

밀레니엄 돔의 화재안전설계

Buro Happold사와 공동으로 Richard Rogers Partnership에서 설계한 밀레니엄 돔은 런던 남서쪽 그리니치의 템스강변에 위치한다. 아주 거대한 건축물이며 반투명의 천장구조물의 경관은 런던의 다른 역사적 건축물들을 압도한다. 바닥면적은 Royal Albert Hall의 13배, Wembley Stadium의 2배에 달하는 약 20에이커 정도가 된다. 이는 Cardington에 있는 화재감시국의 비행기 격납고를 돔 안에 3개나 설치할 수 있는 면적이다.

돔에는 관계직원 2,000명을 포함하여 37,000명을 수용할 수 있다. 원형인 중앙경기장에만 12,500명을 수용할 수 있다. 하루에 55,000명이상이 밀레니엄 돔에 입장하여 전시, 쇼핑, 휴게 시설 등을 이용할 것으로 기대된다.

Buro Happold사의 화재안전 엔지니어링 그룹인 Fire Engineering Design & Risk Assessment (FEDRA)가 이 경이적인 건물의 화재안전전략 설계의 책임을 맡았다. 그 임무는 복잡한 컴퓨터 모델링 기법의 사용과 화재안전 기술의 원리를 완전하게 시험하는 것이다.

1. 건물 세분화

FEDRA는 화재안전전략의 개념을 설명하기 위해 1997년 3월에 그리니치 건축감독기관과 런던 소방서를 방문했다. 모두가 화재안전에 대한 기술적 접근이 필요하다는데 동의하였다.

거대한 규모와 내부의 공간체적 때문에 돔은 작은 도시로 볼 수 있다. 화재엔지니어링의 관점에서 볼 때 중앙 건물, 전시장, 판매시설 등은 개방된 공간의 개별 건물들로 다루어질 수 있다. 이 건축물에서의 방화대책은 제연과 연소확대방지에 있다. 모든 구획 칸막이는 1시간 이상의 내화성이 요구된다. 돔의 판매시설과 기타 구역은 스프링클러설비가 갖추어진다.

건축감독기관 및 소방서와의 협의에서 FEDRA는 통합 설계가이드를 제시하였다. 돔 내부를 이러한 작은 건물로 세분화하는 것은 피난수단, 화재하중조절, 소화수단 등을 고려한 것이다. 돔 내의 전체 화재하중을 설정함으로써 세부 내용물들을 수용하기 전에 지붕과 내부구조에 대한 설계와 시공이 가능할 수 있게 되었다. 돔 내부의 통로를 통해 소방차의 접근이 가능하도록 설계되고 대형 차량의 통행이 가능하도록 충분한 간격을 둔다. 또한, 돔에는 소방용 급수배관과 옥내소화전이 설

치된다.

설계시 고려해야 할 가장 중요한 사항 중 하나는 개방된 돔 구조가 피난시간동안 확실히 견딜 수 있어야 한다는 것이다. 공간 체적, 화재하중, 피난영역 등이 제연설비의 설계에 영향을 끼치는 요소들이다. 피난시간은 피난모델을 사용하여 추정 가능하고 안전피난가능시간(ASET)은 연기 발생모델을 통해 추정 가능하다.

2. 피난수단

돔은 최대로 37,000명을 수용할 수 있다. 방대한 공간이 관련되기 때문에 구역화된 대피영역이 설계의 필수요소이다. 복잡성의 단계별로 세 가지 모델을 사용하여 화재감지 및 방송설비를 적절하게 설치하고 피난수단을 시험한다.

3. 단순모델

피난규정에서는 정상적인 방법을 이용했을 경우의 최대피난거리와 개념적 피난시간에 근거한 피난출구의 폭이 규정되어 있다. 돔은 직경이 320m이며 표준 피난거리 제한을 초과한다. 그러나, 빌딩코드에서는 단지 피난출구의 전체 폭을 185m로 요구하고 있으며, 돔은 둘레 1km의 외벽을 따라 출구 폭의 합계가 300m를 넘는다. 이는 초과되는 피난거리를 어느 정도 보완해 준다. FEDRA의 검토결과는 피난수단의 신뢰성이 충분하다는 것을 나타낸다.

4. 중급모델

다음 단계로 FEDRA는 아래 사항들을 고려한 한 차원 높은 모델을 사용하였다.

- 구역별 대피지연시간
- 화재감지시간
- 사전이동시간
- 계단, 경사로 및 개방된 지역을 통과하는 이동시간
- 줄지어 대기하는 시간

이 다양한 시간들은 화재안전 엔지니어링기법을 사용하여 계산된다. 그러한 기법은 BS DD240 : Use of Fire Safety Engineering Principles와 Chartered Institution of Building Services Engineers Guide E : Fire Engineering에 소개되어 있다.

피난시간은 화재발생지점, 구역인구밀도, 전시물의 배치 또는 관람시간 등에 따라 다양하게 변한다. 각 상황별로 피난시간을 계산하고 설계변경을 하여 병목현상을 줄여야 한다.

5. Exodus 모델

설계에 대한 시험과 FEDRA의 신뢰성을 강조하기 위해 돔의 설계에 그리니치대학에서 만든 피난모델인 Building Exodus를 사용하였다.

그리니치대학의 Galea 교수는 이 모델이 돔의 설계에 사용할 피난분석에 적합한 모델임을 설명하기 위해 FEDRA와 건축감독기관을 방문하였다. 돔 공간의 기하학적 형상은 CAD를 사용하는 Exodus 모델에 간단하게 입력할 수 있다. 다음 단계로 그 공간은 예상되는 수의 사람으로 채워지고 피난실험을 수행하게 된다. 사람마다 식별 가능한 하나의 점으로 표현되어 대피과정을 효과적으로 가시화 시켜준다.

Exodus 모델은 각 사람들마다 나이, 속도, 민첩성 및 인내심 등을 고려한 속성을 적용할 수 있다. 또한, 표준화된 내부시설용도의 배치도 가능

한데 예를 들면, '일반공공시설'의 적용은 무작위의 나이, 민청성을 가진 사람들 그룹이 제공된다. Exodus 모델은 사람과 건물, 사람과 사람의 상호작용을 현실적인 방법으로 모의 실험할 수 있다.

Exodus 모델은 동일한 배치상태에서 여러 번 수행 가능하므로 각 사건마다 실질적인 대피형태는 무작위로 입력되는 최종적 피난속성에 따라 약간씩 다른 결과가 나타날 것이다. 그러므로 피난 시간의 배분을 위해 프로그램 수행 시마다 감도분석이 이루어진다. 결과는 그림형태로 표현되므로 어느 곳에서 병목현상이 나타날 것인지 눈으로 확인이 가능하다. 이런 지역은 피난통로의 변경이 필요할 것이다.

그림 표현방식의 가장 큰 이점은 모델실행에서의 잘못된 부분을 쉽게 발견할 수 있다는 것이다. 만약 잘못된 방향으로 대피하고 있다거나 실내에 머물러 있기만 하는 사람들이 있다면 쉽게 확인이 된다. 화면상에서 각 사람들마다의 피난거리, 사건이동시간, 피난로 등의 정보를 확인할 수 있다.

Exodus 모델을 사용함으로써 피난수단의 신뢰성도 한층 증대될 것이다. 그럼에도 불구하고 도움이 일반인들에게 개방되기 전에 이 모델의 시험을 위한 대피훈련이 실시될 것이다.

6. 연기발생모델

안전피난가능시간(ASET)은 연기발생모델을 통해 결정된다. 연기발생모델의 주요 입력인자 중 하나는 화재의 크기이다. 화재의 크기는 다음과 같은 방법으로 제한이 가능하다.

- 구조재는 가능한 한 Class 0 재료로 제한
- 스포팅클러설비
- 방화구획
- 화재분리(불연속적인 위치에 화재하중 배치)

설계자는 이런 방법과 Class 0 재료를 사용하는 것은 하지만 강제적인 것은 아니다.

7. 단순모델

FEDRA는 대규모 내부공간이 존재하는 곡면 지붕구조물에는 배연설비가 일반적으로 필요치 않다는 기본적 원리에 근거하여 설계하였다. 지붕공간은 연기로 채우기에는 상당한 시간이 필요한 연기저장조 역할을 하고, 이 시간은 연기로 인한 위급한 상황이 되기 전에 피난이 완료될 수 있게 한다. 더구나 동일한 화재하중일지라도 개방된 공간에서의 화재는 반자가 있는 작은 밀폐실에서보다 더욱 느리게 성장한다.

8. Zone 모델

FEDRA는 CIBSE Guide E에 근거한 Zone 모델을 적용하였다. 이 모델은 다음과 같은 입력자료가 필요하다.

- 화재성장속도
- 배연능력
- 연기저장조의 형상

이 모델은 다음과 같은 결과를 출력한다.

- 연기층 두께
- 연기층의 가시도
- 연기의 온도

이 모델은 신속하고 쉽게 수행하기 위해 감도분석을 한다. 그러나 이 경우 Zone 모델은 건물내의 환경적 유동을 고려하지 않으며 사용되는 방정식이 유효한 적용범위를 넘어선다는 단점이 있다. 돔 전체의 체적을 30° 씩 세분화한 구역에서부터 360° 전체를 하나의 체적으로 보는 개념적 연기

저장조를 가정하여 일련의 비교를 하였다. 이러한 비교를 통해 단순모델에서의 가정이 높은 안전율을 갖는 것을 알 수 있었다. 그러나 이 모델은 유효한 적용범위를 벗어나므로 높은 수준의 신뢰성을 위해 Computational Fluid Dynamic (CFD) 분석을 실시하였다.

8. CFD 분석

CFD는 열역학 제1법칙이 적용되는 작은 계에서 유체(이 경우는 공기)의 거동을 계산하는 기법이다. 이 방법은 반복 계산해야 할 양이 엄청나기 때문에 슈퍼컴퓨터급으로만 연산이 가능하다. Buro Happold사는 원자력기구(AEA)의 슈퍼컴퓨터에서 돔의 분석을 수행하였다.

모델링의 첫 번째 단계는 환경적으로 유사한 화재상황을 만드는 것이다. 돔의 경우 공조설비, 굴뚝효과, 조명타워 등의 영향을 고려하여 내부공간에 강한 기류가 형성되는 것으로 내부환경을 설정하였다. Zone 모델에서와 같은 입력자료를 사용하여 화재상황을 발생시켰다.

돔에 대한 CFD 모델의 입력자료는 다음과 같은 사항들이 포함된다.

- 화재성장속도
- 전기적 부하, 사람 등 화재 이외의 열발생량
- 500m/s의 용량인 12개의 배연팬
- 돔 지붕에 설치된 400m²의 루버창
- 보충공기가 공급되는 개방된 출입문의 면적 500m²
- 연기저장조 역할을 하는 돔 내부공간의 기하학적 형상
- 외부 풍압
- 태양열
- 연기발생량

CFD의 결과는 그림형태로 표현된다. 연기층의 가시정도에 대한 가장 유용한 결과출력은 연기 가시도의 등가표면을 구성하는 것이다. 이 분석에서는 50m 가시도의 등가표면이 선택되었다. 알아낼 수 있는 주요한 결과치는 다음과 같다.

- 모델의 지속시간(30분) 동안 상층부(지붕 아래로 10m까지)의 잔류연기량
- 안정상태는 20분 후에 이루어진다.
- 상층부의 연기는 희석된다.
- 상층부에서 성층화되고 부분적으로 유동이 발생하나 연기가 공공시설이 있는 곳까지 아래로 내려오지는 않는다.
- 연기와 가스의 자연배출량은 배연팬 용량의 4배 정도 된다.
- 공조설비의 효과와 돔의 환경적 유동은 화재 발생후 몇 분간은 영향력이 작았다.
- 돔내의 6개 조명타워(고열 발생)가 상층부의 연기유동패턴에 아주 큰 영향을 끼친다.

CFD 모델은 Zone 모델의 결과를 확인시켰다. 연기는 Zone 모델에서보다 더욱 희석되고 냉각되었다. CFD 모델은 연기의 위치와 유동방향을 보여주며 연기가 하층부로 내려오지 않는다는 것을 증명해 주었다.

Exodus와 CFD 모델과 같은 차원 높은 분석 기법은 돔의 설계 신뢰성을 높여준다. Zone 모델과 단순피난계산방식은 비용이 저렴하고 사용하기가 쉬우며 확정되지 않은 지역에서의 설계시 초기에 확인 가능하다. 차원 높은 모델링기법은 설계를 효율적이며 신속하게 하며 비용을 절감시켜 준다.

FEDRA는 CFD 및 Exodus 모델과의 실질적 계산값 차이를 줄이기 위해 개량형 Zone 모델을 개발 중에 있다. — "Fire Prevention"(99.1)