

이동정보 기록장치를 이용한 전철 계단 피난평가 연구

김영길 · 김응식*

현대 엔지니어링 · *호서대학교 안전소방학부
(2018. 10. 22. 접수 / 2018. 11. 28. 수정 / 2018. 12. 21. 채택)

Performance Evaluation of Evacuation in Subway Station Stairs using Movement Recording Apparatus

Young Gil Kim · Eung Sik Kim**

Hyundai Engineering CO. LTD.

*Division of Safety and Fire Protection, Hoseo University

(Received October 22, 2018 / Revised November 28, 2018 / Accepted December 21, 2018)

Abstract : Recent catastrophic accidents at the underground subway stations in South Korea have proven that the subway evacuation is an important safety concern. Previous studies have used commercial programs for safety assessment or have been focused on development of computing algorithms rather than the basic analysis data which form the foundation of studies. In this study, we designed a new movement recording apparatus which measured and analyzed crowd movements including but not limited to moving velocity, specific flow rate and crowd density. Moreover, We propose new effective analysis method for evacuation studies with this apparatus.

Key Words : evacuation, stairway, specific flow rate, substation

1. 연구배경

우리나라 지하 공간 중 지하철은 유동인구가 가장 많은 시설로서 서울에 1974년 1호선의 개통 이후 40년 만인 2015년 기준으로 11억3천3백만 명이 사용하는 것으로 보고되고 있다. 이는 1974년 280만 명을 기준으로 볼 때 40배의 증가율을 보여준다. 이용인구의 증가와 함께 각종 사고 역시 간헐적으로 발생하고 있다. 그 예로 2003년 2월 대구 지하철 중앙로역 화재사고로 192명의 사망과 148명의 부상을 입었으며, 2014년 5월 서울지하철 3호선 방화사고 때는 370명의 승객이 있었으나 신속한 초기대응으로 승객들은 모두 대피하는 사례도 발생하였다.

지하철과 같은 군집이 몰려 있는 곳에서의 화재는 피난 통로의 역할이 매우 중요하며 이때 계단은 승강장에서 위층이나 지상으로 탈출할 수 있는 유일한 피난 통로이다. 기존의 대피 연구들은 대부분 상용 프로그램 사용하여 안전성 평가를 하거나¹⁻⁶⁾ 대피 알고리즘의 개발에 중점을 두고 있다. 하지만 대피 현상의 실

측에 기반을 둔 평가 연구⁷⁻⁸⁾는 많지 않으며, 병목에서의 효과적인 분석방법의 개발 연구는 드물다⁸⁻⁹⁾. 본 논문에서는 계단 대피 현상의 효과적인 분석을 위하여 이동정보 기록장치를 개발하여 사용하였으며 이로 인하여 새로운 분석방법이 제시되었다. 이전의 비디오 판독에 의존하던 방법이 쉽고 정확하게 이루어질 수 있게 되었다. 이를 사용하여 군중 및 개인의 보행 속도, 유출 계수, 계단에서의 밀도 및 밀도에 따른 보행 속도 등을 구할 수 있다. 본 논문에서는 지하철 역사에서의 여러 상향 계단에서 병목 현상을 분석하였다. 조사대상 역사는 총 7개소로 서울역, 용산역, 시청역, 안국역, 종로3가, 병점역, 천안역 등이다. 그 중 서울역, 병점역, 천안역에는 일반적인 전철역보다 긴 계단이 존재하며 나머지는 일반적인 전철역의 계단으로 이루어져 있다.

2. 안전성 평가와 총 피난 시간

피난 시간에 영향을 미치는 요인은 개인적, 환경적,

* Corresponding Author : Eung Sik Kim, Tel : +82-41-540-5722, E-mail : eskim@hoseo.edu

Division of Safety and Fire Protection Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro, 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungnam 31499, Korea

심리적 요인이 있으나 일반적으로 피난평가 시에는 동일한 조건의 개인으로 취급한다¹⁰⁾. 총 피난 시간은 피난 경로의 병목 구간에서의 피난 시간에 가장 큰 영향을 받게 되고 병목 구간에서의 피난 시간은 유출계수 (specific flow rate)를 산출하여 구할 수 있다¹⁰⁾. 안전성 평가는 일반적으로 연기의 하강 속도를 고려하여 대피가 어렵기 전까지의 시간을 총 피난 시간과 비교하여 결정한다. 유출계수의 정의는 식(1)과 같이 병목을 통과 하는 단위 길이 당, 단위 시간 당의 대피 인원수를 나타낸다. 조사대상 계단의 폭과 총 피난 인원이 주어지게 되면, 총 피난 시간을 구할 수 있는 유용한 상수이다. 미국의 경우 고층건물에서의 하향 수직이동에 비선형 유출계수 식을 사용하고 있으며¹⁰⁾, 일본의 경우 수평이동과 수직이동의 경우 각각 1.5, 1.3 persons/m·sec의 상수로 사용하고 있으나, 지하공간에서의 상향 수직이동에 관한 유출계수가 실측된 보고는 거의 없다¹¹⁾.

$$\text{유출계수[persons/m} \cdot \text{sec]} = \frac{\text{총대피인원}}{(\text{계단총대피시간} \times \text{유효계단폭})} \quad (1)$$

본 연구에서는 지하철 역사에서의 병목 구간인 계단에서의 인원 에 따른 유출을 측정 분석하여 유출계수, 밀도 대비 속력 등 여러 가지 변수를 도출하였다.

3. 측정 장치

본 연구에 동원된 측정 장치는 Fig. 1과 같은 측정장치를 개발하였다. 이 장치는 휴대용으로 PC에 USB 케이블을 연결하면 통신 포트에 날짜, 시간을 설정할 수 있다. 측정된 데이터는 장비 내부 메모리 카드에 저장되어 PC에서 불러올 수 있게 설계되었다. 사용방법은 인원이 입구 계단에 오르는 순간 스위치를 누르면 그

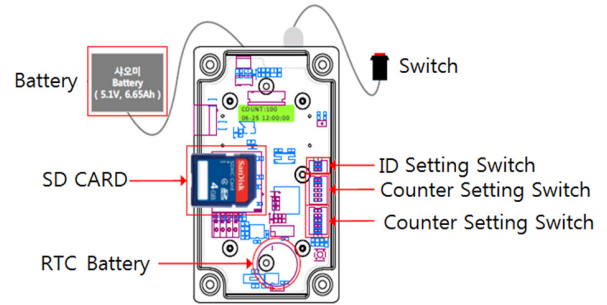


Fig. 1. Schematic of movement recording apparatus.

인원의 들어온 순서와 들어온 시간이 기록되고 같은 원리로 장치가 계단 출구에서도 사용된다. 기록 형식은 Fig. 2와 같이 임의의 장소를 지나간 모든 인원의 순서와 지나간 시간이 파일에 저장되며, 기록 방법은 인원이 지나갈 때 스위치를 누르면 자동적으로 순서와 시간을 기록하게 설계하였다. 결과적으로 시간적으로 동기화된 두 개의 장치를 특정공간의 입구와 출구에서 사용하면, 각 인원의 입력시간과 출력시간을 알 수 있게 된다. 이런 과정을 거치면 스위치를 통하여 모든 인원의 이동정보가 기록되며 각 인원의 데이터 처리가 가능해진다. 한 계단은 입구와 출구에서 2인 1조로 측정한다.

4. 조사대상 계단 및 계단 치수

Table 1은 조사대상 계단이 존재하는 7개의 역사의 이름과 그들의 각종 치수이다. 분석은 주로 계단 폭에 따라 1~2 m, 2~3 m, 3 m 이상의 세 그룹과 이동 거리에 따라 10~20 m, 20~30 m의 두 그룹으로 나누어 분석하였다. Table 2는 각 역에서의 측정 일시, 측정 회수, 총 측정 인원 등을 나타낸 표이다. 측정은 출퇴근 인원을 대상으로 실시하였고 그 이유는 이 시간대에는 피

Table 1. Stairwell description of subway station

	Numbers of sstps	Depth (cm)	Rise (cm)	Stair landing (cm)	Stair width (cm)	Distance (m)	Area of stair (m ²)	Angle (°)	Depth of handrail (cm)	Effective stair width (cm)
Cheonan	54	34.83	15.13	154	351	24.08	113.19	23.47	24	327
Seoul 5, 6	52	33.43	14.67	150.6	374	23.5	65	23.7	12	362
Seoul7, 8	53	33.27	14.6	150.43	371	23.8	65.39	23.68	12	359
Anguk	30	35	16.17	221.5	275	13.43	28.83	24.81	18	257
Jongno-3ga	27	33.57	17.57	155	265	11.44	23.99	27.63	18	247
Seoul 13, 14	54	33.47	15.3	150.4	221	24.4	40.08	24.56	12	209
Yongsan	52	30.45	15.3	150.5	200	23.1	33.81	24.5	12	188
Byeong-jeom1	54	33.1	14.77	177.6	151	22.88	32.17	24.06	24	127
Byeong-jeom 2	54	33.1	14.77	177.6	164	22.88	32.17	24.06	24	140
City Hall	27	35.37	17	119.5	158	11.44	15.12	25.66	18	140

Table 2. Measurement conditions

Stations	Dates of measurement	Total number of measurements (Times)	Total number of persons (Persons)	Remarks
Cheonan	2017.3.14. AM 8~9	3	703	College student
Seoul 5,6,7,8,11,12,13,14	2017.3.17. AM 7~10	13	1,484	Commuter, escalator
Anguk	2017.5.19. AM 7~8 2017.5.26 AM 7~8	16	3,159	Commuter
Jongno-3ga	2017.5.19. AM 7~8	12	1,453	Commuter
Yongsan	2017.3.10. AM 8~9	7	652	Commuter, escalator
Byeong-jeom 1, 2	2017.4.21. AM 8~9	15	851	Commuter
City Hall	2017.5.26. AM 8~9	8	1,006	Commuter

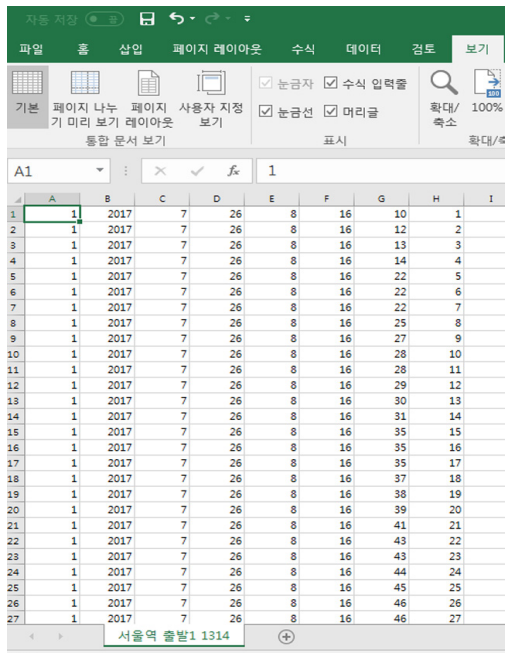


Fig. 2. Example of entrance data.

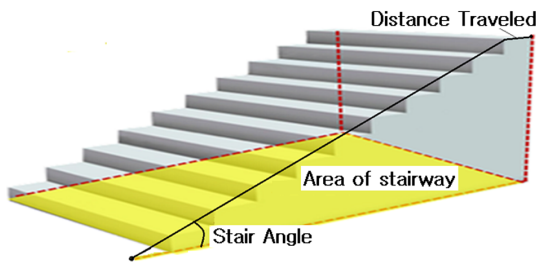


Fig. 3. Stair dimensions.

난 상황을 가정한 계단에서의 상향이동이 하향이동 인원의 간섭없이 측정이 가능하기 때문이다. Fig. 3와 식 (2) ~ (4)는 이동거리, 경사각, 면적을 계산할 때 사용하는 계단 치수를 나타낸다.

$$\text{이동거리[m]} = \text{계단빗변의 길이} \times \text{계단의 총 개수} + \text{계단참의 총 길이} \quad (2)$$

$$\text{경사각}[\theta] = \tan^{-1}(\text{높이/밑변}) \quad (3)$$

$$\text{면적[m}^2\text{]} = \text{계단 폭길이} \times \{(\text{계단너비} \times \text{참을 제외한 계단개수}) + \text{참너비}\} \quad (4)$$

5. 측정 데이터의 처리 방법

이동정보 기록장치 2대를 사용하여 각각 계단 입구 데이터와 계단 출구 데이터를 기록한다. 입구데이터는 x번째 계단에 들어온 인원의 시간 t가 기록된다. 출구는 같은 형식으로 x번째 계단을 나간 인원의 시간 T가 기록된다. Fig. 2은 입구에서 작성된 데이터의 샘플로 H열은 들어온 인원의 순서이다. 계단을 통과한 사람이 총 250명이면 250번째까지 모든 사람의 들어가고 나간 시간이 기록된다. T-t에서 이동시간이 산출되고 이동거리를 이동시간으로 나누면 x번째 인원의 속력이 산출된다. 이와 같이 계단을 통과한 모든 이의 입출력 시간에서 각 개인의 보행속력과 전체 평균 보행속력으로 구할 수 있다. 총 피난시간은 마지막 사람이 계단을 통과한 시각에서 첫 번째 사람이 계단을 통과한 시각을 빼면 구해진다. 평균 유출계수는 총인원을 총 피난시간과 계단 유효 폭의 값으로 나누어 구한다.

여기서 x번째 인원은 계단에 들어선 누적인원 x를 뜻하기도 한다. 각 시간마다 들어온 누적 인원에서 나간 누적 인원을 빼면 각 시간에 계단에 머무르는 인원이 계산된다. 이를 계단의 면적으로 나누어 계단위의 피난자의 밀도를 구한다. Fig. 4는 시간에 따른 계단 체류 인원이다.

위에 언급한 인원을 중심으로 정리된 데이터를 시간 t에 따른 누적인원 x의 형태로 변환하면 순간 밀도, 순간 속력, 순간 유출계수 등을 구할 수 있게 된다. 기존의 연구에서 순간의 데이터는 추출할 수가 없었다. Fig. 5와 6은 한 곳의 계단 데이터에서 추출한 밀도에 따른 순간 속력 및 유출계수의 한 예이다. Fig. 5에서 밀도가 높아지면 속력이 감소하지만 Fig. 6에서와 같이 유출계

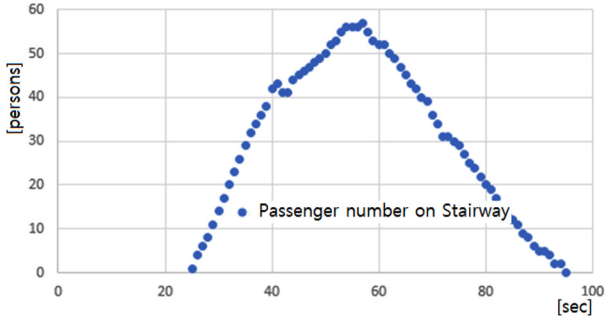


Fig. 4. Number of Passengers on the stairway according time.

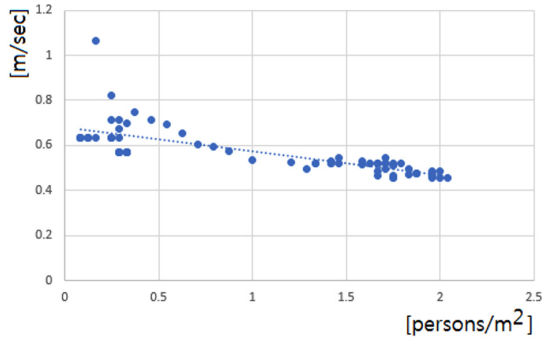


Fig. 5. Moving speed versus crowd density.

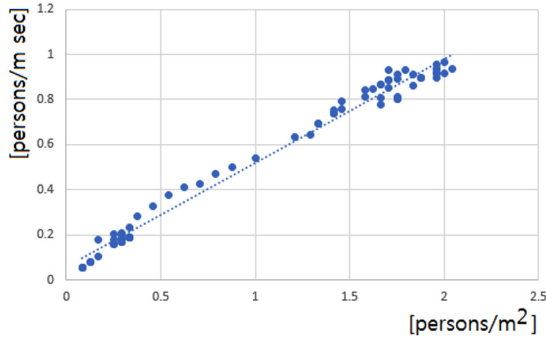


Fig. 6. Specific flow rate versus crowd density.

수는 증가함을 알 수 있다. 이런 결과는 대피시간에 중점을 두는 상용 대피 프로그램에서는 추출할 수 없는 것들로 상용 프로그램의 신뢰성 확보를 위해 상호 비교해 보아야 할 보완적 데이터라고 사료된다⁷⁾.

6. 결과

6.1 평균 보행속력

얻어진 데이터를 정리하여 Fig. 7과 같은 계단길이 20 m 이상에서의 총인원과 계단 폭에 따른 평균보행속력 그래프를 얻었다. 그림에서 계단 폭 3 m인 이상인 곳은 서울역 5, 6, 7, 8번, 천안 5, 6번 계단이고, 계단 폭 2~3 m인 곳은 서울역 11, 12, 13, 14번, 용산역 4, 5

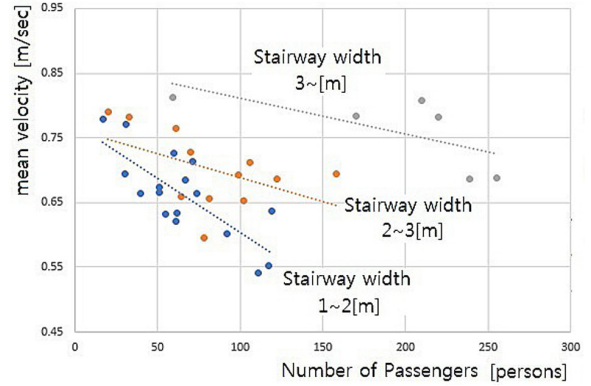


Fig. 7. Average moving speed of stairwell longer than 20 m.

번 계단이고, 계단 폭 1~2 m인 곳은 병점역 1, 2번 계단이다. 계단을 통과하는 총인원이 늘어날수록 평균보행속력이 느려지며, 계단의 폭이 좁을수록 병목현상이 증가하므로 군중의 평균보행속력도 느려짐을 확인할 수 있었다. 보행속도는 계단의 폭과 전체 통과 인원의 함수임을 알 수 있다.

6.2 유출계수

얻어진 데이터를 정리한 결과 Fig. 7과 같은 계단 길이 20 m 이상에서의 총인원과 계단 폭에 따른 유출계수 그래프를 얻을 수 있다. 측정 계단은 앞 절 6.1과 동일하다. 앞에 설명한 평균보행속도와는 달리 총인원이 증가할수록 유출계수가 증가함을 확인할 수 있었으며, 계단 폭도 1~2 m일 때 유출계수의 값이 가장 큰 것으로 나타났다. 결론적으로 총 대피 인원이 많을수록, 계단 폭이 좁을수록 유출계수는 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8을 사용하여 총 대피인원이 100명일 때 각각 계단 폭 1.99, 2.65 m의 계단에서의 총 피난 시간을 예측하면, 폭 1.99, 2.65 m에서의 각각 유출계수는 0.5, 0.4 persons/m · sec로 주어지고 이들 계단의 단위 시간당 유출 인원은 $1.99 \times 0.5 = 0.995$, $2.65 \times 0.4 = 1.06$ persons/sec로

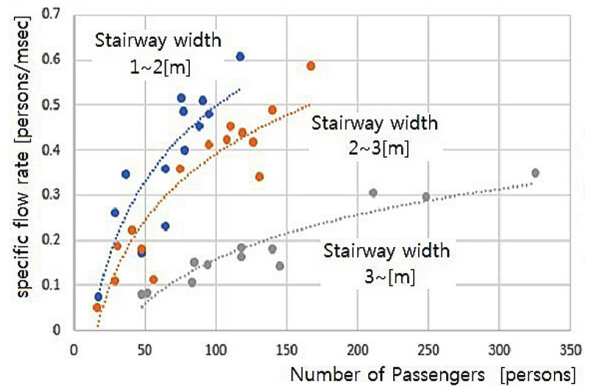


Fig. 8. Specific flow rate for stairwell longer than 20 m.

계산된다. 총 인원수를 이값으로 나누면 각각 100.5, 94.3 sec가 소요됨을 알 수 있다.

6.3 경사각에 따른 속도 비교

Fig. 9는 경사각에 따른 보행속력의 분포를 나타낸 것이다. 예상대로 경사가 23°일 때 평균보행 속력의 값이 가장 큰 것으로 나타났다. 주어진 결과값들의 변화 추이를 보면 얻어진 데이터들이 신뢰성 높은 데이터임을 확인할 수 있었다. Fig. 9의 23°의 경사를 갖는 계단은 서울역 5, 6, 7, 8번 계단, 24°의 경사를 갖는 계단은 서울역 11, 12, 13, 14번, 안국역, 병점역 계단, 25°의 경사를 갖는 계단은 시청역 계단, 26°의 경사를 갖는 계단은 용산역 4, 5번 계단, 27°의 경사를 갖는 계단은 종로 3가역 계단이다.

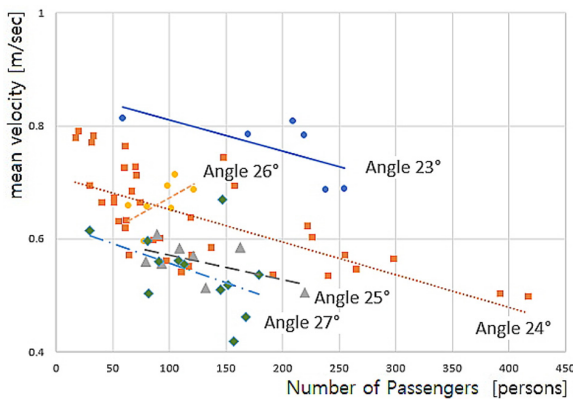


Fig. 9. Comparison of walking speeds according to stair angles.

7. 결론

측정 데이터를 토대로 각 계단에서의 군중의 유출계수, 보행속력, 경사각, 밀도 등을 분석·비교 하였으며 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 이동정보 측정 장치를 사용하여 계단에서의 군집 이동 특징을 편리하게 분석하였다.
- 2) 기존의 실험적 분석방법은 평균적인 속력과 유출계수만을 구할 수 있었으나 개발된 장치를 사용하여 평균 뿐 아니라 순시적인 밀도, 속도, 유출계수 등을 구할 수 있었다.
- 3) 구하여진 유출계수를 사용하여 계단의 형태 및 총 대피인원이 주어지면 총 피난 시간의 예측이 가능해지며 이를 통해 피난평가를 수행할 수 있다.
- 4) 얻어진 데이터는 상용 프로그램의 결과와 비교하여 프로그램의 신뢰성을 확보할 수 있는 상호 보완적 데이터로 사용될 수 있다.

5) 지하공간 설계 시 유동인원수에 따라 상향 계단의 설계가 가능해진다.

※본 논문은 호서대학교 안전공학과 대학원 김영길의 박사 논문 “이동정보 측정 장치를 이용한 통행 계단 피난평가 연구”에 기초하여 작성되었습니다.

References

- 1) Y. LI, X. Sun, X. Feng, C. Wang and J. LI, “Study on Evacuation in Subway Transfer Station Fire by STEPS”, *Procedia Engineering*, Vol. 45, pp. 735-740, 2012.
- 2) Peter Thompson, Eric Marchant, “Modelling Evacuation in Multi-Storey Buildings with Simulex”, *Fire Engineers Journal*, Vol. 56, Issue 185, pp. 6-11, 1996.
- 3) “Simulex User Manual”, Intergrated Environmental Solutions Ltd, 2001.
- 4) “Pathfinder User Manual”, Thunderhead Engineering, 2014.
- 5) J. S. Jang and D. H. Rie, “A Comparative Study for Dispersion Model in Evacuation Plan by using MAS-based Evacuation Simulation”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 29, No. 1, pp. 59-63, 2014.
- 6) M. J. Jeong, M. G. Lee and E. G. Ham, “Assessment of Fire Evacuation Safety for Building Construction”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 29, No. 6, pp. 119-124, 2014.
- 7) H. Chenga and X. Yanga, “Emergency Evacuation Capacity of Subway Stations”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 43, pp. 339-348, 2012.
- 8) M. H. Kim, E. S. Kim and J. H. Cho, “The Study of Crowd Movement in Stair and Turnstile of Subway Station”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 24, No. 3, pp. 88-95, 2009.
- 9) E. K. Hwang, S. J. Woo, J. H. Kim and W. H. Kim, “Comparison of Egress Modeling and Experiments for Flow Rate in the Bottleneck”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp.47-51, 2014.
- 10) P. J. DiNunno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. P. Custer, J. R. Hall and J. M. Watts, “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 3rd Edition, Chap. 3-12~3-13, pp. 3-346~3-352, 2002.
- 11) S. G. Lee, Y. G. Chung and H. M. Koh, “Fire Prevention and Protection for Building”, Translation of Original Book by Saburo Horiuchi, p. 107, 1998.