건물 복도에서의 밀도와 이동속도에 대한 영상분석

A Video Analysis of Movement Speed and Density of People in Building Corridor

김운형* · 양창근** · 양건모*** · 정우인**** · 김종훈*****

Kim, Woon Hyung*, Yang, Chang Geun**, Yang, Gun Mo***, Jung, Woo In****, and Kim, Jong Hoon*****

Abstract

Experiment were conducted to analyze the relationship between crowd density and movement speed on a 2 m wide corridor. Video analysis was performed on the result of experiment. The result of analysis data from 108 samples for speed and density showed that the speed was less than 2.3 m/s at a density of 1.2 P/m² or more. In the analysis of 57 data over 1.2 P/m², the speed from the experiment and the result of calculation using the equation from SFPE handbook and the measured density value were compared. As a result, the experimental value was 0.65 m/s higher than the calculated value. Therefore, the actual movement speed is faster than the calculated speed at the same density.

Key words : Evacuation, Movement Speed, Density, Video Analysis, Corridor

요 지

2 m 폭의 복도에서의 밀도와 이동속도 간의 관계를 분석하고자 참여인원 100명을 대상으로 실험 결과에 대하여 영상분석을 수행하였다. 108개의 밀도와 속도에 대한 데이터를 분석한 결과, 밀도 1.2 P/m² 이상에서 이동속도는 2.3 m/s 이하로 제한됨을 알 수 있었다. 1.2 P/m² 이상의 57개 데이터 분석으로 측정된 밀도 값에 대하여 SFPE의 수식 계산 속도와 실험 측정 속도를 비교한 결과, 실험값이 평균 0.65m/s 정도 더 높게 나왔다. 따라서 피난 시 밀도에 대한 속도는 수식의 예측 속도보다는 실제 이동속도가 더 빠른 것으로 나타났다.

핵심용어 : 피난, 이동속도, 밀도, 영상분석, 복도

1. 서 론

건물 고층화와 대심도화 등에 나날이 복잡해지고 있는 건축물의 화재안전성능은 기존의 사양기준만으로는 어려운 상황이다. 이러한 건축물에 대한 화재안전 분석 기반의 성능

위주소방설계(Performance based fire safety design)는 선진국뿐만 아니라 국내에서도 법제화되고 적용 추진되고 있는 상황이다. 이러한 화재안전 분석에서 허용피난안전시간(Available Safe Egress Time)과 요구피난안전시간(Required Safe Egress Time)을 산정하고 이의 비교를 통해 안전성

*교신저자, 정회원, 경민대학교 소방안전관리과 교수(Tel: +82-31-828-7312, Fax: +82-31-828-7312, E-mail: nfpa101@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire Safety Management, Kyungmin University

**경민대학교 소방안전관리과 학사과정

Undergraduate, Department of Fire Safety Management, Kyungmin University

***경민대학교 소방안전관리과 학사과정

Undergraduate, Department of Fire Safety Management, Kyungmin University

****(주) H2K솔루션 이사

Director, H2K Solution Inc.

***** (주) H2K솔루션 이사

Director, H2K Solution Inc.

확보여부를 판단하는 방법을 사용하고 있다. 허용피난안전시간의 계산은 화재실험, 계산수식, 그리고 화재시물레이션을 의하며, 요구피난안전시간은 피난실험, 피난 수계산 분석, 그리고 컴퓨터 피난시물레이션에 의하게 된다. 화재위험성 평가나 성능위주 소방설계의 결과에 대한 신뢰성은 각각의 계산에 대한 신뢰성에 의해 결정된다. 따라서 어느 한 부분의 계산 결과의 신뢰성이 낮을 경우 평가 또는 설계 전체의 신뢰성이 저하된다고 볼 수 있다. 피난시간의 예측은 피난 수계산과 컴퓨터 피난모델링으로 가능하며 이들 결과의 신뢰성은 입력데이터와 계산수식 및 알고리즘 자체의 신뢰성으로 구성된다고 볼 수 있다. 컴퓨터 피난모델의 경우 일부 입력 값은 국내 자료의 확보가 가능하나 아직도 많은 부분에 한국인의 자료를 필요로 하고 있다.

선행연구에서는 이러한 피난 수계산 분석 및 컴퓨터 피난 모델링에 사용되는 기본적 입력 값의 확보를 위하여 복도에서의 피난실험을 통해 밀도의 변화와 유동률, 그리고 이동속도에 대해 수치적 계산을 통한 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 지난 연구의 분석 방식과 다른 영상분석을 통한 결과를 도출하였다. 이러한 연구는 동일 실험에서 분석방법에 따른 결과의 차이를 고찰해볼 수 있는 계기를 제공한다.

2. 기존 문헌에 대한 고찰

기존문헌에서 밀도와 보행속도의 관계가 적용되는 군집 보행의 경우, 먼저 Kimura (1937)의 연구에 의하면 $0.5 \sim 1.0 \text{ P/m}^2$ 이하일 경우는 자유로운 보행이 가능하지만 밀도가 1.2 P/m^2 이상이 되면 전면에 피난자를 추월하기 위해서는 신체적 충돌이 불가피하게 되므로 군집보행이 형성됨을 제시하였다. Fruin (1971)에 의해 발표된 연구에서는 보행속도와 밀도와의 관계와 보행자의 밀도에 따른 서비스 수준과 그에 따른 유동계수 등을 제시하였다. 국내의 경우 국토교통부 고시 「도시철도 정거장 및 환승편의시설 설계지침」에서 서비스수준에 대한 사항을 인용하고 있다. Predtechenskii와 Milinskii (1978)는 보행자의 흐름에 대한 연구에서 밀도를 개인이 차지하는 공간으로 정의하고 최대 밀도를 제시하였다. Ando et al. (1988)는 그의 연구에서 지하철 역 승강장으로 출퇴근하는 사람들의 군집상태를 분석한 결과, 4 P/m^2 에 도달하여도 약 0.3 m/s 의 느린 보행이 가능함을 확인하였다. Polus et al. (1983)는 그의 분석에서 밀도가 2 P/m^2 이상 되면 군집유동에 혼잡이 발생하여 보행속도가 빠르게 감소한다는 결과를 도출하였다. Gwynne and Rosenbaum (2016)은 SFPE Handbook에서는 군집인원의 밀도와 이동속도의 관계를 다음과 같은 수식으로 제시하고 있다.

$$S = k - akD \quad (1)$$

위 수식에서 복도의 경우 k 는 1.4, a 는 0.266을 적용하여

계산한다. 이는 밀도가 $0.54 \sim 3.8 \text{ P/m}^2$ 에 적용할 수 있다.

3. 복도 피난 실험 수행

3.1 실험 개요

본 피난실험에서는 일자형 복도에서의 이동을 측정하였다. 실외 주차장에 세트를 만들었으며, 측정은 직선유동과 합류유동을 측정하기 위해 설치된 T자형 세트의 긴 일자형 부분에서 실시되었다. 분기복도 쪽 방향은 막아서 일자형 복도를 15 m 길이, 2 m 폭으로 구현하여 이 부분에 카메라를 5개 지역에 설치하고 이 중 입구와 출구를 제외한 3개 지역에 대해 측정을 실시였다. 본 실험은 3.5 m 높이에 카메라를 설치하였다. 설치한 카메라는 Full HD 방식이며, 촬영 각 120° 이고 200만 화소로서 CCTV용으로 제작된 것이다. 이동 시 촬영면적을 표시하기 위하여 카메라를 중심으로 전후방 2 m부분 벽에 표시를 해놓았다. 카메라는 설치 위치의 직 하부를 향하도록 설치되었다. 실험인원은 총 200명으로 2개의 그룹으로 나누어 각각 100명씩 통과하도록 실험이 진행되었다.

Fig. 1. Corridor Experiment Setup

실험 참가자는 모자와 가슴에 번호표를 제공하고 착용하도록 하여 이동하는 참가자의 확인을 쉽게 하였다.

Fig. 2. Number on Body

3.2 참가자 기본 자료 측정

각 참가자 200명에 대해 개인의 신체 데이터와 개인 이동 속도 측정을 실시하였다. 이동속도는 참가자가 20 m 길이를 보통의 보행속도로 걸어가면서 측정 장치를 통해 보행속도를 기록하였다. 개인 데이터는 연령, 성별, 키, 몸 두께, 몸 폭을 획득하였다. 측정 결과는 Table 1과 같이 평균 21.8세였으며 남성참가자는 126명, 여성참가자는 73명이었다. 보행속도의 측정에서 평균 2.1 m/s이고, 최대 3.8 m/s에서 최소 1.2 m/s로서 이는 자유상태의 보행속도를 의미한다.

Table 1. Analysis of Personal Data and Walking Speed

Item	Data
Age	21.8 years old
Gender	Male : 126 persons Female : 73 persons
Height	170.2 m
Body width	27.3 cm
Body depth	49.2 cm
Walking speed	2.1 m/s (Average) 3.8 m/s (Max) 1.2 m/s (Min)
Standard Deviation	0.43

3.3 복도에서의 이동속도 영상 측정

15 m의 복도에서 3개 지역을 설정하여, 폭 2 m, 길이 4 m의 지역을 선정하고 이 부분을 촬영하여 영상데이터를 획득하였다.

Fig. 3. Movement in the Corridor

4. 복도 피난 실험 결과 분석

본 피난실험의 결과를 분석하는 접근방법으로 2가지를 적용하였다. 첫 번째 방법은 설정된 지역으로의 유입되는 유동률과 평균 이동속도를 기반으로 밀도를 측정하였으며 선행연구에서 수행된 바 있다.

4.1 유동률-평균이동속도 기반 분석

선행연구에서 수행된 분석에서 실험에서 측정된 유동률

과 시간 데이터를 기반으로 밀도와 시간데이터를 계산해보았다.

Fig. 4. Comparison between Experiment and SFPE Correlation

2 m 폭의 단일 복도의 단 방향 피난이동 실험의 수행 결과는 Fig. 4에서 나타내고 있다. 이를 보면 평균 밀도 2.36 P/m²에서 0.55 m/s의 속도를 보이고 있다. SFPE Handbook에서 제시된 복도에서의 밀도기반 속도 수식의 계산결과와 비교해보면 평균값은 실험이 0.55 m/s, SFPE 수식이 0.53 m/s의 결과를 보여 0.02 m/s의 근소한 차이를 가진다. 그러나 데이터별 차이를 보면 최대 0.38 m/s의 큰 차이를 나타내고 있다. 밀도가 낮은 상황에서도 낮은 이동속도를 보인 것은 실험에 대한 분석이 밀도 형성 시간 전체에 대한 평균적인 데이터이기 때문에 좀 더 국소적인 분석 처리가 진행된다면, 다른 결과를 보여줄 가능성도 있다.

4.2 영상 분석

진행된 실험에 대하여 영상분석을 수행해보았다. 이 분석은 실험 시 촬영된 영상을 가지고 수행되었다. 먼저 카메라가 영상을 획득한 지역으로 3군데를 선택했으며, 각 지역은 상부의 카메라를 중심에서 수직으로 도달한 벽의 위치에서 2 m씩 떨어진 곳에 표식(Mark)을 하여 4 m의 길이와 2 m의 폭으로 구성된 8 m² 면적의 분석 지역을 설정하였으며 실제 촬영된 영상은 Fig. 4와 같다.

기록된 영상에서 최소한의 밀도가 형성되지 않은 부분과 밀도 형성이 해제되는 구간을 제외하고, 밀도가 형성된 구간을 설정하여 1초 단위로 영상을 분석하였다. Fig. 5와 같이 지역을 설정하고 해당시간에 지역 안에 있는 인원의 수를 직접 확인하여 밀도를 산출하였다. 또한 밀도 형성 시작, 중간, 그리고 해제 시점까지 도달한 인원을 대체로 3명씩

추출하여 통과시간을 측정한 후 이들의 평균값을 기반으로 속도를 산출하였다.

Fig. 5. Video Analysis of Experiment

영상분석의 결과로 총 108개의 밀도기반 속도 샘플을 추출하였다. Table 2는 이 샘플에서 실험 측정 밀도와 실험 측정 속도, 그리고 실험 측정 밀도에 대한 속도를 SFPE에 수록된 수식에 대입하여 계산된 결과를 수록한 것이다. 최대 밀도는 2.46 P/m^2 , 최소 밀도는 0.75 P/m^2 를 나타내었다. 속도는 최대가 3.64 m/s , 최소는 1.03 m/s 였다. SFPE 수식의 계산결과는 최대 1.12 m/s , 최소 0.48 m/s 의 속도가 계산되었다. Table 2의 최대 최소 속도 값은 이 표 내의 밀도 값에 의해 계산된 결과가 아니라 전체 108개의 계산 결과에 대한 분석 값이다.

Table 2. Data from Video Analysis of the Experiment (108 Samples)

	Crowd Density $\rho(\text{P/m}^2)$	Experiment $V_e(\text{m/s})$	SFPE Eq. $V_s(\text{m/s})$	ΔV_{e-s}
MAX	2.46	3.64	1.12	2.68
MIN	0.75	1.03	0.48	0.13
AVE	1.29	1.95	0.92	1.03
ST DEV	0.37	0.76	0.14	0.70

전체 추출된 샘플을 그래프로 분석해보면, Fig. 6에서 보는 바와 같이 밀도 1.2 P/m^2 를 기준으로 그 이상에서는 약 2.2 m/s 이상의 속도가 기록되지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 Kimura의 연구에서 제시한바와 같이 자연스러운 추월이 어려운 밀도에 도달하여 군집보행이 형성되기 때문인 것으로 보인다. 밀도 1.2 P/m^2 이상의 데이터 샘플은 총 57개로서 별도의 분석을 수행하였다.

Table 3은 이 샘플에서 실험 측정 밀도와 실험 측정 속도, 그리고 실험 측정 밀도에 대한 속도를 SFPE에 수록된 수식에 대입하여 계산된 결과를 수록한 것이다. 최대 밀도는 2.46 P/m^2 , 최소 밀도는 1.58 P/m^2 를 나타내었다. 속도는 최대가 2.22 m/s , 최소는 1.25 m/s 였다. SFPE 수식의 계산결과는 최대 0.92 m/s , 최소 0.48 m/s 의 속도가 계산되었다.

Fig. 6. Data from Video Analysis

Table 3. Data above 1.2 P/m^2 from Video Analysis of the Experiment (57 Samples)

	Crowd Density $\rho(\text{P/m}^2)$	Experiment $V_e(\text{m/s})$	SFPE Eq. $V_s(\text{m/s})$	ΔV_{e-s}
MAX	2.46	2.22	0.92	1.38
MIN	1.58	1.25	0.48	0.55
AVE	1.74	1.40	0.75	0.65
ST.DEV	0.29	0.08	0.11	0.06

밀도 1.2 P/m^2 이상의 데이터 샘플 57개를 Fig. 7과 같은 그래프로 나타내보았다. 이 데이터에 대하여 회귀분석을 통해 선형 추세선을 도출하면 밀도에 따라 감소하는 그래프를 얻을 수 있다.

이 그래프를 기준으로 SFPE 수식의 적용결과와 비교해 보면 약 $0.7\sim 0.8 \text{ m/s}$ 정도의 차이가 나타나는 것으로 보인다. 동일 밀도에 대한 속도의 실험값과 SFPE 수식에 의한 계산 값의 차이를 보면 최대 1.38 m/s , 최소 0.55 m/s , 평균 0.65 m/s 인 것으로 나타났다.

Fig. 7. Comparison of the Data from Video Analysis with SFPE Calculation

실험에 대한 영상분석의 결과를 보면 1.2 P/m^2 이상에서 보행속도가 2.22 m/s 이하로 나타나고 있다. 이는 전체 인원의 보행속도 측정에서의 평균값인 2.1 m/s 이하여서, 밀도가 1.2 P/m^2 이상이 되면 보행속도에 제한을 받아 군집보행이 되는 것으로 판단해볼 수 있다. 1.2 P/m^2 이상의 밀도에서 대한 속도 데이터를 기준으로 SFPE 수식과의 비교를 해보면 $0.55 \sim 1.38 \text{ m/s}$ 의 차이가 발생하는 것으로 나타나고 있다.

5. 결 론

2 m 폭의 복도에서의 밀도와 이동속도 간의 관계를 분석하고자 실험을 실시하였다. 유동 시 참여인원은 100명이였다. 실험 결과에 대하여 영상분석을 수행하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

- (1) 108개의 밀도와 속도에 대한 데이터를 분석한 결과를 보면 밀도 1.2 P/m^2 이상에서 속도가 2.3 m/s 이하로 제한되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 1.2 P/m^2 이상의 57개 데이터에 대한 분석에서, 측정된 밀도에 대하여 SFPE의 수식으로 계산한 속도와 실험에서 측정된 속도를 비교한 결과, $0.55 \sim 1.38 \text{ m/s}$ 의 차이가 발생하였으며, 실험측정값이 더 높은 결과가 산출되었다. 그러므로 피난 시 밀도에 대한 속도는 수식의 예측 속도보다는 실제 이동속도가 더 빠른 것으로 나타났다.
- (3) 유동률-평균이동속도 기반 분석의 결과인 평균 밀도 2.36 P/m^2 에서 0.55 m/s 를 보면 영상분석의 결과와 큰 차이를 보이고 있어, 유동률-평균이동속도 기반 분석 방법의 적용에 대한 추가 연구가 필요함을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원 (16AUDP-B100356-02)에 의해 수행되었습니다.

References

Ando, K., Ota, H., and Oki, T. (1988) Forecasting the Flow of People. *Railway Research Review*, Vol. 45, No. 8, pp. 8-14.

Fruin, J.J. (1971) *Pedestrian Planning Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York.

Gwynne, S., and Rosenbaum, E. (2016) Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5th Ed.)*, Springer, New York, p. 2125.

Kim, W.H., Lee, K.H., and Kim, J.H. (2017) Measurement of the Movement Speed and Density of People on a Building Corridor. *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 36-41.

Kimura Koichiro (1937) Observation of Crowd Flow in Building. *Journal of Architectural Institute of Japan*, No. 5, pp. 307-316.

(木村 幸一郎 (1937) 建築物内に於ける群集流動状態の觀察, 建築學會論文集, 第5卷, pp. 307-316)

Lee, S.H., Hong, W.H., Choi, J.H., and Kim, I.H. (2014) Analysis on Crowd Movement Behavior in a One-way Corridor. *Architectural Institute of Korea*, Vol. 30, No. 12, pp. 255-262.

Mowrer, F.W. (2016) Enclosure Smoke Filling and Fire-Generated Environmental Conditions. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5th Ed.)*, Edited by Hurley M.J. et al., Springer, New York, p. 1066.

Polus, A., Schofer, J.L., and Ushpiz, A. (1983) Pedestrian Flow and Level of Service. *J. of Transportation Engineering*, Vol. 109, Issue 1, pp. 46-57.

Predtechenskii, V.M. and Milinskii, A.I. (1978) *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. Amerind Publishing, New Delhi.

Seo, D.G., Hwang, E.K., and Kwon, Y.J. (2010) An Investigation Study on the Walking Speed of Crowd for Egress Safety of PBD. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 26, No. 12, pp. 99-106.

Received	December 8, 2017
Revised	December 12, 2017
Accepted	December 18, 2017