

A-09

성능위주의 설계를 위한 성능기준에 관한 연구

김환진, 김원국, 박해준, 최승호, 천지혜
서울대학교 화재안전공학센터

A Study on the Performance Criteria for Performance-Based Design

Hwan-Jin Kim, Won-Kook Kim, Hae-Jun Park, Seung-Ho Choi, Ji-Hye Chun
Seoul National University Fire Safety Engineering Center

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

성능위주 소방설계는 최근 화재안전분야에서 가장 활발히 논의되고 있는 분야 중 하나이다. 일부 소방선진국에서는 이미 15여 년 전부터 도입하여 적용하고 있는 방법이며 미국과 일본도 지난 수년간 성능위주 소방설계에 대하여 활발한 연구를 진행해왔다.

이러한 성능위주 소방설계의 핵심은 시뮬레이션에 의한 화재위험성평가 및 예측에 있으며, 정확한 화재위험성평가 및 예측을 위해서는 프로젝트에 목적에 맞는 성능기준(Performance Criteria) 설정이 매우 중요하다. 하지만 국내에서는 아직까지 이들에 대한 명확한 기준이 정해지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 보다 정확하고 신뢰 할 수 있는 화재위험성평가 및 예측을 위하여 성능위주 설계의 필수요소인 성능기준에 대한 국외의 법규 및 자료를 검토하여 국내에 부분적으로 도입 되어있는 성능위주 소방설계를 위한 성능기준의 참고자료를 만드는 동시에 그 기준의 범위를 검토해보고자 한다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구는 성능위주의 소방 설계를 위한 외국의 법규와 실제 건축물의 적용 사례를 통하여 적용된 성능기준을 조사·비교·분석 하였으며 성능기준의 적용에 대한 근거와 적용범위를 검토하였다.

2. 성능기준

본 장에서는 소방선진국에서 적용하고 있는 성능기준의 종류와 그 근거를 밝히고 각 나라별 성능기준을 조사하여 비교·분석하였다.

2.1 거주자 인명안전 성능기준

거주자 인명안전 성능기준은 세 가지 종류로 나눌 수 있다. 열적 영향(Thermal Effects), 독성(Toxicity), 그리고 시계(Visibility)이다.

2.1.1 열적영향 (Thermal Effects)

화재 발생시 공기온도의 상승은 크게 대류와 복사를 통하여 이루어지게 된다. 이 중 대류에 의한 공기온도의 상승은 거주자가 정상적인 호흡을 하는데 어려움을 주며 더운 가스층과 화원으로부터의 복사열은 직접적인 피부의 화상이나 화상을 통한 정신적인 쇼크 등을 일으킨다. 각 나라별 열에 대한 성능기준은 [표-1] 과 같다.

[표-1]을 살펴보면 복사에 의한 기준은 $2.0\text{kW/m}^2 \sim 2.5\text{kW/m}^2$ 의 범위를 가지고 있고 바닥으로부터 반사되는 복사의 기준으로는 10kW/m^2 의 성능기준을 갖추고 있다. 또한 호흡하는 공기온도의 기준으로 $65 \sim 220^\circ\text{C}$, 상층부 연기층 온도로 $80 \sim 200^\circ\text{C}$ 의 범위를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 일본의 경우에도 주위 공기온도를 일반적으로 25°C 로 볼 때 위의 범위를 만족하게 된다.

[표-1] 열에 의한 거주자 인명안전 성능기준

국가	성능기준		
미국	복사열: 2.5kW/m^2 미만 거주자가 호흡불능 조건가정 - 100°C 의 습한 공기 - 220°C 의 건조한 공기	Perkins 실험 Babrauskas 제안	[2] & [3]
	상층부온도: 80°C 미만 바닥에 반사되는 복사열: 10kW/m^2 미만	-	[4]
캐나다	공기온도: $65 \sim 190^\circ\text{C}$ 복사열: 2.5kW/m^2 미만 상층부온도: $183 \sim 200^\circ\text{C}$	NRC (National Research Council of Canada) 제안	[6]
스웨덴	복사열; 1) 최대 10kW/m^2 에서 나오는 단기복사열 2) 1kW/m^2 의 복사에서 나오는 에너지에 더해지는 최대 60kJ/m^2 복사에너지 공기온도: 80°C 미만	Swedish Building Regulations (5:36)	[1]
호주	연기층온도; 1) 연기층높이 > 2.1m 일때 - 200°C 미만 - 복사열: 2.5kW/m^2 미만 2) 연기층높이 < 2.1m 일때 - 100°C 미만	Australian Fire Engineering Guideline (FCRC, 1996)	[1]
일본	복사열: 2.0kW/m^2 미만 연기층온도 = $140 + T_\infty$ 미만 (Mall과 같은 대공간일 경우)	-	[2]
뉴질랜드	상층부온도: 200°C 미만 (Mall과 같은 대공간일 경우)	Fire Engineering Design Guide	[2]

2.1.2 시계(Visibility Effects)

시계에 대한 영향은 화재 발생 시 발생하는 연기와 더불어 시계가 확보되지 않아 발생하는 심리적인 문제까지 고려해야 한다. 각 나라의 시계에 대한 성능기준은 [표-2]와 같다.

[표-2]를 살펴보면 시계에 대한 거주자 인명안전 성능기준은 가시거리와 연기층 높이로 인한 시야확보의 문제로 나누어 질수 있다. 가시거리의 경우 일반적인 공간일 경우 2~4m의 범위를 보여주고 있으며 Mall과 같은 대공간일 경우에는 최소 10m 이상의 기준을 보여주고 있다. 한편 연기층 높이 측면에서는 일반적인 방의 높이를 3m 로 가정해 볼 때 최소 1.9m 이상의 높이를 기준으로 삼고 있음을 알 수 있다.

[표-2] 시계에 의한 거주자 인명안전 성능기준

국가	성능기준	비고	참고문헌
미국	1)거주공간의 경우 OD/m=0.5 (2m 이상)	1) Babrauskas 제안	[2]
	2)Mall 같은 대공간의 경우 OD/m=0.08 (12.5m 이상) OD: Optical Density 4m 이상	2) Rashbash 제안 -	
캐나다	일반적인 실: 2~3m 그 외의 실: 10m 이상	NRC (National Research Council of Canada) 제안	[6]
스웨덴	연기층높이: 1.6+(0.1H)m 이상 H: 방 높이	Swedish Building Regulations (5:36)	[1]
호주	연기층높이 < 2.1m 일때 OD/m<0.1 (10m이상) (Mall과 같은 대공간일 경우)	Australian Fire Engineering Guideline (FCRC, 1996)	[1]
일본	연기층높이: 1.6+(0.1H)m 이상 H: 방 높이	-	[2]
뉴질랜드	연기층높이: 2m 이상	Fire Engineering Design Guide	[2]

2.1.3 독성에 의한 영향 (Toxicity Effects)

독성에 의한 성능기준은 미소당량복용량(Fractional Equivalent Dose)을 기준으로 하며 그 양은 사망 혹은 질식을 일으키는 수치를 표현한다. 이 기준들은 [표-3]에 정리되어 있다.

[표-3]에서는 여러 독성성분에 대한 성능기준을 보여주고 있다. CO의 경우, COHb (Carboxyhemoglobin)의 수치가 30~40%, 즉 CO와 결합한 헤모글로빈의 양이 전체 헤모글로빈의 30~40%가량 차지하는 경우를 기준으로 삼고 있다. 이산화탄소 CO₂의 경우에는 5~6%이하, 시안화수소 HCN의 경우에는 80ppm 이하를 거주자 인명안전 성능기준으로 삼는다. 또한 산소 O₂의 함유량은 최소 10~15% 이상을 기준으로 하고 있다.

[표-3] 독성에 의한 거주자 인명안전 성능기준

국가	성능기준	비고	참고문헌
미국	의식불명: 34% COHb COHb: 헤모글로빈에 포함되어있는 Carboxyhemoglobin 의 농도	Stewart식 %COHb = $(3.317 \times 10^{-5})(\text{ppm CO})^{1.036} \text{RMV}(t)$ ppmCO=CO 농도[ppm] RMV= 호흡하는 공기부피[L/min] t=노출시간	[2]
	CO _{30min.} < 1400ppm	-	[4]
	CO _{30min.} < 1400ppm HCN < 80ppm O ₂ > 12% CO ₂ < 5%	-	[3]
	COHb < 30~40% HCN < 80ppm O ₂ > 12% CO ₂ < 5%	Stewart식 Kimmerle dose	[5]
캐나다	CO < 1400ppm~1700ppm HCN < 80ppm O ₂ > 10%~15% CO ₂ < 5%~6%	NRC (National Research Council of Canada) 제안	[6]

2.2 소방관 인명안전 성능기준

소방관의 인명안전 측면에서 추가적으로 고려되는 것이 건축물 붕괴 발생여부이다. 소방관들은 화재가 성장하여 더 열악한 환경, 즉 거주가 불가능한 상황에서 진화작업을 수행하여야 하므로 위에 언급한 내용들은 적용되지 않는다.

2.2.1 건축물 구조 붕괴 (Structural Failure)

건축물 구조의 성능기준으로 [표-4]에서 보는 바 같이 철골구조에서 구조물 온도가 538℃이상으로 상승하지 않아야 한다. 이는 내화재료나 단열재의 열용량 (Heat Capacity)을 고려하지 않은 기준이다.

[표-4] 구조붕괴에 의한 소방관 인명안전 성능기준

국가	성능기준	비고	참고문헌
미국 & 캐나다	철골구조 경우: Ts < 538℃	$\Delta T_s = \frac{K_i}{C_{sh} W/D} (T_f - T_s) \Delta t^{10}$ Ts: 철의 온도, Tf: 화재온도 Ki: 열전도율 Csh: 열용량 W: 넓이 D: 길이 ASTM E-119 기준	[2]&[6]

2.3 재산보호 성능기준

재산보호 성능기준에는 화재의 전파와 연기의 전파가 고려된다.

2.3.1 화재 전파 (Fire Spread)

화재 전파는 거주공간 내에서의 화재 전파와 거주공간 밖에서 일어난 화재의 전파 이렇게 두 가지의 경우를 나눠서 고려한다.

[표-5]를 보면 거주공간 내에서의 화재전파는 상층부 온도 기준으로 500℃~600℃의 범위를, 거주공간 밖에서 일어난 화재로부터의 전파는 325℃를 성능기준으로 잡고 있다. 또한 바닥으로부터 반사되는 복사열이 10kW/m²~20kW/m² 범위에 있다.

[표-5] 화재전파 영향에 의한 재산보호 성능기준

국가	성능기준	비고	참고문헌
미국	1)거주공간에서의 화재전파 상층부온도 < 577℃ 2)거주공간 밖에서 일어난 화재로부터 전파 상층부온도 < 325℃	1) Thomas Flashover 식 2) 325℃의 온도는 대부분의 유기고체가 열분해를 하는 평균온도	[2]
	거주공간에서의 화재전파; 상층부 온도 < 500℃~600℃ 바닥에 반사되는 복사열: 10kW/m ² ~20kW/m ² 미만	Thomas Flashover 식	[4]
	거주공간에서의 화재전파; 상층부 온도 < 600℃ 바닥에 반사되는 복사열: 20kW/m ² 미만	Thomas Flashover 식	[7]
캐나다	거주공간에서의 화재전파; 상층부 온도 < 600℃ 바닥에 반사되는 복사열: 20kW/m ² 미만	NRCC (National Research Council Canada) 제안	[6]

2.3.1 연기 전파 (Smoke Spread)

재산보호 측면에서 연기의 영향은 인명기준과 달리 그 물질의 연기에 민감성과 연기의 종류와 양에 따라 다르게 나타난다. 따라서 연기에 의한 직접적인 영향을 평가하는 것보다는 주변공간의 온도변화에 의한 연기전파의 여부로 판단하게 된다. 연기전파 여부의 기준으로 주변온도보다 20℃ 이상 올라갈 때를 성능기준으로 삼고 있다.

[표-6] 연기전파 영향에 의한 재산보호 성능기준

국가	성능기준	비고	참고문헌
미국	한지역의 온도가 주변온도보다 20℃ 이상 올라갈 때	-	[2]

3. 결론

본 연구에서는 참고문헌을 통해 각 나라에 대한 성능기준을 조사하여 정리하였다. 그 중 거주자 인명안전 성능기준은 열, 시계, 독성에 의한 영향으로, 소방관 인명안전 성능기준은 건축물에 구조붕괴의 가능성으로, 재산보호 성능기준은 화재와 연기 전파의 가능성을 기준으로 살펴봐왔으며 이는 [표-7]에 정리되어 있다. [표-7]에 정리된 성능기준은 소방

선진국들이 사용하고 있는 하나의 참고자료로서 성능기준에 대한 가이드이며 모든 경우를 만족하는 절대적 기준이 될 수는 없다. 예를 들어 열에 의한 영향의 경우 거주자가 호흡할 수 있는 최대온도 성능기준은 220℃인데 반해 상층부 최대 온도를 200℃로 잡는 것은 문제점이 있어 보이는 범위이다. 이는 각 프로젝트의 목적이나 설계에 따라 변경되어질 수 있음을 보여주는 것이다. 이들에 대한 보다 구체적인 기준의 제시는 현재 진행되고 있는 선진국들의 연구과제중의 하나이며 이에 우리나라 역시 성능위주의 소방설계 도입은 물론 여러 조건에 따른 성능기준의 개발이 필요하다 하겠다.

[표-7] 선진 소방국 성능기준 범위

목적		성능		
거주자 인명안전	열에 의한 영향	거주자에 노출되는 복사열 [kW/m ²]	2.0	2.5
		바닥에 반사되는 복사열 [kW/m ²]	-	10
		호흡되는 공기의 온도 [°C]	65	220
		상층부 연기온도 [°C]	80	200
	시계에 의한 영향	일반적인공간의 시계확보 [m]	2	4
		대공간의 시계확보 [m]	10	-
		실내의 연기층높이 [m]	1.9	-
	독성에 의한 영향	CO [ppm]	1400	1700
		HCN [ppm]	-	80
		COHb [%]	30	40
O ₂ [%]		10	15	
CO ₂ [%]		5	6	
소방관 인명안전	건축물구조붕괴	철골구조온도 [°C]	-	538
재산보호	화재전파	거주공간에서의 화재전파 [°C]	500	600
		거주공간 밖에서 일어난 화재전파 [°C]	-	325
		바닥에 반사되는 복사열 [kW/m ²]	10	20
	연기전파	특정지역온도 - 주변온도 [°C]	20	-

참고문헌

1. "Case Studies, 3rd International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods Volume 1", SFPE, 2000
2. "Case Studies, 3rd International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods Volume 2", SFPE, 2000
3. Thomas F. Barry, "Risk-Informed, Performance-Based Industrial Fire Protection", TFBarry Publications, 2002
4. Richard L.P. Custer and Brian J. Meacham, "Introduction to Performance-Based Fire Safety", SFPE, 1997
5. David A. Purse, "Toxicity assessment of Combustion Product", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition, NFPA, Quincy, MA, 2003

6. Georgy V. Hadjisophocleous and Noureddine Benichou, "Development of Performance-Based Codes, Performance Criteria and Fire Safety Engineering Methods", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes V.2 No.4, pp16~18, 2000
7. NFPA 555, "Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover", NFPA, MA, 2000