



지하매설 도시가스배관의 누출시나리오에 따른 사고피해영향분석

김진형 · 고병석 · 양재모 · 고상욱* · †고재욱

광운대학교 화학공학과, *(주)에스코

(2014년 6월 10일 접수, 2014년 6월 26일 수정, 2014년 6월 26일 채택)

Consequence Analysis for Release Scenario of Buried High Pressure Natural Gas Pipeline

Jin Hyung Kim · Byung Seok Ko · Jae Mo Yang · Sang-Wook Ko* · † Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 20, Kwangwoon-ro,
Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

*YESCO Co., Ltd., 23, Jadongchasijang gil, Seongdong-gu, Seoul 133-851, Korea

(Received June 10, 2014; Revised June 26, 2014; Accepted June 26, 2014)

요약

인구가 밀집되어 있는 도심지역에 매설된 천연가스 공급배관은 외부 또는 내부 결함으로 인한 가스의 누출, 확산, 화재, 폭발로 발생하는 재산과 인명피해의 큰 잠재위험을 지니고 있다. 사고를 미연에 방지하기 위해 정량적 평가에 기초한 위험관리를 실시하고 있으며, 매설배관의 정량적 위험성을 평가하기 위해서는 우선적으로 사고피해영향 분석을 통한 화학물질의 누출량 계산, 확산 분석, 화재 및 폭발로 인한 복사열과 압력과 계산이 필요하다. 본 논문에서는 CCPS, TNO에서 제안하는 model 들을 통하여 실제 San Bruno 매설배관 폭발 사고 시나리오를 기반으로 천연가스의 누출량, Fireball의 복사열 계산을 수행하고 결과 값을 실제 피해결과와 비교분석 하였다.

Abstract - Buried natural gas pipelines in densely populated urban areas have serious hazards of property damages and casualties generated by release, dispersion, fire and explosion of gas caused by outside or inside failures. So as to prevent any accident in advance, managers implement danger management based on quantitative risk analysis. In order to evaluate quantitative risk about buried natural gas pipelines, we need calculation for radiant heat and pressure wave caused by calculation for release rate of chemical material, dispersion analysis, fire or explosion modeling through consequence analysis in priority, in this paper, we carry out calculation for release rate of pressured natural gas, radiant heat of fireball based in accident scenario of actual "San Bruno" buried high pressured pipelines through models which CCPS, TNO provide and compare with an actual damage result.

Key words : consequence analysis, natural gas pipeline, CCPS, TNO, rupture, fireball

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

천연가스의 수요는 1987년 공급개시 이후 높은 증가세를 보이고 있으며, 2027년에는 그 수요량이 3만7천톤에 육박할 것이라고 전망하고 있다[1]. 이에 따라 에너지 발전소, 아파트 단지 등으로 가스를 공급하는 배관들이 인구가 밀집된 도심지역 곳곳에 지하매설 기준을 따라 0.6m 이상 매설되어 있으며, 특히 고압가스배관은 부식이나 외부 충격으로 발생하는 가스 누출이나 폭발사고 시 재산 및 인명 피해가 큰 잠재위험을 지니고 있다[2].

일반적으로 이러한 매설된 배관의 건전성을 평가하기 위해 과거에는 제 3자요인, 부식요인 등을 세부적으로 평가하는 Index-based Method를 사용하였지만 최근에는 누출의 빈도와 피해영향의 정량적 위험성을 평가하고 그 결과를 토대로 보수의 우선순위를 정하는 Risk-based Method로 전환이 되고 있다.

배관의 정량적 위험성을 평가하기 위해서는 우선적으로 화학물질의 누출량을 정확하게 계산하는 것이 필요하지만 보통 최악의 누출 시나리오로 가정을 하거나, 사고 시나리오에 적용한 여러 기관들의 누출, 화재, 폭발 모델에 따라 사고결과 값이 다양하게 도출되기 때문에 피해 결과를 예측하는데 있어서 신뢰성 문제가 있으며 안전조치사항 수립의 어려움을 겪고 있다[3]. 따라서 현재 이러한 문제들을 해결하고 보완할 수 있는 정량적 위험기반 배관 건전성평가 S/W 개발 연구를 진행 중이며, 이를 위해 정량적 위험성 평가를 위한 사고 시나리오 선정과 신뢰도 있는 기관들에서 제안하고 있는 누출, 화재, 폭발 모델들을 분석하고 case study를 통해 실제 발생한 San bruno 천연가스 배관 사고와 피해 결과 값을 비교 및 분석함으로써 최종적으로 S/W에 적용할 모델 선정에 관한 연구를 진행하였다.

II. 사고영향분석

2.1. 정량적 위험성 평가의 개요

우선적으로 사고를 미연에 방지하기 위해서 가장 먼저 수행되어야 하는 절차는 HAZOP, Check-list, FMECA 등과 같은 정성적인 위험성평가 방법으로서 잠재적인 위험요소를 찾아내어 확인, 분석하고 그 이후에 위험을 제거하거나 통제하는 것이다. 일반적으로 위험(Risk)은 사고의 빈도(Frequency)와 사고의 피해결과(Consequence)의 조합으로 정의하며, 본 논문에서는 매설배관에서의 가스 누출로 인한 누출량 계산과 점화 시 화재로 인한 복사열과 노출 시간 및 거리에 따른 치사율을 계산하는 사고피해영향분

석을 다룬다. 그 이후 사고빈도와 사고피해영향을 바탕으로 위험이 허용가능한 수준인지 여부를 증명하기 위해 FAR(Fatal Accident Rate)로 표시되는 개인적 위험과 F-N Curve로 표시되는 사회적 위험을 계산하고, 마지막으로 국내의 기관에서 제안하는 위험기준과 비교분석을 하여 최종적으로 위험도 감소 방안들을 도출하게 되며, 고압배관의 정량적 위험성 평가의 절차는 Fig. 1과 같다[4-5].

2.2. 사고 유형 분석

지하매설 도시가스배관에서 발생 가능한 사고 시나리오를 예측하기 위해 사고유형을 분석하였다. 대표적인 국외 기관인 영국 BSI(British Standard Institution)의 PD 8010-3에서는 육상 파이프라인-유해물질이 포함되는 재해 위험 파이프라인 근접 지역의 개발 계획 및 파이프라인 위험성 평가 적용 지침을 다루고 있으며, Delayed local ignition과 remote ignition을 적용함으로써 누출 후에 확산되는 영향을 고려하였고 최종화염형상은 Fireball, Crater fire, Flash fire, Jet fire가 발생한다고 제안하고 있다. 다음으로 IGEN(Institution of Gas Engineers and Managers)의 TD/2에서는 고압 천연가스 배관의 근접 지역 개발 계획에 대한 배관 위험성 평가를 다루고 있으며, Rupture의 경우에 30초를 기준으로 Immediate, Delayed ignition을 판단하고, 최종화염형상은 Fireball, Crater fire, Jet fire가 발생한다고 제안하고 있다.

2.3. 누출량 모델 분석

대부분의 사고는 유해물질 누출에서 시작되고, 도시가스배관 사고도 마찬가지이다. 누출된 물질의 양을 산정하는 것이 사고영향분석의 시작이며, 누출량 산정을 위해서는 물질의 누출상, 배관과 같은 저장용기의 종류, 온도 등을 알아야 한다. 특히 누출직접은 누출량 산정에 큰 영향을 미치는 요인이고 사용하는

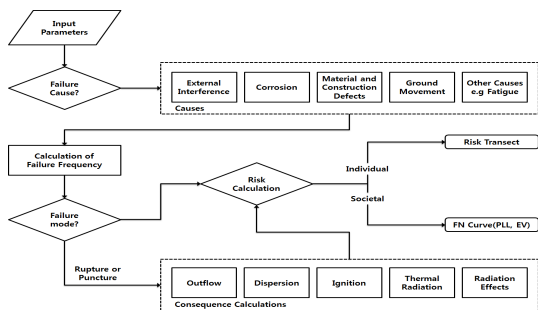


Fig. 1. The stages of QRA for pipeline.

누출 모델을 통해 계산되는 누출량은 고려하는 변수들에 따라 최종 결과 값인 복사열을 계산하는데 영향을 주는 요인이다. 따라서 leak 혹은 rupture 등으로 발생하는 사고와 피해영향결과를 규정하기 위해서는 각 신뢰도 있는 기관에서 제안하는 누출 직경 및 누출 모델 조사, 분석이 필요하다. API(American Petroleum Institute) 581 code의 경우 일반적인 배관을 대상으로 하며, HSE(Health & Safety Executive)는 가스배관을 대상으로 하고, EGIG(European Gas pipeline Incident Data Group)의 8th report는 천연가스배관을 대상으로 한다.

다음 step으로 누출량 산정을 위한 누출모델을 분석하고, 일반적으로 활용되는 CCPS(Center for Chemical Process Safety)의 rupture 모델, 그리고 TNO(The Netherlands Organization) Yellow book의 source모델로 누출량을 계산하고자 한다.

Table 1. Standard of Hole size in API 581[6]

Hole Size	Range	Representative Value
Small	0 - 0.25 inch	0.25 inch
Medium	0.25 - 2 inch	1 inch
Large	2 - 6 inch	4 inch
Rupture	> 6 inch	-

Table 2. Standard of Hole size in HSE[7]

Hole Size	Range
Pinhole	≤ 25mm
Hole	40mm
Hole	110mm
Rupture	> Pipeline Diameter

Table 3. Standard of Hole size in EGIG 8th report[8]

Hole Size	Range
Pinhole	≤ 25mm
Hole	40mm
Hole	110mm
Rupture	> Pipeline Diameter

2.3.1. CCPS Rupture model

Rupture의 경우 상황에 따라 adiabatic flow model과 isothermal flow model로 구분하는데, 일반적으로 보온배관의 경우 adiabatic 모델이 적합하고, 지하수 수송 배관처럼 일정한 온도가 유지되는 배관의 경우 isothermal 모델을 사용하는 것이 적합하다. 매설된 배관의 사고영향분석을 위해 isothermal 모델을 사용하며, 압력구배에 의해 기체가 팽창하기 때문에 속도는 같은 질량유속을 유지하기 위해 증가하고, 배관의 관경과 거칠기를 고려하여 식(1)로 fanning 계수 f 를 배관관경 d 와 배관거칠기 ϵ 로 결정하고, 그 후에 마하 수 $Ma1$ 값을 식(2)를 열용량비 γ 와 누출 지점까지의 거리 L 을 통해 계산하고 식(3)에 대입하여 누출량을 계산한다[11]. R_g 은 기체상수, M 은 분자량, T 는 온도이다.

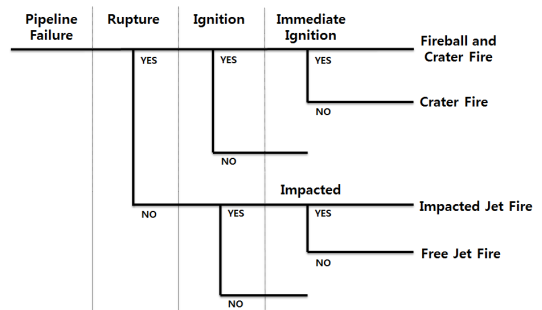


Fig. 2. Event tree for a natural gas pipeline failure in Igem TD/2[9].

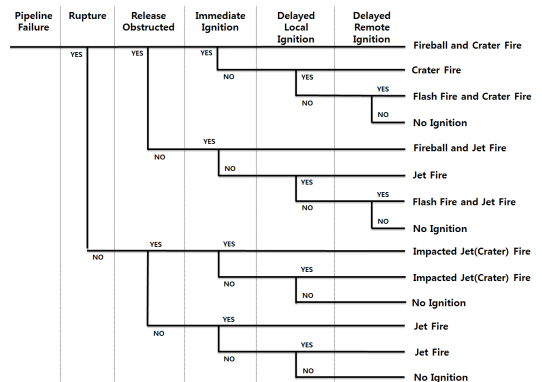


Fig. 3. Event tree for a natural gas pipeline failure in BSI PD 8010-3[10].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log(3.7 \frac{d}{\epsilon}) \quad (1)$$

$$\ln(\frac{1}{\gamma M_1^2}) - (\frac{1}{\gamma M_1^2} - 1) + \frac{4fL}{d} = 0 \quad (2)$$

$$G_{choked} = M_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T}} = P_{choked} \sqrt{\frac{g_c M}{R_g T}} \quad (3)$$

2.3.2. TNO Source model

TNO Yellow book에서 제안하는 누출 모델은 CCPS와는 다르게 leak와 rupture를 따로 구분하지는 않지만, darcy계수나 시간상수 등 다양한 요인을 고려하여 시간의 변화에 따른 누출량의 변화를 계산할 수 있다.

식(4)의 배출계수 C_d , 누출계수 ψ , 누출면적 A_p 통해 초기 누출량을 구하며, 누출계수는 초크 흐름일 경우에는 1로 가정하여 계산한다. 배관 내 유체의 속도 u_s 는 식(5)으로, darcy계수 f_d 는 식(6)으로, 시간상수는 식(7)로 구할 수 있다[12].

$$q_{s0} = C_d A_p \psi \sqrt{(\rho_0 P_0 \gamma (2/(\gamma+1))^{(\gamma+1)/(\gamma-1)})} \quad (4)$$

$$u_s = \sqrt{(\gamma \times z \times R_g \times T_0 / M)} \quad (5)$$

$$f_d = \{1/(-2 \times 10^4 \log(\epsilon / (3.715 \times d)))\}^2 \quad (6)$$

$$t_B = 2/3 \times L / u_s \times \sqrt{(\gamma \times f_d \times L / d)} \quad (7)$$

위에서 구한 값을 바탕으로 하여 일정 시간이 지난 후 물질의 누출량을 식(8)를 식(9)에 대입하여 최종적으로 구할 수 있으며, Q_0 는 초기 누출 총 질량, T 는 일정 시간 지난 후 온도이다.

$$B = Q_0 / (t_B q_{s0}) \exp(-T/t_B) + \exp(-T t_B (\frac{q_{s0}}{Q_0})^2) \quad (8)$$

$$q_s(t) = \frac{q_{s0}}{(1 + Q_0 / (t_B q_{s0})) \times B} \quad (9)$$

2.4. 화염 모델 분석

위에서 BSI PD 8010-3과 Igem TD2의 사고유형 분석을 기반으로 하여 매설된 도시가스배관에서 고려해야 할 최종사고유형은 Jet fire, Fireball, Crater fire, Flash fire, VCE(Vapour Cloud Explosion)이다. 하지만 국내 도시가스배관의 경우 대부분 개방된 지역(Confined area)에 설치되어 있고, 공기보다 가벼

운 천연가스가 대기 중으로 쉽게 확산될 것이므로 폭발을 일으키기 위한 충분한 농도의 가스가 지면에 밀집해 있기 힘들다. 그러므로 explosion에 의한 피해영향은 무시 될 수 있다. 따라서 대표적인 최종화염형상으로는 가압 용기의 rupture에 의해 과열된 액체, 또는 액화 가스가 갑자기 방출되는 경우에 발생하는 fireball이 있으며, CCPS와 TNO의 fireball model을 사용하여 복사열로 인한 피해영향을 분석하고자 한다.

2.4.1. CCPS Fireball model

CCPS의 Fireball model은 상대습도를 통해 환경적인 요인을 고려하였으며 가연성물질의 질량을 통하여 fireball의 직경 D_{max} , 높이 h 과 지속시간을 구한다. 그 식은 식(10), 식(11), 식(12), 식(13)과 같다 [11].

$$D_{max} = 5.8M^{1/3} \quad (10)$$

$$h = 0.75D_{max} \quad (11)$$

$$t_d = 0.45M^{1/3} \quad \text{For } M < 30,000 \text{ kg} \quad (12)$$

$$t_d = 2.6M^{1/6} \quad \text{For } M > 30,000 \text{ kg} \quad (13)$$

Fireball로 인해 발생하는 복사열은 3가지 방법으로 계산하는데, 이 연구에서 사용할 계산식은 대기 투과율을 적용하여 복사열이 감소되는 영향을 대기 투과율 τ_a , 연소열량 H_c , 방사율 R , 가연성 물질의 질량 m , fireball과 대상과의 거리 X_c 를 사용하여 분석한 아래의 식이다.

$$E_r = \frac{2.2\tau_a R H_c m^{2/3}}{4\pi X_c^2} \quad (14)$$

2.4.2. TNO Fireball model

TNO 모델 또한 CCPS 모델과 같이 누출량을 통한 화구의 크기, 지속시간과 높이를 고려하였고 복사열 산정에 다양한 요인을 고려하였다는 장점이 있다. Fireball의 직경, 지속시간과 높이는 식(15), 식(16), 식(17)와 같다[12].

$$D_{max} = 3.24M^{0.325} \quad (15)$$

$$h = 2D_{max} \quad (16)$$

$$t_d = 0.852M^{0.26} \quad (17)$$

Fireball로부터 발생하는 복사열 q'' 은 아래와 같은 식으로 계산한다.

$$x = (X^2 + h^2)^{1/2} \quad (18)$$

$$F_{view} = (D_{max}/x)^2 \quad (19)$$

$$F_s = 0.00325 \times (P_{sv})^{0.32} \quad (20)$$

$$SEP = \frac{\Delta HMF_s}{4\pi D_{max} t_d} \quad (21)$$

$$\tau_a = 2.02(P_w X_s)^{-0.09} \quad (22)$$

$$P_w = 101325(RH)\exp(14.4114 - \frac{5328}{T_a}) \quad (23)$$

$$q'' = SEP \times F_{view} \times \tau_a \quad (24)$$

III. 복사열 영향 기준 분석

계산된 복사열로 인한 피해를 산정하기 위해서는 fireball이 외부 또는 건물 내부에 있는 사람에게 미

치는 영향을 분석하는 과정을 거쳐야 한다. 화염은 높은 표면온도와 복사열을 방출시키며, 이는 대상까지의 거리에 의해 감소되고 view factor와 대기투과율의 영향을 받는다. 복사열로 인한 피해는 복사열의 강도와 노출 지속시간에 의해 결정되어야 하며 이러한 방법을 TDU(Thermal Dose Unit)이라고 하며, 그 수식은 식(28)와 같다.

$$TDU = (W)^{4/3} \times t \quad (28)$$

Table 4의 HSE에서는 TDU의 기준만을 제시하였으며, 탈출에 어려움을 느끼는 낮은 강도의 TDU부터 100%의 치사율을 발생시킬 수 있는 TDU 까지 그 기준을 세분화 하여 제안하였다. 사람이 대피하는 속도를 2.5m/s로, 도피처의 거리를 50m, 75m로 가정하여 노출 시간을 산정 하였다.

Table 5의 DNV(Det Norske Veritas)는 특정 복사열이 미치는 영향 및 TDU를 동시 고려하여 복사열의 피해를 산정하였고, 건물이 점화될 수 있는 복사열의 강도와 인명피해를 일으킬 수 있는 확률을 100, 50, 1%로 나누었다.

IV. 사례 연구

4.1. 시나리오 선정

본 논문에서는 각 기관에서 제안하는 누출, 화재, 복사열 모델이 실제 발생한 사고와 비교분석을 수행해보고, 그 정확도를 고찰해 보고자 한다.

각 BSI와 IGEM에서 제안하는 사고유형을 분석하여 선정 하고자 한다. 앞서 explosion으로 인한 피해 영향은 무시될 수 있으며 또한 공기보다 가벼워서 쉽게 LFL(Lower Flammable Limit) 이하의 농도로 확산되기 때문에 Delayed remote ignition에 의하여 발생하는 flash fire의 발생가능성이 매우 낮다. Crater fire는 매설된 시설에서 발생하는 고유한 화염형상 이지만 매설되었다는 상황을 제거하면 jet fire와 유사한 화염형상을 보이게 된다. 주로 leak에 의해 발생하는 fet fire 보다는 rupture로 인하여 발생하는 fireball의 화염형상이 그 피해 환경과 정도가 크므로 사고유형으로 rupture로 인한 fireball로 선정하여 복사열에 의한 피해를 분석하였다.

선정한 사고유형과 그 결과 값을 실제 발생한 사고의 피해영향과 비교분석하기 위해, 도시가스 공급용 30inch 132 배관이 파열되면서 가스가 누출되고 점화되어 재산피해와 인명피해를 발생시킨 2010년 9월 California, San bruno 지역 PG&E(Pacific Gas and Electric Company)사의 사고 데이터를 기반으로

Table 4. Standard of TDU in HSE[13]

Thermal Dose Unit(TDU)	Effect
3500	100% fatality
2000	50% fatality
1800	50% fatality with radiation only to the front or back
1000	1-5% fatality
290	Escape impede

Table 5. Standard of TDU, radiation in DNV[14]

Dose or flux(kW/m ²)	Effect
40kW/m ²	Building ignition from, 100% fatality
35kW/m ² 3500TDU	100% fatality for people outdoors(rupture or hole)
1800TDU	50% fatality for people outdoors(rupture)
1000TDU	1% fatality for people outdoors(rupture)
25kW/m ²	1% fatality for people indoors(hole)
6kW/m ²	1% fatality for people outdoors(hole)

하여 시나리오를 선정하고 각 누출모델을 통한 누출량 산정과 복사열 모델을 통한 최종적으로 화염에 의한 복사열과 피해반경 등을 비교하고자 한다. 사고 내용 및 시나리오는 Table 7과 같다[15].

4.2. 누출량, 복사열 계산 및 비교 분석

San bruno 지역 132 배관의 rupture로 인한 누출속도를 구하고 이를 기반으로 누출량을 계산하였으며, NTSB(National Transportation Safety Board)에서 제공하는 사고조사보고서에서의 실제 사고 지속 시간 95분을 기반으로 Fig. 5과 같이 시간 변화에 따른 결과 값을 도출하였다. 먼저 source model을 통해 구한 누출속도 식을 비교해 보았을 때, CCPS의 누출속도가 더 빠르게 계산되었으며, 실제 San bruno 지역의 도시가스 누출량과 비교해 보았을 때, CCPS rupture model보다 TNO source model이 실

제 누출량과 근접함을 보였다. 이는 TNO source model이 CCPS rupture model보다 누출 물질의 밀도, 최종 온도 등 여러 변수들을 고려하였으며, 특히 시간상수를 고려함으로써 시간의 변화에 따른 누출량의 변화를 계산할 수 있기 때문에 실제 결과와 유사하게 도출된 것으로 판단된다. Fig. 6과 Fig. 7은 각 rupture로 인한 가스의 누출량을 기반으로 하여 CCPS와 TNO fireball 모델을 통해 계산된 복사열과 복사열, 화구지속시간을 통해 계산된 TDU 결과 비교 값이다. 실제 사고에서는 사고영향으로 인한 피해가 약 400m까지 미쳤으며 화구로부터 가까운 38 가구는 완전한 파괴가, 그 밖의 70가구에 크고 작은 재산피해를 발생시켰고 8명 사망, 10명 중상, 48명이 경미한 부상을 입었다. HSE와 DNV의 복사열 및 TDU에 따른 피해영향 기준을 분석해 보았을 때, 실제 피해범위와 유사한 model은 CCPS fireball model이라고 판단된다.

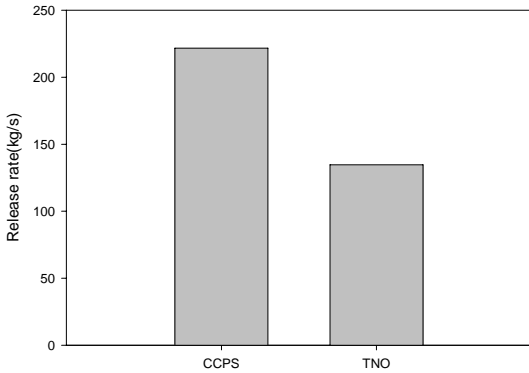


Fig. 4. Calculated release rate of San Bruno accident using CCPS and TNO source model.

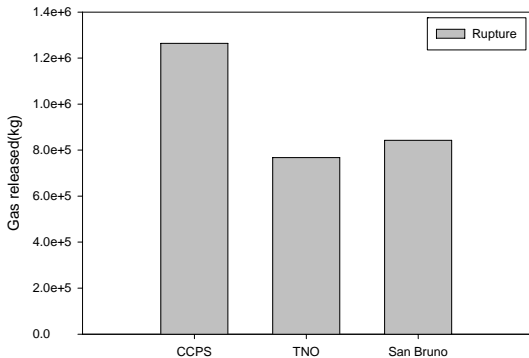


Fig. 5. Comparison of CCPS, TNO gas released model and the actual amount of gas released in San Bruno.

Table 7. Natural gas pipeline accident in San Bruno

Type	Rupture
Pipe diameter	762mm
Pipe wall thickness	9.5mm
Pressure	2.6MPa
Pipe length	74km
Released point	63km
Temperature	64°F

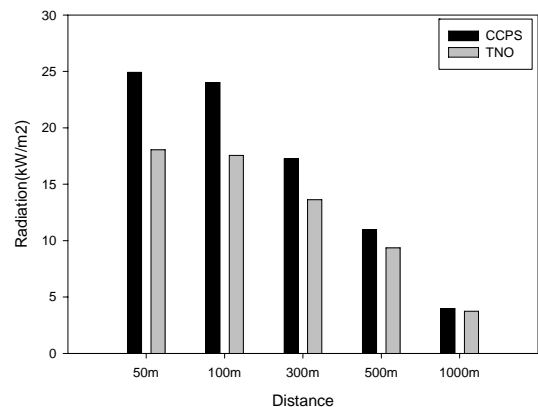


Fig. 6. Calculated radiant heat of fireball based on CCPS, TNO gas released model at each distances.

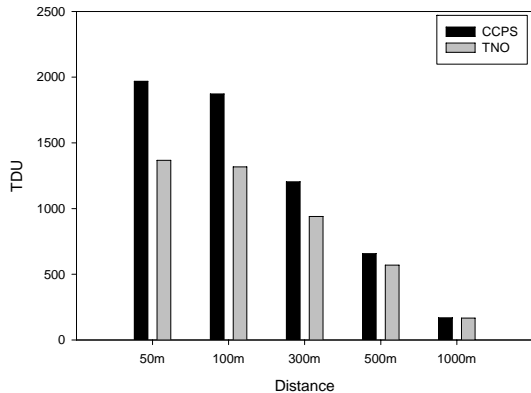


Fig. 7. Calculated TDU of fireball based on CCPS, TNO gas released model at each distances.

V. 결론

본 논문에서는 매설배관 정량적 위험성평가 절차 중 사고영향분석을 연구하였으며, 이는 화재 또는 폭발로 인한 피해를 분석하는 방법이다. 먼저 rupture 사고발생 시나리오를 선정하고 CCPS, TNO 누출량 모델을 이용하여 사고로 인한 누출량을 산정한다. 그 후 확산경향을 분석한 후 각 사고유형에 적합한 fireball 화재 모델을 사용하여 화염으로 인한 복사열을 계산하고, DNV의 복사열 피해영향 기준을 활용하여 건물이나 인체에 미치는 영향을 도출하였다.

선정한 사고유형과 유사한 실제 사고인 2010년 발생한 San Bruno 도시가스 배관 화재 사고와 비교해 보았을 때, rupture로 인한 가스의 누출량은 TNO 누출 모델과 유사했고, fireball로 인한 복사열 모델은 CCPS 화재 모델과 유사했다. DNV의 복사열 피해영향 기준에 따르면 100m이내의 건물 밖의 사람들에게 50%의 치사율에 이르는 복사열을, 300m에서는 1%의, 1000m 이상에서는 거의 복사열이 인체에 영향을 미치지 않는다는 결과를 도출 할 수 있었다. 계산된 사고피해영향 결과 데이터와 UKOPA(United Kingdom Onshore Pipeline Operator's Association) 또는 EGIG report의 30여년 누적 사고데이터를 활용하여 지하매설배관에 대한 사고빈도를 산정하고, 사회적 위험 계산 시 주간에 주거지역 실내에 있을 확률을 93%, 야간에는 99%로 산정하고 있는 TNO Purple book과 같이 대상 지역의 인구밀도를 고려함으로써 도시가스를 수송하고 있는 매설배관의 사회적 위험을 F-N Curve로 도시하거나 개인적 위험을 사망률로 계산하여 도시가스 배관의 정량적

위험성평가 결과를 도출 할 수 있다. 하지만 한 가지 사고 case와 두 기관의 결과 비교를 통해 S/W에 기반으로 할 model을 결정하기에는 다양성 및 신뢰성이 부족하기 때문에, 향후 여러 model들의 추가적인 연구를 진행함으로써 최종 S/W 개발에 적합한 model을 선택하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20132010500030)

참고문헌

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 11th demand and supply planning of long-term natural gas(2013-2027)", (2013)
- [2] Chae, C. G., "Standard explanation of the town gas", pp. 209-218, Mirae Energy-Code Research Institute, (2014)
- [3] Lee, D. H., "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] Lee, K. S., Jo, Y. D., and Ko, J. W., "A Study on the Procedure of Quantitative Risk Assessment for High Pressure Natural Gas pipeline", *Journal of the Korean Institute of Gas*, **12**(2), 28-31, (2008)
- [5] Korea Gas Safety Corporation, "A Guideline for Risk Assessment of High Pressure Pipelines", (2008)
- [6] American Petroleum Institute, "API 581 : Risk-Based Inspection Base Resource Document", (2000)
- [7] Health & Safety Executive, "An assessment of measures in use for gas pipelines to mitigate against damage caused by third party activity", (2001)
- [8] European Gas Pipeline Incident Data Group, "Gas Pipeline Incidents", 8th, (2011)
- [9] The Institution of Gas Engineers and Managers, "Application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of high pressure natural gas pipelines", (2008)
- [10] British Standards Institution, "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", (2008)

- [11] Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", Wiley-AIChE, pp. 59-284, 2nd, (2000)
- [12] The Netherlands Organization, "Yellow Book : Methods for the calculation of physical effects-due to releases of hazardous materials(liquids and gases)", TNO, Chapter 2 & 6, 3rd, (1997)
- [13] Health & Safety Executive, "Thermal radiation criteria for vulnerable populations", (2000)
- [14] Det Norske Veritas, "Report : Corrib Onshore Pipeline QRA", (2010)
- [15] National Transportation Safety Board, "Pacific Gas and Electric Company-Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire-San Bruno, California September 9, 2010", (2011)