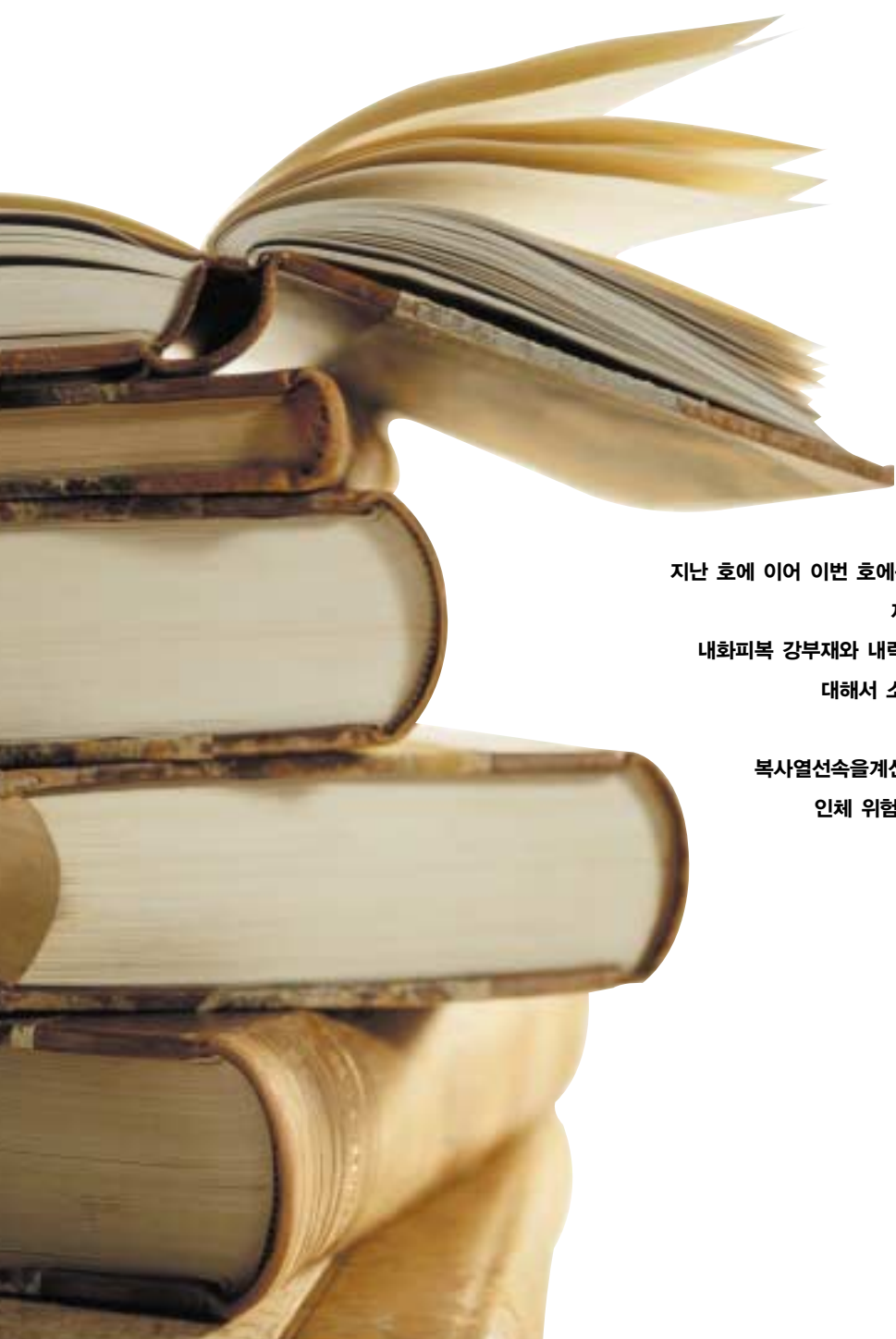


## 성능위주설계를 위한 『SFPE 방화공학 핸드북』의 활용 2



지난 호에 이어 이번 호에는 SFPE 방화공학핸드북의 제4부, 제9장 및 제11장에서 설명하고 있는 내화피복 강부재와 내력 목재 부재의 내화성능 계산방법에 대해서 소개하고, 제3부, 제11장에서 다루는 개방형 탄화수소 화재의 복사열선속을계산하는 방법과, 이러한 복사열선속의 인체 위험성(제2부, 제6장)에 대해 소개한다.

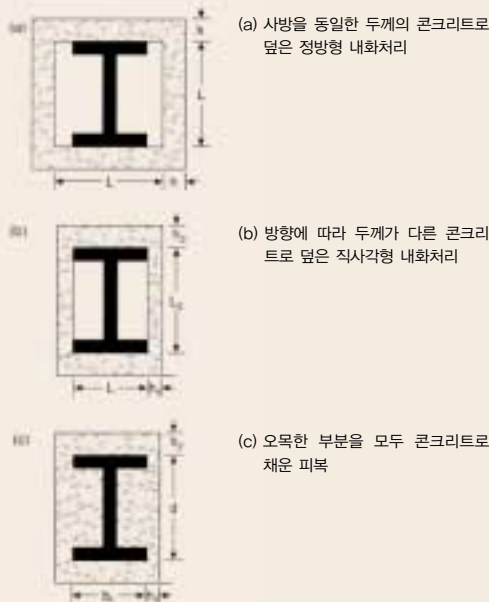
정리 | 유호정 협회 위험조사부 사원

### 1. 강부재 내화성능의 실험적 상관관계

다양하고 사용하기 편리한 실험적 상관관계를 이용해 철골 기둥, 보 및 트러스의 내화성능을 계산할 수 있다. 실험적 상관관계는 특정 부재의 여러 가지 변형에 대해 수행한 수많은 표준시험의 결과로 얻은 데이터를 바탕으로 하고 있다.

#### 가. 철골기둥

내화/비내화 철골기둥의 내화성능을 추정하기 위한 상관관계가 <표 1>에 제시되어 있다. 플랜지 구간에 대해서는 W/D, 중공 구간에 대해서는 A/P가 방정식 내에 포함되어 있다. W/D는 가열 강재 주변의 길이의 내화 경계면(비내화 강재의 경우 강재 주변의 길이)에 이르는 직선방향 단위길이 당 중량이다. A/P는 단면적을 가열대상 주변의 길이로 나눈 값이다.



■ 그림 1. 콘크리트 내화구조용 철골기둥

#### 예제 1

밀도가 110lb/ft<sup>3</sup> [176.2kg/m<sup>3</sup>]인 경량 콘크리트를 피복한 W8×28 기둥의 내화성능을 구하라. 이 때 오목한 공간은 모두 채워지고 콘크리트 덮개의 두께는 1.25in. (31.8mm)이다.

#### 풀이

[표 1]로부터, 이 경우에 해당하는 방정식은 다음과 같다.

$$R = R_0 (1 + 0.03m)$$

여기에서,

$$R_0 = 10 (W/D)^{0.7} + 17 (h^{1.6}/k_c^{0.2}) \{1 + 26 [H/\rho_c C_{ch} (L + h)]^{0.8}\}$$

[그림 1]을 참조하면,

$$h_2 = h_1 = h = 1.25 \text{ in. (31.8mm)}$$

$$b_f = 6.535 \text{ in. (166mm)}$$

$$d = 8.060 \text{ in. (204.7mm)}$$

$$W/D = 0.67 \text{ lb/ft} \cdot \text{in. (39.3kg/m}^2 \text{ (외형))}$$

$$A = 8.25 \text{ in.}^2 \text{ (0.0053m}^2 \text{)}$$

상온에서 콘크리트가 보이는 열특성은 다음과 같다.

$$k_c = 0.35 \text{ Btu/hr-ft} \cdot \text{F}$$

$$c_c = 0.20 \text{ Btu/lb} \cdot \text{F}$$

$$\rho_c = 110 \text{ lb/ft}^3$$

$$L = \frac{1}{2} (b_f + d) = 7.30 \text{ in.}$$

$$H = 0.11W + \frac{H_c}{144} (b_f D - A)$$

$$H = 0.11 \times 28 + \frac{110 \times 0.20}{144} (6.535 \times 8.060 - 8.25) = 9.87$$

$$R_0 = 10(0.67)^{0.7} + 17 \left( \frac{1.25^{1.6}}{0.35^{0.2}} \right)$$

$$\times \left\{ 1 + 26 \left[ \frac{9.87}{110 \times 0.2 \times 1.25(7.30 + 1.25)} \right]^{0.8} \right\}$$

$$R_0 = 99 \text{ min}$$

■ <표 1> 철골기둥 관련 실험식

Member/Protection	Solution	Symbols
Column/Unprotected	$R = 10.3 (WD)^{0.7}$ , for $WD < 10$ $R = 8.3 (WD)^{0.8}$ , for $WD = 10$ (for critical temperature of 1000°F)	$R$ = fire endurance time (min) $W$ = weight of steel section per linear foot (lb/ft) $D$ = heated perimeter (in.)
Column/Gypsum Wallboard	$R = 130 \left( \frac{hW^2 D^2}{3} \right)^{0.25}$ where $W' = W + \left( \frac{50hD}{144} \right)$	$h$ = thickness of protection (in.) $W'$ = weight of steel section and gypsum wallboard (lb/ft)
Column/Spray-applied materials and board products—wide flange shapes	$R = [C_1(WD) + C_2]h$	$C_1$ & $C_2$ = constants for specific protection material
Column/Spray-applied materials and board products—hollow sections	$R = C_1 \left( \frac{A}{P} \right) h + C_2$	$C_1$ & $C_2$ = constants for specific protection material The $A/P$ ratio of a circular pipe is determined by $A/P \text{ pipe} = \frac{t(d-t)}{d}$ where $d$ = outer diameter of the pipe (in.) $t$ = wall thickness of the pipe (in.) The $A/P$ ratio of a rectangular or square tube is determined by $A/P \text{ tube} = \frac{t(a+b-2t)}{a+b}$ where $a$ = outer width of the tube (in.) $b$ = outer length of the tube (in.) $t$ = wall thickness of the tube (in.)
Column/Concrete cover	$R = R_0(1 + 0.03m)$ where $R_0 = 10(WD)^{0.7} + 17 \left( \frac{h^{1.5}}{k_c^{0.5}} \right) \left[ 1 + 26 \left( \frac{H}{\rho_c c_c R_0 L + H} \right)^{0.8} \right]$ $D = 2(b_1 + d)$	$R_0$ = fire endurance at zero moisture content of concrete (min.) $m$ = equilibrium moisture content of concrete (% by volume) $b_1$ = width of flange (in.) $d$ = depth of section (in.) $k_c$ = thermal conductivity of concrete at ambient temperature (Btu/hr·ft·°F)
Column/Concrete encased	for concrete-encased columns use $H = 0.11W + \frac{t_c c_c}{144} (b_1 d - A_s)$ $D = 2(b_1 + d)$ $L = (b_1 + d)/2$	$H$ = thermal capacity of steel section at ambient temperature ( $= 0.11W$ Btu/ft·°F) $c_c$ = specific heat of concrete at ambient temperature (Btu/lb·°F) $L$ = inside dimension of one side of square concrete box protection (in.) $A_s$ = cross-sectional area of steel column (in. <sup>2</sup> )

경량 콘크리트의 수분함량이 5%라고 가정하면,  
 Fire endurance time(내화성능시간) = 99 (1 + 0.03 × 5) = 114min.

2. 목조 부재의 내화성능 계산

Lie는 대형 목재 보 및 기둥의 내화성능을 계산하기 위한 간단한 방정식을 유도해 냈다. 이들

방정식은 미국 및 캐나다에서 빌딩 코드에 적용되고 있고, 해당 방법이 여러 개의 목재업계 간행물에 언급되어 있다.

보의 경우, 관련 방정식은 다음과 같다.

$$t = 2.54ZB \left[ 4 - 2 \left( \frac{B}{D} \right) \right] \text{ for fire exposure on four sides}$$

$$t = 2.54ZB \left[ 4 - \left( \frac{B}{D} \right) \right] \text{ for fire exposure on three sides}$$

여기에서,

B = 화재에 노출되기 전에 보의 폭 (in.)

D = 화재에 노출되기 전에 보이 깊이 (in.)

Z = 하중계수[그림 2 참조]

기둥의 경우, 관련 방정식은 다음과 같다.

4면이 화재에 노출된 경우,

$$t = 2.54ZD \left[ 3 - \left( \frac{D}{B} \right) \right]$$

3면이 화재에 노출된 경우,

$$t = 2.54ZD \left[ 3 - \left( \frac{D}{2B} \right) \right]$$

여기에서,

B = 기둥의 긴 변 길이 (in.)

D = 기둥의 짧은 변 길이 (in.)

적용 단위가 SI일 경우, 상기 방정식에서 2.54Z는 0.10Z로 바뀌게 된다. 기둥의 경우에는 하중계수 Z (그림 2 참조)가 기둥에서 지지되지 않은 길이 l과 유효길이계수 Kc (그림 3 참조)의 영향을 반영하게 된다.

**예제 2**

3면이 화재에 노출되고 허용하중 대비 75%의 하중이 가해진 5.125in. × 21in. (130mm × 533mm) 보의 내화성능을 구하라.

**풀이**

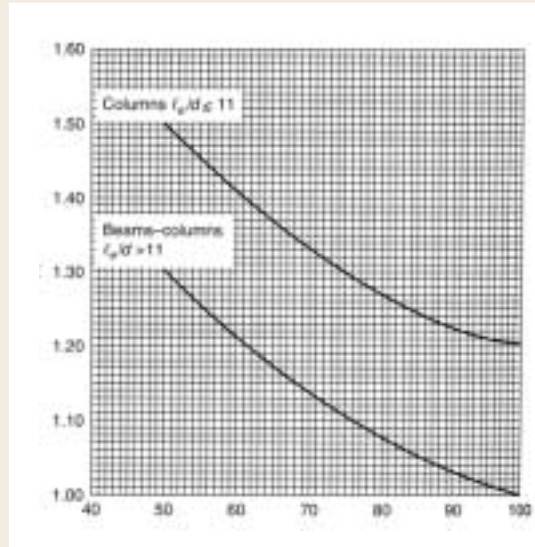
D = 21in.

B = 5.125in.

[그림 2]에서, 허용수치 대비 75%의 하중이 가해진 보에 대한 Z값은 1.1이다. 방정식 2로부터,

$$t = 2.54 (1.1) (5.125) \left[ 4 - \left( \frac{5.125}{21} \right) \right]$$

t = 53.8min

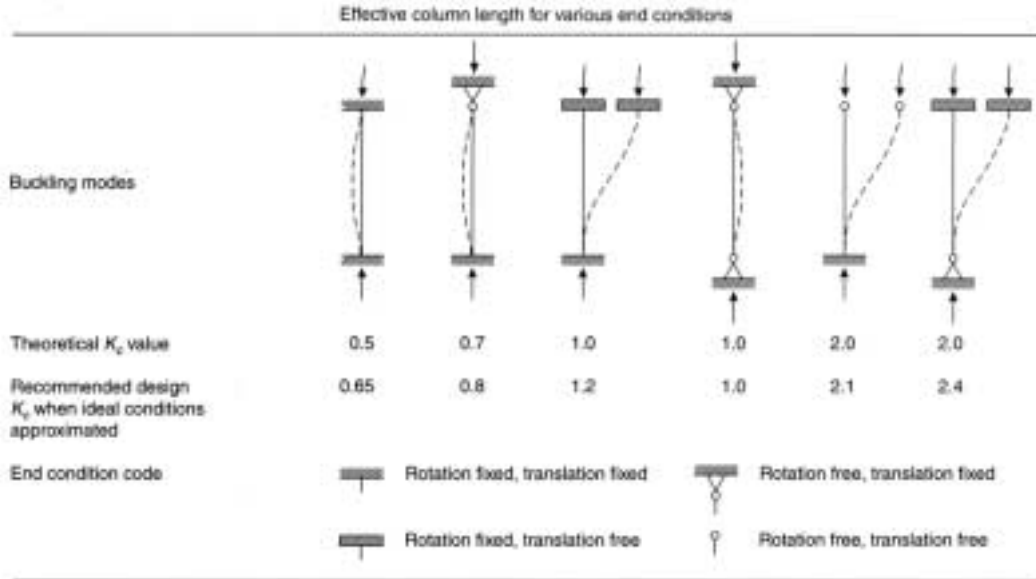


■ 그림 2. 허용수치 대비 백분율로 나타낸 작용하중 대비 하중계수(NBCC는 두 곡선에 대한 기준으로 11 대신 12를 사용함) : 유효기둥길이 l<sub>e</sub>는 K<sub>c</sub>l (그림 3)와 동일하고 d는 측면 지지부 평면의 단면치수

여기에서 제시된 방법은 미국 및 캐나다의 빌딩 코드에 반영되어 있지만, 대형 목재 보 및 기둥에만 적용할 수 있는 한계가 있다. 속 찬 목재 바닥이나 지붕에 대해 적용할 수 있는 것으로 알려진 방식은 없다. 해당 목재판의 구조 분석에 적용할 수 있는 방법을 참조할 수 있는 자료로는 Janssens이 발표한 기술보고서 10, Eurocode 5 등이 있다.

**3. 대규모 개방형 탄화수소 화재의 화재위험계산**

산업체 방화분야의 주요 과제 중 하나가 대규모 개방형 탄화수소 화재를 제어하는 것이다. 이러한 유형의 화재로부터 발생하는 피해로 인한 주된 상해 메커니즘이 열복사이다. 여기에서는 대규모 개방형 탄화수소 화재로 인해 발생하는 영향을 계산하기 위한 간략한 방법과 상세한 기법을 소개한다.



■ 그림 3. 유효기둥길이

### 가. Shokri 및 Beyler의 간략한 방법

대규모 화재실험으로부터 얻은 실험 데이터를 바탕으로 Shokri 및 Beyler는 지면 높이의 복사 열선속에 대한 간단한 상관관계를 수직 목표물의 방사상 위치에 대한 함수로 도출해 냈다. 입사 열선 속 상관관계(단위: kW/m<sup>2</sup>)는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{q}'' = 15.4 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1.59}$$

여기에서 D는 풀 파이어(Pool Fire)의 직경이고, L은 풀 파이어 중심으로부터 목표물 가장자리까지 거리이다.

이 방법은 풀이 원형이거나 거의 원형이고 목표물은 지면 높이에 수직방향으로 배치되어 있다고 가정하고 있다. 이미 알려진 바와 같이 복사 열선속은 복사원 중간 높이 부근에서 최대화되며, 복사 중심을 마주 보고 있는 목표물은 주어진 위치에

대해 최대 열선속을 받게 된다. 따라서 높이가 지면보다 높을 경우에는 복사 열선속이 방정식 5에 의해 주어지는 수치를 초과하게 될 것이다.

### 나. Shokri 및 Beyler의 세부적인 방법

Shokri 및 Beyler는 관련 문헌에 실린 풀 파이어 복사 데이터를 바탕으로 풀 파이어로부터 나오는 복사를 예측하는 방법을 도출하였다.

그들은 외부 목표물에 전달되는 화염 복사에 대한 실험 데이터의 상관관계를 화염의 평균유효 방사도 측면에서 제시했다. 이 때 화염은 평균방사도를 갖고 있는 원통형 균질 복사 흑체라고 가정한다.

Shokri 와 Beyler는 형상계수 개념을 바탕으로 발화원으로부터 목표물에 전달되는 복사열을 다뤘다. 이 때, 화염 외부의 목표물에 전달되는 입사 복사 열선속(kW/m<sup>2</sup>)  $\dot{q}''$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$q'' = EF_{12}$$

여기에서, E는 풀 파이어 화염의 방사도(kW/m<sup>2</sup>)이고, F<sub>12</sub>는 목표물과 화염 간의 형상계수이다.

풀 파이어 화염의 화염높이를 구할 때는 방정식 6으로 주어지는 Heskestad의 상관관계를 이용한다.

$$H = 0.235\dot{Q}^{2/5} - 1.02D$$

여기에서,

H = 화염높이

$\dot{Q}$  = 풀 파이어의 열방출률 (kW)

D = 풀 파이어의 직경 (m)

화염의 직경 및 높이가 주어지면, 원통형 복사원에 적용되는 방정식 8과 9를 이용해 형상계수 F<sub>12</sub>를 구한다. 수평 및 수직 목표물의 경우에 대한 형상계수를 구하는 표현식은 각각 방정식 8 및 9에 제시되어 있다.

$$F_{12,h} = \frac{(B-1/S) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}}}{\pi\sqrt{B^2-1}} - \frac{(A-1/S) \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}}{\pi\sqrt{A^2-1}}$$

$$F_{12,v} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left( \frac{h}{\sqrt{S^2-1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(S-1)}{(S+1)}} + \frac{Ah}{\pi S\sqrt{A^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}$$

여기에서,

$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S}, \quad B = \frac{1 + S^2}{2S}$$

$$S = \frac{2L}{D}, \quad h = \frac{2H}{D}$$

L = 원통 중심으로부터 목표물까지 거리

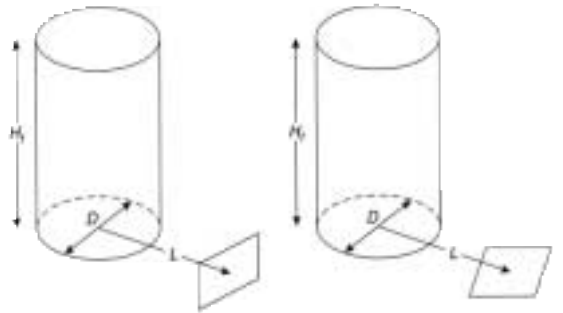
H = 원통 높이

D = 원통 직경

관련 명명법에 대해서는 [그림 4]를 참조한다.

특정지점에 대한 형상계수가 수평 및 수직 형상계수의 벡터 합으로 제시되어 있다.

$$F_{12,max} = \sqrt{F_{12,h}^2 + F_{12,v}^2}$$



■ 그림 4. 지면 높이의 수직/수평 목표물에 대한 원통형 화염 형상계수의 기하학적 구조

Shokri 및 Beyler는 풀 파이어로부터 외부 목표물에 도달하는 복사 열선속에 대한 실험 측정결과를 일치시키는 방법으로 화염의 유효방사도를 구했다. 풀 파이어의 유효 방사도는 유효 풀 직경을 이용해 다음 상관관계로 제시할 수 있다.

$$E = 58(10^{-0.00823D})$$

이 상관관계는 전체 화염에 대한 평균방사도를 의미한다. 풀 직경이 증가함에 따라 화염 외부에 발생하는 검은 연기의 증가로 인해 발광형 화염에서 나오는 복사가 차단되면서 방사도는 감소하게 된다.

#### 예제 3

탱크에서 유출된 톨루엔이 12m 직경의 방유제 구역 내에 풀을 형성한다고 가정한다. 이 때 풀 파이어 중심으로부터 목표물 가장자리까지 거리는 30m라고 가정한다.([그림 5] 참조)

바람이 불지 않을 경우, 지면과 높이가 동일한 목표물까지 전달되는 화염의 복사 열선속을 Shokri 와 Beyler의 간략화 방법과 상세 기법으로 계산하여 본다.

**풀이**

**톨루엔의 특성**

연소열:  $\Delta H_c = 40,550 \text{kJ/kg}$

질량연소율:  $\dot{m}''_{\infty} = 0.1126 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

20°C에서 공기 특성,  $\rho_a = 1.2 \text{kg/m}^3$

(a) Shokri 및 Beyler의 상관관계(방정식 5)로부터 열선속 판정

$$\dot{q}'' = 15.4 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1.59}$$

여기에서,  $L = 30\text{m}$ 이고  $D = 12\text{m}$ , 따라서 목표물까지 전달되는 열선속은

$$\dot{q}'' = 15.4 \left( \frac{30}{12} \right)^{-1.59} = 3.6 \text{ kW/m}^2$$

(b) 목표물의 높이가 지면과 동일하고 바람이 불지 않을 경우, 형상계수 계산 원리와 함께 Shokri 및 Beyler의 상세 기법으로부터 구한 열선속은 (방정식 6),

$$\dot{q}'' = E F_{12}$$

화염의 방사도 E는 방정식 11로부터,

$$E = 58(10^{-0.00823D})$$

$$E = 58(10^{-0.00823 \times 12}) = 46.2 \text{ kW/m}^2$$

방정식 8을 이용하여 수평방향에 대한 형상계수를 구할 수 있다.

$$F_{12,H} = \frac{[B - (1/S)] \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}}}{\pi \sqrt{B^2 - 1}} - \frac{[A - (1/S)] \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}}{\pi \sqrt{A^2 - 1}}$$

방정식 9를 이용하여 수직방향에 대한 형상계수를 구할 수 있다.

$$F_{12,V} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left( \frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(S-1)}{(S+1)}} + \frac{Ah}{\pi \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}$$

여기에서,

$$S = \frac{2L}{D} = \frac{2 \times 30}{12} = 5$$

$$H_f = 0.23 \dot{Q}^{0.5} - 1.02D = 32.11 \text{ m}$$

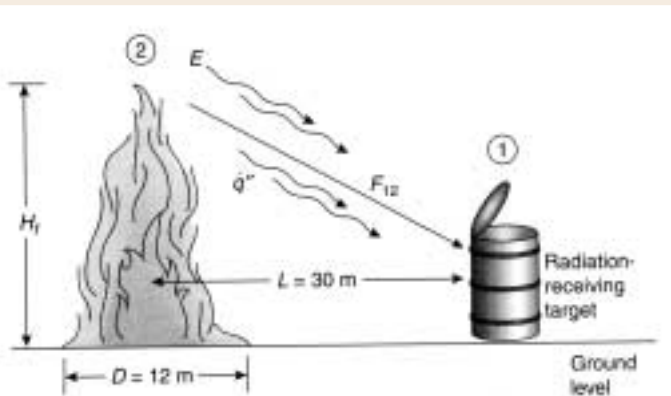
$$h = \frac{2H_f}{D} = \frac{2 \times 32.11}{12} = 5.35$$

$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S} = \frac{5.35^2 + 5^2 + 1}{2 \times 5} = 5.46$$

$F_{12,H}$  및  $F_{12,V}$  값을 구하기 위해 형상계수 방정식에 A, B, S 및 h 값을 대입하면  $F_{12,H}$ 는 0.039이고  $F_{12,V}$ 는 0.088이다.

특정지점에 대한 최대 형상계수는 수평 및 수직 형상계수의 벡터 합으로 주어진다.

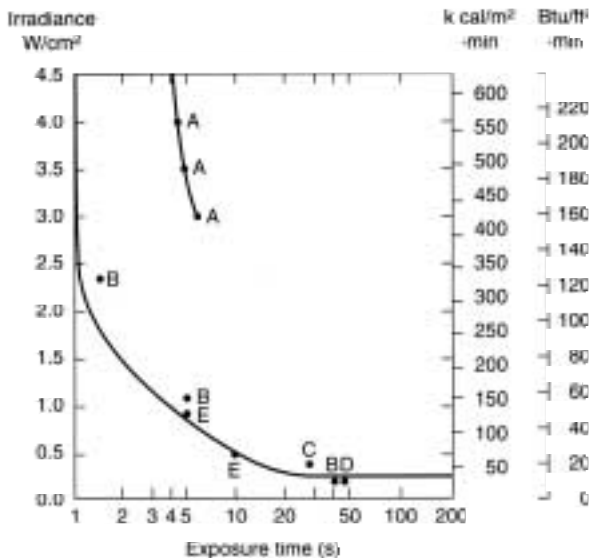
$$F_{12,max} = \sqrt{F_{12,H}^2 + F_{12,V}^2}$$



■ 그림 5. 톨루엔 풀 파이어와 지면 높이 목표물

■ <표 2> 노출이 복사열에 미치는 영향

Reference Source	Heat Flux W/cm <sup>2</sup>	Time to Effect(s)			Letter in Figure 2-6.28
		Erythema (or pain)	Burn	Full Burn	
Perkins et al. <sup>124</sup>	15	1	2.5	4	
	10	2	4	6	
	5	4	7	>15	
	4	4.5	9	>15	A
	3.5	5	9.5	>15	A
Buettner <sup>119</sup>	3	6	10	>15	A
	2.35	1.6			B
	1.05	5			B
Veghte <sup>116</sup>	0.25	40			B
	0.42		Blisters 30		C
Simms and Hinkley <sup>112</sup>		Unbearable pain			
	0.126	600			
Dinman <sup>125</sup>	0.252	30 to 60			D
	0.24	Lower limit for pain after a long period			
Berenson and Robertson <sup>111</sup>	0.82	5			E
	0.46	10			E
Babrauskas <sup>98</sup>	0.34	Limit for blood to carry away heat			
	0.25	Tenability limit			



■ 그림 6. 복사열로 인해 심각한 통증이 느껴지는 데 소요되는 시간 (Berenson 및 Robertson의 자료를 수정한 결과) : A~E의 데이터 좌표에 대한 논의 내용은 [표 2]를 참조

따라서 특정지점에 대한 최대 형상계수는 0.097이 되고 목표물에 전달되는 열선속은,

$$\dot{q}^* = EF_{12,max} = 48 \times 0.097 = 4.5 \text{ kW/m}^2$$

간략 방법으로 계산한 결과는 3.7kW/m<sup>2</sup>이며 상세방법으로 계산한 열선속은 4.5 kW/m<sup>2</sup>으로 차이가 나지만, 폴 파이어 등 대규모 개방형 탄화수소 화재의 화재위험계산에 기본이 되는 열선속을 예측할 수 있는 유용한 방법이다.

#### 4. 복사 열선속의 인체 위험성

위 예제의 결과를 보고 이런 경우의 화재 시에 인체에 얼마나 위험한지를 평가해 볼 수 있다. SFPE 핸드북의 제2부, 제6장에는 복사 열이 인체에 주는 영향에 대해 보여주고 있다.

복사열의 경우에 옷이 내열 허용시간에 큰 영향을 미치지만, 이 경우에도 머리처럼 보호 조치가 취해지지 않은 부분에 대해서는 맨 피부에 대한 데이터가 적용된다. [그림 6]에는 피부 통증까지 소요되는 시간과 복사 선속 간의 관계가 제시되어 있다. 여러 저자들로부터 인용한 A~E의 데이터 좌표(표 2의 세부사항 참조)는 비교를 위해 표시했다. [그림 6]을 참조하면, 3kW/m<sup>2</sup>정도의 복사열에 50초 이하로 노출되어도 심각한 통증을 느끼게 된다. 따라서 예제 3의 경우에 화원으로부터 훨씬 더 멀리 떨어져 저야 위험을 피할 수 있다. [표 2]를 보면 복사열의 인내 한계(Tenability Limit)를 2.5kW/m<sup>2</sup>로 하고 있다. 이러한 데이터를 이용하여 위험물의 안전거리 확보 등에 대한 기본 근거 자료로 활용이 가능할 것이다. ☺