

지상 고압 천연가스 배관의 최소 이격거리 기준에 관한 연구

이진한[†] · 조영도

한국가스안전공사 가스안전연구원
27738 충청북도 음성군 맹동면 원중로 1390
(2018년 10월 8일 접수, 2018년 11월 11일 수정본 접수, 2019년 1월 15일 채택)

A Study on Minimum Separation Distance for Aboveground High-pressure Natural Gas Pipelines

Jin-Han Lee[†] and Young-Do Jo

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, 1390, Wonjung-ro, Maedong-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, 27738, Korea

(Received 8 October 2018; Received in revised form 11 November 2018; accepted 15 January 2019)

요 약

우리나라의 경우 지상에 설치된 고압 천연가스 배관과 건축물 간의 최소 이격거리는 가스기술기준(KGS code)에 의해 규제된다. 이 논문을 통해 이러한 최소 이격거리를 관련된 KGS 코드를 개정한 기술적 근거를 보여주고자 한다. 이격거리를 설정하는 접근 방법으로 합리적 사고 시나리오에 의한 피해기반 접근법을 적용하였는데 배관에 부착된 1인치 분기 라인이 파손되어 제트화재가 발생한 시나리오를 선정하였다. 여기서 공업지역에 종사하는 작업자에 대해 비공업지역에 있는 사람들보다 더 높은 허용가능 복사열 플럭스를 적용하였다. 그 이유는 공업지역에 종사하는 근로자는 일반 대중들 보다 더 짧은 시간 안에 비상 대피가 가능하기 때문이다. 이 사고 시나리오에 대한 피해영향 분석 결과로부터 지상에 설치된 고압 천연가스 배관과 건축물 간의 최소 이격거리로서 비공업지역에서는 30 m, 공업지역에서는 15 m로 KGS 코드 개정을 제안하였다. 코드 개정안은 KGS 코드 위원회(가스기술기준위원회)에 채택되어 현재 시행 중이다.

Abstract – In Korea, the minimum separation distance between aboveground high-pressure natural gas pipeline and buildings is regulated by Korea gas safety (KGS) code. In this paper, The technical backgrounds for the revision of the KGS code related to the minimum separation distance was presented. A consequence-based approach was adopted to determine the minimum separation distance by a reasonable accident scenario, which was a jet fire caused by the rupture of one inch branch line attached the gas pipeline. Where, the higher thermal radiation flux threshold was selected for workers in industrial area than for people in non-industrial area, because the workers in industrial area were able to escape in a shorter time than the people in public. As result of consequence analysis for the accident scenario, we suggested the KGS code revision that the minimum separation distances between high-pressure natural gas pipeline installed above ground and buildings should be 30 meter in non-industrial area and 15 meter in industrial area. The revised code was accepted by the committee of the KGS code and now in effect.

Key words: Separation distance, Gas pipeline, Jet fire, Consequence-based

1. 서 론

고압 천연가스 배관은 대부분 지하에 매설되어 운전된다. 다만 일부 배관의 경우 지상에 노출되어 관리되며 노출배관의 대표적 사

례는 정압기지에 설치된 배관이다. 정압기지는 상류의 압력을 감압하여 일정한 압력으로 조정하는 정압기, 감압을 통해 낮아진 가스온도를 높이는 가열기, 불순물을 제거하는 필터, 유량을 계측하는 계량기와 이에 따른 부대설비로 구성된다. 이들 설비를 연결하기 위한 배관에는 온도, 압력, 유량 등의 측정을 위한 각종 계측설비들이 설치되므로 유지관리를 용이하게 하기 위해 통상 지상에 설치하게 된다. 한편, 이렇게 지상에 설치되는 천연가스 고압배관은 주변 시설물과는 일정거리 이상을 이격해야 하는데 이에 관한 기술기준은 도시가스사업법 제17조의5에 따른 상세기준인 가스기술기준

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: imhappy@kgs.or.kr

*이 논문은 서울과학기술대학교 김래현 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Korea Gas Safety Code)에 규정되어 있다. 이 기준은 고압 천연가스 배관에 대한 시설 및 기술기준을 규정하고 있으며, 그 명칭은 “KGS FS451(가스도매사업 제조소 및 공급소 밖의 배관의 시설·기술·검사·정밀안전진단 기준)”이다[1]. 지상에 설치되는 고압가스 배관과 주택, 학교, 병원, 철도 등 인근 타 시설 간에 이격해야 하는 최소 거리는 KGS FS451의 2.5.8.3.1(1)항에 ‘수평거리’란 용어로 정의(본 논문에서도 ‘수평거리’란 용어정의를 그대로 사용하였다.)되어 있다. 세부내용을 보면, 지상에 노출되어 설치되는 고압 천연가스 배관과 주택, 학교, 병원, 철도와는 30 m 이상의 수평거리를 유지하도록 규정하고 있는데 예외적으로 전용 공업지역 및 일반 공업지역 안에 설치된 배관에 대해서는 주변 시설물들과 15 m 이상의 수평거리를 유지할 수 있도록 완화된 규정을 적용하고 있다.

수평거리에 대한 해외 사례를 살펴보면, 영국의 경우 가스 엔지니어 및 관리자 협회인 IGEM(Institute of Gas Engineer & Manager)에서 설정한 기술기준에 배관과 건물과의 최소 이격거리인 BPD(Building Proximity Distance)를 규정하고 있다[2]. 이 규정에 따르면 BPD는 최소 배관두께가 9.52 mm 이상인 배관에 대해서는 식 (1)과 같이 운전압력(P_{op})의 함수로 계산하도록 규정하고 있다. 우리나라 고압 천연가스 배관의 최고 운전압력인 70 bar를 식 (1)에 대입하면 배관과 건물과의 최소 이격거리(BPD)는 10.6 m로 계산된다.

$$BPD_{min} = 0.08 \times P_{op} + 5 \quad (1)$$

한편, 스위스의 경우 배관 수송안전에 관한 조례에 고압 천연가스 배관에 대한 최소 이격거리를 규정하고 있는데 주거 건물과는 10 m(운전압력이 2.5 MPa 초과), 도로와는 5 m, 철도와는 10 m 이상을 유지하도록 안전거리를 설정하고 있다[3]. 미국의 경우 배관과 주변 건물과의 거리를 Setback이라고 부르는데 이는 연방기술규정(CFR, Code of Federal Regulations)으로 강제화 되어 있지 않으며 일부 지방정부에서 조례로 정하고 있다. 참고로 워싱턴 주의 경우 가스 수송배관과 일반 주거, 상업, 공업용 빌딩과의 최소 이격거리를 50 feet(15 m) 이상으로 할 것을 모델 코드로 제안하고 있다[4].

위 해외 사례들과 비교하면 우리나라에 적용되는 고압 지상 천연가스 배관에 적용되는 건물과의 수평거리(30 m) 기준은 앞서 소개된 해외 사례(10~15 m) 보다 2배 이상으로 매우 보수적이었기 때문에 배관운영자의 개정 요구가 있어 지상 고압 천연가스 배관의 최소 이격거리 기준의 적정성에 대해 검토를 수행하였다. 수평거리 개정 요구는 정압기지, 밸브기지 내 지상 고압 천연가스 배관을 설치할 당시에는 주변에 건축물 등 시설물이 없어 수평거리 기준을 만족(30 m 이상 이격)하고 있었으나 배관이 설치된 후 부지경계 밖에 들어서는 시설물에 의해 배관운영자가 의도하지 않았지만 수평거리 기준 준수가 어렵게 됨에 따른 것이었다. 공업지역에서는 설치되는 배관에 대해서는 예외적으로 공업지역 외의 지역보다 더 적은 최소 수평거리 기준(15 m)을 적용할 수 있다는 분석결과를 토대로 수평거리 관련 KGS 코드 개정을 제안하였다. 그 후 고압가스안전관리법 제22조의2에 의해 설치된 가스기술기준위원회에서 KGS FS451 중 수평거리 기준을 심의, 의결함으로써 동 규정이 개정, 시행되었는데 본 논문에서는 이 최소 수평거리 기준 개정하기 위해 제시된 기술적 근거를 소개하고 자 한다.

2. 접근방법

2-1. 이격거리 설정을 위한 접근방법

이격거리를 설정하는 방법은 단순히 설비의 주변에 발생할 수 있는 유지보수 활동에 근거하여 설정하는 경우도 있다. 그러나 고압의 가연성 가스 배관처럼 사고발생 시 주변에 피해를 미칠 가능성이 큰 경우에는 주변에 미치는 위험성을 고려하여야 한다. 주변에 미치는 영향을 평가하는 방법은 크게 피해영향 기반(consequence-based) 접근법과 위험기반(risk-based) 접근법으로 구분될 수 있다[5]. 피해영향 기반 접근법은 다시 최악의 시나리오를 가정된 경우와 발생 가능성이 높은 합리적 사고시나리오를 고려한 경우로 구분될 수 있다. 그러면 이격거리를 설정하기 위한 방법으로 어떤 접근방법이 적합한 지에 대한 4가지 접근법에 대해 각각 그 적용 가능성을 검토하여 후술하였다.

2-1-1. 유지보수를 위한 최소 공간

해외 일부 국가의 경우 유지보수 등을 위해 배관주변에는 타 시설물이 들어설 수 없는 공지의 폭을 설정하고 있으며 이는 지역권(easement) 또는 통행권(right-of-way)이라는 용어로 정의된다. 미국의 경우 배관 매설지 위 공지로 유지되는 공지의 폭은 미국 수송연구위원회(TRB, Transportation Research Board)의 보고서[4]에 제시된 바와 같이 25~50 feet (7.6~15 m)으로서 배관 중심으로부터 양쪽으로 3.8~7.6 m의 폭을 유지하고 있다고 한다. 이 공지의 폭은 배관주변 지역 차량을 이용한 순찰 등 유지보수를 위해 배관 운영회사가 최소한 확보(보유 또는 계약에 의해)해야 하는 폭으로서 앞서 서론에서 설명한 배관이 보호시설(건물 등)과 유지해야 하는 Setback과는 다른 개념이다. 우리나라의 경우도 배관 유지관리를 위한 공지의 폭을 규정하고는 있으나 사고가 발생했을 경우 주변 건물이나 사람에게 피해를 최소화할 수 있도록 정한 ‘수평거리’와는 규제 목적이 다를 수 있다.

2-1-2. 위험기반 접근법(허용위험을 충족하는 거리)

정량적 관점에서 위험은 사고의 발생빈도와 그 사고에 따른 피해의 곱으로 표현된다. 발생 가능한 사고 시나리오가 다수 존재한다면 시나리오별로 사고발생빈도와 피해영향으로부터 계산된 위험을 모두 합산한다. 위험기반 접근법은 위험을 측정하는 지표에 따른 허용위험 수준 이하인지를 판단하는 방법이다. 위험기반 접근법에서 사용하는 가장 일반적인 위험 측정지표는 개인적 위험(individual risk)과 사회적 위험(societal risk)이다.

개인적 위험은 고압가스 배관 주변의 배관에서 떨어진 특정 지역에 위치한 개인이 배관 사고로 인해 사망할 빈도로 표현된다. 이 때 특정 위치에 있는 개인의 입장에서 볼 때 배관 경로에 따라 사고발생 지점을 알 수 없으므로 개인의 위험(통상 개인이 사망할 빈도로 표현된다)은 배관경로에 따라 적분함으로써 구할 수 있다.

사회적 위험은 주변 지역사회의 관점에서 측정되는 위험이다. 배관에서 사고가 나면 그 사고로 인해 발생하는 예상사망자 수로 사회적 위험이 정의된다. 어떠한 기상 사고에 의한 예상 사망자의 수는 위험지역 내의 인구밀도와 사망확률의 곱을 면적으로 적분함으로써 계산될 수 있다. 통상적으로 다양하며 치명적인 영향을 일으키는 등 잠재적 위험성을 갖고 있는 배관에 대하여 사회적 위험은 개인적 위험보다 더 중요하게 고려된다.

위험기반 접근법은 우리나라가 채택하고 있는 기술형 (prescriptive) 규제와 는 다른 목표 설정형(goal setting) 규제이다. 고압 천연가스 배관의 수평거리를 예를 들면 기술형 규제는 30 m 라고 구체적으로 기술하는 방식이지만 목표 설정형은 허용위험 수준을 정해 놓고 허용위험을 충족하는 거리로 배관의 내용물, 압력 등에 따라 달라진다. 참고로 허용위험을 정하여 목표 설정형 규제를 하고 있는 대표적 국가는 영국과 네덜란드이다. 허용위험은 국가별로 조금씩 차이가 나는 데 우리나라는 기술형 규제를 채택하고 있으므로 허용위험을 설정해 놓고 있지 않다. 따라서 위험기반 접근법을 사용하여 수평거리를 정하려면 허용위험이 먼저 규정되어 있어야 하는데 우리나라는 허용위험을 정하고 있지 않으므로 위험기반 접근법 적용이 어렵다.

2-1-3. 최악의 시나리오에 따른 피해거리

고압 천연가스 배관이 완전히 파손(rupture)되어 화재가 발생하면 그 피해거리는 200 m 이상에 이를 수 있다. 그 사례로 2000년 미국 뉴멕시코 Carlsbad 지역에서 발생한 고압 천연가스 배관 누출 및 화재 사고로 인해 배관파손 지점에서 약 200 m 떨어진 곳에서 캠핑을 하던 12명이 사망하였다[6]. 그러나 최악의 시나리오에 따른 최대 피해거리는 이격거리 기준으로 직접 규제하는 국가는 없다. 그 이유는 이 이격거리를 유지하기 위해 주변 토지이용을 제한하게 되면 기회비용이 너무 크기 때문으로 판단된다. 그렇다면 최악의 시나리오에 따른 피해거리는 어떤 경우에 사용되는가? 해외 사례를 보면 최악의 시나리오에 따른 피해거리는 사고 발생 시 비상대응을 위해 관리하는 거리로 인식된다. Stephen[7]은 천연가스 배관이 rupture되어 누출된 가스가 착화되어 화재가 발생하는 최악의 시나리오에 따른 사망확률이 1%에 이르는 피해거리로 200 m를 제안하였으며, 미국, 캐나다는 이 연구 결과를 받아들여의 경우 배관의 주변 200 m를 위험을 관리해야하는 범위로 설정하고 그 범위 내에 있는 주택의 밀도에 따라 4개의 등급으로 나누어 위험관리를 달리 하고 있다. 우리나라의 경우도 화학물질 누출사고 시 비상대계획 수립에 최악의 시나리오를 고려하는 데 그 사례로 Kim과 Jung[8]은 불화수소 누출 사고 시 비상대응 거리를 예측하기 위해 최악의 시나리오를 사용하였으며, Park[9]은 염산 취급시설의 누출피해 예측을 위해 최악의 시나리오를 사용하였다.

2-1-4. 합리적 시나리오에 따른 피해거리

앞서 사례로 든 미국 Carlsbad 지역에서 발생한 배관파손 및 화재사고[6]의 원인은 지하에 매설된 배관 부식이다. 그러나 정압기 지에 노출된 지상 고압배관의 경우 부식이 존재하더라도 외관검사로 발견될 수 있으며, 두께측정으로 쉽게 모니터링이 가능하다. 그러므로 유지관리(주기적인 두께 측정)가 잘 수행된다면 이 사고와 같은 rupture 시나리오를 무시할 수 있다. 또한 배관에 가해지는 위협요인 중 큰 비중을 차지하는 굴착공사에 따른 배관의 파손도 굴착자가 배관의 배설여부나 위치를 몰라 발생하는 사고로서 노출된 배관의 경우 굴착공사에 의한 사고 시나리오도 무시될 수 있다. 다만 노출 지상배관이 정압기지 내 배관의 경우 온도, 압력, 유량 등의 측정을 위한 각종 계측설비 등이 설치되므로 작업자 또는 유지보수를 위한 제3자의 간섭영향은 배제할 수 없게 된다. 따라서 지상 노출배관에서 발생 가능한 사고 시나리오는 Fitting 라인의 파손(소규모 누출)이다.



Fig. 1. Example of branch lines attached aboveground high pressure natural gas pipeline in a regulating station.

2-1-5. 이격거리 설정을 위한 접근방법 선정

상기 접근방법을 요약하면, 유지관리를 위한 최소거리는 사고 시 피해를 고려하지 않는 방법으로 그 목적이 다르고, 위험기반 접근법은 영국 등의 사례와 같이 위험목표를 설정하지 않은 국내 여건 상 적용이 어렵다. 또한 최악의 시나리오에 따른 피해거리는 통상 비상대응에 필요한 거리로 배관과 주변시설 간에 이격하여야 하는 거리와는 그 의미가 다르다. 따라서 본 연구에서는 이격거리를 정하기 위해서는 합리적인 시나리오를 설정하고 그 시나리오에 의한 피해영향 범위를 고려하여 이격거리를 정하는 방법을 사용하였다.

2-2. 시나리오 가정

정압기지 등 지상에 설치된 고압 천연가스 배관에서 발생 가능한 가장 합리적 사고발생 시나리오는 전술한 바와 같이 배관에 부착된 센서 등 부품(fitting) 부착을 위한 라인의 파손으로 누출이 발생한 후 착화되어 제트화재로 진행되는 사건으로 설정하였다. 제트화재는 수직방향, 수평방향 모두가 가능하며 이 두 경우를 모두 고려대상에 포함하였다. 제트화재 발생 시 복사열에 의해 주변의 건물과 사람에게 피해를 줄 수 있으므로 본 연구에서는 복사열의 영향범위를 수평거리를 설정하는 근거로 삼았다. 누출공(release hole) 크기는 Fig. 1의 사례처럼 온도, 압력, 유량 등의 측정을 위한 각종 계측을 위해 배관에 부착된 라인의 파손을 가정한 1인치를 선정하였다.

2-3. 누출속도 예측

누출속도 예측 모델은 Crowl과 Louvar[10] 이 제안한 기상의 최대 누출속도를 구하는 모델을 사용하였다. 이 모델에 따른 최대 누출속도는 식 (2)로부터 계산된다. 2.2의 시나리오처럼 배관환경에 비해 누출구경에 작은 경우에는 배관 내 가스흐름의 저항에 따른 누출속도의 저하를 고려하지 않는다.

$$Q_{peak} = C_D A_h P_1 \sqrt{\frac{\gamma M}{RT_1} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \tag{2}$$

식 (2)로부터 순수한 메탄이 7 MPa 압력으로 운전되는 배관의 1 인치 누출공으로부터 방출되는 메탄의 누출속도(Q_{peak})는 4.08 kg/s로 계산되었다.

2-4. 화염길이 모델

제트화재 발생시 그 화염길이에 대해서는 Bagster과 Schubach [11]가 상세히 검토하였는데, 누출구경이 작은 경우에는 HWH 모델(Hawthorne, Weddell and Hottel, 1949)과 H&S모델 (Hostad and Sonju, 1985) 모델이 적합하다고 평가하였다. 그 이유는 HWH 모델은 0.12~0.3 인치의 작은 직경의 누출, H&S모델은 2~80 mm의 누출공의 실험 데이터를 사용하였기 때문이다[11]. 다만 HWH 모델이 H&S 모델 보다는 조금 더 보수적인(화염길이가 긴) 결과를 나타내므로 여기서는 HWH모델을 사용하였다. 피해영향 평가방법에 대한 전반적인 방법론에 대해 설명하고 있는 미국 화학공학회 공정안전센터 (CCPS, center for chemical process safety) 가이드라인[12]에도 천연가스 누출에 대한 화염길이 모델로 HWH 모델을 추천하였다. 따라서 본 연구에서도 HWH 모델을 이용하여 화염길이를 계산하였는데 식 (3)와 같다.

$$\frac{L}{d_j} = \frac{5.3}{C_T \sqrt{\alpha T}} \sqrt{\frac{T_f/T_f}{C_T + (1-C_T) \frac{M_a}{M_f}}} \quad (3)$$

순수한 메탄이 직경(d_j) 0.025 m의 누출공을 통해 분출될 때 제트화재 화염(L)의 길이는 약 5.0 m로 계산된다.

2-5. 제트화재 모델

2-5-1. 제트화재 모델 선정

복사열의 강도는 통상 단위면적당 복사열의 양을 나타내는 복사열 플럭스(radiative flux)으로 표현된다. 실제 제트화재 시 그 화염에서 일정 거리에 있는 수용체(receptor)가 받는 복사열은 화염의 형상에 의존한다. 그러나 실무적으로는 화염의 형상을 고려하지 않고 수용체가 받는 복사열 플럭스는 화염 중심의 한 점에서 방출된다고 가정하는 점누출원(point source) 모델을 주로 사용한다. 본 연구에서도 이 모델을 채택하였다. 화염과 수용체와의 거리는 Fig. 2와 같이 수직방향 화염에 대해서는 화염의 중심에서 수용체까지의 거리를 사용하였으며, 수평방향 화염에 대해서는 화염의 끝에서 수용체까지의 거리를 사용하였다. 수평방향 화염의 경우 수용체의 관점에서 보면 화염의 끝부분이 복사열을 방사하는 점으로 간주될 수 있다.

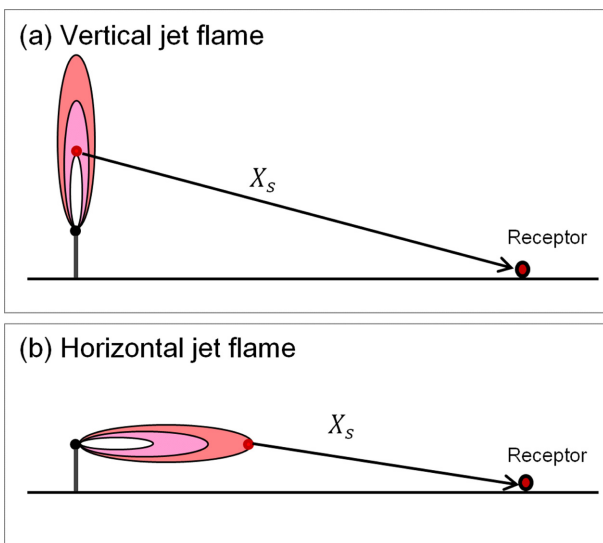


Fig. 2. Geometry for radiant flux from a jet fire.

점누출원 모델에 따른 복사열 플럭스(thermal radiation flux)는 식 (4)으로부터 계산될 수 있다[12].

$$E_r = \tau_a \eta \dot{m} \Delta H_c F_p \quad (4)$$

2-5-2. 대기투과도

대기 투과도(τ_a)는 수증기 분압과 화염, 수용체 간 거리에 의존하는데 다음 식 (5)로 계산된다.

$$\tau_a = 2.02(P_w X_s)^{-0.009} \quad (5)$$

여기서, P_w 는 수증기의 분압으로서 상대습도(RH)와 대기온도를 입력하여 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_w = 101325(\text{RH}) \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{T_a}\right) \quad (6)$$

2-5-3. 복사열로 전환된 에너지의 분율

연료가스의 전체 연소에너지 중 복사열로 전환된 분율은 통상 0.15-0.35의 값을 가진다. Mudan and Croce[13]은 수소 0.2, 메탄 0.2, 에틸렌 0.25, 프로판 0.3, 부탄 0.3을 제안하였다. CCPS[12]에 따르면 불완전 연소로 인해 이 값에 0.67을 곱한 값(메탄에 대해서 0.134)을 사용할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 천연가스의 주성분이 메탄이므로 메탄의 연소시 복사열로 전환된 에너지의 분율인 0.134를 사용하였다.

2-5-4. Point source view factor

점누출원 모델의 식 (3)에 사용되는 변수인 view factor (F_p)는 다음의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$F_p = \frac{1}{4\pi X_s^2} \quad (7)$$

2-5-5. 허용가능 복사열 플럭스 판단기준

고압 천연가스 배관에 대한 위험거리 설정에 관한 기존 연구결과를 살펴보면 Stephens[74]은 수평거리 설정을 위한 위험거리 판단은 1% 사망확률을 가지는 복사열 플럭스를 위험거리 설정을 정하는데 사용하였다. 복사열 플럭스에 따른 사망확률(P)은 Finny[14]가 제안한 프로비트(Probit)와 사망확률과의 관계식인 식 (8)로부터 구할 수 있다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (8)$$

여기서, Pr은 Probit 변수로서, 평균이 5이고 표준편차가 1이며, u는 적분 변수이다. 또한, 복사열에 대한 프로비트 모델은 식(9)과 같이 Eisenberg[15]가 제안한 모델을 사용하였다.

$$\text{Pr} = -14.9 + 2.56 \ln\left(\frac{tI^{4/3}}{10^4}\right) \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에서 알 수 있듯이 복사열에 의한 사망확률은 복사열 플럭스(I)와 복사열에 노출된 시간(t)에 의존하는데 식 (8)의 사망확률을 1%로 가정하면 복사열 플럭스에 따른 허용 노출시간과의 관계를 도식화 할 수 있는데 Fig. 3에 이 관계를 나타내었다. Stephens[7]은 위험거리 산정을 위한 복사열 노출시간으로 30초를 가정하였는데 그 근거로 화재가 발생하면 화재 주변 사람이 5초간 원래자리에서

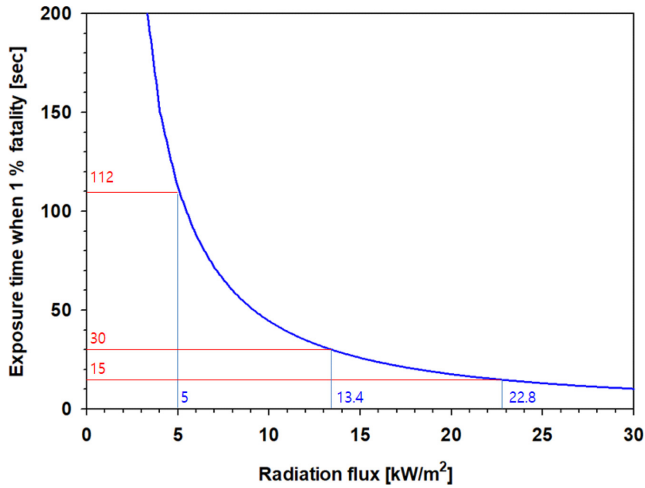


Fig. 3. Radiation flux vs. Radiation exposure time corresponding to 1% fatality.

머뭇거리다가 2.5 m/s 속도로 60 m를 이동하는데 소요되는 시간을 가정한 결과이다. 참고로 사망확률 1%를 가정하면 복사열 플럭스는 13.4 kW/m²에서의 허용노출 시간은 30 초이다. Stephens은 복사열 노출시간을 30초, 1% 사망확률을 가정한 후 이에 관계된 복사열 플럭스가 미치는 영향거리를 산정하였는데 이 결과는 미국의 천연가스수송배관의 안전에 관한 연방규정 중 49CFR 192.903에 잠재피해반경(PIR, Potential Impact Radius)을 산정하는 데 그대로 사용되었다.

복사열 노출시간 즉, 피난에 소요되는 시간에 대해서는 네덜란드 TNO Green Book[16]에 잘 설명되어 있는 데 이 문헌에 따르면 일반적인 사람은 화재와 같은 비상상황 발생 시에 5~10 초 안에 대피를 위한 행동을 취할 수 있으며, 초당 2~4 m의 속도로 대피할 수 있다고 설명하였다. 이는 Stephens[7]이 제안한 것과 같이 비상대응을 위해 행동을 취하는 데 5초가 소요되며, 초당 2.5 m의 속도로 이동할 수 있다고 한 가정이 충분히 보수적이라는 것을 보여준다. 산업단지와 같은 공업지역에서 공장 등 사업체 종업원 들은 어린이, 노약자 등과 달리 사고발생시 비상대피에 제약사항이 없다고 간주될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공업지역 종업원에 대해서는 위 Stephens이 위 가정을 그대로 사용하였다. 다만 Stephens[7]이 사용한 24 인치 누출 시나리오보다는 누출공 크기가 훨씬 작은 1 인치 누출에 의한 제트화재 시나리오를 사용하므로 수평누출일 경우에도 25 m 정도만 이동하면 누출원(화재원)에서 떨어지면 일반 공중에 허용되는 복사열 플럭스인 5 kW/m² 이하인 곳으로 벗어날 수 있다. 따라서 공업지역 종업원에 대해서는 사고 시 원래자리에서 5 초 동안 머뭇거리다가 2.5 m/s 속도로 25 m를 벗어나야 하는 시간인 10 초를 더하여 15 초를 복사열 노출시간으로 가정하였다. 이때 식 (8)과 식 (9)로부터 사망확률 1%에 이르는 복사열 플럭스를 구하면 22.8 kW/m²로 계산된다. 따라서 공업지역에 설치된 배관으로부터 타 시설 간에 이격해야 하는 최소 거리를 정하는 판단기준으로 최대 허용 복사열 플럭스 값으로 22.8 kW/m²을 사용하였다. 한편, Stephens[7]은 22.8 kW/m²보다 더 높은 25.24 kW/m²의 복사열 플럭스에서도 목재 건물에 자발적인 착화가 일어나지 않을 것으로 평가하였으므로 22.8 kW/m²은 사람뿐만 아니라 건물에 대해서도 화재피해를 유발하지 않는 복사열 플럭스 기준으로 볼 수 있다.

한편, 공업지역 외의 주거지역, 상업지역에는 학교, 병원 등이 위치할 수 있으며, 이 경우 어린이와 노약자처럼 대피에 다른 사람의 도움이 필요한 경우는 15 초 안에 위험지역을 완전히 벗어나는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 어린이와 노약자가 대피하는 데 소요되는 시간을 가정하는 대신 해외 허용 복사열 플럭스 판단기준을 토대로 대피시간을 추정해 보았다. 영국 HSE[17]에서는 통상적으로 피난이 가능하다고 판단하는 복사열 플럭스를 5 kW/m² 이하로 보고 있으며, 대피하지 못하고 죽음에 이르는 복사열 강도는 37.5 kW/m²를 제시하고 있었다. 미국 석유협회에서 발간한 API RP 521[18]에서는 건물 밖에서 적당한 옷을 걸친 상태에서 몇 분 동안 비상대응을 할 수 있는 복사열 플럭스 한계를 4.73 kW/m²으로 설정하고 있다. 미국 화재방재협회에서 발간한 NFPA 59A[19]에도 소유자의 토지경계 선까지 또는 건물 외부에 있는 50 인 이상의 사람이 모일 수 있는 지역에 이르는 복사열 한계를 5 kW/m²로 설정하고 있다. 한편, 식 (8)과 식 (9)로부터 5 kW/m²에 노출되는 경우 1% 사망에 이르는 시간을 역으로 계산하면 약 112 초였다. 이는 5 kW/m²의 복사열 플럭스에 노출되는 경우 112초 안에 대피를 통해 위험범위를 벗어나야 99% 생존할 수 있음을 의미한다. 본 연구에서도 일반 주거, 상업 지역에서 수평거리를 산정하기 위한 허용가능 복사열 플럭스 판단기준으로 5 kW/m²을 가정하였다.

3. 결과 및 분석

Fig. 4에 누출원으로부터 피난에 허용되는 최소시간으로부터 허용가능 복사열 플럭스 판단기준을 구분하여 도식화하여 나타내었다. 누출원으로부터 37.5 kW/m²의 복사열 플럭스가 미치는 거리(반경) 내에는 대피가 어렵다. 22.8 kW/m²의 복사열 플럭스가 미치는 위치에서 15초 머무는 사람(공업지역 종사자)의 사망확률이 1%이며, 마찬가지로 5 kW/m²의 복사열 플럭스에서 미치는 거리에서 112초 동안 머무는 사람(비공업지역 일반 대중)의 사망확률도 1%이라는 것을 의미한다. 한편 앞서 설명한 바와 같이 공업지역 종사자가 비상 대피하는 경우 해당 복사열이 미치는 위치에서 5초 동안 머물다가 나머지 10초 동안은 복사열을 피해 이동하게 되는 데 열원으로부터 점점 멀어져 복사열 플럭스도 줄어들게 된다. 본 연구에서는 복잡함을 피하기 위해 대피에 소요되는 전체 시간동안 같은 복사열 플럭스를 받는다고 가정하였으나 이동 중 복사열 플럭스가 줄어드는 효과까지 감안한다면 실제 대피 중인 사람의 사망확률은 1%는 상당히 낮을 것으로 것을 추정할 수 있다.

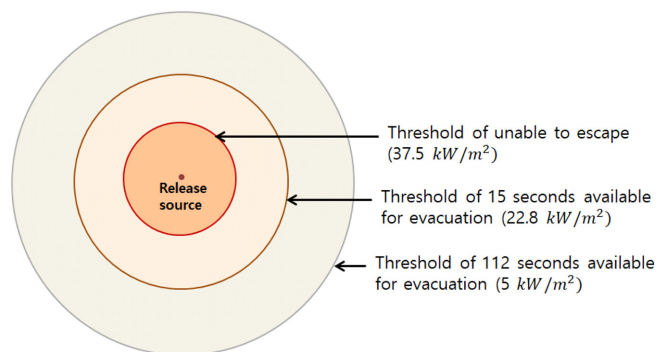


Fig. 4. Illustration of the threshold of the time available for evacuation.

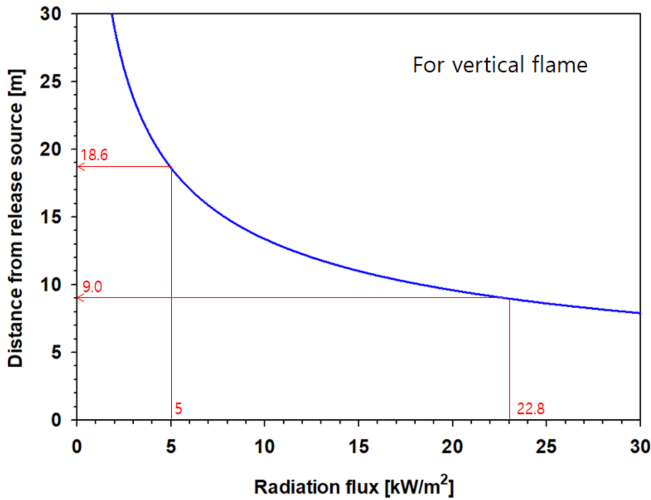


Fig. 5. Distance affected by radiation flux emitted from horizontal jet flamet.

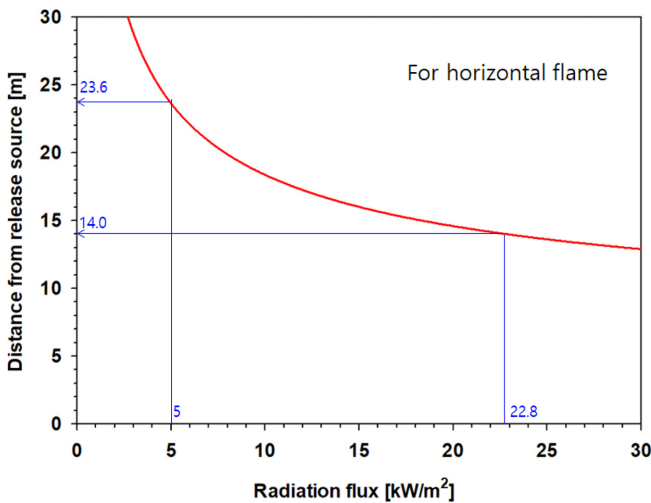


Fig. 6. Distance affected by radiation flux emitted from horizontal jet flame.

앞서 설명한 바와 같이 고압 지상 천연가스 배관에서 발생 가능한 합리적 사고 시나리오로 1 인치 피팅라인이 파손되어 가스가 누출되면서 화재가 발생한 사건을 선택하였다. 화재가 발생하면 화염의 중심으로부터 거리가 멀어질수록 복사열 플럭스는 줄어들게 된다. 수직화염을 가정하였을 때 식 (4)로부터 누출원으로부터의 거리에 따른 복사열 플럭스 계산결과를 Fig. 5에 나타내었다. 공업지역의 허용 복사열 플럭스인 22.8 kW/m²에 이르는 거리는 9 m이며, 주거, 사업지역 등 공업지역 외 지역의 허용 복사열 플럭스인 5 kW/m²에 이르는 거리는 18.6 m로 계산되었다. 한편, 수평방향 화염을 가정하였을 때 누출원으로부터의 거리에 따른 복사열 플럭스를 Fig. 6에 나타내었다. 공업지역의 허용 복사열 플럭스인

22.8 kW/m²에 이르는 거리는 14 m이며, 주거, 사업지역 등 공업지역 외 지역의 허용 복사열 플럭스인 5 kW/m²에 이르는 거리는 23.6 m로 계산되었다. 이 값은 수직화염에 대한 계산 결과보다 각각 5 m만큼 더 긴 거리인데 Fig. 2에 제시된 바와 같이 수평방향 화염은 화염길이(5 m) 끝 부분을 복사열 발생 점원(point source)으로 가정하였기 때문이다. 실제 정압기지 내의 지상배관에서는 수직방향과 수평방향 화염 모두 발생 가능한 시나리오다. 여기서는 주변 사람에게 더 큰 피해를 유발할 수 있는 수평누출에 따른 화재 시나리오를 이격거리 산정에 고려하였다.

공업지역에 상주하는 종사자들은 1인치 라인의 수평누출 화재시 22.8 kW/m²의 복사열 플럭스가 미치는 누출원으로부터 14 m 떨어진 곳에서 15 초 이내 피난할 경우 사망피해 없이(엄밀하게는 사망 확률 1%이하) 위험지역을 벗어 날 수 있다. 따라서 공업지역에서 배관으로 부터의 최소 이격거리인 수평거리를 계산된 14 m에 안전을 1 m를 더한 15 m를 수평거리로 제안하였다. 다만, 공업지역 외의 지역에서는 노약자, 어린이 등 대피가 어려운 사람은 동일한 화재 시나리오 발생시 5 kW/m²의 복사열 플럭스가 미치는 누출원으로부터 23.6 m 떨어진 곳에서 112 초 안에 피난할 경우 역시 위험지역을 벗어 날 수 있는 것으로 계산되었다. 공업지역 외의 지역에서는 계산된 이격거리(23.6 m)는 기존 기준(30 m) 보다 6.4 m 적게 계산되었지만 앞서 설명한 바와 같이 노약자, 어린이 등이 대피하기에 112 초가 충분한 지에 대해 근거가 부족하고 논란이 있을 수 있어 기존 수평거리 기준(30 m)을 유지할 것을 제안하였다.

Table 1에 공업지역과 비공업지역을 비교하여 요약하였다. 일반 공중이 거주할 수 있는 주거지역, 상업지역 등 비공업지역에 비해 공업지역 종사자는 비상시 대피에 소요되는 시간이 더 짧다는 데 근거하여 계산된 이격거리를 참조하여 공업지역에 한해 수평거리를 기존 30 m에서 15 m로 줄일 수 있도록 제안하였다. 제안된 것처럼 공업지역과 비공업지역을 구분하여 안전 수준을 규제하는 사례는 해외에서도 찾을 수 있는데 미국 화학공정안전센터 가이드라인[20]에는 일반 공중(public)에 대한 허용 개인적 위험보다 사업장(work place)에서의 최대 허용위험을 1/10 수준으로 낮게 설정하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지상의 고압 천연가스 배관으로부터 주변 시설물과 유지하여야 하는 최소 이격거리(수평거리)를 설정하기 위한 접근 방법으로 합리적인 시나리오에 따른 피해거리를 선정하였다. 합리적인 시나리오는 온도, 압력, 유량 등의 측정을 위한 각종 계측을 위해 부착된 1인치 분기라인의 파손을 가정하여, 누출속도와 착화로 인한 제트화재 시 누출원으로부터의 거리에 따른 복사열 플럭스를 구하였다. 또한 공업지역 내 종사자는 일반 대중들 보다 더 짧은 시간 안에 비상 대피가 가능하다고 가정될 수 있으므로 비공업지역 보다 더 높은 복사열 플럭스 판단기준을 적용하여도 비상대피가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 이는 종사자가 누출원인 배관으로부터

Table 1. Calculated and suggested minimum separation distance for high pressure natural gas pipeline installed above ground

	Industrial area (Assumed evacuation is possible)	Non-industrial area (Assumed evacuation is not possible)
Suggested radiation flux criterion	22.8 kW/m ²	5.0 kW/m ²
Time to escape	15 seconds	112 seconds
Calculated hazardous distance	14.0 m	23.6 m
Suggested minimum separation distance	15 m	30 m

터 기존 30 m보다 더 짧은 거리인 15 m에 위치하더라도 사고 시 비상대피가 가능함을 의미한다. 이러한 계산결과를 토대로 공업지역에 설치된 배관에 한해 타 시설물과 유지하여야 하는 최소 거리를 기존 30 m에서 15 m로 줄일 수 있도록 가스기술기준의 개정을 제안하였으며, 이 제안된 개정안은 가스기술기준위원회에서 채택되어 현재 시행중이다. 이를 통해 공업지역에 설치된 정압기지, 밸브기지 내 지상 고압 천연가스 배관을 설치한 후 부지경계 밖에 공장, 창고 등 시설물이 들어섬에 따라 의도치 않게 수평거리 유지기준 준수가 어렵게 되는 문제를 일부 해소할 수 있었다.

Nomenclatures

- A_h : Area of the release hole = $4.9 \times 10^{-4} \text{m}^2$ for this study
- BPD_{min} : Minimum building proximity distance [m]
- C_D : Discharge Coefficient = 0.7 for this study
- C_T : Fuel mole fraction concentration in a stoichiometric fuel air mixture = 0.095 for methane
- d_j : Diameter of the nozzle, 0.025 m for this study
- E_r : Thermal flux received at the target [kW/m^2]
- F_p : Point source view factor
- ΔH_c : Heat of combustion $\approx 50,000$ [kJ/kg] for natural gas
- I : Radiation flux [kW/m^2]
- \dot{m} : Mass flow rate = Q_{peak} [kg/sec]
- M_a : Molecular weight of the air = 29 kg/kmol for this study
- M_f : Molecular weight of the air ≈ 16 kg/kmol for methane
- P_1 : Pressure upstream of the hole [N/m^2] = 7×10^6 Pa for this study
- P_{op} : Operating pressure [bar]
- Pr : Probit variable
- P_w : Partial pressure of water
- Q_{peak} : Peak discharge rate [kg/s]
- R : Ideal gas constant = 8314 N-m/kg-kmol
- RH : Relative humidity = 50% for this study
- T_1 : Initial upstream temperature = 295 K for this study
- T_F : Adiabatic flame temperature ≈ 2200 K for methane
- T_j : Jet fluid temperature = 298 K for this study
- t : Exposed time [sec]
- u : Integration variable for Probit model
- X_s : Radiation path length [m]
- α_T : Moles of reactants per mole of product for a stoichiometric fuel air mixture = 1 for methane
- γ : Heat capacity ratio ≈ 1.3 for methane
- η : Fraction of total energy to radiation [unitless]
- τ_a : Atmospheric transmissivity [unitless]

References

1. KGS Code, KGS FS451, Facility/Technical/ Inspection/ Safety Diagnosis/Safety Assessment Code for Pipelines outside Manufacturing Plants and Supply Stations for Wholesale Gas Busi-

- ness, Korea Gas Safety Code(2018).
2. IGEM, Steel Pipeline for High Pressure Gas Transmission, Recommendation on Transmission and Distribution, IGE/TD/1 Edition 4, The Institution of Gas Engineers(2015).
3. Swiss Gas Industry, Framework Report on High-pressure Gas Facility Safety, Revised Edition 1997, Swissgas, Zurich, Switzerland(1997).
4. TRB, Transmission Pipelines and Land Use – A Risk-Informed Approach, Special Report 281, Transportation Research Board of The National Academies(2004).
5. Christou, Michalis D., Amendola, A. and Smeder, M., “The Control of Major Accident Hazards: The Land-use Planning Issue,” Journal of Hazardous Materials, **65**, 151-178(1999).
6. NTSB, Pipeline Accident Report - Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico August 19, 2000, National Transportation Safety Board, NTSB Report No. NTSB/PAR-03/01(2003).
7. Stephens, M. J., “A Model for Sizing High Consequence Areas Associated with Natural Gas Pipelines,” Gas Research Institute, GRI Report No. GRI-00/0189(2000).
8. Kim, J.-H. and Jung, S.-H., “Offsite Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride (HF) Release Scenarios,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(4), 582-585(2016).
9. Park, K.-S., “Offsite Risk Assessment on Chloric Acid Release,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(6), 781-785(2016).
10. Crowl, D. A. and Louvar, J. F., Chemical process safety, fundamentals with applications, 2ed., New Jersey: Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences (2002).
11. Beater, B., Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Control, Springer, ISBN 3540694706(2007).
12. CCPS, Guidelines for consequence analysis of chemical releases, New York, New York: Center for chemical process safety of the AIChE(1999).
13. Mudan, K. S. and Croce, P. A., Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, Section 2:45-87(1990).
14. Finney, D. J., Probit analysis, Cambridge University Press(1971).
15. Eisenberg, N. A., Lynch, C. J. , and Breeding, R. J., Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills, CG-D-136-75 and NTIS AD-015-245, U.S. Coast Guard(1975).
16. TNO, Methods for the Determination of Possible Damage: to people and objects from releases for hazardous materials (The Green Book), CPR 16E, 1st Edition, The Netherlands Organization of Applied Scientific Research(1992).
17. HSE, Fire Effects, <http://www.hse.gov.uk/offshore/strategy/effects.htm>, retrieved Nov. 2018.
18. API, A Guidance Manual for Modeling Hypothetical Accidental Release to the Atmosphere, Americal Petroleum Institute, Washington D.C.(1996).
19. NFPA, Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG), National Fire Protection Association, NFPA 59A-11(2006).
20. CCPS, Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment, Center for chemical process safety of the AIChE (2001).