 분석은 단순한 기술통계 분석으로 실제 발생하는 수선교체 비용에 대해 설명하는데 한계가 있다. 본 연구의 목적인 교육시설물 FM의 수선교체비용에 대한 정량적인 분석을 위해서는 확률론적인

리스크 추정 방법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 수선교체 비용 추정을 위해, 플로리다의 교육시설물의 수선교체 원인에 따른 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

### 5. 몬테카를로 분석

본 연구에서는 교육시설물의 FMS을 위한 시설 수선교체 비용 평가를 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 FM 평가를 위한 연간 수선교체 비용을 예측해보고자 한다. 이를 위해 데이터 수집을 통해 얻은 플로리다의 13개 교육 시설의 10년간의 수선교체 비용을 토대로 분석을 수행하였다.

#### 5.1 필요성

몬테카를로 분석은 우연적 결과를 통해 모수를 추정하기 위한 실험이다. 모형에서 가정한 확률분포에 따라 모수의 추정치 속성을 이해하기 위해서 사용되며, 이를 위해서 난수를 사용해 데이터를 추출하고 충분히 많은 수의 무작위 실험의 결과를 종합한다. 이로 인해 확률분포를 가지는 하나 이상의 변수를 시뮬레이션을 통해 자신의 평균값과 분산을 가지는 확률분포로 예측치를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구와 같이 수선교체의 14개의 요인들이 불확실한 요인으로 작용하는 경우 기존의 수식적인 방법을 적용하기 곤란하거나 어렵기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션은 이를 분석하고 예측하는데 유용한 수단이 된다.

#### 5.2 모델링

##### 1) 실험조건

시뮬레이션 모델링하기에 앞서 확률변수인 추정변수를 정의해야하는데 기준값과 분포의 크기를 확정하고 그 특성에 따라 분포도를 결정해야한다. 따라서 식 (1)의 두 변수인 F, S를 토대로 본 연구에서는 교육시설물의 수선교체 비용을 추정하였다.

$$R = F \times S \tag{1}$$

여기서,

- R: 전체 수선교체 발생 비용
- F: 연간 수선교체 발생 빈도
- S: 평균 수선교체 발생 비용

또한, 난수의 특징을 일반적으로 사용되는 삼각형 분포

를 이용하였으며, 이는 리스크 레벨이 0~1 사이의 난수로 주어지도록 하였다. 따라서 대부분의 실험값은 최빈값인 0.5에서 발생하며, 최소값과 최대값에 가까워질수록 같은 기율기로 확률이 감소하도록 난수가 생성된다.

2) 누적분포함수

시뮬레이션하기에 앞서 리스크 레벨에 따른 데이터의 형태를 파악하기 위해 표준 정규 누적 분포의 역함수 값을 분석해보았다. 리스크 레벨을 확률 x로 0~1까지 수집한 데이터를 식 (2)의 누적밀도함수에 적용하였으며, 수선교체 원인별 평균과 표준편차를 표준화시키기 위해 식 (3)을 이용하였다.

$$\rho(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (\text{단, } -\infty < z < \infty) \quad (2)$$

$$z = \frac{X-m}{\sigma} \quad (3)$$

리스크 레벨을 0.05간격으로 20개의 구간으로 나누어 분석하였으며, 누적밀도함수를  $x = \rho^{-1}(R)$ 인 역함수의 형태로 변환하였다.

5.3 평균 수선교체 발생 비용 누적분포함수

수선교체 원인별 평균 수선교체 발생 비용을 분석하기에 앞서 정규성 검토를 수행한 결과, 모든 수선교체 원인의 p-value가 0.05이하로 나타났으며, 누적분포함수 분석에 적합한 분포모형으로 분석할 필요가 있다. 따라서, 본 데이터를 식 (4)와 같이 로그함수로 데이터를 변환하여 활용하였다.

$$Transformed S = \text{Ln}(Original S) \quad (4)$$

Figure 5는 종속변수를 로그화시킨 표준화 잔차에 대한 정규성 검토를 나타내며, 정규분포를 따르는 것으로 판단

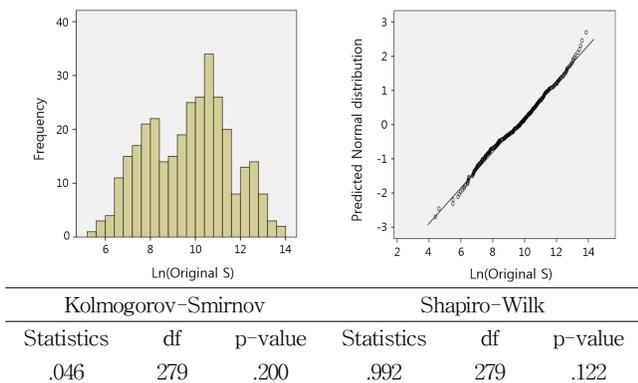
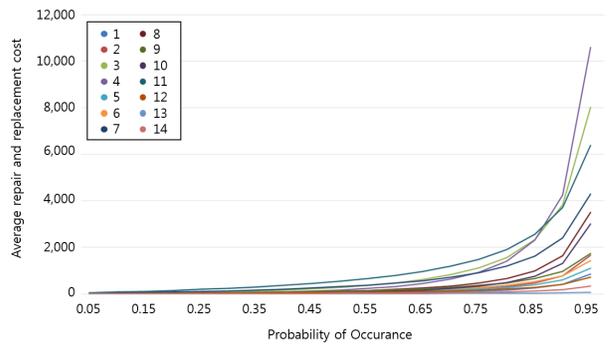


Figure 5. Normality test



code	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ave	8.7	9.2	10.5	10.0	9.6	9.5	10.6	9.9	10.4	9.4	11.3	8.8	7.3	7.9
Std	2.0	1.9	1.9	2.5	1.6	1.7	1.4	2.1	1.5	2.0	1.6	2.1	1.2	1.7
Min	11.1	13.5	12.5	13.3	12.9	11.5	11.8	13.4	13.9	12.6	13.6	12.6	8.1	10.7
Max	11.1	13.5	12.5	13.3	12.9	11.5	11.8	13.4	13.9	12.6	13.6	12.6	8.1	10.7

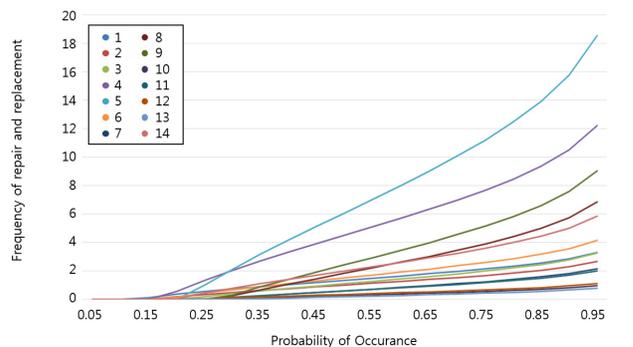
Figure 6. Average repair and replacement cost

된다. 그러므로 본 연구에서는 수선교체 발생 비용을 로그화 시켜 누적분포함수를 분석을 수행하였다.

Figure 6과 같이 X축은 수선교체의 누적 발생확률을 나타내며, Y축은 평균 수선교체 비용으로 누적분포함수를 분석한 결과, 비교적 수선교체가 발생할 확률이 낮은 경우에는 수선교체 원인별 평균 비용이 sprinkler, mechanical failure, fire, overflow 순으로 높게 나타났다. 또한, 수선교체 발생 확률이 높은 경우에는 weather event, fire, sprinkler, mechanical failure 순서대로 높게 나타났다.

5.4 연간 수선교체 발생 빈도 누적분포함수

다음은 수선교체 원인별 연간 수선교체 발생 빈도를 같은 방식으로 Y축을 수선교체의 빈도를 넣어 분석해보았다. 그 결과 Figure 7과 같이 나타났다.



code	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ave	0.11	0.11	0.10	0.41	0.55	0.17	0.04	0.14	0.25	0.03	0.05	0.04	0.01	0.22
Std	0.10	0.10	0.08	0.36	0.49	0.15	0.04	0.12	0.22	0.03	0.04	0.04	0.01	0.20
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	0.54	0.54	0.47	2.02	2.73	0.84	0.20	0.67	1.21	0.17	0.24	0.20	0.07	1.11

Figure 7. Frequency of annual repair and replacement

수선교체가 발생할 확률이 낮은 경우, 수선교체 원인별 발생 빈도가 weather event, crime, etc, lightening 순으로 높게 나왔으며, 수선교체 발생 확률이 높을수록 leakage, weather event, overflow, mold 순서대로 높은 것으로 분석된다.

### 5.5 전체 수선교체 발생 비용 누적분포함수

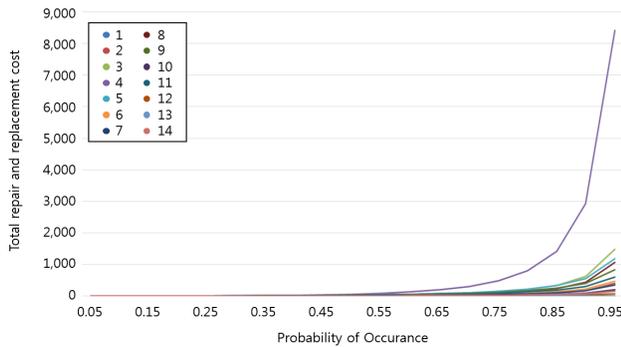


Figure 8. Total repair and replacement cost

상기 분석한 두 데이터를 식(1)에 적용하여 Y축에 총 수선교체 비용을 넣어 Figure 8과 같이 전체 수선교체 발생 비용에 대한 누적부적분포함수로 나타내었다.

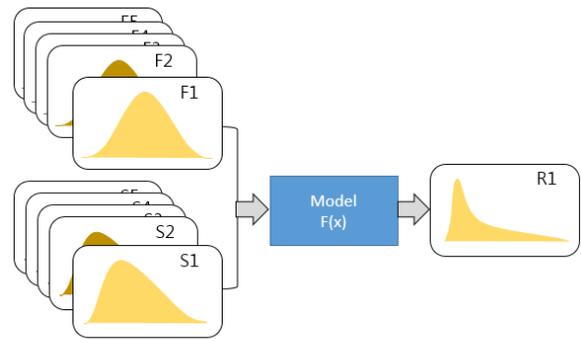
그 결과, 수선교체가 발생할 확률이 낮은 경우에서 발생하는 비용이 weather event, leakage, overflow, fire 순으로 높아 총 수선교체 비용이 적은 지역에서 발생하는 주요 수선교체 원인으로 판단된다. 또한, 수선교체 발생 확률이 높은 총 수선교체 비용이 큰 지역에서 주요 수선교체 원인이 weather event, fire, leakage, mold로 분석된다.

위 분석한 확률누적분포는 건설 프로젝트에서 발생할 수 있는 손해분포에 대해서 파악할 수 있으나, 향후 교육 시설의 FM을 수행할 때 적절하게 수선교체 원인별 특성을 반영하는데에는 한계가 있다. 따라서 몬테카를로 시뮬레이션을 통해서 수선교체 원인별 확률분포를 분석하였다.

### 6. 몬테카를로 시뮬레이션

본 연구에서는 수선교체 발생 원인별 확률 분포로 발생 빈도와 심도를 몬테카를로 시뮬레이션 분석하기 위해 Crystal Ball을 을 도구로 사용하였다. 상기 분석한 누적분포함수와 같은 모델링 조건을 가지고 Figure 9같이 각 사고원인별 전체 수선교체 발생 비용을 분석하였다.

Figure 9는 수선교체 원인 1번인 Crime의 연간 수선교체 발생 빈도(F1)에 대한 확률분포와 Crime의 평균 수선



R : Total repair and replacement cost  
 F : Frequency of annual repair and replacement  
 S : Average repair and replacement cost  
 1~14 : Code number of Causes of repair and replacement

Figure 9. Methodology of Monte carlo simulation

교체 발생 비용(S1)의 확률분포의 결합 모델인 Crime의 전체 수선교체 발생 비용(R1)의 시뮬레이션을 의미한다.

각각의 14가지의 수선교체 원인별로 전체 수선교체 비용에 대하여 10,000회의 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션의 결과를 Table 4와 같이 사고원인별 기술통계분석으로 해석하였으며, 수선교체 원인을 우선순위에 따라 나타내었다. 대부분의 비용을 차지하는 주요 요인은 weather event, leakage, overflow, mold로 나타났으며, 이 요인들이 한 교육시설물에서 발생할 수 있는 연평균 시설 보수 투입금액의 79.64%로 큰 비중을 차지하였다. 또, 투입금액의 표준편차는 수선교체 범위의 평균적 변동 리스크를 의미하며, 변동폭이 좁을수록 안정적인 측정값으로 판단할 수 있다. 이러한 현상은 발생 요인의 발생확률이

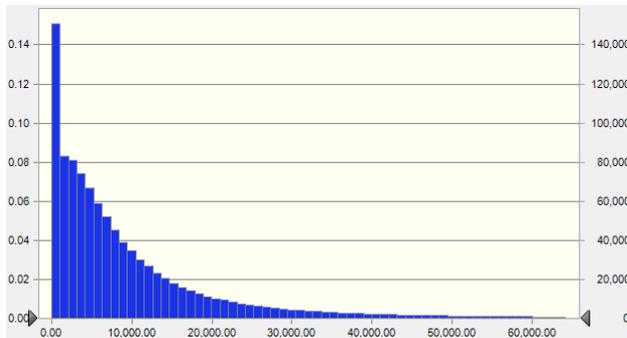
Table 4. Descriptives analysis of simulation result

No.	Cause	No.	Ave.	Std.	Var.
1	Weather event	10,000	172,991	1,925,254.9	3,706,606,429,974
2	Leakage	10,000	29,254	125,475.6	15,744,126,195
3	Overflow	10,000	25,184	95,920.8	9,200,799,873
4	Mold	10,000	21,496	160,020.9	25,606,688,437
5	Fire	10,000	19,100	109,037.5	11,889,176,406
6	Sprinkler	10,000	13,785	58,215.8	3,389,079,370
7	Lightening	10,000	8,849	39,941.8	1,595,347,387
8	Etc	10,000	6,122	36,165.2	1,307,921,691
9	Mechanical failure	10,000	4,224	13,804.4	190,561,459
10	Crime	10,000	4,182	27,230.4	741,494,684
11	Power failure	10,000	2,935	20,248.4	409,997,703
12	Vehicle	10,000	2,355	10,621.5	112,816,262
13	Structure failure	10,000	2,036	14,687.3	215,716,781
14	Vandalism	10,000	39	97.1	9,428

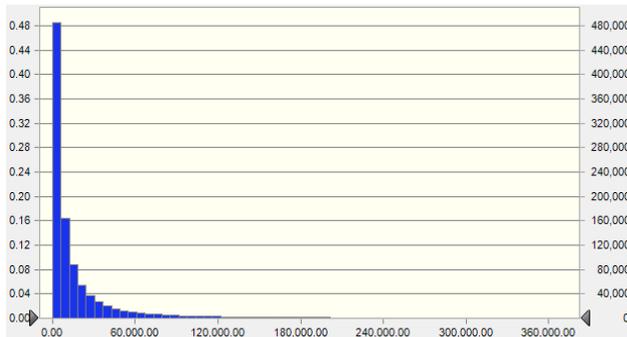
기댓값 근처에 몰려있기 때문이다. 시뮬레이션 결과에서는 weather event, mold, leakage, fire가 각각 1,925,254달러, 160,020달러, 125,475달러, 109,037달러 순으로 높은 것으로 나타났다.

또한, Figure 10과 같이 시뮬레이션 분석으로 주요 요인인 Weather event, Leakage, Overflow의 확률분포를 히스토그램으로 나타내었다. 이 히스토그램에서 가로축은 한 교육시설물에서 발생한 한 해 평균 수선교체 발생 비용이며, 세로축은 발생 확률이다.

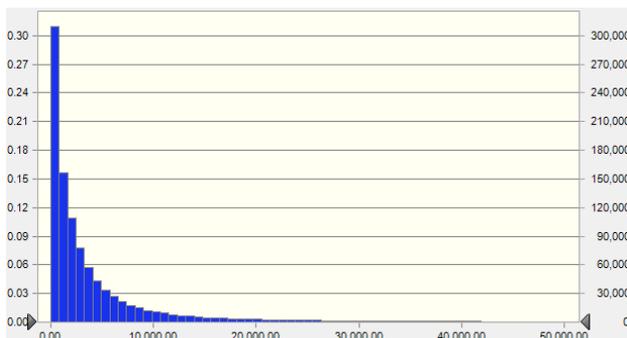
대부분의 리스크 히스토그램과 같이 Figure 10의 히스토그램은 왜도가 왼쪽으로 치우쳐 수선교체의 낮은 비용에서 많이 분포 한다는 것으로도 확인할 수 있다. 또한, 히스토그램의 꼬리길이는 해당 원인에서 발생 가능한 고위험의 발생률을 보여준다. 특히 weather event의 경우에



(a) overflow



(b) weather event



(c) mold

Figure 10. Result of annual repair and replacement simulation

확률분포의 꼬리길이가 수선교체 요인 중 가장 긴 것으로 판단되며, 이는 weather event가 시설관리 중 발생하는 수선교체 비용이 다른 원인보다 고액으로 발생할 확률이 높음을 나타낸다.

상기 분석의 결과를 이용하여 대학 교육 시설마다 1년 동안 발생하는 수선교체 비용에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, Table 5와 같이 weather event, leakage, overflow가 가장 크게 나타났으며, 범위 추정을 통해 최선(best-case), 최악(worst-case), 최빈(most likely)으로 가능한 결과의 시나리오를 도출하였다.

Table 5. Sensitivity analysis

Cause	10%	30%	50%	70%	90%	sensitivity
Weather event	158	2,424	6,524	15,284	53,969	0.67
Leakage	296	2,876	6,008	11,238	26,904	0.30
Overflow	318	2,965	6,036	11,014	25,260	0.27

## 7. 결론

본 연구에서는 플로리다 주의 교육시설물에 대한 수선 교체이력을 기초 데이터로 하여 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하였다. 추정된 사고원인별 확률분포를 활용하여 원인별 수선교체 비용의 확률분포 특성을 분석하였다. 이에 대한 결과는 아래와 같다.

첫째, 원인별 분석한 결과, 자연 환경요인으로 발생한 경우와 시설 노후에 의한 수선교체가 97.13%로 대부분을 차지하였다. 수선교체 원인별로 분류하였을 시 Weather event(31.1%), Overflow(16.4%), Leakage(14.5%), Sprinkler(7.3%)가 주요 요인으로 나타났다. 또한, 이를 수선교체 원인에 따라 규모별, 위치별, 계절별로 분석하였다. 그 결과, 규모가 Large인 시설물에서 69.71%, 위치가 City인 시설물에서는 57.93%, 우기에 97.46%가 수선교체 원인이 발생하는 것으로 나타났다.

둘째, 본 연구에서 주어진 각 수선교체원인에 대한 비용 발생을 확률론적으로 분석으로 10,000회를 시뮬레이션을 한 후 원인별 비용을 히스토그램으로 확률적 특성을 파악하였다. 그 결과 대학시설에서 발생되는 14가지로 분류된 수선교체 원인의 우선순위는 다음과 같이 나타났다. 1) Weather event, 2) Leakage, 3) Overflow, 4) Mold, 5) Fire, 6) Sprinkler, 7) Lightning, 8) Etc, 9) Mechanical failure, 10) Crime, 11) Power failure, 12) Vehicle, 13) Structure failure, 14) Vandalism으로 각각 연간 비용을 예측할 수 있는 모델의 기초인 히스토그램으로 원인별 확

률분포의 특성을 파악하였다. 본 연구의 결과인 히스토그램의 꼬리 길이는 각각 고위험의 발생률을 나타내며 그 길이가 길게 이어질수록 수선교체의 비용이 고액으로 발생할 확률이 높아짐을 나타낸다.

본 연구의 시뮬레이션 분석 결과인 각 수선교체 원인별 확률분포를 이용한다면 향후 민감도 분석, 시나리오 분석 등을 토대로 국내 교육시설물의 FM 관리에 적용하여 연간 재정계획 단계에서 발생 가능한 수선교체 원인에 대한 피해예측 및 그에 대한 대책마련, 예방 전략 수립 등에 기여할 것이다.

25(5), pp.59-66, 2011

10. Yu, Yeong-Jin, Son, Kiyoung, Kim, Taehui and Kim, Ji-Myong, A Risk Quantification Study for Accident Cause of Building Construction Site by Applying Probabilistic Forecast Concept. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 4(5). pp.45-53, 2017

접수 2017. 7. 27  
 1차 심사완료 2017. 8. 28  
 2차 심사완료 2017. 10. 16  
 2차 재심완료 2017. 1. 19  
 게재확정 2018. 1. 23

### References

1. Dilanthi Amarantunga, Assessment of facilities management performance, Property management, 18(4), pp.258-66, 2000
2. Kim, Jong-Rok, Jung, Young-Han and Son, Jae-Ho, A study on reliability analysis model of the repair and replacement cycle of a building which utilizes Monte Carlo Simulation, Journal of the Korea institute of building construction, 10(2). pp.41-50, 2010
3. Lee, Seong-Soo, Choi, Hee-Bok, Kang, Kyung-In, A financial feasibility analysis of architectural development projects that use probabilistic simulation analysis method, Korea Journal of Construction, 8(3). pp.15-24, 2010
4. Robert S. Kaplan and David P. Norton, The balanced score card measures that drive performance. Harvard Business Review. 1(2). pp.171-179, 1992
5. Herman B. Kok, Mark P. Mobach and Onno S.W.F Omta, The added value of facility management in the educational environment. Journal of Facilities Management, 9(4). pp.249-265, 2011
6. Sarel Lavy and David L. Bilbo, Facilities maintenance management practices in large public schools, Texas. Facilities, 27(1/2), pp.5-20, 2009
7. Jolanta Tamošaitienė, Friedel Peldschus and Yaarob Al Ghanem, Assessment of Facility Management Candidates by Applying Game Theory. Procedia Engineering. 57. pp.1145-1150, 2013
8. Sarel Lavy, John A. Garcia and Manish K. Dixit, KPIs for facility's performance assessment, Part I: identification and categorization of core indicators. Facilities. 32(5/6). pp.256-74, 2014
9. John Woodhouse, Optimal Timing for Replacing Aging or Obsolete Assets. IET Asset Management Conference,