

로지스틱 회귀분석을 이용한 BIM 설계 검토에 의하여 발견된 설계 오류와 그 영향도간의 관계 분석

Analysis of the Relations between Design Errors Detected during BIM-based Design Validation and their Impacts Using Logistic Regression

원종성 김재엽*

Won, Jong-Sung Kim, Jae-Yeob*

School of Architecture, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea

Abstract

This paper analyzes the relations between design errors, prevented by building information modeling (BIM)-based design validation, and their impacts in order to identify critical consideration factors for implementing BIM-based design validation in architecture, engineering, and construction (AEC) projects. More than 800 design errors detected by BIM-based design validation in two BIM-based projects in South Korea are categorized according to their causes (illogical error, discrepancy, and missing item) and work types (structure, architecture, and mechanical, electrical, and plumbing (MEP)). The probabilistic relations among the independent variables, including the causes and work types of design errors, and the dependent variables, including the project delays, cost overruns, low quality, and rework generation that can be caused by these errors, are analyzed using logistic regression. The characteristics of each design error are analyzed by means of face-to-face interviews with practitioners. According to the results, the impacts of design error causes in predicting the probability values of project delays, cost overruns, low quality, and rework generation were statistically meaningful.

Keywords : building information modeling (BIM), design validation, design error, logistic regression

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

설계, 시공 과정에서 발생하는 설계 오류는 재작업, 품질 저하, 공기 지연, 공사비 증가를 유발한다[1,2,3]. 따라서 설계 오류를 절감하기 위한 체계적이고, 효율적인 관리가 필요하다. 하지만 건설 프로젝트에서 설계 오류의 발생은 만연해 있으며, 프로젝트나 조직에 제한을 두지 않고 반복적으로 발견된다[4]. 또한 잦은 설계 변경과[5], 건축 프로젝트의 형태 및 내부 설비가 복잡화되고, 정보가 방대해짐에 따

라 정확한 설계 검토가 어려워지고 있다[6]. BIM (building information modeling)은 각 공종별 도면, 정보, 모델을 통합함으로써 시공 이전에 설계 및 시공 오류를 발견함으로써 현장에서 실제 발생하는 오류의 수를 절감할 수 있고, 설계 검토 과정에서 발견되는 설계 오류의 변경 이력 관리를 가능하게 해준다[7,8]. BIM 기반 설계 검토는 BIM 기반 프로젝트에서 가장 널리 활용되는 BIM 기능 중 하나이며 [9], 설계, 시공전, 시공 단계에서의 BIM 모델 검토, 부재, 공중, 동선간 간섭 체크 등을 포함한다[10]. Figure 1은 BIM 기반 설계 검토 프로세스를 나타낸다. Lee et al.[10]에 따르면, 건설 프로젝트에 BIM 기반 설계 검토의 도입만으로 약 63%의 긍정적인 ROI 분석 결과를 얻을 수 있었다고 보고되었다.

기존 연구에서 BIM 기반 설계 검토를 통한 오류 발생 건수 절감 비율 및 특징 분석[10,11], 재작업 절감[10], 건설폐기

Received : July 10, 2017

Revision received : August 28, 2017

Accepted : October 27, 2017

* Corresponding author : Kim, Jae-Yeob

[Tel: 82-43-841-5203, E-mail: kimjy67@ut.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

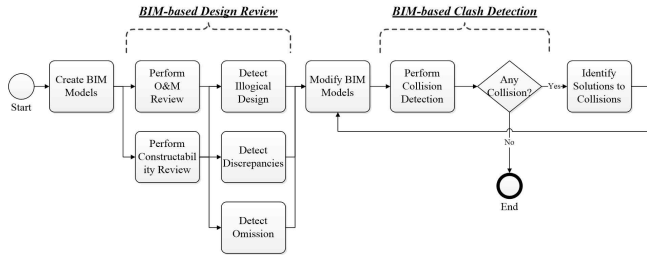


Figure 1. A BIM-based design validation process (based on Won et al.[11] and anumba et al.[12])

물 절감, 공사비 절감, 온실가스 저감[13] 등의 정성적, 정량적 효과에 대한 분석은 다수 수행되었다. 하지만 시공 이전에 BIM 도입에 의하여 발견된 설계 오류의 특징과 설계 오류 방지에 따른 영향 정도에 대한 통계적인 분석은 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류의 특징과 그 영향도간의 관계를 로지스틱 회귀분석을 이용하여 통계적으로 분석하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구는 BIM 기반 설계 검토를 통한 공사비 및 공사 기간 증가, 품질 저하, 재작업 발생 확률을 낮추기 위하여 우선적으로 관리해야 하는 항목 도출을 위한 기초 연구이다. 이를 위하여 한국에서 수행되었던 두 개의 BIM 기반 프로젝트에서 BIM 기반 설계 검토를 도입함으로써 발견되었던 약 800 여건의 설계 오류를 설계 오류 발생 원인별, 발생 공종별로 분류한다. 설계 오류의 분류와 설계 오류로 인한 공사비, 공사 기간, 품질, 재작업에의 영향 여부는 두 개 프로젝트에 참여했던 실무자 집단과의 인터뷰를 통해서 분석한다.

전문가에 의한 분류 및 분석 자료를 기반으로 BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류의 특징과 그 영향도간의 관계를 로지스틱 회귀분석을 이용하여 분석한다. 로지스틱 회귀분석은 어떤 사건이 발생하는지 안하는지를 직접 예측하는 것이 아니라 사건이 발생할 확률을 예측하는 기법으로[14], 판별분석과 달리 변수의 분포에 대한 제약이 요구되지 않는다[15].

로지스틱 회귀분석은 일반적으로 종속변수의 범주가 두 개인 경우에 적용되며, 로짓분석이라고도 불린다[14]. 종속 변수 값은 0과 1 사이의 값을 갖으며, 확률(종속변수 값)이 0.5보다 크면 그 사건이 일어나며, 0.5보다 작으면 그 사건이 일어나지 않는 것으로 예측한다. 독립변수와 종속변수의 관계를 단순회귀분석과 다중회귀분석은 선형으로 가정하지

만 로지스틱 회귀분석은 S자형으로 가정한다. 본 연구에서는 IBM SPSS 24를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 수행하였고, 이분형 종속변수(유발, 비유발)를 설정하고, 독립변수는 설계 오류의 발생원인, 발생공종으로 설정하여 분석하였다. BIM 기반 설계 검토에 의하여 설계 오류 분류시 설계 오류의 발생원인, 발생공종을 가장 널리 활용되고 있는 항목이다[10,11,13].

2. 기존문헌고찰

2.1 설계 오류 관련 연구

설계 오류 유형 분류는 오류를 사전에 방지하는 전략을 계획할 수 있다는 측면에서 매우 유용하기 때문에 다수의 연구에서 설계 오류를 분류하였다[10,11,16,17,18,19]. 국가를 당사자로 하는 계약에 관한 법률(이하 국가계약법)과 많은 연구에서 시공과정에서 발견되는 설계 오류를 비논리적 오류, 도면 상이, 누락으로 분류하였다[10,11,17]. Kwak and Kim[19]과 Kim[18]은 기존의 오류 유형에 시공을 고려하지 않은 오류를 추가적으로 고려하였다. 하지만 시공을 고려하지 않은 오류는 큰 범위에서는 비논리적 오류에 포함된다.

따라서 본 연구는 국가계약법과 다수의 기존 설계 오류 관련 연구의 설계 오류 분류 기준[10,11,17]에 따라 BIM 기반 설계 검토에 의하여 시공 이전에 발견된 설계 오류를 (1)비논리적 오류, (2)도면 상이, (3)누락으로 분류하고, 설계 오류로 인한 영향도 (공사비 증가, 공기 지연, 품질 저하, 재작업 유발)와의 확률관계를 분석하였다. 이는 국내뿐만 아니라 국외에서도 적용 가능한 일반적인 설계 오류 분류 체계이다.

- 1) 비논리적 오류는 설계 정보 자체의 논리적 오류로 부재간 간섭, 각종 법규나 규정의 위반, 시공성 고려 미비, 현장 여건 등이 고려되지 않은 설계 등이 포함된다. 부재간 간섭은 물리적 간섭과 비물리적 간섭으로 분류된다[8]. 물리적 간섭은 부재간의 직접적으로 간섭이 발생하여 시공 및 기능상의 문제가 발생하는 것을 의미하며, 비물리적 간섭은 부재의 설치 및 시공은 가능하나 공간이나 부재의 활용이 불가능한 것을 의미한다. 예를 들면, 공간의 부족으로 설치된 문을 열 수 없는 경우가 있다.
- 2) 도면 상이는 동일 또는 다른 설계 도서(또는 모델) 상의

설계 정보 혹은 용어가 다른 것을 의미한다.

- 3) 누락은 필요한 설계 정보가 부분적으로 기입되지 않거나 표현이 불분명하여 정보 해석 및 적용에 왜곡이 발생할 수 있는 오류를 의미한다.

비논리적 오류는 사전에 관리가 가능한 오류이며[10], 설계 오류가 발생하는 업무 프로세스의 개선을 통하여 시공 이전에 설계 오류 발생을 예방할 수 있다[4]. 특히, BIM의 도입은 업무 프로세스 개선을 통한 설계 오류 절감 및 관리에 도움을 줄 수 있으며, BIM을 활용한 설계 오류 절감 및 관리를 위한 연구가 다수 수행되었다.

2.2 BIM 기반 설계 검토 관련 연구

아직까지 다수의 실무자들은 BIM 기반 설계 검토의 도입 없이 과거 또는 현재의 프로세스만으로도 설계 오류를 방지할 수 있다고 믿고 있다. 이와 같은 실무자 또는 발주처를 설득하기 위하여 다수의 연구에서 BIM 기반 설계 검토에 의한 효과를 정량적으로 측정하였다. BIM 기반 설계 검토에 의한 주요 효과는 설계 변경 건수 감소[20], 노동력 절감[21], 공기 단축[20,21,22], 공사비 절감이었다. BIM 기반 설계 검토에 대한 관심이 증가하면서 이를 발주자의 요구사항, 법규, 규칙 등의 검토를 자동화하는 연구도 다수 진행되었다[23,24,25].

하지만 BIM 기반 설계 검토에 의하여 발견된 설계 오류와 그 영향도간의 통계적 분석은 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 로지스틱 회귀분석을 이용하여 BIM 기반 설계 검토에 의하여 발견된 설계 오류와 그 영향도간의 확률관계를 통계적으로 분석하고, BIM 기반 설계 검토를 도입하여 체계적으로 설계 오류 절감 및 관리하기 위한 주요 고려요인을 도출하고자 한다.

3. 자료수집

3.1 프로젝트 개요

본 논문에서 분석한 두 개의 국내 BIM 기반 프로젝트는 모두 설계 단계에서는 BIM이 도입되지 않았지만, 시공전 단계와 시공 단계에서 발생하는 오류 및 재작업을 절감하기 위하여 BIM 기반 설계 검토를 도입하였다. 첫 번째 프로젝트는 51층의 주거용 건물 두 개 동을 포함하며(총연면적: 120,000m²), 2011년 완공되었다(Figure 2). 2014년 완공된 두 번째 프로젝트는 야구 훈련 시설(야구장과 그 외 부대



Figure 2. A BIM model of the first case



Figure 3. BIM models of the second case

시설)과 지상 4층, 지하 2층 규모의 클럽하우스를 포함하며 (9,995m²), 총 공사기간은 11개월이었다(Figure 3).

3.2 자료 수집 프로세스

시공 전단계와 시공 단계에서 BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류는 두 프로젝트의 BIM 담당자에 의하여 BIM 보고서로 작성되었으며, 발견된 설계 오류를 설명할 수 있는 이미지와 그에 대한 설명, 설계 오류 발생 위치 등이 해당 자료의 수집 및 데이터베이스화를 위하여 BIM 보고서에 기입되었다.

첫 번째 프로젝트에서는 저자들이 사전에 제공한 지침에 따라 15년 경력 이상의 6인의 프로젝트 참여자가 BIM 기반 설계 검토에 의하여 사전에 발견된 설계 오류에 의하여 시공 단계에서 공사비 증가, 공기 지연, 품질 저하, 재작업 발생을 유발할 수 있는가를 분석하였다. 설계 오류에 의한 영향도에 대한 판단은 BIM 보고서에 기입된 각각의 오류에 대한 이미지 파일과 이에 대한 설명, 참여자들의 경험을 기반으로 수행되었다. 두 번째 프로젝트에서는 평균 10년 이상의 경력을 가진 3인의 프로젝트 참여자에 의하여 동일한 프로세스로 분석되었다. 다만, 두 번째 프로젝트에서는 설계 오류로 인한 품질 저하에 대한 영향도 분석은 이루어지지 못하였고, 분석 자료에서 결측치로 제외하였다.

4. 기술통계 분석결과

두 개의 프로젝트에서 BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류의 건수는 각각 711개, 136개(합계: 847개)였다(Table 1). 2 개의 프로젝트 분석 결과, 도면 상이로 인한 설계 오류가 BIM 기반 설계 검토에 의하여 가장 많이 방지되었고(약 48%), 비논리적 오류(28%)와 누락(25%)은 비슷한 수준이었다. 첫 번째 프로젝트에서는 도면 상이가 차지하는 비율이 가장 많았지만(51%) 두 번째 프로젝트에서는 비논리적 오류의 비중이 가장 높았다(57%). 첫 번째 프로젝트는 그 규모가 상대적으로 커, 많은 도면과 정보를 생성해야 했기 때문에 도면 상이 오류가 많았던 것으로 판단된다.

하나의 설계 오류가 여러 개의 공종에서 동시에 발생될 수 있기 때문에 설계 오류 발생공종별 분류에 따른 설계 오류의 총합은 설계 오류 발생원인별 분류에 따른 설계 오류의 총합과 다르다. 예를 들면, 구조 부재와 설비 부재간의 물리적 간섭이 발생한 경우, 발생원인은 비논리적 오류 1건이지만 발생공종은 구조 1건과 설비 1건(총 2건)으로 분류된다. 설계 오류 발생공종별 분류에 따르면, BIM 기반 설계 검토가 적용되었을 때, 구조 공종(52%)에서 오류 감소에 가장 많은 효과를 보였고, 건축(31%), 설비(17%) 순이었다. 하지만 두 번째 프로젝트에서는 구조 공종(41%)뿐만 아니라 설비 공종에서의 오류도 다수 방지되었다(42%).

BIM 기반 설계 검토에 의하여 두 개의 프로젝트에서 시공 이전에 발견된 847건의 설계 오류를 사전에 발견하지 못하였을 때, 공사비 증가, 공기 지연, 재작업의 발생 여부를 프로젝트 참여자의 경험에 기반하여 예측하였다. 품질 저하에의 영향 여부는 첫 번째 프로젝트에서만 분석되었다.

BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류 중 사전에 발견하지 못하였을 때, 공사비 증가, 공기 지연을 유발할 수 있는 비율은 70%, 71%로 분석되었다. 이는 해당 설계 오류들은 사전에 발견하지 못할 경우, 공사비 및 공사 기간이 증가할 확률이 높다는 것을 의미한다. 첫 번째 프로젝트에서는 사전에 발견하지 못하였을 때, 공사비 증가, 공기 지연을 유발할 수 있는 설계 오류의 비율이 78%, 80%였지만 두 번째 프로젝트에서는 두 개 모두 27%에 그쳤다.

실무자와의 인터뷰를 통하여 설계 오류를 발견하지 못했을 때, 설계 오류가 시공단계에서 재작업을 유발했을 것으로 분석된 설계 오류 건수는 첫 번째 프로젝트에서 108건(발견

Table 1. Classification of design errors by causes

Case		Illogical error	Discrepancy	Missing item	Total
(1)	#	155	363	193	711
	%	22%	51%	27%	100%
(2)	#	78	40	18	136
	%	57%	29%	13%	100%
Total	#	233	403	211	847
	%	28%	48%	25%	100%

Table 2. Classification of design errors by worktype

Case		Architecture	Structure	MEP*	Total
(1)	#	286	457	98	841
	%	34%	54%	12%	100%
(2)	#	32	75	76	182
	%	17%	41%	42%	100%
Total	#	318	532	174	1023
	%	31%	52%	17%	100%

MEP* stands for mechanical, electrical, and plumbing

Table 3. Classification of design errors by their impacts

Case		Increased construction cost	Delayed construction schedule	Rework generation	Low quality
(1)	#	553	566	108	552
	%	78%	80%	15%	78%
(2)	#	37	37	25	-
	%	27%	27%	15%	-
Total	#	590	603	133	552
	%	70%	71%	16%	78%

된 설계 오류의 약 15%), 두 번째 프로젝트에서 25건(약 15%)이었다. 재작업을 유발할 수 있는 설계 오류 비율이 두 개의 프로젝트에서 유사하였다. 재작업을 유발할 수 있는 설계 오류는 모두 공기 지연과 공사비 증가 또한 초래할 것으로 분석되었다.

5. 로지스틱 회귀분석 결과 및 해석

BIM 기반 설계 검토를 통하여 사전에 발견된 각각의 설계 오류의 발생원인, 발생공종과 (1)공사비 증가여부, (2)공사 기간 증가여부, (3)품질 저하 유발여부, (4)재작업 유발여부 간의 관계를 로지스틱 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 즉, 로지스틱 회귀 분석을 이용하여, 사전에 설계 오류를 발견하지 못하였을 때, 해당 설계 오류로 인한 공사비 및 공사기간의 증가, 품질 저하와 재작업 유발 확률을 예측하였다. 종속 변수는 (1)공사비 증가 발생여부, (2)공기 증가 발생여부,

(3)품질 저하 발생여부, (4)재작업 발생여부이었고, 독립변수는 다음의 4개 변수를 공통적으로 활용하였다. (1)설계 오류의 구조분야에서의 발생여부(발생, 미발생), (2)건축분야에서의 발생여부(발생, 미발생), (3)설비분야에서의 발생여부(발생, 미발생), (4)설계 오류 발생원인(도면 상이, 누락, 비논리적 오류). 두 개의 프로젝트에서 수집된 자료만을 이용하였지만, 해당 프로젝트에서 발견된 800건 이상의 설계 오류 특성간의 관계를 분석하였기 때문에 로지스틱 회귀 분석이 활용이 가능하다.

5.1 공사비 증가

847건의 데이터의 로지스틱 회귀분석 분석결과는 Table 4-5와 같다. 4개의 독립변수들의 유의성 분석 결과, 통계적으로 유의한 결과를 보였고(총통계량: 357.249, 유의확률: 0.000), 건축분야에서의 설계 오류 발생(0.000), 구조분야에서의 설계 오류 발생(0.016) 설계 오류 발생원인(0.000)의 유의성이 높았다. 모형의 카이제곱값은 368.802, 유의확률은 0.000으로 모형에 포함된 독립변수들의 영향력이 0이라고 할 수는 없으며, 모형은 유용하다고 할 수 있다. 따라서 모든 독립변수는 결합적으로 공사비증가 여부를 구분하는데 유용했다. Nagelkerke R 제곱값에 따르면 종속변수 분산의 약 50%가 모형에 의해 설명된다고 할 수 있다. Hosmer 및 Lemeshow 검정의 카이제곱 값은 로지스틱 회귀모형의 적합도를 나타내는 값이며, 종속변수의 실제치와 모형에 의한 예측치간의 일치정도를 나타낸다. 카이제곱값은 103.929, 유의확률은 0.000으로 유의적으로 나타나 모형의 적합도가 낮은 것으로 나타났지만 분류 정확도는 84%로 통계적으로 유의미한 관계가 있었다.

Table 4. Results classified by logistic regression and their accuracy (cost perspective)

		Classified by LR*		
		Not increased	Increased	Accuracy (%)
Classified by experts	Not increased	167	90	65
	Increased	44	546	93
	Total	-	-	84

LR* stands logistic regression

설계 오류로 인한 공사비 증가여부는 구조(유의확률: 0.000) 및 설비 공종(0.000)에서의 설계 오류 발생여부와

설계 오류 발생원인(0.000)과 통계적으로 유의적인 관계가 있다고 분석되었다. 즉, 구조 및 설비 공종에서의 설계 오류 발생 여부와 설계 오류 발생 원인을 분석함으로써 설계 오류로 인한 공사비 증가여부를 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 5. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on construction cost (all variables)

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Structure	X ₁	-0.964	0.000	0.382	2.621
Architecture	X ₂	-0.409	0.170	0.664	1.506
MEP	X ₃	-2.375	0.000	0.093	10.756
Discrepancy			0.000		
Missing item	X ₄	-3.919	0.000	0.020	50.365
Illogical error		-0.041	0.905	0.960	1.042
Constant		3.438	0.000	31.127	0.032

VAR: variable

$$Pr = \frac{\exp(3.066 - 0.754X_1 - 2.005X_3)}{1 + \exp(3.066 - 0.754X_1 - 2.005X_3)}$$

(단, X₄ = discrepancy)

통계적으로 유의적이지 않은 변수들을 제외하고, 생성한 로지스틱 회귀모형은 다음과 같다(Table 6). 특히, 설계 오류 발생원인 중 누락은 도면 상이와 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 즉, 도면 상이의 경우 누락보다 공사비 증가가 발생할 확률의 비율이 약 47.6배가 될 것으로 예측되었다. 또한 구조공종과 설비공종에서 설계 오류가 발생하지 않을 때에는 발생할 때와 비교하여 공사비 증가가 발생할 확률의 비율이 2.1배, 7.4배가 될 것으로 예측되었다.

Table 6. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on construction cost (selected variables)

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Structure	X ₁	-0.754	0.001	0.470	2.128
MEP	X ₃	-2.005	0.000	0.135	7.407
Discrepancy			0.000		
Missing item	X ₄	-3.840	0.000	0.021	47.619
Constant		3.066	0.000	21.459	

5.2 공기 지연

설계 오류 특성에 따른 공기 지연 유발 확률 예측에 대한 로지스틱 회귀분석 분석결과는 Table 6-7와 같다. 4개의 독

립변수들의 총통계량은 275.961이고, 유의확률은 0.000으로 통계적으로 유의하였고, 건축공종에서의 발생여부(0.002)와 설계 오류 발생원인(0.000)의 유의성이 가장 높았다. 모형의 유의확률은 0.000(카이제곱값: 278.534)으로 모든 독립변수는 결합적으로 공기 지연 여부를 구분하는데 유용하다고 할 수 있다. 종속변수 분산의 40%(Nagelkerke R 제곱값)가 모형에 의해 설명되었다. Hosmer 및 Lemeshow 검정의 카이제곱값의 유의확률이 0.000으로 모형의 적합도가 낮다고 분석되었으나, 분류 정확도는 82%로 통계적으로 유의미한 관계가 있었다.

Table 7. Results classified by logistic regression and their accuracy (schedule perspective)

		Classified by LR		
		Not increased	Increased	Accuracy (%)
Classified by experts	Not increased	149	95	61
	Increased	62	541	90
	Total	-	-	82

공기 지연 여부는 구조(0.011), 건축(0.017), 설비공종(0.000)에서의 발생여부와 설계 오류 발생원인(0.000)이 통계적으로 유의미한 관계가 가졌다. 즉, 건축, 구조, 설비 공종에서의 설계 오류 발생 여부와 설계 오류 발생 원인을 분석함으로써 설계 오류로 인한 공기지연 여부를 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 분석 결과를 로지스틱 회귀모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$Pr = \frac{\exp(3.227 - 0.665X_1 - 0.688X_2 - 2.241X_3)}{1 + \exp(3.227 - 0.665X_1 - 0.688X_2 - 2.241X_3)}$$

(단, X_4 = discrepancy)

설계 오류 발생원인 중 누락은 도면 상이와 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 즉, 도면 상이의 경우 누락보다 공기 지연이 발생할 확률의 비율이 약 29.3배가 될 것으로 예측되었다. 반면, 비논리적 오류는 도면 상이와 통계적으로 유의미한 차이가 없었다. 설비, 건축, 구조공종에서 설계 오류가 발생하지 않을 때에는 발생할 때와 비교하여 공기 지연이 발생할 확률의 비율이 9.4배, 2.0배 1.9배가 될 것으로 예측되었다.

Table 8. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on schedule delay

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Structure	X_1	-0.665	0.011	0.514	1.944
Architecture	X_2	-0.688	0.017	0.502	1.991
MEP	X_3	-2.241	0.000	0.106	9.403
Discrepancy			0.000		
Missing item	X_4	-3.377	0.000	0.034	29.280
Illogical error		-0.048	0.882	0.953	1.049
Constant		3.227	0.000	25.215	0.040

5.3 품질 저하

139건의 결측치를 제외한 708건의 설계 오류가 분석에 사용되었으며, 로지스틱 회귀 분석을 이용한 품질 저하 유발에 대한 예측 결과는 Table 8-9와 같다. 4개의 독립변수들의 총통계량은 492.410(유의확률: 0.000)으로 통계적으로 유의한 결과를 보였고, 건축(0.000), 구조(0.000), 설비공종(0.001)에서의 발생여부와 설계 오류 발생원인(0.000)의 유의성이 높았다. 모형의 유의확률은 0.000(카이제곱값: 508.341)으로 독립변수는 결합적으로 품질 저하 발생여부를 구분하는데 유용했다. Nagelkerke R 제곱 결과값에 따르면, 종속변수 분산의 79%가 모형에 의해 설명되었다. Hosmer 및 Lemeshow 검정의 카이제곱값은 6.402(유의확률: 0.269)으로 가설이 기각됨에 따라 모형이 적합하다고 평가되었고, 분류 정확도는 94%로 통계적으로 유의미한 관계가 있었다.

Table 9. Results classified by logistic regression and their accuracy (quality perspective)

		Classified by LR		
		Not increased	Increased	Accuracy (%)
Classified by experts	Not increased	148	8	95
	Increased	32	520	94
	Total	-	-	94

품질 저하여부는 구조(0.005), 건축공종(0.000)에서의 발생여부와 설계 오류 발생원인(0.000)이 통계적으로 유의미한 관계가 있었다. 즉, 구조 및 건축 공종에서의 설계 오류 발생 여부와 설계 오류 발생 원인을 분석함으로써 설계 오류로 인한 품질저하 여부를 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 10. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on low quality (all variables)

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Structure	X ₁	1.887	0.005	6.602	0.151
Architecture	X ₂	2.551	0.000	12.822	0.078
MEP	X ₃	1.708	0.306	5.520	0.181
Discrepancy			0.000		
Missing item	X ₄	-5.770	0.000	0.003	320.539
Illogical error		0.796	0.602	2.218	0.451
Constant		2.191	0.009	8.947	0.112

$$Pr = \frac{\exp(1.694 + 0.061X_1 + 0.864X_2)}{1 + \exp(1.694 + 0.061X_1 + 0.864X_2)}$$

(단, X₄ = discrepancy)

통계적으로 유의적이지 않은 변수들을 제외하고, 생성한 로지스틱 회귀모형은 다음과 같다(Table 11). 설계 오류 발생원인 중 누락은 도면 상이와 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 즉, 도면 상이의 경우 누락보다 품질저하가 발생할 확률의 비율이 약 31.3배가 될 것으로 예측되었다. 건축, 구조공종에서 설계 오류가 발생할 때에는 발생하지 않을 때와 비교하여 공기 지연이 발생할 확률의 비율이 1.1배, 2.4배가 될 것으로 예측되었다.

Table 11. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on low quality (selected variables)

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Structure	X ₁	0.061	0.002	1.063	0.941
Architecture	X ₂	0.864	0.000	2.372	0.422
Discrepancy			0.000		
Missing item	X ₄	0.238	0.000	0.032	31.250
Constant		1.694	0.000	5.456	0.183

5.4 재작업 유발

설계 오류 특성과 재작업 발생 확률간의 관계에 대한 로지스틱 회귀분석 분석결과는 Table 10-11과 같다. 4개의 독립변수들의 유의확률은 0.000으로 통계적으로 유의하였고(총통계량: 97.869), 건축(0.000), 설비공종(0.000)에서의 발생여부와 설계 오류 발생원인(0.000)의 유의성이 높았다. 모형의 카이제곱값은 118.846, 유의확률은 .000으로 모형에 포함된 모든 독립변수는 결합적으로 재작업 발생 여부를 구분하는데 유용했다. Negelkerke R 제곱값에 따르

면, 종속변수 분산의 23%가 모형에 의해 설명되었다. Hosmer 및 Lemeshow 검정의 카이제곱값은 11.243 유의 확률은 0.128으로 가설이 기각되어 모형이 적합한 것으로 분석되었고, 전체 분류 정확도는 84.3%였다.

Table 12. Results classified by logistic regression and their accuracy (rework perspective)

	Classified by LR			Accuracy (%)
	Not increased	Increased		
Classified by experts	Not increased	714	0	100
	Increased	133	0	3
	Total	-	-	84

재작업 유발여부는 건축공종(0.000)에서의 발생여부, 설계 오류 발생원인(0.000)과 통계적으로 유의적인 관계가 있었다. 즉, 건축 공종에서의 설계 오류 발생 여부와 설계 오류 발생 원인을 분석함으로써 설계 오류로 인한 재작업 발생 여부를 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 13. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on rework generation (all variables)

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Structure	X ₁	-0.167	0.636	0.846	1.181
Architecture	X ₂	-2.325	0.000	0.098	10.230
MEP	X ₃	-0.204	0.647	0.815	1.227
Discrepancy			0.000		
Missing item	X ₄	-2.420	0.000	0.089	11.243
Illogical error		-0.443	0.155	0.642	1.557
Constant		-0.466	0.219	0.627	1.594

$$Pr = \frac{\exp(-0.638 - 2.222X_2)}{1 + \exp(-0.638 - 2.222X_2)}$$

(단, X₄ = discrepancy)

통계적으로 유의적이지 않은 변수들을 제외하고, 생성한 로지스틱 회귀모형은 다음과 같다(Table 14). 설계 오류 발생원인 중 누락은 도면 상이와 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 즉, 도면 상이의 경우 누락보다 공기 지연이 발생할 확률의 비율이 약 11.2배가 될 것으로 예측되었다. 건축공종에서 설계 오류가 발생하지 않을 때에는 발생할 때와 비교하여 공기 지연이 발생할 확률의 비율이 10.2배가 될 것으로 예측되었다.

Table 14. Statistical relationships between detected design errors and their impacts on rework generation (selected variables)

	VAR	B	P-value	Exp(B)	1/Exp(B)
Architecture	X_2	-2.222	0.000	0.108	9.259
Discrepancy	X_4	-2.414	0.000	0.089	11.236
Missing item					
Constant		-0.638	0.000	0.528	1.894

5.5 재작업 유발을 고려한 영향도 분석

두 프로젝트 사례의 전문가 집단은 재작업을 유발할 수 있는 설계 오류는 공기 지연과 공사비 증가를 초래할 것으로 분석하였다. 또한 일반적으로 재작업은 공사비증가, 공기 지연, 품질 저하를 발생시킬 수 있기 때문에 공사비증가, 공기 지연, 품질 저하 발생 확률 예측을 위한 독립변수로서 설계 오류로 인한 재작업 발생 여부를 추가적으로 고려하여 로지스틱 회귀분석을 수행하였다. 분석결과, 공사비증가, 공기 지연, 품질 저하 발생확률의 분류정확도는 88%, 85%, 94%였다. 이는 각각 기존 모델의 정확도가 4%, 4%, 0% 높아진 수치였다. 품질 저하(유의확률: 0.595) 발생확률 예측에 재작업이 발생할 수 있는 설계 오류가 영향을 미치지 않은 반면, 공사비(0.000)와 공사기간(0.000) 증가에는 통계적으로 유의미한 영향을 준다는 것을 의미한다. 즉, 설계 오류로 인한 재작업 발생 여부를 독립변수로 사용할 경우, 공사비증가, 공기지연, 품질저하 예측값을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.

6. 결 론

BIM 기반 설계 검토의 정량적인 성과 분석을 위한 연구는 다수 진행되었지만 BIM 기반 설계 검토에 의하여 절감된 설계 오류와 그 영향도간의 관계를 정량적으로 분석한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 BIM 기반 설계 검토에 의하여 방지된 설계 오류의 발생원인, 발생공종과 (1)공사비증가, (2)공기 지연, (3)품질 저하, (4)재작업 발생 확률간의 관계를 로지스틱 회귀분석을 이용하여 통계적으로 분석하였다. 이를 위하여 두 개의 국내 BIM 기반 프로젝트의 사례 분석을 수행하였다. 두 프로젝트에서 BIM 기반 설계 검토를 통하여 총 847건의 설계 오류가 발견되어 분석자료로 활용되었다.

분석 결과, 구조, 건축, 설비 공종에서의 설계 오류 발생과 설계 오류의 발생원인 분석을 통한 (1)공사비증가(84%), (2)공기 지연(82%), (3)품질 저하(94%), (4)재작업 발생(84%) 확률 예측에 대한 분류 정확도는 모두 82% 이상으로 높은 정확도를 보였다. 설계 오류 발생원인은 4개 항목의 확률 예측에 통계적으로 가장 유의미한 영향을 미쳤다. 즉, 설계 오류 발생원인이 해당 설계 오류로 인한 공사비증가, 공기지연, 품질저하, 재작업발생의 예측에 가장 많은 영향을 미친다는 것을 의미한다. 특히, 설계 오류 발생원인 중 도면 상이의 경우 누락보다 4개 항목에의 영향 발생확률이 11.2배~320.5배 차이를 보일 정도로 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 이는 BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류 중 도면 상이로 인한 설계 오류를 해결, 관리할 필요가 있다는 것을 의미한다. 공기 지연의 발생확률 예측에 구조, 건축, 설비공종에서의 발생여부가 모두 통계적으로 유의미한 영향을 미쳤다. 하지만 공사비증가, 품질 저하 발생확률 예측에는 각각 건축, 설비공종에서의 발생여부가 유의미하지 못한 영향을 미쳤고, 재작업 발생확률 예측에는 건축공종에서의 발생여부만이 통계적으로 유의미한 영향을 미쳤다. 이는 얻고자 하는 결과에 따라 관리해야 하는 공종이 다르다는 것을 의미하며, 구조, 건축, 설비 순으로 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 설계 오류의 발생원인, 발생공종 뿐만 아니라 설계 오류로 인한 재작업 발생여부까지 고려한 설계 오류의 영향도 분석 결과, 분류 정확도는 0%~4% 증가하였으며, 설계 오류로 인한 재작업 발생여부가 공사비, 공사기간 증가에 통계적으로 유의미한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 즉, 재작업이 발생할 수 있는 설계 오류의 경우 집중적인 관리가 필요하다.

본 연구는 BIM 기반 프로젝트에서 가장 널리 사용되고 있는 BIM 기반 설계 검토를 통하여 발견된 설계 오류 중 보다 우선적으로, 체계적으로 관리해야 하는 요인들을 도출하였고, 이를 기반으로 한 설계 오류관리를 통하여 공사비증가, 공기 지연, 품질 저하 발생 확률을 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 향후에는 보다 많은 BIM 기반 프로젝트의 자료를 수집하고 추가적으로 설계 오류의 발생원인과 발생공종 외에 다른 항목에의 영향도를 분석하고자 한다.

요 약

본 논문은 BIM 기반 설계 검토를 통하여 사전에 방지된

설계 오류와 그 영향도를 통계적으로 분석한다. 이를 위하여 한국에서 수행되었던 2개 BIM 프로젝트에서 BIM 기반 설계 검토를 도입함으로써 발견되었던 약 800여건 이상의 설계 오류를 설계 오류 발생 원인별(비논리적 오류, 도면 상이, 누락), 발생 공종별(구조, 건축, 설비)로 분류한다. 시공 이전에 발견된 설계 오류로 인하여 발생할 수 있는 재작업과 공사비, 공사기간, 품질에의 영향 여부를 해당 현장의 실무자와의 인터뷰를 통해서 분류하고, 설계 오류와의 확률적 관계를 로지스틱 회귀분석을 이용하여 분석한다. 분석결과, 설계 오류 발생원인이 공사비 증가, 공기 지연, 품질 저하, 재작업을 유발 확률 예측에 통계적으로 가장 유의미한 관계가 있었다. 두 개의 프로젝트에서 수집된 자료만을 활용하여 설계 오류 간의 관계를 분석하였지만 설계 오류의 특성의 관계가 유사하다는 점에서 의미가 있다고 할 수 있다. 향후에는 다수의 프로젝트에서 수집된 자료를 분석하여 이를 검증하고자 한다.

키워드 : 건설정보모델링 (BIM), 설계 검토, 설계 오류, 로지스틱 회귀분석

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP; Ministry of Science, ICT & Future Planning) (NRF-2017R1C1B5016643) and by Korea National University of Transportation. We would like to express thanks to Prof. Ghang Lee at Yonsei University for sharing valuable data.

References

1. Bubshait A, Al-Abdulrazzak A, Design quality management activities, *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 1996 Jul;122(3):104-6.
2. Lopez R, Love P, Design error costs in construction projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, 2012 May;138(5):585-93.
3. Han S, Love P, Pena-Mora F, A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects, *Mathematical and Computer Modelling*, 2013 May;57(9-10):2044-53.
4. Love PED, Lopez R, Edwards DJ, Goh YM, Error begat error: design error analysis and prevention in social infrastructure projects, *Accident Analysis & Prevention*, 2012 Sep;48:100-10.
5. Lee Y, Lee T, Kim J, Han C, Kim S, The study of quality control in engineering on the turnkey project-focus on change orders at the construction phase, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 2001 Sep;2(3):58-66.
6. Acharya NK, Lee Y, Kim J, Design errors: Inefficiency or carelessness of designer? *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2006 May;20(2):192-5.
7. Peterson F, Hartmann T, Fruchtera R, Fischera M, Teaching construction project management with BIM support: Experience and lessons learned, *Automation in Construction*, 2011 Mar;20(2):115-25.
8. Eastman C, Teicholz P, Sacks R, Liston K, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, 2nd ed, NJ: Wiley; 2011, 598 p.
9. Lee G, Lee J, Jones SA, *The Business Value of BIM in South Korea*, Bedford (MA): McGraw Hill Construction; 2012.
10. Lee G, Park KH, Won J, D3 city project - economic impact of BIM-assisted design validation, *Automation in Construction*, 2012 Mar;22:577-86.
11. Won J, Cheng JCP, Lee G, Quantification of construction and demolition waste prevented by BIM-based design validation: case studies in South Korea, *Waste Management*, 2016 Jan;49:170-80.
12. Anumba C, Dubler C, Goodman S, Kasprzak C, Kreider R, Messner J, Saluja C, Zikic N, *The BIM Project Execution Planning Guide and Templates - Version 2.0*, University Park (PA): CIC Research Group, Department of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University; 2010, p. 1-90.
13. Won J, Quantification of greenhouse gas emissions prevented through building information modeling (BIM)-based design validation - case studies in South Korea, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 2017 Feb;38(2):71-7.
14. Lee H, Lim J, *SPSS 12.0 Manual*, Seoul (Korea): Bobmunsa; 2006, 547 p.
15. Lee M, Kim J, Exploring the factors affecting K-entertainment tourism by simultaneous logistic equation modeling, *Journal of the Korean Contents Association*, 2015 Nov;15(11):550-8.
16. Lopez R, Love PED, Edwards DJ, Davis PR, Design error classification, causation, and prevention in construction engineering, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2010 Aug;24(4):399-408.

17. Park HK, A study on the effect of pre-detecting errors using BIM in the pre-construction phase. [Dissertation]. [Seoul (Korea)]: Yonsei university; 2011, 134 p.
18. Kim J. The construction plan of design error management system in construction projects, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 2008 Oct;10(3):231-8.
19. Kwak C, Kim Y. An analysis for the causes of design quality declining from the perspective of a contractor in the apartment construction projects. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2010 Dec;26(12):193-200.
20. Giel BK, Issa RR, Olbina S. Return on investment analysis of building information modeling in construction. In: Tizani W, editor. *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*; Jun 30 - Jul 2; Nottingham, UK, Nottingham (UK): The University of Nottingham; 2009.
21. Khanzode A, Fischer M, Reed D. Benefits and lessons learned of implementing building virtual design and construction (VDC) technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing (MEP) systems on a large healthcare project. *ITcon*, 2008 Jun;13:324-42.
22. Manning R, Messner JI. Case studies in BIM implementation for programing of healthcare facilities. *ITcon*, 2008 Jun;13:246-57.
23. Ahn Y. Design of rule-based inference engine for the monitoring of harmful environments in workplace. *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, 2009 Dec;14(4):65-74.
24. Kristensen A. BuildingSMART: digital rule checkers. [Master's Thesis]. [Trondheim (Norway)]: Norwegian University of Science and Technology; 2010.
25. Nawari NO. Automating codes conformance in structural domain. *International Workshop on Computing in Civil Engineering*; Jun 19-22; Miami, FL, Miami (FL): American Society of Civil Engineers; 2011, p. 569-77.