



광학가스이미지에서 유출량의 정량표시 실험적 연구

†박수리 · 한상욱 · 김병직

숭실대학교 화학공학과

(2017년 3월 9일 접수, 2017년 9월 9일 수정, 2017년 9월 10일 채택)

Practical Research for Quantitative Expression of Leakage Through Optical Gas Image

†Suri Park · Sang-wook Han · Byung-jick Kim

Dept. of Chemical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received March 9, 2017; Revised September 9, 2017; Accepted September 10, 2017)

요약

화학플랜트 산업단지 내의 플랜지, 밸브 등의 이음새 및 저장탱크의 균열 등에서 발생하는 원료, 중간재, 제품가스의 누출 유무와 누출량을 확인하는 것은 안전 관점이나 경제적 관점에서 매우 중요하다. 광학가스이미지 기술은 누출 유무를 확인하는데 사용되고 있으나 누출량을 표시하지 않는다. 일부기기는 검출 가능한 가스에 대한 색상 구분과 농도에 따른 색상의 진함으로 나타내고 있다. 따라서 OGI영상에서 유출량의 정량화에 대한 연구가 필요하다. 본 실험적 연구는 광학가스이미지로 부터 유출량의 정량표시에 관한 것이다. 2 차원의 OGI영상으로 3 차원에 분포되어 있는 누출가스 양을 추정하기 위하여 몬테카를로 확률기법을 적용하였다. 산출면적 기준은 가로(2.54 cm), 세로(2.54 cm)의 2 차원의 OGI영상 점의 수에 대해 3 차원의 가스 분포 유출량과의 상관관계수를 구하니 그 평균값이 0.980이었다. OGI영상의 이러한 데이터 표를 이용하여 역으로 유출량을 추정한 결과 유량계 측정값과 일치도가 높음을 확인했다.

Abstract - In chemical industry plants, the raw material, intermediate and final products can leak from unstable joints of flanges and valves as well as cracks of storage tanks. From the safety and economic standpoints, it is very important to understand whether leaks or not and leakage rate. The OGI(optical gas image) technique can tell gas leakages, but cannot give the leakage rate. Some special OGI devices can show the kind of gas in different color concentration in different darkness. Therefore the research on quantification of OGI is necessary. In this research, we have developed the practical method to quantify OGI of methane leakage. To estimate 3-dimensional gas leakages distribution from 2-dimensional OGI, the Monte Carlo Probability technique was applied. First the number of points in the area of width(2.54 cm) and length(2.54 cm) in OGI was counted. Total no of each experiment was compared with the measured flow rate. The correlation average between total points and measured flow rate was found to be 0.980. Reversely we estimated the leakage rate of OGI by use of the correlation table. The results showed good agreement between the estimation value and the measured value.

Key words : OGI, leak gases, outflow, quantification, correlation coefficient

†Corresponding author:babsool@ssu.ac.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

본 논문은 화학플랜트 산업단지에서 발생하는 누출가스 이미지에 대한 정량표시 적용 연구이다.

배출시설이 설치한 사업장 등 특정장소에서 화학물질을 배출하는 굴뚝, 소각로 등 점오염원 배출을 거치지 않고, 불특정 장소에서 다수의 작거나 분산된 형태로 화학물질을 배출하는 배출원인 비점오염원의 flanges, valves, pumps, compressors 등 수십 만개의 구성부품 사이에서 발생할 수 있는 가스 누출과 저장 탱크의 균열에 의한 VOC 누출 등이 있다[1].

가스 누출의 위험성은 생명과 재산의 안전 뿐 아니라 환경오염에도 영향을 줄 수 있다. 그러나 산업단지의 모든 구역에 가스감지기를 설치하는 것은 어려움이 있고 또한 효율적이지 못하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전통적인 방법으로 gas와 직접 접촉하는 휴대용 가스 누출 검출 장치가 사용되어 왔다. 하지만 직접 접촉식 측정 장치는 특정영역에서만 유효한 국부적인 측정으로 난해 지점 누출에 대한 감지 실패 가능성과 많은 노동 비용이 발생하며, 육안으로 보이지 않기 때문에 조업자의 안전 보건사고에 노출되어있다.

이러한 단점의 보완으로 신속하고 효율적인 가스 누출 탐지 기술로 비접촉 방식을 기반으로 하는 OGI(Optical Gas Image) 영상 기술이 있다. 직접 접촉의 단점을 보완 할 수 있는 해결책 중에 하나로 플랜트 공정의 운영 중단 없이 산업단지에서 휘발성 가스의 누출 유무를 확인할 수 있다. 가스 누출에 대해 빠른 시각적 확인이 가능하고, 신속한 점검으로 이를 통해 누출 시 유해한 가스의 피해를 최소화하여 사람의 안전과 환경을 보호 할 수 있다 [2-4]. 물체에서 방출되는 복사에너지를 전자적으로 측정하여 만들어지는 이미지의 원리로, 광범위한 영역과 큰 면적에 대해 가스 누출의 유무를 확인할 수 있다.

하지만 단점으로 누출 여부를 알 수 있는 확인만 가능하며, 정량값이 아닌 검출 가능한 가스에 대한 색상 구분과 농도에 따른 색상의 진함으로 나타내고 있다[4]. 이 또한 어느 정도의 양이 누출 되었는지 정량적인 확인은 어렵고, OGI영상에서 정량화하여 어느 정도의 양이 누출되는지는 연구된 바 없다. 국외의 경우 적외선 영상 기법과 가스 분산 모델링의 결합을 통해 가스 누출 탐지측정 확률을 높일 수 있는 분출속도, 가스농도 및 분출가스 형태 plume에 대한 연구 사항이 있다[5-7].

플랜트 산업단지에서 플랜지, 밸브 등의 이음새

및 저장탱크의 균열 등에서 발생하는 보이지 않는 누설을 인지하여 유출량의 정량적 값을 통해 누출에 대한 금전적 피해 손실규모와 환경 및 인체에 미치는 피해 영향에 대하여 유추할 수 있다. 또한 이를 바탕으로 가스플랜트의 설계 및 건설 시 누설 유출량에 대한 참고 보완설계와 구성부품 설정에 영향이 있다고 판단한다. 누출가스 이미지 정량표시를 통한 현장에서 필요 점검 및 보완정비의 우선 순위 파악과 시급성 유무를 선택할 수 있다고 예측한다.

이에 따른 특정가스에서 방출되는 전자기파 복사에너지를 전자적으로 측정하여 만들어지는 이미지 기술을 이용하여 정량표시를 통한 누출 가스의 분출량을 예측할 수 있는 연구를 진행하였다.

II. 이론

물체에서 방출되는 전자기파 에너지인 복사에너지를 전자적으로 측정하여 만들어지는 이미지의 원리로, 적외선 가스화상 카메라는 가스의 특성에 따라 특정 파장대역에서 영상화 할 수 있다. 비접촉으로 냉각식 중적외선(3~5 μm)검출기를 이용한 이에 포함된 파장대역(3.2~3.4 μm)을 기준으로 특정가스(CH₄)를 시각화 하며, 적외선 가스화상 카메라는 Methane 및 각종 휘발성 유기화합물(C₂H₆O, C₈H₁₀, C₇H₁₆, C₆H₁₄, C₅H₈, CH₃OH, MEK, MIBK, n-C₈H₁₈, C₅H₁₂, C₃H₁₀, C₇H₈, C₄H₁₀, C₃H₈, C₃H₆, C₂H₆, C₂H₄ 등) 가스의 누출을 영상으로 볼 수 있다. 적외선 파장대역은 4 가지 작은 대역으로 세분화되기도 하며, 각 대역의 경계선은 임의로 선택되기도 한다. 근적외선 (0.75~3 μm), 중적외선 (3~6 μm), 원적외선 (6~15 μm), 극적외선 (15~100 μm)이다.

2.1. 적외선 가스화상 카메라의 구조

렌즈는 게르마늄 (단파장, 3~5 μm)과 실리콘 (장파장, 7.5~13 μm) 재질로 제작된다. 필터는 특정 온도, 특정파장만을 검출 할 목적으로 사용한다. 검출기는 렌즈로부터 입사되어진 적외선 복사에너지의 결과를 전기적 신호로 만들어 주는 역할로 검출기의 온도 감응성 및 안정성을 위하여 냉각장치가 요구되는 Cooling 방식과 냉각 장치가 요구되지 않는 un-cooled 방식으로 나눌 수 있다. Cooling 방식은 액체 질소, 아르곤을 이용한 방식과 헬륨 가스를 이용한 Stirling 냉각 사이클, 열전소자 냉각 방식 등이 사용된다. 데이터 처리장치는 검출기로부터 발생된 전기신호를 받아 이 신호를 정량적인 수치와 화상으로 표현되도록 처리하여 주는 장치이다[3].

2.2. 유출 정량표시 적용 산출 방식

분출가스의 유출량 정량표시 적용에 몬테카를로 확률계산법을 응용하였다. 몬테카를로 확률 (경우의 수)기법은 통계적 문제에 난수(Random number)를 사용한 무작위적인 표본의 해결 방법으로 5~10 % 정도의 오차를 허용할 수 있는 공학적 문제와 컴퓨터를 이용한 통계적 추출을 통해 확률적 모델을 적용한 문제 해결 방식이다[8,9]. 정사각형 내부에 무작위로 점을 찍어 점이 원 안과 밖에 많아질수록 점의 수와 원 안에 찍힌 점의 수의 비는 정사각형의 넓이와 원의 넓이의 비에 같아지게 된다. 이 같은 방식을 적용하여 가로×세로가 6.4 cm와 25.8 cm의 분출가스 면적(점의 수, 대략 5143~5266 개, 대략 20,400~21,060 개)을 측정한다. 원본 이미지를 8 배~16 배 확대하여, 가로, 세로 각 2.54 cm에 있는 분출가스의 면적과 가로, 세로 각 5.08 cm에 있는 분출가스의 면적을 측정한다. 기준은 분출구 위의 면적 6.4 cm², 25.8 cm²로 공기의 흐름과 바람의 영향이 가장 적은 영역 설정이다.

일정기준 분출에서는 누출량이 많아지고 가스분출속도가 증가해도 분출가스 형태 plume의 크기는 크게 변하지 않는다[6].

분출되는 가스의 이미지를 더 선명하게 확인하기 위해 영상처리 프로그램을 통해 전체 배경 빛의 양 표시 값을 각 거리의 분출량에 적용하여 분출가스 이미지를 나타낸다[10,11].

2차원의 OGI영상으로 3차원의 가스분포를 추정하기 위하여 몬테카를로 확률기법을 활용했다. 함수관계에 따른 나타낼 수 있는 한계분출량 및 한계농도가 있을 것으로 추론한다.

OGI영상에 기준영역을 설정하여 이미지처리를 통한 분출량의 정량표시를 하였다. 분출량과 정량표시의 연속적 속성의 연관성을 보기위하여 상관관계 분석을 하였다[12]. 이를 바탕으로 분출가스 누출량을 알 수 없는 누설가스의 역 추정 산출을 하였다.

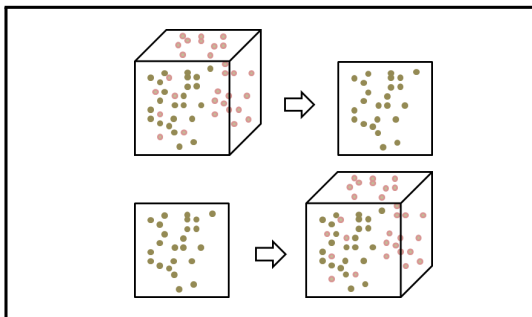


Fig. 1. 3D and 2D estimated limit conversion area.

III. 실험 장치 및 방법

3.1. 실험 장치

비점오염원의 flanges, valves, pumps 등 구성부품 사이에서 발생할 수 있는 가스 누출 및 저장 탱크의 균열에 의한 VOC 누출을 가정하기 위한 Methane 가스의 분출을 이용한 실험을 하였다. OGI(Optical Gas Image)영상에서 유출량 정량표시를 위한 실험에는 적외선 가스화상 카메라 GF320 (Table 1.)을 사용하였다. Cooled InSb 방식의 검출기로 적용 렌즈 14.5°와 24°를 사용하였다. 누출 측정에 사용하는 가스는 Methane(99.99 %) 10 L용기이고, 역화 방지기를 설치하였다. 분출 조정의 regulator와 최대 유량 1 L/min의 flowmeter를 사용하였다. tube는 직경 1/4"이다. 실험 주변 온도는 3~4 °C이고, 적외선 가스화상 카메라의 조작 및 사용법은 다음과 같다.

- (1) 적외선 검출 소자로 인듐 안티몬화물(InSb) Cooling 방식의 검출기를 사용하여, 전원 on 후 온도감응성과 안정성을 위한 장치냉각을 대기한다.
- (2) 장치냉각(5~7분 소요)의 가동음이 없어지면, 카메라 외부의 모드 휠을 돌려 영상에 맞춘다.
- (3) 온도 범위 버튼을 누르고, 조이스틱을 위/아래로 움직여 피사체에 적합한 온도 범위를 선택, 다시 온도 범위 버튼을 눌러 설정 모드를 확인한다.
- (4) 탐지하고자 하는 피사체에 카메라를 조준하여 FOCUS/ZOOM 버튼 가운데를 눌러 초점을 자동으로 맞춘다.

Table 1. IR camera imaging specifications

Model Number	GF320	Temp. Range	-20 °C to 350 °C
Detector Type	Cooled InSb	Thermal Sensitivity	<15 mK @ +30°C
Spectral Response	3.2 ~ 3.4 μm	Zoom	1 ~ 8× continuous digital
Resolution	320 × 240	Total Pixels	76,800
Accuracy	±1°C for temperature range 0°C to +100°C	Lens Options	Standard: 24°, 18° Optional: 14.5°, 6°
Detection gas	C ₂ H ₆ O, C ₈ H ₁₀ , C ₇ H ₁₆ , C ₆ H ₁₄ , C ₅ H ₈ , CH ₃ OH, MEK, MIBK, n-C ₈ H ₁₈ , C ₅ H ₁₂ , C ₅ H ₁₀ , C ₇ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , CH ₄		

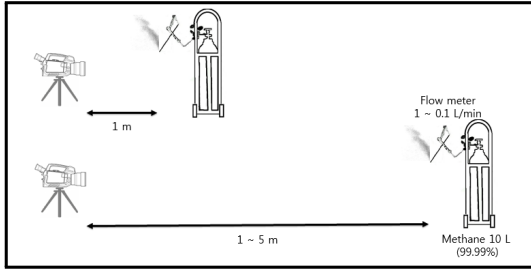


Fig. 2. Experimental method.

- (5) 카메라가 탐지 가능한 가스종류의 누출이 있을 경우 카메라의 화면에서 누출이 확인(Fig. 3) 된다.
- (6) 비디오 녹화/중지의 경우 S 버튼을 사용한다.
- (7) 직접 연결가능 케이블 및 SD 메모리 카드 삽입/제거를 통한 영상 확인이 가능하다.

3.2. 실험 방법

Methane(99.99 %)의 분출에 대한 분출량과 거리에 따른 가스이미지를 탐지 영상화하였다.

1 m를 시작으로 1~5 m까지 분출량 1.0 L/min부터 0.1 L/min까지 조정하며 Methane 가스의 분출 이미지를 탐지측정 했다. 거리에 대한 분출량이 적을수록 가스화상 카메라를 이용한 탐지 확인이 어려울 것으로 예상되어 최대거리 5 m, 최소 분출량 0.1 L/min으로 기준하였다. 실험 환경은 온도 3~4 °C, 환기가 잘 되고 외부바람의 영향이 적은 사방이 모두 막히고 위쪽만 외부로 개방되어 있는 면적 약 40㎡, 깊이 약 7 m의 공간에서 가스분출과 뒤의 벽과의 거리는 2 m 내외에서 실험하였다.

이미지 처리의 경우, 원본 이미지를 확대하여 가로, 세로 기준영역에 있는 분출가스를 각 거리마다 분출량(1.0~0.2 L/min)에 따른 이미지처리 설정값을 적용하여 분출 이미지를 나타냈다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 이미지 처리를 통한 시험 데이터 분석 및 정량적 표준화

거리가 멀어질수록, 분출량이 적을수록 가스화상 카메라를 이용한 탐지확인 어려움 최대거리 5 m, 최소 분출량 0.1 L/min 으로 실험을 진행하였다. Fig. 3.은 C-H 화합물 중 Methane 99.99%의 측정으로 가스 분출량 1~0.1 L/min (Fig. 3. 왼쪽 → 오른쪽), 거리 이동 1~5 m (위 → 아래) 의 가스화상 카메라를 이용한 탐지측정 이미지이다.

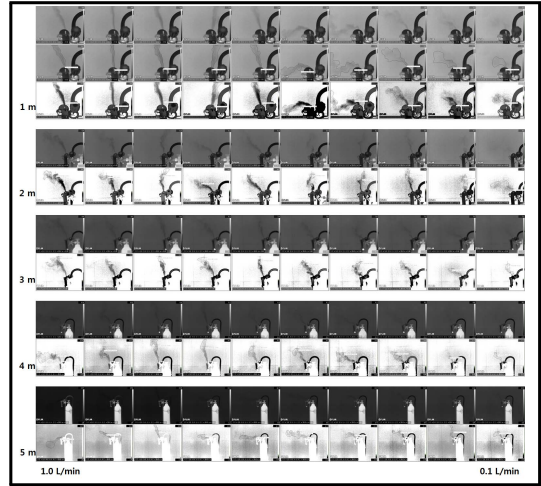


Fig. 3. Leakage gas by distance (1~5 m, 1~0.1 L/min).

흑백 이미지로 가스 누출 부분이 조금 더 진한 어두운색으로 나타난다. 분출량이 클수록 공기 흐름의 영향을 적게 받아 위로 솟아오르는 것을 확인할 수 있다. 이미지 처리 방식을 추가하여 분출되는 가스를 더 선명하게 확인하였다. 처리 전 이미지 보다 노이즈가 적어 더욱 선명한 가스 분출 영역의 둘레 구역 설정 및 면적 계산이 가능하였지만 거리 및 분출량의 규칙적인 산출 값은 확인 할 수 없었다. 이에 따른 이미지 처리 방식을 변경하여 분출가스 이미지 정량표시를 하였다.

분출되는 가스의 이미지를 더 선명하게 확인하기 위해 영상처리 프로그램을 통해 전체 배경 빛의 양 표시 입 · 출력값을 각 거리의 분출량에 따른 동일한 값을 적용하여 분출가스의 열은 농도 제거 및 주변 노이즈 제거 후 거리 당 0.2 L/min 씩 분출가스 이미지를 나타내었다. 이를 바탕으로 면적을 통한 유출량의 역 추정을 적용하고자 한다.

원본 이미지를 8 배~16 배 확대하여, 가로, 세로 각각 2.54(5.08) cm 에 있는 분출가스의 면적을 측정하였다. 이 기준은 분출구 1~2 cm 위의 면적 6.4 cm² (25.8 cm²)로 분출가스의 외부 영향으로 인한 특성 변화를 최소화하기 위해 설정하였다. 몬테카를로 확률기법을 응용하여, 가로×세로, 각 0.035 cm의 사각 점을 전체 면적(2.54×2.54 cm², 대략 5,143~5,266 개, 25.8×25.8 cm² 대략 20,400~21,060 개) 중에 가스 분출 면적의 정량표시 값을 나타냈다.

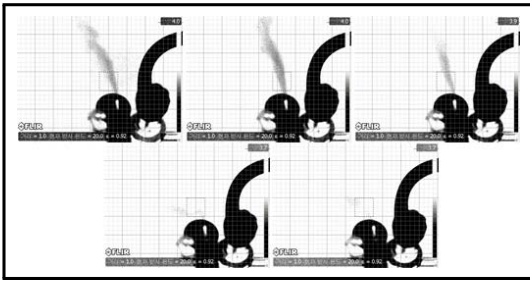


Fig. 4. Image processing at 1 m distance.

Table 2. Quantification of leakage gas at a distance of 1 m

Measuring distance and Outflow (L/min)	Dimensions 6.4cm, (25.8cm)	Number of points 6.4cm, (25.8cm)	Estimated output volume 6.4cm, (25.8cm)
1 m 1.0	3.414, (8.266)	2786.6, (6747.4)	4.74, (17.88)
1 m 0.8	3.326, (7.913)	2714.9, (6459.4)	4.56, (16.74)
1 m 0.6	2.523, (6.048)	2059.2, (4937.1)	3.01, (11.19)
1 m 0.4	1.771, (3.001)	1445.6, (2449.6)	1.77, (3.910)
1 m 0.2	1.180, (2.302)	963.3, (1879.2)	0.96, (2.630)

위의 Fig. 4는 측정 거리 1 m, 분출구 위의 면적 6.4 cm²의 분출량에 따른 가스 분포이다. 전체 배경에서 빛의 양 표시 입·출력 값을 각 분출량에 따른 동일한 값(80,255),(140,0)을 적용한 분출가스 이미지이다. 왼쪽 위부터 오른쪽으로 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 L/min으로 1 L/min의 경우, 면적 6.4 cm² 중 누출 가스 면적 0.001225 cm²의 사각점 2786.6 개를 나타냈다. 1 m, 1 L/min의 면적 3.414 cm²로 면적이 원형과 구형이라는 가정으로 4.74 cm³의 체적을 산출했다. 분출량이 작아질수록 (0.8~0.2 L/min) 분출가스의 작은 면적(3.326, 2.523, 1.771, 1.180 cm²)과 작은 체적(4.56, 3.01, 1.77, 0.96 cm³)이 계산된다.

1 m 측정 거리에서 분출량의 길이에 따른 점의 수를 산출하여 면적을 나타냈다. 면적은 원형이라는 가정 하에 반지름을 통한 구의 체적을 산출하였다.

x축의 분출량에 따른 y축의 분출가스가 차지하는 점의 수인 면적 6.4 cm²(25.8 cm²)를 기준으로 나타냈다. 1~0.8 L/min을 살펴보면 2.57 %의 차이로 기준으로 잡은 가로, 세로 각 2.54 cm에 속한 분출가스의 면적에선 큰 차이가 없는 비슷한 분출 정량 표시 값을 나타냈다. 2차원의 OGI영상으로 3차원

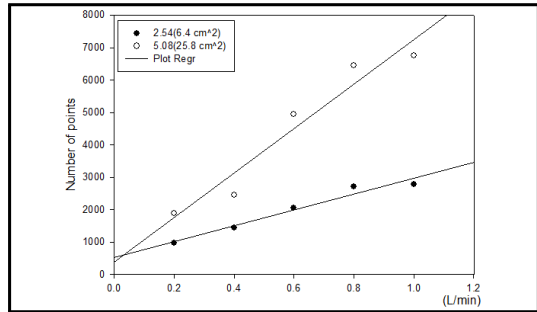


Fig. 5. Quantification of leakage gas at a distance of 1 m.

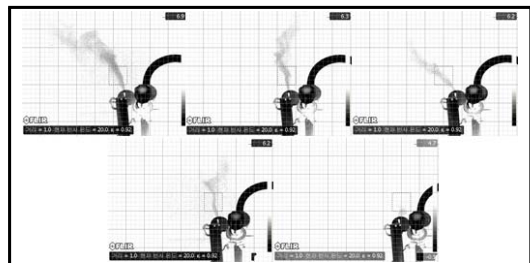


Fig. 6. Image processing at 2 m distance.

의 가스분포를 추정하는 한계분출량 및 한계농도로 판단된다. 0.8 L/min부터 0.2 L/min까지 분출량에 대한 점의 수가 비례되는 선형 그래프를 나타냈으며 x축의 분출량에 따른 가스면적 점의 수 y축의 상관관계계수는 0.980로 높은 연관성 강도를 갖는 회귀선 및 연관성 방향을 나타냈다.

분출가스의 면적 25.8 cm²을 살펴보면 분출량이 0.6~1.0 L/min으로 많은 경우에는 6.4 cm²에 비해 2~2.5배 높은 정량표시를 나타냈지만, 연관 방향성만 있을 뿐 흩어진 정량표시 값으로 연관성의 강도는 낮은 그래프를 확인하였다. 0.4~0.2 L/min의 경우 가스분출 이미지의 감소로 정량표시 되는 점의 수도 현저히 줄어들었다.

측정 거리 2 m의 분출량에 따른 가스를 살펴보면, 전체 배경의 빛의 양 표시 입·출력 값을 거리의 각 분출량에 대한 동일한 값 (90,255), (30,0)을 적용하여 분출가스 이미지를 나타냈다. 왼쪽 위부터 오른쪽으로 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, L/min 으로 1 L/min의 경우, 면적 6.4 cm² 중 누출 가스 면적 0.001225 cm²의 사각점 2315.3 개를 나타냈다. 2 m, 1 L/min의 면적 2.836 cm²로 면적이 원형과 구형이라는 가정으로 3.59 cm³의 체적을 나타냈다. 분출량이 작아질

Table 3. Quantification of leakage gas at a distance of 2 m

Measuring distance and Outflow (L/min)	Dimensions 6.4cm ² , (25.8cm)	Number of points 6.4cm ² , (25.8cm)	Estimated output volume 6.4cm ² , (25.8cm)
2 m 1.0	2.836, (7.736)	2315.3, (6315.4)	3.59, (16.19)
2 m 0.8	2.690, (6.129)	2195.7, (5003.0)	3.32, (11.41)
2 m 0.6	2.079, (6.039)	1697.1, (4929.6)	2.25, (11.16)
2 m 0.4	1.279, (3.103)	1043.9, (2533.3)	1.09, (4.11)
2 m 0.2	0.662, (1.181)	540.7, (963.90)	0.41, (0.97)

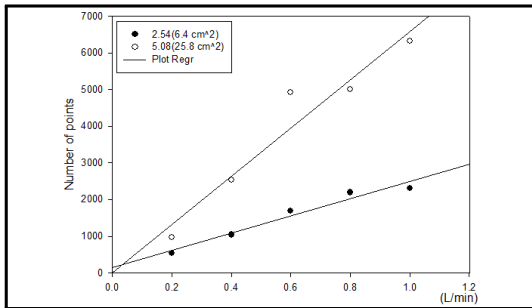


Fig. 7. Quantification of leakage gas at a distance of 2 m.

수록 분출가스의 작은 면적과 작은 체적을 확인하였다.

x축의 분출량에 따른 y축의 기준 면적 6.4 cm² (25.8 cm)에 분출가스가 차지하는 점의 수를 나타냈다. 1~0.8 L/min 을 살펴보면 5.17 % 의 차이로 기준으로 잡은 가로, 세로 각 2.54 cm 에 속한 분출 가스의 면적에선 큰 차이가 없는 비슷한 분출 정량표시 값을 나타냈다. 0.8 L/min부터 0.2 L/min까지 분출량에 대한 점의 수가 비례되는 선형 그래프를 나타냈다. x축과 y축의 상관관계계수는 0.981로 높은 연관성 강도와 연관성 방향을 나타냈다.

분출가스의 면적 25.8 cm²을 살펴보면 분출량에 따른 가스 면적 점의 수가 대략적으로 일치하는 듯 보이지만 0.6 L/min 의 경우 0.8 L/min과 큰 차이 없는 정량표시를 나타내었다. 큰 기준 면적 설정으로 인한 공기의 흐름과 바람의 영향으로 분출가스 plume이 기준 면적에서 많이 정량표시 되었다.

측정 거리 3 m 의 분출량에 따른 가스를 살펴보면, 전체 배경의 빛의 양 표시 입 · 출력값을 거리의

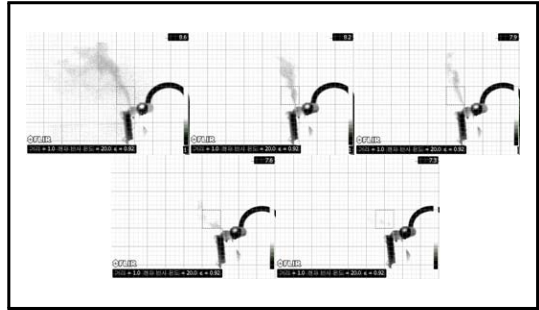


Fig. 8. Image processing at 3 m distance.

Table 4. Quantification of leakage gas at a distance of 3 m

Measuring distance and Outflow (L/min)	Dimensions 6.4cm ² , (25.8cm)	Number of points 6.4cm ² , (25.8cm)	Estimated output volume 6.4cm ² , (25.8cm)
3 m 1.0	2.130, (6.425)	1739.1, (5244.5)	2.34, (12.25)
3 m 0.8	1.969, (5.955)	1607.3, (4861.1)	2.08, (10.93)
3 m 0.6	1.732, (4.946)	1413.8, (4037.6)	1.71, (8.27)
3 m 0.4	1.228, (3.002)	1002.7, (2450.7)	1.02, (3.91)
3 m 0.2	0.750, (0.853)	612.5, (696.1)	0.49, (0.59)

각 분출량에 대한 동일한 값 (70,255), (30,0)을 적용하여 분출가스 이미지이다. 왼쪽 위부터 오른쪽으로 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, L/min 으로 1 L/min의 경우, 면적 6.4 cm² 중 누출가스 면적에 마찬가지로 몬테카를로 확률기법을 응용하여 0.001225 cm²의 사각점 1739.1 개를 나타냈다. 3 m, 1 L/min의 면적 2.130 cm²로 면적이 원형과 구형이라는 가정으로 2.34 cm²의 체적을 나타냈다. 분출량이 작아질수록 분출가스의 작은 면적과 작은 체적을 확인하였다.

x축의 분출량에 따른 y축의 기준 면적 6.4 cm² (25.8 cm)에 분출가스가 차지하는 점의 수를 나타냈다. 1 L/min 1739.1 개 0.8 L/min 1607.3 개, 0.6 L/min 1413.8 개, 0.4 L/min 1002.7 개, 0.2 L/min 612.5 개를 나타냈다. x축과 y축의 상관계수는 0.976 이다.

분출가스의 면적 25.8 cm²을 살펴보면 연관 방향성은 일정하지만 회귀선과는 떨어진 연관성의 강도가 낮은 그래프를 확인하였다. 0.2 L/min의 경우 가스분출 이미지의 감소로 정량표시 되는 점의 수도 현저히 줄어들었다.

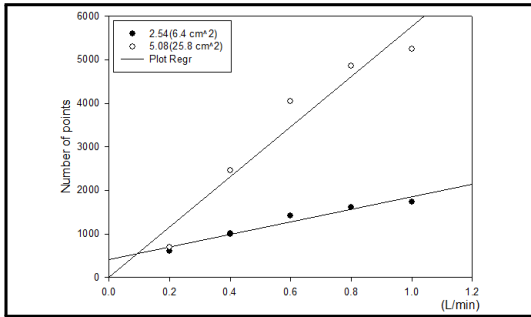


Fig. 9. Quantification of leakage gas at a distance of 3 m.

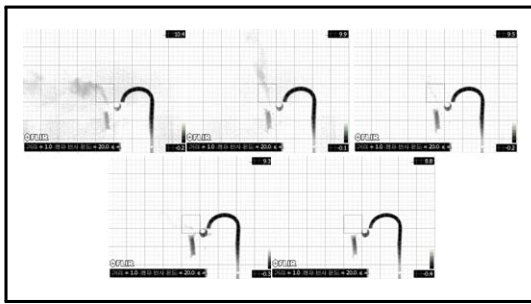


Fig. 10. Image processing at 4 m distance.

측정 거리 4 m 의 분출량에 따른 가스를 살펴보면, 전체 배경의 빛의 양 표시 입 · 출력값을 거리의 각 분출량에 대한 동일한 값 (55,255), (20,0)을 적용하여 분출가스 이미지를 나타냈다. 왼쪽 위부터 오른쪽으로 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, L/min 으로 1 L/min 의 경우, 면적 6.4 cm² 중 누출 가스 면적 0.001225 cm²의 사각점 1626.4 개를 나타냈다. 4 m, 1 L/min 의 면적 1.992 cm²로 면적이 원형과 구형이라는 가정으로 2.12 cm²의 체적을 나타냈다. 분출량이 작아질수록 분출가스의 작은 면적과 체적을 확인하였다.

Fig. 11.은 1 L/min 1626.4 개 0.8 L/min 1481.6 개, 0.6 L/min 1160.3 개, 0.4 L/min 866.7 개, 0.2 L/min 568.2 개를 나타냈으며, x축의 분출량에 따른 가스면적 점의 수 y축의 상관관계계수는 0.994로 매우 높은 연관성 강도를 갖는 회귀선 및 방향을 나타냈다.

분출가스의 면적 25.8 cm²을 살펴보면 분출량이 0.8~1.0 L/min는 대략 6.4 cm² 보다 약 2.5배 높은 정량표시를 나타냈지만, 연관 방향성만 있을 뿐 흩어진 정량표시 값으로 연관성의 강도는 낮은 그래프를 확인하였다. 0.6~0.2 L/min의 경우 가스분출 이미지의 감소로 정량표시 되는 점의 수도 현저히 줄

Table 5. Quantification of leakage gas at a distance of 4 m

Measuring distance and Outflow (L/min)	Dimensions 6.4cm ² , (25.8cm ²)	Number of points 6.4cm ² , (25.8cm ²)	Estimated output volume 6.4cm ² , (25.8cm ²)
4 m 1.0	1.992, (5.508)	1626.4, (4495.9)	2.12, (9.72)
4 m 0.8	1.815, (4.602)	1481.6, (3756.4)	1.84, (7.43)
4 m 0.6	1.421, (1.823)	1160.3, (1488.5)	1.27, (1.85)
4 m 0.4	1.062, (1.343)	866.7, (1096.0)	0.82, (1.17)
4 m 0.2	0.696, (1.116)	568.2, (911.0)	0.44, (0.89)

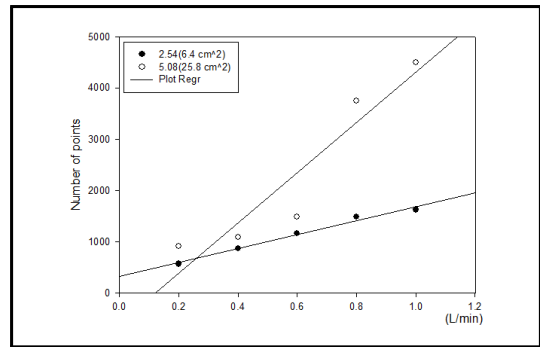


Fig. 11. Quantification of leakage gas at a distance of 4 m.

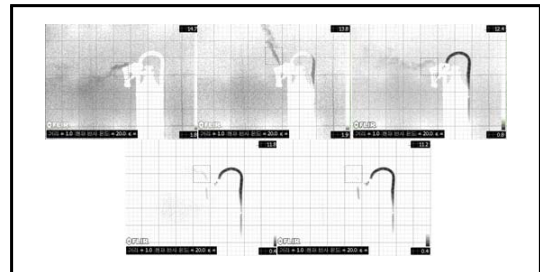


Fig. 12. Image processing at 5 m distance.

어들었다.

측정 거리 5 m 의 분출량에 따른 가스를 살펴보면, 전체 배경의 빛의 양 표시 입 · 출력값을 거리의 각 분출량에 대한 동일한 값 (25,255), (5,0)을 적용하여 분출가스 이미지이다. 왼쪽 위부터 오른쪽으로 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, L/min 으로 1 L/min의 경우,

Table 6. Quantification of leakage gas at a distance of 5 m

Measuring distance and Outflow (L/min)	Dimensions 6.4cm, (25.8cm)	Number of points 6.4cm, (25.8cm)	Estimated output volume 6.4cm, (25.8cm)
5 m 1.0	1.520, (4.860)	1240.5, (3967.7)	1.41, (8.06)
5 m 0.8	1.456, (3.131)	1188.4, (2555.8)	1.32, (4.17)
5 m 0.6	1.117, (3.029)	911.8, (2472.3)	0.89, (3.96)
5 m 0.4	0.772, (0.673)	630.1, (549.6)	0.51, (0.42)
5 m 0.2	0.267, (0.267)	217.7, (217.7)	0.10, (0.10)

Table 7. Leakage gas quantification by distance of 1~5 m

Measuring distance and Outflow	0.2 L/min	0.4 L/min	0.6 L/min	0.8 L/min	1.0 L/min
Number of points, 1 m	963.3	1445.6	2059.2	2714.9	2786.6
Number of points, 2 m	540.7	1043.9	1697.1	2195.7	2315.3
Number of points, 3 m	612.5	1002.7	1413.8	1607.3	1739.1
Number of points, 4 m	568.2	866.7	1160.3	1481.6	1626.4
Number of points, 5 m	217.7	630.1	911.8	1188.4	1240.5

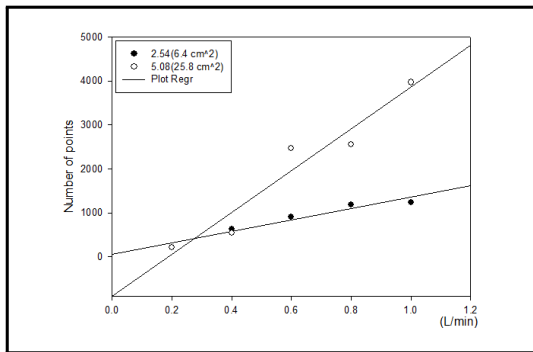


Fig. 13. Quantification of leakage gas at a distance of 5 m.

면적 6.4 cm² 중 누출가스 면적에 마찬가지로 몬테카를로 확률기법을 응용하여 0.001225 cm²의 사각점 1240.5 개를 나타냈다. 5 m, 1 L/min의 면적 1.52 cm²로 면적이 원형과 구형이라는 가정으로 1.41 cm²의 체적을 나타냈다. 분출량이 작아질수록 분출가스의 작은 면적과 작은 체적을 확인하였다.

x축의 분출량에 따른 y축의 면적 6.4 cm²(25.8 cm²)에 분출가스가 차지하는 점의 수를 나타냈다. 1 L/min 1240.5 개 0.8 L/min 1188.4 개, 0.6 L/min 911.8 개, 0.4 L/min 630.1 개, 0.2 L/min 217.7 개를 나타냈다. 1~0.8 L/min 을 살펴보면 4.20 %의 차이로 기준으로 잡은 가로, 세로 각 2.54 cm에 속한 분출 가스의 면적에선 큰 차이가 없는 비슷한 분출 정량표시 값을 나타냈다. 0.6 L/min부터 0.2 L/min까지 분출량에 대한 점의 수가 비례되는 선형 그래프를 나타냈다. x축의 분출량에 따른 가스면적 점의 수 y축의 상관관계수는 0.972로 높은 연관

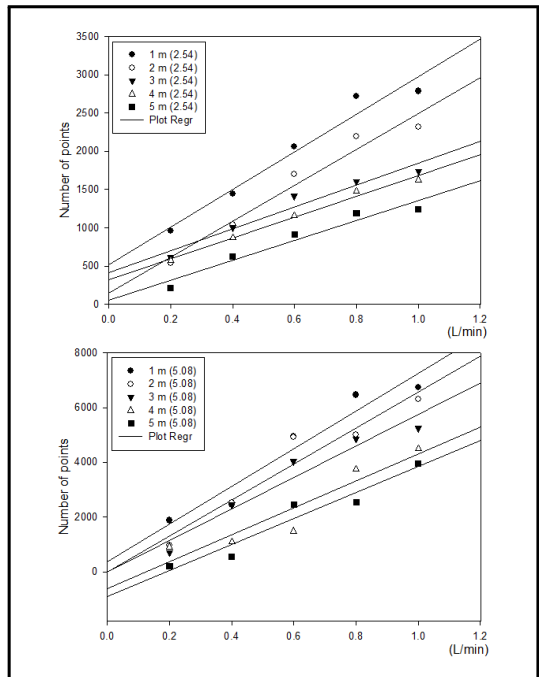


Fig. 14. Graph of leakage gas quantification by distance of 1~5 m (Temperature 3~4 °C, 14.5° lens).

성 강도를 갖는 회귀선 및 연관성 방향을 나타냈다. 분출가스의 면적 25.8 cm²을 살펴보면 분출량이

0.6~1.0 L/min은 많은 경우 6.4 cm²에 비해 2~3배 높은 정량표시를 나타냈지만, 연관 방향성만 있을 뿐 흩어진 정량표시 값으로 연관성의 강도는 낮은 그래프를 확인하였다. 0.4~0.2 L/min의 경우 가스분출 이미지의 감소로 정량표시 되는 점의 수도 현저히 줄어들어 6.4 cm²의 정량표시와 같은 값을 나타냈다.

실험 조건은 기온 3~4 °C, 14.5° 렌즈의 영상을 통해 전체 배경 빛의 양 표시 입·출력값을 각 거리의 분출량에 대해 동일한 값을 적용하여, 분출가스 이미지로 나타난 정량표시 값이다. 이미지 처리를 통한 거리 및 분출량에 따른 정량표시 그래프를 살펴보면, 0.2~0.8 L/min은 분출량이 증가함에 따라 점의 수가 비례 증가하는 그래프를 나타냈다. 1~0.8 L/min 에서는 대략 2.5~5.1 % 줄어든 차이를 나타내며, 큰 차이가 없는 비슷한 분출 정량표시 값을 나타냈다. 이것은 2 차원의 점의 수와 3 차원의 가스 분포가 기준으로 잡은 가로(2.54 cm), 세로(2.54 cm)의 분출가스 면적의 한계농도에 따른 함수 관계라고 판단된다. 4 m의 경우 1~0.8 L/min에서 감소를 8.90 %를 나타냈는데, 그래프가 서로 비례하는 값을 나타내는 것으로 보아 1~1.2 L/min에서는 한계농도의 비슷한 분출량을 예상해보거나 빛의 양 표시 입·출력값을 거리의 각 분출량에 따른 동일 설정값 조정의 차이로 판단된다. 가로, 세로 2.54 cm의 그래프 분포 상관관계계수의 경우 1 m 0.980, 2 m, 0.981, 3 m, 0.976 4 m, 0.994, 5 m, 0.972 이다.

1 m를 시작으로 각 거리가 멀어질수록 분출량의 정량표시 값은 평균적으로 2 m에서 20.4 %, 3 m에서 35.1 %, 4 m 42.7 %, 5 m 56.0 % 줄어드는 값을 나타냈다.

이미지 처리의 경우, 기준으로 잡은 원본 이미지를 가로 2.54 cm, 세로 2.54 cm에 있는 분출가스의 면적은 약 5200 개의 점의 수로 나타난다. 1 m의 경우 점의 수 약 2786개로 전체의 53.5 %에 해당된다. 3 차원의 가스분포를 바탕으로 거리와 분출량에 따른 점의 수를 산출하여 면적을 나타냈다.

4.2 정량적 표준화를 통한 누출가스의 예상 유출량 환산

기준 범위에서 누출량을 알 수 없는 Methane 가스의 누설 시, OGI영상에서 이미지 처리를 통한 유출량의 역 추정 산출이 가능하다. OGI영상에서 분출가스 이미지 처리를 통해 나타난 기준 면적 6.4cm² 정사각형 점의 수 Table 7.을 응용하여 유출량을 산출하여 Table 과 Fig.의 그래프를 나타냈다.

정량표시 값이 2,100 개, OGI 탐지거리는 1 m일 경우, 누출량은 0.6 L/min 이라는 것을 알 수 있다.

Table 8. Inverse estimation of Outflow (L/min)

Quantification of Outflow	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
2650~3000	1.0, 0.8				
2300~2650		1.0, 0.8			
1950~2300	0.6				
1600~1950		0.6	1.0, 0.8	1.0	
1250~1600	0.4		0.6	0.8	
900~1250	0.2	0.4	0.4	0.6	1.0, 0.8, 0.6
550~900			0.2	0.4, 0.2	0.4
200~550		0.2			0.2

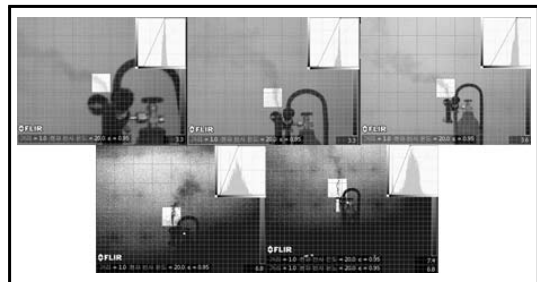


Fig. 15. Application of outflow quantification (1~5 m distance).

정량표시 값이 1600 개, 측정 거리가 2 m일 경우, 0.6 L/min이고, 또는 4 m일 경우라면 1.0 L/min이라는 것을 알 수 있다. 3 m라면 1.0~0.8 L/min이다. 이것은 2차원의 OGI영상으로 3차원의 가스분포를 추정할 때 기준내의 한계분출량 및 한계농도로 설명된다. 일부는 실험 조건의 특성상 위험성에 따른 분출가스의 작은 분출량 설정과 좁은 간격의 측정 거리 설정으로 점의 수가 작아질수록 측정 거리마다 분출량이 일부 중복되는 원인이 있다. 이를 바탕으로 역 추정 실험을 통한 누출량을 알 수 없는 가스누설의 유출량을 산출하였다.

Fig. 15.는 분출량에 대한 거리 1~5 m에 따른 실험으로 탐지측정 된 이미지에 빛의 양 표시 입·출력값을 표시 그래프의 가장 높은 값을 설정하여 노이즈를 최소화하고 분출가스의 색상은 진하게 설정

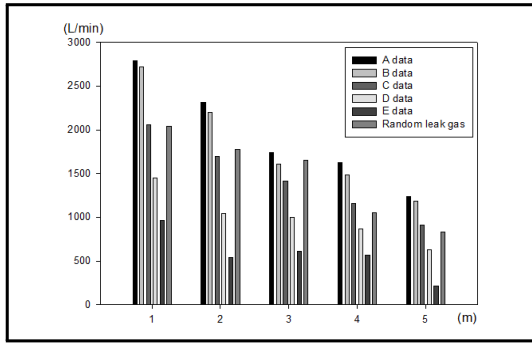


Fig. 16. Review inverse estimation of outflow (1~5 m distance).

하였다. 분출가스 plume 점의 수를 확인하여 유출량의 역 추정 산출을 하였다.

분출량을 확인하기 위하여 1~5 m 거리별로 분출량에 따른 점의 수를 나타낸 그래프이다(Fig. 16). 거리별 각각의 A~E의 경우는 이미지 처리를 통한 정량표시 값으로 Table 7.의 값을 거리에 따른 점의 수 분출량으로 나타낸 그래프이다. 각 거리의 A data는 Table 7.의 각각의 1.0 L/min 값, 각 거리의 B data는 0.8 L/min, 각 거리의 C data는 0.6 L/min 값, 각 거리의 D data는 0.4 L/min 값, 각 거리의 E data는 각각의 0.2 L/min 값의 점의 수를 나타낸 그래프이다. 가장 오른쪽의 값은 Random Leak Gas(RLG)로 분출량을 알 수 없는 유출가스의 값을 나타낸 것으로, 기존 정량표시 값과 검토 실험 값의 비교 추정 그래프이다.

1 m의 RLG의 경우, C 데이터 값(2059.2)과 근사한 영역의 그래프를 나타낸 것을 알 수 있다. Table 8.은 분출량별 점의 수를 350개 간격을 참고로 0.6 L/min이라는 것을 알 수 있다. 2 m의 경우 역시 C 데이터 값(1697.1)과 근사한 영역의 그래프로 0.6 L/min이라는 것을 알 수 있고, 3 m의 경우 A 데이터(1739.1)와 B 데이터(1607.3)인 1~ 0.8 L/min이라는 것을 알 수 있다. 실험 조건의 특성상 위험성에 따른 분출가스의 작은 분출량 설정과 좁은 간격의 측정 거리 설정으로 점의 수가 작아질수록 측정 거리마다 분출량이 일부 중복되는 원인이 있다. 탐지 측정의 거리가 먼 4 m, 5 m의 경우 대략 C 데이터 (1160.3), (911.8))의 값과 유사한 그래프를 확인할 수 있었다.

V. 결론

화학플랜트 산업단지에서 파이프 및 밸브를 통

한 가스의 이동 시 플랜지, 볼트 등의 이음새에 발생하는 누설에 대한 OGI(Optical Gas Image) 영상에서 몬테카를로 확률기법을 도입한 유출량의 정량표시 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 0.8 L/min 내에서는 분출량과 설정기준인 정사각형안의 분출가스 점의 수는 매우 강한 양의 상관관계계수를 나타냈다.

(2) 분출량과 OGI영상에서 도출한 분출가스 면적 점의 수와의 상관관계계수는 기준 면적 2.54 cm의 경우 평균 0.980이고, 5.08 cm의 경우 0.961이다.

(3) 따라서 상관관계 표를 사용하여, OGI영상으로부터 유출량을 추정할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 엔지니어링개발연구센터의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제번호 : N0000990)

REFERENCES

- [1] ME., *Regulations of the investigation and calculation coefficient of chemical substance emissions*, Notification of ME., Seoul, (2014)
- [2] KOGAS-Tech., Korea Gas Technology corporation, 2017.01., www.kogas-tech.co.kr
- [3] FLIR, Gas detection systems, GF320 Infrared camera, 2017.01. www.flirkorea.com
- [4] Telops, *Innovative Infrared Imaging*, Telops Company, Canada, (2015)
- [5] Zazzeri, G., Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., Lanoiselle, M., Nisbet, E. G. "Plume mapping and isotopic characterisation of anthropogenic methane sources", *Atmospheric Environment*, 110, 151-162, (2015)
- [6] Safitri, A., "Infrared optical imaging techniques for gas visualization and measurement", A&M Univ. Dissertation, (2011)
- [7] Naoya K., Chihiro T., Takabumi F., "Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera", *Yokohama National Univ. NDT&E international*, 44(1), 57-60, (2011)
- [8] Kottegoda, N. T., Natale, L., Raiteri, E., "Monte Carlo Simulation of rainfall hyetographs for analysis and design", *Journal of Hydrology*, 519, 1-11, (2014)

- [9] Palisade, *@RISK, advanced risk analysis for spreadsheets*, Palisade Corp, New York, (2005)
- [10] Kelby, S., *Adobe Photoshop CC Book for Digital Photographers*, NewRiders, Indiana, (2014)
- [11] Bang, S. W., *to lean properly Matlab*, Hanbit Academy, Seoul, (2016)
- [12] Rea, L. M., Parker, R. A., *Designing & conducting Survey Research A Comprehensive Guide*, 3rd ed., Jossey-Bass, San Francisco, (2005)