



지하 매설 공동구 내부 가스 폭발에 대한 위험성 평가

장유리 · †정승호*

한국가스안전공사 한국가스안전연구원, *아주대학교 환경안전공학과
(2016년 8월 4일 접수, 2016년 10월 14일 수정, 2016년 10월 15일 채택)

Quantitative Risk Assessment for Gas-explosion at Buried Common Utility Tunnel

Yuri Jang · †Seungho Jung*

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation,

**Dept. of Environmental and Safety Engineering, Ajou University*

(Received August 4, 2016; Revised October 14, 2016; Accepted October 15, 2016)

요약

가스 배관을 공동구 내에 수용하는 것은 단순 매설하는 것보다 부식의 위험이 적고, 외부인의 출입이나 굴착 공사 등으로부터 오는 물리적 손상을 예방할 수 있다는 점에서 편의성이 크다. 그러나 밀폐된 공간이라는 특성상 개방된 공간에서의 폭발보다 폭발 과압에 의한 피해가 크다. 그럼에도 공동구에 대한 연구는 화재 사고에 국한되어 진행되었고, 폭발로 인한 위험성에 관한 연구가 부족한 실정이다. 본 연구는 지하 공동구 내부의 가스 배관으로부터 누출된 메탄가스가 원인모를 점화원에 의해 폭발을 일으켰을 경우를 가정하여 피해결과 관점에서 공동구 내부의 폭발이 상부 시설물에 미치는 영향을 살펴보았다. 안전설비의 작동상태에 따른 2가지의 시나리오를 선정하여 CFD tool인 FLACS를 사용하여 영향성 평가를 진행한 결과 대부분의 건축물을 전파시킬 수 있을 정도의 폭발 과압이 예측되었다. 이 결과를 활용하여서 사고 발생 빈도를 감소시켜 안전성을 확보할 수 있는 추가 대책을 제시하였다.

Abstract - Keeping the gas pipelines in the common utility tunnel is useful because it has a lower risk of corrosion than conventional burial, and can prevent from excavating construction. But, explosions in common utility tunnels can cause greater damage from the blast overpressure compared to outdoor explosions, due to nature of the confined environment. Despite this fact, however, research on common utility tunnels has been limited to fire hazard and little has been studied on the dangers of explosions. This study developed scenarios of methane gas explosion caused by gas leak from gas piping within the common utility tunnel followed by unknown ignition; the study then calculated the extent of the impact of the explosion on the facilities above, and suggested the needs for designing additional safety measures. Two scenarios were selected per operating condition of safety devices and the consequence analysis was carried out with FLACS, one of the CFD tools for explosion simulation. The overpressures for all scenarios are substantial enough to completely destroy most of the buildings. In addition, we have provided additional measures to secure safety especially reducing incident frequency.

Key words : Common Utility Tunnel, Risk Assessment, Methane, Gas-explosion, CFD(Computational Fluid Dynamics)

†Corresponding author: processsafety@ajou.ac.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

가스 배관을 공동구 내에 설치하는 것은 가스 배관을 단순 매설하는 것보다 부식의 위험성이 적고, 내·외부인의 출입이나 외부의 굴착 공사 등으로부터 오는 물리적 손상을 예방할 수 있다는 점에서 용이하다. 그러나 그동안 공동구에서 발생한 재해는 거의 전력구나 통신구의 전기 선로에 의해 발생한 화재로, 현재 우리나라에서는 단독구의 개념으로만 가스 배관을 수용하고 있다. 하지만 이는 비용적인 측면에서 경제적이지 않다.

서울 아현동 도시가스 폭발(1994), 대구 상인동 지하철 가스폭발(1995)을 포함하여 최근 대만 가오슝시의 가스폭발 사고(2014, Fig. 1)와 같이 공동구와 같은 지하공간에서의 재해는 사회적·경제적으로 큰 영향을 끼칠 수 있으며, 특히 지하 공동구의 내부 폭발은 상부 시설물의 변형에도 영향을 미칠 수 있다.

그러나 현재 공동구에 대한 연구는 대부분이 화재사고에 국한되어 진행되었고[13][14], 공동구 내부의 가연성 가스 폭발로 인한 위험성에 관한 연구가 부족한 실정이다. 때문에 지하공동구 내 폭발이 지상 시설물에 얼마나 영향을 미치는지 알아보고, 그 안전성을 평가하고자 한다.

II. 본론

2.1 연구방법

영향성을 평가하는 방법으로 다음 Fig. 2의 절차에 따라 3D simulation을 진행 하였다[2]. 선정된 가상의 지하공동구를 대상으로 Geometry를 모델링한 후, 발생 가능한 시나리오를 발굴 및 선정하여 시물레이션에 적용하였다. 계산된 누출량을 기반으로 가스 폭발 현상을 시물레이션 함으로써 피해결과를 분석하였다. CFD tool은 가스 확산 및 폭발 연구에 대표적으로 사용하는 Gexcon社(노르웨이)의 3D 시물



Fig. 1. Explosion in Kaohsiung, Taiwan(2014).

레이터인 FLACS v10.3를 사용했다[15].

2.2 사전준비

(1) 대상 공정 : 공동구(common utility tunnel)

공동구란 전기·가스·수도 등의 공급설비, 통신 시설, 하수도시설 등의 지하매설물을 공동 수용함으로써 도시미관의 개선, 도로 구조의 보전 및 교통의 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물을 말한다[3]. 동일 구 내에 2종 이상의 시설물을 공동으로 수요·공급하기 위해 설치하여 도로의 반복 굴착 방지, 도시 미관의 향상, 유지관리 용이, 도로 공간의 효율적 이용 등 다양한 측면에서 용이하다. 그러나 공동구와 같은 지하공간은 지상 공간에 비해 폐쇄적 공간이므로 화재·폭발 발생 시 피해가 더 커질 수 있다.

(2) 가상의 공동구 주변 여건

산업용 가스를 공급하기 위해 가로 3.55 m × 세로 2.35 m의 직사각형 형태의 공동구가 설치된다고 가정하였다. 이 공동구는 도심지 하부를 통과하며, 공동구의 구간은 총 170 m(총 연장 250 m)이며, 지하 5 m 지점에 매설된다고 가정하였다. Fig. 3은 가상의 공동구 주변 여건 및 상황의 이해를 돕기 위한 단순 도식이며, 실측 사이즈와는 무관하다.

(3) 공동구 Layout

공동구 내부에는 가연성 가스인 메탄(CH₄)을 운반하는 직경(Ø) 400 mm의 파이프라인을 포함한 다수의 가스배관과 함께 전기 선로가 수용된다고 가정

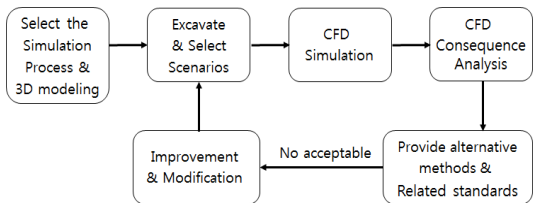


Fig. 2. Schematic procedure for the simulation.

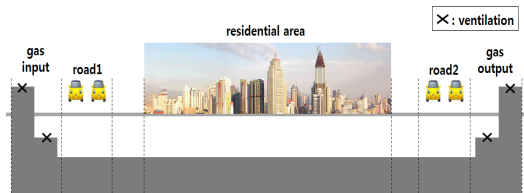


Fig. 3. Simplified cross-sectional view around the common utility tunnel.

Table 1. Composition of LNG

Category		Country of production	
		Borneo	Alaska
Composition (Vol %)	Methane(CH ₄)	88.1	99.8
	Ethane(C ₂ H ₆)	5.0	0.1
	Propane(C ₃ H ₈)	4.9	-
	Butane(C ₄ H ₁₀)	1.8	-
	Pentane(C ₅ H ₁₂)	0.1	-
	Nitrogen(N ₂)	0.1	0.1
Density(g/l)		465	415
Boiling point(°C, 1 atm)		-160	-162

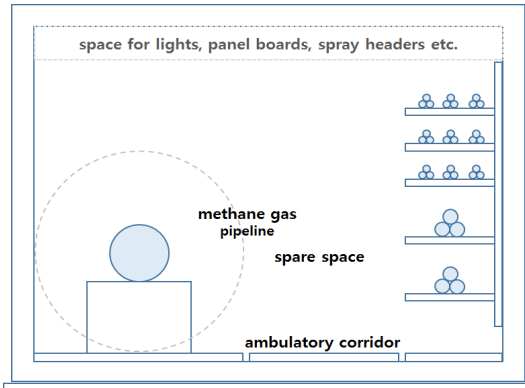


Fig. 4. Layout of common utility tunnel.

하였다. 이 가상의 공동구의 Layout은 Fig. 4와 같고, 공동구 설계기준[4]에 제시된 그림 예시를 따라 설계하였다.

(4) 대상물질의 선정

천연가스는 메탄(CH₄)을 주성분으로 한 가연성 가스의 총칭으로, 이를 액화시킨 것을 LNG(Liquefied Natural Gas, 액화천연가스)라 한다. LNG는 기화설비에 의해 기화되어 천연가스(Natural Gas) 상태로 수용자에게 공급되는 도시가스의 주를 이루고 있으며, 발전용 연료 외에 일반 공업용 연료로도 널리 사용되며, 화학공업원료로도 이용한다[5]. Table 1과 같이 LNG의 조성은 원산지에 따라 다르나, 상당량이 메탄으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 때문에 공동구 내부에는 가연성 가스인 메탄을 운반하는 배관을 수용하는 것으로 가정하였다.

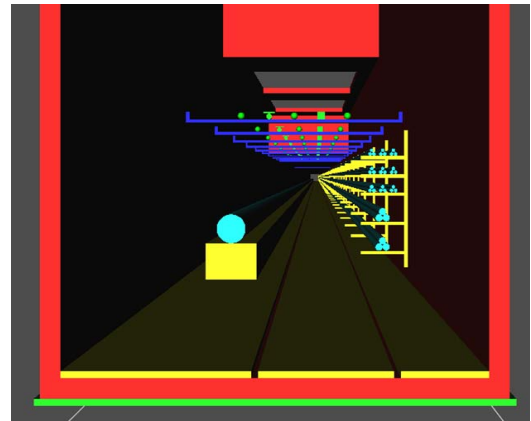


Fig. 5. Cross sectional view of common utility tunnel.

2.3 3D Simulation

(1) Geometry 생성

FLACS의 object 형상은 매우 단순하기 때문에 사선 표현에 한계가 있으므로 geometry 구현에 임의로 생략한 설계 기준이 존재한다.

가상의 공동구를 대상으로 Geometry를 모델링 하였다. 공동구의 총 길이는 250 m이며, 도로 및 주거지가 통과하는 상부 구간은 200 m 이다. 깊이 약 5 m 지하에 Fig. 5와 같이 가로 3.55 m × 세로 2.35 m의 직사각형 형태의 공동구를 설계 하였으며 내부의 배관망에는 가연성 가스인 메탄을 운반하는 직경(Ø) 400 mm의 배관을 수용하였다. 보행통로 우측으로는 통신/전력 케이블을 5단으로 설치하고, 케이블을 받치고 있는 Beam은 3 m 간격으로 하였으며, 상단에는 조명등, 연소방지설비 등을 간소화하여 배치하였다.

(2) Grid 설정

CFD에서는 Grid(격자) 개념으로 데카르트 좌표(Cartesian Coordinate), 즉 교차하는 축에 대한 위치에 의해서 위치가 결정되는 평면(2D) 또는 공간(3D) 상의 점에 의해 해석이 이루어진다[2]. 시뮬레이션하기 위해 본 연구에서 생성한 격자의 개수와 형상 그리고 세부정보는 아래 Fig. 6와 같다.

(3) 사고 Scenario

적절한 시나리오의 선정은 리스크 분석에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 하는 과정으로 적절하지 않은 시나리오를 통한 시뮬레이션의 연구 결과는 연구의 신뢰도 전체를 떨어뜨리게 되는 결과를 초래한다. 본 연구에서는 현실적으로 일어날 수 있는 시나

리로부터 최악의 시나리오로 점진적으로 접근하였다. 계산의 복잡성을 배제하기 위해 배관의 폭발로 인해 발생한 파편들이 인근의 케이블에 영향을 미치는 등의 domino effect는 고려하지 않았으며, DDT(Deflagration to Detonation Transition)의 반영 또한 고려하지 않았다.

메탄의 누출량 및 fuel region 이 다른 시나리오를 다음의 2가지로 선정했다.

- 시나리오 1 : 안전장치 정상 작동. 공동구 내부에 설치된 안전장치가 정상적으로 잘 작동하여 공급

되는 메탄을 바로 차단 한 경우로, 이미 공급 된 즉, 배관 내부의 부피($30.16 \text{ m}^3 = 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times \pi \times 240 \text{ m}$, 이상기체상태방정식에 의해 약 39.70 kg의 메탄)만큼의 메탄만 누출된 경우.

- 시나리오 2 : 안전장치 미 작동. 모든 안전 조치가 실패되어 누출 가스의 검지가 이루어지지 않아 공동구 내부 전체에 메탄이 가득 차도록 누출된 경우. 이 경우는 메탄은 공기와 적절히 섞여 폭발상·하한 농도를 벗어나지 않는 폭발 분위기를 형성한 상태이다.

각 시나리오에 따른 누출 량을 산정하고 그에 따라 fuel region 크기 설정을 다르게 하였다. 이를 제외한 나머지 시나리오 및 grid의 설정은 동일하게 적용했다.

- Scenario setting : Gas explosion
- Boundary condition : Euler (for all direction)
- Initial conditions : Default
- Ignition region : 공동구 내부의 가장 중심
- Monitor point : 좌표 (1.775, 0.5, 2.35)를 기준으로 x축으로 ± 1 m간격, +y축으로 3 m간격을 두고 총 252개 지정(Fig. 7에 형상화하였다.)

2.4 결과

메탄이 누출되어 어느 정도의 fuel region을 형성하는지, 점화가 어느 위치에서 일어나는 지 등 여러 변수에 따라 폭발 과압이 다양하게 나타남을 확인할 수 있었다.

가정한 2가지의 시나리오로부터 피해 영향 측면에서의 해석결과를 Table 2와 Fig. 8-9를 통해 나타내었으며, 시나리오 1에서 1.53 barg, 시나리오 2에

Table 2. Maximum overpressure for each scenario

No.	Scenario Information	overpressure
1	Normal operation	1.53 barg
2	Malfunction	6.49 barg

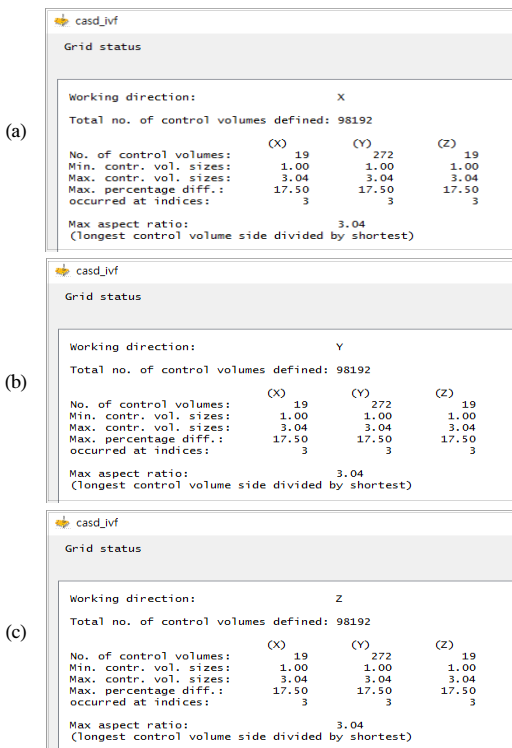


Fig. 6. Information for Grid. (a) x-axis (b) y-axis (c) z-axis.

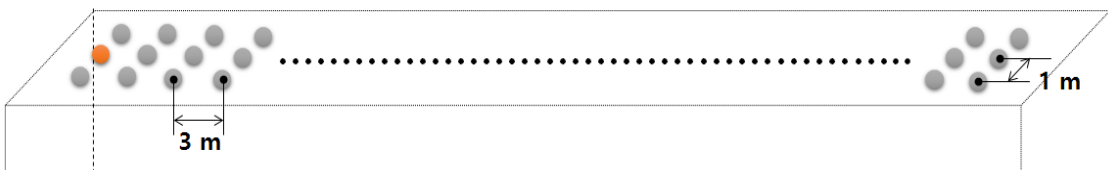


Fig. 7. Position of the monitor points.

지하 매설 공동구 내부 가스 폭발에 대한 위험성 평가

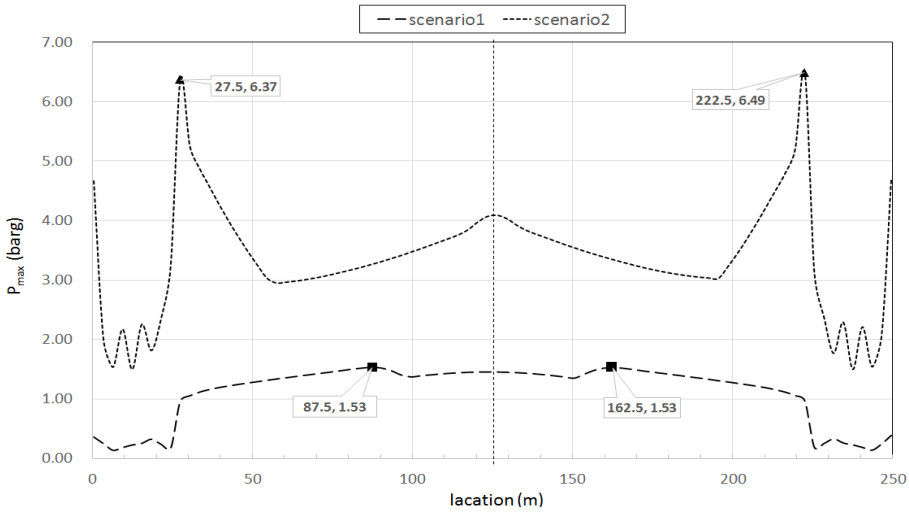


Fig. 8. Overpressure curves observed at different locations in the tunnel.

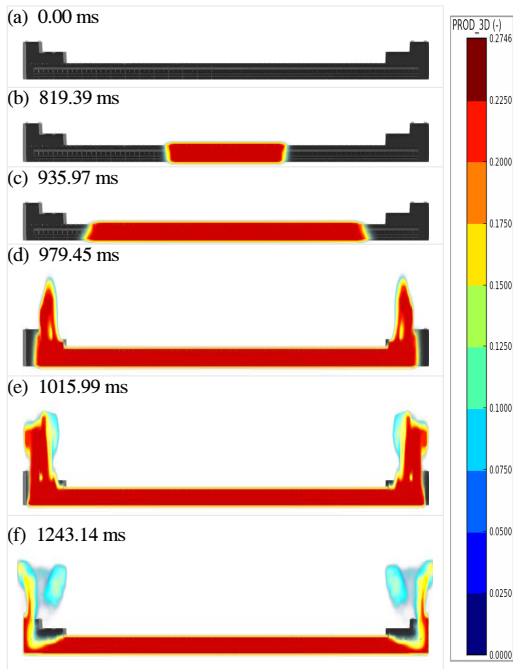


Fig. 9. Flame propagation for scenario #2.

서 6.45 barg를 확인할 수 있었다. 예상과 같이 가장 많은 메탄의 누출이 발생했을 경우 가장 큰 폭발압력이 측정되었다.

그러나 밀폐된 공간에서의 폭발은 점화 지점에 따라 폭발 압력의 차이가 크기 때문에 폭발 시나리

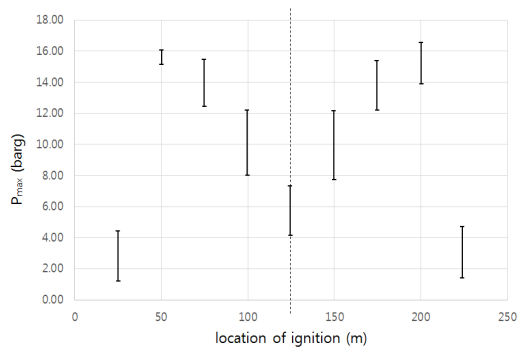


Fig. 10. Maximum overpressure value range simulated for various ignition points.

오에 있어서 한 지점으로 되어 있는 점화위치를 다수 지점으로 구성하여 적용하여야 시뮬레이션에서 계산된 폭발 압력이 유효한 것으로 판단될 것이다. 때문에 상위 데이터의 신뢰성 확인을 위해 연료 누출량이 가장 큰 최악의 시나리오인 시나리오 2에서 점화원의 위치를 다각화 시켜 그 결과를 살펴보았다.

Fig. 10는 다양한 점화원에서 측정된 폭발 과압 값의 범위를 나타낸 것이다. 다양한 점화원에서 측정된 최고압력들의 평균을 계산해 보면 약 9.62 barg로 모든 안전 조치가 실패되어 공동구 내부 전체에 메탄이 가득 차도록 누출된 시나리오 3에서 측정된 폭발 과압보다 작게 측정된 값을 알 수 있었다. 따라서 다양한 점화 지점에 따른 폭발압력을 고려해보

았을 때, 본 시나리오로부터 계산된 폭발 압력은 상당히 낙관적인 시나리오의 결과라고 할 수 있다.

2.5 안전성 확보 대책

2.4절로부터 얻은 폭발 과압으로부터 안전성을 확보하기 위해서는 공동구 내부의 geometry를 최대한 단순화하는 작업이 필요하다. 공동(common)구의 개념이 아닌 단독 가스구로 설계함으로써 geometry를 단순화시킬 수 있을 것으로 보인다.

또한, 배관의 실패(결함)는 가연성 가스의 누출 원인이며 가연성 가스의 누출로부터 폭발 분위기가 형성되기도 한다. 따라서 배관의 실패 발생빈도를 감소시켜 폭발분위기의 형성을 차단하는 설계로부터 안전성을 확보할 수 있다. 배관의 실패 발생빈도는 Fig. 11의 Fault tree에 의해 계산 하였다. 그 값은 $3.31 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 이고, 사용된 자료는 가정한 시나리오와 상당량의 조건이 일치하는 EGIG(European Gas Pipeline Incident Data Group)의 Historical data를 활용 하였다.

(1) 이중배관(coaxial piping)의 설계를 고려한다. 해당 빈도를 저감시키기 위해 이중배관 설계를 적용 하면 최종적으로 빈도를 $1.10 \times 10^{-9}/\text{yr}$ 로 낮출 수 있도록 한다. 이중배관 설계에 추가로 이음매가 없는 배관(seamless)의 사용으로 매우 낮은 사고빈도를 갖게 되어 전체적인 위험도를 낮출 수 있다.

(2) 또한, 기존 배관의 설계 요구 두께(STD)보다 두꺼운 Extra Strong(XS) schedule 배관을 사용하여 배관의 실패 확률을 저감 시키는 방법도 있다.

(3) 추가적인 빈도의 감소를 위해 이중 배관의 내·외부 배관 사이의 공간에 질소를 주입시킨 후, 질소 압력을 모니터링하여 이상 발생 시 메탄의 공

급이 중단되도록 하는 관련 설비를 추가 설치한다. 이는 안쪽 배관의 손상이 발생하여 메탄이 누출 되면 이중배관 사이 공간의 압력이 상승하게 되고, 이를 사전에 검지하여 메탄가스의 외부 누출 없이 이를 대처할 수 있도록 한다. 뿐만 아니라 바깥쪽 배관의 결함이 발생하게 되면 질소압력의 저하로 내부 배관 누출과 관계없이 공급을 중단하는 것이 가능하다. 따라서 배관의 이중화와 함께 메탄 가스의 누출을 예방 할 수 있는 방법으로 판단된다.

(4) 그 외, 방화·방폭 설비의 사용하여 점화원에 대한 대비를 하는 것을 포함 한 주기적인 안전 점검 등의 관리적인 대책 또한 필요하다.

III. 결 론

본 연구는 지하 공동구에서 발생할 수 있는 가스 폭발에 대한 사전 대비 측면에서 진행 되었으며 공동구 내부에서 발생한 폭발이 지상 시설물에 얼마나 영향을 미치는지 알아보고, 그 안전성을 평가하였다.

가상으로 설정한 공동구의 내부에서 메탄가스 누출 량에 따른 2가지의 시나리오를 설정했다. CFD Simulation을 통해 계산된 공동구 내부의 폭발압력은 각 시나리오별로 1.53 barg, 6.45 barg이다. 이 값들은 대부분의 건축물을 전파 시킬 수 있는 70 kPa(Clancey, 1972)을 초과하는 값이다. 공동구 상부의 도로와 주거지가 위치해 있어 인구의 밀집이 예상되는 바, 안전성을 확보하기 위하여 폭발 발생 빈도를 낮추는 안전 설계 방안을 다음과 같이 제시 한다.

- 가스 단독구의 설계
- 이중배관 + Seamless (혹은 Extra Strong(XS) schedule) 배관을 사용한 설계
- 이중 배관 사이의 압력 검지기
- 방화·방폭 설비 사용
- 그 외 관리적인 대책: 외부인의 출입 관리, 관계자들의 주기적인 안전교육, 유지보수 활동에 대한 매뉴얼 정비 등

이와 같은 사항을 기존 가상의 설계에 반영한다면, 공동구 내부의 가연성 가스의 폭발로 인한 피해 가능성을 최대한 절감 및 제어가 가능하고, 이를 통해 공동구 상부 5m의 도로와 주택가의 안전성이 확보 될 수 있을 것이다. 그러나 실제의 경우, Domino effect와 같이 본 연구에서 고려되지 않은 다양한 위험이 추가적으로 존재하기 때문에 발생할 수 있는

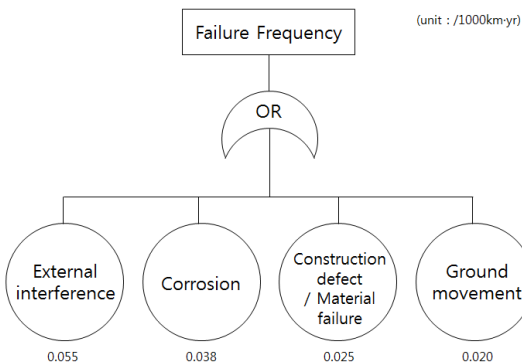


Fig. 11. Simple fault tree for pipeline failure frequency (EGIG).

다양한 위험에 대해 항상 인지해야 한다.

발생 빈도를 고려하지 않은 단순 사고 영향 분석 결과를 놓고 보면 공동구 내부의 폭발은 상부에 꽤 큰 영향을 미칠 수 있다고 추정된다. 뿐만 아니라 공동구와 같이 밀폐된 공간에서의 폭발은 개방된 공간에서의 폭발보다 공간특성을 고려 할 때 폭발 시 압축 파에 의한 폭발압력이 더욱더 커지면서 피해가 크게 나타날 것으로 예상[16]되므로 이에 따라 추후, CFD를 통해 계산된 수치해석 결과를 FEA(Finite Element Analysis)에 적용하여 구조 변형을 검토하는 등의 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지 안전기술 개발사업 연구 과제입니다. (No. 20162220100260)

REFERENCES

- [1] "공동구 통합정보 및 활용기술개발 연구", 최종 보고서, 국토해양부, (2011)
- [2] Jang, C. B., "A Research on Prevention of Chemical Accident utilizing Simulation Techniques", Korea Occupational Safety & Health Research Institute, (2014)
- [3] "국토의 계획 및 이용에 관한 법률", 국토교통부, [시행 2016.6.30.] [법률 제13681호, 2015.12.29., 일부개정]
- [4] "공동구 설계기준", 국토해양부. (2010)
- [5] Park, J. K., Roh, S. K.. "A Study on the Risk Management Information System of the Underground Space - Focused on Fire Growth Risk Assessment System", *FIRE SCIENCE AND ENGINEERING*, 16(4), 49-58, (2002)
- [6] "화재조사요원양성과정V", 중앙소방학교, (2015)
- [7] Flacs Manual, Gexcon, (2013)
- [8] "9th report of the European Gas Pipeline Incident Data Group(period 1970-2013)", EGIG, (2015)
- [9] "OGP process release frequencies Report No. 434-1", International Association of Oil&Gas Producers, (2010)
- [10] "사고 피해예측 기법에 관한 기술지침", 안전보건공단, (2012)
- [11] Ha, D. M., Choi, Y. C., "Prediction of Auto ignition Temperatures and Explosion Limits for Methane", *FIRE SCIENCE AND ENGINEERING*, 6, 26-33, (2001)
- [12] Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, "Chemical Process Safety", 2nd
- [13] Lee, J. I., "A study on the fire prevention activities and suppression measures of utility-pipe conduit", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 10(4), 63-68, (2010)
- [14] Yoon, M. O., Koh, J. S., Park, H. J., Park, S. E., "Estimation of fire Experiment Prediction by Utility Tunnels Fire Experiment and Simulation", *FIRE SCIENCE AND ENGINEERING*, 15(1), 22-33, (2001)
- [15] Hansen, O. R., Storvik, I., van Wingerden, K., "Validation of CFD-models for gas explosions, where FLACS is used as example; model description and experiences and recommendations for model evaluation." *Proceedings European Meeting on Chemical Industry and Environment III, Krakow, Poland*, 365-382, (1999).
- [16] Jo, Y. D., Kim, J. Y., "Explosion hazard analysis in partially confined area", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 18(3), 292-296, (2001).