

반월 · 시화공단 주변 주거지역의 악취현황 및 황화합물의 체감도

The Concentrations of Sulfur Compounds and Sensation of Odor in the Residential Area Around Banwol-Sihwa Industrial Complex

김 종 보* · 정 상 진 · 송 일 석¹⁾

경기대학교 토목환경공학부 환경공학과, ¹⁾경기도보건환경연구원 악취분석팀
(2006년 6월 27일 접수, 2007년 3월 28일 채택)

Jong-Bo Kim*, Sang-Jin Jeong and Il-Seok Song¹⁾

Department of Environment Engineering, Kyonggi University

¹⁾*Odor Analysis Team, Gyeonggi-do Institute of Health and Environment*

(Received 27 June 2006, accepted 28 March 2007)

Abstract

This study was carried out to investigate the characteristics of fourteen odor compounds from a total of 10 sampling sites in residential areas around Banwol-Sihwa industrial complex. The measurement data are analyzed and compared with sensation of odor unit.

Only a hydrogen sulfide out of four sulfur compounds was quantified above the detection limit (0.06 ppb) in the residential area around Banwol industrial complex with leather companies and a sewage treatment plant. The concentrations of VOCs were higher than those measured from a big city, and styrene showed the relatively high concentration from all sampling sites (2.1 ~ 37.8 ppb). In the case of carbonyl compounds, acetaldehyde was found most frequently with the mean of 3.97 ppb, and its concentration difference was not significant between Banwol and Sihwa industrial complex. Of the nitrogen compounds, ammonia was measured at the relatively high concentration from all the sampling sites (12 ~ 707 ppb), and a trimethylamine was found at the odor threshold level (0.1 ppb).

The concentrations of styrene and ammonia showed relatively seasonal variation, the concentration of styrene in summer was five times higher than that in autumn, the concentration of ammonia in autumn was two times higher than that in summer. However other odorous compounds did not show such strong seasonal variation.

Odor-concentration relationship between odor unit and H₂S concentrations from industrial sources was examined and used as odor sensation evaluation, and thus the neighbourhood odor complaints maybe caused during the four seasons from the results.

Key words : Odor compounds, VOCs, Banwol-Sihwa industrial complex, Odor annoyance

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-250-2592, E-mail : k1820814@hanmail.net

1. 서 론

감각공해라 일컬어지는 악취는 생활수준의 향상과 함께 대기환경오염의 원인이며 생활환경의 주요한 오염원이 되고 있다. 최근 신도시의 개발과 함께 대단위 지구로 형성되는 주거생활권역과 산업 활동권역이 구분되고 있는 현재 이들이 서로 인접하게 된다면 이로 인한 도시생활형 악취 민원은 발생 가능성이 높다. 특히 지리적으로 공업단지의 입지상 해안가에 위치하여 풍상의 역할을 하고 배후주거지역이 풍하의 위치에 있다면 악취 민원은 증가할 수 밖에 없다(조석연 등, 2003). 경기도 안산시의 반월공단과 시흥시의 시화공단은 이러한 지리적 여건이 만족된 대표적 악취 민원 지역으로 악취발생형태의 연구나 관리대책의 수립을 위한 학문적 및 행정적 노력들이 계속되고 있다. 결과적으로 악취방지법의 제정에 있어 중요한 모티브를 제공하였다고 할 수 있다.

악취방지법 제정 이전 후각측정법을 중심으로 악취를 규제하였으나 제정 이후 12종의 단일 악취물질들 대상의 기기분석법을 통해 악취물질의 농도규제가 강화하고 있다. 후각측정법은 다양한 냄새 물질에 대응이 가능하고 피해지역의 주민이 느끼는 피해감각과 유사한 상황에서 냄새의 존재 여부를 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 냄새의 강도를 표현함에 있어 개인별 생리적 요인과 후각반응의 차이로 완전한 객관성을 보장하지 못한다. 반면 물질농도규제의 의미로 도입된 기기분석법은 12종의 단일악취물질을 대상으로 하고 있으나 냄새유발물질이 40만종 이상 존재하는 것으로 알려져 있어 이들 모든 물질의 분석법과 규제농도를 정하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 여러 물질이 혼합된 복합취기에 대한 대응이 쉽지 않다. 그러나 특정악취물질을 통한 악취원의 추적이나 후각측정법이 가지지 못하는 과학적 신뢰성은 후각측정과 함께 상호 보완적으로 발전되어야 할 가장 큰 이유이다.

냄새의 측정은 감지할 수 있는 냄새 구성 성분의 분석을 통해 어떠한 물질이 특정한 농도수준으로 존재하고 있음을 규명하고 주변에 미치는 영향을 파악하여야 악취의 본질을 이해할 수 있다(김선태, 2004). 또한 발생한 악취성분이 발생지역내에서 최소감지농도를 초과하더라도 피해 대상지역에 감지되지 않음

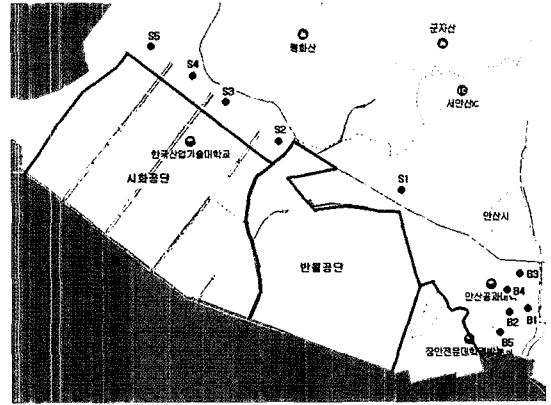


Fig. 1. Sampling site of this study.

면 악취의 원인이 된다고 할 수 없다. 따라서 악취에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 악취오염원과 리셉터 사이에 적절한 이격거리가 필요하다(정상진, 2002).

본 연구는 최근 사회문제화 되고 있는 반월·시화공단의 발생악취가 주변지역에 미치는 영향을 기기분석법을 통해 조사하여 악취 민원 해결에 기초 자료를 제시하고자 한다. 아울러 황화합물의 단계별 농도에 따른 공기회석관능 측정결과와 기기분석법 측정 결과의 연관성을 조사하였다. Koe (1985)와 Gostelow and Parsons (2000)에 따르면 황화합물과 악취체감도(odor unit)의 관계는 Steven의 법칙에 따르며 지수함수의 관계로 표현할 수 있다. 본 연구에서 악취 체감도를 평가하기 위하여 Steven의 법칙에 따라 황화합물의 농도와 악취체감도의 관련성을 평가하는 식을 제시하고 이를 이용하여 대상지역의 악취체감도를 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 연구대상 지점 및 방법

그림 1에는 본 연구의 대상지역인 반월·시화공단과 악취 측정 지점을 나타내었다. 반월·시화공단은 해안가에 위치하여 각각의 배후주거단지에 영향을 미치고 있으며 아울러 두 공단의 위치가 근접하여 기상학적 요인에 따라 인접공단의 영향을 동시에 받을 수도 있다(임문순 등, 2006).

Table 1. Description of sampling sites and periods.

| Sampling site | Location | Sampling period | | | | |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| | | Spring (10:00~15:00) | Summer (10:00~15:00) | Autumm (10:00~15:00) | Winter (10:00~15:00) | Nighttime (Summer) (10:00~15:00) |
| B-1 | Y Apt. (608) | | | | | |
| B-2 | P Apt. (120) | | | | | |
| B-3 | J Apt. (1106) | 1st | 1st | 1st | 1st | 1st |
| B-4 | J Apt. (1409) | 04/07/2005 | 07/05/2005 | 10/05/2005 | 10/10/2006 | 07/05/2005 |
| B-5 | J Apt. (1804) | 2nd | 2nd | 2nd | 2nd | 2nd |
| S-1 | S Apt. (108) | 04/14/2005 | 07/13/2005 | 10/12/2005 | 10/18/2006 | 07/13/2005 |
| S-2 | M Apt. (111) | 3rd | 3rd | 3rd | 3rd | 3rd |
| S-3 | Y Apt. (608) | 04/21/2005 | 07/19/2005 | 10/19/2005 | 10/25/2006 | 07/19/2005 |
| S-4 | J Apt. (108) | | | | | |
| S-5 | D Apt. (105) | | | | | |

Table 2. Summary of analytical method.

| Target compound | Instrument | Analytical conditions |
|------------------|---------------------------------|---|
| Aldehydes | LC/MS (Waters, Micromass ZQ) | Column: C18 column (Xterra MSC18 3.5 μ m, 2.1 \times 150 mm, Waters) Injection volume: 5 μ L Column Flow: 0.2 L/min Mobile phase: gradient flow (acetonitrile and water) Analysis mode: SIR (Selected Ion Record) Analysis ions: [M-H] ⁻ Source temperature : 120°C Desolvation temperature: 300°C |
| TMA | GC/NPD (Varian, CP-3800) | Column: CP-volamin (60 m \times 0.32 mm) Column Flow: 2 mL/min Oven Condition: 40°C (5 min) \rightarrow 10°C/min \rightarrow 200°C (4 min) SPME Combi PAL (CTC Analysis) adsorption at 30°C, 15min desorption at 260°C, 3min |
| Sulfur compounds | GC/PFPD (Varian, CP-3800) | Column: CP-Sil 5CB (60 m \times 0.32 mm \times 5 μ m) Column flow: 1.5 mL/min Oven condition: 80°C (5 min) \rightarrow 8°C/min \rightarrow 250°C (10 min) Sample volume: 200 mL (50 mL/min \times 4 min) |
| Styrene | GC/FID (Varian, CP-3800) | Column: CP-Sil 5CB (60 m \times 0.32 mm \times 5 μ m) Column flow: 1.5 mL/min Oven condition : 80°C (5 min) \rightarrow 8°C/min \rightarrow 250°C (10 min) Sample volume : 50 (50 mL/min \times 10 min) |
| Ammonia | UV/VIS (Beckman, DU-800) | Wavelength range 640 nm |

본 연구에서는 이러한 영향을 고려하여 대상지역인 반월·시화공단 각각의 주변 주거지역에 해당하는 아파트 단지 5개 지점(그림 1)에서 시화(S1~S5), 반월(B1~B5) 총 10개 지점을 선정하여 동일한 날에 조사를 실시하였다.

조사 대상항목으로는 현행 악취방지법의 규제대상

단일악취물질로 규정된 12항목을 설정하였다. 시료의 채취 및 분석은 악취공정시험방법에 따라 실시하였다. 조사기간은 각 계절의 1개월 중 1주일 간격 3일로서 봄은 일부 VOCs 물질과 황화합물에 대해서만 조사를 진행하였고 나머지 계절은 12항목 전체에 대한 조사를 실시하였다(표 1).

2.2 시료의 채취 및 분석

시료의 채취는 악취공정시험방법에 규정된 각 항목별 시료 채취법에 따라서 암모니아 및 트라이메틸아민(TMA)은 임핀저 흡수법, 황화합물은 Tedlar Bag, 알데하이드는 DNPH 카트리지법, 스타이렌은 Canister를 이용하여 채취하였다. Tedlar Bag 및 Canister로 채취한 황화합물과 스타이렌은 전기냉각저온농축장치(Markes, Unity)를 이용 저온농축 후 증은 탈착시켜 GC로 주입시켜 주었다. 산성용액에 흡수한 TMA는 알칼리용액과 반응, 분해 후 기화시킨 TMA

가스를 SPME로 흡착, 농축하여 GC로 분석하였다. 알데하이드류는 2, 4-Dinitrophenylhydrazine (DNPH)와 반응하여 형성된 DNPH유도체를 아세트나이트릴 용매로 추출하였다. 그리고 이를 HPLC를 이용 자외선 검출기의 360nm 파장에서 분석하였다. 농축 및 분석에 사용한 각 분석기기의 분석 조건은 표 2에, 각 분석 항목별 정도관리 사항은 표 3에 나타내었다.

Table 3. Basic QA/QC parameters for odorous pollutants investigated in this study.

| Odorous compounds | MDL (n=7) (ppb) | (ng) | Precision (RSD in %) | Linearity (r ²) | *Recovery (%) |
|-------------------|-----------------|------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| H ₂ S | 0.06 | 0.02 | 0.5 | 0.999 | 94.1 |
| MESH | 0.06 | 0.02 | 1.9 | 0.999 | 95.4 |
| DMS | 0.06 | 0.03 | 1.0 | 0.998 | 94.8 |
| DMDS | 0.03 | 0.02 | 1.3 | 0.997 | 94.2 |
| Styrene | 0.10 | 0.08 | 0.4 | 0.997 | - |
| Acetaldehyde | 0.76 | 0.06 | 0.2 | 0.999 | - |
| propionaldehyde | 0.17 | 0.02 | 1.0 | 0.999 | - |
| Butyraldehyde | 0.35 | 0.04 | 0.3 | 0.999 | - |
| i-Valeraldehyde | 0.12 | 0.02 | 0.6 | 0.999 | - |
| n-Valeraldehyde | 0.21 | 0.03 | 0.6 | 0.999 | - |
| TMA | 0.14 | 0.11 | 2.0 | 0.999 | - |
| NH ₃ | 8.0 | - | 6 | 0.997 | - |

*N₂ (RH=10%)

3. 결과 및 고찰

3.1 현황

반월 · 시화공단은 해안에 위치하여 해륙풍의 국지 순환에 의한 오염물질의 이동 및 확산으로 인해 측정 당시의 기상상황은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 계절별 시료의 균질성을 위해 비교적 동일한 기상조건하에서 측정을 시도 하였으며 대상지역 주변에 위치한 대기측정소의 기상자료를 활용하였다. 측정이 이루어진 시간대는 오전 10시경부터 오후 3시경으로 해륙풍의 순환이 바뀌는 일출 또는 일몰전 후의 시간대가 아닌 공장 가동율이 높은 주간이다. 또한 악취 민원의 발생가능성이 높은 여름철 야간 측정을 통한 비교분석을 실시하였다.

표 4에서는 대상지역의 측정 당시 기상 조건의 요약 을 나타내었다. 단 피해지역인 주거지역의 계절별

Table 4. Trend of meteorological data during sampling periods.

| Item | Season | Spring | Summer | Autumn | Winter |
|----------------------------|--------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| | | mean ± s.d | mean ± s.d | mean ± s.d | mean ± s.d |
| Temperature (°C) | | 13.2 ± 2.15 | 27.2 ± 2.45 | 16.1 ± 2.54 | -1.2 ± 1.25 |
| Atmospheric pressure (hpa) | | 1015 ± 13.28 | 1012 ± 11.05 | 1016 ± 9.12 | 1012 ± 10.25 |
| Wind speed (m/s) | | 2.73 ± 0.43 | 2.32 ± 0.55 | 1.64 ± 0.48 | 2.34 ± 0.74 |
| Humidity (%) | | 49 ± 8.81 | 78 ± 4.25 | 65 ± 7.82 | 41 ± 5.21 |
| Wind direction | | SW | SW | SW | NW |

Table 5. A statistical summary of odorous compounds made from a residential area around Banwol industrial complex (ppb).

| Parameter | H ₂ S | Tolu | p-Xyl | Styr | A-alde | P-alde | B-alde | l-alde | N-alde | TMA | NH ₃ |
|-----------|------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-----------------|
| Mean | 0.40 | 2.80 | 2.76 | 7.92 | 2.29 | 1.93 | 0.22 | 0.16 | 0.01 | 0.08 | 200.70 |
| SD | 0.17 | 3.61 | 1.40 | 6.62 | 3.09 | 3.21 | 0.34 | 0.18 | 0.02 | 0.08 | 192.61 |
| Med | 0.43 | 5.81 | 2.34 | 5.18 | 1.58 | 0.09 | 0.03 | 0.09 | 0.01 | 0.06 | 110.50 |
| Min | 0.05 | 3.21 | 1.33 | 2.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 24.30 |
| Max | 0.72 | 17.12 | 6.23 | 26.36 | 14.01 | 14.09 | 1.18 | 0.55 | 0.05 | 0.34 | 707.00 |
| N | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

Table 6. A statistical summary of odorous compounds made from a residential area around Sihwa industrial complex (ppb).

| Parameter | H ₂ S | Tolu | p-Xyl | Styr | A-alde | P-alde | B-alde | I-alde | N-alde | TMA | NH ₃ |
|-----------|------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-----------------|
| Mean | 0.29 | 9.36 | 3.00 | 12.14 | 3.97 | 4.30 | 0.29 | 0.16 | 0.04 | 0.10 | 161.30 |
| SD | 0.24 | 2.87 | 1.59 | 10.96 | 4.32 | 4.92 | 0.46 | 0.21 | 0.06 | 0.11 | 181.53 |
| Med | 0.27 | 9.20 | 2.73 | 6.74 | 2.76 | 2.34 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.08 | 88.50 |
| Min | 0.00 | 4.79 | 1.02 | 2.62 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 12.00 |
| Max | 1.32 | 18.54 | 8.25 | 37.75 | 16.68 | 17.95 | 1.69 | 0.69 | 0.20 | 0.43 | 678.60 |
| N | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

Table 7. Seasonal concentrations of odorous compounds (Spring) (ppbv).

| Item | Site | | Banwol | | | | Sihwa | | | | | Total | |
|------------------|-------|-------|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | M | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | M | M |
| H ₂ S | 0.44 | 0.33 | 0.55 | 0.38 | 0.37 | 0.41 | 0.23 | 0.14 | 0.23 | 0.35 | 0.42 | 0.27 | 0.34 |
| MESH | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - |
| DMS | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - |
| DMDS | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | - |
| Toluene | 8.21 | 3.24 | 3.21 | 4.01 | 3.25 | 4.38 | 7.24 | 13.45 | 9.25 | 9.16 | 6.08 | 9.04 | 6.71 |
| p-Xylene | 3.21 | 2.01 | 1.54 | 1.45 | 1.43 | 1.93 | 1.62 | 5.21 | 2.62 | 3.02 | 2.13 | 2.92 | 2.43 |
| Styrene | 5.23 | 5.02 | 6.27 | 4.18 | 3.82 | 4.90 | 6.50 | 4.67 | 6.21 | 8.72 | 6.88 | 6.60 | 5.75 |

Table 8. Seasonal concentrations of odorous compounds (Summer) (ppbv).

| Item | Site | | Banwol | | | | Sihwa | | | | | Total | |
|------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | M | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | M | M |
| H ₂ S | 0.40 | 0.52 | 0.47 | 0.35 | 0.42 | 0.43 | 0.12 | 0.13 | 0.21 | 0.35 | 0.49 | 0.26 | 0.35 |
| MESH | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - |
| DMS | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - |
| DMDS | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | 0.07 | <0.03 | <0.03 | - | - |
| Toluene | 4.56 | 4.64 | 3.79 | 3.73 | 4.14 | 7.65 | 7.61 | 18.54 | 11.72 | 11.03 | 6.70 | 11.12 | 7.65 |
| p-Xylene | 2.33 | 2.75 | 1.40 | 1.36 | 1.33 | 2.50 | 1.69 | 6.85 | 2.60 | 2.84 | 1.82 | 3.16 | 2.50 |
| Styrene | 18.65 | 21.26 | 19.27 | 19.33 | 21.99 | 26.36 | 22.05 | 37.75 | 35.31 | 35.92 | 32.08 | 32.62 | 26.36 |
| A-alde | 2.12 | 3.61 | <0.76 | 4.50 | <0.76 | 2.05 | <0.76 | 4.24 | <0.76 | <0.76 | <0.76 | 0.85 | 1.45 |
| P-alde | <0.17 | 3.05 | <0.17 | 3.23 | <0.17 | 1.26 | <0.17 | 5.86 | <0.17 | <0.17 | <0.17 | 1.17 | 1.21 |
| B-alde | <0.35 | 0.39 | <0.35 | 1.04 | <0.35 | 0.29 | <0.35 | 0.08 | <0.35 | <0.35 | <0.35 | 0.02 | 0.15 |
| I-alde | <0.12 | 0.07 | 0.22 | 0.55 | 0.21 | 0.21 | <0.12 | <0.12 | 0.12 | <0.12 | 0.17 | 0.06 | 0.13 |
| N-alde | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | 0.05 | 0.01 | <0.21 | <0.21 | 0.15 | <0.21 | <0.21 | 0.03 | 0.02 |
| TMA | <0.14 | <0.14 | 0.03 | <0.14 | 0.07 | 0.02 | <0.14 | <0.14 | 0.04 | <0.14 | <0.14 | 0.01 | 0.01 |
| NH ₃ | 324.2 | 98.5 | 225.5 | 375.3 | 139.7 | 232.6 | 92.8 | | 274.4 | 182.9 | 25.01 | 115.0 | 173.8 |

농도 평가를 대상으로 하므로 표에서는 측정당시의 계절별 평균 기상조건을 나타내었다.

표 5와 6은 각 공단 주변 주거지역에서 측정된 악취물질의 통계자료이며 표 7~10에서는 계절별 주요 악취물질의 평균농도를 나타낸 것으로 전술한 바와 같이 황화합물과 일부 VOCs물질은 사계절 측정이 이루어졌으나 알데하이드류와 TMA, 암모니아는 봄을 제외한 여름부터, 겨울까지 측정이 실시되었다.

표에서 알 수 있는 바와 같이 대표적인 악취원인물질인 황화합물의 경우 측정대상 물질인 황화수소(H₂S), 메칠메르캅탄(MESH), 다이메틸설파이드(DMS), 다이메틸다이설파이드(DMDS) 중 가장 민감한 황화수소가 주로 검출되었고 대부분 1ppb 이내로 조사되었다. 또한 DMDS가 일부 지점에서 0.1ppb 검출되었으나 MESH와 DMS는 검출한계 이내(MESH, DMS < 0.06ppb)로 조사되었다.

Table 9. Seasonal concentrations of odorous compounds (Autumn) (ppbv).

| Item | Site | | Banwol | | | | | Sihwa | | | | | Total | |
|------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | M | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | M | M | |
| H ₂ S | 0.72 | 0.69 | 0.54 | 0.31 | 0.11 | 0.47 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 0.37 | 1.32 | 0.37 | 0.42 | |
| MESH | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - | |
| DMS | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - | |
| DMDS | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | 0.07 | <0.03 | 0.01 | - | - | |
| Toluene | 15.12 | 10.14 | 13.24 | 8.25 | 10.02 | 11.36 | 6.83 | 7.02 | 6.85 | 11.23 | 11.12 | 8.61 | 9.98 | |
| p-Xylene | 2.45 | 2.35 | 6.23 | 3.54 | 4.02 | 3.72 | 3.03 | 3.60 | 4.02 | 8.25 | 4.23 | 4.63 | 4.17 | |
| Styrene | 3.61 | 2.12 | 3.38 | 3.20 | 3.50 | 3.16 | 8.93 | 3.88 | 3.31 | 5.51 | 2.62 | 4.85 | 4.01 | |
| A-alde | <0.76 | 4.09 | 6.31 | 1.68 | 3.05 | 3.02 | 6.34 | 5.55 | 7.66 | 6.43 | 6.69 | 6.53 | 4.78 | |
| P-alde | <0.17 | 2.64 | 5.94 | <0.17 | 4.17 | 2.55 | 7.84 | 5.86 | 10.46 | 6.09 | 3.50 | 6.75 | 4.65 | |
| B-alde | <0.35 | 0.57 | 0.26 | 0.17 | 0.72 | 0.34 | 1.05 | 0.11 | 1.27 | <0.35 | 0.26 | 0.54 | 0.44 | |
| I-alde | <0.12 | 0.10 | 0.03 | <0.12 | <0.12 | 0.03 | 0.02 | <0.12 | <0.12 | <0.12 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | |
| N-alde | <0.21 | 0.04 | 0.01 | <0.21 | 0.05 | 0.02 | 0.20 | 0.07 | 0.17 | 0.08 | 0.04 | 0.11 | 0.07 | |
| TMA | <0.14 | 0.17 | 0.17 | 0.09 | 0.34 | 0.16 | <0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.09 | 0.22 | 0.11 | 0.13 | |
| NH ₃ | 331.5 | 707.0 | 59.3 | 443.8 | 610.2 | 430.4 | 358.6 | 441.9 | 124.4 | 57.4 | 678.6 | 332.2 | 381.3 | |

Table 10. Seasonal concentrations of odorous compounds (Winter) (ppbv).

| Item | Site | | Banwol | | | | | Sihwa | | | | | Total | |
|------------------|-------|-------|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | M | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | M | M | |
| H ₂ S | 0.45 | 0.59 | 0.54 | 0.48 | 0.33 | 0.48 | 0.31 | 0.24 | 0.32 | 0.41 | 0.54 | 0.36 | 0.42 | |
| MESH | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - | |
| DMS | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - | |
| DMDS | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | - | |
| Toluene | 6.20 | 6.68 | 5.42 | 5.00 | 5.05 | 7.56 | 12.84 | 11.69 | 11.98 | 5.96 | 4.79 | 9.45 | 7.56 | |
| p-Xylene | 1.50 | 1.69 | 1.93 | 1.67 | 1.83 | 1.72 | 1.57 | 2.45 | 2.97 | 1.95 | 1.69 | 2.13 | 1.93 | |
| Styrene | 5.18 | 2.69 | 4.66 | 4.73 | 5.60 | 4.57 | 7.85 | 5.37 | 5.98 | 5.26 | 5.87 | 6.07 | 5.32 | |
| A-alde | 0.40 | <0.76 | 1.47 | 0.53 | 0.21 | 0.52 | <0.76 | 0.44 | 0.35 | 1.27 | 0.75 | 0.56 | 0.54 | |
| P-alde | 0.08 | 0.05 | 0.16 | 0.10 | 0.03 | 0.08 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.09 | 0.10 | 0.05 | 0.07 | |
| B-alde | <0.35 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | <0.35 | <0.35 | <0.35 | 0.01 | 0.01 | |
| I-alde | 0.04 | 0.36 | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.29 | <0.12 | <0.12 | 0.35 | 0.36 | 0.35 | 0.21 | 0.25 | |
| N-alde | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | |
| TMA | 0.14 | 0.11 | 0.11 | 0.06 | 0.14 | 0.11 | 0.17 | 0.10 | 0.27 | 0.07 | 0.23 | 0.17 | 0.14 | |
| NH ₃ | 47.5 | 123.5 | 122.5 | 97.0 | 94.5 | 97.0 | 88.5 | 12.0 | 61.5 | 84.5 | 27.5 | 54.8 | 75.9 | |

황화합물의 자연적 발생원으로는 해수 중 서식하는 식물성 플랑크톤에 의해 생성되어 대기 중으로 유입되기도 하지만 해안가에 비교적 가까운 대상 주거지역의 검출농도로 볼 때 그 영향은 크지 않다고 사료된다. 다만 황화수소의 경우 원유의 정제나 황을 취급하는 사업장에서 발생할 수 있는 물질로 하수처리장의 포기조나 피혁가공공정에서 고농도로 배출된다(김기현 등, 2005). 따라서 이러한 공정이 존재하는 공단 주변 주거지역에서의 검출가능성은 높다. 특히 피혁가공 관련 업종이 상대적으로 많은 반월공단 주거지역이 시화공단 주거지역보다 높은 농도를 나

타내는 이유가 될 것이다. 아울러 시화공단 주거지역 중 S-5지점의 황화수소 농도가 1.32 ppb로 최고농도를 보였는데 이는 주변의 대규모 하수처리장의 영향으로 보여진다.

황화합물의 계절적 농도변화는 약하게 나타났으며 야간의 경우 일부 지점에서만 황화수소가 검출되었고 주간에 비해 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다(표 11 참조). 표 11에서 야간에 상대적으로 저농도로 조사된 것은 황화수소 배출관련 업종의 조업종료와 관련된 것으로 보여지며 야간에도 황화수소가 검출된 S-4와 S-5지점은 하수처리장과 가까운 지점으

Table 11. Concentrations of odorous compounds for nighttime in summer (ppbv).

| Item | Site | | Banwol | | | | | Sihwa | | | | | Total | |
|------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | M | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | M | M | |
| H ₂ S | 0.19 | <0.06 | 0.08 | <0.06 | 0.05 | 0.06 | <0.06 | <0.06 | 0.12 | 0.35 | 0.46 | 0.19 | 0.12 | |
| MESH | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - | |
| DMS | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | <0.06 | - | - | |
| DMDS | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | <0.03 | - | - | |
| Toluene | 5.25 | 3.64 | 6.75 | 8.42 | 17.12 | 8.24 | 6.85 | 10.12 | 9.24 | 10.54 | 6.25 | 8.60 | 8.42 | |
| p-Xylene | 3.37 | 4.12 | 5.21 | 3.62 | 6.02 | 4.47 | 3.34 | 3.24 | 1.62 | 1.02 | 1.62 | 2.17 | 3.32 | |
| Styrene | 7.56 | 7.32 | 8.42 | 7.82 | 7.45 | 7.71 | 5.42 | 12.24 | 12.25 | 10.54 | 12.32 | 10.55 | 9.13 | |
| A-alde | 0.02 | 0.01 | 14.01 | 3.81 | 0.01 | 3.57 | 6.29 | 6.54 | 10.20 | <0.76 | 16.68 | 7.94 | 5.76 | |
| P-alde | 0.01 | 0.01 | 14.09 | 4.99 | 0.01 | 3.82 | 8.24 | 9.10 | 10.28 | 0.65 | 17.95 | 9.24 | 6.53 | |
| B-alde | <0.35 | <0.35 | 1.18 | <0.35 | <0.35 | 0.24 | 0.12 | 0.50 | 0.61 | <0.35 | 1.69 | 0.58 | 0.41 | |
| I-alde | <0.12 | <0.12 | 0.51 | <0.12 | <0.12 | 0.10 | <0.12 | 0.25 | 0.69 | 0.12 | 0.65 | 0.34 | 0.22 | |
| N-alde | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | <0.21 | - | |
| TMA | 0.03 | 0.05 | 0.05 | <0.14 | <0.14 | 0.03 | 0.43 | 0.06 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 0.13 | 0.08 | |
| NH ₃ | 62.1 | 37.7 | 39.6 | 50.3 | 24.3 | 42.8 | 490.3 | 20.8 | 22.6 | 23.5 | 24.4 | 116.3 | 79.6 | |

로 황화수소 배출원의 영향지점임을 확인할 수 있었다.

VOCs는 수많은 유기화합물의 총칭으로 발생원이 매우 다양하며 악취물질로서의 기여도가 높은 물질로 본 연구에서는 현행 규제물질로 지정된 Styrene을 중심으로 Toluene과 p-Xylene의 농도조사를 실시하였다. FRP제품 제조공정에서 주로 배출되는 것으로 알려진 Styrene은 여름철 농도가 높게 나타났고 반월공단 주거지역보다 시화공단 주거지역이 전체적으로 높게 검출되었다. 특히 여름철에는 VOCs계열 중 비교적 고농도로 검출되는 Toluene의 평균 농도를 상회하는 특이치를 보여 이들 지역에서 악취발생 기여물질로 간주되어야 할 것으로 보여 진다. 아울러 소각공정 중 소각재 보관장이나 굴뚝에서 많은 양의 Styrene이 배출된다(김덕현 등, 2003). 이러한 점을 감안할 때 공단 배출원에 의한 배출결과로 생각된다. Toluene과 p-Xylene은 여름보다 가을, 여름 주간보다 야간의 농도가 높게 측정되었는데 이는 여름철 대기 온도 상승과 주간 일사량의 영향으로 2차 오염물질로의 변환이 이루어진 것으로 추정된다. 전체적인 농도순은 Toluene > Styrene > p-Xylene이었고, 일반대도시 주변보다 높게 나타났다(광주 Toluene 3.37 ppb). 따라서 이 지역이 악취 민원 다발지역으로써의 개연성을 보여주고 있다(강병욱 등, 2001).

알데하이드류는 측정결과 아세트알데하이드가 가장 높은 농도를 보였으며, 가을농도가 여름보다, 여름

야간이 주간보다 높게 나타났다. 이는 알데하이드 화합물이 대기 중 유기화합물의 광산화 반응이 활발한 주간에는 높은 농도를 보이는 페틴(선우영 등, 2002)과 다른 결과로 광산화반응 등 2차 발생원의 영향보다 사료·비료 제조공정, 음·식료 제조공정, 폐기물 소각공정 등 1차 발생원의 영향이 큰 것으로 생각된다. 특히 음·식료 제조업에서 최고의 평균농도(2,882 ppb)를 보였다는 조사(김기현 등, 2005)와 산업폐기물 처리공정 중 액상폐기물 저장조와 굴뚝, 소각재 보관장에서의 고농도 검출조사(김덕현 등, 2004)는 이 결과의 인과 관계를 보여준다고 생각된다.

질소계 화합물 중 현행 규제 대상물질은 암모니아와 TMA로 암모니아는 가을철 농도가 여름보다 약 2배 정도 높게 나타났으며 반월공단 주거지역이 시화공단 주거지역보다 높았다.

가을에는 대부분의 대상지점에서 최소감지농도(0.1 ppm)를 초과하여 이 지역의 대표적인 악취유발 물질로 간주되어야 할 것으로 보여진다. 암모니아의 주요 배출원은 펄프 및 제지업종으로 이들 사업장의 기여도가 큰 것으로 사료된다. 가을의 고농도 검출은 관련 업종의 폐수처리 운영에 있어 미생물 활성 증가를 위해 암모늄이 다량 함유된 영양제의 사용이 가을에만 한정되어 있다는 사실에 기인한 것으로 예측된다(환경부, 2001).

동·식물의 부패·분해로 인한 생선가공 공장, 도축처리 공장이 주요 배출원인 TMA는 최소 감지농

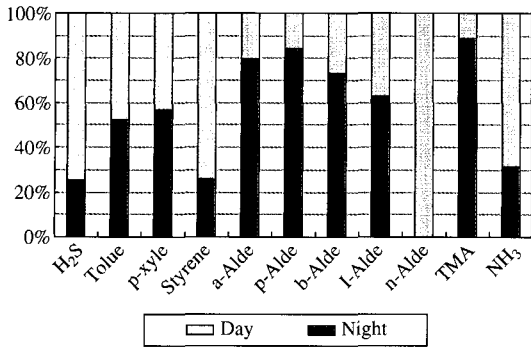


Fig. 2. Concentration fractions of each compound for day/night in summer.

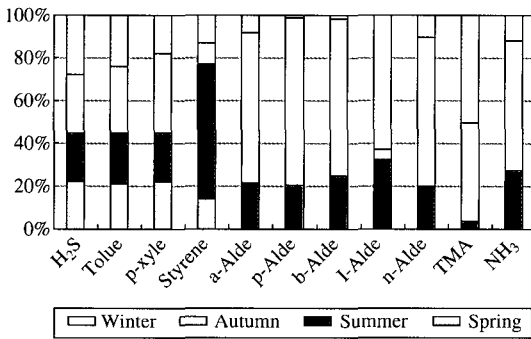


Fig. 3. Seasonal concentration fractions of each compound.

도수준(0.1 ppb) 내외로 계절과 지역별 차이는 미비하였다. 그림 2와 3에서는 조사 대상 악취물질의 계절별 농도 분포와 악취 민원 발생가능성이 높은 여름철 주·야간의 농도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 알데하이드류와 TMA의 야간농도가 높게 나타나고 있다.

3.2 황화합물의 악취체감도

악취 민원 발생과 관련하여 악취 발생 원인물질의 성분과 농도의 조사는 악취문제 해결을 위해 선행되어야 할 첫 단계 시도라 할 수 있다. 그러나 분석한 결과를 이용하여 악취 수용지점에서의 영향을 평가하는 것은 어려운 과제이다. 특히 수많은 화학종이 혼합된 복합악취의 경우 악취물질간의 상호작용으로 인해 악취의 영향이 증가 또는 감소할 수 있다. 본

연구에서는 악취물질의 농도와 악취체감도를 관련시키기 위하여 악취농도와 희석배수의 관계식을 산출하였다. 그리고 그러한 관계를 토대로 악취농도를 희석배수로 표시하고 구해진 희석배수를 악취체감도와 관련시켰다.

Gostelow *et al.* (2001)에 따르면 기기분석 결과와 체감 농도의 관계로부터 하수 악취의 경우 다양한 악취가 혼재되어 있으므로 이들 복합 악취 중 주된 악취의 영향을 찾기가 곤란하다. Guadagni *et al.* (1965)은 복합 악취의 최저 악취 감지 가능성에 대하여 4 가지 효과를 제시하였으며 이는 다음과 같다.

1. 악취성분 간의 상쇄작용(counteract)으로 혼합취기가 감지되지 않는 경우
2. 혼합물이 독립적이어서 하나의 악취가 최저 악취 감지 농도 이상이면 악취가 감지되는 경우
3. 악취 성분 간의 첨가(additive) 작용이 발생하여 각 악취가 최저 감지 농도 이하 농도에서도 복합 악취가 감지되는 경우
4. 상승효과(nergistic effect)를 나타내어 악취강도가 강화되는 경우

Best *et al.* (1994)은 위에서 언급한 2, 3, 4 경우에 대하여 하수처리장 악취인 butyl mercaption, H₂S, isovaleric acid, skatole에 대하여 조사하였다. 그리고 그 결과 총괄적으로 혼합물의 악취강도가 지배적인(가장 강한) 악취성분의 강도와 유사하다고 하였다. 그러나 추가적인 실험에서 더 많은 성분이 혼합되면 각 성분의 강도를 구별하기 어렵게 된다고 하였다. Gostelow *et al.* (2001)은 많은 악취 성분이 존재하지만, 하수나 슬러지의 경우 H₂S가 지배적이면 악취체감도는 H₂S 농도와 관련시킬 수 있다고 하였다. Koe (1985)는 H₂S 농도와 총괄 악취 농도를 Steven의 법칙에 따라 식(1)과 같이 나타내었다.

$$C_{(ou)} = k \cdot C^n_{(H_2S)} \quad (1)$$

여기서 C_(ou)는 희석 배수(dilutions to threshold: OU/m³)를 나타내고 C_(H₂S)는 황화수소 농도(ppm)를 나타내며, k와 n은 실험 상수이다. Gostelow and Parsons (2000)은 17개의 폐수처리장의 슬러지 저장/처리 공정에 대한 실험 결과에서 황화수소의 농도가 0.002에서 1,000 ppm인 경우(Gostelow *et al.* (2001)의 그림 5 참조) 식(1)의 실험 상수 k=38902, n=0.6371을 구하였다. 이들 상수는 황화수소와 다른 악취물질

과 복합적인 상호 관계를 제시할 수 있다. Gostelow and Parsons (2000)은 순수 황화수소의 경우 황화수소 농도와 회석 배수사이 선형관계가 예상되며, k 값은 황화수소 검지 한계농도의 역수이고 n 값은 1 이 될 것이라고 하였다. Bonnin *et al.* (1990)에 따르면 황화수소 검지한계농도가 농도가 0.0001에서 0.02 ppm(일반적으로 0.0005 ppm 사용)인 경우 황화수소 농도와 회석 배수사이에는 식 (2)가 성립한다.

$$C_{(ou)} = 2000 \cdot C_{(H_2S)} \quad (2)$$

본 연구에서 대상 지역 내 악취는 3.1절에서 나타낸 바와 같이 다양한 악취물질이 혼재해 있고, 특히 황화합물은 황화수소 (H₂S), 메칠메르캅탄 (MESH), 다이메틸설파이드 (DMS), 다이메틸다이설파이드 (DMDS)를 대상으로 조사한 결과 황화수소가 주된 악취오염물로 나타났다. 따라서 위에서 언급한 식 (1) 과 식 (2)와 유사한 황화수소와 회석배수 관계식이

사용될 수 있을 것이다. 이상의 문헌 고찰을 참고로 본 연구에서는 황화수소의 농도와 회석배수사이 관계식을 이용하여 악취체감도를 평가하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서 사용한 표준 혼합 황화합물(황화수소(10.4 ppm), 메칠메르캅탄(9.8 ppm), 다이메틸설파이드(10.2 ppm), 다이메틸다이설파이드(10.2 ppm))을 사용하여 황화수소 농도와 회석 배수 사이 관계식을 구하여 그림 4에 나타내었다. 본 연구에서 구한 황화수소의 농도와 회석배수 사이 관계식의 k 값은 혼합 악취를 사용한 Gostelow and Parsons (2000)의 값보다 1차수 작게 나타나고 단일 성분의 황화수소 만에 대한 식 (2)의 k보다는 크게 나타났다. 본 연구에서 구한 관계식의 지수(n)는 약 1을 나타내므로 이는 순수 황화수소만을 사용한 관계식에서의 n=1과 유사한 결과로 나타났다.

표 8에서는 그림 4에서 구한 황화수소 혼합물과 회석배수의 관계식을 사용하여 대상 지역의 회석배수를 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 반월공단의 경우 회석배수(OU/m³)는 0.41에서 3.18에 걸치고, 시화공단의 경우 0.17에서 6.18에 걸치는 것으로 나타났다.

Nicell (1994)에 따르면 회석배수(OU/m³)로 표시되는 악취체감도는 1 OU/m³일 때 감지, 2 OU/m³일 때 식별, 5 OU/m³일 때 불만표시임 (Miedma *et al.*, 2000)을 고려하면 가을철 시화 S-5지점을 제외하고는 모든 측정 지점에서 악취를 감지할 수 있는 수준으로 생각된다.

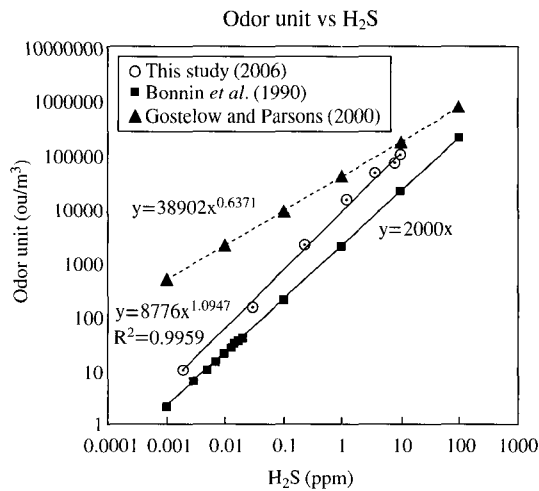


Fig. 4. Correlation of odor and H₂S concentration for sulfur compound.

4. 결 론

본 연구는 최근 사회문제화 되고 있는 반월 · 시화공단의 발생 악취가 주변 주거지역에 미치는 영향을 알아보기 위해 주요 악취물질의 농도 조사와 황화합

Table 12. Seasonal variation of Odor Unit (ou/m³).

| Season | Banwol | | | | | | Sihwa | | | | | Total | |
|--------|--------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|
| | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | M | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | M | M |
| Spring | 1.86 | 2.23 | 1.99 | 1.44 | 1.76 | 1.81 | 0.45 | 0.49 | 0.83 | 1.45 | 2.09 | 1.04 | 1.45 |
| Summer | 1.67 | 2.23 | 1.99 | 1.44 | 1.76 | 1.81 | 0.45 | 0.49 | 0.83 | 1.45 | 2.09 | 1.04 | 1.45 |
| Autumn | 3.18 | 3.04 | 2.32 | 1.26 | 0.41 | 1.99 | 0.17 | 0.06 | 0.25 | 1.54 | 6.18 | 1.54 | 1.77 |
| Winter | 1.90 | 2.56 | 2.32 | 2.04 | 1.35 | 2.04 | 1.27 | 0.96 | 1.31 | 1.72 | 2.32 | 1.49 | 1.77 |

물의 희석 배수를 사용한 악취체감도를 평가한 결과 다음을 알 수 있었다.

1. 황화합물 중 황화수소가 주로 검출되었고 주요 배출원(피혁가공, 하수처리장)이 비교적 많은 반월공단 주변 주거지역, 특히 하수처리장 주변지역 농도가 상대적으로 높게 나타났다(0.54~0.72 ppb).

2. VOCs는 각 공단 주변 주거지역의 농도가 일반 대도시의 평균농도보다 높게 나타났으며 이 중 스타이렌은 전 지점에서 고농도로 검출되었다(2.12~37.75 ppb).

3. 알데하이드류에서는 음·식료 제조공정에서 많이 배출되는 아세트알데하이드의 검출빈도가 높았고 공단별 농도 차이는 미비하였다

4. 질소계 화합물 중 암모니아는 전 지점에서 비교적 고농도로 검출되었다. 트라이메틸아민은 전 지점에서 최저감지 농도수준(0.1 ppb)의 검출을 보였다.

6. 계절관련 농도변화를 보인 물질은 스타이렌과 암모니아로 스타이렌은 가을 대비 여름농도가 약 5 배였고 암모니아는 여름보다 가을농도가 2배 높게 나타났으며 기타 다른 물질의 농도변화는 미비하였다.

7. 황화합물(황화수소, 메틸메르캅탄, 다이메틸설파이드, 다이메틸다이설파이드의 혼합물)을 이용한 황화수소 농도와 희석 배수 사이 관계식은 순수 황화수소만을 사용한 관계식과 유사한 관계식으로 나타났다.

8. 황화합물을 이용한 악취물질의 체감도를 Nicell (1994)의 방법에 따라 평가한 결과 대상으로 한 10 개 측정지점 4계절 자료(40개 자료) 중 한 지점의 가을철을 제외하고 전체지역의 악취 체감도는 악취를 감지할 수 있는 수준으로 나타났다.

이상의 결과는 부분적인 관측 자료에 근거한 것으로 복합 악취에 대한 보다 정밀한 결과를 얻기 위해서는 악취 측정, 악취체감도의 평가방법 등에 대한 장래의 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

강병욱, 신대윤, 이영재, 이학성, 한중수(2001) 광주지역 여름철 대기 중 주야간 VOC 농도특성, 한국대기환경학회지, 17(2), 169-177.
 김기현, 최여진, 홍윤정, 사재환, 박종호, 전의찬, 최창렬, 구윤

서(2005) 반월공단내 주요 산업시설물들의 대기 배출시설을 중심으로 한 주요 악취성분의 배출특성 및 배출원별 악취인자 선별방식에 대한 예비연구, 한국대기환경학회지, 21(2), 215-226.
 김덕현, 김선태, 김완중, 박민수, 박종호, 이석조, 유병대, 전의찬, 홍지형(2003) GC/FID를 이용한 소각시설의 Styrene 농도 분포 특성 연구, 한국냄새환경학회지, 2(2), 94-100.
 김덕현, 김선태, 김완중, 박민수, 이석조, 최기섭, 홍지형(2004) DNPH cartridge/HPLC 방법을 이용한 산업폐기물 처리업에서 발생하는 아세트알데히드의 분석, 한국냄새환경학회지, 3(1), 18-23.
 김선태(2004) 악취 후각측정의 기술적 과제 및 국내성과, 첨단환경기술, 7월호, 5-14.
 선우 영, 임철수, 여현규, 조기철, 최민규(2002) 수도권지역에서 포름알데히드와 아세트알데히드의 계절별 발생원특성, 한국대기환경학회지, 18(1), 11-13.
 임문순, 김기현, 최여진, 전의찬(2006) 안산시 반월공단을 중심으로 한 주요 배출시설의 업종 및 배출시설별 VOC의 배출특성, 한국대기환경학회지, 22(3), 325-336.
 정상진(2002) AUSPLUME 모델을 이용한 악취를 피하기 위한 산업오염원과 주거단지 사이 이격거리에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 18(5), 393-400.
 조석연, 황용우, 황상순(2003) 인천 서구지역 악취배출원 조사 및 저감방안 연구(보고서), 인천지역 환경기술 개발 센터.
 환경부(2001) 악취물질 발생원 관리 방안 개선을 위한 조사연구(보고서).
 Best, D.J., A. Eddy, and D.G. Laing (1994) Perceptual characteristics of binary, trinary, quaternary odor mixtures consisting of unpleasant constituents, *Physiol. Behav.*, 56, 81-93.
 Bonnin, C., A. Laborie, and H. Paillard (1990) Odor nuisances created by sludge treatment: problems and solutions, *Water Sci. Technol.*, 22, 65-74.
 Gostelow, P. and S.A. Parsons (2000) Sewage treatment works odour measurement, *Water Science and Technology*, 41(6), 33-40.
 Gostelow, P., R.M. Stuetz, and S.A. Parsons (2001) Review Paper, *Odour measurements for sewage treatment works*, *War. Res.*, 35(3), 579-597.
 Guadagni, D.G., R.G. Buttery, S. Okano, and H.K. Burr (1965) Additive effect of sub-threshold concentrations of some organic compounds associated with food aromas, *Nature*, 200, 1228-1289.
 Koe, L.C.C. (1985) Hydrogensulphide odor in sewage atmospheres, *Water Air Soil Pollut.*, 24, 297-306.

- Miedema, H.M.E., J.I. Walpot, H. Vos, and C.F. Steunenberg (2000) Exposure-annoyance relationships for odour from industrial sources, *Atmospheric Environment*, 34, 2927-2936.
- Nicell, J.A. (1994) Development of the odour impact model as a regulatory strategy, *International Journal of Environment and pollution*, 4, 124-138.