

論文

울산항 선박으로부터의 대기오염 배출량 산정에 관한 연구

정광현 · 김성주 · 박흥석*
울산대학교 건설환경공학과

A studies on the Air pollutant Emission Rate calculation from vessels in the Ulsan Port

Kwang-Hyun, Cheong · Sung-Joo, Kim · Hung-Suck, Park

* Department of Civil & Environmental Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

요 약: 국제해사기구(IMO)에서 1997년 9월 선박으로부터의 대기오염방지를 위한 협약(MARPOL 부속서VI)을 채택하여 2005년 5월 19일 협약 발효를 앞두고 있다. 따라서 향후 선박으로부터 배출되는 배기가스 중에 포함된 아황산가스(SOx)와 질소산화물(NOx)등 대기오염 물질의 배출 규제와 항만이나 터미널에서 유조선으로부터 휘발성유기화합물(VOCs) 배출금지 등의 규제가 강화될 것으로 예상된다. 본 연구는 이에 대한 대비와 관리방안을 모색하고자 외국에서 이용되는 선박의 배출오염물질 산정 방법을 이용하여 선박에서 배출되는 SOx, NOx의 배출량을 산정하였다. 또한 울산항 특성을 감안하여 액체화물 적·양하시 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs)의 양을 산정하는 방법에 대해 고찰하고 그 배출량을 산정하였다.

ABSTRACT : The Protocol adopted in Sep. 1997 included the new Annex VI of MARPOL 73/78, which will enter into force on 19 May 2005. MARPOL Annex VI sets limits on sulphur oxide and nitrogen oxide emissions from ship exhausts and prohibits deliberate emissions of volatile organic compound (VOCs) from oil tanker in port and oil terminal. This study was conducted to find out countermeasures for the new Annex VI of MARPOL 73/78 and draw up a feasible management plan. The emission quantity of NOx and SOx from ships in Ulsan Port was calculated by U.S. EPA and Japan Marine Engineering emission factors of air pollutant from ship exhausts. In addition, volatile organic compound (VOCs) from oil tanker during the loading and discharging period, also calculated.

1. 서 론

국제해사기구(International Maritime Organization: IMO) 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee: MPEC)의 보고에 의하면, 1990년 선박에서 배출되는 대기오염물질(질소산화물 및 황산화물)은 지구전체의 4~7%에 달하고 있다고 한다¹.

특히 선박 배출 대기오염이 문제시되는 것은 육상에서 사용되지 않는 저질연료가 선박에서 사용되며, 항만구역과 내해 등 주거지역에 가까운 해역에서는 선박이 대기에 미치는 영향이 상당하기 때문이다. 그리하여 국제해사기구에서는 1997년 9월 선박으로부터 대기오염방지협약(MARPOL부속서 VI)을 채택하였고, 2005년 5월 19일에 발효될 예정이다. 이는 선박으로부터 배출되는 배기가스 중에 포함된 황산화물(SOx) 및 질소산화물(NOx)등 대기오염 물질의 배출 규제와 항만이나 터미널에서 유조선으로부터 휘발성 유기화합물(VOCs)의 배출금지 등의 규제가 포함되어 국내 관련업체에 미치는 영향이 적지 않을 것으로 예상된다. 특히 연안 역에 위치한 울산광역시는 항구도시로서 해륙풍의 순환과 같은 국지풍계의 영향으로 연안지역 선박으로부터 발생한 대기오염 물질들이 내륙지역까지 운송되고 있어 효율적인 대기질 관리를 위해서는 선박오염원의 배출관리에 대한 고려가 필수적이다².

이와 같이 선박에 의한 대기오염의 영향은 분명히 존재하며 지역 대기질에 상당한 영향을 미칠 것으로 추측되지만, 우리나라에서는 선박으로부터 오염물질 배출량에 관한 조사나 연구가 전무한 상태이다. 본 연구에서는 선박으로부터의 대기오염방지를 위한 협약 발효를 앞두고 이에 대한 대비와 관리방안을 모색하고자 선박에서 배출되어지는 오염물질의 양을 산정하는 방법을 문헌상에서 인용하여 이를 바탕으로 선박 오염물질(SOx, NOx) 배출량을 산정하였으며, 울산항 특성을 감안하여 액체화물 적·양하시 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs)의 배출량을 산정하였다.

II. 문헌 조사

1. 선박으로부터의 대기오염 배출량 산출

선박은 일반적으로 엔진의 장착방식에 따라 내장형(Inboard-Powered Vessel)과 외장형(Outboard-Powered Vessel)으로 나누어지고, 용도에 따라 상업용, 군사용, 위락용으로 나눌 수 있다. 또한 사용하는 연료에 따라 디젤엔진과 가솔린 엔진으로 구분하기도 하고, 발동기선과 증기선으로 나누기도 하는데, 이와 같은 다양한 구분인자들을 고려하여 배출계수를 산정하고 적용해야 한다. 상업용 선박의 배출량 산정방법

은 연료판매자료를 이용하는 방법과 선박의 운항자료를 이용하는 방법이 구분되며, 배출계수도 각 경우에 대하여 별도로 작성되어있다³.

1.1 연료판매 자료를 이용

연료판매 자료를 이용하는 경우에 선박을 발동기선과 증기선으로 나누고 발동기선은 다시 운항지역에 따라 호수, 하천, 해양으로 구분하고 있는데, <표 2-1>와 <표 2-2>는 연료판매 자료를 이용하여 상업용 선박의 배출량을 추정할 수 있는 배출계수이다⁴.

<표 2-1> 수로에 따른 상업용 발동기선의 평균 배출계수

오염물질	배출계수(kg/kl)		
	SO ₂	CO	NO ₂
해양	3.2	13.0	32.0

<표 2-2> 상업용 선박의 오염물질 평균 배출계수(kg/kl)

오염물질	잔사유			증류유		
	Hoteling	Cruise	Full	Hoteling	Cruise	Full
TPS	1.20	2.40	6.78	1.80	1.78	1.78
SO ₂	19.1S	19.1S	19.1S	17.0S	17.0S	17.0S
CO	Neg.	0.414	0.872	0.5	0.5	0.5
NO ₂	4.37	6.70	7.63	2.66	2.83	5.34
VOCs	0.4	0.4	0.4	0.38	0.082	0.206

주 1) S : 연료의 황함량(%), 잔사유(4%), 증류유(1.0%)
 2) Hoteling 모드는 정격출력의 10-11%, Cruise 모드는 35-75%, Full 모드는 100% 부하에서 운전하는 것을 의미함.

1.2 선박의 운항자료를 이용

항만을 입·출항하는 대상선박으로는 화물선, 유조선, 여객선, 컨테이너선, 어선 등이며, 선박에 탑재되어 있는 기관으로는 주 엔진(main engine) 디젤기관, 보조엔진(auxiliary engine) 디젤기관, 보조 보일러 등이 있다. 디젤 엔진선의 경우 입·출항시에 가동하는 기관은 주 엔진 디젤기관, 보조 엔진 디젤기관, 보조 보일러이며, 1척의 선박이 1회 입항 혹은 출항에서 배출하는 오염물질의 양은 각 배출량의 합으로 구해진다. 추정 방법에는 미국과 일본의 추정기법을 사용하여 배출량을 산정할 수 있는 방법이 있다.

① 선박항행에 관한 자료

선박에서의 배출량을 산정하기 위해서는 각 기관의 주 엔진 출력, 운항 상태에 따른 부하율, 기관별 각종 원단위식, 정박시간은 日本船舶機關學會(1995), 日本船舶煤煙問題研究會(1985) 등의 경험식을 이용하여 설정한다.^{5,6} 그리고 정박시간이나 입

출항자료, 항행모드 등은 대상항구의 자료를 활용하여 톤급별로 선박크기를 500톤미만(I구간), 500톤~5,000톤(II구간), 5,000톤~10,000톤 미만(III구간), 10,000톤이상(IV구간)의 4구간으로 나눈다.¹ 주 엔진의 출력은 선종별로 톤수와 출력의 상관식을 이용하는 것이 일반적이다. 선박의 주 엔진 부하율은 각 항로에 대한 선박의 크기별 항행모드 또는 선박의 운항 상태에 따라 주 엔진 디젤기관과 보조엔진 디젤기관, 보조보일러의 부하율을 각각 설정하며, 선박의 운항 상태는 항행중, 정박중 하역시, 정박중 비하역시로 구분한다. 일반적으로 선박은 입항해서부터 하역작업을 행하지만 보조엔진의 사용상황은 하역을 행하지 않을 때와는 다르므로, 정박후 하역시간과 비하역시간, 그리고 하역시간과 비하역 시간을 합한 정박시간으로 구분하여 각 시간별 적정 값을 설정한다.

② 선박배출량 산정식

NO_x 배출량은 기관에 따라 다르고 같은 기관이라도 연소상태에 따라 달라지며, 연료에 따라서도 변화하므로 정확한 추정은 힘들다⁷. NO_x 배출량 추정은 기관출력과 상관관계를 정의하거나 연료소비량과의 상관관계를 정의하는데, 대체로 기관출력과 상관식을 사용하고 있다. 반면에 SO_x 배출량은 연료중의 유황분에 의해 결정되며 연료소비량에 비례하는 추정식이 이용되고 있다. 항행중이나 정박중에 사용한 연료전체의 황 함유량은 가중 평균한 값이다. <표 2-3>과 <표 2-4>에 선박타입별 단위배출량을 추정할 수 있는 식을 정리하였다⁵.

<표 2-3> 디젤엔진의 발생동력 상관식

선박종류	주 엔진(ps)	보조엔진(kW)
여객선	7.9X ^{0.83}	1.5X ^{0.63} .3
컨테이너선	1.9X ^{0.97}	2.2X ^{0.60} .2
유조선	12X ^{0.70}	10X ^{0.37} .2
화물선	19X ^{0.65}	7.7X ^{0.40} .2
어선	73X ^{0.50}	13X ^{0.43} .3

<표 2-4> 디젤엔진의 단위배출량 추정식

주 엔진	보조엔진	보조 보일러
W = 0.21P ^{0.95}	W = 0.17P ^{0.98}	
N = 1.49P ^{1.14} ·10 ⁻³ . (46/22.4)	N = 1.49P ^{1.14} ·10 ⁻³ . (46/22.4)	B = 0.0267X ^{0.48} .2 W = 73.48B ^{0.41}
S = W·s·(1/100)·(64/32)	S = W·s·(1/100)·(64/32)	N = W·n(n = 0.008) S = W·s·(1/100)·(22.4/32)·(64/22.4)

주) s은 연료의 황 함유량(w/t%)이고, P는 정격 발생동력(PS unit)임.
 n은 NO_x의 배출계수이고, x는 화물총량임

2. 선박의 선적·하역과정에서 발생하는 VOCs 배출량 산출

휘발성유기화합물(VOCs)은 아직까지 국제적으로 통일된 정의나 대상물질의 범위가 마련되어 있지 않다. 우리나라의 경우는 대기 환경 보전법 시행령 제 39조에 의하여 VOCs를 정의하고 있고⁸, 시행규칙 제 64조에 배출시설을 규정하고 38종의 물질을 VOCs로 고시⁹하고 있어 본 연구에서는 38종의 액체 화학물질만 배출량 산정식을 활용하여 산출하였다. 선박으로부터의 배출은 적·양하시와 수송과정의 배출이 있다. 수송과정의 배출은 가솔린의 경우 수송 기간동안의 배출계수가 증기회수장치를 장착하지 않은 경우에도 0-1.0mg/liter로 매우 낮은 값을 나타내므로 생략하였고 액체화합물의 적·양하시 배출량만을 고려하였다.

2.1 선박 적하시 VOCs 배출량 산출

선박 적하시 VOCs 배출량을 산정하기 위해서는 우선 VOCs 물질의 정확한 선박 적하량이 필요하며 운송 수단중 선박과 Barge의 구분, 적하 방식중 상부적하와 하부적하에 따라 배출계수가 달라지므로 정확한 구분이 필요하다. 또한, 입항전 탱크세정 유·무, 탱크세정을 하지 않은 경우에는 Gas-Free의 유·무를 분류해야하며, 이전 화물이 휘발성이었는지 비휘발성이었는지에 따라 배출계수가 다르다. 미국 EPA에 제시된 석유 적하시 배출량 산정 식은 다음과 같다¹⁰.

<식 2-1> 적하시 배출량 산정식

$$Q = 12.46 \times [(SMP)/T]$$

여기서, Q : 선적된 액체의 10³ gal당 선적손실
 M : 증기의 분자량 lb/lb-mol
 P : 선적된 액체의 실제 증기압, Ψ
 T : 선적된 벌크 액체의 온도, R(F+460)
 S : 포화계수

<식 2-2> 유증기배출제어시스템을 갖춘 경우 배출량 산정식

$$Q = 12.46 \times [(SMP)/T] \times (1 - eff/100)$$

여기서, eff : 제어효율

2.2 선박 양하시 VOCs 배출량 산출

양하시 배출량 산정기법은 어디에도 없으며 미국 EPA에 제시된 고정지붕탱크(fix roof tank) 작업시 배출량 산정식을 이용하여 선박의 양하시 배출량을 추정할 수 있다. 선박 양하시 VOCs 배출량을 산정하기 위해서는 적하시와 같이 우선 VOCs 물질의 정확한 선박 양하량이 필요하며, 선박의 입·출항자료도 필요하다.

<식 2-3> 고정지붕탱크 작업시 배출량 산정식

$$Q = 2.40 \times 10^{-5} M_v P V N K_N K_C$$

여기서, Q : 고정지붕탱크의 작업시 배출량, lb/year

M_v : 증기의 분자량 lb/lb-mol

P : 액체화합물 온도에서의 실제 증기압 Ψ ,

V : 탱크용량

N : 연간 턴오버 회수

K_N : 턴오버계수

K_C : 제품계수

note. $N = \frac{\text{연간 총 수입량 (gal)}}{\text{탱크용량, V (gal)}}$

note : 원유의 K_C = 0.84이며, 이외 유기 액체유의 K_C = 1.0

III. 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 선박으로부터의 대기오염방지를 위한 협약(MAPOL 부속서 VI) 발효시 주요 배출규제 대상인 NO_x, SO_x 등 선박 운항시 발생하는 배기가스를 연료판매 자료를 이용한 방법과 운항자료를 이용한 방법중 미국 산출 기법과 일본 산출 기법을 사용하여 배출량을 산출하고 비교하였다. 또한 액체화합물의 선박 적·양하시 발생하는 VOCs는 미국 EPA 자료를 사용하여 추정하였다.

1. 선박으로부터의 오염물질 배출량 산정

1.1 연료판매 자료를 이용한 배출량 산정

① 울산항 연료사용량

통상산업부의 에너지센서스 자료¹¹ 중 수상운수업 전체부문에서의 연료사용량에서 내륙수상여객운송부문에서 사용한 양을 제외하여 해상에서의 연료사용량을 구하고, 이를 각 항구별 연료사용량으로 할당하기 위하여 각 항구별로 연간 입항 총톤수 자료¹²를 근거로 입항총톤수별 점유비율을 계산하였다. 항구별/입항총톤수별 점유비율에 의거하여 항구별 경유와 경질 중유(B-A유), 중유(B-B유), 중질중유(B-C유)의 연간 사용량을 각각 추정하였다.

그리고 해양용으로 판매된 연료가 모두 항구에서 이용되는 것은 아니므로 항구에서 이용된 연료의 비율을 곱하여 보정해야 하는데, 미국 환경청의 자료에 의거하여 잔사유의 경우는 25%, 중류유의 경우는 75%가 항구에서 이용된다고 가정하였다¹³.

<표 3-1> 울산항 연료 사용량 및 중류유와 잔사유의 항구에서의 사용량 (단위 : kℓ/년)

해양부문 연료사용량		항구에서의 연료사용량			항구에서의 연료사용량
중유유	잔사유	중유유의 75%	잔사유의 25%		
81,836.43	374,261.41	61,377.32	93,565.35	154,942.67	
중유유		잔사유			소 계
경유	경질중유 *70%	중유 *30%	경질중유 *30%	중유 *70%	
40,861.52	18,971.95	1,917.95	2,656.84	1,491.74	89,416.79
					154,942.67

② 울산항에서의 대기오염물질 배출계수 선정 및 배출량 추정

항구에서의 연료별 사용량에 미국 EPA가 제시한 선박의 배출계수를 이용할 수 있다. 여기서는 운항하는 선박을 발동기선만을 가정하였으며 운항모드는 Cruise모드를 사용하였다. 이 과정에서 요구되는 연료의 황 함량에 대해서는 다음과 같이 추정하였다. 국제적으로 현재의 선용유 평균 황 함량은 약 3%인 것으로 제시되었지만, 일본의 조사 자료에 의하면 세계 약 47개 지역에서 공급되는 전체 선용유 8,500만톤 가운데 29개 지역에서 황 함유량 3.5%가 넘는 선용유의 약 68%가 공급되고 있는 실정이다¹⁴. 하지만 본 연구에서는 선용유의 황 함량을 울산지역 해운판매 석유류 판매량의 가중 평균값을 구하여 다음과 같이 가정하였다.

<표 3-2> 연료중 황 함유량의 가정값

구 분		경 유	경질중유	중 유	중질중유
세계 선용유 평균 황 함유량	가중평균값(%)	0.98104	1.99878	2.95962	3.52534
	본 연구의 가정값(%)	1.00	2.00	2.96	3.53
울산 선용유 평균 황 함유량	가중평균값(%)	0.42224	1.15859	1.40075	1.60532
	본 연구의 가정값(%)	0.42	1.16	1.40	1.61

<표 3-3> 선박 대기오염물질 배출계수 (단위 : 톤/년)

구 분	배출계수 (kg/kt)	중유유			잔사유			수로 (해양)
		경유	경질중유 *70%	중유 *30%	경질중유 *30%	중유 *70%	중질중유	
SO ₂	10.34	22.92	27.00	25.36	29.94	33.95	3.2	
NO ₂	34.66	34.66	34.66	36.37	36.37	36.37	32.0	

1.2 선박의 운항자료를 이용한 배출량 산정

선박에서의 오염배출량을 추정할 수 있는 기법이 국내에서 연구된 추정방법이나 배출계수는 아직 없어 본 연구에서는 미국과 일본의 추정기법 두 가지를 각각 사용하여 산정하였다.

① 미국 EPA 자료 이용

선박에 의한 오염물질 배출량은 한국석유개발공사의 2002년도 「석유류 수급통계」에서 울산지역에 해운으로

판매된 연료¹⁵를 기준으로 산정하였다. 하지만 해운부문 판매연료가 모두 울산항내에서 사용된다고 볼 수 없으므로, 울산항에 2002년도 톤급별 총 입항 선박톤수와 톤급별 선박 연료경제(해리/kl)¹⁶를 고려하여 울산·온산항에서 울산시계(Pilot station으로부터 12해리)까지 운행하는데 소요되는 연료와 항구 정박시 소요되는 연료를 기준으로 해운에 판매된 총 연료중 울산시계 내에서 사용한 연료비율은 산정하여 오염물질 배출량을 산정하였다. 울산항 입항척수와 시계까지의 거리(25km) 및 연료경제를 이용하여 울산항 선박운항에 따른 연료 사용량을 <표 3-4>에 제시하였다.

<표 3-4> 울산항 입출항 선박에 의한 연료사용량 (단위 : kl/yr)

톤급별	계	중유유 사용량	잔사유 사용량
100톤이하	421.0	419.8	1.2
101~1,000톤	14,489.4	11,948.8	2,540.6
1,000~10,000톤	18,984.0	7,127.6	11,856.4
10,000~20,000톤	3,760.8	224.8	3,536.0
20,000~50,000톤	6,768.0	13.2	6,754.8
50,000톤이상	4,929.0	-	4,929.0
운항시	49,352.2	19,734.2	29,618.0
정박시	9,870.4	3,946.8	5,923.6
합 계	59,222.6	23,681.0	35,541.6

울산시계까지 입·출항하는 선박에 의한 연료사용량을 산출하였으며 항구 정박시 연료사용량을 운항시 연료사용량의 20%(선박배출계수의 Cruise/Hoteling 비율)를 추가로 고려하였는데, 총 연료사용량은 59,222.6kl/year로서 해운 판매 석유류 수급량의 9.3%에 해당하며 나머지 90.7%는 외해 또는 공해 상에서 운항시 사용하는 연료로 보아 배출량 추정에서 제외하였다.

$$\text{연료사용량} = \sum \frac{\text{입항척수}}{\text{연료경제}} \times \text{운항거리}$$

여기서, 입항척수는 톤별 입항척수를 의미하며, 연료경제는 톤별 연료경제, 운항거리는 울산시계(25km)까지의 왕복 거리를 적용할 수 있다. 또한, 선박에 의한 오염물질 배출량은 앞서 산출한 운항시 연료사용량과 정박시 연료사용량하고 운항시에는 Cruise모드를 정박시에는 Hoteling모드를 사용해서 오염물질 배출계수를 곱하여 산출하였다.

② 일본 船舶機關學會자료 이용

울산지방해양수산청 자료를 이용하여 울산항 입·출항 대상선박으로 화물선, 유조선, 컨테이너선으로 연간 톤급별 척수 및 운송량을 구분하고, 톤급별로 선박크기를 500톤 미만(I구간), 500톤~5,000톤(II구간), 5,000톤~10,000톤 미만(III구간), 10,000톤이상(IV구간)의 4구간으로 나눈다. 선박에 탑재된 각각의 기관은

운항이나 정박상황에 따라 달리 가동되므로 항행중 및 정박중으로 나누어 日本船舶機關學會 자료를 이용하여 선종별 톤수와 출력의 상관식을 이용하여 1척마다의 배출량 원단위를 설정하고 그들의 합으로 배출량을 산정할 수 있다. NOx 배출량의 추정은 기관출력과의 상관관계를 정의하거나 연료소비량과의 상관관계를 정의하는데, 대체로 기관출력과의 상관식을 사용하고 있고, 반면에 SOx 배출량은 연료중의 유황분에 의해 결정되며 연료소비량에 비례하는 추정식이 이용되고 있다. 항행중이나 정박중에 사용한 연료 전체의 평균 황 함유량은 공통적으로 1.4%로 가정하는데, 이는 항행 및 정박중 각 연료의 평균 황 함유량을 가중 평균한 값이다.

<표 3-5> 선박 대기오염물질 배출계수 (단위 : Kg/s)

구분	컨테이너			유조선			화물선		
	주 엔진	보조 엔진	보조 보일러	주 엔진	보조 엔진	보조 보일러	주 엔진	보조 엔진	보조 보일러
발생동력(Ps)	5,248	821	18	553	99	8	1,364	.223	18
연료소비량	776	126	19	92	16	14	216	35	19
SOx 단위배출량	56.33	6.80	0.15	4.33	0.61	0.11	12.12	1.53	0.15
NOx 단위배출량	21.74	3.54	0.53	2.56	0.45	0.38	6.04	0.99	0.53

2. 액체화물의 선적·하역과정에서 발생하는 VOCs 배출량 산정

2.1 액체화물의 선적 적하시 VOCs 배출량 산정

① 울산항 화물 수송 현황

한국석유공사의 석유정보 자료 중 지역별 수·출입 정보를 이용하여 울산항 액체화물 수출량 상위 50위 물질 현황¹⁷에서 VOCs와 관련된 액체화물의 연간 수출량은 <표 3-6>와 같으며, 2004년 울산항에서 국외로 수출된 화학물질의 양은 29,470천톤이며, 이중 상위 50위 물질의 수출량은 13,380천톤으로 전체 수출량의 45.4%를 차지하고 있고, 연안 수송 액체 화학물질의 양은 14,420천톤으로 수출량의 48.9%를 차지하고 있다. 또한, 환적 액체 화학물질은 2,424천톤으로 나타났다. 본 연구에서는 수출량 상위 50위 밖의 액체 화학물질 수송 현황 과 연안수송 및 환적의 경우 물질별로 분리한 자료를 찾을 수 없어 산출에서 제외하였다.

② 울산항 적하시 VOCs 배출계수 선정 및 배출량

위의 VOCs 물질의 배출계수는 <표 3-6>와 같으며 앞서 기술한 적하시 배출량 산정 식에 배출계수를 사용하여 산출하였다. 여기서 S값 1.2를 택한 이유는 국내에서는 상부적하(splash)와 하부적하(submerged) 방식 중 중간형태의 출하방식을 취하고 있기 때문에 포화계수 값으로 1.2를 택하였다¹⁸. 각각의 연간 제품별 배출량을 계산하여 합산하였으며, 수송량 자료가 없는 부분은 배출량에서 제외하였다. 결과는 <표 3-10>에 그 배출량을 나타내었다.

<표 3-6> 울산항 수출 화물 중 VOCs 물질의 배출계수

구분	수출량(천톤/년)	M	P	S	T(°F+460)
Carbon Tetrachloride	1,214	154	1.4	1.2	515 R
Unleaded Gasoline	778	66	6.2	1.5	523 R
Naphtha	642	80	1.9	1.2	542 R
Styrene	460	104	1.4	1.2	564 R
Xylene	693	106	1.4	1.2	563 R
Toluene	312	92	0.8	1.2	532 R
Benzene	245	78	2.6	1.2	540 R
Acetic Acid	162	60	3.7	1.2	533 R
Methyl Teriary Butyl Ether	136	88	1.9	1.2	537 R
Ethylene	121	26	2.0	1.2	534 R
Acrylonitrile	100	53	1.8	1.2	532 R
Propylene	53	42	0.9	1.2	533 R
1-Butene	24	56	2.9	1.2	522 R

주) 선적된 벌크 액체의 온도는 평균값이다.

2.2 액체화물의 선적 양하시 VOCs 배출량 산정

① 울산항 화물 수송 현황

한국석유공사의 석유정보 자료 중 지역별 수·출입 정보를 이용하여 울산항 액체화물 수입량 상위 50위 물질 현황에서 VOCs와 관련된 액체화물의 연간 수입량은 <표 3-7>과 같으며, 2004년 울산항에서 국내에 수입된 화학물질의 양은 78,490천톤으로 이중 상위 50위 물질의 수입량은 69,935천톤으로 전체 수출량의 89.1%를 차지하고 있고, 가장 많이 수입된 화학물질은 Petroleum으로 63,211천톤이고, 연안 수송 액체 화학물질의 양은 2,737천톤으로 수입량의 3.5%를 차지하는 것으로 나타났다.

② 울산항 양하시 VOCs 배출계수 선정 및 배출량

위의 VOCs 물질의 배출계수는 <표 3-7>와 같으며 앞서 기술한 선적시 배출량 산정식을 이용하여 배출량을 산출하였다. 각각의 연간 제품별 배출량을 계산하여 합산하였으며, 수송량 자료가 없는 부분은 배출량 산정에서 제외하였다. 결과는 <3-10>에 그 배출량을 나타내었다.

<표 3-7> 울산항 수출화물 VOCs 물질의 배출계수

구분	수출량(천톤/년)	Mv	P	V	N	KN	KC
Petroleum	63,211	50	4.0	30000	2107	0.2	0.84
Naphtha	4,372	80	1.9	20000	219	0.3	1.00
Xylene	2,402	106	0.8	2000	1201	0.2	1.00
Methanol	918	32	2.6	2000	459	0.2	1.00
Cabon Tetrachloride	856	154	2.3	2000	428	0.2	1.00
Ethylene	950	26	2.6	2000	475	0.2	1.00
1,2-Dichloroe thane	589	99	1.7	2000	295	0.2	1.00
Methyl ethyl ketone	345	72	2.1	2000	173	0.3	1.00

Styrene	306	104	0.8	2000	153	0.3	1.00
Acrylonitrile	283	53	2.4	2000	142	0.4	1.00
Propylene	220	42	0.9	2000	110	0.4	1.00
Benzene	157	78	2.0	2000	79	0.5	1.00

IV. 배출량 산정 결과 및 고찰

선박으로부터의 대기오염방지 협약(MARPOL 부속서 VI) 발효시 배출규제 대상으로는 오존파괴물질과 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx)등 선박 운항시 발생하는 배기가스, 항만이나 터미널에서 유조선의 휘발성유기화합물(VOCs), 선내 소각기 등이 될 것이다. 선박에서의 오존파괴물질의 고의적인 배출이 금지되고 오존파괴물질을 함유한 새로운 장비의 설치는 금지되며, NOx의 배출규제 대상으로는 2000년 1월 1일 이후 건조되는 선박에 거치되거나 개조가 이루어지는 출력 1백30kW이상의 디젤기관에 적용된다. 또한 SOx는 황산화물 배출통제지역을 운항하는 선박의 경우 연료유의 황 함유량이 1.5%를, 그 외의 지역을 운항하는 선박은 4.5%를 넘지 않도록 규정하고 있고, 협약에 의하면 휘발성 유기물질의 배출이 통제된 항구를 운항하는 유조선의 경우 유증기 수집 장치를 설치해야 하고 배출이 통제된 항구 또는 터미널에서는 유증기 배출제어시스템을 설치해야 한다¹⁰. 마지막으로, 2000년 1월 1일 이후에 선박에 설치되는 선내 소각기는 IMO에서 정한 기준에 적합해야 하며, 선내 소각 물질도 엄격히 제한되므로 이에 대한 대책이 시급히 수립되어야 한다.

본 연구에서 추정한 선박으로부터의 오염물질 배출량 및 환경부 발표 울산지역 총 배출량은 <표 3-8>~<표 3-10>과 같다. 우선 선박으로부터 발생하는 배기가스 중 연료판매 자료를 이용한 배출량 산정은 SOx의 경우 울산에서 판매된 선용유 평균 황 함유량으로 산정해서 4,048.3 Ton/year로 환경부 발표 자료와 비교하면 5.5%에 해당되나, 세계 선용유 평균 황 함유량을 이용하여 산정하면 7,130.6 Ton/year로 9.6%에 달하는 것으로 나타났다. NOx의 경우 5,530.3 Ton/year로 환경부 발표 자료와 비교하면 8.2%에 해당된다. 또한, 선박운항 자료를 이용한 배출량 추정 결과 미국 EPA 자료를 이용한 추정기법과 일본 船用機關學會 자료를 이용한 추정기법을 사용했을 경우 두 가지 기법이 유사한 배출량 값을 나타냈다. 환경부 발표 자료와 비교하면 SOx의 경우 5.6%, 5.7%를 배출하였으며, NOx의 경우 11.9%, 11.9%를 배출되는 것으로 나타났다. 그러나 연료 판매 자료를 이용한 경우와 운항 자료를 이용한 경우에는 SOx는 유사한 배출량 값을 나타냈으나, NOx는 3.7% 가량의 차이를 확인할 수 있다. 또한, 액체화물 적·양하시 배출되는 VOCs는 3,142.6 Ton/year로 환경부 발표 자료와 비교했을 경우 4.1%로 대부분의 배출이 적하시 발생한다는 사실을 알 수 있다. 배출통제지역으로 지정됐을 경우 제어 효율을 95%로 가정하면, VOCs 배출

량은 155.7Ton/year로 0.2%까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 다음으로 선박 운항시 배출되는 오염물질로서 CO는 2,044.9 Ton/year로 5.9%, TSP는 222.8 Ton/year로 1.4% 가량 배출 되는 것으로 나타났다.

선박으로부터 발생하는 배기가스중 SOx는 선용유 평균 황 함유량을 줄임으로서 배출량을 줄일 수 있고, NOx는 기관의 교체 등으로 배출량을 줄일 수 있다. 또한 선박의 적·양하시 발생하는 VOCs는 선박의 경우 유증기 수집 장치를 터미널은 유증기 배출제어시스템을 설치함으로써 배출량을 줄일 수 있음을 확인하였다.

<표 3-8> 연료판매 자료를 이용한 울산항 배출량 추정결과 (단위 : 톤/년)

구 분	SO ₂	NO ₂	CO	TSP
본 연구의 추정결과	4,048.3	5,530.3	2,044.9	222.8
울산지역 환경부 발표자료	74,105.0	67,119.0	34,397.0	16,024.0
비교 백분율	5.5%	8.2%	5.9%	1.4%

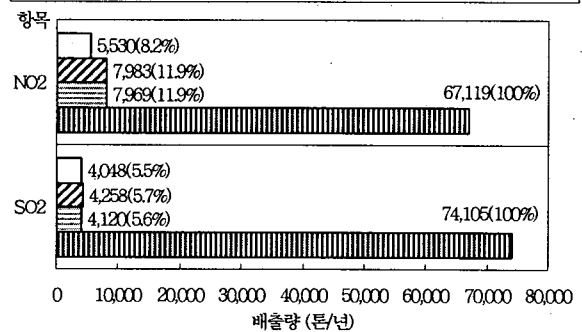
<표 3-9> 선박운항 자료를 이용한 울산항 배출량 추정결과 (단위 : 톤/년)

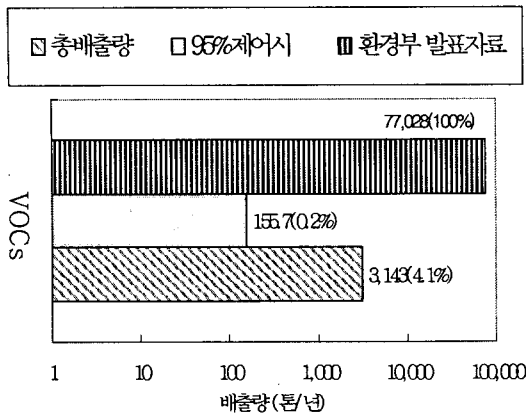
구 분	미국 추정기법		일본 추정기법	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
본 연구의 추정결과	4,119.9	7,969.1	4,257.6	7,982.6
울산지역 환경부 발표자료	74,105.0	67,119.0	74,105.0	67,119.0
비교 백분율	5.6%	11.9%	5.7%	11.9%

<표 3-10> 울산항 선박 적·양하시 VOCs 배출량 추정결과 (단위 : 톤/년)

구 분	적하시 배출량	양하시 배출량	총 배출량	95% 배출제어
본 연구의 추정결과	3,114.2	28.4	3,142.6	155.7
울산지역 환경부 발표자료	-	-	77,028.0	77,028.0
비교 백분율	-	-	4.1%	0.2%

환경부 발표자료
 추정결과(미국기법)
 추정결과(일본기법)
 추정결과(연료판매자료 이용)





<그림 1> SOx, NOx 배출량 추정결과

<그림 2> VOCs 배출량 추정결과

V. 결론

본 연구에서는 선박으로부터의 대기오염방지를 위한 협약 발효를 앞두고 이에 대한 대비와 관리방안을 모색하고자 선박에서 배출되어지는 오염물질의 양을 산정하는 방법에 대해 고찰하고 선박 배출량을 산정하였다. 또한 울산항 특성을 감안하여 액체화물 적·양하시 발생되는 휘발성유기화합물(VOCs)의 배출량을 산정하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. SOx의 울산 대기질 배출량 기여율은 연료판매 자료를 이용한 경우와 운항자료를 이용한 경우 5.5%~5.7%로 모두 유사한 값을 나타냈다.
2. SOx는 세계 선용유 평균 황 함유량으로 산정할 경우 7,130.6 Ton/year로 환경부 발표 자료와 비교하면 9.6%에 달하는 것으로 나타났다. 이는 1997년말을 기준으로 우리나라에서는 황 함유량을 선박용 B-C유는 4.0%미만, 선박용 경유의 경우 1.0%미만을 함유하도록 저황 연료유를 공급하고 있어 SOx 오염 배출량이 줄어든 사실을 확인 할 수 있다.
3. NOx는 연료판매 자료를 이용한 경우와 운항자료를 이용한 경우 3.7% 정도의 차이를 확인 할 수 있는데 NOx 배출량 추정은 기관 출력과의 상관관계를 정의하거나 연료 소비량과의 상관관계를 정의하는데, 일반적으로 기관 출력과의 상관식을 사용하고 있어 울산 지역 대기질 배출량 기여율은 11.9%에 근접하게 배출되는 것으로 사료된다.
4. VOCs는 3,142.6 Ton/year로 환경부 발표 자료와 비교했을 경우 4.1%로 나타났으나 정확한 자료가 부족하고 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 선박으로부터의 적·양하시 VOCs 배출량을 파악하고 이를 줄이기 위해서는 VOCs 물질의 정확한 운송량 파악과 체계적인 관리가 우선적으로 이루어져야 할 것이다.

5. 울산항을 VOCs 배출 통제지역으로 지정하면 선박의 경우 유증기 수집 장치를 설치해야 하고, 터미널의 경우 유증기 배출제어시스템을 설치해야 하며 제어 효율을 95%로 가정하면, VOCs 배출량을 155.7 Ton/year로 줄일 수 있는 것으로 확인 되었다.
6. 선박의 배출량 산정 방법 중 연료 판매 자료를 이용하는 방법과 선박의 운항자료를 이용하는 경우 약간의 배출량 차이를 보였다. 따라서 향후 추정 과정에서 전제하거나 가장한 요인들의 적합성과 배출계수의 정확성 등에 대한 검증에 대하여 면밀한 연구가 수반되어야 한다.

울산은 항구도시이므로 선박으로부터 대기오염방지 협약에 따라 선박으로부터 배출되는 배기가스 중에 포함된 황산화물(SOx) 및 질소산화물(NOx)의 배출 규제를 강화할 수 있도록 철저한 준비가 필요하다. 울산의 경우 SOx의 농도가 전국에서 가장 높은 도시로 산업체에서 청정 연료 사용을 적극적으로 권장하고 있으므로 선박으로부터의 배출량을 줄이기 위해서도 하루 빨리 황산화물 배출통제지역 지정이 필요하다. 또한 휘발성유기화합물(VOCs)도 배출 통제 항구로 지정하고, 항구를 운항하는 탱커의 경우 유증기 수집 장치를 설치토록하고, 터미널에서는 유증기 배출제어시스템을 의무적으로 설치하여 VOCs 배출량을 줄인다면 "에코폴리스울산"에서 지향하는 울산의 대기질 환경 개선에 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 日本船舶機關學會, 船舶大氣汚染物質削減手法檢討調査報告書, 1995
- [2] 이화운의 3명, 연안의 선박오염배출을 포함한 부산지역의 대기오염물질 배출량 산정, 1999.
- [3] 항만대기오염관리를 위한 기초연구, 조경두, 2002. 인천발전연구원
- [4] U.S. EPA, Compilation of Air Pollutants Emission Factors, Vol. II, Mobile sources, 1985.
- [5] 日本船舶機關學會, 1995,
- [6] 日本船舶煤煙問題研究會, 1985.
- [7] 庶田和則, 大阪灣へイエアアの 대기環境の測定と分析, 神戸商船 大學大學院 碩士學位論文, 1996.
- [8] 환경부 : 환경법전, 2004
- [9] 환경부고시집 : 환경부고시 제 2000-71호, 2000
- [10] U.S. EPA : Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Vol. I, 5th edition, AP-42, 1995.
- [11] 통산산업부, 에너지센서스 자료, 2004
- [12] 울산지방해양수산청, 울산항 톤급별 입·출항 통계 및 수송 현황, 2004
- [13] U.S. EPA : Compilation of Air Pollutant Emission

- Factors. Vol. III, Marine vessels, 1981.
- [14] 최동현외 1명, 선박 대기오염 방지협약 제정동향과 대책, 해운산업연구원, 1996.
- [15] 한국석유개발공사, 석유류 수급통계, 2002
- [16] 산업자원부, 에너지 총조사보고서, 2002.
- [17] 한국석유개발공사, 석유류 정보자료중 지역별 수·출입 정보, 2004
- [18] 광주지역의 VOCs 배출량산정에 관한 연구, 이영재·신대운, 조선대학교 환경공학과
19. IMO, 73/78 MARPOL Annex VI, 1997