

# 화재를 입은 콘크리트 교각의 손상에 관한 연구

## A Study on the Damage to a Concrete Bridge Pier due to Fire

윤우현\*

Yoon, Woo Hyun

---

### 요 약

본 연구에서는 유조차의 추락으로 인해 화재를 입은 콘크리트 교각의 손상 정도에 대하여 조사하였다. 화재에 의한 콘크리트의 조직 변성 및 파손 깊이는 유한요소법으로 계산하여 현상 실측치와 비교 분석하였고, 철근의 손상도는 인장시험을 통하여 파악하였다. 유한요소법에 의한 계산에서는 콘크리트의 열 전달 계수  $\alpha=2000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , 콘크리트의 초기 온도  $T_0=5^\circ\text{C}$  그리고 화재 지속 시간  $t=30$  분으로 고정하였고, 화재 온도  $T_a=500\sim 800^\circ\text{C}$ 로 변화시켰다. 계산 결과 콘크리트 조직 변성 깊이는 1.5~4.1cm 그리고 압축 파열 깊이는 8.7~10.1cm로서 각각 실측치인 2~4cm 및 8~10cm 와 근접한 결과를 얻었다. 그리고 화재후 철근의 인장강도는 별 손실이 없는것으로 나타났다.

### Abstract

In this study, the damage to a concrete bridge pier due to fire caused by the fall of an oil truck were investigated by the use of FEM and by tensile tests for reinforcements. And these results were analyzed and compared with the measured values. In the FEM calculations, the selected variable was the fire temperature  $T_a=500\sim 800^\circ\text{C}$ . The fixed values were the heat transition coefficient  $\alpha=2000\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , the initial temperature of concrete  $T_0=5^\circ\text{C}$  and the fire duration  $t=30$  minutes. As the results obtained from numerical calculations, the property damage zone appeared to be 1.5~4.1cm and the structure damage zone appeared to be 8.7~10.1cm from the concrete surface. And this results give values very similar to those measured, namely 2~4cm and 8~10cm respectively. The results from tensile tests give no serious loss of the tensile strength.

**Keywords :** concrete bridge pier, fire temperature, heat transition coefficient, property damage zone, structure damage zone, fire duration, tensile strength, tensile test

---

\* 정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수, 공박

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1995년 8월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

콘크리트는 열을 받아서 온도가 상승하면 팽창하게 되나 온도가 300℃ 까지는 조직의 변화 또는 강도의 변화가 거의 없다, 그러나 온도가 300℃ 이상이 되면 콘크리트 조직이 변하고 600~800℃ 에서 부터는 파열하여 손상된다.<sup>(7)</sup>

온도상승으로 인한 콘크리트의 열응력 발생은 지금까지는 주로 원자로 콘크리트를 대상으로 조사되었고<sup>(2,4)</sup> 최대 작용온도 200~600℃ 정도에서 콘크리트의 재료특성이 실험적으로 규명하려는 시도가 있었다.<sup>(8, 11, 15)</sup>

최근에는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 화재에 의한 손상정도가 조사 연구되었고 여기서는 주로 PC-강재의 응력손실이 연구 대상이었다.<sup>(13)</sup>

본 연구에서는 철근 콘크리트교각(단면 : 4m×3m)이 화재를 입은후 콘크리트와 철근의 손상정도를 주 조사내용으로 하였으며, 콘크리트 손상에서는 표면 경도변화, 조직 변성깊이 및 압축 파열깊이를 조사하였고 철근은 인장시험을 수행하여 그 손상정도를 파악하였다.

이들 결과는 실제 콘크리트 구조물이 화재를 입었을때 보수, 보강설계를 위한 유용한 자료를 제공하게 된다.

## 2. 화재에 의한 콘크리트의 손상

콘크리트는 다음과 같은 온도 T 범위에서 내부 수분이 방출된다.

T=~100℃ 에서 자유 공극수 방출

T=100℃~200℃ 에서 물리적인 흡착수 방출

T=400℃~ 에서 화학적인 결합수 방출

따라서 시멘트 경화체는 상기온도에서 수축 변형하면서 화학적인 결합이 변하고, 또한 골재의 열팽창으로 콘크리트는 결국 조직이 이완된다. 그러나 T=300℃ 까지는 콘크리트의 강도손실이 없는 것으로 나타났다.<sup>(7)</sup>

한편 콘크리트 온도가 계속 상승하면 압축 파열 현상이 나타나는데 이것은 다음의 원인에 의한 것이다.

- 공극수의 증기압으로 인한 파열
- 급격한 온도경사에 의한 압축파열
- 골재와 시멘트 경화체의 열팽창 계수차이에 의한 파열

일반적으로 콘크리트속의 골재는 석회암인 경우 T=600℃~800℃ 에서 연소되고, 석영질 골재는 T=570℃ 에서 결정수의 증기압으로 파열된다.<sup>(7)</sup> 그리고 석회암 골재는 열팽창계수가 석영질 골재보다 낮아 화재 발생시 열응력이 작기 때문에 파손정도가 적다. 또한 화재 발생시 콘크리트의 함수량이 높으면 고열에 의한 증기압으로 파열되기 쉽다.

본 연구에서는 이와 같은 콘크리트의 조직변성 및 파열깊이를 유한요소법에 의한 컴퓨터 프로그램으로 시뮬레이션하여 실측치와 비교 분석하였다.

## 3. 콘크리트의 표면 경도 조사

화재로 인한 콘크리트 표면부의 강도특성을 파악하고, 이것을 무손상 부위와 비교하기 위하여 Schmidt Hammer 에 의한 표면경도를 측정하였다. 측정은 파열이 가장 심하게 나타난 최대 손상 부위와 파열부 및 비파열부의 경계부, 그리고 화재의 영향이 없었던 무손상 부위의 세곳에서 실시하였고, 그 결과는 다음과 같다.

Table 1 Rebound numbers of Schmidt Hammer

Position	Rebound Number	Remarks
damaged zone	23.4	58%
Boundary zone	30.4	75%
Sound zone	40.5	100%

위의 결과에서 알 수 있듯이 화재를 입지 않은 부위의 콘크리트 표층상태를 정상이라고 했을때 최대 손상부위의 강도특성은 정상치의 58% 정도로서 매우 심하게 손상됐음을 알 수 있고, 또한 파열은 없으나 화재영향을 받은 경계부도 정상치보다 25% 정도 강도 손실이 있음을 알 수 있다. 이들 결과는 보수,보강시 콘크리트 표층의 일정 두께를 제거해야 한다는 기준을 제시하게 된다. 여

기에 대한 자세한 값을 결정하기 위해서 본 연구에서는 비파괴 시험 및 유한요소법에 의한 계산을 수행하였다.

#### 4. 조직 변성 깊이 및 압축 파열 깊이 조사

화재에 의해서 콘크리트 조직이 어느 정도 깊이까지 변성 됐는지를 조사하기 위해서 전자파에 의한 비파괴 시험방법인 Ground Penetrating Radar(GPR)를 사용하였다. GPR의 원리는 Echo Impulse의 각 매질내 재료고유의 유전특성에 따라 전파속도가 변화하는 점을 이용하여 장비에서 송출된 전자파가 유전상수가 다른 각 매질을 통과하면서 굴절, 흡수, 반사되는 파를 포착, 분석하여 구조물 내부구조를 파악하는 것이다. GPR 시험결과 화재를 입은 콘크리트는 파열면에서 약 2~4cm 깊이까지 조직에 이상이 있음을 파악하였다. 압축 파열 깊이는 육안으로 조사하였고, 조사결과 교각 표면으로부터 약 8~10cm 정도 파열된 것으로 나타났다(Fig. 1).

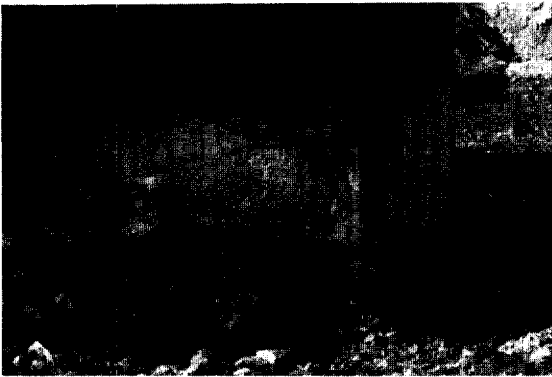


Fig. 1 The fire-damaged concrete pier

#### 5. 철근 인장 시험

교각에 작용하는 하중은 축력과 수평력에 의한 휨 모멘트로서 대부분의 축력은 콘크리트의 압축 강도로 지항되며, 휨 모멘트는 철근의 인장력으로 전달된다. 따라서 화재를 입은 철근 콘크리트 교

각의 안정성 검토를 위해 철근의 강도손실 여부를 파악해야 한다. 문헌<sup>(7)</sup>에 의하면 냉간 가공강재는 500℃ 이상이면 강도손실이 있고 자연가공 강재는 800℃까지는 강도손실이 없다. 본 연구에서는 대상교각의 철근에 대한 인장시험을 KS B 0802에 의해 수행하였다. 인장시험에서는 항복강도, 인장강도 및 연신율이 측정되었고, 다음 Table 2에는 손상부의 철근과 무손상 부위의 철근에 대한 이들 각각의 값이 정리되었다. Table 2로부터 화재에 의해서 철근은 대체로 항복강도가 2~3%, 인장강도가 7~8% 정도 손실됨을 알 수 있다. 손실이 비교적 적은 이유는 교각의 철근 피복이 10cm 정도로서 화재영향을 덜 받은 것으로 판단된다.

Table 2 Tensile testing of the reinforcements( $\phi=16\text{mm}$ )

Position	Yield stress	Tensile strength	Ultimate strain	Remarks	
	[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg/cm <sup>2</sup> ]	[%]		
Sound zone	3760	5360	28.8	100%	
Damaged zone	A	3650	4930	21.2	92~97%
	B	3680	4960	22.1	93~98%

#### 6. 유한 요소법에 의한 손상 깊이 계산

콘크리트 파열깊이는 육안으로 파악할 수 있는 것이고 그 이상의 깊이까지 콘크리트는 화재로 인해서 조직이 변성될 수 있기 때문에 4.절에서는 GPR 시험을 하였다. 본 절에서는 화재에 의한 콘크리트 조직변성 및 파열 깊이를 유한요소법에 의한 Computer Program으로 Simulation하여 실측치와 비교하였다. 콘크리트는 T=300℃까지는 강도손실이 없고, T=400℃ 이상에서 시멘트 경화제의 Shrinkage로 조직변성이 나타날 수 있다. 그리고 콘크리트는 압축강도 이상에서 압축파열이 발생한다. 따라서 조직변성 및 압축파열 깊이는 다음과 같이 결정하였다.

- 조직변성 깊이 : 화재 지속 시간동안 콘크리트 온도가 400℃까지 도달된 깊이
- 압축파열 깊이 : 화재 지속 시간동안 콘크리트 압축응력이 교각의 설계

기준강도인  $\sigma_{ck}=210\text{kg}/\text{cm}^2$   
에 도달된 깊이

### 6.1 열 확산 해석

등방성 매질내에서 비정상적인 열확산(Temperature Diffusion) 방정식은 Fick 의 제2법칙을 적용하면 다음과 같다.<sup>(12)</sup>

$$C_T \dot{T} - \text{div}(k_T \text{grad}T) - S = 0 \quad (1)$$

여기서,  $C_T$ =열용량=비열용량  $c_T$  · 밀도

$$\rho \text{ [J / K · m}^3\text{]}$$

$$k_T = \text{열전도율 [W / K · m]}$$

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (T = \text{온도, } t = \text{시간})$$

$S = \text{Heat Source Intensity}$

(1) 식은 다차원, 시간의 함수인 열확산 방정식으로서 3차원(x, y, z축)에서 열전도율  $k_T$ 가 일정하고 Heat Source Intensity 를 무시하면 다음과 같은 미분 방정식으로 표시된다.

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} - k_T \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

(2) 식의 유한 요소법 해석을 위해서는 다음과 같은 Matrix 형태로 변환시켜야 한다.<sup>(5)</sup>

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $[C] = \int_{V_e} C_T [N]^T [N] dV$

(열용량  $C_T$  Matrix)

$$[K] = \int_{V_e} k_T \left( \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]}{\partial y} + \right.$$

$$\left. \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV$$

(열전도율  $k_T$  Matrix)

각 시간 구간에서 식(3)의 적분은 Crank Nicolson 방법<sup>(3)</sup>에 의해 다음과 같이 수행된다.

$$\left[ \frac{C}{\Delta t} + \frac{K}{2} \right] \{T\}_{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} - \frac{K}{2} \right] \{T\}_n \quad (4)$$

여기서,  $n, n+1 =$  시점

$$\Delta t = \text{시간구간} = t_{n+1} - t_n$$

유한요소법으로 해석한 결과와 다음과 같은 Carslaw & Jager<sup>(6)</sup>의 수식으로 계산한 결과를 비교하여 화재에 의한 열이 콘크리트 표면에 전달되는 열 전달계수  $\alpha$ 를 결정하였다.

$$\frac{T}{T_a} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-(2n+1)^2 \pi^2 V / 4} \cdot \cos \frac{(2n+1) \pi \zeta}{2} \quad (5)$$

여기서,  $T =$  시간  $t$ , 위치  $x$  에서의 온도

$T_a =$  작용(외부)온도

$$V = \frac{k_T}{\rho C_T} \cdot \frac{t}{\ell^2}$$

$$\zeta = x / \ell \quad (2\ell = \text{부재두께})$$

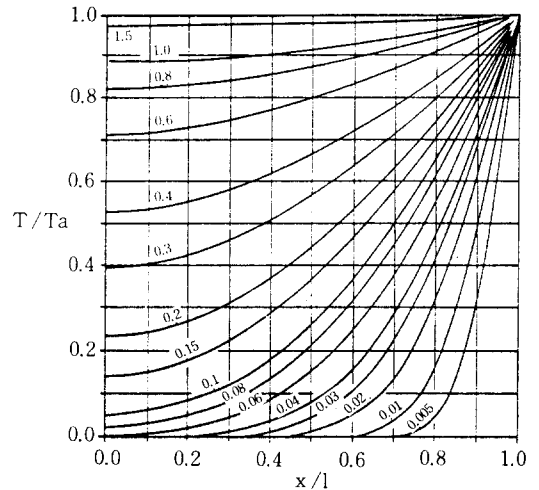


Fig. 2 Temperature distribution at various times in the slab  $-\ell < x < \ell$  with zero initial temperature and surface temperature  $T_a$ . The numbers on the curves are the value  $V$ <sup>(6)</sup>

### 6.2 열 응력 해석

열 응력 계산을 위한 일반적인 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & \nu & \nu \\ \nu & 1 & \nu \\ \nu & \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \epsilon_0 \quad (6)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 6.1절에서 계산된 시간변화에 따른

콘크리트의 온도 변형율이고 이것은  $\epsilon_0 = \alpha_T \cdot \Delta T$  로 표시된다. 대상 구조물을 일차원으로 간략하면 한 방향에서만 변형이 발생하므로 x, z축을 고정하면  $\epsilon_x = \epsilon_z = 0$ 이다. 따라서 (6)식은 다음과 같이 응력식으로 변환할 수 있다.

$$\sigma_y = \left[ \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} \right) \epsilon_y - \alpha_T \cdot \Delta T \right] \frac{E}{1-2\nu} \quad (7)$$

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{\epsilon_y \cdot E \cdot \nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} - \frac{E \cdot \alpha_T \cdot \Delta T}{1-2\nu} \quad (8)$$

여기서  $\alpha_T$ 는 콘크리트의 열팽창계수[1/K]

### 6.3 열 확산 및 응력계산에 필요한 물성치

우선 열 확산 해석에 필요한 콘크리트의 물성치는 다음과 같다.

- 열전도율  $k_T$
- 비 열용량  $c_T$

Mandry<sup>(14)</sup>에 따르면  $k_T$ ,  $c_T$  값은 콘크리트의 배합성분에 따라서 다음과 같이 계산된다.

$$c_T = \sum G_i \cdot f_{1i}; \quad k_T = G_1 f_{2i} \quad (9)$$

여기서  $G_i$ 는 콘크리트 배합성분의 중량비이고  $f_{1i}$  및  $f_{2i}$ 는 각 성분의 비 열용량  $c_T$ 와  $k_T$  값을 나타낸다. 이들 계수는 다음 Table 3에 각각 정리되어 있다.

Table 3 Factor  $f_1$ ,  $f_2$  in formula(9) at  $T=21^\circ\text{C}$  and  $54^\circ\text{C}$ .<sup>(14,16,17)</sup>

Material	$f_1$ [J/kg·K]		$f_2$ [W/m·K]	
	T=21°C	T=54°C	T=21°C	T=54°C
Water	4200	4200	0.60	0.60
Cement	460	830	1.24	1.35
Basalt	770	840	1.91	1.90
Granit	806	850	3.30	3.30
Sand Stone	900	980	5.40	5.40
Quarzsand	700	870	3.10	3.10

교각 콘크리트의 배합은 다음과 같다.

- 시멘트 = 334kg/m<sup>3</sup> (14.85%)
- 강모래 = 710kg/m<sup>3</sup> (31.56%)

- 채석자갈 = 1028kg/m<sup>3</sup> (45.70%)
  - 물 = 172kg/m<sup>3</sup> (7.65%)
  - 혼화제 = 5.5kg/m<sup>3</sup> (0.24%)
- 
- 계 = 2249.5kg/m<sup>3</sup> (100.0%)

다음 Table 4에 식(9)에 의해서 계산된  $c_T$ ,  $k_T$  값과 문헌<sup>(1,9,10,16)</sup>에서 조사한 값을 비교 정리하였다. Table 4에서와 같이 식(9)로 구한  $c_T$  값의 범위는 930~1202 J/kg·K,  $k_T$  값의 범위는 1.7~4.4 W/m·K로서 문헌의 실측값보다 비교적 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이 점을 고려하여  $c_T=1000$  J/kg·K,  $k_T=2.5$  W/m·K로 정하여 계산하였다.

열응력 계산에 필요한 콘크리트의 탄성계수는  $E=15000\sqrt{\sigma_{ck}}$ 의 공식에 의해  $\sigma_{ck}=210$  kg/cm<sup>2</sup>이므로  $E=217371$  kg/cm<sup>2</sup>, 그리고 Poisson 비  $\nu=0.17$ , 열팽창계수  $\alpha_T=10^{-5}$ /K로 정하여 응력을 계산하였다.

여기서 탄성계수 E와 열팽창계수  $\alpha_T$ 는 온도의 증가에 따라서 서로 상반되게 감소, 증가하므로<sup>(7)</sup> 각 온도마다 다른 값을 사용해야 하나 상호증감의 효과를 고려하여 T=20°C에 대한 값을 사용하였다.

Table 4 Specific heat capacity  $c_T$  and thermal conductivity  $k_T$

Source	T[°C]	H[%]	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$c_T$ [J/kg·K]	$k_T$ [W/m·K]
ACI <sup>(1)</sup>	10	-	2390~2530	870~950	1.9~3.7
	66	-	-	980~1080	1.9~3.4
Hundt <sup>(9)</sup>	20~80	100	2200~2300	-	2.8~3.5
	20~80	0	2200~2300	-	1.4~1.8
Hundt <sup>(10)</sup>	21	100	2350~2420	-	2.1~2.8
	57	100	2350~2420	-	1.7~2.7
	20	0	2220~2290	-	1.4~1.5
	57	0	2220~2290	-	1.0~1.6
U.S <sup>(16)</sup>	10	-	2330~2570	860~980	1.4~3.7
	32	-	2330~2570	910~1040	1.5~3.6
Formula(9)	21	100	2250	930~1085	1.7~4.4
	54	100	2250	1094~1202	1.7~4.4

### 6.4 조직 변성 및 파열 깊이 계산

6.1절~6.3절의 결과에 따라서 개발한 Computer Program에 의해 화재를 입은 콘크리트 교

각(단면 : 4m×3m)의 온도분포와 응력분포를 화재 지속시간 t=30분 까지 계산하였다.

실험실에서는 일정한 온도로 콘크리트에 열을 가하여 화재실험을 할 수 있으나 실제의 경우에는 화재 지속 시간중에 콘크리트에 접촉하는 화재강도 Ta가 바람의 영향으로 일정치 않다. 따라서 본 계산에서는 화재온도를 500℃, 600℃, 700℃, 800℃로 변화시켰고, 화염과 콘크리트 표면사이에서의 열 전달계수 α는 6.1절에서 논한 바와 같이 임의의 α에 대하여 유한 요소 해석결과와

1에 의한 값이 거의 동일한 온도 분포를 가질 때의 값으로 결정하였다. 이 결과 본 연구에서 사용될 열 전달계수 α ≃ 2000 W/m<sup>2</sup>·K이다. 그리고 교각 콘크리트의 초기온도 To는 화재 발생시기가 동절기(2월말)인 점을 감안하여 5℃로 가정하였다.

#### 6.4.1 조직 변성 깊이

조직 변성 깊이는 화재에 의해 콘크리트의 온도가 400℃에 도달하는 부위까지로 정하였으며, 화재 지속시간 t=30분(1800 sec)를 다음과 같은 식으로 세분하여 각 시간마다 온도분포를 계산하였다.

$$t_i = (1800+1)^{i/100} - 1 ; 0 \leq i \leq 100 \quad (10)$$

다음 Fig. 3~Fig. 6에는 각 화재온도 Ta별로 i=20, 40, 60, 80, 100 즉, t=3.5 sec, 19 sec, 89 sec, 401 sec, 1800 sec에서의 온도분포가 도시되었다.

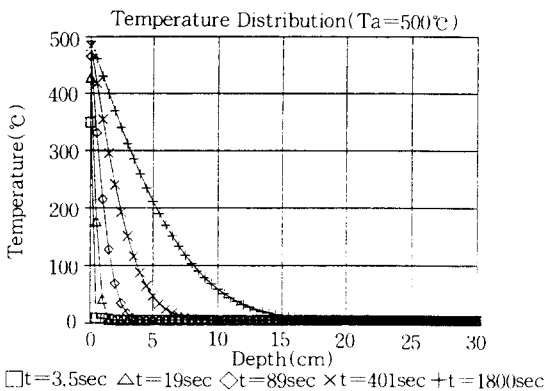


Fig. 3 Time-dependent temperature distribution for Ta=500℃

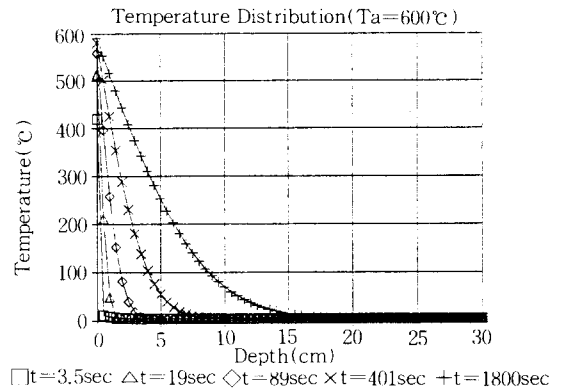


Fig. 4 Time-dependent temperature distribution for Ta=600℃

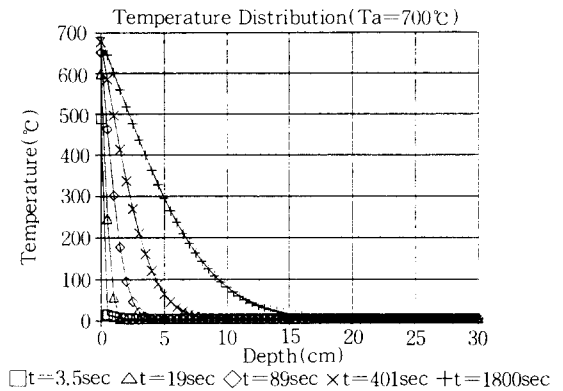


Fig. 5 Time-dependent temperature distribution for Ta=700℃

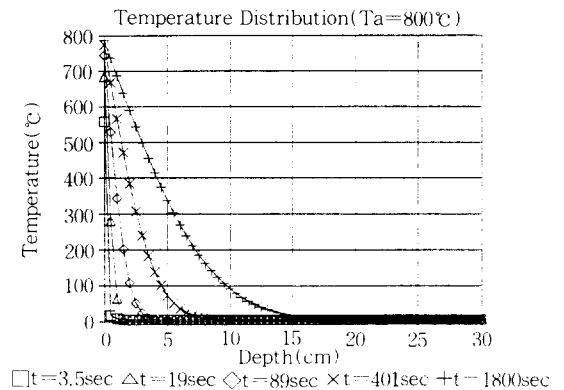


Fig. 6 Time-dependent temperature distribution for Ta=800℃

Fig. 3은 화재온도  $T_a=500^\circ\text{C}$ 에 대한 교각표면 ( $x=0\text{cm}$ )부터 30cm 깊이까지의 온도분포를 나타낸 것이다. 화재발생후  $t=89\text{ sec}$ 에서 콘크리트는 0.3cm,  $t=401\text{ sec}$ 에서 0.6cm, 그리고 화재 종료시에는 약 1.5cm 정도 조직이 변하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 화재온도  $T_a=600^\circ\text{C}$ 에 대한 온도분포이다. 이 도표로 부터 콘크리트는 화재발생후  $t=19\text{ sec}$ 에서 0.2cm,  $t=89\text{ sec}$ 에서 0.5cm,  $t=401\text{ sec}$ 에서 1.1cm 그리고 화재 종료시에는 약 2.6cm 까지 조직이 변함을 알 수 있다.

Fig.5는 화재온도  $T_a=700^\circ\text{C}$ 에 대한 온도분포이다. 여기서는 콘크리트의 조직변성 깊이가 화재발생후  $t=19\text{ sec}$ 에서 0.3cm,  $t=89\text{ sec}$ 에서 0.6cm,  $t=401\text{ sec}$ 에서 1.6cm 그리고 화재 종료시에는 약 3.5cm 정도까지 도달하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 화재온도  $T_a=800^\circ\text{C}$ 에 대한 온도분포이다.  $T_a=800^\circ\text{C}$ 인 경우에는 콘크리트의 조직변성이 화재발생후  $t=3.5\text{ sec}$ 에서 0.1cm,  $t=19\text{ sec}$ 에서 0.3cm,  $t=89\text{ sec}$ 에서 0.9cm,  $t=401\text{ sec}$ 에서 2.0cm 그리고 화재 종료시에는 약 4.1cm 깊이까지 나타났다.

다음 Table 5에는 화재 온도별로 시간에 따른 조직 변성 깊이를 종합 정리하였다.

Table 5 Property damage zone for different fire temperatures  $T_a$

$T_a [^\circ\text{C}]$	Property Damage Zone [cm]				
	$t=3.5\text{ sec}$	$t=19\text{ sec}$	$t=89\text{ sec}$	$t=401\text{ sec}$	$t=1800\text{ sec}$
500	-	-	0.3	0.6	1.5
600	-	0.2	0.5	1.1	2.6
700	-	0.3	0.6	1.6	3.5
800	0.1	0.3	0.9	2.0	4.1

#### 6.4.3 압축 파열 깊이

콘크리트 파열 깊이는 화재에 의해 콘크리트의 응력이 설계기준 강도인  $\sigma_{ck}=210\text{ kg/cm}^2$ 에 도달하는 부위까지로 정의하였으며 6.4.1 절과 마찬가지로  $t=3.5\text{ sec}$ ,  $19\text{ sec}$ ,  $89\text{ sec}$ ,  $401\text{ sec}$  그리고  $t=1800\text{ sec}$ 의 5단계 시점에서 응력분포를 계산하여 조사하였다. Fig.7~Fig.10에는 화재온도별

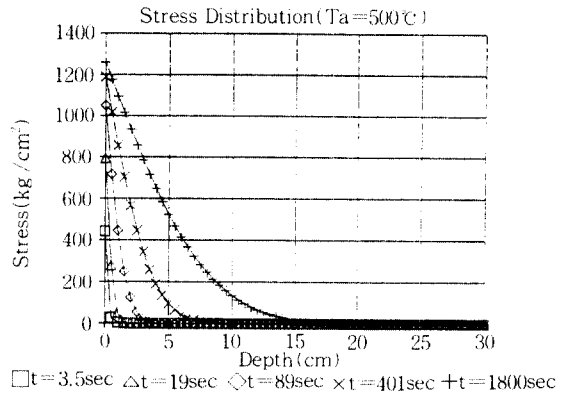


Fig. 7 Time-dependent stress distribution for  $T_a=500^\circ\text{C}$

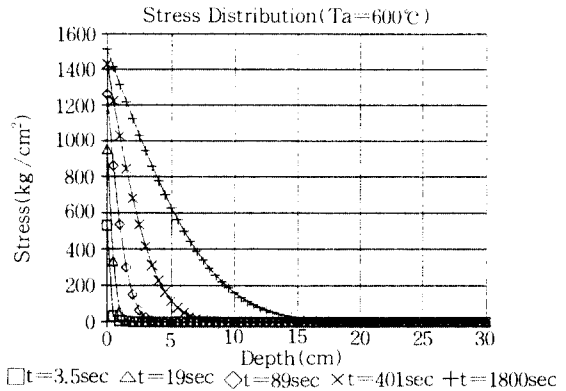


Fig. 8 Time-dependent stress distribution for  $T_a=600^\circ\text{C}$

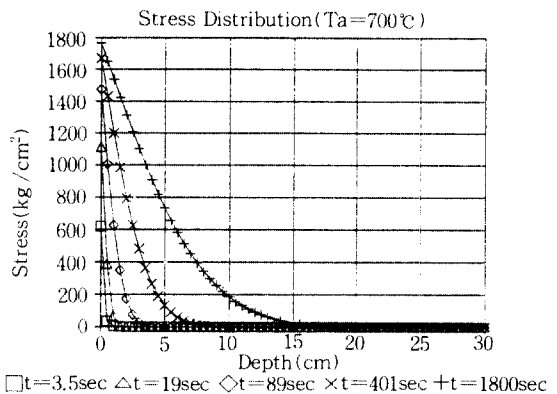


Fig. 9 Time-dependent stress distribution for  $T_a=700^\circ\text{C}$

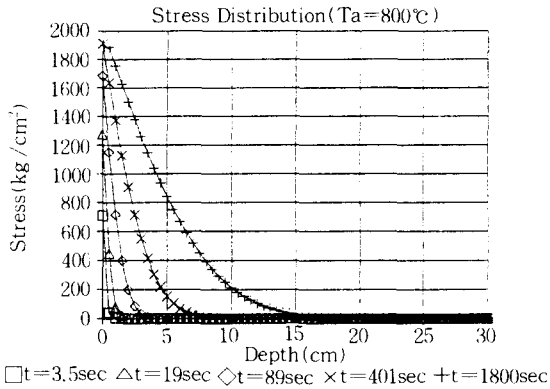


Fig. 10 Time-dependent stress distribution for  $T_a=800^\circ\text{C}$

응력분포가 도시되었다.

Fig.7은 화재온도  $T_a=500^\circ\text{C}$  에 대한 교각표면 ( $x=0\text{cm}$ )부터 30cm 깊이까지의 응력분포를 나타낸 것이다. 화재발생후  $t=3.5\text{ sec}$  에서 콘크리트는 0.3cm,  $t=19\text{ sec}$  에서 0.6cm,  $t=89\text{ sec}$  에서 1.8cm,  $t=401\text{ sec}$  에서 4.0cm, 그리고 화재 종료시에는 약 8.7cm 정도 파열되는 것으로 나타났다.

Fig.8는 화재온도  $T_a=600^\circ\text{C}$  에 대한 응력분포이다. 이 도표로 부터 콘크리트는 화재발생후  $t=3.5\text{ sec}$  에서 0.4cm,  $t=19\text{ sec}$  에서 0.8cm,  $t=89\text{ sec}$  에서 1.9cm,  $t=401\text{ sec}$  에서 4.3cm 그리고 화재 종료시에는 약 9.3cm 까지 파열됨을 알 수 있다.

Fig.9는 화재온도  $T_a=700^\circ\text{C}$  에 대한 응력분포이다. 여기서는 콘크리트의 파열 깊이가 화재발생후  $t=3.5\text{ sec}$  에서 0.4cm,  $t=19\text{ sec}$  에서 0.9cm,  $t=89\text{ sec}$  에서 2.0cm,  $t=401\text{ sec}$  에서 4.4cm 그리고 화재 종료시에는 약 9.7cm 정도까지 도달하는 것으로 나타났다.

Fig.10은 화재온도  $T_a=800^\circ\text{C}$  에 대한 응력분포이다.  $T_a=800^\circ\text{C}$  인 경우에는 콘크리트의 파열이 화재발생후  $t=3.5\text{ sec}$  에서 0.4cm,  $t=19\text{ sec}$  에서 0.9cm,  $t=89\text{ sec}$  에서 2.2cm,  $t=401\text{ sec}$  에서 4.6cm 그리고 화재 종료시에는 약 10.1cm 깊이까지 나타났다.

다음 Table 6 에는 화재 온도별로 시간에 따른 파열 깊이를 종합 정리하였다.

Table 6 Property damage zone for different fire temperatures  $T_a$

$T_a [^\circ\text{C}]$	Structure Damage Zone [cm]				
	$t=3.5\text{ sec}$	$t=19\text{ sec}$	$t=89\text{ sec}$	$t=401\text{ sec}$	$t=1800\text{ sec}$
500	0.3	0.6	1.8	4.0	8.7
600	0.4	0.8	1.9	4.3	9.3
700	0.4	0.9	2.0	4.4	9.7
800	0.4	0.9	2.2	4.6	10.1

#### 6.4.3 결과 분석

지금까지 6절에서는 화재에 의한 콘크리트 교각의 조직 변성 깊이와 압축 파열 깊이를 유한 요소법에 의해서 계산하였다. 계산 결과 조직 변성 깊이는  $T_a=500^\circ\text{C} \sim T_a=800^\circ\text{C}$  에서 1.5cm~4.1cm, 파열 깊이는 8.7cm~10.1cm 로서 화재온도가 증가할수록 커지며 이들 값은 각각 축성값인 2cm~4cm, 8cm~10cm 와 근접하는 결과를 보였다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 철근 콘크리트 교각이 화재를 입은후 콘크리트와 철근의 손상정도를 조사하였다. 우선 콘크리트 손상에서는 콘크리트 표면경도가 Schmidt Hammer 에 의해 조사되었고, 조직 변성 깊이 및 압축 파열 깊이는 실측 및 유한요소법으로 계산되었다. 유한요소 해석결과에서 손상깊이 길정은 콘크리트 온도와 응력이 각각 화학적인 결합수 방출로 인해 조직이 변성될 수 있는 온도인  $T=400^\circ\text{C}$  와 콘크리트 설계 기준강도인  $\sigma_{ck}=210\text{ kg/cm}^2$ 에 도달된 깊이를 기준으로 하였고 철근의 손상도 조사를 위해서 인장시험을 수행하였다. 본 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 화재로 인해 콘크리트 표면경도는 25~42% 정도 손상을 입었다.

(2) 철근은 화재후 항복강도가 2~3%, 인장강도가 7~8% 정도 감소되는 비교적 적은 손실을 보였고 이는 철근의 피복두께가 10cm 정도로서 화재영향이 적었던 것으로 판단된다.

(3) 화재후 콘크리트 표층에서 나타난 조직 변성 깊이는 화재온도가  $500^\circ\text{C}$ 에서  $800^\circ\text{C}$ 로 증가함에 따라 1.5cm 에서 4.1cm 로 증가하였고, 이는



GPR 에 의한 실측치인 2~4cm 와 비슷한 결과를 보였다.

④ 화재로 인한 콘크리트의 압축 파열 깊이는 화재온도가 500℃ 에서 800℃ 로 증가함에 따라 8.7cm 에서 10.1cm 로 증가하였고, 이 값은 실측치인 8~10cm 에 근접 하는 것이다.

⑤ 따라서 ③항과 ④항의 결과로 부터 실제 화재후 콘크리트 교각의 보수 보강시에는 압축 파열깊이 8~10cm 에 조직 변성깊이 2~4cm를 추가하여 약 10~14cm 정도 제거한 후에 작업을 해야할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. ACI Committee 207, "Mass Concrete for Dams and other Massive Structures," Journal of ACI, pp.273-309, Apr.1970
2. Argyris, J.H., Faust, G., Roy, J.R., Szimmat, J., Warnke, E.P. and Willam, K.J., "Finite Elemente zur Berechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern," Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 234, Beuth Verlag GmbH Berlin Köln, 1973.
3. Argyris, J.H., Warnke, E.P. and Willam, K. J., "Berechnungen von Temperatur-und Feuchtefeldern in Massivbauten nach der Methode der Finiten Elemente" Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 278, Beuth Verlag GmbH Berlin Köln, 1977.
4. Argyris, J.H., Faust, G., Roy, J.R., Szimmat, J., Warnke, E.P. and Willam, K.J., "Finite Elementberechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern," Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 279, Beuth Verlag GmbH Berlin Köln, 1977.
5. Bathe, K.J., "Finite-Elemente-Methoden," Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1986.
6. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of Heat in Solids," Oxford at the Clarendon Press, 1973.
7. Dartsch, B., "Konservieren Sanieren Restaurieren," Beton-Verlag GmbH, 1978.
8. Diederichs, U., Ehm, C., Weber, A. and Bec-

ker, G., "Deformation Behaviour of HTR-Concrete under Biaxial Stresses and Elevated Temperatures," Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.H, Concrete and Concrete Structures, pp.109-114, 1987.

9. Hundt, J., "Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles," Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 256, Beuth Verlag GmbH Berlin Köln, 1975.
10. Hundt, J. and Wagner, A., "Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes und des Reifegrades auf die Wärmeleitfähigkeit von Beton," Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 297, Beuth Verlag GmbH Berlin Köln, 1978.
11. Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E., Gungoosingh, R. and Malektojar, S., "Effect of Age and Specimen Size on the Transient Thermal Strain of Concrete," Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.H, Concrete and Concrete Structures, pp.133-140, 1987.
12. Klopfer, H., "Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen," Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1974
13. Maissen, A., "Brandschäden bei vorgespanntem Beton - Nachweis der Rest- Vorspannkraft," Beton-und Stahlbetonbau, Heft 5, 125-128, 1994
14. Mandry, W., "ber das Kühlen von Beton," Springer-Verlag, 1961.
15. Roelfstra, P.E., "Numerical Simulation of Time-Dependent Deformation under Hygral and Thermal Transient Conditions," Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.H, Concrete and Concrete Structures, 83-102, 1987.
16. U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, "Boulder Canyon Project Final Reports(1940-1949, Part VII-Cement and Concrete Investigations"
17. Weast, R.C., "Handbook of Chemistry and Physics," CRC Press, Inc., 58th Ed., 1977

(접수일자 : 1994. 12. 1)