등온법에 따른 콘크리트 구조물의 내화성능 평가절차에 관한 연구

A Study on the Evaluation Procedure of Fire Resistance Performance of Concrete Structures Using the Isotherm Method

양승조* · 이재승**

Yang, Seung Cho*, and Lee, Jae Sung**

Abstract

As large-scale/high-rise buildings increase, specification-based fire resistance standards can not guarantee the safety of the buildings when a fire occurs. This study suggests an evaluation method on a performance-based fire resistance design for concrete structures. The evaluation method is based on the code of New Zealand. Fire engineering theories are analyzed in order to establish the evaluation process on the fire resistance design of concrete structures with the comparison between laws on fire resistance design of Korea and other countries. The method developed in this study can be used as an alternative evaluation tool based on the performance-based fire resistance design of concrete structures.

Key words : Isotherm Method, Fire Resistance Performance, Concrete Structures

요 지

대규모/고층 건축물이 증가함에 따라 국내에 적용중인 사양적 설계를 통해 화재로부터 건축물의 안전성을 확보하는 것이 어려운 경우가 빈번히 발생한다. 따라서 선진외국의 경우 이러한 사양설계의 단점을 극복하고자 지난 수 십년간 성능적 개념을 도입한 내화설계 방법을 제시하고 있다. 본 연구는 선진 외국의 성능적 내화설계 개념을 분석하여 국내에 도입 가능한 내화성능 설계 평가방법을 제시하는 것이다. 내화성능 설계 평가 절차를 제시하기 위하여 유로코드 및 뉴질랜드 코드 등 국외 기준을 분석하였다. 분석된 기준을 토대로 국내 실무자가 활용 가능하도록 세부 기준을 변경/수정하여 국내 도입이 가능한 콘크리트 구조물의 성능적 내화설계 절차를 제시하였다.

핵심용어 : 등온법, 내화성능, 콘크리트 구조물

1. 서 론

현대 사회가 발전함에 따라 건축물에서 발생하는 화재 위험도는 지속적으로 상승하고 있으며 이로 인한 인명 및 재산피해는 크게 증가하고 있다. 이와 같은 화재 피해를 줄이고자 신기술/신공법에 대한 연구 및 개발이 지속되고 있는 추세이나, 현재 국내에 적용중인 사양위주 내화설계 방식은 신기술/신공법의 효율적인 적용이 어려운 상황이다. 유럽, 미국, 뉴질랜드 등 여러 국가에서는 사양위주의 설계의 단점을 보완하여 화재 공학적 이론을 근거로 한 성능위주

내화설계를 도입하였다.

국내의 경우 성능위주 내화설계 도입을 위한 법적 근거는 건축법을 통해 제시하고 있으나, 성능위주 내화설계를 활용하기 위한 설계 절차 및 세부 기준은 제시하지 못하고 있는 실정이다.

현재 국내의 내화관련 연구는 화재시 특정 구조물에 대한 구조해석, 화재시 건축 재료에 대한 열특성 분석 등에 관한 것이 주를 이루고 있으며, 실제 실무에 적용 가능한 성능위주 내화설계 절차 및 평가 방법에 대한 연구는 부족한 상황이다.

국내의 경우, 사양적 기준을 적용하여 내화설계 및 평가가

*정회원, 한남대학교 건축공학과 박사과정(E-mail: trppp@nate.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Hannam University

**교신저자, 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-42-629-7528, Fax: +82-42-629-7552, E-mail: jaesung@hnu.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Hannam University

어려운 경우 실험형 내화 실험을 통해 성능을 인정받아야 한다. 그러나 내화실험의 경우 많은 비용이 소요되고 성능 평가에 수일이 걸리는 단점이 있다. 또한 특정 주요 구조부재가 내화성능을 인정받았을지라도 단면 치수 및 형상 등을 약간 변경하여 건축물에 적용하기 위해서는 재실험을 통해 내화성능을 인정받아야 한다. 따라서 화재시 구조부재의 내화성능을 간략하게 평가할 수 있는 내화설계 평가 절차 및 세부 기준을 개발하여 내화설계 및 성능을 검증하는 것이 반드시 필요하다(Lee, 2014).

본 연구에서는 실무적으로 적용이 가능한 콘크리트 구조물에 대한 성능위주 내화설계 평가 절차 및 세부 기준을 제시하고자 한다. 평가 절차 및 세부 기준은 현재 뉴질랜드에서 사용중인 등온법을 적용하여 국내 적용 가능토록 수정·보완하였다. 본 연구에서 제시한 절차는 내화 성능 평가시험의 대안적 방법으로 적용이 가능하며 차후 국내에 적용될 성능위주 내화설계의 기본적인 자료로 제공될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 내화설계 법규 및 기준 분석

2.1 국내 내화설계 기준 분석

국내 건축물의 내화법규는 사양위주 설계법을 기본으로 채택하고 있다. 사양위주 내화설계는 건축물의 용도, 크기, 높이에 따른 요구내화시간과 법정내화구조와 내화구조표준에 의해 성능이 인정된 설계내화시간을 비교하여 건축물의 주요구조부에 적용하는 방식이다. 따라서 정해진 기준과 부합하지 않거나 새로운 공법 및 재료를 적용하기 위해서는 내화성능 시험을 통해 성능을 평가받는 내화구조인정을 적용해야만 한다. 건축법 하위법인 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 제 3조에 따르면 사양기준을 제외하고 국내 건축물에 적용되는 내화구조의 경우 다음과 같이 크게 3가지 방법에 의해 법적 내화성능을 인정받을 수 있다.

- ▶ 법정내화구조: “피난 및 방화규칙”에서 인정하고 있는 법정 내화구조
- ▶ 내화구조표준: 한국건설기술연구원이 인정한 표준 내화구조
- ▶ 내화구조인정: 한국건설기술연구원이 인정한 성능 설계법 또는 관계 전문가를 통해 내화구조의 성능을 검증한 내화구조

명확한 화재 안전성을 확보하고 내화에 사용되는 재료의 경제적 손실을 최소화하기 위해서는 성능위주 내화설계 및 평가 방법을 적용하는 것이 합리적이다. 상기에 언급한 바와 같이 성능위주 내화설계 도입을 위한 법적근거는 제시되어 있으나 이에 대한 평가 절차 및 세부 기준은 제시하지

못하고 있다.

2.2 국외 기준 분석

상기에서 언급한 바와 같이 사양설계의 단점을 극복하고자 선진외국의 경우 성능위주 내화설계를 추가로 채택하여 사용하고 있는 추세이다. 본 연구에서는 비교적 체계적으로 성능적 내화설계를 적용한 뉴질랜드와 영국의 기준을 중점적으로 분석하여 평가 절차를 제시하였다. Fig. 1은 성능위주 설계의 계층을 나타내고 있다(Buchanan, 2001).

Fig. 1. System of Fire Performance-based Designs

설계단계에서 내화설계는 Acceptable Solution과 Approved Calculation Method의 적용 가능성을 우선적으로 검토하게 된다. Acceptable Solution은 국내의 법정내화 구조와 유사한 형태로서 콘크리트 피복두께, 철근 배근 간격, 철골 부재의 내화 피복 두께 등을 사양적으로 명시하고 있다.

Approved Calculation Method는 사양적 개념과 성능적 개념을 복합적으로 고려하는 것으로서 콘크리트의 깊이별 온도(등온선) 및 강재의 온도상승에 따른 강도 저감 등을 제시하고 이를 고려하여 계산 및 평가하는 방법으로 간략한 계산법 또는 단순 계산법으로 표현되고 있다.

Performance Based Alternative Design은 사양적 기준을 제시하지 않고 온도 상승에 따른 물성 변화 등만을 고려하여 화재시 구조적인 성능 유무 또는 성능 시간을 판별하는 것으로서 상세 계산법 또는 Advanced Design으로 표현되고 있다.

2.2.1 뉴질랜드 코드

뉴질랜드의 건축법은 Building Act 2004, Building Regulations, Building Code로 구성되어 있다. 이중 Building Code는 Department of Building and Housing(2010)이라는 지침서를 두어 건축 전반에 걸친 설계 및 평가방법에 대해 설명하고 있다. 건축물 화재와 관련해서는 크게 Acceptable Solution, Verification Method, Alternative Solution으로 구성되어 있다(BIA, 1992). Fig. 2는 뉴질랜드 건축법 중 화재와 관련한 코드 및 법규 구성을 나타내고 있다.

Fig. 2. New Zealand Building Code

Acceptable Solution은 일반건축물에 적용되는 일반적인 성능설계 프로세스로서 빌딩높이 · 평면계획 · 개구부 · 인접건물과의 거리 등을 고려한 설계 기준을 제시하고 있다. 다만 구조재료의 발전 및 구조공법의 개발 등으로 건물이 장수명화 되기 때문에 건물의 용도 · 거주특성 · 사용목적 등이 대체될 수 있으므로, 화재안전시스템은 이를 고려하여 탄력적으로 변화할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다고 권고하고 있다.

Verification Methods는 내화설계의 적합성을 평가하는 하나의 방법으로서 수계산, 실험 등으로 구성되어 있다. 계산방법은 인정된 수치해석과 분석방법을 통해 평가되며, 실험은 국내 KS 실험방법과 유사하게 공인된 시험방법을 통해 평가하도록 되어있다.

Alternative Solution은 Acceptable Solution과 Verification Methods에서 다루지 못하는 건축물, 공법, 재료 등에 대하여 대안적 설계 방법에 대해 설명하고 있다. 특히 철골구조의 경우 NZS 3404의 절차를 통해 성능위주 내화설계를 수행해야 한다고 명시하고 있다. 이는 유로코드의 성능위주 설계 절차를 기반으로 구성된 것으로 강재 단면형상에 따른 온도 상승을 통해 내화성능시간을 도출하는 방법을 채택하고 있다. 유로코드의 단순설계 방법에 기반한 것으로서 사양적 기준과 성능적 평가 방법을 적절하게 접목한 것이다. 그러나 강구조 설계기준과 달리 콘크리트 구조의 경우, NZS 3101에서 탄성계수, 밀도, 비열, 열전도율 등 성능위주 내화설계에 필요한 정보를 제공하고 있으나 명확한 성능위주 설계 및 평가 절차를 제시하지 않고 유로코드 2 및 내화설계 가이드라인을 참고할 것을 권고하고 있다(NZS 3101). 이는 설계조건, 허용판단기준, 평가할 공학기법의 선택방법 등에 대해 명확한 규칙이 정해져 있지 않고 설계자의 재량에 맡겨져 있는 것으로 성능위주 내화설계를 수행하는데 현실적으로 혼란을 빚고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 이와 같은 이유를 보완하고자 설계 가이드라인을 제공하여 철골구조 및 콘크리트 구조에 대한 평가 절차를 돕고 있다. Alternative Solution

의 지침서적인 가이드라인은 화재, 플래쉬오버 판별, 등가 화재심각도, 강구조 보의 내화 성능 판별, 콘크리트 구조의 내화설계 절차를 제시하고 있다(Yang, 2014).

설계 가이드라인은 유로코드의 성능위주 설계를 기반으로 구성되어 있으며 상세설계보다 단순설계의 개념을 통해 전반적인 절차 및 세부 기준을 구축하였다. Table 1은 뉴질랜드 코드 및 가이드라인에서 제시하는 설계 항목을 나타내고 있다.

Table 1. New Zealand Code vs Guide-Line

	Concrete Structure		Steel Structure	
	Acceptable Solution	Alternative Solution	Acceptable Solution	Alternative Solution
NZS CODE	○	X	○	○*
Guide-Line	○	○*	○	○*

○* is standards based on Eurocode.

2.2.2 영국 코드

영국의 경우 Fig. 3과 같이 내화관련 법규인 Building Regulation 2010에서 내화설계방법 관련 사항을 화재안전의 일부에 포함하고 있으며 세부사항을 Approved B에서 제시하고 있다. Approved B는 B1(Means of warning and escape), B2(Internal fire Spread-linings), B3(Internal fire spread-structure), B4(External fire spread), B5(Access and facilities for the fire service)로 구성되어 있다. 특히 내화설계와 관련된 Approved B3의 경우 주요 구조부, 구획 공간, 반자 밑이나 지붕과 같은 숨겨진 공간, 개구부와 소화시설의 보호, 복합소평물과 주차장을 위한 특별 규약으로 구분되어 있다. 주요구조부의 경우 바닥, 내력벽과 같이 구조적인 성능을 하는 요소로 한정하였다. Approved B3에서 제시하고 있는 주요구조부의 경우 사양적 기준으로서 Appendix A의 Table A1에서 제시하는 내화성능을 준수해야 한다고 제시하고 있으며 이는 건축 부재에 따른 사양적 요구내화시간을 나타내고 있다.

Fig. 3. Hierarchy of United Kingdom Building Code

사양규정을 준수하기 어렵거나 해당항목에 포함되지 않는 경우에 한하여 Approved 일반사항에서 성능위주 내화설계와 관련하여 BS 7974 [Published Document 포함]를 제시하고 있으며 이는 건축물의 화재안전 평가와 설계를 위한 체계 및 가이드라인 제공하고 있다. BS 7974는 건축물의 재료별에 따른 성능위주 내화설계 절차에 관한 것으로써 크게 실험, 단순설계, 상세설계로 구분지어 절차를 제시하고 있다.

BS 7974에서 제시하는 강구조물의 단순설계는 유로코드 1993-1-1과 유로코드 1993-1-2에 해당하는 것으로써 온도에 따른 강재의 한계온도 및 소요강도/설계강도를 통하여 주요구조부의 내화성능을 판별하고 있다. 상세설계의 경우 정해진 설계 기준 없이 온도에 따른 강재의 열적 특성을 고려하여 설계자가 주요구조부의 화재안전성을 평가하고 이에 대한 근거자료를 제시하는 방법으로 구성되어 있다(Min, 2013).

BS 7974에서 제시하는 콘크리트 구조물의 단순설계는 500℃ 등온법, 구역분할법 등 온도가 상승함에 따라 콘크리트가 구조적인 역할을 하지 못하는 단면 부위를 제외하고 상온설계와 유사한 방법으로 구조물의 안전성을 평가할 수 있도록 구성되어 있다. 특히 콘크리트의 경우 복합재료로서 불규칙한 성능을 갖는다고 가정하여 강구조의 단순설계방법보다 높은 안전율을 고려하여 설계하는 것이 특징이다. 상세설계의 경우 열전도율, 밀도, 비열 등 콘크리트 재료의 고유 물성치가 적용되거나 재료의 특성상 오차 확률이 높으므로 상세설계를 수행하기 어렵다고 제시하고 있으며 연구목적 등으로 수행하는 것이 바람직하다고 명시되어 있다.

3. 콘크리트 구조의 내화성능 평가

본 연구에서는 건축물 화재와 관련된 국내외 문헌 및 관련 코드 분석을 통하여 국내에 적용 가능한 대안적 성능위주 내화설계 평가 절차를 제시하였다. 기본적인 성능위주 내화설계 절차는 뉴질랜드 코드의 지침서인 Fire Engineering Design Guide(2002)를 참고 하였으며, 이는 유로코드의 절차를 단순화하여 사용자의 편의성을 극대화한 것이 특징이다.

3.1 개요

콘크리트 구조에 대한 내화설계 평가는 주로 등온법에 의해 계산된다. 등온법은 주요구조부가 화재에 노출될 경우 상승하는 콘크리트 깊이 별 온도를 파악하여 재료의 강도를 저감하거나 유효 단면을 재 산정하여 계산하는 방법으로써 유럽, 호주, 뉴질랜드 등에서 사용하고 있는 성능적 단순 계산방법이다. 등온법은 화재곡선에 의해 온도가 상승함에 따라 특정 온도 이상 초과되는 단면을 제외하여 유효 단면을 산정한 뒤 100% 강도를 유지하는 것으로 가정하며 계산한다.

단, 철근의 경우 해당 위치의 콘크리트 온도를 철근의 온도로 가정하여 이에 대한 강도 저감을 통해 단면의 성능을 평가한다. 평가 기준은 화재시 소요강도 및 설계강도를 비교하여 결정하며 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,t}} \leq 1.0 \quad (1)$$

Eq. (1)에서 $E_{d,fi}$ 는 화재시 소요강도, $R_{d,fi,t}$ 는 시간 t 에 따른 화재시 설계강도이다. 본 연구를 통해 제시된 콘크리트 구조의 내화성능 평가 절차에 대한 기본 절차는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. Performance Design Procedure of Concrete Structure

3.2 내화성능설계 절차

콘크리트 구조에 대한 내화성능 설계 절차에 대한 세부 사항은 다음과 같다.

3.2.1 대안적 설계 적용 가능성 분석

해당 건축물이 사양적 기준 조건을 충족할 수 있는 경우 요구내화성능을 충족하는 것으로 판단하여 대안설계를 실시할 필요가 없게 된다. 그러나 사양적 기준의 조건에 만족하지 못한 경우 다음 절차에 의해 해당 건축물의 내화성능을 평가 또는 설계하게 된다.

3.2.2 부재의 유효두께 산정

프리스트레스 강연선 또는 인장철근까지의 유효두께(C_e)를 계산한다. 유효두께(C_e)는 강재 각각의 중심거리 또는

화재에 노출된 표면에서부터 철근까지의 거리의 가중평균을 취하게 된다. 예를 들어 Fig. 5와 같이 보에 매립된 인장철근에 적용 가능한 유효두께는 Eq. (2)를 따른다.

Fig. 5. Section of the Beam

$$C_e = \frac{A_1 C_1 + A_2 C_2 + A_3 C_3 + A_4 C_4 + A_5 C_5 + A_6 C_6}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 A_n 은 n 번째의 철근이나 강연선의 단면적, C_n 은 n 번째의 철근이나 강연선 축부터 피복까지 거리이다.

3.2.3 강재의 공칭온도 산정

산정된 유효두께(C_e)를 요구내화 시간 및 보의 단면 치수를 활용하여 강재의 공칭온도를 결정한다. 온도 상승에 따른 보 내부의 상승온도는 기존 실험 결과를 기반(Abrams, 1977)으로 Fig. 6과 같이 나타내었다. Fig. 6은 표준화재곡선에 의해 60분 또는 120분 가열시 콘크리트 깊이별 온도를 나타내고 있다. 그래프를 이용한 공칭온도는 다음과 같이 결정된다.

- 유효두께를 이용하여 가로축의 값 계산
- 보폭의 요구내화성능을 만족하는 커브와 교차하는 점 계산
- 세로축과 화재곡선이 교차하는 지점 계산
- 교차하는 지점에서의 세로축으로부터 필요한 온도를 계산

경량 콘크리트 또는 웨브의 경우 유효두께에 따른 온도에 관한 특정설계곡선이 없는 경우에는 경량콘크리트의 낮은 열확산율을 고려하기 위해 Fig. 6의 값에 의한 온도 값에 0.8을 곱하여 사용한다.

보 폭의 중간에 대한 값은 곡선 사이를 보간하여 사용한다. 보의 두께가 300 mm보다 큰 경우 300 mm인 보의 곡선을 적용하여 사용한다.

(a) [FRR-60min]

(b) [FRR-120min]

Fig. 6. Temperature-Effective Cover of Beams

3.2.4 온도상승에 따른 강재의 항복강도 결정

Fig. 6을 사용하여 산정된 철근의 온도 T_c 를 Eq. (3)을 이용하여 철근의 강도저감계수 r_θ 를 결정한다. 계산된 철근의 강도저감계수를 이용하여 화재시 철근의 항복강도 또는 프리스트레스 강연선의 항복강도를 결정한다. Fig. 7은 온도 상승에 따른 강재의 강도저감계수를 나타내고 있다.

Fig. 7. Strength of the Steel According to the Temperature

(a) 철근 (AS 3600, 1988)

$$r_{\theta} = \begin{cases} 1.0 & T_s \leq 250^{\circ}\text{C} \\ 1.53 - T_s/470 & T_s > 250^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

(b) 프리스트레스 강 또는 강연선

$$r_{\theta} = \begin{cases} 1.0 & T \leq 150^{\circ}\text{C} \\ 1.27 - T/550 & T > 150^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

$$F_{y\theta} = F_y \times r_{\theta} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 F_y 는 강재의 항복강도, r_{θ} 는 온도상승에 따른 강재의 강도저감계수이다.

3.2.5 온도상승에 따른 유효 춤 및 유효 폭 산정

Fig. 6을 통해 750°C 보다 높은 온도를 기록하는 부재영역에서의 콘크리트를 무시하여 부재의 감소 유효춤(b_{θ})과 유효 폭(d_{θ})을 결정한다. 부재의 압축영역이 화재에 노출된 경우에는 d_{θ} 는 d 보다 작아 질 수도 있다. 온도상승에 따른 유효 춤 및 유효폭의 산정방법을 정리하면 Eq. (4)와 같다.

- 철근의 도심 [c_a] 결정

$$c_a = \frac{A_1 \times l_1 + A_2 \times l_2 + A_3 \times l_3 + \dots + A_n \times l_n}{\sum A_n} \quad (4)$$

Eq. (4)에서 A_n 은 철근의 단면적, l_n 은 철근 중심으로부터 콘크리트 표면까지 최소길이이다.

- 감소피복두께 결정

감소피복 두께는 Fig. 8을 통해 결정된다. 뉴질랜드 가이드라인에서는 750°C 이상 상승하는 단면의 경우 구조적인 성능을 발휘하지 못한다고 가정하였으며, 유로코드의 경우 500°C 를 기준으로 계산한다. 감소피복 두께를 산정하는 방법은 다음과 같다.

Fig. 8. Calculation Method of the Effective Cover

- 온도상승에 따른 유효 춤 결정

$$d_{\theta} = \min[\text{보춤}(D) - C_a; \text{보춤}(D) - \text{감소피복두께}]$$

- 온도상승에 따른 유효 폭 결정

$$b_{\theta} = b - \text{감소피복두께} \times 2$$

3.2.6 콘크리트의 공칭온도 결정

콘크리트의 공칭온도(T_c)는 등가응력블럭의 온도로 가정한다. 보와 T형 리브의 단면에 대해서는 등가응력블럭 끝부분 온도(일반적으로 750°C)와 보 중간폭 온도의 평균값을 사용한다. Fig. 9는 콘크리트의 온도 및 중간 지점의 온도를 산정하는 방법에 대한 예시를 나타내고 있다.

Fig. 9. Concrete Internal Temperature

3.2.7 콘크리트 강도 결정

압축응력블럭의 공칭온도(T_c)를 통해 온도 상승에 따른 콘크리트의 압축강도를 결정한다. 온도상승에 따른 콘크리트의 압축강도($f'_{c\theta}$)는 Fig. 7에 의해 정해진 계수(r'_{θ})를 압축강도에 곱하여 Eq. (4)와 같이 결정된다. 일반 콘크리트가 $T_c < 350^{\circ}\text{C}$, 경량콘크리트가 500°C 일 경우, $f'_{c\theta} = f'_c$ 이다.

(a) 경량콘크리트

$$r'_{\theta} = \begin{cases} 1.0 & T_c \leq 500^{\circ}\text{C} \\ 2.0 - 0.6 T_c/300 & T_c > 500^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

(b) 일반 콘크리트

$$r'_{\theta} = \begin{cases} 1.0 & T_c \leq 350^{\circ}\text{C} \\ 1.65 - 0.8 T_c/440 & T_c > 350^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

$$f'_{c\theta} = f'_c \times r'_{\theta} \quad (4)$$

3.2.8 온도상승에 따른 등가응력블럭 깊이 [a_{θ}] 계산

감소된 철근의 강도를 통해 등가응력블럭(a_{θ})의 깊이를 계산하며 Eqs (5), (6)과 같다.

$$a_{\theta} = \frac{A_s F_{y\theta}}{0.85 f'_{c\theta} b_{\theta}} \quad [\text{철근인 경우}] \quad (5)$$

$$a_{\theta} = \frac{A_s F_{ps\theta}}{0.85 f'_{cd} b_{\theta}} \quad [\text{프리스트레스인 경우}] \quad (6)$$

3.2.9 요구내화시간에 따른 공칭강도 계산

등가응력블럭 깊이, 유효단면, 감소된 철근의 강도가 계산 되면 Eqs. (7), (8)과 같이 단면해석을 수행하며 상온시 부재 단면해석방법과 동일하다.

$$M_{\theta}^{+}(\text{or } M_{\theta}^{-}) = A_s F_{y\theta} (d_{\theta} - \frac{a_{\theta}}{2}) \quad [\text{철근}] \quad (7)$$

$$M_{\theta}^{+}(\text{or } M_{\theta}^{-}) = A_s F_{ps\theta} (d_{\theta} - \frac{a_{\theta}}{2}) \quad [\text{프리스트레스}] \quad (8)$$

3.2.10 화재시 소요강도[M_f] 계산

화재시 부재에 작용하는 소요강도를 계산한다. 화재시 구조물에 적용되는 하중은 화재 발생으로 인한 적재물의 연소에 의해 상온 시에 적용된 최대 설계하중보다 작아지게 된다. 뉴질랜드 코드에서 제시하고 있는 화재시 하중 조합은 Eq. (9)와 같다.

$$\omega = 1.0D + \phi L \quad (9)$$

$$\phi = \begin{cases} 0.4 & (\text{주거시설, 사무실, 주차장, } Trafficable \text{ roofs}) \\ 0.6 & (\text{저장창고, 그외 시설}) \\ 0 & (Non - Trafficable \text{ roofs}) \end{cases}$$

Eq. (9)에서 D 는 고정하중, L 은 활하중이다.

3.2.11 내화성능 평가

상온시 극한강도설계법과 동일하게 소요강도 및 설계 · 공칭강도 비교를 통하여 화재시 부재에 대한 내화성능을 평가한다.

$\phi M_{\theta}^{+} \geq M_f$ 인 경우 - 요구내화성능 만족

$\phi M_{\theta}^{+} < M_f$ 인 경우 - 재설계

공칭강도 ϕM_{θ} 에 사용되는 강도저감계수 ϕ 는 다음과 같이 정의되나 상온에서 강도저감계수 ϕ 는 일반적으로 0.9의 값을 사용한다.

$$\phi = \begin{cases} < 1.0 & \text{상온} \\ = 1.0 & \text{화재} \end{cases}$$

4. 결 론

본 연구에서는 성능위주 내화설계를 적용한 국가를 선정 하여 성능위주 내화설계에 대한 적용 범위 및 전반적인 설계 절차를 분석하였다. 이를 통하여 선정된 유로코드

및 뉴질랜드 코드의 세분화된 화재 공학적 이론 및 평가 절차를 분석하여 콘크리트 구조의 대안적 성능위주 내화설 계 평가 절차를 정립하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내에 적용 가능한 성능위주 내화설계 기준 정립 및 법적 타당성 확보를 위해 성능위주 내화설계를 기존에 수행중이거나 법으로 제정한 선진외국의 관련 코드 및 기준을 분석하였다. 분석 대상으로는 성능 설계법을 보유하고 있는 뉴질랜드, 영국 및 유로코드를 선정하였으며 국내 사양기준과 비교하여 문제점을 분석함으로써 한국형 성능위주 내화설계 평가 절차에 대한 방향을 제시하였다.
- (2) 콘크리트 구조의 경우 강구조와 달리 복합적인 재료의 특성으로 인해 복잡한 성능위주 내화설계 과정이 필요하다. 그러나 화재 공학적 이론 및 고온에 따른 물성값 등 많은 영향 인자로 인해 적절한 성능위주 내화설계를 평가하는데 한계점이 있다. 본 연구의 경우, 온도 상승에 따른 콘크리트의 강도 저하 및 철근의 강도 저하를 내화성능 시간에 따른 부재의 깊이별 온도로 예측함으로써 실무 구조 설계자 및 평가자들이 콘크리트 부재에 대한 내화성능을 간편하게 평가할 수 있도록 제시하였다.
- (3) 본 연구에서는 보에 대한 내화성능 설계 방법을 제시하고 있음으로 보를 제외한 기둥, 슬래브 등 주요구조부에 대한 내화성능 평가방법에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Abrams, M.S. (1977) Performance of Concrete Structures Exposed to Fire. *Materials and Process*, Vol. 9.
- BIA (1992) *New Zealand Building Code Handbook and Approved Documents*. Building Industry Authority, Wellington.
- Buchanan, A.H. (2001) *Fire Engineering Design Guide*. University of Canterbury, pp. 21-42.
- Department of Building and Housing (2010) *Compliance Document for New Zealand Building Code Clauses C1, C2, C3, C4 Fire Safety*.
- Eurocode 2 (1995) *Design of Concrete Structures Part1.2: General Rules Structural Fire Design*.

Lee, J., Yang, S., Na, O., and Kweon, O. (2014) A Study on the Fire Resistance Performance Evaluation of Steel Structure using Performance-based Fire Resistance Design. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 5, pp. 229-235.

Min, J. (2013) Structural Fire Design of Steel Structures Using Eurocodes. *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 19-25.

New Zealand Standard (2006) *NZS 3101:Concrete Structure Standard*.

Yang, S., Lee, J., Yeo, I., and Na, O. (2014) Development of the Evaluation Program based on Fire Resistance Performance Design of Steel Structures. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 3, pp. 201-207.

Received	September 14, 2017
Revised	September 19, 2017
Accepted	November 27, 2017