

화재방호시설의 성능위주설계 요소

Factors in Performance-Based Design of Facility Fire Protection

Jane I. Lataille, P.E.

대다수의 방화기술자들은 성능위주설계(Performance-Based Design, PBD)와 규범적 설계(Prescriptive Design)의 차이점에 대해서는 잘 알고 있지만, 화재방호시설을 유지 관리 하는데 있어서 PBD의 장점, 초기설계 및 재검토 비용, 설계 타당성 검증을 위한 장기유지비용, 용도변경으로 인한 재설계비용 간의 차이점에 대해서는 잘 모르고 있는 것 같다.

여기서 우리는 화재방호 관점에서 PBD의 일반적인 특징들을 다시 한 번 생각해보고, PBD에 의한 새로운 기술과 화재모델링을 통해 완성된 설계의 특징에 대한 몇 가지 예를 살펴볼 것이다. 아울러 PBD의 비용요소와 PBD 사용자의 입장에 대해서도 논의할 것이다.

□ PBD의 일반적인 특징

PBD는 그 이름에서도 알 수 있듯이 특수한 성능수준을 만족시키는 설계로 구조공학과 기계공학분야에서는 수십 년 동안 PBD를 사용해 오고 있다.

예를 들어, 구조공학기술자는 교각을 건설할 때 교각의 순수한 하중 외에 동하중, 사하중, 설하중, 풍하중, 지진 등 다른 많은 하중요소로부터 교각이 지탱할 수 있도록 교각의 수많은 구조요소들의 치수를 예측하여 구조 계산을 통해 교각이 이러한 하중들을 충분히 지지할 수 있음을 입증하고, 기계공학기술자는 열기로 가득한 공간을 서서히 냉방상태로 변환시켜주는 HVACR 시스템을 설계할 때, 열교환계산을 통해 HVACR 시스템의 냉방효과를 증명한다.

방화공학분야에서 PBD는 새로운 발전양상이다. PBD에 의한 방화시설 설계의 한 형태는 화재 시 거주자가 빌딩을 안전하게 피난하기 전에 연기가 하강하여 피난에 장애를 주지 않도록 설계하는 것이다. 여기서 방화공학기술자는 빌딩에서 예상되는 여러 유형의 화재의 연기성장과 거주자의 피난계산을 통해 빌딩 내 거주자의 안전성을 입증해야 한다.

PBD에 의한 또 다른 형태의 방화시설 설계는 어떤 일정량의 가연물 종류가 저장된 구획 공간 내 화재가 플래시오버로 진행되지 않도록 설계하는 것으로, 이를 증명하기 위해 방화공학기술자는 화재의 진행과정에서 나타나는 구획 공간의 층 온도(layer temperature)와 열방출률을 산출한다. 플래시오버의 발생시점을 측정하는 것은 그 구획 공간 화재가 다른 장소로 연소 확대되어 다른 공간에 거주하는 거주자들에게 어떠한 영향을 미치는지에 대한 예측을 돕는다.

이러한 형태의 PBD는 빌딩의 화재방호성능을 만족시키는데 많은 유연성을 주기 때문에 더욱 널리 보급되고 있지만, 방화공학에서 PBD의 사용은 다른 공학 분야와는 달리 표준화되어 있거나 법제화되어 있어 사회적으로 인정된 값이 아니기 때문에 간단하지가 않다. 그리고 PBD는 어떤 설계가 적합한지에 대한 견해와 더불어 그 방법론을 제시하고, 계속적으로 발전하고 있기 때문에 다른 공학 분야보다 방화공학 분야에서는 일반적으로 보급되어 있지 않다. PBD로 화재성상을 예측하는 것은 날씨를 모델링하는 것만큼 복잡하다. 그러나 날씨 모델링은 화재모델링보다 수많은 세월동안 연구한 결과물이 많기 때문에 날씨 예측에 대한 정확성이 화재성상예측의 정확성보다 더 우수하다.

화재 시 진압시스템의 효과에 대한 모델링은 비교적 복잡하고 화재모델링 또한 100% 완벽하지 않기 때문에, 이러한 모델을 이해하고 적정하게 사용하는 것에 어려움을 느낄 수 있다.

□ PBD의 사례

규범적 코드는 폭넓고 다양한 특징을 갖고 있는 시설물에 동일하게 적용된다. 즉, 사무용 빌딩은 층수, 보행거리 또는 화재하중에 관계없이 동일한 규범적 코드가 적용되는 것이다.

만약 동일하게 적용되는 몇 가지 특징을 제외하고 빌딩마다 서로 다른 규정이 적용된다면, 규범적 방호계획은 빌딩마다 다양해질 수 있다.

PBD는 설계의 최종 목표로부터 추출된 특수한 가설에 기초하여 각 빌딩에 유일한 필수사항들을 설계하게 되는데, 아래의 3가지 예가 그러한 설계를 설명하고 있다.

📁 PBD의 3가지 예제

사무용 빌딩의 PBD는 그 빌딩에 대한 특수한 가설에 기초하고 있으며, 제안된 방호계획은 이러한 가설이 적정하다는 것을 보여주기 위해 모델을 사용한다. 가설 관련 내용은 다음과 같다.

- 각 사무실은 4개의 서랍으로 구성된 금속재 서류보관 캐비닛이 최대 2개 설치되어 있으며, 각 캐비닛은 평상시 닫힌 상태로 약 100 kg 정도의 가연물질을 저장하고 있다.
- 각 사무실은 5개의 면으로 구성된 금속재 쓰레기통이 최대 4개 설치되어 있으며, 각 쓰레기통은 평상시 뚜껑이 닫힌 상태로 약 25 kg 정도의 가연물질을 저장하고 있다.

이러한 설계에 있어서 장점은 스프링클러설비가 NFPA 13 기준에 모두 만족하지는 않지만 그 빌딩을 효과적으로 방호할 수 있다는 것이며, 단점은 그 가설들 중 일부라도 변경사항이 있으면 모든 것이 무효가 된다는 것이다. 즉, 그 가설을 초과하는 화재 하중을 갖는 사무실이나 가연성 칸막이로 구획된 개방형 사무실에 있어서는 스프링클러설비의 방호능력이 부족할 것이다.

유사한 방법으로 실험실에 대한 PBD도 가정할 수 있다.

- 유일한 위험물질은 소량의 가연성 액체이다.
- 각 실험실은 UL이 인증한 가연성 액체 저장용 캐비닛에 인화성 물질을 저장하고 있다.

쇼피센터에 대한 PBD는 거주자의 걱정된 피난시간을 측정하기 위해 연기제어설비를 적용할 수 있다. 이러한 설계는 특수한 화재시나리오에 기초한 결과, 세입자의 활동을 제한함으로써 그들이 원하는 성능을 만족시키지 못할 수도 있지만, 빌딩 공간 내에서 연기가 축적되는 장소를 결정할 수가 있다. 이렇게 하면 연기축적을 위한 공간을 설계에서 별도로 정할 수 있게 되어 새로운 점포들은 연기축적을 위한 공간을 설계에 반영하지 않아도 된다.

이러한 PBD의 3가지 예는 단순한 가설일 뿐이다. PBD는 그 빌딩에서 미래에 유연성을 확보하기 위해 가장 최악의 상황을 가정한다. 그러나 이들 가설은 여전히 방화시설의 미래 효용성을 제한할 수 있다.

PBD 수행은 설계 및 시공의 모든 과정에 있어서 관할기관과의 밀접한 관계를 필요로 하며, 관할기관은 일반적으로 경험이 풍부한 방화기술자가 이러한 설계를 검토하기를 원하고 있다.

□ PBD에서 화재모델링의 사용

컴퓨터화재모델은 방화설비의 PBD 실현을 위해 사용 빈도가 날로 증가하고 있다. 대부분의 컴퓨터화재모델은 실제 발화장소에서의 화재 영향을 100% 완벽하게 모델화하지는 못한다. 예를 들면, 컴퓨터화재모델은 온도, 연기의 하강, 화염전파, 플래시오버의 도달시간 등 많은 데이터를 예측하는데 화재모델링 결과 얻을 수 있는 데이터의 종류는 아래와 같다.

- 파이어 플룸, 화염분출 및 연기층의 온도
- 파이어 플룸의 속도
- 연기층의 높이
- 플래시오버의 도달시간
- 환기의 한계
- 개구부 및 환기구를 통한 유출량

- 목적물의 발화소요시간
- 화염전파
- 스프링클러헤드 및 감지기의 동작
- 구조부재의 내화성능
- 연기의 이동
- 거주자의 피난

화재모델은 다양한 방법으로 이러한 영향을 시뮬레이션 하는데, 그 이유는 현대 컴퓨터의 능력으로는 분자 레벨(molecular level)의 화재를 정확하게 모델링하는 것이 불가능하기 때문이다. 따라서 화재모델은 방(rooms)과 화염의 대규모 특징들만을 고려하고, 여기에 많은 근사값을 사용한다. 또한, 구획 공간 및 화염 형상에서의 모델링의 한계성을 인정하고 있다.

이러한 모델을 적정하게 사용하여 측정된 결과값이 무엇이고, 그 근사값은 얼마이며, 어떠한 한계성이 적용되었으며, 그 결과값이 모델링된 시설물의 리스크를 얼마나 잘 반영할 수 있는지를 알아야 한다. 이러한 지식수준은 여러 모델링의 경험과 방화공학 분야에서의 축적된 기초지식에서 나오게 된다.

화재모델링프로그램을 사용하는 것도 어렵지만, 화재모델로부터 나온 결과물을 재검토하는 것은 더 어렵다. 입력 자료에 대한 세밀한 검토와 그 모델링이 입력 자료를 어떻게 모델화하는지에 대한 세부적인 이해과정이 그 모델의 적정한 사용 여부의 판단에 필수적이다.

몇몇 모델은 컴퓨터로 생성한 화재의 특징을 나타내기 위해 실험화재시험으로부터 생성된 결과물을 사용하기도 한다. 이러한 모델은 시험에서 사용된 화재(같은 형태의 같은 크기의 화재에서의 같은 물품의 연소)와 유사한 화재를 분석하는데 유용할 뿐 아니라, 조건이 다른 모델에 이 시험 값을 사용할 경우 어떤 차이점이 발생하는지를 이해하는데 도움을 준다.

컴퓨터화재모델은 점점 널리 보급되어 가고 있으나 모든 방화시설 설계의 문제점을 해결하지는 못한다. 이들 모델은 계속 발전하고 있으며 주의 깊게 적용되어야 한다. 아무리 경험이 풍부한 방화공학기술자일지라도 몇몇 화재모델링의 적용에서는 여전히 어려움을 호소하고 있다.

□ PBD에서 새로운 기술의 사용

컴퓨터화재모델과 더불어 화재방호를 위한 PBD는 새로운 방화설비 기술을 사용할 수 있다. 스프링클러헤드와 화재경보설비 등과 같은 설비들이 개발 중에 있으며, 다른 새로운 설비들도 개발 중이다.

스프링클러헤드와 화재경보설비의 새로운 기술들은 규범적 규칙이 있는데, 이는 새로운 기술이 개발되면 기존의 기술은 일반적으로 뒤쳐지게 된다는 것이다. 새로운 기술이 규범적 코드로 승인되기 전에 PBD는 이미 새로운 기술을 사용하는데 익숙해져 있다.

□ 스프링클러헤드 기술

표준 분무형 스프링클러헤드는 물이 표준형 오리피스를 통과하여 특수한 분무 패턴을 생성하는 디플렉터에 부딪쳐서 흐른다. 이것은 주거용 스프링클러헤드가 개발된 해인 1981년까지 북아메리카지역에서 거의 독점적으로 사용되었다. 주거용 스프링클러헤드를 개발한 기술력은 특정한 기하학적인 구조 또는 특수한 위험을 수용하고 있는 비거주지역에 대해서도 신속하게 응용되었다.

현재 많은 스프링클러헤드가 특수한 기하학적인 구조에 사용될 수 있도록 개발되어 있으며, 기타 스프링클러헤드는 특수한 위험을 방호하기 위해 이용할 수 있다.

현재 이용가능한 특수한 기하학적 형태의 스프링클러헤드는 다음과 같다.

- 다락용 스프링클러헤드 (Attic sprinklers, 지붕과 반자사이에 설치)
- 창문용 스프링클러헤드 (Window sprinklers)
- 은폐공간용 스프링클러헤드 (Concealed space sprinklers)
- 확장형 스프링클러헤드 (Extended coverage sprinklers)

현재 이용 가능한 특수한 위험의 방호용 스프링클러헤드는 다음과 같다.

- 초대형 오리피스 스프링클러헤드 (Very large orifice sprinklers)
- 라지드롭 스프링클러헤드 (Large drop sprinklers)
- 화재조기진압용 스프링클러헤드 (Early Suppression Fast Response sprinklers)
- 특수형 스프링클러헤드 (Special sprinklers)

규범적 코드의 체제에서 특수한 형상의 스프링클러헤드는 해당 스프링클러헤드의 등록 사항에 열거되어 있는 설치 위치와 배치간격의 규정에 따라서 설치되어야 한다. 이와 유사하게, 특수한 위험의 방호용 스프링클러헤드 또한 아주 엄격한 규정에 의해 설치되어야 한다. 예를 들면, ESFR 스프링클러헤드는 저장물품의 상단과 지붕사이에 장애물이 없는 여유 공간을 가진 상태에서 최대높이까지 한정된 유형의 저장물품을 보호할 수 있는데, 이를 위해서는 ESFR 스프링클러헤드의 설치 위치와 배치간격에 대해 엄격한 규정을 적용하여야 하고 그에 따른 엄격한 수력기준을 충족시켜야 한다.

특수한 기하학적 형태와 위험용으로 설계된 스프링클러헤드를 사용하는 것은 설계조건과 제한사항에 관한 해박한 지식을 필요로 하며, 특수한 스프링클러헤드가 개발되면 될수록 용도가 변경될 때마다 설계변경의 필요성이 더욱 많아지게 된다.

따라서 용도에 맞는 스프링클러헤드를 선택하는 일은 과거보다 더욱 복잡해지고 있다.

□ 화재경보설비

화재경보설비는 빌딩 내 부적합한 상황을 감시한다. 부적합한 상황에는 스프링클러헤드, 수동식 발신기, 연기감지기 또는 열감지기의 작동 시에 발하는 경보음, 열의 손실 또는 스프링클러설비의 제어밸브의 폐쇄 등의 감시상태와 전원 차단이나 회로의 단선상태 등을 포함한다.

기존의 화재경보설비는 방재실에 일반적인 신호만을 보내고, 경보에 대한 세부적인 정보나 경보를 발하는 장소에 대해서는 방재실 또는 소방대원에게 제공하지 않았다. 즉, 이 설비는 화재경보만 발할 뿐, 동작한 장치가 무엇이고 그 장소가 어디인지는 알 수가 없어 관리자들이 직접 그 장소를 조사해야 했다.

오늘날의 전자경보설비는 한층 더 발전되어 전기회로는 매우 단순해지고 더 많은 장치를 감시할 수 있게 되었다. 이러한 설비는 설비에 연결되어 있는 장치를 상시 감시하고 있어 수시로 현재 상태를 확인할 수 있다. 장치 자체도 고성능화되어 장치에 문제가 발생하면 즉시 감시제어반으로 신호를 전송한다. 예를 들면, 어떤 종류의 연기감지기는 먼지 등으로 인해 오염되면 감도를 스스로 조정해서 감시제어반에 이러한 상황을 전송한다.

이러한 경보설비는 감시자(응답장치)가 원하는 정보를 알 수 있도록 프로그램화시킬 수 있다. 즉, 이 설비는 장치가 설치된 장소와 장치의 종류뿐만 아니라, 만일 어떤 장소에서 경보가 발생하면 취해야 할 행동까지도 감시자(응답장치)에게 알려 줄 수 있다.

이러한 설비에서 그래픽 표시장치는 기본이며, 건물의 평면도가 표시되어 작동된 설비의 정확한 위치와 경보 종류, 필요한 행동을 시각적으로 보여준다. 이러한 표시장치는 보통 빌딩 내 소방대가 접근 가능한 장소에 설치되어 있으며, 방재센터에도 설치될 수 있다.

이러한 첨단화재경보설비는 화재의 경보에 가장 신속하고 효과적으로 응답할 수 있도록 디지털 기술을 적용하고 있으며, 화재 이외의 많은 다른 보호 기능도 갖고 있다. 이러한 특징의 실례로는 호출설비 및 보안설비를 들 수 있다. 이러한 화재경보설비는 화재 이외의 다른 보호 기능이 무용지물 되더라도 화재경보감시기능이 계속 유지될 수 있도록 설계된다.

새로운 다른 기능들이 지속적으로 화재경보설비에 추가되고 있으나 이러한 기능이 코드에 등록되기까지는 수년이 걸리고 있으며, 이러한 코드가 새로운 화재경보 기술의 발전보다 뒤쳐져 있을 때마다 PBD가 그러한 간격을 충족시키기 위해 이용될 수 있다.

□ PBD의 실제 비용

다른 설계와 마찬가지로, PBD도 비용과 편익의 견지에서 타당성을 가져야 한다. 그 이익에 대한 평가는 일반적으로 공정하나, 그 비용을 결정하는 일은 다소 어려움이 있다.

화재방호를 위한 PBD 관련 비용은 다음과 같다.

설계비용 (Cost of the design) : PBD는 규범적 설계보다 더 많은 시간이 소요되고, 많은 자료를 필요로 하며, 또한 특수한 시설에 대한 최상의 방안을 설계할 수 있는 책임자를 구하는 일도 어렵기 때문에 PBD에 적합한 기술자가 적으면 적을수록 설계비용은 높아진다.

검토비용 (Cost of the review) : 설계가 일단 완료되면, 반드시 검토가 필요하다. 검토 작업에 적합한 인력을 구하는 일은 적합한 설계자를 찾는 것만큼 어렵기 때문에 요구사항과 작업량이 많으면 비용은 높아질 수 있다.

추가된 불확실성의 리스크 (Risk of added uncertainty) : PBD에 의한 방화시설의 설계는 감정(鑑定) 및 재검토가 어렵다. 각 설계안은 불확실성을 갖고 있으며, 검토안도 마찬가지로 불확실성을 지니고 있다. PBD는 규범적 설계처럼 유효성이 증명되지 않기 때문에 리스크의 레벨은 더욱 불확실하다.

설계대로 "유지하기" 위한 비용 (Cost to "maintain" the design) : PBD의 가설에 존재하는 모든 시설 특징이 실제에 적용될 때 비로소 그 유효성이 확인되는데, 이러한 특징에는 건물 내벽의 위치와 구조, 위험물질의 양과 저장위치, 그리고 제연구역의 크기 등이 있다. 이러한 특징은 규범적 설계에서는 필요하지 않으며, 빌딩 소유자들은 이러한 사항을 유지 관리할 필요가 없다.

재설계비용 (Cost of redesign) : 최초의 설계안이 지속적으로 유지될 수 없는 상황이 발생하면, 새로운 상황에 맞는 PBD를 계획해야 한다. 시설의 용도측면에서 예상치 못한 변경사항이 발생하면, 규범적 설계가 요구하는 것 이상으로 그 조건에 맞는 PBD의 재설계가 필요하다.

PBD는 스포츠 경기장처럼 용도변경이 극히 적은 건물에는 아주 효과적이다. 이러한 용도 이외의 다른 건물에 PBD를 적용하는 것은 설계 가설의 선택에 있어 아주 뛰어난 판단력을 필요로 한다. 용도가 바뀔 가능성이 큰 빌딩에 최소비용을 들여 PBD를 적용하는 것은 다음과 같은 두 가지의 리스크를 갖고 있다. 첫 째는 설계변경에 대한 추가비용이고, 둘째는 초기 설계안에 의해 예상되었던 리스크보다 더 큰 리스크에 처할 수 있다는 것이다.

출처 : Fire Protection Engineering (No.38, 2008 Spring)

번역 : 대전충청지부 과장 윤종철