



## 도심지 하천매설배관의 위험성 평가에 관한 연구

박우일\*,\*\* · 유철희\* · 신동일\*\*\* · 김태옥\*\*\* · †이효렬\*

\*한국가스안전공사 가스안전연구원, \*\*명지대학교 재난안전학과 석사과정, \*\*\*명지대학교 교수  
(2019년 12월 10일 접수, 2020년 3월 12일 수정, 2020년 4월 11일 채택)

### A Study on the Risk Assessment of River Crossing Pipeline in Urban Area

Woo-Il Park\*,\*\* · Chul-Hee Yoo\* · Dong-Il Shin\*\* · Tae-Ok Kim\*\* · †Hyo-Ryeol Lee\*

\*Institute of Gas safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

\*\*Dept. of Disaster and Safety, Myongji University, Yongin, Gyeonggido 17058, Korea

(Received December 10, 2019; Revised March 12, 2020; Accepted March 11, 2020)

#### 요약

본 연구에서는 도심지 국가하천을 지나는 도시가스 고압 배관에 대하여 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 위험성 평가는 최악의 시나리오 조건에서 실제 도시가스 물성, 교통량과 인구 · 기상 데이터를 기반으로 수행하였으며, 평가 결과 사회적(societal) 위험도와 개인적(individual) 위험도는 조건부 허용영역에 위치하는 것을 확인하였다. 이는 하천매설 배관의 시공 시 당시 보호관으로 보호하거나 방호구조물 안에 설치한 것에 따른 위험 경감 효과가 고려되지 않은 위험성 평가 결과에 반영되지 않은 점을 고려한다면 보다 안전하다고 판단할 수 있다. 또한, SAFETI v8.22를 활용하여 복사열에 의한 사고 피해 거리와 확산 거리 등이 풍속과 대기안정도의 변화에 따른 영향을 분석하였다. 결과적으로 위험성 평가 결과 현재까지 배관의 안전성은 확보되어 있으나, 주기적인 점검과 모니터링을 통해 하상 변동을 포함한 예상치 못한 사고를 방지하는 등 안전성 향상방안을 제언한다.

**Abstract** - In this study, quantitative risk assessment was carried out for city gas high-pressure pipelines crossing through urban rivers. The risk assessment was performed based on actual city gas properties, traffic volume and population and weather data in the worst case scenario conditions. The results confirmed that the social and individual risks were located in conditionally acceptable areas. This can be judged to be safer considering that the risk mitigation effect of protecting the pipes or installing them in the protective structure at the time of the construction of the river buried pipe is not reflected in the result of the risk assessment. Also, SAFETI v8.22 was used to analyze the effects of wind speed and pasquil stability on the accident damage and dispersion distances caused by radiation. As a result of the risk assessment, the safety of the pipelines has been secured to date, but suggests ways to improve safety by preventing unexpected accidents including river bed changes through periodic inspections and monitoring.

**Key words** : risk analysis, pipeline, SAFETI, leak frequency, consequence

†Corresponding author:hrlee@kgs.or.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

현재 국내에서는 하천구역을 횡단하는 배관 설치 시 교량에 설치하도록 되어 있다. 다만 현장 여건상 교량에 설치할 수 없는 경우에는 하천 밑을 횡단하여 매설할 수 있으며, 하천 등급에 따라 매설 심도를 구분하여 규정하고 있다. 국가하천 및 지방 1·2급 하천의 경우 매설 심도는 4.0 m 이상, 소하천·수로의 경우에는 2.5 m 이상, 경암으로 이루어진 하천과 기타 하천은 1.2 m 이상으로 유지하도록 규정되어 있다.

하지만 배관이 퇴적층에 매설되는 경우 하천의 유량에 의한 영향은 크지 않으나 퇴적물의 하중에 의한 영향이 지배적이며, 침식층에 매설되는 경우에는 토양 자중에 의한 영향은 배제되지만, 지속적인 침식으로 배관의 노출, 유체의 항력과 부력에 의한 하중이 작용하여 안전성에 위협을 받는다. [1] 뿐만 아니라 홍수, 지진과 같은 천재지변, 하천 정비 등에 의한 공사로 배관이 파손될 우려가 있다. 이에 국외 기준의 경우 하천횡단 설계 시 예측 가능한 사고 발생 가능성과 피해 영향을 확인하여 위험 경감조치를 취하고 있다. [2]

본 연구에서는 국내 매설되어있는 1000여개의 하천횡단 매설 배관 중 도심지에 인접한 대상 지역을 설정하고, 정량적 위험성 평가 소프트웨어인 SAFETI V8.22를 활용하여 사고 발생 시 피해 영향을 분석하였다. 위험성 평가 결과 위험도가 높은 지역의 경우에는 위험 경감조치 및 안전성 향상방안을 제시하였다.

## II. 연구 배경

### 2.1. 국외 기준 조사

해외에서 하천횡단 매설 배관 설치 시 안전성 검토 및 위험 관리를 의무적으로 시행하도록 하고 있다. 미국의 경우 배관 위험 관리 기준인 API RP1133에 따라 하천횡단의 매설 배관의 위험과 잠재적 손상 메커니즘, 수명주기 관리 및 운영들을 규정하고 있다. 영국의 경우 공급 배관 기준인 IGE TD/3에 따르면, 하천횡단 배관 설계 시 예측 가능한 사건의 발생 가능성과 그 사건에 따른 피해 영향을 확인하며, 확인된 위험을 경감할 것으로 규정하고 있다. 호주의 경우 배관 설계 및 설치기준인 AS 2885.1에 따르면 모든 배관 경로에 대해 환경영향평가를 실시해야 하며, 하천횡단의 경우 지질학적, 수리학적 조사를 한 후 침식을 고려하여 설계하도록 규정하고 있다. 마지막으로, 캐나다의 경우 배관 설계, 설치, 유지관리 기준인 CSA Z662-15에 따

라 하천횡단을 포함한 배관을 건전성 관리 프로그램에 따라 위험을 관리하고 있다.[3]

국내 기준의 경우에는 하천횡단 매설 배관에 대해 설계 전 위험성 평가나 피해 영향을 확인하지 않고 있으며, 더불어 위험 등급 분류에 따른 매설 심도 선정에 대한 상세기준을 제시하지 않고 있어 국외 기준과의 부합화가 요구되는 상황이다. 본 연구에서는 도심지와 인접하여 상대적으로 위험도가 높은 하천횡단 매설 배관에 대해 위험성 평가를 실시하여 피해 영향 분석을 통한 안전성 향상방안 강구 및 기준 부합화를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

### 2.2. 위험성 평가 체계

위험성 평가란 시설에 존재하는 다양한 위험성(hazard)을 인지하고 그에 따른 위험(risk)을 분석·평가하여 이를 안전하게 관리(control)하기 위한 적합한 방법을 결정하는 과정을 말한다.[4]

위험성 평가의 일반적인 절차는 위험요소 확인과 사고시나리오 수립, 설정된 사고시나리오에 대한 빈도 분석과 결과분석, 개인적/사회적 위험도 분석, 위험감소 방안 수립으로 정리된다. 위험요소를 확인하는 단계에서는HAZOP과 같은 정성적 평가기법이 적용될 수 있으며 사고빈도 분석은 통계 데이터나 FTA(Fault Tree Analysis) 분석 기법 등이 적용된다. 사고결과분석은 누출 등 사고시나리오에 근거하여 거리별 복사열이나 폭발 압력 피해 규모를 해석하고 사람이나 건물의 피해 정도를 산정한다. 즉, 사고빈도, 사고결과 분석 기반에 기하학적 위치, 기후 영향을 연계하여 개인적 위험도나 사회적 위험도를 계산한다.[5] Fig. 1은 국내의 도시가스배관 위험성평가 지침에 사용되는

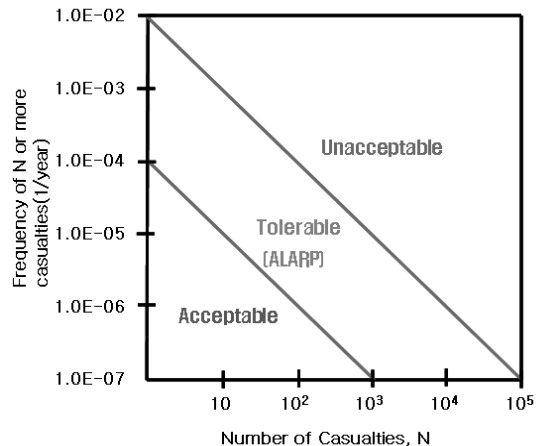


Fig. 1. Societal risk criteria.

위험기준(risk criteria)을 나타낸 것이며, 위험도의 크기에 따라 허용영역(Broadly acceptable region), 허용불가영역(Unacceptable region) 및 조건부 허용영역(Tolerable region or ALARP)으로 구분한다.[6] 위험기준과 계산된 결과를 비교하여 위험도가 높을 경우 위험도 경감조치를 통한 안전성 향상이 요구된다.

본 연구에서는 앞서 기술한 위험성 평가 절차와 같이 평가대상을 선정하고, 그에 대한 인구·기상 및 교통량 자료수집, 최악의 사고시나리오 구성, 사고 발생빈도 및 피해분석, 위험도 계산 및 판단, 위험의 허용 여부를 결정하는 순서로 연구를 수행하였다.

### III. 위험성 평가 시나리오의 구성

#### 3.1. 사고시나리오 구성

사고시나리오는 한국산업안전보건공단의 “최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침”에 따라 배관에서 가스가 누출 및 점화로 인해 화재가 발생하는 경우 피해 범위, 복사열에 의한 사회적(social)

**Table 1.** Composition of natural gas for risk analysis

성분	단위분자량 (kg/kmol)	조성(%)
CH <sub>4</sub>	16.043	91.33
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	36.069	5.36
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.096	2.13
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	0.45
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	0.017
N <sub>2</sub>	28.013	0.217



**Fig. 2.** Conditions of risk analysis for river crossing pipeline.

위험도를 나타내는 F-N curve 등을 확인하고자 한다.

Fig. 2는 정량적 위험성 평가대상으로 선정된 도시지 A에 하천을 횡단하는 도시가스 공급배관과 인접도로, 거주 지역 등의 조건을 SAFETI V8.22에 입력한 결과를 나타낸 것이다. 배관의 관경은 20 in, 두께는 7.9 mm, 배관 사용 년 수는 33년이며, 유량은 사용량에 따라 유동적으로 변하기 때문에 15 kg/s로 가정하였다.

매설 배관에서 발생 가능한 최악의 사고 및 최악의 사고 보다 발생빈도가 높은 소·중 규모의 사고를 포함하여 시나리오를 구성하였다. 사고 시 발생하는 누출공의 크기는 발생빈도에 따라 소, 중, 대로 나뉘었으며, 소누출의 경우 누출공의 크기를 1 cm, 중누출의 경우에는 10 cm, 대누출의 경우에는 배관이 파열되는 조건으로 선정하였다. 화재로 발생하는 복사열은 가연성 가스의 발열량과 밀접한 관계가 있으며, 보다 정확한 해석결과를 도출하기 위해 Table 1과 같이 도시가스 물성 정보를 입력하였다.[7]

#### 3.2. 사고 발생 빈도데이터

사고 발생빈도는 Table 2와 같이 한국가스안전공사의 2000-11 도시가스 고압배관의 안전성평가 지침 명시된 EGIG(The European Gas Pipeline Incident data Group)의 자료를 활용하였다.[8] 자료에는 사고 요인별 누출 양상과 사고빈도가 정리되어 있으며, 위험성 평가 시에는 각 누출공의 크기별 사고 발생빈도의 최악의 시나리오를 적용하였다. 즉, 소누출에서는 부식에 의한 사고, 중누출에서는 타공사를 포함한 외부간섭, 대누출은 지반이동이라는 사고 상황으로 가정하였다.

#### 3.3. 점화확률

하천횡단 매설 배관의 누출공에서 도시가스 누출이 발생 후 화재, 폭발로 이어지기 위해서는 점화원이 필요하다. 점화원은 일반적으로 나화, 고온의 열원 등 기계적 점화원, 정전기, 전기불꽃, 과전류 등의 전기적

**Table 2.** Failure frequency of pipelines[9]

Unit : 1/year · 1000km

Failure mode	Leak size		
	Pinhole/Crack	Hole	Rupture
External interference	0.0166	0.0195	0.0058
Construction defects	0.0224	0.0014	0.0022
Corrosion	0.0353	0.0007	0.0000
Ground movement	0.0065	0.0079	0.0065
Others/unknown	0.0123	0.0014	0.0007

점화원, 분해열, 융화열 등과 같은 화학적 점화원 등이 있으나, 배관의 매설 위치가 도로에 근접해 있어 운송 수단을 교통량에 따른 점화확률을 주요 점화원으로 선정하였다. TNO에서 발간한 “Purple book”의 통계 자료에 따르면, 일반적으로 운송 수단에 의한 가연성 가스의 점화확률은 노출 시간이 60초 일 때 약 40% 정도이다. 이는 가스가 누출된 후 증기운 내 자동차가 60초

동안 머물러 있을시 40%의 점화확률을 가진다는 의미이다.[10] 교통량은 서울열린데이터광장의 2019년 6월 자료를 활용하여 대상 지역 A의 교통량에 따른 점화확률을 적용하였다.[11]

Table 3. Meteorological data

Stability class	Wind speed <sup>(1)</sup>
B	medium
D	low
D	medium
D	high
E	medium
F	low

<sup>(1)</sup>Low wind speed corresponds with 1 - 2 m/s  
 Medium wind speed corresponds with 3 - 5 m/s  
 High wind speed corresponds with 8 - 9 m/s

3.4. 기상조건 및 인구 현황

대상 지역의 기상조건은 기상청의 최근 30년간 통계 데이터를 활용하였다. 그 중, 풍향별 발생빈도 Fig. 3에 도식화하여 나타내었다.[12] 풍속은 풍배도의 범위별 중간값을 대푯값으로 설정하였으며, 대기안정도(Pasquill stability)는 Table 3에서와 같이 평균 풍속 값에 대응하는 D를 사용하였다.

대상 지역에 거주하는 인구 현황 역시 통계청 자료 [13]를 사용하였으며, 일반적으로 생활 여건, 지역적 특성에 따라 주간, 야간의 상주인구가 다르므로 이를 구별하여 산정하였다. 주간은 06:00~18:00, 야간은 18:00~06:00으로 구분하였으며, 주거지역의 경우 주간은 총인구의 70%, 야간의 경우에는 99%가 상주한다고 가정하였다. 또한, 도심지 인근 지역의 하천에 설치된 산책로 이용인구를 주간 30명, 야간 150명으로 가정하였다.

Table 4. Populations with administrative district

‘A’ area	31,742
‘B’ area	24,429
‘C’ area	9,775

IV. 정량적 위험성 평가 해석 결과

4.1. F-N CURVE

Fig. 4는 A 지역의 하천횡단 매설 배관이 가지는 사회적 위험도 평가 결과를 나타낸 것이다. F-N 선도는 일어날 수 있는 사고의 누적 빈도(F)와 사고결과에 따라 발생 될 수 있는 예상 사망자 수(N) 사이의 관계를 나타낸 것으로, 주간, 야간 각각의 경우와 주·야간을 동시에 고려한 위험도를 나타내었다. 세 경우 모두 허용 불가영역을 넘지 않고 조건부 허용영역과 허용영역에 걸쳐 분포함을 확인할 수 있다. 야간의 경우 주간 대비 산책로 이용자의 수의 증가로 위험도가 가장 높게 나왔으나, 하천매설 배관을 보호하는 보호관 및 방호구조물 내부에 설치하여 위험성이 경감된 것을 고려하면 충분한 안전성을 가진 것으로 판단된다.

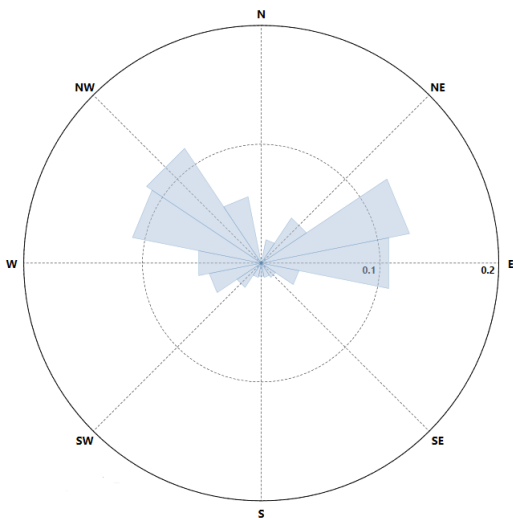


Fig. 3. The wind rose of urban area.

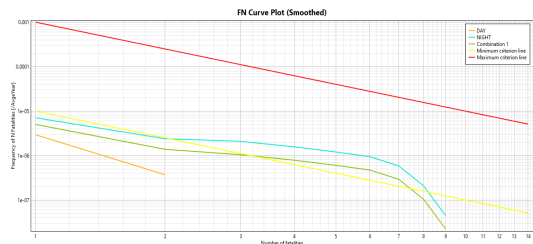


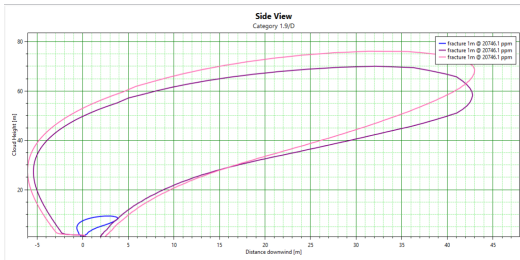
Fig. 4. Results of risk analysis(F-N Curve).

## 4.2. MULTI-LEVEL

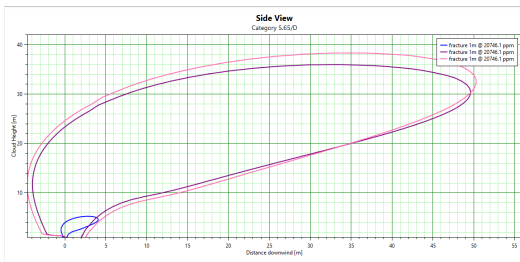
Risk 평가를 통해 실질적인 개인의 영향을 GIS 상에 나타내고 확인하였다. Fig. 5는 개인의 위험도를 GIS상에 1E-06 / Avge Year의 영향 범위를 기준으로



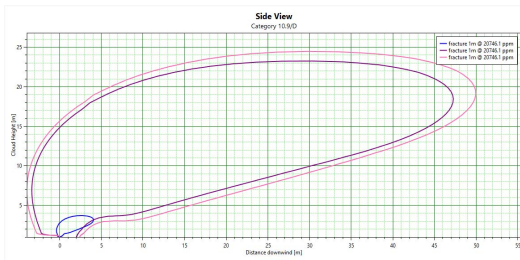
Fig. 5. Personal risk with release scenario (Multi-level).



(a)1.9/D Side View



(b) 5.65/D Side View



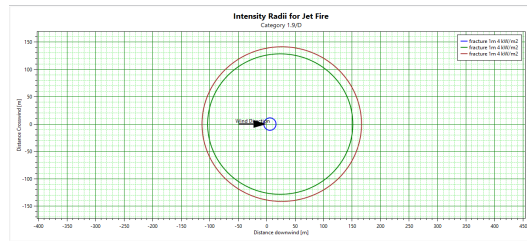
(c)10.9/D Side View

Fig. 6. Dispersion range with leakage hole and stability(Side view).

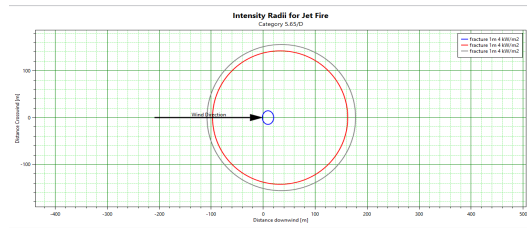
도식화하여 나타낸 것이다. 영향 범위의 경계면에서 배관으로 근접할수록 위험도는 증가하나, 주·야간 산책로의 인구 밀도별 개인의 위험도가 허용 불가 수준인 1E-03/AvgeYear 범위 내에는 존재하지 않았다. 이는 조건부 허용 가능 범위에 존재하며, 앞서 기술한 위험 경감조치와 더불어 안전관리자 선임, 차량순회 점검, 정밀안전진단 등의 조치로 개인의 위험도는 위험성 평가 보다 더욱 더 감소되리라 판단된다. 인근 주거지역의 경우 1E-06 / Avge Year 이하의 위험도를 가지며 피해 영향이 없는 것으로 확인된다.

## 4.3. SIDE VIEW

Fig. 6은 위험성 평가조건에 따라 매설 배관에서 발생하는 도시가스의 누출 범위를 나타낸 것이다. 확산 범위는 풍속의 영향이 지배적이며, 풍속이 강함에 따라 확산 높이는 낮아지고 거리는 증가하는 경향을 보인다. 중누출 이상의 조건에서 확산 범위는 거주지 인근까지 근접해지나 강한 풍속에 의한 희석, 환기 효과로 인해 가연성 가스가 장기간 체류하지 않아 피해 영향은 없을 것으로 판단된다.



(a)1.9/D



(b) 5.65/D



(c)10.9/D

Fig. 7. Intensity of radiation with conditions.

## V. 결론

본 연구에서는 위험성 평가를 통해 도심지의 하천 횡단 매설 배관 안전성을 확인하고, 필요 시 안전성 향상을 위한 대안을 마련하고자 하였다. 국내 도심지의 A에 위치한 국가하천을 횡단하는 배관을 대상으로 선정하였으며, 위험성 평가 결과 F-N curve의 위험도는 조건부 허용범위(ALARP) 내에 분포하는 것을 확인하였다. 인구에 직접적인 영향을 끼치는 위험 범위를 나타내는 Multi-Level의 분석결과 허용 불가 범위는 확인되지 않았으며, GIS 상에 표시된 영역은 조건부 허용범위 중 가장 높은 안전성을 보여주고 있음을 확인하였다. 지반이동으로 발생하는 대누출은 최악의 사고 시나리오에 해당하며 이 역시도 인근 거주 지역에 크게 영향을 미치지 않는 허용범위 내에 위치하였다.

위험성 평가 결과 일부 조건에서는 위험도가 조건부 허용범위로 나타나고 있으나, 실제 하천횡단 매설 배관 시공 시 보호관 등의 설치로 발생하는 위험성 경감 효과를 고려한다면 허용할만한 수준의 안전성을 확보하였다고 판단된다. 하지만, 세굴과 퇴적, 각종 하천 정비 등의 요인으로 하천 바닥 높이의 변동이 발생하게 되므로 매설 심도를 일정하게 유지하기는 매우 어려운 일이다. 이에 하천매설 배관의 안전성을 보다 향상시키기 위해서는 주기적인 하상고 측정 및 하상횡단면도 작성을 통한 매설 심도 관리, 안전진단을 통한 보수 계획 수립 등의 유지관리가 필요하다.

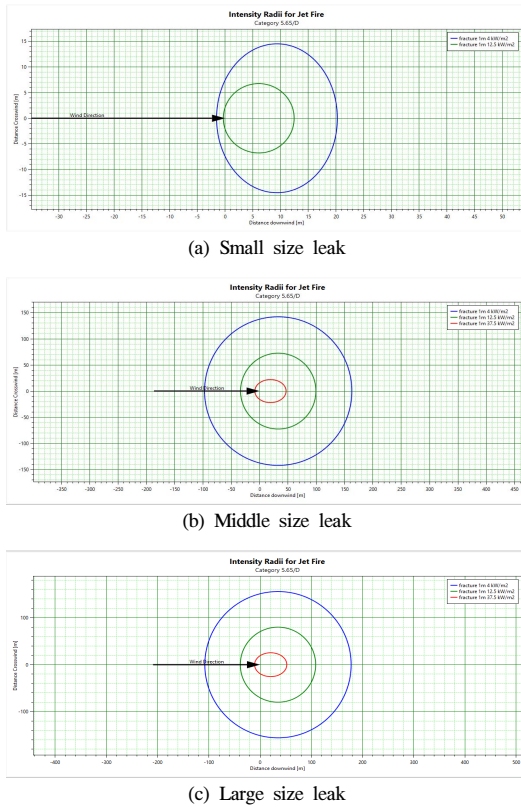


Fig. 8. Radiation Contour by size.

### 4.4. 피해 영향

Fig. 7은 누출공으로부터 누출된 가스가 가스 구름이 형성된 후 지면 점화가 발생하여 폭발(exposure)이 발생하는 경우의 피해 범위를 나타낸다. 소누출 경우 복사열이 사람에게 영향을 미칠 수 있는 강도( $4 \text{ kW/m}^2$ )는 약 20m, 중누출의 경우 약 150m, 대누출의 경우 약 170m까지 도달한다. 풍속이 강해질수록 최대 약 190m까지 도달하는 것으로 평가된다.

기상조건이 5.65/D일 때 각 누출공 크기별로 목재 등에 화염을 일으킬 수 있는 강도( $12.5 \text{ kW/m}^2$ )와 장비에 손상을 줄 수 있는 강도( $37.5 \text{ kW/m}^2$ )도 Fig. 8에 나타냈으며,  $12.5 \text{ kW/m}^2$ 의 복사열 강도에서 소누출 경우 약 13 m, 중누출의 경우 약 100 m, 대누출의 경우 약 110 m까지 도달한다.  $37.5 \text{ kW/m}^2$  조건에서는 소누출 경우 나타나지 않으며, 중누출의 경우 약 50 m, 대누출의 경우 약 60 m까지 도달한다. 따라서, 대표적으로 사람에게 영향을 미칠 수 있는 강도( $4 \text{ kW/m}^2$ )는 풍속이 강해질수록 최대 약 190m까지 도달하는 것으로 확인된다.

## REFERENCES

- [1] Lee, D. H., Jo, Y. D., Choi, S. C., Bang, H. J., Gong, J. S., and Ma, Y. H., "A study on the depth of cover for river-crossing pipelines", *Korea Institute of Gas*, 2010(5), 159-162, (2010)
- [2] The Institution of Gas Engineers, "Steel and PE pipelines for gas distribution", *IGE Code TD1, 4th ed.*, 1677, (2005)
- [3] Park, W. I., Jo, Y. D., Yu, C. H., and Ryou, Y. D., "Research and Analysis of International DOC (Depth of Cover) Standards for Installing City Gas Pipelines Crossing a River", *Korea Institute of Gas*, 2018(5), 106-106, (2018)
- [4] Ryou, Y. D., Chae, C. K., Kwak, C. S., Jo, Y. D., Yoon, Y. K., Lee, K. S., and Lee, S. K., "Comparison of Safety Measures to Installing High Pressure Pipelines in the Cities", *Korea Institute of Gas*, 2008(4), 316-322, (2008)
- [5] Yoon, Y. K., Oh, S. K., Seo, J. M., Lim, D. Y.,

- and Yoon, E. S., “A Development of System for Efficient Quantitative Risk Assessment on Natural Gas Supply Facilities”, *Korea Institute of Gas*, 2012(1), 39-45, (2012)
- [6] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 107 - 206 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침, (2016)
- [7] HSE, Guidance on ‘as low as reasonably practicable’(ALARP) decisions in control of major accident hazards (COMAH), <http://www.hse.gov.uk/comah/circular/perm12.htm>
- [8] 한국가스안전공사, 2000-11 도시가스고압배관의 안전성평가 지침, (2008)
- [9] European Gas Pipeline Incident Data Group, Gas Pipeline Incidents 10th Report 1970-2016, (2018)
- [10] P.A.M. Uijt de Haag and B.J.M. Ale, “Guideline for Quantitative Risk Assessment, ‘Purple book’ Exposure and Damage”, (2005)
- [11] 서울열린데이터광장, (2019)
- [12] 기상청, (2019)
- [13] 통계청, (2019)