

# 북경올림픽 수영센터의 성능기반 화재안전설계 소개

## 1. 머리말

중국 북경은 2008년 8월 8일 올림픽 개최를 앞두고, 각종 시설에 대한 건설, 정비를 진행하고 있다. 그중에서도 메인스타디움(북경국가체육관) 'Bird's Nest(새둥지)'와 나란히 참신한 디자인이 눈을 끄는 수영경기장 'Water Cube(수립방)' (<그림 1>, <그림 2>)는 단연 최고다. 이 글은 Arup사 관계자(Marianne Foley, 油野健志, 三澤 潤)가 작성한 내용을 번역한 것으로, 올림픽 프로젝트 중에서 최초로 성능기반 화재안전설계의 승인을 득한 Water Cube의 설계 개요를 소개한 것이다.

## 2. Water Cube 개요

북경시 도심 북부에 올림픽공원이 정비되어 있고, 한쪽에 Water Cube 건물이 위치하고 있다.

기본 설계는 PTW Architects(시드니)사에 의한 것이며, 실시 설계에는 CSCEC + Design, SDI Architects사가 참여했다. Arup사는 이들 건축사무소와 협동하여 엔지니어링 전반을 담당했다. 건축규모는 약 120m×80m, 높이 30m, 연면적은 약 7,000㎡로서, 과거 올림픽 수영경기장 중에서도 최대 규모이다. 수용시설은 경기용 풀장, 레저 풀장 외에 체육관, 소매점, 레스토랑, 바, 사무실, 레저용 아이스링크 등으로 구성되어 있다.(<그림 3> 참조)

올림픽 기간 중에는 경기자, 관객, 스태프 등 합계 약 20,000명의 수용을 예상하고 있으나, 종료 후에는 10,000명까지 수용이 가능하다.

Water Cube는 유기적인 셀과 비눗방울의 자



<그림 1> 건물 외관



<그림 2> 건물 내경

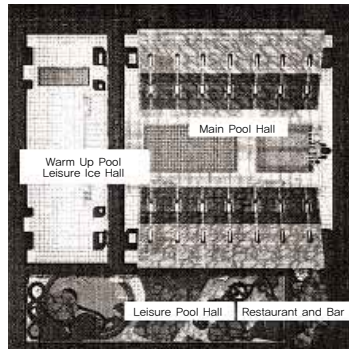
연형상을 기조로 한 참신한 철골구조(架構) (<그림 4> 참조)가 특징이고, 외장재는 ETFE (Ethylene Tetra Fluor Ethylene)로 구성되어 있다. 이런 형상의 패턴은 대단히 유기적이며 무질서하게 보이나 입체해석에 의해 도출된 최적단위의 반복이기 때문에 건설하기 쉽다. 또한 건물은 일견 취약하게 보이나, 구조는 대단히 굳세고 튼튼하며 기하학 형상이 만들어내는 가소성 구조는 북경의 지진조건에 충분히 적합하다.

## 3. 성능기반 화재안전설계의 목적

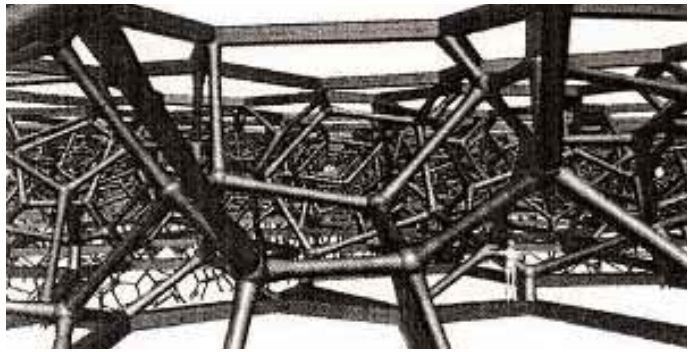
이 건물의 디자인을 실현하는데 있어서 내화구조, 외장재의 연소성, 피난경로를 중국의 현행규정에 맞추는 것은 곤란하다. 그래서 행정·평가기관과의 협의 끝에 성능기반 화재안전설계에 의해 적절한 안전성을 검증하기로 했다.

## 4. 내화설계

Water Cube는 구조체가 디자인 자체이다. (<그림 5> 참조) 사양규정은 최대 3시간의 내



〈그림 3〉 평면도

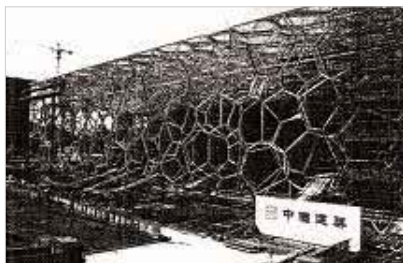


〈그림 4〉 가구의 개념·디자인

화성을 요구하지만, 내화피복은 디자인을 훼손하고 내화도료는 가격이 비싸기 때문에 열전도해석에 입각하여 無내화피복의 강구조를 검토했다. 구조는 3차원 스폰지모형(구성요소 약 22,000개)을 작성하고, 유한요소법(有限要素法)을 이용하여 검토했다.

실제하중은 호주 기준(AS 41003)에 입각하여,  $[1.2 \times \text{고정하중} + 1.5 \times \text{적재하중}]$ 으로 했다. 동일하게 AS 4100에 준거하여 화재 시의 하중조건은  $[1 \times \text{고정하중} + 0 \sim 0.6 \times \text{적재하중}]$ 으로 가정했다(0~0.6은 풍하중의 풍력계수 등에 의한 계수). 검정치( $r_f$ )는 화재 시의 하중조건 하에서의 응력도를 상온 시의 보유내력으로 나눈 것이다. 검토 결과, 검정치는 최대 0.7이며, 부재는 여력이 있다고 말할 수 있다. 또한 구조부재의 상한온도  $T$ (화재 시에 하중을 지지할 수 있는 한계온도)는 아래 식에 따른다.

$r_f = \frac{905 - T}{690}$  따라서  $r_f = 0.7$ 에 의해 구조부재의 상한온도  $T = 422^\circ\text{C}$ 가 된다.



〈그림 5〉 Water Cube 구조체

화재 시나리오는 20분간의 정상연소를 가정하여 발열량, 피크 시의 발열속도 및 단위발열속도 데이터 등을 바탕으로 검토했다. 철구조의 수열은 다양한 거리로부터 화염복사에 근거하여 계산되었기 때문에 화염높이를 Macaffrey의 플룸식에 의해 추정했다.

$$I = 0.23Q_c^{2/3} - 1.02D$$

여기서 I : 화염높이(m)

D : 화원지름(m)

$Q_c$  : 화원발열속도(kW/m<sup>2</sup>)

화재 시나리오는 20분간의 정상연소를 가정하여 발열량, 피크 시의 발열속도 및 단위발열속도 데이터 등을 바탕으로 검토했다.

그러나 동 건물은 가구체가 크기 때문에 화원은 거의 가구에 접하지 않는다. 따라서 여러 가지 화원 시나리오에 대한 검토를 하지 않고, 정상상태의 화재온도 계산의 경우 가구의 내화성을 검증하는 것으로 했다. 또한 가정된 최악의 화재 시나리오에서는 상한온도를 초과하는 부재가 있기 때문에, 상한온도를 초과한 부재는 하중을 부담하지 않는다고 가정했다.

이상의 조건과 가정에 근거하여 전체 구조로서의 내화성능을 유한요소법으로 검토한 결과, 화재 계속시간을 통해 전체 가구가 유지되는 것이 명확하고, 강재를 無내화피복으로 할 수 있었다. 이 방법은 상한온도를 초과하는 구조부재의 평가나 시계열해석에 의해서도 효과적인 내화성능 평가방법이며, 다른 복잡한 구조에도 적용할 수 있다.

## 5. 건축물의 외관

Water Cube의 외장재로 사용된 ETFE는 투광성과 절연성을 가진 가벼운 막재료이며, 상시 일정한 압력을 줌으로써 형상을 유지한다. 2006년 축구월드컵 독일대회 스타디움 'Allianz-Arena' (독일 바이에른)에서도 채택되어 건축재료로서 관심이 높다. 그러나 다른 나라와 마찬가지로 중국의 사양규정도 ETFE가 가연성이기 때문에 외장용으로 인정하지 않는다.

ETFE 이용승인을 얻기 위해 다음 요건을 만족시켜야 했다.

- 점화/착화에 의해 아래쪽에 있는 사람이나 공간으로 연소 중인 조각이 낙하하지 않을 것
- 열원이 제거되면 화염이 확대되지 않거나, 연소가 계속되지 않을 것
- 건물화재에 큰 영향을 주지 않을 것

현재 ETFE는 다양한 화재시험에 의해 가연성의 작은 조각이 발생하지 않는 것이 확인되었으며, 아래의 성능을 확보했다.

- DIN 4102 : B1
- BS 476 : Class 0
- NFP 92-505 : M2

그리고 ETFE는 275℃에서 녹기 시작하여 부드럽게 되는 재료이며, 내압이 가해지면 늘어나 구멍이 형성된다. 이 구멍은 '자연배기구'가 되어 연기를 건물 밖으로 유효하게 배출한다. 또한 ETFE는 불소를 함유하고 있어 화염을 조장하지는 않는다. 더구나 ETFE의 두께는 약 0.6mm로 화재 시 연소중량도 극히 적다. 예를 들면, 아이스스케이팅장 난간의 발열량이 300~495MJ/m<sup>2</sup>인 데 대하여, 건축물 외관의 발열량이 약 14~30MJ/m<sup>2</sup>인 것으로 평가되었다. 이상과 같은 이유로 이 건물에 ETFE의 적용이 가능하게 되었다.

## 6. 피난안전성 검토

중국의 사양규정에서는 수용인원이 20,000명인 경우, 출구의 폭은 합계 약 200m가 요구된다. 그 때문에 ETFE로 외장 마감된 건

축물 정면 전체길이의 1/2을 출구문으로 변경하도록 요구되었다. 그러나 이것은 디자인상 또는 안전의 관점에서도 회피해야 하는 문제였기 때문에 피난에 관한 성능검증을 실시했다.

이와 같은 용도에서는 건물 내의 사람이 경로를 알아차리기 어렵고, 피난개시까지 시간이 걸리는 것이 문제가 된다. 그 때문에 큰 출구 폭을 설치하는 것뿐만 아니라 건물 내의 사람이 충분히 안전하게 피난할 수 있는 (출구에 도달하는) 시간을 확보하는 것이 필요하다. Water Cube의 피난경로는 건물전체로 넓게 개방된 일반통로를 이용하는 것으로 되어 있는데, 이것은 피난에 의한 혼란을 피하고 설치된 출구의 효과를 최대한으로 이용하기 위함이다. 피난시간은 보행자의 이동테이터에 근거하여 기왕의 보행속도나 유동계수(표 1 참조)를 이용했다. 스탠드로부터의 피난시간은 <그림 6>과 <도표 1>에 근거하여 산정했다.

일반거실 등으로부터의 이동시간은 거실에서 체류시간 및 일반통로를 경유하여 최종 출구까지 도달하는 시간에 근거를 둔다. 다만, 체류나 혼잡을 억제하기 위해 피난한계시간에 관계없이 피난경로에 있어서 체류한계시간을 8분으로 했다. 피난완료시간은 안전계수 1.5를 가미한 인지시간, 피난개시시간 및 이동시간의 합계로 했다. 또한 피난개시시간은 심리학의 응답모델에 근거했고, 화원을 인식한 상황 하에서는 60초로 했다. 건물 화재시의 내구성은 소방 활동을 고려하여 스프링클러, 연기제어, 방연구획에 의해 확보되어 있는 것으로 했다.

한편, 화재 및 연기성상의 해석 및 평가에는 CFD모델(FDS) <그림 8>, <그림 9>과 존모델(CFast), 간이계산식이라는 여러 가지 TOOL을 이용했다. 화재 시나리오 대상을 건물전체로 하여 필요 배연량을 결정했다. 이들의 해석과 피난시간과의 비교에 의해 피난안전성을 실증했고 보행거리 확대 및 출구 폭의 축소가 가능하게 되었다.

Water Cube의  
피난경로는  
건물전체로 넓게  
개방된  
일반통로를  
이용하는 것으로  
되어있는데,  
이것은 피난에  
의한 혼란을  
피하고 설치된  
출구의 효과를  
최대만으로  
이용하기  
위함이다

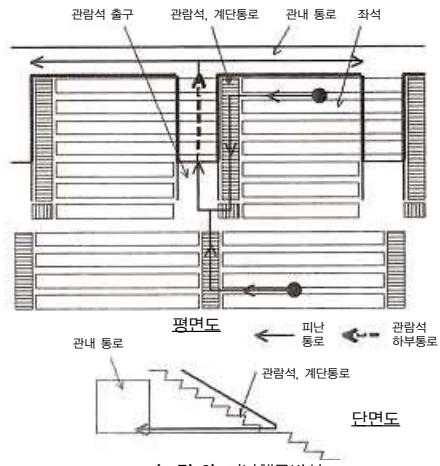
## 7. 성능평가의 개요

중국의 방화설계는 2가지의 방화규정에 입각하여 행해지고 있는데 성능규정은 아직 도입되지 않았다. 또한 방화설계를 위한 가이드라인 같은 것도 없다. 그렇지만 중국에서는 경제성장과 함께 건축, 인프라구축 프로젝트가 증가하고 그 규모도 대형이며 복잡해지고 있다. 그 때문에 사양규정만으로는 설계는 곤란하고, 공항, 고층빌딩, 상업시설을 비롯하여 2008년 올림픽, 2010년 세계박람회 프로젝트 등에 성능설계가 적용되었다.

성능기반 화재안전설계에 관해서는 중앙행정당국이 유식자에 의한 평정의 실시를 통지하며, 또한 지방행정에서도 소방국에 의해 평정위원회가 개최된다. 그러나 구체적인 설계지침이나 평정제도 등은 규정되어 있지 않고 지역마다 다르다.

북경이나 상해의 사례에서는 우선 기본설계시에 성능기반 화재안전설계 적용이나 검증방법 등을 평정기관에 제시하고 성능기반 설계적용의 승인을 얻어야 한다. 그 후 상세검증을 실시하고 방재계획서를 평정기관에 제출한다. 성능기반 화재안전설계는 기본설계시에 선정된 방화건설턴트에 의해 실시되는 한편 평정기관도 제3자 평가로서 다른 건설턴트(대학, 연구기관 등)에게 설계내용을 확인시키며, 그들의 검토에 근거하여 설계변경을 지시하는 경우도 있다. 이 양자에 의해 동일한 검증결과가 얻어진 후, 평정위원회(소방기관, 연구자들로 구성)에서 검증내용에 대한 질의응답이 행해지며, 최종적인 승인에 이른다.

또한 올림픽 프로젝트를 위한 평정위원회는 북경올림픽조직위원회, 북경 소방국, 전문평가자들로 구성되었다. 이 건물의 전문평가자는 Institute of Building Fire Research of China이며, 피난해석에는 Simulex, 연기성상에는 CFD를 이용한 독자검증을 실시했다. 승인과정에서는 소방국, 전문평가자들과의 계속적인 협의가 이루어졌고, 최종승인에 있어서는 모든 의뢰인에게 설계 설명을 실시했다.



〈그림 6〉 피난행동방식

부위	보행속도(m/min)	유동계수(명/m/min)
좌석간 통로	60	56
관람석·계단통로	46	56
중앙광장	60	82
계단	46	56

〈표〉 보행에 관한 데이터

$$\begin{aligned}
 & \text{좌석에서 계단통로까지 이동시간} + \text{계단통로의 이동시간} + \\
 & \text{관람석 출구의 통과시간} + \text{관내통로에서 출구까지의 시간} \\
 & = \text{피난행동시간}
 \end{aligned}$$

〈표〉 피난시간의 산정

## 8. 맺음말

해외 성능기반 화재안전설계의 사례소개로서 북경올림픽·수영경기장 'Water Cube'의 설계개요 및 성능평가에 대해 기술했다. 중국은 비록 법적으로 성능기반 화재안전설계가 규정화되어 있지 않지만, 세계조류에 발맞춰 사양규정으로는 건설할 수 없는 시설들을 척척 건설해가고 있다. 그들의 사고방식이 대단히 유연함을 엿볼 수 있다. 법적 정비가 충분하지 않은 대신 밀도가 진한 성능평정의 시작, 방화관리자, 행정, 평가자가 일체가 되어 방재계획을 구축하고 있다는 느낌을 갖는다. 우리나라도 앞으로 성능기반 화재안전설계가 본격화될 태세인데, 이러한 해외사례가 성능규정·설계에 관한 논의에 참고가 되었으면 한다. ☺