

# 건축물에서 피난 경로 설계

한양대학교 건축설비·환경공학 연구실譯

이 논문에서는 Predtechenskii와 Milinski에 의해 개발된 보행자 이동을 대비한 설계방법에 대하여 검토하고, 고층사무소 건물에서의 실제 피난훈련에 대하여 기술하면서 고층건물에서의 계단을 중심으로 한 출구의 모델을 제공한다. 또한 이 논문은 예측되는 피난 수단과 그것에 대한 규제의 필요성을 간략하게 비교하였다.

## 1. 머릿말

지난 20여년 동안 건축물에서 사람의 이동에 대한 설계법이 개발되어 왔다. 이러한 것 중에서 건축물에서 부터 출구에 이르기까지 관련된 광범위한 연구가 Predtechenskii와 Milinski에 의해 수행되어 왔다. 이러한 데이터에 의해 개발된 정교한 수학적 모델은 동구의 여러나라와 소련에서 건축물에 적용되고, 또한 건축법규에도 제정되어 있다.

## 2. Predtechenskii와 Milinski의 방법

Predtechenskii와 Milinski의 설계 방법은 결정적 유동 모델이며, 수평·경사 피난로의 분포 밀도와 피난 속도의 측면에서 출구로 대피하려는 사람들의 이동을 예측한 것이다.

유동을 위한 유효 바닥 면적과 사람의 투영면적의 합의비에 관계되는 피난경로의 면적에 대한 유동 밀도는 다음식과 같이 평가된다.

$$D = p \cdot 5 / b l \quad (1)$$

여기서

P: 유동 속에 있는 사람 수

5: 사람의 수직 투영 면적

b: 유동폭 즉 피난 경로의 폭

l: 유동길이

D: 무차원

본 논문에서 유동의 평균 분포, 혹은 밀도는 단위면적당 사람수를 의미하며, 서로 상보적으로 사용되기도 한다. 여기에는 모든 사람의 신체치수가 동일하며, 그 차는 무시할 수 있다는 가정을 내포하고 있다.

<표1>과 <표2>는 연령에 따른 사람들의 투영면적을 나타낸 것이다.

<표 1> 1인당 투영면적 (f)<sup>5)</sup>

	5/m <sup>2</sup>
아 동	0.04~0.06
청소년	0.06~0.09
성 인...여름옷 착용	0.10
봄옷 착용	0.113
겨울옷 착용	0.125
봄옷을 착용한 성인	
한개의 서류가방 휴대	0.18
한개의 여행가방 휴대	0.24
두개의 여행가방 휴대	0.39

<표2>는 연령에 따라 무작위로 선택한 오스트리아인을 대상으로 투영면적을 인체계측법으로 산출한 평균값이다.

빛과 같이 평행광선을 투사하는 인공태양과 45° 각도의 거울을 배열하여 피실험자의 형상

을 바닥에 투영한 후, 그 투영 면적을 側面器를 사용하여 측정하였다. 이 실험은 코트를 입은 상태와 벗은 상태, 그리고 한 발자욱 움직인 상태로 서있는 다수의 실험자를 대상으로 600개의 그림을 평가한 것이다.

〈표 2〉 오스트리아인을 대상으로한 인체계측<sup>1)</sup>

Age group Sex	5 yrs			10-15 yrs			15-30 yrs			>30 years
	w	m	all	w	m	all	w	m	all	
A(Du):x	0.705	1.300	1.290	1.291	1.683	1.894	1.825	1.872		
Standard deviation	0.171	0.175	0.208	0.208	0.115	0.379	0.334	0.252		
f(N):x	0.0696	0.1092	0.1126	0.1113	0.1383	0.1484	0.1458	0.1740		
Standard deviation	0.0078	0.0202	0.0174	0.0187	0.0172	0.0171	0.0172	0.0315		
f(M):x	-	0.1453	0.1326	0.1386	0.1809	0.1892	0.1862	-		
Standard deviation	-	0.0178	0.0191	0.0186	0.0213	0.0296	0.0272	-		
f(S):x	-	0.1262	0.1221	0.1238	0.1508	0.1645	0.1600	0.1918		
Standard deviation	-	0.0198	0.0170	0.0180	0.0163	0.0191	0.0193	0.0356		

w	women	A(Du):x	DuBois-Area (mean value)
m	men	f(N):x	mean projected area per person in m <sup>2</sup> standing and without coats
f(S):x	mean projected area per person by walking in m <sup>2</sup>	f(M):x	mean projected area per person in m <sup>2</sup> standing and wearing coats

오스트리아인을 대상으로 측정된 결과는 러시아인을 대상으로 한 〈표1〉과는 차이를 보이며, 그 이유는 1인당 투영면적 (투영면적 계수)가 국가에 따라 다르기 때문이다.

폭6의 일정한 단면을 갖는 피난경로를 통과하는 피난인의 유동량은 다음 식과 같다.

$$Q = Dvb \quad [m^3 / min] \dots (2)$$

여기서  $v$ 는 유동속도이다.

Predtechenskii와 Milinski는 유동밀도 즉 식(1)을 이용하여 문을 통한 수평피난로와 계단에서의 유동 속도를 정의하였다.

$$v = s(p) \dots (3)$$

식(1)은 정상상태에서 피난 경로의 형태나 유동의 외형이 변하지 않으면, 유동의 밀도는 일정하고, 무한한 유동 밀도는 이론적으로는 집단의 측면에 따라 변할 것이다. 즉 밀도가 증가함에 따라 유동부분의 사람이 더 빨라지는 것처럼 밀도의 증가는 유동의 방향으로 확대한다. 역으로 유동에서 밀도의 감소는 유동이 분해되어 다른 밀도를 가진 부분 유동으로 된다. 따라서, 밀도 증가에 비례하는 수정항이 식(3)에 고려되어야 한다.

$$v = f(D) - C(dD / dx) \quad C > 0 \dots (4)$$

이러한 시도는 Predtechenskii와 Milinski의 데이터를 기초로하여 건물의 긴급피난을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델에 적용되어 왔다. 투영면적 계수를 변화시켜 얻어지는 모델의 감도분석은 피난 시간에 따라 예측되는 편차를 얻을 수 없다.

투영면적계수(유동밀도)가 감소할수록 실험대상 건물에서 이 모델은 보다 많은 피난 시간이 예측된다.

반면에 건물에서 피난의 경우처럼 제한된 유동길이를 갖는 군중 이동의 관찰은 위의 조건과 일치하지 않는다. 그것은 식(1)이 건물의 피난 경로에 대한 유동밀도를 결정함에 있어 충분한 근사값을 제공해줌을 나타내며, 이에 대한 좀더 명확한 연구가 요구되고 있다.

Predtechenskii와 Milinski는 정상적인 환경에서 여러 형태의 건물에 대한 유동 밀도와 속도를 측정하였다. 이러한 관찰을 통하여 낮은 밀도의 범위에서는 유동속도가 큰 편차를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 비상시 보행 변수와 비슷한 정상적인 환경조건에서 벗어난 유동 속도와 용량을 평균 유동속도와 용량보다 더 크게 가정하였으며, 정의된 세가지 이동 조건은 다음과 같다.

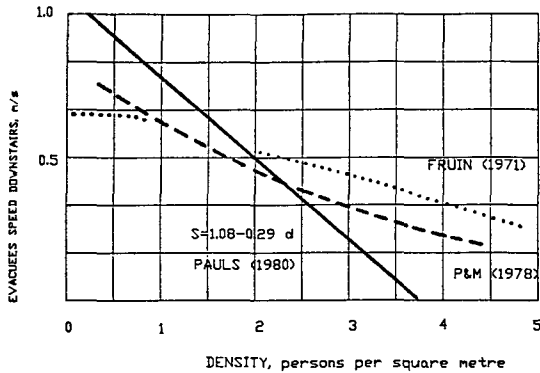
1. 정상적 유동 상태
2. 쾌적한 유동 상태
3. 비상시 유동 상태

쾌적한 유동 조건에서의 평균 속도는 측정된 보행 속도의 낮은 범위에서, 비상시 유동 상태에서는 높은 범위로부터 산출할 수 있다. [그림1]은 J. Fruin과 J. Pauls 그리고, Predtechenskii와 Milinski에 의한 것으로 밀도면에서 아래층으로 향하는 피난자의 속도를 비교한 것이다.

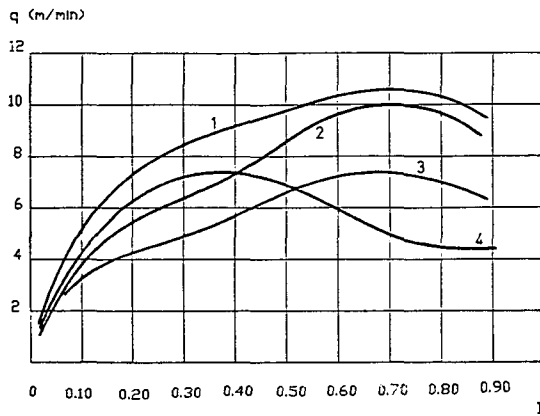
또 다른 중요한 유동 변수는 피난로 폭의 길이당 유동 용량인데 그 것은 특별유동으로 정의 된다.

$$q = Dv \quad [M / min] \dots (5)$$

특별유동은 밀도의 함수로써 시간이 지남에 따라 증가하여 절대 최고값( $q_{max}$ )을 경계로 다시 감소하며  $q_{max}$ 는 피난 경로의 종류에 따라 다른 값을 갖는다.



[그림 1] 계단에서의 밀도와 속도



[그림 2] 정상적인 환경조건에서 각기 다른 피난경로의 유동 밀도에 관한 특별 유동

1. 출입구
2. 수평이동
3. (위층으로 향한) 계단
4. (아래층으로 향한) 계단

[그림 2] 정상적인 환경 조건에서 각기 다른 피난경로의 유동 밀도에 관한 특별 유동

1. 출입구
2. 수평이동
3. (위층으로 향한) 계단
4. (아래층으로 향한) 계단

피난 효율은 수평적 이동, 문, 계단 등 세가지 제한적 요소에서의 유동의 연속성에 관계한다. 그러므로 피난로의 연속부분에 대한 유동용량의 균형은 자유 유동을 위한 중요한 요건이다.

$$\text{즉, } Q_i = Q_{i+1} \dots (6)$$

또는 식(2)와 (5)로부터

$$q_i b_i = q_{i+1} b_{i+1} \dots (7)$$

이 된다.

[그림 3]은 각기 다른 방향으로부터 나오는 세 가지 부분

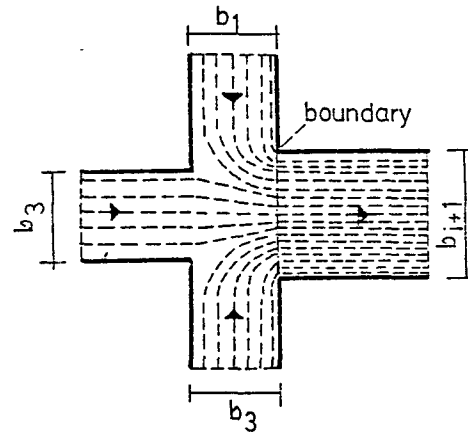


그림 3. 유동의 합류

유동의 합에 대한 도식을 보여준다. 이 경우 자유 유동의 조건은

$$Q_{i1} + Q_{i2} + Q_{i3} = Q_{i+1}$$

$$\text{또는, } q_{i+1} = Q(I) / b_{i+1} \dots (8)$$

로 나타낼 수 있으며,  $Q(I)$ 는 모든 부분 유동 용량의 합이다.

특별 유동  $Q_{i+1}$  값이 최대값을 초과하면 즉,

$$q_{i+1} > q_{\max} \text{ 일 경우, 유동밀도는 자연스럽게 최}$$

대값으로 증가되며 ( $D_{\max} = 0.92$ ) 이것은 주요 경로  $i+1$ 에 이르는 경계에 배열하게 된다.

이러한 혼잡때문에 모든 사람이 동시에 합쳐지는 시도는 불가능하게 된다. 주 유동에 관계하는 특별유동은 그들의 용량  $Q$ 에 비례한다고 생각되며, 주 유동에 관계하는 각 유동의 백분율은 각 특별 유동의 폭과 그 폭을 합친 비율로써 얻어진다.

$$P_1 = b_{i1} / B_i$$

$$P_2 = b_{i2} / B_i \dots (9)$$

$$P_n = b_{ni} / B_i$$

여기서,  $B_i$ 는 모든 특별 유동에 대한 폭의 합이다.

만약, 각 특별 유동이 합류되는 과정에서 특별 유동  $q_{i+1}$ 이 최대값을 초과하지 않으면, 즉

$$q_{i+1} < q_{\max}$$

라면 피난 경로에서 혼잡은 일어나지 않는다.

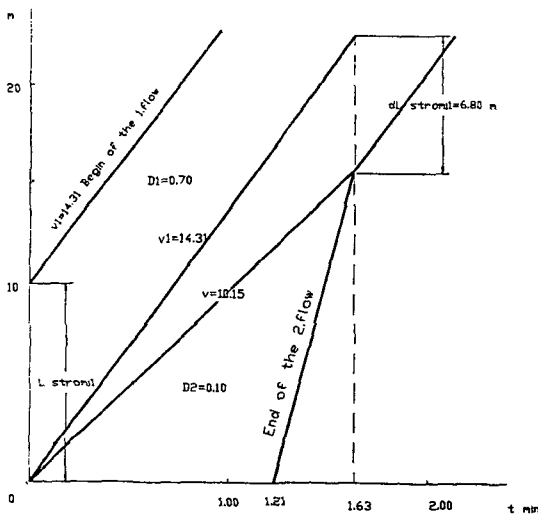
다른 밀도와 속도를 가진 두개의 유동이 합류되는 동안 연도 유동의 속도와 밀도를 조절함으

로써 유입유동의 이동변수가 변화하는 것을 정상적인 환경조건하에서 행해지는 집단이동의 관찰을 통해 알 수 있다. 이러한 관계에 따라 변수  $D_1:q_1$ 와  $D_{1+1}:q_{1+1}$ 을 가진 유동사이에서 경계가 형성될 것이며, 그 위치는 다음 속도의 구간에 따라 변하게 된다.

$$v_1 < v_{1+1} \text{ 일 경우, } v'' = q_1 - q_{1+1} / D_1 - D_{1+1} \dots (10)$$

$$v_1 > v_{1+1} \text{ 일 경우, } v'' = q_{1+1} - q_1 / D_{1+1} - D_1 \dots (11)$$

이러한 과정은 [그림4]와 같고, C점에서 유동의 합류는 종결된다.



[그림 4] 유동 합류과정의 예

유동밀도와 속도가 다르지만 건물에서의 대피, 먼저 대피하려는 시도, 교신과 정보의 추구 등 공통된 목적을 지닌 집단이 있어 이러한 현상이 비상피난에 적절하게 적용하도록 배려해야 할 것이다.

혼잡한 유동의 형성도 비슷한 과정이다.

$$Q_1 > Q_{1+1}$$

일 경우 다른 용량을 가진 유동은 통과하는 도중 경계 부분에 배열을 하게 된다. 혼잡이 시작될 때 유동은 두 부분 즉 최대 유동 집중( $D_{max}=0.92$ )을 가진 다수 인원으로 구성되는데 그 사람들은 피난 경로의 주요 부분에 이미 도착해 있게 되며, 나머지 피난자들은  $D_{max}$ 보다 작지만 상당히 높은 속도와 밀도를 가진 유동에 접하게 된다. 이 경우 혼잡도는 다음 식으로 주어진다.

$$v''_{STAU} = (Q_{Dmax} \cdot b_{1+1} / b_1 - q_1) / (D_{max} - D_1) \dots (12)$$

여기서,

$Q_{Dmax}$ : 최대 밀도일 때의 특별 유동

$b_{1+1}$ : 혼잡한 유동의 폭

$b_1$ : 초기 유동의 폭

$q_1$ : 초기 특별 유동의 값

$D_1$ : 초기 유동의 밀도

빠른 속도를 가지고 이동하는 마지막 사람이 배열의 끝에 이르게 되면 혼잡은 다음과 같은 비율로 감소한다.

$$v_{STAU} = v_{Dmax} \cdot b_{1+1} / b_1 \dots (13)$$

$v_{Dmax}$ 는 최대밀도일 때의 유동속도이다.

이와같이 기본적인 고려가 된 설계방법은 Predtechenskii 와 Milinski에 의해서 주로 강당이나 홀의 피난에 적용되어 왔다. 다음은 방법의 보정과 건물에서의 그 적용성을 검토하며, 한 예를 제시한다.

### 3. 계단을 통한 고층건물의 피난에 대한 출구 모델.

여기서는 초기논문 즉, “계단을 통한 고층 사무소 건물의 전체 피난에서의 투영 면적에 관한 피난 시간의 결정”에서 부분적으로 발췌한 것이다. 이 연구의 목적은 독일 Karlsruhe대학의 Forschungsstelle fur Brandschutztechnik에서 수행한 실제 피난 실험에 관한 러시아 방식의 보정이며 고층건물에 있어 유동의 이동을 예측키 위한 출구 모델의 설치에 있다. 이러한 목적을 위해 투영 면적 계수를 고려한 전체피난시간이 세계의 고층 사무소 건물에서 평가되었고, 위에서 언급한 실험에서 얻어진 피난시간과 비교하였다.

	$t_{ges}$	n	$P_{TR}$	$P_G$	$b_{TR}$
Building A	8.78min	23	427	19	1.20m
Building B	10.48min	22	567	26	1.25m
Building C	10.47min	32	502	16	1.25m

여기서,

$t_{ges}$ : 참고문헌 19에서 측정된 피난시간

n: 위층의 수

$P_{TR}$ : 실험에 이용된 계단을 통해 피난한 인원 수

$P_G$ : 층당 사람수

$b_{TR}$ : 계단폭

다음과 같은 단일화, 즉

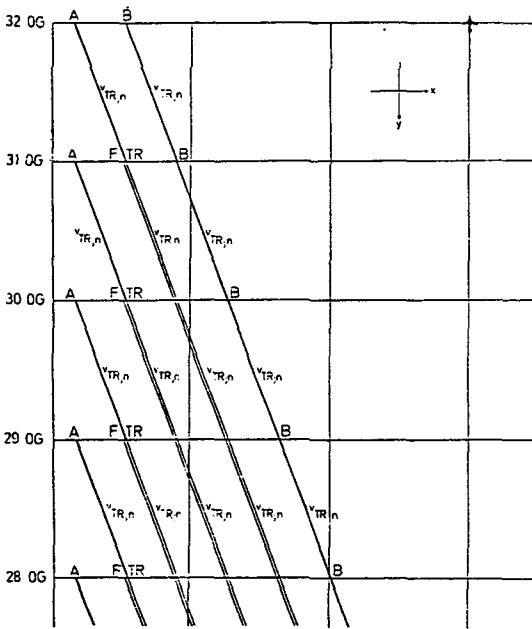
1. 각 층의 재실자에 의해 형성되는 각 특별 유동의 길이(유동에 있어 처음과 마지막 사람의 길이로 정의)는 복도를 따라 진행하는 최대이동 거리와 같게 될 것이다.

2. 피난 경로의 형태와 마찬가지로 사람수는 각 층에서 동일하다.

3. 각 특별 유동은 동시에 피난하려 하며 같은 순간에 계단으로 유입된다.

는 것이 일반 양식으로 알려지면 계단을 통한 이동은 몇가지 규칙으로 나타낸다.

1. 각층 복도에서의 피난 시간  $t_F$ 가 층당 계단에서의 피난 시간  $t_{TR}$ 보다 적게 걸린다면, 각 층에서 발생하는 특별유동은 건물에서 빠져나간다. [그림5] 이 경우 전체 피난 시간은 다음과 같다.



[그림 5] 건물 C :  $f = 0.18m^2$ /사람일때 이동과정은 계산되었다. 특별유동은 상호작용없이 아래 층으로 이동한다. 각 층의 방화된 로비에서 약간 지연되기 때문에 특별 유동의 합류는 발생하지 않는다.

$$t_{Ges} = t_{F+n} \cdot t_{TR} \dots (14)$$

여기서,

$t_F$ : 각 층 복도에서의 피난 시간

$n$ : 위층의 수

$t_{TR}$ : 층당 계단에서의 피난 시간

2. 각층 복도에서의 피난 시간  $t_F$ 가 층당 계단에서의 피난시간을 초과한다면 각 층에서 발생하는 특별 유동은 아래층의 계단참에서 계단으로 대피하는 나머지 피난자들과 마주치게 된다. 이러한 경우에 계단의 밀도를 증가 시킨다 할지라도 주유동의 용량은 최대값  $Q_{max}$ 가 되지 못하며, 이 것은 계단폭이 아직까지 유동을 합류시키는데 적당하다는 것을 나타내준다. 즉

$t_F > t_{TR}$  이고

$$Q_{TR, n-1} = (Q_{T, n-1} + Q_{TR}) / b_{TR} < Q_{TR, max} \dots (15)$$

여기서,

$Q_{TR, n-1}$ : 합류과정을 거친 후 계단에서의 특별 유동 값

$Q_{T, n-1}$ : 문을 통하여 각 층의 계단에 이르는 유동용량

$Q_{TR}$ : 계단에서의 초기 유동 용량

$Q_{TR, max}$ : 계단에서의 최대 유동 용량

이 때 전체 피난 시간은

$$t_{Ges} = t_F + n \cdot t_{TR} + w \cdot dt \dots (16)$$

으로 주어진다. 식의 끝 항은 마지막 사람이 최상층에서 피난하는데 지연된 시간을 나타낸다. 고밀도 형태의 수인 인수  $m$ 은 피난 과정 동안 감소한다. (이것은 [그림6]에서 실선 사이의 면적이며, 실선은 다른 변수를 갖는 유동의 모집단 사이의 경계를 나타낸다.)

$m$ 은 반복을 되풀이하여 평가 된다.

$dt$ 는 자연 시간으로 다음과 같다.

$$dt = v''(t_F - t_{TR}) (v_{TR} - v_{TR, n-1}) / (v_{TR, n-1} - v'') \dots (17)$$

여기서,

$t_F$ : 복도를 따라 이동하는 마지막 피난자의 이동 시간

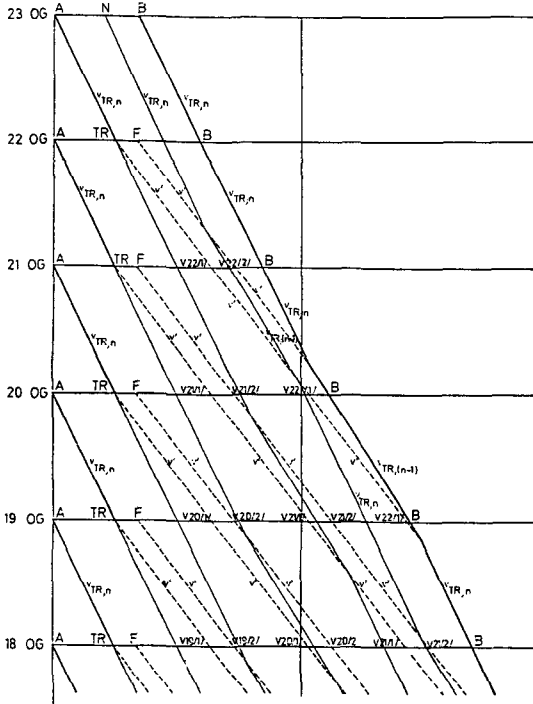
$t_{TR}$ : 인접한 층에 도달하기 위해 계단의 상층으로 이동하는 시간

$v''$ : 변수  $D_{TR, n}$ 과  $Q_{TR, n}$ 을 가진 계단에서 초기

흐름 사이의 경계치에 의한 속도, T 변수,  $D_{TR, n-1}$ 과  $Q_{TR, n-1}$ 을 가진 합류 유동은 그 위치가 변한다.

$v_{TR, n}$ : 밀도  $D_{TR, n}$ 일 때 흐름 속도

$v_{TR, n-1}$ : 밀도  $D_{TR, n-1}$ 인 계단에서의 유동 속도



[그림 6] 건물A :  $f=0.07m^2$ 일 때 이동과정이 계산되었다. 각 층에서 주기적인 밀도의 증가 때문에 이동은 지연된다.  $T_{ces}$ 는 +6.67분이다.

3. 만약  $n-1$  층에서의 부분적 유동이 합쳐지는 동안 계단에서의 특별 유동의 값이 최대값을 초과한다면 계단실의 입구에서와 같이 계단에서도 혼잡이 생긴다. 이 경우

$$Q_{TR, n-1} = (Q_{T, n-1} + Q_{TR}) / b_{TR} > q_{max} \dots (18)$$

여기서,

$Q_{TR, n-1}$ : 합류과정 후 계단에서의 특별 유동값  
 $Q_{T, n-1}$ : 각 층에서 문을 통해 계단에 이르는 유동 용량

$Q_{TR, n}$ : 계단에서의 초기 유동 용량

$b_{TR}$ : 계단폭

$Q_{TR, max}$ : 계단에서의 최대 유동 용량

식(7)로부터 주 유동에 관계하는 각 특별유동의 백분율은 아래와 같다.

$$P_T = b_T / (b_T + b_{TR}) \dots (19)$$

$$P_{TR} = b_{TR} / (b_T + b_{TR}) \dots (20)$$

여기서,

$b_T$ : 계단 쪽 문의 폭

$b_{TR}$ : 계단 폭

계단에 있어 특별 유동의 새로운 폭을 정하기 위해 유동의 주요폭  $b_{TR}$ 은 위에서 구한 분율(分率)을 곱함으로써 얻어진다.

$$b_{T1} = P_T \cdot b_{TR} \dots (21)$$

$$b_{TR1} = P_{TR} \cdot b_{TR} \dots (22)$$

계단이 혼잡하기 때문에 각 층에서 대피한 피난인은 곧바로 계단실로 들어갈 수 없다. 층의 출구에서 배열하게 되며 복도에서의 특별 유동은 다음과 같은 속도로 뒤쪽으로 확대된다.

$$v''_T, STAU = (q_T \cdot D_{max} \cdot b_{T1} / b_T) - q_T / D_{max} - D_T \dots (23)$$

여기서,

$v''_T, STAU$ : 복도에서의 혼잡 속도

$q_T, D_{max}$ : 최대 밀도일 때 출입구를 통한 특별 유동

$b_{T1}$ : 계단에서의 주 유동시 각 층으로 부터의 부분 유동의 폭

$b_T$ : 계단쪽 문의 폭(또는 자유유동 상태에서 각 층으로 부터의 유동폭)

$q_T$ : 계단의 자유 유동 상태에서 문을 통해 계단에 이르는 특별 유동

$D_{max}$ : 최대 유동 밀도

$D_T$ : 계단이 혼잡하지 않을 때 문을 통해 계단에 이르는 밀도

복도에서 유동의 마지막 사람이 계단실 입구에 배열한 후의 혼잡은 다음 속도로 감소한다.

$$v_T, STAU = v_T, D_{max} \cdot b_{T1} / b_{TR} \dots (24)$$

여기서,

$v_T, D_{max}$ : 최대 밀도일 때 출입구를 통한 유동 속도

복도에서 유동의 이동은 [그림7]에서  $f \cdot STAU$ 로 표시된  $t_{f \cdot STAU}$  순간에서 끝나며,  $t_{f \cdot STAU}$ 는 층으로부터 나가는 시간이다.

혼잡은 층계에서도 발생하는데 특별유동이 서로 합류되는 과정을 시작으로 출입문에서 계단으로 배열하면 끝난다. 이 때문에 계단에서의 유

동은 다음과 같은 비율로써 뒤쪽으로 확대된다.

$$u''_{TR,STAU} = (Q_{TR, Dmax} \cdot b_{TR1} / b_{TR} - Q_{TR, n}) / (D_{max} - D_{TR, n-1}) \dots (25)$$

여기서

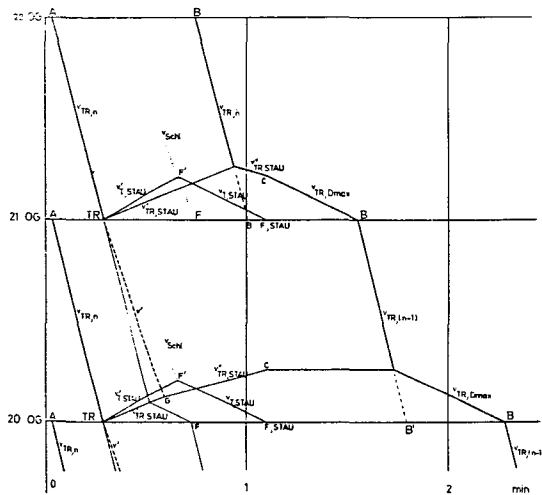
$u''_{TR,STAU}$ : 계단에서의 혼잡속도.

$Q_{TR, Dmax}$ : 최대 밀도일 때 계단에서의 특별 유동

$b_{TR1}$ : 계단의 주 유동에서 위층으로 부터의 특별 유동 폭

$Q_{TR, n}$ : 혼잡이 없을 때 계단에서의 특별 유동

$D_{max}$ : 최대밀도



[그림 7] 건물 B :  $f=0.18m^2$  일때 이동과정이 계산되었다. 혼잡에 의한 지연 시간은  $\Delta T=0.47$ 분이며 각층에서 반복된다. 1m가 채 안된 길이를 가진 방호된 로비는 전체 피난 시간에 영향을 주지 못한다.  $T_{ges}=16.39$ 분이다.

$D_{TR, n}$ : 혼잡이 없을 때 계단에서의 유동 밀도 (또는 위층으로 부터의 특별 유동 밀도)

여기서 두가지 다른 상황이 발생하는데

1.  $t_F + t_{TR} > t_{F,STAU}$  일 경우

즉, 위층에서 대피하는 마지막 사람이 계단에 배열 하기전, 최상층의 아래층에서 대피하는 사람이 계단실에 들어온다면 위층으로 부터의 특별 유동은  $t_{F,STAU}$  다음에 전체 계단의 폭을 이용할 수 있다. [그림7]. 이 경우 계단에서의 혼잡 속도는 다음과 같다.

$$u''_{TR,STAU} = (Q_{TR, Dmax} - Q_{TR, n}) / (D_{max} - D_{TR, n}) \dots (26)$$

위층으로 부터 대피한 마지막 사람이 계단에 배열한 후 혼잡은  $u_{TR, Dmax}$ 의 속도일 때 감소하게 되는데, 최대 밀도일 때 계단에서의 유동속도와 일치한다.

2.  $t_F + t_{TR} < t_{F,STAU}$  일 경우

아래층에서 대피한 마지막 사람이 계단실에 들어오기전 위층에서 대피하는 마지막 사람이 계단에 배열한다. 이 경우 계단에서의, 혼잡은 다음 속도일 때  $t_{F,STAU}$ 까지 감소한다.

$$u_{TR,STAU} = u_{TR, Dmax} \cdot b_{TR1} / b_{TR} \dots (27)$$

여기서,

$u_{TR,STAU}$ : 최대밀도일 때 계단에서의 유동 속도

$b_{TR1}$ : 주 유동의 위층으로 부터 나오는 특별 유동의 폭

$b_{TR}$ : 혼잡하지 않은 유동상태에서 위층으로 부터 나오는 유동폭 또는 계단의 폭

계단실 입구에서 혼잡이 끝난후 위층으로부터 나오는 특별유동은 또 다시 계단의 전체폭을 이용할 수 있다. (n-1) 층에서의 이동과정은 그림에서 TR STAU 로 표시된 점에서 완결된다.

(n-1)층에서 아래층으로 이동하는 유동은 각기 다른 두 그룹의 사람으로 이루어진다. 앞쪽의 이동 매개변수는  $Q_{TR, n}$ 과  $u_{TR, n}$ 인데 그것은 초기 유동의 매개변수이다. 이 그룹은 (n-1)층의 매우 혼잡한 지역에서 나오는 피난자와, 최대치보다 더 낮은 밀도를 가진 특별 유동에 의해 이동하는 피난자들을 따른다.

([그림1] 뒤에는 최대밀도  $Q_{TR, Dmax}$ 에서 특별 유동에 상응하는 두가지 다른 밀도의 값이 있다.)

이 두 그룹의 사람들이 합류되는 동안 그룹간의 경계는  $u''$ 의 속도로 위치가 변하는데, 속도  $u''$ 는 다음식에 의해 결정될 수 있다.

$$u'' = (Q_{TR, Dmax} - Q_{TR, n}) / (D_{TR, n-1} - D_{TR, n}) \dots (28)$$

여기서

$Q_{TR, Dmax}$ : 최대 밀도일 때 계단에서의 특별 유동

$Q_{TR, n}$ : 이동 초기일 때 계단에서의 특별 유동

$D_{TR, n-1}$ : (n-1)층의 혼잡한 지역에서 나오는 사

람들의 밀도

$D_{TR, n}$ : 계단에서의 초기 유동 밀도

동시에 (n-2)층의 복도와 (n-1)층과 (n-2)층 사이에 있는 계단에서의 유동의 이동은 상부층에서의 유동 이동과 같은 방법으로 형성된다. 그곳에서 계단의 뒤쪽으로 배열하여 이동하는 유동속도는 위에서 언급한 경계에  $t_{F,STAU}$  보다 앞서 도달하거나 뒤에 도달하느냐에 따라 달라질 것이다.

( $t_{F,STOU}$ 는 어떤 층에서 피난하는데 걸리는 시간이다.)

이동하는 배열의 끝이  $t_{F,STAU}$  이전에 경계선에 도달한다면 혼잡도는 식(21)에 의해 얻어지지만, 그렇지 않은 경우의 혼잡도는 다음식으로 예측된다.

$$v_{TR,STAU}^{n} = (Q_{TR, Dmax} b_{TR1} / b_{TR} - Q_{TR} Dmax / Dmax - P_{TR, n-1}) \dots (29)$$

이 경우 두 그룹 즉, 유입되는 유동이나 따라잡는 유동의 특별한 유동값이 같다는 것에 주목해야 한다.

(n-2)층에서 피난한 마지막 사람이 계단에 진입한 후 계단에서 혼잡한 이동의 길이는 (n-1)층에서 피난한 마지막 사람이 계단에 도착한 후에 변하게 된다. 그런다음 혼잡은 최대밀도에서 유동속도인  $V_{TR, Dmax}$ 의 비율로 감소한다.

(n-2) 층에서의 유동의 이동은 그림에서 B라고 표시된  $t_{TR,STOU}$  지점에서 끝난다.

만일 (n-1) 층에서 나온 마지막 사람이 혼잡 때문에 생기는 어떠한 방해없이 그 다음층에 도달한다면 그 사람은 t, 시간 후에 그 곳에 도착할 것이다. 피난 경로에 있어 혼잡에 의해 야기되는 지연 시간(dt)은 각 층에서 일어날 것이며

$$dt = t_{TR,STAU}^{n} - t_1 \dots (30)$$

으로 예측할 수 있다.  $t_{TR,STAU}^{n}$ 는 유동이 (n-2)층에서 나오는데 걸리는 시간이다.

피난 경로에 혼잡이 있을 경우 고층 건물에서 피난하는데 필요한 전체 시간은 다음 식으로 얻어진다.

$$t_{Ges} = t_{TR,STAU}^{(n-1)} + l_{TR} / v_{TR(n-1)} + (n-2)dt \dots (31)$$

여기서,

$t_{TR,STAU}$ : 유동이 (n-1) 층을 나오는데 필요한 시간

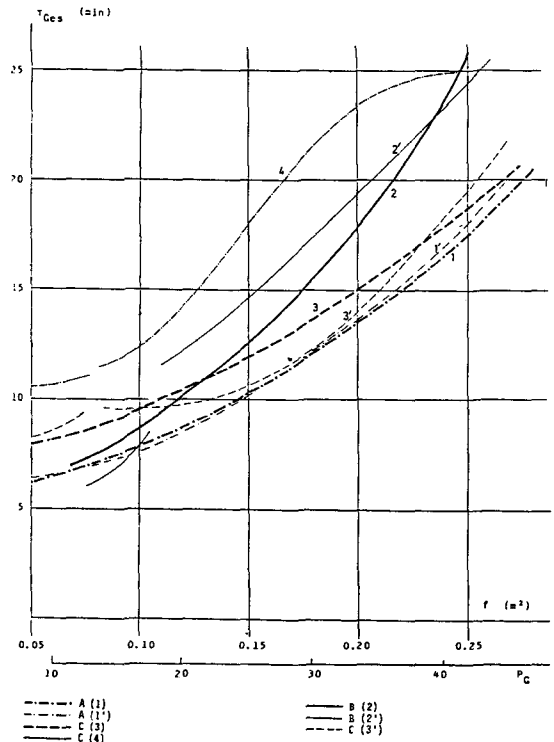
$l_{TR}$ : 연속된 두층 사이를 계단을 통해 이동한 거리

$v_{TR, n-1}$ : (n-1)층의 혼잡한 지역에서 나오는 유동 속도

dt: 혼잡으로 인해 지연되는 시간

n: 건물의 층수

피난하는데 필요한 전체시간  $t_{Ges}$ 는 투영면적 계수(또는 밀도의 증가)에 비해 비선형 방식으로 영향을 받는다.



[그림 8] 고층사무소 건물에 있어 투영면적계수 f와 층당 사람수 P(G)를 위한 전체 피난 시간을 나타낸다. 층당 사람수 P(G)에 대한 전체 피난시간을 결정한 경우는 투영면적 계수가  $f=0.12m^2$ 에서 일정하다고 가정

[그림8]은 투영 면적 계수와 각 층의 사람수  $P_G$ 에 반하여 세워진 세계의 관청 건물에서 피난하는데 걸리는 시간의 변화를 보여준다.



[그림8]에서 곡선 (1) (2) (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Building A (1)} \quad t_{Ges} = 4.6334 \times 208.6954^5 \dots \dots (32)$$

$$r^2 = 0.99$$

$$\text{Building B (2)} \quad t_{Ges} = 4.1981 \times 1,441,4973^5 \dots \dots (33)$$

$$r^2 = 0.87$$

$$\text{Building C (3)} \quad t_{Ges} = 6.3630 \times 74.1953^5 \dots \dots (34)$$

$$r^2 = 0.84$$

한사람당  $5 = 0.12\text{m}^2$ 의 평균값에 의해 식(32)(33)과 (34)로 실제 피난 훈련을 통해 얻어진 것과 같은 피난 시간의 측정을 예측할 수 있다. <표1>에서  $\zeta = 0.12\text{m}^2$ 은 코트를 걸친 성인의 투영면적과 같은 값이다.

실제 피난 실험에 근거를 둔 실험 데이터 범위내에서 한 사람당  $\zeta = 0.12 \sim 0.14\text{m}^2$ 의 평균치를 사용하여 제시된 피난모델의 예측으로 피난경로에서 유동의 이동평가를 위한 적절한 기준을 알 수 있다. 모델의 개선은 확실히 가능하지만 유동 밀도 면에서 특별한 부수적 자료가 요구된다.

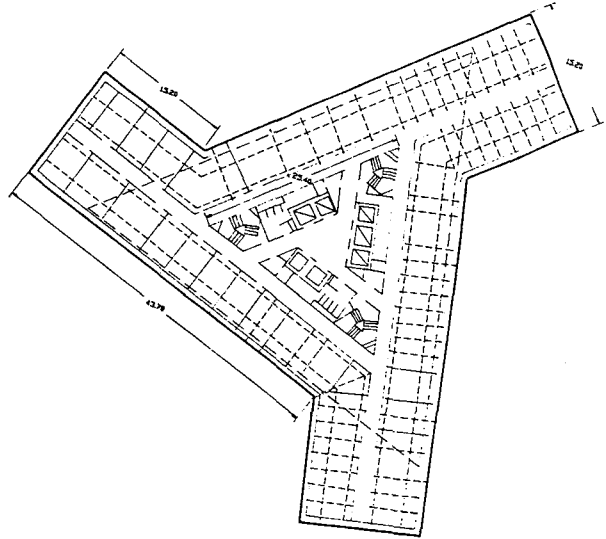
#### 4. 피난 경로의 최적화

[그림9]는 실제 피난 실험이 행해진 고층 관청 건물중 한 건물에 대한 사무실 점유층의 평면을 나타낸 것이다.

이 건물은 1층, 2개의 中二層과 21층의 상부층 그리고 2개의 타워층으로 구성되어 있다. 두층 사이의 높이는 3.60m이다. 삼각형 코어를 중심으로 건물이 배치되며, 계단은 각 코어의 구석에 위치에 있고, 방호된 로비 가까이에 있다.

계단으로 이어지는 연속복도는  $b_F = 2.87\text{m}$ 의 두께이며, 복도의 가장 긴 이동거리는  $1_F = 29.40\text{m}$ 이다. 복도와 방호된 로비 사이의 출입문은 계단으로 통하는 출구와 마찬가지로  $b_T = 0.82\text{m}$ 이다. 1층이 삼각형 모양이기 때문에 계단도 삼각형 기둥을 중심으로 놓여 있으며 상하층 사이에 세개의 창이 있다.

피난 실험중에 이와 같은 계단을 통해 대피한 인원은 567명이었으며, 각 층의 평균 인원은  $P_G$



[그림 9] 고층 관청 건물B의 사무층 평면

$= 26$  이었다. (즉 한사람당 점유 면적은  $20\text{m}^2$ 이었다.) 건물에는 분명히 사람들이 적었음에도 처음 3~4분 동안은 아래층으로의 피난이 지연되었는데 상당히 부적당한 크기를 가진 방호된 로비로 출구가 열려 있었기 때문이다.

이 경우 방호된 로비를 통한 각 층에서 계단 실과 마지막 출구로 통하는 아래층으로 향하는 유동을 예측할 수 있다. 더우기 피난은 이미 시작되었고, 시간 0에서 각 층에 있는 특별 유동중 첫번째 사람이 출입문을 통해 방호된 로비를 지날 것이라고 생각된다.

층과 계단에 대한 사람수, 계단에 이르는 복도 폭, 또는 출입구의 폭을 변화시킴으로써 다음과 같은 출구 모델을 예측할 수 있다.

주어진 데이터에 따라 Ⅱ 항목의 실제 피난 실험에서 예상된 총피난 시간 10.29분은 실제 측정값 10.47분에 상당히 가까웠다.

최상층과 1층을 제외한 위쪽 층에서 피난시간은 혼잡한 상태에서 0.79분으로 측정되었다. 혼잡의 길이는 출입구에서 0.71m이고, 계단에서 1.11m이다.

층과 계단에 대한 인원이 26명에서 40명으로 증가할 때 총 피난시간은 Ⅱ 항목에서 15.34분으로 급격히 증가한다.

복도의 폭이 1.87m에서 1.25m로 감소할 때

(표 3) 최적의 피난 경로 치수를 위한 유동의 비교

	I	II	III	IV
사람수	26	40	40	40
복도길이(m)	29.4	29.4	29.4	29.4
복도폭(m)	1.87	1.87	1.25	1.25
문폭(m)	0.82	0.82	0.82	1.25
복도의 유동밀도	0.07	0.10	0.15	0.15
복도의 유동속도(m/min)	44.43	39.00	32.73	32.73
복도의 특별유동	2.94	3.97	4.99	4.99
최상층에서의 피난시간	0.69	0.80	0.93	0.93
계단의 초기 유동밀도	0.10	0.16	0.12	0.12
위층 출입구에서의 혼잡속도	-1.75	-6.76	-3.17	-0.63
출입구에서 최대 혼잡의 길이(m)	0.71	2.48	1.87	0.41
위층에서의 피난시간(m/min)	0.79	1.10	1.18	1.00
계단에서의 혼잡속도(m/min)	-2.11	-4.31	-2.90	-3.48
계단에서의 혼잡의 최대길이(m)	1.11	2.48	2.23	2.59
계단을 통한 전체 피난시간(min)	10.29	15.34	14.50	14.55
실제 피난시간(참고문헌 8)	10.47			

층당 40명에 대한 총 피난시간은 좁아진 복도의 고밀도로 인해 계단으로 갈 수 있는 사람이 적어지기 때문에 앞의 예에서 측정된 시간보다 적은 14.50분으로 예상되었다. 그러므로 계단에서의 초기밀도와 혼잡의 속도는 감소한다.(III 항목)

### 5. 피난 경로

층계의 폭과 같은 출입구의 폭이 0.82m에서 1.25m로 증가 했을 때 피난 형태는 특별히 변하지 않는다. 이 경우 피난시간은 감소하고, 계단에서의 혼잡은 증가한다(IV 항목).

예상 건물에 대해 각 층의 출입구 길이는 약 110m이다.

복도의 폭이 0.6m정도 줄어들다 해도 유동의 운동은 위험하지 않을 것이다.(총 피난 시간은 단지 조금 줄어들었다고 예측된다.) 그러나 좁아진 복도의 폭은 각층에서 약 70m<sup>2</sup>의 공간이 보태어 진 것을 말하며, 전체 건물에 대해 임대 면적 즉 한층의 면적보다 많은 약 1,540m<sup>2</sup>를 나타낸 것이다.

### 6. 피난경로 설계와 평가를 위한 컴퓨터 프

### 그램

저자는 최근 Basic언어로 컴퓨터 프로그램을 만들었는데 이는 피난형태의 서술을 토대로 Hewlett Packard 150을 위한 것이다. 이 것은 사용자와 컴퓨터의 대화 형식으로 쓰여진 것으로 피난 경로의 구성(각 단면의 폭과 길이) 뿐만 아니라 거주인원을 계산할 수 있게한 것이다. 이 프로그램은 사용자로 하여금 거주인원의 하중을 쉽게 산출하고, 완전한 순환 시스템에 의한 다양한 변화도 계산할 수 있도록 하였다.

미국의 규정과 비교하면 다음과 같다.

미국 소방안전 협회의 규정과 피난 모델의 예측을 비교하는 것은 흥미있는 일이다.

만일 건물에 불이 난다면 어떤 층, t<sub>c</sub>STAU에서 방호된 계단실이나 다른 피난 장소로 대피하는 피난시간이 사람들의 이동관점에서 먼저 고려해 볼 필요가 있다.

미국 소방안전 협회 법규(NFPA 101.26장)에서는 1unit당 75명(1.12m 당 150명)의 거주자를 위한 계단, 외부계단, 스모크 타워의 용량을 규정하였다.

더우기 26장에서는 필요한 출구를 결정하기 위한 목적으로 상업 건물 또는 상업목적으로 사용된 부분의 재실자 하중이 전체 바닥 면적의 100ft<sup>2</sup>(9.3m<sup>2</sup>)당 한 사람이어야 하며, 5-6절에 따라 측정된 출입구의 이동거리는 200ft(60m)라고 규정하고 있다. 각 층의 모든 부분에서 접근할 수 있는 출구가 2개 이상 있어야 할 것이다.)

5- 6.1절은 어떤 거주 공간에서 적어도 한개의 출입구에 이르는 최대 이동거리는 개인의 거주자를 위한 한계를 초과해서는 안되는데 이 한계는 200ft(60m)이다.

이러한 규정은 층당 300명의 거주자와 2개 unit의 폭 두개의 출구를 갖는 층당 면적이 2,800m<sup>2</sup> 정도인 고층 사무소 건물에 허용될 것이다.

계단의 수용정도와 모든 출입구(문·계단)의 폭뿐만 아니라 계단에 이르는 이상적 피난 경로와 혼잡한 상태에서 2.73분 후에 거주자의 마지막 사람이 계단에 대피하는 유동의 형태를 예측할 수 있다.

초만원 상태로 움직일 때의 사람수는 51명인데 이것은 방호된 로비가 적어도 14.2㎡(51m×0.28m)이거나 폭 1.4m인 계단에 층당 150명을 수용할 수 있는 크기임을 뜻한다. 후자에 있어 마지막 사람을 위해 피난하는 시간은 1분이 될 것이다. 유동의 상호 작용없이 층당 35명을 수용할 수 있는 계단의 폭은 1.12m(2unit)가 되어야 한다. 이 경우 한 층에서 대피하는 시간은 0.4분 정도이다.

유통성 있고 효과적인 비용을 산출하기 위해서는 시간이 중요한 기준이 된다. [그림10]은 피난 수단에 대하여 다양한 건축법규의 요구조건과 계산된 계단의 수용능력의 비교를 보여준 것이다.

여기서, 층당 계산된 사람수는 한 층에서의 피난시간이 1분이라는 가정아래 계산될 수 있다. 수평축은 다양한 형태의 요구조건을 수용할 수 있는 계단의 폭과 사람수를 나타내는 반면, 수직축은 예측된 모양을 보여준다. 참고 문헌에 수록된 계단 수용 능력에 관해 조사된 많은 규정을 주목하는 것은 흥미로운 일이다.

이러한 것은 기존 법규가 요구하는 조건을 나타낸 것으로 한 층에서 피난하는 시간이 1분보

다 크다는 것을 의미한다.(영국 규정은 5분이다.)

참고 문헌과 법규에 따라 요구된 사람수와 의 상관 관계는 어떤 층에서 피난하는 시간에 따라 변할 것이다. 즉, 한개의 층으로부터 모든 재실자들이 피난할 수 있는 유효한 시간이 위의 예에서 3분이라 한다면 필요한 계단의 용량은 거주자를 충분히 수용할 수 있을 것이다.

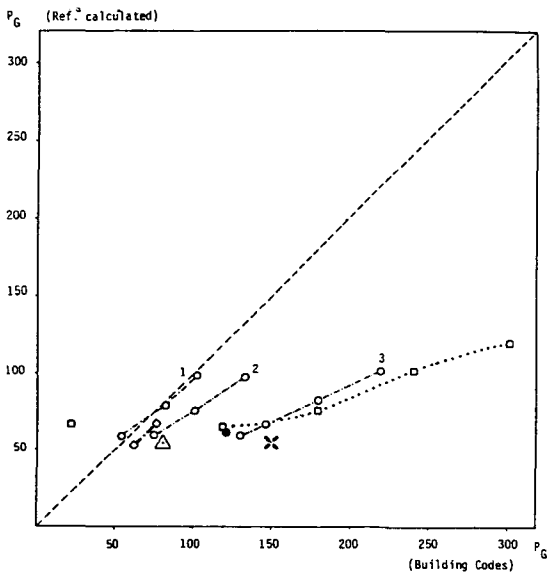
만약 피난 유효시간이 4분으로 예상된다면 필요한 계단폭은 주어진 거주자에 대해서 과대 평가된 것이다.

### 5. 결론

건물이 기능, 크기 및 배치 면에서 다양해짐에 따라 비상시 건물에서의 피난을 확보할 수 있는 피난 방법의 계획에 보다 큰 관심이 필요하다.

이러한 면에서 제안된 피난 모델은 설계자를 위해 유통성 및 예측 수단을 제공해 줄 것이다.

이 모델은 시간에 따른 건물 거주자의 이동을 평가해주고 완전한 순환 시스템에 관해서 출구나 계단에서 생기는 잠재적 혼란에 대한 문제를 취급할 수 있을 것이다.



[그림10] 피난 수단에 관한 건축법규와 계산된 계단용량 피난시간 1분이라는 가정아래 층당 사람의  $P_c$  (참고문헌에 계산) 수

### REFERENCES

1. Stahl, F.I., and Archea, J., "An Assessment of the Technical Literature on Emergency Egress from Buildings." NBSIR 77-1313, Center for Building Technology, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1977.
2. Muller, W.L., "Die Beurteilung von Treppen als Rückzugsweg in mehrgeschossigen Gebäuden." *User Brandschutz* 16, (1966), No.8, wissenschaftlich-technische Beilage No.3, p.65; *User Brandschutz* 16, (1966) No.11, wissenschaftlich-technische Beilage No.4, p. p.93.
3. Galbreath, M., "Time of Evacuation by Stairs in High Buildings." *Fire Research Note* No.8, 1969.
4. Melinek, S.J., and Booth, S., "An Analysis of Evaluation Times and Movement of Crowds

- in Buildings." Building Research Establishment, Fire Research Station, Boreham-wood, UK, CP 96 / 75, 1975.
5. Predtechenskii, W.M., Milinski, A.I., **Planning of Foot Traffic Flow in Buildings**, National Bureau of Standards by Amerind Publishing Co., Pvt. Ltd., New Delhi, 1978.
  6. Pauls, J. L., "Building Evacuation: Research Findings and Recommendations" *Fires and Human Behavior*, ed. D. Canter. New York, John Wiley and Sons, 1980, p.251.
  7. Stahl, F.I., "BFIRES- II :A Behavior Based Computer Simulation of Emergency Egress During Fires." *Fire Technology*, Vol.18, No.1, 1982, p49.
  8. Kisko, T.M., and Francis, R.L., "Network Models of Building Evacuation: Development of Software System." NBS-GCR-457. National Bureau of Standards, Center for Fire Research, Washington, DC, May 1984.
  9. SNIP II -2-80, "Baunormen und Bauvorschriften Teil II :Projektierungsnormen Blatt 2:Brand-schutznormen für die Projektierung von Gebauden und baulichen Anlagen." Staatliches Komitee für Bauwesen(GOSSTROI) der UdSSR. Verlag für Bauwesen, Moskau, 1980.
  10. Fruin, J.J., **Designing for Pedestrians: A Level of Service Concept**. Polytechnic Institute of Brooklyn, 1970.
  11. Kendik, E., "Die Berechnung der Personenströme für die Bemessung von Gehwegen in Gebäuden and und um Gebäude. Technical University of Vienna, 1984.
  12. Garkish, R., and Heindl, W., "Simulation der Räumung eines Gebäudes im Gefahrenfall." Forschungsarbeit im Auftrag des Bundesministeriums für Bauten und Technik, Vienna, 1983 (unpublished).
  13. Kendik, E., "Determination of the Evacuation Time Pertinent to the Projected Area Factor in the Event of Total Evacuation of High-Rise Office Buildings via Staircases. *Fire Safety Journal*, 5, 1983, p.223.
  14. Life Safety Code, NFPA 101, National Fire Protection Assen, Quincy, MA.
  15. British Standard BS 5588, "Fire Precautions in the Design and Construction of Buildings, Part 3." **Code of Practice for Office Buildings**. British Standards Institution, 1983.
  16. Landesgesetzblatt für Wien, Jahrgang 1976, 18. Gesetz: Bauordnung.
  17. Muster für Richtlinien über die bauaufsichtliche Behandlung von Hochhausern. Fachkommission der Bauaufsicht der ARGEBAU, FRG: 1979.
  18. Kobayashi, M., "Design Standards on Menas of Egress in Japan." International Seminar on Life Safety and Egress, University of Maryland, 1981.
  19. Seeger, P.G., and John, R., Untersuchung der Räumungsabläufe in Gebauden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen, Teil III :Reale Räumungsversuche. Stuttgart, Informationszentrum für Raum und Bau fer FgG, 1978, p.395.