

수소혼입 천연가스 배관망의 누출 특성 분석 및 누출 시나리오 선정에 관한 연구

탁송수^{1*} · 임기섭²

A Study on the Analysis of the Leakage Characteristics and the Selection of Leakage Scenarios of the Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline

Song Su Tak^{1*} · Ki Seop Lim²

*Corresponding Author

Song Su Tak

Tel : +82-43-880-3123

E-mail : gogaek7727@gmail.com

Received : January 15, 2024

Revised : February 3, 2024

Accepted : February 14, 2024

Abstract : This study analyzed cases of hydrogen (H₂) and natural gas (CH₄) leakage from a hydrogen-blended natural gas pipeline to determine a range of leakage characteristics, including leakage type, pipe material, pipe diameter, pressure, and damage size. Based on the results of this analysis, five hydrogen-blended natural gas leakage scenarios were selected. The national vision for a carbon-neutral society by 2050 is a very important strategic objective and promotes environmentally sustainable economic development in the age of the climate crisis. Accordingly, zero-carbon and low-carbon policies are being promoted in various fields, including energy production, consumption, and industrial processes. Hydrogen-blended natural gas is eco-friendly and is considered an important step towards carbon neutrality, with various countries including the United States and several European countries conducting empirical research to further investigate its potential. In Korea, a national research project commenced in April 2023 to verify and demonstrate the life cycle safety of blending hydrogen into the natural gas network. The results of this study will provide important data for the analysis of the damage impacts caused by the leakage of hydrogen-blended natural gas, such as the diffusion of gas clouds, fires, and gas explosions.

Key Words : carbon-neutral society, hydrogen-blended, natural gas, pipeline, leakage, gas leakage scenarios

Copyright©2024 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

정부는 2050 탄소중립 목표 달성을 위해 메탄가스를 주 원료로 하는 천연가스 배관망에 일정량의 수소를 혼입하여 공급함으로써 매년 증가하는 천연가스 사용량에도 불구하고 탄소배출량을 감축하는 방안을 모색하였다. 2021년 기준 국내 천연가스 소비량은 39,578천톤으로 전년대비 12.8% 증가하였으며, 도시가스용은 19,332천톤(48.8%), 발전용은 20,246천톤(51.2%)이다¹⁾.

우리나라의 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)는 2018년 727.6백만톤 대비 40% 감축한 436.6백만톤(CO₂e)이다²⁾.

정부는 제5차 수소경제위원회(2021.11.26.)를 통해 의결된 제1차 수소경제이행기본계획에 천연가스 배관망 수소혼입 과제를 반영하였다³⁾. 천연가스 배관망에 수소 혼입은 기존의 도시가스 배관을 활용한다는 점에서 가장 경제적이면서도 빠르게 탄소절감 목표를 달성하는 방법 중 하나로 볼 수 있다. 그러나 도시가

¹⁾국동대학교 친환경에너지공학과 교수 (Department of Green Energy Engineering, Far East University)

²⁾국동대학교 친환경에너지공학과 석사과정 (Department of Green Energy Engineering, Far East University)

스가 국민생활과 안전에 밀접하게 연관된 만큼 충분한 안전성과 내구성에 대한 사전 검증이 필수적임에도 불구하고, 현재 국내에서는 수소혼입 관련 도시가스 배관, 연소기 및 가스기기별 안전성 검증, 비금속 재료의 적합성 평가 등 성능평가 및 안전기준이 부재한 상황이다.

이에 정부에서는 천연가스 배관망에 최대 20%의 수소혼입을 고려한 전주기(제조-공급/운송-사용)의 안전성 검증 및 영향도에 대한 정밀분석을 위해 2023년 4월부터 2026년 3월까지 3년간 실증연구에 착수하였다. 즉, 천연가스 배관망에 농도별(5%, 10%, 15%, 20%) 수소혼입 공급 테스트 베드를 개발, 구축하여 수소 혼입 전주기 실험 및 안전성 평가 환경을 제공하고 배관망, 연소기, 가스기기, 정압기 등의 내구성과 안전성 등을 평가분석, 실증을 진행할 계획이다.

해외의 경우 미국, 영국 등에서 이미 수소혼입 실증 연구를 수행하여 수소혼입 농도 20% 수준에서는 기존 인프라 활용 가능성을 검증한 것으로 보고되고 있다⁴⁾. 예를들면, 미국 NREL 연구결과에서 가스터빈, 가스보일러 등 가스기기는 최대 28% 수소혼입 비율에서 안전하게 사용이 가능하였으며, CNG 차량은 수소혼입 20%까지는 기존 엔진의 교체없이 사용이 가능하였다. 수소 혼입농도 17%에서 PE 배관 누출량 측정결과 0.0005%로 무시 가능한 수준으로 나타났다. 영국의 HyDeploy Project 결과에서는 수소농도 28.4% 까지 가스기기의 연소상태가 안정된 것으로 나타났고, 배관 재료 등의 인장시험 결과 20%까지 손상이 없었으며, 실제 2개소 지역을 대상으로 실증한 결과 20% 농도 혼입시 기존 기기에 문제없이 사용가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 수소혼입 배관에서의 가스누출에 따른 피해영향 평가 기술개발을 위한 첫 단계로 수소혼입 농도별 배관의 가스 누출원을 분석하고 가스누출 시나리오를 선정하고자 한다. 즉, 도시가스와 수소의 실제 누출사례를 조사하여 누출특성을 누출원인, 누출부위, 재질, 크기 등에 따라 분석하여 수소혼입 천연가스 배관에서 발생가능한 가스누출시나리오를 선정한다. 이렇게 선정된 시나리오는 향후 수소혼입 가스운환해석, 화재 및 폭발 해석, 피해영향 해석의 기초 입력데이터로 활용되게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 가스누출원 해석 모델의 이론적 배경을 기술하였고, 3장에서 천연가스와 수소의 누출사례를 분석하였으며, 4장에서 누출사례 분석결과를 토대로 5개의 가스누출 시나리오를 선정하였다.

2. 대상물질 특성 및 누출원 해석모델

2.1 수소혼입 천연가스 주요 특성

가스누출원 해석을 위한 기초 데이터는 누출 물질의 물리화학적 특성으로 천연가스의 주성분인 메탄과 수소의 주요 특성 그리고 누출관련 수소의 주요 특성은 Table 1과 같다^{5,6)}.

Table 1. Properties of hydrogen and methane

Division	H ₂	CH ₄	Properties of H ₂
Molecular weight(g)	2	16	-
Density(g/cm ³) at gas, 1atm/0°C	0.089	0.72	much lighter than air
Diffusion coefficient(cm ² /sec)	0.61	0.16	very easy to diffuse
Minimum ignition energy(mJ)	0.02	0.29	very easy to ignite
Combustion range(vol%)	4~75	5~15	very wide range of combustion
Heat emissivity(ε)	0.04~0.25	0.15~0.35	less heat emissivity than other fuel

또한 가스운환산, 화재 및 폭발해석, 피해영향 평가를 위한 수소혼입 농도별 천연가스의 특성인 평균 분자량과 연소범위(vol%)는 Table 2와 같다. 수소혼입 농도별 평균 분자량(*Mw*)은 식 (1)에 의해 계산하였다. 연소범위는 르샤틀리에 공식의 의해 수소와 메탄의 부피함량(*V₁*, *V₂*)에 대해 연소하한값(*L*)은 식 (2), 연소상한값(*U*)은 식 (3)에 의해 계산하였다.

$$Mw = aMw_1 + bMw_2 \tag{1}$$

$$\frac{100}{L} = \frac{V_1}{L_1} + \frac{V_2}{L_2} \tag{2}$$

$$\frac{100}{U} = \frac{V_1}{U_1} + \frac{V_2}{U_2} \tag{3}$$

Table 2. Main properties of hydrogen blended natural gas

Division	5% H ₂	10% H ₂	15% H ₂	20% H ₂
Molecular Weight(g)	15.3	14.6	13.9	13.2
Combustion Range(vol%)	4.93~15.62	4.87~16.3	4.81~17.04	4.76~17.85

2.2 누출원 해석 모델

누출원 해석 모델은 누출속도, 누출시간, 누출시 물질의 상태 등을 계산하는 것으로 확산, 화재 및 폭발

해석시 입력자료로 이용한다. 누출에 따른 해석모델은 누출물질의 상(phase)에 따라 기상, 액상, 기-액 혼합인 경우에 대해 각각 누출장소가 배관 또는 저장탱크로 구분할 수 있다.

본 연구는 수소혼입 천연가스 배관망에 대한 누출원 해석을 위한 가스누출 시나리오 선정에 한정되어 있으나 향후 시나리오에 따른 피해영향 해석을 위해 누출원 해석 모델을 미리 선정하였다. 즉, 누출물질이 기상(gas phase)만이 존재하며 누출장소는 배관과 그 부속품에 해당하는 배관으로 가정할 수 있다. 따라서, 본 연구를 통해 선정된 가스 누출시나리오에 따른 누출원 해석은 [Crowl and Louvar 4th]에 의해 주어진 식 (4)에 의해 누출량이 계산되며, 피해영향 해석시 압력차에 대한 최대 누출량은 식 (5)를 이용한다⁷⁾.

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{2g_c M_w}{R_g T_o} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_o} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_o} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (4)$$

$$(Q_m)_{choked} = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M_w}{R_g T_o} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (5)$$

- Q_m : mass flow rate
- C_o : discharge coefficient
- A : cross-sectional area of pipe
- P_o, T_o : initial pressure, temperature within process
- P : final pressure of the escaping gas
- M_w : molecular weight of the escaping gas
- g_c : gravitational constant
- γ : heat capacities(C_p/C_v)
- R_g : ideal gas constant

3. 누출사례 조사 및 분석

3.1 도시가스 배관 누출사례

한국가스안전공사에서 발간한 2022년 가스사고연감에 따르면 최근 10년간 도시가스 사고는 총 177건으로 연평균 약 18건의 사고가 발생하였다⁸⁾. 그러나, 도시가스 사고 발생시 도시가스사업법 제41조 제3항에 따라 한국가스안전공사에 통보하여야 하는 사고외에도 도시가스 배관 등에서 많은 누출사례가 발생하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 수소혼입 천연가스 배관망에서의 가스누출에 따른 피해영향 분석을 위한 시나리오 선정을 위해 실제 2개 도시가스사에서 발생한 가스 누

출사례를 조사 및 분석하였다. 다만, 도시가스사로부터 민감한 대외비적인 누출사례를 수집, 조사하는 데 어려움이 있어 사례 수에는 한계가 있었으나 누출 시나리오 선정을 위한 분석 데이터로는 유의미한 결과를 도출할 수 있었다.

3.1.1 A사 누출사례 분석 결과

A사로부터 총 9년간의 누출사례 총 47건을 확보하여 분석하였다. 전체 현황은 Table 3과 같다. 공급시설보다는 수요자 시설인 사용시설에서 76.6%인 36건으로 대부분을 차지하고 있다. 참고로 Table 3~9내 숫자의 단위(unit)는 모두 누출사례 건수(numbers of leakage cases)이다.

Table 3. (Company A) Total status of leakage cases

Division	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	sum	%	
total sum	6	2	1	3	3	5	5	9	13	47	100	
Supply	other works	1	-	-	-	1	2	1	-	2	7	14.9
	car crash	-	-	-	-	-	1	3	-	4	8.5	
	subtotal	1	0	0	0	1	3	4	0	11	23.4	
Demand	other works				1		1		1	3	6.3	
	car crash	4	2	-	2	2	1	1	2	6	20	42.6
	corrosion	1	-	1	-	-	-	-	6	5	13	27.7
	subtotal	5	2	1	3	2	2	1	9	11	36	76.6

Table 4는 누출원인의 분석결과이다. 차량 추돌에 의한 누출이 51.1%인 24건으로 가장 빈번하게 발생하였고, 다음으로 부식과 타공사에 의한 누출 순이었다.

Table 4. (Company A) Leakage cases by cause

Division	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	sum	%
sum	6	2	1	3	3	5	5	9	13	47	100
other works	1	-	-	1	1	3	1	1	2	10	21.2
car crash	4	2	-	2	2	2	4	2	6	24	51.1
corrosion	1	-	1	-	-	-	-	6	5	13	27.7

Table 5. (Company A) Leakage cases by pipe type and location

Division	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	sum	%
sum	6	2	1	3	3	5	5	9	13	47	100
Under-ground	PLP	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
	PE	1	-	-	1	1	3	4	-	2	25.5
	Steel pipe	5	2	1	2	1	2	1	9	11	72.4
Ground	PLP (governer)	-	-	-	-	1	-	-	-	1	2.1

Table 6. (Company A) Leakage cases by pipe size

Division	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	sum	%
sum	6	2	1	3	3	5	5	9	13	47	100
PE Pipe											
63 mm	1	-	-	1	1	3	3	-	2	11	23.4
315 mm	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	2.1
Steel pipe											
20 A	3	2	1	1	1	2	1	8	11	30	63.8
32 A	2	-	-	1	-	-	-	-	-	3	6.4
50 A	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2.1
PLP(governer)	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	2.1

누출 발생위치 및 배관의 종류별 분석결과, Table 5와 같이 지하 매설배관에서 12건, 노출배관에서 35건이 발생하였으며, 노출배관의 백관이 전체의 72.4%를 점유하였다. 또한, 관경별로 분석한 결과, Table 6와 같이 노출배관 중 백관 20A가 30건, 매설배관 중 PE관 63 mm가 11건으로 다수를 차지하고 있었다.

배관의 누출 발생 부위를 배관과 배관 부속품으로 세분화하여 분석한 결과는 Table 7과 같이 배관에서 30건, 배관 부속품에서 17건이 발생한 것으로 나타났다. 여기서 배관 부속품은 엘보, 티, 계량기, 밸브 등 배관을 제외한 부분으로 구분하였다. 누출 발생 부위는 특정한 경향을 보이진 않았고 다양한 부위에서 발생한 것을 알 수 있다. 배관 누출의 경우 대부분 차량 충돌 등 외부 충격에 의해 발생하였고, 배관 부속품의 경우 부품의 노후, 취급부주의 등에 의해 발생한 것으로 분석되었다.

Table 7. (Company A) Leakage cases by parts

Division	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	sum	%
Sum	6	2	1	3	3	5	5	9	13	47	100
Piping	2	1	-	3	3	5	4	3	9	30	63.8
Piping accessories	4	1	1	-	-	-	1	6	4	17	36.2

Table 8. (Company A) Cases by leakage size

Division	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	sum	%
sum	6	2	1	3	3	5	5	9	13	47	100
small leak	1	1	-	-	-	1	3	8	9	23	48.9
large leak	5	1	1	3	3	4	2	1	4	24	51.1

누출 발생시 누출 크기를 미세누출과 다량누출로 구분해 분석하였다. 미세누출은 부식에 의한 핀홀 등 배관이 분리되지 않은 상태의 노출배관 누출과 손상 부위가 20 mm 미만인 매몰배관의 경우로 분류하였으며, 다량 누출의 경우 배관이 완전히 분리된 노출배관에서의 누출과 손상부위가 20 mm 이상인 매몰배관으로 구분하였다. 그 결과 Table 8과 같이 미세누출은 48.9%인 23건, 다량누출은 51.1%인 24건으로 비슷한 경향을 보였다.

3.1.2 B사 누출사례 분석 결과

B사의 경우 2003년부터 2021년까지 공동주택 점검 과정에서 발견한 가스누출 111건에 대한 보고자료⁹⁾를 분석하였다. Table 9와 같이 누출부위별로 111건 중 입상배관 39건, 입상밸브 20건, 계량기 19건 순으로 누출 빈도가 많았고, 연도별로는 20년 초과가 68.5%인 76건으로 사용연한이 길수록 가스누출 발생 빈도가 높은 것을 알 수 있었다. 주요 누출원인으로는 입상 노출배관의 경우 배관부식, 매설배관의 경우는 지반침하나 토압에 의한 이음매 손상, 입상밸브는 플랜지 또는 볼트 노후, 계량기의 경우는 결합볼량 또는 다이어프램 손상 등이었다. 그 밖의 배관종류 및 관경, 누출부위 크기 및 누출량 등은 A 천연가스사의 사례와 유사한 경향을 나타냈다. 실제 가스누출의 원인인 차량충돌, 부식, 타공사로 인한 파손 사례는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1. The sample cases of gas leakage from pipe(including accessories).

Table 9. (Company B) Total status of leak cases for an apartment complex(inspection results in 2003~2021)

classification	~5 years	5~10 years	10~20 years	20 years ~	sum	%
sum	4	10	21	76	111	100
gas meters	-	-	1	18	19	17.1
standing pipes	2	5	6	26	39	35.1
dividing valves	-	2	1	2	5	4.5
underground pipes	-	2	5	10	17	15.3
main valves	-	-	-	7	7	6.3
standing valves	1	1	6	12	20	18.0
others	1	-	2	1	4	3.6

3.2 수소 누출사례 분석

수소 누출사례는 2019년부터 본격적으로 구축 및 운영되고 있는 수소자동차 충전소에 대해 조사, 분석하였다. 2023년 3월 기준 수소경제종합정보포털에 게시되어 있는 국내 상업용 수소충전소(HRS: Hydrogen Refueling Station)는 총 255기가 구축, 운영되고 있다¹¹⁾. 한국가스안전공사에서는 상업용 수소자동차 충전소 완공 이후 운영미숙과 수소누출 등으로 인한 운영 중단 사태를 사전에 방지하고 사업자의 자율안전관리 능력 향상 도모를 위해 상설 안전점검을 2021년 2월부터 실시하고 있다¹²⁾.

2022년도 상설점검 결과에 대해 수소자동차 충전소 운영자 대상으로 진행한 간담회¹³⁾에서 공개된 수소 누출은 총 1,836건으로 Fig. 2와 같이 압축기와 제어판넬에서 가스누출이 68.1%로 대부분을 차지하고 있었다. 압축기는 약 87 MPa의 초고압 설비로 진동이 심하고 이음부가 많아 누출 발생이 가장 많은 것으로 분석되고 있다. 누출 농도별로는 Fig. 3과 같이 5,000 ppm 이상의 누출이 43.6%를 차지하고 있었으며, 1,000 ppm 미만의 미량누출의 경우도 26.6%를 점유하고 있었다. 누출 농도는 휴대용 가스검지기를 이용해 배관 등 설비 이음부에서 측정된 값이다.

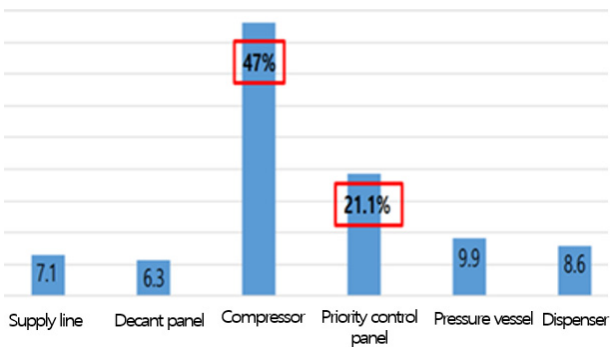


Fig. 2. The share rate of gas leakage by parts in HRS.

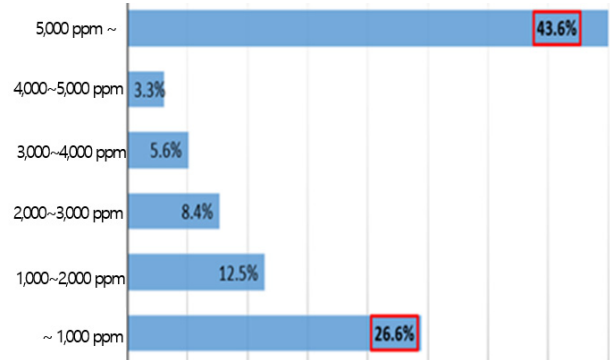


Fig. 3. The share rate of gas leakage by concentraion in HRS.

또한, 총 1,836건 중 배관에서의 누출이 41.3%인 758건으로 가장 많은 비중을 차지하고 있다.

4. 가스누출원 해석 시나리오 선정

메탄을 주성분으로 하는 천연가스 배관망과 수소 시설에서 다수의 가스누출이 발생하고 있다는 사실을 사례조사를 통해 확인하였다. 특히 천연가스 배관망의 실제 누출사례로부터 누출원인, 누출위치, 누출크기, 배관의 종류 및 관경 등을 분석하였으며, 그 분석 결과와 실제 운영조건을 토대로 수소혼입 천연가스 배관에서 발생 가능성이 높은 5개의 가스누출원 해석 시나리오를 Table 10과 도출하였다. 시나리오 선정의 근거는 다음과 같다.

첫째, 누출원인으로 누출빈도가 많은 차량추돌, 부식, 타공사로 분류하였다.

둘째, 누출부위로 차량추돌은 횡지관과 입상관, 부식은 배관 부속설비인 계량기와 입상밸브, 타공사는 매설배관으로 분류하였다.

셋째, 배관의 재질은 누출원인과 누출부위에 따른 분석결과를 토대로 백관(galvanized steel pipe), PE관 등으로 구분하였으며, 타공사에 의한 배관 파손은 매설 배관으로 PE관에 해당한다.

넷째, 압력은 사용시설의 주 공급압력인 2.5 kPa로 하였다. 이는 누출사례가 본관이 아닌 수요자시설에 공급하는 공급관(사용자공급관 포함)과 내관에 해당한 것이므로 추후 필요시 0.5 MPa 전후의 압력과 관경에 대한 해석의 검토도 가능하다.

다섯째, 관경은 입상관은 50A, 횡지관은 20A으로 구분하였고, 매설 PE관의 경우 주 관경인 63 mm로 선정하였다.

마지막으로, 파손크기는 누출사례와 실제 운영조건을 토대로 배관 관경의 파손정도를 백분율로 설정하였다. 즉, 차량추돌에 의한 입상관 파손은 50%, 횡지관

Table 10. Five scenarios of gas leakage in hydrogen-blended natural gas pipeline

case	causes	parts	materials	press.	pipe size	damage size
case 1	car crash	standing piping	galvanized steel pipe	2. 5kPa	50A	50%
case 2		horizontal piping	galvanized steel pipe	2. 5kPa	20A	100%
case 3	corrosion	standing piping	galvanized steel pipe	2.5 kPa	50A	diameter 2 mm
case 4		meter/standing valves	steel	2.5 kPa	-	diameter 1 mm
case 5	other works	underground pipes	PE(polyethylene)	2.5 kPa	63 mm	diameter 20 mm

파손은 100%로 설정하였다. 계량기 및 입상밸브의 미세누출은 직경 1 mm, 입상관은 부식에 의한 핀홀 형태로 직경 2 mm에 상당하는 크기로 하였다. 타공사의 경우 파손사례를 통해 직경 20 mm에 상당하는 누출크기로 하였다.

5. 결론

본 연구에서 수소혼입 천연가스의 특성을 파악하고 누출원 해석 모델식을 결정하였다. 즉, 수소 혼입 천연가스 분석을 통해 수소와 천연가스의 주성분인 메탄의 주요 물리화학적 특성을 파악하였으며, 이를 토대로 수소혼입 농도별(5%, 10%, 15%, 20%) 평균 분자량과 연소범위를 산정하였다. 그리고 수소혼입 천연가스 배관 및 부속품에서 흠을 통한 가스누출을 고려하여 Crowl 등이 제시한 식을 누출원 해석 모델식으로 선정하였다.

또한, 실제 천연가스 배관 등에서 실제 누출된 사례를 수집하여 누출원인, 누출형태, 누출부위 및 크기 등을 세부적으로 분석하였다. 누출사례 분석결과와 실제 운영조건 등을 고려하여 5가지의 누출원 해석 가스누출 시나리오를 선정하였다.

본 연구결과인 5가지의 가스 누출원 해석 시나리오를 토대로 수소혼입 농도별로 수소혼입 천연가스의 평균분자량과 연소범위를 활용하여 가스누출량을 산출하고, 누출된 수소혼입 천연가스의 가스온 확산 해석과 화재 폭발 등 피해영향 평가 연구를 수행할 수 있다.

Acknowledgement: This research was supported by KETEP grant funded by the Korea government(MOTIE) (RS-2023-00236237).

References

- 1) Korea Gas Safety Co., “Gas Statistics 2021”, p. 3, 2022.
- 2) Government of the Republic of Korea, “National Strategy for Carbon Neutrality and Green Growth and the First National Basic Plan(Including Mid-to Long-term Greenhouse Gas Reduction Goals)” p. 21, 2023.
- 3) Government of the Republic of Korea, “Basic Plan for Implementation of the First Hydrogen Economy” p. 27, 2021.
- 4) W. K. Han, “Planning and Forecasting of blending Hydrogen Into Natural Gas Pipeline”, Fall Academic Conference, Korean Soc. Hydrogen&New Energy, 2022.
- 5) S. G. Kang, “Hydrogen Safety and Standards”, Sep. Special Issue, Tecnology&Innovation, Koita, 2019.
- 6) Korea Gas Safety Co., “Construction Management Manual of Hydrogen Refueling Station”, pp. 9-10, 2022.
- 7) D. A. Crowl and J. F. Louvar, “Chemical Process Safety; Fourth Edition”, Pearson, 2019.
- 8) Korea Gas Safety Co., “Gas Accident Almanac 2022”, p. 28, 2023.
- 9) S. J. Shin, “The Trend and Response of Nonconformities in the User Supply Pipe of Multi-family Housing by Year”, Spring Academic Conference, Korean Soc. Gas, 2023.
- 10) Korea Petrochemical Industry Association, “Supply and Demand Status of Petrochemical Industry”, 2019.
- 11) Construction Status of Domestic Commercial Hydrogen Refueling Stations, “https://www.h2hub.or.kr/main/stat/stat_distribute_charge_domestic.do”, Retrieved on 01.6.2024.
- 12) D. W. Choi, “Performance and Advancement of Hydrogen Safety Management Comprehensive Measures”, Spring Academic Conference, Korean Soc. Hydrogen&New Energy, 2022.
- 13) Korea Gas Safety Co., “Meeting with Operators of Hydrogen Refueling Stations”, p. 31, 2023.