

화재시 내화피복철골기둥의 온도분포에 관한 연구

A Study on the Temperature Distribution of Thermally

Protected Steel column Exposed to the Fire

玄 哲*

Hyeon, Cheol

金 文 漢**

Kim, Moon Han

Abstract

This paper is concerned with the numerical analysis of the temperature of steel columns when they are exposed to flame of a fire temperature curve in order to test resistivity against the fire. In this stuer a 2-dimensional heat conduction FDM was developed to predict the temperature dustribution of steel column under various construction conditions. A proposal to estimate the influence of free water content in the insulation also made.

1. 序論

철골조 건물에서 열에 대한 강의 약점 때문에 이의 보안을 위해 일반적으로 내화피복재를 철골에 피복함으로써 강의 내화 성능을 높이는 방법이 채택되고 있다.

그런데 뽀칠 공법의 경우 피복재의 피복 두께와 밀도의 균일성을 확보하기 어렵고 시공후 피복재가 탈락하는 경우도 많으므로 정확한 조건에서의 가열시험에 의한 강제온도 측정에 어려운 점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 강제온도에 대한 이론적인 검토가 필요하다고 생각된다. 또한 현재 시행되고 있는 실험에서는 H형강의 특정부위의 온도 만을 측정하고 있지만 보다 완벽한 검토를

위해서는 강제 전체의 온도 분포를 밝혀내는 것이 필요하다라고 생각된다.

따라서 본연구에서는 유한차분법(FDM)을 이용한 강제온도 파악의 이론적인 검토의 가능성을 알아보고 simulation을 통해서 여러가지 시공조건에서의 강재의 온도분포를 파악하여 최소 피복두께와 시공방법의 개선방향에 대해 알아보았다. 또한 피복재 내의 수분에 따른 강제 온도상승 억제효과를 알아보기 위해 피복재내의 함수량과 강제온도 정체시간간의 함수관계에 대해서도 고찰하였다.

2. 鋼材 溫度的 數值的 解析

2-1. 計算 model

計算 model은 다음 2가지 경우이다.

* 일본 동경대학교 대학원

** 서울대학교 教授, 工博, 監査

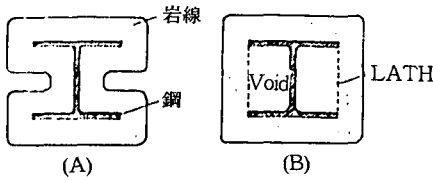


그림 1. 계산 model

(A), (B) 모두 좌우상하 대칭이므로 다음과 단순화 시킬 수 있다.

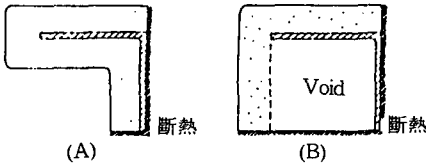
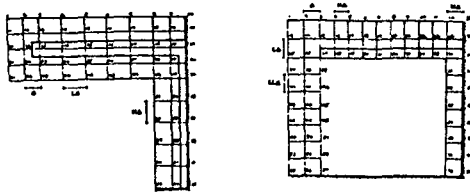


그림 2. 계산 model

본 연구에서는 (A), (B)형을 수치해법으로 해석하였다.



I형 공법 □형 공법

그림 3. 계산 model의 grid분할

2-2. 境界條件

(1) 加熱表面 熱傳達

건물 내화설계를 위한 내화시험을 실시함에 있어 일정한 시간마다의 온도를 정하여 시험을 실시하고 있다.

국제시험 규격인 IS 834에서는 시간과 관련된 온도 변화의 곡선식을 다음과 같이 나타내고 있다.

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1)^{0.5} \quad (1)$$

t: 시간(분)

T: 시간(t)에 있어서의 로내온도(°C)

T₀: 초기 로내온도(°C)

본 연구에서는 IS규정 가열곡선에 의거하여 수치해법으로 해석하였다. 화염에서 가열표면으로의 열전달은 대류와 복사효과를 고려해야 한다. 이에 대한 연구가 진행되어 다음과 같은 식이 제안되어 있다.⁴⁾

$$af = afr + afc$$

$$= \sigma \epsilon \frac{\left(\frac{\theta_f + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_s + 273}{100}\right)^4 + afc}{\theta_f - \theta_s} \quad (2)$$

σ: 4.88kcal/m²h°C(대류에 의한 열전달율)

ε: 0.7(염의 흑도)

θ_f: 화재온도

afc: 20kcal/m²h°C(대류에 의한 열전달율)

θ_s: 표면온도

본 연구에서는 이식을 가열표면 열전달율로 하여 산정하였다.

(2) 中空 表面 熱傳達

中空부분의 열전달은 복사와 대류효과를 고려하여야 한다. 그러나 자연대류에 따른 영향은 미소하다고 보고 여기서는 복사효과만을 고려하였다.

또한 中空부분에서 각 지점마다 복사효과를 고려하면 복잡하므로 각 면의 평균 온도를 취하여 그 면은 온도가 균일하다는 가정하에 계산하였다.

2-3. 유한차분법

본 연구는 유한차분법 중에서 전진 유한차분법을 이용하였다. 그 이유는 후진 유한차분법이 절점수가 많은 경우 시간의 제약을 받지 않는 장점이 있다고 할 수 있으나 simulation결과 본 연구와 같이 온도전도율이 크게 차이나는 경우 역시 시간의 제한을 받는 것이 확인되었고 따라서 연립1차 방정식을 Gauss소거법등으로 해석하는 것 보다는 기지의 전시간단계의 온도로부터 바로 다음단계온도를 구할 수 있는 전진유한차분법이 오히려 시간이 절약되기 때문이다.

다른 재질의 접촉에 있는 경우 이 두 매질간의 열전도율은 다음과 같은 방법으로 구한다.

주) I형 공법: solid protection method
□형 공법: hollow protection method

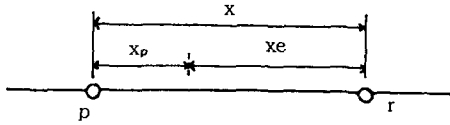


그림 4. 두 재질간의 열전도율

$$f_c = \frac{x_e}{x} \quad (3)$$

$$\frac{1}{K_c} = \frac{1-f_c}{K_p} + \frac{f_c}{K_r}$$

- K_c : 서로 다른 매질간의 열전도율
- K_p : P점 재료의 열전도율
- K_r : r점 재료의 열전도율

2-4. 피복재의 함수에 따른 停滯時間 算定式的 誘導

피복재의 함수량이 강재온도 상승에 미치는 영향은 상당히 크며 따라서 함수량의 영향을 정확히 파악하는 것은 산정식 완성을 위해서 중요하다고 생각된다.

藤井씨 이론의 개념을 이용하고 열전도의 대류 경계 조건 방정식을 이용하여 다음과 같은 식을 제안한다.(단열재 내부의 온도가 100℃가 되면 그 부분에 포함되어있는 수분이 증발해 버리기까지 이 온도를 유지하고 그 후 다시 온도 상승을 시작한다고 가정한다. 그리고 이 동안 단열재가 유입하는 열량이 수분의 증발열과 같게 되는 것으로 한다.)

$$539WA\rho = L \int_x h(F(t)-100)dt \quad (4)$$

- A: 내화피복재의 단면적
- ρ : 밀도
- W: 함수율
- 539: 물의 증발잠열
- L: 내화피복재의 주장(周長)
- h: 열전달계수
- $F(t)$: 표준가열곡선(=345log(8t+1)+T₀)
- K: 피복재의 표면온도가 100℃에 달한 최초시간

그런데 $F(t)$, h모두 시간t의 함수인데 이를 계산

하는 것은 지극히 어려운 일이다. 따라서 $h(t)$ ($F(t)-100$)의 값을 각 시간대($t=1, 2, \dots, 120$ 분)마다 구해서 1차 회귀방정식으로 정리하였다.

표 1. 표면유입열 flux의 1차 회귀식(100℃표면정체시)

$h(t)(F(t)-100)=\alpha+\beta t$		F_0	r^2	시간구간
α	β			
5700	4130	206	0.986	1≤t≤5분
22000	1509	1310	0.982	5≤t≤30분
52031	586	6790	0.987	30≤t≤120분

각 구간식의 유의 성검정(F_0)은 모두 1%에서 유의함을 알 수 있고 결정계수(r^2)의 값은 모두 0.98이상이어서 총변동 중에서 98%이상이 회귀방정식에 의해 설명되어지는 변동으로 매우 높은 비율이다.

여기서 시간t의 구간을 1분부터로 한 것은 1차운 Simulation에 결과 대략 1분 전후에서 내화 피복(암면) 표면온도가 100℃에 달했기 때문이다.

3. 考察

3-1. 계산치와 실험치의 비교

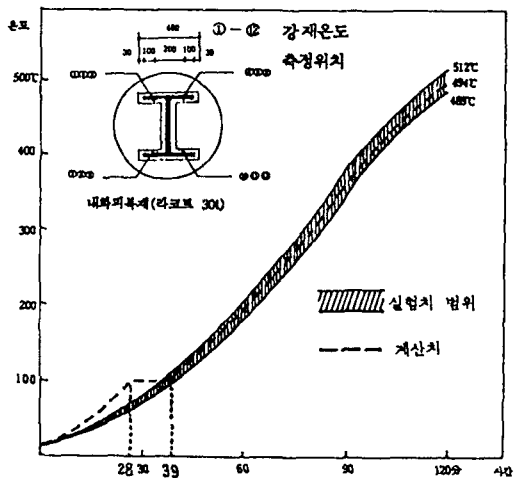


그림 5. 내화피복 철골기둥 가열 시험실측치와 계산치의 비교

강재온도에 대한 실험치와 유한차분법에 의한 계산치를 비교하면 그림5와 같으며 이는 대체로

일치함을 알 수 있다. 계산치 곡선에서 11분간 정체된 것은 피복재의 함수에 따른 정체시간을 산정하여 나타낸 것이다.(개선안 이용)

$$\text{열전도율 } K = \alpha + \beta_1 T + \beta_2 T^2$$

$$\alpha = 5.647 \times 10^{-2}$$

$$\beta_1 = 0.871 \times 10^{-5}$$

$$\beta_2 = 2.460 \times 10^{-7}$$

T: 온도

밀 도 300kg/m

비 열 0.673kcal/kg°C

함 수 율 6%

3-2. 鋼材部位別 溫度分布의 影響

Simulation 결과 I형 공법의 경우 flange 단부에서 최고 온도를 나타내고 flange와 web의 접합부분에서 최저 온도를 나타낸다. □형 공법의 경우는 역시 flange 단부에서 최고 온도를 나타낸다.

그림 6은 2시간(피복두께 40mm) 가열의 경우 두 공법의 최고온도, 평균온도의 변화를 나타낸 것이다. 유한차분법 해석상 두 공법의 simulation 강재의 두께를 同一하게 하기 어렵다. 따라서 강재의 열전도율이 크기 때문에 두께에 따른 영향을 무시할 수 있다고 가정하면 두 공법이 온도를 비교할 수 있다.(simulation 강재크기는 I형 공법 400×400×27×27 □형 공법 400×400×30×13.5) 여기서 □형 공법의 최고온도가 I형 공법의 최고온도와 비슷하다는 점을 알 수 있다. 그러나 평균 온도에 있어서는 I형 공법보다 단연 높다.

현행 가열실험에서는 대체로 flange 단부에 열전대를 설치해 강재온도를 측정하여 KS의 강재 온도 제한규정과 비교 판정하고 있다.

i) 최고온도에 의거해서 KS규정과 비교판정하는 경우

최고온도는 거의 비슷하다.

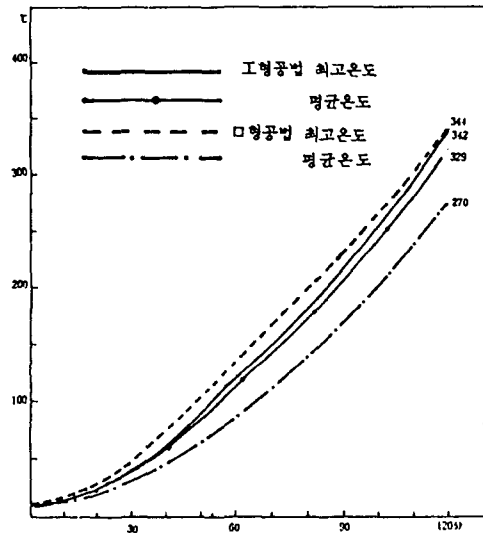
현재는 □형 공법보다는 I형 공법이 많이 사용되고 있는데 그 이유는 □형 공법의 경우 I형 공법에 비해 소요 피복재량은 적게 들지만 중곡부에 설치되는 lath의 재료비용과 용접 시공비용 등 비용이 더 많이 들기 때문이다. 따라서 뿔철 시공이 훨씬 간편하고 정확한 피복두께의 확보에

도 유리한 □형 공법이 최근에는 사용빈도가 줄어들고 있다.

최고온도 만을 비교했을 때 □형 공법이 I형 공법과 별 차이가 없으므로 단열에 대한 잇점은 없다고 할 수 있다.

ii) 평균온도에 의거해서 KS규정과 비교판정하는 경우

이 경우 I형 공법은 최고온도와 비교해서 10-20°C 정도 차이로 그다지 크다고는 할 수 없다. 그러나 □형 공법의 경우는 74°C로 상당히 크다고 할 수 있다. 또한 이것은 그만큼 I형 공법에 비해 단열성이 뛰어나다고도 할 수 있다.



I형 공법 강재 size: 400×400×27×27

□형 공법 강재 size: 400×400×30×13.5

그림 6. Simulation에 의한 공법별 강재온도 비교(2시간 가열)

3-3. 뿔철施工의 마감처리가 鋼材溫度에 미치는 影響

뿔철공법은 두께의 균일성을 확보하기 어렵고 표면이 거칠기 때문에 시공후 누름마감처리를 하는 경우가 있다. 이에 대해 실험적으로 마감처리하지 않는 쪽이 단열성이 크다는 사실이 입증됐다.⁵⁾ 여기서는 이론적으로 그 이유에 대해 고찰해보고자 한다. 누름시공시 공기량의 유출도 그 한 이유가 되겠지만 그것은 측정하기 어려우므로

고려치않고 누름시공시 물리적인 변화에 대해 고찰하고자 한다. 만약 누름시공으로 밀도가 2배가 되었다면 피복두께는 반으로 줄어들 것이다. 즉 밀도와 두께는 반비례 관계이다. 이때 열전도 방정식

$$K \frac{dT}{dx^2} = \rho C \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K}{\rho c} \frac{dT}{dx^2} \quad (6)$$

이를 차분식으로 고치면

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} = \frac{K}{\rho c (\Delta x)^2} (T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m) \quad (7)$$

단위시간당 온도상승에 대한 밀도와 두께의 역할을 비교해보면 Δx^2 이므로 두께의 변화에 대해 더 큰 영향을 받게된다. 따라서 이론적인 관점에서 누름마감처리가 두께를 감소시킴으로서 내화성을 저하시킨다고 할 수 있다. 다음 그림은 누름시공으로 두께를 1.25, 1.5배 줄였을 때의 강제온도상승을 1차원으로 해석하여 정상상태와 비교한 것이다.(함수를 고려치않음)

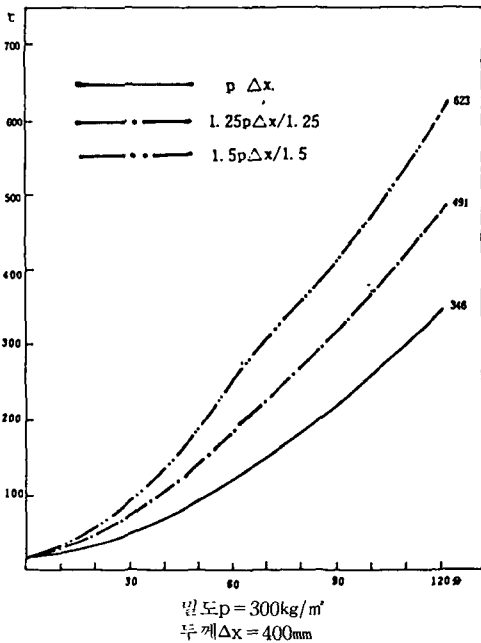


그림 7. 뿔철공법의 마감처리에 따른 강제온도 비교

3-4. 鋼材의 크기가 鋼材溫度에 미치는 影響
철골조에 이용되는 H형강의 size는 여러가지가 있지만 현행 기준에는 그러한 것은 고려치 않고 일률적으로 피복두께를 규정하고 있다. 따라서 여기서는 size에 따른 강제온도 변화를 Simulation을 통하여 고찰하였다. 최고 온도와 평균온도를 비교할 때 I형 공법은 그다지 차이가 없다.

그러나 □形 공법의 경우는 $400 \times 400 \times 30 \times 13.5$ rhk $200 \times 200 \times 30 \times 13.5$ 크기의 강제 온도를 비교할 때 최고온도는 size가 큰쪽이 높게 나타나지만 평균온도는 size가 작은쪽이 높게 나타나고 있다. 그 이유는 web의 길이가 짧기 때문에 온도저하가 크지 않기 때문이라 생각된다.

특히 flange길이는 同一하고(200mm) web길이가 200mm, 400mm, 600mm인 경우를 고찰하면 web부분에 의한 온도저하 효과가 상당함을 알 수 있다. web길이가 길수록 강제 최고온도는 $45 \sim 56^\circ\text{C}$, 평균온도는 $59 \sim 83^\circ\text{C}$ 의 차를 보이고 있다.

또한 flange길이가 200mm, 400mm인 강재의 경우를 비교하면 최고온도는 59°C , 평균온도는 28°C 차를 보이고 있다.

따라서 □形공법의 경우 flange 길이가 짧을 수록

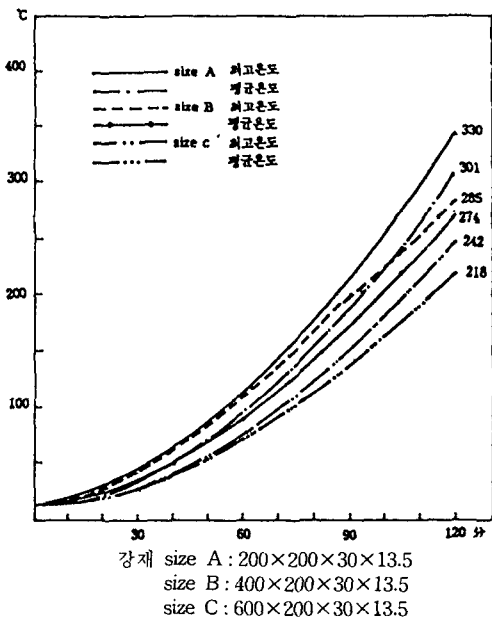


그림 8. H형강의 web 길이에 따른 강재의 온도 비교(□形 공법)

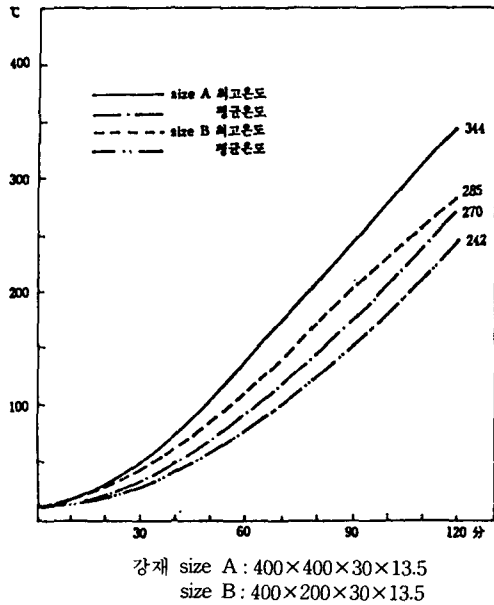


그림 9. H형강의 flange 길이에 따른 강재의 온도 비교 (□형 공법)

web 길이가 길수록 강재의 온도저하 효과는 크다.

4. 결론

- 1) FDM을 이용한 강재온도의 이론적 검토가 가능하다.
- 2) 최고 온도와 평균온도차를 비교할 때 I형 공법은 그다지 차이가 없지만 □형 공법의 경우 큰차를 나타내고 있다. 따라서 평균온도를 기준으로 하는 경우 □형 공법은 시공시 피복두께완화를 고려할 수 있다.
- 3) (강재 두께의 영향을 무시한다고 가정할 때) I형 공법과 □형 공법의 최고 온도는 거의 비슷하게 나타나고 있으나 평균온도는 60°C 정도 □형 공법이 낮다. 따라서 최고온도를 기준으로 할 경우 □형 공법은 I형 공법에 비해 단열성이

뛰어나다고 할 수 없으나 평균온도를 기준으로 하는 경우 단열성이 우수하다고 할 수 있다.

4) 뿔칠시공의 마감처리에서 누름시공을 하는 것보다 원상태로 두는 것이 내화성이 좋다. 그 이유는 누름시공을 할 경우 피복재의 밀도는 높아 지지만 피복재의 두께가 줄어들기 때문이다.

5) □형 공법의 경우 web 길이가 길수록 flange 길이가 짧을수록 강재온도 상승억제 효과가 크다.

参 考 文 献

1. 若松孝旺, 耐火被覆と耐火設計 建築技術, No. 212, 1969. 4.
2. 若松孝旺, 耐火試験時における 諸熱傳達について, 日本火災學會論文報告集, Vol.17, No.1, 19 67. 9.
3. 藤井正一, 柱まは梁の耐火試験における鐵骨温度上昇の理論計算, 日本火災學會論文報告集, Vol. 13, No.1.
4. 川越邦雄, 高温下熱傳達の電子計算機による數値計算, 日本火災學會論文集, Vol.13, No.2, 1965
5. 鄭雨澤, 鐵骨構造物の spray 耐火被覆의 耐火性能에 관한 實驗的 研究, 漢大碩士 學位論文, 1 988.
6. 大內當夫, 耐火被覆材の高温時の熱傳度率, 日本建築學會大會學術講演集, 1985. 10.
7. 齊藤光, 鋼構造部材の耐火性, 日本建築學會大會學術講演集, 1983. 9.
8. 宮本圭一, H形鋼部材の火災時の變形性能に關する 實驗, 日本建築學會大會學術講演集, 1986. 8.
9. K.H. Mommertz, Fire protection of the New Iron and steel Research Institute, Dusseldorf, acier · stahl · steel, 1971. 10.
10. 日本火災學會 建築防火教材, 1984.