

아스콘 제조 시설의 특정대기유해물질 관리방안 연구

신재원*, 이상현, 조성근, 김경열, 양해원, 이영주, 추완중, 이충대, 박완순, 권문주
인천보건환경연구원 산업환경과

A Study on Management of specific air pollutants from Ascon plants.

Jae-Won Shin*, Sang-Hyun Lee, Sung-Geun Cho, Kyeong-Yeol Kim, Hae-Won Yang, Young-Ju Lee,
Wan-Jong Chu, Choong-Dae Lee, Wan-Soon Kwak, Moon-Ju Kwon

Division of Industry Environment, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

This study investigated the effluent quality standard of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs), emission factors, odors, and total hydrocarbon concentrations using samples from stacks of the Ascon plants. Based on the survey conducted from 2018 to 2021, The PAHs concentration was measured as $197.685 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$. It was satisfied with Effluent quality standard of benzo(a)pyrene. The emission factors of PAHs was calculated $795.627 \text{ ng}/\text{ton}$, the substances with three or less benzene rings accounted for more than 98% of the substances emitted from the Ascon plants. There was inappropriated complex ordors about 33 %. Because of the concentration of shipping facilities, it need to prevent counterplans. There was no link between aggregate use and THC concentrations. As a result of the modeling, PAHs may affect nearby areas depending on weather conditions, so periodic inspections of air pollutant discharge facilities are required.

Key words : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs), Ascon plants, Ordor, Emission factors

I. 서론

산업화와 경제발전으로 인해 인류의 삶이 안락함과 편리한 생활을 하는 반면에 그에 따른 환경오염 문제가 크게 대두되고 있다. 대기오염물질은 자연적 혹은 인위적으로 배출되고 있는데 인간에게 문제시 되는 것들은 인위적인 배출에 의한 것이 대부분이다. 오늘날 대기오염은 나날이 증가하고 있고 대기오염으로 인해 피해를 받는 사람과 이에 관심을 갖는 사람도 점점 많아지고 있다. 대기오염을 일으키는 요인 중 특히 가스 상태의 물질은 눈에 잘 보이지 않지만 심한 악취를 일으켜 사람들에게 불쾌감을 줌과 동시에 건강상으로도 악영향을 미치고 있다. 가스 상태의 물질은 소각, 발전, 각종 산업에 의해 발생하며, 휘발성유기화합물질(Volatile Organic Carbons, VOCs), 산성가스(Acid Gas), 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 등을 배출한다. 특히 이 중 다환방향족탄화수소(PAHs)는 입자상과 가스상 물질로 구성되어 있으며, 보일러, 쓰레기 소각, 금속제조, 자동차 배출가스, 아스팔트 제조 등 주로 화석연료를 연소하면서 배출된다고 알려져 있다(정중현 et al., 2011). 특히 아스팔트를 생산하는 아스콘 제조 사업장의 경우 다환방향족탄화수소(PAHs)의 배출과 함께 악취 민원이 끊임없이 제기되어 이에 대한 해결책이 필요한 실정이다.

아스팔트 콘크리트를 줄여 아스콘이라고 하는데, 아스콘은 아스팔트, 골재, 석회암, 광물 충전재 등의 혼합으로 구성되어 있고, 주로 도로나 주차장 등의 포장에 위해 여러 현장에서 사용하고 있다. 한국아스콘공업협동조

합연합회의 자료에 따르면, 전국적으로 2015년도까지 매년 아스콘생산 및 납품실적이 증가했으며, 2016년부터 2020년까지 매년 약 2,300만톤 이상의 아스콘을 생산 및 납품하고 있다.

아스콘 제조 사업장은 일반적으로는 산업단지 내에 위치해 있지만 일부 사업장의 경우 주거지역과 멀지 않은 곳에 위치하여 아스콘 생산시에 발생하는 다환방향족탄화수소(PAHs) 물질이 인근 주민들에게 노출되고 있다. 이에 따라 주민 건강에 악영향을 미칠 가능성이 있으며 아스콘 제품에서 나는 악취로 인한 민원도 자주 발생하고 있는 것이 현실이다.

다환방향족탄화수소(PAHs)는 석유, 코크스 생산 및 운송과 수송 등의 산업공정과 목재, 화석연료, 기타 유기물질 등이 불완전 연소하거나 열분해 하면서 발생한다(Wilcke et al., 2000). 또한 벤젠고리가 여러 형태로 배열되어 다양한 유기화합물이 그룹을 이루고 있다. 이 화합물의 대부분은 독성이 있는 것으로 알려져 있으며 일부 물질은 발암성을 띄거나 유전적으로 독성을 일으키는 등 인체에 다양한 건강피해를 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다(Bolden et al., 2017). 다환방향족탄화수소(PAHs)는 그 유해성이 확인된 후 많은 규제가 만들어졌는데, 실제로 미국 EPA에서는 다환방향족탄화수소(PAHs) 16종을 우선적으로 통제해야 할 오염물질로 분류했다(EPA, 1997).

이 중 벤조(a)피렌은 국제암연구기관(IARC)에서 인체에 암을 발생시키는 요인으로 분류된 Group 1에 속하는 물질이며(Pincemaille et al., 2014), 우리나라에서는 2020년 1월 1일부터 다환방향족탄화수소(PAHs) 중 벤조(a)피렌에 대해 배출허용기준(모든 배출시설 0.05 mg/Sm³ 이하)

을 적용하고 있다.

대기오염물질 발생 원인을 정확하고 빠르게 파악하고 예측하는 것은 시민의 삶의 질 향상과 건강을 보호하기 위해 중요하며, 이를 위해 오염물질 배출시설의 특성과 현황을 분석하여 오염물질의 저감 또는 제거할 수 있는 대책을 마련하는 노력이 필요하다.

따라서, 이론에 근거한 배출보다 실측을 바탕으로 한 사업장의 대기오염물질 배출 수준을 정확히 파악하여 대기오염을 발생시킬 수 있는 원인 물질 저감을 위한 노력으로 대기오염시설 사업장 관리의 효과적 진행과 동시에, 신뢰성 있고 정확한 기초자료를 생성하는 것을 근본적인 목표로 검사업무를 진행해야 할 것이다.

인천시 관내 아스콘 제조 사업체의 수는 총 21개소로 산업단지에 위치해 있는 사업체가 대부분인데, 일부업체의 경우 주거지역에서 멀지 않은 곳에 위치해 있기도 하다.

이에 따라, 1)아스콘 제조 사업장에서 발생하는 다환방향족탄화수소(벤조(a)피렌)의 배출허용기준 준수 여부를 파악하고, 2)배출계수와 악취강도, 모델링 평가를 통해 배출시설의 운영과 현황의 적절성을 조사하여, 다환방향족탄화수소(PAHs)로부터 주민들의 불안을 해소하고 대기보전을 위한 정책수립과 대기 모델링 분석 등 관련 연구 및 정책을 위한 기초자료 생성을 목표로 하고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 조사지점 및 기간

본 연구는 인천광역시 내 신고된 아스콘 제조 사업장을 대상으로 2018년부터 2021년까지 조사하였다. 아스콘 제조 사업장의 배출시설은 건조시설, 계량 및 혼합시설 등으로 구성되어 있고, 방지시설은 원심력집진시설, 여과집진시설, 흡착에 의한 시설, 소취제살포시설 등이 직렬 또는 병렬로 설치되어 있다(Fig. 1).



Fig. 1. The view of Ascon plant

검사를 진행한 업체는 총 13개 업체로, 검사 횟수는 2회씩 진행한 업체를 포함하여 총 22건의 검사를 하였다. 이 중 10개 업체는 검단일반산업단지에 속해 있으며, 3개 업체는 각각 미추홀구, 서구, 중구의 준공업지역과 공업지역에 위치해 있다.

검단일반산업단지에 위치한 아스콘 제조 사업장(A사 ~ J사) 10곳의 자세한 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 사업장은 산업단지 안에 위치해있으며, 가장 가까운 단독주택 주거지역은 직선거리로 약 400 m 거리에 위치해 있고, 아파트가 위치한 주거지역은 직선거리로 약 1.7 km 떨어져 있다. G사를 제외하고 모두 2018 ~ 2021년 각각 2회씩 시료채취가 이루어져, 총 19회의 조사가 수행되었다.

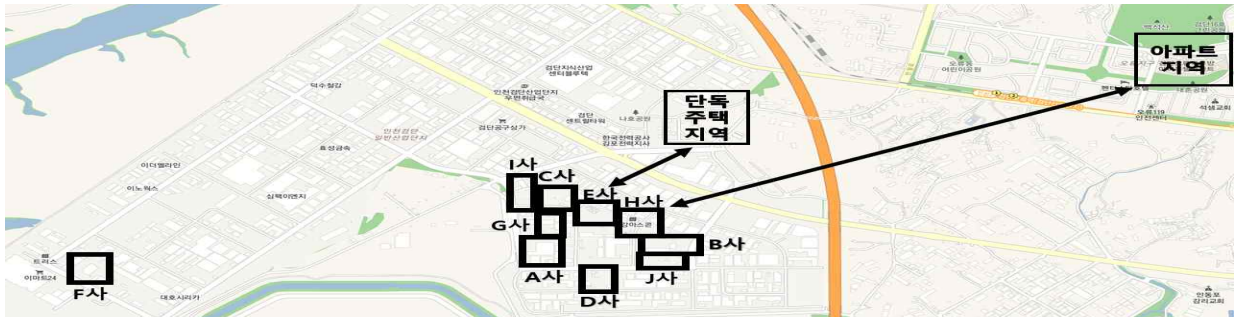


Fig. 2. Location of Ascon plants in Geomdan Industrial Complex

미추홀구에 위치한 아스콘 제조 사업장 K사는 2020년 1회 조사사업을 진행했고 관련 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 해당 사업장은 준공업지역에 속해있으나, 주변에 주거지역이 혼재되어 있으며 현재 해당지역의 도시개발사업을 진행 중이다. 가장 가까운 아파트가 위치한 주거지역은 직선거리로 약 300 m 떨어져 있다.



Fig. 3. Location of Ascon plant in Michuhol-gu

서구 및 중구에 위치한 아스콘 제조 사업장 L사, M사는 각각 2020년 1회 시료채취 하였으며, Fig. 4에 위치를 나타내었다. 사업장은 일반공업지역에 위치해 있고 주위가 일반공업 또는 준공업지역으로 구성되어 있으며, 가장 가까운 다세대 아파트가 위치한 주거지역은 직선거리로 약 1 km 떨어져 있다.

M사는 인천국제공항 건설에 필요한 아스콘 납품을 위해 운영 중이며, 가장 가까운 아파트가 위치한 주거지역은 직선거리로

약 2.5 km 떨어져 있다.



Fig. 4. Location of Ascon plant in Seo-gu(Up) and Jung-gu(Down)

2.2. 연구방법

2.2.1. 시료채취 및 분석방법

다환방향족탄화수소(PAHs)의 시료채취 및 분석은 대기오염공정시험기준 ES 01505.1a(배출가스 중 다환방향족탄화수소류-기체크로마토그래피)를 기준으로 실시하고, 분석대상 물질은 미국 EPA에서 우선적 통제 물질로 구분된 16종을 대상으로 하였다(Fig. 5).

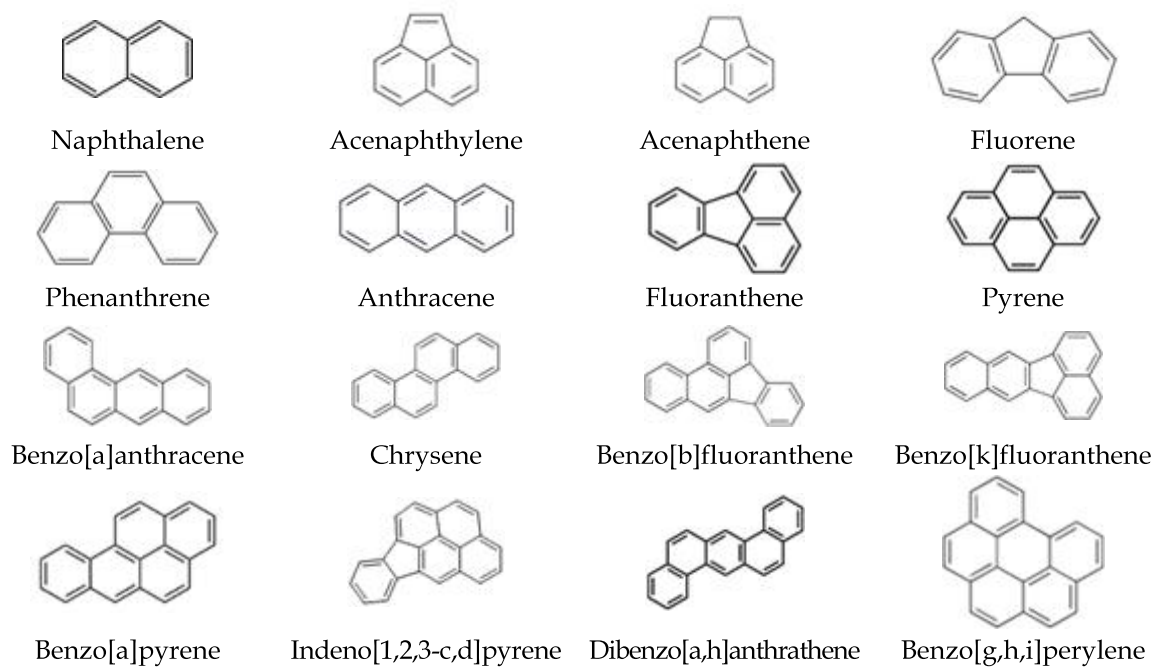


Fig. 5. Chemical structure of 16 US EPA PAHs

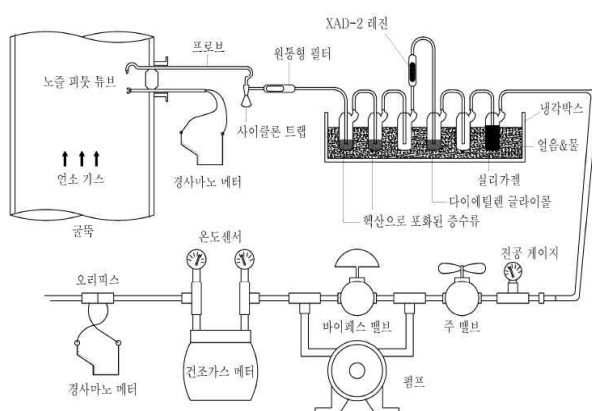


Fig. 6. Flow-chart(Left) and Actual place(Right) of PAHs sampling system from stack

배출가스의 다환방향족탄화수소(PAHs)는 입자상물질과 가스상 물질로 구성되어 있어, 이를 모두 포집하기 위한 시료채취 장치를 구성하여 Fig. 6에 나타내었다. 입자상 물질은 석영재질의 원통형 여과지(Advantec)를 사용하였으며, 시료채취 전에 850 °C에서 2시간 강열시키고, 초음파 세정 및 건조과정을 거쳐 배출가스 중 먼지시료의 채취방법과 동일하게 등속흡입으로 시료를 채취하였다. 가스상 물질은 XAD-2 수지(Amberlite, Supelco), 흡수

액, PUF(Poly Urethane-Foam, Supelco)을 사용하여 시료채취장치를 구성하고 시료를 채취하였다.

2.2.2. 분석방법

채취된 시료 중 원통여지, XAD-2 수지, PUF는 가속추출용매장치(ASE350, Thermo)를 사용하여 헥산(Hexane)과 디클로로메탄(Dichloromethane) 혼합용매(1:1)로 추출하고, 임핀저 흡수액과 임핀저 세척용액은 분액깔대기를 이용하여 헥산 추출 후, 수분을 제거하여 질소농축기로

1 mL까지 농축하였다. 헥산으로 활성화한 실리카겔 컬럼(Sep-Pak, Waters)에 농축액 1 mL와 회수율 평가를 위한 정제용 대체표준물질 5종(d_8 -Naphthalene, d_{10} -Acenaphthene, d_{10} -Phenanthrene, d_{12} -Chrysene, d_{12} -Perylene)을 주입하고 헥산을 흘려 불순물을 일부 제거한 후, 디클로로메탄과 헥산 혼합용매(2:1)를 이용하여 일정한 속도로 용리시킨다. 최종적으로 1 mL까지 농축하여 주사기 첨가용 내부표준물질 2종(d_{10} -Fluorene, d_{10} -Pyrene)을 주입하고 바이알에 옮겨 분석하였다.

분석은 전자충격이온화 원리의 GC/MS(5977B, Agilent)를 이용하였으며, 세부 분석 방법은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 선택이온 검출 모드에서 검출하였으며, 상대검정곡선법으로 정량하였다.

2.2.3 정도관리

분석대상 물질별 대체표준물질 7종(시료채취용, 정제용) 및 주사기첨가용 내부표준물질 적용은 Table 2에, 대체표준물질 7종의 평균 회수율은 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Analytical Condition for PAHs by GC/MS

1) GC operation condition	
Column	DB-5MS UI (30m×0.25mm ID×0.25μm)
Oven Temp.	40 °C/min 10 °C/min 5 °C/min 40 °C(1min) → 120 °C(2 min) → 250 °C(5 min) → 310 °C
Injection Method	Split(10:1) - Injection Volume 1 μL
Injector Temp.	280 °C
Carrier Gas	He, 1 mL/min
Transfer line Temp	280 °C
2) Mass spectrometric condition	
Ionization Mode Source	EI Positive ion (32 eV ~ 36 eV)
Ionization Source Temp.	250 °C
Quad. Mass Temp.	150 °C

Table 2. Surrogate Standards and Internal Standards for PAHs

Target(PAHs 16)	Laboratory Surrogate STD	Field Surrogate STD	Internal STD
Naphthalene	d8-Naphthalene	d10-Fluoranthene	d10-Fluorene
Acenaphthylene	d10-Acenaphthene		
Acenaphthene			
Fluorene			
Phenanthrene	d10-Phenanthrene		
Anthracene			
Fluoranthene			
Pyrene	d12-Chrysene	d12-Benzo(a)pyrene	d10-Pyrene
Benz(a)anthracene			
Chrysene			
Benzo(b)fluoranthene			
Benzo(k)fluoranthene	d12-Perylene		
Benzo(a)pyrene			
Indeno(1,2,3-cd)pyrene			
Dibenz(a,h)anthracene			
Benzo(g,h,i)pervlene			

Table 3. Recovery Ratio of Laboratory and Field Surrogate Standards

		Recovery Ratio(%)	
		QAQC	Average of Samples
Laboratory Surrogate STD	d ₈ -Naphthalene	73.1	59.3
	d ₁₀ -Acenaphthene	89.5	84.2
	d ₁₀ -Phenanthrene	84.9	97.2
	d ₁₂ -Chrysene	92.3	98.6
	d ₁₂ -Perylene	109.7	125.5
Field Surrogate STD	d ₁₀ -Fluoranthene	82.4	88.5
	d ₁₂ -Benzo(a)pyrene	93.8	78.3

III. 결과 및 토의

3.1. 다환방향족탄화수소(PAHs) 배출농도 경향

인천광역시 내 아스콘 제조 사업장의 2018년부터 2021년까지 조사한 PAHs의 평균 농도 및 항목별 농도를 Table 4 ~ Table 5에 나타내었다. 기간별 시료채취 및 분석횟수는 2018년 4건, 2019년 6건, 2020년 5건, 2021년 8건으로 13개 사업장 중 2회 시료채취 사업장을 포함하여 총 23건의 검사를 진행하였지만, 2021년 진행한 1건의 시료채취 및 분석결과가 기존 22건과는 일반화하기 어려운 결과를 나타내 데이터 산출에서 제외하고 총 22건을 사용하였다.

인천광역시 아스콘 제조 사업장의 PAHs 농도는 평균 197.685 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 으로, 최소 7.371 ~ 최대 654.923 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 의 범위로 조사되었고 이는, 사업장의 생산규모, 생산 공정 등으로 차이가 나는 것으로 판단된다. 모든 아스콘 제조 사업장에서 PAHs의 설치허가 대상 특정 대기유해물질 배출시설의 적용기준 (10 ng/Sm^3)을 초과하여 변경신고 절차를 통해 정상적인 운영을 위한 허가가 완료되었다.

한편, 2020년 1월 1일부터 시행된 배출허용기준 신설 항목인 벤조(a)피렌(기준 0.05 mg/Sm^3)의 경우, 평균 0.048 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 으로 조사되었고, 최소 불검출 ~ 최대 0.213 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 나타났다. 모든 사업장이 배출허용기준을 만족했으며 최대농도 기준으로 배출허용기준 대비 0.43 % 수준이었다.

아스콘 제조 사업장이 위치해 있는 지점을 기준으로 각각 검단산업단지(GD), 서구(SE), 미추홀구(MC), 중구(JU)로 나뉜 전체 PAHs 중 개별 물질의 비율을 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과 나프탈렌, 아세나프틸렌, 아세나프텐과 같이 벤젠 고리가 2개로 이루어져 있는 물질이 평균 약 92 %, 플로렌, 페난트렌, 안트라센, 플로란센과 같은 벤젠고리 3개로 이루어져 있는 물질이 평균 약 6 %의 비율로 구성되어 벤젠고리 3개 이하의 물질이 아스콘 제조 사업장의 PAHs 농도 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 벤젠고리 4개 이상의 물질들은 평균적으로 약 1 %로 구성되어 있어 저분자량 물질들에 비해 상대적으로 적은 양으로 측정되었다.

Table 4. Concentration of PAHs in 2018 ~ 2019(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$, A~M : Ascon Plants, 1st and 2nd : The number of analysis)

	2018				2019					
	A-1st	B-1 st	C-1 st	D-1 st	E-1 st	F-1 st	G	H-1 st	I-1 st	J-1 st
Nap	94.895	154.900	207.760	175.618	103.382	72.115	34.762	520.085	95.572	646.570
Acy	0.218	0.110	0.737	1.038	0.191	0.096	0.257	0.594	1.386	0.214
Ace	1.085	0.240	1.745	0.342	0.239	0.262	0.615	0.563	0.655	0.343
Flu	1.386	0.412	2.492	0.641	1.388	0.634	1.189	1.037	1.130	1.082
Phe	6.418	2.962	7.258	3.025	4.649	2.615	4.465	2.410	3.213	3.280
Anthr	0.409	0.074	0.602	0.204	0.406	0.232	0.501	0.449	0.313	0.586
Flt	0.828	0.647	1.101	0.797	0.782	0.951	0.759	0.558	0.302	0.955
Pyr	1.225	1.730	1.135	1.705	1.060	1.176	1.789	0.542	2.318	0.955
BaA	0.061	0.000	0.000	0.000	0.125	0.097	0.242	0.031	0.161	0.185
Chry	0.066	0.084	0.053	0.013	0.197	0.127	0.221	0.063	0.256	0.166
BbF	0.039	0.025	0.043	0.014	0.103	0.088	0.032	0.000	0.000	0.149
BkF	0.026	0.013	0.048	0.009	0.139	0.196	0.073	0.000	0.000	0.000
BaP	0.031	0.026	0.069	0.005	0.111	0.097	0.041	0.003	0.005	0.041
Ind	0.034	0.017	0.044	0.013	0.164	0.157	0.017	0.000	0.000	0.140
DBahA	0.033	0.014	0.059	0.018	0.192	0.118	0.013	0.000	0.000	0.124
BghiP	0.040	0.023	0.049	0.020	0.189	0.159	0.052	0.025	0.021	0.134
PAHs	106.793	161.278	223.196	183.461	113.316	79.119	45.028	526.360	105.334	654.923

※ Naphthalene(Nap), Acenaphthylene(Acy), Acenaphthene(Ace), Fluorene(Flu), Phenanthrene(Phe), Anthracene(Anthr), Fluoranthene(Flt), Pyrene(Pyr), Benz(a)anthracene(BaA), Chrysene(Chry), Benzo(b)fluoranthene(BbF), Benzo(K)fluoranthene(BkF), Benzo(a)pyrene(BaP), Indeno(1,2,3-cd)pyrene(Ind), Dibenz(a,h)anthracene(DBahA), Benzo(g,h,i)perylene(BghiP)

Table 5. Concentration of PAHs in 2020 ~ 2021(unit : $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, A~M : Ascon Plants, 1st and 2nd : The number of analysis)

	2020					2021						
	K	L	A-2 nd	M	E-2 nd	I-2 nd	D-2 nd	J-2 nd	B-2 nd	C-2 nd	H-2 nd	F-2 nd
Nap	445.0320	79.3951	10.7719	4.1384	4.9793	37.669	125.831	18.692	75.764	213.107	250.974	372.958
Acy	67.7113	19.4698	0.9945	1.9677	0.0354	0.118	5.704	0.080	0.000	2.691	10.111	131.458
Ace	10.3578	4.3000	0.2340	0.0718	0.0524	0.428	1.106	0.103	0.637	0.771	1.766	9.360
Flu	6.4333	11.7273	0.8549	0.2674	0.3042	1.050	3.233	0.451	2.038	1.479	3.708	17.483
Phe	15.0538	27.5387	2.6102	0.5693	1.4999	4.611	14.161	1.566	4.818	3.874	4.723	33.545
Anthr	7.3672	6.3450	0.6058	0.1990	0.2393	1.072	1.590	1.414	2.482	6.447	6.006	8.005
Flt	2.4947	1.9408	0.4137	0.0450	0.0756	0.079	0.593	0.086	0.237	0.400	0.116	2.571
Pyr	2.9777	6.3069	0.1866	0.0472	0.0744	0.171	0.670	0.130	0.215	0.299	0.135	2.848
BaA	0.0203	1.8782	0.0214	0.0194	0.0064	0.013	0.015	0.008	0.021	0.023	0.011	0.143
Chry	0.0724	2.9827	0.0984	0.0120	0.0184	0.012	0.052	0.079	0.105	0.036	0.007	0.245
BbF	5.1410	0.2140	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.014	0.002	0.023
BkF	0.0729	0.3797	0.0000	0.0707	0.0574	0.000	0.000	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000
BaP	0.0933	0.2127	0.0527	0.0320	0.0110	0.024	0.056	0.031	0.029	0.070	0.000	0.008
Ind	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0150	0.006	0.014	0.005	0.023	0.064	0.006	0.028
DBahA	0.0000	0.0000	0.0422	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.028	0.045	0.002	0.009
BghiP	0.0000	0.0684	0.0066	0.0000	0.0019	0.002	0.007	0.004	0.005	0.013	0.005	0.037
PAHs	562.828	162.759	16.893	7.440	7.371	45.255	153.032	22.648	86.414	229.338	277.572	578.722

※ Naphthalene(Nap), Acenaphthylene(Acy), Acenaphthene(Ace), Fluorene(Flu), Phenanthrene(Phe), Anthracene(Anthr), Fluoranthene(Flt), Pyrene(Pyr), Benz(a)anthracene(BaA), Chrysene(Chry), Benzo(b)fluoranthene(BbF), Benzo(K)fluoranthene(BkF), Benzo(a)pyrene(BaP), Indeno(1,2,3-cd)pyrene(Ind), Dibenz(a,h)anthracene(DBahA), Benzo(g,h,i)perylene(BghiP)

한편, 이러한 저분자량 화합물 중에서 가장 큰 비율을 차지하고 있는 물질은 나프탈렌으로 평균적으로 약 85 %이상 차지하고 있었다. 나프탈렌은 석탄이나 석유에서 정제되어 생산되며, 사람에게도 독성을 띠는데 적혈구 감소, 용혈성 빈혈 발생 등의 건강에 대한 악영향과 사람에게 발암성을 나타낼 가능성이 있는 물질로 알려져 있다(IARC 2008).

다환방향족탄화수소(PAHs)는 탄소 수소의 비율과, 벤젠고리의 형태에 따라 안정성이 나타나며, 각 물질 종류에 따라 열역학적인 안정성이 달라 불완전연소를 야기하여 화학 중간체로 생성되기도 한다(NIER, 2010). 또한 PAHs 분포 특성은 벤젠고리가 3개 이하인 물질의 경우 대부분 90 %이상이 가스상에 존재하는 것으로 알려져 있고, 벤젠 고리가 4개 이상의 물질은 분자량이 증가할수록 입자상 농도의 비율이 높은 것으로 알려져 있다(박찬구 et al., 2004). 이에 따라 아스콘 제조 사업장의 경우 배출구에서 대부분이 저분자 물질로 이루어진 가스상 성분으로 구성된 특징을 가지며, 벤젠고리가 3개 이하인 물질이 배출의 대부분을 차지하기 때문에 이와 관련한 물질들의 관리 대책이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

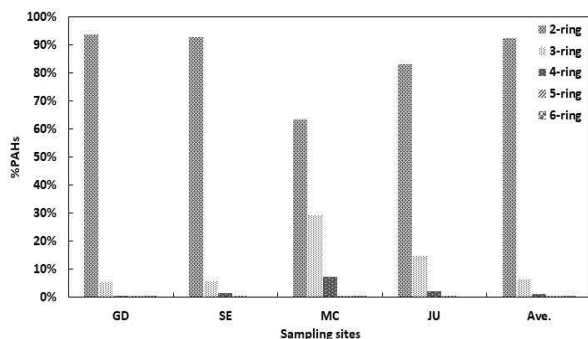


Fig. 7. Ratio of PAHs concentration in the six types of Ascon plants by number of rings
* GD(Geomdan industry complex), SE(Seo-gu), MC(Michuhol-gu), JU(Jung-gu)

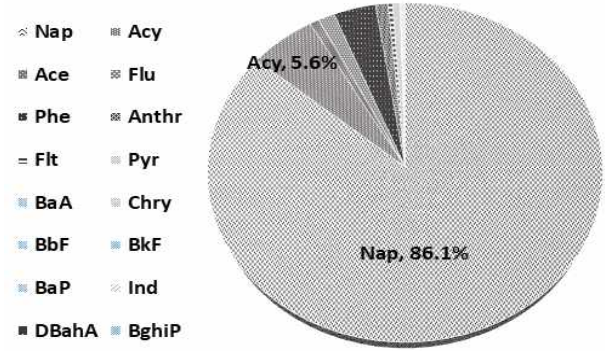


Fig. 8. Composition of PAHs at Ascon plant

미국 EPA에서는 PAHs 16종 중 Group 2에 속해있는 7개의 개별 물질이 사람에게 발암작용을 일으킬 수 있다고 정의하였는데, 각각의 물질은 benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3-cd)pyren and dibenzo(a,h)anthracene이며(EPA 2000, EPA 1996), 이들 물질은 벤젠고리 4 ~ 5개로 구성되어 있는 것이 특징이다. 이를 바탕으로 발암성이 있는 7종류의 PAHs 합 농도를 살펴보면, 최소 0.028 ~ 최대 5.667 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 나타났다. 이는 조사된 PAHs의 최소 0.01 ~ 최대 3.48 %의 비율로, 아스콘 사업장에서 배출되는 PAHs는 7종의 발암가능성이 있는 물질은 다른 물질들에 비해 상대적으로 적은 양이 배출되는 것으로 조사되었다.

3.2. 다환방향족탄화수소(PAHs) 배출계수

실측된 농도 자료를 바탕으로 아스콘 제조 사업장의 PAHs 배출정도를 정확하게 파악하기 위해 아스콘 제조 생산량당 배출되는 배출계수를 산출하였다. PAHs 배출계수 산출에 대한 정확한 정의가 있지 않아 Hall et al.(2012)의 배출계수 산출식을 참고하였다.

$$EF = \frac{C \times Q}{m} \times 10^3$$

여기서,

EF = 다환방향족탄화수소 배출계수(ng/ton)

C = 다환방향족탄화수소 농도(μg/Sm³)

Q = 건조배출가스유량(Sm³/hr)

m = 아스콘제품생산량(ton/hr) 이다.

PAHs 농도와 건조배출가스 유량은 실측된 자료를 바탕으로 하였고, 아스콘 제품 생산량은 시료채취 동안 생산된 생산량을 바탕으로 적용하였다. 그 결과 PAHs의 배출계수는 최소 16.682 ~ 최대 3427.431 ng/ton으로 평균 795.627 ng/ton 이었으며, 배출허용기준 항목인 벤조(a)피렌의 경우 평균 0.192 ng/ton으로 계산되었다(Table 7, 8).

또한, 배출계수 역시 배출농도 경향과 마찬가지로 저분자량 화합물이 대부분의 비율을 차지하여 배출되는 경향이 나타났으며, 전체 평균 배출계수 기준으로 봤을 때 나프탈렌, 아세나프틸렌, 페난트렌, 플로렌, 안트라센, 아세나프텐 순으로 많이 배출되었다.

타 연구에서 고형연료 사용시설 중 RPF(Refuse Plastic Fuel), SRF(Solid Refuse Fuel), BIO-SRF(Biomass-SRF)의 배출구의 PAHs 배출계수 조사 내용을 바탕으로 이번 연구에서 진행한 배출계수의 값을 비교해보았다(Table 8). PAHs의 배출계수를 비교해보면 아스콘 제조사업장의 배출계수는 타 연구에서 조사된 배출계수에 비해 미미한 것으로 나타났다. 이전 연구에서 수행한 고형연료사용 시설의 배출계수도 RPF 시설과 SRF 시설의 배출계수가 차이가 3 ~ 9배로 나타났는데 이는 연료분류체계, 연료형태의 단순화, 운영가동 등 여러 조

건에 의해 차이가 나는 것으로 조사됐다. 또한 고형연료 사용시설에서는 연료사용량을 기준으로, 이번 연구에서는 아스콘 생산량을 기준으로 배출계수를 산정하였기에 이 또한 차이를 나타내는 요인으로 판단된다. 따라서, 시설별 배출계수의 직접적인 비교를 위해 배출계수 산정 가이드라인을 일반화하여 연구할 필요가 있다.

Table 8. Comparison of emission factor with other factories

	Emission Factors					unit : μG/ton
	unit : g/ton					This study
Nap	2.248	5.672	15.932	-	-	0.689
Acy	0.068	0.011	0.009	-	-	0.041
Ace	0.051	0.024	0.011	-	-	0.006
Flu	0.073	0.060	0.021	-	-	0.011
Phe	0.245	0.095	0.050	-	-	0.028
Antr	0.010	0.006	0.003	-	-	0.008
Flt	0.019	0.017	0.028	-	-	0.003
Pyr	0.012	0.007	0.006	-	-	0.006
BaA	0.001	0.001	0.002	-	-	0.001
Chry	0	0.002	0.006	-	-	0.001
BbF	0.019	0.002	0.007	-	-	0.001
BkF	0	0.001	0.001	-	-	0.000
BaP	6.662	0.001	0.005	-	-	0.000
Ind	0.002	0.001	0.006	-	-	0.000
DBA	0.002	0.001	0.004	-	-	0.000
BghiP	0	0.001	0.004	-	-	0.000
PAHs	9.411	5.899	16.096	1.631	1.852	0.796

Table 6. Emission factor of PAHs in 2018 ~ 2019(unit : ng/ton, A~M : Ascon Plants, 1st and 2nd : The number of analysis)

	2018						2019			
	A-1 st	B-1 st	C-1 st	D-1 st	E-1 st	F-1 st	G	H-1 st	I-1 st	J-1 st
Nap	481.401	682.952	480.698	755.332	352.374	259.171	120.409	2015.328	834.233	3383.715
Acy	1.105	0.484	1.705	4.464	0.651	0.344	0.891	2.301	12.100	1.119
Ace	5.503	1.059	4.039	1.472	0.815	0.940	2.132	2.182	5.720	1.796
Flu	7.033	1.817	5.766	2.756	4.730	2.277	4.120	4.018	9.864	5.665
Phe	32.559	13.060	16.792	13.009	15.847	9.399	15.465	9.340	28.050	17.165
Anthr	2.076	0.328	1.394	0.875	1.384	0.833	1.737	1.741	2.734	3.066
Flt	4.201	2.854	2.548	3.430	2.664	3.417	2.629	2.162	2.637	4.996
Pyr	6.214	7.627	2.626	7.331	3.613	4.226	6.198	2.100	20.235	5.000
BaA	0.310	0.000	0.000	0.000	0.427	0.349	0.837	0.120	1.406	0.967
Chry	0.336	0.372	0.123	0.056	0.671	0.455	0.765	0.245	2.236	0.871
BbF	0.195	0.112	0.099	0.059	0.352	0.316	0.110	0.000	0.000	0.779
BkF	0.130	0.059	0.112	0.039	0.473	0.706	0.254	0.000	0.000	0.000
BaP	0.158	0.113	0.159	0.020	0.377	0.349	0.141	0.012	0.044	0.214
Ind	0.172	0.074	0.102	0.058	0.558	0.565	0.059	0.000	0.000	0.731
DBahA	0.167	0.061	0.136	0.077	0.655	0.423	0.043	0.000	0.000	0.647
BghiP	0.201	0.102	0.113	0.088	0.643	0.570	0.181	0.096	0.186	0.701
PAHs	541.762	711.075	516.411	789.065	386.233	284.341	155.968	2039.645	919.444	3427.431

※ Naphthalene(Nap), Acenaphthylene(Acy), Acenaphthene(Ace), Fluorene(Flu), Phenanthrene(Phe), Anthracene(Anthr), Fluoranthene(Flt), Pyrene(Pyr), Benz(a)anthracene(BaA), Chrysene(Chry), Benzo(b)fluoranthene(BbF), Benzo(K)fluoranthene(BkF), Benzo(a)pyrene(BaP), Indeno(1,2,3-cd)pyrene(Ind), Dibenz(a,h)anthracene(DBahA), Benzo(g,h,i)perylene(BghiP)

Table 7. Emission factor of PAHs in 2020 ~ 2021(unit : ng/ton, A~M : Ascon Plants, 1st and 2nd : The number of analysis)

	2020					2021						
	K	L	A-2 nd	M	E-2 nd	I-2 nd	D-2 nd	J-2 nd	B-2 nd	C-2 nd	H-2 nd	F-2 nd
Nap	2162.399	449.799	30.321	16.950	11.270	109.766	485.777	84.098	99.890	579.651	719.181	1046.058
Acy	329.008	110.303	2.799	8.059	0.080	0.345	22.021	0.361	0.000	7.320	28.974	368.708
Ace	50.328	24.361	0.659	0.294	0.119	1.248	4.272	0.462	0.840	2.097	5.062	26.253
Flu	31.259	66.439	2.406	1.095	0.688	3.059	12.480	2.028	2.687	4.024	10.627	49.035
Phe	73.146	156.016	7.347	2.332	3.395	13.438	54.671	7.047	6.352	10.538	13.533	94.086
Anthr	35.797	35.946	1.705	0.815	0.542	3.123	6.137	6.360	3.272	17.537	17.209	22.453
Flt	12.122	10.996	1.165	0.184	0.171	0.229	2.289	0.385	0.313	1.087	0.332	7.210
Pyr	14.469	35.731	0.525	0.193	0.168	0.499	2.586	0.583	0.283	0.812	0.388	7.989
BaA	0.098	10.641	0.060	0.079	0.014	0.037	0.056	0.037	0.028	0.064	0.030	0.402
Chry	0.352	16.898	0.277	0.049	0.042	0.034	0.202	0.355	0.139	0.099	0.021	0.687
BbF	24.980	1.213	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.038	0.006	0.066
BkF	0.354	2.151	0.000	0.289	0.130	0.000	0.000	0.000	0.004	0.014	0.000	0.000
BaP	0.453	1.205	0.148	0.131	0.025	0.069	0.215	0.139	0.038	0.189	0.000	0.024
Ind	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.019	0.054	0.024	0.031	0.174	0.016	0.078
DBahA	0.000	0.000	0.119	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.122	0.005	0.026
BghiP	0.000	0.388	0.019	0.000	0.004	0.006	0.028	0.016	0.007	0.034	0.013	0.103
PAHs	2734.765	922.086	47.550	30.472	16.682	131.873	590.788	101.896	113.931	623.801	795.397	1623.177

※ Naphthalene(Nap), Acenaphthylene(Acy), Acenaphthene(Ace), Fluorene(Flu), Phenanthrene(Phe), Anthracene(Anthr), Fluoranthene(Flt), Pyrene(Pyr), Benz(a)anthracene(BaA), Chrysene(Chry), Benzo(b)fluoranthene(BbF), Benzo(K)fluoranthene(BkF), Benzo(a)pyrene(BaP), Indeno(1,2,3-cd)pyrene(Ind), Dibenz(a,h)anthracene(DBahA), Benzo(g,h,i)perylene(BghiP)

3.3. 악취강도 및 총탄화수소 농도경향

3.3.1 악취강도 경향

아스콘 제조 사업장의 악취경향을 살펴보기 위해 악취오염도 검사를 실시하였다. 배출허용기준이 적용되는 배출구 및 부지경계 뿐 아니라 아스콘 적재 및 이송 시 비산으로 인

해 영향을 받을 가능성이 있는 출하시설도 함께 조사하였다(Fig. 9). 모든 자료는 2021년 점검한 내용을 바탕으로 사용하였으며 악취공정 시험기준 ES 09301.b(공기회석관능법)을 사용하여 시료채취 후 분석하였다.



Fig. 9. Sampling on the Border(Left) and Shipment facility(Right)

아스콘 제품 생산과정 중 사용되는 골재에 따라 일반골재와 재생골재로 나뉘는데 생산과정 중 재생골재가 일부 포함된 공정은 재생골재사용 공정, 그 외에는 일반골재사용 공정으로 나누었다. 아스콘 사업장 악취오염도는 악취방지법 시행규칙 별표3의 복합악취의 엄격한 배출허용기준(회석배수)의 규정(500배)을 적용하였다.

아스콘 제조 사업장의 배출구 악취오염도 검사는 총 24건 수행했으며(Table 9), 이 중 부적합 결과는 8건으로 약 33 %의 비율로 나타났다. 전체 24건 중 일반골재 사용 9건, 재생골재 사용 15건 이었으며, 일반골재 사용 3건, 재생골재 사용 5건에서 부적합이었고, 부적합 악취강도는 최소 농도값 1,000배, 최대 농도값 3,000배로 조사되었다. 골재사용에 따른 부적합 결과가 비슷한 양상으로 나타나 아

스콘 제조 시 골재 종류와 복합악취 농도의 상관성이 적은 것으로 판단된다. 또한 악취방지법 시행규칙 별표3에 배출허용기준이 있는 부지경계의 경우, 모두 3배의 복합악취 농도가 나타나 모두 기준 이내로 나타났다.

배출허용기준이 적용되지 않는 출하시설의 경우 최소 100배, 최대 300배로 복합악취 농도가 나타났다. 일부 사업장에서는 악취 및 오염물질 비산을 막기 위한 에어커튼 및 밀폐형 시설이 설치되어 있지만(Fig. 10), 관련 규정이 없어 대부분의 아스콘 제조 사업장에서는 출하시설 오염물질 관리를 위한 시설이 없는 것이 현실이다.

출하시설의 복합악취 농도 조사결과를 바탕으로 출하시설 관리를 위한 관련기준 마련 및 오염물질의 비산정도를 줄일 수 있는 시설 설치를 유도하는 것이 필요하다고 판단된다.



Fig. 10. Ascon plant Shipment facility with preventive facilities

Table 9. Complex odor on the Ascon plant (unit : dilution value)

Sample ID	Samples	standards value	dilution value	Results	Shipment facility	Border	Types of Aggregates
A	1	500	300	appropriate	-	-	Recycled
	2		144	appropriate	-	-	Recycled
	3		100	appropriate	-	-	General
	4		100	appropriate	208	3	Recycled
B	1		100	appropriate	-	-	Recycled
	2		100	appropriate	-	-	Recycled
	3		300	appropriate	144	3	Recycled
C	1		100	appropriate	-	-	General
	2		448	appropriate	100	3	Recycled
D	1		3000	inappropriate	-	-	General
	2		3000	inappropriate	300	3	Recycled
E	1		1442	inappropriate	-	-	Recycled
	2		1442	inappropriate	-	-	General
F	1		1000	inappropriate	-	-	Recycled
	2		448	appropriate	-	-	Recycled
	3		1442	inappropriate	100	3	Recycled
G	1		100	appropriate	-	-	General
H	1		100	appropriate	-	-	General
	2		1000	inappropriate	-	-	General
	3		100	appropriate	144	3	General
I	1		1000	inappropriate	-	-	Recycled
J	1		100	appropriate	-	-	General
	2		144	appropriate	208	3	Recycled
K	1		100	appropriate	100	3	Recycled

3.3.2 총탄화수소(Total Hydrocarbons; THC) 농도 경향

악취와도 밀접한 관련이 있는 총탄화수소(THC)는 휘발성유기화합물 중 하나이며, 미세먼지의 원인이 되거나 도시지역의 오존농도를 증가시키는데 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Yang et al., 2016). 따라서 관련 원인들을 파악하고자 아스콘 제조 사업장 7개 업체

의 THC 농도를 측정하였다. THC는 대기오염 공정시험기준 ES 01507.1c(배출가스 중 총탄화수소-불꽃이온화검출기법)로 측정하였으며, 사용한 장비는 polaris-FID이다. THC 농도와 더불어 질소산화물, 황산화물, 다환방향족탄화수소(PAHs) 농도, 아스콘 재생골재 사용비율을 함께 조사하여 나타내었다(Table 10).

Table 10. Result of measured and investigated values from Ascon plants

	I	D	J	B	C	H	F
PAHs($\mu\text{g}/\text{Sm}^3$)	45.255	153.032	22.648	86.414	229.338	277.572	578.722
THC(ppm)	104.3	423.9	41.6	22.3	34.2	156.4	496.0
NOx(ppm)	15.0	14.0	2.0	6.0	10.0	10.0	19.0
SO ₂ (ppm)	N.D.	37.0	N.D	N.D	N.D	22.0	78.0
percentage of recycled aggregates(%)	30.0	100.0	0.0	43.5	37.5	30.0	100.0
Type of Fuels	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG

2021년도 실시한 7건의 조사결과를 보면 B사에서 22.3 ppm으로 최소값을, F사에서 496.0 ppm으로 최대값을 나타냈고, 평균 182.7 ppm으로 조사되었다. 아스콘 제조 사업장의 배출시설은 건조시설 등으로 구성되어 있으며 THC 배출허용기준 200 ppm 이하의 값이 적용된다. 배출구 검사 당일 측정된 값을 토대로 기준치를 초과한 사업장은 활성탄 교체 등 시설개선 유도를 진행하였다.

THC 농도 값이 400 ppm 이상으로 높게 측정된 사업장은 재생골재사용 비율이 100 %로 나타났다. 하지만 재생골재사용 비율이 43.5 %로 두 번째로 높았던 B사의 경우 THC의 농도가 가장 낮은 22.3 ppm으로 조사된 반면에 재생골재를 사용하지 않은 J사의 경우 41.6 ppm의

THC 농도값이 나타났고, 재생골재사용 비율이 30 %인 I사 및 H사의 경우 THC 농도가 각각 104.3 ppm, 156.4 ppm으로 측정되어 재생골재사용 비율과 총탄화수소농도 사이의 연관성을 찾을 수 없었다.

이는, 다양한 원인이 있을 것으로 판단되지만, 본 연구에서는 배출시설 및 방지시설 구성의 차이로 인한 것이라고 판단된다. J사와 B사는 계량/혼합시설 등인 반면, 그 외의 사업장은 건조시설을 포함한 배출시설로 구성되어 있었다. J, B, H사의 방지시설에는 흡착에 의한시설이 포함되어 있지만, 그 외 업체는 포함되어 있지 않았다. 이를 바탕으로 계량/혼합시설의 배출시설과 흡착에 의한시설이 포함된 J사, B사의 총탄화수소의 농도가 상대적

으로 낮은 것으로 조사되었지만, 측정횟수 및 비교대상이 한정적이기에 일반화하기는 어렵다고 판단된다. 정확한 비교를 위해 재생골재 사용비율, 배출시설 및 방지시설의 구성, 작업 시간 등 다양한 조건을 통일하여 조사할 필요성이 있다.

3.3 유해성 평가

이번 연구에서 아스콘 제조 사업장의 PAHs의 독성 정도를 평가하기 위해 벤조(a)피렌을 기준으로 하여 각 개별 화합물의 상대 독성등가계수(TEFs : toxic equivalency factors)를 이용하여 독성등가농도(TEQs : Toxic Equivalent)로 환산하였으며, 이용한 식은 다음과 같다.

$$TEQ = PAH_i \times TEF_i$$

여기서,

TEQ = 독성등가농도

PAH_i = 개별 PAHs 농도

TEF_i = 상대독성등가계수

다환방향족탄화수소의 TEFs는 EPA와 Nisbet 등에 의해 보고되었으며(Nisbet et al., 1992, Nguyen et al., 2019), 그 상세한 값과 결과를 Table 11에 제시하였다. 아스콘 제조 사업장의 전체 평균농도를 TEQ로 환산한 결과는 0.346 µg/Sm³로 나타났다. 타 연구에서 고형 연료 사용시설의 PAHs의 유해성 평가 결과를 보면 SRF 사용시설과 BIO-SRF 사용시설에서 각각 27.00, 31.52 µg/Sm³로 나타났고, 생활폐기물 소각시설에서 122.65 µg/Sm³로 조사되었는데(허선화 등, 2017), 기존 연구에 비해 아스콘 제조 사업장의 경우 약 0.3 ~ 1.3 %의 낮은 수치의 유해성 결과를 보였다.

Table 11. Analysis result of TEQs

µg/Sm ³	TEFs	TEQs
Nap	0.001	0.170
Acy	0.001	0.011
Ace	0.001	0.002
Flu	0.001	0.003
Phe	0.001	0.007
Anthr	0.01	0.021
Flt	0.001	0.001
Pyr	0.001	0.001
BaA	0.1	0.014
Chry	0.01	0.002
BbF	0.1	0.027
BkF	0.1	0.005
BaP	1	0.048
Ind	0.1	0.003
DBahA	1	0.032
BghiP	0.01	0.000
PAHs		0.346

3.4 모델링 평가

이번 연구에서 조사된 아스콘 제조 사업장의 PAHs의 성분들이 주변지역에 미치는 정도를 알아보기 위해 기상자료를 이용한 모델링을 사용해 대기확산정도를 평가해보았다.

대기확산정도를 평가하기 위해 대기확산모델인 Calpuff 모델을 사용하였고, 관련 기상자료는 시료채취 지점에서 가장 가까이 위치한 인천광역시보건환경연구원에서 운영하는 측정망 자료와 인천기상대(112)자료를 이용하였다.

사용된 기상자료는 풍향(도), 풍속(m/s), 기온(°C), 습도(%), 기압(hPa), 일사량(W/m²), 안정도, 혼합고(m)이며, 점오염원인 아스콘 제조 사업장의 굴뚝 내경(m), 배기가스 속도(m/s), 배출가스 온도(°C), 굴뚝 높이(m)의 인자도 사용하였다. 모델링은 실제 시료채취가 이뤄진 시점부터 최대 48 시간으로 설정하였고, 아스콘 제조 사업장을 중심으로 반경 10 km 범위를 영역으로 설정하여 진행하였다.

Fig. 11 및 Fig. 12에 아스콘 제조 사업장별 대기확산모델링 결과를 나타냈으며, 크게 각 개별 구와 산업단지지역으로 나누었다. 수행결과는 기상조건에 따라 다양하게 표시되었으며, 그 날의 기상 상황에 따라 배출되는 방향, 범위가 상이하게 나타났다.

중구의 경우 시료채취 당시 인천공항 방향, 서구의 경우 산업단지 주변, 검단산단 역시 산

업단지 주변 혹은 남쪽으로 영향을 미쳤으나, 기상 상태에 따라 PAHs 16종이 주거지역(모든 지도 오른쪽 지역)에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 PAHs 뿐만 아니라 기타 오염물질 배출 관리를 위해 대기오염물질 배출시설의 주기적인 점검으로 적정 배출을 유도해야 할 것으로 판단된다.

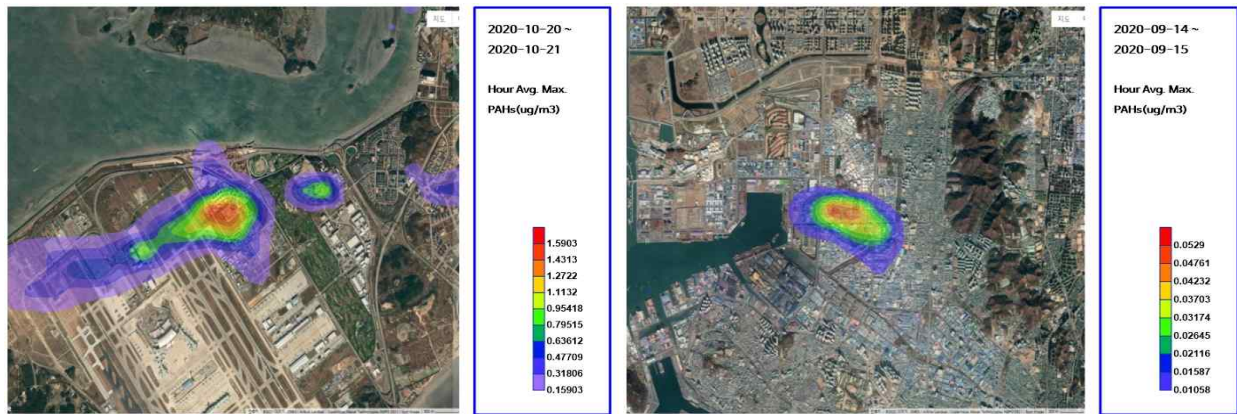


Fig. 11. Model results in Jung-gu(Left) and Seo-gu(Right)

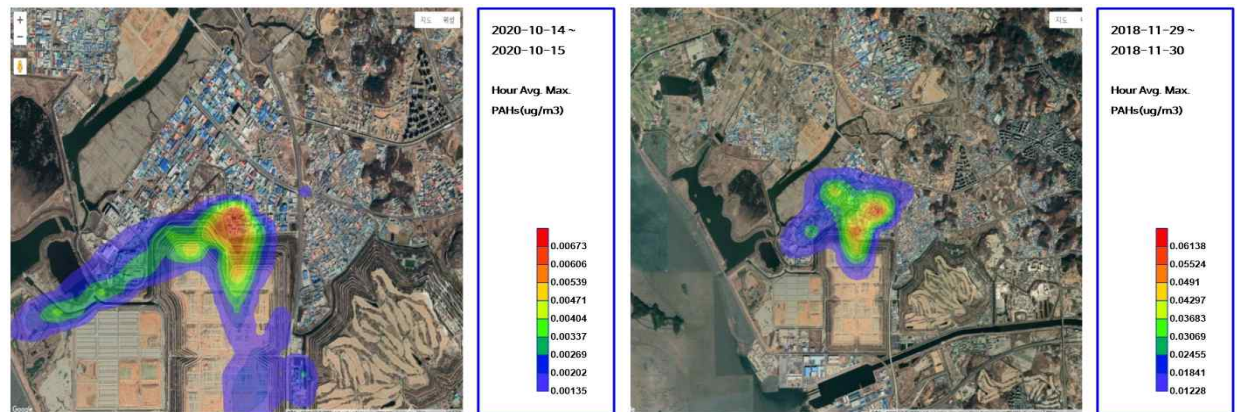


Fig. 12. Model results in Geomdan industry complex

IV. 결 론

본 연구는 아스콘 제조 사업장에서 발생하는 다환방향족탄화수소(PAHs)의 배출허용기준 준수 여부와, 배출시설의 운영 및 적절성 조사 및 모델링 분석을 통해 연구 및 정책을 위한 기초자료 생성을 하고자 하였다.

1. 아스콘 제조 사업장의 PAHs 농도는 16종 합 평균 $197.685 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 으로 나타났으며, 배출허용기준 항목인 벤조(a)피렌(기준 $0.05 \text{ mg}/\text{Sm}^3$)의 경우 모두 기준 이내로, 최대값($0.213 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$)기준 배출허용기준 대비 0.43 % 수준으로 측정되었다. 현재 벤조(a)피렌 배출허용기준이 모든 배출시설에 동일하게 적용되어 있는데, 업종별 배출실태에 맞는 시설별 세분화된 배출허용기준 산정을 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
2. 벤젠고리 3개 이하의 물질이 아스콘 제조 사업장에서 배출되는 PAHs 물질의 98 % 이상을 차지하고 있으며, 이 중 가장 높은 농도로 배출되는 항목은 나프탈렌이다. 규제를 위한 관련 기준은 없지만 발암 가능성이 있는 물질로 관리를 위한 대책마련이 필요하다.
3. 배출농도를 기반으로 아스콘 제조 생산량 당 PAHs 배출계수는 최소 16.682 ~ 최대 3427.431 ng/ton으로 평균 795.627 ng/ton으로 도출되었으며, 벤조(a)피렌의 경우 평균 0.192 ng/ton으로 나타났다. 타 연구에서 진행한 고탄연료 사용시설의 PAHs 배출계수에 비해 미미한 양이 배출되지만,

배출계수를 위한 가이드라인 제정과 함께 많은 연구가 이루어져야 정확한 비교가 될 것으로 판단된다.

4. 2021년에 조사한 아스콘 제조 사업장 배출구에서의 복합악취는 약 33 % 비율로 부적합이 나타났고, 최소 1,000배, 최대 3,000배의 농도값을 보였다. 이와 함께 사업장 부지경계에서는 3배, 출하시설의 경우 최소 100배, 최대 300배로 농도가 나타났다. 배출구 외의 출하시설에서 조사한 악취도 적지 않은 농도로 나타나 비산정도를 막아주는 시설의 설치를 유도하는 것이 필요하며, 아스콘 적재를 기다리고 이송하는 대형 화물차 또한 관리대책 마련이 필요하다.
5. THC 농도의 경우 일부 사업장에서 배출허용기준 이상으로 나타나 시설개선 유도를 하였으며, 적은 측정횟수로 인해 아스콘 생산에 따른 골재사용과 총탄화수소농도의 값의 연관성을 찾기는 어려웠다.
6. 아스콘 사업장의 유해성 평가 결과 고탄연료시설, 생활폐기물 소각시설 대비 0.3 ~ 1.3 %의 낮은 수치의 결과가 나타났지만, 다양한 사업장과의 비교를 통해 유해성 평가 결과를 도출해야 할 것으로 판단된다.
7. 모델링 수행 결과 배출구에서 발생한 PAHs가 기상상황에 따라 인근 지역에 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 나타났다. PAHs 외에 배출되는 오염물질 배출관리를 위해 대기오염물질 배출시설의 주기적인 점검이 필요하다.

V. 참고문헌

1. Bolden, A.L., et al., (2017) yccyclic aromatic hydrocarbons and female reproductive health: A scoping review. *Reprod Toxicol*, 73: p. 61-74.
2. Danielle Hall, Chang-Yu Wu*, Yu-Mei Hsu, James Stormer, Guenter Engling, Krisha Capeto, Jun Wang, Scott Brown, Hsing-Wang Li, Kuei-Min Yu. (2012) PAHs, carbonyls, VOCs and PM2.5 emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane, *Atmospheric Environment*, 55, 164-172
3. Duong Thanh Nguyen, Phuong Duc Luu, Tien Duy Doan, Yen Hai Dao, Giang Truong Le. (2019) Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contamination in Three Tea Samples Collected in Two Different Areas of Vietnam, *Journal of Food and Nutrition Research*, Vol. 7, No. 1, 51-64
4. Heo S. H., Lim S. Y., Kang D. I., Kim D. G., Jeon K. J., Jang K. W. (2017) Emission Characteristics and Hazard Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs) from Solid Fuel Facilities, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 33, No. 4, 333-341
5. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2002) Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Some Traditional Herbal Medicines, Some Mycotoxins, Naphthalene and Styrene, Vol. 82(p. 367). ISBN 9789283212829. Retrieved December 25, 2008.
6. Jung J.H., Phee Y.G., Cho S.W., Ok G., Shon B.H., Lee K., Lim H.S. (2011) Concentration Levels and Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at Ambient Air in Industrial Complex Area, *CLEAN TECHNOLOGY*, 17(4), 379-388.
7. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency. (1997) Exposure Factors Handbook, Final Report.
8. National Insutitute of Environmental Research, (2010), A Study of Emission Characteristics of Air pollutants from Facilities using Reclaiming Fuel.
9. Nisbet, I.C. and P.K. LaGoy. (1992) Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regul Toxicol Pharmacol*, 16(3): p. 290-300
10. Park C. K., Yun J. S., Kim M. Y., Sohn J. R., Mo S. Y. (2004) PAHs Source Fingerprints for Municipal Incinerator, Motor Vehicle Fuels and Industrial Boilers Emission, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 20, No.3 pp. 331-343
11. Pincemaille, J., Schummer C., Heinen E., Moris G. (2014) Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in

- smoked and non-smoked black teas and tea infusions. Food Chem, 145: p. 807-13
12. United States Environmental Protection Agency. (1996) National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Aluminum Reduction Plants
 13. United States Environmental Protection Agency. (2000) Technical Support Document: Control of Emissions of Hazardous Air Pollutants from Motor Vehicles and Motor Vehicle Fuels
 14. Wilcke, W. (2000) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil-A review. J. Plant. Nutr. Soil Sci. 163, 229 - 248.
 15. Yang S. B., Yu M. S., Woo K. B. (2016) A Case Study on the Measurement Volatile Organic Compounds and Total Hydrocarbon Concentration in Block Paint-Shops at a Shipyard, Journal of Environmental Science International, 25(8), 1177-1189