

# 나철골기둥의 허용화재하중에 대한 이론적 평가

李 德 濬 / 연소시험실장

본고는 나철골기둥이 근접한 화재하중에 의해서만 가열될 때 어느 정도의 화재하중만큼 견딜 수 있는지에 대하여 이론적인 모형실험을 실시해 연구한 논문을 번역·정리한 것이다.

특히 허용화재하중을 철골중량에 대한 일정한 비율로 제안하고 있는 것이 특징이다.

그러나 허용화재하중을 철골부재에 대한 일정한 중량비로써만 정하므로써, 화재의 복잡성을 비추어 볼 때 많은 문제점이 제기될 소지는 있다고 본다.

## 1. 개 요

일반적으로 철골구조 자체는 화재에 대해 비내화구조이기 때문이 이에 대한 보호조치가 필연적으로 강구되어야 하며 보호조치로는 내화재료로 피복하는 방법을 주로 이용하고 있다.

그러나 극히 적은 양의 화재하중을 가진 실 및 건물의 철골부재에 대해서 일반적인 내화피복두께로 시공한다는 것은 비경제적이고 불필요한 조치로 볼 수 있다. 이러한 철골부재의 화재하중에는 근접해 있는 케이블(Cable), 도료 등이 될 수 있으며 이들만이 철골부재를 가열하게 된다.

또한 구조체로 사용되는 대부분의 철골부재는 400~600°C의 온도에서 강도를 잃게 되므로 이 온도를 초과하지 않는 화재하중을 모형실험을 통해 파악해 본 결과, 허용화재하중은 철골부재중량의 5%정도 된다는 것이며 이를 「5%법칙」으로 제안하고

있다.

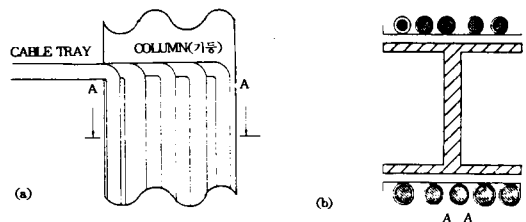
## 2. 모형실험조건

하나의 철골기둥을 실내의 견고한 기단위에 설치하여 철골기둥의 온도가 주위온도를 유지토록 한다. 그러나 이 온도는 간단히하기 위해 이론상 0이 되는 것으로 한다(이것은 1차함수에서 일반성을 손실하는 것이 아니다).

화재하중은 케이블 트레이(Tray)로써 케이블은 그림1과 같이 기둥의 길이방향으로 합쳐져 있다.

기둥의 단위길이별 화재하중은  $Q'c$ 로 표시하며 하중단위는 J/m이다. 이 모형실험으로 아래의 3가지 의문점을 간단히 해결한다.

(1) 최대허용화재하중  $Q'c$ 는 얼마인가?



[그림 1] (a) 케이블트레이와 기둥  
(b) A-A 횡단면도

(2) 화재하중이 단지 철골부재의 길이 부분에만 영향을 미칠 경우 전체피복면의 하중보다 더 큰 하중이 허용될 수 있는가?

(3) 철골온도에 관해 기단의 냉각영향은 무엇인가

### 3. 열전달 및 연소이론

열전달방식은 에너지평형원리를 이용하며 전달 형태는 그림2에 표시한다

화재하중이 연소할 때 에너지  $Q_c$ 의 일부인  $P$ 는 즉시 철골기둥으로 전달되며 기둥의 수평부분은 같은 온도에 있다고 가정한다. 에너지의 나머지 부분인  $1-P$ 는 실 속으로 흡수되며, 극한치를 구하기 위해 이 흡수량은 무시된다. 케이블이 화재하중인 등 실험에서 연소는 착화지점에서 상향으로 빨리 진행하며 가장 위험한 상황을 고려하기 위하여 착화지점은 기단에 있도록 한다.

전반적인 연소상황으로 볼 때 표면에서 연소화대가 빠를 경우 케이블트레이는 모든 단열재가 소모될 때까지 연소하며 이는 연소시간이 통상 10~30분간 소요되지만 모든 에너지가 일시에 방출되어지는 것으로 가정한다.

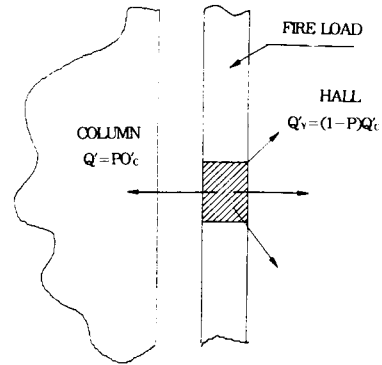
철골속으로 흡수되는 열량  $Q' = PQ'c \dots \textcircled{1}$ 이고, 철골부재의 온도가 균등히 분배되었을 때 상승 온도  $\Delta T$ 는 평형방정식으로부터 계산한다. 즉  $Q' = C_p A \Delta T \dots \textcircled{2}$ 이다.

( $C$ : 비열용량,  $\rho$ : 철골비중,  $A$ : 기둥단면적) 가열하중의 상한치는  $Q' \leq C_p A T_c \dots \textcircled{3}$ 로 표기하므로  $\textcircled{1}$ ,  $\textcircled{3}$ 식에서  $Q'c \leq C_p A T_c / P \dots \textcircled{4}$ 된다. 이 식은 철골을 가열하는 화재하중의 일부인  $P$ 가 주요 온도  $T_c$ 까지는 철골부재의 열용량과 일치한다는 것을 의미한다.

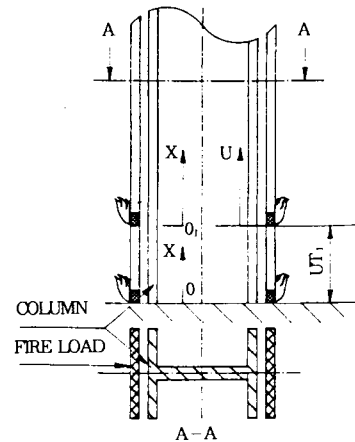
국부적인 연소상황으로 볼 때 화재는 그림3에 나타난 바와 같이 일정속도  $u$ 로써 부분적으로 확대한다고 고려하며 확대면은 수평면으로 취급한다. 철골온도는 열전도방정식으로 산출하고 기둥온도는  $0^\circ\text{C}$ 에서 시작하며 냉각작용은 뉴턴의 냉각법칙을 이용한다.

실제의 화재에선 연소지역이 착화지점으로부터 더 넓은 지역으로 확대하며 화재존속기간도 유한하므로 구조체에 가해지는 열하중은 착화시 0에서 출발하여 최대값에 도달한 후 화재가 사라질 때까지 천천히 감소한다. 이 하중을 계산하려면 3차원의 열전달문제를 해결하여야 하지만, 등 모형실험

결과는 화재안전설계상 구조체의 허용화재하중을 계산해 보기위함과 실험목적상 필수적인 것이 아니므로 제외한다.



[그림 2] 기둥과 실사이의 화재하중의 에너지분리



[그림 3] 기둥따라 배선된 케이블 화재의 모형

### 4. 철골온도의 계산

철골기둥의 온도  $T(x, t)$ 는 열전도식에 의해 위치  $x$ 와 시간  $t$ 의 함수로 주어진다. 즉,

$$\text{즉 } \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \nu T = g(x, t) / \rho c \dots \textcircled{5}$$

이 식의 왼쪽항은 철골부재의 열용량, 기둥의 열분포와 기둥표면의 냉각작용을 나타내며 오른쪽항은 화재로 인해 가열되는 것을 표시한다.  $\alpha$ 는 열분포성을 나타내며  $\alpha = \lambda / \rho c \dots \textcircled{6}$ 이고, 표면의 냉각작

용을 나타내는 인자값은  $\lambda = (h/ec)F/V \dots \textcircled{7}$ 이다.  
(단,  $\lambda$ : 열전도성,  $h$ : 열전달계수,  $F/V$ : 단면인자)

연소지역이 하나의 평면으로 줄어들 때의 기본  
항  $g(x, t) = (Q' U/A) \delta(x-ut) \dots \textcircled{8}$ 이며 여기서  
 $\delta(x-ut)$ 는 Dirac델타함수이고 이 값은  $x-ut=0$ 일  
때는 부정이나 그 외는 0이다.

최초온도가 0인 곳은  $T(x, 0)=0 \dots \textcircled{9}$ 로 표시되  
고 최종적으로 큰 양수  $x$ 에 대한 경계조건으로  
 $\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = 0 \dots \textcircled{10}$ 을 유도하며 큰 기단 위에 설  
치한 기둥온도가 0인 것으로부터  $T(0, t) = 0 \dots \textcircled{11}$   
식이 도출된다. 앞서의  $\textcircled{5} \sim \textcircled{11}$ 식들은 가열문제만  
유일하게 규명하고 있다.

속기기와 무차원의 온도로 대체하므로써  $\mu = 4$   
 $\alpha \nu u^2 \dots \textcircled{12}$ 와  $Q = T(Q'/ecA) \dots \textcircled{13}$ 식이 유도되며 이  
들 변수에 의하여 식  $\textcircled{5}$ 와  $\textcircled{9} \sim \textcircled{11}$ 은

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \nu \theta = u \delta(x-ut) \dots \textcircled{5a} \quad \theta(x,$$

$0) = 0 \dots \textcircled{9a}, \lim_{x \rightarrow \infty} \theta(x, t) = 0 \dots \textcircled{10a}, (0, t) = 0$   
 $\dots \textcircled{11a}$  식이 된다. 식  $\textcircled{5a}$ 의 일반적 해법은 온도  $\theta$   
( $x, t$ )의 Laplace변환  $P(x, s)$ 를 이용해 구한다. 시  
간과 관계되는 변형식  $\textcircled{5a}$ 로부터 일정상수와 독립  
변수  $x$ 를 가진 2차미분 방정식을 얻으며 이는  $\textcircled{10a}$   
와  $\textcircled{11a}$ 식을 이용해 풀 수 있다. 길이계산은 최종적  
으로 온도의 Laplace 변환으로써 산출한다.

$$P(x, s) = \frac{1}{(s-s_2) - 1/(s-s_1)} \left[ \exp\{-x\sqrt{(s+s_1)}\} \right. \\ \left. / \alpha \right] - \exp\{-xs/u\} / \sqrt{(1+\mu)} \dots \textcircled{14}$$

$$\text{단, } S_1 = (u^2/2\alpha) [1 - \sqrt{(1+\mu)}] \dots \textcircled{15}$$

$$S_2 = (u^2/2\alpha) [1 + \sqrt{(1+\mu)}] \dots \textcircled{16}$$

방정식  $\textcircled{14}$ 의 반대적 변형은 Laplace 변환의 표준  
표로 구하며 길이표현의 작성 및 설명을 간편히  
하기 위해 시간 및 위치를 의미하는 2개의 무차원  
변수를 이용한다.

$$\text{시간 : } \tau : \tau = ut/4\alpha \dots \textcircled{17}$$

$$\text{위치 : } \eta : \eta = x/ut \dots \textcircled{18}$$

이 새로운 변수에 의해 온도  $\theta(\eta, \tau)$ 는 다음과 같  
이 된다.

$$\theta(\eta, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{(1+\mu)}} \left\{ \exp\{2\tau[1 - \sqrt{(1+\mu)}]\} \right. \\ \left. (1+\eta) - \operatorname{erfc}\left\{\frac{\eta+1+\sqrt{(1+\mu)}}{\sqrt{\tau}}\right\} - \exp\{2\tau[1 + \sqrt{(1+\mu)}]\} \right. \\ \left. (1-\eta) - \operatorname{erfc}\left\{\frac{-\eta-1+\sqrt{(1+\mu)}}{\sqrt{\tau}}\right\} \right\} \\ \times \operatorname{erfc}\left\{\frac{\eta-1-\sqrt{(1+\mu)}}{\sqrt{\tau}}\right\} \\ \exp\{2\tau[1 - \sqrt{(1+\mu)}]\} \times \operatorname{erfc}\left\{\frac{\eta-1+\sqrt{(1+\mu)}}{\sqrt{\tau}}\right\}$$

$$+ 2u\tau(1-\eta) \exp\{2\tau[1 - \sqrt{(1+\mu)}]\} (1-\eta) \\ + 2u\tau(\eta-1) \exp\{2\tau[1 + \sqrt{(1+\mu)}]\} (1-\eta) \} \dots \textcircled{19}$$

단  $\operatorname{erfc}(z)$ 는 보조적인 오차함수로서  
 $\operatorname{erfc}(z) = (2/\sqrt{\pi}) \int_z^\infty \exp(-y^2) dy \dots \textcircled{20}$ 으로 표기되며  
단위 step함수  $U(z)$ 는

$$0, Z < 0$$

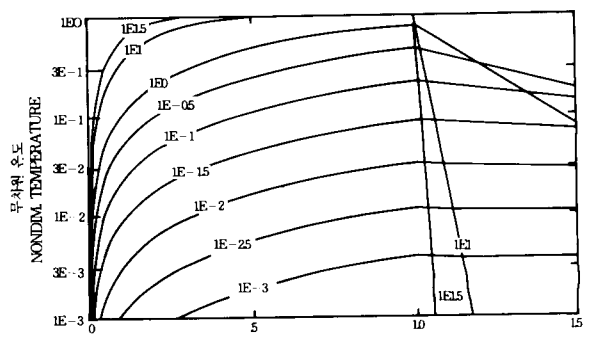
$$U(z) = 1/2, z = 0 \dots \textcircled{21}$$

$$1, Z > 0$$

### 5. 철골부재의 온도형상

방정식  $\textcircled{19}$ 은 3개의 변수(시간  $\tau$ , 위치  $\eta$ 와 식  $\textcircled{12}$ 로  
표현된 상수  $\mu$ )로써 온도  $\theta$ 를 나타낸다. 실제로 이  
식은 2개의 매개변수 방정식이다. 그것은  $\mu$ 의 값이  
실제로 너무 작아 무시될 수 있기 때문이다. 또한  
열전도성  $\lambda$ 와 확산성  $\alpha$ 는 재료성질에 관한 문헌에  
서 알 수 있고 단면인자  $F/V$ 는 25~400 m<sup>2</sup>의 범위  
내에 있으며 열전달계수  $h$ 는 25~100 w/m<sup>2</sup>·K이고  
불꽃속도  $u$ 는 다른 재료들에 대하여는 크게 변화  
한다. Hasegawa et al에 의해 측정된 대표적 전기  
케이블의 불꽃연소속도  $u = 4 \sim 26 \text{ mm/s}$ 를 이용하여  
 $\mu$ 의 범위가  $6 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-2}$ 인 것을 산출하였으며  
이 값은 전체와 비교할 때 대단히 작은 값이므로  
크기계산에선  $\mu$ 값은 완전히 제외된다.

방정식  $\textcircled{19}$ 에 의해 묘사된 곡선의 특징을 구하기  
위해 그림 4와 같이 곡선집단을 작성해 본다. 이 그  
림에서 무차원의 온도  $\theta(\eta, \tau)$ 는 무차원의 위치  
 $\eta$ 의 함수로 구성되며 무차원의 시간  $\tau$ 는 매개변  
수이다. 이는 최초의 연소단계에서만 적용하고  $\eta$



[그림 4] 매개변수 시간τ에 따른 철골부재의 온도형상

0의 위치는 기둥의 기단이며  $\eta=1$ 은 연소구역이 된다. 시간이 경과함에 따라 이 점들 사이의 거리는 식(18)과 같이 전형으로 증가한다.

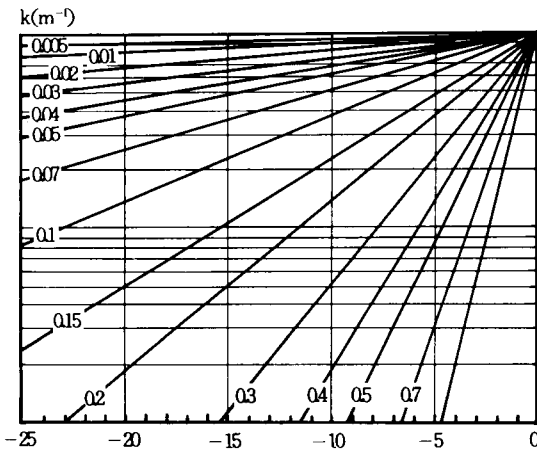
방정식(19)의 시간해법을 위해 새로운 참고사항이 필요하며, 이 새로운 동격인 기원  $O_1$ 은 그림3과 같이 연소지역으로 이동할 것이며 이 위치는 X로 표시된다.

기둥의 기단으로부터 일정거리에서의 시간·온도 형상은 다음식으로 주어진다.

$$\theta(x, \infty) = \left[ \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} \right] \begin{cases} \exp(kx), & x < 0 \\ \exp(-Xu/\alpha), & x > 0 \end{cases} \quad (22)$$

K는 냉각매개변수로써  $K = (h\alpha/\lambda u)F/V \dots (23)$ 이다. 그림5는 매개변수 K인 연소지역에 이동했을 때 나타나는 온도형상을 표시한다.

⊕x축상의 온도강하는 대단히 가파라서 눈금상에 표현하기가 불가능하며, 이는 단순히 불꽃확대속도 u가 확산전면보다 훨씬 더 빠르다는 것을 뜻하고, 이와같은 경우에는 철골부재를 따라 일어나는 열전도성은 실질적인 의미를 가지지 못한다.



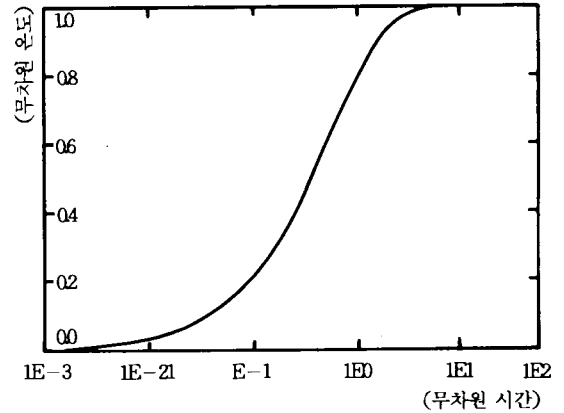
[그림 5] 냉각매개변수  $k(m^{-1})$ 와 위치  $X(m)$ 에 의한 철골온도의 영향

철골부재는 연소지역( $\eta=1$ )내에서는 항상 가장 뜨거우며, 시간상의 특징을 구하기 위해 특별한 경우에는 식(19)을 이용한다. 그 표현을 다음과 같이 간단히 한다.

$$\theta(1, \tau) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{1+\mu}}} \right\} \left\{ 2 - 2\text{erfc}\left\{ \sqrt{[(1+\mu)\tau]} \right\} - \exp\{4\tau[1+\sqrt{(1+\mu)}]\} \text{erfc}\left\{ [2+\sqrt{(1+\mu)}] \sqrt{\tau} \right\} \right\} \dots (24)$$

$$\left. \begin{aligned} & \sqrt{\tau} \\ & -\exp\{4\tau[1+\sqrt{(1+\mu)}]\} \text{erfc}\left\{ [2+\sqrt{(1+\mu)}] \sqrt{\tau} \right\} \dots (24) \end{aligned} \right\}$$

이 식은 시간함수로써 그림6으로 표시되며  $\tau$ 가 일관성을 초과할 때 도달하는 점근선 한계를 관측한다.



[그림 6] 철골부재의 최대온도에 관한 시간의 영향

온도  $\theta(1, \infty)$ 의 점근값은 지극히 간단하게  $\theta(1, \infty) = 1/\sqrt{1+\mu} \dots (25)$ 이 되며,  $\mu$ 값이 1보다 아주 작을 때는  $\theta(1, \infty) \approx 1 \dots (25a)$ 를 얻는다. 이것은 철골부재에 가까운 지역연소의 주요한 산출결과이다.

## 6. 중요화재하중의 평가

### 가. 일반적 계산형

방정식 (25a)에 식(13)을 대입하므로써 차원있는 변수로 되돌아가 식(3)의 최대화재하중은 다시 구해진다. 이와같이 식 (25a)는 전반적인 신속한 연소에서는 식(3)과 동일한 것이 알려졌다, 신속한 지역연소의 산출값은 전반적인 신속한 연소가 대부분 이루어질 때의 결과와 동일한 결과를 유도한다. 이는 열이 기둥을 따라 전도될 때, 크기를 정하는 근거를 형성하므로 방정식(4)는 최대허용화재하중

Q'c를 평가하는 일반형이 된다.

#### 나. 5%법칙

방정식④는 비록 덜 정확하지만 질량을 이용하므로써 수월하고 계산용이한 간단하다.

단위길이별 철골부재의 질량(kg/m)을  $m'$ , 케이블의 그 질량을  $m_c'$ 로 표시하고 방정식④에 따라  $m_c'/m'$ 의 무게비율은  $m_c'/m' = CTc/HP \dots$ 이 된다. 여기서 H는 케이블 단열재의 저장열량이며,  $T_c=500^\circ\text{C}$ ,  $C=600\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $H=13\text{MJ/kg}$ ,  $P=0.5$ 를 대입하므로써 철중량 분의 케이블 단열재 중량 비율( $\pm 0.05$ )을 얻는다. 이 결과는 하나의 고정상수가 될 수는 없다. 그러나 이 값은 5%라는 쉽게 기억할 수 있는 수치를 제공하고 있다.

#### 다. 토의사항

동 실험에서는 철골부재를 가열하는 2개의 극단적인 경우(전체 케이블면에 대한 갑작스런 불꽃의 전면확대연소와 철골기둥을 따라서 불꽃이 순식간에 확대하는 좁은 구역연소)를 고려하여 화재하중을 산출하였다. 양쪽 경우에서 방정식④에 주어진 허용최대화재하중과 같은 값이 얻어진다. 실제의 케이블화재는 이들 극단적인 경우의 사이에 있다고 할 수 있으며, 연소시간이 너무 길지 않을 경우엔 대부분의 케이블화재에서의 철골부재의 가열 조건은 극단적인 경우와 큰 차이가 없다. 그러므로

2-(1)의 답변으로써 모든 기둥의 화재하중 크기를 정하는 방법으로 방정식④의 사용을 권하고 있다. 2-(2)의 답은 확산파의 속도가 화재전면(前面)의 속도보다 훨씬 느리기 때문에 없다. 이 결과는 케이블이 단지 교차하는 수평철골부재에도 적용할 수 있다. 이 때는 기둥길이의 일부분만 소량의 화재하중에 의해 가열될 수 있지만 케이블 바로 밑에 있는 철골부재의 열용량만이 고려된다.

기둥따라 확산되는 열전도성은 대단히 느리므로 내화력크기를 산출하는 데 있어서 실제적인 의미가 없으며, 주요한 화재하중에 의해 가열되는 기둥은 없다. 그러므로 2-(3)의 해답은 영향이 없는 것으로 한다.

#### 라. 화재하중의 산출에

(문제) 그림1에서 케이블트레이는 TH1 532-8-16×400형의 2개 프랭크(flank)위에 설치한다. 구조체의 주요철골온도가  $600^\circ\text{C}$ 일 경우 최대허용화재하중은 얼마인가? 부재의 횡단면적은  $16800\text{mm}^2$ 이며 철재의 비열용량은  $700\text{J/kg} \cdot \text{K}$ , 철재비중은  $7850\text{kg/m}^3$ 이다.

$$\begin{aligned}(\text{해}) \quad Q'c &= C\rho ATc/P \quad (\text{단 } P \text{는 약 } 0.5\text{임}) \\ &= 700 \times 7850 \times 0.0168 \times (600 - 20) / 0.5 \\ &= 110 \text{ MJ/m}\end{aligned}$$

#### 참고문헌(원문)

Theoretical Estimation of Critical Fire Load  
Close to an Unprotected Steel Member ; O.  
Keski-Rahkonen.  
(Fire & Materials Vol 12. 1988)