

## 연기발생으로 인한 시야장애가 초고층 공동주택 거주자의 피난계단실 진입시간과 피난경로에 미치는 영향

### How Visual-Field Obstruction from Fire Smoke Influences a Resident's Necessary Time to Reach Fire Escape and Evacuation Route in a High-rise Apartment Housing

서상목\*  
Seo, Sang-Mok

최준호\*\*  
Choi, Jun-Ho

홍원화\*\*\*  
Hong, Won-Hwa

#### Abstract

The purpose of this study is to know how visual-field obstruction from fire smoke influences a resident's necessary time to reach fire escape and evacuation movement in a high-rise apartment housing. Generally, fire smoke not only gives visual-field obstruction and breath troubles to residents but interrupts their evacuation behavior. If a fire smoke layer is formed in the core department when evacuee enters at the evacuation staircase until, residents will be made to undergo a range of vision obstacle. In order to set a situation like that, participants wore eye bandage which had been made especially before the experiment. Also as a comparative standard, through no.1442 Japanese construction ministry notices about the building evacuation safety verification method, this study calculated smoke layer's dissent time and evacuation time. Then to compare with the former, the participants without an eye bandage joined a experiment once again. This study has understood how fire smoke effects on one's evacuation delay by analyzing residents' evacuation time to reach the staircase and movement route, however, in this study a toxic gas is not considered because it might threaten participants not to breathe.

Keywords : High-rise Apartment Housing, Fire, Smoke, Fire Escape, Evacuation Time, Evacuation Movement

주요어 : 공동주택, 화재, 연기, 피난계단, 피난시간, 피난동선

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

지난 2005년에 실시된 대한민국 인구·주택 총조사의 결과를 살펴보면 우리나라의 주택을 유형별로 분류했을 때 공동주택이 전체의 52.7%를 차지하고 있는데, 이는 2000년에 실시된 조사에서 나타난 47.8%에 비해 증가한 것으로 나타났다.<sup>1)</sup> 공동주택은 도시가 팽창하고 요구 성 능이 다양하게 변화하면서 대규모화, 고층화, 복합화 양상을 띠면서 최근 10년간 도심 공동화 현상을 해결하고 토지를 효율적으로 사용하기 위해 상업시설이나 편의시설 등과 복합된 초고층 주상복합아파트까지 들어서게 되었다. 우리나라의 공동주택은 과거 복도식으로 많이 건설되었

으나 건축물의 고층화 및 기능 변화와 함께 점차 거주자들이 계단식을 선호하게 되면서 현재에는 계단식 형태의 공동주택이 전체의 71.2%를 차지하고 있다.<sup>2)</sup>

그러나 공동주택 건축물이 고층화되고 계단식의 폐쇄적인 형태를 띠게 됨에 따라 화재발생에 따른 위험성은 예전에 비해 더욱 커지게 되었는데, 특히 최근 10년간 발생한 화재의 약 40%는 아파트 등의 주거지에서 발생하였으며, 이로 인해 연평균 2,300여명의 사상자와 1,500억 원의 재산피해를 입힌 것으로 나타났다.<sup>3)</sup> 이 중 대부분의 사망자가 수면상태에 있어 화재발생 사실을 인지하지 못했거나 피난도중 화재로 인해 발생하는 연기로 인한 시야장애 및 유독가스로 인한 호흡곤란 때문에 사망한 것으로 조사되고 있다.

특히, 지난 2003년 2월, 192명의 사상자와 148명의 부상자가 발생한 대구지하철 화재 참사에 관한 연구 결과에서도 인명피해가 심했던 주원인은 연기와 유독가스로

\*정회원(주저자), 경북대학교 대학원 건축공학과 석사과정  
\*\*정회원(교신저자), 경북대학교 대학원 건축공학과 박사과정  
\*\*\*정회원, 경북대학교 건축학부 부교수, 공학박사

이 논문은 2단계 BK21「미래지향 글로벌 방재인력 양성 사업」 및 소방방재청 차세대 핵심소방안전기술개발사업의 「초고층 건축물 피난을 위한 제연시스템 연구개발」 과제의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

1) 통계청(2006), 2005년 대한민국 인구주택 총조사 보고서  
2) 국토해양부(2001), 아파트 주거환경통계  
3) 소방방재청(2005), 전국화재통계자료

인한 질식과 중독이었다. 특히 생존자를 대상으로 실시한 설문조사에서 피난에 있어 가장 큰 장애가 되었던 요소는 연기로 인한 시야장애가 65%로 가장 높았다. 그 뒤를 이어 기둥, 계단, 공간구조, 개찰구 등으로 나타났는데 이마저도 시야가 차단됨에 따라 나타나는 요인들로, 호흡장애로 인해 피난자들은 체력적 저하 또는 생명에 치명적 손상을 입게 되지만, 2차적으로 피난이 가능한 사람들의 피난에 있어서는 연기로 인한 시야장애가 실질적인 주요 장애요인이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 공동주택의 각 세대에 배치된 거주자들이 연기발생으로 인해 각 세대에서 피난계단실로 진입할 때까지 어떠한 영향을 받는지를 알아보기 위해 폐쇄적 평면을 가진 계단식 공동주택 1개소를 선정하여 이론적 검증 및 모의피난실험을 실시하여 그 영향을 분석하였다.

2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 우선 초고층 공동주택<sup>4)</sup>에서 발생하는 화재의 특성과 거주자들의 피난행태에 대한 선행연구 및 이론적 고찰을 바탕으로 완공된 J사의 초고층 공동주택 1개소를 대상지로 선정하여 일본 건설성 고시 1442호 「건물 피난 안전 검증법에 관한 산출방법」에 의한 연기층의 강하시간과 거주자의 피난시간을 도출하였다. 또한 J사의 공동주택에서 25명의 피험자를 대상으로 모의피난 현장실험을 실시하여 실제상황과 가까운 피험자들의 피난행태를 분석하였다.

특히 본 연구의 대상지에서는 기본적으로 피난계단실 내부가 방화구획으로 설정되어 있고 제연설비가 설치되어 있어 세대별 거주자들이 각 세대에서 피난계단실로 진입을 하면 각 층별 피난은 완료한 것으로 가정하였다. 그러나 본 연구에서는 화재상황을 가정한 피난실험의 특성상 실제 실험에 안전상의 문제 등 어려움이 있어 연기발생 시 수반되는 유독가스에 의한 호흡곤란 문제를 배제하기 위해 연기발생 상황을 설정한 특수제작안대를 착용하여 실험을 진행하였으며, 연기발생 유무에 따른 피난특성을 비교하기 위한 항목으로 피험자들이 피난계단실로 진입하는데 소요된 시간과 이동한 피난경로 분석에 초점을 맞추었다. 하지만 본 실험은 대상지에서 실제 거주하는 거주자를 상대로 진행되지 않아 공간에 대한 인지정도가 실제와 다를 수 있어 피험자에게 맞는 연기발생 조건을 부여하여 오차를 줄이고자 하였다.

II. 초고층 공동주택의 화재 및 피난특성<sup>5,6)</sup>

1. 공동주택의 화재특성과 통계

공동주택은 우리나라 전체 주거형태의 절반이상을 차지하고 있는데, 현행 건축법에서는 건축물의 용도 분류상 단독주택이 아닌 모든 주택을 뜻하는 것으로 다세대주택, 연립주택, 아파트, 기숙사 등을 포함하고 있다.

소방방재의 측면에서 접근을 한다면 공동주택은 1차적으로 주거시설이므로 불의 사용을 피할 수 없으므로 언제라도 화재의 위협을 가지고 있는 건축물이며 가구, 내장재, 의류 등과 같은 가연물이 많이 존재하고 있다. 그러나 공동주택은 대부분 벽식 구조로 이루어져 있어 연소의 확대를 지연시키는 데에는 다른 건축물에 비해 다소 유리한 편이지만 지상으로 피난할 수 있는 유일한 경로라 할 수 있는 피난계단실을 포함한 코어부가 화염이나 연기에 노출되면 거주자들이 피난이 매우 힘들기 때문에 위험성을 내포하고 있다.

우리나라에서는 지난 30여년 동안 주택보급을 위해 공동주택을 많이 건설해 왔는데 지금까지도 전체 주택유형에서 차지하는 비율 또한 계속 증가하고 있는 추세이다. 1997년 이후 지난 10년간 전체 화재발생 건수는 0.99% 증가한데 비해 공동주택에서 발생한 화재는 4.93%로 약 5배나 많은 증가율을 보여주고 있으며, 특히 인명피해 중 사망자 수는 전체 화재통계에서는 0.39% 감소하였으나 공동주택의 사망자 수는 오히려 7.71%나 증가하였다. 이상의 화재통계를 분석해보면 공동주택에서 발생하는 화재의 인명피해 규모가 점점 증가하고 있으며 전체 화재 및 인

표 1. 국내 공동주택의 연도별 화재발생 및 인명피해 현황

구분	화재발생 총계			공동주택 발생 화재		
	화재건수	인명피해(명)		화재건수	인명피해(명)	
		부상	사망		부상	사망
1997년	29,472	1,631	564	1,242	114	36
1998년	32,664	1,779	505	1,925	143	37
1999년	33,856	1,825	545	1,953	155	37
2000년	34,844	1,853	531	1,874	140	27
2001년	36,169	1,860	516	1,900	141	40
2002년	32,966	1,744	491	1,673	161	35
2003년	31,372	2,089	744	1,775	191	45
2004년	32,737	1,820	484	1,748	182	34
2005년	32,340	1,837	505	1,746	154	38
2006년	31,778	1,734	446	1,712	194	54
연평균 증가율(%)	0.99	1.06	-0.39	4.93	7.06	7.71

\*출처: 소방방재청 전국화재통계분석 자료(1997~2006년)  
\*2007년의 자료는 국가화재분류체계 기준변경으로 제외함

4) 본 연구에서는 거주자의 수직적 피난은 고려되지 않고 있으나 본 논문의 제목에서부터 대상을 '초고층' 공동주택이라 한정짓는 것은 연구 대상지의 코어부가 초고층 공동주택에 맞게 계획된 평면을 가지고 있기 때문이기도 하지만 추후 진행될 후속 연구와의 연계성 또한 고려하였기 때문이다.

5) 최준호(2007), 「초고층 공동주택의 유비쿼터스 기반 피난시스템 도입을 위한 유형별 피난특성 분석」, 경북대학교 공학석사 학위논문, pp. 6-42.

6) 권선욱(2001), 「연령별 피난시간에 따른 피난계획에 대한 연구」, 중앙소방학교 제11기 소방간부후보생 졸업논문, pp. 3-17.

명피해 규모에서 공동주택에서 발생한 건수의 비중이 점점 높아지고 있는 것으로 나타나 그 위험성이 커지고 있다.

특히 초고층 공동주택은 다른 형태의 건축물에 비해 화재발생 1,000건당 약 2.4배 정도 높은 사망률을 나타내고 있어 화재발생시 다른 건축물에 비해 상대적으로 사망자가 발생할 가능성이 높다고 할 수 있다. 주거용 건축물에서 화재로 인한 사망자는 대부분 연기발생으로 인한 것으로, 시야차단으로 인해 피난로를 제대로 찾지 못해 피난시간이 지체되는 사이 유독가스에 의한 질식사로 인해 사망할 가능성이 크므로 시야가 차단되었을 경우에도 거주자들이 피난로를 쉽게 찾을 수 있도록 합리적인 피난 유도설비 및 제연시스템의 설치가 필요하다.

더욱이 2005년 12월 발코니의 개조를 전면 허용하는 개정된 건축법 시행령으로 인해 화재가 발생하여 뒤늦게 피난하는 거주자가 피난계단실이 화염과 연기로 오염되어 피난계단실로 진입하지 못했을 경우 '2차적 피난장소'라 할 수 있는 발코니로의 피난이 어려워져 이에 대한 안전성 문제가 대두되고 있다. 실제로 통계자료<sup>7)</sup>에 의하면 2007년 1/4분기 동안 공동주택의 화재로 인한 인명피해가 전년 동기기간에 비해 33.3% 증가했는데, 발코니가 거실로 확장되어 별도의 피난공간이 없어진 점과도 밀접한 관련이 있는 것으로 분석되었다.

2. 거주자의 피난특성

화재에서 인명안전에 가장 큰 영향을 주는 요소 중의 하나가 피난행동과 관련된 심리상태라고 추정하지만, 화재시의 인간의 행동에 관한 정보는 화재가 자주 발생하지 않고 발생환경이 매우 다양하기 때문에 일반화하기 어렵다. 그러나 여러 선행연구를 통해 개개인의 피난행동을 예측할 수는 없으나 과거 화재발생사례의 통계분석을 통해 일련의 피난행동패턴을 발견할 수 있는데 그 중 대표적인 것이 일상적인 동선과 피난동선을 동일시 한다는 것과 짧고 단순하고 외기에 면해 있는 동선을 선택한다는 것이다. 그러므로 건축물의 계획단계에서부터 공동주택 거주자들을 빠른 시간내 어느 방향으로 피난시킬 것인가 하는 일은 매우 중요하지만 평면구성에 매우 익숙한 거주자라 할지라도 연기발생에 의한 시야차단시 심각한 피난장애를 겪게 될 수 밖에 없다.

표 2. 사람의 평균보행속도 (단위: m/s)

종류	속도	종류	속도
표준보속	1.30	발과 손으로 기어감	0.50
빠른사람	2.00	무릎과 손으로 기어감	0.40
느린사람	1.00	어둠 속 (익숙한 길)	0.70
균중보속	1.00	어둠 속 (처음가는 길)	0.30
속보	3.00	무릎까지 수중 (흐린물)	0.70

\*단, 1.5명/m<sup>2</sup>인 이하일 경우.

7) 2007년 1/4분기 화재구조 및 구급발생현황 통계분석 발표, 서울특별시 소방방재본부

공동주택은 층수가 커짐에 따라 자연스럽게 당연히 피난시간도 많이 소요된다. 따라서 거주자의 안전을 확보하기 위해서는 피난행동에 장애를 주는 여러 가지 요소들을 제거하여 피난소요시간을 줄이는 노력이 절실한데 이들 피난 장애요소들 중에서 가장 대표적인 것이 연기로 인한 시야와 호흡선 차단이므로 이러한 장애요소가 거주자의 피난행동에 어떠한 영향을 미치는지 파악하여 대책을 강구할 필요가 있다.

대부분의 초고층 공동주택에서는 피난계단실을 통해 지상으로 대피하는 피난계획을 가지고 있다. 일반적으로 공동주택은 폐쇄적인 평면구성을 보이고 있어 개구부가 있다고는 하나 고층부일수록 외기와 단절되는 형태를 띠고 있으므로 화재가 일어나면 여러 가지 가연물에서 발생하는 연기와 유독가스가 건축물 내부로 확산되어 거주자들에게 큰 위협요소로 작용한다.

표 3. 공동주택 화재로 인한 사망자수의 시간대별 현황 (2005년)

계	19~21시	21~23시	23~01시	01~03시	03~05시	05~07시	07~09시	09~11시	11~13시	13~19시
38	9	10	3	2	7	2	3	0	2	0

그런데 <표 3>의 소방방재청 화재통계연감에 의하면 화재로 인한 인명피해는 주로 심야취약시간에 발생하는데 이는 거주자들이 수면상태이므로 화재발생사실을 인지하지 못해 피난개시가 늦어짐 때문이다. 더욱이 각 세대에서 피난계단실까지는 비록 멀지 않은 거리일지라도 화염이나 연기로 인해 피난장애요소가 발생하면 피난계단실로 진입하는 시간이 상당히 지체되므로 위험에 노출되게 된다.<sup>8)</sup>

3. 연기발생과 피난행동

연기는 매우 작은 액적(液滴)과 고체입자들로 대략적으로 0.1~10 μm 정도의 크기를 가지며 타지 않는 분해물질 및 농축물 또는 혼합된 공기의 양과 더불어 연소과정에서 생성된 뜨거운 증기와 가스의 혼합물이라 할 수 있다. 연기의 유동속도는 수평방향으로 0.5~1 m/s, 수직방향으로 2~3 m/s, 계단실과 같은 수직적 공간에서는 3~5 m/s로 알려져 있는데, 공동주택과 같은 폐쇄적인 공간에서 연기의 농도가 증가하면 연기의 입자에 의한 빛의 차폐효과가 증가하기 때문에 피난 및 소화활동에 큰 지장을 주게 된다.<sup>9)</sup>

일반적으로 화염에서 발생한 연기는 거주자의 피난시 시야를 차단하는 입자형태의 가시연기와 호흡을 차단하는 가스형태의 비가시연기로 크게 분류된다. 화재시 발생하는 연기가 문제가 되는 것은 연기가 일반적으로 불투명하고 피난로에 침입하면 피난유도를 위한 표지의 식별이

8) FED(Fractional Effective Dose): 화염의 성장이나 연기의 확산에 대한 피난자의 노출 정도

9) 손봉세(1997), 「연기유동의 해석과 제어」, 한국소방안전협회 소방기술, 통권 제53호.

방해되어 피난행동을 저해하며 또한 유독가스를 수반하므로 인간에게 치명적인 결과를 입히기 때문이다.

거주자가 안전하게 대피하는데 지장이 없는 연기의 농도는 공간의 인지도 정도에 따라 좌우되는데 공간에 대하여 잘 알지 못하는 거주자는 연기로 인한 가시거리의 미확보와 유독가스의 자극 등 심리적인 불안에 영향을 받지만 내부공간을 잘 알고 있는 사람은 심리적인 요인보다는 호흡곤란, 보행속도의 저하 등과 같은 생리적인 요인에 더 영향을 받는다.

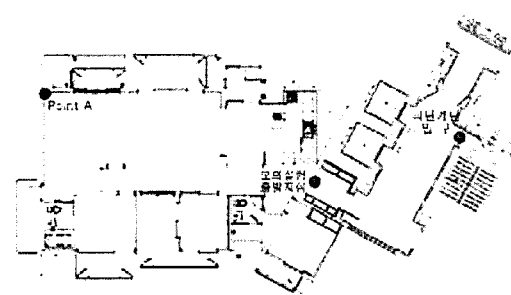
공동주택은 주거시설이므로 대부분의 거주자들이 이미 건축물 내부 공간에 대해 충분히 인지하고 있다고 가정한다면 심리적인 요인보다는 보행속도와 같은 신체적인 요인이 피난시간과 안전에 직결된다고 할 수 있다. 연기층의 보행속도는 연기의 농도 이외에 복도의 밝기, 건물 내부의 인지정도, 연기의 자극도 등에 좌우되는데, 자극이 약한 연기의 경우 보행속도는 연기의 농도에 대개 비례해서 늦어지지만, 자극성이 강한 연기의 경우 보행속도는 연기농도가 옅은 지역에서는 연기농도가 어느 기준치 이상이 되면 급격히 저하된다. 이처럼 연기의 농도에 따라서 보행속도가 늦어지게 되는 것은 연기중에서의 가시거리가 변화하기 때문이다.

### III. 이론적 검증 및 피난실험 시나리오

#### 1. 대상지 개요

본 연구에서는 연기가 거주자의 피난행동에 미치는 영향을 알아보기 위해 실제 완공된 공동주택 1개소를 선정하여 이론적 검증 및 모의피난실험을 실시하였다. 본 실험을 위한 대상지의 개요는 다음과 같다.

표 4. 실험 대상지의 개요

위치	대구광역시 수성구 만촌동 J 공동주택
규모	지하 3층, 지상 30층
구성	단위층당 세대면적 165 m <sup>2</sup> ×4세대
단위 세대 평면	

#### 2. 피난안전 검증법<sup>10)</sup>에 의한 검토<sup>11,12)</sup>

본 연구에서는 우선 대상지의 연기발생량 및 연기층 강하시간, 거주자의 피난시간을 이론적으로 검토하기 위해 일본 건설성 고시 1442호(建設省告示第1442号 全館避難安全檢證法に關する算出方法等を定める件, 이하 피난안전 검증법이라 명함)을 이용하였다. 피난안전 검증법은 이론적

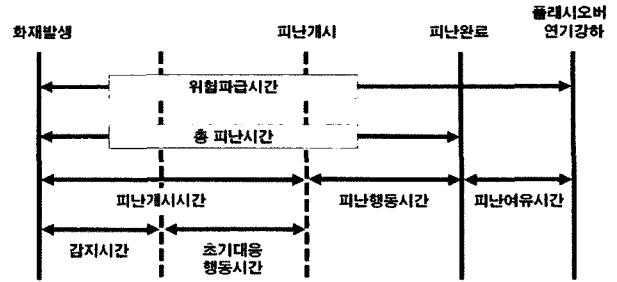


그림 1. 피난시간의 구성

인 검증방법의 하나로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 모의실험에 비해 최대허용 한계치의 범위가 크나, 학계에서는 시뮬레이션을 통한 검증과 함께 피난계산을 통한 정량적 평가기법의 하나로 사용되고 있다.

본 검증법은 화재가 발생한 층에 있던 모든 재실자들이 피난계단실까지 피난하는 상황을 수식으로 계산하여 안전성을 예측하는 방법으로, 연기층이 재실자들의 피난에 지장을 주는 일정 높이까지 내려오기 전에 피난계단실로 진입을 완료해야 한다는 것을 목표로 한다.

본 연구에서는 피난안전 검증법에 의해 거주자가 피난을 개시하기까지 걸리는 시간( $T_{start}$ ), 피난계단실에 도달하기까지 걸리는 보행시간( $T_{travel}$ ), 출구를 통과하기 위해 필요한 시간( $T_{queue}$ )은 다음과 같다.

$$T_{start} = \frac{\sqrt{\sum A_{area}}}{30} = 13.73 \text{ (초)} \quad (1)$$

$$T_{travel} = \max\left(\sum \frac{l_i}{v}\right) = 21.00 \text{ (초)} \quad (2)$$

$$T_{queue} = \frac{\sum p \times A_{room}}{\sum N_{eff} \times B_{eff}} = 7.33 \text{ (초)} \quad (3)$$

여기서,

$A_{area}$ : 단위세대에서 피난을 하기 위해서 반드시 통과해야만 하는 부분의 바닥 면적의 합계(m<sup>2</sup>)

$l_i$ : 단위세대에서 피난계단실에 도달하는 보행거리(m)

$v$ : 피난자의 보행속도(m/분)

$p$ : 재실자 밀도(인/m<sup>2</sup>)

$N_{eff}$ : 유효유동계수(인/분 · m)

$B_{eff}$ : 출구폭(m)

10) 피난안전 검증법에서는 계산을 간단하게 하기 위해 피난자의 행동에 대해 다음과 같이 가정하고 있다.

- 피난대상자는 실내에 균등하게 분포되어 있다.
- 피난은 일제히 개시되나, 발화실과 비발화실은 개시시간이 다르다.
- 피난자는 미리 정해진 경로를 통해 피난한다.
- 보행속도는 일정하며, 추월이나 후퇴는 하지 않는다.
- 피난자 흐름은 출입구 등의 병목에 의해 규제된다.
- 피난경로가 복수인 경우에는 가장 가까운 경로를 이용한다.

11) 최준호(2007), 「초고층 공동주택의 유비쿼터스 기반 피난시스템 도입을 위한 유형별 피난특성 분석」, 경북대학교 공학석사 학위논문 pp. 77-98.

12) 防災研究會 AFRI (2005), 「建築防災計劃の考え方・まとめ方」, Ohmsha, pp. 149-169.

(3)식에서 재관자 밀도  $p$ 는 주택이므로  $0.06\text{인}/\text{m}^2$ 을, 유효유동계수  $N_{eff}$ 는  $90\text{인}/\text{분} \cdot \text{m}$ 을, 출구폭인  $B_{eff}$ 는  $0.9\text{m}$ 를 사용하였다. 한편 화재에 의해 생성된 연기가 거주자의 피난에 영향을 미치기 시작하는  $1.8\text{m}$ 까지 강하하는 연층 강하시간( $T_s$ )과 연기발생량( $V_g$ )은 다음과 같다. 단, 유효배연량( $V_e$ )은 배연설비가 없으므로 0으로 간주하였다.

$$V_g = 3\sqrt[3]{9((a_f + a_m)A_{room})} \times 3\sqrt[3]{(3\sqrt[3]{H_{low}^5} + H_{low} - H_{room} + 1.8)^5} = 67.48 \text{ m}^3/\text{분} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{A_{room} \times (H_{room} - 1.8)}{\max(V_g - V_e, 0.01)} = 117.60(\text{초}) \quad (5)$$

여기서,

$a_f$ : 당해 거실의 적재 가연물의  $1\text{m}^2$ 당 발열량( $q_1$ )이  $170\text{MJ}/\text{m}^2$  이상일 경우  $a_f = 2.6 \times 10^{-5} \times 3\sqrt[3]{q_1^5}$

$a_m$ : 세대의 실내마감재의 종류에 따라 정해진 수치로 불연재료일 경우  $0.0035$

$A_{room}$ : 화재실의 바닥 면적( $\text{m}^2$ )

$H_{low}$ : 당해실의 바닥면의 최저 위치에서의 평균 천장고( $\text{m}$ )

$H_{room}$ : 당해실의 기준점에서의 평균 천장고( $\text{m}$ )

$H_{lim}$ : 한계 연기층 높이( $\text{m}$ )

피난안전검증법을 통한 이론적 검증에서 연기층이  $1.8\text{m}$  높이까지 강하하여 거주자의 피난에 지장을 주기까지 소요되는 시간은  $117.60(\text{초})$  거주자가 피난계단실로 진입하는데 소요되는 시간은  $T_{start} + T_{travel} + T_{queue} = 42.06(\text{초})$ 로 나타났다. 이론적으로 연층강하시간까지 약  $75(\text{초})$  정도의 시간적 여유가 있으나 화재경보가 작동하려면 화재발생 후 화염이 일정기준 이상 발열량을 보여야 하는데다가 심야 취약시간대 또는 다른 행위를 하다가 화재경보의 인지가 늦어져 피난개시의 지연으로 이어지면 연기로 인한 시야차단 및 호흡곤란 등의 피난장애가 뒤따라 발생하게 되므로 거주자의 피난에 위험성도 있을 것으로 판단된다.

### 3. 실험개요 및 방법

본 연구에서 실시한 모의피난실험의 목적은 공동주택에서 화재로 인해 연기가 발생했을 경우 피난계단실이 위치하고 있는 코어부에서 각 세대의 거주자들이 피난계단실로 진입하는데 어떠한 영향을 받는지를 알아보기 위함이다. 따라서 금번 실험에서는 피실험자 25명(남15, 여10) 각각을 대상으로 공동주택에서 화재상황을 가정하여 연기 발생 유무에 따른 거주자 개인의 피난행동을 비교하여 연기발생이 피난시간과 동선에 미치는 영향을 알아보았다.

그러나 본 연구에서는 실제 화염을 발생시켜 실험하기에는 안전상의 문제 등의 어려움이 있고, 피험자 모두에게 동일한 정도의 시야차단 조건을 부여하기 위해 아래 식을 활용해 선행연구<sup>13)</sup>에서 제작한 불투명 안대(가시광선 투과율  $T=27\%$ )를 피험자들에게 착용시켜 동일한 환경을 조성하였다.

표 5. 피난실험 개요

장 소	대구광역시 수성구 만촌동 J 공동주택
인 원 <sup>14)</sup>	20대 남녀 25명 (남: 15명 여: 10명)
실험 조건	CASE-1. 연기발생으로 인해 가시거리가 제한된 상황 CASE-2. 연기가 발생하지 않은 상황

불투명 안대의 빛 투과율( $T$ )과 가시거리( $L$ )의 측정을 통해 감광계수( $C_s$ )를 구하면 불투명 안대의 시야장애 정도를 실험공간에 대한 연기농도의 수치로 나타낼 수 있다. 감광계수( $C_s$ )에 의해 균일 거리  $L(\text{m})$ 만큼 떨어져 있는 경우, 대상 광원의 세기가  $I_0$ 의 경우, 물체에 도달하는 빛의 세기를  $I$ 로 하였을 때 위 식과 같은 관계가 성립하며, 연기에 의해 나타나는  $I_0$ 와  $I$ 의 관계는 실험에 사용된 안대의 투과율( $T$ )로 나타낼 수 있다.

$$T(\%) = \frac{I}{I_0} \times 100 = 100 \times \exp(C_s L) \quad (6)$$

$$C_s = \frac{1}{L} \times \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (7)$$

여기서,

$C_s$ : 감광계수( $\text{m}^{-1}$ )

$L$ : 광원과 빛이 닿는 물체와의 거리( $\text{m}$ )

$I$ : 연기층 통과후의 빛의 강도( $\text{lux}$ )

$I_0$ : 빛의 원래 강도( $\text{lux}$ )

표 6. 감광계수에 따른 가시거리의 상황

감광계수	가시거리의 상황
$0.1 (\text{m}^{-1})$	희미한 연기가 감돌때의 농도
$0.3 (\text{m}^{-1})$	건물 숙지자가 피난에 장애를 느끼는 농도
$0.5 (\text{m}^{-1})$	약간 어두울 때의 농도
$1.0 (\text{m}^{-1})$	거의 앞을 볼 수 없을 정도의 농도
$10.0 (\text{m}^{-1})$	최성기의 화재층 연기농도

표 7. 거리에 따른 감광계수(빛투과율이 27%일때)

거 리( $\text{m}$ )	1	5	10	15	20
감광계수( $\text{m}^{-1}$ )	1.309	0.262	0.130	0.087	0.065

위의 <표 6>을 통해 투과율 27%의 안대를 착용상태에서  $5\text{m}$  앞이 보이는 것은 감광계수가  $0.26$ 인 연기가 차 있는 경우라 할 수 있다. 따라서 본 실험에 사용된 불투명 안대를 착용한 것은  $5\text{m}$  앞에 희미한 연기가 감돌 때의 농도로 연기 감지기가 작동되고 건물에 익숙하지 않은 사람이 피난장애를 일으키게 되는 상황이라 할 수 있다.

본 실험은 연기발생 유무의 상황을 연출하기 위해 각각의 피험자에게 안대의 착용여부에 따라 2회 실시되었으며, 피험자가 실제 거주자가 아니기 때문에 감광계수

13) 특수 불투명 안대의 제작 및 투과율 선정에 대한 내용은 참고문헌에 표기된 선행연구를 따름.

14) 동일 연령대를 선정하여 나이차에 따른 신체적 운동능력 및 판단능력 등의 요인을 실험에서 배제하였음.



그림 2. 불투명 안대의 착용 모습과 모의피난실험 과정

0.3 m<sup>-1</sup>의 상황과 유사한 가시광선이 27% 투과되는 안대를 착용시켰다. 또한 피험자가 평면구성을 인지하지 못하도록 안대를 착용한 실험을 먼저 실시하여 출발지점에 배치할 시점부터 눈을 가리고 안대를 착용시켰다. 그리고 피험자가 세대의 내부공간에 대해 인지하지 못한 상태이므로 피험자 간 동일 조건을 부여하기 위해 현관의 끝 지점에서부터 피난을 시작하였고, 각 개인마다 피난특성이 달라 실험 결과에 대해 신뢰성을 부여하기 위해 동일 조건에서 25명에게 반복적으로 실시하여 패턴을 찾고자 하였다.

#### IV. 연기발생이 피난행동에 미치는 영향

##### 1. 피난실험 결과 분석

###### 1) 피난계단실 진입시간 분석

피난안전 검증법에 따른 이론적 검증에서, 대상지의 단위세대 내부 현관에서 가장 먼 지점(Point A)으로부터 모의피난실험의 출발점인 현관 끝 지점까지의 피난행동 소요시간은 표준보속(1.3m/s)을 기준으로 했을 때 13.07초로 나타난다. 따라서 A지점에서 피난계단실로 진입하는 전체 피난행동시간인 21.00초에서 13.07초를 빼면 본 실험의 피난 시작점에서부터 피난계단실 입구까지의 이론적 피난행동 소요시간은 7.93초로 나타난다. 본 연구에서는 이론적 계산을 통해 얻은 7.93초를 실제 피난실험과 비교할 수 있는 피난시간의 기준으로 설정한 후 실험을 통해 얻은 결과를 분석하였다.

우선 실제 피험자들이 피난하는데 걸린 소요시간을 살펴보면, 연기가 발생하지 않은 상황에서는 피난을 하는데 걸린 평균 소요시간이 4.92초(기준치의 62.0%)로, 이론적 소요시간에 비해 3.01초의 여유가 있었으나 연기가 발생한 상황에서는 11.38초(기준치의 143.5%)가 소요되어 이론적 기준치에 비해 3.45초가 초과된 것으로 나타났다.

실험에서 소요된 피난시간을 성별로 구분해보면 남자 집단의 평균은 연기가 발생했을 경우 10.00초로 연기가 발생하지 않은 경우인 4.31초에 비해 2.32배(+5.69초)의 시간이 더 걸렸다. 여자 집단도 13.46초로 5.84초에 비해 7.62초가 증가되었는데 이 역시 연기가 없을 경우보다 2.30배나 많은 시간이다.

표 8. 안대착용여부에 따른 피험자별 피난시간(초)과 보속(m/s)

성별	이름	안대착용시		안대미착용시		일상 보속
		소요시간	보속	소요시간	보속	
남 (15)	A	14.13	0.68	4.88	1.96	1.04
	B	5.93	1.61	4.41	2.17	1.98
	C	8.75	1.09	2.54	3.76	1.53
	D	8.22	1.16	3.38	2.83	1.45
	E	9.29	1.03	3.54	2.70	1.63
	F	10.16	0.94	4.67	2.05	1.53
	G	5.11	1.87	2.89	3.31	1.55
	H	12.00	0.80	4.31	2.22	1.67
	I	13.21	0.72	6.15	1.55	1.53
	J	9.86	0.97	4.11	2.33	1.45
	K	12.11	0.79	5.10	1.87	1.74
	L	8.81	1.09	4.39	2.18	1.56
	M	11.74	0.81	4.56	2.10	1.90
	N	8.09	1.18	4.28	2.23	1.50
	O	12.65	0.76	5.47	1.75	1.47
평균	10.00	1.03	4.31	2.33	1.57	
표준편차	2.54	0.32	0.91	0.57	0.21	
여 (10)	P	10.10	0.95	7.66	1.25	1.55
	Q	8.32	1.15	6.06	1.58	1.47
	R	16.87	0.57	4.69	2.04	1.03
	S	8.81	1.09	6.15	1.55	1.18
	T	12.08	0.79	6.98	1.37	1.13
	U	9.97	0.96	4.00	2.39	1.88
	V	7.21	1.33	4.09	2.34	1.89
	W	12.22	0.78	4.42	2.16	1.57
	X	36.72	0.26	7.66	1.25	1.06
	Y	12.25	0.78	6.66	1.44	1.50
평균	13.46	0.87	5.84	1.74	1.43	
표준편차	8.17	0.29	1.36	0.43	0.30	
전체 평균	11.38	0.97	4.92	2.10	1.51	
전체표준편차	5.78	0.32	1.34	0.59	0.26	

한편, 피험자들의 보행속도<sup>15)</sup>를 살펴보면, 전체 피험자 집단의 평상시 평균 보행속도는 1.51 m/s였으나, 화재경보를 통한 화재발생 상황을 부여하여 피난행동을 개시한 후에는 <표 8>과 같이 2.10 m/s로 보행속도가 0.59 m/s (32.08%)만큼 빨라졌다.<sup>16)</sup>

피난시의 보행속도를 성별로 구분하여 살펴보면 남자가 2.33 m/s, 여자가 1.74 m/s로 남자가 0.59 m/s(33.91%) 정도 빠른 것으로 나타났다. 또한 일상속도에 비해 화재발생 상황에서의 보행속도는 남자가 0.76 m/s(48.41%), 여자가 0.31 m/s(21.68%)만큼 증가하였다.

그러나 연기가 발생한 상황에서 25명의 평균 보행속도는 일상 보행속도에 비해 0.54 m/s(35.76%)만큼, 또 연기가 발생하지 않은 상황에서의 보행속도에 비해 1.51 m/s

15) 표 8에서 출발지점에서 피난계단실 입구까지의 거리는 모든 피험자가 불투명 안대를 착용하지 않고 이동한 동선체적의 평균 길이인 9.56m로 산정하였음. 본 연구에서 피험자 개개인이 움직인 동선의 길이를 기준으로 보행속도를 산정하지 않은 이유는 피난의 출발점에서 도착점까지 거리가 명확한데다가 피험자가 얼마만큼 우회하여 시간이 더 걸리는지를 확인하기 위함임.

16) 본 실험은 피험자 1인을 대상으로 실시되었으므로 피난자간 작용하는 심리적, 물리적 영향 및 장애요인은 고려되지 않음.

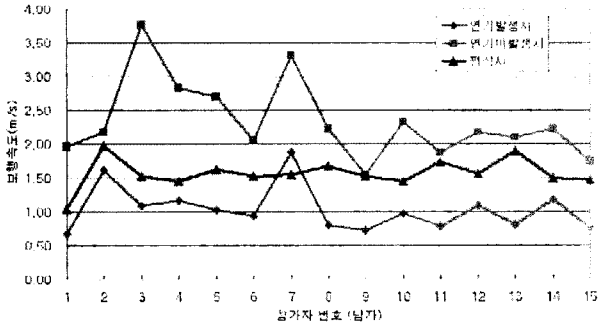


그림 3. 남자 피험자의 상황별 피난속도(15명)

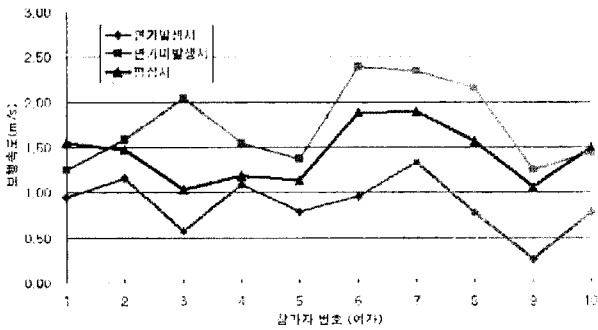


그림 4. 여자 피험자의 상황별 피난속도(10명)

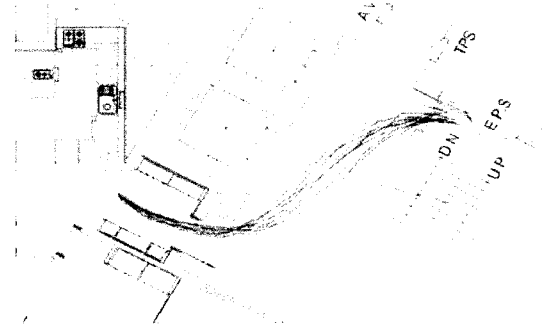


그림 5. 피험자들의 피난동선 (연기가 발생하지 않은 상황)

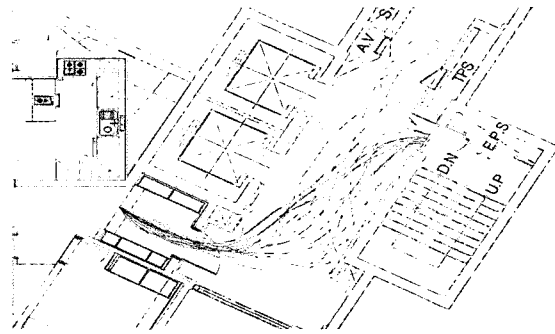


그림 6. 피험자들의 피난동선 (연기가 발생한 상황)

(53.81%)만큼 감소하였는데 앞서 화재 발생시 보행속도가 빨라졌던 것에 비해 오히려 더 큰 폭으로 보행속도가 느려졌다. 성별에 따라 나누어 볼 때에도 마찬가지로, 남자 피험자 1명을 제외하고는 남녀 모두 평상시 보행속도에 비해 각각 0.54 m/s(34.39%), 0.56 m/s(39.16%)의 속도저하를 나타내었다. 그러나 연기가 발생하지 않은 화재발생 상황에 대해서는 오히려 남자가 0.76 m/s(48.41%), 여자가 0.89 m/s(21.68%)의 속도증가를 보여 성별에 따른 속도변화의 차이를 보여주었다.

2) 피난계단실 진입경로 분석

피험자 개개인의 피난계단실로의 진입경로를 분석해보면 연기가 발생하지 않은 상황에서는 <그림5>과 같이 대부분의 피험자가 현관 출입문을 열자마자 피난계단실의 출입문을 인지하고 최단거리로 피난계단실로 진입하는 모습을 보여주고 있다. 그러나 연기가 발생한 상황에서는 피험자들이 연기가 발생하지 않은 상황에 비해 매우 상이한 동선패턴을 보이고 있다.

연기가 발생한 상황에서는 남자 15명 중 11명인 73.33%가, 여자는 10명 중 7명인 70.00%가 피난계단실의 입구의 위치를 정확히 인지하지 못해 양팔을 앞으로 뻗어 손으로 벽이나 물체를 더듬으면서 피난계단실로 진입하였다. 또한 비교적 좁은 공간이라 할 수 있는 피난계단실 진입부에서 시야확보의 어려움이 있다고는 하지만 벽이나 바닥을 만지는 등 촉각에 의지할 수는 있음에도 불구하고 피난계단실 출입문의 위치를 인지하지 못하거나 완전히 방향 감각을 상실하는 피험자의 동선도 나타나고 있다.

2. 연기발생이 미치는 영향

본 연구의 피난실험 결과를 살펴보면 참가한 피험자 25명 모두 피난안전 검증법에 의한 이론적 피난시간보다 짧은 시간이 소요되었다. 그리고 피험자 중 여자 2명을 제외한 23명이 평상시 보행속도에 비해 화재발생 상황에서 보행속도가 빨라졌는데, 위급상황에서 남녀 모두 신속히 피난하려는 의지가 보행속도에 반영된 것으로 보이며, 여기서 발생하는 남녀 간의 보행속도 차이는 생물학적 또는 신체적 운동 능력의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

하지만 거주자가 화재가 발생한 초기에 피난하지 못한다면 발생한 연기가 피난로와 수직적 공간인 엘리베이터 실이나 피난계단실로 확산될 가능성이 큰데 연기가 확산되면 시야가 가려져 피난속도가 현저히 줄어든다. 본 실험에서는 피험자 전원의 보행속도 평균 감소폭이 35.76%로 나타났는데 실제 상황에서는 시야차단과 함께 호흡선까지 위협받게 되어 몸을 구부리거나 기어가게 되므로 보행속도가 이보다 더욱 늦어질 것으로 판단된다. 현재 우리나라의 초고층 공동주택의 출입문에서 피난계단실까지의 공간은 비교적 좁은 공간인데다 경제적 비용 등의 문제로 제연설비나 피난 유도설비, 비상용 방송설비 등이 거의 설치되어 있지 않고, 피난계단실에서 제연시스템이 가동되면 압력차로 인해 출입문을 열기가 힘들 수 있어 때문에 연기에 노출되면 조금이라도 늦게 피난을 시작한 거주자들은 피난에 큰 어려움을 겪게 될 수 있다.

연기가 발생한 상황에서 피험자 모두 평상시 보행속도에 비해 느린 보행속도를 보여 준 것도 시야차단으로 인

해 피난행동에 장애를 겪은 것으로 판단된다. 특히 남자 집단에 비해 여자 집단이 평소와 비교해봤을 때 연기발생으로 인한 보행속도의 변화폭과 표준편차가 컸으며, 연기로 인해 시야장애를 겪게 되면 남자와 여자의 보행속도의 격차가 평소에 비해 작아져 거의 비슷하게 된다는 것을 보여주고 있다. 또한 연기가 발생한 상황에서 여자 집단의 평균 보행속도는 0.87 m/s로 남자 집단의 1.03 m/s에 비해 15.53%가 느리지만 피난계단실로 진입하는데 걸린 시간이 13.46초로 남자집단의 10.00초에 비해 34.60% 더 소요되었는데, 여기서 여자 집단이 피난할 때의 움직임 평균 거리가 남자들에 비해 길었다는 것을 유추할 수 있으며, 비록 실험 참가자가 비교적 적다고는 하나, 이를 통해 여자집단이 남자집단에 비해 피난로를 우회하여 긴 동선을 보인 것으로 나타났다.

### V. 결론 및 발전사항

일반적으로 방화공학에서 실시되고 있는 Performance Based Design(PBD)은 연기를 제어하여<sup>17)</sup> 비상구 및 피난계단실, 그리고 직접적으로 피난을 하는 재실자들에게 연기가 가까이 가지 않도록 하는 것을 목표<sup>18)</sup>로 하고 있다. 연기는 피난을 방해하는 치명적인 요소이므로 피난계획을 수립하는데 있어 가장 큰 고려사항이 된다. 특히, 초고층 공동주택에서는 좁은 피난계단실로 인해 거주자들이 피난을 하면서 병목현상을 일으킬 가능성도 지니고 있어 연기발생으로 인한 피난의 지연은 전체 피난군집에게도 위험을 가져올 수 있다. 또 연기의 배출경로와 거주자들의 피난경로가 일치하는 경우가 많아 연돌효과로 인한 위험성 또한 배제할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 초고층 건축물에서 연기발생이 피난자들에게 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 먼저 각 세대에서 피난계단실 진입부까지의 공간을 대상으로 모의피난실험을 실시하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 각 세대에서 피난계단실 입구까지의 비교적 짧은 거리에서도 연기가 발생하면 안전을 위협할 정도로 피난소요시간이 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 실험에 참여한 남녀 집단 모두 화재발생 상황에서는 평소 걷는 속도보다 32.08% 빠른 보행속도를 보였다.

(3) 그러나 연기발생을 가정한 상황에서는 보행속도가 평소에 비해 35.76%만큼, 연기가 발생하지 않은 화재상황에 비해 53.81%만큼 줄어들었다.

(4) 특히, 연기가 발생한 상황에서 보행속도와 소요시간의 상관관계에서 여자 집단이 남자 집단에 비해 피난행동에서 우회동선을 보였다.

상기 내용을 초고층 공동주택 전체 피난의 관점에서 보면 발화층 피난자의 피난지체, 재연시스템 가동에 따른 압력차로 인한 피난계단실 출입문 개폐의 어려움, 좁은

피난계단실로 수백 명이 몰리는 병목현상 발생 등으로 뒤늦게 피난을 시작한 거주자나 노약자, 장애인 등의 재난약자를 포함한 개개인은 물론 모든 재실자의 피난안전에도 위협을 가할 수 있다. 그러므로 각 세대에서 피난계단실까지 진입하는 코어부에도 고회도의 피난 유도등이나 제연경계벽 등의 설치로 피난시간을 벌 수 있는 장치가 필요하다고 판단된다. 그러나 본 연구에서 실시한 실험은 실제 상황과 다를 수 있으며, 실제 화재의 성장과 연기의 확산을 고려하지 않았으며 25명의 피험자를 대상으로 실험을 진행하였다는 점에서 한계가 있을 수 있다. 추후에는 다양한 연령대와 신체적 조건을 가진 피험자 구성으로 연기의 농도 변화 및 호흡장애까지도 고려한 연구가 뒤따라야 하며, 거주자들의 수직적 피난활동에 미치는 영향에 대한 후속 연구 또한 요구된다.

### 참고 문헌

1. 최준호(2007), 초고층 공동주택의 유비쿼터스 기반 피난시스템 도입을 위한 유형별 피난특성 분석, 경북대학교 공학석사 학위논문.
2. 홍원화 · 최준호 · 전규엽(2007), 초고층 공동주택의 USN 기반 피난시스템 도입을 위한 수직적 피난위계 설정에 관한 연구, 한국주거학회 논문집, 18(5), 133-141.
3. 최준호 · 전규엽 · 홍원화(2007), 초고층 공동주택의 피난계단쪽에 따른 피난시간 및 피난자의 수직적 분포 분석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 27(1), 737-740.
4. 최준호 · 전규엽 · 홍원화(2006), 고층 주상복합 건축물의 피난 안전을 위한 국내의 법규사례 분석 및 개선방향에 관한 연구, 한국화재소방학회 춘계학술발표대회논문집, 203-208.
5. 나옥정(2006), 지하공간 비상유도등의 성능평가 및 피난유도 향상에 관한 연구, 경북대학교 공학석사 학위논문.
6. 권선욱(2001), 연령별 피난시간에 따른 피난계획에 대한 연구, 중앙소방학교 제11기 소방간부후보생 졸업논문.
7. 나옥정 · 전규엽 · 홍원화(2006), 지하공간 비상 유도등의 성능평가 및 피난유도 향상에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 계획계, 22(10), 295-302.
8. 손봉세(1997), 연기유동의 해석과 제어, 한국소방안전협회 소방기술 통권 제53호.
9. 이강훈(1997), 인간행동패턴에 대한 고찰과 피난로 설계에의 적용방법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 13(7), 83-93.
10. 최재필 · 강범준 · 박영섭 · 이윤재(2005), 초고층 건축물의 대피층 및 대피공간 개념 도입 방안, 대한건축학회 논문집, 21(1), 147-154.
11. 손봉세 · 이용재(2004), 초고층 건축물의 화재시 방재 · 피난계획, The 4th International Symposium of KSTBF
12. Junho Choi, Gyuyeob Jeon, Wonhwa Hong (2006), A Study on the Analysis of the Evacuation Safety at a High-rise Apt. on Fire, 4th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia
13. NFPA 101: Life Safety Code, 2006 Edition
14. 日本火災學會 編(2006), 火災と建築, 共立出版株式會社.
15. 防災研究會 AFRI (2005), 建築防災計劃の考え方・まとめ方, Ohmsha.
16. 日建設省告示第1442戸(2001), 全館避難安全檢證法に關する算出方法等を定める件.

접수일(2008. 8. 1)  
수정일(1차: 2008. 9. 12)  
게재확정일(2008. 9. 22)

17) Methods for design of smoke control  
18) Objective of keeping smoke away from exits and occupants