

석유화학업종에서의 비산배출원 배출 특성 분석

구치완 · 안승효* · †마병철**

(주)LG화학 및 전남대학교 대학원 화학공학과, *전남대학교 화학공학과 석사과정,

**전남대학교 화학공학부 교수

(2022년 11월 4일 접수, 2022년 12월 25일 수정, 2022년 12월 26일 채택)

Analysis Characteristic of Non-point source in Petrochemical

Chiwan Ku · Seunghyo An* · †Byungchol Ma**

LG Chem & Department of Chemical Engineering, Cheonnam National University

*Department of Chemical Engineering, Cheonnam National University

**Cheonnam National University, School of Chemical Engineering

(Received November 4, 2022; Revised December 25, 2022; Accepted December 26, 2022)

요약

고정된 점배출원(Point source)에서 배출되는 오염물질을 포집하여 처리하는 기술은 꾸준히 개발되고 있으나, 비산배출원(Non-point source)의 경우 배출원이 다양하고, 일정하지 않아 배출물질 처리기술 및 실효성 있는 배출계수 등을 개발하는 것은 어려운 실정이다. 그렇지만, 비산배출원은 국내 배출량의 약 60%를 차지하고 있기 때문에 배출량 산정방법이 타당하여야 하며 이를 토대로 사업장은 배출저감기술 등을 개발하여야 한다. 이에, 본 연구에서는 배출량이 많은 석유화학업종을 대상으로 현재 사용되고 있는 배출계수의 실효성과 개선 방안 등을 제시하고자 한다. 이를 위하여, 전남 여수 소재 00회사의 최근 5년간의 LDAR(Leak Detection And Repair)데이터를 분석하여 비산배출원의 배출특성 확인하였다. 그 결과, 유체 성상에 따른 배출 특성의 차이는 없으나 장치의 크기, 제조사별 특성의 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 석유화학 업종에서 적용하는 자체 배출계수가 정유업종에 비해 크게 나타나는 것을 확인하였으며 이에 대한 개선방안 등을 제시하였다. 이러한 연구를 통하여 석유화학업종에 특화된 배출계수를 적용할 수 있으며 사업장 스스로 이를 획기적으로 감할 수 있는 기술을 개발하는데 기여할 것으로 기대한다.

Abstract - Technologies for collecting and treating pollutants from point sources are steadily being developed, but Non-point sources, it is difficult to develop emission treatment technologies and effective emission coefficients. However, since non-point sources make up about 60% of domestic emissions, and first of all, the method of calculating emissions should be reasonable, and the workplace should develop emission reduction technologies based on this. This study suggest the effectiveness and improvement of the emission coefficient currently used for the petrochemical industry with high emissions. The emission characteristics of non-point sources emission were confirmed by analyzing the LDAR (Leak Detection And Repair) data of 00 company located in Yeosu, Jeollanam-do over the past five years. As a result, there was no difference in discharge characteristics according to fluid phase, but it was confirmed that there was a difference in the size of the device and the characteristics of each manufacturer. In addition, it was confirmed that the emission coefficient applied in the petrochemical industry was larger than that of the refining industry, and improvement measures were suggested. Through these studies, it is expected that emission coefficients specialized in the petrochemical industry can be applied and that the workplace itself will contribute to the development of technologies that can drastically reduce them.

Key words : non-point source, emission, coefficient, petrochemical, leak detection and repair

†Corresponding author: anjeon@jnu.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

화학물질관리법에서 규정하는 배출량조사 제도에 대상이 되는 사업장은 매년마다 규제 대상물질이 환경매체로 배출되는 양(배출량)을 산정하고, 배출량을 저감하기 위한 계획 등을 수립하여야 한다. 배출원은 크게 점배출원(point source)과 비산배출원(non-point source)으로 구분하는데, 환경부의 화학물질 배출량조사 보고서(2019년)에 따르면 배출량은 점배출원 약 40%, 비산배출원 약 60%를 차지하고 있다. 이러한 배출량을 저감하기 위하여 점배출원의 경우 고정된 배출원에서 한꺼번에 많은 양이 배출되는 포집 및 처리 방식 분야에서 새로운 기술 등이 꾸준히 개발되고 있으나, 비산배출원의 경우 배출원이 다양하며 배출되는 정도가 일정하지 않아 이에 맞는 배출저감기술 등의 개발이 더딘 것이 현실이다.

또한, 배출저감을 위하여 무엇보다 배출량을 정확하게 산정하는 것이 중요하나, 비산배출의 경우에는 주로 확률적인 배출계수(emission coefficient) 등에 의존하여 결과값의 유효성과 산업군 별로 타당성을 고려한 기준인지에 대한 의문 등이 제기되고 있다. 화학산업의 경우, 크게 정유업종과 석유화학업종으로 구분할 수 있으며 이들 업종은 장치 및 설비가 유사하고 관리방식 또한 크게 다르지 않다. 그럼에도 불구하고, 배출량 산정에 적용되는 배출계수는 정유업종(refinery)과 이를 제외한 모든 업종(synthetic organic chemical manufacturing industry(SOCMI))으로 구분하고 있기 때문에 석유화학업종은 사업의 유사성에도 불구하고 정유업종보다 상대적으로 높은 배출계수가 적용되고 있어 이러한 부분이 합리적으로 개선되어야 한다는 목소리가 높아지고 있다.

이에, 본 연구에서는 석유화학업종에서 비산 배출원의 배출량을 직접 측정하는데 많이 사용되는 LDAR(leak detection and repair)를 활용하여 설비별(밸브, 플랜지, 펌프 seal 등) 배출특성을 분석하고, 이를 토대로 석유화학업종에서 적용 가능한 배출계수 등을 개발하고자 한다. 이를 위하여, 여수산단 소재 00화학의 A공장의 데이터를 통하여 비산배출원의 배출특성을 분석하고, 그 결과를 토대로 효과적인 배출량 저감방안 등을 도출하고자 한다. 또한, 설비별 배출특성 데이터를 통계적인 기법 등을 활용하여 석유화학업종에서 적용가능한 자체 배출계수 개발방안을 제시하고자 한다.

II. 비산배출원 관리 및 배출량 산정 현황

2.1. 비산배출원 관리현황

국내 다수의 석유화학 사업장은 오래전부터 비산배출원의 배출량을 효과적으로 관리하기 위하여 LDAR를 도입하고 운영하고 있으며, 최근 환경부는 대기 환경보전을 위하여 비산배출시설 관리제도(hazardous air pollutants, HAPs)를 제정하였고, LDAR 등을 통하여 누출여부 등을 확인하도록 규정하는 등 비산배출원을 효과적으로 관리하는데 기여하고 있다. LDAR를 적용하기 위하여 먼저, 인벤토리(inventory) 구축이 필요하다. 이를 위하여, P&ID와 PFD를 통하여 구축대상인 배출량조사 대상과 HAPs대상물질의 흐름(stream)을 결정하고, 현장에서 바코드 태그(tag)를 부착하여 설비번호(Item number)가 없는 비산배출원 설비를 식별하도록 하고 각 설비별 기본 제원정보(장치종류, 제조사, 크기 등) 및 위치정보를 시스템에 입력한다. 이렇게 구축된 인벤토리를 기반으로 사업장에서는 설비별 누출여부 등을 직접 확인하는 일정을 계획하고, 일정에 맞춰 휴대용 VOC 측정기를 활용하여 해당 지점에서의 누출 여부 등을 측정한다. 누출측정 시에는 경로에 있는 바코드 태그를 순서대로 확인하고, 데이터는 시스템에 곧바로 전송한다. 누출이 확인되는 설비는 즉시 조치가 가능한 경우 볼팅(bolting), 씰링(sealing), 패키징(packaging) 또는 캡(cap) 및 플러그(plug) 씌우기 등으로 간단하게 수행할 수 있으며, 이러한 방식으로 누출량을 감소시킬 수 있다.

연구 대상인 '00 화학'의 A공장은 배출량 조사제도가 시작된 시점부터 5년이 지난 2004년부터 LDAR를 도입하였으며, Fig. 1과 같이 단계적으로 확대하여 2013년에는 전 공정에 적용하였으며 2021년에는 약 56만 개의 측정지점(point)을 관리하고 있다.

장치별 구성비율은 Table 1.과 같이 플랜지(Flange) 36.6%, 밸브(Valve) 32.8%, 커넥터(Connector) 28.5%

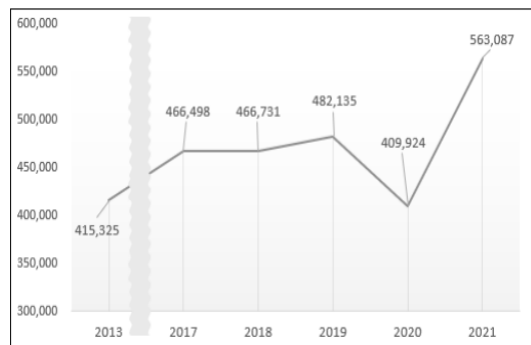


Fig. 1. 'A' Complex LDAR Inventory.

Table 1. Configuration status by device

Equipment Type	Ratio (Average 5years)
Flange	36.6 %
Valve	32.8 %
Connector	28.5 %
Pressure relief valves	0.6 %
Pump seals	0.6 %
Open-ended line	0.4 %
Manholes	0.4 %
Sampling connections	0.1 %
Drains	0.1 %
Compressor seals	0.0 %

순으로 3개의 장치종류가 비산배출원의 대부분을 구성하고 있다.

2.2. 비산배출원 배출량 산정방법

비산배출원의 배출량 산정방법은 직접측정법, 물질수지법, 배출계수법, 공학적계산법 등이 있으며 특히, 배출계수법이 가장 많이 사용되고 있다. 배출계수법은 평균배출계수, 누출기준 배출계수, 농도 배출계수, 배출계수 상관관계식 등 총 4가지 방법으로 구분되며 평균배출계수 등과 같은 설비별로 정해진 평균값을 적용하는 방식보다 모든 비산배출원의 측정 데이터를 바탕으로 배출계수 상관관계식을 도출하여 배출량을 산정하는 방식이 더욱 유효한 결과를 가져올 수 있다. 실제 ‘00화학’사의 A공장의 경우, 각 측정 지점에서 VOC를 측정하고 해당물질의 누출농도를 산정하여 이를 Table 2.에서 제시한 배출계수 상관관계식에 대입하여 배출량을 산정하고 있다.

III. 배출특성 및 배출량 산정 방법 분석결과

3.1. 분석방법

‘00화학’의 A공장의 지난 5년간의 데이터를 취합하여 아래와 같이 분석하였다.

(1) 분석 대상

LDAR 시스템에 누적된 데이터 중 지난 5년 (2017년~2021년)의 데이터를 선정하였으며, 총 8회 측정 (2017년~ 2019년 : 1회/반기, 2020년~2021년 : 1회/년) 데이터를 분석하였다.

Table 2. Application status of emission coefficient correlation equation

Equipment Type	SOCMI (Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry)
Gas valve	Gas valve correlation equation
Liquid valve	Gas Liquid correlation equation
Pump seal	Light liquid pump seals correlation equation
Connector	Gas connector correlation equation
Flange	Gas connector correlation equation
Manholes	Gas connector correlation equation
Compressor seals	Light liquid pump seals correlation equation
Pressure relief valves	Light liquid pump seals correlation equation
Agitators seals	Light liquid pump seals correlation equation
Open-ended line	Light liquid pump seals correlation equation
Sampling connections	Light liquid pump seals correlation equation
Drains	Light liquid pump seals correlation equation

(2) 측정 및 분석 방법

2019년까지는 PID(Photo Ionization Detector, 광이온화 검출기)방식의 휴대용측정기를 활용하였으며, 2020년부터는 FID(Flame Ionization Detector, 화염이온화 검출기)방식의 측정기를 활용하였다. PID에 비해 FID의 측정시간이 많이 소요되어 2020년 부터는 1회/년으로 측정하였다. 또한, 비교가 필요한 경우에는 전 공정에 대한 최초 적용 시점인 2013년의 데이터를 활용하였고, 구축 당시 자료의 확인이 어려워 누락된 정보는 “unknown”으로 명명하여 분석을 진행하였다.

3.2. 비산배출원 배출특성 분석결과

(1) 누출율

연구대상 공장에 대한 5년간의 배출량조사 대상 물질중 취급물질인 에틸렌의 49종의 측정결과를 분석한 결과 Fig. 2와 같이 비산배출원의 누출율은 2017년 0.38%에서 2021년 0.23%로 평균 0.28% 임을 확인하였다. 이는 총 측정 지점(563,087)에 대해 1회 측정 시 약 1,366개의 설비에서 누출이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 경우, 1,3-부타디엔, 염화비닐 및 벤젠 (환경부 배출량 저감 자발적 협약대상 물질)은 100 ppm, 그 외 물질은 500 ppm을 초과할 경우 누출이 발생하였다고 간주하였다.

전체 누출설비를 종류별로 분석하면 밸브(41.7%), 커넥터(40.2%), 플랜지(14.5%)순으로 누출이 많이 발생하고 있음을 알 수 있으나 실제 공장에 설치된 설비는 플랜지가 가장 많으며 밸브, 커넥터가 뒤를 이었다. 이를 고려한다면, 플랜지는 누출이 발생할 빈도는 높으나 관리 및 유지보수가 상대적으로 용이하여 누출 발생 시 간단한 조임만으로 즉시 조치가 가능하다는 특성이 있기 때문에 판단된다.

(2) 유체성상

취급 유체의 성상은 액체 70%, 기체 30%로 일반적으로 액체보다는 기체상태에서 누출이 더 많이 발생할 것으로 추정할 수 있으나, Fig. 4와 같이 누출율에서의 성상에 따른 결과는 크게 차이나지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 이에 대한 원인으로서는 첫째, 액체 경우도 증기압이 높을 경우에는 증기가 기체와 같은 거동을 보일 수 있으며 둘째, 유체의 성상보다는 다른 인자(장치의 유지보수 등 관리상태)의 차이가 누출에 더 큰 영향을 줄 수 있다는 것이다.

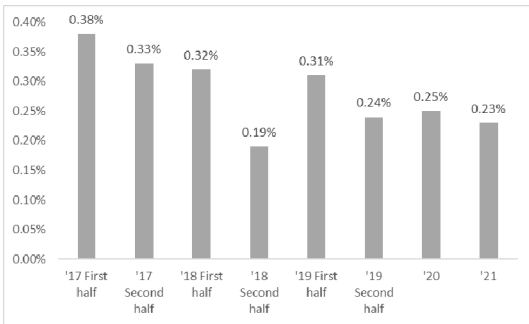


Fig. 2. Non-point source leak rate.

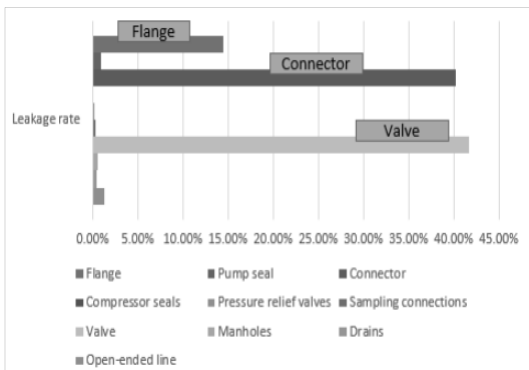


Fig. 3. Leakage Rate by device.

(3) 장치 크기

전체 누출장치를 대상으로 크기별 누출현황을 분석해 본 결과, 8 inch를 기준으로 그보다 작은 크기를 갖는 장치에서 대부분의 누출이 발생하였다. 특히, 아래 제시한 Fig. 5와 같이 커넥터 장치특성에 따라 상대적으로 작은 0.5~1inch미만 에서 누출이 발생하는 것을 알 수 있었다.

(4) 누출농도

누출농도는 Fig. 6과 같이 대부분 3,000 ppm 미만이며 특히, 600 ppm이하가 높은 비중을 차지하였다. 2013년과 비교 시 크게 차이가 있는 부분은 동그라미로 표시하였다. 이러한 차이는 비산누출원을 주기적으로 점검하여 누출 지점을 확인하고 보수하는 과정을 반복함으로써 누출되는 지점이 줄고, 누출이 발생하였어도 낮은 농도로 측정되는 것을 말해 준다.

(5) 제조사별 누출분석

누출이 발생한 설비를 제조사별로 분석한 결과 Fig. 7과 같이 누출이 높은 빈도로 발생하는 설비는 밸브

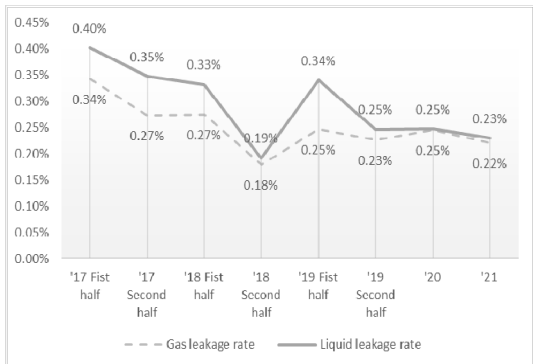


Fig. 4. Leakage Rate by fluid phase.

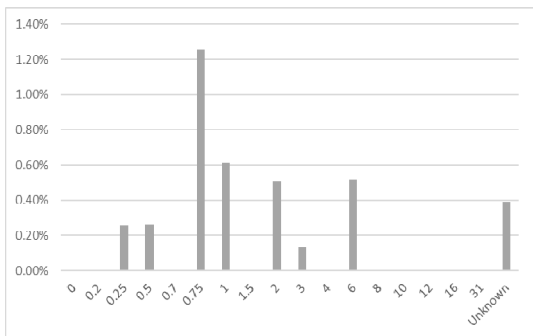


Fig. 5. Leak Point by connector size.

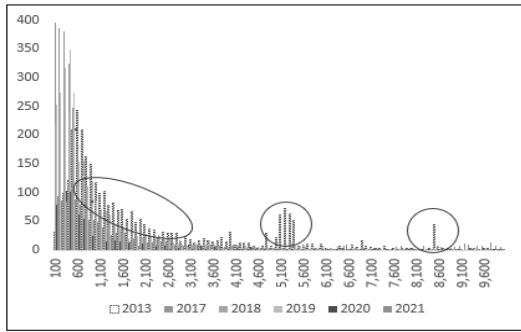


Fig. 6. Leak concentration change trend.

'17 1st half					'17 Second half					'18 1st half				
ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate	ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate	ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate
MC192	71	4	75	5.33%	MC030	20	11	31	35.48%	MC030	22	9	31	29.03%
MC146	71	3	74	4.05%	MC047	19	5	24	20.83%	MC192	70	3	73	6.62%
MC147	36	1	37	3.70%	MC119	10	1	11	9.09%	MC105	18	1	19	5.26%
MC202	100	3	103	2.91%	MC045	178	8	186	4.30%	MC156	19	1	20	5.00%
MC090	34	1	35	2.86%	MC146	71	3	74	4.05%	MC045	178	8	186	4.30%
MC186	40	1	41	2.44%	MC186	40	1	41	2.44%	MC047	23	1	24	4.17%

'18 Second half					'19 1st half					'19 Second half				
ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate	ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate	ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate
MC055	10	1	11	9.09%	MC030	42	20	62	32.26%	MC030	26	5	31	16.13%
MC043	10	1	11	9.09%	MC044	27	1	28	3.57%	MC192	49	5	54	9.26%
MC105	17	1	18	5.56%	MC146	72	2	74	2.70%	MC147	36	1	37	3.73%
MC166	20	1	21	4.76%	MC047	47	1	48	2.08%	MC012	29	1	30	3.33%
MC146	71	3	74	4.05%	MC040	161	3	164	1.83%	MC146	72	2	74	2.70%
MC040	56	2	58	3.45%	MC086	58	1	59	1.69%	MC187	49	1	50	2.00%

20					20					ID	
ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate	ID	Non leak	leak	Total	Leakage rate	Leakage rate high rank	
MC146	69	5	74	6.76%	MC131	33	2	35	5.71%	MC146	6
MC192	65	4	69	5.80%	THT	52	2	54	3.70%	MC030	5
MC147	26	1	27	3.70%	MC027	63	2	65	3.08%	MC192	4
MC121	27	1	28	3.57%	MC037	4614	112	4726	2.37%	MC047	3
MC106	42	1	43	2.33%	MC030	61	1	62	1.61%	MC147	3
MC129	1196	21	1217	1.73%	MC144	62	1	63	1.59%		

Fig. 7. Leak rate by manufacturer.

제조업체에 집중되었으며, 그 중에서도 특정 제조사의 경우 누출이 많이 발생하고 높은 농도를 형성함을 알 수 있었다. 즉, MC030은 설치 건수가 많지 않았음에도 전체 평균 누출율(0.28%)보다 훨씬 높은 16~35% 정도의 누출율을 차지하고 있었다. 이는 동일 설비군에서도 제조사에 따라 누출의 결과가 달라 질 수 있다는 것을 의미한다.

3.3. 배출계수 차이에 의한 비교

(1) 산정방법에 따른 배출량 차이

사업장의 비산배출원에서 배출되는 양을 비교적 정확하게 산정하기 위해서는 직접 측정법에 따라 배출계수 상관관계식을 이용하여 배출량을 산정하여야 한다. 이를 위하여, '00화학' A공장의 실제 배출량 데이터로 상관관계식을 도출하여 배출량을 산정하였다. 그 결과 Table 3.과 같이 총 14,348 kg으로 산정되었으며, 이 값은 동일 조건에서 평균배출계수법을 적

Table 3. Compare with average Emission coefficient and correlation equation

	Average emission coefficient (kg)	Correlation equation (kg)
Valve	8,187,191	5,299
Flange	3,246,595	2,379
Connector	3,101,051	4,920
Pump seal	550,052	219
Compressor seal	388,238	9
Pressure relief valve	3,622,545	936
Sampling connector	114,998	275
Manholes	29,871	35
Drains	83,604	48
Open ended line	30,833	228
Total	19,354,979	14,348

용하여 산정한 양(19,354,979 kg)의 약 0.01%에 해당하는 것을 알 수 있었다. 이는, 비록 비산배출원이라하여도 평상시에 누출농도를 확인하고 누출이 발생하는 곳에 누출방지 조치를 실시하면, 누출되는 빈도와 양을 줄일 수 있어 배출계수 등이 값이 낮아질 수 있으며 배출량 역시 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 사업장에서는 평균계수법을 적용하기 보다 직접측정법을 이용하여 배출계수 등을 직접 도출하는 경우에 실제 배출된 양과 유사한 배출량을 알 수 있으며, 저감 활동 등을 통해 배출계수를 점차 수정(상수 또는 지수의 감소)할 수 있어 배출량 저감 등에 크게 도움이 될 것으로 예상된다.

(2) 석유정제업과 비교

환경부의 배출량조사 지침은 미국환경보호청(EPA)의 "Emissions Estimation Protocol for petroleum refineries" 지침을 참고하여 제정되었다. 이 지침에 따르면, 배출계수 상관관계식은 석유정제업과 석유정제업종을 제외한 모든 업종으로 구분하여 업종별로 제시되어 있다. 그 결과 Fig. 8과 같이 석유정제업이 석유화학제조업에 비해 낮은 배출계수값을 갖는다. 이는 동일설비라도 석유화학보다는 석유정제업에서 배출되는 양이 적다는 것을 의미한다.

석유정제업과 석유화학업종은 장치 구성과 그 유지관리 시스템이 매우 유사하나, 환경부 비산배출시설 관리지침의 배출계수는 석유정제업보다 석유화학

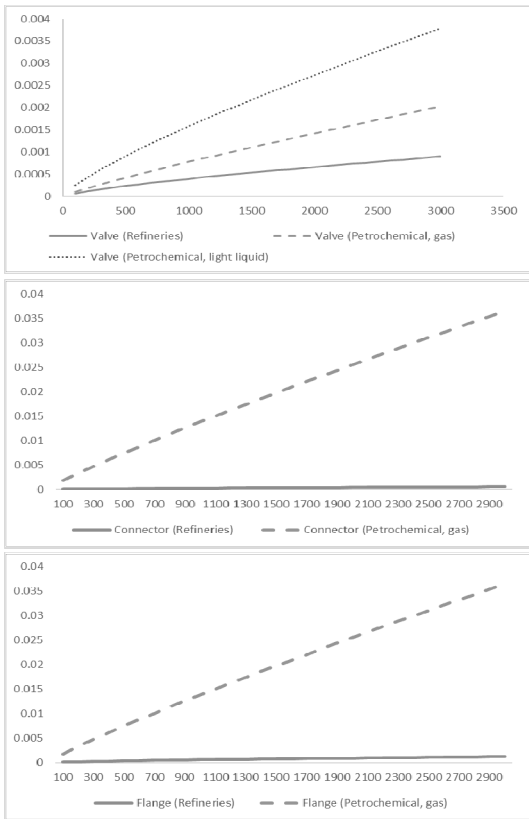


Fig. 8. Correlation equation compare with refineries and petrochemical industry.

업종에서 누출기준인 500ppm의 구간에서 Valve(경질유) 4.5배, Connector 60.4배, Flange 24.9배 차이를 보이며 누출농도가 높을수록 그 차이는 커진다.

따라서, 석유화학업종에서 설비 등의 관리가 잘되고 있음에도 불구하고 평균배출계수법을 사용할 경우 실제로 배출되는 양보다 수십배 이상이 배출되는 것으로 잘못 인식될 수 있다. 따라서, 각 회사에는 직접측정법에 따른 배출계수상관관계식을 도출하여 배출량을 계산하는 것이 권장되며, 환경부 지침 또한 석유화학업종 실정에 맞추어 배출계수를 현실적으로 수정해야 할 필요가 있다.

IV. 결론

이제까지 석유화학업종에서의 LDAR 데이터를 분석하여 누출설비 등의 배출특성을 알아보았으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 전체 누출설비를 종류별로 분석하면 밸브(41.7%), 커넥터(40.2%), 플랜지(14.5%)순으로 누출이 많이 발생하였다. 이 경우, 플랜지는 현장에서 가장 많이 사용되는 설비로써 누출이 발생할 빈도는 높으나 관리 및 유지보수가 상대적으로 용이하여 누출율을 지속적으로 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 밸브와 플랜지는 8 inch 이하, 커넥터는 1 inch 내·외의 설비를 집중적으로 관리할 필요가 있으며, 가능하다면 일상적 패턴에서 OGI(optical gas image)카메라를 통해 수시로 누출여부 및 그 징후를 조기 관리하는 것도 고려해 볼 수 있다.

2. 비산배출원에 배출되는 특성은 물질의 성상(액체 또는 기체 상태)에 따라 영향을 많이 받지 않음을 알 수 있다. 이는 액체의 증기압이 높은 경우 기상공간에서 증기로 존재할 수 있으며, 유체의 성상보다는 다른 인자(장치의 유지보수 등 관리상태)의 차이가 누출에 더 큰 영향을 주기 때문이라고 설명할 수 있다. 장치의 유지보수방법은 측정을 통해 누출 지점이 확인된 경우 볼팅 등의 간단한 조치로 보수가 가능한 곳은 빠른 기간 내 조치하고 재측정을 하여 배출량을 최소화하여야 한다. 교체 및 설비의 운전정지가 필요한 경우 계획을 세우고, 보수가 필요한 경우 그 전까지 누출 방지테이프, 비산 Shield를 적용하여 배출량을 줄이는 조치방법 등이 있다.

3. 누출이 발생한 설비를 제조사별로 분석한 결과 밸브 제조업체의 특정설비가 누출율이 높다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 동일설비라도 제조사별로 누출율을 모니터링하고 그 결과 값을 분석하여 누출율이 낮은 제품을 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

4. 석유화학업종에서 평균배출계수법과 직접측정법을 사용하여 배출량을 산정하는 경우를 비교하면 직접측정법의 경우가 평균배출계수법의 비해 0.01% 수준으로 배출되는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 평균배출계수법을 사용해 배출량을 산정하는 경우에는 제품의 성능, 운전조건 및 지속적인 모니터링, 누출발견시 조치 등 관리적 측면 등에 대한 면밀한 검토 없이 획일적인 기준을 적용하였고, 석유화학업종과 유사한 설비로 구성되고 관리방식 또한 크게 다르지 않은 석유정제업에 비해서도 과도하게 높은 평균배출계수를 적용하고 있기 때문이다.

따라서, 석유화학업종의 사업장은 직접측정법에 따른 배출계수 상관관계식을 도출하여 배출량을 계산하는 것이 권장되며, 환경부 지침 또한 석유화학업종 실정에 따라 배출계수를 현실적으로 수정해야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 전남대학교 대학원 화학물질 안전관리 특성화 대학원의 지원을 받아 수행되었으며, 지원에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] 환경부, 화학물질안전원, “2022년 화학물질 배출량 조사 지침서”, (2022)
- [2] 환경부, “비산배출의 저감을 위한 시설 관리기준 세부 이행지침”, (2020)
- [3] 환경부, “HAPs 비산배출시설 관리제도 설명자료”, (2021)
- [4] 국립환경과학원, “대기오염공정시험 기준”, (2021)
- [5] 방승석, 신승원, 이상목, 이종협, 박현수, “LDAR 시스템을 이용한 휘발성무기화합물질(VICs)관리 방법 개발”, *NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERES*, 25(3), 310-318, (2007)
- [6] RTI international, EPA, “Emissions Estimation Protocol for Petroleum Refineries, Ver.3”, (2015)
- [7] EPA, “Protocol for Equipment Leak Emission Estimates”, (1995b)
- [8] EPA, “Toxic Chemical Release Inventory Reporting Forms and Instructions”, (2013)