

# 사고 영향 분석을 이용한 성능위주의 내화설계

한동훈<sup>†</sup> · 이종호

현대 엔지니어링(주) 화공플랜트 사업부 안전 설계부  
(2003. 9. 15. 접수 / 2004. 3. 10. 채택)

## Performance Based Design of Passive Fire Protection Using Consequence Analysis

Dong-Hoon Han<sup>†</sup> · Jong-Ho Lee

Safety Engineering Department, Process Plant Division, Hyundai Engineering Co., LTD.  
(Received September 15, 2003 / Accepted May 10, 2004)

**Abstract** : Performance based design is a recent evolutionary step in the process of designing fire protection systems. In essence, it is a logical design process resulting in a solution that achieves a specified performance. Sometimes the prescriptive solutions presented in various codes and standards are too expensive or inflexible. Often the solutions do not fit a particular situation very well. In such cases, performance based design offers a wider variety of possible solutions and enables optimization of a solution for cost and function.

In this study, performance based design was carried out to determine the extent of passive fire protection for oil terminal facilities. The results of performance based design were compared with those of prescriptive code based design. Performance based design is not always more economic than prescriptive code based design but provides more reliable and effective design that is fit for the purpose.

**Key Words** : performance based design(PBD), prescriptive code based design(PCBD), passive fire protection (PFP), consequence analysis, maximum allowable temperature, fire potential equipment, FRED, jet fire, pool fire, potential source of leakage, hazard level, radiation

### 1. 서 론

내화(Passive fire protection)는 화재 발생 초기 단계에서 장치 및 구조물이 손상되어 발생한 2차 사고로 인해 화재가 확산되는 것을 방지하기 위한 수단이다. 이러한 내화설계는 일반적으로 지정된 규정에 근거하여 일정 범위의 지역에 동일한 방호조치를 실시하며 국내에서도 산업안전기준에 관한 규칙 제290조에 근거하여 방폭 지역 내에 설치되는 건축물 등 및 위험물 저장·취급 용기 지지 대에 내화설계를 실시하고 있다.

그러나 최근 플랜트의 대형화와 신기술 및 신공정의 개발에 따라 기존의 경험에 근거한 안전설계 기준의 획일적인 적용이 실제 위험상황발생 시 효

과적이지 않다는 사실이 밝혀졌다. 이에 따라 잠재적 위험요소를 정량 평가하여 위험정도가 크며 가능성이 높은 장치에 선별적으로 방화조치를 강화하는 것이 동일 비용으로 보다 큰 방호효과를 얻을 수 있음이 여러 사례를 통해 보고되고 있다<sup>1)</sup>.

이미 영국을 중심으로 한 구미 선진국 및 영연방 국가들에서는 기존의 규정 중심의 내화설계를 탈피하여 성능위주의 설계를 통한 내화설계가 법제화되고 있는 추세이며 최근 발주되고 있는 사업들도 점차 규정중심이 아닌 성능위주의 내화설계를 요구하는 추세이다<sup>2,4)</sup>.

본 연구에서는 규정 중심의 내화설계와 성능위주의 내화 설계법을 소개하고 원유 인수 기지의 설계의 경우에 대하여 각각의 기법을 적용하였다. 규정 중심의 설계는 Shell사의 Code를 기준으로 설계하였고 성능위주의 내화설계법의 적용 시에는 원유인수 기지의 공정을 Isolatable section으로 구분하여 각

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
handh@hec.co.kr

Section 별로 가능한 Fire scenario를 추정하여 설계하였다. 또한 각 기법을 통해 설계된 내화설계 구역의 크기를 비교함에 의해 성능위주의 내화설계의 유용성을 제시하였다.

## 2. 내화설계법의 종류

### 2.1. 규정중심의 내화설계

규정중심(Prescriptive code based design)의 내화설계 기준은 설계회사별로 각 회사의 설계, 운전 및 사고 경험 등을 바탕으로 하고 있기 때문에 자세한 설계 기준은 서로 다르다. 그러나 규정중심의 내화설계기준은 일반적으로 API 2218<sup>5)</sup>을 기본으로 하고 있기 때문에 설계의 기본 틀은 거의 비슷하다.

규정중심의 내화설계 절차는 다음과 같다.

- Fire potential equipment(FPE)의 선정  
수행 사업의 내화 설계 규정에 따라 가연성(Flammable) 혹은 연소성(Combustible)물질을 어느 기준이상 저장 혹은 처리하는 장치를 FPE로 선정한다.
- 내화설계구역(Fireproofing zone)선정  
내화설계 구역에 관한 규정에 따라 정해진 거리를 기준으로 내화설계 구역의 크기를 결정한다. 내화설계 구역의 크기는 국가 및 회사의 규정에 따라 다르지만 일반적으로 6~12m의 크기를 갖는다.
- 내화대상 선정  
선정된 내화설계 구역 내에서 내화가 필요한 대상을 규정에 의거 선정한다.

### 2.2. 성능위주의 내화설계

성능위주의 분석을 통한 내화설계 및 내화 재료의 적용정도를 결정하기 위해서는 먼저 정량적인 위험도 분석 및 경험을 바탕으로 다음 항목을 결정한다.

- 화재 위험요인 분석  
화재 발생 시 화재를 확산시킬 수 있는 가연성 물질의 양을 추정한다.
- 화재 시나리오 추정 및 영향 분석  
누출 및 화재 발생 시 그 영향을 분석한다.
- 내화설계구역 결정  
사고피해 정도에 근거하여 내화 설계 구역을 결정한다.

- 내화 정도(Fire rating) 결정  
필요성 분석(Need analysis)에 근거하여 특정한 장치에 요구되는 Passive fire protection수준을 결정한다.

### 2.3. Maximum Allowable Temperature

Maximum allowable temperature란 내화 설계대상 이 화재에 노출될 경우 온도 상승에 의해 그 구조적 강도를 잃어 붕괴되는 온도를 의미한다. API 2218<sup>5)</sup>에 따르면 Steel structure의 경우 528℃에서 Steel structure의 강도가 원래 강도의 50%이하로 감소하는 것으로 보고되어 있으며 본 연구에서 적용한 사업의 내화설계 기준도 API 2218에 근거하여 528℃로 규정되어 있으므로 본 연구에서는 Maximum allowable temperature를 528℃로 정하였다. 이 온도는 내화설계 시 내화설계 구역을 결정하는 기준으로 사용할 수 있으며 내화 설계 구역 확정 후 적절한 내화 설계를 위해 필요한 내화 물질의 종류 및 두께 등을 정하는 기준으로 사용한다.

## 3. 내화설계의 적용

### 3.1. 적용 대상

본 연구에서 내화설계의 비교를 위해 적용한 사업은 원유의 저장시설 및 처리 시설들을 개선하고 원유의 안정화 및 안정화 이후 발생한 가스를 압축하는 시설 그리고 안정화된 원유를 운송하는 시설 등을 설계, 건설하는 사업이다.

### 3.2. 규정중심의 내화설계

규정중심의 내화설계<sup>6)</sup>는 당 사업의 기본설계사의 내화설계 기준을 사용하여 설계하였으며 설계 기준 중 중요한 내용은 다음과 같다.

- Fire potential equipment  
5ton이상의 가연성 물질을 취급 저장하는 장치.
- Potential source of leakage  
누출 가능성이 높은 곳으로 아래와 같은 부분이 해당된다.
  - Small bore connections to piping and equipment
  - Vents, drains and instrument tapping
  - Flange connections in piping and at equipment
  - Seals and swivels of rotary equipment
  - Valves

- Expansion bellows
- 내화설계구역(Table 1 참조)  
Pool fire의 경우 내화설계 구역은 3차원의 원통형으로 가정하며 Jet fire의 경우는 구형으로 가정한다.
- 방호시간 및 제한온도(Table 2 참조)

**3.3. 성능위주의 내화설계**

성능위주의 내화설계의 적용을 위해 Fire scenario를 수립하여 Fire & explosion study를 수행하였으며 그 결과에 따라 내화 설계 구역을 추정하였다.

성능위주의 내화설계의 기본단계는 아래와 같이 3단계로 구성된다.

- 화재 위험 요인 분석
  - PFD(Process flow diagram) 및 P&ID(Piping & instrument diagram)를 통한 Isolatable section (사고발생 시 Shut down valve에 의해 누출을 최소화 할 수 있는 구역) 선정 및 저장 용량 추정(Fig. 1).
  - Failure rate data를 근거로 Isolatable section 중 누출 가능성이 높은 장치 선정.
  - Failure rate자료 및 Specification에 근거한 누출 원의 크기 선정(Table 3)<sup>8)</sup>.
  - 누출 시간(API 581)에 근거하여 누출 시간을 30분으로 선정) 선정 및 누출 가능량 산정.
- 화재시나리오 추정 및 화재 영향 분석
  - 화재 종류 별 발열량 및 복사열 계산. (Gas jet fire, Liquid jet fire, Pool fire)
  - Gas jet fire의 경우 누출 지속시간을 고려하기 위해 Blow down계산을 통해 화재 영향 분석.

**Table 1.** The extent of fireproofing zone

	Initiation point	Distance(m)
Horizontal	Potential source of leak	9
Vertical	• Hazard level*	8

\* Hazard level : Any surface, typically at grade or a deck where a pool fire could occur.

**Table 2.** Allowable maximum temperature and fire exposure times

Substrate	Allowable maximum temperature(°C)	Max. exposure time(hrs)
Carbon steel structures, vertical vessel legs or vessel skirts, equipment and pipe supports	538	Min. 0.5

**Table 3.** Hole sizes of leak source

Source of leakage	Hole size(mm)
Small leaks from process equipment and piping, sampling systems, sight glasses	6
Pump seal failure	9

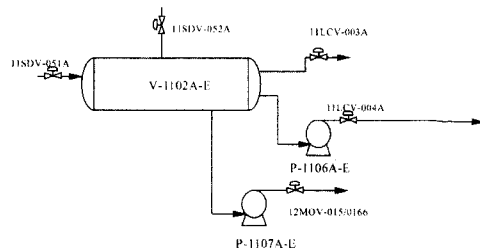
**Table 4.** Radiation criteria of fireproofing

Radiation level	Consequence of exposure	Application
37.5 kW/m <sup>2</sup>	Unprotected steel equipment will quickly (10-15min) exceed the maximum allowable temp.	Fireproofing shall be provided for the process equipment supports and steel structures within radii of 37.5kW/m <sup>2</sup> from potential leak of sources.
12.5 kW/m <sup>2</sup>	It does not exceed the maximum allowable temp.	Fireproofing is not required.

- 내화 설계 구역 추정(Table 4)<sup>8)</sup>
  - Steel structure의 경우 12.5kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 노출되었을 때 표면온도가 300°C 이상 상승하지 않기 때문에 Structure에 내화가 불필요.
  - 37.5kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 노출되었을 경우에는 15분 이내에 Steel표면의 온도가 Maximum allowable temperature를 초과하므로 내화가 필요.

위에서 언급한 세가지 단계를 통해 가정된 Fire scenario에 따른 사고 피해 범위를 예측하였으며 이를 위해 Shell Global Solutions사의 FRED(Fire, Radiation, Explosion and Dispersion) Ver.3.2가 사용되었다. FRED에 사용된 모델은 Shell사의 자체 모델과 외부 모델로 구성되어 있으며 그 중 일부는 아래와 같다<sup>9)</sup>.

- Pool Fire: Shell Pool and tank fire model
- Jet Fire: Shell Generalized jet fire model
- Dispersion: HEGADAS, AEROPlume, PGPlume
- Explosion: Shell CAM2 (Congestion assessment method)



**Fig. 1.** Example of isolatable section(Isolatable section 1)

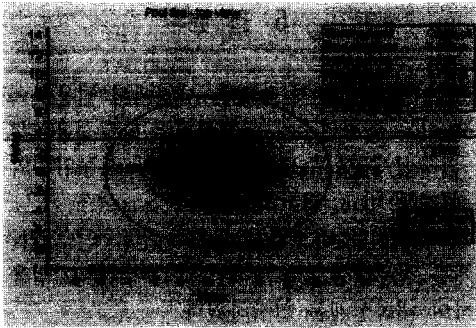


Fig. 2. Example of radiation study(Top view of L11-1-1)

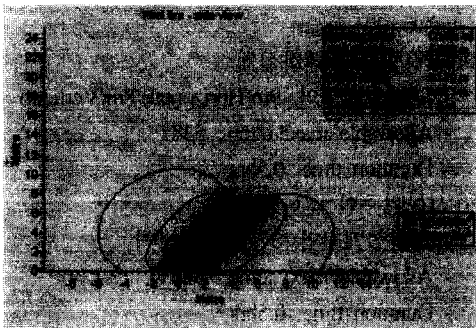


Fig. 3. Example of radiation study(Side view of L11-1-1)

그 결과 그림의 예가 Fig. 2와 3에 나타나 있다. 이 계산을 통해  $37.5\text{kW/m}^2$ 의 내화설계 구역이 결정되었고 이 반경 내에 설치된 Steel structure, Equipment support, Pipe rack support등에 내화구조를 적용하도록 설계하였다(Fig. 4).

#### 4. 규정중심의 내화설계와 성능위주의 내화설계의 비교

성능위주의 설계와 규정중심의 설계를 비교하기 위하여 대상 사업에 두 가지 방법의 내화설계를 수행한 후 비교하였다.

Table 5와 6에서 보듯이 서로 다른 Leak scenario에 대하여 동일한 내화설계를 적용하는 규정중심의 내화설계에 비해 성능위주의 내화설계는 각 Leak scenario에 대해 그 결과를 분석함으로써 보다 타당한 내화설계를 수행할 수 있음을 알 수 있다.

즉 성능위주의 설계방식 적용 시 Pool fire발생에 대비한 내화설계는 규정중심의 설계보다 내화설계 구역이 일반적으로 작지만 Table 6에서 보는 것처럼 규정중심의 설계에서 비용 효과성 문제로 적용되지

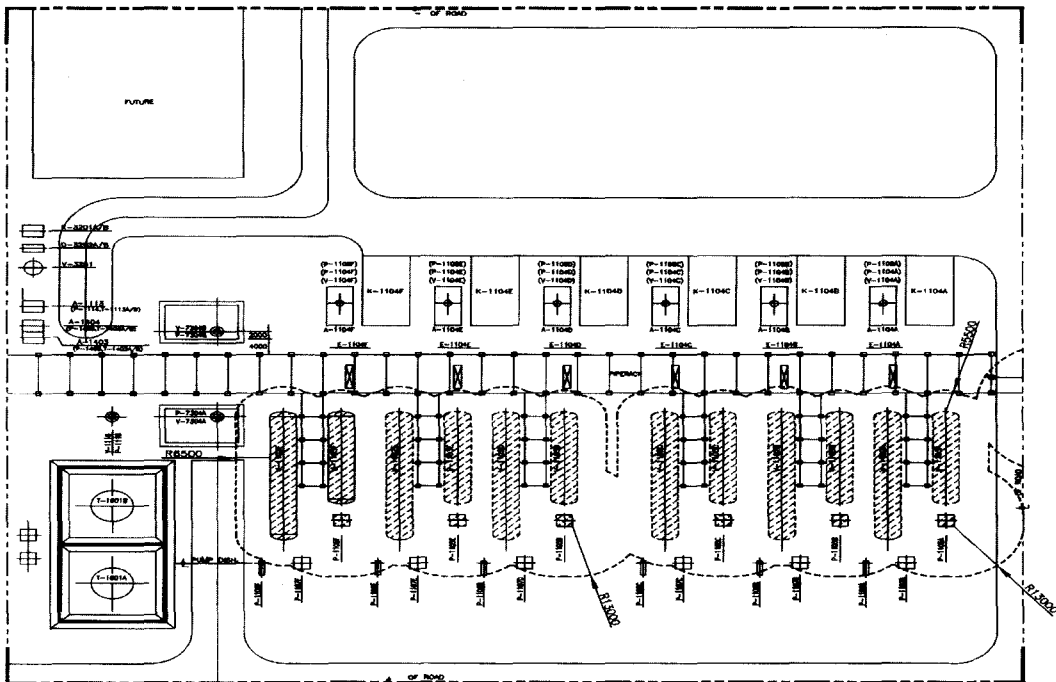


Fig. 4. Fire proofing zone based on performance based design (Unit is mm and the fireproofing is to be required for the interior surrounded by dotted line.)

**Table 5.** Comparison of fireproofing between PCBD and PBD

ISOL. SECT.	Leak scenario	Fire Type	PCBD (m)*	Comparison	PBD** (m)
1	L11-1-1	Pool fire	9	>	6.5
2	G11-2-1	Liquid jet fire	9	<	13.0
2	L11-2-1A	Pool fire	9	>	5.5
6	G11-6-1	Liquid jet fire	9	>	6.5
6	L11-6-1	Pool fire	9	>	6.5

\* PCBD : Prescriptive code based design  
 \*\* PBD : Performance based design

**Table 6.** Comparison of fireproofing between PCBD and PBD

ISOL. SECT.	Leak scenario	Fire Type	PCBD (m)*	Comparison	PBD** (m)
7	L13-1-1	Pool fire	9	>	6.0
9	G13-3-1	Gas jet fire	0	<	4.0
9	G13-3-2	Gas jet fire	0	<	2.5
9	L13-3-1	Pool fire	9	>	6.0
10	L13-4-1	Pool fire	9	>	6.5
10-1	G13-5-1	Gas jet fire	0	<	6.5
10-1	G13-5-3	Gas jet fire	0	<	4.5
10-1	G13-5-4	Gas jet fire	0	<	4.5
10-1	L13-5-1	Pool fire	9	>	7.0
2	G13-6-1	Liquid jet fire	9	<	15.5

\* PCBD : Prescriptive code based design  
 \*\* PBD : Performance based design

않는 고압에 기인한 Gas jet fire에 대하여 적절한 범위의 내화설계의 적용을 권고하고 있다.

특히 Liquid jet fire가 발생할 수 있는 경우에는 규정중심의 설계 시 Pool fire의 가능성만 감안할 경우보다 내화 설계 기준이 훨씬 강화됨을 알 수 있다.

즉 위험성이 높은 것으로 검토된 지역에는 계산 결과에 따라 규정에 기술된 값 이상의 내화설계를 할 수도 있으며 반대로 규정에 기술된 값보다 더 적은 내화설계를 할 수도 있다

따라서 성능위주의 설계가 항상 비용 효과적인 것은 아니지만 정량적 위험분석을 바탕으로 대상 공정의 특성에 맞는 적절한 방호조치를 적용하기 때문에 동일 비용으로 보다 효과적으로 위험에 대처할 수 있으며 규정 중심의 설계 시 위험도와 상관 없이 정해진 비효율적인 설계를 보다 효율적으로 설계할 수 있도록 해준다.

## 5. 결론

본 연구에서는 최근 많은 사업에서 적용이 확대되고 있는 성능위주의 내화설계의 타당성을 검토하기 위하여 규정 중심의 내화설계와 성능위주의 내화 설계를 비교, 검토하였다.

두 설계법을 비교하기 위하여 원유 인수 기지의 설계를 적용대상으로 정하였으며 각각의 기법을 적용하여 내화설계를 실시하였다.

성능위주의 내화설계와 규정중심의 내화설계 적용기준은 아래와 같다.

- 규정중심의 내화설계
  - 내화설계구역: 9m(Horizontal)/8m(Vertical)
  - Allowable max. temp.: 538℃
  - Duration time: 0.5hrs
- 성능위주의 내화설계
  - 내화설계구역: 37.5kW/m<sup>2</sup>구역
  - Allowable max. temp.: 538℃
  - Duration time: 0.5hrs

각각의 기준을 적용한 결과를 아래에 비교하여 정리하였다.

- 성능위주의 설계방식 적용 시 Pool fire발생에 대비한 내화설계는 규정중심의 설계보다 내화 설계구역이 작다. 따라서 규정중심의 설계보다 비용 효과적이며 안전한 설계가 가능하다.
- 규정중심의 내화설계에서 비용 효과성 문제로 고려하지 않는 Gas jet fire에 대하여 Blow down Study와 Radiation Study에 기초하여 성능 위주의 내화설계를 실시하여 보다 안전하고 비용 효과적인 설계를 실시하였다.
- 성능위주의 내화설계 시 발생가능성이 있는 Liquid jet fire를 정량적 분석을 통하여 판단하여 내화설계 기준을 강화시킴으로 공장의 안전성을 증대시켰다.

## 참고문헌

- 1) A.H. Buchanan, "Fire Engineering Design Guide", CAE(Center for Advanced Engineering), pp. 7~8, 2001.

- 2) ABCB, "Building Code of Australia", Australian Building Codes Board, 1999.
- 3) SBBHP, "Building Regulations", Swedish Board of Building, Housing and Planning, 1994.
- 4) HMSO, "The Building Regulations", HMSO(UK), 1985.
- 5) API, "Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants: API Publ 2218", American Petroleum Institute, pp. 1~17, 1999.
- 6) SGSI, "Assessment of the Fire Safety of Onshore Installations: DEP 80.47.10.30-Gen", Shell Global Solutions International B.V., pp. 20~23, 2000.
- 7) API, "Risk-Based Inspection Base Resource Document: API 581", American Petroleum Institute, pp. 7-8~7-9, 2000.
- 8) SGSI, "Assessment of the Fire Safety of Onshore Installations: DEP 80.47.10.30-Gen", Shell Global Solutions International B.V., pp. 12~13, 2000.
- 9) SGSI, "Shell FRED Operational Guidance", Shell Global Solutions International B.V., 2001.