



화재규모에 따른 화학공장의 내화구조 적용에 대한 연구

이동혁 · †유병태*

한국바스프, *화학물질안전원

(2018년 8월 29일 접수, 2018년 9월 17일 수정, 2018년 9월 18일 채택)

A Study on Fireproofing Application by Fire Magnitude

Dong Hyeok Lee · †Byung Tae Yoo*

BASF, Yeosu 373-15, Korea

*National Institute of Chemical Safety

(Received August 29, 2018; Revised September 17, 2018; Accepted September 18, 2018)

요약

최근 국내 대형화재 발생으로 화재예방 및 소방에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다. 화재에 대한 피해를 최소화하기 위해서는 감지설비, 경보설비, 소화설비, 피난설비 및 유지관리 등 모든 요소가 중요하지만 화학공장과 같이 철골구조에 가연성 물질을 집중적으로 취급하는 시설에서는 화재 시 그 구조를 유지할 수 있도록 주요구조부에 적용하는 내화구조의 중요성이 특히 대두된다. 현재 건축법, 산업안전보건법 등 국내법에서는 산업시설에 대하여 일괄적으로 지상으로부터 6m까지 내화구조를 적용하도록 규정하고 있다. 하지만 화학공장은 경우에 따라 가연성 물질을 대량으로 취급할 수도 비가연성 물질만을 취급할 수도 있다. 이 연구에서는 화학공장에서 발생할 수 있는 화재 규모에 따라 필요한 내화구조 적용이 필요한 높이에 대하여 연구하였다.

Abstract - Interest in fire prevention/fighting has been increased by large fire. It is important to install/manage the detector, alarm, firefighting facility, evacuation route and so on to minimize the damage from fire. Chemical plant is generally constructed by steel structure. So fireproofing is significantly required to chemical plant because steel structure should endure during fire. Currently, fireproofing should be applied up to 6m from ground by local regulation. But chemical plant can handle the large amount of flammable materials or only non-flammable materials. Required of fireproofing height by fire magnitude is studied in this thesis.

Key words : Fireproofing, Thermal Radiation

I. 서론

화재가 발생하면 화염으로부터 복사열이 발생하여 주변 시설물의 온도를 증가시킨다. 만약 기둥, 위험물 취급 용기의 지지대가 이 복사열에 의해 구조가 변형되어 하중을 버티지 못하고 붕괴된다면 초기화재로 인해 2차사고가 발생할 수 있다. 이러한 2차사고를 방지하기 위하여 건축물의 주요구조부(기둥, 보, 지붕 등)나 가연성 물질 취급용기의 지지대에 내화구조를 적용한다. 이 내화구조는 소

규모 화재의 경우 내화성능을 유지할 수 있지만 대형화재의 경우 복사열이 법 상 의무적으로 적용해야 하는 내화범위를 초과할 수 있어 여전히 2차 사고를 유발할 수 있다. 따라서 화재의 규모에 따른 내화구조 적용에 대한 기준이 필요하다.

II. 내화구조

내화구조는 건축물의 기둥 및 보, 위험물 저장취급용기의 지지대 및 배관 전선관 등의 지지대가 화재 시 일정시간 동안 강도와 그 성능을 유지할 수 있는 구조이다. 여기서 내화성능은 화재 시 구조의 평균온도가 538℃를 넘지 않고 특정 지점의 온도가

†Corresponding author: flyduck@korea.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

Table 1. Fire proofing time for each structure

용도	구성부재		벽						보, 기둥	바닥	지붕틀
			외벽			내벽					
			내력벽	비내력벽		내력벽	비내력벽				
연소우려가 있는 부분	연소우려가 없는 부분	간막이벽		구획벽							
용도구분	용도규모 (층수/최고높이)										
일반 시설	업무시설, 판매 및 영업시설, 공공용시설 중 군사시설·방송국·발전소·전신전화국찰영소 기타 유사한 것, 통신용시설, 관광휴게시설, 운동시설, 문화 및 집회시설, 제 1층 및 2층 근린생활시설, 위락시설, 묘지관련 시설 중 화장장, 교육연구 및 복지시설, 자동차관련시설(공장제외)	초과	3	1	0.5	3	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1.5	1.5	2	2	0.5
		4/20 이하	1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
주거 시설	단독주택 중 다중주택, 다가구주택, 공공, 공동주택, 숙박시설, 의료시설	초과	2	1	0.5	2	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
		4/20 이하	1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
산업 시설	공장, 창고시설, 분뇨 및 쓰레기 처리시설, 자동차관련 시설 중 정비공장, 위험물 저장 및 처리시설	초과	2	1.5	0.5	2	1.5	1.5	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
		4/20 이하	1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5

649℃를 넘지 않는 조건을 말한다. 이러한 내화구조는 내화재료(내화 콘크리트, 내화 뿔철재, 내화 페인트 등)를 통해 아래와 같은 방법으로 적용할 수 있다[1].

- 강재를 콘크리트, 철망모르타르, 콘크리트블록, 벽돌 또는 석재로 덮어 내화성능을 확보하는 방법
- 뿔철재나 페인트, 석고보드 등을 강재 표면에 피복하여 내화성능을 확보하는 방법

III. 국내법 상 내화구조 적용 기준

산업안전보건 기준에 관한 규칙에서는 아래에 해당하는 부분을 내화구조로 적용하도록 규정하고 있다[2].

- 건축물의 기둥 및 보: 지상 1층까지, 지상 1층의 높이가 6미터를 초과하는 경우에는 6미터까지 단, 다층구조의 건물로 위험물이 바닥에 고일 수 있는 구조면 상층부의 바닥까지 내화구조를 적용한다. 석유화학공장 등 위험물의 보유량이 많거나 공정압력이 높은 경우에는 9m까지 내화구조 적용하는 것을 고려한다.

- 가연성 물질 저장·취급용기의 지지대: 지상으로 부터 지지대의 끝부분까지 내화구조를 적용한다. 단, 높이가 30센티미터 이하인 것은 제외한다. 탑조류와 수직용기를 지지하는 스커트에 개구부가 없는 경우에는 외부표면을 내화 구조로 적용하며 밀폐되지 않은 직경 600mm 이상의 개구부가 있는 경우는 내외면을 모두 적용한다.
- 배관·전선관 등의 지지대: 지상으로부터 1단, 1단의 높이가 6미터를 초과하는 경우에는 6미터까지를 내화구조로 적용한다. 단 파이프 랙 하부에 이송펌프가 설치된 경우에는 9m 범위 내에서 최 상단까지 내화구조를 적용한다.

내화구조는 건축물의 용도구분에 따라 화재시 그 성능(내화시간)이 유지되어야 한다. 건축물의 용도구분에 따른 내화시간은 Table 1 과 같다[3].

IV. 화재규모와 내화구조

화재가 발생하면 복사열이 주변으로 전파되며 복사열을 받은 강재는 온도가 빠르게 상승하여 그 성능을 상실하고 파괴된다. 아래 Fig.1.와 같이 화재가 발생하면 ASTM A515, Grade 79 강재의 경우 두께 1inch를 기준으로 온도가 12분만에 593℃ (1100°F), 17분만에 704℃(1300°F)까지 상승하는 것을

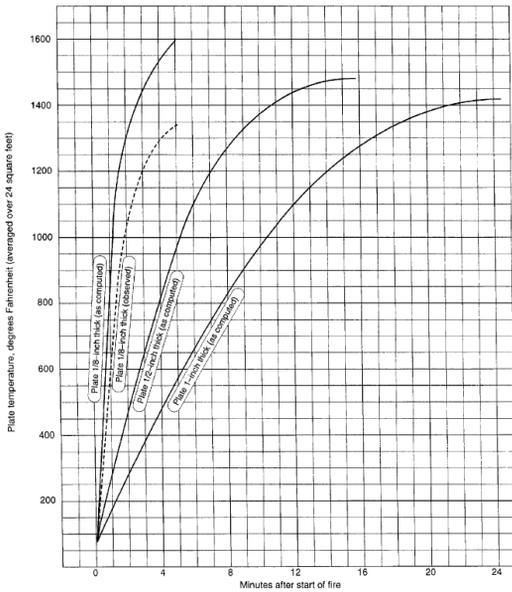


Fig. 1. Average rate of heating steel plates exposed to open gasoline fire on one side.

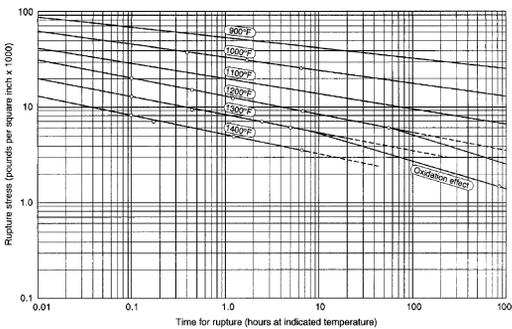


Fig. 2. Effect of Overheating Steel (ASTM A 515, Grade 79).

확인할 수 있다. 또한 Fig.2에서와 같이 593℃(1100°F)에서 7시간, 704℃(1300°F)에서 2분 30초만에 성능을 잃고 파괴되는 것을 확인할 수 있다[4].

이것은 화재 발생 시 내화구조가 적용되지 않은 강재는 30분 이내로 파괴될 수 있음을 말한다. 또한 내화구조가 적용되었다 하더라도 화재는 그 규모에 따라 발산하는 복사열의 강도에 차이가 있다. 아래 Fig. 3와 같이 gasoline pool fire의 경우 pool의 직경 증가함에 따라 복사열의 크기 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다[5].

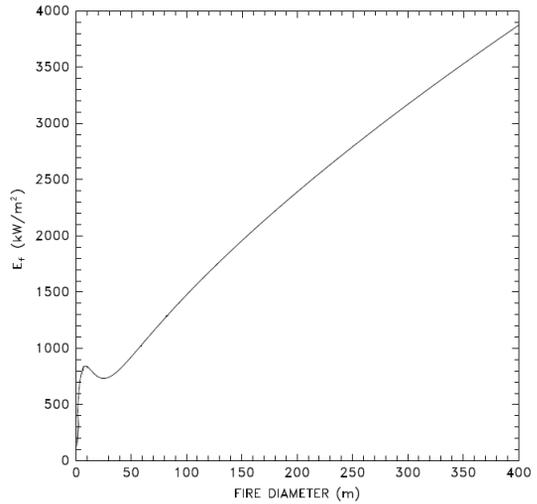


Fig. 3. Thermal radiation as fire diameter for a gasoline pool fire(Mudan & Croce).

V. 화재로 인한 건축물의 붕괴 사고사례

내화구조는 화재 발생 시 화재를 진압하는 시간 동안 주요구조부의 성능을 유지하여 건축물의 붕괴를 막아 2차 피해를 예방하기 위한 안전장치이다. 이러한 내화구조를 제대로 적용하지 않으면 화재로 인해 아래와 같은 대형사고를 일으킬 수 있다.

- 브라질 상파울루 고층아파트 붕괴 사고
일시 : 2018.05.01
개요 : 브라질 상파울루에서 26층 아파트에 화재가 발생하여 90여분만에 건물이 붕괴
피해 : 50여명의 사상자 발생
원인 : 불법 거주 및 부실한 내화 시공
- 테헤란 17층 상가 화재 사고
일시 : 2017.01.19
개요 : 이란 테헤란 시 17층 의류 상가 건물에 화재가 발생하여 약 100여분만에 건물이 붕괴
피해 : 50여명의 사상자 및 발생 구조작업 중 소방관 30여명 사망
원인 : 전기합선 및 부실한 내화 시공
- 대구 서문시장 화재 사고
일시 : 2016.11.30
개요 : 대구 서문시장 1지구에 화재가 발생하여 4지구(의류상가)로 화재가 전파, 진화 도중

4지구와 다른 건물을 연결하는 통로가 붕괴

피해 : 점포 839개가 모두 전소, 1000억원의 재산피해 발생

원인 : 전기합선 및 내화에 의한 방화구획미비

- 우암상가아파트 화재

일시 : 1993.01.07

개요 : 우암상가아파트에 LPG 가스 화재사고가 발생하여 50여개의 점포와 2층~4층 아파트 건물 전체가 붕괴

피해 : 28명 사망 및 350명의 이재민 발생

원인 : 무리한 설계 및 부실시공

VI. 화학공장의 화재 유형

화학공장에서는 공정의 특성에 따라 압력, 온도와 같은 운전조건과 취급하는 유체가 다양하다. 따라서 누출사고 발생 시 고압의 가스가 분출될 수도 있으며 액체가 누출되어 pool을 형성할 수도 있다. 이로 인해 발생할 수 있는 화재 유형은 분출되는 고압가스가 점화되어 발생하는 jet fire, 액체의 누출로 형성된 pool의 액면이 점화되어 발생하는 pool fire, 가연물이 일시에 점화되어 발생하는 fire ball이 있다. 이 연구에서는 화재규모에 따른 내화구조의 적용범위를 산정하기 위하여 fire ball을 제외한 jet fire와 pool fire를 대상으로 사례연구를 수행하였으며 복사열 산정을 위하여 아래의 수식을 사용하였다[6,7].

- 누출량(기상)

$$Q = C_d A P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R T_1} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$$

- 누출량(액상)

$$Q = C_d A \rho_l \left[\sqrt{\frac{2 g_c (P_1 - P_a) M}{\rho_l} + 2 g h} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- pool fire(복사열)

$$E_r = \tau_a \eta m_b \Delta H_c F_f, \quad F_p = \frac{1}{4 \pi x^2},$$

$$\tau_a = 2.02 (P_w X_s)^{-0.09}$$

- pool fire(액면의 크기)

$$D_{\max} = 2 \sqrt{\frac{V_l}{\pi y}}, \quad y = 1.27 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*}$$

- pool fire(화염의 높이)

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{m_b}{\rho_a \sqrt{g D}} \right)^{0.61}$$

- jet fire(복사열)

$$E_r = \frac{2.2 \tau_a R H_c M^{2/3}}{4 \pi X^2}$$

- jet fire(분출 마하수)

$$M_a = 0.1161 \times \frac{W}{P_s \times d^2} \sqrt{\frac{T_s}{r M_s}}$$

- jet fire(화염의 중점, 추력변수)

$$C_{LP} = C_L \left[\frac{v}{u} \right] \left[\frac{M}{28.8} \right]$$

$$d_j R = d \left(\frac{v}{u} \right) \left[\frac{T_a M}{T_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

VII. 사례연구

화재규모에 따른 내화구조 적용범위를 산정하기 위하여 다음과 같은 화학공장을 가정하여 화재유형에 따른 복사열을 산정하였다.

<가연성 물질 취급 화학공장>

- 취급물질 : Benzene(1층), Propane(2층)

- 규모 : 20m X 10m X 12m

<Case 1> 공장 1층 바닥에 pool fire 발생

- 취급물질 : Benzene

- 누출공 : 2" 배관에 0.5" hole 발생

- 운전온도 : 30도

- 운전압력 : 0.03MPa

<Case 2> 공장 2층 배관에 jet fire 발생

- 취급물질 : Propane

- 누출공 : 2" 배관에 0.5" hole 발생

- 운전온도 : 30도

- 운전압력 : 3MPa

VIII. 복사열의 범위

<Case 1> Benzene pool fire

- 누출속도 : 0.56kg/s
- 액면의 크기 : 2.78m²(early pool fire), 100m²(late pool fire)

- 복사열의 범위(37.5kW/m²기준) : 3m(early pool fire), 116m(late pool fire)

<Case 2> Propane jet fire

- 누출속도 : 0.596kg/s
- 화염의 중점 : 3m
- 복사열의 범위 : 5.1m(37.5kW/m² 기준)

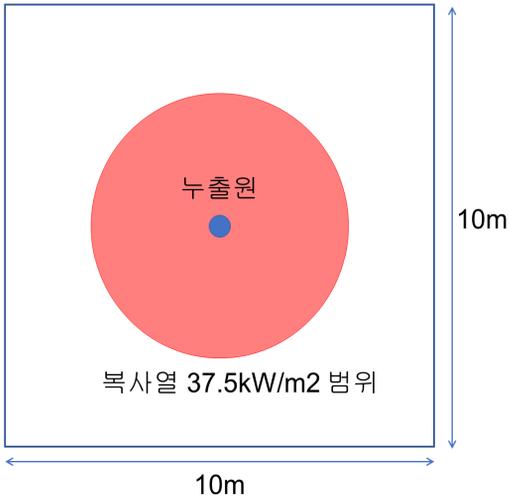


Fig. 4. Thermal radiation radius by <case 1>early pool fire top view.



Fig. 6. Thermal radiation radius by <case 1>late pool fire top view.

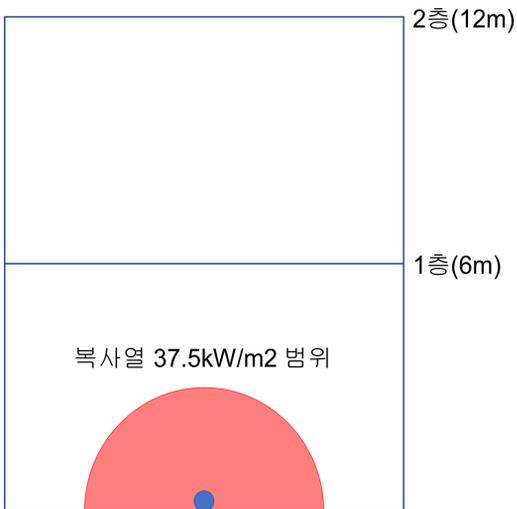


Fig. 5. Thermal radiation radius by <case 1>early pool fire side view.

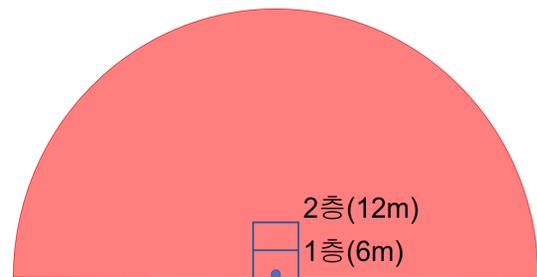


Fig. 7. Thermal radiation radius by <case 1>late pool fire side view.

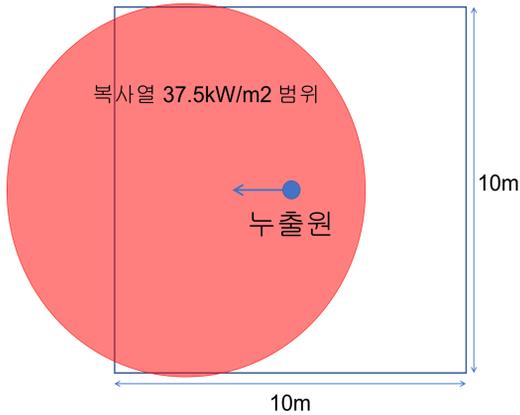


Fig. 8. Thermal radiation radius by <case 2> jet fire top view.



Fig. 9. Thermal radiation radius by <case 2> jet fire side view.

IX. 결 과

화재규모에 따른 내화구조 적용범위를 산정하고자 화재 유형별 복사열을 산정하였다. 각 화재의 유형은 건축물 1층 바닥면에서 발생한 pool fire와 2층에서 발생한 jet fire이다. 영향범위는 구조물에 피해를 줄 수 있는 복사열 $37.5\text{kW}/\text{m}^2$ 를 기준으로 거리를 산정하였다[8].

Case 1의 pool fire 중 early pool fire는 benzene의 누출과 동시에 점화가 발생하는 것을 가정하기 때문에 액면의 크기는 누출량, 연소속도에 따라 산정된다. 이 경우 액면의 크기는 2.78m^2 이며 복사열의 범위는 3m로 산정되어 현재의 국내법 상 내화구조 적용범위인 6m내에서 발생했다. 하지만

late pool fire는 누출된 benzene이 액면을 형성한 후에 점화가 발생하는 것을 가정하기 때문에 액면의 크기는 dike 등 물리적인 요소에 따라 산정된다. 이 경우 액면의 크기는 공장의 바닥면적과 동일한 100m^2 이며 복사열의 범위는 116m로 산정되어 내화범위를 초과하여 화재가 발생한다. 화학공장은 대부분 trench 등 공정의 배출구를 close한 상태로 운전함으로 실질적으로 early pool fire 보다 late pool fire가 발생하기 쉽다. 따라서 pool fire 발생시 대부분의 경우 복사열은 법적으로 건축물에 적용해야 하는 내화범위를 초과할 수 있음을 알 수 있다.

Case 2의 jet fire는 누출속도에 따라 화염의 크기가 결정된다. 0.5" hole이 발생한 경우 복사열의 범위는 5.1m로 산정되어 공장밖까지 화염이 도달하는 것을 확인하였다. 이는 누출 방향에 따라 복사열이 기둥, 보 등 주요구조부에 미친다는 것을 의미한다. 또한 만약 case 2보다 작은 규모의 jet fire라 하더라도 발생 위치에 따라 복사열이 주요구조부에 도달할 수 있다.

X. 결 론

화재의 규모에 따른 내화구조 적용범위를 산정하기 위하여 사례연구를 수행하여 화재 유형별 화염의 크기를 산정하였다. 화학공장은 대부분 실외 철골구조로 되어있기 때문에 현재 국내법 상 내화구조를 바닥으로부터 6m까지 적용한다. 하지만 사례연구에서 확인한 것처럼 pool fire로 인해 화염이 6m 이상 도달할 수 있으며 jet fire로 인한 화염도 누출크기에 따라 건축물의 각 주요구조부 특히 기둥까지 도달 할 수 있음을 확인하였다.

법은 모두가 지킬 수 있도록 명확하고 실현가능해야 한다. 현재의 내화구조의 적용범위 역시 일반시설, 주거시설, 산업시설 등 모든 건축물에 적용할 수 있도록 명확하게 규정되어 있다. 하지만 화학공장과 같이 위험물을 대량으로 취급하는 시설은 대형화재가 발생할 수 있으며 내화구조가 충분히 적용되지 않아 시설물이 붕괴된다면 화재로 인해 2차 사고가 발생할 수 있다.

화학공장은 설립 초기에 PSM, SMS, 장외영향평가 등으로 위험성을 평가하여 필요한 안전장치를 검토하고 최종적으로 안전성을 검증 받는다. 이는 각 공정의 특성이나 위험성에 따라 수행되며 획일적으로 적용하지 않는다. 내화구조의 적용범위 또한 일반시설, 주거시설을 위한 특정 기준과 화학공장과 같은 특정 산업시설을 위한 위험성 기반의 적

용범위를 산정한다면 화재 발생 시에 2차 사고가 발생하는 것을 예방하는데 도움이 될 것이다.

사용기호

- C_0 : discharge coefficient
- A : hole area
- P_0 : initial pressure
- g_c : gravity acceleration
- M : molecular weight
- R_g : ideal gas constant
- T_0 : initial temperature
- γ : heat capacity ratio
- P : pressure
- d : diameter
- F_p : geometrical view factor
- T_j : ambient temperature
- τ_a : atmospheric transmissivity
- P_w : water partial pressure
- RH : relative humidity
- T_a : ambient temperature
- E_r : heat radiation
- $D_{m\ ax}$: pool diameter
- h : pool fire height
- H_c : entergy of combustion of fuel
- η : fraction of energy converted to radia-

tion
 mb : mass flow rate of fuel

REFERENCES

- [1] "KOSHA guide D-45-2012 내화구조에 관한 기술지침", KOSHA, (2012)
- [2] "산업안전보건기준에 관한 규칙", 고용노동부, (2018)
- [3] "건축물의 피난, 방화구조 등의 기준에 관한 규칙", 국토교통부, (2017)
- [4] "Guide for Pressure Relieving and De pressuring Systems (API RP 521)", API, 6th, (2014)
- [5] Kevin B. McGrattan Howard R. "Thermal Radiation from Large Pool Fires (NISTIR 6546)", NIST, (2000)
- [6] "Guidelines for chemical process quantitative risk analysis", Center for Chemical Process Safety, 2th, AIChE/CCPS, (2000)
- [7] Y.D. Jo, B.J. Ahn, "Analysis of hazard areas associated with high - pressurenatural - gas-pipelines", JournalofLossPrevention in the Process Industries, 15(3), 179-188
- [8] "KOSHA guide P-102-2013 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침", KOSHA, (2013)