

## 인천항 고철 하역 작업시 발생하는 비산분진 억제를 위한 계면활성제의 적용 및 기초 성능 평가

### The Application of Surfactants to the Suppression of Fugitive Dust Generated from the Scrap Metal Loading Field in Inchon Port and Preliminary Evaluation on Their Wetting Capability

이보영 · 유용호 · 정용원 · 김 진

인하대학교 지구환경공학부

(2000년 10월 13일 접수, 2000년 12월 22일 채택)

Bo Young Lee, Yong Ho Yoo, Yong Won Jung and Jin Kim  
*Division of Environmental & Geosystem Engineering, INHA University*

(Received 13 October 2000; accepted 22 December 2000)

#### Abstract

The objective of this study is to develop the water spraying technology which can effectively be applied to the control or suppression of the fugitive dust generated from the scrap metal handling area at the Port of Inchon. As a first step toward this goal, we carried out some preliminary analyses on the chemical composition, physical shape, and particle size distribution of the sample dust. Next, to quantitatively investigate the effect of adding surfactants to the spraying water on the wettability of the sample dust, the Standard Sink Test was carried out for four different surfactants and at six different concentrations using the surfactants considered in this study.

Results of from the preliminary analyses indicated that the main chemical component consisting of the sample dust is Goethite ( $\text{FeO(OH)}$ ) and that the particles smaller than  $10 \mu\text{m}$  in geometric diameter occupy about 36% of the sample dust in mass. This result implies that the fugitive dust generated from the scrap metal handling area at the Port of Inchon should affect the environment nearby more than we have expected. This is because of relatively large mass percentage of the small metal particles less than  $10 \mu\text{m}$  in geometric diameter, what we may call respirable particles. As for the results of the Standard Sink Test, higher surfactant concentration tends to result in the higher wettability of the sample dust for the surfactants considered in this study, which in turn ensures the high particle collection efficiency of the droplets generated from the water spraying system. Based upon this preliminary results, studies to develop more sophisticated scaled model for dynamic test is underway and the effort to find the best surfactants as well as the optimum operating conditions are being made at the same time.

**Key words :** fugitive dust, scrap metal, Standard Sink Test, surfactant, wettability, suppression

## 1. 서 론

수도권지역의 관문인 인천항은 고철, 콘크리트, 사료원료, 원목, 모래 등 부피와 분진발생의 소지가 큰 벌크화물을 집중적으로 산적하고 있으며, 이는 수도권 지역 대기오염의 주범이 되고 있는 실정이다. 특히 고철의 하역 및 수송 시에 발생하는 비산 먼지는 항만 주변의 주거지역은 물론 인천시 전역의 대기오염을 가속화시킬 뿐 아니라 다량의 분진 발생으로 인해 민원의 주 대상이 되고 있다. 인천항의 경우 수입하는 고철은 그 산화도가 비교적 높아 하역 및 취급 시에 다량의 먼지가 발생되고, 먼지 중에 중금속 성분을 많이 포함하여 인체 위험성이 높을 가능성이 크다. 또한, 불완전한 분진 제어로 인해 작업 효율이 떨어지며, 현장 내 작업자들의 호흡기 장애 등의 직업병을 유발시킬 소지가 있고, 작업환경을 더욱 악화시키는 등의 문제를 야기한다. 외국의 경우 벌크 부두에서는 대부분 작업장의 비산 방지를 위한 설비(집진기, 상온, 필터, 호퍼 등)가 이루어져 있으며, 비산 방지를 위한 연구 역시 집진기의 성능향상에 맞추고 있는 현실이다. 현재 인천항에서는 비산 먼지의 억제를 위해 방진망 설치와 분사장치(water spray system)을 이용하고 있으나, 상수도의 비효율적 다량살수에 의한 경비증가 및 수질오염의 문제점 등 보다 근본적인 대책이 필요한 상황이다.

Water spray는 광산의 채굴 현장 및 다량의 분진이 발생하는 작업현장에 대해 대기 중의 호흡성 유해분진을 포함한 부유분진(airborne dust)을 억제하는데 널리 이용되었다(Chander *et al.*, 1989). 즉, 다량의 미세한 액적에 의한 분진포집은 액적과의 충돌(collisions)과 액적표면으로의 분진부착(adhesion) 및 액적 내부로 분진이 침습(engulfment)함을 포함한다. 이에 계면활성제는 미소 액적의 전하, 표면장력, 분진과 액적과의 wetting에 대한 영향을 주는 요인이 되며, 수분을 함유하고 있는 분진과 호흡성 분진에 대해서는 매우 적용이 난해한 문제라고 지적되어 왔다(Glanville and Wightman, 1979). 계면활성제가 첨가되면 액적 정전하의 크기는 현격하게 변화하며, 정전하의 크기는 계면활성제의 종류와 농도에 대한 함수인 것으로 알려져 있다

(Polat *et al.*, 1993). 계면활성제는 분진 입자 표면의 계질을 변화시켜 물을 분사시킬 경우보다 입자간의 반응성을 향상시켜 분진의 비산을 감소시킬 수 있다. 특히, 계면활성제를 이용한 수분사 방식은 진폐증과 같은 산업재해병의 직접적인 원인인 5 μm 이하 미세 먼지 억제에 보다 효과적일 것으로 예상되어 하역작업자들에 대한 분진노출정도 억제에도 기여할 것으로 기대된다(Dumm and Hogg, 1987). 따라서, 본 연구에서는 계면활성제 spraying system을 이용한 비산분진 방지 대책에 관한 사전 연구로 고철분진의 특성을 조사하였다.

조사 방법으로는 XRD(X-Ray Diffraction), SEM(Scanning Electron Microscope), TG(Temperature Gradient)분석을 통해 고철 분진시료의 물성시험 및 입도분석을 실시하였으며 분진의 계면활성제 용해에 의한 wettability를 시험하기 위해 표준침강실험(standard sink test)를 실시하였다.

## 2. 실 험

일차적으로 시료의 포집은 현장의 고철로부터 채취한 분진시료의 총 중량을 측정한 후 50 mesh에서 420 mesh까지의 일체적인 체분석을 실시하였으며, 비산의 가능성이 높은 100 μm 이하의 분진 10 g의 입도분포를 선행하였다. 그 결과 입도분포에서 가장 높은 빈도수를 보이는 구간인 61~73 μm 입경의 분진을 기본으로 하고, 호흡성 분진의 중량분포를 고려하여 실제 실험에서는 230 mesh 이하(63 μm)의 분진을 시료로 채택하였다.

### 2. 1 고철분진의 물성실험

계면활성제를 사용하는 분사장치(spraying system)을 이용하여 고철분진을 억제하기 위해서는 분진의 물성조사가 필수적이다. 그 이유는 분진이 소수성 표면을 가지고 있으면 액적 표면에서 부착이 되지 못하는 현상(bounce off)이 발생되고 집진 효율이 크게 저하될 소지가 있기 때문이다. 계면활성제는 이러한 분진의 소수성 표면을 친수성 표면으로 개질시키는 역할을 하게 된다. 이러한 정확한 물성조사 자료를 바탕으로 분진의 특성을 파악하여 최적의 계면활성제를 평가할 수 있으며, 경제적인 측면을 고려한 최적의 계면활성제 농도를 결정할 수 있

다. 고철하역장 비산먼지는 고철에서 기인된 먼지로 대부분  $Fe_2O_3$  등의 산화철일 것으로 예상되며, 이러한 고철하역장에서 기인된 먼지분율의 산출은 먼지 중의  $Fe_2O_3$  또는 Fe의 무게분율을 구하면 알아낼 수 있다. 선행연구 결과에 의하면 Fe의 경우 사업지구 이외의 지역보다 높은 것으로 나타나 고철하역장의 먼지가 사업지구에 영향을 주는 것을 시사한다(정용원, 1995). 분말 X-선 회절법(X-Ray Diffraction, XRD)은 원리적으로는 미세한 결정이 모든 방향에 대해 임의적으로 배열되어 있는 시료를 대상으로 하는 측정법이나, 다종의 시료가 혼합되어 있는 미지 시료에 대해 측정한 분말 X-선 회절 패턴을 완벽히 해석하는 일은 매우 어려운 일이다. 본 미지의 고철분진 시료에 대해서는 정성분석을 통한 정확한 성분차를 평가하는 것이 분진 제어를 위한 최적의 계면활성제를 선택하기 위한 필수요건이었음을 밝힌다. XRD 측정 조건은  $CuK\alpha$  (Ni filter) : 45 KV, 15 mA, scanning speed :  $2^\circ/min$ 로 고정하였고 측정 범위는  $2\theta = 20\sim120^\circ$ 로 하였다. 산화철은 비정질화 되어 X-선 회절 peak가 매우 미약하였으므로, 이에 대해  $400^\circ C$ 에서 2시간 및  $850^\circ C$ 에서 2시간을 고온 산화시켜 각각 회절 분석을 하였으며, 부차적으로 같은 시료에 대해 TG-DTA 및 EDTA 분석을 통해 그 흡열 혹은 발열반응에 대한 온도분포를 측정하여 시료의 성분을 파악하였다.

## 2. 2 고철 분진 시료의 입도분석

10  $\mu m$  이상의 분진들은 유동공기의 속도가 크지 않아도 공기 내에 장기간 부유상태로 잔존하며, 특히 병리학적으로 신체에 영향을 미치는 분진 입자들은 10  $\mu m$  이하의 입경이다. 다시 말해, 10  $\mu m$  이하의 미세분진을 제어하는 것은 dust control의 기본적인 개념이라 할 수 있다. 일반적으로 호흡성 분진은 5  $\mu m$  이하의 분진으로 분류되며, respirable particulate TLVs(RPM-TLVs)는 폐 내의 가스 교환부위에 침적되어 유해한 분진에 적용하며 양적인 면에서 입경의 대수정규분포 누적곡선(cumulative log-normal function)상의 공기역학적 중앙값이  $3.5 \pm 0.3 \mu m$ 인 입경분리 포집효율을 갖는 입자로 구성된 분진을 말한다(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1989). 이러한 호흡성 분진에 대한 높은 관심도는 무엇보다도 산업장에서 각종

분진의 흡입에 의한 진폐증 발병이 주 요인이다. 따라서 분진 사업장에서 부유분진의 입도분포 및 공기 중에 부유하고 있는 분진 중 호흡성 분진의 크기에 해당하는 입경이 차지하는 비율이 어느 정도 인가를 파악하는 것은 진폐예방 측면에서 공학적 개선 방안을 강구하는데 중요하다(김영식, 1992). 또한 향후 효율적인 비산분진 억제에 대한 연구를 위한 전단계 조사로서 그 중요도 및 기여하는 바가 크다.

이에 본 연구에서는 대상 하역장의 고철을 회수하여 표면의 산화철을 샘플링하여 SEM(Scanning Electronic Microscopy)분석을 이용하여 입도분포를 나타내었으며, 유동식 기류분산방법(전식)을 이용하여 측정하였다. 전식 방법을 사용할 경우 습식 방법 사용시 발생 될 수 있는 분산액에 의해 시료의 상태 변화를 배제시킬 수 있다. 입도분포 실험은 기준 시료량 10 g에 대해 R3(0.5~175  $\mu m$ )LENS의 측정 범위 내에서 이루어졌으며, 3bar의 공기압, 45%의 feed속도는 0.7 mm이었다.

고철 분진 시료의 물성파악과 더불어 시료입자의 표면 형상을 정확하게 파악하는 것은 물 분사 작업시 액적과의 흡착 및 포집효과를 상승시킬 수 있는 계면활성제의 종류 및 농도선택에 중요 인자로 고려된다. 그러나, 정확한 입자 개개의 형상 파악을 위해서는 각 입자를 독립시켜 분리시키는 것이 중요하였으며, 효율적인 입자 형상 관측을 위해서 분산제를 이용하였다.

## 2. 3 표준침강시험(Standard sink test)- 분진의 wettability 시험

Draves and Clarkson(1931)에 의해 최초로 수행된 immersion sink time procedure는 Walker *et al.*(1952)에 의해 보완되었으며, 이는 다양한 계면활성제의 분진에 대한 wettability를 평가하기 위한 것이다. 이 시험은 광산에서의 채굴 작업시 발생하는 비산 탄진을 효율적으로 제어하기 위하여 현장실험뿐만 아니라 탄진 시료를 채취하여 실내에서 wettability의 정량적인 측정을 위해 많이 이용되어 왔다. 그러므로 본 연구에서는 향후 추진 예정인 분진제어의 현장실험 및 실제 스프레이 시스템 모델링 시험 등 역학적 시험(dynamic test)에 앞서 사전 실험으로 standard sink test(static test)를 실시하였다. 특히 sink

test에서 액체-기체 경계면에 분진 시료입자가 부착되고 분진이 wetting이 되어 분진이 침강하는 현상은 분사 장치에서 미세한 액적에 분진이 포집되는 효과 즉 충돌, 부착, 침습과 같은 물리적 메커니즘을 가진다는 점에 착안할 때 그 중요성이 더욱 부각된다. 따라서 본 연구에서는 스프레이 시스템에 대한 좀더 완벽한 분진제어를 위해 계면활성제의 첨가를 전제 조건으로 하여 계면활성제의 종류 및 농도에 따른 고철 분진의 wettability을 조사하였다.

실험에 사용한 계면활성제는 국내 D회사의 분산 방지제인 ADO (Anti-Duster Oil) #100, 미국 Air Product & Chemicals, Inc.의 SURFYNOL 440, PPG Industries, Inc.의 MACOL 30이다. 이를 외국산의 계면활성제는 기존의 선행 연구에서 계면활성제로서 분진포집율이 우수하다고 평가된 바 있는 제품이다 (Kim and Tien, 1993). ADO #100은 25°C의 상온에서 외관상 담황색의 투명한 액상으로 존재하며 pH 6.0~8.0의 비이온성 계면활성제이다. 안정한 유화 수용성으로서 유화 분산력이 우수한 기능을 가진다. SYRFYNOL 440은 액상으로서 거품을 생성하지 않으며 FDA regulations에 검증된 인체 무해한 비이온성의 계면활성제이다. 25°C의 물에 약 0.15%의 용해도이다. Standard sink test는 계면활성제 용액 1,000 ml에 대해 이용 가능한 농도를 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30%의 weight percent로 정하고, 시료의 각각 1.6 g을 사용하였다 (Brij Raj Mohal, 1988). Sink Test 용기는 내경이 약 4.7 cm, 높이 36 cm인 1,000 ml의 메스실린더를 이용하였으며, 이에 mm의 자를 부착하여 용액 표면으로부터 시료의 침강이 진행함에 따라 단위시간(5 sec, 2 sec, 1 sec)에 대하여 입자의 침강거리를 연속적으로 측정하였다. 이를 이용하여 침강곡선을 작성하고, 이 곡선으로부터 침강속도를 wettability의 척도로 간주하여 그 특성을 비교·검토하였다.

각 실험은 standard sink test에서 요구되는 5분 정도의 aging time동안 계면활성제 용액이 평형을 유지하게 한 후, 종류별 계면활성제 용액의 규정한 농도에 대해 4회씩 측정하였다. 이에 시간에 대한 wettability를 얻기 위한 방편으로 다음과 같은 방식으로 시행하였다. 특정농도의 계면활성제들을 준비하고 이렇게 조절한 계면활성제액을 1,000 ml의 비커에 넣고 1.6 g의 고철분진 시료를 용액의 표면에

조심스럽게 쏟는다. sample이 용액 표면에서 바닥으로 가라앉는데 걸리는 시간을 stop-watch로 측정하고, 또한 입자들의 단위 시간당 이동 거리를 확인한다. 이 침강시간으로부터 시료의 wettability인 침강 속도를 확인할 수 있다. 즉, 일정 주어진 농도에 대해 시간 당 입자들이 침강하여 이동하는 거리를 측정하여 단위시간 당 이동 거리에 관한 함수로써 표현하였다.

### 3. 결과 및 고찰

고철 분진 시료의 물성시험에 대한 결과는 그림 1과 그림 2의 XRD 패턴과 TG-DTA 결과 및 EDTA 분석을 통해 확인할 수 있었다. XRD 분석결과 시료는 비정질로서 그 회절강도가 낮기 때문에 좀 더 명확한 구성물질 파악을 위하여 TG-DTA 분석을 시행하였다.

시료는 성분적으로 Goethite ( $\text{FeO(OH)}$ )가 다량으로 존재하며, Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 및 비정질의 Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )가 존재함을 확인하였고, 또한 불순물로써 Low-quartz (silica)를 미량으로 함유하고 있음을 알 수 있다.

그림 2의 고철 분진 시료의 SEM 분석결과 분진 입자의 표면현상을 나타내 주는데, (a)는 상온에서 실제의 3,000배의 배율, (b)는 소성 후 4,000배의 크기로 측정한 것이다. (a), (b)는 각각 실제 입경으로는 약 12  $\mu\text{m}$ 와 5  $\mu\text{m}$  정도이다. (c)의 전체적인 분포

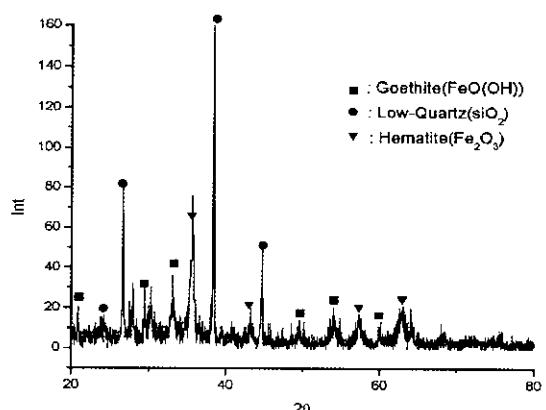


Fig. 1. XRD analysis for the scrap metal dust sample at 400°C.

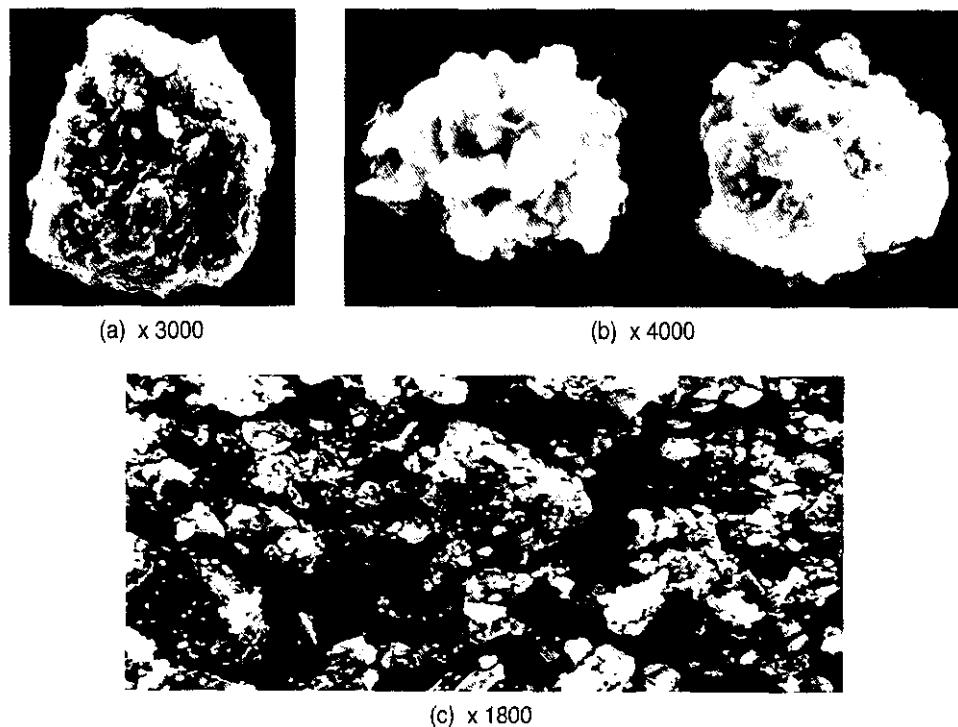


Fig. 2. SEM patterns of the scrap metal dust sample.

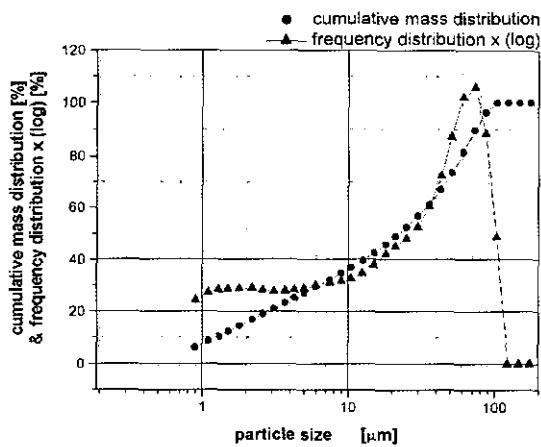


Fig. 3. Cumulative distribution of the sample weight and the frequency distribution for the particle size.

패턴과 비교할 때, 이는 중립 이상 조립의 입도가 큰 분진입자이며, 또한 이들의 표면은 매우 불규칙하고, 엉김 상태가 매우 심한 것으로 나타난다. (c)

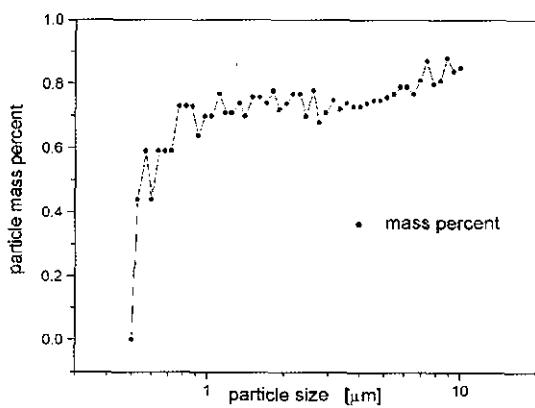


Fig. 4. Geometric size distribution for the size of 0.5~10 μm at 50 size interval.

의 일정 배율에서의 분진 입자들의 입도를 측정한 결과 약 0.2~12 μm의 분포를 보임을 알 수 있다.

입도분석 결과 그림 3, 그림 4와 같은 입도 존재 범위 및 분포도를 보였으며, 매우 우수한 분산을 나

**Table 1. The result of particle size distribution for the whole dust sample.**

Size interval [μm]	Ave. size for each Interval [μm]	Residue distribution [%]	Mass percent	Cumulative distribution [%]	Frequency distribution × log [%]
0.90	0.70	93.97	6.03	6.03	24.29
1.10	1.00	91.62	2.35	8.38	27.04
1.30	1.20	89.59	2.04	10.41	28.17
1.50	1.40	87.82	1.77	12.18	28.50
1.80	1.65	85.54	2.28	14.46	28.83
2.20	2.00	83.04	2.50	16.96	28.80
2.60	2.40	81.00	2.04	19.00	28.13
3.10	2.85	78.89	2.11	21.11	27.71
3.70	3.40	76.77	2.12	23.23	27.72
4.30	4.00	74.94	1.83	25.06	28.10
5.00	4.65	73.05	1.89	26.95	28.83
6.00	5.50	70.69	2.36	29.31	29.86
7.50	6.75	67.69	3.00	32.31	31.08
9.00	8.25	65.20	2.50	34.80	31.64
10.50	9.75	63.02	2.18	36.98	32.56
12.50	11.50	60.40	2.62	39.60	34.72
15.00	13.75	57.39	3.00	42.61	38.05
18.00	16.50	54.07	3.32	45.93	42.08
21.00	19.50	51.05	3.02	48.95	45.16
25.00	23.00	47.42	3.63	52.58	48.12
30.00	27.50	43.27	4.15	56.73	52.57
36.00	33.00	38.48	4.78	61.52	60.56
43.00	39.50	32.91	5.57	67.09	72.40
51.00	47.00	26.46	6.45	73.54	87.30
61.00	56.00	18.53	7.93	81.47	102.23
73.00	67.00	10.29	8.24	89.71	105.97
87.00	80.00	3.57	6.72	96.43	88.39
103.00	95.00	0.00	3.57	100.00	48.80
123.00	113.00	0.00	0.00	100.00	0.00
147.00	135.00	0.00	0.00	100.00	0.00
175.00	1161.00	0.00	0.00	100.00	0.00

타내었다. 이는 고철 시료에 대해 3회 측정한 값의 평균치를 이용하고, 그 재현성을 표현한 것이다. 이에 누적 질량 10%되는 지점의 입도크기는 1.26 μm, 16%지점에서는 2.05 μm, 50%지점에서는 22.16 μm, 84%지점에서는 64.68 μm, 90%지점에서는 73.60 μm, 99%지점에서는 98.52 μm의 입도크기를 보였으며, 이에 대해 본 실험에서 입도분석에 사용된 시료의 평균입도는 22.16 μm로 나타났다. 이는 시료를 무게기준으로 분석한 결과이며, 입자 개수에 대한 기준 및 면적기준에 대해서는 평균입도가 각각 0.76 μm, 1.16 μm로 측정되었다. 한편 먼지에 대한 대기 환경기준이 중량농도로 규정되어 있는 만큼 시료의 무게를 기준으로 입도분석을 하는 것이 본 연구에

**Table 2. The result of geometric size distribution for the sample of 0.5~10 μm for 50 size interval.**

Size interval [μm]	Cumulative Distribution [%]	Mass percent [%]	Size interval [μm]	Cumulative Distribution [%]	mass percent [%]
0.50	0.00	0.00	2.31	17.13	0.77
0.53	0.44	0.44	2.61	18.62	0.78
0.57	1.03	0.59	2.94	20.01	0.71
0.60	1.46	0.44	3.13	20.76	0.75
0.68	2.64	0.59	3.33	21.49	0.72
0.72	3.22	0.59	3.54	22.22	0.74
0.77	3.95	0.73	3.76	22.96	0.73
0.82	4.69	0.73	4.00	23.69	0.73
0.87	5.42	0.73	4.25	24.43	0.74
0.98	6.76	0.70	4.52	25.18	0.75
1.04	7.46	0.70	4.80	25.93	0.75
1.11	8.22	0.77	5.10	26.69	0.76
1.18	8.93	0.71	5.43	27.46	0.77
1.25	9.64	0.71	5.77	28.26	0.79
1.33	10.38	0.74	6.13	29.05	0.79
1.41	11.09	0.70	6.52	29.82	0.77
1.50	11.85	0.76	6.93	30.64	0.81
1.60	12.61	0.76	7.37	31.51	0.87
1.70	13.35	0.74	7.83	32.31	0.80
1.81	14.13	0.78	8.32	33.12	0.81
1.92	14.85	0.72	8.85	34.00	0.88
2.04	15.59	0.74	9.41	34.84	0.84
2.17	16.37	0.77	10.00	35.69	0.85

타당하다고 볼 수 있다. 또한 표 1에서 나타난 바와 같이 빈도수 분포가 가장 높은 구간은 61~73 μm로 측정되었다.

0.5~10 μm의 흡입성 분진을 50개의 구간으로 구분하여 입도분포를 측정한 결과 표 2에 나타난 바와 같이 거의 일정한 무게분율을 나타내었으며, 전체 시료에 대해 10 μm 이하 분진의 누적분포가 35.69%에 이를 줄 알 수 있었다. 또한, 본 연구에 대상이 되는 분진은 순수한 철이나 산화철이 아닌 oil 성분이 다량 함유되어 피막을 형성하고 있는 분진이 대부분이며, 10 μm 이하의 호흡성 유해 분진의 경우, 그 입자의 중량 및 입경이 매우 경마하므로 수표면에 대해 부유하는 경향이 더욱 크게 된다. 이러한 입경의 입자들이 다양 수표면에서 피막을 형성하므로, 피막 위의 잔여 분진들은 물과 접촉하지 못하고 막 위에 떠있는 형상으로 된다. 그러므로, 이러한 피막폐해를 방지하기 위하여 계면활성제의 첨가는 불가피하며, 첨가하는 계면활성제의 농도를 평가하는 것이 중요하게 된다.

본 연구의 standard sink test는 농도변화에 따른 다양한 분진 입자들이 일정 시간에 따라 용액 내를 이동하는 거리를 측정하여 시간에 대한 이동거리를 wettability로 평가하였다. 그 결과 계면활성제 농도의 증가함에 따라 평균 침강시간이 현저히 감소하는 현상, 즉 wettability가 증가하는 현상을 볼 수 있다.

그림 5에 제시된 바와 같이 계면활성제의 적용은 적용치 않은 경우보다 분진 입자의 wettability가 크게 향상되는데 0.3% SURFYNOL440의 경우 계면활성제를 적용하지 않은 경우보다 대략 16배 정도 평균 침강 시간이 단축되는 것으로 판명되었다. 또한, 국내에서 제조되는 제품보다는 외국산이 더욱 효과적인 것으로 판명되었다. 또한, 표 3과 그림 6에서 보는 바와 같이 ADO#100 농도 0.05%의 경우 계면활성제의 적용효과가 거의 없었으며 0.1% 이상의 농도에서부터 그 효과를 볼 수 있었다. 분진이 침강하는데 소요되는 평균 침강 시간은 농도 0.05%에서 0.3%까지 증가함에 따라 68.8 sec에서 21.1 sec

까지 감소함을 보였으며, 분진을 침강시킨 직후의 단위 시간당 침강 속도는 2.4~1.2 cm/sec의 범위에

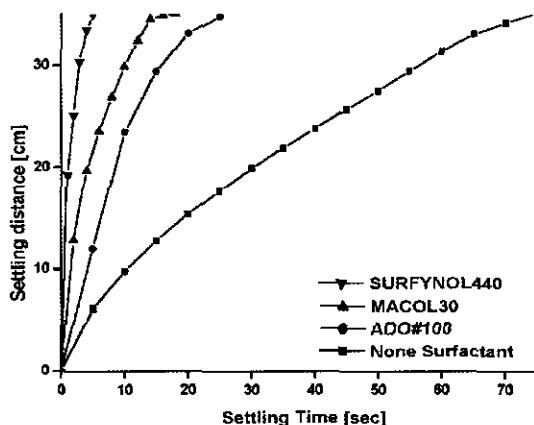


Fig. 5. Settling distance vs. settling time for three different surfactants (0.3% solution) and the water without surfactants.

Table 3. Wetting rate for the different concentrations of surfactant ADO#100.

Conc. [wt%]	Time[sec]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	Ave. Sink Time [sec]
0	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	6.1	9.9	12.7	15.1	17.3	19.3	21.3	23.2	25.1	27.0	28.9	30.9	32.8	34.4	70.5
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	1.2	0.8	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	
0.05	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	6.0	8.5	11.2	14.2	16.6	19.3	21.4	23.3	25.1	26.7	28.9	30.9	32.8	34.5	68.8
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	1.2	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	
0.1	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	8.9	13.9	19.4	24.4	29.1	33.5	35.0	-	-	-	-	-	-	-	32.8
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	1.7	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.3	-	-	-	-	-	-	-	
0.15	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	7.5	13.0	18.2	22.7	27.7	32.5	35.0	-	-	-	-	-	-	-	31.8
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	1.5	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.5	-	-	-	-	-	-	-	
0.2	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	10.2	16.9	22.1	26.5	30.7	34.3	35.1	-	-	-	-	-	-	-	30.8
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	2.0	1.4	1.0	0.9	0.8	0.7	0.2	-	-	-	-	-	-	-	
0.25	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	9.4	15.7	27.2	29.8	34.0	35.3	-	-	-	-	-	-	-	-	28.3
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	1.9	1.3	1.2	1.1	1.0	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.3	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	11.8	25.7	31.6	34.6	35.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.1
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	2.4	2.3	1.2	0.8	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

있었다.

표 4와 그림 7에서 보면 MACOL30의 경우 분진이 침강하는데 소요되는 평균 침강 시간은 농도 0.05%에서 0.3%까지 증가함에 따라 25.5 sec에서 14.7 sec까지 감소함을 보였으며, 분진을 침강시킨 직후의 단위 시간당 침강 속도는 6.5~2.8 cm/sec의 범위로 전술한 ADO#100보다 wettability를 증가될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 농도 증가에 따른 평균 침강 시간의 변화 폭에 있어서 그리 큰 변화를 보이지 않았으며 SURFYNOL440 보다 현저하게 낮은 wettability를 나타낸다고 하겠다.

표 5와 그림 8에서 보는 바와 같이 SURFYNOL 440의 경우 평균 침강시간이 농도 0.05%에서 0.3%까지 증가함에 따라 27.7 sec에서 4.4 sec까지 감소

함을 보여, MACOL30 비교해 볼 때 처음 0.05%의 농도일 때는 유사한 침강속도를 보인 반면, 농도가 증가함에 따라 MACOL30보다 현저하게 증가되는 침강속도를 확인할 수 있었다. 또한, 분진을 침강시킨 직후의 단위 시간당 침강 속도는 19.3~4.0 cm/sec로 이 역시 가장 우수함을 보인다. 그러나, 초기의 0.05%, 0.1%, 0.15%에 대해서는 오히려 MACOL 30에 비해 다소 떨어지는 wettability를 나타내었으나, 농도 0.2%부터 현격한 증가 추이를 보이며, 0.3% 농도에 이르러서는 최단 침강시간을 나타내었다. 이는 그림 9에 나타낸 바와 같이 국산 ADO# 100에 비해 무려 약 4.8배에 이르는 침강율을 나타내며, 이는 분진 표면을 효과적으로 개질시킴으로써 공기 중에 비산하는 부유분진 및 호흡성 분진을 가장 효

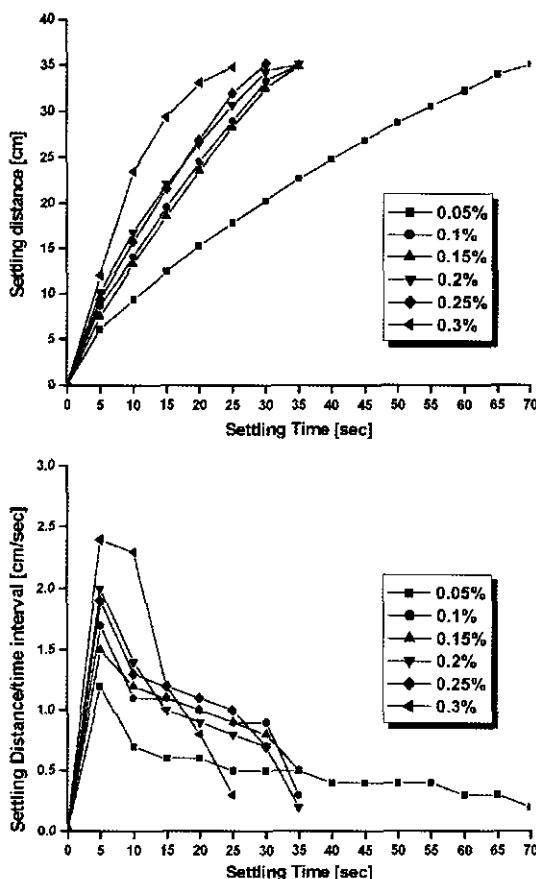


Fig. 6. Wettability for the different concentrations of surfactant ADO#100.

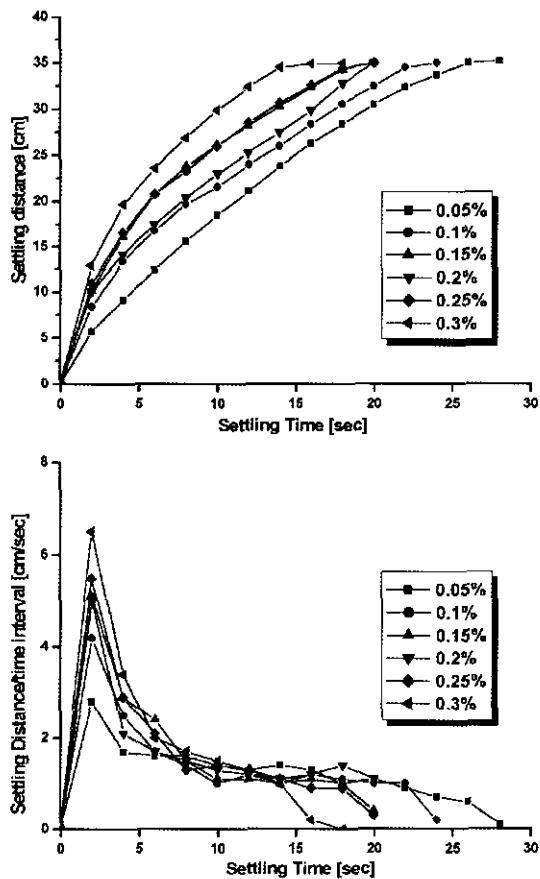


Fig. 7. Wettability for the different concentration for the surfactant MACOL30.

**Table 4. Wetting rate for the different concentrations of surfactant MACOL30.**

Conc. [wt%]	Time [sec]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	Ave. Sink Time [sec]
0.05	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	5.7	9.2	12.4	15.6	18.5	21.2	23.8	26.3	28.4	30.5	32.4	33.7	35.0	35.2	25.5
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	2.8	1.7	1.6	1.6	1.4	1.3	1.4	1.3	1.0	1.1	0.9	0.7	0.6	0.1	
0.1	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	8.4	13.4	16.8	19.7	21.6	24.0	26.0	28.4	30.6	32.5	34.5	35.0	—	—	22.9
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	4.2	2.5	1.7	1.4	1.0	1.2	1.0	1.2	1.1	1.0	1.0	0.2	—	—	
0.15	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	10.2	16.1	20.8	23.8	26.1	28.2	30.3	32.4	34.3	35.0	—	—	—	—	18.9
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	5.1	2.9	2.4	1.5	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	0.4	—	—	—	—	
0.2	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	10.1	14.2	17.5	20.4	23.0	25.3	27.5	29.9	32.8	35.0	—	—	—	—	19.1
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	5.0	2.1	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.2	1.4	1.1	—	—	—	—	
0.25	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	10.9	16.6	20.8	23.3	26.0	28.5	30.7	32.6	34.4	35.0	—	—	—	—	18.7
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	5.5	2.9	2.1	1.3	1.4	1.3	1.1	0.9	0.9	0.3	—	—	—	—	
0.3	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	12.9	19.7	23.6	26.9	29.9	32.4	34.5	34.9	35.0	—	—	—	—	—	14.7
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	6.5	3.4	2.0	1.7	1.5	1.3	1.0	0.2	0.0	—	—	—	—	—	

**Table 5. Wetting ability for the different concentrations of surfactant SURFYNOL440.**

Conc. [wt%]	Time [sec]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	Ave. Sink Time [sec]
0.05	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	—	8.0	—	11.6	—	14.5	—	16.7	—	18.7	20.7	22.8	24.7	26.5	28.4	30.2	31.9	33.5	34.3	34.8	27.7
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	—	4.0	—	1.8	—	1.5	—	1.1	—	1.0	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.4	
0.1	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	—	9.2	—	14.0	—	17.7	—	20.2	—	22.4	24.4	26.4	28.1	30.0	31.6	33.3	34.3	34.9	—	—	23.9
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	—	4.6	—	2.4	—	1.9	—	1.3	—	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	0.5	0.3	—	—	
0.15	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	—	11.0	—	16.9	—	19.7	—	21.9	—	24.0	26.1	28.5	30.4	32.3	34.2	34.7	34.9	—	—	—	20.8
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	—	5.5	—	2.9	—	1.4	—	1.1	—	1.1	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	0.2	0.1	—	—	—	
0.2	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	15.8	20.3	23.4	26.4	28.7	30.9	32.9	34.5	34.9	35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.4
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	15.8	4.5	3.1	3.0	2.3	2.2	2.0	1.6	0.5	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	12.7	18.1	22.9	26.8	29.5	31.9	34.2	34.9	35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.5
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	12.7	5.4	4.9	3.9	2.8	2.4	2.3	0.7	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.3	Ave. cumulative settling distance[cm]	0	19.3	25.2	30.4	33.5	35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.4
	settling distance/time interval[cm/sec]	0	19.3	6.0	5.2	3.1	1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

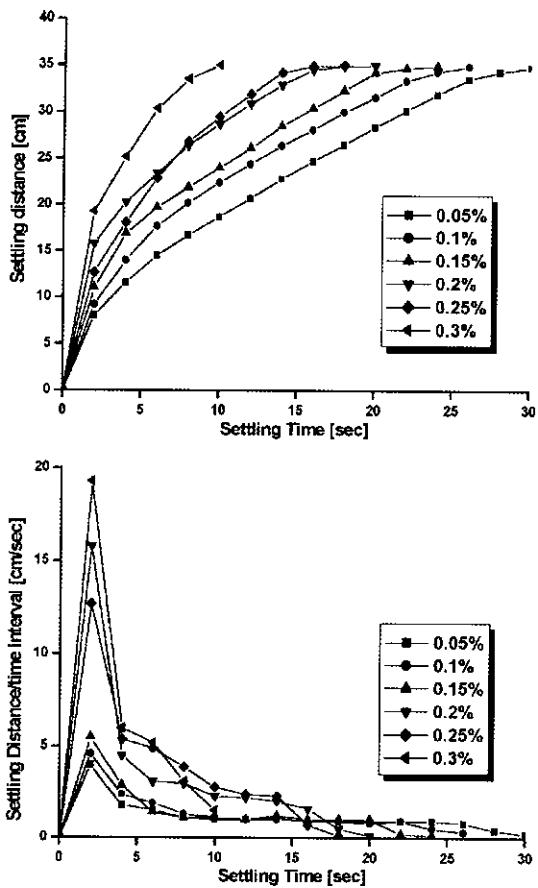


Fig. 8. Wettability for the different concentrations of the surfactant SURFYNOL440.

율적으로 포집할 가능성이 높은 것으로 사료된다. 일반적으로 계면활성제의 농도를 증가시키면 표면장력이 감소하여 wettability를 증가시키나 어느 일정 농도-Critical Micelle Concentration (CMC)-에 다다르면 표면장력의 저하효과도 더 이상 기대하기 어려우며, 계면활성제의 소수기가 분진입자 표면에 모두 흡착되어 포화 상태에 이르러 더 이상의 표면개질 효과를 얻을 수 없다. 따라서, 가장 경제적이고 효율적인 계면활성제 이용을 위해서는 CMC를 파악하여 적절한 적용 농도를 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 그림 9에서 보는 바와 같이 ADO#100의 경우 0.1% 이상에서 부터는 농도 증가에 따른 침강 시간의 뚜렷한 증가를 보이지 않아 CMC에 이르는 양상을 보임을 볼 수 있다.

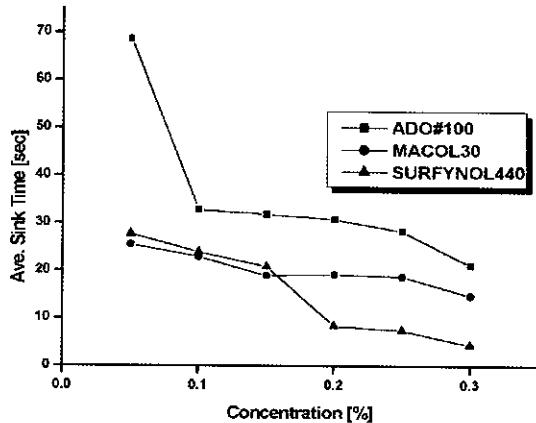


Fig. 9. Comparison of surfactant effect at various concentration.

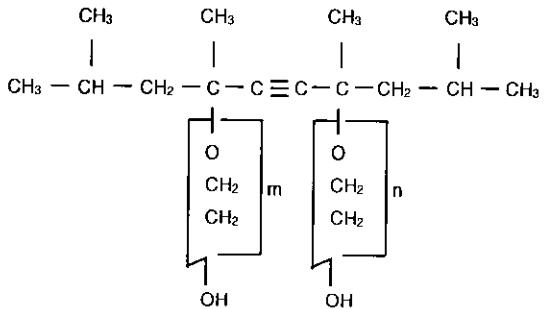


Fig. 10. Chemical structure of the surfynol surfactants.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인천항 고철 하역부두의 비산 먼지 억제를 위한 일환으로 발생분진의 입도분석 및 물성시험을 실시하였으며, 스프레이 시스템에서 계면활성제를 첨가하여 얻을 수 있는 효과를 평가하기 위하여 standard sink test를 실시하였다. 실험을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. XRD 분석법을 이용하여 분진의 성분을 분석한 결과, Goethite ( $\text{FeO(OH)}$ )가 주요성분으로 존재하며 Hematite ( $\text{Fe(OH)}_3$ )와 혼재되어 있고, 불순물로 저온형 석영 (Low-Quart)을 미량으로 함유하고 있음을 알 수 있었다.

2. 분진의 size distribution을 통하여 고철 비산분진의 입경별 분포를 평가하였으며, 호흡성 유해분진

의 상대적 분포도를 파악한 결과 전체적인 분포 패턴과 비교할 때, 중립 이상 조건의 입도가 큰 분진 입자이며, 표면은 매우 불규칙하고, 엉김 상태가 매우 심한 것으로 나타난다. 또한, 일정 배율에서의 분진 입자들의 입도를 측정한 결과 약 0.2~12  $\mu\text{m}$ 의 분포를 보임을 알 수 있었으며, 분진의 입도분석을 정량적인 측정으로 수행한 결과 시료 10%되는 지점의 입도크기는 1.26  $\mu\text{m}$ , 16%지점에서는 2.05  $\mu\text{m}$ , 50%지점에서는 22.16  $\mu\text{m}$ , 84%지점에서는 64.68  $\mu\text{m}$ , 90%지점에서는 73.60  $\mu\text{m}$ , 99%지점에서는 98.52  $\mu\text{m}$ 의 입도크기를 보였으며, 평균입도는 22.16  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 0.5~10  $\mu\text{m}$ 의 흡입성 분진을 50개의 구간으로 구분하여 입도분포를 측정하였으며, 호흡성인 10  $\mu\text{m}$  이하 분진의 누적분포가 35.69%에 이를 줄 알 수 있다.

3. Standard sink test 결과 예상했던 바와 동일하게 계면활성제의 첨가시 입자의 침강속도는 현격히 증가하였다. 계면활성제의 종류에 따라 농도 변화에 민감하게 반응하여, SURFYNOL400의 경우 다른 계면활성제에 비하여 현격한 wettability의 증가를 보였다. MACOL30은 국내 제조품인 ADO#100에 비해서는 높은 wettability를 나타내었으나, 농도 변화의 추이에 대해서는 변화폭이 크지 않아 SYRFYNOL440에 비해서는 월등한 분진의 포집율을 기대할 수 없을 것으로 판단된다. SYRFYNOL440의 경우 ADO#100에 비해 무려 약 4.8배에 이르는 침강율을 나타내어 분진 표면을 효과적으로 개질시킴으로써 공기 중에 비산하는 부유분진 및 호흡성 분진을 가장 효율적으로 포집할 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

4. 아울러 국내 제조 계면활성제의 성능 향상을 위한 지속적인 연구와 관심이 필요하다. 특히, 전술한 바와 같이 SYRFYNOL440이 매우 효과적으로 분진을 포집할 수 있을 것으로 판단됨으로 SYRFYNOL440의 화학적 특성과(ethoxylated acetylenic diol을 기본으로 함)구조(그림 10)와 물성조사를 통하여 얻어낸 주요 성분을 종합하여 연구와 노력을 지속적으로 실행한다면 매우 효과적이면서도 우리의 실정에 맞는 국내산 계면활성제 개발이 가능하리라 판단된다.

본 연구에서 실행한 standard sink test는 model test와 같은 동적 실험에 앞서 수행되는 여러 실험

인자들에 대한 특성 파악을 위한 기초적인 선행실험으로서 매우 중요한 부분을 차지한다. 그러나, 분진 제어를 위한 계면활성제의 적용은 5  $\mu\text{m}$  이하의 미세 분진에 더욱 효과적인 것으로 알려져 있으나 미세 분진 제어에 대한 보다 자세한 효과는 standard sink test와 같은 정적 실험을 통해서는 그 효과를 검증할 수가 없다. 또한, 실제 하역 작업장에서의 계면활성제 이용을 위해서는 보다 높은 포집율과 경제성을 고려하여 현장 적용성에 대한 극대화가 요구되며, 이를 위해서 다양한 계면활성제에 대한 농도별, 친·소수성 벌련성 등의 인자를 고려한 wettability를 평가하는 것이 더욱 바람직할 것이다. 이에 전술한 문제를 해결하기 위하여 모형모델실험(scale model test)를 수행 중에 있으며 이를 통한 실험 결과와 고철 하역장에서의 현장실험이 이루어져 정적인 실험 결과와 종합되어진다면, 비산분진 제어에 직접적인 실효를 거두는데 많은 효과를 주어 작업자들의 환경 개선은 물론 인천항 인근과 주변 지역 대기환경 개선에 많은 효과를 과급할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 1999년도 인하대학교 서해 연안 환경 연구센터(RRC)과 동남합성(주)의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김영식 (1992), 일부분진 작업장에서의 폭로분진의 입경분포와 호흡성 분진비율, 韓國環境科學會誌 1(2), 25~31.
- 정용원 (1995), 인천항에서의 사료용 부사료 비산먼지 규제방안 연구, 해안산업연구원.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (1989), Air Sampling Instruments, ACGIH, Inc., 62~66.
- Brij Raj Mohal (1988) Enhancement of the Wettability of coal Powders Using Surfactants, A Thesis For The Degree Of Doctor Of Philosophy-The Pennsylvania State University The Graduate School Department of Mineral Engineering, 11~22, 53~100.
- Chander, S., A.R. Alaboyun, and F.F. Aplan (1989) On The Mechanism of Capture of Coal Dust Particles by

- Spray, Proc. 4th U.S. Mine Vent. Sympo., SME, Littleton, 193–202.
- Draves, C.Z. and R.G. Clarkson (1931) A New Method for the Evaluation of Wetting Agents, Am. Dyestuff Reporter, 109–116.
- Dumm, T.F. and R. Hogg (1987) Particle Size Distribution of Airborne Dust In Coal Mines, Proceedings Of The 3rd US Mine Ventilation Symposium, 510–516.
- Glanville, J.O. and J.P. Wightman (1979) Actions of Wetting Agents on Coal Dust, FUEL 58, 819–822.
- Kim, J. and J.C. Tien (1993) Enhanced Dust Suppression Using Surfactants, Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium, 523–528.
- Polat, H., Q. Hu, M. Polat, and S. Chander (1993) The Effect and Particle Charge on Dust Suppression By Wetting Agents, Proc. 6th U.S. Mine Vent. Sympo., SME, Littleton, 535–540.
- Walker, P.L., E.E. Peterson, and C.C. Wright (1952) Surface Active Agent Phenomena in Dust Abatement, Ind. and Eng. Chem., 44(10), 2389–2393.