

[Research Paper]

건물 복도에서의 밀도와 이동속도 측정

김운형[†] · 이규홍* · 김종훈**

경민대학교 소방안전관리과, *서울과학기술대학교 안전공학과, **(주)H2K솔루션

Measurement of the Movement Speed and Density of People on a Building Corridor

Woon Hyung Kim[†] · Gyu Hong Lee* · Jong Hoon Kim**

Department of Fire Safety Management, Kyungmin Univ.

*Department of Safety Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology.

**H2K Solutions Inc.

(Received December 23, 2016; Revised February 3, 2017; Accepted February 17, 2017)

요 약

단일 복도에서의 단방향 피난 이동 실험의 수행 결과, 평균 밀도 2.36 P/m²에서 0.55 m/s의 속도를 보이고 있다. S.F.P.E. Handbook에서 제시된 복도에서의 밀도기반 속도 수식 계산결과와 평균값을 비교할 때, 본 실험이 0.55 m/s, SFPE 수식이 0.53 m/s로서 0.02 m/s의 차이를 보였으며 데이터 별로 분석한 결과, 최대 0.38 m/s의 큰 차이를 나타내고 있다. 일부 실험결과는 보행속도의 증가에 따라 밀도가 높아짐을 보였으며 실험 결과분석은 전체 실험시간에 대한 평균 데이터를 사용하였다. 동영상에 대한 프레임단위 분석과 같은 세부적인 시간분석을 수행한다면 더욱 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있을 것으로 보인다.

ABSTRACT

In this study, the experimental measurements from a one-way moving experiment showed that the average movement speed was 0.55 m/s with an average crowd density of 2.36 P/m² in a corridor. The calculation result of the correlations between the crowd density and movement speed from the SFPE Handbook showed an average of 0.53 m/s. The difference between the calculation and experiment was 0.02 m/s. A comparison of each data set showed that the maximum difference was 0.38 m/s. Some experimental results showed that the crowd density increased with increasing movement speed and the average data from the entire experiment time was used for the analysis. When the short time interval for frame by frame analysis for video files was conducted, the experimental data was expected to be more reliable.

Keywords : Building Corridor, Density, Evacuation, Experiment, Movement Speed

1. 서 론

건축물의 화재안전은 허용피난안전시간(Available Safe Egress Time)과 요구피난안전시간(Required Safe Egress Time)의 비교를 통하여 판단할 수 있다.⁽¹⁾ 이러한 화재안전의 평가방법은 일반적인 화재위험평가(Fire hazard assessment)에서부터 성능위주 소방설계(Performance based fire safety design)까지 적용되고 있다. 각각의 시간에 대한 평가에서 허용피난안전시간의 계산은 화재실험, 화재역학계산, 그리고 화재모델링에 의하며, 요구피난안전시간은 피난실험, 피난수계산 분석, 그리고 컴퓨터 피난모델링에 의하게 된

다. 화재위험평가나 성능위주 소방설계의 결과에 대한 신뢰성은 각각의 시간 계산에 대한 신뢰성에 기반하고 있다. 이는 어느 한 부분의 계산 결과의 신뢰성이 낮을 경우 평가 또는 설계 전체의 신뢰성이 저하된다는 의미가 된다. 피난부분의 계산은 크게 피난수계산과 컴퓨터 피난모델링에 의하고 있다. 이들 결과의 신뢰성은 입력데이터와 계산수식 및 알고리즘 자체의 신뢰성으로 구성된다고 볼 수 있다. 컴퓨터 피난모델의 경우 일부 입력값은 국내 자료의 확보가 가능하나 아직도 많은 부분이 한국인의 자료를 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 이러한 피난수계산 분석 및 컴퓨터 피난

[†] Corresponding Author, E-Mail: nfpa101@daum.net, TEL: +82-42-828-7312, FAX: +82-42-828-7950
Copyright © 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

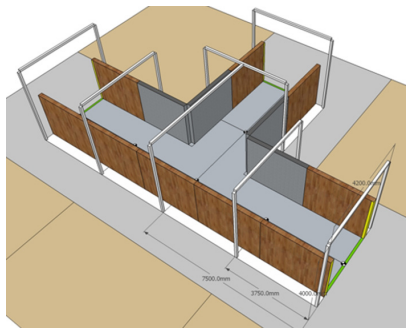


Figure 1. Corridor experiment setup.



Figure 2. Picture from recording video file.



Figure 3. Number on cap.



Figure 4. Number on body.

모델링에 사용하는 기본 입력 값의 확보를 위하여 복도에서의 피난실험을 통해 밀도의 변화와 유동률, 그리고 이동속도에 대한 분석을 수행하였다.

2. 기존 문헌에 대한 고찰

보행속도와 밀도와의 관계는 Fruin⁽²⁾에 의해 1971년도에 발표된 연구에서 보행자의 밀도에 따른 서비스 수준과 그에 따른 유동계수를 구분하여 제시하였다. 국내의 경우 국토교통부 고시 「도시철도 정거장 및 환승편의시설 설계지침」에서 서비스 수준에 대한 사항을 인용하고 있다. Predtechenskii와 Milinskii⁽³⁾는 보행자의 흐름에 대한 연구에서 밀도를 개인이 차지하는 공간으로 정의 하였으며, 최대 밀도를 제시하였으며, Ando⁽⁴⁾는 지하철 역 승강장에서 출퇴근하는 사람들의 군집상태를 관찰하여 분석한 결과 4인/m²에 도달하여도, 약 0.3 m/s의 느린 보행이 가능하다는 것을 확인하였다. Polus⁽⁵⁾는 그의 분석에서 밀도가 2인/m²이상 되면 군집유동에 혼잡이 발생하여 보행속도가 빠르게 감소한다는 결과를 도출하였다. SFPE Handbook에서는 군집인원의 밀도와 이동속도의 관계를 다음과 같은 수식으로 제안하고 있다.⁽⁶⁾

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

위 수식에서 복도의 경우 k는 1.4, a는 2.266을 적용하여 계산한다. 이는 밀도가 0.54~3.8인/m²에 적용할 수 있다.



Figure 5. Recorder.

국내에서도 군집보행에 대한 연구가 진행된 바 있다. 서동구⁽⁷⁾는 그의 연구에서 국내외 기존 문헌 분석과 실제 조사를 통하여 회귀식을 도출하여 제시하였으며, 이수호⁽⁸⁾는 단방향 이동식 복도 공간에서의 보행자 군집이동특성을 분석하여 제시한 결과 현장실험을 실시하고 그 결과를 기반으로 이론식 비교와 수정이론식을 제시하였다.

3. 복도 피난 실험 수행

3.1 실험 개요

본 실험에서는 일자형 복도에서의 이동을 측정해보았다. 실험 시에는 옥외 주차장에 세트를 만들었으며, 측정은 T자형 세트의 긴 일자형 부분에서 실시되었다. 분기복도 쪽

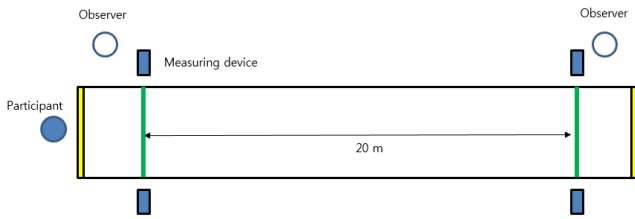


Figure 6. Walking speed measurement.

Table 1. Analysis of Personal Data and Walking Speed

Item	Data			
	Average	Max	Min	Standard Deviation
Age (Years)	21.8	55	19	3.7
Height (m)	170.2	193	150	8.3
Body width (cm)	27.3	53	16.5	4.1
Body depth (cm)	49.2	65.5	30.0	5.7
Walking Speed (m/s)	2.1	3.8	1.2	0.4
Gender	Male : 126 persons Female : 73 persons			

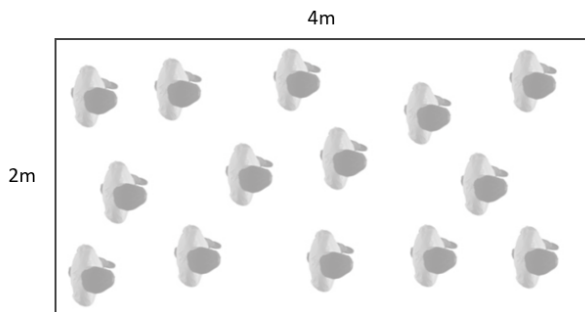


Figure 7. Measuring movement speed in corridor.

방향은 막아서 일자형 복도를 15 m 길이, 2 m 폭으로 구현하여 이 부분에 카메라를 5개 지역에 설치하고 이중 입구와 출구를 제외한 3개 지역에 대해 측정을 실시했다. 대부분 복도는 천정이 낮아 단일 카메라로 촬영이 거의 불가능하다. 본 실험은 3.5 m 높이에 카메라를 설치하였다. 설치한 카메라는 촬영각 120°이고 200만 화소로서 CCTV용으로 사용하는 Full HD 방식이었다. 이동 시 촬영면적을 표시하기 위하여 카메라를 중심으로 전후방 2 m 부분 벽에 표시를 하였다. 카메라는 설치 위치의 직 하부를 향하도록 설치되었다.

실험인원은 총 200명으로 2개의 그룹으로 나누어 각각 100명씩 통과하도록 실험이 진행되었다. 실험참가자는 모

자와 가슴에 번호표를 달아 이동하는 참가자를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

3.2 참가자 기본 자료 측정

각 참가자 200명에 대해 개인의 신체 데이터와 개인 이동속도 측정을 실시하였다. 이동속도는 참가자가 20 m 길이를 보통의 보행속도로 걸어가도록 하였으며, 측정장치를 통해 보행속도를 측정하였다. 개인 데이터는 연령, 성별, 키, 몸 두께, 몸 폭을 획득하였다.

측정 결과는 Table 1에서 보는바와 같이 평균 21.8세였으며 남성참가자는 126명, 여성참가자는 73명이었다. 보행속도의 측정에서 평균 2.1 m/s이고, 최대 3.8 m/s에서 최소 1.2

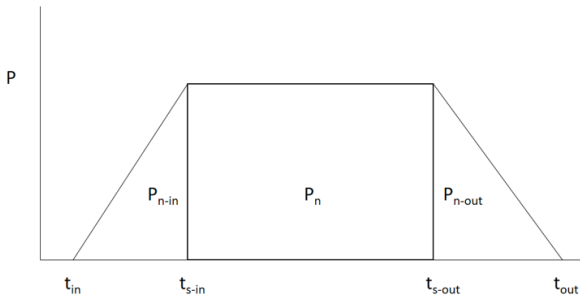


Figure 8. Relationship between time and numbers of person.

m/s로서 이는 자유상태의 보행속도를 의미한다.

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.

4. 실험결과 및 분석

4.1 밀도 및 속도 분석방법

군집이동에서의 이동속도와 밀도를 육안으로 실험현장에서 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 측정은 영상촬영결과와 그 분석에 의할 수밖에 없다. 영상에서의 인원수와 이동속도를 측정하여 데이터를 얻는 방법도 있지만, 본 연구에서는 설정된 지역으로의 유입되는 유동률과 평균 이동속도를 기반으로 밀도를 측정하였다.

먼저, 영상분석을 통하여 설정구역에 대한 다음의 데이터를 구한다.

t_{in} : 첫 번째 실험대상자가 설정구간내로 들어오는 시간 (s)

t_{s-in} : 최초로 설정구간 내 유입 경로의 폭에 인원이 가득 차는 시간 (s)

t_{s-out} : 설정구간 내 유입 경로의 폭에 인원이 감소하는 시간 (s)

t_{out} : 마지막 실험대상자가 설정구간을 빠져나가는 시간(s)

영상을 통해 획득된 데이터를 수식 (2)에 대입하여, 이동시 밀도가 형성되는 시간을 설정한다. 이는 초기와 말기의 인원 유입의 변화가 있는 부분에서 밀도의 변화를 일단 산정에서 배제하기 위해 초기와 말기의 시간은 제외하였다.

$$t_s = t_{s-out} - t_{s-in} \tag{2}$$

위 수식에서 t_s 는 군집이동시간, t_{s-out} 는 설정구간 내 유입 경로의 폭에 인원이 감소하는 시간(S), t_{s-in} 는 최초로 설정구간 내 유입 경로의 폭에 인원이 가득 차는 시간(S)를 의미한다.

단위시간당 설정구간 체류인원을 구하기 위해 우선 (3)번식을 이용하여 인원수를 파악한다.

$$P_n = P - (P_{n-in} + P_{n-out}) \tag{3}$$

P_{n-in} : 밀집이 형성되기 이전 통과한 인원 (N)

P_{n-out} : 밀집이 소멸된 이후 통과한 인원 (N)

(3)번 식의 결과값을 사용하여 유입 유동률을 구한다.

$$N_{in} = \frac{P_n}{W_d \cdot t_s} \tag{4}$$

N_{in} : 유입 유동률 (P/m·s)

W_d : 복도의 폭 (m)

대상 지역의 평균 밀도(density)는 다음에 의해 구한다.

$$D_{avr} = \frac{N_{in} \cdot W_r \cdot t_r}{A} \tag{5}$$

W_r : 복도 폭(m)

t_r : 최초로 설정구간 내 진입 경로폭을 가득채운 때의 유입된 실험자가 설정구역의 유출 지점에 도달하는 데 걸리는 시간 또는 설정구간 진입인원 감소 시점의 진입 실험자가 유출 지점에 도달하는 데 걸리는 시간(s)

A : 설정구역 면적(m²)

t_r 는 결과적으로는 설정구간 내 인원이 유입되어 유출되는 지점까지의 이동시간이 된다. 그러므로, 설정구간의 길이(d_r)을 t_r 로 나누면 평균이동속도 V_{avr} 를 계산할 수 있다.

$$V_{avr} = \frac{d_r}{t_r} \tag{6}$$

4.2 분석 결과

위 식을 활용하여 각 피난 요소별 측정결과는 다음과 같이 나왔다. 입구와 출구를 제외한 구역에 대해 밀도와 속도를 구하였다.

실험에서 측정된 유동률과 시간 데이터를 기반으로 밀도와 시간데이터를 계산하였다. 이들 데이터를 분석하면, 평균 밀도 2.36 P/m²에서 0.55 m/s의 속도를 보이고 있다. 이에 대한 그래프와 추세선은 Figure 10에 나타내었다.

실시한 실험의 데이터를 선행연구결과와 비교해보면 먼저, SFPE Handbook에서 제시한 복도에서의 밀도기반 속도 수식 (1)과 비교해보면 평균은 실험이 0.55 m/s, SFPE 수식이 0.53 m/s의 결과를 보이고 있어 0.02 m/s의 근소한 차이를 나타내고 있다. 그러나 각 데이터별로는 최대 0.38 m/s

Table 2. Result of Experiment 1 of Group A

	Section		
	A	B	C
t_s (s)	11	9	5
P_n (Persons)	86	84	82
N_{in} (P/m/s)	3.9	4.67	8.2
D_{avr} (P/m ²)	2.35	3.03	2.76
V_{avr} (m/s)	0.33	0.5	0.67

Table 3. Result of Experiment 2 of Group A

	Section		
	A	B	C
t_s (s)	13	13	12
P_n (Persons)	84	83	83
N_{in} (P/m/s)	3.23	3.19	3.46
D_{avr} (P/m ²)	1.78	1.99	2.5
V_{avr} (m/s)	0.36	0.52	0.69

Table 4. Result of Experiment 1 of Group B

	Section		
	A	B	C
t_s (s)	9	9	9
P_n (Persons)	86	80	75
N_{in} (P/m/s)	4.78	4.44	4.17
D_{avr} (P/m ²)	2.15	2.33	2.6
V_{avr} (m/s)	0.44	0.62	0.72

Table 5. Result of Experiment 2 of Group B

	Section		
	A	B	C
t_s (s)	10	10	9
P_n (Persons)	83	81	72
N_{in} (P/m/s)	4.15	4.05	4
D_{avr} (P/m ²)	2.07	2.22	2.5
V_{avr} (m/s)	0.4	0.59	0.72



Figure 9. Conducting experiment of group A in corridor.

의 차이를 나타내는 데이터도 있다. Figure 10을 보면 밀도가 높고 낮음에 대해 SFPE Handbook에 의해 계산된 데이터와는 차이가 형성됨을 알 수 있다. SFPE Handbook의 계산 결과는 특정밀도를 초과하면 속도가 감소하지만, 본 실험에서 일부 결과는 보행속도의 증가가 밀도를 높이는 결과를 가져온 것으로 보인다.

5. 결 론

성능기준 피난설계를 위한 입력데이터 확보를 위하여 밀도의 변화와 유동률, 그리고 이동속도에 대한 피난실험을 수행하였다. 2 m 폭의 단일 복도의 단방향 피난 이동실험의 수행 결과, 평균 밀도 2.36 P/m²에서 0.55 m/s의 속도를 보이고 있다. SFPE Handbook에서 제시된 복도에서의

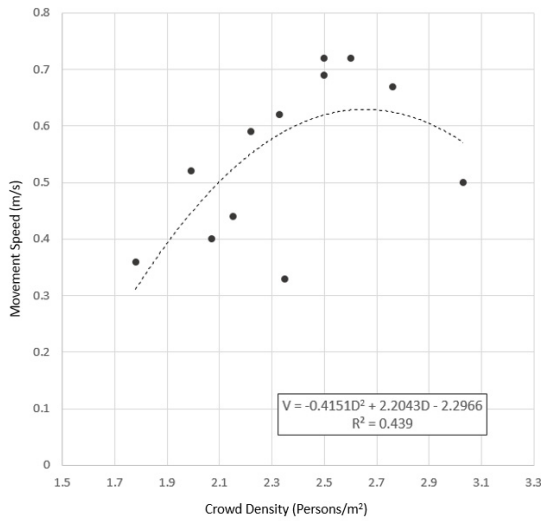


Figure 10. Relationship between movement speed and density.

밀도기반 속도 수식의 계산결과와 비교해보면 평균은 실험이 0.55 m/s, SFPE 수식이 0.53 m/s의 결과를 보이고 있어 0.02 m/s의 근소한 차이를 나타내고 있지만, 데이터 별로 차이를 보면 최대 0.38 m/s의 큰 차이를 나타내고 있다. 일부 실험결과는 보행속도의 증가에 따라 밀도가 높아짐을 보였으며 실험 결과분석은 전체 실험시간에 대한 평균 데이터를 사용하였다. 동영상에 대한 프레임단위 분석과 같은 세부적인 시간분석을 수행한다면 더욱 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있을 것으로 보인다.

후 기

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

References

1. Frederick W. Mowrer, "Enclosure Smoke Filling and Fire-Generated Environmental Conditions", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, p. 1066, 5th Edition (2016).
2. J. J. Fruin, "Pedestrian Planning Design", Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental

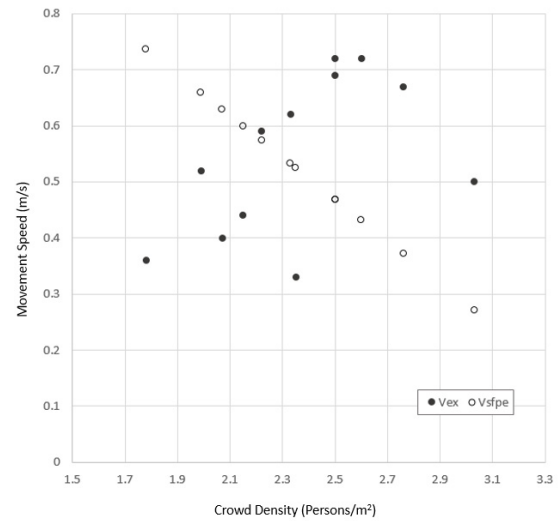


Figure 11. Comparison between experiment and SFPE correlation.

Planners, Inc., New York (1971).

3. V. M. Predtechenskii and A. I. Milinskii, "Planing for Foot Traffic Flow in Buildings", Amerind Publishing, New Dehli (1978).
4. K. Ando, H. Ota and T. Oki, "Forecasting the flow of people", Railway Research Review, pp. 8-14 (1988).
5. A. Polus, J. L. Schofer and A. Ushpiz, "Pedestrian flow and level of service", J. of Transportation Engineering. Proc. ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 46-57 (1983).
6. Steven M. V. Gwynne and Eric R. Rosenbaum, "Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th Editin, SFPE, p. 2125 (2016).
7. D. G. Seo, E. K. Hwang, and Y. J. Kwan, "An Investigation Study on the Walking Speed of Crowd for Egress Safety of PBD", Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 12, pp. 99-106 (2010).
8. S. H. Lee, W. H. Hong, J. H. Choi and I. H. Kim, "Analysis on Crowd Movement Behavior in a One-way Corridor", Architectural Institute of Korea, Vol. 30, No. 12, pp. 255-262 (2014).