성능위주 피난안전설계를 위한 한국인 대상 유출계수 측정 실험

Measurements of Flow-Rate with Korean for Performance Based Egress Safety Design

윤호주* · 황은경** · 김종훈***

Youn, Ho Ju · Hwang, Eun Kyoung · Kim, Jong Hoon

Abstract

In recent times, high rise and complex buildings have raised concerns about fire damage. In most developed countries, the performance basis evacuation safety design is established by the characteristics of the buildings and their occupants. Especially, the run-off coefficient is the major evacuate factor in determining the time required in case of fire and, the foreign countries suggest the standard and the process of the run-off coefficient through accumulated fire accident experiences and experimental analysis. However, performance based fire protection design is recently introduced to domestic and, the studies and standards in the emergency situation are insufficient. In addition, it is limited to secure the reliable evacuation capacity when applying the international standards due to the different evacuation characteristics of the domestic occupants (escape behavior, physical size and socio-cultural situation). Precedent studies on the domestic occupants' evacuation characteristics are required to secure the safer and more efficient domestic buildings evacuation safety. Therefore, in this study, the experiment set was built to obtain the run off coefficients in the evacuation elements to establish the domestic building evacuation safety design and run-off coefficient experiments with the domestic age-categorized groups were conducted. These experiment can be used as a basis for establishing the run-off coefficients of performance evacuation safety design in future.

Key words : Evacuation, Bottleneck, Performance based design, Occupants density, High rise building

요 지

최근 건축물이 고층·복합화 됨에 따라 화재발생 시 많은 인적피해발생의 우려가 높아지고 있다. 이에 선진국에서는 건축물 특성에 따라 성능기반 피난안전설계를 실시하고 있는데, 이를 위해서는 해당 건축물 및 이용하는 재실자의 특성을 파악할 필요가 있다. 특히 유출계수는 피난에 필요한 시간을 결정에 하는데 중요한 피난요소로서 국외의 경우에는 축적된 화재사고 경험과 다양한 실험분석을 통해 유출계수 기준 및 절차를 제시하고 있지만 국내에는 최근에야 성능기반 소방설계가 도입되어 국내피난상황을 고려한 연구 및 기준이 미흡한 상태이다. 또한 국외기준을 그대로 적용하기에는 국내 재실자의 피난특성(피난행동, 신체적 크기, 사회문화적 상황)이 달라 신뢰성 있는 피난용량을 확보하기에는 한계가 있다. 이에 보다 안전하고 효율적인 국내 건축물 피난안전성 확보를 위해서는 국내 재실자의 피난특성을 고려한 실험과 관련연구가 선행되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 국내 건축물 피난안전설계 확립을 위하여 피난요소 중 유출계수에 대해 실험세트를 제작해 국내 연령별 유출계수 실험을 실시하였다. 이러한 유출계수실험은 향후 성능기반 피난안전설계분야의 유출계수 정립에 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 피난, 병목, 성능기반설계, 재실자 밀도, 초고층

1. 서 론

최근 경제발전과 도시의 밀집화로 건축물이 대형화·고층화로 증가되는 추세이다. 이러한 대형고층건물은 경제적이고 효율적인 기능이 있는 반면 안전에 대해서는 (다수의 피난인원 집중, 수직수평 피난거리의 증가, 화재진압 어려움)등 같은 문제점들을 보이고 있어 화재 시 많은 인명피해를 동반할 수 있다.

이에 최근 건축물의 충분한 인명안전을 확보하고자 건축물 및 재실자의 특성을 고려한 성능기반 피난안전설계를 실시하고 있는데 이를 위해서는 재실자의 특성(연령, 성별, 활동성, 대기상태)을 고려한 피난요소(이동속도, 재실자 밀도, 유출계수, 반응시간)들의 세부적인 기준정립이 필요하다.

국외의 경우에는 축적된 화재사고 경험과 다양한 실험분석을 통해 기준과 절차를 제시하고 있지만 국내는 최근에야 성능기반 소방설계가 도입되어 국내피난상황을 고려한 연구 및

*정회원 · 한국건설기술연구원 연구원(E-mail : hojunala@hanmail.net, 교신저자)

**정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원

***정회원 · 경민대학 교수

기준이 미흡한 상태이다.

또한 국외기준을 그대로 적용하기에는 국내 재실자의 피난 특성(심리, 행동성향, 신체적 차이, 사회/문화적 상황)이 달라 신뢰성 있는 피난용량을 확보하기에는 한계가 있다. 보다 안전하고 효율적인 국내 건축물 피난안전성 확보를 위해서는 국내 재실자의 피난특성을 고려한 연구와 실험이 선행되어 세부적인 성능기준이 마련되어야 할 것이다.

이에 본 연구는 선행연구의 일환으로 국내에서 주로 사용하고 있는 출입구의 폭에 대해 연령별 유출계수 실험을 실시 분석해 보았다.

유출계수는 유효피난 폭(출입구, 계단, 복도)과 같은 피난 폭 결정함에 있어 중요한 역할을 하는 피난요소로서 계수 값에 따라 병목현상이 생기면 이는 피난완료시간에 많은 영향을 미치는 중요 요소이다.

현재 국내의 유출계수는 국외 기준을 그대로 적용하고 있기에 국내피난상황과의 검토 및 확인절차가 필요하며 이러한 실제실험을 통해 도출된 Data는 향후 국내 성능기반 피난안전설계분야의 유출계수 정립에 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 연구방법 및 범위

본 연구는 국내 건축물 성능기반 피난안전설계 시 국내 재실자 특성을 반영한 유출계수 기초자료를 제시하고자 국내 재실자를 대상으로 다음과 같이 유출계수실험과 연구를 진행하였다.

첫째, 국내외에서 적용하고 있는 유출계수 산정 및 기준들에 대해 살펴보았다. 이를 바탕으로 유출계수에 영향을 미칠 것으로 판단되는 주요변수들을 도출하였다.

둘째, 실험방법 및 세트제작을 위해 IMO

(International Maritime Organization)가이드라인 중 Test 4의 출입유량(Flow rate) 측정 세트와 동일하게 제작하여 연령별 유출계수 실험을 실시하였다.

마지막으로, 실험에서 도출된 유출계수Data와 기존의 국내외 유출계수를 비교분석해 유출계수의 적용성 검토 및 향후 국내 표준유출계수 연구방향을 제시하는 순서로 연구를 진행하였다.

2.2 유출계수 관련 이론적 고찰

2.2.1 유출계수 정의

건축물의 유출계수란 병목이 존재하는 곳(이동 경로 상에 출입구와 같이 좁은 곳을 통과 시)에서 통로의 폭이 결정되어 있을 때 단위시간당 그 폭을 통과할 수 인원수를 나타낸 계수이다(서동구, 2010).

유출계수정도에 따라 병목현상이 발생하는데 병목현상은 건축물 탈출구 형태 및 피난인원수에 따라 출입구에서의 피난인원의 정체현상을 말하며 이는 피난완료시간에 많은 영향을 미친다.

그림 1. 병목현상

2.2.2 국내외 유출계수

일본의 경우에는 “일본건축법의 피난안전검증법”에서 피난경로가 지상으로 통하는 경우와 그 밖의 경우로 구분하고 있다.

$$t_{queue} = \frac{\sum \rho \times A_{area}}{\sum N_{eff} \times \sum B_{eff}} \quad (1)$$

피난경로가 출입구가 직접지상으로 통하는 경우에는 $N_{eff}=90$ 유동계수 $1.5N(\text{인}/\text{s}\cdot\text{m})$ 을 정의하고 있으며 출입구가 직접지상으로 통하는 않는 경우에는 출입구 통과 후 피난인원을 수용가능한지에 따라 다르게 적용하고 있다.

출입구 통과 후 피난 인원을 수용가능	
많은 경우	부족한 경우
$N_{eff}=90$	$N_{eff} = \max \left(\frac{80B_{\neq ck} \sum \frac{A_{co}}{a_n}}{B_{room} \sum \rho A_{load}}, \frac{80B_{\neq ck}}{B_{load}} \right)$

미국의 경우에는 “SFPE Handbook”에서 대규모 인원의 피난소요시간 계산 위해서 수력모델을 적용하고 있는데 이를 이용해서 유출계수를 산정할 수 있다.

$$F_s = S \times D \quad (2)$$

F_s 는 단위시간에 및 단위유효폭에 대해 특정지점을 통과하는 사람들의 유동인구를 의미하며 단위는(인/s·m)이다. 여기서 S 는 이동속도(m/s)이고 D 는 밀도로(명/m²)를 나타낸다. 속도와 밀도간의 관계식을 그래프와 도표로 제시하고 있다. 일반적인 건축물에서의 출입문의 유출계수를 1.3(인/s·m)을 적용하고 있다.

영국은 2005년 David의 “people flow modelling” 보고서에서 종목별 스포츠경기장에서의 유출계수 실험을 했는데 비디오 판독을 통해 유출계수를 도출하였다. 경기장의 종목별로 축구장은 1.25~1.63(인/s·m) 골프장은 0.43(인/s·m)까지 용도별로 다르게 유출계수를 제시하고 있다(David, 2005).

국내에는 건축방재계획론에서 유출계수에 대해 정의하고 있으며 일반적으로 (3)과 같은 산정식으로 나타내고 있으며 평균적으로 유출계수는 1.5(인/s·m)를 적용 하고 있다.

$$P = NBT \quad (3)$$

N : 출입구 유출계수 (인/s·m)
 P : 인원수
 t : 통과시간 (s)
 B : 피난유효 폭 (m)

국내외의 유출계수는 각종 기준에서 여러 가지 과정을 통해 유출계수산정을 하고는 있지만 결론적으로 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$N = \frac{P}{t_B \times B} \quad (4)$$

N : 출입구 유출계수 (인/s · m)
 P : 인원수
 t_B : 통과시간 (s)
 B : 피난유효 폭 (m)

여기서 유출계수 N (인/s·m)는 단위시간당 출입구의 폭을 통과하는 사람의 수로 피난유효 폭(출입구 폭)인 B (m)는 각 나라들마다 기준이 정해져있지만 인원수 P 와 통과시간 t_B 는 재실자의 특성(신체크기, 피난행동, 교육정도)에 따라 다르게 나타날 수 있다.

국외의 유출계수에 대해 살펴보면, 많은 연구와 조사를 통해 재실자밀도, 이동속도, 수용인원의 특성에 따라 유출계수 산정식을 정립하여 적용하고 있었다. 하지만 표 1과 같이 일반적인 유출계수에서도 차이를 보이고 있으며 국가적 상황에 따라 유출계수 조사방법 및 기준이 달라 국외기준을 그대로 적용하기보다는 면밀한 검토 작업 및 실험을 통한 기준비교가 선행되어야 할 것이다.

표 1. 국내외 유출계수

그룹	한국	일본	미국	영국
유효 유출계수	1.5	1.5	1.3	1.63

3. 출구의 유출계수 실험

3.1 실험개요

본 실험은 주로 사용되고 있는 출구의 폭에 국내 재실자의 연령별에 따라 도출되는 유동계수를 보고자 20세부터 70세에 이르는 다양한 연령층으로 구성하여 실제 현상과 근접할 수 있도록 실험을 구성하였다. 실험은 2개의 그룹으로 구분하여 편성 하였으며 먼저 Group A는 신체적으로 매우 원활하게 피난행동을 할 수 있을 것으로 예측되는 20대로 구성, Group B는 20-70대로 여러 연령층을 중심으로 구성하였다.

유출계수는 출입구 폭을 재실자들이 통과하는 시간이므로 신체사이즈와 이동속도는 중요한 결정요소이다. 이에 다음과 같이 실험당사자들의 연령별 신체사이즈와 이동속도 평균을 조사하였다. 또한 국내연령별 신체치수 통계와 비교하여 국내 신체치수의 대표성을 검토하였다.

실험당사자와 국내 신체치수 평균치와는 몸통 폭은 연령별

표 2. 연령별 실험그룹 구성

구분	남	여	합계
Group A 20대	38	10	48
Group B	20대	1	40
	30대	3	
	40대	2	
	50대	3	
	60대	8	
	70대	-	

표 3. 연령별 신체사이즈 및 이동속도

연령	몸통 폭	몸통 두께	키	걸기 (단위 :m/s)	뛰기 (단위 :m/s)
20대	46.5/47	27.8/22.2	174.8/173	1.62	3.92
30대	50.5/47	24.0/23.5	175/171	1.67	4.21
40대	47.3/46	28.8/23	168.4/168.5	1.76	3.35
50대	45.8/45	29.9/24	165.5/166	1.58	3.92
60대	46.2/44	29.6/24	165.2/164	1.51	2.97

*실험치/국내 평균치

표 4. 실험 측정세트와 장비

장비	측정장비 내용
실험세트
피난 실험용 가변식 도어	<p>전면 도어와 후면 받침대, 그리고 전도방지를 위한 지지대 및 이동과 고정이 가능한 바퀴 등으로 구성됨.</p>
피난실험 영상장비	<p>피난영상의 측정은 기본적으로 CCTV 카메라와 녹화기를 가지고 운용하였으며 각 이동통로의 상부 및 고지점에서 영상 측정을 위한 장비는 별도로 제작함.</p>

평균 +3.18%, 몸통두께 +20.1%, 키+0.7로 나타났으면 총 +8%의 차이를 보였다. 몸통두께는 평균치와 다소 차이를 보였지만 키와 몸통 폭은 국내 평균치와 유사하게 나타났다.

실험의 세트는 IMO (International Maritime Organization) 가이드라인을 기준 중 Test 4에서 수행하도록 되어있는 출구 유량(Flow rate) 측정 실험의 세트(4 m×8 m)와 동일하게 제

표 5. 연령별 실험횟수

문 폭	그룹	실험 횟수
1 m	A 그룹	4회
	B 그룹	3회
1 m	A 그룹 + B 그룹	3회
1.5 m	A 그룹 + B 그룹	1회
2 m	A 그룹 + B 그룹	2회
합계		13회

작하여 수행하였다.

병목현상 실험은 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m의 3가지 문 폭 종류에 대해 유출계수 실험을 수행하였다.

각 실험의 문 통과 시간측정은 문 앞에서 진행요원들 2명과 비디오촬영으로 유출시간을 측정하였다. 먼저 출입구 폭 1 m에서는 20대로 구성된 Group A와 40~50대가 주로 구성된 Group B의 유출계수 실험을 했다. 현재의 유출계수는 연령별로 구분해 적용하고 있지 않아 연령별로 같은 인원수 구성된 그룹별 편차를 알아보고자 실시하였다.

두 번째로는 두 그룹을 합쳐 80명의 인원이 문 폭에 대해 실험을 실시하였다.

실험진행은 비상 시 피난상황을 고려해 실험참가자들에게 실험내용을 교육했으며 비상 시 급박한 환경을 조성하기 위해 진행요원들이 사이렌으로 뒤에서 참가자들에게 피난상황에 대한 동기부여를 했다.

3.2 실험결과

3.2.1 실험결과

먼저 폭 1.0 m에 대한 실험에서는 Group A가 4회 평균 8.12초, Group B는 3회 평균 10.79초를 기록하여 고 연령층 Group A가 Group B보다 좀 더 정제되는 것으로 나타났다.

두 개의 그룹을 합쳐 80인이 되도록 수행한 결과에서는 폭 1.0 m에서는 평균 통과시간은 23.9초, 폭 1.5 m에서는 15.5초, 폭 2 m에서는 평균 11.61초의 통과 시간이 기록되었다.

실험으로 기록된 피난시간과 통과인원에 대해 유출계수 (Flow rate, N/m·s)으로 산정해 비교해보면 폭 1.0 m는 Group

표 6. 연령별 유출계수실험결과

그룹	문폭	실험 횟수	기록	유동률 (N/m·s)	평균 (N/m·s)	
A 그룹	1 m	1회	8초47	4.7	4.95	
		2회	7초40	5.4		
		3회	8초72	4.6		
		4회	7초90	5.1		
B 그룹		1회	9초84	4.1	3.73	
		2회	10초19	3.9		
		3회	12초34	3.2		
A + B 그룹			1회	20초75	3.9	3.4
			2회	25초13	3.2	
			3회	25초82	3.1	
	1.5 m	1회	15초53	3.4	3.4	
	2 m	1회	12초16	3.3	3.45	
		2회	11초06	3.6		

A가 4.925(N/m·s), Group B가 3.73(N/m·s) 많은 차이를 나타냈다. 두 그룹을 합친 문 폭에 대한 유출계수는 폭 1.0 m에서는 3.4(N/m·s), 폭 1.5 m에서는 3.4(N/m·s), 폭 2 m에서는 3.45(N/m·s)의 통과 시간이 기록되었다.

통과시간에서는 문 폭에 따라 많은 차이를 보였지만 유출계수로 산정해 비교해보면 유출계수는 큰 차이점이 없었다.

3.2.2 국내의 실험결과 비교

국내 연령별 재실자 실험에서 측정된 유출계수와 국내의 유출계수를 같은 실험조건으로 산정해 비교해 보았다.

표 7. 실험결과와 국내의 유출계수 비교 (N/m·s)

문폭	그룹	국내실험 유동률 (N/m·s)	일본	미국	영국
1 m	A 그룹	4.92	1.5	1.3	여러 종류의 경기장에서 유출조사를 했으며 종류별로 1.25~1.63로 조사되었음.
	B 그룹	3.73	1.5	1.3	
	A + B 그룹	3.4	1.5	1.3	
1.5 m		3.4	1	0.87	
2 m		3.45	0.75	0.65	

유출계수 실험과 같은 인원수와 문 폭에 대해 일본, 미국의 유출계수는 실험에서 도출된 유출계수와 3배의 차이를 보이고 있었다. 문 폭에 증가 따라서는 일본과 미국은 일정하게 유출계수 감소를 보이는 반면 국내 유출계수 실험은 거의 비슷한 유출계수값을 나타내고 있었다.

4. 결 론

본 연구는 국내 건축물 성능기반 피난안전설계 시 국내 재실자 특성을 반영한 유출계수 기초자료를 제시하고자 국내 재실자를 대상으로 연령별, 문 폭을 구성을 달리하여 실험을 실시했다.

그림 2. 병목현상실험

이를 토대로 실험결과와 국외의 기준의 유출계수를 비교 분석해 다음과 같은 결론들을 도출 할 수 있었다.

- 1) 출입구 폭 1 m에서는 20대로 구성된 Group A와 40~50대가 주로 구성된 Group B의 유출계수 실험에서 Group A는 유동계수 평균 4.95(N/m·s)을 Group B 유동계수 평균 3.73(N/m·s)을 나타내 1.22(N/m·s)의 편차를 보이고 있었다. 이러한 실험결과 편차는 건물내의 수용인원 구성에 따라 유출계수가 달라지는 것을 나타내며 현재의 일괄적인 유출계수 적용에 문제가 있다는 것을 알 수 있었다. 이에 성능적인 피난안전설계 시 유출계수에 대해서는 건축물 용도별 수용하고 있는 재실자의 구성 및 특성에 대한 면밀한 검토를 통해 특성을 반영한 알맞은 유출계수가 적용되어야 할 것으로 판단된다.
- 2) Group A 와 Group B를 합친 80인을 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 문 폭에 따라 실시한 유출계수 실험은 통과시간은 1.0 m(23.9초), 1.5 m(15.5초), 2.0 m(11.61)로 시간은 문 폭의 증가에 따라 단축되었지만 유출계수 산정으로 하면은 1.0 m(3.4N/m·s), 1.5 m(3.4N/m·s), 2.0 m(3.45N/m·s)을 나타내 차이가 없었다. 이는 유출계수 산정방법이 (재실자N/피난유효 폭 m × S)으로 통과시간은 단축되었지만 피난유효 폭의 증가로 유출계수에는 큰 영향이 없었다.
- 3) 국외(일본, 미국)의 유출계수기준을 실험과 같은 조건(인원수, 문 폭)으로 산정해 실험과 비교해 보면 3배 이상의 차이를 보이고 있었다. 이러한 편차는 국가별 재실자 피난특성(신체능력, 몸체크기, 행동성향, 문화)차이와 실험의 방법 및 측정기술에 따라 다른 결과 값이 발생되기 때문이다. 특히 이번 실험은 이동속도 및 실험환경을

긴급한 피난상황과 비슷하게 설정해 국외 기준보다 높은 유출계수를 보이고 있었다. 이에 국외기준을 국내 유출계수에 그대로 적용하는 것보다는 사전에 검토 및 연구를 통해 국내 재실자 출입구 유출계수 기준 정립이 선행되어 할 것으로 판단되며 좀 더 다양한 연령층 및 재해약자를 고려한 유출계수 실험과 Data분석이 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 권영진 (2009) PBD를 위한 화재역학, 동화기술.
- 김응식 (2003) 대피 시뮬레이션 시스템 개발을 위한 조사연구II, 연구보고서, 보건복지부.
- 서동구 (2010) 성능적인 피난안전계획을 위한 출구유동계수 조사 및 방법제안에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제26권, 제1호 pp. 168-171.
- 석호태 (2009) 대규모 실내경기장의 건축적 특성에 EKfms 피난요소시간 예측에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제25권, 제9호 pp. 329-337.
- 송용호 (2006) 종합병원병동부 피난행태분석에 관한 연구, 박사학위논문, 충남대학교.
- 이강훈 (2002) 건축방재계획론, 경남대학교 출판부.
- 정영배 (2010) 건축방재계획, 기문당.
- 한국건설기술연구원 (2007) 건축물 피난기준 설정 및 설계기술 개발연구, 연구보고서.
- 한국화재보험협회 (2001) SFPE 방화공학 핸드북
- David (2005) people flow modelling-Benefits and Applications within industry, Loughborough University.

◎ 논문접수일 : 11년 11월 17일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 11월 22일
 ◎ 심사완료일 : 11년 12월 13일