



감소인자 적용에 따른 고압가스배관의 사고피해영향에 관한 연구

이동혁 · 정상용 · 고상욱 · 김민섭 · [†]고재욱

광운대학교 화학공학과

(2012년 7월 11일 투고, 2012년 8월 13일 수정, 2012년 8월 13일 채택)

A Study on the Accident Consequences of High Pressure Pipelines by Applying Reduction Factors

Dong Hyuck Lee · Sang Yong Jung · Sang Wook Ko · Min Seop Kim · [†]Jae Wook Ko

Department of chemical Engineering, Kwangwoon University

(Received July 11, 2012; Revised August 13, 2012; Accepted August 13, 2012)

요 약

한정된 자원과 공간에서 효율을 증가시키기 위해 설비가 고도화와 대형화되는 추세이다. 이에 따라 공정 내에 처리 용량이 증가하여 배관에 흐르는 유체의 유량과 압력 또한 높아지고 있으며 사고의 위험성 또한 높아지고 있다. 특히 고압가스는 누출 가능성이 높으며 누출시 폭발이나 화재로 인한 큰 피해를 줄 수 있다. 이러한 이유로 고압가스배관에 대한 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Assessment) 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 정량적 위험성 분석시 지형지물 등으로 인한 차폐효과와 같이 사고영향을 감소시키는 요인에 대한 연구는 그다지 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 고압가스배관에서 발생할 수 있는 사고 유형과 그에 따른 피해를 계산하고 감소인자 적용에 따른 피해 감소효과를 분석하였다.

Abstract - It becomes a more and more common practice to build facilities bigger and more integrated in an effort to optimize the process within limited resources and spaces. As the capacity of facilities increases, so does the flow rate and pressure. This in turn leads to a high consequence of accident. Not only are these facilities vulnerable to leakage because of their high pressure, but also subsequent fire and explosion can be threatening. For these reasons, there is an urgent need to come up with solutions to assess and minimize the damage from an accident. The Quantitative Risk Assessment(QRA) is one of the most efficient ways to solve problems on pressurized pipelines. The QRA can be re-enforced by applying reduction factors. In this study various types of accidents in a pressurized pipeline were evaluated. The damage from accidents were computed, then. Finally the reduction factors were very effective to decrease consequences of high pressure pipeline accidents.

Key words : pipeline, QRA, reduction factor, FN-curve

I. 서 론

정량적 위험성 분석은 특정대상에서 발생할 수 있는 사고에 대한 피해를 사고 가능성과 사고로 인한

경제적 손실 또는 인명피해를 합산하여 수치화하는 방법으로 여러분야에서 사용되고 있다. 특히 운전압력이 1 MPa이상인 고압가스배관은 화학공장, 가스 시설, 발전소 등 산업전반에 사용되며 인구밀도가 높은 도심지에도 도시가스배관과 같이 매설되어 사용되고 있어 가스안전공사나, 산업안전보건공단과

[†]교신저자:jwko@kw.ac.kr

같은 국가기관에서 지침을 발행하여 관리하고 있는 실정이다. 그러나 기존의 정량적 위험성 분석은 사고 영향을 산정할 때 감소요인을 고려하지 않아 계산된 결과가 실제 결과보다 상당히 크게 나타날 수 있다. 따라서 이 연구에서는 고압가스배관을 대상으로 사고 유형과 사고영향을 분석하고 차폐효과, TDU(Thermal Dose Unit)를 적용하여 사고 피해가 감소하는 것을 분석하였다.

II. 고압가스배관의 사고유형

고압가스배관에서 발생하는 사고유형을 분석하기 위하여 유럽(European Gas pipeline Incident data Group)[1], 영국(British Standards Institution)[2], 호주(Hazardous Industry Planning Advisory Paper)[3]의 규정과 관련논문을 조사하여 Table 1에 각 기관별 사고유형 분석을 위해 고려된 사항을 Table 2에 각 기관별로 고려하는 사고유형을 나타내었다.

고압가스배관 사고유형에 대해 각 기관별 규정을 분석한 결과 배관의 Leak와 Rupture, Immediate, Delayed ignition(점화시간 30초 기준)의 형태로 Jet fire와 Fireball을 구분하였으며 누출된 가스의 정체 여부(Space confinement, Release obstructed)에 따라 Flash fire와 VCE(Vapor Cloud Explosion)를 고려

하였다. 기관 대부분이 Jet fire와 Fireball을 고려하였고 기존의 위험성 분석에서도 Jet fire를 주로 분석하였으므로 이 연구에서도 고압가스배관에서 발생하는 사고유형으로 Jet fire와 Fireball을 고려하였다.

III. 사고영향분석

사고영향분석을 위해서는 특정 사고로 발생하는 가스의 누출량과 누출량에 따른 복사열을 산정하여야 한다. 누출량과 복사열을 산정하기 위해 일반적으로 가장 많이 사용되는 CCPS(Center for Chemical Process Safety)모형을 사용하였다. 누출량은 배관의 직경, 압력, 온도와 Hole Size에 따라 결정된다. CCPS에서는 Leak와 Rupture 두 경우 다른 식을 적용하여 누출량을 산정하였다.

3.1 Leak 모델

CCPS에서 제안하는 Leak에 관한 누출량 수식은 아래의 수식(1)과 같다[6].

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_0} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (1)$$

고압가스배관에서의 누출은 일반적으로 초크흐

Table 1. Considered factors for the results of high pressure pipeline accidents

	HIPAP6	IGEM TD2	PD8010	Thesis1[4]	Thesis2[5]
Leak, Rupture		○	○	○	
Isolation	○				
Immediate/Delayed ignition	○	○	○	○	○
Release obstructed			○		
Space confinement				○	
Local/Remote ignition			○		○

Table 2. Results of high pressure pipeline accidents

	HIPAP6	IGEM TD2	PD8010	Thesis1[4]	Thesis2[5]
Fireball		○	○	○	○
Jet fire	○	○	○	○	○
Crater fire		○	○		
Flash fire	○		○		○
VCE				○	

름을 가정하며 초크흐름에서의 압력과 열용량 비의 관계는 아래의 수식(2)와 같다.

$$\frac{P_{choked}}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2)$$

이 관계를 통해 Leak 모델은 아래의 수식(3)으로 대체된다.

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{g_c M}{R_y T_0} \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (3)$$

3.2 Rupture 모델

Rupture로 인한 누출량을 계산하기 위해서는 관 내 유체의 흐름을 정의하여야 한다. 계산과정은 아래와 같으며 일반적으로 초크흐름과 높은 레이놀즈 수를 가정하였다[6].

먼저 아래의 수식(4)로 배관의 관경과 거칠기를 고려하여 Fanning 계수를 결정하였다.

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

Fanning 계수를 결정한 후 아래의 수식(5)를 사용하여 Ma1 값을 계산하였다.

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma Ma_1^2}\right) - \left(\frac{1}{\gamma Ma_1^2} - 1\right) + \frac{4fL}{d} = 0 \quad (5)$$

위에서 구한 Ma1 값을 아래의 수식(6)에 대입하여 누출량을 계산한다.

$$G_{choked} = \rho u = Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_y T}} = P_{choked} \sqrt{\frac{g_c M}{R_y T}} \quad (6)$$

3.3 Jet fire 모델

CPS에서 제안하는 Jet fire model은 물질의 연소 반응식의 양론계수와 연소 온도를 통해 화염의 길이 산정하고 Geometrical view factor를 사용하여 복사열 강도를 산정한다. 아래의 수식(7)을 통해 화염의 길이를 계산할 수 있다[6].

$$\frac{L_f}{d_i} = \frac{5.3}{C_T} \sqrt{\frac{T_f/T_i}{\alpha_T} [C_T + 1(1 - C_T) \frac{M_a}{M_f}]} \quad (7)$$

화염의 길이가 결정되면 대상과 화염 중심 사이의 거리를 구하여 Geometrical view factor를 구하였다.

$$F_p = \frac{1}{4\pi x^2} \quad (8)$$

습도로 인한 영향을 고려하기 위하여 아래의 수식(9), (10)으로 대기투과율을 계산하였다.

$$\tau_a = 2.02(P_w X_s)^{-0.09} \quad (9)$$

$$P_w = 101325(RH)\exp(14.4114 - \frac{5328}{T_a}) \quad (10)$$

최종적으로 대상이 받는 복사열을 아래의 수식(11)을 통해 구할 수 있다.

$$E_r = \tau_a Q_r F_p = \tau_a \dot{m} \Delta H_c F_p \quad (11)$$

3.4 Fireball 모델

CCPS에서 제안하는 Fireball model은 가연성 물질의 질량을 통해 Fireball의 직경, 지속시간, 높이를 계산하며 계산된 높이와 직경을 통해 복사열을 계산한다. 아래의 수식(12), (13), (14), (15)를 통해 Fireball의 직경, 지속시간, 높이를 계산하였다[6].

$$D_{max} = 5.8M^{1/3} \quad (12)$$

$$h = 0.75D_{max} \quad (13)$$

$$t_d = 0.45M^{1/3}, \text{ for } M < 30,000 \text{ kg} \quad (14)$$

$$t_d = 2.6M^{1/6}, \text{ for } M > 30,000 \text{ kg} \quad (15)$$

Fireball로부터의 발생하는 복사열은 Fireball의 높이와 직경을 통해 Fireball과 대상과의 거리를 구하고 대기 투과율을 적용하여 산정한다. 아래의 수식(16)으로 복사열을 계산하였다.

$$E_r = \frac{2.2\tau_a RH_c M^{2/3}}{4\pi X_c^2} \quad (16)$$

IV. 감소효과

4.1. 차폐효과

차폐효과란 사고지점에서 발생하는 복사열의 영향을 실내, 실외로 구분하여 적용하는 방법이다. 기존의 위험성 분석에서는 건물의 영향을 고려하지 않고 실내, 실외 활동인구 모두에게 동일한 복사열을 적용하였다. 활동인구의 대부분이 실내에 있기 때문에

Table 3. Fraction of the population present indoors and outdoors

Description	fin	fout
day time(8:00~18:30)	0.93	0.07
night time(18:30~8:00)	0.99	0.01

건물에 의한 차폐효과를 고려해야 보다 정확한 위험성 분석을 수행할 수 있다. 차폐효과를 적용하기 위해서는 실내, 실외 활동인구에 대한 비율을 먼저 정의해야한다. TNO Purple book[7]에서는 Table 3과 같이 실내, 실외 활동인구 비율을 정의하였다.

차폐효과는 아래의 두 가지 방법으로 적용할 수 있다[7].

1. 건물의 차폐효과를 고려하지 않고 실내, 실외 활동인구에게 감소요인 0.14를 적용

2. 40 kW/m²이상의 복사열이 미치는 거리는 차폐효과를 고려하지 않고 40 kW/m²이하의 복사열이 미치는 거리의 실내 거주자는 안전하다고 판단. 단, 이 경우 실외 활동자에게는 감소요인 0.14를 적용하지 않음.

4.2. Thermal Dose Unit(TDU)

TDU는 복사열의 노출시간을 사람의 대피속도와 사고지역에서 차폐물까지의 거리를 기준으로 산정하는 방법이다[8]. 기존의 정량적 위험성 분석에서는 노출시간을 30초로 고정하여 개인적 위험성 분석을 하였으나 HSE에서는 사람의 도피속도를 2.5 m/s로 가정하고 사고지역에서 Shelter까지의 거리를 도심지는 50 m, 도외지는 75 m로 가정하여 노출시간을 산정하여 분석한다[2]. 기존의 Probit에서는 노출시 100% 죽는 복사열의 강도를 35 kW/m²[8]으로 계산하지만 TDU에서는 3200 TDU로 노출시간에 따라 복사열을 계산한다. 아래의 수식(17)에 TDU의 계산방법과 Table 4에 TDU별 영향을 나타내었다.

$$TDU = (W)^{4/3} \times t \quad (17)$$

V. 사례연구

복사열의 감소효과를 알아보기 위해 실제 사용하고 있는 고압가스배관을 대상으로 다음의 조건을 적용하여 가스누출 시나리오를 작성하였다. 이 시나리오의 환경이 24 in(61 cm)이고 압력이 2 Mpa인 메탄가스배관이 인구밀도가 높은 지역에서 파열되는 사례로 구체적인 개요는 다음과 같다.

Table 4. Thermal dose fatality criteria

Thermal Dose units	Effect
1000	1% lethality
1800	50% lethality, members of the public
2000	50% lethality, offshore workers
3200	100% lethality

Table 5. Flow rate and Radation of scenario

	Flow rate(kg/s)	Jet fire(m)	Fireball(m)
Leak(1 cm)	0.36	1.65	134.14
Leak(4 cm)	12.95	7.51	
Rupture	153.53	71.52	

<시나리오>

관경: 24 in(61 cm)

압력: 2 Mpa

길이: 9.5 km

누출지점: 4.75 km

누출직경: 1, 4 cm, Rupture

누출가스: 메탄

인구밀도: 2.5×10^{-4} 인/m²

5.1. 누출량과 복사열 계산

Table 5에 시나리오에 대한 Hole size별 누출량과 복사열을 나타내었다. 복사열은 35 kW/m²이 미치는 거리로 나타내었다.

5.2. 복사열 감소효과 적용

차폐효과와 TDU의 적용으로 인한 복사열 감소효과를 FN-curve로 나타내었다. 사고빈도는 EGIG 7th[9]의 데이터를 활용하였다.

Fig. 1.은 감소효과가 없을 때의 FN-curve이고, Fig. 2~4.은 차폐효과1, 차폐효과2, TDU를 적용한 FN-curve이다. 감소효과를 적용했을 때 전체적으로 사망자 수가 감소한 것을 알 수 있다. 차폐효과1을 적용했을 경우에는 실내, 실외의 구분없이 감소요인을 적용함으로써 전체적으로 사망자 수가 감소하였다. 차폐효과2를 적용했을 경우에는 40 kW/m²을 기준으로 감소요인을 적용하기 때문에 40 kW/m²이상의 복사열이 미치는 구간은 차폐효과를 적용하지 않은 FN-curve와 동일한 경향을 보였고 40 kW/m²이

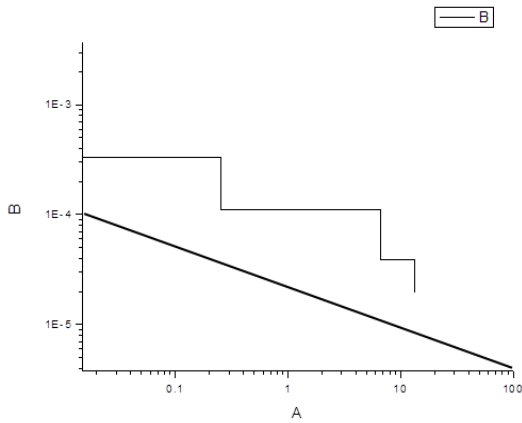


Fig. 1. FN-curve of scenario.

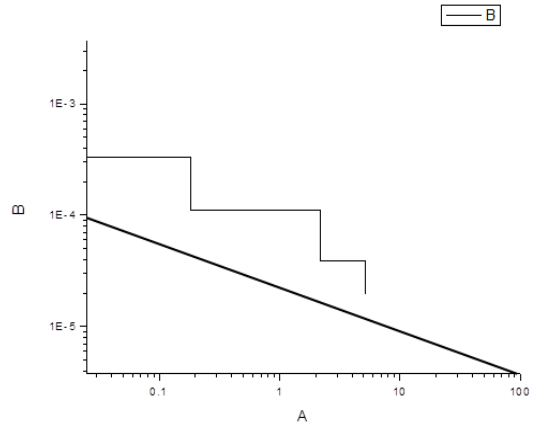


Fig. 4. FN-curve of scenario(TDU).

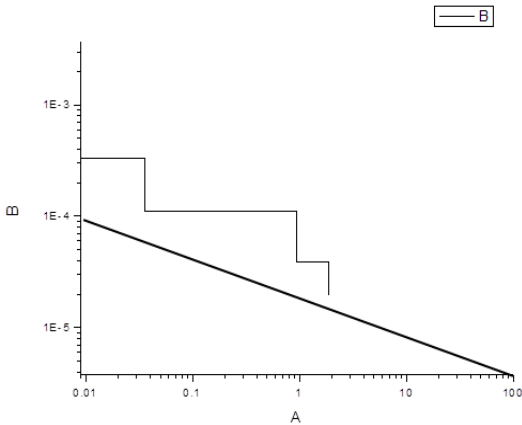


Fig. 2. FN-curve of scenario(protective effect 1).

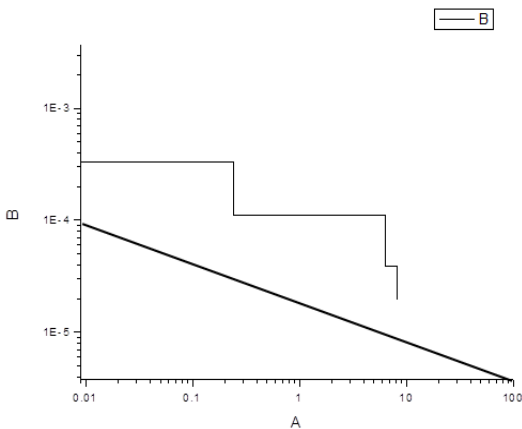


Fig. 3. FN-curve of scenario(protective effect 2).

Table 6. Number of fatalities

	no effect	Cover effect1	Cover effect2	TDU
Leak (1 cm)	0.093	0.0013	0.0088	0.0062
Leak (4 cm)	0.25	0.04	0.24	0.18
Rupture	6.64	0.93	6.38	2.21
Fireball	13.27	1.86	8.23	5.15

하의 복사열이 미치는 구간에서 사망자 수가 감소하였다. TDU를 적용하였을 경우에는 복사열의 노출 시간 감소로 인해 분석기준이 35 kW/m²보다 낮아지기 때문에 전체적으로 사망자가 감소하였다. 아래의 Table 6에 감소효과가 있는 경우와 없는 경우의 사망자 수를 비교하였다.

VI. 결론

고압가스배관의 위험성 분석과 감소효과 적용으로 인한 복사열의 피해영향이 감소하는 것을 확인하기 위해 고압가스배관에서 발생할 수 있는 사고유형을 분석하였고 사고 시나리오를 바탕으로 누출량과 복사열을 계산하였다. 여기에 감소인자를 적용하였고 감소효과별로 피해영향이 감소하는 것을 비교하기 위해 감소효과별 FN-curve와 사망자수를 계산하였다. 감소효과 적용에 따른 결과는 아래와 같다.

1. 차폐효과1: 실내, 실외 구분 없이 활동인구에 감

소요인 0.14를 적용하였기 때문에 가장 많은 감소효과를 보였으며 적용하지 않은 경우보다 사망자 수가 86%감소하였다.

2. 차폐효과: 40 kW/m²이하의 복사열이 미치는 구간의 실내 활동자는 안전하다고 판단하기 때문에 가장 적은 감소효과를 보였다. 이는 TNO purple book의 실내, 실외 활동인구 비율이 실내로 치중되어있고 사례연구 분석기준이 35 kW/m²이므로 복사열의 편차가 적었기 때문이다. 만약 분석기준의 복사열이 낮아진다면 더 큰 감소효과를 볼 수 있을 것이다. 차폐효과2를 적용하였을 때 사망자 수가 26%감소하였다.

3. TDU: TDU는 노출시간의 변화에 따라 감소효과가 큰 차이를 보였으며 도외지의 경우 오히려 적용하지 않았을 때보다 사망자 수가 증가하였다. 도심지를 기준으로 TDU를 적용하였을 경우 사망자 수가 63%감소하였다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구결과입니다.

(세부과제번호: 2010201010095C-21-1-000)

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
P_{choked}	: choked pressure
f	: fanning friction factor
d	: diameter
ϵ	: roughness factor
M_a	: Mach number
L	: pipe length
L_f	: jet fire height
T_f	: flame temperature
C_T	: stoichiometric fuel-air mixture
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_{max}	: fireball diameter
h	: fireball height
t_d	: fireball duration time
H_c	: entergy of combustion of fuel
η	: fraction of energy converted to radiation
\dot{m}	: mass flow rate of fuel

참고문헌

- [1] IGEM TD2, *Application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of high pressure Natural Gas pipelines*, 3th, Institution of Gas Engineers and Managers(2008)
- [2] PD8010-3, *Steel pipelines on land Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammable Supplement to PD 8010-1*, 3th, British Standards(2009)
- [3] Hazardous Industry Planning Advisory Paper No6, *Hazrd Analysis*, 3th, NWS GOVERNMENT(2011)
- [4] A.J. Brito, A.T.deAlmeida, “Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines”, *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 187-198 (2009)
- [5] L. V. Aparicio, S. M. Tonelli, “consequence evaluation in buried natural gas pipelines”, 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, (2005)
- [6] *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Center for Chemical Process Safety, 2th, (2000)
- [7] PGS3, *Guidelines for quantitative risk assessment, gevaarlijke stoffen*, (2005)
- [8] OGP 434-14.1, *Risk Assessment Data Directory*, International Association of Oil & Gas Producers, (2010)
- [9] 7th EGIG-report, *Gas pipeline incidents*, European Gas Pipeline Incident Data Group, (2008)