

복도에서 소방관에 의한 카운터플로우 발생 시 밀도와 속도 측정

The Counterflow Speed and Density of a Fire fighter in Corridor

김운형^{1*} · 김흥열² · 정우인³ · 김종훈⁴Woon-Hyung Kim^{1*}, Heung-Youl Kim², Woo-In Joung³, Jong-Hoon Kim⁴¹Professor, Department of Fire Safety Management Kyungmin University, Uijeongbu-si, Republic of Korea²Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseong-si, Republic of Korea³Director, H2K Solution Inc., Incheon, Republic of Korea⁴Director, H2K Solution Inc., Incheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Woon-Hyung Kim, nfpal01@hanmail.net

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to present data of density and speed through the experiment of the counterflow by firefighter in corridor. **Method:** Experimental setup including a corridor in building was prepared for measuring data with 1.5m and 2m width. Normal flow and counterflow were created for each. Data were measured using camera and acquired by video image analysis. **Results:** The counterflow in corridor resulted in increasing average density of about 0.55P/m² and decreasing average movement speed of about 0.61 m/s. These data measured during the time when the counterflow occurred. **Conclusion:** It was found that counterflow by firefighter in corridor momentary increasing the density and decreasing walking speed of evacuee. Further experiments of the counterflow effect in the total evacuation time are needed.

Keywords: People Density, Walking Speed, Counterflow, Firefighter, Corridor

요약

연구목적: 본 연구는 화재 시 소방관에 의한 카운터플로우 현상에 따른 밀도와 속도 실험 데이터를 제시함을 목적으로 한다. **연구방법:** 복도에서의 실험을 통하여 데이터를 측정하였다. 측정값을 위하여 복도 폭 1.5m 및 2m 각각에 대하여 일반적인 유동상황과 카운터플로우 발생상황을 구현하였다. 이동 시 데이터는 카메라를 통해 측정되었으며, 영상분석을 통해 데이터를 확보하였다. **연구결과:** 복도에서의 카운터플로우의 발생은 평균밀도를 약 0.55P/m² 정도 상승시키고, 정 방향 이동인들의 평균보행속도는 0.61m/s 정도가 감소됨을 확인하였다. 이 데이터는 카운터플로우가 발생하는 시점에서 측정되었다. **결론:** 카운터플로우 현상의 발생은 순간적으로 밀도를 상승시키고 평균보행속도의 감소를 초래함이 확인되었다. 전체피난에서의 카운터플로우 영향에 대한 추가실험이 필요하다.

핵심용어: 피난인 밀도, 보행복도, 카운터플로우, 소방관, 복도

Received | 14 December, 2018

Revised | 26 December, 2018

Accepted | 27 February, 2019

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

국내에서 50층 이상 또는 200m 이상의 층고를 포함하는 초고층 건축물은 2017년을 기준으로 전국에 107개소가 있으며 지속적으로 증가하고 있다. 30층 이상의 고층건축물도 2,833개에 이르며 아파트가 2,196개로서 대부분을 차지하고 있으며 53개의 업무용 건축물이 있다(National Fire Agency, 2018).

이렇게 고층건축물의 증가와 더불어 화재 시 재실자의 피난과 소방대의 대응에 문제가 발생하게 된다. 본 연구에서는 피난인의 이동에 대하여 역방향 동선을 가지는 소방대가 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 실험적 접근을 해보았다. 일반적으로 외부로 이동하는 피난인에 대하여 반대방향으로 이동하여 교차되는 상황을 카운터플로우(Counterflow) 또는 역류(逆流)라고 표현할 수 있다. 이는 여러 공학 분야에서 쓰이며 유체의 흐름에서 상반된 방향으로의 두 개의 흐름이 마주하게 되는 것을 의미한다. 다른 정의에서 카운터플로우는 일반적인 방향의 흐름에 반대되는 이동으로 표현된다(Kratchman, 2007). 구체적인 카운터플로우 현상에 대한 설명은 재실자가 건물 출구를 향해 이동할 때, 소방관이나 비상대응을 위한 요원들이 진입할 때 발생하는 것으로, 재실자와 소방관이 동시에 같은 피난경로를 사용할 때 발생한다고 기술되고 있다(Tubbs et al., 2007).

카운터플로우 현상은 보행자 이동역학(Pedestrian dynamics)분야에서 먼저 다루어졌으며, 관련 연구들이 진행되었다. 보행자 이동역학에서의 카운터플로우는 집단 대 집단의 흐름이 서로 교차하면서 생성되는 것을 주로 다루게 된다. 선행연구에서 그룹을 2개로 나누고 교차흐름을 형성하여 카운터플로우에 대한 실험을 수행한바 있으며(Kretz et al., 2006) 지하상가에 서의 다양한 카운터플로우 상황에 대한 실험연구도 진행된바 있다(Liu et al., 2014).

피난분야에서는 세계무역센터테러(WTC 911)에서 나타난 현상들에 대한 조사연구에서 카운터플로우의 문제점이 부각되었다. 세계무역센터 붕괴에 대한 최종 화재안전보고서에서 하향 피난하던 피난인들은 계단을 올라오는 소방대원들로 인해 이동속도가 지연되었음을 진술하였다(Shyam-Sunder, 2005). 또한 뉴욕소방대(FDNY)도 계단을 통해 내려오는 피난인들로 인하여, 건물상부로 이동하는데 어려움을 겪었다고 진술하고 있다(Lawson et al., 2005). WTC의 연구결과에서 보듯이 화재 시 대규모 인원이 피난을 할 때 흐름을 역행하게 되는 소방대원은 피난속도 감소에 기여하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 화재 시의 소방관에 의한 카운터플로우 현상에 대하여 복도 상황에 대해 실험을 통하여 이동 현상을 고찰하고 데이터를 측정하였다.

실험 개요 및 세트 설치

실험은 경민대학교 교내에 가설 복도를 구현하고 카운터플로우 현상에 대한 데이터 측정실험을 수행하였다. 측정은 일자형 부분에서 진행하였으며 Fig. 1에서 나타난 위치에 카메라를 설치하고 Fig. 2와 같이 세트를 구축하였다. 복도의 경우, 입구와 출구를 제외한 3개 지역에 대해 측정을 실시하였으며, 구석부분은 하나의 위치에서 촬영을 수행하였다. 건물 실내의 대부분 복도는 천정이 낮아서 단일 카메라로 촬영이 거의 불가능하므로 본 실험은 세트에 바닥으로부터 3.5m 높이에 카메라를 설치하였다. 설치한 카메라는 촬영 각 120° 이고 200만 화소로서 CCTV용으로 사용하는 Full HD 방식이었다. 이동 시 촬영 면적을 표시하기 위하여 카메라를 중심으로 전후방 2.5 m부분 벽에 표시를 하고 카메라는 설치 위치의 직 하부를 향하도록 설치되었다. 실험참가 인원은 총 61명이며 개인별로 모자와 가슴에 번호표를 달아 이동하는 참가자를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

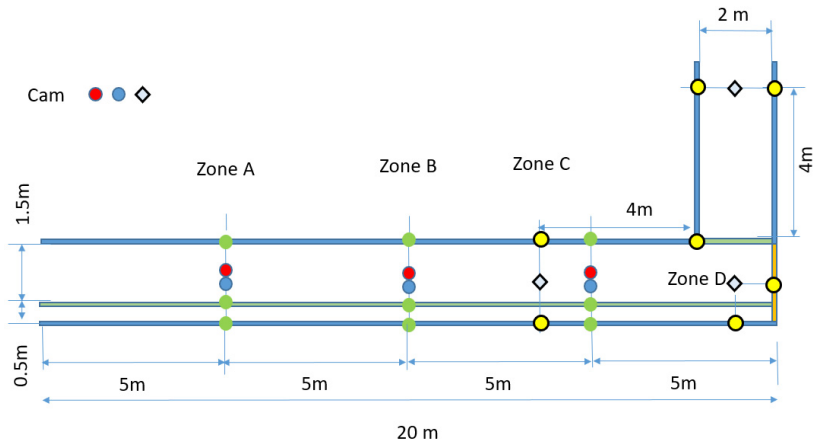


Fig. 1. Experimental setup



Fig. 2. Photo of experimental setup

참가인원 데이터 측정

실험의 참가인원은 소방관역할의 4인을 제외하고 총 61명이었다. 남성은 49명, 여성은 12명이었으며, 평균나이는 21.6세였다. 이들의 데이터는 다음 Table 1과 같다. 측정항목은 연령, 키, 몸무게, 몸통두께, 어깨 너비 등이며, 몸통두께와 어깨너비는 향후 피난모델링 입력데이터 확보를 위해 측정되었다.

Table 1. Personal data analysis of participants

	Age (Year)	Height (cm)	Weight (kg)	Body Depth (cm)	Body Width (cm)
Max. Value	25	185	90	37	59
Min. Value	19	155	42	20	42
Average Value	21.57	172	68.38	26.38	51.18

복도에서의 군집이동 시 이동속도와 밀도를 육안으로 실험현장에서 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 이러한 측정은 영상촬영결과와 그 분석에 의존하게 된다. 본 연구에서는 영상에서의 인원수와 이동속도를 측정하여 데이터를 얻는 방법을 선택하였다. 이에 대한 측정부분의 배치는 Fig. 3에서 나타내었으며, 영상측정은 Fig. 4에 나타내었다. 영상을 통한 속도 분석은 특정인을 선정하여 두 개의 라인을 통과하는데 소요되는 시간을 측정하였다.

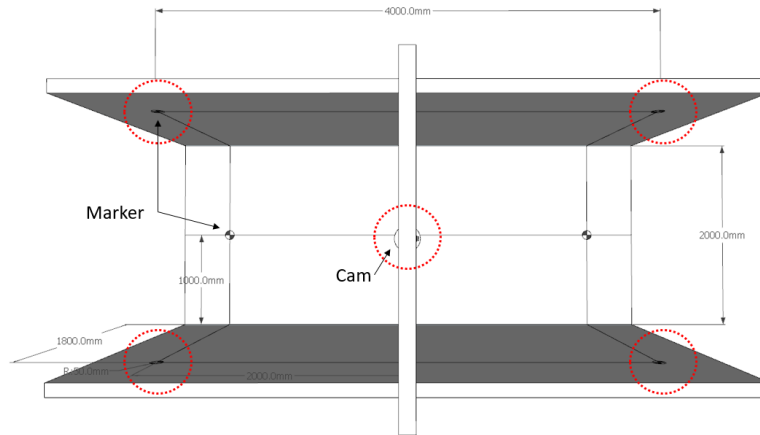


Fig. 3. Camera and marker location at the video record zone



Fig. 4. Density measurement through video scene

실험 수행 및 데이터 측정 결과

밀도측정결과

복도 이동 시 카운터플로우의 영향을 알아보기 위하여 복도의 폭은 1.5m, 2.0m를 2가지 경우로 구분하여 진행하였다. 또한, 각각에 대하여 카운터플로우가 적용되지 않는 경우와 소방관 이동에 의해 카운터플로우가 형성되는 경우를 설정하였다.

따라서 총 4가지 실험으로 각각에 4회씩 실험을 진행하여 데이터는 총 16가지 경우가 측정되었다. 먼저 Table 2의 데이터를 분석해보면 먼저 폭 1.5m - 일반보행의 경우, 평균 1.71P/m²의 밀도가 나타나며, 폭 1.5m - 카운터플로우의 경우, 평균 2.4P/m²의 밀도가 나타나고 있다. 또한 폭 2.0m - 일반보행의 경우, 평균 1.6P/m²의 밀도가 나타나며, 폭 2.0m - 카운터플로우의 경우, 평균 1.82P/m²의 밀도가 나타나고 있다.

측정결과에 따르면 복도의 폭이 넓어지면 일반보행의 경우 밀도가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 폭 1.5m, 평균 1.71P/m²에서 폭 2.0m, 평균 1.6P/m²으로 0.21P/m²정도 낮아졌다. 한편, 복도의 폭이 넓어지면서 카운터플로우의 경우 폭 1.5m, 평균 2.4P/m²의 밀도에서 폭 2.0m, 평균 1.82P/m²의 밀도가 나타나 같은 조건에서 밀도도 낮아진 것을 알 수 있었다. 이는 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Density measurement for each case

No.	Case	Width of Corridor (m)	Number of People (P)	Including Firefighter (P)	Density (P/m ²)
1	A-A-1.5-N-1	1.5	8	-	1.33
2	A-A-1.5-N-2	1.5	10	-	1.67
3	A-A-1.5-N-3	1.5	9	-	1.50
4	A-A-1.5-N-4	1.5	14	-	2.33
5	B-A-1.5-F-1	1.5	15	19	3.17
6	B-A-1.5-F-2	1.5	7	11	1.83
7	B-A-1.5-F-3	1.5	9	13	2.17
8	B-A-1.5-F-4	1.5	11	15	2.50
9	C-A-2.0-N-1	2.0	13	-	1.63
10	C-A-2.0-N-2	2.0	13	-	1.63
11	C-A-2.0-N-3	2.0	11	-	1.38
12	C-A-2.0-N-4	2.0	14	-	1.75
13	D-A-2.0-F-1	2.0	10	14	1.75
14	D-A-2.0-F-2	2.0	9	13	1.63
15	D-A-2.0-F-3	2.0	12	16	2.00
16	D-A-2.0-F-4	2.0	11	15	1.88

Table 3. Analysis of average densities

No.	Case	평균밀도 (P/m ²)
1	1.5m 일반보행	1.37
2	1.5m 카운터플로우	1.93
3	2.0m 일반보행	1.27
4	2.0m 카운터플로우	1.93

속도측정결과

복도 이동 시 카운터플로우가 이동속도 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 측정과 분석을 실시하였고, 밀도측정 결과가 진행된 시점에서 속도를 측정하였다. 즉 밀도가 측정된 시점에서 그 지역을 통과하는 사람의 보행속도를 측정한 것이다. 대체로 측정자와 주변인의 속도차이가 거의 미미하여 1인만을 측정하였다.

밀도측정과 동일한 실험이므로, 복도의 폭은 1.5m, 2.0m를 2가지 경우를 실험하였고, 각각에 대해 카운터플로우가 적용되지 않는 경우와 소방관 이동에 의해 카운터플로우가 형성되는 경우를 설정하였다. 총 4가지 실험으로 각각에 4회씩 실험을 진행하여 데이터는 총 16가지 경우가 측정되었다.

Table 4의 데이터를 분석해보면 먼저 폭 1.5m - 일반속도의 경우, 평균 1.67 m/s의 속도가 나타나며, 폭 1.5m - 카운터플로우의 경우, 평균 0.7 m/s의 속도가 나타나고 있다. 또한 폭 2.0m - 일반보행의 경우, 평균 1.25 m/s의 속도가 나타나며, 폭 2.0m - 카운터플로우의 경우, 평균 1.0 m/s의 속도가 나타나고 있다.

이를 보면 카운터플로우 발생 시 순간적으로 이동속도가 저하되는 것을 알 수 있다. 특히 좁은 1.5m에서 발생한 경우 더 많이 속도가 저하됨을 알 수 있다. 이는 Table 5에서 나타내었다.

Table 4. Movement speed measurement for each case

No.	Case	Width of Corridor (m)	Counterflow	Speed (m/s)
1	A-A-1.5-N-1	1.5	N	1.33
2	A-A-1.5-N-2	1.5	N	2.00
3	A-A-1.5-N-3	1.5	N	2.00
4	A-A-1.5-N-4	1.5	N	1.33
5	B-A-1.5-F-1	1.5	Y	0.67
6	B-A-1.5-F-2	1.5	Y	1.00
7	B-A-1.5-F-3	1.5	Y	0.57
8	B-A-1.5-F-4	1.5	Y	0.57
9	C-A-2.0-N-1	2.0	N	1.33
10	C-A-2.0-N-2	2.0	N	1.33
11	C-A-2.0-N-3	2.0	N	1.00
12	C-A-2.0-N-4	2.0	N	1.33
13	D-A-2.0-F-1	2.0	Y	1.00
14	D-A-2.0-F-2	2.0	Y	1.33
15	D-A-2.0-F-3	2.0	Y	0.67
16	D-A-2.0-F-4	2.0	Y	1.00

Table 5. Analysis of average movement speed

No.	Case	평균속도 (m/s)
1	1.5m 일반보행	1.67
2	1.5m 카운터플로우	0.70
3	2.0m 일반보행	1.25
4	2.0m 카운터플로우	1.00

밀도-속도 측정결과 분석

밀도와 속도에 대한 측정결과를 토대로 분석해보면 Table 6에서 보는 바와 같이 카운터플로우 발생 시 밀도가 증가하면서 속도는 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5를 통해서도 알 수 있다. 또한, 카운터플로우 발생 시의 밀도와 속도의 관계를 분석해보면 Fig. 6에서와 같은 그래프와 회귀분석식을 얻을 수 있다.

Table 6. Comparison between average movement speed and average density

No.	Case	평균밀도 (P/m ²)	평균속도 (m/s)
1	1.5m 일반보행	1.37	1.67
2	1.5m 카운터플로우	1.93	0.70
3	2.0m 일반보행	1.27	1.25
4	2.0m 카운터플로우	1.81	1.00

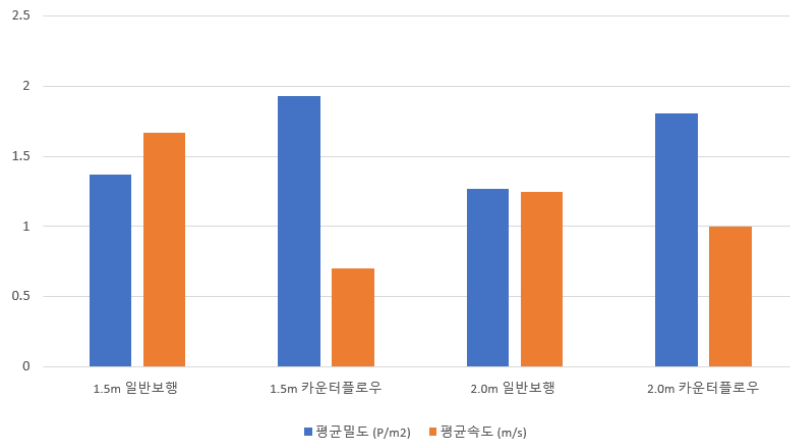


Fig. 5. Comparison between average movement speed and average density

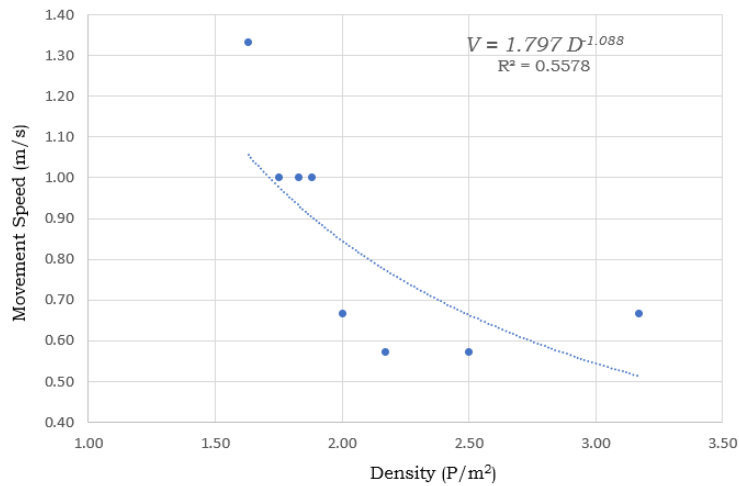


Fig. 6. Relationship between average density and movement speed

결론

본 연구에서는 화재 시의 소방관에 의한 카운터플로우 현상에 대하여 복도 상황에 대해 실험을 통하여 현상을 고찰하고 데이터를 측정해보았다. 실험측정을 위하여 복도 폭을 1.5m와 2m로 구현하고 각각에 대하여 일반적인 유동상황과 카운터플로우 발생상황을 가정하였으며 주요 실험결과는 다음과 같다.

1. 일반 보행의 경우 복도 폭이 2.0m에서 1.5m로 감소함에 따라 평균밀도의 상승이 약 $0.12P/m^2$ 정도 발생하였고 속도는 약 $0.42m/s$ 정도의 증가를 보여주었다.
2. 카운터플로우 발생 시 보행의 경우 복도 폭이 2.0m에서 1.5m로 감소함에 따라 평균밀도의 상승이 약 $0.12P/m^2$ 정도 발생하였고 보행속도는 약 $0.3m/s$ 정도의 감소를 보여주었다.
3. 복도에서의 카운터플로우 발생은 결과적으로 평균밀도를 약 $0.55P/m^2$ 정도 상승시키고, 정방향 이동인들의 평균보행 속도는 $0.61m/s$ 정도 감소를 유발하였다. 이는 카운터플로우가 발생하는 시점, 즉 피난인과 소방관들이 교차되는 시간 동안 발생한다.

연구 결과, 소방관 진입에 따른 카운터플로우는 일시적으로 평균밀도가 증가하고, 피난인의 평균속도가 감소함을 알 수 있다. 향후 전체 피난시간에서의 영향에 대한 추가적인 연구와 실험이 필요하다.

Acknowledgement

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

References

- [1] Jessica K. (2007). An Investigation on the Effects of Firefighter Counterflow and Human Behavior in a Six-Story Building Evacuation. pp. 19-22.
- [2] Kim, W.-H., Yang, C.-G., Yang, G.-M., Joung, W.-I., Kim, J.-H. (2018). "A Video analysis of Movement Speed and Density of People in Building Corridor." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.18, No.3, pp. 167-171.
- [3] Kretz T., Grünebohm A., Kaufman M., Mazur F., Schreckenberg M. (2006). Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor., *Journal of Statistical Mechanics*, pp. 10014.
- [4] Lawson, J. R., Vettori, R.L.(2005). "Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster – The Emergency Response Operations." National Institute of Standards and Technology, NIST National Construction Safety Team Act Reports, Vol. 1, pp. 81-83.
- [5] Liu X.-D., Song W.-G., Huo F.-Z., Jiang Z. G. (2014). "Experimental Study of Pedestrian Flow in a Fire-protection Evacuation Walk." *Procedia Engineering*, Vol. 71, pp. 343-349.
- [6] National Fire Agency (2018). Statistical Yearbook of the Fire Department for 2018. pp. 55-60.
- [7] Shyam-Sunder, S. (2005). "Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Final Report of the National Construction Safety Team on the Collapses of the World Trade Center Towers (NIST NCSTAR 1)." National Institute of Standards and Technology, p. 190.
- [8] Tubbs, J.S., Meachame, B.J. (2007). *Egress Design Solutions*. JohnWiley & Sons, Inc. p. 313.