

가스크로마토그래피-이온트랩질량분석법을 이용한 하수슬러지 중 다핵방향족탄화수소(PAHs) 함량 분석

남 재 작·소 규 호·박 우 균·조 남 준·이 상 학*
농업과학기술원 환경생태과·농촌진흥청 연구관리국·*경북대학교 화학과
(2001년 12월 5일 접수; 2002년 4월 20일 채택)

The Quantitative Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs) in Sewage Sludge by Gas Chromatography-Ion Trap Mass Spectrometry

Jae-Jak Nam, Kyu-Ho So, Woo-Kyun Park, Nam-Jun Cho* and Sang-Hak Lee**

National Institute of Agricultural Science & Technology, Suwon 441-707, Korea

*Research Management Bureau, Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea

**Department of Chemistry, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

(Manuscript received 5 December, 2001; accepted 20 April, 2002)

The polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) content in sewage sludge was determined by gas chromatography linked to ion trap mass spectrometry(GC/ITMS) with five deuterated PAHs as internal standards. The minimum detection limit was from 1.66 to 7.14 pg for individual PAH by GC/ITMS. For determining total PAHs(Σ PAH) in sewage sludge 84 samples from 74 waste water treatment plants in whole country were analyzed. The average content of Σ PAH for whole samples was $3,289 \pm 3,098 \mu\text{g/kg}$, and ranged from 142 to maximum 20,102 $\mu\text{g/kg}$. According to the number of population of the city, the areas were classified as five regions, ie. big, large, middle, small, and rural area in which the waste water treated plants were grown. The contents of PAHs were $4,689 \pm 5,503$, $5,839 \pm 6,401$, $3,725 \pm 2,053$, $2,237 \pm 2,069$, and $2,475 \pm 1,489 \mu\text{g/kg}$, in big, large, middle, small, and rural area, respectively.

Key words : sewage sludge, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), GC/MS

1. 서 론

우리나라에는 150여 개의 생활하수처리장에서 연간 106만 톤의 하수슬러지가 발생되고 있고, 이들 하수슬러지의 처리는 대부분 해양투기나 매립에 의존하여 왔다¹⁾. 그러나 매립지의 부족과 매립지 침출수에 의한 환경오염으로 80% 정도의 수분을 함유한 하수슬러지의 매립에는 많은 어려움이 있고, 해양투기는 영양염류와 유기물에 의한 해양환경오염 우려로 국제적인 제한을 가하고 있다. 또한 하

수슬러지의 소각이나 자원화 방법이 부분적으로 사용되고 있지만 처리비용과 효율성 측면에서 널리 사용되지 못하고 있다. 이런 문제점으로 인해 국내에서도 하수슬러지의 처리수단으로서 퇴비화를 통한 농경지 활용이 일부 연구자들에 의해 연구되어 왔다²⁻⁴⁾. 미국과 유럽연합 국가에서는 하수슬러지의 농경지 사용이 허용되고 있으나 국내에서는 유해성분으로 인한 농작물 피해방지와 토양환경보전을 위해 군 단위 이하 농·어촌지역에서 발생하는 생활하수슬러지만 사전 검토 후 사용토록 하고 있다⁵⁾. 하수슬러지를 토양에 사용하는 국가에서는 농경지에 투입되는 하수슬러지에 포함된 중금속에 의해 농산물이 오염되는 것을 방지하고자 하수슬러지의 사용량에 일정한 제한을 가하고 있다⁶⁾. 현재까

Corresponding Author ; Jae-Jak Nam, National Institute of Agricultural Science & Technology, Suwon 441-707 Korea

Phone : +82-31-290-0213

E-mail : jjnam@rda.go.kr

지 일부국가에서 하수슬러지에서 Polychlorinated biphenyls (PCBs)에 대한 규제를 제외하고는 유기오염물질에 대한 법적 규제를 실시하는 나라는 없다. 그러나 하수슬러지에 포함된 유기오염물질에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해서 진행되어왔는데⁷⁻¹⁰⁾, 이는 독일에서는 슬러지에서 다이옥신과 퓨란에 대한 우려로 인해 슬러지의 농경지 사용을 완전히 금지하자는 요구처럼¹¹⁾ 유기오염물질의 운명, 거동, 건강에 미치는 영향 등에 대한 일반인들과 연구자들의 관심이 크기 때문이다.

다핵방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 변이원성과 발암성으로 인해 유기오염물질로서 중요한 의미를 갖는다^{12,13)}. PAHs는 두 개 이상의 폐닐 링이 융합하여 구성된 화합물로서 화석연료의 불완전연소에 의해 주로 생성되며, 식물의 생합성 과정에서 자연발생적으로는 생성되기도 한다. 그 외 산불 발생시나, 화산활동, 흡연, 식품조리과정 등 다양한 원인에 의해 생성된다¹⁴⁾. 오염원으로부터 발생한 PAHs는 대기를 통하여 환경 중으로 확산되며, 이러한 원인으로 인해 대기, 수질, 토양, 생물체, 그리고 식품 등 거의 대부분의 환경에서 검출되고 있다¹³⁾. 가장 일반적으로 사용되는 PAHs의 분석방법은 크로마토그래피를 이용하는 방법으로 고성능액체크로마토그래피(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)와 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)법이 주로 사용되고 있다. 특히 C₁₈ 역상컬럼을 이용한 HPLC 분석법이 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 검출기로는 자외선(UV) 및 형광검출기(FL)가 상호보완적으로 사용되고 있다¹⁵⁾. GC 분석법에는 불꽃이온화검출기와 질량분석법(mass spectrometry, MS)을 사용하는 검출방법이 일반적으로 사용되고 있다¹⁶⁾. 이들 크로마토그래피를 이용하는 분석법에서는 16종의 EPA (US Environment Protection Agency) PAHs를 분석할 수 있고 검출한계도 매우 낮은 장점이 있다. GC의 검출기로 사용되는 질량분석기에는 사중극자(quadrupole), 이온트랩(ion trap, IT), magnetic sector, 시간비행(time of flight)방식 등이 있다. 이 중 사중극자(quadrupole) 질량분석기를 사용한 GC/MS-SIM(selective ion monitoring)방식이 가장 일반적으로 사용되어 오고 있지만, GC/ion trap MS(GC-ITMS)도 full scan 모드에서의 우수한 감도와 빠른 주사속도 등으로 인해 환경분석을 포함하는 다양한 분야에 사용되어오고 있다^{17,18)}.

하수처리의 최종 산물로서 슬러지에는 폐수에 존재하는 많은 화학물질들을 함유하고 있다. 하수슬러지에서 발견되는 오염물질의 스펙트럼은 아주 다

양할 뿐만 아니라 그 조성은 일정하지 않고 계절과 분해양상에 따라 계속적으로 변하고 있다. 본 논문에서는 우리나라에서 발생하는 하수슬러지의 PAHs를 GC/ITMS를 사용하여 분석하고 도시규모별로 PAHs함량과 프로파일에 대해 비교 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

본 시험에 사용된 시료는 전국 150개소의 하수처리장 중 74개 하수처리장에서 84점의 시료를 2001년 4월부터 5월까지 2개월에 걸쳐 수집하였다. 시료는 각 하수처리장에서 채취하여 비닐 팩으로 봉한 후 4℃의 냉장고에 보관하면서 분석시료로 사용하였다.

2.2. 하수오니 분류

수집된 하수슬러지 시료는 각 하수처리장이 수용하고 있는 지역의 인구 규모에 따라 Table 1과 같이 5 단계로 분류하였다. 이는 현재의 하수슬러지의 농경지 사용 가능여부는 인구기준으로 분류되는 도시 규모에 따라 결정되기 때문이다⁵⁾. 광역시 등 인구 100만 이상의 도시들이 속한 지역에 위치한 하수처리장은 Region A, 인구 50만 이상의 대도시는 Region B, 20만 이상의 중도시는 Region C, 10만 이상의 도농 복합도시는 Region D, 그리고 10만 이하의 농촌지역은 Region E로 각각 분류하였다. 대도시 이상(Region A, B)의 하수처리장은 수적인 면에서는 중·소도시 이하의 소규모 하수처리장 보다 작았으나 생활하수 슬러지 발생량의 대부분을 차지하였다(Table 1).

Table 1. Classification of sewage sludge produced in the different city scale

Region	Population range (x10,000)	No. of sample collected	Amount of sludge collected site (10 ³ kg/yr)
A	> 100	11	421,074
B	50 ~ 100	7	17,6187
C	20 ~ 50	14	133,240
D	10 ~ 20	22	56,649
E	< 10	30	22,855
Total		84	810,005

2.3. PAHs 분석

채취된 하수오니는 먼저 105℃ 항량건조법에 따라 수분을 정량하였다. ΣPAHs의 정량은 미국 환경보호청(US EPA)의 우선감시물질목록에 포함된 16가지 PAHs (naphthalene, acenaphthylene, acena-

phthene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoroanthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b)fluoroanthene, benzo(k)fluoroanthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3-cd)pyrene, dibenzo(a,h)anthracene, benzo(ghi)perylene)에 대해 실시하였다¹⁹⁾. 표준물질은 16가지의 PAHs가 포함된 혼합표준용액을 사용하였으며, 내부표준물질은 naphthalene-d₈, acenaphthene-d₁₀, phenanthrene-d₁₀, chrysene-d₁₀, perylene-d₁₀가 용해된 혼합시약(AccuStandard, USA)을 사용하였다.

시료 추출 및 정제는 US EPA의 SW-846 분석법에 준하여 분석하였다. 시료 20g을 먼저 약 20~50g의 무수 황산나트륨과 혼합한 후 원통여지에 넣고 Soxhlet 추출법을 이용하여 약 16시간 추출하였다²⁰⁾. 추출용매는 Dichloromethane 200ml을 사용하였다. 추출된 시료에 내부표준물질을 첨가 후 무수 황산나트륨 컬럼을 통과시켜 미량의 수분을 제거 후, 감압회전농축기를 사용하여 농축하였다. 2 ml 정도로 농축된 추출액을 cyclohexane으로 용매 교환 후 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 사용하여 정제하였다²¹⁾. 정제 컬럼을 통과한 유출액은 최종적으로 질소농축기(TurboVaP II, Zymark, USA)를 사용하여 1 ml로 농축한 후 GC/ITMS(GCQ, Finnigan, USA)를 사용하여 분석하였다.

Table 2. GC/MS condition to analyze PAHs

Compartment	Condition
Oven program	: 75°C(5min) to 150°C(0min) at 25°C/min, then 265°C(0min) at 4°C/min, then 285°C(10min) at 30°C/min
Flow rate	: He, 40 cm/sec
Injector temp.	: 285°C
Transfer line temp.	: 285°C
Ion source temp.	: 200°C

PAHs의 분석을 위한 GC조건과 MS의 조건은 Table 2와 같이 설정하였다. PAHs 정량에는 100~285 m/z의 범위를 주사(scan)하여 총 이온 크로마토그램(total ion chromatogram, TIC)을 얻고, Table 3의 정량이온을 사용하여 추출 이온 크로마토그램(extracted ion chromatogram, EIC)을 구한 후 봉우리(peak)의 면적을 계산하였다. 이를 5종의 내부표준물질의 EIC 봉우리 면적과 비교하여 내부표준물질법으로 정량하였다. 이 때 사용한 표준물질의 농도는 20, 50, 100, 500, 1000 ng/ml이었고, 내부표준물질의 농도는 200 ng/ml이었다. 모든 PAHs 농도는 건물기준으로 나타내었다.

Table 3. Abbreviation, retention time, quantitation mass and MDL of PAHs

Name	Abbreviation	Retention time	Quantitation mass	MDL* (pg)
Naphthalene	Nap	5.62	128	7.14
Acenaphthylene	Acy	8.51	152	1.99
Acenaphthene	Ace	8.97	154	2.35
Fluorene	Fle	10.57	166	3.54
Phenanthrene	Phe	14.38	178	2.34
Anthracene	Ant	14.61	178	2.59
Fluoroanthene	Fla	20.34	202	6.00
Pyrene	Pyr	21.49	202	3.06
Benzo(a)anthracene	BaA	28.40	228	3.89
Chrysene	Chr	28.58	228	2.90
Benzo(b)fluoroanthene	BbF	34.16	252	2.65
Benzo(k)fluoroanthene	BkF	34.28	252	6.05
Benzo(a)pyrene	BaP	35.28	252	2.81
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	IcP	40.24	276	2.13
Dibenzo(a,h)anthracene	DaA	40.54	278	1.66
Benzo(g,h,i)perylene	BgP	41.59	276	2.86

*Minimum detection limit equals three times the standard deviation of the replicate analysis of the lowest standard(n=8)

2.4. 정도관리(quality control)

PAHs의 약어, 머무름 시간(retention time), 정량이온, 검출한계 등은 Table 3에 나타내었다. 여기서 검출한계는 최저농도 표준물질을 8회 분석한 후 이때 얻어진 표준편차의 3배 값으로 하였다²²⁾. 분석법의 정확성과, 회수율, 재현성 등의 확인에는 미국 표준기술연구소(NIST)의 SRM 1941a를 사용하여 검증하였다. NIST SRM 1941a를 사용하여 Soxhlet 추출법과 GC/ITMS를 사용하여 분석한 결과와 회수율, RSD 값은 Table 4에 나타내었다. 시료분석에 있어서는 첨가된 내부표준물질의 회수율이 75% 이상일 때 그 분석 데이터를 인정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PAHs의 분리과 검출

GC/ITMS를 사용하여 16가지의 1,000 ng/ml의 PAHs 표준물질에 대해 분석한 TIC 크로마토그램은 Fig. 1a에 나타내었다. 높은 농도의 표준물질 크로마토그램의 경우 TIC 크로마토그램에서 16종의 PAH가 구별이 가능하였으나, 슬러지 시료에서는 방해물질들로 인해 TIC 크로마토그램에서 PAH 봉우리의 구분이 불가능하였다(Fig. 1b). 그러나 Fig. 2에서와 같이 EIC 크로마토그램의 경우 표준물질과 같이 슬러지 시료에서도 명확히 각 봉우리에 대한

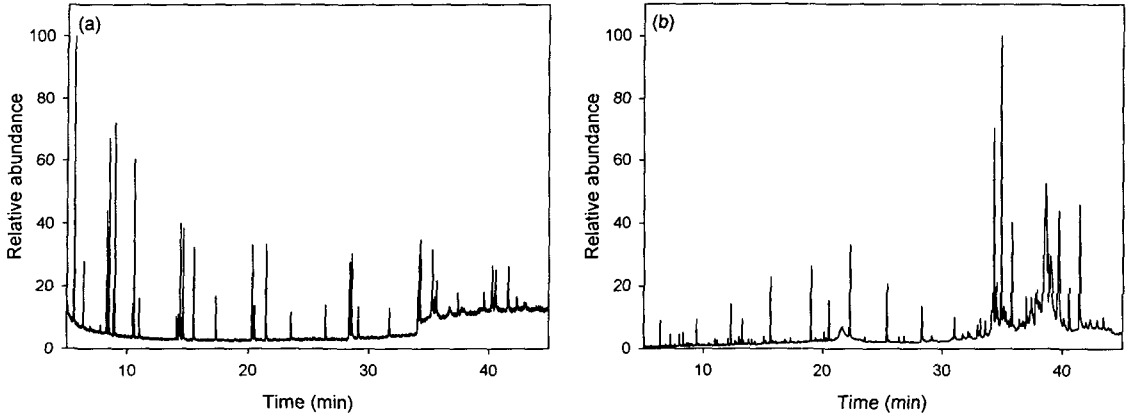


Fig. 1. Total ion chromatogram of PAHs standard(a) and sewage sludge sample(b) in mass range 100~285.

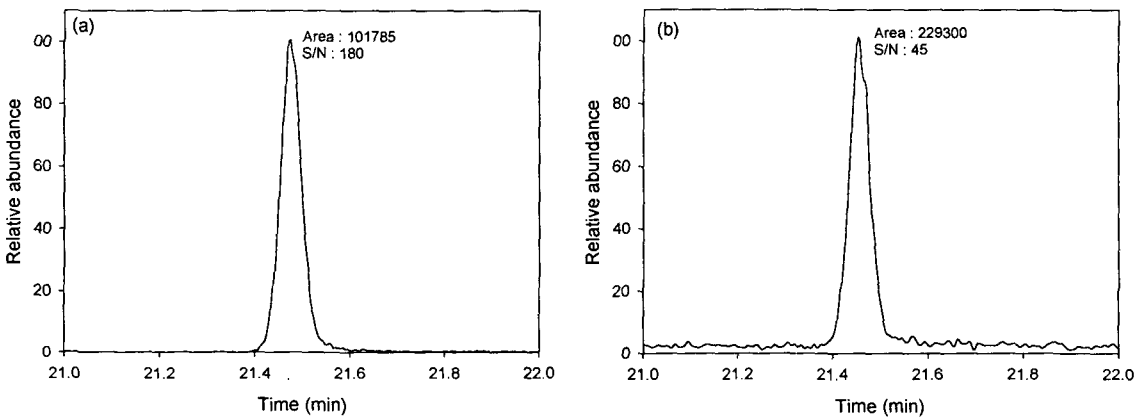


Fig. 2. Extracted ion chromatogram of pyrene in the standard(a) and sewage sludge sample(b) from Fig. 1.

구분이 가능하였다. GC/ITMS의 PAH에 대한 검출 한계는 1.66~7.14 pg으로 다른 연구자들이 보고한 HPLC-UV(0.06~1.54 ng)보다는 크게 낮았고, HPLC-FL(0.5~6.0 pg)과는 비슷하였다¹⁸⁾. 그러나 GC/MS-SIM(0.5~1.5 pg)과 비교하면 약간 높았다²²⁾. NIST SRM 1941a를 분석하였을 때 보증값(certified value)과 비교하여 측정된 값의 범위는 평균 76~180% 였다(Table 4).

3.2. PAH 함량

84개의 하수슬러지 시료에 대해 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 우리나라의 하수슬러지의 ΣPAH의 평균은 $3,289 \pm 3,098$ 이었고, 중간값은 2,493, 그리고 범위는 142~20,102 μg/kg이었다. 16종의 PAHs 중 Pyr이 평균 456 ± 746 , 최대 $5,174$ μg/kg으로 가장 많이 분포하였고, 최대값의 기준으로 볼 때 Fla>Phe>BgP 등의 순으로 분포하였다. 이러한 농도는 영국의 하수슬러지에서 분석된 개별 PAH의

농도가 대략 1~10 mg/kg의 범위 내에 분포한다는 것에 비하면 약간 낮은 값이다²⁴⁾. 외국에서는 토양에 슬러지 처리시 발생하는 PAHs의 오염과 식물체 전이에 관한 연구^{8,9)}가 당근, 귀리 등 몇몇 작물에 대해 수행되었지만 국내에서는 아직 이러한 연구보고가 없었다. 우리나라의 주 작물과 토양 조건 등에서 PAHs를 함유한 하수슬러지 처리시 미치는 영향에 대한 연구가 하수슬러지 사용 논의 이전에 먼저 수행될 필요가 있다고 생각된다.

3.3. 도시규모와 PAHs

도시규모별 ΣPAHs의 평균함량 및 범위를 Table 5에 나타내었다. 광역시 규모의 지역인 Region A에서는 평균 $4,689 \pm 5,503$ μg/kg, 최대 19,665 μg/kg를 나타내었고, 대도시 규모의 지역인 Region B에서는 $5,839 \pm 6,401$ μg/kg, 최대 20,102 μg/kg를 나타내어 가장 높은 농도를 나타내었다. 이에 반해 중·소도시 규모이하인 Region C, D, E 지역에서는

Table 4. Analysis of SRM 1941a ($\mu\text{g}/\text{kg}$, dry weight)

Name	Certified value	Soxhlet value	Percent of certified value	Soxhlet RSD ³
Naphthalene	1010±140 ¹	792±47 ¹	78.4	37.4
Acenaphthylene	(41±10) ²	47±4.0	115	3.55
Acenaphthene	(37±14)	32±7.7	87	6.80
Fluorene	97.3±8.6	90±11	93	9.60
Phenanthrene	489±23	436±34	89	29.7
Anthracene	184±14	151±13	82	11.2
Fluoroanthene	981±78	892±25	91	21.8
Pyrene	811±24	674±31	83	27.6
Benzo(a)anthracene	427±25	364±31	85	27.4
Chrysene	380±24	579±29	152	25.3
Benzo(b)fluoroanthene	740±110	877±26	119	22.9
Benzo(k)fluoroanthene	361±18	321±6.0	89	5.26
Benzo(a)pyrene	628±52	475±20	76	17.3
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	501±72	453±33	90	30.1
Dibenz(a,h)anthracene	73.9±9.7	133±6.5	180	5.77
Benzo(g,h,i)perylene	525±67	472±15	90	13.5

¹The uncertainty is base on a 95% confidence interval for the true concentration

²Values in parenthesis were not certified value

³Relative standard deviations for the measured values are base on three replicate analysis

각각 평균 3,725±2,053, 2,237±2,069, 2,475±1,489 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 이었고, 최대 8,768, 5,240, 6,821 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 을 나타내었다. 이는 중·소도시이하의 규모에서 대도시 이상의 규모에서의 ΣPAHs 의 농도보다 1/2 또는 1/3 정도의 농도만을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이는 PAHs가 주로 화석연료의 사용과 밀접하게 관련되어 있고, 화석연료의 사용량은 도시규모와 비례한다는 기존의 관점과 잘 일치하고 있다.

3.4. PAH 프로파일

PAHs 프로파일은 PAHs의 독성평가에 있어서 중요한 의미가 있다. 이는 개별 PAH에 대한 독성 정도가 각각 다르기 때문이다¹³⁾. 하수슬러지에 대한 16종의 PAHs 프로파일은 Fig. 3에 나타내었다. Nap의 경우 농촌지역에서 약간 낮았지만 하수슬러지 발생지역에 관계없이 대개 250~430 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 정도의 농도를 보였으나 독성에 있어서도 중요한 의미를 갖지 않는다. Acy와 DaA의 경우에는 모든 지역에서 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 내외로 존재량이 극히 적었다. 3~4개 phenyl링을 가진 Fle, Fla, Pyr 등은 PAHs 중 가장 많은 양을 차지하고 있다. 특히 Phe/Ant의 비는 8 이하를 나타내고, Fla/Pyr의 비는 약 1 정도를 보여 대부분의 PAHs가 화석연료의 사

Table 5. PAH concentration in sewage sludge

Compounds	Arithmetic mean ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Median ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Range of concentration ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
Nap	345(354) ¹	235	26~2,443
Acy	23(26)	19	nd ² ~168
Ace	83(84)	50	nd~356
Fle	242(222)	170	nd~1,299
Phe	455(524)	357	18~2,526
Ant	71(66)	52	nd~331
Fla	409(643)	272	nd~4,650
Pyr	456(746)	310	nd~5,174
Chr	120(166)	76	nd~1,234
BaA	203(205)	149	nd~1,350
BbF	190(208)	149	22~1,702
BkF	73(70)	60	nd~505
BaP	150(189)	107	nd~1,589
IcP	157(139)	131	nd~1,152
DaA	12(38)	nd	nd~219
BgP	284(399)	223	22~3,715
Σ PAH	3,289(3,098)	2,493	142~20,102

¹): standard deviation; ²nd : not detectable

Table 6. Mean and range of ΣPAHs in sewage sludge depend on the size of city

Region	total PAH ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	
	mean	range
A	4,689(5,503)*	674~19,665
B	5,839(6,401)	2,062~20,102
C	3,725(2,053)	1,403~8,768
D	2,237(2,069)	1,174~5,240
E	2,475(1,489)	142~6,821

*): standard deviation

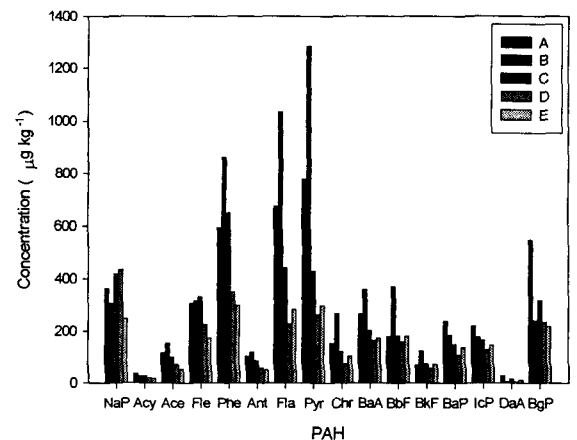


Fig. 3. PAH profile depend on the size of city.

용에 의해 발생한 것임을 보여주고 있다²⁵⁾. 대도시 지역인 Region B에서 대부분의 성분이 가장 높은 양을 차지하고 있지만, 독성에 있어서 중요한 의미를 갖는 5~6 링의 PAHs의 분포에서는 Region A, B와 Region C, D, E에 있어서의 함량에서의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 ΣPAHs의 함량에 있어서는 도시규모별 차이가 존재하지만 독성 평가시에는 이 차이가 크게 줄어들 수 있음을 예측할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 PAHs의 독성관점에서 본다면 소규모지역에서 발생하는 하수슬러지의 위해성도 대도시와 비교해서 차이가 크지 않을 것을 예측할 수 있었다.

4. 결 론

하수슬러지의 PAHs를 정량하기 위해 Soxhlet 추출법과 GC/ITMS를 사용하여 분석한 결과와 우리나라의 생활하수 처리장 74개소에서 채취한 84점의 하수슬러지의 PAHs를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. GC/ITMS의 PAH에 대한 검출한계는 1.66~7.14 pg으로 HPLC-UV(0.06~1.54 ng)보다는 크게 낮았고, HPLC-FL(0.5~6.0 pg)과는 비슷하였으며, GC/MS-SIM(0.5~1.5 pg)과 비교하면 약간 높았다.
2. Soxhlet 추출법과 GC/ITMS를 사용하여 NIST SRM 1941a를 분석하였을 때 보증값과 비교하여 측정된 값의 범위는 평균 76~180% 였다.
3. 우리나라의 하수슬러지의 ΣPAH의 평균은 3,289 ± 3,098이었고, 중간값은 2,493, 그리고 범위는 142~20,102 μg/kg이었다.
4. ΣPAH는 광역시 4,689 ± 5,503¹⁾, 대도시 5,839 ± 6,401, 중도시 3,725 ± 2,053, 소도시 2,237 ± 2,069, 농촌지역 2,475 ± 1,489 μg/kg으로 도시 규모가 클수록 대체로 증가하였다.
5. 16종의 PAH 중 Fle, Fla, Pyr 등이 가장 많은 양을 차지하고 있고, Phe/Ant의 비는 약 8 정도로 대부분의 PAHs가 화석연료의 사용에 의한 것으로 추정되었다.

참 고 문 헌

- 1) 환경부, 2000, 환경통계연감.
- 2) Song, J.C., M.J. Yu and D.M. Kim, 1986, A study on the composting of sewage sludge, J. Kor. Solid Wastes Engineering Society, 3(2), 121-129.
- 3) Han, E.J., H.G. Choi, J.A. Lee, K.Y. Kim, C.K. Lee, K.H. Park and C.G. Phae, 2000, Investigation on possibility of composting by proper-

ties analysis of organic sludge composts, J. of KOWREC, 8(1), 109-120.

- 4) Phae, C.G., J.K. Cho, N.H. Kwak and D.W. Kim, 1998, A study on the evaluation of optimum treatment by analysis of sewage sludge properties, J. Kor. Solid Wastes Engineering Society, 15(3), 252-260.
- 5) 농림부, 1998, 비료공정규격, 농림부 고시 제 1998-39호.
- 6) EPA, 1992, Technical support document for land application of sewage sludge, EPA 822/R-93-001b.
- 7) Goodin, J. D., and M. D. Webber, 1995, Persistence and fate of anthracene and benzo(a)-pyrene in municipal sludge treated soil, J. Environ. Qual., 24, 271-278.
- 8) Wild, S. R., K. C. Jones, 1992, Polynuclear aromatic hydrocarbon uptake by carrots grown in sludge-amended soil, J. Environ. Qual., 21, 217-225.
- 9) Smith, K. E. C., M. Green, G. O. Thomas and K. C. Jones, 2001, Behavior of sewage sludge-derived PAHs on pasture, Environ. Sci. Technol., 35, 2141-2150.
- 10) Schnaak, W., T. H. Kuchler, M. Kujawa, K. P. Henchel, D. Süßenbach and R. Donau, 1997, Organic contaminants in sewage sludge and their ecotoxicological significance in the agricultural utilization of sewage sludge, Chemosphere, 35, 5-11.
- 11) Goosmann, G., 1989, World water, 111-115pp.
- 12) Keith, L. H., 1997, Environmental endocrine disrupters, A handbook of property data, John Wiley & Sons, New York, 4pp.
- 13) Roy, J., 1997, Environmental contaminants encyclopedia, PAHs entry, National Park Service, Colorado, USA.
- 14) Sims, R.C., and M. R. Overcash, 1983, Fate of polynuclear aromatic compounds in soil-plant systems, Residue. Rev., 88, 1-68.
- 15) Freeman, D. J., and F. C. R. Catteil, 1990, Woodburning as source of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons, Environ. Sci. Technol., 24, 1581-1585.
- 16) Jones, K. C., J. A. Stratford, K. S. Waterhouse, E. T. Furlong, W. Giger, R. A. Hites, C. Schaffner and A. E. Johnston, 1989,

- Increases in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of an agricultural soil over the last century, *Environ. Sci. Technol.*, 23(1), 95-101.
- 17) Bumpus, J. A., 1989, Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Phanerochaete chrysosporium*, *Applied and Environmental Microbiology*, 55(1), 154-158.
 - 18) Chiu, C.P., Y. S. Lin and B. H. Chen, 1997, Comparison of GC-MS and HPLC for overcoming matrix interferences in the analysis of PAHs in smoked food, *Chromatographia*, 44, 497-504.
 - 19) US EPA, 1996, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846, Method 8270C: Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS), Washington, DC, USA.
 - 20) US EPA, 1996, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846, Method 3540C: Soxhlet Extraction.
 - 21) US EPA, 1996, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846, Method 3630C: Silica gel cleanup.
 - 22) Mazzer, D., T. Hayes, D. Lowenthal and B. Zielinska, 1999, Quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil at McMurdo station, antarctica, *The Science of the Total Environment*, 229, 65-71.
 - 23) Kim, J. H., 2000, Analysis for 16 polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) in sewage sludge and soil, *Analytical Science & Technology(Korea)*, 13(3), 357-367.
 - 24) Wield, S. R., S. P. McGrath and K. C. Jones, 1990, The polynuclear aromatic hydrocarbon (PAH) content of archived sewage sludges. *Chemosphere*, 20, 703-716.
 - 25) Yang, S. Y. N., D. W. Connell, D. W. Hawker and S. I. Kayal, 1991, Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil, and vegetation in the vicinity of an urban roadway, *The Science of the Total Environment*, 102, 229-240.