

주물공장의 Furan 공정에서 발생하는 휘발성 유기 화합물 및 분진의 동시제거 시스템 개발 및 현장설치 연구

박진수 · 정재학[†] · 이태진

영남대학교 디스플레이화학공학부
712-749 경북 경산시 대동 214-1
(2005년 11월 24일 접수, 2006년 1월 13일 채택)

Development and Field Installation of a System of Simultaneously Removing Dust and Volatile Organic Compounds from Furan Process in Foundry

Jin Soo Park, Jae Hak Jung[†] and Tae-Jin Lee

School of Chemical Engineering and Technology, Yeungnam University, 214-1, Daedong Gyeongsan, Gyeongbuk 712-749, Korea
(Received 24 November 2005; accepted 12 January 2006)

요 약

주물공장에서는 주철을 녹여서 다양한 기계부품을 만든다. 다양한 기계부품을 만들기 위해 목형을 주물사에 넣은 후 주입구를 만들어 녹인 주철을 투입한다. 주물공장은 furan 공정을 포함해 많은 공정으로 이루어지며, 이 중 furan 공정은 목형에 주물사를 부어 넣는 공정이다. Furan 공정의 첫 단계는 주물사가 서로 엉겨 붙어 있게 하기 위해 접착성을 가지는 고분자 물질인 furan류를 주물사에 섞게 되고 녹은 주철이 목형으로 들어가는 것이며 고온에 의해 많은 유해 VOC류가 발생하게 된다. 또 공정조업에서 furan용 모래를 목형이 든 주물형틀에 부어 넣게 되고, 이때도 유독가스와 분진이 발생하게 되며 이 분진은 furan 물질을 포함하고 있어 조업자의 건강에 치명적인 요소가 되며, 이로 인해 조업 기피현상이 심화되어 인력수급에 문제가 되고 나아가 사업 경영에 큰 걸림돌이 되고 있다. 본 연구는 이러한 조업 기피의 원인을 제거하고 쾌적한 조업환경을 제공하기 위해 유해 VOC류와 집진을 동시에 수행할 수 있는 유해 VOC 및 분진 동시제거 시스템을 최적 설계하고 나아가 현장에 적용 설치하였다. 그 결과 설치 후 포름알데히드의 경우 VOC 0 ppm, 분진 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조업환경이 개선되었으며, 조업자들의 조업 기피 요인을 해소하였다. 또한, 우리는 회사의 고용 문제를 해결하고, 작업의 생산성을 향상시킬 수 있었다.

Abstract – A foundry makes various machinery parts made by iron. For manufacturing machinery parts, they usually uses wooden mold with molding sand and pour the molten iron into wooden mold through inlet. A foundry have many processes including Furan process, In Furan process workers prepares a wooden mold in the molding sand. So they fixes wooden mold in sand housing and then they fill the molding sand in the sand housing. Molding sand should be sticky enough to sustain the shape of wooden mold, so several materials are needed to prepare the suitable molding sand. The first step of Furan process is making the molding sand with molding sand and Volatc Organic Compounds (VOC) and the second step of Furan process is pour the molding sand into the wooden molding housing. This two step of process generated noxious VOC and various size of dust. So the process is very dirty and dangerous one. Because of these, Workers frequently shrink out of the plant. The company related with foundry usually faced on the difficult situation for engagement and always have shortage of hiring problem. Through this study, we developed a system which removes toxic VOC and dust simultaneously. We design and construct real system and install it at real plant. Before setting up this system, the working surroundings VOC (for formaldehyde) 15 ppm and Dust(for PM_{10}) 8,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. After setting up this system, working surroundings is improved by VOC (for formaldehyde) 0 ppm, Dust(for PM_{10}) 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the work evasion factor is removed. So we contribute to solve hiring problem of this company and increasing the productivity also.

Key words: Volatc Organic Compounds(VOC), Dust, Removing Technology, Furan

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jhjung@yumail.ac.kr

1. 서 론

국내 주조산업은 기계, 자동차, 선박산업의 기반산업이나 작업환경이 열악하고, 기업 규모가 영세하여 전형적인 3D 업종으로 알려져 인력 수급과 기술개발에 한계점을 안고 있다. 따라서, 주조공정에서 발생하는 분진과 주조공정에서 사용하는 주물사의 첨가제인 유기화합물에서 발생하는 휘발성 유기화합물(VOC, volatile organic compounds 이하 VOC류)을 동시에 제거할 수 있는 설비를 개발함으로써 작업자의 인체에 미치는 유독성을 제거하고 작업조건을 쾌적하게 하여 인력수급에 도움을 주며, 또한 분진 발생량의 빈도가 일정치 않은 공정이 대부분인 주조산업에서 효율적 분진 제거를 위해 분진 발생 정도에 따라 자동적으로 적당한 분진 제거 성능을 갖는 자동제어 시스템의 개발은 중소형 주조산업에는 필수적인 연구라 할 수 있다.

VOC류는 인체에 유독성을 나타내고 광화학 스모그를 발생시키는 매개체로 작용하기 때문에 작업장의 환경과 작업자의 건강에 미치는 영향이 지대하다. 국외에서는 1991년 유럽과 북미국가를 중심으로 VOC류 배출량 삭감을 위한 조약이 체결되어 미국, 일본, EU를 비롯한 여러 국가에서는 VOC류로 인한 오존생성 유발 물질과 유해성 물질의 배출 저감을 위해 여러 VOC류 대상물질을 정하여 본격적으로 규제하여 오고 있다. 국내에서는 지난 1995년 대기환경보전법 개정안에 VOC류 배출시설 및 법적 규제조항이 마련되었으며, 대기환경규제지역의 경우 벤젠, 톨루엔 같은 VOC류 물질을 배출하는 사업장은 배출량 측정 시스템(TMS)을 갖춰야 한다.

분진의 경우 자연환경하에서 태양광선을 차단하고 시야를 흐리게 하여 작업환경을 매우 열악하게 만들어 작업자의 생산성에 큰 영향을 준다. 분진이 다량 호흡기 내로 들어갈 경우 직업병으로 잘 알려진 진폐증을 일으키고, 호흡곤란, 기관지 및 폐 즉 호흡기 관련 질환의 1차적 요인이 되고 있다. 다음에 한국의 대기환경 기준 연도별 변경 사항을 Table 1에, 대기환경 보전법 입자상 물질 배출 허용 기준을 Table 2에 나타내었다. 다음의 Table 1, 2에서 보듯이 분진에 대한 환경 기준치는 점차 까다로워 질 것으로 전망된다[1].

2. VOC 및 분진의 제거 방법 선정

2-1. VOC 제거 방법

VOC류 처리 방법에는 물리적, 화학적, 생물학적 처리방법이 있다. VOC를 처리하기 위해 지금까지는 다른 대기오염물질 및 악취를 방지하기 위해 활용된 기술이 제안될 수 있는데, 이들 중 흡착, 응축 기술이 유망하고 배출 전 안전한 물질의 완전한 분해를 위한 산화반응 기술로는 열소각, 촉매산화, plasma 반응, 막 분리법 등이 제안되고 있다.

기존의 연구결과인 VOC 처리기술의 장단점을 나타낸 Table 3과 처리기술별 특성을 비교한 Table 4에 의하면 흡착, 흡수, 응축이 유력한 VOC 제거 기술이라 예측되었으며 특히 본 연구의 대상공정이 VOC 농도가 약 10 mg/m³ 정도의 오염 정도를 보이고 있는데, 이 농도에서 활성탄 단독 사용보다는 다중 흡착제 사용의 흡착법이 매우 유용한 것으로 나타났다. Fig. 1에는 습식 scrubber와 화학 산화법이 좀 더 경제적이나 습식 scrubber는 폐수를 유발시키고 또다시 폐수를 처리해 주어야 하는 부담이 생기며, 화학 산화법은 중소기업에 설치하기에는 초기투자가 크며, 또한 지속적 사용을 위한 유지관리 기술이 어려워 적합하지 않은 것으로 판명되었다[2-8].

2-2. 분진 제거 방법

분진 제거를 위하여 채택될 수 있는 기계적 작용에는 중력, 원심력, 관성충돌, 직접차단, 확산, 정전기 효과 등이 있는데, 중력침전법은 중력을 이용하여 침전실에서 입자의 크기가 50 μm 이상이거나 침전속도가 7.5 m/sec 이상인 큰 입자를 제거하기 위하여 이용된다.

원심분리기는 고체 혹은 액체상태의 분진을 가스로부터 분리시키기 위하여 가스를 회전시킬 때 발생하는 원심력을 이용하는 가스정화기로서 더러운 가스가 하향으로 나선운동을 함에 따라 입자는 둘레부분의 벽 쪽으로 이동한 다음 점차 바닥에 침전하게 된다. 정화된 가스는 하향의 나선운동을 끝마치고 상향 나선운동을 하게 되며, 마지막으로 중앙의 관을 통하여 흘러나간다.

Table 1. Modification of ambient air standard by year <Dust generated by a foundry>

(unit: μm/m³)

	~1993. 12. 31	1994.1.1~2000.8.1	2000. 8. 1~	Measurement
TSP	Yearly average: 150 μg/m ³	150 μg/m ³	Deletion	β ray absorption
	Daily average: 300 μg/m ³	300 μg/m ³	Deletion	β ray absorption
PM 10	Yearly average: 150 μg/m ³	80 μg/m ³	70 μg/m ³	β ray absorption
	Daily average: 300 μg/m ³	150 μg/m ³	150 μg/m ³	β ray absorption

TSP: Total Suspended Particle, PM₁₀: Dust below diameter 10 μm

Table 2. An Emission standard of particle according to Environmental laws

Facility	Standard	Permissible standard(mg/m ³)	
		(~1998.12.31)	(1999. 1. 1~)
Facility using liquid fuel	More than 6000 m ³ /h	150	100
	Less than 6000 m ³ /h	200	150
Facility using solid fuel	More than 6000 m ³ /h	150	50
	Less than 6000 m ³ /h	200	100
Facility dealing with a metal	Arc furnace, Induction furnace	20	20
	Melting furnace, Cupola	50	50
	Sintering furnace	70	70
	Heating furnace	100	100

Table 3. The Merits and defaults of a treatment technology for VOC

	Strength	Weakness
Heat Incinerator	- Widespread Technology	- The maximum VOC concentration of catalyst incineration is under 10,000 ppm
Catalyst Incinerator	- Able to use the existing boiler or Incinerator	- Decreasing efficiency in case of changing the concentration of VOC
Flame phlogiston	- Complete destruction of VOC	- Require the second equipment in case of generating by-products
	- Suitable for treating a mixing VOC	- Unsuitable for treating a material including sulfur of nitrogen
Adsorption	- Simple operation	- Generate the secondary pollutant
	- Able to treat a mixing VOC	- Increasing cost in high concentration
	- Able to recollect VOC	- Increasing a supply of absorbent In the use of an aplastic absorbent
Absorption	- Low-priced installation and treatment	- After design an absorption tower, unable to change a composition of VOC
	- The effective method in case of selecting the suitable solvent	- Increasing cost because of an chemical addictive
		- Impossible to treat for heterogeneous VOC
Condensation	- There is no by-product excepting Liquid VOC	- re-boiling VOC to prevent freezing in the condenser
	- Simple operation	- Unable to use under 3,000 ppm
	- There is no restrictions as to the feasible range of VOC	- Unable to use under saturation concentration in a condensing point
Biological Treatment	- The most effective method of treating VOC under 20 ppm	- Decreasing tradability in the influx of an excess VOC
	- Small size	- Lack of a accumulated data
	- Low-priced installation and treatment	

Table 4. Comparison of a treatment technology for VOC

Permitted limit (unit: scfm)	Treatable VOC
Thermal oxidation without heat recovery (1-20,000)	Thermal oxidation: Aliphatic HC, Aromatic HC, Halogen HC, Alcohols, etc. Ketones, etc
Thermal oxidation with heat recovery (20,000-1,000,000)	
Catalytic oxidation (1-1,000,000)	Catalytic oxidation: Aliphatic HC, Aromatic HC, Alcohols , etc., Ketones, etc
Adsorption (200-1,000,000)	Adsorption: Aliphatic HC, Aromatic HC, Halogen HC, Alcohols, etc. Ketones, etc
Absorption (1,000-1,000,000)	Absorption: Alcohols, etc. Ketones, etc
Condensation (1-2,000)	Condensation : Aliphatic HC, Aromatic HC, Alcohols, etc. Ketones, etc
Bio-filtration (1-1,000,000)	Bio-filtration : Aliphatic HC, Aromatic HC, Alcohols, etc. Ketones, etc
Membrane Technology (1-150)	Membrane : Aliphatic HC, Aromatic HC, Halogen HC Alcohols, etc., Ketones, etc.
UV oxidation (2,000-250,000)	UV oxidation : Aliphatic HC, Aromatic HC, Halogen HC , Alcohols, etc., Ketones, etc

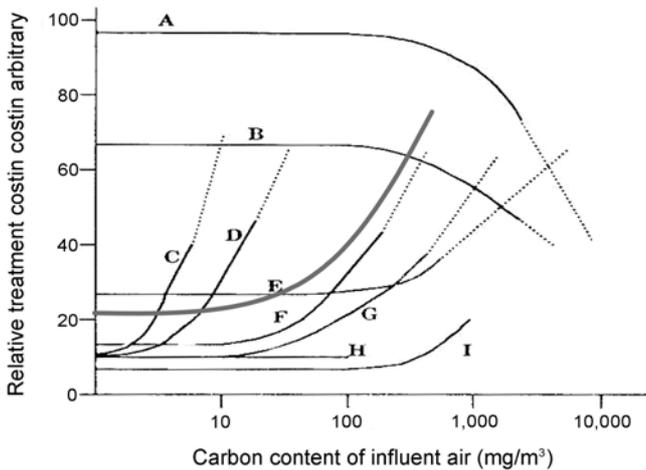


Fig. 1. Concentration comparison by unit price A) Heat Incineration, B) Catalyst Incineration, C) Activated Carbon-no regeneration, D) Activated Carbon-regeneration, E) Multiple Absorbent, F) Wet Scrubber, G) Chemical Oxidation, H) Biological Precipitator, I) Bio-filter

세정법의 경우 분진이나 가스를 접촉에 의해서 0.2~10 μm 크기의 작은 입자를 직접 액체방울에 흡수시켜 제거하는 것으로 접촉은 관성충돌이나 중력침전일 수도 있다.

세정기의 장점은 분진과 가스를 동시에 제거할 수 있고, 작은 입

자의 제거효율이 높으며, 한번 제거된 입자가 다시 배기가스로 흘러들어가는 일이 없다는 것이다. 그러나 습도가 높은 연기의 부력은 약하기 때문에 연기의 상승이 중요성을 갖는 경우에 세정기는 부적당하다. 또한, 분진제거에 사용된 더러운 액체를 처리하는 것도 어려울 뿐만 아니라 수질오염을 일으킬 수도 있다.

여과는 분진제거방법으로서 가장 오래된 것이고 현재도 널리 이용되고 있다. 여과에서는 가스가 여과막의 공극을 통과할 때 입자를 붙잡아 두는 작용이 일어난다. 여과에 의한 제진은 직접차단, 관성충돌, 확산, 정전기인력 그리고 중력침전에 의해서 일어난다고 가정되고 있다. 1 μm 이상의 큰 입자는 직접차단, 충돌, 중력 등의 작용에 의해서 제거되나 0.001~5 μm 정도의 입자는 확산과 정전기적 인력에 의해서 제거된다. 각 작용에 의해서 제거되는 분진의 양은 현재로서는 계산할 수 없는 실정이다.

정전집진기는 고압방전 코로나에 의해서 carrier gas를 통상 (-)로 이온화 시키면 이온들은 먼지입자에 부착하여 입자를 이온화시킨다. 이온화된 입자는 접지된 집전판 혹은 집진극으로 끌려서 제거된다. 집진극에 축적된 분진은 보통 진동이나 타력에 의해서 집진극으로부터 제거된다.

앞에서 살펴본 분진처리기술을 바탕으로 한 산업현장에서 널리 사용되는 분진 제거 설비는 여러 가지가 있으나 현장의 여건 및 경제적인 측면에서 여과 집진기가 가장 적합한 것으로 조사되었다. 여과 집진기는 분진 흐름을 필터로 걸러 분진을 포집하는 유형으로 백 필터를 통과시키는 경우가 가장 많다. 이 유형이 가장 널리 사용

Table 5. The properties of dust collector

	Equipment	Mechanism	Shape	Separable Size(μm)	ΔP(Pa)	Max Temp.(°C)
Surface Dust collector	Gravity sedimentor	Gravity	Plane	>20	150>	1,000
	Centrifugal sedimentor	Centrifugal force	Cylindrical plane	>10	2,000>	1,000
	Electric precipitator	Electrostatic force	Plane/Cylindrical plane	>0.02	300>	1,000
	Crash dust collector	Inertial force	Plane	>1.0	500>	1,000
Target Dust collector	Membrane filter	Inertia/Diffusion/Blocking	Fiber/Particle	>0.1~0.01	3,000>	250
	Bag house	Direct Blocking	Fiber	>0.01	2,000>	250
	Ceramic filter	Direct Blocking	Particle	>0.01	10,000>	1000
	Cleaning dust collector	Inertia/Diffusion/Blocking	Waterdrop	>0.	20,000>	-

되고 있으나 유속, 백 필터의 제질, 백 필터의 분진제거 방법 및 빈도 등 조업조건에 따라 연구를 수행할 필요가 있었다. 또한, 집진 용량 계산과 아울러 집진기 종류 및 형식별 성능을 나타내는 자료를 Table 5에 나타내었다[9-14].

3. 현장실태조사

A사의 경우 주물사 작업 공장 내에서의 분진의 양이 많아 작업장 내의 시야가 매우 흐렸으며 휘발성 유기화합물로 인한 냄새로 마스크가 없이는 작업장 내에 진입하기가 곤란하였다. A사의 주물사 토출 flow mixer 공정은 분진뿐만 아니라 furan계의 화합물 질냄새와 고온 작업으로 인한 대기휘발 고농도 VOC의 영향으로 마스크 없이는 조업이 불가능하였고, 또 정상조업을 하더라도 두통, 두드러기, 기관지염, 안구질환 등의 원인을 제공하고 있음을 알 수 있었다.

3-1. 현장 환경 조사 및 분석

3-1-1. 분진량 측정 실험 및 분석

분진량 측정은 PM₁₀과 TSP로 나누어 10 μm 이하의 미세먼지 분진량과 총 분진량을 각각 파악하였다. 10~20회에 걸친 실험을 통해 최대 오염정도를 얻어내었고 개발장비 설계는 최대 오염치에 준하여 설계하였다. 분진량의 실험을 위해 휴대용 미세먼지 측정기를 사용하였으며, 현장 실험 분진 측정 순서는 다음과 같다.

- ① 휴대용 미세먼지 측정기용 필터를 데시케이터에서 충분히 건조시킨다.
- ② 측정 직전 데시케이터에서 필터를 꺼내어 전자저울로 무게를 측정 후 휴대용 미세먼지 측정기에 장착한다.
- ③ TSP와 PM₁₀ 각각 20분씩 측정 후 전자저울에서 무게를 측정한다.

작업장 내의 분진 농도는 다음 (1)식과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{작업장 내의 분진 농도}[\text{mg}/\text{m}^3] &= (\text{포집 먼지량}/\text{기체부피}) \\ &= (\text{포집량}/(\text{유량} \times \text{시간})) \end{aligned} \quad (1)$$

현장 측정 결과 PM₁₀과 TSP가 각각 최대 8,000 μg/m³, 22,000 μg/m³이 도출되었다. 분진발생량은 장소마다 작업시간마다 다르게 나타남이 분진측정결과 확인되고 있다. 분진발생량은 TSP로 2,000 μg/m³에서 125,000 μg/m³으로 크게 변동되고 있다. 이러한 변동치는 작업장소 특히 작업시간 중 또는 전후에 따라서 크게 차이가 있다. 또한, PM₁₀ 측정치도 500 μg/m³에서 101,000 μg/m³으로 변동되고 있음을

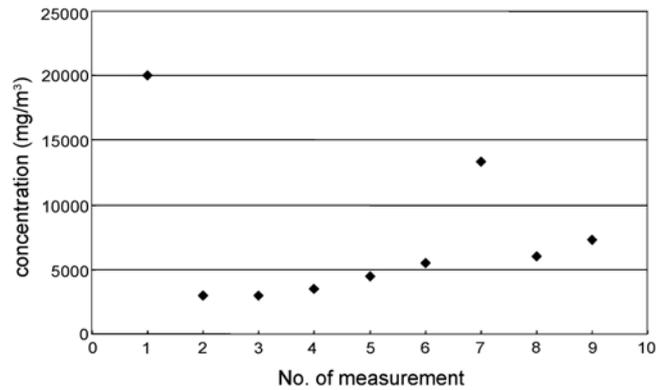


Fig. 2. The result of TSP measurement in company A. Max: 22,000 μg/m³, min: 30,000 μg/m³

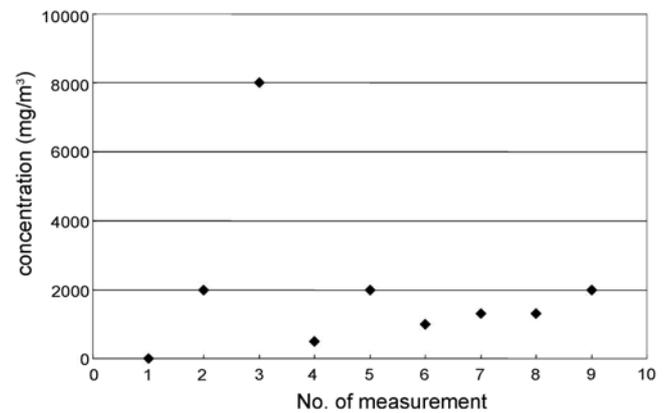


Fig. 3. The result of PM₁₀ measurement. Max: 8,000 μg/m³, Min: 800 μg/m³

확인하였다.

A사의 경우 최대 분진량은 PM₁₀은 8,000 μg/m³, TSP는 22,000 μg/m³이었으며, TSP와 PM₁₀의 측정결과를 Fig 2와 Fig. 3에 각각 나타내었으며 또한 분진들의 모양과 크기를 알아보기 위해 300배율의 전자 현미경 사진을 찍었고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

3-1-2. VOC 측정 실험 및 분석

많은 종류의 유해가스 VOC군을 target으로 우선 사용된 경화제 및 유기용제의 성분을 바탕으로 주요 오염요인을 선별하는 현장 실험 및 분석 작업을 수행하였다. 본 실험을 조업현장에서 air sampler를 이용하여 조업현장의 대기를 채취하고 채취한 시료는 신속히 실험실로 이송하여 FID가 장착된 GC를 이용하여 분석하였다.

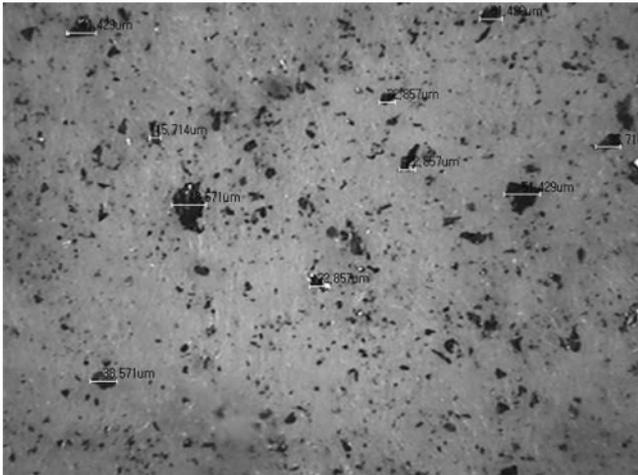


Fig. 4. The result of TSP analysis in company A (Size: 0.001 µm~ 54.429 µm).

Fig. 5는 일반 생활공간의 대기 중 공기를 GC로 분석한 결과이며, Fig. 6은 A사의 작업 중 현장 공기를 GC로 분석한 결과이고, Fig. 7은 시약으로 구입한 포름알데히드를 0.35%로 희석하여 GC로 분석한 결과이며, Fig. 8은 시약으로 구입한 에틸알코올을 10%로 희석하여 GC로 분석한 결과이다.

분석결과 Fig. 5에서는 나타나지 않았던 peak가 Fig. 6에 나타났다. 이것이 냄새를 유발하는 물질이라고 판단되고 이 물질의 성분과 양을 정밀 분석하는 실험을 수행하였다. 분석결과 retention time 1.004초에 나타난 peak는 포름알데히드 류인 것으로 판단되고, 1.416초에 생긴 peak는 알코올류라고 판단되었다.

분석한 결과 작업 중인 현장에는 포름알데히드류는 약 15 ppm, 알코올류는 약 87 ppm이 발생되고 있다.

4. 유해 VOC류 및 분진 동시제거 시스템의 최적 설계

주물사 토출 공정은 분진뿐만 아니라 VOC를 다량 유발시켜 밀

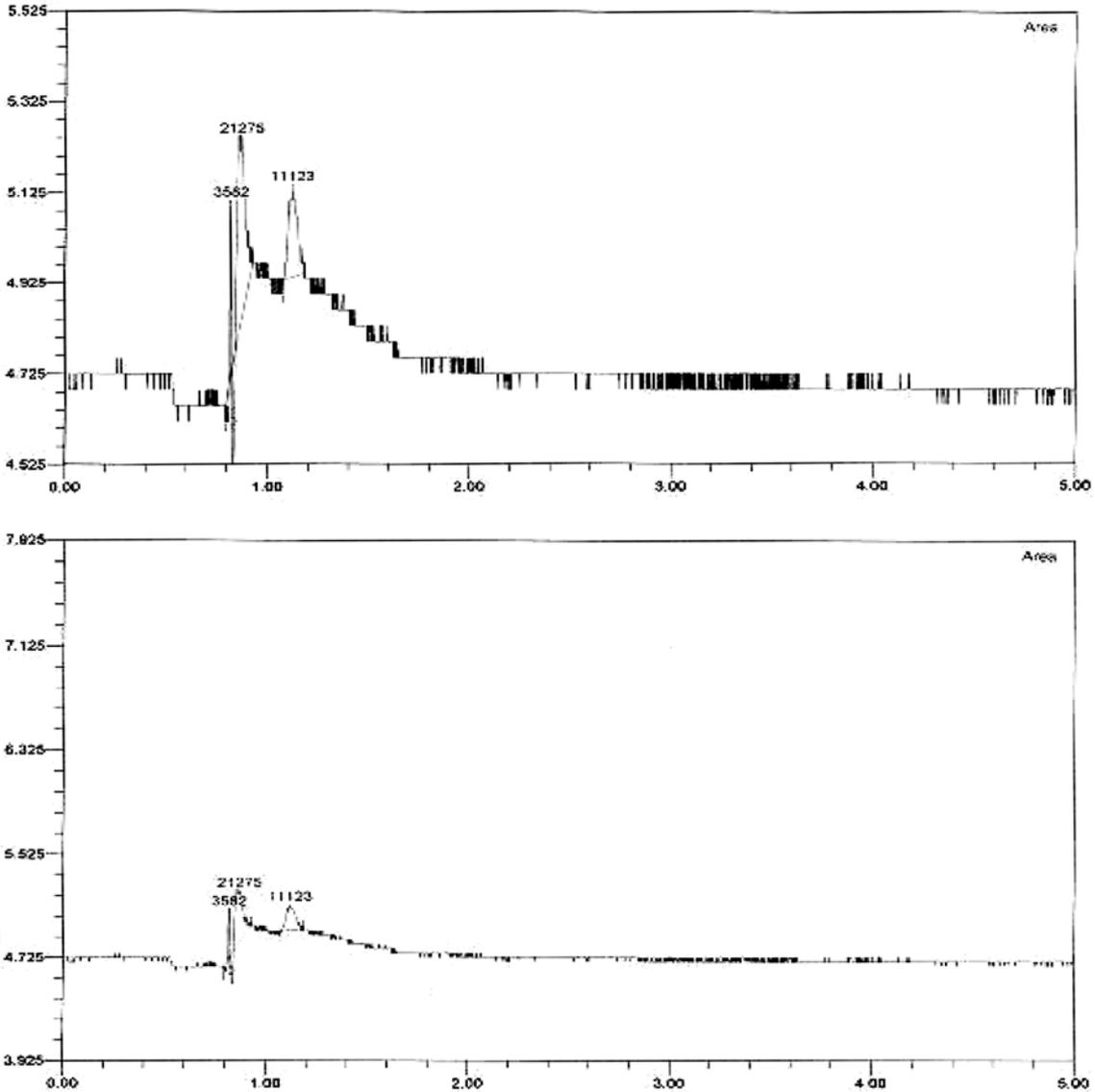


Fig. 5. The result of GC analysis for air.

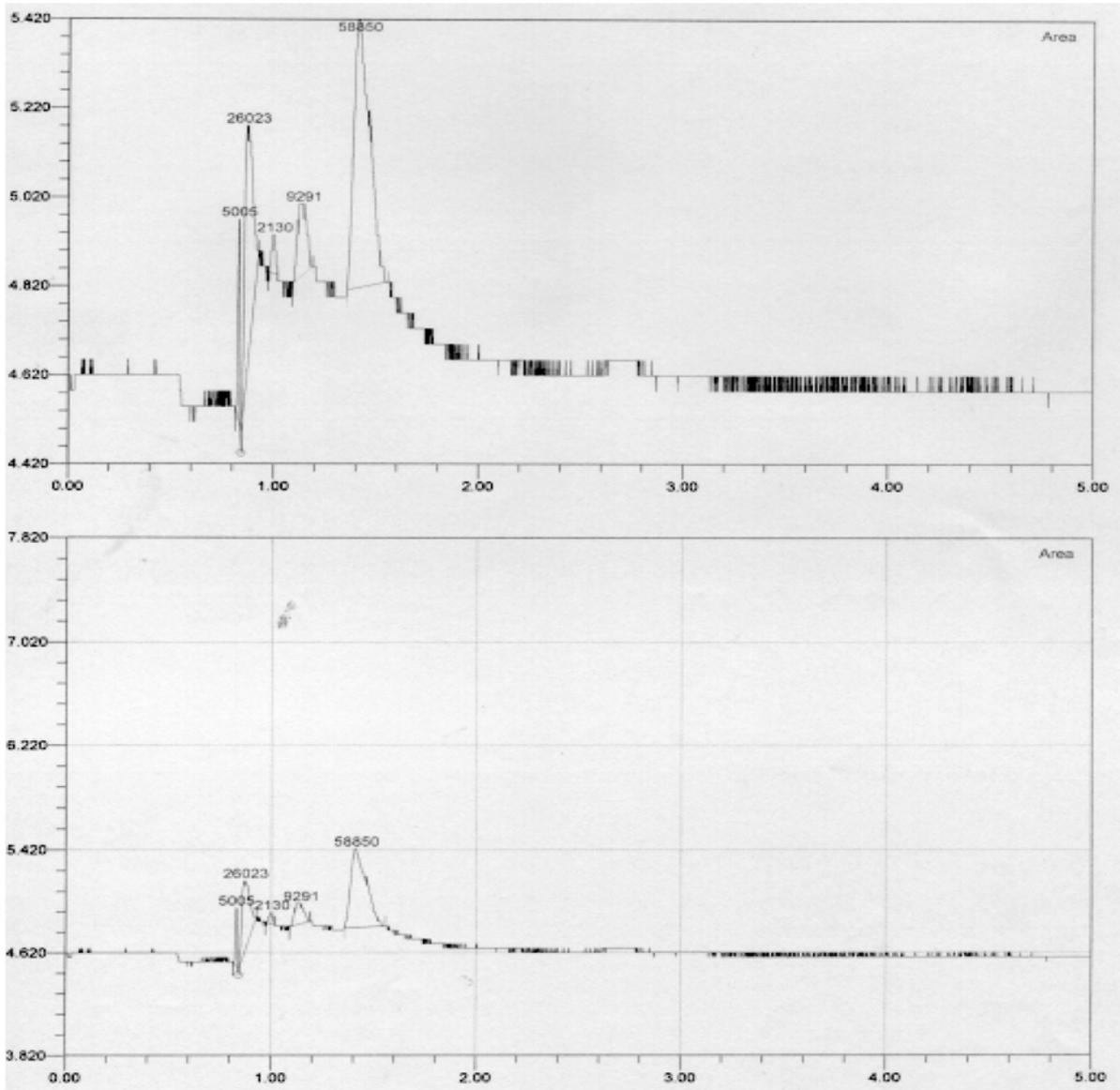


Fig. 6. The result of GC analysis for working surroundings.

폐된 작업장 전체의 대기환경에 매우 큰 악영향을 끼치고 있다. 또한, 주물사에 furan계 화학약품을 섞어 flow mixer로 주물사를 토출하면서 분진과 동시에 VOC를 대기 중으로 방출하고 또 작업 시 고온으로 인한 VOC가 동시에 발생하므로 초기에는 Fig. 9와 같이 flow mixer 토출 공정만을 밀폐시킬 수 있는 천막이나 자바라 형태의 닫힌 공간을 만들면서 상부로 움직일 수 있는 duct 시스템을 설치하여 작업장으로 퍼져 나가기 전에 집진과 VOC를 동시에 포집하는 시스템을 설치하고, 포집된 VOC와 분진은 적당한 기술적 처리 방법에 의해 설계된 분진 및 VOC 처리 시스템으로 처리할 수 있도록 설비를 개발하고자 하는 것이었다. 그러나 이 방법은 조업자들의 조업을 방해할 수 있고 또 관리적 측면에서도 난점이 많음을 지적받았다. 따라서 정확한 흡인량 계산에 의한 후드 밖으로의 분진 및 VOC 배출을 차단 하고자 하였다.

대부분의 분진과 VOC가 작업장 밖으로 빠져나가기 전에 차단하면서 조업에는 지장을 초래하지 않는 형태의 주물사 토출부의 새로

운 후드 설계를 수행하였으며 이러한 형태의 후드에 의한 집진 설비는 상업적으로 또는 연구차원에서 개발된 것이 없어 우선 본 논문의 독창성을 나타내는 첫 번째 설계라 할 수 있다. 새로운 후드 시스템의 설계와 그 치수를 Fig. 10에 나타내었다.

다음에 유해 VOC류 및 분진 동시제거 시스템의 최적 설계를 위한 용량 분석의 내용을 나타내었다. 분진의 PM₁₀과 TSP 실험 결과와 중소기업의 산업 환경 및 유지관리 보수 투자 등을 고려해 볼 때 분진은 역시 기존의 집진 방식 중 bag filter 방식이 가장 적합한 것으로 드러났다. 직포여과 집진기는 가동비용이 적게 들고 설치투자비용도 적게 들지만 그 성능은 매우 우수한 것으로 나타났다[10, 15, 16].

A사의 flow mixer 공정을 위한 집진 여과포 설계 기준은 아래와 같다.

- Type: pulse jet, 기계식, 공기역류식
- 여과속도(A/C ratio): 2~5 m/min
- ΔPa: 5~8 cm H₂O, ΔPm: 10~15 cm H₂O(20~80 cm H₂O 가능)

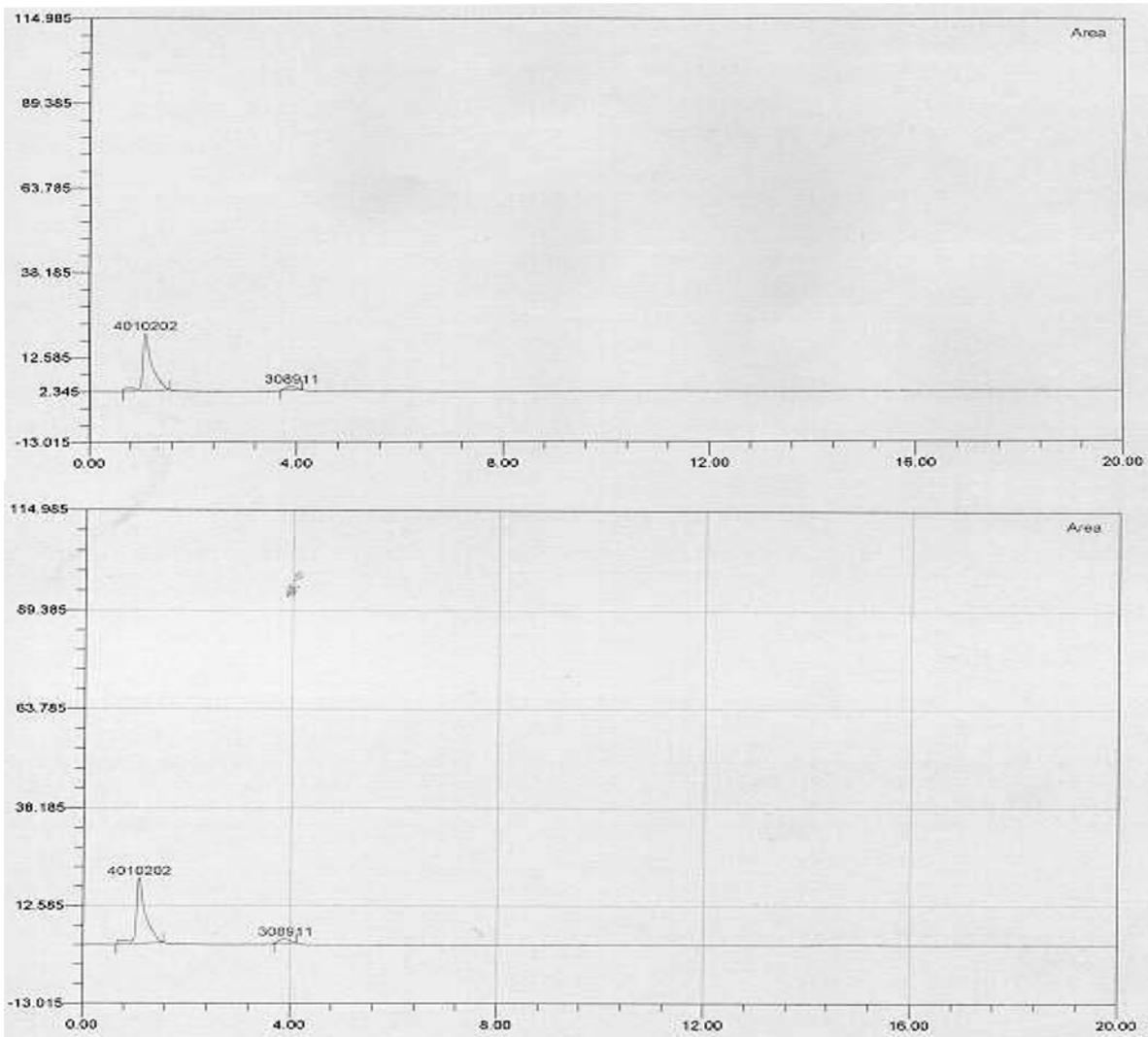


Fig. 7. The result of GC analysis for formaldehyde.

- Duct 유속: 10 m/s
- 포 housing 유속: 60 m/min 이하 유지
- 여과포: Ø100~Ø300, L3000~L10000
- 여과포 재질: 먼, 폴리에스테르 등
- 여과포 코팅: 고어택스 등 hard coating
- Stack 높이: Duct Ø × 3~8배

집진 용량 설계는 다음과 같이 수행되었다.

- 집진기의 blower 용량: 200 m³/min
- 분진 포집 속도: 20 mg/m³ × 200 m³/min
= 4,000 mg/min = 240 g/hr = 5.7 kg/day(MAX)
- ∴ 약 6 Kg/day 용량 여과포 가능 길이(현장조사): 2~4 m

- 집진포 직경(trial & error): 0.15 m → 8 × 10개
- 0.15 × 3.14 × 80개 = 113.04 m²

하루 처리분진 용량의 집진포 포집면적은 다음과 같이 계산되었다.

- 집진여과포 housing 면적(현장조사 설치가능 넓이):
2 m × 2.5 m = 5 m²

- 여과포 가능 길이(현장조사): 2~4 m
- 집진포 직경(trial & error): 0.15 m → 8 × 10개
0.15 × 3.14 × 80개 = 113.04 m²

여과 속도는 trial & error에 의해 다음과 같이 계산되었다.

- 풍량: 200 m³/min
- Dust size: (duct 유속: 10 m/s 이상 기준)
■ Size: 0.25 × (0.55 m)² × π = 0.24 m²
■ 유속: $\frac{200 \text{ m}^3 / \text{min}}{0.24 \text{ m}^2} = 14 \text{ m/sec}$

- 포 housing 크기(포 housing 유속: 60 m/min 이하 기준)

$$\frac{200 \text{ m}^3}{5.0 \text{ m}^2} = 40 \text{ m/min} \approx 0.83 \text{ m/sec}$$

- 집진포 설계
φ0.15 × L3000 × 80개 = 113.04 m² (집진포 면적)
- 여과 속도

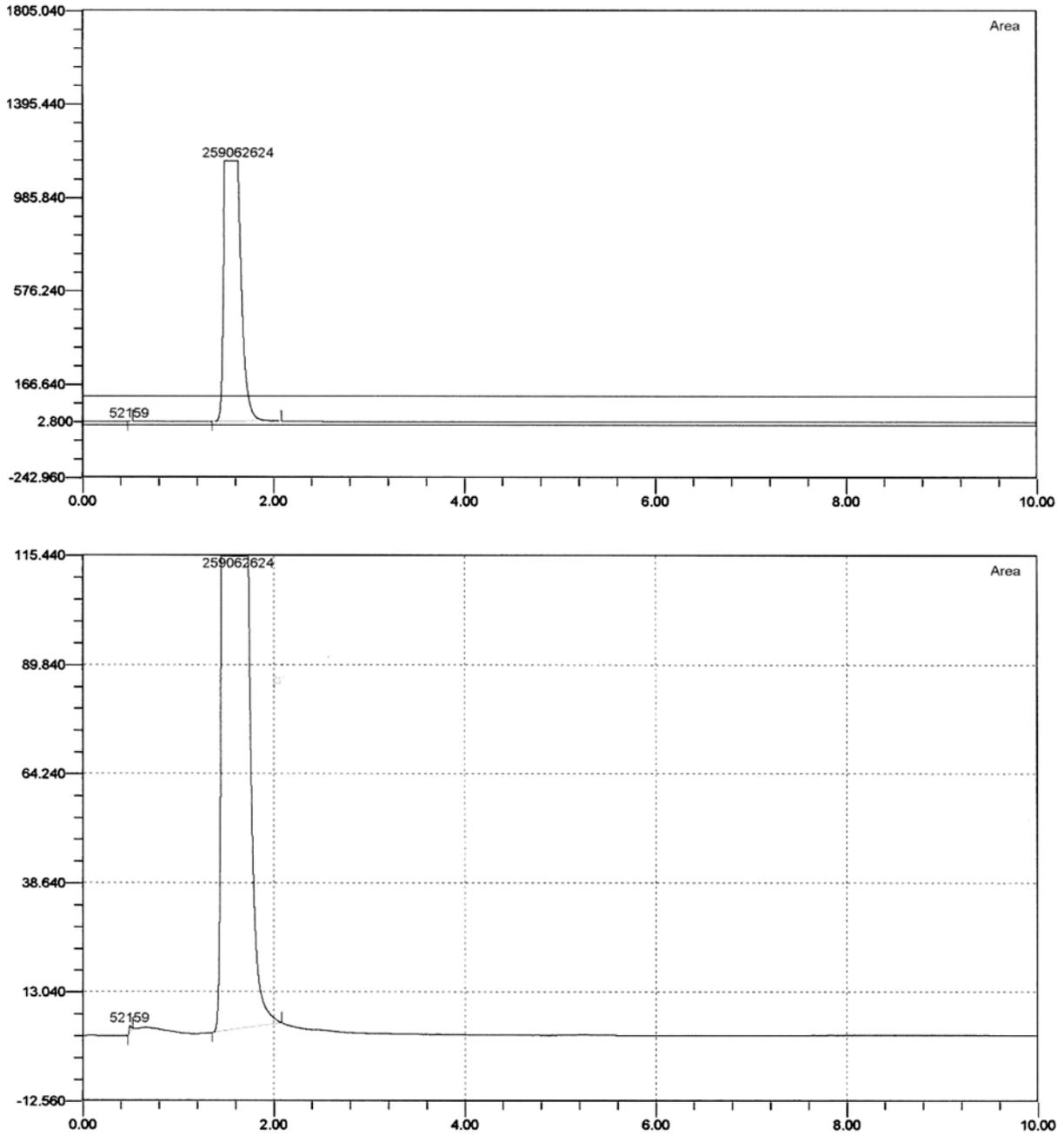


Fig. 8. The result of GC analysis for ethanol.

$$\frac{200 \text{ m}^3 / \text{min}}{113 \text{ m}^2} = 2 \text{ m/min} \cong 0.03 \text{ m/sec}$$

또 VOC 포집 실험에 의한 VOC 종류와 그 양에 따라 흡착법이 가장 적합한 방법으로 드러났고, 흡착제는 활성탄, 제올라이트, 알루미나 3가지에 대하여 실험을 수행하였으며, 그 결과 각 흡착제 1g 당 total VOC 처리량(emission 양)을 얻을 수 있었다. Fig. 11과 Fig. 12는 현장에서 검출된 VOC류인 알코올류와 포름알데히드류에 대한 각 흡착제 1g당 total VOC 처리량(emission량)을 보여주고 있다. 또한, 3가지 흡착제의 흡착 능력과 아울러 흡착제의 대체적인 가격에 대비하여 경제성을 분석하여 Table 6에 나타내었다.

위에서 나타난 흡착제 성능 실험 결과는 경제성 측면의 활성탄과 흡착능력 측면의 제올라이트가 유력한 흡착제로 결론 내릴 수 있다. 그래서 각 온도 영역에서의 활성탄과 제올라이트의 흡착능을 알아보기 위해 온도 상승에 따른 두 흡착제의 흡착능을 알아보는 실험을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

활성탄과 제올라이트의 탈착곡선에서의 두 흡착제의 탈착온도가 다른 온도인 것을 알 수 있었으며, 두 흡착제가 같이 사용될 경우 흡착 가능 온도구간이 확대될 것이며 특히 주물사 furan 공정은 온도 범위가 넓어 매우 우수한 흡착성능을 보일 것이다. 또한, 본 연구의 대상공정의 VOC 농도가 약 10 mg/m³ 정도의 오염을 보임에 따라 단일 흡착제보다는 다중 흡착제 흡착법이 보다 효과적인 것

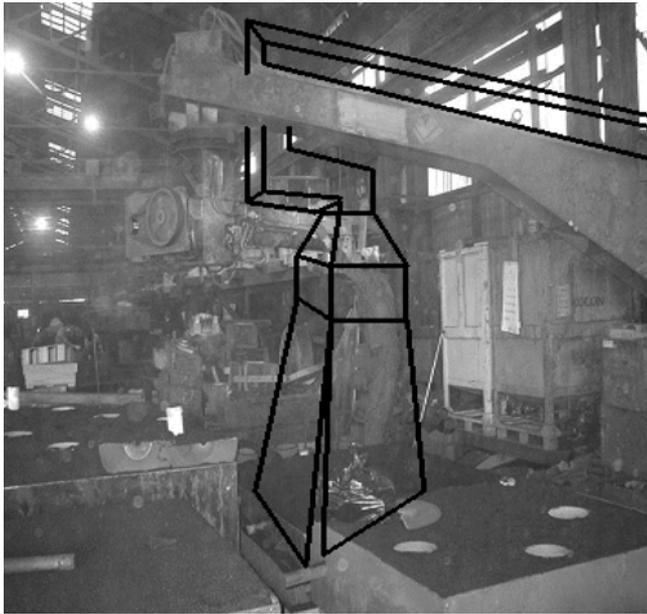


Fig. 9. The example of hood system desired for installing in the field.

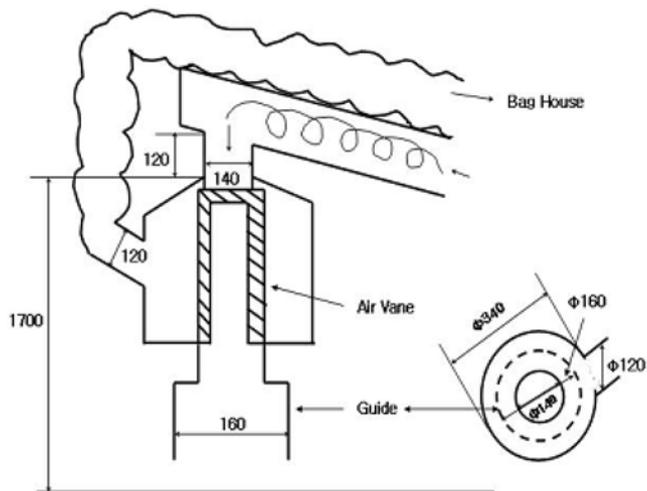


Fig. 10. The schematic diagram of flow mixer's hood.

로 판단되어 활성탄과 제올라이트를 사용하기로 하였고 그 실험 결과를 바탕으로한 용량설계는 다음과 같다.

현장 포집 공기는 포름알데히드 15 ppm, 알코올류 87 ppm의 공기이고 사용한 공기는 활성탄 1g을 사용할 때 알코올류의 경우 약 40분, 또 포름알데히드 경우 역시 약 40분 정도에서 emission이 시작되고 있음을 보았다. 또 제올라이트를 사용한 경우 알코올류, 포름알데히드 모두 약 50분부터 emission 방출이 시작됨을 Fig. 11과 Fig. 12에서 보여주고 있다. 우선 이들 중 성능이 다소 떨어지는 활성탄을 기준으로 그 용량을 설계하였다. 40분간 100 ml/min의 속도로 포름알데히드 15 ppm과 알코올류 87 ppm을 1g의 활성탄이 처리하므로 약 4,000 ml의 공기를 활성탄 1g이 처리함을 알 수 있다.

현장의 집진설비 가동시간 즉 flow mixer의 가동 평균 조업시간은 약 1일 4시간이며 매일 가동한다고 가정하고 6개월(약 180일) 가동 시까지 사용할 수 있는 흡착제의 양을 계산하였다. 즉, 4시

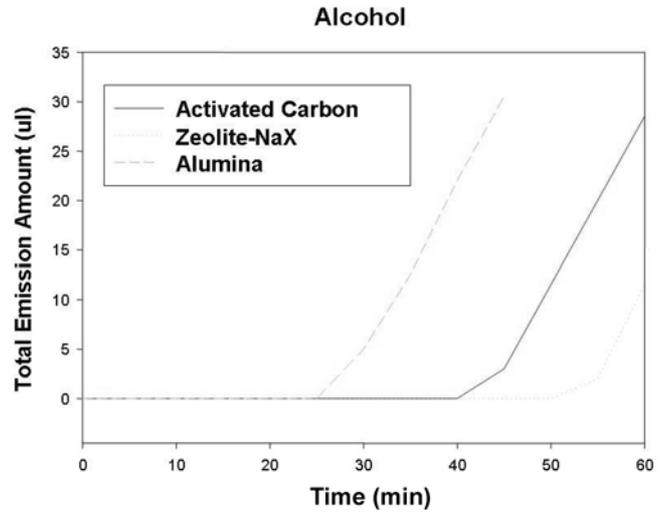


Fig. 11. The total emission amount of an absorbent 1 g for alcohols. Total Emission Amount(ul): $\Sigma[5 \text{ min} \times 100 \text{ ml/min} \times \text{Concentration (ppm)} \times 1000 \text{ ul/ml}]$

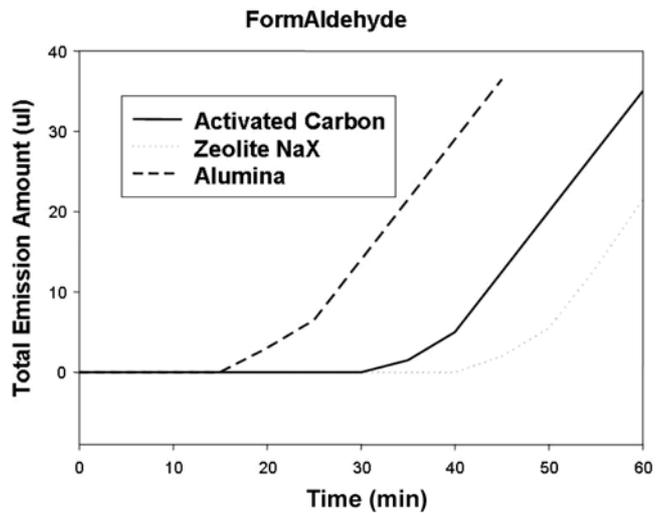


Fig. 12. The total emission amount of an absorbent 1 g for formaldehyde. Total Emission Amount(ul): $\Sigma[5 \text{ min} \times 100 \text{ ml/min} \times \text{Concentration(ppm)} \times 1000 \text{ ul/ml}]$.

Table 6. The treatment amount and economic efficiency of absorbents

Absorbent	Quantity	Price	Total
Activated carbon	3.5~4 l/g	inexpensive	good
Zeolite NaX	4.5~5	expensive	moderate
γ-Alumina	2~2.5	expensive	bad

간 × 60분 × 180일 = 43,200분이므로 43,200분간 흡착제를 사용한다고 볼 수 있다.

현장의 집진기 blower는 200 m³/min 이므로 200,000 l/min의 유량이나 안정된 현장주변의 공기가 포름알데히드 15 ppm, 알코올류 87 ppm이며 200 m³/min으로 빨아들이는 풍량의 경우는 주변 대기 공기가 다량 흡입된다고 보아야 한다. 공기유입은 약 500~1,000배 정도 희석된다고 볼 수 있고 이때 200,000 = 200 즉 약 200 l/min의

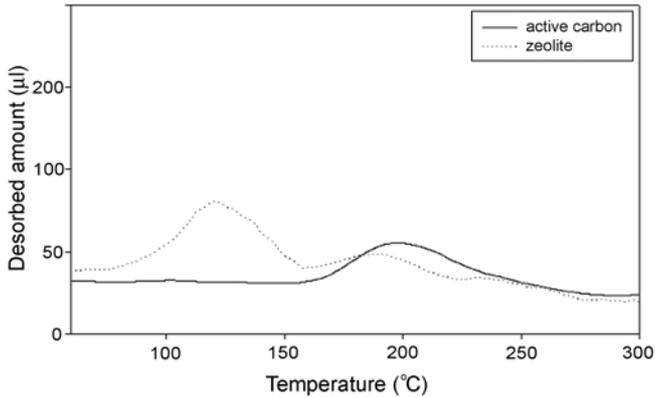


Fig. 13. The desorbed amount of absorbent according to temperature.

포름알데히드 15 ppm, 알코올류 87 ppm의 오염된 공기를 처리한다고 볼 수 있다. 총 6개월간 처리 오염 공기량은 $200 \times 43,200 / = 8,640,000$ l의 처리량이 된다. 1 g 활성탄의 오염공기 처리능력은 4 l 이므로 2,160,000 g의 활성탄이 6개월간 공정에서 재생 없이 사용하기 위해 약 2.1 tone 정도의 양이 필요하다는 결과가 도출된다. 약 2.1 tone의 활성탄의 부피를 계산해 보면 다음과 같다. 이때 활성탄의 밀도는 0.56 kg/l 이다. 즉 3,750 l 이상의 활성탄 chamber가 필요한 결과가 도출된다.

위 계산 방식에 의해 활성탄 chamber의 크기를 5,000 l로 산정하였고 또 제올라이트는 부가적으로 별도의 chamber를 두어 설계하였다. 또 흡착제를 재생하기 위해 흡착 chamber를 열선으로 감아 열을 가해줌으로써 흡착된 VOC류를 탈착시키는 시스템을 보강하였다. 활성탄과 제올라이트의 탈착온도가 서로 다르므로 두 흡착제

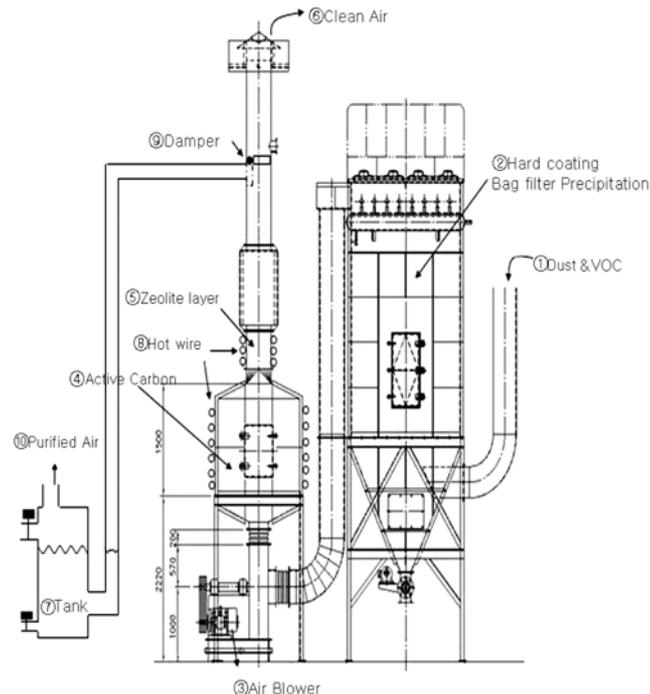


Fig. 14. The schematic diagram of absorption tower.

chamber가 별도로 설계되었고 열선에서의 최고온도도 각각 제올라이트 120~130 °C, 활성탄은 약 200 °C로 조절할 수 있게 하였다. 결과적으로 도출된 흡착탑의 설계를 Fig. 14에 나타내었고 또 이 설계를 이용하여 흡착제 교체 주기를 더욱 길게 즉 흡착제의 수명을 6개월 이상으로 사용할 수 있게 된다.

5. 현장 설치 및 결과 분석

5-1. 현장 설치

Fig. 15에서는 집진 후드가 설치되기 전의 모습과 설치 후의 모습을 보여주고 있다. Fig. 15에서 보듯 작업자들은 과거에 비해 작업을 매우 안정적으로 쉽게 수행하고 있고 특히 발생분진과 VOC가 거의 없어 마스크 착용 없이도 현장 작업을 수행할 수 있을 정도로 (작업 규정상 마스크를 착용하도록 지시 감독하고 있음) 원활한 작업수행을 볼 수 있다. 또한, 분진과 VOC를 동시에 제거하는 최종 목표물 설비는 작업장 외부에 설치되어 있고 Fig. 16은 현장에 설치된 설비 모습을 보여주고 있다. 이 설비는 우측에 특수 설계된 bag filter에 의한 여과포 집진 방식의 집진기와 좌측의 활성탄 및 제올라이트층의 흡착제 충전탑을 가지고 있다.



(a) before



(b) after

Fig. 15. Comparison of work surroundings for Flow Mixer's Process.



Fig. 16. The picture of system for removing simultaneously dust and VOC.

5-2. 결과 분석

본 연구를 통해 개발된 설비를 각 조업 현장에 설치하고 약 2~3개월간 운전 후 만족 할만한 현장 조업자들의 반응을 얻었다. 설치된 장비가 얼마나 설치 전의 시스템이 포집하지 못한 분진과 VOC류를 처리해 주는가를 실험하기 위해 설치 후 현장 실험을 통해 그 결과를 설치전과 비교하여 분석해 보았다. 첫째, 분진의 경우 약 20회에 걸친 개발된 장비가 설치되기 전의 실험에서 TSP 최대치 약 22,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소치 약 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 결과를 얻어내고 있고 PM₁₀의 경우로 최대치 약 8,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 최소치 약 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 결과를 얻어내고 있음을 앞서 제시한 대로 알 수 있었다. 개발된 설비가 장착되어 운전된 지 약 2개월 후부터 10회에 걸쳐 실험해 보았으며 TSP의 경우 최대 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 결과가 도출되었고 PM₁₀의 경우 최대 약 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 결과가 도출되었다. 이 결과들의 그래프를 Fig. 17에 나타내었다.

TSP의 경우 최대치 조업 기준으로 볼 때 즉 99.927%의 TSP 분진 처리 결과를 보여주고 있고 PM₁₀의 경우도 즉 99.67%의 분진 처리 능력을 보여주고 있으며 PM₁₀의 경우 최소치가 전혀 배출되지 않았으므로 수치상으로는 100%의 분진을 처리한 결과가 도출되었다. 분진을 걸러낸 후 현미경 사진에서도 확인할 수 있는 것이 TSP의 경우 설치 전의 현미경 사진은 300배율로 촬영하였으나 설치 후의 분진 현미경 사진은 설치 전의 배율에 약 50배율을 높여야만 분진 입자를 확인할 수 있을 정도로 미세한 분진 밖에 확인할 수 없었다. 설치 전에는 최대 54.429 μm 크기의 분진입자가 보였으나 설치 후에는 최대 분진 입자 크기가 0.5 μm 를 넘지 못하고 있다.

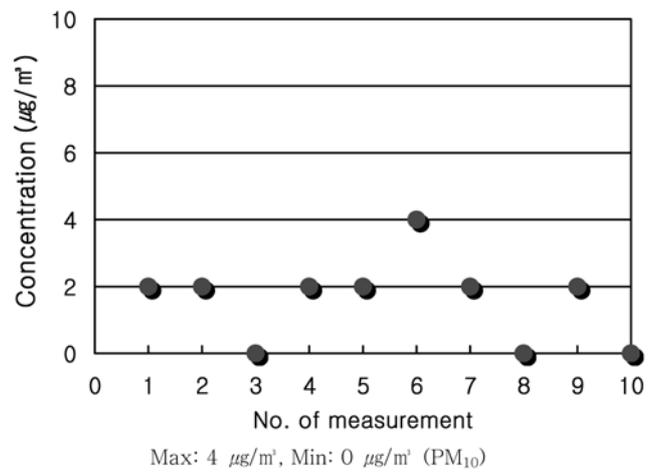
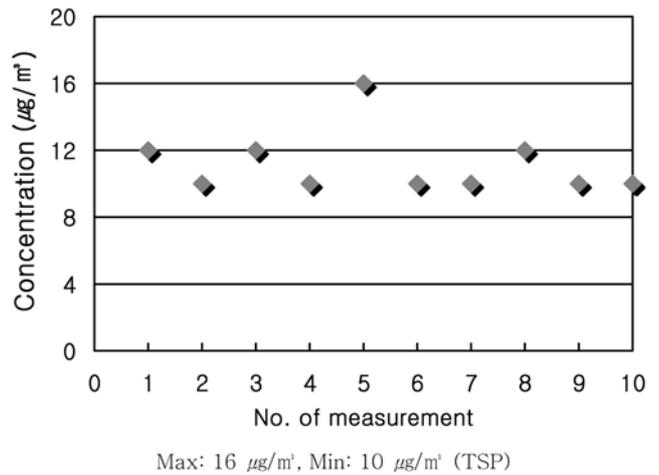


Fig. 17. After setting up a system, the result of measurement for PM₁₀ and TSP.

PM₁₀에서는 보다 미세하여 0.127 μm 가 가장 큰 입자이고 그나마 거의 없어 현미경으로 분진을 찾기 힘들어 현미경 촬영이 어려울 정도이었다. Fig. 18, Fig. 19에는 개발 설비 설치 후 조업에서의 TSP와 PM₁₀의 현미경 촬영 사진을 나타내었다.

또 VOC 포집 실험에서 앞서 밝힌 대로 개발장비 설치 전의 GC 분석 data에 의하면 포름알데히드 15 ppm 이상 그리고 알코올류 87 ppm 이상, 기타 VOC류가 포함된 공기로 분석되었다. 개발된 설비를 장착한 후 0.1 ppm 단위까지 검출하는 GC 분석기로 분석해 본 결과 포름알데히드류와 알코올류 모두 검출 되지 않았고 GC 분석 결과 그래프 역시 연구실 환경의 대기와 거의 같은 공기로 나타남을 알 수 있었다. Fig. 20에는 개발설비 설치 후의 조업환경 대기의 GC 분석결과를 나타내었다.

본 연구는 분진 및 Fume, 기타 휘발 유기물을 동시에 제거할 수 있는 설비의 최초 개발로 이는 국내 주조 및 화석연료 분쇄 공정 등 분진 및 VOC 혹은 유해 유기화합물이 동시에 발생하는 산업에서의 유해 분진 및 VOC류 제거가 이루어져 소위 3D 업종으로 분류되는 이러한 업종의 조업 환경을 크게 개선하여 인력의 원활한 수급과 작업환경 개선으로 인한 생산성 향상 및 대기오염 환경문제의 해결 등 일석삼조의 효과를 얻을 수 있을 것이다. 설치된 설비는 분진 류 99.6% 이상 VOC류 99.9% 이상의 제거효과를 나타내고 있

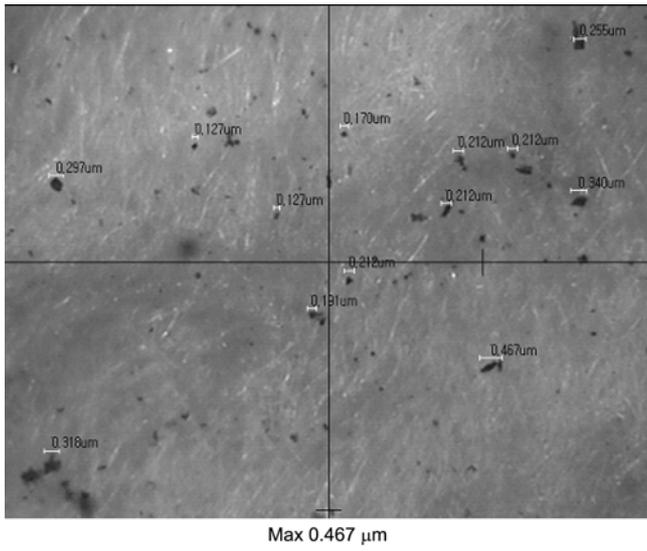


Fig. 18. After setting up a system, the result of analysis for TSP.

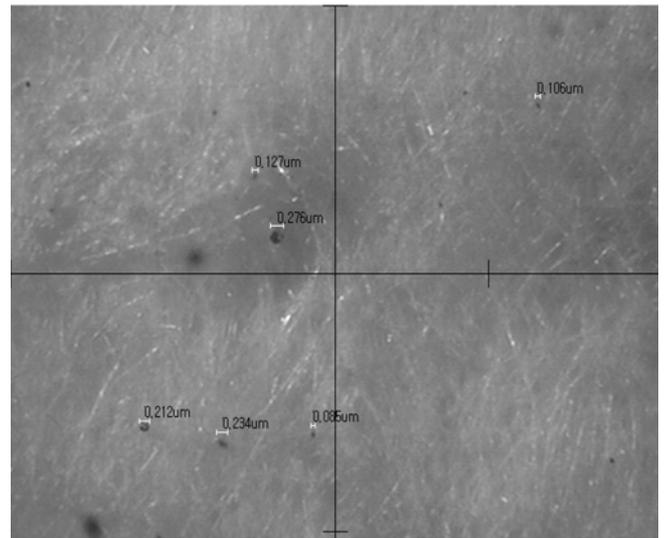


Fig. 19. After setting up a system, the result of analysis for PM₁₀.

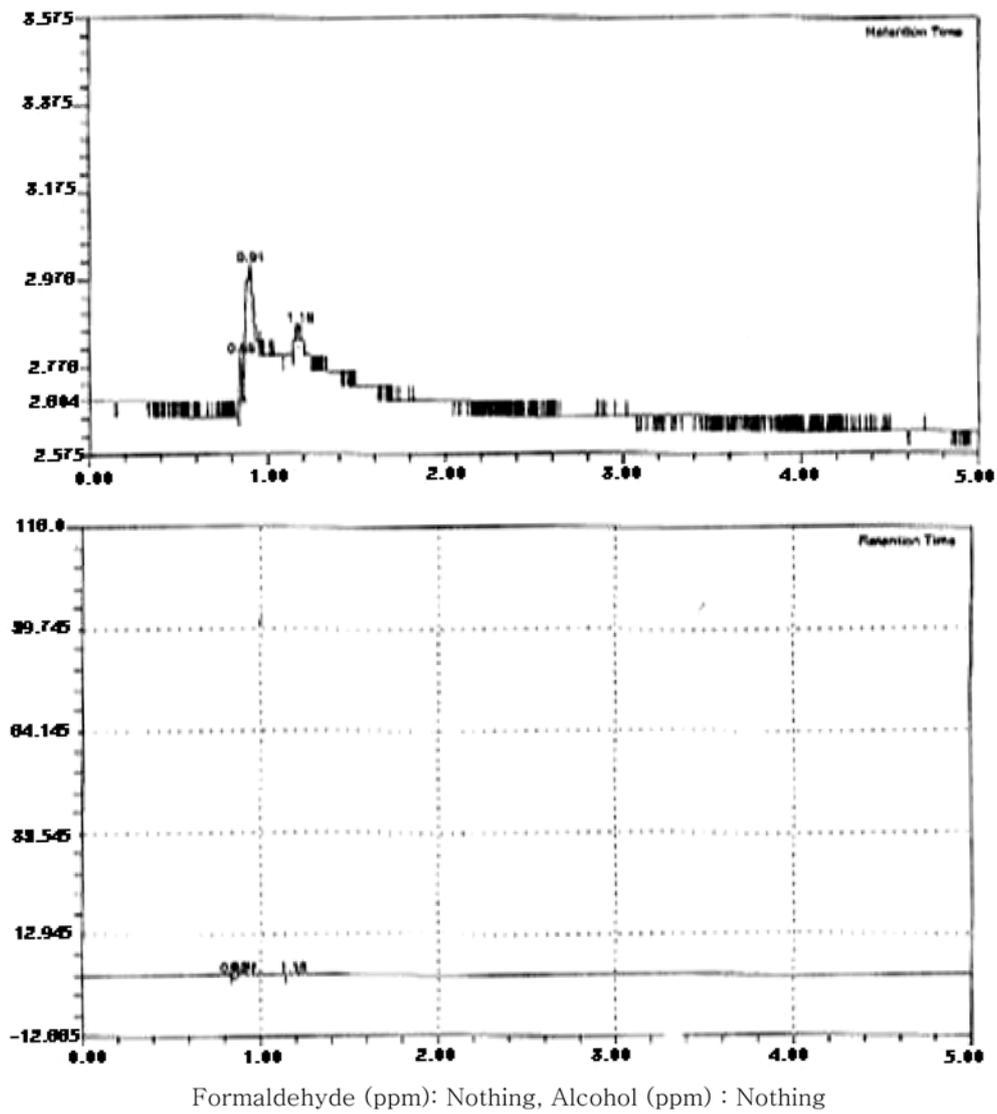


Fig. 20. After setting up a System, the result of GC analysis.

어 당초 계획을 상회하는 결과를 얻은 것으로 간주 될 수 있다.

기술적 측면에서 볼 때 복합적 유해 대기오염원의 동시 제거 기술은 설비 투자비를 절감할 수 있고 결과물의 응용이 매우 광범위한 산업으로 확대 적용될 수 있을 것이다. 산업현장에서 분진의 시각적 효과와 VOC류에 의한 냄새로 인한 후각적 효과를 동시에 직면하여 작업자들의 작업의 기피 성이 극대화되고 있는 실정에서 두 가지 오염원의 동시 제거로 인해 작업환경의 쾌적성을 직접적으로 느끼게 될 것이고, 이로 인한 생산성 향상과 이직률 저하 그리고 인력 수급의 해소 등의 효과를 거둘 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. <http://filter.kier.re.kr>
2. Kang, S. H., Lee, T. J. and Bae, K. S., "Adsorption of Methylene Chloride and Freon-12 on the Some Adsorbents," *HWAHAK KONGHAK*, **26**(4), 345-350(1988).
3. Kang, S. H. and Paik, S. K., "Kinetics of Batch Adsorption on Active Carbon from Aqueous Fuchsine Solution," *HWAHAK KONGHAK*, **10**(2), 51-56(1972).
4. Kang, S. H. and Paik, S. K., "Kinetics of Adsorption in Fixed Bed Packed with Active Carbon from Aqueous Fuchsine Solution," *HWAHAK KONGHAK*, **11**(4), 242-246(1973).
5. Park, Y. G., Moon, J. W. and Ko, M.-S., "Estimation of the VOC Fugitive Emission Released from Process Units," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(3), 382-388(2003).
6. Hwang, K.-S., Choi, D.-J. and Gong, S.-Y., "The Thermal Regeneration Characteristics of Volatile Organic Compounds on an Activated Carbon Bed(I): Adsorption Step," *HWAHAK KONGHAK*, **36**(2), 159-168(1998).
7. Song, K. S., Seo, Y. S., Jeong, N. J., Yu, S. P., Ryu, I. S., Lee, S. N., Choi, J. J. and Jung, J. D., "Incineration Characteristic of Volatile Organic Compound in the Regenerative Catalytic Oxidizer," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(3), 397-402(2003).
8. Kim, H. J., Yang J. C., Jung, K. T., Shul, Y. G., Chun, K. Y., Han, H. S., Joe, Y. I. and Kim, Y. W., "Performance of Ceramic Composite Membrane for the Separation of VOCs," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(5), 662-667(2001).
9. Choi, H. K., Park, S. J. and Lim, J. H., "A Study on the Characteristics of Improvement in Filtration Performance by Dust Pre-charging," *Korean J. Chem. Eng.*, **19**(2), 342-346(2002).
10. Kang, S. H., Ahn, H. K. and Ryoo, P. J., *The theory and applications of Particulate control technology*, Yeungnam University press, Gyeongsan(2004).
11. Saleh Abd El-Aziz M. Atia, "Study on Performance Improvement of a Water Powered Scrubber for Coal Dust Control," Graduate School of Seoul University, Seoul(1992).
12. Lee, T. S., "A Study on the Optimization of the Discharge and Dust Collection Characteristics of Dry Electrostatic Precipitator," Graduate school of Ulsan university, Ulsan(1998).
13. <http://home.ulsan.ac.kr/~biofood/database>
14. <http://blog.naver.com/nixmbc.do?Redirect=Log&logNo=120014754702>
15. <http://www.sinsungplant.co.kr>
16. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D. and West, R. E., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 5th Ed.*, McGraw-Hill, Seoul (2003).