

무피복FR강을 사용한 철골주차장의 화재시 거동성상 예측에 관한 연구

The Study on Predicting Behavior of Open Car Parks Using The Bare FR Steel Exposed to Fire

김 화 중* 이 지 희** 이 창 준*** 추 연 희***
Kim, Wha-Jung Lee, Ji-Hee Lee, Chang-Joon Choo, Yeun-Hee

ABSTRACT

This study investigated to the stability of open car parks below 600°C, as to predict behavior of bare FR steel structure exposed to fire. Especially, This study evaluated deformation of steel structure members of open car parks, considering change of material property by temperature. From the numerical analysis, we know the fact that the deformations comparing of standard values are stable to use the FR steel below 600°C in open car parks plan

1. 서 론

현행법규에서의 내화설계법에서는 각 부재의 내화성능이 표준가열곡선에 의해 평가되는 시방서적인 면이 많아 실화재와의 대응이 어렵다는 단점과 강재의 특성을 고려하지 않고, 최고온도를 일률적으로 규정(강재의 최고온도가 350°C이하 : 일본동일)하고 있어 건축물의 용도, 규모 등에 따른 내화피복두께 또한 획일적으로 결정되고 있어 내화피복경감에 따른 건축경비의 절감을 기대할 수 없다고 여겨진다.

이러한 정세와 함께 최근 세계각국에서의 내화설계법은 많은 변화를 보이고 있다. 종래의 표준가열하에서의 부재허용온도판정방법에 따른 각각의 건축물에서의 화재온도곡선을 이론적모델과 실험결과를 이용하여 공학적인 방법으로 정하고, 그 가열조건을 가지고 열응력 해석을 하여 내화성능을 판정하는 신내화설계법으로 바뀌어 가고 있다. 이상과 같은 관점에서 본 연구는 철골주차장에 대하여, 철골조의 내화성능을 파악하는 것을 목적으로 철골조의 화재시 FR강이 600°C이하의 범위에서 무피복상태로서의 화재안정성을 보장할 수 있는지의 여부를 살펴보는 것을 목적으로 한다.

* 경북대학교 건축공학과 교수

** 경북대학교 건축공학과 박사수료

*** 경북대학교 건축공학과 석사과정

본 연구는 포항종합제철에서 지원하는 연구비로 수행 되었습니다. 포항종합제철에 감사를 포함합니다.

2. 해석 순서

FR강을 사용한 개방식 주차장의 화재시의 내화성능 평가를 위해서는 먼저 화재가 발생한 구획의 화재성상을 파악하여야 한다. 이때 화재성상은 화재하중 밀도, 환기조건 및 구획을 둘러싼 주변 벽의 열적 성질의 함수로 나타난다. 화재성상의 결과로 얻어진 화염온도를 바탕으로 FR강의 열전도 해석을 행한다. FR강의 재료적 성질은 일반강과 비교하여 그 열적 특성의 차이가 있으므로 적절한 물성치를 고려하여 해석을 행할 필요가 있다. 열전도 해석의 결과로 얻은 FR강의 시간에 따른 온도의 변화는 가구의 열응력 해석을 하는데 이용되며, 최종적으로 허용기준과 가구의 해석결과를 비교하여 그 안전성을 판단한다. 아래 그림1에 이상의 해석 순서를 보인다.

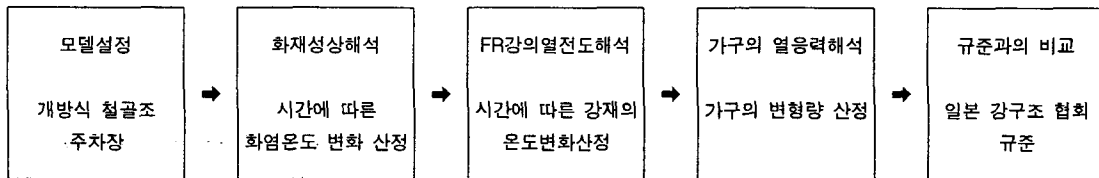


그림1. 주차장의 내화성능 평가 과정

3. 모델설정

해석모델로 사용한 주차장의 건물의 개요를 표1에, 기준층 평면을 그림2에 보인다. 그림2의 평면에서 명암으로 처리된 부분을 화재 발생시의 가상공간으로 가정하여 화재시의 화재하중, 온도성상 등을 파악하며, A-A골조에 대해서 열응력 해석을 행한다.

대지위치	대구광역시 중구 종로 2가	
대지면적	2,724㎡	
지역, 지구	중심상업지역, 주차장 정비지구, 방화지구	
층수, 구조	지상6층 일반철골조	
층별	바닥면적	용도
1층	1,789.6㎡	기계실, 발전기실, 주차장
2층	1,789.6㎡	주차장
3층	1,789.6㎡	주차장
4층	1,789.6㎡	주차장
5층	1,789.6㎡	주차장
옥탑층	150.59㎡	옥탑층(전기실, 주차장)
계	9,085.09㎡	
주차	설치주차대수 : 282대	
	(1층: 51대, 2-5층 :각 층64대, 지붕층:47대)	

표1. 모델 주차장 건물 개요

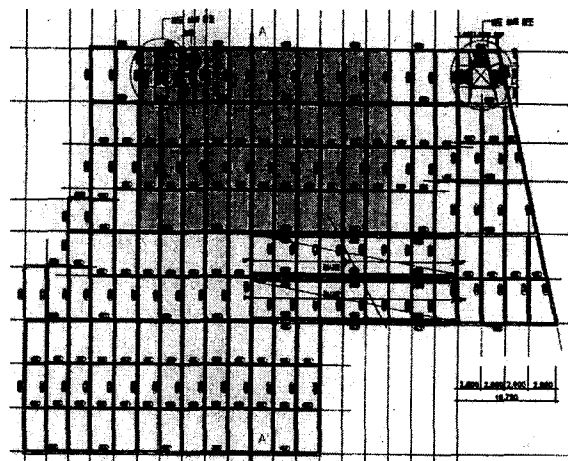


그림2. 주차장 기준층 평면

4. 해석방법 및 해석결과

4.1 화재성상 해석

일반적으로 건축물의 화재성상은 공기량과 가연물량에 의해 지배를 받고 있는데 특히, 개방식 주차장의 경우는 개구의 면적이 전체 벽면적의 대부분을 차지하므로 공기량은 충분하다고 판단된다. 따라서 주로 가연물량에 의해 화재성상이 지배되는 본 모델의 경우에는 개구면적을 전체벽면적의 90%로 가정하여 화재 성상 해석을 행하였다.

화재하중의 경우는 보통승용차를 기준으로 하였을 때, 차량 면적당 40kg/m², 바닥면적당 10~20kg/m²정도가 된다. 본 모델에서는 화재하중을 바닥면적당 20kg/m²으로 한다.

모델의 화재온도를 파악하는데 필요한 초기데이터는 표2와 다음과 같다.

① 벽면초기온도 = 10 ℃
② 개구부의 면적 = 125 m ²
③ 개구부의 폭 = 23.15 m
④ 바닥면적 = 518.7m ²
⑤ 전체벽의 면적 = 138.9m ²
⑥ 벽의 분할두께 = 0.02m
⑦ 개구부의 높이 = 2.7m
⑧ 벽의 열전도율 = 1.0 kcal/kg·h·℃
⑨ 벽의 밀도 = 2400 kg/m ³
⑩ 벽의 비열 = 0.24kcal/kg·℃
⑪ 연소율 = 80%
⑫ 화재하중 = 20kg/m ²
⑬ 환기계수 = 2.38

표2. 화염온도예측을 위한 입력데이터

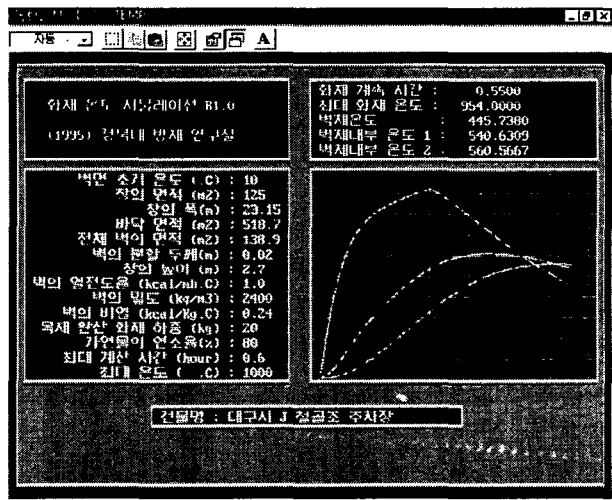


그림3. 화염 온도 추정 결과

위의 데이터를 사용하여 화염온도를 구한 결과, 화재의 지속시간은 0.55hr이고, 최대화재온도는 954℃를 나타내었다.

4.2 FR강의 열전도해석

열전도해석시 해석대상이 되는 철골가구부재의 내화피복은 없는 것으로 하였고, 화염은 강재의 표면에만 닿는 것으로 제한하였으므로 경계조건에서는 부재표면과 외기와의 열전달만을 유효한 것으로 가정하였다. 강재의 온도를 예측하기 위해 비정상열전도에 대한 지배방정식을 식1과 같이 나타낸다. 단, 본 모델에서는1차원 온도장만을 고려하여 그 성상을 파악하였다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q} \quad (\text{식1})$$

단, $T = T(x, t)$: 온도, ρ : 밀도, c : 비열 λ : 열전도율 \dot{Q} : 발열량을 나타낸다.

(식1) 에서 사용된 부재의 열전도율과 비열은 강제온도에 따라 변화하며, 다음의 식을 따르는 것으로 하였다.

$$\lambda (\text{열전도율}) = -2.96 \times 10^{-4} \times T + 0.48 \quad (\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{°C})$$

$$c_p (\text{비열}) = 1.21 \times 10^{-4} \times T + 0.11 \quad (\text{kcal/kg} \cdot \text{°C})$$

위의 (식1)을 가라킨법에 근거하여 유한요소식으로 나타내는데 먼저 형상함수 $[N]$ 을 도입하여 매트릭스로 표현한 것을 (식2)에 나타낸다.

$$[k] \{ \phi \} + [c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{ f \} \quad (\text{식2})$$

단, $[k]$, $[c]$, $\{ f \}$ 는 각각 열전도매트릭스, 열용량 매트릭스, 열유속벡터 이다.

(식2)는 공간에 관해서는 이산화하고 있지만, 시간에 관해서는 이산화 되고 있지 않다. 따라서 시간에 관한 이산화수법으로서 많이 사용되고 있는 크랭크-니콜슨(Crank-Nicolson) 차분식을 도입하여 그 식을 정리하면 (식3)과 같다.

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{ \phi(t + \Delta t) \} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right) \{ \phi(t) \} + \{ F \} \quad (\text{식3})$$

4.1절에서 얻은 시간에 따른 화염온도의 변화를 식3에 적용하여 강제온도를 구하면 그림3과 같다.

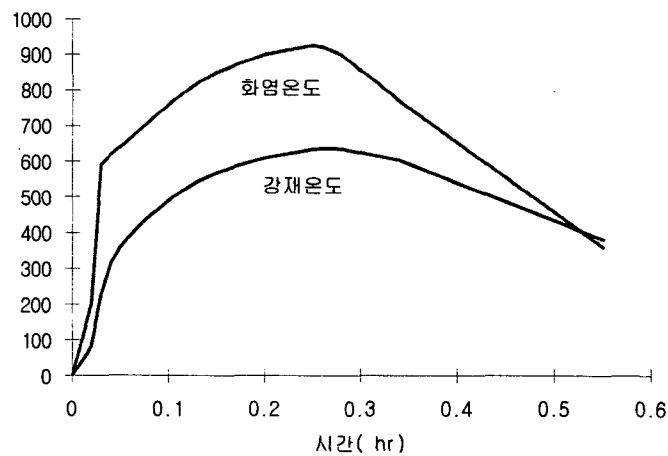


그림4. FR강의 시간에 따른 온도의 변화

4.3 가구의 열응력해석

본 절에서는 일정한 하중을 받고 있는 가구에 대해서 시간의 경과에 따라 화재에 의해 가구의 온도가 변화함으로써 발생하는 가구의 추가 변형을 탄성범위 내에서 해석한다. 그림1의 평면에서 온도가 600℃ 까지 증가할 경우의 A-A클조의 변형을 살펴본다. 그림4의 A부분에서 화재가 집중 발생한 경우와 B부분에서 발생한 경우에 대해서 해석한다. 가구의 형태 및 각 부재의 단면은 그림4와 같으며, 하중은 주차장 적재하중 400kg/m²을 고려하여 각 노드에 하중으로 작용시켰다.

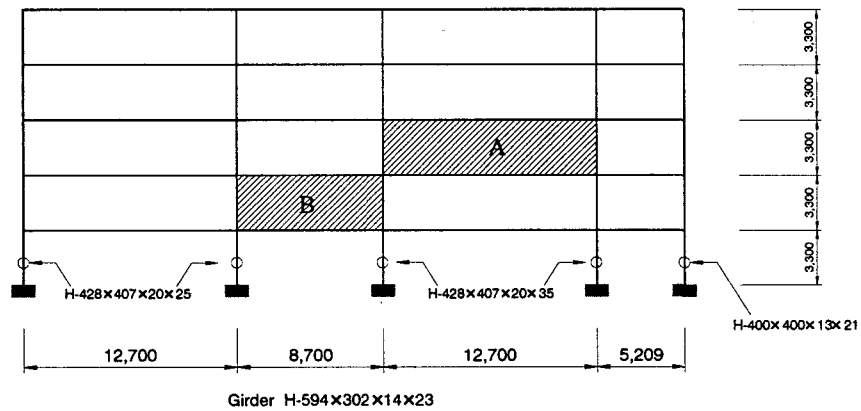


그림 5. 예제가구의 형태 및 부재단면

시간에 따른 강재의 온도 변화는 4.2절에서 계산된 값을 사용하며 NSFR490A를 무피복으로 사용했을 경우를 고려한다. 이 재료의 온도에 따른 E값의 변화와 α 의 변화 및 항복하중의 변화는 아래 표2-표4의 값들을 선형보간 하여 사용한다. 참고로 일반강과의 비교를 위해 그래프에 그 값들을 표시한다.

가열온도 (°C)	탄성계수 E(kg/mm ²)
	NSFR490A
상온	21530.61
100	21147.96
200	20535.71
300	19846.94
400	19132.65
500	18010.20
600	18010.20

표3. 온도변화에 따른 E값의 변화

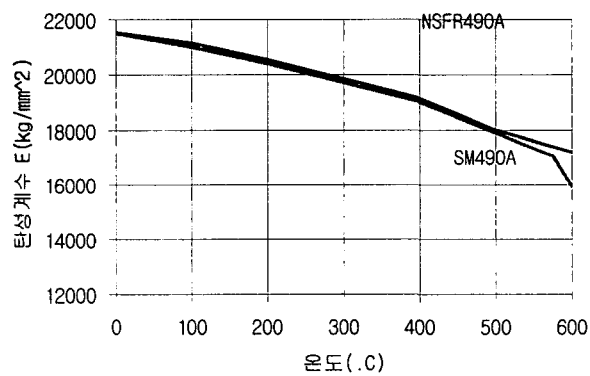


그림6. 온도변화에 따른 E값의 변화

가열온도 (°C)	팽창계수 α (/°C)
	NSFR490A
상온-100	12.44×10^{-6}
100-200	12.60×10^{-6}
200-300	12.90×10^{-6}
300-400	13.80×10^{-6}
400-500	14.80×10^{-6}
500-600	15.40×10^{-6}

표4. 온도변화에 따른 α 값의 변화

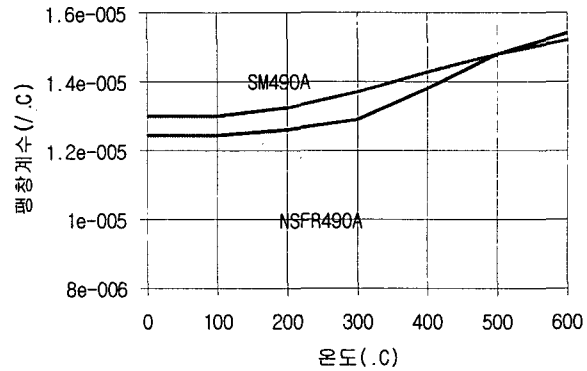


그림7. 온도변화에 따른 팽창계수의 변화

가열온도(°C)	항복응력 (kg/mm ²)
	NSFR490A
상온	35.20
100	34.56
200	33.72
300	32.86
400	30.61
500	29.18
600	23.23

표5. 온도변화에 따른 항복응력변화

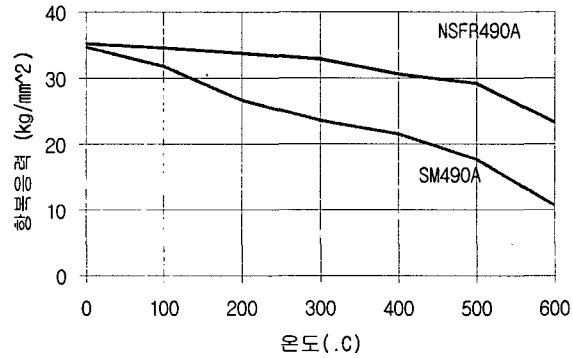


그림8. 온도변화에 따른 항복응력도 변화

온도변화에 따른 재료성질의 변화를 고려하여 다음과 같은 방법으로 열응력 해석을 행한다.

FEM으로 2차원 공간에서의 가구해석을 위해 프레임(frame)요소를 사용한다. 온도의 변화가 없는 정적상태의 초기변형 산정을 한다. 여기서 산정된 가구의 변위값을 기초로 하여 온도 증가에 따른 변형을 예측한다. 온도가 증가함에 따라 열팽창에 의한 변형률은 증가하지만 E값은 감소한다. 이들 모두를 고려하기 위해서 다음과 같은 수법을 사용한다.

온도 증가가 없는 초기의 평형 방정식을 $k_0 \cdot d_0 = f_0$ 로 둔다면, Δt 시간 후 온도는 $\Delta temp$ 만큼 증가 한 경우 E값은 감소하게 되며 ϵ_T 값은 증가하게 된다. ϵ_T 의 증가는 국부좌표계에서 다음과 같이 외부 하중의 증가로서 고려할 수 있다.

$$\underline{\Delta \hat{f}_e} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}_1 \\ \Delta \hat{v}_1 \\ \Delta \hat{\theta}_1 \\ \Delta \hat{u}_2 \\ \Delta \hat{v}_2 \\ \Delta \hat{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta \varepsilon_T AE \\ 0 \\ 0 \\ \Delta \varepsilon_T AE \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \Delta \hat{f}_e &= \underline{T} \cdot \Delta f_e \\ \Delta f_e &= \underline{T}^T \cdot \Delta \hat{f}_e \\ \Delta \varepsilon_T &= \Delta temp \times \alpha \end{aligned}$$

또 E값의 변화와 d_0 값의 증가치가 고려되어 변화한 강성 Δk_0 를 고려하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$(\underline{k}_0 + \Delta \underline{k}_0) \cdot (\underline{d}_0 + \Delta \underline{d}_0) = (\underline{f}_0 + \Delta \underline{f}_0)$$

이때 강성의 변화와 힘의 변화는 미소시간 Δt , 즉 온도변화 $\Delta temp$ 간에서 선형으로 변하며 이에 따른 $\Delta \underline{d}_0$ 역시 선형으로 변화한다고 가정한다. 따라서

$$\begin{aligned} (\underline{k}_0 + \Delta \underline{k}_0) \cdot \Delta \underline{d}_0 &= (\underline{f}_0 + \Delta \underline{f}_0) - (\underline{k}_0 + \Delta \underline{k}_0) \cdot \underline{d}_0 \\ \underline{k}_1 \cdot \Delta \underline{d}_0 &= \underline{f}_1 - \underline{k}_1 \cdot \underline{d}_0 \\ \Delta \underline{d}_0 &= \underline{k}_1^{-1} (\underline{f}_1 - \underline{k}_1 \cdot \underline{d}_0) \end{aligned}$$

이 되고, Δt 시간 이후의 새로운 방정식 $\underline{k}_1 \cdot \underline{d}_1 = \underline{f}_1$ 을 구성한다. n번째 즉 $n \times \Delta t$ 시간 경과후의 변위증분은

$$\Delta \underline{d}_n = \underline{k}_{n+1}^{-1} (\underline{f}_{n+1} - \underline{k}_{n+1} \cdot \underline{d}_n)$$

이다. 이상의 과정을 설정된 시간까지 반복계산하여 원하는 변위를 구한다. 여기서 산정된 변위는 일본 강구조 협회에서 제시하고 있는 열변형에 의한 가구의 안정조건

- 1) 보팽창에 의한 기둥의 수평변위가 $h/50$ 이하일것
- 2) 보의 처짐이 $L^2/800d$ 이하일것

여기서 h : 층고, L: 보 길이, d: 보 춤

으로 판단한다.

시간에 따른 가구의 변형을 그림9와 그림10에 나타내었으며, 수평 변형이 가장 많이 일어난 화재 발생 지역 기둥의 최대 수평 변형량은 약45.58mm(A위치일 경우)와 약33.34mm(B위치일 경우)로서, 위와 같은 조건하에서 기둥의 수평변위가 $h/50$ 를 넘지 않은 것으로 나타났다. 또 보의 최대처짐은 약20.4mm(A위치일 경우)와 약27.5mm(B위치일 경우)로서 $L^2/800d$ (A위치:339mm, B위치: 159mm)를 초과하지 않는다.

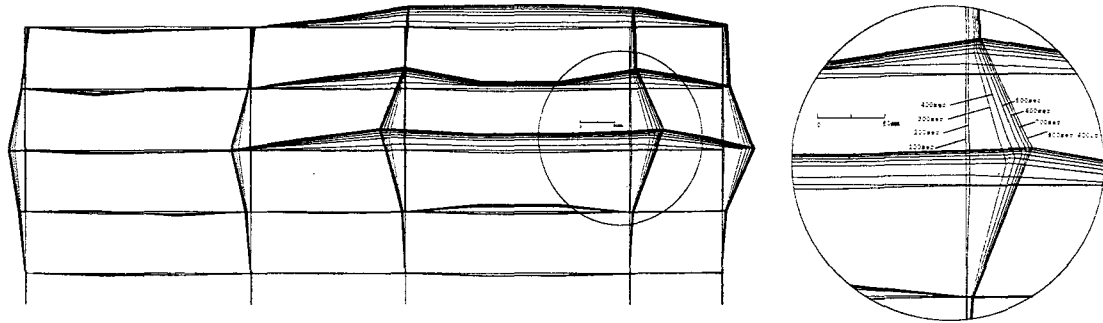


그림9. A위치에서 화재가 발생한 경우의 변형도

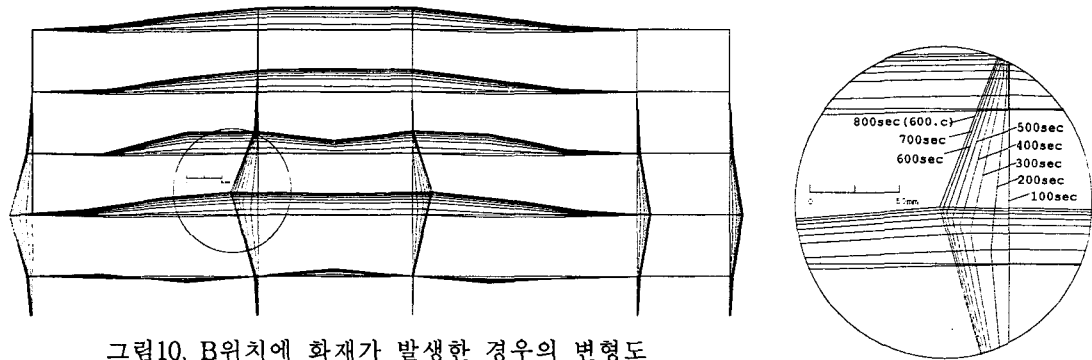


그림10. B위치에 화재가 발생한 경우의 변형도

5. 결론

본 고에서 해석한 결과에 따르면 화재시 강재의 온도 600°C 이하에서는 FR강을 무피복으로 사용하여도 붕괴의 위험은 없는 것으로 사료된다. 지금까지의 철골조 주차장에서는 여러가지 이유로 인하여 외관상 피복을 하지 않고 사용하려는 요구가 있어왔다. 무피복 일반강의 경우, 내화 능력이 떨어지는 경향이 많으므로 피복을 하지 않아도 응력이나 변형의 관점에서 유리하다고 판단되는 FR강을 사용하여 여러 가지 이점을 얻을 수 있을 것이다. 특히 주차장은, 부재에 피복을 하지 않고 철골에 직접 도장하는 것으로 디자인 이미지를 향상시킬 수 있고, 또한 피복이 없는 기둥은 주차장면적을 넓게 할 수 있다. 따라서 주요구조부의 고온시의 역학적 성질이 우수한 FR강의 사용으로 방화 안전상 충분하고, 디자인상 유리한 주차장을 설계할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) 사단법인 대한건축학회, '강구조 내화설계 기준 및 기법에 관한 연구' 1995
- (2) O.C.Zienkiewicz & R.L.Taylor, 'The Finite Element Method 4th Edition' 1991
- (3) Suhas V. Patankar, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow' 1980
- (4) 金和中, 高温度におけるコンクリートの力學的舉動に関する實驗的研究, 1988, 東京工業大學
- (5) 一色尙次 & 北山直方, '伝熱工學' 1971
- (6) 矢川元基 & 宮崎則幸, '要素法によるクリープ熱伝導解析' 1985