

# 유한요소해석을 이용한 구조물의 성능기반 내화설계

## Performance Based Fire Design of Structures using Finite Element Analysis



민정기\*

\* 캔터베리대학교 토목공학과 박사과정

### 1. 서론

구조화재공학(Structural Fire Engineering)은 1900년대 초부터 사양기반 내화설계(Prescriptive Based Fire Design)를 기초로 표준화재시험을 통해 꾸준히 이루어져 왔다. 그러나 표준화재시험에 기초한 사양 내화설계는 고비용, 비효율적이며 지식의 부족으로 인해 건물의 성능보다는 어떻게 건물을 지을 수 있는지에 초점을 맞춰져 왔다. 그 결과, 지난 20여년 동안 영국 BRE의 카딩턴(Cardington)에서의 실물구조 화재시험(Kirby, 1997; 2000) 및 미국의 비행기 테러로 인한 2002년의 세계무역센터의 붕괴(FEMA, 2002), 유로코드의 발전 등으로 인해 구조화재공학은 현저한 발전을 이루어 왔다. 또한, 국내에서도 초고층, 초대형 건물들이 많이 지어짐에 따라 성능기반 내화설계(Performance Based Fire Design)에 대한 관심이 증대하고 있으나, 인식 및 그에 대한 연구의 부족 등으로 인해 성능 기반 내화설계가 활발히 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 기본적으로 성능기반 내화설계는 실제 구조물이 화재에 대해서 어떻게 거동하는지에 초점을 맞추므로써 성능이 충족되면 과학적으로 엔지니어의 판단에 의해 설계에 적용될 수 있는 개념이다. 이미 많은 나라들이 성능기반 내화설계를 적용해 오고 있지만, 그 중 뉴질랜드는 1992년에 건물 규준에 성능기반 내

화설계(그림 1)를 포함시킴으로서 이 분야에 가장 앞선 국가들 중의 하나이다. 뉴질랜드의 경우, 오랜 연구와 설계를 통해 강구조물 뿐만 아니라 콘크리트 및 프리캐스트 콘크리트 구조물에 대해서도 유한요소해석을 이용한 성능기반 내화설계를 적용하고 있다. 본 기사에서는 지금까지 구조화재공학의 발전을 살펴보고, 이러한 구조화재공학의 발전과 함께 유한요소해석을 이용한 구조물의 성능기반설계가 어떻게 이루어지고 있는지 뉴질랜드 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

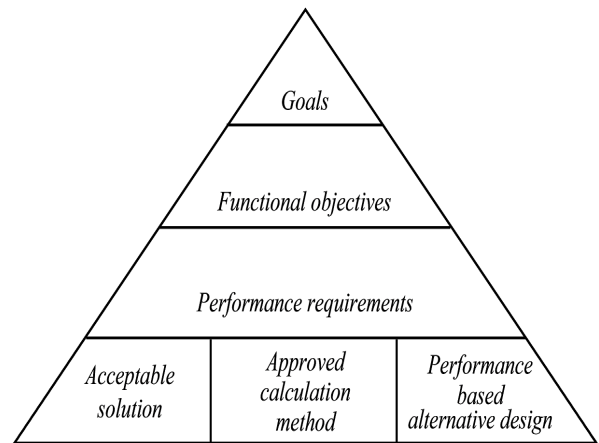


그림 1 뉴질랜드 성능기반 설계의 체계 (Buchanan, 2001)

## 2. 구조화재공학 해석 및 설계의 발전

전통적인 사양기반 내화설계는 기본적으로 두 단계의 설계과정을 거친다. 첫째, 구조물을 설계한다. 둘째로, 설계된 구조물이 요구되는 내화성을 만족하는지 확인한다. 이 과정에서 가능한 해결책은 요구되는 내화성에 따라 콘크리트 구조물이 사용되거나, 아니면 피복된 강구조물을 사용하는 것이다.

반면에, 성능기반 내화설계는 각각의 건물들에 기초해서 예상 가능한 화재 위험 정도를 정량화할 수 있는 선택을 제공한다. 이 과정에서 각각의 구조물의 용도(주거시설, 사무용 시설, 쇼핑몰 등 유동인구가 많은 대형시설)에 따른 화재하중이 결정되고 방화구획이나 외부벽 등으로 인한 특성들을 고려한다. 이 과정에서 반 사양적인 간편 설계 접근법이 사용될 수 있다. 구조 성능의 평가는 ISO 834 표준화재시험에 의해 측정된 개별 구조 부재들과 관련하여 이루어진다.

1996년 이후로, 실제 화재 노출에 유사한 좀 더 개선된 해석 방법들이 유로코드(EC1 2002)에 의해 소개되었다. 표 1은 유로코드에 포함된 내화 구조 설계의 대안 설계과정을 보여준다. 화재 모델에 있어서 사양기반 설계법은 온도에 의한 영향을 발생하기 위해서 표준 화재를 사용한다. 그러나 성능기반 설계법은 물리적인 변수들에 기초하여 구조물의 고온에서의 영향을 결정한다. 고온에 의한 구조내화설계는 가능한 정도에 따라 표 1같이 크게 세 가지(Tabulated data, Simple calculation method, Advanced calculation method)로 나뉜다. 우리가 흔히 규준에서 쉽게 볼 수 있는 내화 피복과 같은 표로 만들어진 데이터(Tabulated data)는 단일 부재에 대해서 단지 사양기반 설계법에서만 사용이 가능하다. 간단 계산법(Simple calculation method) 또한 주로 단일 부재에 대해서 사용하지만, 부분 구조물에도 적용될 수 있으며, 공학 설계법으로 많은 시간을 제공하지 않는 실무에 적용이 가능하다. 마지막으로 고급 계산법(Advanced calculation method)은 모든 구조물에 적용이 가능하며, 유한요소해석을 통해 화재 하에서 구조물의 내하력 및 변형 거동의 시뮬레이션이 가능하다.

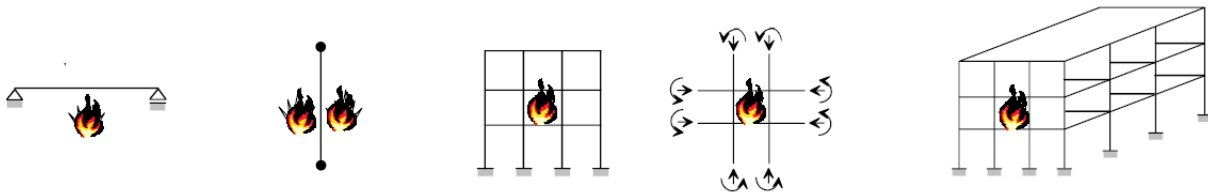
## 3. 성능기반 구조내화설계의 절차

성능기반 구조내화설계는 빠르게 발전하고 있고, 몇몇 설계 가이드와 교과서들에서 잘 설명하고 있다(예를 들어, Buchanan(2001), Clifton(2006), Franssen and Zaharia(2006), Purkiss(2006)). 계산에 의한 내화성의 설계는 반드시 시스

템이 실제로 의도한대로 거동하는지를 보여 줄 수 있는 실험들에 의해 보완되어야 한다. 그림 2는 계산에 의한 내화성을 결정하는 전체적인 과정에 대한 흐름도를 보여준다. 먼저, **화재 모델(Fire model)**은 표준화재나 측정된 혹은 평가된 실제 화재를 포함하는 어떤 선택된 시간 온도 곡선이 될 수 있다. 화재 온도는 실의 구조, 환기 및 화재하중에 의해 영향 받는다. 표준화재 곡선을 결정하는 식은 ISO 834(ISO 1975)에서 찾을 수 있으며, 유로코드(EC1, 2002)는 실의 구조, 환기 및 화재 하중과 냉각단계를 고려할 수 있는 식을 제공한다. 컴퓨터 화재모델은 전반적인 화재공학 설계과정의 작은 부분으로써 대안 화재 시나리오의 영향을 조사하기 위해서 유용하며, 더 자세한 컴퓨터 화재 모델 방법(Zone model, Field model)은 위에 소개된 설계 가이드와 교과서에서 자세히 확인 할 수 있다. **열전달 모델(Heat transfer model)**은 화재에 노출된 부재의 온도 변화를 계산하기 위해 사용된다. 열전달의 계산은 요소의 형상에 대한 지식, 재료의 열 특성과 경계조건에서의 열전달 계수의 지식을 필요로 한다. 요소 표면에서의 열전달은 대류와 복사의 조합이다. 단단한 재료(solid materials)를 통한 열전달은 전도에 의해서 이루어진다. 빈 공간(void materials)을 통한 열전달은 대류와 복사의 조합이다. 실무적인 어려움은 몇몇 재료들의 열 특성이 매우 온도 의존적이고 열전달 계수가 잘 정립되어 있지 않다는 것이다. 정확한 결과들은 오로지 유한요소(혹은 유한차분) 컴퓨터 프로그램 내에서 얻을 수 있다. **구조 모델(Structural model)**은 화재 상황에서의 구조 해석의 과정이다. 이 과정은 몇몇의 차이점을 제외하고 화재에 노출되지 않은 구조물의 해석과 유사하다. 이러한 과정의 대부분은 강재 및 콘크리트에 대한 적절한 재료 설계 기준들로부터 얻을 수 있다. 수계산 법은 단순한 요소들에 대해 사용될 수 있지만, 복잡한 컴퓨터 모델들은 골조나 더 큰 구조물의 해석을 위해 필요하다. 현재 구조물의 내화성을 평가하기 위한 상업적으로 가능한 프로그램들이 있다. SAFIR 프로그램(Franssen 2005)은 하나의 패키지에 열 및 구조 해석이 포함되어 있다. 반면에, Vulcan 프로그램(Huang et al. 2003)은 열 및 구조 해석이 가능하지만, 열 해석에 있어서 특정한 단면만 가능하다. ABAQUS(Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc. 2002)나 DIANA(TNO, 1999)와 같은 범용 유한요소해석 프로그램은 사용자가 온도와 재료 특성 사이의 관계를 정의해야 한다. 그러므로 실무의 적용에 있어서 사용자가 이용하기 편리하지 않지만, 그 코드들은 투명하다. SAFIR와 Vulcan과 같은 프로그램들은 화재에서의 구조물의 성능을 해석하기 위해서 쓰인 프로그램으로 온도와 재료 특성 관계들은 프로그램에 포함되어 있다. 이

표 1 대안 설계 과정 (EC1 2002)

STRUCTURAL DESIGN PROCEDURE			TABULATED DATA	SIMPLE CALCULATION METHOD	ADVANCED CALCULATION METHOD
PRESCRIPTIVE BASED RULES	Member	Calculation of mechanical actions and boundaries	YES	YES	YES
	Part of structure		NO	YES (If available)	YES
	Entire Structure	Selection of mechanical actions	NO	NO	YES
PERFORMANCE BASED RULES	Member	Calculation of mechanical actions and boundaries	NO	YES (If available)	YES
	Part of structure		NO	NO	YES
	Entire Structure	Selection of mechanical actions	NO	NO	YES



러한 프로그램들은 사용자들이 사용하기 편리하지만 프로그래머에 의한 가정의 복잡함은 적절하게 숙련된 실무자들에 의해 적용되어야 할 필요가 있다.

#### 4. 사례 연구

본 기사에서는 뉴질랜드에서 유한요소해석을 통해 실제 연구되어 적용되고 있는 성능기반 내화설계의 사례를 강구조 건물과 콘크리트 건물 각각에 대해 소개하고자 한다.

##### 4.1 강구조 건물

강구조 건물은 일찍이 BRE 카딩턴 실물화재시험으로부터 심각한 화재 상황에서도 상당한 처짐의 증가와 함께 붕괴 없이 만족스런 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 뉴질랜드에서는 이러한 연구결과를 실제 성능기반 내화설계에 적용하기 위한 연구가 New Zealand Heavy Engineering Research Association(HERA)와 캔터베리 대학(University of Canterbury)에 의해 2002년부터 2004년까지 진행되었다. 그 연구결과로서 슬래브 패널법(Slab Panel Method, SPM)라고 불리는 구조화재모델이 개발되었다(Clifton, 2002). 화재에 노출되지 않은 상태에서 보는 바닥 슬래브를 지지한다. 그 결과 하중은 슬래브, 2차 보(secondary beams), 1차 보(primary beams), 기둥 순으로 전달된다. 그러나 심각한 화재 상황에서, 2차 내부 보가 피복되어 있지 않다면, 2차 내부 보는 화재의 발달과 함께 강도를 상실하고 위에서 설명한 하중전달 메커니즘은 유지되지 못한다. 그 결과 보는 소성 힌지를 생성하고 하중전달 메커니즘은 이방향 시스템은

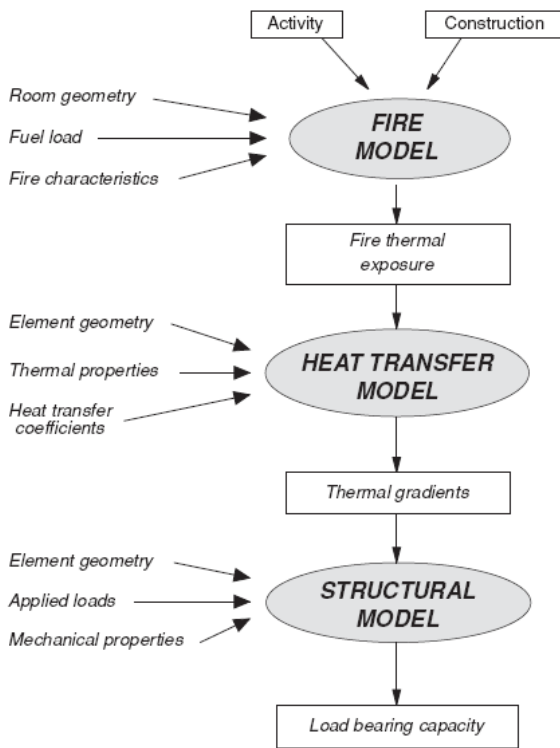


그림 2 내화성을 계산하기 위한 흐름도 (Buchanan 2001)

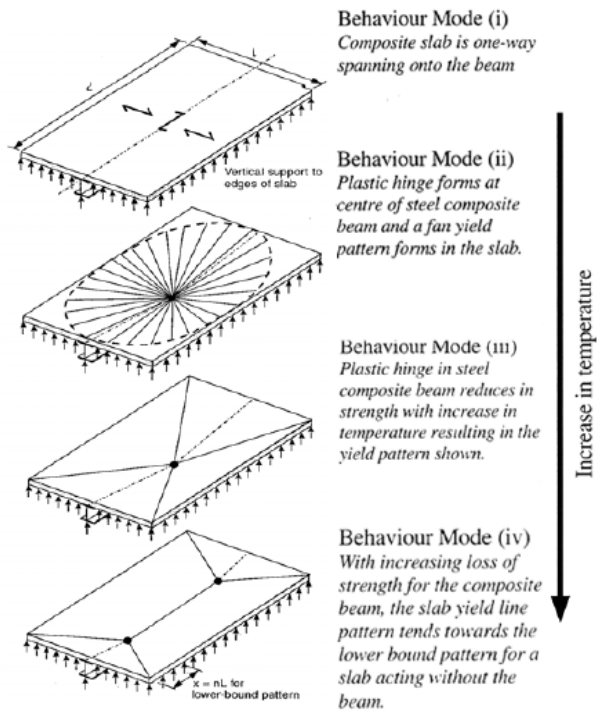


그림 3 온도 증가와 함께 슬래브와 피복되지 않은 강재 보 거동 (Clifton, 2002)

로 변화한다. 그림 3은 이러한 과정을 잘 보여준다. 화재 하에서, 슬래브와 피복되지 않은 부분을 포함하는 슬래브 패널을 포함해서 이방향 작용이 팽배하게 된다. 그래서 슬래브 패널은 슬래브 패널, 지지보, 기둥 순의 하중 경로를 통해 화재 시에 적용된 하중을 전달하게 된다. 슬래브 패널은 항복선 모멘트 작용(Yieldline moment action)과 인장 멤브레인 향상(Tensile membrane enhancement)을 통해 변형된 상태에서 하중 저항 능력을 발달하게 된다. 그림 4는 이러한 슬래브 패널법의 항복선 경향을 잘 보여준다. 슬래브 패널법 모델의 개발은 불필요한 내화피복을 줄임으로써 비용을 절감하고, 요구되는 내화시간 동안 더욱 안전한 화재설계를 가능하게 한다.

위와 같은 슬래브 패널법 모델은 오클랜드 도심의 12층 짜리 강-콘크리트 합성 구조의 사무용 건물에 화재에 대한 심각도를 평가하기 위해 적용되었다. ABAQUS 유한요소해석 프로그램은 설계에서 사용된 슬래브 패널법 내화 설계 과정의 중요한 부분으로 이용되었다. 그림 5와 6은 각각 슬래브 패널법을 이용한 성능기반 내화설계와 규제준수 문서에 기초한 사양기반 내화설계의 내화성에 대해 평가하였다. 그 결과, 이전에 화재로 인한 슬래브의 붕괴를 막기 위

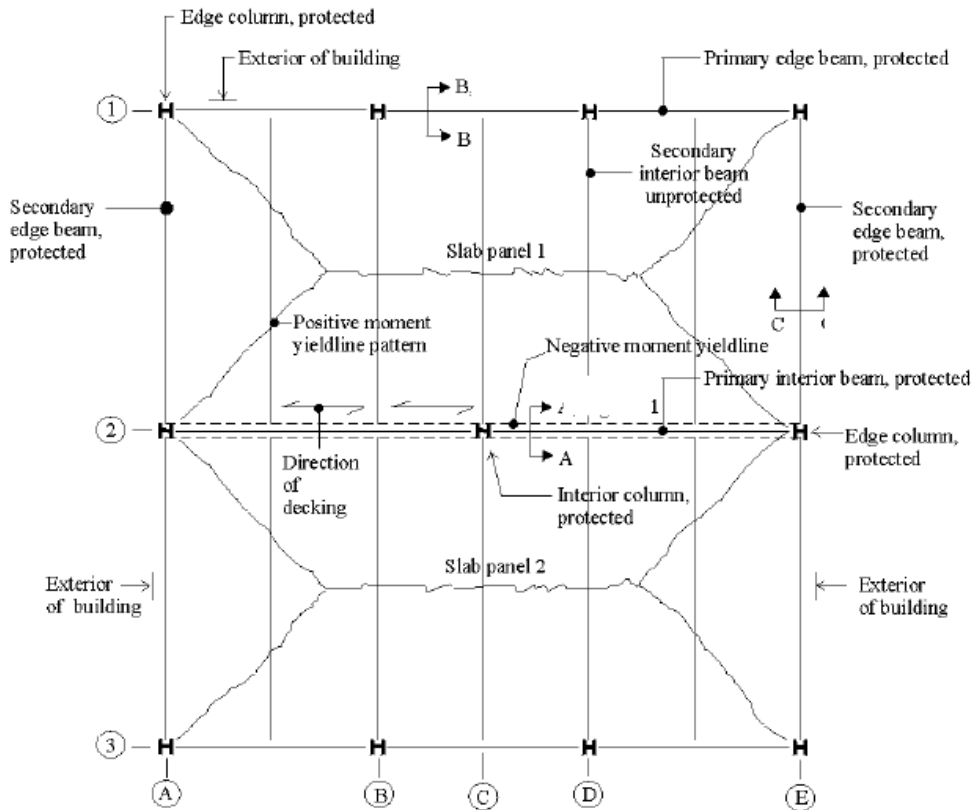


그림 4 1차(primary)와 2차(secondary) 보위에 지지된 성형 강재 데크 위 콘크리트 슬래브에 슬래브 패널 화재 공학 설계의 적용을 위해 반영된 바닥 평면 (Clifton, 2002)

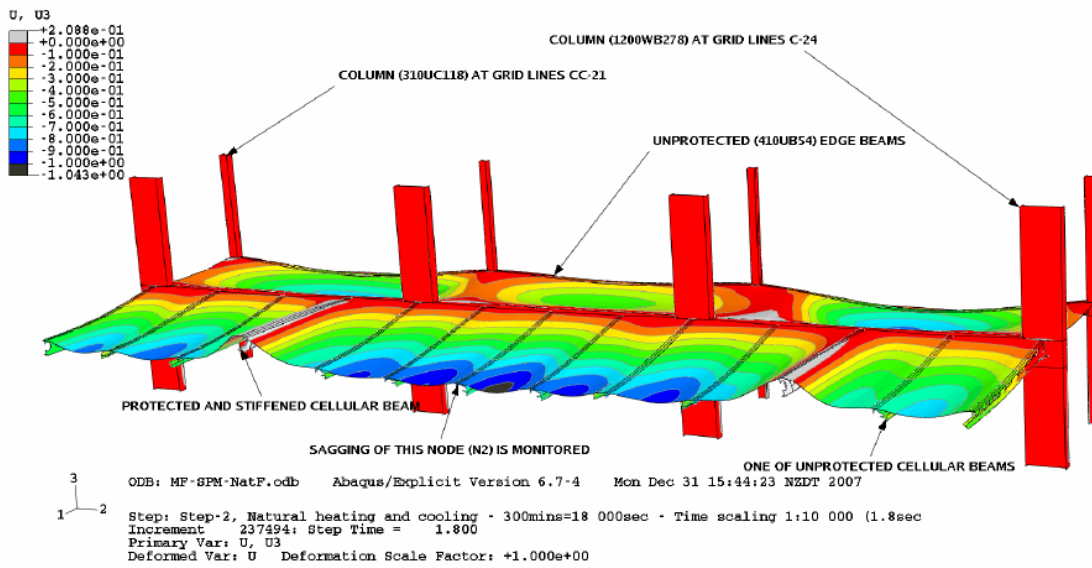


그림 5 성능기반 내화설계 - 슬래브 패널법에 기반한 부분 내화피복 (Feeney et al., 2008)

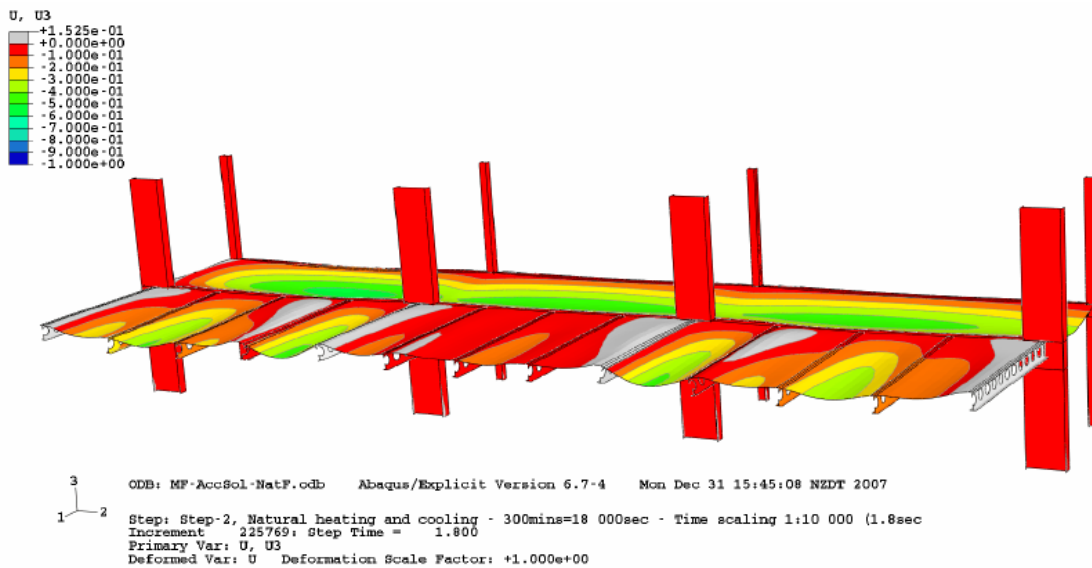


그림 6 사양기반 내화설계 - 규제준수 문서(Compliance document)에 기반한 완전 내화피복 (Feeney et al., 2008)

해 요구되었던 장스팬 2차 셀룰러 보 위의 내화 피복들은 제거되었다. 이러한 장스팬 슬래브에 있어서 내화피복의 75% 감소는 건물주에게 상당한 비용 절감을 가져다 주었다.

#### 4.2 콘크리트 건물

뉴질랜드에서는 강-콘크리트 합성 바닥 뿐만 아니라, 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트(PC)슬래브가 바닥 요소로 많이 사용된다. PC 슬래브 중에 할로우코어 슬래브는 가장 일반적인 바닥 형태이지만, 내부에 중공을 포함하고

있어 화재 시에 거동을 예측하는데 어려움이 있다. 또한, 콘크리트 구조물의 온도 의존적인 재료 특성 때문에 비선형해석이 어려움이 있다. 그 결과, 종종 수렴해를 제공하지 못하고, 국부 파괴(local failure) 이상으로 해석이 진행되지 않아 많은 시뮬레이션에 있어서 화재시 구조물의 특징 중 하나인 대변형에 이르는 결과를 얻어내기 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 다양한 해석적 연구가 캔터베리 대학에서 진행되고 있다. 일반적으로 단일 부재시의 할로우코어 슬래브에 대한 화재시 거동은 실험을 통해 연구되었지만, 이는 사양기반 내화설계에 가깝다. 그래서 성능기

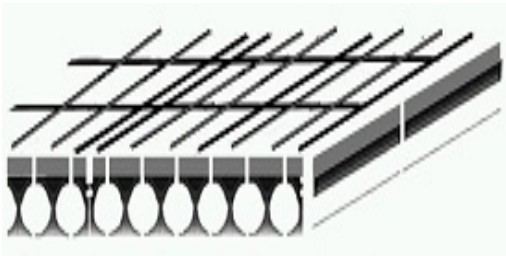


그림 7 할로우코어 슬래브 모델링

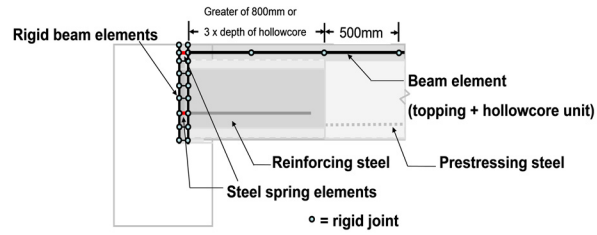


그림 8 멀티 스프링을 이용한 접합부 모델링

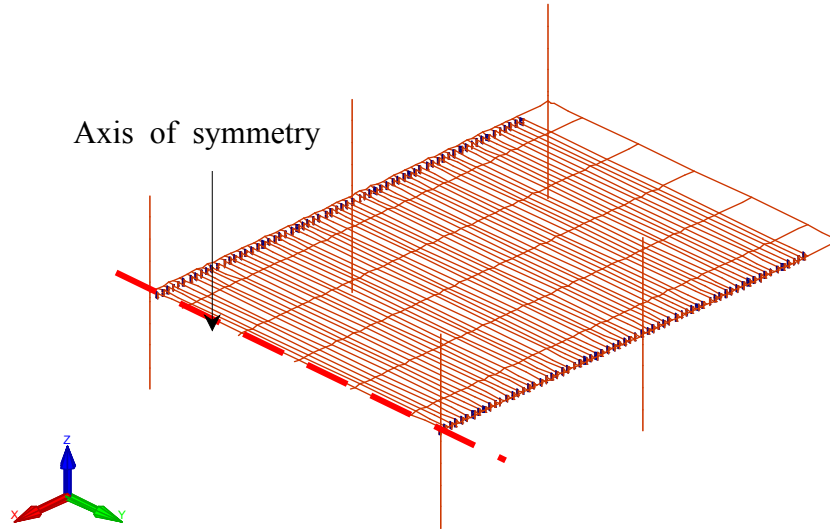


그림 9 할로우코어 바닥 슬래브를 포함하는 멀티 베이 구조물의 1/2 모델링

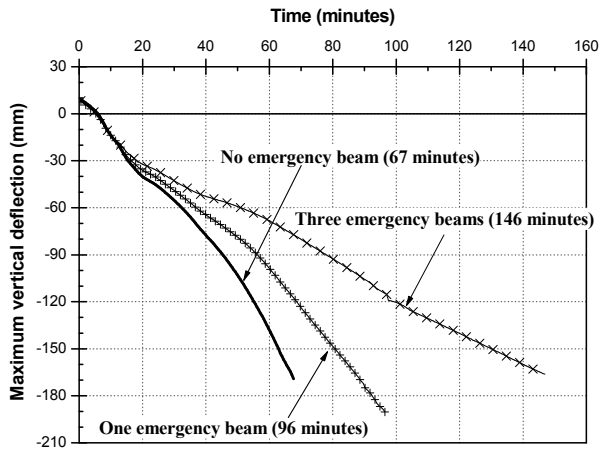


그림 10 화재 응급 보의 증가에 따른 멀티 베이 할로우코어 바닥의 거동의 비교

반 내화설계에 대한 대안을 제시하기 위해 다리의 바닥 슬래브 모델링에 주로 사용되는 격자 방법(grillage method)을 이용해 간략화된 할로우코어 모델링을 개발하였다(그림 7). 또한, 프리스트레스트 텐던이 주변 구조물에 연결되지 않고, 단지 토폭 콘크리트의 스타터 바만 연결되는 것을 모델

링하기 위하여 멀티 스프링을 이용하여 접합부 모델링을 개발하였다(그림 8). 구체적인 내용은 참고문헌(Min et al., 2012)을 참고하기 바란다.


위의 모델링 기법들은 실제 멀티 베이 바닥 슬래브 (28.4m×10m)에 기둥 및 주변 보들과 함께 시뮬레이션 되었다(그림 9). 그 결과, 멀티 베이 할로우코어 슬래브의 화재 시의 거동이 확인되었으며, 좀 더 내화성을 향상시키기 위한 해결책이 제시되었다. 그 해결책은 화재 응급 보(Fire Emergency Beam)의 사용으로 일반적으로 멀티 베이의 할로우코어 슬래브에는 중간에 보가 사용되지 않으나, 적절히 보의 개수를 늘림으로써 더 나은 내화성을 확인할 수 있었다(그림 10).

### 5. 맺음말

최근 들어 건물들이 고층화 및 대형화되면서 화재로 인한 피해 가능성은 나날이 증가하고 있으며, 건물의 안전에 관한 관심이 증대하고 있다. 더불어, 지식의 발달 및 인식의 변화로 인해 성능설계를 이용해 건축 비용을 줄이기 위

한 노력들이 진행되고 있다. 이에 따라, 앞으로 성능기반 내화설계법의 연구 및 실무의 적용 필요성은 더욱 증대하고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 성능기반 내화설계에 대한 체계 정립이 제대로 이루어지지 않고, 관련 연구의 부족으로 인해 실제 적용에 있어서 많은 어려움이 있다. 그러나 유한요소해석을 이용한 성능기반 내화설계는 고비용의 표준화재시험을 대체하여 점차 복잡해져 가는 건축물에 더욱 활발히 적용될 수 있다. 이를 위하여 구조화재공학에 대한 교육, 유한요소해석 프로그램에 있어서 고온에서의 재료의 열특성 및 열-구조 연성 해석에 대한 활발한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Buchanan, A. H. (2001). *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
2. Clifton, C. (2002). Design of Multi-Storey Steel Framed Buildings with Unprotected Secondary Beams or Joists for Dependable Inelastic Response in Severe Fires. *Proceedings of the Second International Conference on Structures in Fire (SiF'02)*, Christchurch, New Zealand.
3. Clifton, G. C. (2006). *Design of Composite Steel Floor Systems for Severe Fires*. HERA Report R4-131, New Zealand Heavy Engineering Research Association, Manukau City, New Zealand.
4. EC1 (2002) *Eurocode 1: Actions on structures. PrEN 1991-1-2: Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization, Brussels.
5. Feeney, M., Clifton, C., and Mago, N. (2008). Dependable Performance of Steel Structures in Fire – The Britomart East Office Building. *Proceedings of the Fifth International Conference on Structures in Fire (SiF'08)*, Nanyang, Singapore.
6. Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2002). *World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations*. FEMA Region II, New York, USA.
7. Franssen, J-M. (2005). SAFIR - a thermal/structural program modelling structures under fire. *Engineering Journal*, AISC, Vol 42, No. 3, pp. 143-158.
8. Franssen, J-M. and Zaharia, R. (2006). *Design of Steel Structures Subjected to Fire: Background and Design Guide to Eurocode 3*. University of Liège, Belgium.
9. Hibbit, D. Karlsson, B., and Sorensen. P. (2004). *ABAQUS Analysis User's Manual*, v6.5, Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Providence, USA.
10. Huang, Z et al., (2003). Modelling membrane action of concrete slabs in composite buildings in fire - Part I : theoretical development, *Journal of Structural Engineering*, 129(8), pp. 1093-1102.
11. ISO (1975). *Fire resistance tests - Elements of building construction. ISO 834-1975*. International Organization for Standardization.
12. Kirby, B. R. (1997). Large Scale Fire Tests: the British Steel European Collaborative Research Programme on the BRE 8-Storey Frame. *Fifth International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia.
13. Kirby, B. R. (2000). *British Steel data on the Cardington fire tests*. Technical report, British Steel, UK.
14. Min, J-K., Dhakal, R. P., Moss, P. J., Buchanan, A. H. and Abu, A. K. (2012). Modelling the Fire Resistance of Prestressed Concrete Floors using Multi-Spring Connection Elements. *Journal of Structural Fire Engineering*, In Press, March, 2012.
15. Purkiss, J. A. (2006). *Fire Safety Engineering, Second Edition: Design of Structures*. Butterworth,Heineman, Oxford, UK.
16. TNO, DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics. (1999). *DIANA Finite Element Analysis Users Manual*, TNO Building and Construction Research, Amsterdam, The Netherlands. 

[담당 : 김명한, 편집위원]