



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월
석사학위논문

리모델링 프로젝트의 특성과 에너지 절감 성능 사이의 관계에 관한 연구

- EU 스마트시티 프로젝트를 중심으로 -

조선대학교 대학원

건축공학과

양준호

리모델링 프로젝트의 특성과 에너지 절감 성능 사이의 관계에 관한 연구

- EU 스마트시티 프로젝트를 중심으로 -

Building characteristics influencing to energy saving
performances on EU Smart City Project

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

건축공학과

양준호

리모델링 프로젝트의 특성과 에너지 절감 성능 사이의 관계에 관한 연구

- EU 스마트시티 프로젝트를 중심으로 -

지도교수 조 규 만

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

건축공학과

양 준 호

양준호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김태훈 (인)

위원 조선대학교 교수 조규만 (인)

위원 조선대학교 교수 장우식 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	5
1.2.1 연구의 범위	5
1.2.2 연구의 방법	6
제 2장 EU 스마트 시티 프로젝트 소개 및 이론적 고찰	8
2.1 EU 스마트 시티 프로젝트	8
2.2 스마트 시티 기존연구 분석	15
제 3장 구조방정식 모형	18
3.1 구조방정식 모형에 대한 개요	18
3.2 구조방정식 모형의 분석 절차	23
3.2.1 모델 설정(model specification)	24
3.2.2 모델 식별(model identification)	24
3.2.3 모델 추정(model estimation)	25

3.2.4 적합도 평가(model testing) 26

3.2.5 모델 수정(model modification) 31

제 4장 리모델링 프로젝트의 특성 및 에너지 절감 성능 분석 32

4.1 EU 스마트 시티 리모델링 프로젝트의 특성 32

4.2 EU 스마트 시티 에너지 절감 기술 35

4.3 EU 스마트 시티 에너지 절감 성능 36

4.4 EU 스마트 시티 요인별 데이터 수집 37

 4.4.1 요인별 평가척도 개발 및 데이터 수집 37

 4.4.2 결측값 분석 40

제 5장 구조방정식 모형 개발 44

5.1 신뢰도 분석 및 요인분석 44

 5.1.1 신뢰도 분석 44

 5.1.2 요인분석 46

5.2 모델 개발 및 적합도 평가 52

제 6장 최종 구조방정식 모형 분석	57
6.1 최종 구조방정식 모형 경로 분석	57
6.2 최종 구조방정식 모형 효과분해 분석	61
제 7장 결 론	64
참고문헌	68
감사의 글	

표 목 차

표 1.1	Result of searching from journal of "sustainable cities and society" ·	2
표 2.1	Classification of smart city projects	10
표 2.2	Energy-saving smart city project	11
표 2.3	Renovation techniques for energy performance	14
표 2.4	Research for energy management in building level of smart city	16
표 3.1	Estimated covariance matrix	21
표 3.2	Observed covariance matrix	22
표 4.1	Literature review of building characteristics	33
표 4.2	Project characteristics indices	34
표 4.3	Renovation techniques indices	35
표 4.4	Energy performance indices	36
표 4.5	Data set for SEM	39
표 4.6	Result of frequency analysis	42
표 4.7	Data set for SEM through imputation of missing values	43
표 5.1	Analysis of reliability	45
표 5.2	Initial exploratory factor analysis	48
표 5.3	Result of communalities	49
표 5.4	Final exploratory factor analysis	50
표 5.5	Evaluation of Goodness of fit(GOF)	54
표 6.1	Results of significance test for pathway	60
표 6.2	Direct effect, Indirect effect, Total effect of SEM-1	63
표 6.3	Direct effect, Indirect effect, Total effect of SEM-2	63

그 립 목 차

그림 1.1 Core concept of this study	4
그림 1.2 Research framework	7
그림 3.1 Path model of SEM	19
그림 3.2 Analysis procedure for SEM	23
그림 5.1 Scree plot	51
그림 5.2 Hypothetical SEM	53
그림 5.3 Final SEM among the three factors	56
그림 7.1 Causal relationship between the three factors through core concept	65

ABSTRACT

Building characteristics influencing to energy saving performances on EU Smart City Project

Yang Jun Ho

Advisor : Prof. Cho Kyu-man, Ph.D.

Department of Architectural Engineering

Graduate School of Chosun University

The urbanization phenomenon, which is paying attention all over the world, is the main cause of environmental pollution. In the case of the EU, buildings account for a large proportion of final energy consumption and greenhouse gas emissions. Many researchers are making various efforts to improve the energy performance of aging buildings in smart cities to solve these problems.

However, since most of the research focuses on the software aspects of monitoring and control-oriented using IoT for energy efficiency of buildings, studies dealing with hardware aspects such as physical characteristics of buildings and techniques improving energy performance were insufficient. This study aims to analyze the causal relationship between the three factors (i.e., characteristics of buildings, renovation techniques for energy saving, energy saving performance) by establishing a core concept.

The data for each factor was collected through a case study and analyzed using a Structural Equation Model (SEM). The causal relationship between the three factors and direct/indirect effects through effect decomposition analysis were derived, and the results were obtained: (i) In the causal relationship between the factors, the factor including "Lighting" and "PV system" had the strongest negative effects on energy saving performance (standardized effect = -0.683 , $p < .001$). (ii) In the effect decomposition analysis, "Direction of building" has the greatest indirect effect on "energy saving rate per unit period" by mediating "Lighting" (standardized direct

effects = .258, $p < .01$). Using this causal effect analysis of the three factors can enable the selection of effective renovation techniques and have a positive impact on energy saving performances in the future energy-saving smart city projects.

제 1장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

도시화 현상으로 인해 전체 인구 중 도시에 거주하는 인구 비중이 높아지고 있다. UN은 2050년까지 전 세계 인구의 66%가 도시 지역에 거주하게 될 것이라고 보고 하였다. 이러한 도시화 현상으로 인해 교통, 주택, 공공 서비스 등의 각종 시설이 부족해지고, 무엇보다 환경 오염이라는 큰 문제가 발생하게 된다¹⁾.

이러한 환경 문제를 해결하기 위해 EU는 2030년까지 온실가스 배출 40% 감축을 목표로 하고 있다²⁾. EU의 최종 에너지 소비량 및 온실가스 배출량을 살펴보면, 약 40%를 건물이 차지하는 것으로 나타났다³⁾. 그 이유는 EU 회원국들의 기존 건물들이 노후화로 인해 에너지 성능 측면에서 매우 비효율적이기 때문이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 EU는 스마트 시티 시범 도시를 선정하여 노후화된 건물의 에너지 효율을 높이는 다양한 노력을 하고 있다⁴⁾. 기존 건축물의 리모델링, ICT(Information and Communications Technology) 기술 적용, 지속 가능한 에너지 사용 등을 통해 에너지 소비량을 감소시키고, 재실자의 쾌적성을 높이며, 시장 경제까지 활성화할 수 있다.

이러한 시도에도 불구하고, 스마트 시티와 관련된 연구는 비교적 최근부터 진행되어 오고 있다. 표 1.1은 “Sustainable Cities and Society” 저널에서 제목에 “smart city”라는 단어가 포함된 검색 결과이다. 검색 결과는 리뷰 논문과 연구 논문에 한정되어 있으며, 총 82건이 나타났다. 가장 많이 언급된 키워드는 “Internet of Things(IoT)”로 26회 언급되었다. Khan (2018)은 IoT 기기들의 보안상의 한계를 다루고 있으며, 신뢰 관

* 이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 과제(NRF-2020R1A2C2009799)의 지원을 받아 수행된 연구의 결과를 중심으로 작성되었음.

- 1) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2015). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).
- 2) European Commission. (2014). Climate action. http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm.
- 3) IEA - Intelligent Energy Agency. (2017). Policy pathways: Energy performance certification of buildings - A policy tool to improve energy efficiency. <https://www.iea.org/reports/policy-pathways-brief-building-energy-performance-certification>
- 4) Dall'O', G., Galante, A., and Pasetti, B. (2012). A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks, Sustainable Cities and Society, Elsevier, 4(1), pp. 12-21.

리(trust management) 방법을 통한 접근방식을 개발하여 IoT의 취약한 보안을 개선하고, 에너지 친화적으로 작업할 수 있는 방법을 조사하였다. 이를 통해 스마트 시티에 배치된 IoT 기기들의 정보를 감지하고 전파하여 교통, 의료, 건물 관리 등의 분야에서 IT 기반 서비스 이용의 실현을 목표로 한다⁵⁾. Chithaluru et al. (2020)은 스마트 시티 내의 센서 기반 통신의 향상 및 네트워크 수명 극대화 시키고자 IoT를 채택하여 녹색 무선 센서 네트워크(WSN:Wireless Sensor Network)를 구축하고자 한다. 이를 위해 효율이 높은 라우팅 프로토콜(I-AREOR)을 제안하였다. 이처럼 기존의 연구들은 IoT와 같은 기술들을 주로 다루고 있다⁶⁾.

표 1.1 Result of searching from journal of "sustainable cities and society"

Keyword	Frequency
IoT	26
Transport	13
Security	11
Privacy	9
Computing(fog, cloud, edge, intelligent)	9
ICT	8
Big data	8
Sustainability	8
WSN(Wireless Sensor Network)	7
Machine learning	6
Policy	5
Energy Efficiency	4
Energy management	3

*Journal : Sustainable Cities and Society

*Search method : Searching "Smart city" in title

*Article types : Review articles, Research articles

5) Khan, Z. A. (2018). Using energy-efficient trust management to protect IoT networks for smart cities, Sustainable Cities and Society, 40, pp. 1-15.

6) Chithaluru, P., Al-Turjman, F., Kumar, M., and Stephan, T. (2020). I-AREOR: An energy-balanced clustering protocol for implementing green IoT in smart cities, Sustainable Cities and Society, Elsevier, 61, 102254.

한편, 표 1.1에서 볼 수 있듯이, 앞서 말한 EU의 스마트 시티 정책과 관련된 “에너지 효율성”, “에너지 관리”는 각각 4회, 3회로 언급이 적은 편이다. Iddianozie & Palmes (2020)은 건물에너지 소비량을 줄이는 데 효과적인 건축물 관리 시스템(BMS:Building Management System)을 다루었다. 일반적인 BMS는 스마트 기기인 IoT로 구성된다. 이 연구는 차별적 모델을 개발하여 IoT 기기와 데이터 사이에서 생기는 이질성으로부터 초래되는 문제에 대한 해결책을 제시하였으며, 스마트하고 지속 가능한 도시 내에서 건물에너지 소비량을 대폭 줄이고자 시도하였다⁷⁾. Gopinath et al. (2020)은 효과적인 에너지 관리를 위하여 비침입 부하 모니터링(NILM:non-intrusive load monitoring) 시스템을 개발하고자 한다. NILM 기법은 단일 에너지 미터를 사용하여 건물에서 사용하는 가전제품과 전기의 에너지 소비량을 모니터링한다. 이를 통해 사용자가 가전제품의 사용 행동을 이해하도록 돕고 에너지 소비량을 줄이는 데 도움을 준다⁸⁾. 이처럼 기존 스마트 시티의 에너지 효율과 관련된 연구는 IoT 기술 등을 활용한 모니터링과 통제 위주의 소프트웨어적인 측면에 집중하여 에너지 효율화를 추구해 왔다. 반면 에너지 성능에 영향을 미치는 하드웨어적인 측면(즉, 건축물의 물리적인 성능, 에너지 성능 향상 기술 등)에 관한 연구는 부족했다.

따라서 본 연구에서는 에너지 효율이 높은 스마트 시티로의 전환을 위해 노후화 건축물의 속성이 리모델링 공사를 통해 에너지 성능에 미치는 간접적인 영향을 살펴보고, 건축물의 속성과 에너지 성능 사이의 직접적인 영향 관계 또한 분석하고자 한다. 그림 1.1과 같이, 본 연구에서 진행하고자 하는 연구의 핵심 컨셉을 설정하였으며 그 내용은 다음과 같다. 첫째, 건물의 속성이 건물의 에너지 절감 성능에 어떤 영향을 미치는지를 살펴보았다(즉, 인과관계 I). 둘째, 기존 건물의 속성과 적용된 리모델링 기술의 조합이 에너지 절감 성능에 미치는 영향을 살펴보았다(즉, 인과관계 II). 마지막으로, 건물의 속성과 에너지 절감 리모델링 기술 사이의 인과관계를 살펴보하고자 한다(즉, 인과관계 III).

7) Iddianozie, C., and Palmes, P. (2020). Towards smart sustainable cities: Addressing semantic heterogeneity in Building Management Systems using discriminative models, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, 62, 102367.
 8) Gopinath, R., Kumar, M., Joshua, C. P. C., and Srinivas, K. (2020). Energy management using non-intrusive load monitoring techniques- State-of-the-art and future research directions, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, 62, 102411.

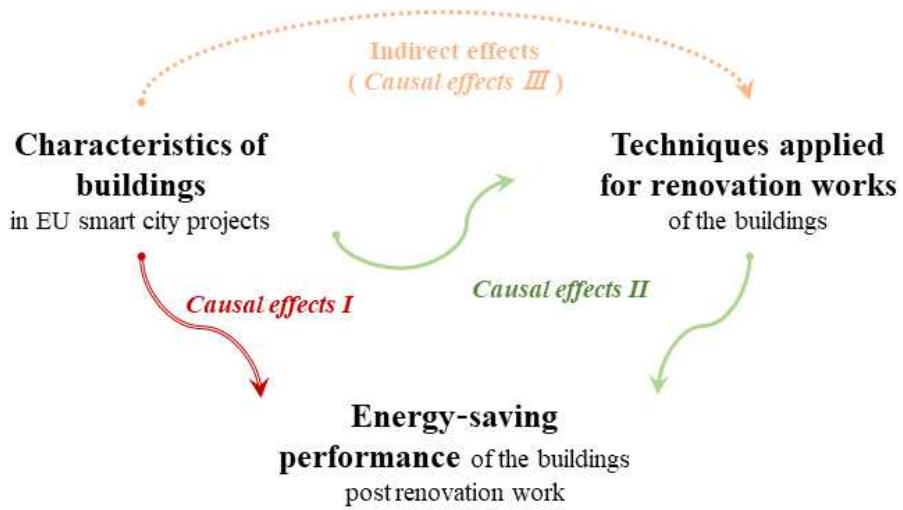


그림 1.1 Core concept of this study

1.2 연구의 범위 및 방법

1.2.1 연구의 범위

스마트 시티는 도시로의 인구 집중 현상으로 발생하는 여러 문제점을 해결하기 위해 효율적이며 효과적인 대안으로 주목받고 있다. 이러한 스마트 시티는 기술, 교통, 안전, 에너지, 정책적 측면 등 다양한 방향에서 연구되고 있다(표 1.1 참고). 많은 연구가 스마트 시티를 ICT, IoT와 같은 기술적인 관점에서 바라보고 있으나, 일부는 사회적 및 환경적 지속가능성 측면에서 살펴봄으로써 다각적인 측면에서 스마트 시티를 논의하였다⁹⁾.

본 연구는 앞서 기술하였듯이 스마트하고 지속 가능한 도시 내에서 노후화된 건축물의 에너지 성능에 영향을 미치는 건축물의 속성과 에너지 절감을 위한 리모델링 기술 같은 하드웨어적인 측면을 다루고자 한다. 이에 본 연구의 범위를 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트로 설정하고자 한다. 또한, 분석대상으로 우리나라보다 활발히 진행되고 있는 EU의 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트 사례를 선정하여 연구를 진행하고자 한다.

9) 김정욱, 최연석, 좌정우, 권준철, 부창진, 박재화, 허유진, 안병후, 김호찬, “스마트 시티”. 제주: 제주대학교 출판부, 2015

1.2.2 연구의 방법

본 연구는 EU의 스마트 시티 프로젝트에서 노후화된 건물의 에너지 개선 활동을 살펴봄으로써, 건물의 속성 및 리모델링 기술 그리고 에너지 성능 간의 세 가지 인과관계를 분석하였다. 그림 1.2와 같이 이 연구는 네 단계로 진행된다.

첫째, EU의 스마트 시티 프로젝트 사례 수집을 통하여, 본 연구에서는 신축건물이 아닌 에너지 성능 개선이 요구되는 노후화 건물의 리모델링 사례를 중심으로, 건축물의 속성, 에너지 절감 기술, 에너지 절감 성능을 분석하였다.

둘째, 수집된 55건의 사례를 중심으로 개발된 명목척도와 서열척도를 활용하여 세 가지 요소별(즉, 건축물의 속성, 에너지 절감을 위한 리모델링 기술, 에너지 절감 성능) 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터 셋을 활용하여, 3가지 인과관계를 분석하기 위해 “가상의 초기 구조방정식 모형(Hypothetical SEM:Structural Equation Model)”을 개발하였다. 이 과정에서, 건물의 속성에 대해 탐색적 요인분석을 실시하여 가상의 초기 구조방정식 모형을 구성하는 3개의 외생잠재변수를 설정했다.

셋째, 구조방정식 모형의 초기 모델을 중심으로 (i) 인과관계가 낮은 경로 및 변수를 제거하고, (ii) AMOS25에서 제공하는 수정지수를 이용하여, 세 가지 인과관계의 신뢰성을 확보한 최종 구조방정식 모형을 개발했다.

마지막으로, 최종 모델의 해석을 통해, 세 가지 요소 사이의 관계를 세부적으로 설명하였다. 한편, 구조방정식 모형 개발 과정에서 SPSS 24와 AMOS25 통계 프로그램이 사용되었다.

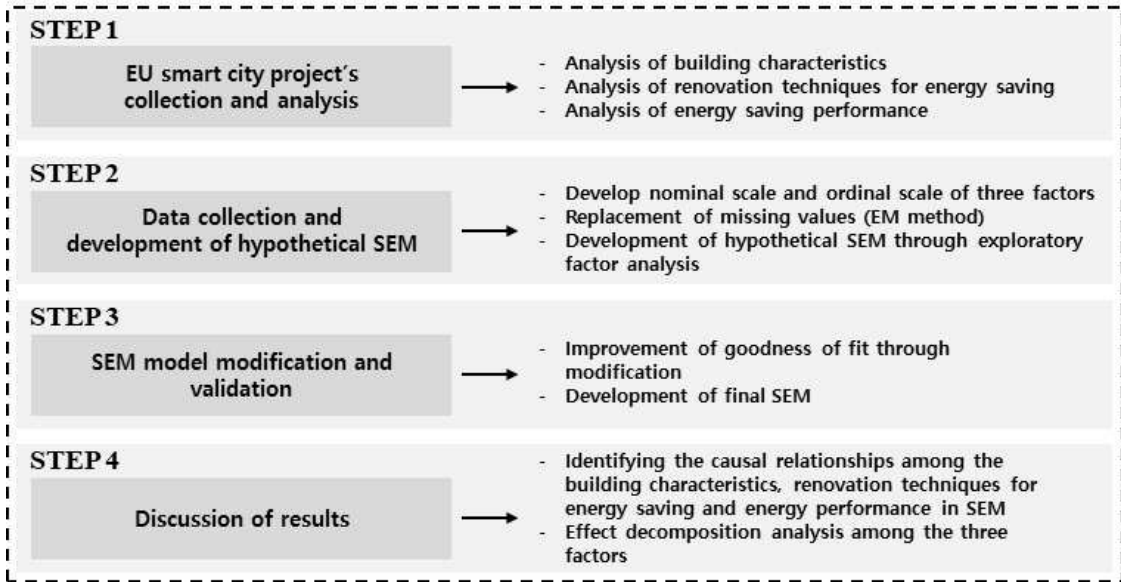


그림 1.2 Research framework

제 2장 EU 스마트 시티 프로젝트 소개 및 이론적 고찰

2.1 EU 스마트 시티 프로젝트

스마트 시티는 ICT를 기반으로 하여, 도시 생활 속에서 유발되는 교통 문제, 환경 문제, 주거 문제, 시설 비효율 등을 해결하여 시민들이 쾌적한 삶을 누릴 수 있도록 한 도시를 의미한다. 그러나 스마트 시티의 개념을 단순히 하나의 정의로 표현하기는 어렵다. 한편, 스마트 시티 관련 기존 문헌과 실행된 프로젝트를 통해서 막연하게나마 그 개념을 정리할 수 있을 것이다. 초기의 스마트 시티는 안전성, 환경 친화성, 효율적인 관리 능력에 초점을 두어 이를 위한 기술 도입을 목표로 하였다¹⁰⁾. 이후에는 스마트 시티의 혼재된 개념을 정립하고자 하는 연구들이 있었으며, 이 과정에서 스마트 시티의 기술 도입을 넘어선 관점에서 바라봐야 한다는 주장들이 확산되었다. 예를 들어, 기존의 도시와 스마트 시티의 철학적인 차이점을 다루었는데, 이는 스마트 시티의 개념이 단순한 기술 도입이 아닌 시민의 관점, 정치공학적인 관점으로 확장되었음을 의미한다¹¹⁾. 그러나 여전히 기술 도입 중심의 연구가 이루어지고 있었다. Hollands (2008)에 따르면 스마트 시티에 대한 연구들이 ICT와 관련된 기술 관점에서 진행되고 있으며, 스마트 시티와 시민의 삶의 질 사이의 연관성을 명확하게 제시하지 못하여 스마트 시티에 대한 명확한 개념 정의가 힘들다¹²⁾. 또한, Ahvenniemi et al. (2017)은 스마트 시티의 개념이 사회적·경제적 측면을 부각시키지만 환경 지속가능성은 상대적으로 간과한다는 점에서 스마트 시티 대신 “스마트 지속 가능 도시(smart sustainable cities)”라는 보다 정확한 용어 사용을 권고했다¹³⁾. 이는 스마트 시티의 개념을 재정립할 필요가 있음을 시사한다. 이처럼, 스마트 시티의 개념은 지금까지도 명확히 확립되어 있지

10) Hall, R. E., Bowerman, B., Braverman, J., Taylor, J., Todosow, H., and Von Wimmersperg, U. (2000). 「The vision of a smart city (No. BNL-67902: 04042)」. Brookhaven National Lab., Upton, NY (US).

11) Song, G., and Wu, L. (2012). Smart city in perspective of inovation 2.0., Urban studies, 19(9), pp. 53-60.

12) Hollands, R. G. (2008). Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial?, City, 12(3), pp. 303-320.

13) Ahvenniemi, H., Huovila, A., and Airaksinen, M. (2017). What are the differences between sustainable and smart cities?, Cities, 60, pp. 234-245.

양을 확인했으나, 기술의 발전으로 시민들의 쾌적한 도시 생활을 가능케 하는 것은 분명하다.

유럽연합 위원회는 유럽통합 관련 조약을 수호하고 EU의 행정부 역할을 담당하며, EU 관련 각종 정책을 입안하고 EU의 이익을 수호하는 EU 통합의 중심 기구이다. 이러한 유럽연합 위원회는 도시에 거주하는 인구의 증가로 인해 발생하는 환경 문제를 해결하기 위해 여러 정책은 물론 특정한 목적을 달성하기 위한 단체를 설립하였다. 그 중 하나는 스마트 시티 프로젝트에 관한 정보의 지속적인 저장소로써 데이터, 경험, 노하우를 교환하는 지식 플랫폼인 “EU Smart Cities Information System(SCIS)”이다. EU SCIS는 스마트 시티의 신축건물, 리모델링, 모빌리티, ICT에 대해 혁신적인 검색 기능을 제공하고 있으며, 표 2.1에서 볼 수 있듯이 스마트 시티 프로젝트 타입에 따라 구분하였다¹⁴⁾.

14) EU Smart Cities Information System. (2020). Projects, <https://smartcities-infosystem.eu/sites-projects/projects>

표 2.1 Classification of smart city projects

Category	Classification by project type	
Project type	Demonstration projects	<ul style="list-style-type: none"> ·Sustainable energy solutions on district level <ul style="list-style-type: none"> -District revitalization, Greenfield development, Optimization of energy systems for high efficiency districts, Brownfield development ·Energy efficiency in buildings <ul style="list-style-type: none"> -ICT based solutions for energy efficiency, New buildings, Renovation, Prefabricated modules ·Smart cities and communities <ul style="list-style-type: none"> -Integration of energy system, ICT and transport in cities ·Energy system Integration <ul style="list-style-type: none"> -ICT based solutions for district heating & cooling, Large scale energy systems - heating & cooling
	Urban planning projects	<ul style="list-style-type: none"> ·Strategic sustainable urban planning
Energy	<ul style="list-style-type: none"> ·Energy efficiency in buildings <ul style="list-style-type: none"> -Building integrated renewable energy sources, Building envelop retrofitting, Building services (HVAC & Lighting), High-performance new buildings, Heat pumps, Small energy storage ·Energy system integration <ul style="list-style-type: none"> -District heating and cooling, Co-generation (CHP), Electrical energy storage, Thermal collectors, Biomass boiler, Photovoltaics, Waste heat recovery, Near-to-surface geothermal energy, Waste-to-energy, Large scale storage, Deep geothermal energy, Thermal storage 	
Mobility & Transport	<ul style="list-style-type: none"> ·Clean fuels and fueling infrastructure, Electric, hybrid and clean vehicles, Bicycle infrastructure, Car-sharing, Intermodality, Urban freight logistics, Car-pooling 	
ICT	<ul style="list-style-type: none"> ·Building energy management system, ICT as planning support, Mobile applications for citizens, Smart district heating and cooling grids demand, Smart electricity grid, Strategic urban planning, Traffic control system, Demand response, Neighbourhood energy management, Travel demand management 	

본 절에서는 EU의 스마트 시티 프로젝트 중, 본 연구의 범위에 해당하는 에너지 절감형 스마트 시티 사례에 대해 살펴보고자 한다. 표 2.2는 지식 플랫폼 EU SCIS를 활용하여 조사한 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트이다. 유럽에서 진행되고 있는 총 11개의 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트 사례를 조사하였으며, 55개의 시범 건축물이 나타났다.

표 2.2 Energy-saving smart city project

No.	Project name	No. of buildings
1	E2ReBuild	4
2	EU-GUGLE	8
3	SCHOOL OF THE FUTURE	7
4	Sinfonia	4
5	ZENN	1
6	R2CITIES	1
7	SMARTER TOGETHER	7
8	PIME'S	1
9	A2PBEER	1
10	P2ENCURE	9
11	EuroPHit	12
Sum of No.		55

대표적인 프로젝트에는 EU-GUGLE, Sinfonia 및 A2PBEER가 있다.

EU-GUGLE은 2020년까지 스마트 시티의 건축물에 리모델링을 실시하여 건축물로부터 발생하는 에너지를 0에 가깝게 만드는 모델 실현을 목표로 한다. 이를 위해 지역 단위에서 건축물의 스마트 리모델링을 실시하여 지역의 요구에 맞는 기술적, 사회 경제적, 재정적 해결책을 제시하고자 노력했다. EU-GUGLE 프로젝트는 핀란드의 Tampere에 위치한 Tammela지역 사례를 제시하고 있다. 이 지역은 도심과 철도 바로 옆에 위치한 전통 주거 지역이며, 대부분의 건축물이 1960년대부터 1980년대에 이르는 시기에 지어져 재정비가 필요했다. EU-GUGLE은 일차적으로 8개의 시범 건축물에 대해 2013.4.1.-2016.12.31.에 이르는 기간 동안 리모델링 작업을 실시했으며, 그 중 4개의 건축물에 대해 2017.3.1.-2017.12.31에 이르는 기간 동안 추가적인 작업을 실시했다. 이러한 프로젝트를 통해, 8개의 빌딩의 연간 에너지 사용량은 약 50% 절감되었으며, 이는 기존의 에너지 절감 목표였던 40%를 웃도는 것으로 나타났다¹⁵⁾.

Sinfonia는 시범 지역인 Bolzano에서 40-50%의 일차 에너지 절감을 달성하고, Bolzano 남서부 지역에서 재생 에너지의 점유율을 20% 증가시키는 것을 목표로 한다. 앞서 살펴본 사례와 같이 지역 단위에서 노후화된 정부 지원 주택 건축물을 대상으로 하여 리모델링 작업을 진행하고자 한다. 이 프로젝트는 리모델링을 통해 높은 에너지 성능을 달성하고 실내 쾌적성을 높이는 동시에 입주자의 비용 효율성 보장을 목표로 한다. Sinfonia 프로젝트는 이탈리아의 Bolzano지역 사례를 제시하고 있으며, 리모델링 실시 건축물은 1960년대부터 1980년대에 이르는 시기에 지어져 에너지 성능 향상을 위하여 재정비가 필요했다¹⁶⁾.

A2PBEER는 2013년부터 2018년까지 EU의 7차 프레임워크 프로그램에서 자금을 지원받아 11개국의 21개 파트너가 참여한 연구 프로젝트이다. EU는 1990년 수준 대비 2050년까지 온실가스 배출량을 80%까지 획기적으로 줄이기 위해 노력하고 있으며, 이때 건물 부문이 핵심 부문 중 하나이다. 이는 기존 노후 건축물과 신축건물 모두의 에너지 소비를 줄인 경우에만 달성할 수 있다. 또한, 기존 건축물의 매우 긴 수명으로 인해 A2PBEER는 리모델링과 같은 즉각적인 조치의 필요성을 강조했다. 이러한 의미에서 A2PBEER 프로젝트는 저렴하고 적용 가능한 신기술을 통해 기존 공공건물의 에너지 사용량을 30% 이상 줄일 수 있고, “에너지 제로 건물” 요건에도 도달할 수 있음을 입증했다¹⁷⁾.

이처럼 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트를 살펴본 결과, 기존 노후화 건축물이 스마트 시티에서 발생하는 에너지 사용량의 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 따라서, 이와 같은 문제를 해결하고자 기존 노후화 건축물의 리모델링 실시와 같은 대안이 주목받고 있음을 알 수 있다.

15) EU-GUGLE. (2020). <http://eu-gugle.eu/>

16) Sinfonia. (2020). <http://www.sinfonia-smartcities.eu/>

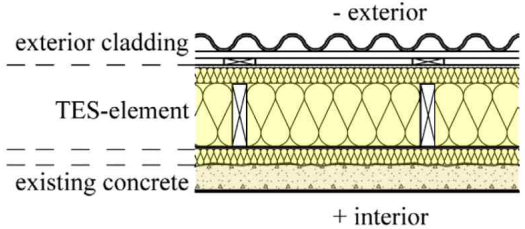

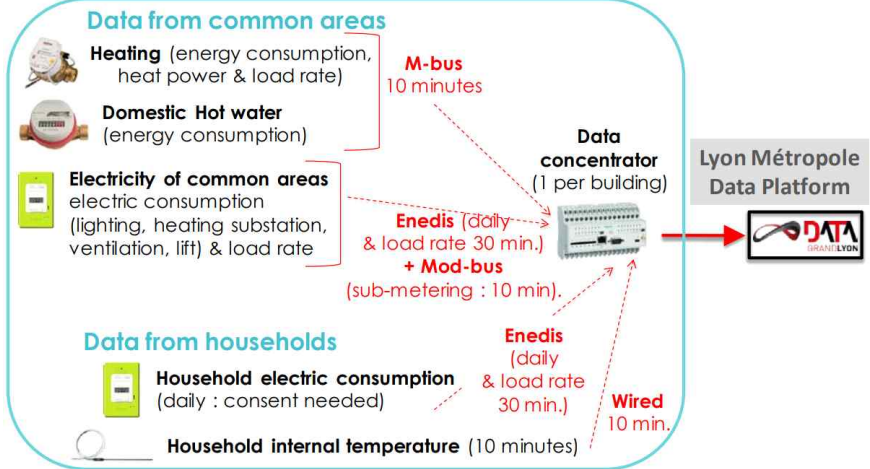
17) CORDIS European Commission. (2020). A2PBEER(Affordable and Adaptable Public Buildings through Energy Efficient Retrofitting). <https://cordis.europa.eu/project/id/609060>

또한, 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트 사례에서 볼 수 있듯이, 환경친화적인 리모델링 기술을 통해 건물의 에너지 절감 성능을 높이기 위한 시도가 있었다. 예를 들어, E2ReBuild 프로젝트는 Oulu 지역의 건물에 목재 기반의 TES(Timber-based Element System) 방법을 채택하여 건물의 단열성능을 높이고자 했다¹⁸⁾. EuroPHit의 Stockholm 지역 사례에서는 새로운 바닥 단열을 설치하고, 추가로 라돈 가스 차단막을 설치하여 에너지 성능뿐 아니라 재실자의 건강까지 고려하였다. 이뿐만 아니라, 에너지 사용량을 효율적으로 모니터링하고 추적하여 기존의 도시를 스마트하고 지속 가능하게 만들고자 하는 시도가 있었다. E2ReBuild 프로젝트의 Oulu 지역에서는 건물에 모니터링 기기를 설치하여 거주자가 환기 설정을 조정할 수 있고 그들의 전기 및 물 사용의 추적이 가능하게 했다. SMARTER TOGETHER 프로젝트의 LYON 지역에서는 에너지 사용량을 추적하는 모니터링 시스템을 도입하였다. 도시 데이터 플랫폼에 연결된 데이터 집중기(data concentrator)를 설치하여 공용 지역에서는 난방설비, 급수설비, 전기설비의 데이터를 모니터링하고 주거용 건물에서는 전기 소비량을 추적한다. 공용 지역의 난방설비 및 급수설비에서는 에너지 소비량 데이터를 수집하고, 전기설비에서는 조명, 환기, 열 발전소, 승강기의 에너지 소비량 데이터를 수집한다. 주거용 건물에서는 전기 소비량 데이터를 수집한다. 이러한 데이터들은 도시에서 제공하는 정보 전달 체계를 통해 일정한 시간 간격마다 데이터 집중기에 수집되어 도시 데이터 플랫폼에 전달된다¹⁹⁾. 표 2.3에서는 앞서 언급한 E2ReBuild, SMARTER TOGETHER 프로젝트에서 실시한 기술들을 정리하였다.

18) E2ReBuild - Industrial Energy Efficient Retrofitting of Resident Buildings in Cold Climates - D2.2 Demonstrator Oulu, Seventh Framework Programme (FP7).

19) SMARTER TOGETHER - Final report on the low-energy district achievements in Lyon - D3.3.2 - Version 1.

표 2.3 Renovation techniques for energy performance

Project name	Renovation techniques	
E2ReBuild	 <p style="text-align: center;">- exterior</p> <p style="text-align: center;">+ interior</p> <p style="text-align: center;">Components of the TES facade</p>	 <p style="text-align: center;">Monitoring devices in building</p>
SMARTER TOGETHER	 <p style="text-align: center;">Data flow of the refurbished buildings in the SMARTER TOGETHER project</p>	

2.2 스마트 시티 기존연구 분석

도시화 현상으로 인해 발생하는 환경 문제 대응을 위하여 저에너지 도시로의 전환을 위한 요구가 확대되고 있다. 이러한 요구를 충족시켜 줄 수 있는 스마트 시티가 생겨났으며, 이와 관련하여 스마트 시티의 건물 단위에서 에너지 관리를 위한 연구 또한 일부 진행되었다. 표 2.4는 기존연구 고찰 결과이다.

오덕성 외 (2015)는 환경친화적인 스마트 시티를 조성하기 위하여 ‘도시 에너지 통합 관리 센터 구축’, ‘건축물 에너지 관리 시스템’, ‘빌딩 자동화 시스템’, ‘녹색 교통 체계 구축’, ‘지능형 교통 시스템’, ‘친환경 교통수단 보급’ 등의 계획기법을 도출하였다. 또한, 스마트 시티를 에너지 수요 측면에서 바라보았을 때, 건축물의 에너지 소비 절감에 초점을 맞춘 계획기법을 에너지 효율 증대 및 탄소 저감에 있어서 우수한 대안으로 평가하였다²⁰⁾. 백윤철 외 (2019)는 미래 도시 구축의 기반 기술로 활용될 것으로 기대되는 스마트빌딩 기술을 소개했다. 이러한 스마트빌딩에서는 에너지 절약을 목표로 건물 에너지 관리 시스템(BEMS:Building Energy Management System)이 도입되었으며, 이러한 건물 에너지 관리 시스템은 건물 내외부의 온습도, 공기 질 및 조도 등의 환경을 모니터링하여 데이터를 수집해 현장 설비에 에너지 절감을 취하도록 한다²¹⁾. 또한, 조형민 외 (2019)는 전문 인력의 투입과 비용으로 인해 상시적인 관리가 어려운 건축물 설비의 효율적인 관리를 위하여, 건축물 내 다양한 센서를 통해 에너지 사용 및 설비상태를 파악하는 고장발견진단 서비스가 개발되었음을 언급하였으며, 해당 연구에서는 이러한 고장발견진단 서비스의 기술적, 비용적 한계를 극복하기 위해 국내의 다양한 건물에너지 공공데이터를 활용할 것을 제안하였다. 또한, 공공데이터의 확보가 쉬운 스마트 시티 내에서 데이터 기반의 서비스 제공을 목표로 하였다²²⁾.

이들 문헌에서 살펴본 바와 같이, 스마트 시티의 에너지 효율화를 위하여 건축물의 에너지 절감은 필요가 아닌 필수조건임을 알 수 있으며, 스마트 시티 내 건물 단위에서는 건물 에너지 관리 시스템 및 공공데이터를 활용한 고장발견진단 서비스를 활용해 설비의 효율적인 관리가 가능하게 됨을 알 수 있었다.

20) 오덕성, 박소연, 이서정 (2015), 에너지 측면의 스마트 그린시티 계획기법에 관한 연구: 행복도시의 적용실태를 중심으로, 한국산학기술학회 논문지, 제 16권 9호, pp. 6368-6375

21) 백윤철, 김형석 (2013), 건설IT융합기술: 스마트빌딩 기술 개발 사례, 한국통신학회 정보와 통신, 제 30권 10호, pp. 25-31

22) 조형민, 박창영, 김진호, 장향인 (2019), 스마트시티 고장발견진단 서비스 개발을 위한 건물에너지 공공데이터 활용방안 기초 연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제 13권 6호, pp. 599-608

표 2.4 Research for energy management in building level of smart city

Author (year)	Research title
Oh et al. (2015)	A Study on the Energy Planning Technique of Smart Green City : Focus on Application Condition in Multi-functional Administrative City, Korea
Baek, Kim (2013)	Convergence technology between construction and IT : The case of development of smart building technology
Cho et al. (2019)	Utilizing Public Data of Building Energy for Fault Detection and Diagnostic Services in Smart City
Goncalves et al. (2020)	One step forward toward smart city Utopia: Smart building energy management based on adaptive surrogate modelling
Sembroiz et al. (2019)	Planning and operational energy optimization solutions or smart buildings
Chen et al. (2020)	Indoor temperature monitoring using wireless sensor networks: A SMAC application in smart cities
Daissaoui et al. (2020)	IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey

Daissaoui et al. (2020)은 스마트 도시를 만들기 위하여 디지털 전환 프로세스 해결책의 일환으로써 주요 디지털 트렌드, 건축 분야의 변화 및 정보 통합 기술을 제시하였다. 또한, 현재의 스마트빌딩 관리 시스템의 IoT 및 빅데이터 분석과 관련된 작업을 검토하였다²³⁾. 한편, Goncalves et al. (2020)은 스마트 시티 유토피아를 실현하기 위해, 건물 단위에서 거주자의 열적 쾌적성을 해치지 않고 에너지 소비를 최소화하는 지능적 감독 및 통제 시스템(ISPC: Intelligent Supervision Control)을 도입하였다. 이 ISPC 시스템은 머신러닝 기법을 바탕으로 한 신뢰할 수 있는 대리모형을 개발하여 건축물에 지속가능성을 부여한다. 또한, ISPC 시스템은 환경 설비 시스템으로부터 독립된 상태에서 에너지와 비용 측면에서 효율적인 결정을 제공했으며, 신축건물뿐만 아니라 기존 건물에도 적용 가능한 장점이 있다²⁴⁾. Sembroiz et al. (2019)는 스마트빌딩의 에너지

23) Daissaoui, A., Boulmakoul, A., Karim, L., and Lbath, A. (2020). IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey, *Procedia Computer Science*, 170, pp. 161-168.

최적화 문제를 계획적 측면과 운영 측면을 모두 고려하였다. 먼저, 무선 센서 네트워크의 최적 배치를 제안하여 입주자의 행동을 파악하고, 이를 통해 건물이 취해야 할 효율적인 대안을 제공하였다. 또한, 입주자의 행동 모델을 사용하여 건물 요소를 효율적이고 자동으로 관리할 수 있는 건축물 관리 시스템(BMS)을 제안하였다²⁵⁾. 또한, Chen et al. (2020)도 무선 센서 네트워크를 다루었다. 이를 사용하여 실내 온도 모니터링하는 사이버-물리적 설계 접근방식을 제안하였다. 이는 건축물 내 설치된 각 센서로부터 감지된 온도에 따라 에너지 효율을 높이는 간헐적인 조치가 가능하다. 이 연구에서 사용된 접근방식을 통해 설계한 시스템은 약간의 지연 시간 내에 발생하는 이상 온도를 보고할 수 있고 동시에 양호한 수준의 에너지 효율을 달성할 수 있다는 것을 입증했다²⁶⁾.

이러한 스마트 시티와 관련된 기존연구 고찰 결과, 리모델링 프로젝트는 스마트 시티의 환경적 측면에서 아주 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 또한, 이러한 프로젝트는 건물 안에서 생활하는 입주자의 쾌적성까지 고려하였다. 그러나 스마트 시티 프로젝트에서 환경적 측면에 관한 이전 연구들은 대부분 건물의 에너지 소비 데이터를 추적하고, 이를 통해 에너지를 효율적으로 관리하는데 집중하는 연구들이 대부분이었다. 따라서 스마트 시티 노후화 건물의 에너지 성능을 높이는 노력에 앞서, 에너지 성능에 영향을 미치는 건물의 기본적인 물리적 속성과 에너지 절감을 목표로 하는 리모델링 기술과의 관계를 살펴보는 연구가 필요하다.

24) Goncalves, D., Sheikhejad, Y., Oliveira, M., and Martins, N. (2020). One step forward toward smart city Utopia: Smart building energy management based on adaptive surrogate modelling, *Energy and Buildings*, 223, 110146.

25) Sembroiz, D., Careglio, D., Ricciardi, S., and Fiore, U. (2019). Planning and operational energy optimization solutions or smart buildings, *Information Sciences*, 476, pp. 439-452.

26) Chen, S., Zhang, L., Tang, Y., Shen, C., Kumar, R., Yu, K., Tariq, U., and Bashir, A. K. (2020). Indoor temperature monitoring using wireless sensor networks: A SMAC application in smart cities, *Sustainable Cities and Society*, 61, 102333.

제 3장 구조방정식 모형

3.1 구조방정식 모형에 대한 개요

구조방정식 모형은 여러 개의 독립변수에 대한 여러 개의 종속변수 사이의 관계를 동시에 분석하는 다변량 분석 방법으로, 회귀분석 등의 방법과 달리 전체적으로 관계를 분석하기에 용이하기 때문에 최근 들어 사회과학 분야에서 연구 방법론으로써 많은 관심을 받고 있다. 구조방정식 모형은 잠재변수들의 관계를 정의하는 구조 모형과 관측변수와 잠재변수 사이의 관계를 정의하는 측정 모형으로 나누며, 서로 관련성이 있는 여러 개의 연구가설을 하나의 모형으로 나타낸 것이다. 여러 잠재변수 사이의 인과 관계를 화살표로 나타낸다. 즉, 구조방정식은 변수 간의 인과관계와 그 유의성 검증을 위해 사용한다.

그리고 구조방정식 모형의 특징 중 하나는 한 잠재변수가 다른 잠재변수로부터 영향을 받으면서 동시에 다른 잠재변수에 영향을 미치는 것을 동시에 반영할 수 있다는 것이다. 각 변수들은 다른 변수에 영향을 미치며 이를 효과라고 할 때, 효과는 변수가 다른 변수에 직접적으로 영향을 미치는 직접효과, 1개 이상의 매개변수를 통해서 영향을 미치는 효과인 간접효과로 나뉜다. 그리고 직접효과와 간접효과의 합을 총효과라 한다. 이때 매개변수는 독립변수와 종속변수의 관계에서 연결 고리 역할을 하는 변수를 의미하며, 이러한 매개변수 모형은 각 변수들 사이에서 발생하는 직접효과, 간접효과, 총효과를 추정할 수 있다²⁷⁾.

27) Brown, R. (1997). Assessing specific mediational effects in complex theoretical models. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 4(2), pp. 142-156.

연구자는 이론적인 근거를 바탕으로 관측변수를 구성하는 잠재변수를 설정하고, 잠재변수들 간의 관계를 통해 연구 모형을 세운다. 이러한 변수 사이의 관계를 쉽게 알아보기 위해 경로모형을 그릴 수 있으며, 구조방정식 모형에서 경로모형은 사각형, 타원, 원 화살표 등으로 표시할 수 있다.

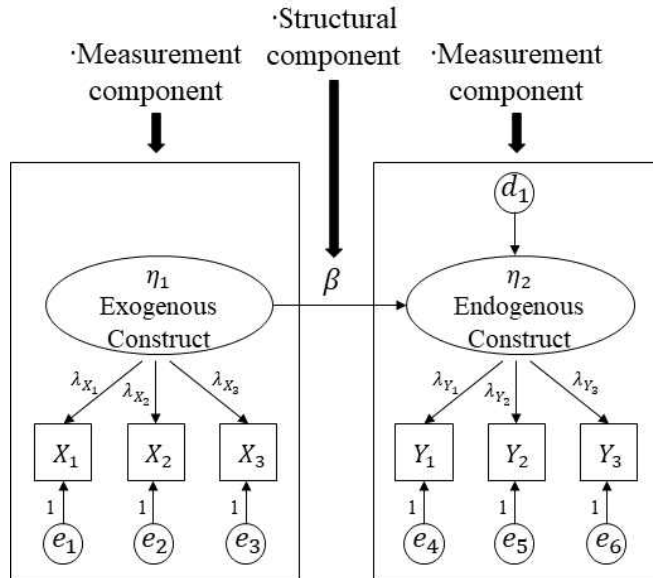


그림 3.1 Path model of SEM

구조방정식 모형은 그림 3.1과 같이 관측변수(Observed Variable), 잠재변수(Latent Variable), 외생잠재변수(Exogenous Latent Variable), 내생잠재변수(Endogenous Latent Variable), 측정오차(Measurement error), 구조오차(Structural error)로 구성된다.

관측변수는 실제 측정을 통해서 얻은 변수이며 일반적으로 잠재변수에 의해서 결정된다. 예를 들어 건물의 위치를 나타내는 위도 및 경도, 건물의 층수, 지붕의 모양, 건물이 향하는 방향 등과 같이 자료가 실제로 눈에 보이는 형태로 주어져서 직접적인 관측이 가능한 변수이다. 위 그림에서 사각형($X_1 \sim Y_3$)에 해당한다.

잠재변수는 연구대상이 되는 개념이면서 추상적이고 직접 관찰될 수 없는 개념을 말한다. 실제로 측정하여 얻어진 관측변수에 의해서 간접적으로 측정된다. 예를 들어 잠재변수인 ‘에너지 절감 성능’은 연간 에너지 절감량을 통해 관찰될 수 있고, 또는 단위 기간당 에너지 절감률을 측정해서도 관찰될 수 있다. 위 그림의 타원(η_1, η_2)에 해당한다. 이때, 외생잠재변수에 해당하는 타원 η_1 는 독립변수의 개념으로 사용되며 다른 변수에 영향을 주는 변수인 반면, 내생잠재변수를 나타내는 타원 η_2 는 종속변수의 개념으로써 다른 변수로부터 직접 또는 간접적으로 영향을 받는 변수이다.

측정오차는 관측변수가 잠재변수를 완전하게 설명하지 못하는 정도를 의미한다. 위 그림에서 원($e_1 \sim e_6$)에 해당한다. 구조오차는 독립변수들에 의해서 설명이 안 되는 정도를 나타내는 오차로, 위 그림에서 원(d_1)에 해당한다. 구조방정식 모형은 일반적인 회귀분석과 다르게 각 관측변수의 오차 및 독립변수에 의해 설명되지 않는 오차(측정오차, 구조오차)를 추정하여, 독립변수가 종속변수에 미치는 영향 정도를 나타내는 경로 계수를 더욱 정확하게 구할 수 있다.

그림 3.1의 경로모형을 통해 구조방정식 모형의 기본 원리를 살펴보고자 한다. 위 그림에서 $\lambda_{x1}, \lambda_{x2}, \lambda_{x3}, \lambda_{y1}, \lambda_{y2}, \lambda_{y3}, \beta$ 는 경로계수를 나타내며, 이를 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_1 &= \lambda_{x1}\eta_1 + e_1, & X_2 &= \lambda_{x2}\eta_1 + e_2, & X_3 &= \lambda_{x3}\eta_1 + e_3 & \text{-----(1)} \\ Y_1 &= \lambda_{y1}\eta_2 + e_4, & Y_2 &= \lambda_{y2}\eta_2 + e_5, & Y_3 &= \lambda_{y3}\eta_2 + e_6 \\ \eta_2 &= \beta\eta_1 + d_1 \end{aligned}$$

위 관계식을 이용하여 모수에 해당하는 경로계수를 계산할 수 있고, 또한 모형에 포함되는 분산이나 공분산의 계산이 가능하다. 구조방정식 모형의 기본 원리는 위 관계식을 통해 계산되는 공분산행렬이 실제의 값에 가깝도록 모수의 값을 설정하는 것이다. 즉, 모형으로부터 추정된 공분산행렬과 실제 데이터에서 얻은 표본으로부터 입력된 공분산행렬이 가급적 유사하도록 모수를 결정하는 과정을 말하며, 모형의 추정 공분산행렬(표 3.1)과 표본으로부터 입력된 공분산행렬(표 3.2)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

표 3.1 Estimated covariance matrix

X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
$\lambda_{X_1}^2\sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{e_1}^2$					
$\lambda_{X_1}\lambda_{X_2}\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_2}^2\sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{e_2}^2$				
$\lambda_{X_1}\lambda_{X_3}\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_2}\lambda_{X_3}\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_3}^2\sigma_{\eta_1}^2 + \sigma_{e_3}^2$			
$\lambda_{X_1}\lambda_{Y_1}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_2}\lambda_{Y_1}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_3}\lambda_{Y_1}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{Y_1}^2\beta^2\sigma_{\eta_1}^2 + \beta^2\sigma_{d_1}^2 + \sigma_{e_4}^2$		
$\lambda_{X_1}\lambda_{Y_2}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_2}\lambda_{Y_2}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_3}\lambda_{Y_2}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{Y_1}\lambda_{Y_2}\beta^2\sigma_{\eta_1}^2 + \lambda_{Y_1}\lambda_{Y_2}\sigma_{d_1}^2$	$\lambda_{Y_2}^2\beta^2\sigma_{\eta_1}^2 + \beta^2\sigma_{d_1}^2 + \sigma_{e_5}^2$	
$\lambda_{X_1}\lambda_{Y_3}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_2}\lambda_{Y_3}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{X_3}\lambda_{Y_3}\beta\sigma_{\eta_1}^2$	$\lambda_{Y_1}\lambda_{Y_3}\beta^2\sigma_{\eta_1}^2 + \lambda_{Y_1}\lambda_{Y_3}\sigma_{d_1}^2$	$\lambda_{Y_2}\lambda_{Y_3}\beta^2\sigma_{\eta_1}^2 + \lambda_{Y_2}\lambda_{Y_3}\sigma_{d_1}^2$	$\lambda_{Y_3}^2\beta^2\sigma_{\eta_1}^2 + \beta^2\sigma_{d_1}^2 + \sigma_{e_6}^2$

표 3.2 Observed covariance matrix

X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
$S_{X_1}^2$					
$S_{X_1X_2}$	$S_{X_2}^2$				
$S_{X_1X_3}$	$S_{X_2X_3}$	$S_{X_3}^2$			
$S_{X_1Y_1}$	$S_{X_2Y_1}$	$S_{X_3Y_1}$	$S_{Y_1}^2$		
$S_{X_1Y_2}$	$S_{X_2Y_2}$	$S_{X_3Y_2}$	$S_{Y_1Y_2}$	$S_{Y_2}^2$	
$S_{X_1Y_3}$	$S_{X_2Y_3}$	$S_{X_3Y_3}$	$S_{Y_1Y_3}$	$S_{Y_2Y_3}$	$S_{Y_3}^2$

3.2 구조방정식 모형의 분석 절차

구조방정식 모형은 다음 그림과 같은 흐름으로 진행된다. 분석 절차는 모델설정, 모델식별, 모델추정, 모델평가, 모델수정, 최종모델선택 순으로 진행된다²⁸⁾.

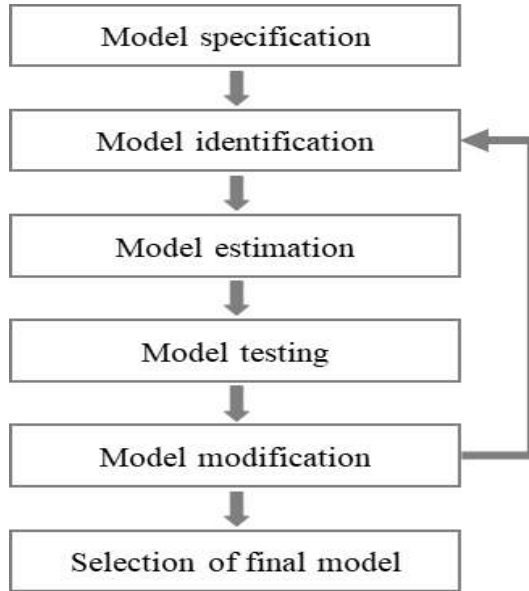


그림 3.2 Analysis procedure for SEM

28) Bollen, K. A., and Long, J. S. (1993). Testing structural equation models. Newbury Park, Calif: Sage.

3.2.1 모델 설정(model specification)

모델설정 단계는 데이터를 수집한 후 변수들 사이의 관계를 설정하고 모수를 추정하는 단계이다. 첫째, 연구에 쓰일 연구 모형과 가설을 설정하고 더 나아가 측정 모형, 구조 모형, 오차 등을 설정하는 단계이다. 이때 어떠한 구조모수를 추정할지는 선행연구 분석을 통해 달라지게 된다. 만약 연구자가 진행하려는 연구가 다른 연구자들에 의해 시도되지 않은 분야라면 선행연구로부터 도움을 받기에 어려움이 있으므로 오직 연구자의 경험에 의존하여 모형을 선택하게 된다.

둘째, 연구자에 의해 선정된 변수들 간 관계의 방향을 설정해야 한다. 예를 들어, 독립변수와 종속변수와 같이 변수들 간의 영향을 주고받는 방향을 설정해야 한다. 또는 변수들이 서로 영향을 주고받는지 설정해야 한다. 변수들 간의 인과관계도 역시 선행연구를 바탕으로 방향 설정이 진행되어야 한다²⁹⁾.

마지막으로, 연구자가 변수들 간의 인과관계에 대해 가설 수립 후 인과관계에 맞는 경로도를 작성한다. 그리고 경로도에 맞는 구조방정식을 세우고 이에 맞는 자료를 입력하면 된다. 구조방정식 분석 시 사용되는 데이터는 관측변수의 원자료 혹은 관측변수 간의 공분산 행렬이나 상관행렬이 있다³⁰⁾.

3.2.2 모델 식별(model identification)

모델식별 단계는 자유모수의 추정치인 고유해를 가질 수 있는지, 또한 모형 내에 포함된 자유모수를 확인하는 단계이다. 즉, 어떤 자유모수가 분산과 공분산의 함수로 표현이 가능하다면 이때의 자유모수는 ‘식별되었다’고 할 수 있다. 반면 그 자유모수가 분산과 공분산의 함수로 표현이 불가능 할 때 ‘식별되지 않았다’고 한다. 그리고 어떤 하나의 자유모수가 두 개 이상의 고유한 방법을 통해 식별되었다면 ‘과대식별’이라고 하며, 모든 자유모수를 확인하는 과정에서 모든 자유모수가 식별되지 않는다면 ‘과소식별’이라고 한다. 모든 자유모수가 단 한 가지의 방법으로만 식별되었다면 ‘적정식별’이라고 한다³¹⁾.

29) 이기종, “구조방정식모형”. 서울: 교육과학사. 2000

30) 김원표, “다시 쓰는 통계분석: 구조방정식모델분석”. 1판, 서울: 와이즈인컴퍼니. 2017

31) 김진수 (2013), 구조방정식 모형을 이용한 노인환자의 치과만족도가 재이용 의사에 미치는 영향. 인하대학교, 박사학위논문

3.2.3 모델 추정(model estimation)

모델추정 단계는 최대가능도추정법(Maximum Likelihood Method), 일반최소제곱법(Generalized Least Squares), 비가중최소제곱법(Unweighted Least square), 가중최소제곱법(Weighted Least Square), 이단계최소제곱법(Two-stage Least Square) 등의 방법을 통하여 모수 값들의 크기를 측정하는 단계이다. 모델추정 단계는 연구모형의 공분산행렬이 모집단의 공분산행렬과 유사하도록 모수의 추정치를 계산하게 된다. 이때 모집단의 공분산행렬을 알지 못하기 때문에 모집단의 공분산행렬 대신 추정치로서 표본공분산행렬을 사용하게 된다. 또한, 표본공분산행렬이 모집단의 공분산행렬과 유사한 정도를 나타내는 함수를 적합함수라고 하며, 적합 함수의 값이 0에 가까울수록 두 공분산 행렬이 유사하다는 것을 의미한다.

모델추정 단계에서 대표적으로 사용되는 최소제곱법과 최대가능도추정법에 대해서 살펴보고자 한다. 먼저 최소제곱법은 표본의 공분산행렬과 연구 모형으로부터 추정된 공분산행렬의 차를 계산한 후 행렬을 구성하는 각 성분의 제곱합을 구하는 방법을 말한다. 이때 두 공분산 행렬이 차이가 없다면 각 성분이 0으로 이루어진 영행렬일 되므로 제곱합도 0이 될 것이다. 즉, 두 행렬 간의 차이가 클수록 제곱합의 값도 커진다는 것을 의미하며, 제곱합이 가장 작은 값을 갖도록 하는 모형을 선택하는 방법을 의미한다. 김진수 (2013)에 따르면 최대가능도추정법 또한 최소제곱법과 비슷한 과정으로 진행되며, 제곱합을 이용하는 대신에 다음과 같은 함수를 사용하여 모수를 추정하는 것을 알 수 있다.

$$f_{ML} = tr(\sum^{-1}S) - \log|\sum^{-1}S| - k \text{ -----(2)}$$

단, S : 표본의 공분산행렬

\sum : 모형의 공분산행렬

k : 변수의 개수

$||$: 행렬식

tr : 행렬에서 대각선에 위치한 원소들의 합

3.2.4 적합도 평가(model testing)

적합도 평가 단계는 모델 추정이 끝난 후 연구 모형과 수집된 자료가 얼마나 일치하는지 확인하는 과정이다. 즉, 이 단계는 여러 적합도 지수를 통해 측정된 자료들이 설정된 구조방정식 모형과 적합한지 살펴봄으로써, 설정된 모형을 받아들일지를 판단하는 단계이다. 적합도 지수를 만족하지 못한 경우에는 설정된 모형의 결과가 무의미해지며, 적합도는 크게 절대적합도지수(absolute fit index), 증분적합도지수(incremental fit index)로 구분된다.

가. 절대적합지수

절대적합지수는 연구 모형과 입력 자료가 얼마나 일치하는지를 확인하는 지수로서 χ^2 (CMIN), GFI, AGFI, RMSEA 등이 있으며 그 의미와 판단 기준은 다음과 같다.

(1) χ^2 (Chi-squareCMIN)

χ^2 (CMIN)은 대표적인 절대적합지수로 구조방정식 모형에서 유일하게 통계적인 검증 방법으로 통계적 유의성인 p -value를 제공한다³²⁾. χ^2 통계량은 모수를 추정하기 위해 사용된 모형의 적합도 함수가 갖는 최솟값에 표본의 크기에서 1을 뺀 값($N-1$)을 곱한 것이다. χ^2 통계량은 구조방정식 모형과 실제 자료 간의 오차를 측정한 f_{ML} 과 ($N-1$)을 곱한 값으로 정의한다. 여기서 f_{ML} 값은 최대가능도추정법을 이용한 오차함수이며, 이 값이 작을수록 적합도가 좋게 나타나기 때문에 ‘badness of fit’으로도 불린다.

$$\chi^2 = (N-1)f_{ML} \text{ -----(3)}$$

32) Hair, J., Black, W., Babin, B., Anderson, R., and Tatham, R. (2006). Multivariate data analysis (6th ed.). Upper Saddle River, New Jersey 07458: Pearson Education, Inc.

위 식을 보면 표본의 개수가 많아질수록 χ^2 값도 커지게 되어 표본의 크기에 민감하게 반응함을 알 수 있다. 따라서 χ^2 차이를 검증하기보다 χ^2 을 자유도(degrees of freedom)로 나눈 표준 χ^2 값(Normed chi-square)을 사용하며 AMOS 프로그램에서는 이를 CMIN/DF로 나타낸다.

$$df = \frac{1}{2}[(p)(p+1)] - k \text{ -----(4)}$$

단, p =관측변수의 개수, k =자유모수의 개수

(2)GFI(Goodness of Fit Index)

GFI는 표본 크기에 덜 민감한 적합도 통계를 작성하려는 초기 시도였으나, 표본 크기에 간접적으로 영향을 받는다³³⁾. GFI는 실제 데이터로부터 얻은 입력공분산행렬과 모형으로부터 계산된 추정공분산행렬에 의해 설명되는 양을 나타낸다.

$$GFI = 1 - \frac{F_k}{F_0} \text{ -----(5)}$$

단, F_k =자유모수 k 를 이용하여 추정된 최소 적합함수, F_0 =자유모수가 0일 때의 적합함수

적합도가 좋은 모형은 F_k/F_0 의 값이 상당히 작음을 의미하며, 반대로 적합도가 좋지 않은 모형은 F_k 가 F_0 와 크게 다르지 않기 때문에 F_k/F_0 값이 상대적으로 큰 것을 의미한다. 이러한 GFI 값이 1에 가까울수록 입력공분산행렬과 추정공분산행렬이 일치하는 것을 의미하며, 0에 가까울수록 연구 모형이 실제 데이터에 부합하지 못하는 것을 의미한다. Hoelter (1983)는 GFI값의 경우 일반적으로 0.9 또는 0.95 이상일 경우 모형이 적합한 것으로 판단하였다³⁴⁾.

33) Maiti, S. S., and Mukherjee, B. N. (1991). Two new goodness-of-fit indices for covariance matrices with linear structures, British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 44(1), pp. 153-180.

34) Hoelter, J. W. (1983). The Analysis of Covariance Structures: Goodness-of-Fit Indices, Sociological Methods and Research, 11(3), pp. 324-344.

(3) AGFI(Adjusted Goodness of Fit Index)

AGFI는 모델 복잡성을 고려한 값으로, GFI를 모델의 자유도에 의해 수정한 값이다. AGFI는 모형의 복잡성에 비례하여 GFI 값보다 낮게 나타나며, GFI와 마찬가지로 1에 가까울수록 적합도가 좋은 것을 의미한다. AGFI는 다음과 같이 정의된다.

$$AGFI = 1 - \frac{p(p+1)}{2 \times df} (1 - GFI) \text{ -----(6)}$$

단, df = 자유도

GFI값은 모수를 추가할수록 증가하는 성질을 가지고 있는 반면, AGFI는 자유도가 줄어드는 것에 비해서 증가하는 GFI값이 상대적으로 큰 경우에는 값이 증가하고 반대의 경우에는 감소한다.

(4) RMSEA(Root Mean Square Error of Approximation)

RMSEA는 표본의 수가 많아서 발생하는 χ^2 통계량의 문제점을 보완하기 위해 개발된 적합도이며, 모형이 모집단을 얼마나 잘 나타내고 있는지를 살펴보기 위한 측도로서 모집단에 대한 모형의 불일치도라고 할 수 있다. RMSEA값이 작을수록 적합도가 좋다는 것을 의미하고, 일반적으로 0.1보다 작으면 수용 가능한 모델이라고 할 수 있다. RMSEA는 다음과 같이 정의된다.

$$RMSEA = \sqrt{\frac{(\chi^2 - df_k)}{(N - 1)}} \text{ -----(7)}$$

RMSEA는 계산이 다소 간단하며, χ^2 통계만을 사용했을 때 발생하는 문제를 수정하기 위하여 사용된다.

나. 증분적합지수

증분적합도지수는 연구모형과 모든 관측변수들이 서로 관계가 없다고 가정한 null모형(독립모형)의 적합도를 비교한 것으로서 TLI, NFI, CFI등이 있으며 그 의미와 판단 기준은 다음과 같다.

(1) TLI(Turker Lewis Index)

TLI는 기초모형과 더 잘 일치하는 모형 사이의 떨어진 거리를 기초모형과 이상적 적합도 함수 간의 거리의 비율로 접근하는 방식이다. TLI는 NNFI(Non-Normed Fit Index)라고도 하며, 특정 이론적 측정 모델과 기준 null 모형의 수학적 비교를 포함한다는 점에서 CFI와 개념적으로 유사하다³⁵⁾. TLI는 규범화되어 있지 않으므로 그 값이 0 미만이거나 1 이상일 수 있다. 그러나 일반적으로 적합도가 높은 모형은 1에 가까운 값을 가지며 TLI 값이 높은 모형은 값이 낮은 모형에 비해 적합도가 더 낫다는 것을 시사한다.

$$TLI = \frac{[(\frac{\chi^2_N}{df_N}) - (\frac{\chi^2_k}{df_k})]}{[(\frac{\chi^2_N}{df_N}) - 1]} \text{-----}(8)$$

여기서, N 과 k 는 각각 null 모형과 지정된 모형을 가리킨다. TLI는 규범화되어 있지 않아서 그 값이 0 미만이거나 1 이상일 수 있으며, 대부분의 상황에서 CFI와 유사한 값을 산출한다.

35) Tucker, L. R., and Lewis, C. (1973). A Reliability Coefficient for Maximum Likelihood Factor Analysis, *Psychometica*, 38, pp. 1-10.

(2)NFI(Normed Fit Index)

NFI는 대표적인 증분적합지수 중 하나로써 적합 모형에 대한 χ^2 값과 null 모형에 대한 χ^2 값 간의 차이를 null모형에 대한 χ^2 값으로 나눈 비율값을 갖는다. NFI값은 0과 1 사이의 범위를 가지며 1에 가까운 값을 가질수록 적합도가 높은 모형임을 나타낸다. CFI는 적합도 측도에 모델 복잡성을 포함하기 위한 노력으로 이 지수에서 도출되었다³⁶⁾.

$$NFI = \Delta = \frac{f_N - f_k}{f_N} = \frac{\chi_N^2 - \chi_k^2}{\chi_N^2} \text{-----(9)}$$

단, f_N = null 모형에서 산출한 적합도 함수 값

f_k = null 모형보다는 자료에 더 잘 일치하는 모형에서 산출한 적합도 함수 값

χ_N^2 = null 모형에서 카이제곱 통계량 값

χ_k^2 = null 모형보다는 자료에 더 잘 일치하는 모형의 카이제곱 통계량 값

36) Bentler, P. M. (1990). Comparative Fit Indexes in Structural Models, Psychological Bulletin, 107(2), pp. 238-246.

(3)CFI(Comparative Fit Index)

CFI는 NFI의 개선된 증분적합지수이다³⁷⁾. CFI는 모델의 적합성에 덜 민감한 장점 등 바람직한 특성이 많기 때문에 가장 널리 사용되는 지표 중 하나이다. CFI값은 0과 1사이의 범위로 더 높은 값이 더 잘 적합됨을 나타내도록 규범화되며, Hair et al. (2006)에 따르면 일반적으로 그 값이 0.9 이상일 때 수용할 수 있다.

$$CFI = 1 - \frac{(\chi_k^2 - df_k)}{(\chi_N^2 - df_N)} \text{-----(10)}$$

여기서, k 는 연구자의 특정 모델 또는 이론을 의미하며, N 은 통계적 null 모형에 관련된 값을 나타낸다. 또한 χ^2 값이 해당 자유도보다 작을 경우 적절한 값(즉, 0)을 대체하여 방정식을 0과 1 사이의 값으로 규범화한다.

3.2.5 모델 수정(model modification)

모형수정 단계에서는 앞선 적합도 평가 시 적합도가 좋지 않은 경우 모형을 수정해야 한다. 즉, 최종모형을 선택하기 위해 적합도 개선 과정을 거쳐야 함을 의미한다. 모델 수정은 모형 내의 경로를 추가 및 제거를 통해 적합도를 개선할 수 있다. 새로운 경로를 추가하는 경우에는 이론적인 근거가 뒷받침되는지 확인하고, 근거가 부족할 경우에는 통계적으로 유의미한 결과가 나오더라도 함부로 추가해서는 안 된다. 이때, 새로운 경로는 적합도를 향상시킬 수 있는 경로를 표시해주는 수정지수(modification index)를 통해 추가해야 한다. 수정지수는 그 값이 최소한 3.84 이상이어야 모형수정을 고려할 수 있다³⁸⁾.

37) Hu, L., and Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives, *Structural Equations Modeling*, 6(1), pp. 1-55.

38) 장종원 (2011). 구조방정식모형에서 수정지수의 경계값 결정을 위한 알고리즘. 동국대학교, 박사학위논문

제 4장 리모델링 프로젝트의 특성 및 에너지 절감 성능 분석

본 장은 구조방정식 모형 개발 단계에서 첫 번째 단계인 모델 설정 단계에 해당한다. 2장에서 살펴본 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트를 통해 노후 건축물의 속성, 에너지 절감 기술, 에너지 절감 성능을 분석하여, 구조방정식 모형에 사용될 변수를 설정하였다. 더 나아가 데이터가 가지고 있는 특성에 맞는 방법으로 데이터를 수집하였다.

4.1 EU 스마트 시티 리모델링 프로젝트의 특성

본 절에서는 건축물의 다양한 속성들을 정리한 기존연구 고찰과 EU의 11개의 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트를 통해 노후 건축물의 대표 속성들을 정리하였다. 노후 건축물의 속성을 살펴본 기존연구는 다음과 같다. Cho et al. (2019)와 Cho et al. (2020a)은 노후화된 건축물을 대상으로 리모델링을 실시하고, 이에 따른 경제적 효과를 분석한 연구이다. 이 연구들에서는 리모델링을 수행하기 전 노후건축물의 대표속성을 정의하였고, 대표적으로 연면적(gross floor area), 층수(number of floors), 건축물의 경과 연수(years elapsed since construction), 1층 바닥면적(building area)이 포함되었다³⁹⁾⁴⁰⁾. Cho et al. (2020b)은 노후 건축물의 속성들이 리모델링 작업 지연에 미치는 영향도를 분석하기 위해 수행되었고, 이 대표적인 노후 건축물의 속성으로 리모델링의 범위(renovation work scope), 연면적(gross area of floors), 건축물 경과 연수(years elapsed since construction) 등을 정의하였다⁴¹⁾. 기존연구 고찰 결과, 건축물의 속성을

39) Cho, K., Kim, J., and Kim, T. (2019). Decision support method for estimating monetary value of post-renovation office buildings, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(12), pp. 1103-1113.

40) Cho, K., Kim, J., Kim, T., and Hong, T. (2020). Model for predicting price change patterns in multi-family houses post renovation work in South Korea, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 19(3), pp. 230-241.

41) Cho, K., Kim, T., and Hong, T. (2020). Estimating a Risk-Integrated Schedule Delay for an Office Building Renovation Project by Considering the Project's Attributes, *Journal of Management in Engineering*, ASCE, 36(2), doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000732.

정리한 내용은 표 4.1과 같다.

표 4.1 Literature review of building characteristics

Existing research Building characteristics	Cho et al. (2019)	Cho et al. (2020a)	Cho et al. (2020b)
1	Gross floor area	household unit area	Number of floors
2	Site area	gross floor area	Gross area of floors
3	Building area	building footprint	Years elapsed since construction
4	Number of floors	number of unit houses	Renovation type
5	Number of underground floors	number of floors	Renovation work scope
6	Exclusive rate of the lease area	years elapsed since construction	Owner's experience
7	Building coverage ratio	type of heating system	Designer's experience
8	Floor area ratio	reputation of the construction company	Engineer's experience
9	Number of parking spaces	number of parking lots	Contractor's experience
10	Number of elevators	unit plan	
11	Years elapsed since construction	administrative district	
12	Walking time to the subway	number of rooms in a household unit	
13	Officially assessed land price	number of convenience facilities near the MFH (multi-family house)	
14	Renovation scope	distance to the nearest metro station	
15		Educational environment	
16		distance to the neighbourhood park	
17		distance to the bus stop	
18		distance to the general hospital	
19		view from each unit	

한편, 본 연구의 주요 분석 대상인 유럽 지역의 스마트 시티 프로젝트는 다양한 나라에서 진행되었다. 따라서 건물의 위치를 나타내는 위도와 경도는 건물의 특징을 잘 나타내는 요인이라 할 수 있다. 또한, 건물의 사용용도, 경과 연수, 층수, 공사 면적도 중요한 속성이라 할 수 있다. 그리고 건물이 바라보고 있는 방향은 일조량과 관련이 있어 건물 내의 조명 설치에 중요한 역할을 한다. 지붕의 모양, 건물의 모양, 입면의 모양은 태양광 패널 설치 시 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 표 4.2에서 볼 수 있듯이, 노후화 건물의 속성은 다음과 같이 10가지로 선정되었다: (C1) 위도:Latitude, (C2) 경도:Longitude, (C3) 사용용도:Purpose of use, (C4) 건축물 경과 연수:Year of construction, (C5) 리모델링 공사 면적:Area of remodeling, (C6) 층수:Story, (C7) 건물의 모양:Shape of building, (C8) 지붕의 모양:Shape of roof, (C9) 건물의 방향:Direction of building, (C10) 입면의 타입:Type of Facade.

표 4.2 Project characteristics indices

No.	Characteristics indices	Definition
C1	Latitude	1 = $40^{\circ} \leq \sim < 45^{\circ}$, 2 = $45^{\circ} \leq \sim < 50^{\circ}$, 3 = $50^{\circ} \leq \sim < 55^{\circ}$, 4 = $55^{\circ} \leq \sim$
C2	Longitude	1 = $\sim < 0^{\circ}$, 2 = $0^{\circ} \leq \sim < 10^{\circ}$, 3 = $10^{\circ} \leq \sim < 20^{\circ}$, 4 = $20^{\circ} \leq \sim$
C3	Purpose of use	1 = residential, 2 = school, 3 = office, 4 = monastery, 5 = hospital
C4	Year of construction	1 = $\sim < 1960$, 2 = 1960's, 3 = 1970's, 4 = 1980 ~
C5	Area of remodeling	1 = $\sim < 1000$, 2 = $1000 \leq \sim < 3000$, 3 = $3000 \leq \sim < 6000$, 4 = $6000 \leq \sim$
C6	Storey	1 = 1,2 storey, 2 = 3,4 storey, 3 = 5,6 storey, 4 = 7,8 storey, 5 = 9,10 storey
C7	Shape of building	1 = rectangle, 2 = L-shaped, 3 = atypical shape, 4 = unidentified
C8	Shape of roof	1 = flat roof, 2 = gable roof, 3 = hipped roof, 4 = unidentified
C9	Direction of building	1 = south, 2 = west, 3 = north, 4 = east, 5 = unidentified
C10	Types of facade	1 = flat/concrete, 2 = flat/masonry, 3 = nonflat/concrete, 4 = nonflat/masonry

4.2 EU 스마트 시티 에너지 절감 기술

에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트에 사용된 리모델링 기술을 분석한 결과, 표 4.3과 같이 총 9개의 대표적인 리모델링 기술로 정리되었다. 이들 리모델링 기술은 EU 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트에서 자주 언급된 기술로 구성되어 있다. 이러한 기술들은 (i) 단열성능을 높여 에너지 효율을 높이는 에너지 절감 기술((T1) 벽체 단열공사:Wall insulation, (T2) 바닥 단열공사:Floor insulation, (T3) 지붕 단열공사:Roof insulation, (4) 창문 단열공사:Window insulation)과 (ii) 에너지 생산 기술((T5) 난방:Heating, (T6) 온수설비:Hot water, (T7) 환기설비:Ventilation, (T8) 조명설비:Lighting, (T9) 태양광 시스템:PV system)로 나눌 수 있다.

T1-T4는 각각 벽체, 바닥 슬래브, 지붕, 창의 단열성능을 높여 에너지 효율을 높이는 리모델링 기술을 의미하며, T5-T9는 에너지를 생산하는 기술 혹은 환경 설비를 의미한다.

표 4.3 Renovation techniques indices

No.	Renovation techniques indices	Definition
T1	Wall insulation	1 = U:0.1 ≤ ~ < 0.15, 2 = U:0.15 ≤ ~ < 0.20, 3 = U:0.20 ≤ ~ < 0.30, 4 = U:0.30 ≤ ~, 5 = No technique applied
T2	Floor insulation	1 = U:0.1 ≤ ~ < 0.15, 2 = U:0.15 ≤ ~ < 0.20, 3 = U:0.20 ≤ ~ < 0.40, 4 = U:0.40 ≤ ~, 5 = No technique applied
T3	Roof insulation	1 = U:~ < 0.1, 2 = U:0.10 ≤ ~ < 0.12, 3 = U:0.12 ≤ ~ < 0.18, 4 = U:0.18 ≤ ~, 5 = No technique applied
T4	Window insulation	1 = U:~ < 0.8, 2 = U:0.8 ≤ ~ < 1.1, 3 = U:1.1 ≤ ~ < 1.4, 4 = U:1.4 ≤ ~, 5 = No technique applied
T5	Heating	1 = Heat pump, 2 = Condensing boiler, 3 = District heating, 4 = District heating + Heat pump, 5 = Heat pump + Condensing boiler, 6 = No technique applied
T6	Hot water	1 = Domestic Hot Water, 2 = Boiler, 3 = No technique applied
T7	Ventilation	1 = Mechanical + Heat recovery, 2 = Mechanical, 3 = Heat recovery, 4 = new ventilation per room, 5 = No technique applied
T8	Lighting	1 = LED, 2 = Automation system, 3 = efficient lighting system, 4 = No technique applied
T9	PV system	1 = ~ < 20,000Wh/yr, 2 = 20,000Wh/yr ~ < 70,000Wh/yr, 3 = 70,000 ~ < 150,000Wh/yr, 4 = 150,000 ~, 5 = No technique applied

4.3 EU 스마트 시티 에너지 절감 성능

이상의 리모델링 기술들을 사용하여, EU의 스마트 시티 프로젝트들은 주목할 만한 에너지 절감 결과를 도출하였다. 대표적인 예로 SMARTER TOGETHER 프로젝트를 살펴보면, Austria의 Vienna 지역 사례인 “social housing Herbortgasse 43” 건물은 1929년에 건설되어 에너지 개선 작업이 필요했다. $2,728m^2$ 에 해당하는 면적을 리모델링 공사를 실시하여, $155kWh/m^2yr$ 에서 $61kWh/m^2yr$ 로 에너지 절감을 목표로 한다. 이 공사는 2,350,000€ 의 공사비가 산정되었으며, 공사 기간은 14개월로 계획했다. 에너지 절감형 리모델링 프로젝트의 주요 목표를 분석한 결과, 표 4.4에서 볼 수 있듯이, 에너지 성능 지표는 다음과 같이 8가지로 정의하였다: (P1) 에너지 절감량:Energy savings, (P2) 에너지 절감률:Energy saving rate, (P3) 단위 기간당 에너지 절감량:Energy savings per one month, (P4) 단위 기간당 에너지 절감률:Energy saving rate per one month, (P5) 단위 에너지 절감량에 대한 공사 비용:Construction cost per energy savings, (P6) 단위 에너지 절감률에 대한 공사 비용:Construction cost per energy saving rate, (P7) 단위 공사 비용에 대한 에너지 절감량:Energy savings per construction cost, (P8) 단위 공사 비용에 대한 에너지 절감률:Energy saving rate per construction cost.

표 4.4 Energy performance indices

No.	Energy performance indices	Definition
P1	Energy savings	initial energy consumption-final energy consumption
P2	Energy saving rate	(initial energy consumption-final energy consumption(P1))/initial energy consumption×100
P3	Energy savings per one month	Energy savings(P1)/construction period
P4	Energy saving rate per one month	Energy saving rate(P2)/construction period
P5	Construction cost per energy savings	construction cost/energy savings(P1)
P6	Construction cost per energy saving rate	construction cost/energy saving rate(P2)
P7	Energy savings per construction cost	energy savings(P1)/construction cost

4.4 EU 스마트 시티 요인별 데이터 수집

4.4.1 요인별 평가척도 개발 및 데이터 수집

본 연구에서 수집한 요인별 데이터는 특성의 유무를 표시하는 유형 또는 종류의 차이를 설명하는 정성적 데이터와 숫자로써 실제 값을 나타내는 정량적 데이터로 나뉘게 된다. Hair et al. (2006)에 따르면, 정성적 데이터는 양으로써 측정할 수 없으며, 오로지 상대적으로 다른 상태에 따라 나뉘게 된다. 따라서 앞서 언급한 건축물의 속성과 리모델링 기술 중 일부(즉, C3, C7, C8, C9, C10, T5, T6, T7, T8)는 표 4.2와 표 4.3의 세 번째 열에 정의된 바와 같이, 명목척도를 사용하여 측정하였다. 즉, 측정단위가 상이하여 직접적인 비교가 어려우므로, 두 가지 요소는 명목척도를 활용하여 측정값의 단위를 동일하게 만들었다.

본 연구의 데이터에서 실제 숫자 값을 포함하는 정량적 데이터의 경우, 다음과 같은 두 방법을 통해 서열척도를 부여하였다. 첫째, 정량적 데이터를 범주화할 때 각 척도에 해당하는 데이터의 숫자가 비교적 균등하게 배분되도록 서열척도를 부여하였다. C1, C2, C4, C5, C6, T1, T2, T3, T4, T9의 경우, 이 방법을 적용하여 임의로 서열척도를 부여하였다. 둘째, 사례를 통해 도출한 데이터의 분포를 고려하여, 대표적인 기술통계량인 평균을 사용하여 척도가 일정한 간격으로 나뉘도록 범주화하여 서열척도를 부여하였다.

균등 배분을 위한 데이터 범주화의 예를 들면, ‘C1 (위도:Latitude)’는 프로젝트의 위치에 따른 위도를 나타낸 것으로, 프로젝트의 시범 도시가 위도 40도 이상 45도 미만에 위치한다면 명목척도 1점, 45도 이상 50도 미만이면 2점, 50도 이상 55도 미만이면 3점, 55도 이상이면 명목척도 4점을 부여했다. 그리고 ‘C7(건물의 모양:Shape of building)’은 건물의 모양이 정방형이면 명목척도 1점, L자 모양이면 2점, 비정형이면 3점, 정보 부족으로 인해 확인이 불가하면 명목척도 4점을 부여했다(표 4.2 참고).

적용된 리모델링 기술 또한 명목척도 및 서열척도를 기준으로 정의하였다. 표 4.3에서 볼 수 있듯이, 단열성능을 높여 에너지 효율을 높이는 기술(T1-T4)은 단열성능을 나타내는 지표인 열관류율(U-value)에 따른 서열척도를 기준으로 나타냈다. 예를 들어, ‘T1(벽체 단열공사:Wall insulation)’은 U-value의 크기에 따라 평가되었다. U-value값

이 0.1 이상 0.15 미만이면 서열척도 1점, 0.15 이상 0.20 미만이면 2점, 0.20 이상 0.30 미만이면 3점, 0.30 이상이면 4점, 적용된 기술이 없는 경우는 서열척도 5점을 부여했다.

에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트의 에너지 절감 성능은 표 4.4에 정의된 방법대로 측정하였으며, 각 척도의 크기를 평균을 활용하여 정하였다. 그 내용은 정량적인 성능 지수이며, 프로젝트의 목적에 맞게 에너지 소비량을 대표적인 지표로 사용하고 공사 기간 및 공사 비용의 개념을 추가하였다. 예를 들어, 'P3(단위 기간당 에너지 절감량:Energy savings per one month)'는 P1(에너지 절감량:Energy savings)값을 에너지 절감 공사 기간으로 나눈 값으로, 0.5 이상 4.7 미만은 서열척도 1점, 4.7 이상 9.0 미만이면 2점, 9.0 이상 37.8 미만이면 3점, 37.8 이상 66.7 미만이면 서열척도 4점을 부여했다. 여기에서 0.5, 66.7, 9.0은 각각 최솟값, 최댓값, 전체 데이터의 평균값을 의미하며, 4.7은 전체 평균값과 최솟값의 평균값이고 37.8은 전체 평균값과 최댓값의 평균값을 의미한다. 나머지 에너지 절감 성능도 동일한 방법으로 측정하였다(표 4.4 참고).

본 연구는 11개의 EU 스마트 시티 프로젝트를 조사하여, 총 55개의 데이터 셋을 얻었으며, 이 데이터 셋은 건물의 속성(C1-C10)이 10개, 에너지 절감 기술(T1-T9)이 9개, 에너지 절감 성능(P1-P8)이 8개로 구성되어 있다(표 4.5 참고).

표 4.5 Data set for SEM

Case	Project characteristics										Renovation techniques									Energy performance				
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	P1	P2	P3	P4	P5
1	4	3	1	2	4	4	1	1	5	1	5	5		2	4	3	5	1	5	2	3	2	2	3
2	4	4	1	4	1	1	1	2	1	4	1	1	2	1	3	1	3	1	5	1	1	2	2	2
3	3	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	3	1	4	5	2	3	2	3	1
4	2	2	1	2	3	3	2	1	5	1	2	2	2	5	2	1	2	4	2	3	2	3	2	2
5	4	4	1	2	2	4	1	1	1	1	2	5	5	2	4	3	1	1	5	3	2			1
6	4	4	1	2	3	3	1	1	1	1	3	5	5	1	4	3	3	1	5	2	2			1
7	4	4	1	3	3	4	1	1	1	1		5	5	3	4	3	3	1	5	2	2			2
8	4	4	1	3	3	4	1	1	1	1	5	5	5	2	1	3	5	1	5	2	2			1
9	4	4	1	3	2	4	1	1	2	1	5	5	5		4	3	3	1	5	2	2			1
10	4	4	1	3	3	4	1	1	4	1	3	5	5	1	4	3	5	3	5	2	2			1
·																								
·																								
·																								
47	1	1	1	1	1	1	2	2	1	4	2	3	3	2	1	1	1	4	1	4	3	3	1	
48	1	4	2	2	2	3	1	1	2	1	1	5	2	5	3	3	1	1	5	3	2	1	1	1
49	1	4	2	1	2	2	1	3	1	1	1	1	5	1	3	3	1	1	5	2	2	1	1	1
50	1	4	2	4	1	1	1	3	1	1	1	5	2	1	2	3	1	1		2	2	1	1	1
51	2	3	1	1	1	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	3	3	4	5	3	3	2	1	1
52	3	1	2	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	5	3	3	2	1	
53	3	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	5	3	2	2	1	
54	1	1	1	2	1	1	3	3	3	4	2	4	4	3	6	3	5	4	5	4	3	3	1	
55	3	1	1	2	2	1	1	1	4	1	1	2	2	2	2	3	1	4	2	4	3	3	1	

4.4.2 결측값 분석

본 연구에서 수집한 스마트 시티 프로젝트 사례는 이미 완료된 프로젝트가 있는 반면, 현재 진행 중인 프로젝트도 존재하기 때문에 정보가 부족한 사례들이 존재한다. 또한, 모든 프로젝트가 동일한 데이터를 제시하지 않아 데이터의 결측치가 발생했다. 그러나 구조방정식 모형 개발에 앞서, 데이터 셋의 결측값은 대체되어야 한다. 그 이유는 AMOS를 활용한 구조방정식 모형 분석 시 오류가 발생하여 분석이 진행되지 않기 때문이다. 또한, 결측값의 존재는 자료의 불완전성을 초래하고, 이러한 자료로부터의 추정치는 일관성에 문제가 있으며, 분석결과의 신뢰성과 타당성을 저하시키는 문제를 초래한다.

결측값 분석에 앞서 결측값이 어떻게 발생한 것인지를 점검해야 한다. 연구자들은 결측값의 발생 원인에 따라 상이한 결측값 분석 방법이 적용되어야 한다는 의견일치를 보이고 있다. 결측값이 발생하는 원인에 따라서 결측값의 유형은 크게 완전무작위 결측(MCAR: Missing Completely At Random), 무작위적 결측(MAR: Missing At Random), 무시할 수 없는 결측(NI: Non-ignorable)과 같이 세 가지 유형으로 나뉜다. 결측값의 발생 원인의 세 유형은 다음과 같다. 첫째, 완전무작위적 결측(MCAR)은 어느 두 변수를 상정할 때 한 변수의 결측값 발생 가능성이 두 변수 어느 것으로부터도 영향을 받지 않는 독립적인 방식이다. 이를 통계학적 의미로 살펴보면 결측값이 무작위적으로 발생했음을 의미한다. 또한, 완전무작위 결측은 조사 및 설문지 내용으로부터 도출된 데이터를 통하여 결측값이 발생할 확률을 예측할 수 없음을 의미한다. 둘째, 무작위적 결측(MAR)은 어떠한 결측치가 발생할 가능성을 관측된 자료를 통해 예측할 수 있지만 관측된 자료의 통제 시 결측된 자료와 관측된 자료는 통계적으로 독립적임을 의미한다. 다시 말해, 주어진 관측치를 활용하면 결측값의 발생 가능성을 예측할 수 있다. 셋째, 무시할 수 없는 결측(NI)은 결측값의 발생 가능성을 관측된 자료를 통해 예측할 수 없는 경우에 해당한다. 즉, 결측된 변수의 값이 그 발생 원인과 직접적으로 관련이 있다면, 결측값의 발생 원인이 무시할 수 없는 것을 의미한다. 이러한 “무시할 수 없는 결측”과 대비되어 “완전무작위 결측”과 “무작위적 결측”은 결측값의 발생 원인을 무시할 수 있는 것으로 본다. “무시할 수 있는” 결측값을 대체하는 대표적인 방법은 다음과 같다⁴²⁾.

42) 김덕준 (2011), 범주형 자료의 결측치 처리 방법, 한국비교정부학회 한국비교정부학보, 제 25권 2

본 연구의 데이터와 같은 범주형 데이터의 결측값 분석의 대표적인 방법은 Expectation Maximization(EM)기법, 완전사례분석기법(Complete Case Analysis Method), 다중대체기법(Multiple Imputation Method), 회귀분석기법(Regression Method)이 있으며, 각 결측값 분석 방법의 기본 논리와 특성은 다음과 같다.

EM기법은 모든 변수들의 결합분포가 다변량 정규분포를 띄고 있다는 가정과 결측값의 발생원인이 “무시할 수 있는” 것이라는 가정 하에서 결측치를 보완하는 방식이다⁴³⁾⁴⁴⁾. 김덕준 (2011)에 따르면, EM기법은 E단계에서 결측값들의 조건부 기댓값을 구하여 결측값을 대체하고, M단계에서 E단계를 통해 얻은 대체값이 포함된 완성된 데이터 셋의 로그 우도를 최대화시켜 다시 추정치들의 수치를 수정해 나간다. 결과적으로, 두 단계가 반복되어 결측값들의 조건부 기댓값이 일정한 값에 수렴하게 된다.

완전사례분석기법은 결측값을 분석하는 방법 중 가장 보편적으로 쓰이며 그 해결방법이 용이하다. 이 방법은 앞서 설명한 완전무작위 결측의 경우에 주로 사용되며, 결측값의 비율이 많은 데이터는 이 방법의 사용이 적절하지 않다. 즉, 결측값의 비율이 극히 낮은 10% 이내에서 해당 방법의 실용성을 제고할 수 있다.

다중대체기법은 표준분석방식을 사용하여 결측값을 대체하는 방법이다. 이 방법에서는 EM기법과 달리 결측값들의 조건부 기댓값이 아닌 추정치를 계산하고 사후확률분포(posterior probability distribution)를 사용한다. Schafer (1997)와 Tanner (1993)에 따르면, 사후확률분포는 관측치와 현재의 모수 추정치가 주어지고 모수를 알고 있다는 가정하에서 결측값들의 조건부 분포를 통해 결측값의 값을 표본추출하는 I 단계와 데이터가 완전하게 구성되었다는 가정하에서 다시 모수를 추정하는 P 단계를 거쳐 구할 수 있다⁴⁵⁾.

회귀분석기법은 회귀분석을 실시하여 결측값을 대체하는 기법이다. 기본 논리는 결측값이 발생된 변수를 종속변수로 설정하고, 관측된 변수를 독립변수로 설정하여 회귀분석을 실시한다. 이때, 도출된 회귀계수를 통해 결측값을 대체한다. 그러나 회귀계수의 표준편차를 반영하지 않고 회귀분석을 통해 나온 최초의 회귀계수를 사용하게 된다

호, pp.319-342

43) Dempster, A. P., Laird, N. M., and Rubin, D. B. (1977). Maximum Likelihood form Incomplete Data via the EM Algorithm, Journal of Royal Statistical Society, Series B(Methodological), 39(1), pp. 1-38.

44) Schafer, J. L. (1997). Analysis of Incomplete Multivariate Data. New York: Chapman & Hall.

45) Tanner, M. A. (1993). Tools for Statistical Inference. New York: Springer-Verlag.

면 결측값 분석의 결과에 오류를 범하게 된다⁴⁶⁾.

본 연구의 데이터 셋에 대한 빈도분석 결과에서 볼 수 있듯이, 변수들의 결측값 비율이 0%부터 44%까지 상당한 차이가 나타났다(표 4.6 참고). 특히, 에너지 절감 성능(P1-P8)의 결측비율이 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 결측값의 비율이 낮을 때와 높을 때 모두 효과적인 것으로 드러난 EM기법을 사용하여 결측값을 대체하였으며, 결측값을 대체한 본 연구의 데이터 셋은 표 4.7과 같다.

표 4.6 Result of frequency analysis

Variable	N		missing value rate(%)
	valid value	missing value	
C1	55	0	0
C2	55	0	0
C3	55	0	0
C4	50	5	9
C5	53	2	4
C6	54	1	2
C7	55	0	0
C8	55	0	0
C9	55	0	0
C10	55	0	0
T1	48	7	13
T2	52	3	5
T3	54	1	2
T4	51	4	7
T5	55	0	0
T6	55	0	0
T7	55	0	0
T8	55	0	0
T9	52	3	5
P1	53	2	4
P2	53	2	4
P3	31	24	44
P4	31	24	44
P5	35	20	36
P6	35	20	36
P7	35	20	36
P8	35	20	36

46) Allison, P. D. (2002). Missing Data. Thousand Oaks, CA: Sage.

표 4.7 Data set for SEM through imputation of missing values

Case	Project characteristics										Renovation techniques									Energy performance							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	4	3	1	2	4	4	1	1	5	1	5	5	7	2	4	3	5	1	5	2	3	2	2	3	3	1	1
2	4	4	1	4	1	1	1	2	1	4	1	1	2	1	3	1	3	1	5	1	1	2	2	2	2	1	1
3	3	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	3	1	4	5	2	3	2	3	1	1	3	3
4	2	2	1	2	3	3	2	1	5	1	2	2	2	5	2	1	2	4	2	3	2	3	2	2	3	1	1
5	4	4	1	2	2	4	1	1	1	1	2	5	5	2	4	3	1	1	5	3	2	2	3	1	1	3	3
6	4	4	1	2	3	3	1	1	1	1	3	5	5	1	4	3	3	1	5	2	2	2	3	1	2	1	1
7	4	4	1	3	3	4	1	1	1	1	4	5	5	3	4	3	3	1	5	2	2	2	2	2	2	1	1
8	4	4	1	3	3	4	1	1	1	1	5	5	5	2	1	3	5	1	5	2	2	1	1	1	1	2	2
9	4	4	1	3	2	4	1	1	2	1	5	5	5	1	4	3	3	1	5	2	2	2	2	1	1	4	4
10	4	4	1	3	3	4	1	1	4	1	3	5	5	1	4	3	5	3	5	2	2	2	3	1	1	3	3
·													·														
·													·														
·													·														
47	1	1	1	1	1	1	2	2	1	4	2	3	3	2	1	1	1	4	1	4	3	3	1	3	3	1	1
48	1	4	2	2	2	3	1	1	2	1	1	5	2	5	3	3	1	1	5	3	2	1	1	1	1	4	3
49	1	4	2	1	2	2	1	3	1	1	1	1	5	1	3	3	1	1	5	2	2	1	1	1	1	3	3
50	1	4	2	4	1	1	1	3	1	1	1	5	2	1	2	3	1	1	5	2	2	1	1	1	1	4	4
51	2	3	1	1	1	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	3	3	4	5	3	3	2	1	1	1	4	4
52	3	1	2	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	5	3	3	2	1	0	0	3	4
53	3	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	5	3	2	2	1	1	1	3	3
54	1	1	1	2	1	1	3	3	3	4	2	4	4	3	6	3	5	4	5	4	3	3	1	1	1	1	2
55	3	1	1	2	2	1	1	1	4	1	1	2	2	2	2	3	1	4	2	4	3	3	1	4	4	2	1

제 5장 구조방정식 모형 개발

5.1 신뢰도 분석 및 요인분석

5.1.1 신뢰도 분석

앞서 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트 사례를 바탕으로 세 요인(즉, 건축물의 속성, 에너지 절감을 위한 리모델링 기술, 에너지 절감 성능)의 데이터를 수집하였다. 이에 대한 구조방정식 모형을 분석하기 위해 결측값을 대체하여 완전한 데이터 셋을 도출했다. 도출된 데이터의 분석을 진행하기에 앞서, 신뢰도 평가가 요구된다. 신뢰도 분석은 척도의 신뢰성을 확인하기 위한 분석으로써, 본 연구에서는 데이터 셋을 구성하는 요인이 사례에 따라 값의 일관성을 확인하는 분석을 의미한다. 신뢰도 분석은 측정하고자 하는 사항이 사례로부터 일관되고 정확한 값을 얻을 수 있는지, 측정도구로서 유의미 한지 확인하는 절차이며, 연구결과의 해석을 위한 필요조건이다.

본 연구는 대표적으로 사용되는 내적일관성(Internal consistency)평가를 통해 신뢰도 분석을 진행했다. 내적일관성은 항목들 간의 상관관계로 평가되며, 항목들 간의 상관관계가 높을수록 내적일관성이 높다. 본 연구에서는 내적일관성 검증을 위해 Cronbach's α 계수를 이용하여 결측값이 대체된 데이터 셋의 신뢰도 분석을 실시하였다. Cronbach's α 계수는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 일반적으로 0.8-0.9 이상이면 바람직하고, 0.6-0.7이면 수용할 만한 것으로 여겨진다. 그러나, 0.6보다 작을 경우 내적일관성을 결여한 것으로 받아들여진다. 본 연구의 신뢰도 기준은 Cronbach's α 계수 0.6 이상으로 설정하였다⁴⁷⁾. Cronbach's α 계수는 다음과 같은 식을 통해 측정된다.

47) Sharma. S. (1996). Applied multivariate techniques, New York: Wiley.

$$\alpha = \left(\frac{k}{k-1}\right)\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_t^2}\right) \text{-----(11)}$$

여기서, k는 전체 항목 수, σ_i^2 는 i항목의 분산값, σ_t^2 는 전체 항목의 분산값을 의미한다.

사례로부터 얻은 데이터 셋의 신뢰도 분석결과, 최초 Cronbach's α 계수 값이 0.501로 나왔다. 따라서 결측값이 많아 신뢰도를 저해하는 요인 P7과 P8을 제거하였고, 이때의 Cronbach's α 계수 값이 0.617로 기준치인 0.6보다 높게 나타났다. 따라서 본 연구의 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트로부터 얻은 데이터는 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

표 5.1 Analysis of reliability

Initial Cronbach's α	Final Cronbach's α
0.501	0.617

5.1.2 요인분석

요인분석은 변수들의 상호 관련성을 소수의 요인(factor)으로 추출하여 전체변수들의 공통요인을 찾아내 각 변수가 받는 영향의 정도와 그 집단의 특성을 규명하는 통계분석방법이다. 즉, 실제 결과를 초래하게 되는 요인을 찾아냄으로써 목표로 하는 명제를 설명하는 다변량 통계분석방법이다.

요인분석의 목적은 여러 개의 변수들에 내제된 정보를 이용하여 보다 적은 수의 요인으로 압축, 요약하는 데 있다. 일반적인 요인분석의 목적은 다음과 같다. 첫째, 변수들을 축소한다. 여러 개의 관련 있는 변수들이 하나의 요인으로 묶임으로써 많은 변수들이 적은 수의 요인으로 줄어들게 된다. 둘째, 불필요한 변수들을 제거한다. 요인에 포함되지 않거나 포함되더라도 중요도가 낮은 변수를 찾을 수 있으므로 불필요한 변수가 제거된다. 셋째, 변수들의 특성을 파악한다. 관련된 변수들이 묶여 요인을 이루고 이들 요인들은 상호 독립적인 특성을 가지게 되므로 변수들의 특성을 알 수 있다. 넷째, 측정항목의 타당성(validity)을 평가할 수 있다. 하나의 특성을 측정하기 위해 관측된 변수들은 하나의 요인으로 묶여진다. 따라서, 이와 같은 특성을 이용하여 묶이지 않은 변수는 다른 특성을 가진다고 판단한다. 이것으로 그 특성의 측정항목이 타당한가를 평가할 수 있다.

요인분석의 절차는, 첫째, 모든 변수들 사이의 상관행렬을 구하고, 둘째, 회전하지 않은 각각의 요인을 추출한다. 셋째, 보다 나은 해석을 위해 요인들을 회전시키고, 넷째, 회전된 요인과 관계있는 요인 부하량이 큰 변수의 내용에 근거하여 요인에 이름을 부여한다. 이처럼 요인분석은 잠재적 특성을 측정하기 위하여 검사를 실시하거나 변수를 측정하여 그들 간 상관계수를 구하면 서로 상관계수가 높은 변수들끼리 모여서 작은 수의 변수집단인 요인으로 구분된다. 요인분석은 목적에 따라 탐색적 요인분석(exploratory factor analysis)과 확인적 요인분석(confirmatory factor analysis)으로 나눌 수 있다. 탐색적 요인분석은 이제까지 요인과 변수 간의 관계가 이론상으로 확립되어 있지 않거나 논리적으로 체계화되지 않은 상태에서 주로 사용하며, 확인적 요인분석은 변인들 간의 기존 관계를 가설로 설정하고 요인분석을 통하여 그 관계를 입증하는 데 사용한다⁴⁸⁾.

탐색적 요인분석은 이론적인 근거가 없기 때문에 모든 측정변수가 모든 요인으로부터

48) 김춘경, 이수연, 이윤주, 정종진, 최응용, “상당학 사전”. 학지사. 2016

터 영향을 받는다고 가정하고, 이를 바탕으로 어떤 요인과 상관관계가 높은 측정변수 (다른 요인과는 상관관계가 낮아야 함)들을 하나의 요인으로 추출하여 변수를 축약한다. 그래서 탐색적 요인분석은 이론적 배경이나 선행연구에 근거하기보다는 데이터가 보여주는 결과 자체를 그대로 받아들여지게 되므로 이론 생성과정(theory generating procedure)에 가깝고, 데이터 지향적(data driven)인 성격을 띠는다고 할 수 있다⁴⁹⁾⁵⁰⁾.

구조방정식 모형은 논리적인 영향 관계를 고려하여 잠재변수들 사이의 관계인 구조 모형을 잘 설정해야 한다. 구조 모형을 설정하기에 앞서 잠재변수들을 설정해야 한다. Hair et al. (2006)에 따르면, 잠재변수는 이전 연구의 이론을 바탕으로 설정하거나 요인의 구조를 가정하지 않은 탐색적 요인분석을 통해 설정함을 알 수 있다. 본 연구에서는 건물의 속성에 관한 외생잠재변수를 탐색적 요인분석을 통해 설정했으며, SPSS 24를 사용하여 진행되었다.

SPSS 24에서는 가장 먼저 요인분석의 모형에 대한 적합도 검정 결과인 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)의 MSA(Measure of Sampling Adequacy)와 Bartlett의 구형성 검정 결과가 제시된다. KMO의 MSA는 변수들 간의 편상관계수가 얼마나 작은지를 확인하는 방법이며, KMO의 해석기준은 일반적으로 0.5 이상이면 수용할 수 있으며, 0.7 이상은 약간 좋음, 0.9 이상은 아주 이상적인 것으로 해석된다.⁵¹⁾ Bartlett의 구형성 검정은 변수들이 모두 상관관계가 없다는 귀무가설과 하나라도 상관관계가 있다는 대립가설을 설정하여 대립가설이 채택되는지를 파악하여 확인한다. 이는 변수들 간의 상관관계가 있음을 확인하여 통계적으로 유의한 경우 요인분석을 시도해 볼 가치가 있음을 나타낸다.

또한, 요인분석의 결과를 제공함에 있어서 요인적재량(factor loading)과 공통성(communality) 그리고 요인의 고유치 등을 명확하게 효율적으로 정리할 필요가 있다. 공통성은 변수에 포함된 요인들에 의해 설명되는 비율을 의미한다. 일반적으로 공통성의 값은 0.5 미만이면 모든 변수를 충분히 설명할 수 없음을 의미한다⁵²⁾. 고유값은 변

49) Stapleton, C. D. (1997). Basic concepts and procedures of confirmatory factor analysis. Paper presented at the annual meeting of the Southwest Educational Research Association, Austin, TX, January, pp.23-25.

50) Van Prooijen, J. -W., and Van der Kloot, W. A. (2001). Confirmatory analysis of exploratively obtained factor structures, Educational and Psychological Measurement, 61(5), pp. 777-791.

51) Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity, Psychometrika, 39(1), pp. 31-36.

52) Enders, C. K., and Bandalos, D. (2001). The relative performance of full information maximum likelihood estimation for missing data in structural equation models, Structural Equation Modeling, 8(3), pp. 460-59.

수의 분산이 어떤 요인에 의해 어느 정도 표현되는지를 나타내주는 비율이며, 먼저 추출된 요인의 고유값은 항상 다음에 추출되는 요인의 고유값보다 크다. 요인적재량은 요인과 각 변수 간의 상관관계의 정도를 나타낸다. 따라서 각 변수들의 요인적재량이 가장 높은 요인에 속하게 된다. 많은 학자들은 요인적재량의 크기에 대해 0.3-0.7에 이르기까지 다양한 의견을 제시하였으며⁵³⁾⁵⁴⁾, 본 연구에서는 요인적재량의 기준을 0.5로 설정하였다.

본 연구에서는 가장 많이 사용되는 주성분분석 방법을 사용하여 산출된 고유값과 스크리도표(scree plot) 결과 등을 참고하여 요인의 수를 정하였다. 이때 고유값 기준은 1로 설정하였다. 또한, 요인의 해석을 단순화하는 방법으로써 가장 많이 사용되는 베리맥스(Varimax) 회전방식을 적용하였으며 수렴을 위한 최대 반복 횟수는 SPSS 24의 기본값인 25로 설정하였다. 본 연구의 요인분석 결과는 다음과 같다.

표 5.2 Initial exploratory factor analysis

Variables	Factor loading of component				Cumulative percent of variance explained(%)
	1	2	3	4	
C5	0.858	-0.064	0.243	0.068	22.235
C6	0.773	-0.014	-0.506	-0.030	
C8	-0.606	-0.300	0.058	0.119	
C10	-0.595	-0.336	-0.021	0.196	
C2	0.081	0.750	-0.086	-0.263	41.036
C7	-0.064	-0.739	0.282	0.069	
C4	0.230	0.720	0.224	0.256	
C3	0.032	-0.121	0.931	-0.023	54.283
C9	0.062	0.029	0.010	0.865	66.970
C1	0.318	0.174	0.026	-0.567	

KMO =.540, Bartlett = 124.177, df(degree of freedom) = 45, p = .000

요인분석을 실시할 때, 요인이 구성하고 있는 변수들 간의 상관관계가 높아야 한다는 집중타당도와 이 변수들이 다른 요인과는 상관관계가 낮아야 한다는 판별타당도를 고려해야 한다. 집중타당도의 경우에는 요인적재량이 0.5 미만일 경우 집중타당도가 저

53) Kline, P. (1994). An easy guide to factor analysis. London: Routledge.

54) MacCallum, R. C., Widaman, K., Zhang, S., and Hong, S. (1999). Sample size in factor analysis. Psychological Methods, 4(1), pp. 84-99.

해된다고 판단할 수 있다. 판별타당도의 경우에는 교차요인적재량(cross factor loading)이 0.4 이상일 경우 판별타당도가 저해된다고 판단할 수 있다. 이러한 기준을 만족하지 못하는 변수를 정제하여 새로운 요인을 추출한다⁵⁵⁾. 표 5.2에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 처음 실시한 요인분석 결과 C6이 교차요인적재량이 -0.506으로 나타나 판별타당도를 해치는 것으로 나타났다. 따라서 변수 C6을 제거하였다. 본 연구에서는 이러한 변수정제과정을 한번 더 거쳐 변수 C4를 추가로 제거하여, 총 C6과 C4가 제거되었다.

변수정제과정을 통해 최종적인 요인분석 결과는 다음과 같다. 먼저 표 5.3은 공통성 값을 나타내며 모든 값이 0.5 이상으로 나타나 변수가 요인들에 의해서 잘 설명됨을 알 수 있다. 공통성 값은 주성분분석법에 의해 추출된 요인이 각 변수를 설명하는 비율이 나타나 있다.

표 5.3 Result of communality

Variables	Communality	
	Initial	Extraction
C1	1	0.559
C2	1	0.523
C3	1	0.530
C5	1	0.715
C7	1	0.712
C8	1	0.523
C9	1	0.641
C10	1	0.592

Extraction method : Principal
 component analysis

55) 강태훈, 조혜영, 오민아 (2013), 교육 연구에서의 탐색적 요인분석 사용 실태에 관한 조사연구, 한국교육방법학회 교육방법연구, 제 25권 3호, pp. 521-541

표 5.4는 고유값 기준인 1보다 큰 결과만 제시한 것으로, 베리맥스 방법을 적용했을 때 재계산된 설명력(%분산), 누적설명력(%누적분산)을 포함한다. 세 요인의 설명력은 59.931%로 나타났다. 각 외생변수는 각각 23.955%(CG1), 19.995%(CG2), 15.981%(CG3)의 분산을 설명했다. 건물의 속성에 관한 외생잠재변수는 CG1(Characteristic Group 1), CG2(Characteristic Group 2), CG3(Characteristic Group 3)로 정의했다. 예를 들어, 잠재변수 CG2는 3개의 관측변수인 “shape of building(C7, factor loading = .774)”, “longitude(C2, factor loading : -.572)”, “purpose of use(C3, factor loading : .691)”로 구성된다. 요인분석 결과의 적합성 검토 결과, KMO값은 .616으로 수용할 만한 수준이며, Bartlett의 구형성 검정을 통해 $\chi^2(p) < .05$ 의 기준에 만족하는지 확인하여 변수들 간의 상관관계가 있다고 나타났다.

표 5.4 Final exploratory factor analysis

Variables	Characteristics of the building (observed variables)	Factor loading	Percent of variance explained (%)	Cumulative percent of variance explained (%)	Components (exogenous latent variables)
C5	Area of remodeling	-.777	23.955	23.955	Characteristics group 1
C10	Types of facade	.730			
C8	Shape of roof	.687			
C7	Shape of building	.774	19.995	43.950	Characteristics group 2
C3	Purpose of use	.691			
C2	Longitude	-.572			
C9	Direction of building	-.795	15.981	59.931	Characteristics group 3
C1	Latitude	.697			

KMO =.616, Bartlett = 59.393, df(degree of freedom) = 28, p = .000

다음으로 나타나는 스크리도표는 앞의 요인별 고유값을 꺾은 선 그래프로 제시한 결과이다. 붉은선은 고유값 기준인 1을 나타내며, 붉은선을 기준으로 위에 나타나 있는 세 성분이 본 연구의 외생잠재변수에 해당하는 CG1, CG2, CG3를 의미한다. 스크리도표는 요인 수를 결정하는 시각적 결과물로서, 고유값을 표현한 것에 불과하고, 또한 꺾이는 정도가 크다 혹은 작다는 판단은 주관적이므로 보조적인 지표로 활용된다(그림 5.1 참고).

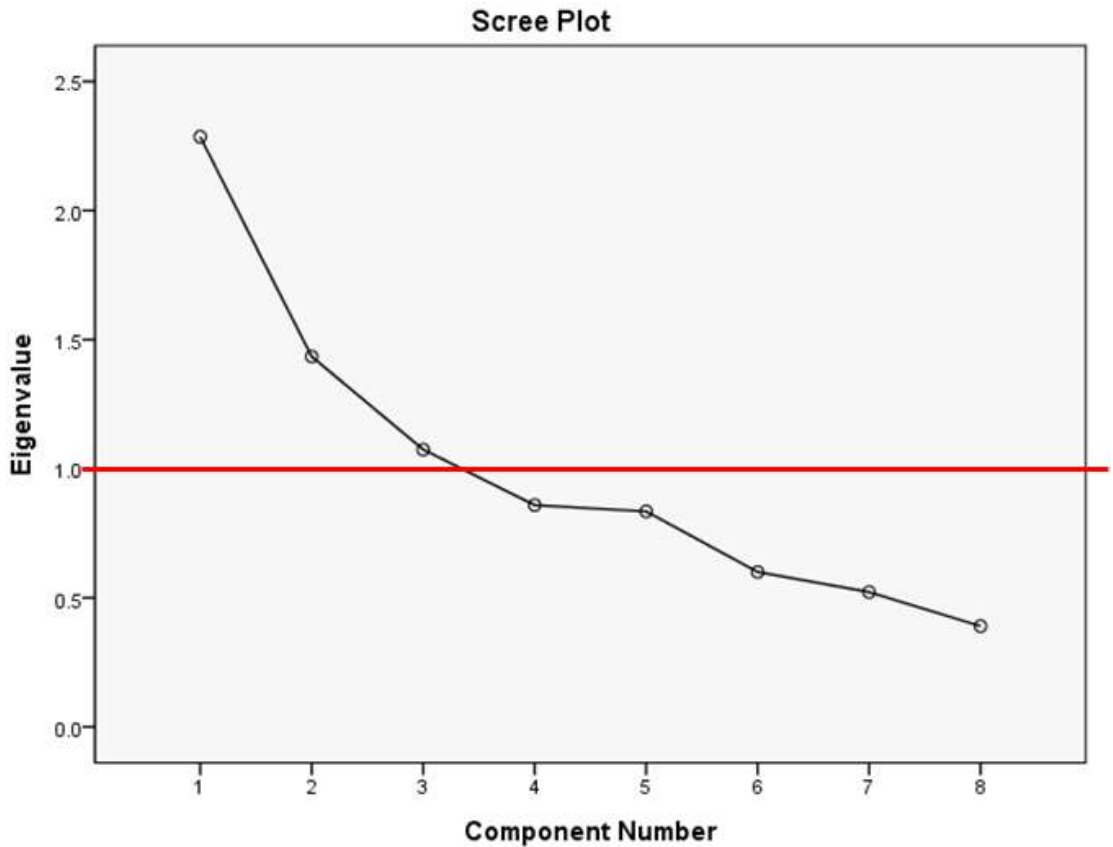
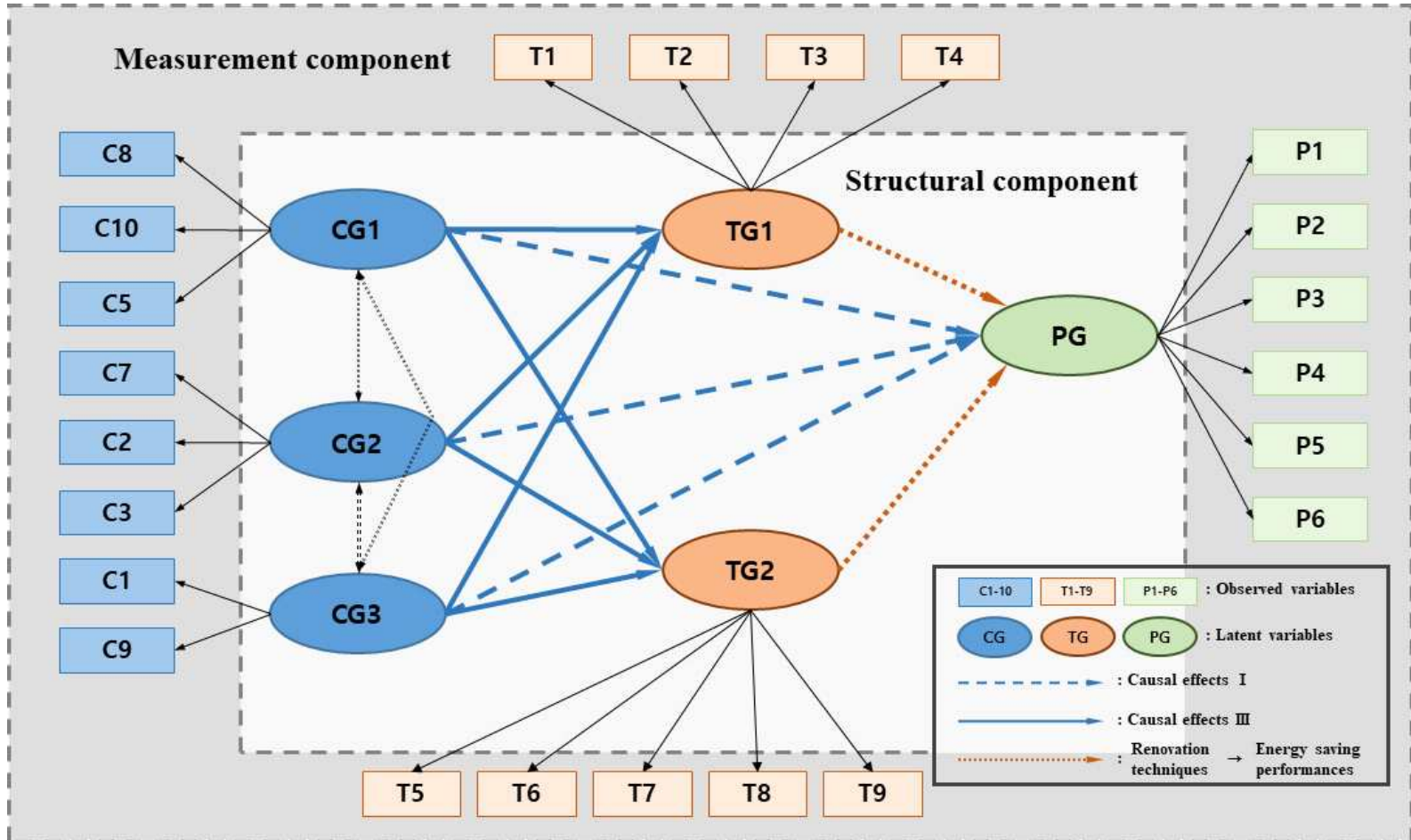


그림 5.1 Scree plot

5.2 모델 개발 및 적합도 평가

본 연구는 스마트 시티의 노후화 건물의 속성이 리모델링 기술을 매개하여 에너지 절감 성능에 미치는 영향을 실증 분석하고자 연구가설에 따라서 그림 5.2와 같은 연구의 가상의 초기 구조방정식 모형을 설정하였다. 본 연구의 구조방정식 모형은 외생잠재변수(CG1, CG2, CG3)와 매개변수(TG1(Technique Group 1), TG2(Technique Group 2)) 또한 내생잠재변수(PG(Performance Group))로 구성되어 있으며, 외생잠재변수와 내생잠재변수 사이의 인과관계를 알아보는 동시에 외생잠재변수와 내생잠재변수 사이에서 매개변수의 매개효과에 대해 살펴보고자 한다. 매개변수(TG1, TG2)는 매개변수를 구성하는 요소들이 명확히 구분되어, 단열성능을 높여 에너지 효율을 높이는 기술들("TG1")과 에너지 생산 기술("TG2")로 나누었다.



$\chi^2/df : 3.611, GFI : 0.548, CFI : 0.294, RMSEA : 0.220$

그림 5.2 Hypothetical SEM

본 연구는 AMOS25 프로그램을 사용하여 초기 구조방정식 모형의 적합도를 분석하였다. 적합도지수는 연구모형이 입력자료를 반영하는 정도를 수치로 나타낸 절대적합도지수와 연구모형이 null모형(모든 측정변수가 서로 관계가 없다고 가정한 모형)에 비해 얼마나 적합도가 높은가를 확인하는 증분적합도지수로 나뉜다. 본 연구에서는, 절대적합도지수인 χ^2/df (degree of freedom), GFI, RMSEA를 사용하고, 증분적합도지수 중 하나인 CFI의 값을 통해 적합도 평가를 하였다. 절대적합도지수인 χ^2/df 는 1에서 2사이일 경우 모형이 적합한 것으로 판단되고, GFI는 0.9 이상, RMSEA는 0.08 혹은 0.1 이하일 경우에 모형이 적합한 것으로 판단된다. 증분적합도지수 중 하나인 CFI는 0.9 이상일 경우에 모형이 적합한 것으로 판단된다⁵⁶⁾. 초기 구조방정식 모형의 적합도 평가 결과, χ^2/df : 3.611, GFI : 0.548, CFI : 0.294, RMSEA : 0.220 와 같이 적합도가 낮아 모델 선정이 불가능하다(표 5.5 참고).

표 5.5 Evaluation of Goodness of fit(GOF)

GOF	Cutoff criteria for GOF indices	Hypothetical SEM	Final SEM
χ^2/df	from 1 to 2	3.674	1.255
GFI	over 0.9	0.552	0.843
CFI	over 0.9	0.272	0.942
RMSEA	below 0.1	0.223	0.069

56) Rigdon, E. (1996). CFI Versus RMSEA: A Comparison of Two Fit Indices for Structural Equation Modeling, *Structural Equation Modeling*, 3(4), pp. 369-379.

이처럼 적합도가 만족 수준에 미치지 못하는 경우에는 모델 수정을 통하여 적합도를 향상시켜야 한다. 모델 수정은 두 방법을 통해 진행될 수 있다. 첫째, 낮은 상관관계계를 갖는 경로 및 변수를 제거한다. 둘째, AMOS25에서 제공하는 수정지수를 이용하여 새로운 경로 및 오차 사이의 공분산을 추가한다⁵⁷⁾⁵⁸⁾. 본 연구에서는 두 방법을 모두 사용하여 적합도를 향상시켜 최종 모델을 개발하였다. 그 결과 8개의 변수(C3, C7, T3, T4, T5, T6, T7, P3)가 제거되었고, CG2에서 TG1, TG2 사이의 인과관계 경로는 제거되었다. 그리고 변수들 사이에 새로운 인과관계가 추가되었다. 최종 SEM의 적합도 평가 결과, χ^2/df : 1.255, GFI : 0.843, CFI : 0.942, RMSEA : 0.069와 같이 적합도 개선됨을 볼 수 있으며, GFI를 제외하고 모두 허용 기준을 충족했다(표 5.5 참고). 기준을 만족하지 못하는 적합도 지표가 확인되었으나, 구조방정식 모형에서 모든 지표가 만족스러운 적합도 지수를 얻기 어렵다⁵⁹⁾. 본 연구는 일반적으로 적합도 기준을 만족하고 있기에 분석하기에 이상이 없다고 판단하였다.

그림 5.3에서 볼 수 있듯이, 최종 구조방정식 모형은 6개의 외생잠재변수(즉, 건축물의 속성)로 구성되고, 매개변수인 리모델링 기술에서는 4개의 변수로 구성되고, 마지막으로 내생잠재변수인 프로젝트의 에너지 성능은 총 5개의 변수로 구성된다. 세 가지 변수 그룹(외생잠재변수, 매개변수, 내생잠재변수) 간의 관계를 그림과 같이 화살표를 통해 나타냈다. 화살표 끝에 기술되어 있는 숫자는 회귀 분석의 회귀 계수값과 유사한 것으로서 영향 수준을 설명한다. 그리고 숫자가 기술되어 있지 않은 화살표는 유의수준 95%에 만족하지 못하여 낮은 신뢰도를 보이는 경로이다.

57) Sarker, M., Aulakh, P., and Cavusgil, S. (1998). The strategic role of relational bonding in inter-organizational collaborations: An empirical study of the global construction industry, *Journal of International Management*, 4(2), pp. 415-421.
 58) Wong, P., and Cheung, S. (2005). Structural equation model of trust and partnering success, *Journal of Management in Engineering*, ASCE, 21(2), pp. 70-80.
 59) Gefen, D., Karahanna, E., and Straub, D. (2003). Trust and TAM in Online Shopping: An integrated model, *MIS Quarterly*, 27(1), pp. 51-90.

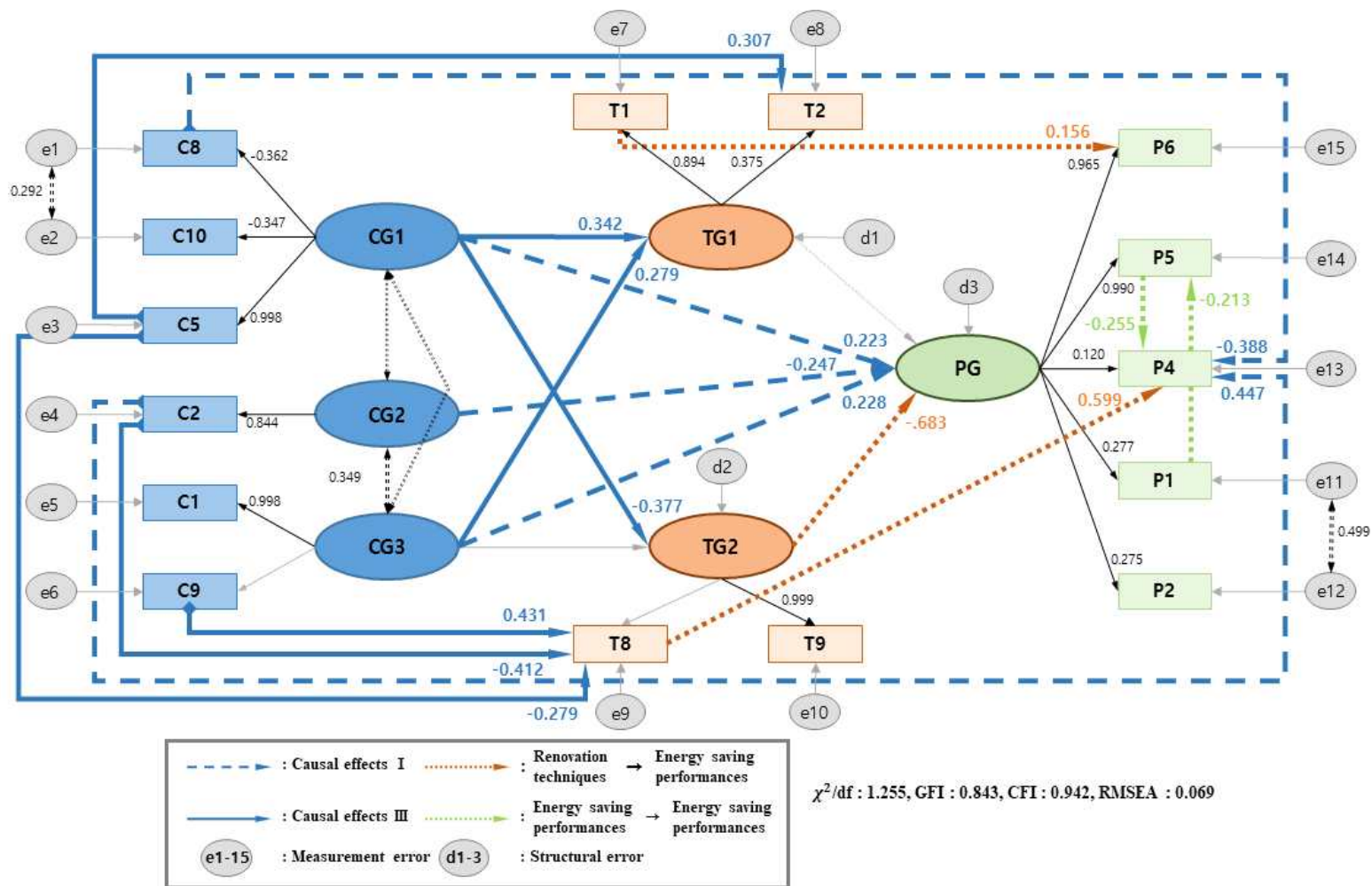


그림 5.3 Final SEM among the three factors

제 6장 최종 구조방정식 모형 분석

6.1 최종 구조방정식 모형 경로 분석

표 6.1에서 볼 수 있듯이, 구조방정식 모형의 각 경로에 대한 H1-H9는 잠재변수 간의 관계에 해당하는 구조 구성요소에 관한 결과이며, H10-H19는 사례조사를 통해 관측한 변수들 사이의 관계에 관한 결과이다. 표 6.1에서는 구조방정식 모형의 경로에 대한 유의성을 검증하기 위해 비표준화 회귀계수, 표준화 회귀계수, 표준오차, C.R.(Critical ratio)값, 유의확률 p값을 확인해야 한다. 회귀계수의 통계적 유의성은 C.R.값이 ± 1.96 보다 크거나 p값이 0.05보다 작으면 통계적으로 유의하다고 판단한다. 첫 번째로 구조 구성요소 간의 관계는 다음과 같다.

(i) CG1의 영향(H1, H2, H7); C8(지붕의 모양), C10(입면의 형태), C5(리모델링 공사 면적)를 포함하는 CG1은 T1(벽체 단열공사)와 T2(바닥 단열공사)를 포함하는 TG1에 긍정적인 영향을 미쳤고(standardized coefficient = .342, $p = .014$), T8(조명설비)와 T9(태양광 시스템)을 포함하는 TG2에는 부정적인 영향을 미쳤으며(standardized coefficient = -.377, $p = .003$), 에너지 절감 성능 지표인 PG에 긍정적인 영향을 미쳤다(standardized coefficient = .233, $p = .036$). 지붕과 입면의 종류에 따라 단열공사 성능을 나타내는 열관류율에 차이가 있었으며, 리모델링 공사 면적이 커지면서 단열성능이 떨어지는 것으로 나타났다.

(ii) CG2의 영향(H8); C2(경도)를 포함하는 CG2는 PG에 부정적인 영향을 미쳤다(standardized coefficient = -.247, $p = .042$). 동유럽 지역에 위치한 건축물의 에너지 성능 개선 결과가 서유럽 지역보다 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

(iii) CG3의 영향(H3, H4, H9); 태양의 일조와 관련이 있는 C1(위도)와 C9(건물의 방향)을 포함하는 CG3는 TG1에 긍정적인 영향을 미쳤고(standardized coefficient = .279, $p = .045$), PG에도 긍정적인 영향을 미쳤다(standardized coefficient = .228, $p = .036$). 위도가 높은 지역일수록 실내외의 온도차가 높아 열관류율값이 높게 나타났으나, 에너지 성능 개선 폭이 큰 것으로 나타났다. 그러나 관련이 있을 것으로 예상되었던 TG2(조명설비, 태양광 시스템)에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(standardized coefficient = .208, $p = .100$).

(iv)TG1의 영향(H5); 단열성능 개선을 통해 에너지 효율을 높이는 기술을 포함하는 변수 TG1은 유의수준을 만족하지 못하여 PG에 영향을 미친다는 가설은 기각되었다(standardized coefficient = $-.117$, $p = .337$).

(v)TG2의 영향(H6); T8(조명설비)과 T9(태양광 시스템)을 포함하는 TG2는 PG에 가장 강한 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다(standardized coefficient = $-.683$, $p < .001$).

잠재변수 간의 인과관계를 제외한 나머지 인과관계는 다음과 같다. 모델 수정을 통해 관측변수 간의 새로운 경로가 추가되었다.

“경도(C2) (standardized coefficient = $-.412$, $p < .001$)”와 “리모델링 공사 면적(C5) : (standardized coefficient = $-.279$, $p = .008$)”는 “조명설비(T8)”에 부정적인 영향을 미쳤다(H10, H11). 반면, “건물의 방향(C9)”은 “조명설비(T8)”에 긍정적 영향을 미쳤다(standardized coefficient = $.431$, $p < .001$) (H12). 경도, 리모델링 공사 면적, 건물의 방향에 따라 조명설비의 종류에 차이가 있는 것으로 나타났다.

“리모델링 공사 면적(C5)”은 “바닥 단열공사(T2)”에 긍정적인 영향을 미쳤다(standardized coefficient = $.307$, $p = .016$) (H13). 이를 통해 넓은 면적의 공사가 진행될 때 단열성능을 더욱 고려해야 하는 것으로 나타났다.

“경도(C2) (standardized coefficient = $.447$, $p < .001$)”와 “지붕의 모양(C8) (standardized coefficient = $-.338$, $p < .001$)”은 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 긍정적인 영향을 미쳤다(H14, H15). 즉, 프로젝트의 위치와 지붕 모양의 종류에 따라 단위 기간당 에너지 절감률에 변화가 있음을 알 수 있다.

“벽체 단열공사(T1)”는 “단위 에너지 절감률에 대한 공사 비용(P6)”에 긍정적인 영향을 미쳤다(standardized coefficient = $.156$, $p < .001$) (H16). 이는 벽체 단열성능을 높이하고자 하는 노력을 취하면 에너지 성능이 향상하여, 단위 에너지 절감률에 대해 적은 비용이 드는 것을 알 수 있다.

“조명설비(T8)”는 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 다소 높은 긍정적인 영향을 미쳤다(standardized coefficient = $.599$, $p < .001$) (H17). 즉, 조명설비의 종류에 따라 에너지 절감 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

“에너지 절감량(P1)”은 “단위 에너지 절감량에 대한 공사 비용(P5)”에 부정적인 영향을 미쳤으며(standardized coefficient = $-.213$, $p < .001$), “단위 에너지 절감량에 대한 공사 비용(P5)”은 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 부정적인 영향을 미쳤다

(standardized coefficient = $-.255$, $p = .015$) (H18, H19). H18의 경우, P5는 P1의 역수값을 포함하기 때문에 P1과 P5 사이에 부정적인 영향 관계가 나타났다. H19의 경우, 더 많은 비용을 투자한 공사가 에너지 개선효율이 높을 것으로 예상하는 일반적인 아이디어와는 다른 결과가 나타났다.

표 6.1 Results of significance test for pathway

Hypothesis	Pathway	Unstandardized β	Standardized β	S.E. (Standard error)	C.R. (Critical ratio)	P	Hypothesis testing
H1	CG1→TG1	.388	.342	.159	2.44	.014*	adoption
H2	CG1→TG2	-.467	-.377	.157	-2.97	.003**	adoption
H3	CG3→TG1	.319	.279	.159	2.01	.045*	adoption
H4	CG3→TG2	.260	.208	.158	1.65	.100 ^{N/S}	rejection
H5	TG1→PG	-.011	-.117	.011	-1.00	.337 ^{N/S}	rejection
H6	TG2→PG	-.058	-.683	.010	-5.80	***	adoption
H7	CG1→PG	.024	.223	.011	2.18	.036*	adoption
H8	CG2→PG	-.034	-.247	.017	-2.00	.042*	adoption
H9	CG3→PG	.024	.228	.012	2.00	.036*	adoption
H10	C2→T8	-.533	-.412	.128	-4.16	***	adoption
H11	C5→T8	-.330	-.279	.125	-2.64	.008**	adoption
H12	C9→T8	.364	.431	.083	4.39	***	adoption
H13	C5→T2	.410	.307	.170	2.41	.016*	adoption
H14	C2→P4	.431	.447	.111	3.88	***	adoption
H15	C8→P4	-.421	-.388	.112	-3.76	***	adoption
H16	T1→P6	.109	.156	.032	3.41	***	adoption
H17	T8→P4	.447	.599	.086	5.20	***	adoption
H18	P1→P5	-.261	-.213	.061	-4.28	***	adoption
H19	P5→P4	-.238	-.255	.097	-2.45	.015*	adoption

*(P<0.05)

** (p<0.01)

*** (p<0.001)

N/S(p>0.05) : Not significant

6.2 최종 구조방정식 모형 효과분해 분석

본 연구에서는 독립변수인 건물의 속성과 종속변수인 에너지 절감 성능 사이를 매개하는 매개변수가 존재하는데, 이는 건물의 속성이 에너지 절감을 위한 리모델링 기술을 통해 에너지 성능에 간접적으로 영향을 미친다는 것을 의미한다. 독립변수가 매개변수에 전체적으로 혹은 부분적으로 영향을 미치고, 이어서 매개변수가 종속변수에 영향을 미칠 때 매개효과가 있다고 할 수 있다. 이처럼 독립변수와 종속변수 사이의 직접효과뿐만 아니라 TG1과 TG2를 매개하여 간접효과까지 살펴보고자 한다. 이를 통해 매개효과 연구가설을 검토해보았다. 본 연구는 AMOS25에서 부트스트래핑(Bootstrapping)방법을 이용하여 간접효과의 유의성을 평가하였다. 간접효과, 직접효과, 총효과의 유의미성을 검증하기 위해 표본추출 5000회, 신뢰구간 95%로 설정하였다⁶⁰⁾.

표 6.2와 표 6.3은 효과분해 분석의 결과이다. 결과 분석은 간접효과를 나타내는 경로만을 설명한다.

(M1) 지붕의 모양, 입면의 형태, 에너지 개선 공사 면적을 포함하는 CG1은 PG에 대해 직접효과를 가지지 않지만, TG1과 TG2를 매개하여 유의미한 간접효과(.218, $p < .01$)를 나타낸다. 그러나 AMOS25는 이와 같은 이중매개모델의 간접효과를 하나의 합으로써 나타낸다. 즉, 두 경로 중 어느 간접효과가 유의한지 판단할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 CG1이 TG1과 TG2를 거쳐 PG에 영향을 미친다. TG1에서 PG로 가는 경로가 유의하지 못하므로, 오직 TG2를 통해서 매개함을 알 수 있다. M1가설을 팬텀변수를 이용하여 TG1과 TG2를 경유하는 두 경로에 대해 각각 간접효과의 유의성을 판단하였다. 그 결과 TG1을 경유하여 발생하는 간접효과(-.004, $p > .05$)는 유의하지 못하며, TG2를 경유하여 발생하는 간접효과(.027, $p < .05$)는 유의하다고 나타났다.

(M2) 위도와 건물의 방향을 포함하는 CG3는 에너지 성능을 나타내는 잠재변수 PG에 직접효과(.228, $p < .05$)와 간접효과(-.175, $p < .05$)가 유의한 반면, 총효과(.054, $p > .05$)가 유의하지 못하여 매개효과가 있다고 볼 수 없다.

(M3) “경도(C2)”는 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 대해 직접효과(.447, $p < .01$), 간접효과(-.247, $p < .01$)는 유의하나, 총효과(.200, $p > .05$)가 유의하지 못하여

60) Hair, J., Hult, G. T. M., Ringle, C., and Sarstedt, M. (2016). A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM): Sage Publications.

매개효과가 있다고 볼 수 없다.

(M4) “리모델링 공사 면적(C5)”은 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 대해 직접효과 없이 간접효과만 존재하는 완전매개이다. 하지만 유의수준을 만족하지 못하여 매개효과가 있다고 볼 수 없다.

(M5) “건물의 방향(C9)”은 “조명설비(T8)”를 매개하여 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 대해 간접효과(.258, $p < .01$)만 존재하는 완전매개이다. 즉, 건물이 향하고 있는 방향의 차이가 조명설비를 매개하였을 때만 에너지 절감 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(M6) “에너지 절감량(P1)”은 “단위 에너지 절감량에 대한 공사 비용(P5)”을 매개하여 “단위 기간당 에너지 절감률(P4)”에 대해 간접효과(.054, $p < .05$)만 존재하는 완전매개이다. 건축물의 리모델링을 통해 에너지 절감량이 클수록 단위 기간당 에너지 절감률 또한 상승하는 것으로 나타났다.

표 6.2 Direct effect, Indirect effect, Total effect of SEM-1

Hypothesis	Pathway	Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects	Hypothesis testing
M1-1	CG1→TG1→PG		-.004	-.004	Not significant
M1-2	CG1→TG2→PG		.027*	.027*	Significant

*(P<0.05)
 **(p<0.01)

표 6.3 Direct effect, Indirect effect, Total effect of SEM-2

Hypothesis	Pathway	Standardized			Hypothesis testing
		Direct Effects	Indirect Effects	Total Effects	
M2	CG3→PG	.228*	-.175*	.054	Not significant
M3	C2→P4	.447**	-.247**	.200	Not significant
M4	C5→T8→P4		-.167	-.167	Not significant
M5	C9→T8→P4		.258**	.258**	Significant (complete mediation)
M6	P1→P5→P4		.054*	.054*	Significant (complete mediation)

*(P<0.05)
 **(p<0.01)

제 7장 결론

본 연구는 EU에서 진행되는 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트 건축물의 속성과 에너지 절감을 위한 리모델링 기술 그리고 에너지 절감 성능이라는 세 요인 간의 관계를 살펴본 연구로써, 구조방정식 모형을 활용하여 각 요인 간의 영향을 미치는 경로를 도출하였으며 세 요인과 각 요인을 구성하고 있는 변수 간의 직·간접적인 영향을 통해 인과관계를 살펴보았다. 이를 위해 EU의 에너지 절감 정책에 따라 스마트 시티 내의 노후화된 건물들을 대상으로 연구가 진행되었으며, 분석 절차는 다음과 같다.

EU 스마트 시티의 노후화된 기존 건물의 에너지 성능 개선 사례를 수집하여 건물의 속성, 에너지 절감 기술, 에너지 절감 성능을 분석하여 데이터를 수집하였다. 그리고 결측값 보완과 신뢰성을 검증하였으며 탐색적 요인분석을 통해 독립변수의 외생잠재변수를 설정했다. 그리고 최종 구조방정식 모형을 개발하여 세 가지 요인 사이의 인과관계와 효과분해 분석을 통한 직·간접적인 효과를 도출했다.

본 연구에서 설정한 핵심 컨셉에 따라 세 요인(즉, 건축물의 속성, 에너지 절감을 위한 리모델링 기술, 에너지 절감 성능) 간의 인과관계를 살펴본 결과 그림 7.1과 같이 정리하였다.

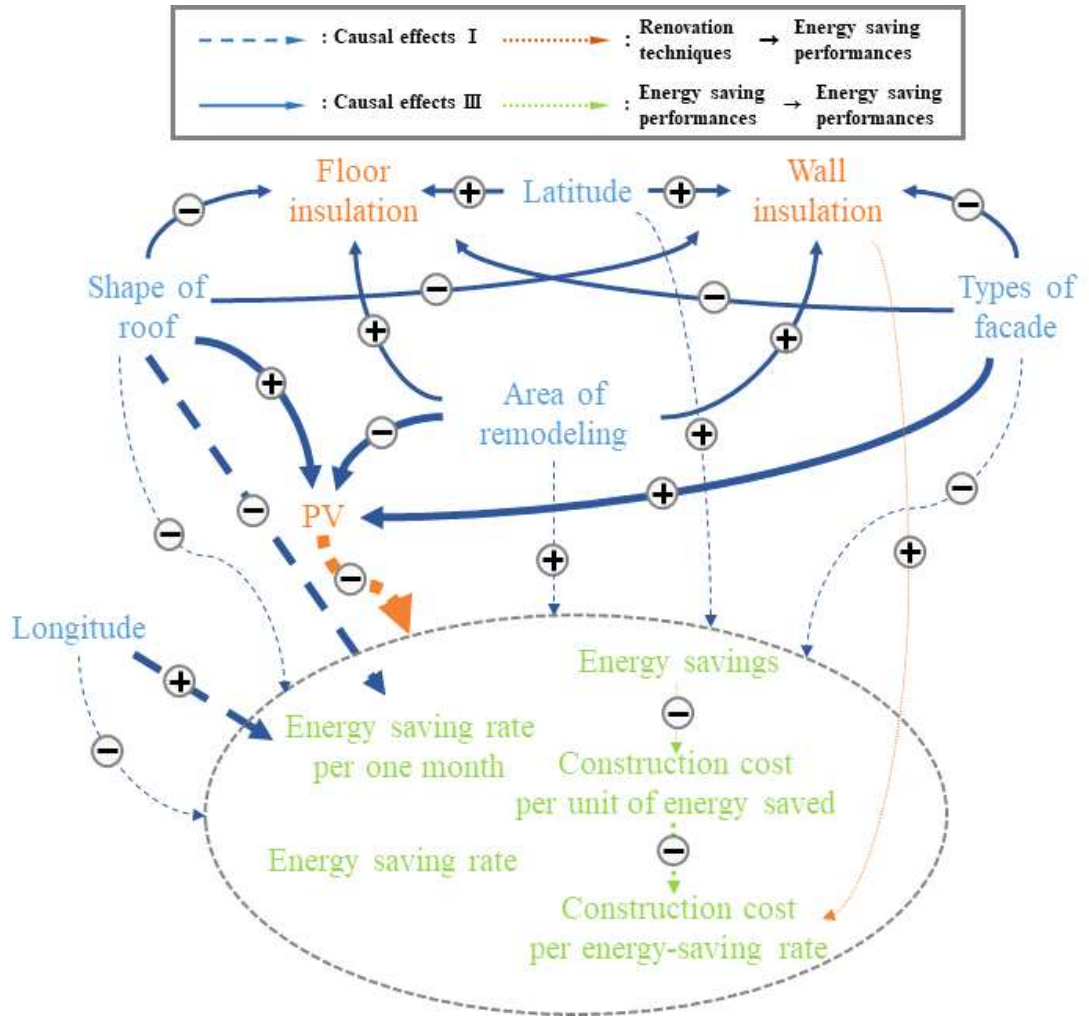


그림 7.1 Causal relationship between the three factors through core concept

인과관계 I(건축물의 속성→에너지 절감 성능) 측면에서, 경도, 위도, 리모델링 공사 면적은 에너지 절감 성능에 긍정적인 영향을 미쳤다. 경도가 낮은 서유럽 지역, 위도가 높은 지역, 리모델링 공사 면적이 큰 경우일수록 에너지 절감 성능 개선에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 지붕의 모양과 건물 입면의 종류에 따라 에너지 성능이 변동했다. 평지붕, 박공지붕과 같은 단순한 형태의 지붕일 때, 그리고 입체적이지 않고 평평한 모양의 입면을 가지고 있을 때 에너지 절감 성능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

인과관계 II(건축물의 속성→리모델링 기술→에너지 절감 성능) 측면에서, 건축물의 지붕과 입면의 종류는 태양광 패널을 설치하는 데 있어서 영향을 미치며, 태양광 시스템에 따른 에너지 성능에도 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한, 리모델링 공사 면적이 넓은 건축물의 경우 태양광 시스템을 적용했을 때 에너지 성능에 긍정적인 영향을 미쳤다. 또한, 조명설비의 종류를 매개하였을 때, 리모델링 공사 면적의 크기와 건물이 향하고 있는 방향에 따라 에너지 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

인과관계 III(건축물의 속성→리모델링 기술) 측면에서, 리모델링 공사 면적이 클수록 벽체와 바닥 슬래브의 단열공사의 성능이 낮은 것으로 나타났으며, 태양광 시스템의 성능 또한 떨어지는 것으로 나타났다. 그리고 위도가 높은 추운 지역일수록 건축물 내 외부의 기온 차가 커지게 되어, 벽체와 바닥 슬래브의 단열 개선 공사 시 열관류율이 높게 나타났다. 즉, 위도가 높은 지역에서는 단열 개선 공사 성능이 떨어지는 것으로 나타났다.

또한, 핵심 컨셉에 따라 세 요인 간의 인과관계를 살펴본 그림 7.1에서는 구조방정식 모형 분석을 통해 도출된 영향의 크기에 따라 화살표의 두께를 다르게 설정하였다. 예를 들어, 건축물의 속성과 에너지 절감 성능 사이의 관계는 대체로 낮은 영향 관계가 나타났으며, “태양광 시스템“의 경우 에너지 절감 성능에 가장 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 독립변수로서 다른 변수에 영향을 주거나, 종속변수로서 다른 변수에 의해 영향을 받는 변수 중 화살표의 왕래가 가장 잦았던 변수는 다음과 같다. 건축물의 속성 중 “지붕의 모양”이 리모델링 기술과 에너지 절감 성능에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 리모델링 기술과 에너지 절감 성능에 미치는 영향력의 크기를 떠나서 다양한 변수에 영향을 미치는 것을 의미한다. 또한, 리모델링 기술 중에서 단열성능을 높여 에너지 효율을 향상시키려는 노력의 일환으로써 “벽체 단열공사”와 “바닥 단열공사”가 건축물의 속성으로부터 가장 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 궁극적으로, 이러한 변수들을 보다 집중적으로 관리하게 된다면 에너지 절감 성

능에 긍정적인 영향을 불러올 것으로 사료된다.

본 연구는 스마트 시티에 존재하는 노후화 건축물의 속성과, 에너지 개선을 위한 리모델링 기술 그리고 에너지 절감 성능 간의 관계를 분석한다는 점에서 기존연구와 차별성을 두었다. 즉 본 연구에서 도출된 구조방정식 모형은 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트의 성공적 추진을 위해 프로젝트의 계획단계에서 건축물의 속성에 따라 효과적인 리모델링 기술 선정을 용이하게 해 줄 것으로 기대된다. 더 나아가 에너지 절감 성능에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 기대한다. 그러나 본 연구는 모든 프로젝트 사례에서 일관된 데이터를 수집하는데 있어 어려움이 존재하였고, 또한 데이터의 부족으로 인해 최종 구조방정식 모형의 적합도 중 일부 지표(GFI : 0.843)가 만족하지 못한다는 한계를 지닌다. 따라서 향후 연구에서는 EU의 에너지 절감형 스마트 시티 프로젝트와 같은 사례를 보다 많이 수집하여, 데이터 표본의 크기를 확장하면, 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

<국내문헌>

❖ 단행본 및 보고서

김원표, “다시 쓰는 통계분석: 구조방정식모델분석”. 1판, 서울: 와이즈인컴퍼니. 2017

김정욱, 최연석, 좌정우, 권준철, 부창진, 박재화, 허유진, 안병후, 김호찬, “스마트 시티”. 제주: 제주대학교 출판부. 2015

김춘경, 이수연, 이윤주, 정종진, 최웅용, “상당학 사전”. 학지사. 2016

이기종, “구조방정식모형”. 서울: 교육과학사. 2000

❖ 학위 및 학술논문

강태훈, 조혜영, 오민아 (2013), 교육 연구에서의 탐색적 요인분석 사용 실태에 관한 조사연구, 한국교육방법학회 교육방법연구, 제 25권 3호, pp. 521-541

김덕준 (2011), 범주형 자료의 결측치 처리 방법, 한국비교정부학회 한국비교정부학보, 제 25권 2호, pp.319-342

김진수 (2013), 구조방정식 모형을 이용한 노인환자의 치과만족도가 재이용 의사에 미치는 영향, 인하대학교, 박사학위논문

백윤철, 김형석 (2013), 건설IT융합기술: 스마트빌딩 기술 개발 사례, 한국통신학회 정보와 통신, 제 30권 10호, pp. 25-31

오덕성, 박소연, 이서정 (2015), 에너지 측면의 스카트 그린시티 계획기법에 관한 연구: 행복도시의 적용실태를 중심으로, 한국산학기술학회 논문지, 제 16권 9호, pp. 6368-6375

장종원 (2011), 구조방정식모형에서 수정지수의 경계값 결정을 위한 알고리즘, 동국대학교, 박사학위논문

조형민, 박창영, 김진호, 장향인 (2019), 스마트시티 고장발견진단 서비스 개발을 위한 건물에너지 공공데이터 활용방안 기초 연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제 13권 6호, pp. 599-608

<국외문헌>

❖ 단행본 및 보고서

Allison, P. D. (2002). Missing Data. Thousand Oaks, CA: Sage.

Bollen, K. A., and Long, J. S. (1993). Testing structural equation models. Newbury Park, Calif: Sage.

E2ReBuild – Industrial Energy Efficient Retrofitting of Resident Buildings in Cold Climates – D2.2 Demonstrator Oulu, Seventh Framework Programme (FP7).

Hair, J., Black, W., Babin, B., Anderson, R., and Tatham, R. (2006). Multivariate data analysis (6th ed.). Upper Saddle River, New Jersey 07458: Pearson Education, Inc.

Hair, J., Hult, G. T. M., Ringle, C., and Sarstedt, M. (2016). A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS–SEM): Sage Publications.

Hall, R. E., Bowerman, B., Braverman, J., Taylor, J., Todosow, H., and Von Wimmersperg, U. (2000). 「The vision of a smart city (No. BNL-67902: 04042)」. Brookhaven National Lab., Upton, NY (US).

Kline, P. (1994). An easy guide to factor analysis. London: Routledge.

Schafer, J. L. (1997). Analysis of Incomplete Multivariate Data. New York: Chapman & Hall.

Sharma. S. (1996). Applied multivariate techniques, New York: Wiley.

SMARTER TOGETHER – Final report on the low-energy district achievements in Lyon – D3.3.2 – Version 1.

Stapleton, C. D. (1997). Basic concepts and procedures of confirmatory factor

analysis. Paper presented at the annual meeting of the Southwest Educational Research Association, Austin, TX, January, pp.23-25.

Tanner, M. A. (1993). Tools for Statistical Inference. New York: Springer-Verlag.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2015). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).

❖ 학위 및 학술논문

Ahvenniemi, H., Huovila, A., and Airaksinen, M. (2017). What are the differences between sustainable and smart cities?, *Cities*, 60, pp. 234–245.

Bentler, P. M. (1990). Comparative Fit Indexes in Structural Models, *Psychological Bulletin*, 107(2), pp. 238–246.

Brown, R. (1997). Assessing specific mediational effects in complex theoretical models, *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 4(2), pp. 142–156.

Chen, S., Zhang, L., Tang, Y., Shen, C., Kumar, R., Yu, K., Tariq, U., and Bashir, A. K. (2020). Indoor temperature monitoring using wireless sensor networks: A SMAC application in smart cities, *Sustainable Cities and Society*, 61, 102333.

Chithaluru, P., Al-Turjman, F., Kumar, M., and Stephan, T. (2020). I-AREOR: An energy-balanced clustering protocol for implementing green IoT in smart cities, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, 61, 102254.

Cho, K., Kim, J., and Kim, T. (2019). Decision support method for estimating monetary value of post-renovation office buildings, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(12), pp. 1103–1113.

Cho, K., Kim, J., Kim, T., and Hong, T. (2020). Model for predicting price change paterrens in multi-family houses post renovation work in South Korea, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 19(3), pp. 230–241.

Cho, K., Kim, T., and Hong, T. (2020). Estimating a Risk-Integrated Schedule Delay for an Office Building Renovation Project by Considering the Project's Attributes, *Journal of Management in Engineering*, ASCE, 36(2), doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000732.

Daissaoui, A., Boulmakoul, A., Karim, L., and Lbath, A. (2020). IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey, *Procedia Computer Science*, 170, pp. 161–168.

Dall'O', G., Galante, A., and Pasetti, B. (2012). A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, 4(1), pp. 12–21.

Dempster, A. P., Laird, N. M., and Rubin, D. B. (1977). Maximum Likelihood form Incomplete Data via the EM Algorithm, *Journal of Royal Statistical Society, Series B(Methodological)*, 39(1), pp. 1–38.

Enders, C. K., and Bandalos, D. (2001). The relative performance of full information maximum likelihood estimation for missing data in structural equation models, *Structural Equation Modeling*, 8(3), pp. 460–59.

Gefen, D., Karahanna, E., and Straub, D. (2003). Trust and TAM in Online Shopping: An integrated model, *MIS Quarterly*, 27(1), pp. 51–90.

Goncalves, D., Sheikhejad, Y., Oliveira, M., and Martins, N. (2020). One step forward toward smart city Utopia: Smart building energy management based on adaptive surrogate modelling, *Energy and Buildings*, 223, 110146.

Gopinath, R., Kumar, M., Joshua, C. P. C., and Srinivas, K. (2020). Energy management using non-intrusive load monitoring techniques– State-of-the-art and future research directions, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, 62, 102411.

Hoelter, J. W. (1983). The Analysis of Covariance Structures: Goodness-of-Fit Indices, *Sociological Methods and Research*, 11(3), pp. 324–344.

Hollands, R. G. (2008). Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial?, *City*, 12(3), pp. 303–320.

Hu, L., and Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives, *Structural Equations Modeling*, 6(1), pp. 1–55.

Iddianozie, C., and Palmes, P. (2020). Towards smart sustainable cities: Addressing semantic heterogeneity in Building Management Systems using discriminative models, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, 62, 102367.

Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity, *Psychometrika*, 39(1), pp. 31–36.

Khan, Z. A. (2018). Using energy-efficient trust management to protect IoT networks for smart cities, *Sustainable Cities and Society*, 40, pp. 1–15.

MacCallum, R. C., Widaman, K., Zhang, S., and Hong, S. (1999). Sample size in factor analysis, *Psychological Methods*, 4(1), pp. 84–99.

Maiti, S. S., and Mukherjee, B. N. (1991). Two new goodness-of-fit indices for covariance matrices with linear structures, *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 44(1), pp. 153–180.

Rigdon, E. (1996). CFI Versus RMSEA: A Comparison of Two Fit Indices for Structural Equation Modeling, *Structural Equation Modeling*, 3(4), pp. 369–379.

Sarker, M., Aulakh, P., and Cavusgil, S. (1998). The strategic role of relational bonding in inter-organizational collaborations: An empirical study of the global construction industry, *Journal of International Management*, 4(2), pp. 415–421.

Sembroiz, D., Careglio, D., Ricciardi, S., and Fiore, U. (2019). Planning and operational energy optimization solutions for smart buildings, *Information Sciences*, 476, pp. 439–452.

Song, G., and Wu, L. (2012). Smart city in perspective of innovation 2.0., *Urban studies*, 19(9), pp. 53–60.

Tucker, L. R., and Lewis, C. (1973). A Reliability Coefficient for Maximum Likelihood Factor Analysis, *Psychometica*, 38, pp. 1-10.

Van Prooijen, J. -W., and Van der Kloot, W. A. (2001). Confirmatory analysis of exploratively obtained factor structures, *Educational and Psychological Measurement*, 61(5), pp. 777-791.

Wong, P., and Cheung, S. (2005). Structural equation model of trust and partnering success, *Journal of Management in Engineering, ASCE*, 21(2), pp. 70-80.

❖ 인터넷

European Commission. (2014). Climate action.
http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm.

IEA - Intelligent Energy Agency. (2017). Policy pathways: Energy performance certification of buildings - A policy tool to improve energy efficiency.
<https://www.iea.org/reports/policy-pathways-brief-building-energy-performance-certification>

EU Smart Cities Information System. (2020). Projects,
<https://smartcities-infosystem.eu/sites-projects/projects>

EU-GUGLE. (2020). <http://eu-gugle.eu/>

Sinfonia. (2020). <http://www.sinfonia-smartcities.eu/>

CORDIS European Commission. (2020). A2PBEER(Affordable and Adaptable Public Buildings through Energy Efficient Retrofitting).
<https://cordis.europa.eu/project/id/609060>