



성능위주 방화설계의 세계적 흐름과 적용



이수정

서울산업대학교 안전공학과

1. 서론

산업 발전과 인구의 급격한 증가에 따라 건축물은 고층화 및 인텔리전트화 되어가면서, 화재로 인한 인적·물적 손실은 계속적으로 증가하고 있다. 따라서 과거보다 구체적이고 근본적인 대책의 마련이 필요하게 되었다.¹⁾ 현재의 소방시설의 설계는 사양중심(Prescriptive Based)의 체계로 되어 있다. 우리나라의 경우는 사양중심 체계로 되어있으나 외국에서의 공학적 도구와 연구를 바탕으로 하는 성능위주의 방화설계에 대한 연구가 시작되어 기존에 개발된 화재저동과 연기이동 및 피난의 소프트웨어를 이용하여 소방대상물의 열분포, 연기이동, 피난특성, 발생열량 및 내화도 등을 분석함으로써 적합한 방화설계가 진행중이다.

성능위주 방화설계의 가장 중요한 점은 화재의 성상을 정확히 예측하고 이에 대한 대비책을 수립할 수 있고, 이에 대한 대책을 세우는 것은 소방시설의 효율화뿐 아니라 과도한 시설을 막아 비용을 절감할 수가 있다.

국내에서 성능위주 방화설계의 사례로 인천 신공항 여객터미널의 방화구획 설정, 고속 철도의 청사에 대한 방화성능 평가, Atrium 공간 내의 사무실과 방화구획 문제(유리창문) 및 ASEM 빌딩 지하공간

내의 Windows Sprinkler 시스템으로 하는 경우에 방화구획으로 일정하는가에 대한 사례들이 있다.

본 고에서는 성능위주 화재안전 설계의 외국의 현황과 미국의 라스베이거스에 소재한 에펠탑II에 대한 성능기준을 바탕으로 한 화재안전설계, 대형쇼핑몰에서의 피난평가와 화재영향평가 및 가연성 액체 취급소의 성능기준 안전설계에 대해서 적용한 Case Study를 언급하면서 전반적인 성능위주의 방화설계를 언급하고자 한다.

2. PBD(Performance Based Design)의 세계적 흐름과 국내현황 분석²⁾

2.1. 영국

1985년 Building Regulations를 개정하면서 성능기준을 사용한 표현으로 법문을 기술하였고, 법이 요구를 실현하는 방법(사양)에 대한 법조문을 폐지하였다. 그 대신 법의 요구를 실현하는 방법으로 구속력을 갖지 않는 승인 기준서가 상술되었다. 즉, 성능에 대한 규정을 어떤 신뢰도가 있는 방법으로 동등한 성능을 가지고 있다는 것이 증명되면 설계를 인정하는 시스템으로 개정한다.

2.2. 일본

화재안전전략과 기술적 도구를 기본으로 총체적인 화재안전설계 시스템의 개발(1981~1985)을 하여

LSK@duck.ac.kr

화재안전기술(FSE)은 실제로의 적용범위까지 확대하였다. 프로젝트설계가이드라인을 공식적으로 1987년에 발표함으로써 화재안전설계방법이 대중적으로 자리를 잡고 있다. 일본 건물표준법(BSL)은 1999년 6월 기능적인 부분을 가미해서 부분개정 되었다. 관련된 성능스케일은 시행령에 포함되며, 평가의 상세 수단들은 아직 발표되지 않고 있다. 그러나 몇 가지 제안들이 일본화재연구공학회에의해 일본 건축물센터의 화재안전지침 개발을 위한 위원회의 활동과 일본건축사 협회의 화재안전설계 소위원회의 자발적인 활동을 통해 만들어졌다.

2.3. 뉴질랜드

1992년판 빌딩코드가 효력을 나타내면서 기존의 사양중심기준을 허용방안이라 하여 유지하는 한편 성능기준적인 조항을 도입하여 체계를 구축하고 구체적으로 어떤 단계의 성능으로 해야하는가는 설계자, 건축주, 행정당국의 3자가 협의를 하고 있다. 평가기준을 설계자, 건축주, 행정당국이 확정하여 공학적기법을 적용하여 평가기준에 대한 적합성 판단을 행정당국과 제3자인 전문가가 판단한다.

2.4. 호주

Warren Centre 회의와 1989년 출판된 보고서를 기초로 성능기준 화재안전을 도입하였다. 이를 계기로 호주의 빌딩코드(BCA; Building Code Australia)의 개정을 위한 비영리 기관인 FCRC가 설립되었다. BCA Code 개발이 1990년에 이루어져 호주내 빌딩규정을 통합하였고 1996년 BCA Code(목적, 기능적일람표, 성능요구사항, 성능기준제도를 포함)는 재개정을 이루었다. BCA의 목적은 다음과 같다.

- 건물내 화재로 인한 손해와 손실에 대한 안전 관리
- 화재시 건물을 피난하는 동안의 손해와 안전 관리
- 응급서비스의 활동촉진
- 주변건물로의 화재 확대 방지
- 화재로 인한 건물의 구조적 문제로 야기된 물리적 손상의 보호

2.5. 스웨덴

1994년 Swedish Code가 성능기준적인 조항을 도입하여 개정되었다. BBR94는 성능요구사항과 화재안전기술을 나타내고 BKR94는 적합건주사항을 나

타내었다. 스웨덴의 규정은 영국, 뉴질랜드의 설계 지침과 유사하고 기본적인 요구사항, 계산방법과 이에 따른 예제, 불확실성, 한계 초과시 해결방안의 제안, 허용된 해결 방안 등이 수록되어있다.

2.5.1. 화재안전설계프로세스

화재안전프로세스는 정량적인 디자인검토(QDR)로 시작된다. QDR 중에 화재안전설계의 범위와 목적이 정의되고 확실한 성능기준과 하나 또는 그 이상의 가능성 있는 설계 해결방안들이 제시된다. 또한 정량적 분석에 입력자료로 사용될 중요한 정보가 수집된다. 화재의 단계별 인적, 물적 영향을 나타내는 6개의 서브시스템을 사용하여 분석한다. 서브시스템은 화재의 성장, 발전, 연소부산물의 전파, 화재근원지로부터의 화재, 화재감지, 화재안전시스템의 동작, 화재서비스의 개입, 거주자의 탈출 등을 다룬다.

2.6. 미국

SFPE를 중심으로 PBD에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. SFPE는 SFPE Guide Book³⁾를 발간하여 성능기준 설계에 대한 방법론을 나타내고 있다.

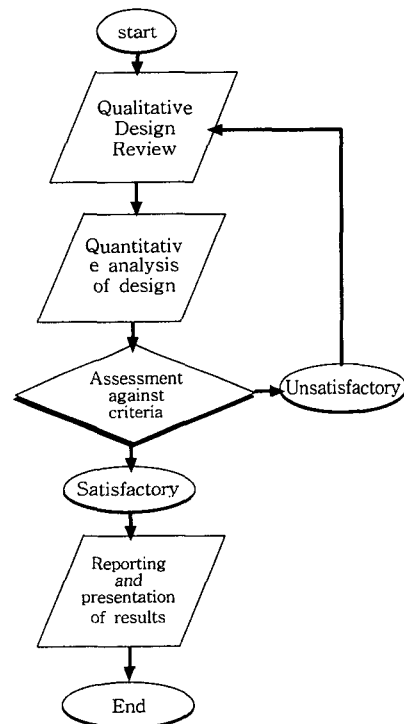


Fig. 1. Fire Safety Design Process(Sweden)

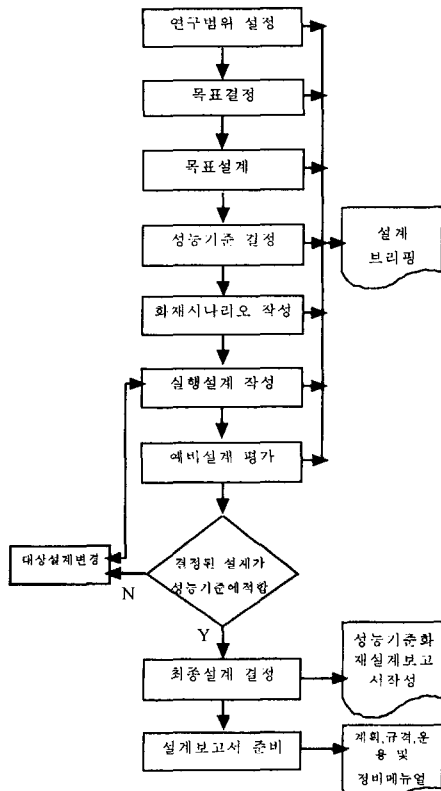


Fig. 2. Overview of the PBD Process(SFPE)

성능기준 화재안전 설계에 대한 논리적인 프레임을 제공하고 다양한 건축물들과 서로 비슷한 구조물들에 대해 성능을 평가하도록 결정론적이고 확률론적인 접근법 모두를 이해시키고 있다.

2.7. 국내여건 분석

성능위주의 소방법에 대한 국외의 연구 및 관심과는 달리 국내에는 이에 대한 관심이 아직 부족한 상태이다. 특히 경제위기 등으로 인하여 그렇지 않아도 열악한 국내 소방분야의 발전이 더욱 더디어지고 있는 실정이다. 그러나 학계와 보험협회 등에서 이에 대한 연구가 진행중이며 아울러 과학기술부에서 주관하는 국제과제인 인위재해 방재기술 개발사업의 2단계 사업이 1998년부터 시작되어 성능기준화재안전설계 적용기술 개발 연구가 한참 진행중이다.

현재 우리나라는 소방법⁴⁾ 체계의 사양위주의 설계 및 공사·감리가 이루어지고 있으나, 소방법 제32조(소방시설의 자체점검)1항의 단서 및 제65조의

Table 1. The result of judgement in central fire safety technology committee (korea)

일시	심의내용	조치실적
1998.9	스프링클러의 배관 관련	수용불가
1998.12	제연설비 자동차압 제어댐퍼 관련	신기술 인정
1999.3	제연설비 관련 (특별피난계단, 승강장)	신기술 인정
1999.4	인천국제공항의 소방시설 관련 (소화설비 등)	보완조치
1999.5	인천국제공항의 소방시설 관련 (방화구획 등)	수용 및 보안
1999.9	인천국제공항의 소방시설 관련(등)	수용
1999.11	FM-2000 및 주소형감지기 관련	부동의 및 수용
1999.12	급기가압방식 등	부동의
2000.2	급기가압방식 등	부동의
2000.4	습식스프링클러의 격자형 배관방식 적정성	수용

4(소방시설의 설계 및 감리)①항의 단서조항에 의하여 특수장소의 위치·구조·용도 또는 그 특수장소에 설치되는 소방시설의 공법 등이 특수한 경우로서 행정자치부령이 정하는 바에 의하여 소방안전기술위원회의 심의를 거친 때는 그러하지 아니하다(99.9.13일자 개정)로 개정되어 우리나라의 현행 법령상으로도 성능기준설계가 도입되었다고 볼 수 있다. 그러나 중앙소방안전기술위원회가 활동하고 있어 이러한 부분을 어느 정도로 좀더 유연한 태도를 가질 필요가 있다.

3. 적용 사례

3.1. 에펠탑 II의 성능기준 화재안전설계

북아메리카의 전통적인 게임과 카지노 도시인 네바다주 클라크 카운티(라스베가스)에 에펠탑을 모사해서 에펠탑의 1/2 크기의 건물이 세워졌다. 에펠탑의 높이는 540ft(170m)이다. 3,700ft²(350m²)의 주방공간을 포함하여 단독층인 레스토랑의 넓이는 10,200ft²(950m²)이고, 지상으로부터 75ft(23m)에 위치해 있으며, 카지노 지붕에서 약 40ft(12m) 위쪽에 위치해 있다. 넓이 1,470ft²(136m²)의 전망대는 약 98명의 재실자를 수용할 수 있고 지상으로부터500ft(150 m)에 위치해 있다.

이 건축물에서 화재안전설계목적은 화재진행동안 재실자들의 안전확보와 재산보호에 목적이 있다. 기

능적인 요구사항은 재실자들의 피난시간을 확보하고 화재진압시간을 확보하더 건물의 붕괴 및 인접건물에 피해를 방지한다.

3.1.1. 화재시나리오

카지노에서 일어난 화재 경험으로 비추어 화재위험분석은 건물화재 사고와 방화 사건을 고려하여 사고시나리오를 작성, 대형화재의 노출은 방화로 일어난 것이다.

- 1) 15MW정도의 화재가 카지노 밖에서 일어남.
- 2) 카지노에서 플래쉬오버 화재 이후 지붕을 뚫고 카지노의 지붕 꼭대기 다리에 노출됨.
- 3) 출구 앞쪽 근처 카지노에서 플래쉬오버 이후 화재가 정문 다리 바닥에 노출됨.
- 4) 카지노 바로 아래쪽의 지붕에서 10MW 화재가 있고 외부 다리에 노출됨.
- 5) 에펠탑 레스토랑에서 플래쉬오버 이후 화재가 지붕을 통해 지붕 꼭대기의 외부 구조요소들에 노출됨.
- 6) 레스토랑의 지붕에서 5MW의 화재가 외부다리에 노출됨.
- 7) 전망대에서 1MW 화재가 발생.

Fig. 3은 에펠탑II에서 화재가 일어나는 시나리오

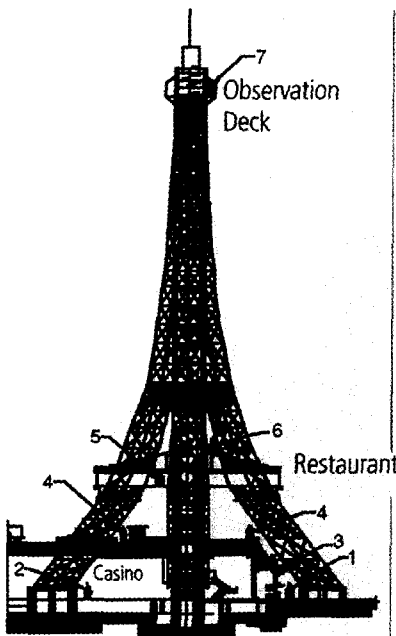


Fig. 3. Graphical Depiction of Fire Scenarios

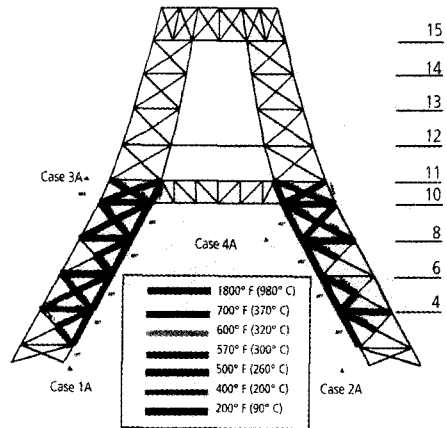


Fig. 4. Heat Reaction Analysis of Eiffel Tower II

의 지점을 나타내며, Fig. 4는 시나리오 1~4까지 강 의 온도를 보여준다.

3.1.2. 에펠탑II의 허용해법

- 1) 심한 화재로 화염 안에 둘러싸일 부분에 한 시간동안의 화재 저항.
- 2) 열가소성 물질, 팽창되는 절연 보(EIFS), 혹은 외부 구조의 20ft내에 카지노 구조로 쓰이게 될 섬유유리강화 플라스틱 등의 사용금지.
- 3) 외부 구조물에 위치한 모든 지붕에 최소한 2시간의 화재 저항성을 지니게 할 것
- 4) NFPA 13에 근거한 스프링클러 설치
- 5) 충분한 물 공급을 위해 여유 있는 소화용수 또는 대체하는 물 확보.

3.2. 대형쇼핑몰의 성능기준화재안전 설계⁵⁾

3.2.1. 화재시나리오

1) 대상건물의 개요 : 건축물은 판매시설로서 대형 할인 매장이며 창고형 점포이다. 건축면적이 6,425.24 m²이며, 지하1층 지상 7층으로 구성되어 있다. 또한, 최고 높이는 33.3m이며 지상 1층에서 지상 4층은 판매시설로 활용되며 지상 5층에서 지상 7층은 주차장 시설로 이용되고 있다.

2) 다중적으로 동시에 일어나는 화재의 경우는 시도하지 않고 완벽히 저지른 방화에 대한 경우를 제외한다. 진화설비들은 각각의 설계에 따르는 작동과 작업순서에서 작동되고 수동적이고 능동적인 시스템들이 절충되어진 동시에 일어나는 화재발생과 다른 재해들이 일어나지 않는다. 매장내에서의 화재는 정상상태로서 HRR이 5MW이다.

Table 2. Egress Time Calculation by FASTLite

	사람수	1인당 피난속도 (m/s)	출입문을 지날 때 사람수 (person/s)	최대이동거리 (m)	이동시간 (s)	총출구 피난시간 (s)
4 Exit Doors	2,690	1.006	0.744	90.13	90	900

3.2.2. 피난평가

FASTLite⁶⁾의 Egress Model을 사용하여 NFPA의 Life Safe Code⁷⁾에 의해서 피난을 위한 비상구를 4개를 확보(권장사항)하여 계산할 결과치이다. 개구부 4개가 열려진 상태에서 성인의 보행속도를 1.003m/s로 보았을 때, 최초로 비상구를 통하여 나온 사람의 시간은 90초이며 전체가 나올 때는 약 900초가 걸렸다.

3.2.3. 화재영향 평가

FASTLite 실행 결과 최고온도는 상층부 220초에서 103℃, 하층부의 경우 920초에서 43℃로 최고 온도를 기록하였다. 또한, BRANZFire 경우 105초만에 64.8℃를 나타내었다.

이 건축물은 상층부온도 보다 하층부 온도에 대해서 더욱 관심이 있는 것은 빌딩의 층고가 높기 때문이다. 1.8m 이상의 온도보다는 그 이하의 온도가 성능기준에 합당하다. 사람에게 대한 성능기준인 100℃ 미만으로 시뮬레이션 결과가 나왔으므로 사람에게 크게 영향을 주지 않는다. 또한 가시도(Visibility)는 매장과 같은 장소에서 Rashbash는 OD/m=0.08이

되어야 약 10m의 가시거리 확보가 가능하다고 제안하였다. 이 값은 지형에 친숙치 못한 재실자가 피난 동선을 찾을 수 있는 값이다. BRANZFire 수행결과 20m로 나타났다. FASTLite와 BRANZFire 결과 연기 층의 높이가 1.8m 이상을 나타내고 있음을 알 수 있

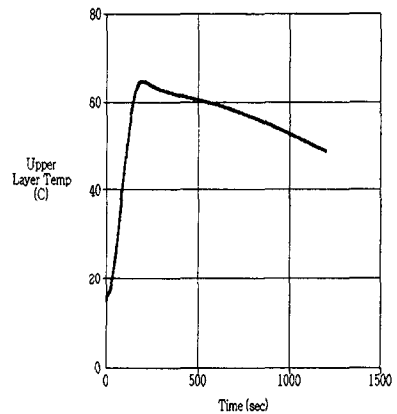


Fig. 6. Upper Layer Temperature

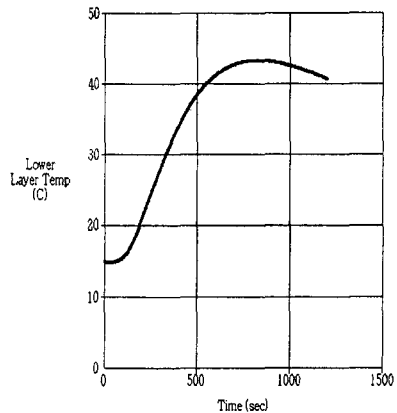


Fig. 7. Lower Layer Temperature

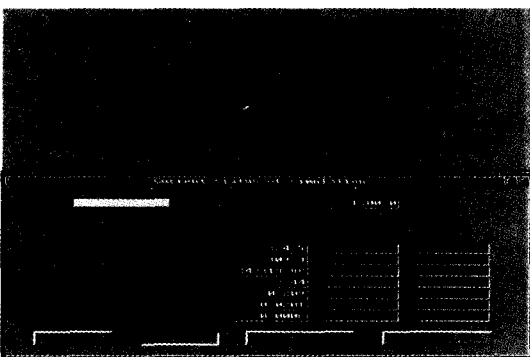


Fig. 5. A Picture of the Simulation Result for Scenario

Table 3. Results of Simulation for Scenario

Software	Event	Time(s)	HRR(kW)	Upper layer Temp	Max. Temp	Layer Height(m)
FASTLite	No Flashover	1,200	5,000	51	103	2.93
BRANZFire	No Flashover	1,200	5,000	48.7	64.8	1.9

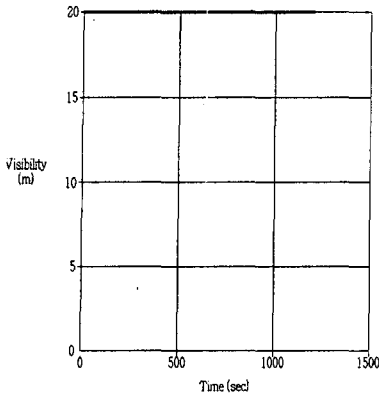


Fig. 8. Visibility of BRANZFire

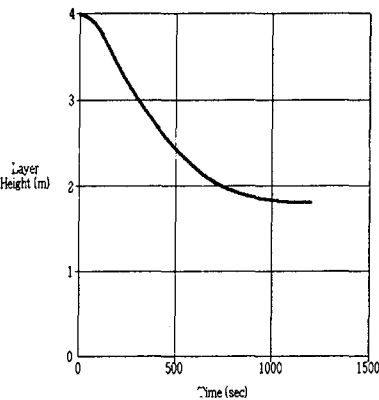


Fig. 9. Layer Height of BRANZfire

다. 따라서 가시도는 피난에 대하여 아무런 방해요소가 되지 않는 것으로 판단된다.

3.2.4. 구조물의 성능분석

화염에 노출된 철골의 성능평가는 Milke가 제안한 $\Delta T_s = \frac{K_i}{C_{sk} W/D} (T_f - T_s) \Delta t^{10}$ 에 의하여 화염의 내부 온도 범위가 1,500°C에서 2,000°C(SFPE Handbook)라는 것과 철재 변화 온도가 538°C이라는 것을 기본으로 할 때 철은 40분에서 57분 사이에 붕괴될 것으

로 계산된다. 이를 성능 기준에 대한 평가를 하면 화재감시시간 5분, 화원 위치 도달시간 5분, 소방차의 소화펌프 진압 15분 총 25분으로서 구조물의 붕괴는 없을 것으로 본다.

3.3. 보가 있는 공간에서의 화재시 스프링클러 반응시간 예측⁸⁾

현재 국내에서는 건축물의 설계 시 소방시설에 대한 고려가 잘 이루어지지 않고 있다. 이러한 문제점 중 천장 보의 깊이가 0.7m~1.2m정도가 되는 공간에서의 스프링클러 헤드의 설치 위치에 대하여 논란이 많다. 이에 대해서 화재모델링의 기법을 사용하여 스프링클러 설치 위치와 반응시간에 대하여 알아보았다.

3.3.1. 대상선정과 화재시나리오

내화구조에의 헤드 설치를 가정하면 헤드의 간격이 약 3.2m가 되므로, 헤드를 배치하기 불리한 조건으로 만들기 위해서 보의 간격을 4m로 하였다. 구획은 콘크리트로 구성되었으며 환기조건은 화재의 성장과 상부의 연기 축적에 영향이 없는 조건으로 설정하였다.

3.3.2. 모델링 수행결과의 비교분석

본 연구에 대해서 필드모델을 응용한 SMARTFIRE를 이용하여 데이터를 얻을 수 있었다.

1) 보의 하단부와 보의 화재방향 측면부와의 온도 분포 : 화재 발생으로부터 150초까지 각 Case의 온도는 거의 비슷하고 보의 화재방향 측면부의 온도분포는 0.45m가 빠르게 상승하며, 0.75m, 1.2m 순으로 1.2m인 경우가 가장 늦게 상승하는 것을 보여준다. 이는 보가 있는 구획에서의 화재시 보의 하단부보다 보의 화재방향 측면부가 화재의 성장에 따라 빠르게 온도가 상승함을 알 수 있다.

2) 스프링클러 헤드의 작동시간에 대한 비교 : 0.45m보다는 1.2m의 보에 설치되는 헤드가 더 빠르게 반응하였다. Table 5에서와 같이 보의 하부와 보

Table 4. Validation Properties for Each Case

	Room Size	Beam Size	Vent Size	Max, HRR	Fire Growth Curve
Case 1.	4m(H) × 12m(W) × 12m(D)	0.45m(H) × 0.3m(W)	3m × 3m	5MW	Ultrafast
Case 2.	5m(H) × 12m(W) × 12m(D)	0.75m(H) × 0.4m(W)	3m × 3m	5MW	Ultrafast
Case 3.	6m(H) × 12m(W) × 12m(D)	1.2m(H) × 0.6m(W)	3m × 3m	5MW	Ultrafast

Table 5. Comparison with Response Time of Sprinkler Head for Each Case

	보의 하부	보의 화재방향 측면	시간차이
Case 1	119초	85초	34초
Case 2	109초	87초	22초
Case 3	106.5초	88.5초	18초

의 화재방향 측면에 설치되는 스프링클러 헤드의 반응시간 차이는 34초 미만으로 판명되었다. 그러므로 두 위치에 설치되는 헤드의 반응시간 차이는 많은 시간차이를 보이지 않으며, Ultrafast의⁹⁾ 화재 성장 조건에서 5MW에 도달하는 시간인 163.1초 이전에 모두 반응하는 것으로 나와 화재를 진압하는 측면에서 볼 때 어느 부분에 설치하는지는 문제가 되지 않는 것으로 나타났다.

3) 평가 : 보의 화재방향 측면부분의 온도가 보의 하단부에 비하여 신속하게 상승하며, 시간이 지날수록 두 부분의 온도 차이는 더욱 벌어지는 것을 알 수 있었다. 그러나, 보의 하부와 보의 화재방향측면에 위치된 스프링클러헤드의 반응시간은 각 Case 별로 34초, 22초, 18초를 나타내어 보의 구조에 따라 차이를 보이고 있으나, 모두 5MW에 도달하기 이전에 모두 작동되어 스프링클러 헤드 설치 시에는 두 위치 모두 무방한 것으로 나타났으며, 보의 깊이가 깊은 경우 0.45m 이하로 헤드의 감열부가 내려가도 충분한 작동을 하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

성능기준화재안전 설계가 전세계적으로 활성화 되어가고 있다. 세계적인 흐름에 능동적으로 대처함과 동시에 국내 소방기술력 확보를 위해 성능기준 화재안전 설계의 개념이해와 각국의 동향을 파악하였다. 그리고 또한, 성능기준 화재안전설계에 대해서 몇가지 Case Study로 연구하였고, 이를 뒷받침하기 위해서는 계속적인 화재안전 연구와 모델링 개발과 이에 대한 전문가의 육성이 필요하다.

1) 미국, 영국, 일본, 스웨덴, 호주, 뉴질랜드의 화재안전시스템은 나름대로 그들의 실정에 맞게 진행되어가고 있다.

2) 우리나라에서도 그 움직임이 중앙소방기술위원회의 인가 등으로 일어나고 있다. 하지만 아직까지 사양중심적인 것에서 성능위주 화재안전설계로

의 발전이 요구된다.

3) 에펠탑II에서 재실자의 피난에 도움이 되는 지연시간과 구조물의 기본요소들은 똑같은 화재 구획 안에서 지지대를 이루는 어떤 요소들이 얼마만큼의 내화성능을 지녀야 하는가에 초점을 두어 설계하였다. 가상화재 시나리오는 화재에 대한 가상 피해영향을 분석하였다. 가상화재 시나리오들에 의한 시간이 지남에 따른 노출부의 최고온도를 나타내었다. 가상화재 시나리오에 의한 화재위험 분석, 열반응 분석, 성능 특성을 만족하는 내화도 및 내화시간 결정하여 각 구조물들의 내화시간이 산출되었다.

4) 대상 건축물에서 NFPA Code 101에서 규정하는 100℃ 이내의 화재온도에 못 미치는 43℃, 45℃ (FASTLite, BRANZFire)의 결과치가 나왔다. 이는 피난시 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 4개의 비상구가 열린 상태에서 성인의 보행속도를 1.003m/s로 보았을 때, 최초로 비상구를 통하여 나온 사람의 시간은 90초이며 전체가 나올 때는 약 900초가 걸렸다. 가시도가 20m로 재실자가 피난시에 크게 지장 받지 않는다.

5) 보가 있는 공간에서 스프링클러 반응시간에 대해서는 각 Case별로 모델링 수해결과 보의 깊이가 깊은 경우 0.45m 이하로 헤드의 감열부가 내려가도 충분한 시간에 작동하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 이수경, “성능기준 방화설계의 개황”, 방재와 보험, Vol. 85, 2000.
- 2) NFPA, “3re International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Method; Proceedings”, Lund Univ. Sweden, 2000.
- 3) SFPE, “SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Building” NFPA, 2000.
- 4) 소방법규편찬위원회, “소방관계법규집” 지다리.
- 5) 임정원 외 4명, “2000년도 한국화재·소방학회 추계 학술대회 논문집” 한국화재·소방학회, 2000.
- 6) Rebecca W. Portier., Richard D. Peacock., Paul A. Reneke, “FASTLite; Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport”, NIST.
- 7) NFPA, “NFPA Code 101; Life Safety Code”, NFPA.
- 8) 김종훈 외 2명, “2000년도 한국화재·소방학회 추계 학술대회 논문집” 한국화재·소방학회, 2000.
- 9) James G. Quintiere, “inciples of Fire Behavior”, Delmar Publishers, 1998.