

# 先進各國의 耐火設計法에 관한 研究

## A Study on Fire Resisting Construction Design in Advanced Nation

金 和 中\*  
Kim, Wha Jung

---

### Abstract

In Our Country, the fire safety design is done by the standard furnace fire test. This is haphazard procedure, as the standard furnace fire endurance of structural elements has little relation to the structural element endurance in an actual Compartment fire. The standard furnace fire test results, though obtained at great cost, do not contribute to the understanding of the behavior of structural elements in an elevated temperature environment and can not be applied rationally in fire safety design. The response of a steel and reinforced concrete structure in fire is a very complex problem.

Therefore, in this paper is explained about tendency of study for fire safety design in advanced nations.

---

### 1. 序

經濟成長과 人口集中에 의한 都市 建築物의 高層化·深層化에 同伴하여 都市 建物の 災害는 날로 增加하고 있다. 그 主要因은 建物 機能의 多樣化와 複雜化에 起因된 것으로 볼 수 있다. 그 中에서도 火災로 인한 被害는 大型化하고 있으며, 그 損害額과 人命損失은 점점 增大해 가고 있는 實情이다. 따라서 火災對策은 國家的인 次元에서 다루어져야 할 問題인 同時에 매우 重要한 研究課題이다.

一般的으로 火災對策은 出火防止對策, 延燒擴大防止對策, 防煙對策, 消火對策, 避難救助對策, 構造安全對策으로 分類된다. 그러나 構造安全對策을 除外한 對策은 不確定 要因을 多數 包含함으로써 經驗의 手法에 의존하고 있으며, 이들의 對策은 相互間에 聯關性을 가지고 있으므로 研究에 있어서 複雜하고도 問題視되는 點이 많다.

\* 正會員, 慶北大學校 工科大学 建築工學科 教授·工博

그 反面 構造安全對策은 工學의 手法에 의한 研究의 接近이 可能하고, 合理的 對策의 提示가 可能하기 때문에 일찍부터 耐火設計法을 指向하는 研究가 先進各國에서 盛行되어 왔다.

그러므로 本 發表에서는 지금까지의 先進各國의 耐火設計法의 開發에 對한 檢討와 本人의 研究 結果에 의하여 開發되어진 耐火設計法을 基準으로 하여 例를 들어가면서 紹介하고자 한다.

### 2. 現行의 耐火設計

現時點에서 耐火設計法은 世界各國 거의 同等한 方法이 採擇되고 있는 實情이다. 즉 이 手法은 各 構造部材에 要求되는 耐火時間이 法令에 의해 規定되어, 各 部材의 耐火性能을 標準加熱 曲線에 의해서 評價되는 示方的인 것으로, 實火災와의 對應 關係를 찾기가 어려움 등의 결점이 있다. 또 이 方法은 劃一的이며, 各 建築物의 耐火性能을 적절히 評價할 수는 없다.

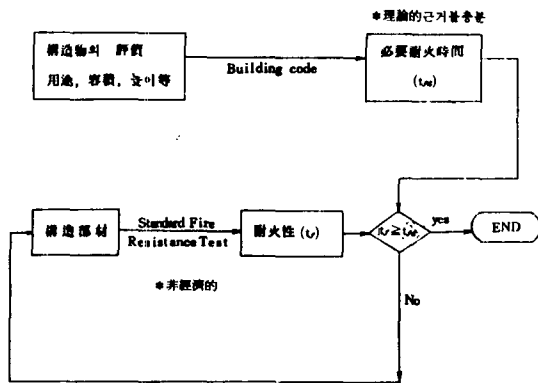


Fig. 1 現行法規에 있어서 耐火設計法

3. 耐火設計에 關한 世界의 動向

近年 諸 外國에 있어서 耐火設計法은 從來의 標準加熱下에서의 部材許容溫度 判定方法에서, 各各의 建築物에 대하여 火災溫度曲線을 理論的 model과 實驗結果를 利用하여 工學的인 手法에 의해 決定하고 그 加熱條件下에서 熱應力解析을 하여 耐火性能을 判定하는 耐火設計法으로의 移行 추세이다.

Fig.2에 新耐火設計法의 進行情程을 表示하고, Fig.3에는 그 進行情程을 단순화 시킨 Flowchart를 나타냄.

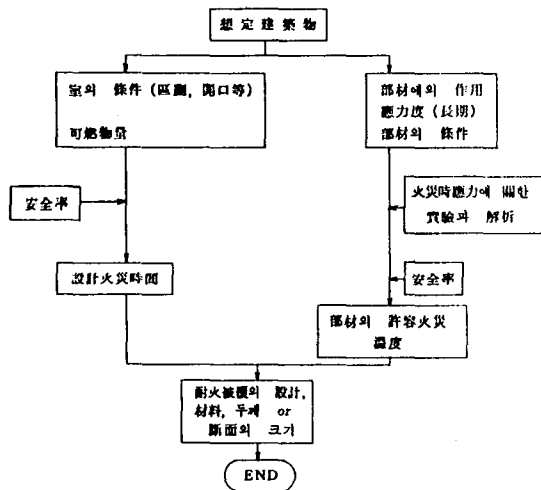


Fig. 2 新耐火設計法

4. 火災의 性狀

어떤 區劃內의 火災는 Fig.4와 같이 成長期,

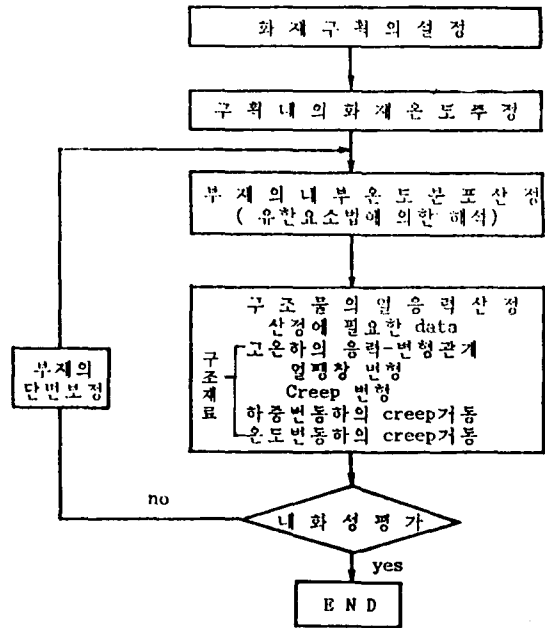


Fig. 3 내화설계의 PROCESS

最盛期, 冷却期의 過程에 따라 進展한다. 즉 區劃內의 可燃物이 무엇인가의 原因으로부터 着火하여 發生한 火災는 區劃內의 酸素를 消費하면서 燃燒範圍를 서서히 擴大시킨다(成長期). 특히 燃燒範圍가 擴大되면 急激히 火災溫度가 상승하는 Flashover를 맞이한다. 이 Flashover는 窓유리의 파손等에 의해 充分한 空氣가 流入되어, 區劃內의 生成可燃性 gas에 着火하여 未燃의 可燃物이 일제히 燃燒를 시작하는 狀態를 말한다. 그後 火災溫度는 時間과 함께 계속 상승하여(最盛期), 可燃物이 거의 燃燒가 끝날 무렵 最高溫度에 도달한 後, 火災溫度는 서서히 低下한다(冷却期).

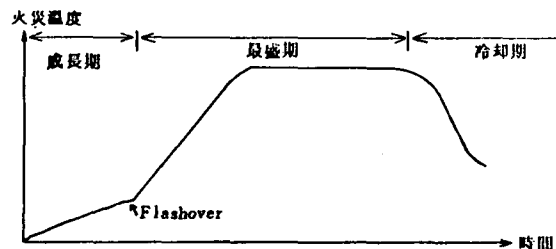


Fig. 4 區劃內의 火災進展

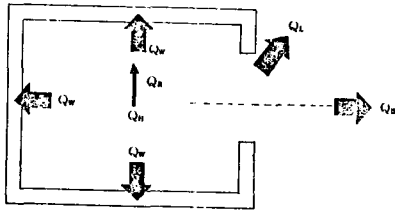
一般的으로 耐火設計에 必要한 點은 Flashover以後의 最盛期이다.

5. 火災性狀 豫測

區劃內的 火災는 主로 다음과 같은 要因의 影響을 받아 그 樣相을 달리한다.

- 1) 建築物의 形態(區劃의 形狀·크기)
- 2) 開口部의 形狀·크기
- 3) 區劃周壁의 熱的性質
- 4) 可燃物의 種類·量·配置 形態

\* 基本理論



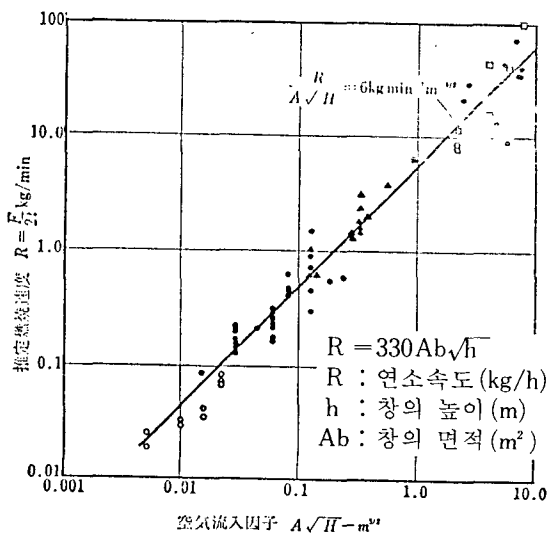
$$Q_h = Q_w + Q_n + Q_d + Q_a$$

(室內에서의 防熱量)    (벽면의 發熱量)    (開口에서 壁 外의 輻射 熱量)    (可燃物들이 가지고 나 가는 熱量)    (區劃內 gas 의 溫度上昇 시키는 熱量)

$$Q_h = q \times R$$

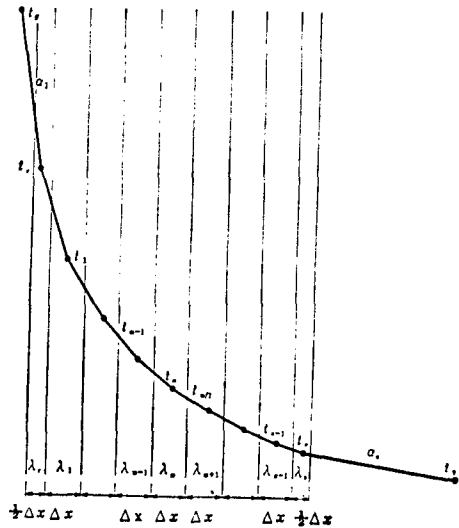
$$q = \frac{\sum(G_i \times H_i)}{(H_o \times A)} = \frac{\sum Q_i}{(450 \times A)}$$

- q : 화재 하중 (kCal / kg)
- A : 화재구획내의 바닥면적 (m<sup>2</sup>)
- G<sub>i</sub> : 가연물중량 (kg)
- H<sub>i</sub> : 가연물의 단위발열량 (kCal / kg)
- H<sub>o</sub> : 목재의 단위 발열량 (kCal / kg)
- ∑Q<sub>i</sub> : 화재구획내의 가연물의 전발열량 (kCal)



$$Q_w = A\alpha(T_g - T_c) + A\epsilon(E_g - E_c)$$

- A : 내벽의 표면적 (m<sup>2</sup>)
- α : 대류에 의한 열전달계수 (kCal / m<sup>2</sup> h °C)
- ε : 주벽의 흑도 (복사율)
- T<sub>g</sub> : 화재온도 (°C)
- T<sub>c</sub> : 주벽의 표면온도 (°C)
- E<sub>g</sub> : 구획내 화재의 복사량 (kCal / m<sup>2</sup> h)
- E<sub>q</sub> : 4.88((T<sub>g</sub>+273) / 100)<sup>4</sup>
- E<sub>c</sub> : 주벽의 방사열량 (kCal / m<sup>2</sup> h)
- E<sub>c</sub> = 4.88((T<sub>c</sub>+273) / 100)<sup>4</sup>



表面溫度

$$t_{c\Delta h} = \frac{2}{c\rho\Delta x} \frac{\Delta h}{\Delta x} (t_p - t_c)$$

$$a_s \Delta x + (t_1 - t_c) \frac{\lambda_1 + \lambda_c}{2} + t_c$$

中間溫度

$$t_{m\Delta h} = \frac{1}{c\rho\Delta x} \frac{\Delta h}{\Delta x} (t_{m-1} - t_m)$$

$$\frac{\lambda_{m-1} + \lambda_m}{2} (t_{m+1} - t_m)$$

$$\frac{\lambda_{m+1} + \lambda_m}{2} + t_m$$

$$Q_B = Ab(E_g - E_o)$$

- Ab: 창 면적 (m<sup>2</sup>)
- E<sub>o</sub>: 외기온에 있어서 외계의 복사량 (kCal / m<sup>2</sup> h)
- E<sub>o</sub> = 4.88((T<sub>o</sub>+273) / 100)<sup>4</sup> T<sub>o</sub>: 외기온도 (°C)

$$Q_L = M_{out} C_p (T_g - T_o)$$

$$M_{out} = G \times R \text{ (배출연소gas 용적(Nm}^3\text{/kg) } \times \text{연소속도(kg/h))}$$

$$C_p: \text{gas 정압비열(kcal/Nm}^3\text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$Q_R = V C_p (T_g - T_o) / \Delta h$$

V: 구획의 용적(m<sup>3</sup>)  
 $\Delta h$ : 미소시간(h)

$Q_R$ 은 계산상 거의 영향을 미치지 않으므로 무시할 경우가 많다.

$$Q_M = Q_W + Q_B + Q_L$$

$$q_R = \sum A_i \epsilon_i (E_o - E_{ct}) + \sum A_i \alpha (t_o - t_{ct}) + \sum A \beta_t (E_o - E_o) + GRC_p (t_o - t_o)$$

화재 계속시간(h)

$$T = W / R = W / (330Ab \sqrt{H})$$

W: 화재구획내의 가연물량(kg, 목재환산중량)

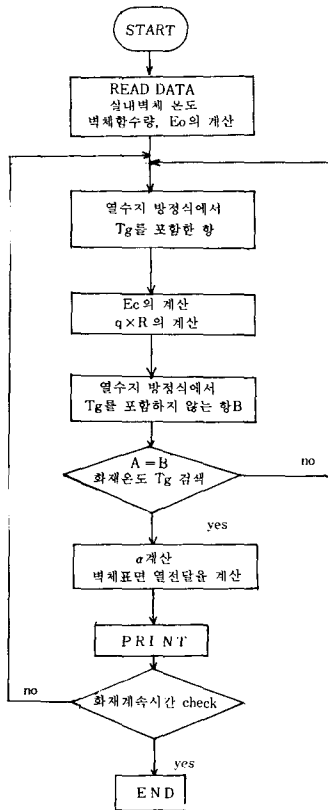


Fig. 5 구획내의 화재온도 추정 PROCESS

6. 部材의 内部温度 分布

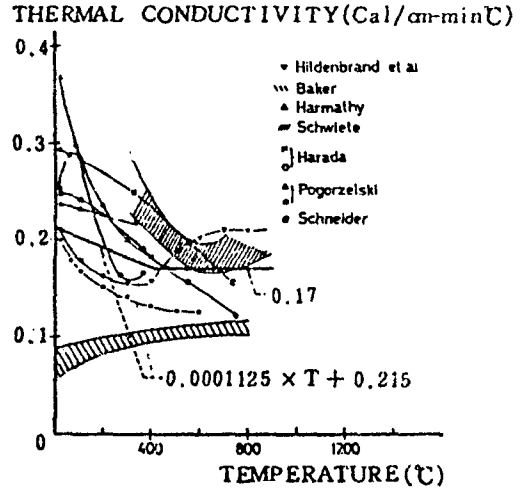


Fig. 6 Thermal conductivity of concrete under elevated temperature

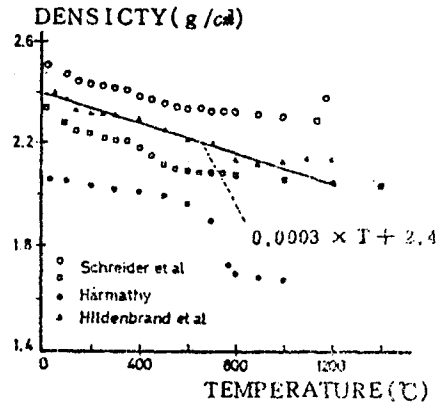


Fig. 7 Density of concrete under elevated temperature

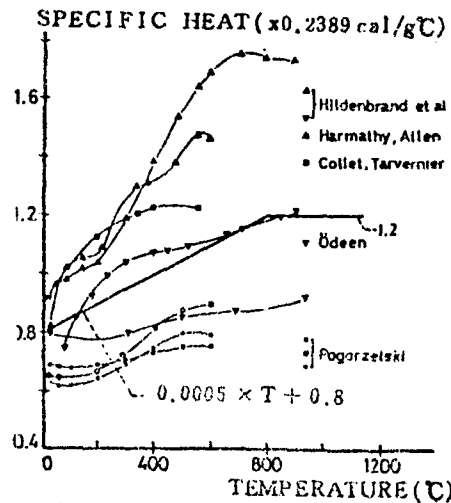


Fig. 8 Specific heat of concrete under elevated temperature

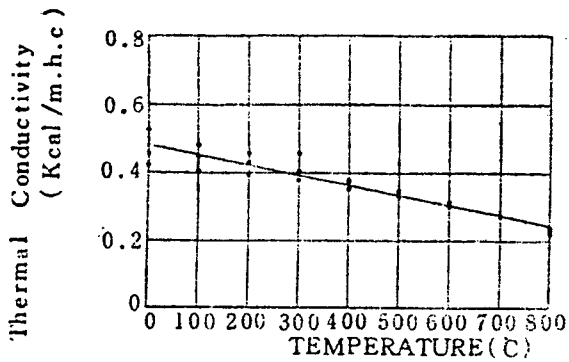


Fig. 9 Thermal conductivity of steel under elevated temperature

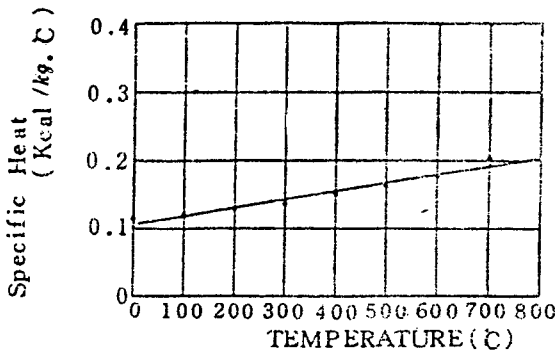
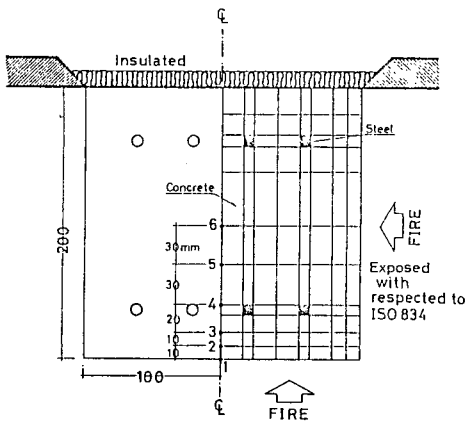


Fig. 10 Specific heat of steel under elevated temperature



ISO 834

$$\theta - \theta_0 = 345 \log(8t + 1)$$

$\theta$  : 화재시의 실내온도

$\theta_0$  : 화재전의 실내온도

$t$  : 화재경과시간

Fig. 11 Temperature distributions in the reinforced concrete column

部材의 内部温度는 構造物의 熱應力 解析을 하는데 꼭 필요한 것이다. 다음의 計算에 使用된 熱定數 DATA와 2次元 有限要素法에 의하여 計算된 結果를 實驗結果와 함께 나타냈다.

### 7. 高温에서 構造材料의 力學的 性質

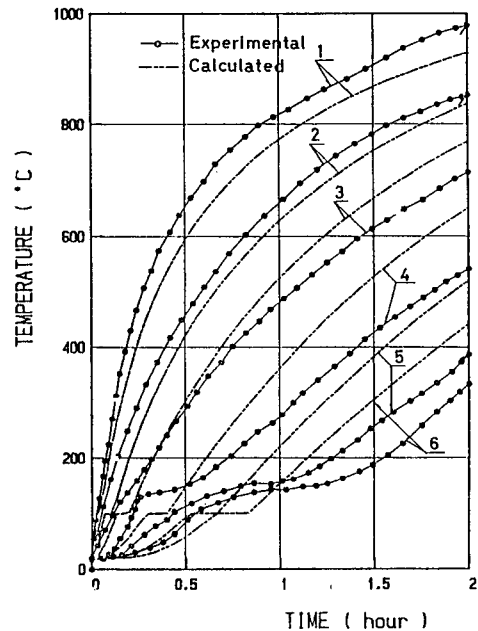
#### 7-1. 熱膨脹

철근콘크리트 構造物의 火害調査에서, 火害특징의 하나는 구속되어 있는 部材의 熱膨脹에 의한 휨 및 기둥의 전단파괴가 있으며, 또 하나는 部材内部의 温度差에 기인하는 爆裂이 있다. 따라서 火災時의 構造物의 舉動을 예측하기 위해서는 構造物 材料의 열팽창특성은 꼭 알아야만 하는 중요한 성질의 하나이다.

다음에 실험장치와 콘크리트와 철의 열팽창 실험결과를 나타낸다.

#### 7-2. 構造材料의 應力-變形 관계 및 Creep

高温에 있어서 構造材料의 力學的 特性은 火災時의 鐵骨, 鐵筋 콘크리트 部材의 舉動에 관한



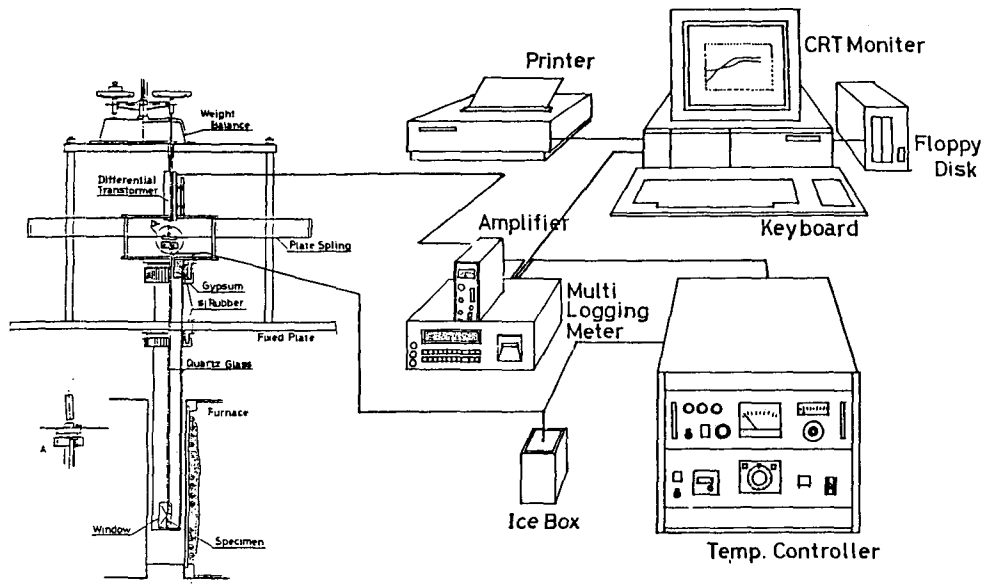


Fig. 12 Schematic diagram of thermal expansion testing system

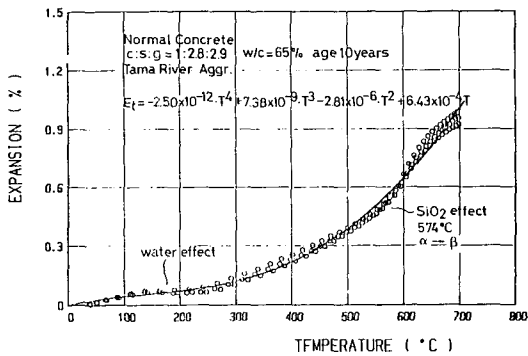


Fig. 13 General form of thermal expansion for concrete

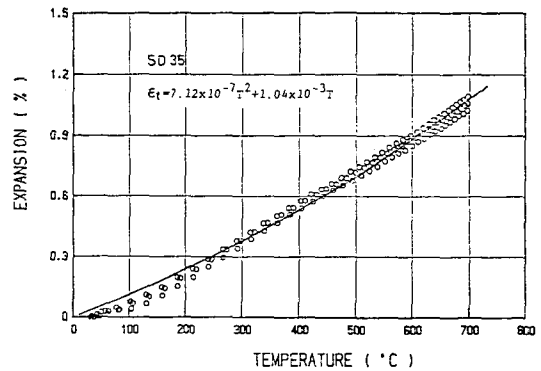


Fig. 15 Thermal expansion data and approximate curve for SD35

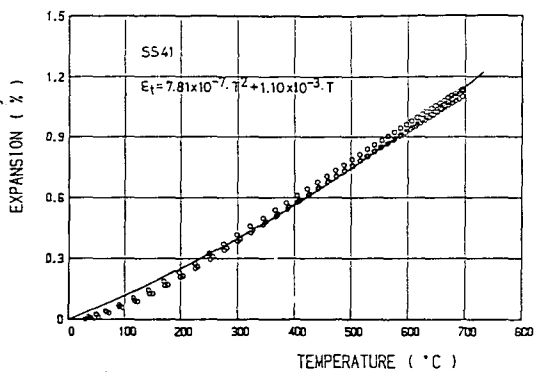


Fig. 14 Thermal expansion data and approximate curve for SS41

연구와 原子力 plant의 Prestress 콘크리트 壓力容器的 開發等과 關連하여 必要하게 되었다.

高温에 있어서 構造物의 舉動을 명확히 解明하기 위해서는 構造材料의 基本的인 力學的 性質에 關한 材料 DATA가 必要하다. 특히 應力-變形關係, Creep등을 넓은 溫度 범위에서 규명하는 것이 重要하다. 따라서, 高温에 있어서 콘크리트, 鐵의 應力·變形關係, 各應力 level에서의 Creep의 실험결과를 다음에 表示한다.

包絡曲線

$$\sigma(T) / \sigma(T)_{\max} = \exp(1 - \epsilon(T) / \epsilon(T)_{\max}) \cdot \epsilon(T) /$$

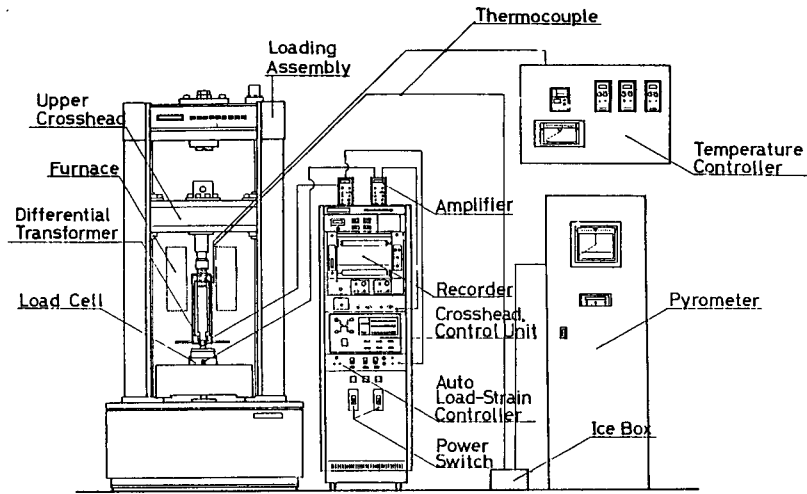
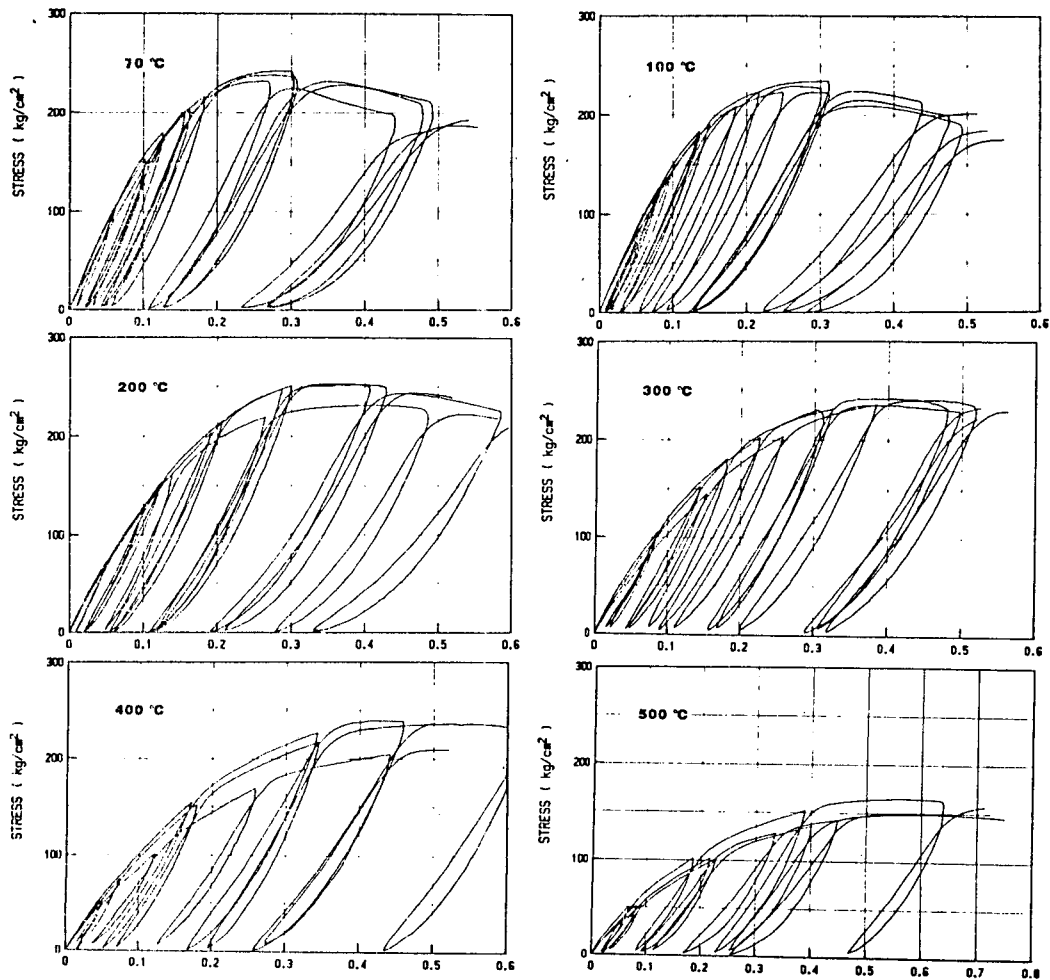


Fig. 16 Schematic diagram of testing system

\* 應力變形關係  
(콘크리트)



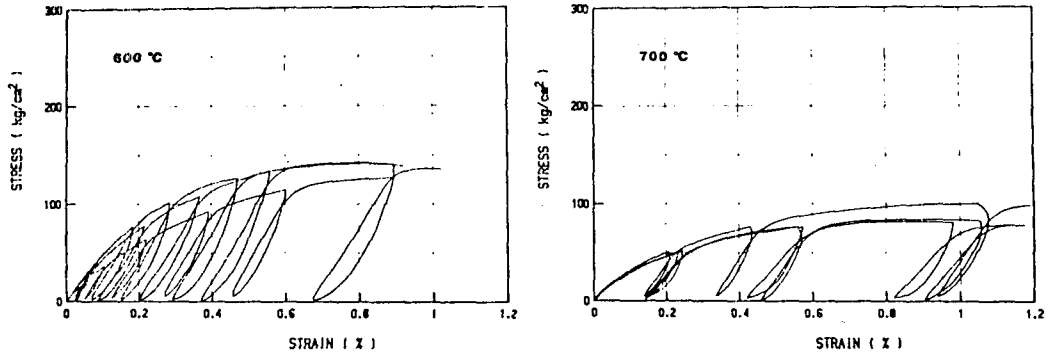


Fig. 17 Experimental stress-strain curves of usual strength concrete (A1) at constant temperature.

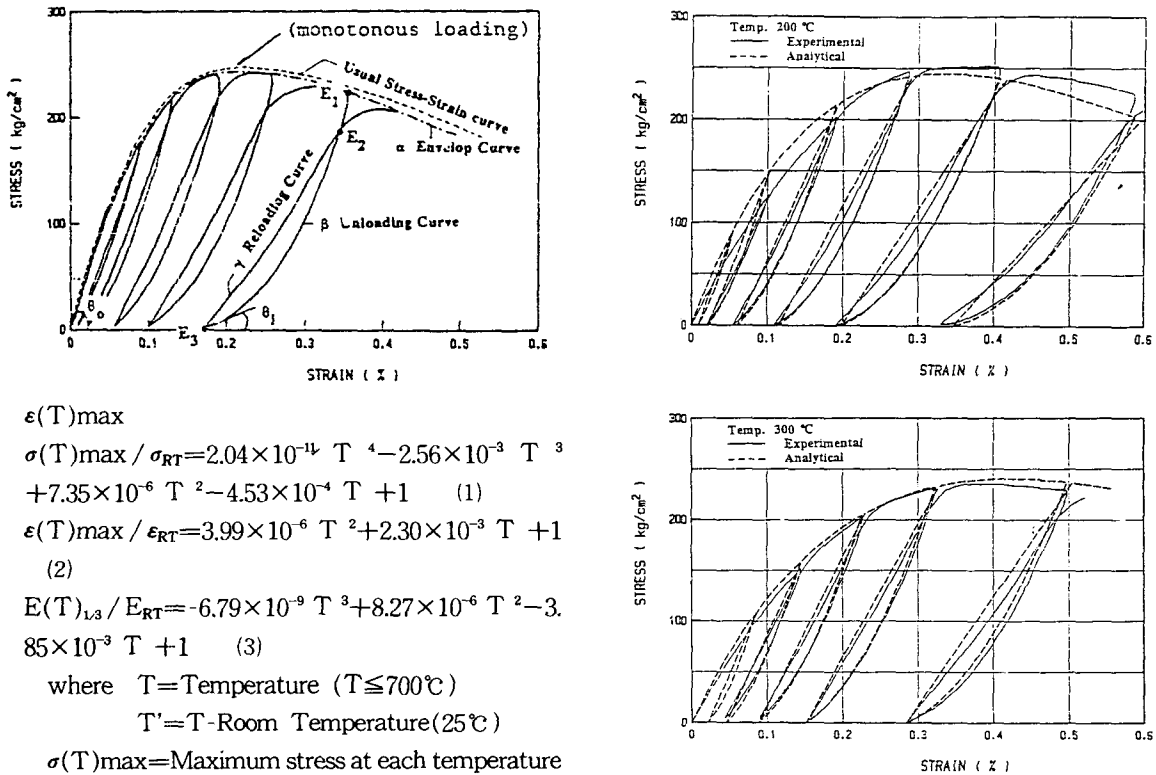


Fig. 18 Experimental and calculated results of stress-strain curves in various temperature (A1 series)

$\epsilon(T)_{max}$

$$\sigma(T)_{max} / \sigma_{RT} = 2.04 \times 10^{-14} T^4 - 2.56 \times 10^{-3} T^3 + 7.35 \times 10^{-6} T^2 - 4.53 \times 10^{-4} T + 1 \quad (1)$$

$$\epsilon(T)_{max} / \epsilon_{RT} = 3.99 \times 10^{-6} T^2 + 2.30 \times 10^{-3} T + 1 \quad (2)$$

$$E(T)_{L/3} / E_{RT} = -6.79 \times 10^{-9} T^3 + 8.27 \times 10^{-6} T^2 - 3.85 \times 10^{-3} T + 1 \quad (3)$$

where  $T$  = Temperature ( $T \leq 700^\circ\text{C}$ )

$T'$  =  $T$  - Room Temperature ( $25^\circ\text{C}$ )

$\sigma(T)_{max}$  = Maximum stress at each temperature (kg / cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{RT}$  = Maximum stress at room temperature (kg / cm<sup>2</sup>)

$\epsilon(T)_{max}$  = Strain at maximum stress for each temperature (%)

$\epsilon_{RT}$  = Strain at maximum stress for room temperature (%)

$E(T)_{L/3}$  = Secant modulus of elasticity at each temperature

$E(T)_{RT}$  = Secant modulus of elasticity ( $E_{L/3}$ ) at room temperature

除荷曲線

$$\sigma = d \epsilon^2 + e \epsilon + f$$

$$E_3(\epsilon) = G \cdot E_1(\epsilon) H$$



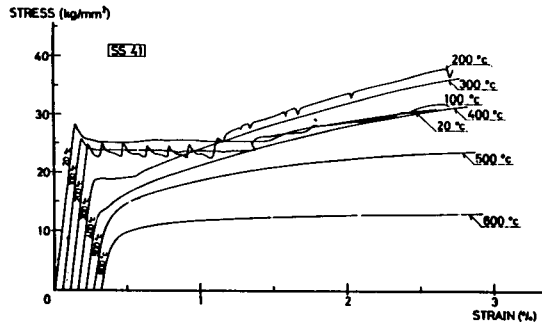


Fig. 19 Stress-strain curves at elevated temperature(SS41)

$$Y_i = l \cdot \exp(J \cdot E_1(\epsilon))$$

$$G = -9.11 \times 10^{-6} T + 0.786 \quad ; \quad H = -7.19 \times 10^{-4} T + 1.68$$

$$l = -1.49 \times 10^{-5} T^3 + 2.11 \times 10^{-2} T^2 + 11.3 T + 2.96 \times 10^3$$

$$J = 6.03 \times 10^{-8} T^3 + 8.92 \times 10^{-5} T^2 + 0.0461 T + 9.75$$

再負荷曲線

$$\sigma = g\epsilon + h$$

$$E_2(\epsilon) = K \cdot E_1(\epsilon)$$

$$K = 2.81 \times 10^{-5} T + 0.969$$

$$\sigma = \frac{E_{1T} \cdot \epsilon}{\left(1 + \left|\frac{E_{1T} \cdot \epsilon}{\sigma_{0T}}\right|^{n_T}\right)^{1/n_T}} + E_{PT} \cdot \epsilon \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$E_{1T} = E_T - E_{PT}$$

$E_{TT}$  : T °C 에서의 초기 young 계수

$E_{PT}$  : T °C " plastic modulus

$\sigma_{0T}$  : T °C " reference plastic stress

$n_T$  : T °C " shape parameter

Table 1. 鋼材의 單軸應力-變形關係實驗式의 諸係數 SS41

Temp (°C)	$\frac{E_T}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_{0T}}{\sigma_{0RT}}$	$\frac{E_{PT}}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_{0T}}{\sigma_{0RT}}$	$n_T$
RT	1.000	1.000	0.0214	0.758	(1.43)
100	0.991	0.952	0.0216	0.750	(1.43)
200	0.964	0.897	0.0353	0.666	(1.43)
300	0.919	0.751	0.0338	0.727	1.43
400	0.855	0.538	0.0288	0.654	1.84
500	0.774	0.000	0.0148	0.668	1.60
600	0.674	—	0.0039	0.452	1.69

$$p(T) = \sum_{i=0}^N a_i \cdot T^i \quad \dots\dots\dots(2)$$

Table 2. 鋼材의 單軸應力-變形關係實驗式係數近似多項式 (2)의 諸係數 SS41

	$\frac{E_T}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_{0T}}{\sigma_{0RT}}$	$\frac{E_{PT}}{E_{RT}}$	$\frac{\sigma_{0T}}{\sigma_{0RT}}$	$n_T$
$a_0$	1.000	1.001	$2.206 \times 10^{-2}$	0.759	1.473
$a_1$	0.0	0.0	$-8.662 \times 10^{-5}$	$1.933 \times 10^{-4}$	$-1.602 \times 10^{-3}$
$a_2$	$-0.905 \times 10^{-4}$	$-3.592 \times 10^{-4}$	$1.393 \times 10^{-14}$	$-5.944 \times 10^{-4}$	$9.024 \times 10^{-4}$
$a_3$	—	—	$-4.186 \times 10^{-9}$	$2.179 \times 10^{-4}$	$-9.728 \times 10^{-3}$
$a_4$	—	—	$3.368 \times 10^{-12}$	$-2.305 \times 10^{-11}$	—

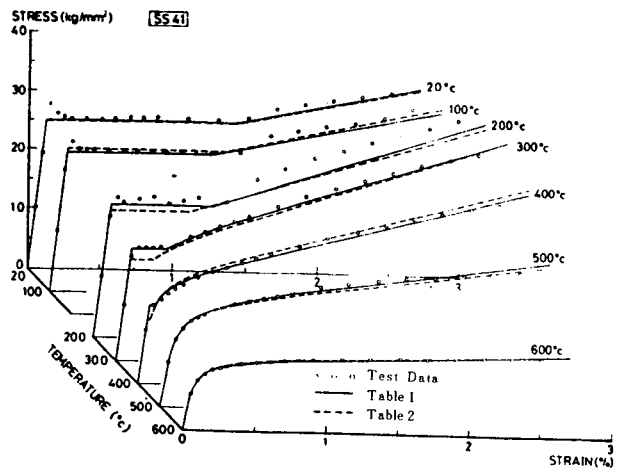


Fig. 20 Total strain-time curves at indicated temperature and stress(A1 series)

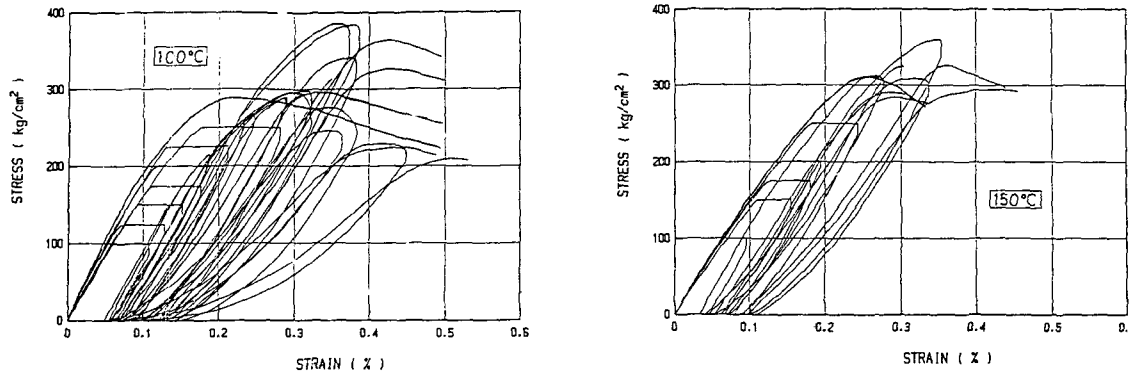


Fig. 21 Stress-strain curves at creep test (A) series

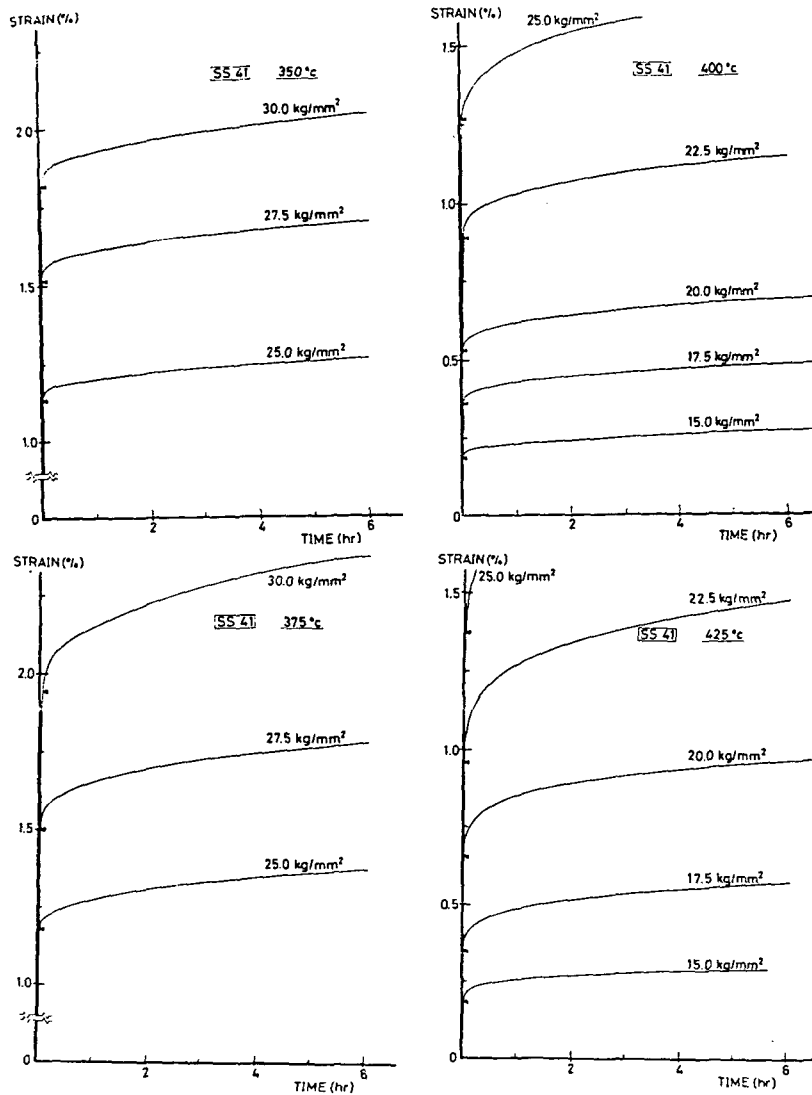


Fig. 22 Total strain versus time at indicated temperature and stress levels

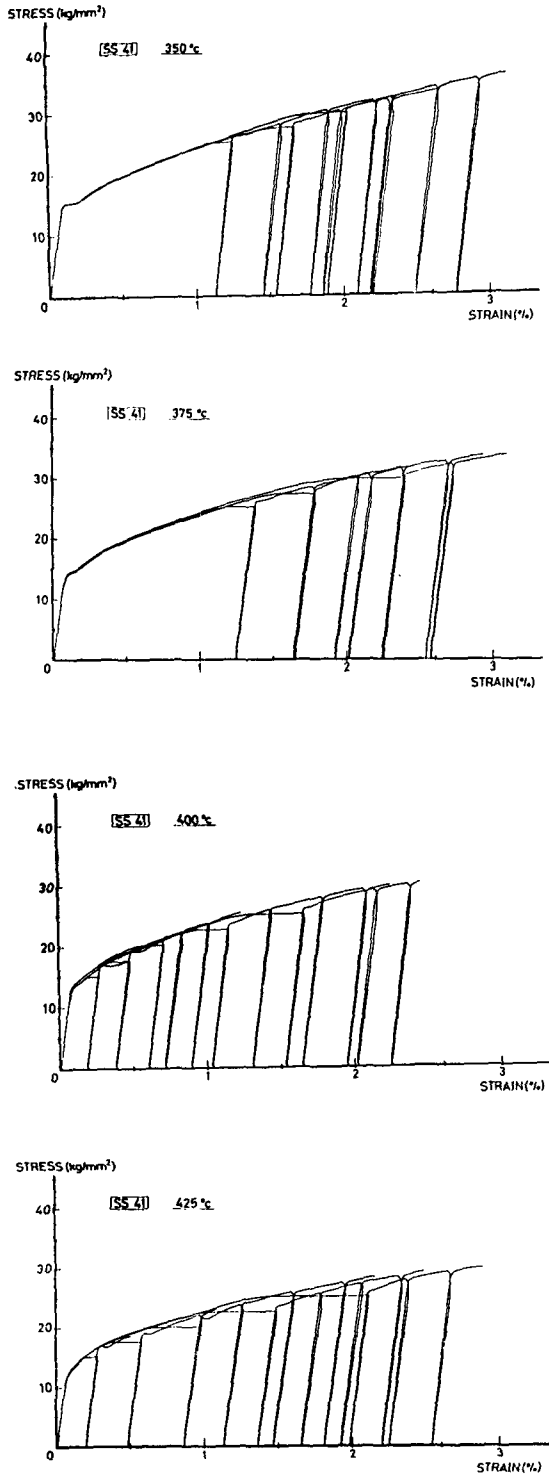


Fig. 23 Stress-strain curves obtained at creep test

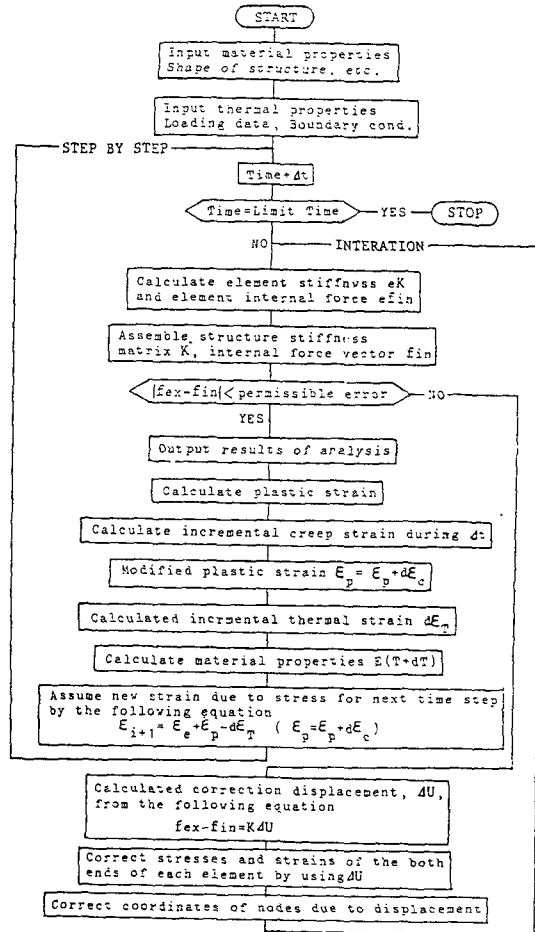


Fig. 24 Flow diagram of the design procedures

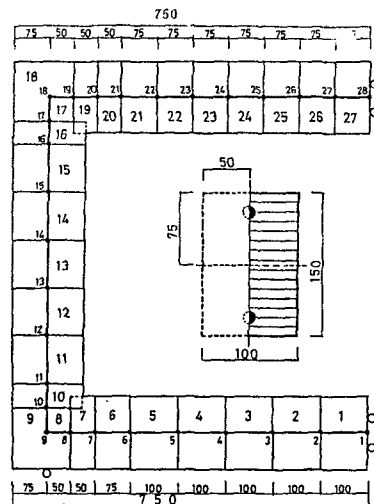


Fig. 25 Sizes and shape of a frame

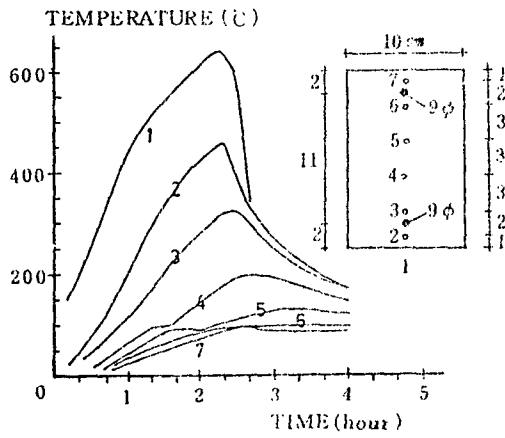


Fig. 26 Temperature distributions in the beam

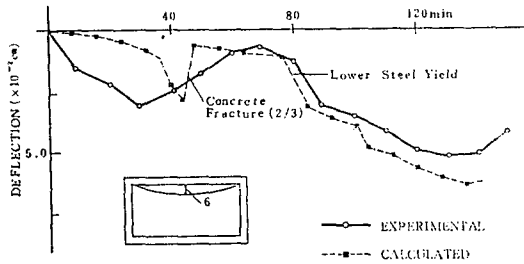


Fig. 27 Deflectional history of the beams

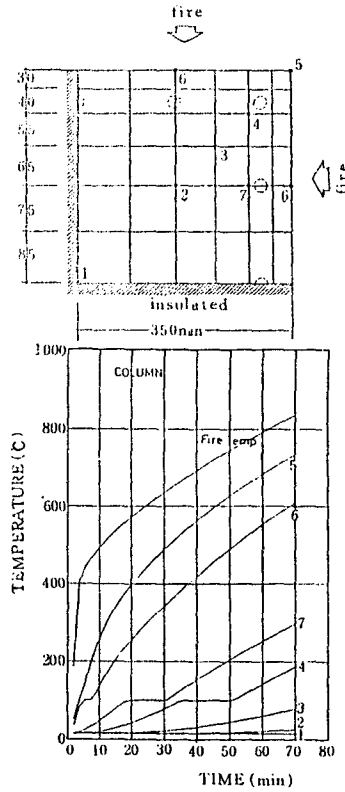


Fig. 29 Temperature distributions in the column

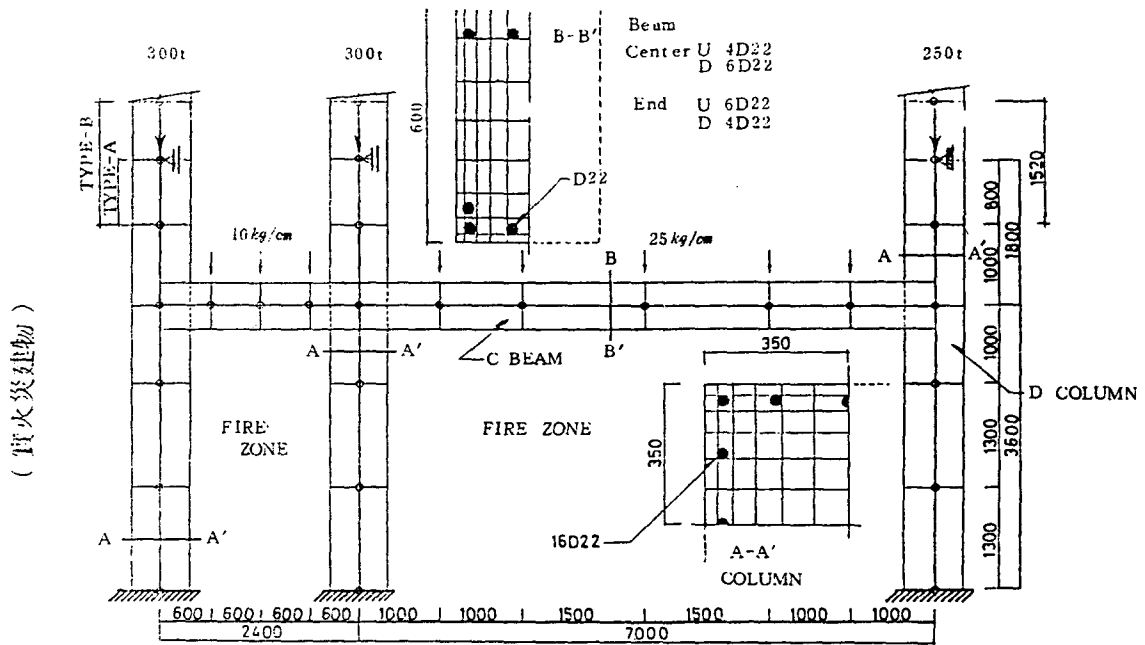


Fig. 28 Sizes and shapes of a frame

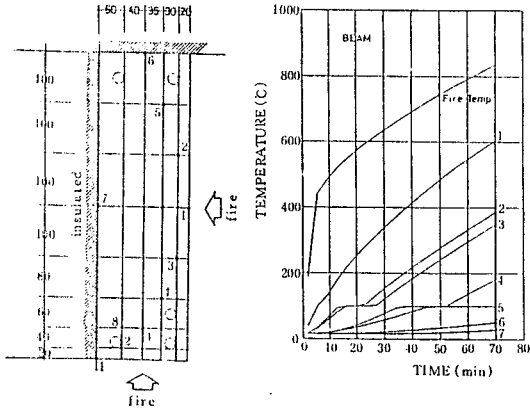


Fig. 30 Temperature distributions in the beam

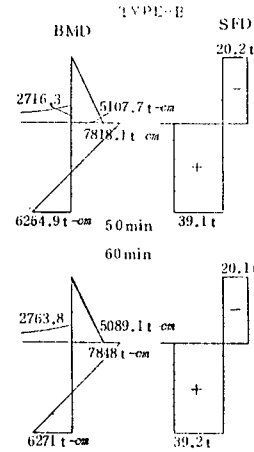


Fig. 32 Bending moment and shear force diagrams of a frame

8. 鐵筋콘크리트 構造物의 熱應力 解析

앞에서 기술된 材料의 DATA와 Fig24의 계산 Flow chart를 이용하여 解析된 結果와 실험 結果를 比較하여 보면 Fig 같이 計算結果가 實驗 結果를 잘 나타내고 있다.

따라서 解析手法의 타당성을 잘 입증하고 있다.

실제 화재건물의 해석 결과와 被害結果의 비교에서 보면 構造物의 被害結果를 事前에 예측할 수 있다. (Fig 31, 32, 33, 34 참조)

기둥의 許容 剪斷力

$$Q = b j f_s$$

$$b = 70\text{cm} \quad j = 56.875\text{cm}$$

$$f_s = F_c(T) / 30 \text{ or } (5 + F_c(T) / 100) \text{ 이하}$$

$$F_c(T) / F_c = 2.04 \times 10^{-11} T^4 - 2.56 \times 10^{-8} T^3 + 7.35 \times 10^{-6} T^2 - 4.53 \times 10^{-4} T + 1$$

$F_c$ : 콘크리트의 設計基準強度 (kg /  $\text{cm}^2$ )

$T$ : 온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )

60분에서 기둥의 許容剪斷力 약 28.76t

熱應力 解析에 의한 結果 39.2t

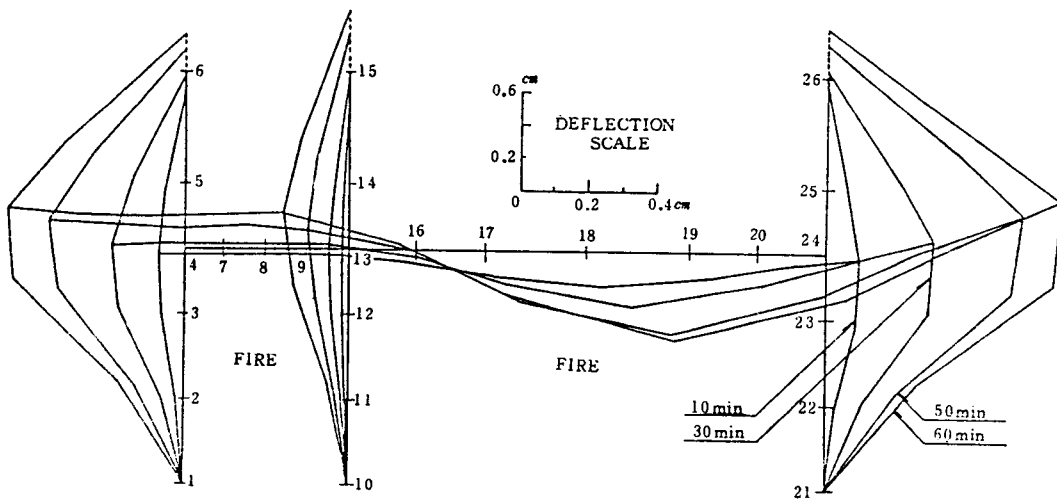


Fig. 31 Deformational histories of DAE-SHIN frame (TYPE-B)

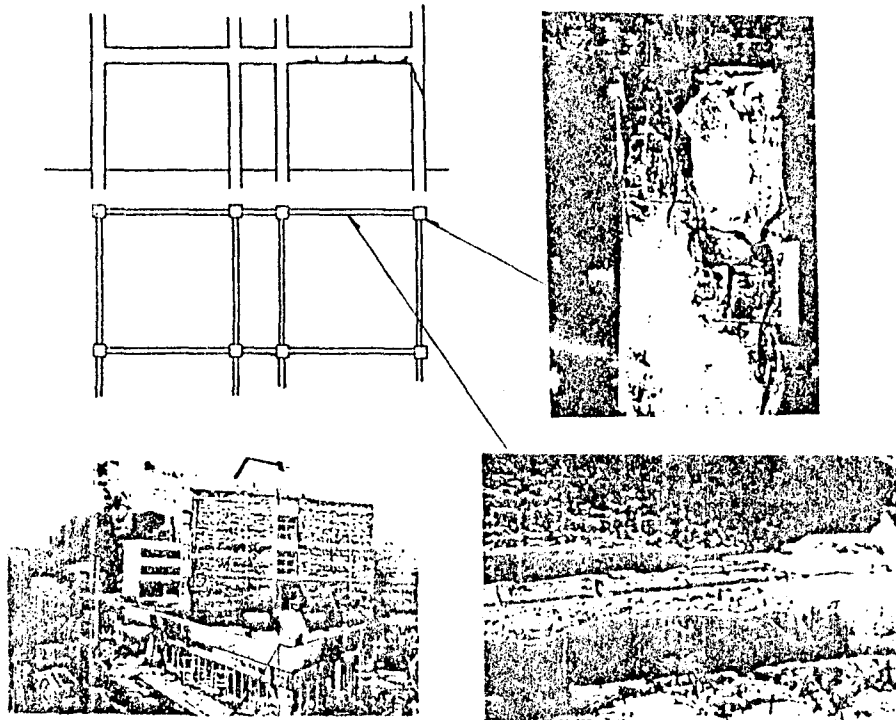


Fig. 33 Damage of a frame after fire

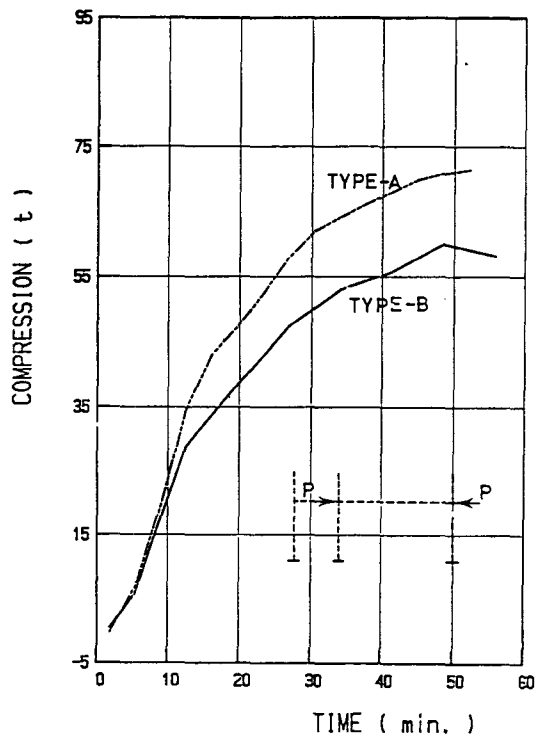


Fig. 34 Axial force in the beam of a frame

### 9. 結論

先進各國에 있어서의 新耐火設計法 추세에 맞추어, 우리나라도 이론적 근거가 없고 비경제적인 法規에 의한 耐火設計法에서 탈피하여 工學的인 手法에 의한 새로운 耐火設計法을 發表하는 研究가 國家的인 次元에서 필요하다.