

# 조선소 밀집지역의 휘발성유기화합물 농도분포 특성에 관한 사례 연구 Concentration Distribution of Volatile Organic Compounds in the Ambient Air of an Industrial Shipbuilding Complex : A Case Study

이명은 · 박은옥\* · 정재우\*<sup>†</sup>

Myoung-Eun Lee · Eun-Ok Park\* · Jae-Woo Chung\*<sup>†</sup>

경남과학기술대학교 도시시스템공학과

\*경남과학기술대학교 환경공학과, 녹색기술연구소

Department of Urban System Engineering, Gyeongsang National University of Science and Technology (GNTECH)

\*Department of Environmental Engineering, Green Technology Institute (GTI), GNTECH

(Received December 29, 2014; Revised June 16, 2015; Accepted June 26, 2015)

**Abstract :** In this study, the spatial and temporal distribution of volatile organic compounds (VOCs) in an industrial shipbuilding complex was monitored, and the local characteristics estimated. The major VOC component measured at all of the sampling sites were almost the same as those found at an indoor painting facility, indicating that painting works conducted in the shipyards were a significant source of VOCs in the vicinity of shipbuilding areas. The main parameters affecting the VOCs distribution were the distance between the sampling site and painting work place, and the intensity of the painting works. A quite broad range of VOC concentrations were observed in all of the sampling sites, depending on the intensity of painting works in nearby areas suppressing the typical seasonal and temporal variation trends in VOCs observed in urban areas.

**Key Words :** Industrial Shipbuilding Complex, Volatile Organic Compounds, Concentration Distribution, Local Characteristics

**요약 :** 조선소 밀집지역의 휘발성유기화합물 농도의 공간 및 시간적 분포특성을 측정하였으며 이를 기반으로 지역적 특성을 평가하였다. 모든 시료채취지점에서 측정된 주요 휘발성유기화합물은 조선소 내부의 실내도장시설에서 측정된 물질들과 밀접한 연관성을 가지는 것으로 나타나 조선소 내부에서 이루어지는 도장작업이 주변지역의 휘발성유기화합물의 중요한 배출원임을 보여준다. 휘발성유기화합물의 분포를 결정하는 주된 요인들은 시료채취지점과 선박제조 작업장 사이의 거리와 선박제조 작업의 강도인 것으로 나타났다. 모든 시료채취지점에서 일반적인 도시 대기에서 관찰되는 VOCs 농도의 일반적인 시계열적 변화경향을 압도하는 도장작업의 강도에 따라 매우 넓은 범위의 휘발성유기화합물 농도가 관찰되었다.

**주제어 :** 조선소 밀집지역, 휘발성유기화합물, 농도분포, 지역적 특성

## 1. 서론

조선산업은 국제무역의 지속적인 증가와 보조를 맞추어 꾸준한 성장을 유지해왔다. 최근의 경제적 불황에도 불구하고 세계의 선박수요는 지속될 것으로 전망되고 있다.<sup>1)</sup> 조선산업이 우리나라를 비롯하여 일본, 중국의 국가경제성장에 기여해왔으나 주변지역에 다양한 환경문제를 유발시켜왔다. 선박제조 과정은 절단, 용매 세척(solvent cleaning and degreasing), 표면 전처리, 도장작업, 용접 및 조립과 같은 여러가지 종류의 작업들을 포함하고 있으므로 다양한 환경오염물질들을 발생시킬 수 있다.<sup>2-8)</sup> 즉, 선박제조 공정은 매우 복잡하고 다양한 단계들로 구성되어 있고 하나의 모기업이 다수의 하청업체들과 연계되어 있으므로 선박제조과정에서 발생하는 다양한 환경오염을 체계적으로 관리하는데 어려움이 있다. 이로 인하여 조선소 주변지역에서는 다양하고 민감한 환경관련 민원들이 유발되어 왔다.<sup>6,7)</sup>

선박제조 활동들과 관련된 가장 중요한 환경문제중의 하나는 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)

과 같은 유해대기오염물질이다. 선박제조 과정의 도장작업은 다량의 유기용제를 사용하므로 많은 양의 VOCs가 생성된다.<sup>9,10)</sup> 수많은 VOCs는 그 자체로 발암성, 기형성 등의 독성을 가질 뿐 아니라 대기화학반응을 통해 오존, 광화학적 산화물질들과 카보닐 화합물들을 생성시키는 전구물질로서 작용한다.<sup>11-15)</sup>

대규모 선박을 제조하는 선박제조 공정은 많은 실외 도장 작업들을 포함하고 있으며 다량의 유기용매를 사용하기 때문에 주변지역의 VOCs 농도분포에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 즉, 조선소 밀집지역의 대기에서 관찰되는 VOCs 농도 특성은 일반적인 도시의 대기에서 관찰되는 현상과는 다를 수 있다. 그러나 조선소 주변지역의 VOCs 농도분포에 대한 연구는 매우 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구에서는 경남 T시에 위치한 조선소 밀집지역을 연구대상 지역으로 설정하여 주변지역의 VOCs 농도를 측정·분석하고 지역적 특성을 규명하여 지역의 대기질을 관리하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: jwchung@gntech.ac.kr Tel: 055-751-3348 Fax: 055-751-3484

## 2. 조사 및 분석 방법

### 2.1. 연구 대상지역 및 측정항목

본 연구의 대상지역으로 T시에 위치한 조선소 밀집지역을 선정하였다(Fig. 1). 이 지역은 3개의 중형 조선소들, 1개의 선박 구성부품 제조업체, 3개의 소규모 선박수리업체들이 비교적 좁은 면적에 위치하고 있으므로 주변지역에 미치는 환경영향이 클 것으로 예상되는 지역이다. 연구 대상지역의 지역현황은 본 연구팀에서 발표된 논문에서 자세히 설명되어 있다.<sup>7,8)</sup>

선박수리업체들은 매우 소규모이고 작업량이 많지 않으며 선박 구성부품 제조업체의 생산품은 동일지역의 조선소에 전량 납품되고 있으므로 3개의 중형 조선소가 연구의 주된 대상이라 할 수 있다. 연구 대상지역에 6개의 시료채취지점을 설치하였으며 그 중 3개(F1~F3)는 조선소 내부에, 나머지 3개(R1~R3)는 주변 주거지역에 설치하였다. 이러한 조선소 내·외부의 시료채취지점외에 도장작업으로부터 직접적으로 발생하는 VOCs 수준을 평가하기 위해 실내 도장시설로부터 시료가 채취되었다.

시료채취는 2009년에 2월부터 10월까지 기상조건을 고려하여 계절별로 1회 또는 2회씩 총 6회가 이루어졌으며 측정항목은 총 52개 VOCs 물질로 설정하였다. 연구기간 동안 조선소의 조업은 세계적인 경기침체로 인해 계절적 차이를 가지고 있었다. 봄철은 조선소의 조업강도가 가장 높았으며 여름부터 작업강도가 감소하기 시작하였으며 마지막 시료채취가 이루어진 가을철은 다른 계절에 비해 가장 조업강도가 낮았다. 이와 더불어 주거지역에 위치한 R2 지점의 주변에서는 모든 시료채취기간 동안에 주택의 건설에 이

어지고 있었다.

일반적으로 대기오염물질의 공간적 분포는 풍향과 풍속 등 기상조건에 큰 영향을 받는다. 시료채취기간의 기상특성을 파악하기 위해 연구기간 동안의 기상자료를 수집하여 바람장미를 작성하였으며 그 결과를 요약하면, 겨울철에는 북북동풍(NNE)과 북동풍(NE)을 비롯한 북풍계열이 우세하며 봄철부터 남풍계열이 증가하기 시작하여 4월에서 7월까지의 남풍계열이 우세한 상황에서 북풍계열이 동시에 영향을 주며 8월부터 다시 북풍계열이 영향을 주는 것으로 나타났다.

### 2.2. 시료채취 및 분석방법

본 연구에서 VOCs를 채취하기 위해 Tenax TA (Supelco, USA)를 가스 유량과 시료채취 시간을 조절할 수 있는 미니 펌프(Sibata, MP-Σ30, Japan)에 연결하여 사용하였다. 시료채취는 각각의 시료채취지점에서 오전(09:00~11:00), 오후(14:00~16:00), 저녁(19:00~21:00)로 구분하여 100 mL/min의 유속으로 2시간 동안 이루어졌다. 하나의 측정지점에서 2개의 시료채취가 동시에 이루어졌으며 그 평균값을 대푯값으로 사용하였다.

VOCs의 정량화를 위한 분석은 US EPA 방법 TO-14에서 규정한 방법에 따라 자동열탈착 장치(ATD, Perkin-Elmer, USA)가 부착된 GC/MS (Agilent GC/MSD)를 사용하여 수행하였다.<sup>16)</sup> VOCs 채취가 이루어진 튜브는 90 mL/min의 고순수 질소를 사용하여 320°C에서 10분간 탈착시켰으며 탈착된 VOCs는 -20°C에서 농축시킨 후에 고순도 헬륨을 사용하여 200°C로 탈착시켜 GC로 주입시켰다. VOCs 성분의 분리에는 1.0 mL/min의 고순도 헬륨을 이동가스로 사용하여

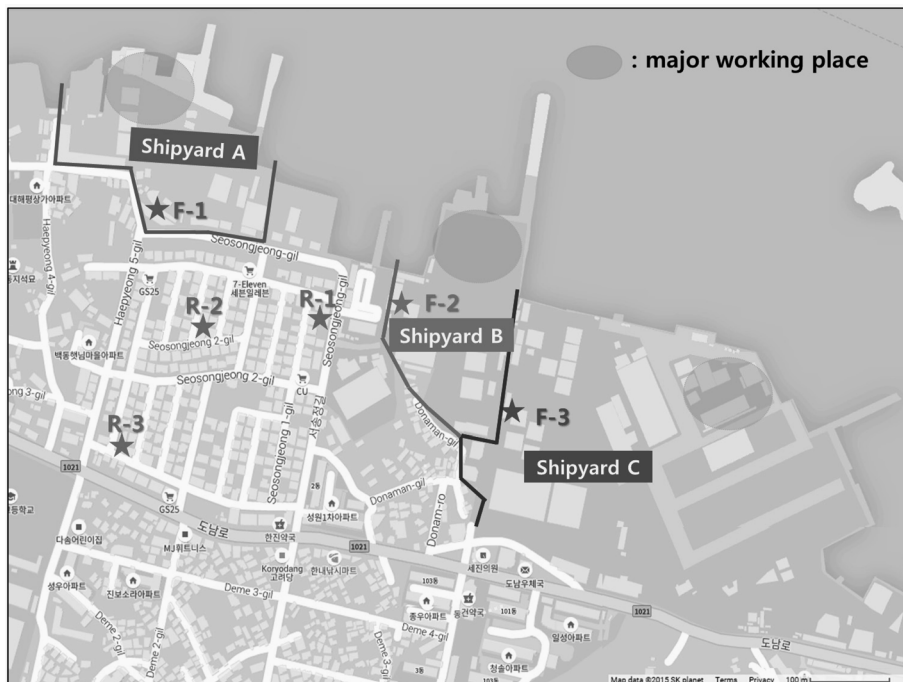


Fig. 1. Study area and sampling sites.

Restek RTX-1 모세관 칼럼(60 m × 0.32 mm; 3.0 μm film thickness)에서 이루어졌다. 오븐 온도는 초기 5분간 40℃를 유지하고 4℃/min의 속도로 120℃까지, 3℃/min의 속도로 170℃까지 상승시킨 후에 20℃/min의 속도로 250℃까지 상승시켰다. 총 52개의 VOCs로 구성된 표준가스(Supelco, Cat No. 47537-U, 49149-U, USA)가 공기시료내의 VOCs를 규명하고 정량화하기 위해 사용되었다. 관심이 되는 농도범위를 포함하는 5개의 표준농도들을 사용하여 검량선을 작성하여 정량에 사용하였다. 시료채취 과정에 현장 블랭크(field blanks)를 수집하여 분석하였다. 시료채취 기간에 카트리지의 포집효율을 검토하기 위해 두 개의 카트리지를 직렬로 연결하여 시료를 채취하여 분석하였으며 95% 이상의 VOCs가 첫 번째 카트리지에서 발견되는 것으로 나타났다. 기기분석은 정부공인 분석기관인 E&B TECH (Environmental and Bio-Technology Company, Ltd.)에서 수행되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 실내 도장시설의 휘발성유기화합물 농도

선박제조 과정에서 VOCs의 주된 발생원은 다량의 유기용제를 사용하는 도장작업이다. 도장작업으로부터 직접적으로 발생하는 VOCs를 측정하기 위해 실내도장시설에서 시료를 채취하여 분석하였으며 그 결과를 Table 1에 나타

Table 1. Concentrations of volatile organic compounds in indoor painting facility inside shipyard

Compounds	Average concentration (ppb)	Composition (%)
Acetone	4.41	0.1
2-Propanol	272.43	7.9
Hexane	25.71	0.7
n-Butanol	660.89	19.3
Benzene	1.16	0.0
4-methyl-2-pentanone	70.32	2.0
Toluene	5.26	0.2
Ethylbenzene	528.04	15.4
m,p-xylene	856.23	24.9
o-Xylene	545.48	15.9
n-Nonane	3.36	0.1
m,p-Ethyltoluene	118.90	3.5
1,3,5-Trimethylbenzene	41.97	1.2
2-Ethyltoluene	26.36	0.8
1,2,4-Trimethylbenzene	208.94	6.1
n-Decane	4.86	0.1
1,2,3-Trimethylbenzene	40.10	1.2
n-Undecane	2.60	0.1
1,2,4,5-Tetramethylbenzene	15.97	0.5
Total VOCs	3432.98	100.0

내었다. 분석된 52개 VOCs 중에 19개의 물질이 검출되었으며 m,p-xylene (24.9%), n-butanol (19.3%), o-xylene (15.9%), ethylbenzene (15.4%), 2-propanol (7.9%), 1,2,4-trimethylbenzene (6.1%)의 6가지 물질과 기타 성분들로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 총휘발성유기화합물(total volatile organic compound, TVOCs)의 농도는 3,433 ppb로 나타났으며 그 중에 상위 6가지 물질이 대략 90%를 차지하는 것으로 나타났다.

#### 3.2. 시료채취 지점별 휘발성유기화합물 농도

조선소 내부와 주거지역에 설치된 시료채취지점에서 측정된 VOCs 농도의 평균값과 표준편차를 Table 2에 나타내었다. 시료채취지점에 따라 37~41개의 VOCs 성분들이 검출되었으며 m,p-xylene, ethylbenzene, o-xylene, n-butanol과 1,2,4-trimethylbenzene이 주된 성분이었으며 이는 실내도장시설에서 발견된 주된 성분에 포함되어 있는 물질인 것으로 나타났다. 시료채취지점에서 검출된 VOCs 성분은 실내도장시설에서 검출된 성분의 2배 가량이 존재하는 것으로 나타났는데 이는 자동차 등과 같은 다른 배출원에 의해 발생되었거나 도장작업에서 배출된 VOCs의 화학반응에 의해 생성되어 일어나는 현상으로 사료된다.

Fig. 2는 연구대상 지역의 VOCs 배출원을 추정하기 위해 조선소 내부 및 주거지역 시료채취지점별로 주된 5가지 VOCs 성분을 비교하여 나타낸 결과이다. 모든 시료채취지점에서 주요 VOCs 성분들과 농도의 크기순서가 동일한 것으로 관찰되었다. 즉, 모든 측정지점에서 m,p-xylene이 가장 높은 농도로 존재하였으며 ethylbenzene, o-xylene, n-butanol, 1,2,4-trimethylbenzene의 순으로 높은 농도를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 사실로부터 연구대상 지역의 VOCs 분포가 동일한 배출원에 의해 영향을 받음을 추정할 수 있다. 시료채취지점별 주요 VOCs 성분의 조성비를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 시료채취지점에 따라 m,p-xylene이 33.26~38.49%를 차지하고 있었으며 ethylbenzene (15.55~17.46%),

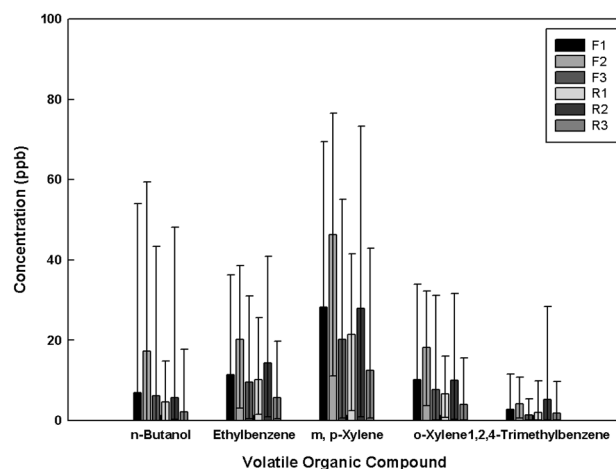


Fig. 2. Comparison of major volatile organic compound concentrations between sampling sites located inside shipyards and in residential areas.

Table 2. Average values and standard deviations of volatile organic compound concentrations inside shipyards and in residential areas

No.	VOC compounds	Concentrations (Avg. $\pm$ SD.)					
		F1	F2	F3	R1	R2	R3
1	Ethanol (Ethyl alcohol)	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
2	Acetone	0.86 $\pm$ 1.57	0.54 $\pm$ 0.40	0.55 $\pm$ 0.71	0.45 $\pm$ 0.31	0.45 $\pm$ 0.36	0.45 $\pm$ 0.39
3	2-Propanol (Isopropyl alcohol)	0.13 $\pm$ 0.47	0.23 $\pm$ 0.33	0.39 $\pm$ 0.66	0.12 $\pm$ 0.19	0.09 $\pm$ 0.18	0.02 $\pm$ 0.04
4	Methylene chloride	0.00 $\pm$ 0.00	0.11 $\pm$ 0.32	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
5	1-Propanol(Propyl alcohol)	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
6	2-Butanone(Methyl ethyl ketone)	0.32 $\pm$ 0.33	0.40 $\pm$ 0.31	0.30 $\pm$ 0.21	0.31 $\pm$ 0.24	0.37 $\pm$ 0.20	0.22 $\pm$ 0.17
7	Ethyl acetate	0.15 $\pm$ 0.28	0.14 $\pm$ 0.25	0.12 $\pm$ 0.20	0.06 $\pm$ 0.13	0.07 $\pm$ 0.13	0.07 $\pm$ 0.12
8	Hexane	0.43 $\pm$ 0.55	0.66 $\pm$ 0.92	0.32 $\pm$ 0.42	1.43 $\pm$ 2.28	1.42 $\pm$ 2.17	0.39 $\pm$ 0.59
9	Chloroform	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
10,11	2,4-Dimethylpentane+1,2-Dichloroethane	0.03 $\pm$ 0.13	0.04 $\pm$ 0.13	0.05 $\pm$ 0.12	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.07
12	n-Butanol	6.89 $\pm$ 12.47	17.32 $\pm$ 16.87	6.19 $\pm$ 10.82	4.58 $\pm$ 4.15	5.76 $\pm$ 11.89	2.25 $\pm$ 4.48
13	Benzene	0.33 $\pm$ 0.17	0.33 $\pm$ 0.13	0.36 $\pm$ 0.21	0.37 $\pm$ 0.21	0.39 $\pm$ 0.18	0.32 $\pm$ 0.16
14	1,2-Dichloropropane	0.02 $\pm$ 0.07	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
15	Bromodichloromethane	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
16,17	Iso-Octane+ Trichloroethylene	0.35 $\pm$ 1.35	0.12 $\pm$ 0.22	0.04 $\pm$ 0.13	0.04 $\pm$ 0.10	0.06 $\pm$ 0.14	0.02 $\pm$ 0.09
18	n-Heptane	0.77 $\pm$ 2.22	0.70 $\pm$ 1.62	0.69 $\pm$ 1.41	0.68 $\pm$ 1.65	1.18 $\pm$ 2.32	0.24 $\pm$ 0.82
19	4-Methyl-2-Pentanone (MILK)	1.98 $\pm$ 1.93	3.28 $\pm$ 3.83	1.11 $\pm$ 1.26	2.08 $\pm$ 1.92	1.21 $\pm$ 1.04	0.55 $\pm$ 0.73
20	Toluene	2.01 $\pm$ 1.39	2.95 $\pm$ 1.86	2.92 $\pm$ 1.79	2.79 $\pm$ 1.83	3.35 $\pm$ 1.40	1.63 $\pm$ 0.81
21	Dibromochloromethane	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
22	n-Butyl acetate	0.80 $\pm$ 1.96	0.36 $\pm$ 0.45	0.33 $\pm$ 0.54	0.66 $\pm$ 1.00	1.73 $\pm$ 2.44	0.37 $\pm$ 0.44
23	n-Octane	0.19 $\pm$ 0.30	0.28 $\pm$ 0.49	0.19 $\pm$ 0.37	0.19 $\pm$ 0.34	0.27 $\pm$ 0.49	0.19 $\pm$ 0.48
24	Tetrachloroethene	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
25	Ethylbenzene	11.44 $\pm$ 10.45	20.31 $\pm$ 10.47	9.58 $\pm$ 8.79	10.27 $\pm$ 7.36	14.43 $\pm$ 11.42	5.79 $\pm$ 5.70
26,27	m,p-Xylene	28.32 $\pm$ 16.42	46.28 $\pm$ 16.51	20.16 $\pm$ 16.21	21.41 $\pm$ 13.80	27.97 $\pm$ 22.66	12.45 $\pm$ 12.45
28	Styrene	0.17 $\pm$ 0.19	0.12 $\pm$ 0.17	0.02 $\pm$ 0.04	0.43 $\pm$ 0.76	0.67 $\pm$ 0.99	0.12 $\pm$ 0.15
29	o-Xylene	10.17 $\pm$ 7.91	18.15 $\pm$ 8.14	7.69 $\pm$ 8.14	6.69 $\pm$ 4.71	9.99 $\pm$ 9.32	4.07 $\pm$ 4.36
30	n-Nonane	0.56 $\pm$ 0.45	1.25 $\pm$ 1.27	0.38 $\pm$ 0.34	0.63 $\pm$ 0.40	0.59 $\pm$ 0.35	0.30 $\pm$ 0.21
31	(1S)-(-)Alpha-pinene	0.03 $\pm$ 0.06	0.03 $\pm$ 0.08	0.09 $\pm$ 0.14	0.03 $\pm$ 0.06	0.02 $\pm$ 0.06	0.04 $\pm$ 0.07
32,33	m,p-Ethyltoluene	2.02 $\pm$ 2.53	2.96 $\pm$ 2.28	1.03 $\pm$ 1.12	1.40 $\pm$ 1.58	4.09 $\pm$ 7.24	1.33 $\pm$ 2.23
34	1,3,5-Trimethylbenzene	0.75 $\pm$ 0.97	1.02 $\pm$ 0.71	0.36 $\pm$ 0.36	0.53 $\pm$ 0.68	1.58 $\pm$ 2.83	0.50 $\pm$ 0.85
35	2-Ethyltoluene(o-Ethyltoluene)	0.51 $\pm$ 0.64	0.74 $\pm$ 0.57	0.26 $\pm$ 0.29	0.35 $\pm$ 0.37	1.00 $\pm$ 1.77	0.33 $\pm$ 0.57
36	B-Pinene	0.01 $\pm$ 0.04	0.02 $\pm$ 0.07	0.02 $\pm$ 0.07	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.05
37	1,2,4-Trimethylbenzene	2.88 $\pm$ 3.63	4.13 $\pm$ 2.98	1.46 $\pm$ 1.43	1.99 $\pm$ 2.39	5.26 $\pm$ 9.00	1.87 $\pm$ 3.14
38	n-Decane	0.36 $\pm$ 0.30	0.91 $\pm$ 1.25	0.27 $\pm$ 0.29	0.41 $\pm$ 0.24	0.36 $\pm$ 0.18	0.18 $\pm$ 0.11
39	1,4-Dichlorobenzene	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
40	1,2,3-Trimethylbenzene	0.63 $\pm$ 0.75	1.03 $\pm$ 0.72	0.38 $\pm$ 0.35	0.43 $\pm$ 0.42	1.15 $\pm$ 1.92	0.38 $\pm$ 0.64
41	(R)-(+)-Limonene (D-Limonene)	0.02 $\pm$ 0.03	0.02 $\pm$ 0.03	0.01 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.04	0.01 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.04
42	Nonanal	0.03 $\pm$ 0.07	0.08 $\pm$ 0.14	0.06 $\pm$ 0.08	0.04 $\pm$ 0.05	0.08 $\pm$ 0.14	0.06 $\pm$ 0.10
43	n-Undecane	0.15 $\pm$ 0.10	0.45 $\pm$ 0.65	0.13 $\pm$ 0.14	0.17 $\pm$ 0.09	0.13 $\pm$ 0.07	0.09 $\pm$ 0.04
44	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	0.12 $\pm$ 0.09	0.26 $\pm$ 0.26	0.10 $\pm$ 0.10	0.08 $\pm$ 0.08	0.13 $\pm$ 0.13	0.05 $\pm$ 0.08
45	Decanal	0.05 $\pm$ 0.10	0.08 $\pm$ 0.09	0.07 $\pm$ 0.09	0.06 $\pm$ 0.09	0.12 $\pm$ 0.20	0.10 $\pm$ 0.13
46	n-Dodecane	0.07 $\pm$ 0.04	0.18 $\pm$ 0.18	0.07 $\pm$ 0.06	0.09 $\pm$ 0.05	0.08 $\pm$ 0.04	0.06 $\pm$ 0.03
47	n-Tridecane	0.03 $\pm$ 0.04	0.06 $\pm$ 0.10	0.03 $\pm$ 0.03	0.04 $\pm$ 0.04	0.04 $\pm$ 0.04	0.05 $\pm$ 0.05
48	n-Tetradecane	0.02 $\pm$ 0.03	0.05 $\pm$ 0.09	0.02 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.02	0.03 $\pm$ 0.03	0.03 $\pm$ 0.03
49	n-Pentadecane	0.00 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.04	0.00 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.02	0.00 $\pm$ 0.00
50	n-Hexadecane	0.00 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.02	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00

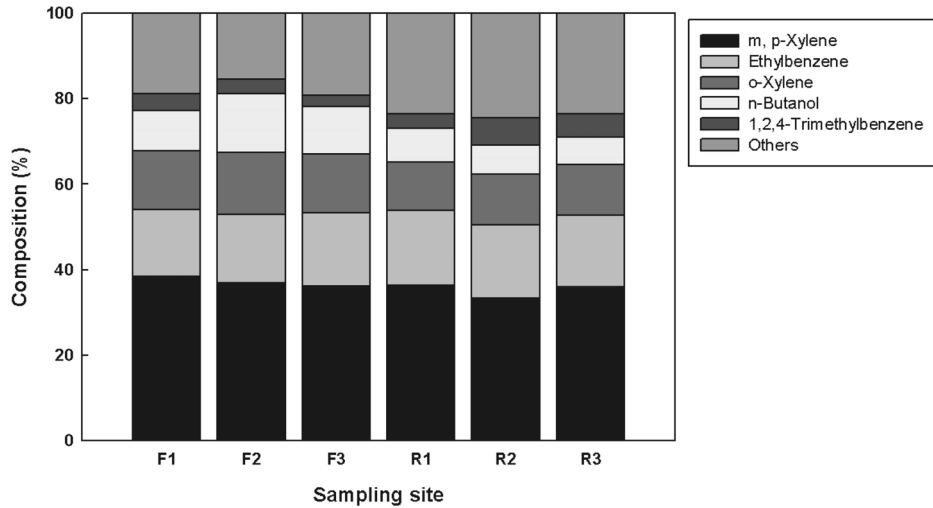


Fig. 3. Composition of volatile organic compounds according to the sampling site.

o-xylene (11.37~14.45%), n-butanol (6.52~13.79%), 1,2,4-trimethylbenzene (2.61~6.26%)를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 5가지 주요 VOCs는 조선소 내부 및 주거지역에서 검출된 전체 VOCs의 80.79~84.53%와 75.42~76.42%를 각각 차지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 연구대상 지역의 VOCs 배출원에 관한 다음과 같은 추정이 가능하다. 첫째, 조선소 내부 또는 외부에 설치된 모든 시료채취 지점들의 주된 VOCs 성분들이 정확하게 같으므로 동일한 배출원에 의해 영향을 받으며 둘째, 모든 시료채취 지점들에서 검출된 주된 VOCs 성분들이 실내도장시설의 VOCs 성분들과 잘 어울리고 있으므로 조선소 내부에서 수행되는 도장작업이 중요한 배출원인 것으로 예측되며, 셋째, 자동차와 도장작업에서 발생하는 VOCs의 화학반응 또한 영향을 미칠 수 있다.

### 3.3. 시료채취 지점별 총휘발성유기화합물 농도

시료채취지점별로 측정된 TVOCs 농도의 평균값과 범위를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 조선소 내부에 위치한 시료채취지점의 평균농도(농도범위; 표준편차)는 F1 지점이 73.61 ppb (6.59~209.33 ppb; 51.50), F2 지점이 125.98 ppb (23.91~205.56 ppb; 51.05), F3 지점이 55.81 ppb (5.84~183.66 ppb; 47.67)인 것으로 나타났다. 주거지역에 위치한 시료채취지점의 경우, R1 지점이 58.85 ppb (11.11~113.88 ppb; 32.56), R2 지점이 84.09 ppb (7.29~222.40 ppb; 67.22), R3 지점이 34.57 ppb (4.95~116.94 ppb; 32.31)인 것으로 나타났다. 조선소 내부의 시료채취지점들의 VOCs 농도는 시료채취지점과 선박제조 작업장과의 거리에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 선박제조 작업장과 시료채취지점 사이의 거리가 가까울수록 측정된 TVOCs 농도가 높은 것으로 나타났다. 동일한 지역에서 수행된 사전연구에 의하면, 조선소 내부에서 측정된 입자상오염물질 농도는 시료채취지점과 작업장 사이의 거리뿐만 아니라 시료채취지점의 높이에 의해 중요한 영향을 받는 것으로 나타난 바 있다.<sup>7)</sup> 그

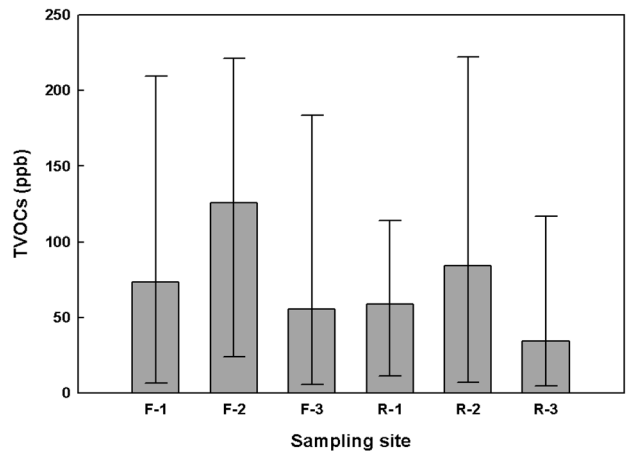


Fig. 4. Comparison of total volatile organic compound concentrations according to the sampling site.

러나 VOCs 농도는 시료채취지점의 높이에 의해 뚜렷한 영향을 받지 않는 것으로 관찰되었으며 이는 VOCs 물질들이 입자상물질에 비해 훨씬 가벼운 가스상 물질이기 때문으로 판단된다. 주거지역에 설치된 시료채취지점의 경우에 R2 지점이 R1 지점보다 조선소의 부지경계선으로부터 멀리 위치하고 있음에도 불구하고 R2 지점의 TVOCs 농도가 가장 높게 나타났으며 이는 인근에서 지속적으로 수행된 건축물의 도장작업으로 인한 것으로 사료된다.

시료채취지점별 TVOC 농도의 계절별 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 비록 계절별 시료채취횟수가 1~2회로 충분하지 못하나 연구대상 지역의 TVOCs 농도의 계절적 변화는 조선소에서 이루어지는 작업강도에 의해 큰 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 앞에서 설명한 바와 같이 선박제조 작업의 강도는 봄철에 가장 높았으며 여름철부터 감소되기 시작하여 가을철에 가장 낮았으며 이는 조선소 내부의 TVOCs 농도가 봄철에 가장 높으며 여름철에 감소하며 가을철에 가장 낮은 결과와 일치하는 현상이다. 주거지역의 경우, R1과 R3 지점의 경우에는 조선소 내부의 측정지점들과 같은

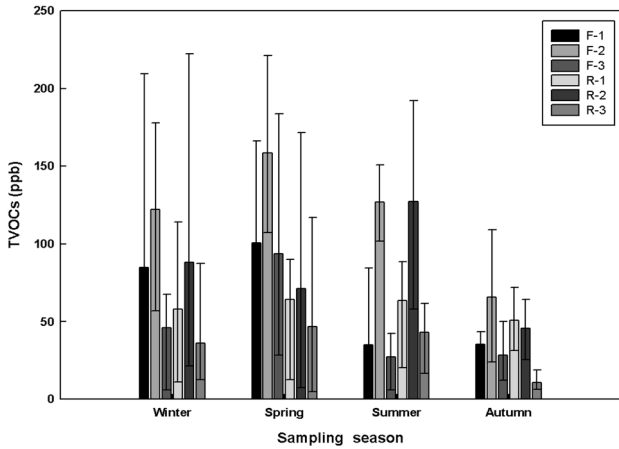


Fig. 5. Seasonal variations in total volatile organic compound concentrations according to the sampling site.

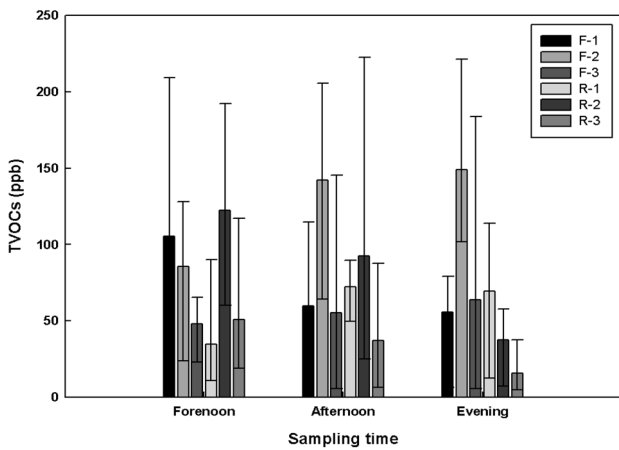


Fig. 6. Effect of sampling time on total volatile organic compound concentrations according to the sampling site.

경향이 나타났으나 R2 지점은 인근에서 수행된 건축공사의 영향으로 여름철에 가장 높은 TVOCs 농도가 관찰되었다. TVOCs 농도에 미치는 시료채취시간의 영향을 Fig. 6에 나타내었으며 TVOCs 농도는 시료채취시간에 뚜렷한 영향을 보이지 않는 것으로 나타났다. 조선소 내부의 시료채취지점의 경우에 F1 지점은 아침에 가장 높은 농도를 가지며 F2와 F3 지점은 저녁에 가장 높은 농도를 가지는 것으로 나타났다. 주거지역 측정지점의 경우, R2와 R3 지점은 아침에 가장 높은 농도를 가지며 R1 지점은 오후에 가장 높은 농도를 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 도시 및 농촌 지역의 VOCs 농도는 태양광의 강도와 기상학적 특성들에 의해 영향을 받는 화학반응에 의존한 계절적이고 시간적인 변동특성을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>17,18)</sup> 그러나 본 연구의 대상지역에서는 계절적이거나 시료채취시간의 차이에 따른 뚜렷한 변화들이 관찰되지 않았으며 이들을 압도하는 매우 넓은 범위의 VOCs 농도의 변동이 관찰되었다. 조선소 내부의 시료채취지점들에서 동일한 시간에 측정된 VOCs 농도들도 해당 조선소에서 수행된 도장작업의 강도에 따라 큰 범위의 차이를 가지는 것으로 관찰되었다. 따라서, 연구

대상 지역의 VOCs 농도분포가 계절적이거나 시간적인 변동경향보다는 조선소에서 수행되는 도장작업의 강도에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 조선소 밀집지역에서 VOCs 농도의 공간적이고 시간적인 분포를 관찰하였다. 실내도장시설에서 측정된 TVOCs 농도는 3433 ppb이며 m,p-xylene, n-butanol, o-xylene, ethylbenzene, 2-propanol, 1,2,4-trimethylbenzene을 포함하는 19종의 VOCs로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 조선소 내부 및 주변 주거지역에서 측정된 VOC 성분들은 실내도장시설에서 검출된 VOCs 성분들과 강한 연관성을 가지는 것으로 나타나 조선소 내부에서 수행되는 도장작업이 조선소 주변지역의 VOCs의 주요 발생원임을 알 수 있었다. 즉, 시료채취지점에 따라 m,p-xylene이 33.26~38.49%를 차지하고 있었으며 ethylbenzene (15.55~17.46%), o-xylene (11.37~14.45%), n-butanol (6.52~13.79%), 1,2,4-trimethylbenzene (2.61~6.26%)를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 5가지 주요 VOCs는 조선소 내부 및 주거지역에서 검출된 전체 VOCs의 80.79~84.53%와 75.42~76.42%를 각각 차지하는 것으로 나타났다. 조선소 내부의 VOCs 농도는 시료채취지점과 선박제조 작업장 사이의 거리와 선박제조 작업의 강도에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 시료채취지점과 작업장 사이의 거리가 가까울수록 높은 농도의 VOCs가 관찰되었으며 조선소에서 수행되는 작업강도에 따라 매우 넓은 범위의 농도가 관찰되었다. 이러한 지역적 특성은 해당지역의 대기질을 효과적으로 관리하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### Acknowledgement

이 논문의 데이터 분석과 작성은 2014년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

KSEE

#### References

1. Lee, J. W. and Kim, H., "Shipbuilding 2013 Outlook," Sector Report, Tongyang Securities Inc.(2012).
2. Celebi, U. B. and Vardar, N., "Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards," *Atmos. Environ.*, **42**(22), 5685~5695(2008).
3. Chen, C. F., Kao, C. M., Dong, C. D. and Chen, C. W., "Butyltin contamination in sediments and seawater from Kaohsiung Harbor, Taiwan," *Environ. Monit. Assess.*, **169** (1-4), 75~87(2009).

4. Chiu, S. W., Ho, K. M., Chan, S. S., So, O. M. and Lai, K. H., "Characterization of contamination in and toxicities of a shipyard area in Hong Kong," *Environ. Pollut.*, **142**(3), 512~520(2006).
5. Choi, M., Choi, H. G., Moon, H. B. and Kim, G. Y., "Spatial and temporal distribution of tributyltin (TBT) in seawater, sediments and bivalves from coastal areas in Korea during 2001-2005," *Environ. Monit. Assess.*, **151**(1-4), 301~310(2009).
6. Chung, J. W. and Lee, M.-E., "Effect of medium and small scale shipyard operations on environmental pollutions related with civil appeal," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **30**(10), 1006~1012(2008).
7. Chung, J. W., Lee, M. E. and Lee, H. D., "Characteristics of environmental pollution related with public complaints in an industrial shipbuilding complex, Korea," *Environ. Monit. Assess.*, **177**(1-4), 73~84(2011).
8. Chung, J. W., Lee, M. E., Kang, S. T. and Bolan, N. S., "Concentration distribution of carbonyl compounds in an industrial shipbuilding complex," *KSCE J. Civ. Eng.*, **18**(4), 927~932(2014).
9. Malherbe, L. and Mandin, C., "VOC emissions during outdoor ship painting and health-risk assessment," *Atmos. Environ.*, **41**(30), 6322~6330(2007).
10. Chung, J. W. and Lee, M.-E., "Case study of hazardous air pollutant concentrations in residential areas nearby small and medium scale shipbuilding companies," *J. Environ. Sci. Int.*, **18**(5), 517~525(2009).
11. Sweet, C. W. and Vermette, S. J., "Toxic volatile organic compounds in urban air in Illinois," *Environ. Sci. Technol.*, **26**(1), 165~173(1992).
12. Kostiainen, R., "Volatile organic compounds in the indoor air of normal and sick houses," *Atmos. Environ.*, **29**(6), 693~702(1995).
13. Mukund, R., Kelly, T. J. and Spicer, C. W., "Source attribution of ambient air toxic and other VOCs in Columbus, Ohio," *Atmos. Environ.*, **30**(20), 3457~3470(1996).
14. Carter, W. P. L., "Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds," *J. Air and Waste Manage. Assoc.*, **44**, 881~899(1994).
15. Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts, J. N., "Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles," *Science*, **276**(5315), 1045~1051(1997).
16. EPA (US Environmental Protection Agency), "Compendium method TO-14A-the determination of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography," (1999).
17. Kawashima, H., Minami, S., Hanai, Y. and Fushimi, A., "Volatile organic compound emission factors from roadside measurements," *Atmos. Environ.*, **40**(13), 2301~2312(2006).
18. Pérez-Rial, D., López-Mahía, P., Muniategui-Lorenzo, S. and Prada-Rodríguez, D., "Temporal distribution, behavior and reactivities of BTEX compounds in a suburban Atlantic area during a year," *J. Environ. Monitor.*, **11**, 1216~1225(2009).