



## 깊이 인자를 고려한 매설배관의 사고피해영향 비교 분석에 관한 연구

한승훈 · 설지우 · 류병태 · 태찬호 · †고재욱

광운대학교 화학공학과

(2016년 1월 20일 접수, 2016년 9월 5일 수정, 2016년 9월 9일 채택)

### A Study for Comparison of Consequence Analysis for Buried Pipeline Considering the Depth Factor

Seung-Hoon Han · Ji-Woo Seol · Byong-Tae Yoo · Chan-Ho Tae · †Jae Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwang-Woon University, 20, Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

(Received January 20, 2016; Revised September 5, 2016; Accepted September 9, 2016)

#### 요약

매설배관은 내부 또는 외부의 결함으로 인하여 leak나 rupture가 발생할 수 있으며, 가스가 누출 시 큰 사고가 발생할 수 있기 때문에 정량적 위험성평가를 통한 분석이 필요하다. 하지만 현재 매설배관에 대한 위험성 평가 시 매설을 고려하지 않거나, 매설 깊이를 고려하지 않고 무조건 배관압력의 1/10으로 가정하는 OGP기준을 사용하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 여러 기관의 매설배관 ETA분석자료를 통하여 발생가능 사고 중 Jet fire의 사고피해영향을 분석하였으며, Jet fire의 복사열 계산에 있어서 배관의 매설깊이 인자를 고려한 매설모델을 수립하였다. 사례연구는 New Jersey의 Edison지역에서 발생한 사고를 이용하여 본 모델과 OGP모델을 비교 분석하였다. 연구결과 화염원으로부터 10m거리를 기준으로 매설모델의 복사열 값이 OGP모델에 비해 실제 사례와 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

**Abstract** - Buried pipe system is subject to leak or rupture due to internal and external defects with age. Especially, if the pipeline is designed for pressurized gas, the leak can wreak a devastating on its surrounding area. The current method of setting up underground gas pipeline is based on OGP criteria of applying one tenth of the inner pipe pressure. The criteria is applied irrespective of their burial depth or pipe's properties. At times, even the whole safety measures are totally ignored. Considering the magnitude of possible damage from a gas leakage, a precise analytical tool for the risk assessment is urgently needed. The study was conducted to assess possible scenarios of gas accidents and to develop a computer model to minimize the damage. The data from ETA was analyzed intensively, and the model was developed. The model is capable of predicting jet fire influence area with comprehensive input parameters, such as burial depth. The model was calibrated and verified by the historic accident data from Edison Township, New Jersey, the United States. The statistical model was also developed to compare the results of the model in this study and the existing OGP model. They were in good agreement with respect to damage predictions, such as radiation heat coming from 10 meters away from the heat source of gas flame.

**Key words** : buried pipeline, consequence analysis, jet fire, event tree analysis, PHAST, Radiation, natural gas, rupture

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

우리나라는 현재 세계 2위의 천연가스 수입국으로서 에너지경제연구원에 따르면 2009년 33,568 천TOE를 수입하였으며 지속적인 수요의 증가추세로 2013년에는 52,524 천TOE를 수입하였다. 이에 따라 대규모로 천연가스를 사용하는 집단에너지 발전소, 아파트 단지 및 생활 주택 등에 가스를 사용하는 곳에 매설배관 설치가 증가하였다[1].

매설배관의 경우 부식 또는 외부충격에 의해 발생하는 가스 누출로 인한 폭발 사고 발생 시 재산 및 인명 피해가 큰 특징을 지니고 있다. 현재 매설배관의 위험성평가에는 배관의 단위 길이 당 위험도가 동일한 것으로 가정하고 평가를 수행하고 있으며, 가스배관의 매설깊이, 배관 압력 등의 차이를 고려하지 않고 있다.

현재 OGP(The International Association of Oil & Gas Producers)에서 제안하는 매설배관에 대한 위험성평가는 배관압력의 1/10인 지상배관으로 가정하여 계산하는 방법이 존재하나, 매설깊이, 화염의 높이 등을 고려하지 않아 오차가 크며, 결과 값에 대한 신뢰성이 부족한 실정이다[5].

또한, 그 외의 정량적 위험성평가 방법으로는 배관의 매설을 고려하고 있지 않아, 정확한 사고피해 영향을 파악하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 매설깊이를 고려한 매설모델을 수립하여 Jet fire의 복사열을 계산하였으며, 사례연구를 통한 OGP모델과

의 jet fire의 복사열을 비교 및 분석하였다.

## II. 사고피해영향

사고피해영향을 분석하기 위해서는 정성적인 위험성평가를 통하여 잠재적인 위험요소를 찾아내는 것이 우선이다. 분석된 위험요소에 대하여 누출, 확산, 화재 및 폭발에 대한 피해범위, 영향, 폭발과압을 확인하여 해당 위험요소가 지닌 위험성을 정량적으로 판단할 수 있다.

잠재위험을 파악하는 초기단계의 정성적 위험성평가 방법으로는 HAZOP(HAZard & OPerability), Checklist, ETA(Event Tree Analysis), FTA(Fault Tree Analysis) 등이 존재하며, 본 연구에서는 ETA를 이용하여 잠재위험을 파악하였다.

### 2.1. 매설가스배관의 사고유형

정량적 위험성평가를 수행하기 위해서는 대상의 잠재위험을 확인하여 발생 가능한 사고유형을 분석해야 한다. 매설가스배관의 경우, 지중에 위치하여 지하수 또는 토양 내 습기로 인한 부식 및 외부충격으로 인한 배관 파열이 발생할 수 있으며, 누출로 인한 화재나 폭발을 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 여러 기관에서 제안하는 ETA(Event Tree Analysis)기법을 이용하여 분석하였다.

IGEM(Institution of Gas Engineers and Managers)은 가스산업의 안전성 향상 및 품질개선을 위해 설립된 단체이다. IGEM에서는 TD2라는 지침을 통해 매설가스배관에서의 안전기준을 발행하였으며 ETA기법을 통하여 발생할 수 있는 사고에 대하여 제시하고 있다. leak/rupture, ignition, immediate ignition의 세 단계로 구분하여 최종사고유형을 분석하였다. 최종적인 화염 형상으로는 fireball, crater fire, jet fire로 분석되었다. PD8010은 영국 BSI(Bri-

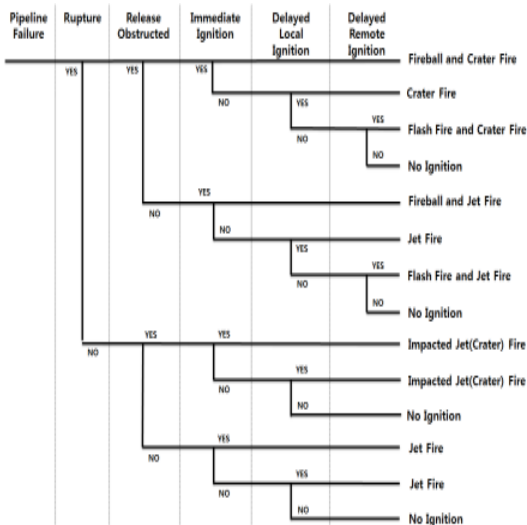


Fig. 1. Event tree for a gas pipeline failure in BSI PD 8010-3.

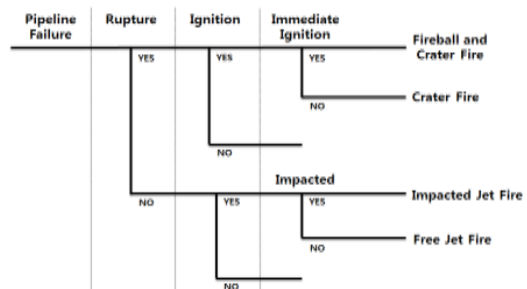


Fig. 2. Event tree for a natural gas pipeline failure in IGEM TD2.

tish Standards Institution)에서 발행한 가스산업시설의 안전기준으로 ETA를 통하여 여러 사고유형에 대하여 분석하였다. 이 기관에서는 leak/rupture, Release obstructed, Immediate ignition, delayed local ignition, delayed remote ignition의 다섯 단계로 구분하고 있으며, 최종사고유형으로는 IGEM TD2와 마찬가지로 fireball, crater fire와 jet fire로 제시하고 있다.

**2.2. 누출모델**

배관에서 rupture를 통하여 발생한 누출공으로 기체가 누출되는 경우, 상황에 따라 adiabatic flow model과 isothermal flow model로 분석이 가능하다. 지하매설 배관과 같이 일정한 온도가 유지되는 경우 isothermal flow model이 적합하며 압력구배에 의해 기체가 팽창하기 때문에 속도는 같은 질량유속을 유지하기 위해 증가하게 된다. CCPS에서는 초과압력손실계수를 통한 배출계수를 고려하였으며, 시간에 따른 누출량의 변화는 고려하지 않았다. 아래의 식(1)과 같이 초과압력손실계수를 결정하여 식(2)에 대입하여 배출계수를 계산한다. 최종적인 누출량은 식(3)을 통하여 계산 할 수 있다. 누출공의 크기는 CCPS의 기준의 FBR(Full Bore Rupture)로 계산하였다.

$$K_f = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \left(1 + \frac{1}{ID_{\in ches}}\right) \tag{1}$$

$$C_o = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum K_f}} \tag{2}$$

**Table 1.** Criteria of leak hole size in CCPS guideline

Pipe Size	Hole size	Range
1.5" Pipe	Small	5mm
	FBR	Pipe diameter
	Small	5
2 - 6" Pipe	Medium	25
	FBR	Pipe diameter
	Small	5
8 - 12" Pipe	Medium	25
	Large	100
	FBR	Pipe diameter

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_y T_o} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}} \tag{3}$$

**2.3. 화재모델**

누출된 가스로부터의 피해를 산정하기 위해서는 적절한 모델을 사용하여 사고피해결과를 분석해야 한다. 매설고압가스배관에서 발생하는 사고의 지배적인 위험은 화재로 인한 복사열이다[10]. IGEM TD2와 BSI PD8010에서 제시하는 최종사고유형으로는 Jet fire, Fireball, Crater fire, Flash fire, VCE (Vapour Cloud Explosion)이다. 그러나 국내 도시가스 배관의 경우 대체적으로 개방된 지역에 설치되었을 뿐 아니라, 도시가스의 밀도가 공기보다 가볍기 때문에 대기 중으로의 확산이 쉬워 폭발을 일으키기 쉽다. 따라서 본 연구에서는 매설배관에서의 rupture에 의해 가스가 방출되는 경우 중 jet fire에 대한 사고영향을 평가하였다.

Jet fire는 가연성 가스가 비교적 큰 운동량을 가지고 특정한 방향으로 연속적으로 분출되며 연소되는 특징을 가진다. 연료가 분출되는 시간 동안에만 화재가 발생한다는 특징이 있으며, 연료의 누출유량 (Release Rate)에 따라 제트 화재의 크기와 강도가 결정된다[14].

Jet fire 모델에는 KGS, TNO, CCPS 식이 존재한다. KGS식은 leak와 rupture에서 복사열 강도가 실제값보다 더욱 높게 나타나는 경향이 존재하며, TNO의 경우 화염표면에서 발생한 복사열과 대상이 받는 복사열의 관계를 정의하기 위해 상당히 많은 요인을 고려한다. 하지만 CCPS모델은 한점에서 복사열이 방출된다고 가정하는 point source 모델을 사용하기 때문에 비교적 간단한 뷰팩터를 사용하며 누출방향에 따른 복사열을 산정할 수 있다는 장점을 지니고 있어 본 연구에서는 CCPS모델을 선정하였다.

CCPS Jet fire의 계산은 물질의 연소반응식의 양론계수와 연소 온도를 통하여 화염의 길이를 계산한 후 view factor를 사용하여 화염에 영향을 받는 receptor가 받는 복사열 강도를 산정한다. 화염 높이는 다음 식(4)를 통해 계산할 수 있다.

$$\frac{L}{d_j} = \frac{5.3}{C_T} \sqrt{\frac{T_f/T_j}{\alpha_T} [C_T + (1 - C_T) \frac{M_u}{M_f}]} \tag{4}$$

위의 식을 통한 화염의 길이가 결정되면, 식(5)을 통하여 화염사이의 거리를 구할 수 있다.

$$F_p = \frac{1}{4\pi x^2} \tag{5}$$

**Table 2.** Criteria of TDU with human lethality in OGP guideline

Thermal Dose Units(TDU)	Effect
3200	100% lethality
2000	50% lethality, members of the public
1800	50% lethality, offshore workers
1000	1% lethality

복사열의 영향을 계산하기 위해서는 다음의 복사 모델에 의존한다[7].

$$E_r = \tau_a Q_r F_p = \tau_a \eta \dot{m} \Delta H_c F_p \quad (6)$$

### 2.4. 복사열에 의한 피해기준 분석

매설배관에서의 사고유형에 따라 jet fire의 복사열 강도를 계산 할 수 있다. 복사열에 의한 피해는 강도와 시간에 비례한다[2].

OGP는 특정복사열이 미치는 피해에 대한 기준과 TDU에 대한 기준 두 가지를 모두 제시하고 있다[2]. 특정 복사열이 미치는 피해 기준의 경우, 7단계로 구분되어 있다. TDU 기준의 경우, 사람이 죽을 확률로 나타내었으며 100%, 50%, 1%에 이르는 3단계로 나누었다.

## III. 모델 비교

### 3.1. 시나리오 선정 및 설계

IGEM TD2와 BSI PD8010에서 제시하고 있는 사고유형을 분석하였다. 제시된 사고 유형으로는 Pool fire, Crater fire, Fireball, Jet fire, Explosion이 존재하나 도시가스용 매설배관을 적용하여 메탄이 공기보다 가볍기 때문에 체적이 되지 않는다. 따라서 폭발의 가능성은 배제하였으며, Pool fire는 지중에서 지상으로 확산 시 LFL(Lower Flammable Limit)이하의 값을 갖게 되어 배제하였다. Crater fire는 매설된 시설에서 발생하는 고유한 화염형상이지만 매설을 고려하지 않는다면 jet fire와 유사한 화염형상을 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 Rupture로 인한 Jet fire발생을 고려하였으며, 복사열에 의한 피해를 분석하였다.

본 연구에서는 도출한 매설배관에서의 jet fire 복사열 계산순서는 다음과 같다.



**Fig. 3.** Procedure of buried pipeline jet fire model.

Lift-off Distance는 누출공으로부터 jet fire까지의 거리를 말하며, 본 연구에서는 매설배관의 지중깊이를 고려하여 재설정하였으며, 이를 통하여 View factor에서의 복사열 값을 재계산 하였다. 본 연구를 통해 계산된 매설깊이를 고려한 결과에 대해서는 이하 ‘매설모델’이라 지칭하도록 하겠다.

### 3.2. 누출량 비교 분석

본 연구에서는 매설배관의 Consequence Analysis 진행시 매설깊이를 고려한 매설모델과 누출압력을 1/10로 가정하는 OGP모델을 비교해보고자 한다. 국내 도시가스 매설배관의 압력과 매설깊이를 기준으로 사고영향분석을 실시하였다. PHAST 6.5의 Discharge 모델을 통하여 누출량을 계산하였으며, 결과는 다음과 같다.

Fig. 4-6 그래프의 x축은 높이이며, y축은 거리를 뜻한다.

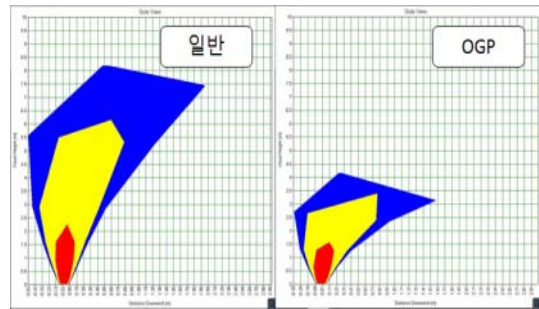
도시가스사업법에 기재되어 있는 중저압의 압력 범위는 0.1MPa이상, 1MPa미만을 뜻한다. 따라서 본 연구에서는 0.1MPa, 0.5MPa, 0.9MPa 총 세 가지 압력으로 구분하여 연구를 진행하였으며, 지상배관을 가정한 경우와 OGP기준을 적용한 매설배관 두 경우를 비교하였다. 계산 결과 도출된 누출유량은 아래 Table 4와 같다.

**Table 3.** OGP influenced certain radiation effects

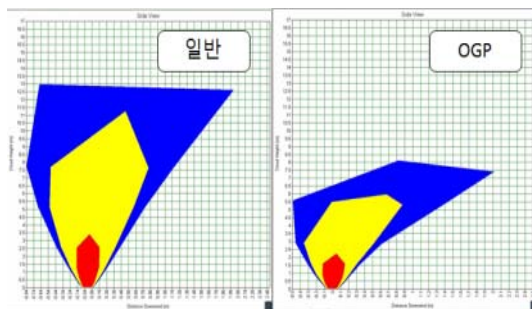
Thermal Radiation(kW/m <sup>2</sup> )	Effect
35	- Significant chance of fatality for people exposed instantaneously. - Cellulosic material will pilot ignite within one minute's exposure
25	- Likely fatality for extended exposure. - Spontaneous ignition of wood after long exposure. - Unprotected steel will reach thermal stress temperatures that can cause failure.
12.5	- Significant chance of fatality for medium duration exposure. - Thin steel with insulation on the side away from the fire may reach thermal stress level high enough to cause structural failure.
Greater than 6	- Pain within approximately 10 seconds; rapid escape only is possible
Less than 5	- Will cause pain in 15 to 20 seconds and injury after 30 seconds Exposure.
2	- Minimum to cause pain after 1 minute
1.2	- Received from the sun at noon in summer

**Table 4.** Leakage flow rate of each case

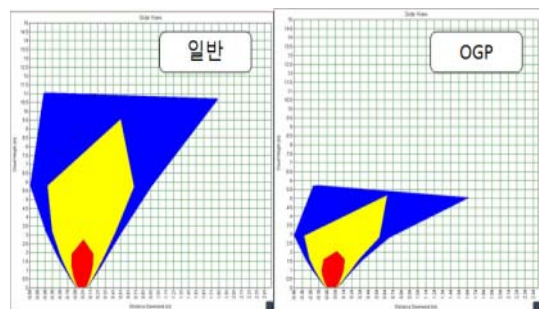
압력	Case	누출유량 (kg/s)
0.1MPa	매설	$8.565 \times 10^{-1}$
	OGP	$8.565 \times 10^{-2}$
0.5MPa	매설	4.283
	OGP	$4.283 \times 10^{-1}$
0.9MPa	매설	7.709
	OGP	$7.709 \times 10^{-1}$



**Fig. 5.** Sideview of gas leakage from 0.1MPa pipelines.



**Fig. 4.** Sideview of gas leakage from 0.9MPa pipelines.



**Fig. 6.** Sideview of gas leakage from 0.5MPa pipelines.

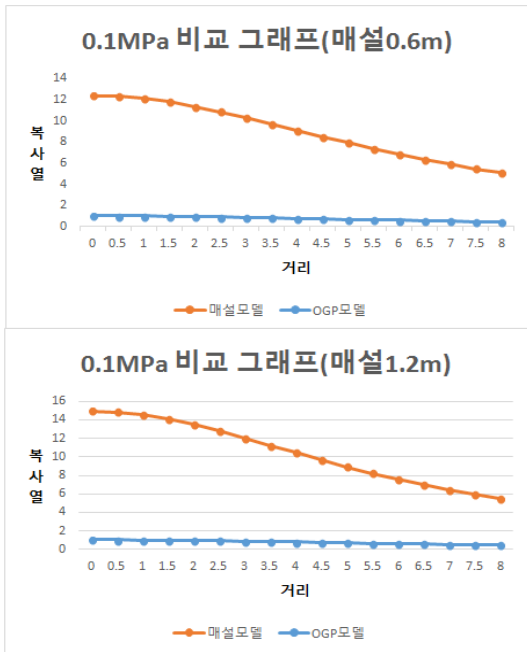


Fig. 7. Comparison of radiation each model in 0.1MPa.

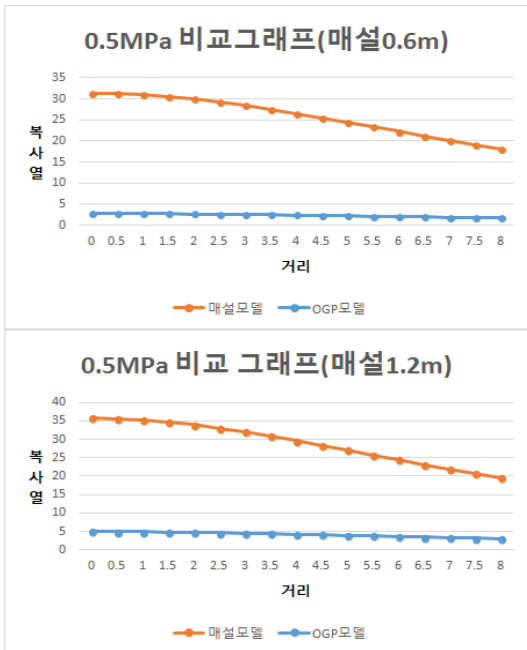


Fig. 8. Comparison of radiation each model in 0.5MPa.

### 3.3. 복사열 비교 분석

중저압 매설가스배관에서 발생하는 jet fire로 인한 지배적인 위험은 복사열에 의한 피해이다. OGP에서 제시하고 있는 복사열이 미치는 영향으로는 특정 복사열이 미치는 영향은  $35\text{kW/m}^2$ 에서 100%,  $25\text{kW/m}^2$ 에서 50%,  $6\text{kW/m}^2$ 에서 1%의 사망확률을 제시한다. 본 연구는 CCPS의 Jet fire 모델을 사용하여 복사열을 도출하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

위의 Fig. 7~9까지 나타내어 있는 것과 마찬가지로 매설모델과 OGP모델의 최대복사열은 모두 달랐으며 결과 값은 Table 5와 같다.

### 3.4. 매설깊이에 따른 복사열 비교 분석

점화원으로부터 10m거리를 기준으로 매설깊이 인자에 변화를 주어 매설모델과 OGP모델의 복사열을 비교 분석하였으며, 매설모델과 OGP 모델이 나타내는 차이는 Fig. 10과 같이 분석되었다. OGP모델을 통해 도출한 값은 깊이의 정도에 관계없이 복사열 값이 일정하게 계산되었으며, 매설모델의 경우, 배관의 깊이에 따라 jet fire의 복사열 값이 다르게 계산됨을 알 수 있었다.

OGP모델의 경우, 매설깊이에 변화를 주어도 같

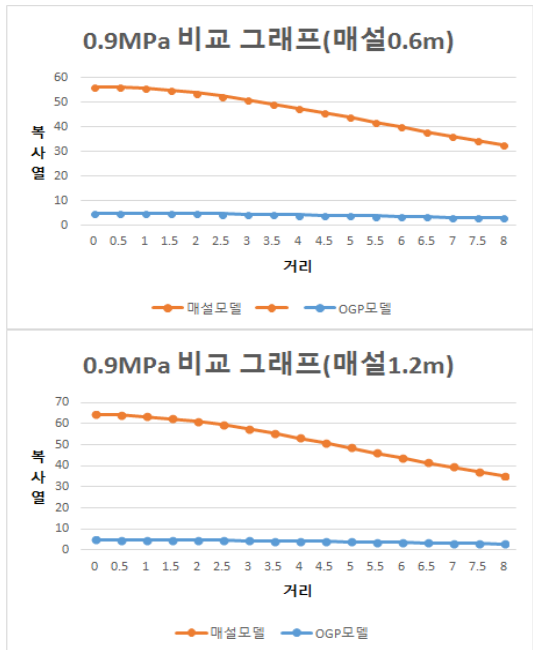


Fig. 9. Comparison of radiation each model in 0.9MPa.

**Table 5.** Radiation analysis according to each case of the 0.6m

입력 (MPa)	Case	최대복사열 (kW/m <sup>2</sup> )
0.1	매설	12.39
	OGP	1.04
0.5	매설	31.30
	OGP	2.77
0.9	매설	56.34
	OGP	4.98

**Table 6.** Accident content and scenarios

Type	Leak
Pipe diameter	36 inch
Depth	3.7m
Pressure	69.2 bar
Pipe length	17km
Temperature	298K

은 복사열을 받는 것으로 나타났으나, 매설모델의 경우, 매설깊이가 깊어짐에 따라 jet fire의 point source와 지면과의 거리가 짧아져 더욱 높은 복사열을 받는 것으로 나타났다.

#### IV. 사례 연구

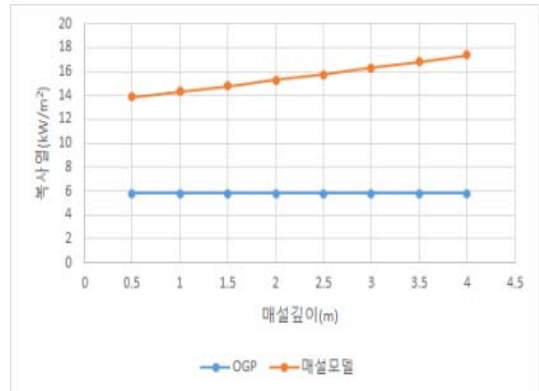
##### 4.1. 시나리오 선정 및 설계

선정한 사고유형과 그 결과 값을 실제 사고사례와 비교분석하기 위해, New Jersey의 Edison에서 1994년 3월에 발생한 사고를 기반으로 하여 시나리오를 선정하고, 매설모델과 OGP모델을 이용하여 Jet fire 발생 시 나타나는 복사열량을 비교하고자 한다. 분석에 사용한 시나리오의 정보는 Table 6과 같다.

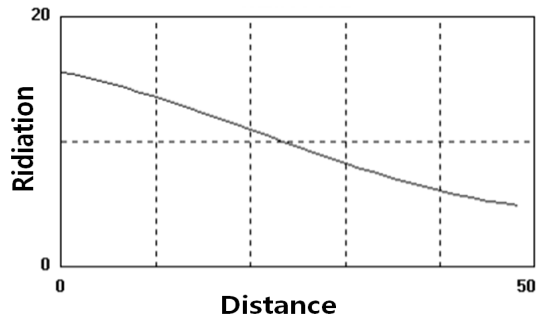
##### 4.2. 복사열 비교 분석

Fig. 11은 Edison사고에서 발생한 복사열을 나타낸 그래프이며, 매설모델과 OGP모델을 통한 복사열은 Fig. 12에 나타내었다.

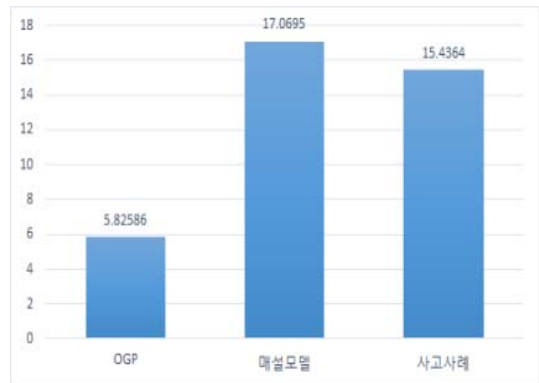
사고사례 시나리오를 적용하여 분석 한 결과, 복사열은 Fig. 12와 같이 도출되었으며, 배관압력의



**Fig. 10.** Comparison of the two models radiation according to the burial depth.



**Fig. 11.** Radiation of accidents Edison.



**Fig. 12.** Compared of the radiation from a 10m distance.

1/10을 적용하는 OGP모델의 경우, 실제 사고에서 발생된 복사열보다 비교적 낮은 복사열이 계산되었

고, 깊이인자를 고려한 매설모델의 경우, 실제 사고에서 발생된 복사열과 유사한 값이 계산되었다.

## V. 결론

본 연구에서는 배관의 매설깊이를 고려한 매설모델을 수립하여, OGP모델과의 복사열을 비교 연구하였다. 모델비교를 위한 시나리오 선정으로는 먼저 BSI PD8010과 IGEM TD2를 통하여 배관에서의 사고 시나리오를 분석하였으며, 이 중 Rupture를 통한 jet fire 사고 시나리오를 선정하였다.

Rupture를 통하여 가스가 누출되는 누출량을 산정하였으며, 누출된 가스가 집화되어 발생하는 jet fire의 형상을 나타내어 주변에 영향을 미치는 복사열을 도출하였다.

OGP모델은 매설깊이와 상관없이 배관압력을 1/10으로 가정하여 결과 값을 도출하는 모델이며, 배관의 매설깊이에 변화를 주어도 최종적인 화염형태인 jet fire의 복사열 값에는 아무런 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서 수립한 매설모델의 경우, 배관의 매설깊이에 따라 jet fire의 복사열 값에 변화가 생겼으며, 현재 사용되는 도시가스배관(0.6~1.2m 매설)에서는 매설깊이가 깊을수록 화염의 view point와 가까워져 복사열 값이 상승하는 결과가 도출되었다.

사고사례분석을 통한 매설모델과 OGP모델의 결과를 비교 분석하였으며, OGP모델보다 매설모델의 복사열이 실제 사고사례의 복사열과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 지하에 매설되어있는 배관에서 발생될 수 있는 jet fire의 복사열을 매설깊이 인자를 고려한 매설모델을 이용하여 계산한다면, 매설배관의 jet fire 시나리오에 대한 효과적인 위험성평가를 수행할 수 있을 것으로 분석된다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20132010500030)

## REFERENCES

[1] Ko, S. W., "Optimization of Biogas Purifying and Upgrading Process for City Gas Supply", Kwang-Woon university (2014)

[2] OGP, "Risk Assessment Data Directory- Vulnerability of Humans", Report No.434-14.1, (2010)

[3] Lee, D. H. et al., "A Study on the Accident Consequences of High Pressure Pipelines by Applying Reduction Factors", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 16(5), 1-6, (2012)

[4] Kim, J. H., et al., "Consequence Analysis for Release Scenario of Buried High Pressure Natural Gas Pipeline", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 18(3), 67-74, (2014)

[5] OGP, "Risk Assessment Data Directory, Consequence modelling Report No.434-7", (2010)

[6] Lee, H. C., Ryoo, J., Kim, T. O., "Selection of Release Scenario and Consequence Analysis for Gas Explosion by Pipe Release", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 10(4), 52-62, (2006)

[7] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Wiley-AIChE, pp.59-284, 2nd, (2000)

[8] Prank P. Lees, *Lee's Prevention In the Process Industries(3rd)*, Elsevier, (2004)

[9] Cowl, D. A. Louvar, J. F., *Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Safety(3rd)*, Wiley-AIChE, pp.119-305, (2011)

[10] Jo, Y. D., Ahn, B. J., "Analysis of Hazard Areas Associated with High-Pressure Natural-Gas Pipelines", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(3), 179-788, (2000)

[11] Steel Pipelines on Land-Guide to the Application of Pipeline Risk Assessment to Proposed Developments in the Vicinity of Major Accident Hazard Pipelines Containing Flammables-Supplement to PD 8010-1(4th), British Standards Institution, (2008)

[12] API 581 : Risk-Based Inspection Base Resource Document(1st), American petroleum Institute, (2000)

[13] Application of Pipeline Risk Assessment to Proposed Developments in the Vicinity of High Pressure Natural Gas Pipelines TD2(1st), Institution of Gas Engineers & Managers, (2008)

[14] Jung, J. Y., "CFD simulation of Jet fire Characteristic", Busan university, (2010)

[15] Report on a study of international pipeline accidents, HSE, (2000)