DOI: https://doi.org/10.13161/kibim.2017.021

가상공간 시뮬레이션을 활용한 고령자 행동특성 기반 계단 낙상사고 평가

Evaluation of staircase accidents using 3D virtual simulation based on behavioral characteristics of the elderly

양현철[1], 나선철[2], 김동현[3], 이재욱[4]
Yang, Hyun-Cheul[1] · Na, Sun-Cheol[2] · Kim, Dong-Hyun[3] · Lee, Jae-Wook[4]
Received December 5, 2017; Received December 15, 2017 / Accepted December 19, 2017

ABSTRACT: Due to the rapidly aging population, the death rate of elderly people by safety accidents has been increasing. In particular, precautions are needed for falls prevention because they either directly or indirectly cause death. In the case of elderly people, most of the fall accidents occur in dense residential areas, and particularly, the staircase poses a risk of falling. Therefore, a safety assessment should be performed from the design phase. However, in general, staircases are designed using existing stair data or only aims to satisfy the installation criteria. Laws and regulations only define minimum requirements for safety, so it is not possible to prevent fall accidents even if they satisfy the requirements. Therefore, this study proposes a simulation-based method for evaluating the safety of staircases. The behavioral characteristics of the elderly are implemented to an virtual user in a virtual space including staircases, and fall accidents are evaluated by the evaluation logic related to the behavioral characteristics. The result shows that the safety of staircases can be pre-evaluated and reflected on the design to reduce the possibility of fall accidents of the elderly.

KEYWORDS: Pre-Occupancy Evaluation, 3D Simulation, Virtual Space, Virtual User, Behavioral Characteristics, The Elderly

키 워 드: 거주 전 공간평가, 3차원 시뮬레이션, 가상공간, 가상사용자, 행동특성, 고령자

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

2015년 기준 안전사고로 사망한 고령자(만 65세 이상)는 12,095명으로 전체 안전사고 사망자의 40%를 차지하고 있다. 최근 3년간(2013년~2015년) 고령자의 안전사고 유형을 분석한 결과 추락 · 낙상사고(이하 낙상사고)의 경우 매년 35%이상 증가하고 있으며 이는 전체 안전사고 발생 증가율 약 15%에 비해 2배 이상 높은 증가율을 나타낸다(Korean Statistical Information Service, 2017).

낙상사고 발생 장소로는 주택, 의료서비스시설, 복지 및 노인요양시설이 전체의 82.1%를 차지하며 고령자의 경우 생활밀접시설 및 생활공간에서 대부분의 사고가 발생하는 것을 알 수 있다(Korea Consumer Agency, 2016). 특히 건축물의 구성요소 중 수직적 이동요소인 계단공간은 낙상사고의 위험성이 높기 때문에 건축학, 간호학, 물리치료학, 보건학, 체육학, 의학 등의 분야에서도 낙상사고 예방을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 기존 계단 낙상사고 예방을 위한 연구들은 사고가 발생한 계단의 물리적 구성 요소를 실측하여 위험요소를 도출하고 개선점을 제시하는 연구와 통제된 실험환경에서 고령자를 직접 실험에 참가시켜 신체적 조건에 따른 계단의 적정 치수를 도출하는 연구

[1]정회원, 세종대학교 건축공학과 석사연구원 (cheori87@gmail.com)
[2]학생회원, 세종대학교 건축공학과 석사과정 (scna91@gmail.com)
[3]정회원, 세종대학교 건축학과 교수 (dkim@sejong.ac.kr)
[4]정회원, 세종대학교 건축공학과 교수 (jaewook@sejong.ac.kr) (교신저자)

에 초점을 맞추고 있다. 즉, 사후 평가 및 향후 계단 설계 시 참고적인 역할만을 하기 때문에 실제 고령자 낙상사고 예방에는 미흡한 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 건축 공간에 대한 성능(안전성, 편리성 등)을 높이는 것이 중요하며, 사용자의 행동특성이 고려된 건축물의 설계가 필수적이다. 건축물의 공간적 성능을 평가하기 위한 방법으로는 실제 구축된 공간을 사용자가 직접 경험하고 이를 바탕으로 평가하는 거주 후 평가(POE: Post-Occupancy Evaluation)가 대표적이며(Preiser, 2013), 실제 공간에 대한 성능을 가장 정확하게 평가 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 POE는 건축물이 물리적으로 구축된 후 평가가 이루어지기 때문에 해당 공간의 개선을 위해서는 금전적, 시간적으로 많은 비용이 발생한다(Na et al., 2017).

거주 후 공간평가의 근본적인 한계를 해결하기 위해 등장한 개념이 거주 전 공간평가(Pre-Occupancy Evaluation, PrOE)이다(Kalay, 2004). PrOE는 건축물이 물리적으로 구축되기 이전에 설계안을 바탕으로 가상의 공간에서 사전 공간평가가 가능함을 의미한다(Alzoub et al, 2010). PrOE는 설계안을 사전에 평가하고 공간만족도를 저하시키는 요소를 파악하여 개선할 수 있으며, 최종적으로 사용자의 만족도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. PrOE는 일반적으로 가상공간과 가상사용자를 구축하고 시뮬레이션을 통해 평가를 진행한다. 여기서 가상의 공간에서 평가를 수행하기 위해서는 평가의 주체가 되는 가상사용자를 평가목적에 맞게 정의하고 구현하는 것이 필요하다(Shin et al., 2017).

하지만 기존의 PrOE에 대한 연구는 다양한 사용자의 특성은 배제하고 전체 사용자의 평균적인 특성을 가진 사용자를 활용하여 평가를 진행하였다. 이로 인해 일반적인 사용자의 특성으로 평가 할 수 없는(예를 들어 영유아 보육시설, 노인복지시설, 장애인시설 등) 공간에 대한 평가는 제대로 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 사용자의 행동특성을 기반으로 한 거주 전 공간 평가 방법을 제안하고 이를 활용하여 고령자 시설의 계단 안전도 평가를 테스트케이스로 진행하였다. 이를 통해 사용자를 고려한 맞춤형 PrOE가 가능하게 하고 평가결과를 바탕으로 고령자시설 설계 개선에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 논문은 사용자의 행동특성을 기반으로 한 거주 전 공간 평가 방법을 제안하였다. 고령자 낙상사고 안전도 평가를 중심으로 낙상의 위험성이 높은 계단공간과 낙상사고와 가장 밀접한 관계를 가지고 있는 생물학적 행동 특성을 연구의 범위로 한정하였다. 평가 시뮬레이션은 공간 모델과 가상사용자 모델, 평가 모델로 구성되며, 정확한 평가를 위해 고령자의 행동특성을 반영한 가상사용자 구현 방법을 함께 제시하였다.

고령자 낙상사고는 '생물학적 요인, 행동 요인, 환경 요인, 사회 · 경제적 요인 등 여러 요인들의 복합적인 상호작용의 결과로 발생한다(WHO, 2008).'는 이론적 배경과 '공간 내 물리적 요소가 인간의 행동에 영향을 미친다(Skinner, 1953; Lewin, 1951; Stokols, 1977).'는 개념을 바탕으로 한다.

본 연구의 수행 방법은 선행연구 고찰 및 분석을 통해 계단 낙상사고의 물리적 문제점 및 행동특성을 파악하고 고령자의 생물학적 요소를 분석 및 정의하여 가상 사용자를 구현한다. 이를 활용하여 안전도 평가를 위한 평가 모델을 체계화 하고 시뮬레이션을 구현한다. 검증을 위해 고령자와 20대 성인 가상사용자를 활용해 평가를 진행하여 결과를 도출한다. 이로부터 본 연구에서 제안한 행동특성 기반 고령자 계단 안전도 평가 방법의 유효성을 검증한다.

2. 선행연구 및 관련이론 고찰

2.1 거주 전 공간평가(PrOE)

거주 전 공간평가란 공간을 평가함에 있어 거주 후 공간평가(POE)와 달리 평가에 영향을 미치는 각 요소들을 사전에 예측하여 건축물의 구축 이전에 문제점을 개선하여 반영하는 것을 의미한다(Kalay, 2004). 이 개념을 반영한 연구로 Alzoibi et al.(2010)은 병원에서의 실내 조도 사전 평가를 위해 일광을 고려한 실내 조명시설, 창문 등의 실내조도의 영향을 미치는 실내 공간의 변수를 가상의 공간에서 조명분석 시뮬레이션을 활용하여 예측하였다. 하지만 사용자를 배제한 채 실내 구성요소만을 고려한 평가를 진행하여 사용자 중심의 공간평가가 이루어지지 않고 있다.

Shin et al.(2017)은 3차원 가상공간에서 인간의 특성과 공간의 특성으로부터 사용자 행동 예측이 가능함을 주제로 사용자 중심 공간 만족도 평가를 진행하였다. 케이스 스터디로 침입절도 범죄 예측을 시뮬레이션 진행하여 가상사용자가 공간의 물리적 요소를 인지하여 행동을 결정 하고 이를 통해 공간을 평가하였다. 사용자 중심의 공간 만족도 평가 측면에서는 기존 연구 대비 차별성을 가지고 있으나 사용자를 어떻게 정의할지에 대한 한계성을 보여주고 있다.

Shin(2016)은 가상공간 평가에서 평가의 주체가 되는 가상사용자의 행동특성 구성요소에 관한 연구를 진행하였다. 여기서 가상사용자는 실제 인간과 동일한 행동특성을 가지며 행동특성 요소의 차이로 인해 상이한 평가가 가능함을 제시하였다. 특히 거주 전 공간 평가에서 가장 중요한 사용자를 생물학적, 사회적, 문화적 요소로 정의하고, 각 요소를 세분화 및 체계화여 가상사용자를 구현하였다. 하지만 아직 개념검증 단계로 실제 활용 측면에서의 연구는 미흡한 실정이다.

2.2 고령자 시설 평가

고령자란 법규에 따라 다소 차이가 있지만 일반적으로 '노인장기요양보험법', '소득세법 시행규칙' 등을 근거로 만 65세 이상 남 · 여를 의미한다. 고령자가 이용하는 시설은 그 특수성과 중요성 때문에 국가 차원에서 법률로 제정하여 관리하고 있다. 그 근거가 되는 노인복지법(법률 제14320호)은 '노인의 질환을 사전예방 또는 조기발견하고 질환상태에 따른 적절한 치료 · 요양으로 심신의 건강을 유지하고, 노후의 생활안정을 위하여 필요한 조치를 강구함으로써 노인의 보건복지증진에 기여함을 목적'으로 한다(Ministry of Health and Welfare, 2017).

고령자 이용시설은 노인복지법 제31조에 따라 노인복지시설이란 명칭으로 생활시설과 이용시설로 분류하여 각 시설을 정의하고 있다(Table 1).

Table 1. Types of elderly welfare facilities (Ministry of Health and Welfare, 2017)

Category	From	Type of facility	
Welfare Institutions for Older Persons	Living Institution	Residential	• An institution for older persons • A communal living home for older persons • A welfare house for older persons
		Medical	• A sanatorium for older persons • A medical treatment and communal living home for older persons
	Leisure Institution	at Home	• Commuting-System Welfare Facility for Older Persons at Home · Visiting medical treatment services · Day and night protection services · Short-term protection services · Visiting bath service
		Leisure	• A welfare center for older persons • A center for older persons • Educational courses for older persons
		• Agencies helping older persons land a job under Article	

국내에서 노인의 문제를 학문적 관점으로 보기 시작한 것은 1960년대부터이며 1980년 노년학회 창설을 시발점으로 노인관련 연구가 활발히 진행되고 있다. Bae(2001)는 노인복지시설의 평가에 관한 연구를 진행하였다. 시설 평가를 위한 평가지표 도출을 중심으로 영역별 문제점과 개선방안을 도출하였는데 총 6개 항목으로 조직운영 및 인사관리, 시설설비 및 관리영역, 일생생활서비스 영역, 전문적 서비스 영역, 거주자의 생활상의 권리영역, 지역사회연계 영역으로 분류하여 평가를 진행하였다.

Cho et al.(2010)은 치매노인들이 생활하는 노인요양 시설을 대상으로 치유환경조성을 위한 환경요소를 도출하는 연구를 진행하였다. 전문가 그룹(건축가, 간병인)을 중심으로 치매 노인 간호 시설의 환경 요소를 파악하고 18개 요소로 종합하여 정의 설정을 통해 인지 및 지남력, 안전성, 프라이버시, 자극의 조절, 자극의 질, 지원성, 선택의 자율성, 자아유지, 커뮤니티 환경조성 총 9개 요소로 통합 축소하여 평가 지표를 도출하였다. 하지만 위 2개의 연구는 설문조사를 중심으로 연구를 진행하고 있어 객관성 확보에 한계를 보이고 있다.

Lee et al.(2003)은 노인복지시설의 화재 피난 안전성 평가를 시뮬레이션을 활용하여 진행하였다. 피난 및 화재 시뮬레이션의 평가 항목으로는 기류 및 온도분포, 연기층, CO농도의 3가지로 정의하고 화재에 의한 연기의 확산방향을 예측함으로써 발생장소별 피난대책을 수립할 수 있는 근거를 제시하였다. 하지만 사용자(고령자)의 행동특성을 고려하지 않는다는 한계를 가지고 있다.

2.3 안전사고 시뮬레이션

안전사고란 일상생활 주변에서 안전상의 부주의로 인하여 발생하는 사고를 말한다. 안전사고 관련 연구의 경우 다양한 학문적 영역에서 진행되고 있다. 그러나 실제 사람을 대상으로 실험하기에는 위험이 따르고 안전사고를 재현하여 문제점을 도출하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모되기 때문에 가상 시뮬레이션을 활용한 연구가 진행 중이다.

Lee(2005)의 경우 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하여 차대 보행자 사고에 관한 연구에서 차량의 충돌속도, 충돌위치, 보행자 이륙각도 등의 변수를 사용하여 예측모형을 구현하고 차량특성과 보행자 특성을 고려하여 충돌상황을 재현하였다. 하지만 가상공간 시뮬레이션에서 평가의 주체가 되는 가상의 사용자를 보편적인 특성을 가진 성인남자로 정의하고 있어 다양한 사용자에 대한 평가는 이루어지지 못한다는 한계를 가지고 있다.

Lee et al.(2016)은 건설 공사 사고 위험 평가에 시뮬레이션을 활용하였다. 작업 자체 요인을 중심으로 특정 공법에 잠재된 안전사고 위험성을 평가함에 있어 해당 작업에 투입되는 인적, 물적 자원과 자원에 수행되는 단위작업 그리고 작업순서를 고려하여 이산사건시뮬레이션(Discrete Event Simulation, DES) 기법을 적용하여 공정수준에서 사고위험성을 평가하였다. 하지만 공정자체에 대한 잠재적 위험을 평가하고 있고 건설현장에서 근로자의 행동요인에 대한 고려가 미흡한 실정이다.

3. 고령자의 계단 공간 낙상사고 분석

낙상사고란 사전적으로 '떨어지거나 넘어져서 다침' 이라 정의하고 있다. 낙상은 모든 연령에서 발생하지만 고령자의 경우 타연령에 비해 10배 높은 사망률을 나타내고 있으며, 입원율 또한 8배 높게 나타나고 있다. 특히 낙상은 머리 부위의 상해(뇌출혈 등), 엉덩이뼈 골절이 사망의 주된 원인으로 보고 있으며 낙상을 경험한 고령자의 경우 또 다시 낙상을 경험하게 될까봐 활동을 제한하고 이로 인한 근력의 약화로 다시 낙상하게 되며, '고령자가 낙상으로 엉덩이뼈에 골절이 발생하면 다시 일어나지 못하고 황천길로 간다.'는 속설이 있을 정도로 고령자 생명을 위협하는 경계의 대상이다(Korea Centers for Disease Control & Prevention, 2016).

고령자의 경우 젊은 사람과 달리 하루만 누워 있어도 근육이 손실된다. 일반적으로 낙상으로 입원 시 일주일에 근육량이 10% 씩 감소하며, 근육 소실로 인해 혈액과 수분이 몸통으로 집중되면서 신체 기관에 과부하가 걸려 이상 증세를 나타내고 전체적인 면역력을 약화시켜 작은 감염에도 결국 패혈증으로 사망에 이르게 된다(Korea JoongAng Daily, 2017). 이처럼 낙상사고는 직접적인 사망의 원인으로 작용할 뿐만 아니라 간접적으로도 사망의 원인이 되기 때문에 무엇보다 사고의 예방이 중요하다.

본 장에서는 건축적 요소 중 낙상의 위험성이 가장 높은 계단 공간의 낙상 위험요소와 고령자 행동특성 요소와의 관계를 분석하고자 한다.

3.1 계단 공간

계단 공간의 구성적 역할을 살펴보면 Kim(2003)은 '계단은 경로로서만 아니라 개별적인 공간으로 존재하며 동선과 밀접한 관계를 가지고 있다. 또한 공간의 연결과 분할, 개방, 폐쇄의 역할을 하며 공간의 질서적인 중심을 갖고 매개체 역할을 한다.' 라고 정의하였다. 또한 계단은 수직적 연결이 기본 속성이기 때문에 낙상사고의 위험을 내포하고 있다. 때문에 계단을 설계함에 있어 안전을 고려한 설계가 필수적이다.

현행 계단 설계는 계단설치 기준이 되는 건축법과 건축법시행령 제48조 '계단복도 및 출입구의 설치'및 국토교통부령 제238호 '건축물의 피난 · 방화구조 등의 기준에 관한 규칙'을 근거로 진행되고 있다. Table 2는 관련법규를 정리한 것이다.

위 기준과 더불어 고령자 시설의 경우 '장애인 · 노인 · 임산부 등의 편의증진보장에 관한 법률'에 의해 세부내용과 한 단계 높은 설치 기준을 적용 하고 있다. Table 3은 세부 내용을 정리한 것이다.

하지만 연면적 200㎡ 미만의 건축물에 설치하는 계단의 경우 안전을 위한 최소 기준인 관련법규에 예외사항으로 존재하여 법적 구속력이 없으며, 이로 인해 계단 설계는 기존 설계 자료에 의존하여 설계되고 있어 사용자 안전을 위한 고려는 미흡한 실정이다.

3.2 낙상사고 요인

본 절에서는 계단공간에 대한 법적 기준을 바탕으로 선행연구를 통해 낙상사고 요인을 분석하였다. Kim et al.(1997)은 계단사고에 대한 원인으로 설계 · 시공의 잘못, 건물 유지관리의 잘못, 보행자의 잘못으로 구분하고 있다. 특히 설계단계의 경우 법규에는 부합하지만 고령자 행동특성을 고려한 적합한 치수를 설계에 반영하지 않고 있다. 이러한 적정치수의 설계에 있어 사용자의 행동특성 중 가장 밀접한 관련을 가지고 있는 요소는 생물학적 인체특성이다. 예를 들어 단너비의 경우 발의 크기와 밀접한 관련이 있으며, 단높이는 관절의 가동범위와 관련이 있다. Table 4는 선행연구에서 진행한 낙상사고와 관련된 요인을 정리한 것이다.

Table 2. Installation standards of the staircase (Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2017)

Category	Content			
일반사항	• 높이 3m를 넘는 계단에는 높이 3m이내마다 유효너비 120㎝ 이상의 계단참 설치 • 높이 1m를 넘는 계단 및 계단참의 양 옆에는 난간설치 • 너비 3m를 넘는 계단에는 계단의 중간에 너비 3m 이내마다 난간 설치 • 계단의 유효 높이는 2.1m 이상			
계단 설치 기준	용도	계단 및 참 너비	단높이	단너비
	초등학교	150cm 이상	16cm 이하	26cm 이상
	중 · 고등학교		18cm 이하	
	문화 및 집회시설 (공연장·집회장 및 관람장에 한함)·판매시설 등	120cm 이상	-	-
	위층의 거실 바닥면적 합계가 200㎡ 이상이거나 거실의 닥면적 합계가 100㎡ 이상인 지하층		-	-
	기타	60cm 이상	-	-
계단 설치 기준 (손잡이 등)	• 최대 지름이 3.2㎝ 이상 3.8㎝ 이하인 원형 또는 타원형의 단면으로 할 것 • 벽 등으로부터 5㎝ 이상 떨어지도록 하고, 계단으로부터의 높이는 85㎝가 되도록 할 것 • 단이 끝나는 수평부분에서의 바깥쪽으로 30㎝ 이상 나오도록 설치할 것			

Table 3. Installation standards for elderly welfare facilities (Ministry of Health and Welfare, 2017)

Category	Content
계단형태	• 계단은 직선 또는 꺾임형태로 설치할 수 있다. • 바닥면으로부터 높이 1.8미터 이내마다 휴식을 할 수 있도록 수평면으로된 참을 설치할 수 있다.
유효폭	• 계단 및 참의 유효폭은 1.2미터 이상으로 하여야 한다. 다만, 건축물의 옥외피난계단은 0.9미터 이상으로 할 수 있다.
디딤판과 챌면	• 계단에는 챌면을 반드시 설치하여야 한다. • 디딤판의 너비는 0.28미터 이상, 챌면의 높이는 0.18미터 이하로 하되, 동일한 계단에서 디딤판의 너비와 챌면의 높이는 균일하게 하여야 한다. • 디딤판의 끝부분에 아래의 그림과 같이 발끝이나 목발의 끝이 걸리지 아니하도록 챌면의 기울기는 디딤판의 수평면으로부터 60도 이상으로 하여야 하며, 계단코는 3센티미터 이상 돌출하여서는 아니된다.
손잡이 및 점자 표지판	• 계단의 측면에는 손잡이를 연속하여 설치하여야 한다. 다만, 방화문 등의 설치로 손잡이를 연속하여 설치할 수 없는 경우에는 방화문 등의 설치에 소요되는 부분에 한하여 손잡이를 설치하지 아니할 수 있다. • 경사면에 설치된 손잡이의 끝부분에는 0.3미터 이상의 수평손잡이를 설치하여야 한다. • 손잡이의 양끝부분 및 굴절부분에는 층수·위치 등을 나타내는 점자 표지판을 부착하여야 한다.
재질과 마감	• 계단의 바닥표면은 미끄러지지 아니하는 재질로 평탄하게 마감할 수 있다. • 계단코에는 줄눈넣기를 하거나 경질고무류 등의 미끄럼방지개로 마감하여야 한다. 다만, 바닥표면 전체를 미끄러지지 아니하는 재질로 마감한 경우에는 그러하지 아니하다. • 계단이 시작되는 지점과 끝나는 지점의 0.3미터 전면에는 계단의 폭만큼 점형블록을 설치하거나 시각장애인이 감지할 수 있도록 바닥재의 질감 등을 달리하여야 한다.
기타설비	• 계단의 측면에 난간을 설치하는 경우에는 난간하부에 바닥면으로부터 높이 2센티미터 이상의 추락방지턱을 설치할 수 있다. • 계단코의 색상은 계단의 바닥재색상과 달리 할 수 있다.

Table 4. Relational factors of falls accidents

Researcher	Subject	Element Relation
Yoon (2008)	The Effect of Stair Depth on Ground Reaction Force Parameters	Stair width
Kim et al. (2003)	A Study about Physical Change According to the Difference of Stair Height in going up Stairs	Step height
Kim (2003)	A Study on the Design of Optimum Dimension of Staircase	slope
Chung et al. (2000)	A Study on the Safety of Stairs for Multi- family Housing	Illumination
Moon et al. (2004)	Housing Circumstances of the Elderly Households Who Live Alone or/with Spouse	Safety grip
Park et al. (2012)	An Analysis of Gait Variables by Muscle Strength Imbalance of Low Extremity and Descent-Stair Walking in Elderly Women	strength of lower extremity
Lee et al. (2007)	The Effect of the Stair Heights on the Gait Patternin Stair-Descent Activity of Elderly Persons	Knee moment
Jun et al. (2008)	A Kinetic Analysis of the Lower Extremity during Walking on Three Different Stair width in Healthy Adults	Hip joint moment

4. 행동특성을 부여한 가상사용자 구현

4.1 고령자 표본 추출

안전도 평가 가상 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 공간을 평가하는 주체인 가상사용자가 필요하다. 가상사용자는 평가의 주체로서 사람을 대표하여 공간을 평가하는 중요한 존재이며, 인간과 동일한 생물학적, 사회적, 문화적 요소를 지닌다. 이러한 행동특성 요소는 평가 공간, 평가목적에 따라 각 요소의 조합을 통해 가상사용자 구현이 가능하다(Shin, 2016).

본 논문은 고령자의 계단 낙상사고와 밀접한 관련이 있는 생물학적 요소 중 신체적 특성을 대표할 수 있는 표본도출을 위해 65세~69세까지의 인체치수평균정보를 국가기술표준원 '한국인 인체치수조사' 데이터와 선행 연구를 바탕으로 정리하였다(Table 5). 국가기술표준원의 인체치수조사보급 사업은 1979년 1차 측정부터 2010년 6차 측정까지의 5~7년 주기로 인체치수 측정을 통해 185만 종의 인체치수, 2만종의 동적치수 및 12만종의 3D 인체형상자료를 보유하고 있다. 측정 데이터의 신뢰도 검증을 위해 통계처리는 평균 및 표준편차에 의한 이상데이터를 검출하고, 상호 관계식에 의한 데이터 검정 및 상관/회귀분석에 의한 데이터 검정의 3단계를 걸친 검정을 통해 신뢰성을 확보 하여 가상사용자의 표본이 되기에 충분한 조건을 갖추고 있다.

Table 5. Anthropometric data of the elderly

Category	Measurement
Stature	165.4 cm
Weight	67.1 kg
Chest Breadth	30.7 cm
Biacromial Breadth	38.0 cm
Hip Width	32.3 cm
Chest Depth	22.3 cm
Hip Depth	21.8 cm
Waist Circumference	23.6 cm
Chest Circumference	95.8 cm
Hip Circumference	92.3 cm
Waist Circumference	87.8 cm
Foot Breadth	10.1 cm
Foot Length	25.0 cm
Outside Leg Length	100.1 cm
Hip joint moment	-7.47°
Vision	0.6 diopter

4.2 고령자 행동특성 구성요소

가상사용자는 공간평가의 주체가 되기 때문에 실제 인간과 동일한 생물학적, 사회적, 문화적 요소를 지닌다(Shin, 2016). 따라서 가상공간을 활용한 계단 안전도 시뮬레이션 평가를 위해 가상사용자의 구성 요소를 도출한다. 고령자 낙상사고의 경우 신체 노화가 주된 원인으로 나타나기 때문에 생물학적 요소의 반영이 필수적이며, 생물학적 요소에 따라 실제 행동에 영향을 받기 때문에 가상사용자를 정의 하는데 있어 첫 단계라 할 수 있다(Cacioppo et al, 2000).

선행연구를 통해 정의된 공간 평가에 영향을 주는 요소 중 본 연구 목적에 부합하는 요소를 도출하여 가상사용자 구성 요소를 정의하였다. Table 6은 도출된 고령자 가상사용자의 행동특성 요소를 정리한 것이다.

Table 6. Elderly virtual user components

class 1	class 2	class 3	code
Biological element	Gender	Man	B1
	Age	65~69	B2
	Physical Characteristics	Stature	B3
		Foot Length	B4
		Hip joint moment	B5
		Biacromial Breadth	B6
		Vision	B7

4.3 계단 낙상사고 평가 기준

계단 안전성 평가 기준은 앞서 도출한 계단관련 법규와 치수를 바탕으로 고령자 행동특성을 반영하여 정의하였다. 평가기준을 시뮬레이션에 활용하기 위해 각 평가 항목에 대해 수식화를 진행 하였으며, 행동특성요소 중 생물학적 특성을 고려한 8개 항목으로 평가기준을 정의하였다(Table 7).

Table 7. Criteria on safety evaluation of staircase

Index	Category	Index	Category
1	Height of handrail	5	Width of staircase
2	width of tread	6	Height of landing
3	Height of riser	7	width of landing
4	slope	8	Illuminance

평가는 선형보간법을 활용하여 0점~4점까지의 평가 값을 산출하도록 설계하였다. 여기서 '선형보간'이란 두 점의 값이 주어졌을 때 그 사이에 위치한 값을 추정하기 위하여 직선거리에 따라 선형적으로 계산하는 방법이다(wikipedia, 2017). 예를 들어 계단의 단 높이가 16cm, 16.5cm 의 높이를 가지고 있을 때 단순 수치 척도로는 0.5cm의 차이로 평가 결과 값이 ±1점 이상 차이나는 것을 설명하기에는 부적합하기 때문에 행동특성을 고려한 적정 값(2점)을 기준으로 ±10%마다 ±1점의 평가 값을 갖도록 설정하였다(Figure 1).

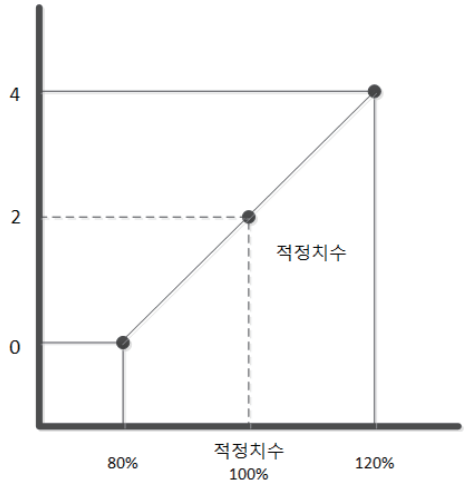


Figure 1. Calculating evaluation value by linear interpolation

평가는 점수를 산출하는 선형 보간법을 기초로 하여 평가대상의 물리적 치수에 행동특성을 고려한 적정 치수로 나눈 값을 활용한다. 여기서 가중치가 부여된 부분은 노인복지시설과 일반시설물의 계단 설치기준이 다른 부분에 가중하였다. 이는 고령자와 일반 성인의 운동능력 차이를 감안한 것이며, Figure 2는 평가모델 구성 개념도이다.

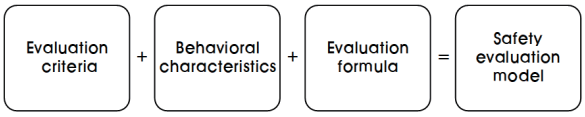


Figure 2. Evaluation model conceptual diagram

다음은 평가 항목 및 평가 모델을 구성하기 위한 수식을 정리한 것이다.

난간높이 평가는 신장에 대한 무게중심 55%에 cm를 mm로 단위환산을 위한 10을 곱하여 적정 난간 높이를 산출한다.

$$E1=(4*(EM1/(B3*0.55*10))-3.2/0.4$$

여기서,

$E1$: 난간높이 평가값

$EM1$: 평가대상 3D 공간모델의 난간높이

$B3$: 가상사용자의 신장

단너비 평가는 발크기에 대한 계단과의 접지율 90% 더하기 계단 하강시 계단과 발뒷꿈치의 여유 공간 60mm을 더하여 적정 단너비를 산출한다.

$$E2=(4*((EM2-60)/(B4*0.9+60)*W1)-3.2)/0.4$$

여기서,

$E2$: 단너비 평가값

$EM2$: 평가대상 3D 공간모델의 단너비

$B4$: 가상사용자의 발크기

$W1$: 단너비에 대한 가중치

단높이 평가는 선행연구에서 정의한 고령자 고관절 모멘트와 적정높이를 선형보간하여 적정높이를 산출한다.

$$E3=(-4*(EM3/((18*B5+768.06)/3.52))+4.8)/0.4$$

여기서,

$E3$: 단높이 평가값

$EM3$: 평가대상 3D 공간모델의 단높이

$B5$: 가상사용자의 고관절 모멘트

계단각도 평가는 선행연구에서 정의한 적정 각도와 행동특성을 고려한 단높이, 단너비를 삼각함수에 대입하고 선형보간하여 적정 각도를 산출한다.

$$E4=(-4*(EM4/(\text{atan}(((18*B5+768.06)/3.52)/(B4*0.9+60))*(180/\text{pi}))*W2)+4.8)/0.4$$

여기서,

$E4$: 계단각도 평가값

$EM4$: 평가대상 3D 공간모델의 계단각도

$B5$: 가상사용자의 고관절 모멘트

$B4$: 가상사용자의 발크기

$W2$: 계단각도 평가 가중치

계단폭 평가는 어깨너비에 대한 두 명이 지나갈 경우 최소 치수인 2.5를 곱하여 적정폭을 산출한다.

$$E5=(4*(EM5/B6*2.5)*W3)-3.2)/0.4$$

여기서,

$E5$: 계단폭 평가값

$EM5$: 평가대상 3D 공간모델의 계단폭

$B6$: 가상사용자의 어깨너비

$W3$: 계단폭 평가 가중치

참높이 평가는 계단 설계 공통 법규기준인 1800mm를 적정 치수로 산출한다.

$$E6=(-4*((EM6-EM7)/1800*W4)+4.8)/0.4$$

여기서,

$E6$: 참높이 평가값

$EM6$: 평가대상 3D 공간모델의 층고

$EM7$: 평가대상 3D 공간모델의 참높이

$W4$: 계단폭 평가 가중치

참폭의 평가는 계단 설계 공통 법규기준인 1200mm를 적정 치수로 산출한다.

$$E7=(4*EM8/1200-3.2)/0.4$$

여기서,

$E7$: 참폭 평가값

$EM8$: 평가대상 3D 공간모델의 참폭

조도 평가는 선행연구에서 정의한 적정조도와 시력을 선형보간 하여 적정 수치를 산출한다.

$$E8=(4*(EM9/((-50*B7+135)/0.7)*W5)-3.2)/0.4$$

여기서,

$E8$: 조도 평가값

$EM9$: 평가대상 3D 공간모델의 조도

$B7$: 가상사용자의 시력

$W5$: 조도 평가 가중치

위 식을 최종 안전도 평가식으로 정의하면 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

최종 계단 안전도 평가 = $\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} Ei$

5. 계단 안전도 평가 시뮬레이션 적용 및 결과

5.1 시뮬레이션 개요

본 논문의 테스트 케이스로 실제 고령자 시설을 모델링하여 평가 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 행동특성 중 생물학적 요소의 차이를 확인하기 위해 고령 가상사용자와 20대 성인 가상사용자를 구현하였다. 여기서 20대 성인을 비교 대상으로 선정한 이유는 일반적으로 가상시뮬레이션 평가에 활용되며, 신체적으로 가장 활발하고 운동능력이 좋은 연령대이기 때문이다.

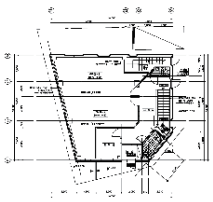
가상공간 구현을 위해 Autodesk Revit을, 가상사용자 구현을 위해 3DS MAX를, 시뮬레이션을 진행에는 게임엔진 소프트웨어인 Unity Game Engine을 활용하였다. Unity Game Engine을 통해 구현된 안전도 평가 시뮬레이션에 가상사용자 행동특성 정보와 공간모델 정보를 불러온다. 평가 모델에서는 불러온 정보를 각 평가 항목에 대입하여 평가 값을 도출하는 프로세스를 활용하여 평가 시뮬레이션을 진행한다. 이를 통하여 행동특성이 반영된 가상사용자를 활용한 계단 안전도 평가가 유효한 결과를 보이는지 검증하고자 한다.

5.2 3차원 가상공간 계단 안전도 평가 시뮬레이션

5.2.1 시뮬레이션 공간 모델링

시뮬레이션에 사용될 공간 모델은 실제 건설된 노인복지시설을 대상으로 선정하였다(Table 8).

Table 8. Overview of evaluation building

Category	Contents	
Plan		
Location	Yeonhui-dong, Seo-gu, Incheon	
Zone/District	2nd class residential district / District unit planning area	
Use of a building	Facilities for older persons and children	
Total floor area	1st floor	110.17 ㎡
	2nd floor	110.17 ㎡
	3rd floor	79.54 ㎡
	Total	299.88 ㎡

선정된 평가 대상을 바탕으로 시뮬레이션을 수행할 가상공간을 Autodesk Revit을 활용하여 모델링하였다 (Figure 3). Revit의 경우 각 구성요소가 속성값을 갖고 있기 때문에 평가를 진행하기 위한 모델 수치정보를 바로 활용할 수 있는 장점이 있다. Figure 3(a)와 같이 실제 건물전체를 모델링 하였지만 평가 시뮬레이션의 편의와 가시성 확보를 위해 계단 공간 부분을 별도로 추출하고 수정작업을 통해 최종 시뮬레이션 공간모델을 제작하였다(Figure 3 (b)).

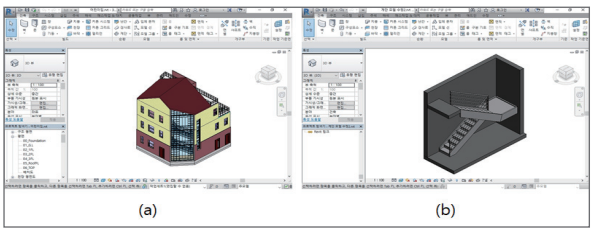


Figure 3. 3D Virtual space model

5.2.2 가상사용자 모델링

가상공간에서 평가를 수행하는 가상사용자는 3DS MAX를 활용하여 제작하였다. 시뮬레이션에서 가상 사용자가 계단을 오르내려야 하기 때문에 실제 사람과 동일하게 각 관절이 움직일 수 있도록 뼈대를 심어 형상을 모델링하고 애니메이션을 삽입하여 최종 가상 사용자를 제작하였다(Figure 4).

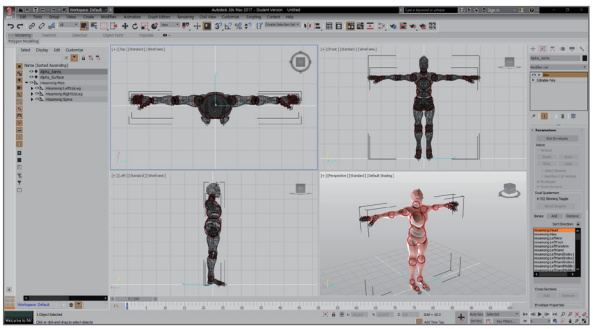


Figure 4. 3D Virtual user model

5.2.3 Unity를 활용한 가상사용자 정보 입력

시뮬레이션을 활용하여 계단 안전도 평가를 진행하기 위해 고령남성 1명(Figure (a)), 성인남성 1명(Figure (b))의 가상사용자를 구현하였다. 사용자의 형상은 동일하지만 행동특성 요소는 Unity Game Engine에서 차이를 반영하였다. 반영된 요소는 생물학적 요소인 신장, 발크기, 고관절 모멘트, 어깨너비, 시력 총 5개 요소이며 Figure 는 행동특성 정보 입력 화면이다.

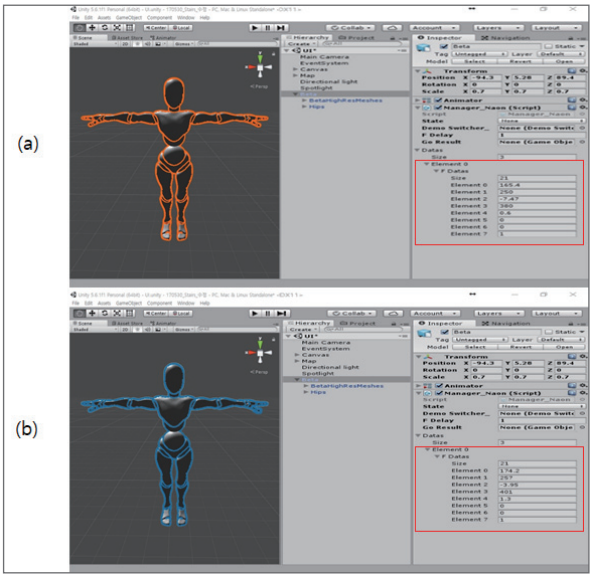


Figure 5. Virtual user with behavioral characteristics

5.3 시뮬레이션 진행 및 결과

시뮬레이션은 Figure 6과 같이 공간모델, 가상사용자 모델, 평가모델의 3가지 정보가 상호작용을 통하여 평가를 진행하게 된다.

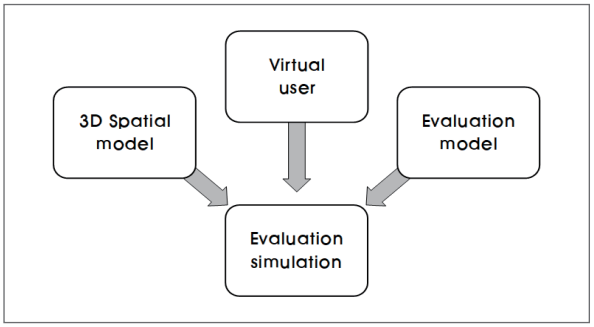


Figure 6. Concept of simulation

구현된 가상사용자 모델과 공간모델, 평가모델을 Unity Game Engine 소프트웨어를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. Figure 7은 시뮬레이션의 UI 화면이다. Figure 7(a)는 행동특성이 부여된 가상사용자의 정보를 나타낸다. Figure 7(b)는 가상공간으로부터 추출된 3D 설계정보를 보여준다. Figure 7(c)는 행동특성이 부여된 가상사용자가 가상공간에서 활동하며 추출한 3D 설계정보와 평가모델을 활용하여 최종 안전도 평가 값을 산출하여 나타낸다.

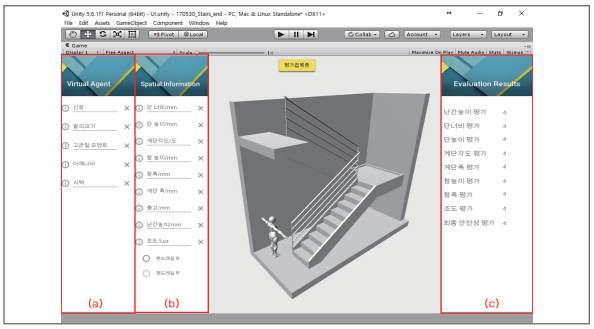


Figure 7. Simulation screenshot

가상사용자와 가상공간, 평가모델을 바탕으로 고령자와 성인을 대상으로 행동특성 중 신체적 요소에 대한 계단 안전성 평가를 위해 비교 테스트를 진행하였다.

Table 9. Evaluation results

Category	Elderly	Adult
Height of handrail	1.893	1.393
width of tread	0	0
Height of riser	3.111	3.919
slope	2.343	3.036
Width of staircase	0	3.466
Height of landing	3.719	4
width of landing	2.750	2.750
Illuminance	0	4
Result	**1.73**	**2.82**

시뮬레이션 결과 고령자와 성인의 최종 평가 값이 각각 1.73점, 2.82점으로 동일한 계단이지만 사용자의 행동특성 차이로 인해 각기 다른 평가 결과가 도출 되었다(Table 9).

평가결과를 해석해 보면 안전도 평가 최고 점수 4점을 기준으로 고령자의 경우 2.27점, 성인의 경우 1.18점이 미달하는 것을 알 수 있다. 이는 고령자가 성인에 비해 상대적으로 낙상사고의 위험도가 1.92배 높다는 것으로 해석할 수 있다. 실제 보건복지부가 집계한 낙상 손상환자의 퇴원 환자 수 (Korean Statistical Information Service, 2017) 총 2,783,651명 중, 고령자(999,334명)가 35.9%로 14.51%를 차지하는 성인(403,839명)에 비해 2.47배 많은 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 시뮬레이션 평가결과와 낙상 손상환자의 퇴원환자수 사이에 유의미한 상관이 있는 것으로 판단되며, 이를 통해 본 논문에서 제시한 방법론의 유효성을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구는 가상공간에서 고령자의 행동특성을 부여한 가상사용자를 활용하여 계단 공간에 대한 안전도 평가 방법과 고령자 행동특성 구현 방법을 다루었다. 이를 통해 계단 공간의 안전도를 사전에 평가하여 문제가 되는 요소를 사전에 수정하여 반영할 수 있는 가능성을 확인하였다.

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 사용자의 행동특성은 평가의 주요한 요소가 된다. 선행연구와 이론고찰을 통해 계단 낙상사고에 기인되는 요소를 파악하였고, 행동특성과의 관계를 분석하여 평가의 기준을 만들 수 있었다.

- 고령자와 성인의 행동특성을 기반으로 안전도 평가 시뮬레이션을 진행한 결과 같은 공간이지만 상이한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 가상사용자에 행동특성을 부여하여 다양한 사용자 그룹을 대상으로 한 공간평가가 가능함을 확인할 수 있었다.

- 낙상사고에서 사용자의 행동특성 중 특히 신체적 요소가 계단 설계에 반영되어야 함을 확인할 수 있었다. Table 10은 고령자에게 안전한 계단 속성을 정리한 것이다.

본 연구에서는 계단 안전도 평가에 한정하여 시뮬레이션을 진행하였지만, 본 방법론을 활용하여 평가 목적, 평가 공간에 맞게

Table 10. Staircase values for the elderly's safety

Category	Measurement	Unit
Height of handrail	90.97	cm
width of tread	285	mm
Height of riser	160	mm
slope	32.27	°
Width of staircase	950	mm
Height of landing	1800	mm
width of landing	1200	mm
Illuminance	150	Lux

평가기준을 추가 한다면 고령자 시설 전체 평가가 가능할 것으로 판단된다. 또한 사전 안전도 평가를 통해 고령자시설의 안전성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 본 연구에서는 계단 사용에 있어 단일 사용자에 대한 평가를 진행하였기 때문에 다중 사용자의 공간 평가와 상호관계에 대한 고려는 부족하다. 또한 관련 자료의 부재 및 한계로 낙상사고에 기인하는 전 요소를 평가하기에는 무리가 있다.

향후 낙상사고 평가 요소에 대한 체계적인 분류 및 정의에 대한 연구와 안전사고 자료의 수집과 관리 및 분석을 위한 빅데이터 구축방안에 대한 연구와 다중 사용자를 고려한 공간평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 재원 한국연구재단의 연구비지원(NRF-2017R1A4A1015660, NRF-2017R1D1A1B03031390)에 의해 수행되었습니다.

References

Alzoubi, H., Bataineh, R. F. (2010). Pre-versus post-occupancy evaluation of daylight quality in hospitals, Building and Environment, 45(12), pp. 2652-2665.

Bae, C. J. (2001). A study on the evaluation of the welfare institution for the aged, International Journal of Gerontological Social welfare, 13, pp. 173-192.

Cho, J. Y., Lee, H. W. (2010). A study on the evaluation of elderly care facilities for elderly people with dementia using the therapeutic environment elements, Journal of The Korea Institute of Healthcare Architecture, 16(1), pp. 25-33.

Kalay, Y. E. (2004). Architecture's new media: Principles, theories, and methods of computer-aided design, 1st ed, MIT Press, pp. 295-375.

Korea Centers for Disease Control & Prevention. (2016). Health / Disease Information - Fall, https://goo.gl/BGXkRG (Jan. 13. 2017).

Kim, Y. H., Lee, M. B. (1997). A Study on the Cause Accidents at Staircase, Journal of The Architectural Institute of Korea, 13(12), pp. 135-146.

Kim, Y. S., Kang, B. K. (2003). A Study about Physical Change According to the Difference of Stair Height in going up Stairs -Focus on the changing of pulse and blood Pressure-, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 19(4), pp. 57-66.

Korea Consumer Agency (2016). Case Trend Analysis for Accidental Falls in Elderly People, https://goo.gl/rqS7cQ (Jan. 13. 2017).

Korean Statistical Information Service (2017). Deaths and death rates By cause(103 item)/By sex/By age(five-year age), https://goo.gl/q7Prvq (Jan. 13. 2017).

Korean Statistical Information Service (2017). The Korean National Hospital Discharge In-depth Injury Survey, https://goo.gl/4WLbXy (Jan. 13. 2017).

Lee, H. G., Lim, T. K. (2016). Methodology for Simulation based Construction Safety Risk Assessment, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 16(1), pp. 151-157.

Lee, P. G., Kim, J. S., Cho, D. M., Bae, K. T., Kim, S. W. (2003). A Study on the Assessment of Egress Safety in Elderly Welfare Facility, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2003(7), pp. 1390-1395.

Lee, S. K. (2005). Effective Safety Countermeasures Developed by a Computer Simulation on Car-Pedestrian Accidents -the case of Wrap Trajectory and Forward Projection-, Masters Thesis, Chung-Ang University.

Lewin, K. (1951). Field theory in social science: selected theoretical papers (Edited by Dorwin Cartwright.), Social Research, 18(4), pp. 522-524

Na, S., Yang, H., Lee, Y., Lee, J. (2017). Method for Design Performance Evaluation based on 3D Patterns, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure, 37(1), pp. 901-902.

Ministry of Health and Welfare. (2016). Act on guarantee of promotion of convenience of persons with disabilities, the aged, pregnant women, etc., https://goo.gl/7dTCEG (Jan. 02. 2017).

Ministry of Health and Welfare. (2017). Welfare of older persons act, https://goo.gl/3BDMak (Jan. 02. 2017).

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2017). Building act, https://goo.gl/vRALWN (Jan. 02. 2017).

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2017). Enforcement decree of the building act, https://goo.gl/GUsLKX (Jan. 02. 2017).

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2017). Regulations on standards for evacuation and fire protection of buildings, https://goo.gl/9pdhGU (Jan. 02. 2017).

Preiser, W. (Ed.). (2013). Building evaluation, 2nd ed, Springer Science & Business Media, pp. 289-327.

Shin, S. (2016). Implementation of virtual users' behavioral characteristics for simulation-based pre-occupancy evaluation, Masters Thesis, Sejong University.

Shin, S., Jeong, S., Lee, J., Hong, S. W., Jung, S. (2017). Pre-Occupancy Evaluation based on user behavior prediction in 3D virtual simulation, Automation in Construction, 74, pp. 55 - 65.

Skinner, B. F. (1951). Science and human behavior, 1st ed, Simon and Schuster, pp. 129-140.

Stokols, D. (1977). Origins and directions of environment-behavioral research. In Perspectives on environment and behavior, Springer US, pp. 5-36.

World Health Organization. (2008). WHO Global report on falls prevention in older age, World Health Organization, pp. 10-47.