새만금 지역 간척지 및 인근 농경지에서의 비산 및 부유먼지의 지역별, 시기별 모니터링

Monitoring of the Fugitive and Suspended Dust Dispersion at the Saemangeum Reclaimed Land and Neighboring Farm areas

황현섭* · 이인복*,† · 신명호** · 이광야*** · 홍세운* · 서일환* · 유재인* · J. P. Bitog* · 권경석* · 김용희*
Hwang, H-S* · Lee, I-B*,† · Shin, M-H** · Lee, G-Y*** · Hong, S-W* ·
Seo, I-H* · Yoo, J-I* · Bitog, J. P.* · Kwon, K-S* · Kim, Y-H*

ABSTRACT

A study on fugitive dusts was conducted at Saemangeum reclaimed land and the neighboring farm located at the west coast of Korea. After the area was completely reclaimed in 2006, halophyte plants and several windbreak systems were installed. The distributions of suspended dust particle was regularly measured through field experiment. The size of dust source area was also analyzed periodically and then it was determined to be in the following order: Buan > Gimje > Gunsan. The suspended dust which were dispersed to the neighboring areas were significantly affected by the size of the soil particles, wind velocity and wind direction. The results of Big Spring Number Eight (BSNE) experiments also showed that the concentration of the fugitive dust generated from the reclaimed land was reduced remarkably by the presence of halophyte plants. Recently, in 2008, the measured dust concentration rate was decreased by an average of 30.6%. The average dust concentration is expected to decrease further as more areas are being covered by halophyte plants.

Keywords: BSNE; dust dispersion; fugitive dust; reclaimed land; Saemangeum

I. 서 론

새만금 사업은 전라북도 서해안에 방조제를 세워 갯벌을 가용 토지로 전환하는 간척 사업이다. 새만금 방조제는 네덜란드의 Zuiderzee 방조제 (32.5 km)보다 500 m 더 긴 33 km의 길이로서, 세계에서 가장 긴 방조제이다 (Wikipedia, <http://ko.wikipedia.org>). 간척면적 또한 43,000 ha로 세계 최대 면적

으로 계획되었다. 간척지 개발로 인하여 새만금 간척사업의 경우 4개의 방조제가 완공된 2006년 이후부터 침수와 노출이 반복되면서 간척지의 약 28,300 ha가 대기에 노출되었으며, 이 지역의 내부 개발이 진행되면서 지표가 건조하고 식생 피복이 빈약하여 부유 먼지의 발생 가능성이 높아지고 있다. 이로 인하여 인근의 농작물 및 환경에 피해가 우려되고 있다.

실제로 새만금 인근 계화도 사업지구에서는 간척개발공사 중에 비산 및 부유 먼지 발생으로 인하여 조성된 논둑과 수로가 없어지고 메워지는 일이 있었다. 또한, 간척 초기에 비산 및 부유 먼지에 대한 민원 및 피해사례가 발생하고 있으며, 시화지구 포도 재배지에 대한 비산 및 부유 먼지의 염분에 대한 피해사례가 있었다 (Citizens Institute for Environmental Studies, 1998). 국내에서 간척지 토양과 관련하여 이루어진 연구는 주로 토성별 제염효과, 제염과정 해석, 제염용수량 추정, 제염시 용수 중 염분함량의 영향 등의 연구가 이루어져 왔다 (Koo et

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학연구원

** 한국농어촌공사 새만금 사업단 친환경관리팀

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 농어촌개발연구소 수자원연구팀

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4586

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: iblee@snu.ac.kr

2009년 7월 10일 투고

2009년 8월 28일 심사완료

2009년 9월 8일 게재확정

al., 1998). 또한, 이전까지 비산먼지에 대한 연구는 황사의 발생원 추정 및 도시권 미세먼지의 영향을 중심으로 이루어졌으며, 간척지의 경우 화학적 분석을 통한 피해를 중심으로 이루어졌다.

이에 새만금 간척사업이 시작되고 방조제가 완공된 이후 발생할 수 있는 비산 및 부유 먼지의 피해를 예상하여 2005년 기초연구를 시작하여 방조제가 완공된 2006년 이후 새만금 지역의 비산 및 부유 먼지에 관한 연구가 집중되었다 (SPO, 2005). 현재 4년의 연구를 통하여 새만금을 친환경적으로 개발하고 비산 및 부유 먼지로 인한 인근지역의 피해를 최소화하기 위한 연구가 진행되었다. 우선적으로 기상별, 시기별, 지역별 분진 발생량, 높이별 발생량 분석, 실시간 발생량 분석 및 확산범위를 예측하고 확산의 메커니즘을 정확하게 분석하고자 하였다. 또한, 간척지에서 발생하는 비산 및 부유 먼지와 기존 지역의 발생원을 분리하고 간척 사업으로 인한 피해를 최소화하기 위한 기초데이터를 확보하고자 하였다. 현재 Hwang et al. (2008, 2009)은 군산과 김제를 각각 대상으로 비산 및 부유 먼지의 농도 분포를 모니터링한 결과를 소개하였으며, 본 논문에서는 부안지역을 포함하여 새만금 전 지역의 비산 및 부유 먼지의 현황을 시기별, 지역별, 상대적으로 비교분석하였다.

II. 실험 장비와 실험 방법

1. 실험 장비

새만금 지역의 기상 분석은 군산의 옥서면사무소에 설치된 간이기상대와 김제 광활면 농가 옥상에 설치된 간이기상대에서 데이터를 수집하여 분석이 이루어졌다. 또한, 기상청의 군산기상대와 부안의 관측소 자료를 기상청을 통하여 매일 수집하였다. 기상데이터는 매시간 평균 데이터이며, 기상청에서 측정된 데이터를 참고 자료로 이용하였다. 데이터의 수집 항목은 풍향, 풍속, 일사량, 온도, 습도 등이다. 비산 및 부유먼지를 포집하는 방법은 대기 중에 공기를 흡입하여 여과지상에 먼지를 포집하는 방법으로 주로 고용량 포집기와 저용량 포집기가 사용되는데, 다점 동시 측정을 위하여 본 연구에서는 저용량 포집기 (Universal Sample Pump, PCR8X, SKC. USA)를 다수 사용하였다.

발생지 및 측정 지점에서 입자분포를 알아보기 위하여 실시간 입자 측정기 (dust spectrometer, Grimm 1.108, Germany)를 이용하였다. 실시간 입자 측정기는 $0.23 \sim 20 \mu\text{m}$ 입경 범위에서 15채널의 입자 크기별 계수 및 질량농도 측정이 실시간으로 가능하다. 광산란 방식 및 중량측정법으로 동시 측정이 가능하므로 0.001 mg 의 감도로 $0.001 \sim 100 \text{ mg/m}^3$ 의 범위에

대해 측정이 가능하다. 이 실험에서는 1분 간격으로 각 측정 지점에서 10분간 측정을 수행하였다. 높이별 입자 포집기 (BSNE: Big Spring Number Eight)를 이용하여 염생 식물의 조밀도 및 성장률에 따라 측정하였으며, 포집된 시료의 입자 분석은 서울대학교 농생명과학공동기기원 (NICEM)이 보유한 주사식 전자현미경 (SEM)을 이용하여 분석하였다. 더 자세한 측정 장비 및 실험 방법 등에 관한 설명은 Hwang et al. (2008, 2009)에서 소개하고 있다.

2. 실험 방법

새만금 지역의 모니터링은 2006년 9월부터 2008년 12월까지 수행되었으며, 각 측정 지점에는 저용량 분진 포집기를 이용하여 총량 (TSP: Total Suspended Particulate)과 미세먼지 (PM10: Particulate matter less than $10 \mu\text{m}$ as an aerodynamic diameter)를 측정하였다. 측정은 매일 1회씩 군산, 김제, 부안지역의 각 8개 지점(내륙 7지점, 간척지 1지점)에서 시행하였다 (Fig. 1). 이는 새만금 지역이 광범위하며 풍향 및 지형적 특성이 다르기 때문에 동시에 측정함으로써 기상의 영향을 분석하고 각 오염요소의 확산을 정확히 파악하기 위해서이다. 모니터링 대상 지역은 Fig. 1과 같으며, 간척지 경계로부터 반경 6 km 이내이다. 내륙의 측정 지점은 간척지와 기존 육지의 경계지점으로 설치가 용이한 측정 지점 (A0)을 기준으로 하여 내륙으로 주풍방향 (서풍)과 부풍방향 (북서풍)으로 각 2 km 간격으로 주변의 영향이 적고 설치가 용이한 곳을 선정하였으며, 주풍방향으로 각각 A1, A2, A3, 부풍방향으로 B1, B2, B3로 정하였다. 주변의 영향을 적게 받을 수 있는 지역으로 논과 논 사이로 지상에서 약 3m 높이로 별도의 지지시설 없이 전신주에 고정하여 월 1회 낮 시간을 중심으로 하여 약 14시간 포집을 실시하였다 (Photo 1). 간척지 내의 측정 지점은 2008년 5월 기준 염생 식물의 피복률을 고려하여 각 지역의 염생 식물 분포상태를 확인 후 피복률이 낮은 지점을 선정하였으며, 측정은 6월부터 동일한 방법으로 측정하였다. 각각의 포집유량은 흡입 장비의 규격 유량으로 TSP과 PM10 각각 $2 \ell/\text{min}$, $4 \ell/\text{min}$ 로 설정하였다. 측정 방법은 Hwang et al. (2008, 2009)과 동일하며 포집된 먼지는 24시간 이상 건조 후 정확도 $1 \mu\text{g}$ 의 전자저울을 이용하여 입자상 물질 전체의 질량농도를 분석하였다. 또한, 포집장비의 설치를 마친 뒤 동일한 측정들을 대상으로 각 측정 지점에서 포집되는 입자의 입경 분포를 알아보기 위하여 실시간 입경별 농도를 측정할 수 있는 장비 (Dust Spectrometer 1108, GRIMM, Germany)를 이용하여 분석하였다.

○ : Measuring point ☆ : Automatic Weather System

Fig. 1 Measuring points in Saemangeum

Photo 1 Universal sample pumps installed at an electric pole where the measuring point is located

III. 결과 및 고찰

1. 새만금 지역의 비산 먼지의 발생량 분석

2006년부터 2008년까지 새만금 간척지의 먼지 발생원은 Fig.

Fig. 2 Annual change of dust source area

2와 같으며, 이의 면적을 CAD (AutoCAD ver. 2006, USA) 프로그램을 이용하여 계산하였다 (Hwang et al., 2009).

선정된 먼지 발생원은 새만금의 끝막이 공사 이후 드러나 위험을 미칠 수 있는 지역으로 선정되었으며, 만경강 일부 지역은 지하수위가 변화면서 2008년 먼지 발생원으로 추가되었다. 또한 2006년 4월 이후 (끝막이 공사) 위험 지역이 변하고 간척지 경계에서 조금씩 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 시간이 지나면서 갯벌이 드러나 면적이 늘어나게 되고, 이전 연도의 위험지역은 대책의 일환으로 염생 식물 피복이 이루어져 발생이 없는 것으로 가정하여 면적을 계산하였다.

각 지역별 면적 변화를 보면, 김제 지역이 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며, 다음으로 부안, 군산 순으로 나타났다. 2006년 기준으로 각 지역별 변화를 보면, 군산은 점차 증가하고 있으며 2008년의 그 증가율을 보면 약 65 %, 김제는 2007년 감소하여 2008년에 높은 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 2007년과 비교하여 2008년은 약 65 %의 증가율을 보였다. 부안은 매우 많은 부분이 증가한 것으로 나타났으며, 2006년 기준으로 2007년에는 93 %, 2008년에는 97 %가 증가하였다. 이러한 면적 변화는 비산 먼지의 발생 및 피해에 대하여 직접적으로 영향을 미치는 것으로 보인다. 이에 따라 2006년부터 비산 먼지 대책의 일환으로 간척지 내 설치된 시설은 Photo 2와 같다. 방풍 대책 시설로 벚짚 울타리와 염생 식물 피복, 코코넛 섬유 울타리, 모래 언덕 등이 설치되었으며, 이중 염생 식물 피

(a) Complex of halophilous

(b) Fence made of coconuts fiber

Photo 2 Windbreak for dust in Saemangeum area

복은 지속적으로 전 지역에 파종되고 있으며, 생장에 따라 그 효과가 더 클 것으로 판단된다. 울타리의 경우는 염생 식물 피복의 조밀도가 낮은 지역에 임시로 설치되어 운영되고 있다.

현장 모니터링 결과 염생 식물 피복과 내부 방풍 시설물로 인하여 풍식 가능성이 적어졌으며, 군산과 김제의 먼지발생량은 2006년에 비하여 감소한 반면, 부안지역은 다른 두 지역과 비교하여 염생 식물 파종시기가 늦은 것이 발생량을 높이는

원인으로 작용된 것으로 보인다.

Fig. 3에 나타난 것과 같이 2006년부터 2008년까지 각 지역별로 매월 1회, 14회 측정된 결과를 토대로 지역별 PM₁₀ 평균을 계산하였다. 군산지역이 57.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 김제지역이 138.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부안지역이 46.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2007년 PM₁₀의 평균값은 군산이 117.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 김제지역이 91.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부안지역이 87.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2008년은 군산, 김제, 부안의 평균값이 46.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 경향을 보면 군산은 55 % 증가하였다가 2008년에 34 %가 감소하였다. 또한, 김제는 52 % 감소하였다가 11 % 증가하는 경향을 보였다. 부안은 64 % 증가하였으며, 2008년에는 약 6 %의 감소를 보였다.

지역별 비교를 위하여 연도별로 지역별 7개 지점의 PM₁₀ 평균값으로 계산하여 비교하였다 (Fig. 4). 군산의 연도별 경향을 보면 2007년에 가장 크게 나타났고 그 다음으로 2008년, 2006년 순으로 나타났다. 2006년에 낮게 측정된 주된 요인은 2006년 끝막이 공사이후 내부의 수위조절을 위하여 해수가 간척지 내로 유입되면서 토양 수분 및 염도에 변동을 주었으며, 이후 2007년 관리수위가 낮아지면서 예상 먼지 발생원의 면적이 증가하게 되고 높은 풍속으로 풍식에 의해서 침식되는 현상이 나타난 것이 그 요인으로 판단된다. 이는 염생 식물 파종은 염분 비사의 비산 및 부유를 막는 시설로 방풍 효과에 큰 영향을 보이는 것으로 나타났다. 이후 2008년 파종이 끝나고 염생 식물의 생장이 촉진되면서 그 효과를 보이는 것으로 판단된다. 김제지역은 2006년 끝막이 이후 5월에 가장 먼저 파종이 이루어진 곳이다. 김제 지역에 많은 지역이 파종되었으며 그 효과가 2007년도에 나타났다. 2008년도에 조금 높은 농도를 보이는 것은 관리수위 조절로 인하여 면적이 넓어져 나타난 것으로 판단된다. 부안 지역의 연도별 경향을 보면, 군산과 유사하였다. 이 지역은 2008년 초까지 파종이 이루어진 지역이며, 염도가 높아 염생 식물의 생육이 좋지 않았다. 파종 이후

Fig. 3 PM₁₀ Concentration at each measuring point

Fig. 4 Yearly distribution of the mean of PM₁₀ concentration in Saemangeum area

(a) Gunsan

(b) Gimje

(c) Buan

Fig. 5 PM₁₀ Concentration at each measuring point

염생 식물 및 방풍시설의 효과로 감소 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 식물 및 염생 식물의 피복률과 생장이 높아지면서 감소폭이 더 높을 것으로 예상된다.

계절별 결과는 Fig. 5에 3, 4, 5월의 봄과 6, 7, 8월의 여름 시기와 9, 10, 11월의 가을과 12, 1, 2월의 겨울별로 나누어 월별 평균값을 분석하였다. 계절별 농도 분포를 보면, 간척지

Fig. 6 Change of wind direction by time (20 Feb. 2008 in Gimje)

인근에서는 군산지역은 봄이 가장 크게 나타났고 그 다음 가을, 여름, 겨울 순이었으며, 김제지역 또한, 군산과 같은 경향을 보였다. 부안지역 또한 간척지 인근에서 같은 경향을 보였다. 건조시기인 봄과 가을에 농도가 높게 나타났으며, 내륙 지역에서는 각 지역별 차이로 보이는 것으로 나타났다. 이러한 차이들은 지역별, 지점별 기상환경 및 주변 발생원, 특히 봄과 가을 시기에 발생하는 농작업 (모내기, 수확 등) 등이 그 요인으로 판단된다.

연구기간 (3년) 동안 기상 요소 중 풍속과 풍향을 보면, 세 지역의 평균 풍속은 약 2 m/s 이었으며, 각 지역의 우세 풍향은 지역별로 군산이 북풍, 김제가 서풍계/북동풍계, 부안이 북풍으로 나타났다. 그러나 풍향의 경우 언급된 풍향의 빈도가 높았을 뿐 시간에 따른 변화를 보면, 다양한 풍향이 불어온 것을 확인할 수 있다 (Fig. 6). 이는 센서가 설치된 지역에서 포집된 먼지가 새만금 간척지에서 발원한 것으로 단정할 수 없으며, 주변의 영향 요소를 배제할 수 없는 요인으로 작용하였다. 센서의 설치 지역 주변이 대부분 농경지인 것을 고려할 경우 농작업 시기별로 다양한 오염원이 영향을 미친 것으로 판단된다. 예를 들어 봄철 모내기시기에 경작지를 갈아 엮는 로터리 작업과 논두렁 태우기, 가을철 수확작업 등으로 인한 농작업기의 이용으로 발생할 수 있는 요소들이 주변에 많이 산재하고 있다 (Photo 3).

2. 실시간 입자 (Dust Spectrometer) 분석

Table 1은 군산과 김제, 부안의 실시간 입자 측정결과를 평균값을 나타낸 것으로 입경을 10 µm을 기준으로 하여 그 이하를 PM₁₀으로 가정하였다. 포집 펌프를 사용하여 측정한 결과와 유사한 농도 분포를 보이지만, 비율을 보면 PM₁₀의 비율이 높게 측정되었다. 이는 펌프와 필터를 이용한 포집 시에는 상당히 큰 입경의 입자까지 유입이 되지만, 실시간 입자측정기를 이용한 측정에서는 25 µm 이하의 입경까지만 측정이 되기 때

(a) Moving of vehicles on unpaved road (b) Grass burning on the slope of levee in Spring

Photo 3 Dust generation around the research area

Table 1 Mean particle size distribution determined from dust spectrometer in 2008 (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Point		A0	A1	A2	A3	B1	B2	B3	Mean
Gunsan	TSP	104.1	23.4	6.09	30.6	7.94	47.0	29.6	35.5
		45%	14%	5%	20%	6%	25%	19%	19%
	PM ₁₀	128.1	140.9	110.8	118.8	116.5	143.5	130.2	127.0
		55%	86%	95%	80%	94%	75%	81%	81%
Gimje	TSP	104.1	23.4	6.09	30.6	7.94	47.0	29.6	35.5
		45%	14%	5%	20%	6%	25%	19%	19%
	PM ₁₀	128.1	140.9	110.8	118.8	116.5	143.5	130.2	127.0
		55%	86%	95%	80%	94%	75%	81%	81%
Buan	TSP	104.1	23.4	6.09	30.6	7.94	47.0	29.6	35.5
		45%	14%	5%	20%	6%	25%	19%	19%
	PM ₁₀	128.1	140.9	110.8	118.8	116.5	143.5	130.2	127.0
		55%	86%	95%	80%	94%	75%	81%	81%

문이다. 따라서 실시간 입자 측정기의 결과로 계산된 TSP의 양은 저용량 포집기의 결과와 달리 $25 \mu\text{m}$ 이하를 합한 총 질량이라 볼 수 있다. 각 지역별 입경분석의 특징을 보면, 대체로 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 범위와 $25 \mu\text{m}$ 부근의 큰 입자가 높은 농도 분포를 나타내었다. 각 지역의 측정결과는 2008년 9월에 먼지 포집기와 동시에 동일한 지점에서 10분 동안 측정된 것이며 이를 입경별로 나타내었다. 각 지역별로 측정된 결과를 보면 군산의 입경별 분포를 보면, $15 \mu\text{m}$ 이하의 입경들로 구성되어 있으며, 약 $5 \sim 7 \mu\text{m}$ 사이 입경 분포에서 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 하지만, A0 측정지점에서는 $25 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자가 분포하는 것으로 나타났으나 이는 간척지(발생지) 인근에서 발생된 것으로 판단된다. 측정된 결과를 이용하여 Table 1과 같이 계산한 결과 총량(TSP)은 평균 $162.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, PM₁₀의 평균 농도는 약 $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. 이와 같이 상대적으로 PM₁₀의 비율이 높게 나타난 것은 $15 \mu\text{m}$ 이하의 입자들이 많이 분포하기 때문으로 판단된다. 또한, 저용량 포집기

를 이용하여 측정된 결과 PM₁₀의 2008년 평균 농도는 약 $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, Table 1에서 보는 것과 같이 실시간 입자 분석에서는 평균 $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 실시간 측정은 측정 시간에 따라 조금씩 다르며, 측정하는 동안 차량 이동 등과 같이 주변 영향에 매우 민감하게 반응하였기 때문이다.

김제의 경우 전반적으로 낮은 농도 분포를 나타내었으며, Table 1에서 보는 것과 같이 PM₁₀의 농도가 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위로 측정지점에 따라 큰 차이 없이 유사하게 나타났다. 하지만 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자 범위에서 각 측정 지점별로 다른 농도 분포를 보이는 것으로 나타났다. A0 측정 지점에서 $25 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자의 비율이 높게 나타났으며, 간척지에서 인접한 지점에서 큰 입자가 높게 나타나는 것은 군산과 유사하였다. 저용량 포집기를 통하여 분석한 결과 발생 농도 범위는 유사하지만, 측정지점별로는 약간의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 저용량 포집기를 이용하여 측정된 PM₁₀의 2008년 평균 농도는 약 $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 실시간 포집

결과와 비교 시 저용량 포집결과가 약 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 더 높게 측정되는 반면, $25 \mu\text{m}$ 의 측정 지점별 농도는 매우 다양하게 분포하고 있으며, 이는 큰 입자의 특성상 멀리 비산 및 부유가 되지 않을 것으로 미루어 볼 때 각 측정 주변의 지역에서 유입된 것으로 보인다.

부안 지역의 입경 분포의 특징을 보면, 군산과 유사한 분포를 보이고 있다. 전반적으로 $5 \mu\text{m}$ 이하에서 높은 농도 분포를 보이고, $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 범위에서도 높은 농도 분포를 보이는 것으로 나타났다. 또한, $25 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자에서 적은 농도 분포를 보이는 것으로 나타났다. TSP와 PM_{10} 의 비율은 약 93%로 미세먼지의 비율이 높게 나타났다. 계산된 결과를 보면, TSP의 농도는 최저 $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최고 $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보이고 있으며, PM_{10} 의 농도는 $99 \sim 174 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 나타났다. PM_{10} 의 평균농도는 약 $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 Fig. 4의 2008년 평균 농도와 비교하여 유사하게 나타났으나, $10 \mu\text{m}$ 이상의 큰 입자는 거의 측정되지 않아 측정 당시 주변부에서의 영향이 거의 없었던 것으로 판단된다.

3. 간척지 내에서 측정된 높이별 비산 및 부유 먼지의 발생량 분석

BSNE 샘플러를 이용하여 2007년 11월 22일과 11월 23일에 전북 김제 광활면 창전리의 방조제 입구를 이용하여 간척지 경계(방조제 제방)로부터 간척으로 드러난 내부 지형 방향으로 약 1 km 인근에 측정지점을 선정하였다. Fig. 7과 같이 염생 식물의 밀집도가 높고, 많이 자란 지역과 키가 작고 밀집도가 낮은 지역에서 실시하였다. 측정시간은 6시간 동안 높이별 비산 및 부유먼지를 측정하였다. 실험 수행 당시에는 이미 염생 식물의 피복도가 높아졌기 때문에 염생 식물이 피복되지 않은 지역을 찾기 힘들었으므로, 2006년에 염생 식물이 피복되지 않은 지역에서 실험한 결과를 함께 비교하였다 (Hwang et al. 2008). 풍속은 22일 1.3 m/s , 23일 2.8 m/s 정도로 나타났으며 풍향은 서남서풍이 거의 일정하게 유지되었다. 서식밀도가 높은 지역의 염생 식물의 키 높이는 평균 약 55 cm 정도였으며, 서식밀도가 낮은 지역의 염생 식물은 평균 약 40 cm 이하였다. 측정결과를 보면 바닥 면에 가까운 포집 통에서 가장 많은 포집량을 보이고, 위쪽의 포집통일수록 적은 포집량을 나타냈다. 현장에서 포집 후 건조한 여지의 외형에서도 그러한 추세를 알 수 있었으며, 결과는 Fig. 8과 9와 같다.

염생 식물의 피복도에 따라 하층에서 발생량이 감소하며, 높이별 발생 분포가 변화함을 확인할 수 있었다. 측정결과를 보

(a) Location of measuring points

(b) Measuring point A: Thin halophilous area

(b) Measuring point B: Dense halophilous area

Fig. 7 Measuring points for BSNE in the reclaimed land

Fig. 8 BSNE measurement : the halophilous plant density in the Gimje area is high

Fig. 9 BSNE measurement : the halophilous plant density in the Gimje area is low

Photo 4 Analysis of particle size by height 0.35m (left) and 0.40m (right) with magnification of 200×.

면 바닥면에 가까운 포집 통에서 가장 많은 포집량을 보이고, 위쪽의 포집통일수록 적은 포집량을 나타냈다. Photo 4와 같이 지표면에서 가장 가까운 0.35 m 높이에서 포집된 입자들은 크고 불규칙한 편이었으며, 0.40 m 높이에서는 상대적으로 입자의 크기가 작은 편이었다. 포집한 먼지 중 약 79 %가 바닥 근처의 낮은 높이 (40~45 cm 이내)에서 도약 (saltation) 및 포행 (creep)에 의해 이동되는 것으로 파악되었다. 김제 간척지내에서 측정한 BSNE의 측정값은 측정일의 환경조건과 토양 상태가 다르기 때문에 직접적인 비교는 힘들지만, 측정된 기상 환경이 유사하여 그 결과를 비교하였다. 염생 식물의 피복도에

따라 같은 높이에서 측정된 결과를 보면 “피복도가 높은 곳 < 피복도가 낮은 곳 < 피복도가 없는 곳” 순으로 나타났다. 따라서 염생 식물의 피복도에 따라 비산 및 부유 먼지의 억제 효과가 뚜렷이 나타나는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구를 통해서 새만금 지역의 비산먼지 모니터링을 실시하였다. 비산 및 부유먼지 발생을 분기별 모니터링 결과와 BSNE 높이별 분석, 실시간 입자 측정기 등을 이용하여 분석을 실시하였다. 이 자료는 앞으로 공기유동분석 등 공학적 접근을 통한 비산 및 부유 먼지 확산 예측을 위한 기초자료로 활용할 계획이다. 2006년부터 2008년까지 새만금 지역의 모니터링 결과 및 세부 연구수행 내용은 다음과 같다. 2006년 끝막이 공사이후 새만금 인근의 모니터링 결과는 지하수위 조절로 인하여 노출 면적의 변화가 있으며, 이에 발생할 수 있는 비산 먼지의 발생 저감을 위하여 염생 식물과 인공 방풍시설이 설치되었다. 방풍시설의 효과 분석에 관한 결과는 J.P Bitog et al. (2009)을 통하여 발표되었으며, 다양한 종류의 방풍시설의 효율을 분석을 통하여 높은 성능 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 방풍시설의 설계기준 및 방법의 도출에 관한 향상 연구가 필요할 것으로 보인다.

이에 연구 기간 동안 인근에서 측정된 각 지역별의 모니터링의 PM₁₀의 평균 농도는 군산지역이 86.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 김제 지역이 111 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 부안지역이 97.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 새만금 인근 지역에서 2007년과 2008년을 비교하여 보면 평균 약 30.6 %의 먼지 농도가 감소한 것으로 나타났다. 각 지역별 면적 변화를 보면, 김제 지역이 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며, 다음으로 부안, 군산 순으로 나타났다. 2006년 기준으로 각 지역별 변화를 보면, 군산은 점차 증가하고 있으며 2008년의 그 증가율을 보면 약 65 %, 김제는 2007년 감소하여 2008년에 높은 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 2007년과 비교하여 2008년은 약 65 %의 증가율을 보였다. 부안은 매우 많은 부분이 증가한 것으로 나타났으며, 2006년 기준으로 2007년에는 93 %, 2008년에는 97 %가 증가하였다. 이러한 면적 변화는 비산 먼지의 발생 및 피해에 대하여 직접적으로 영향을 미치는 것으로 보인다. 시기별 농도 분포를 보면, 간척지 인근에서는 군산지역은 봄이 가장 크게 나타났고 그 다음 가을, 여름, 겨울 순이었으며, 김제지역 또한, 군산과 같은 경향을 보였다. 부안지역 또한 간척지 인근에서 같은 경향을 보였다. 건조시기인 봄과 가을에 농도가 높게 나타났으며, 내륙 지역에서는 각 지역별 차이로 보이는 것으로 나타났다. 건조시기인 봄과 가을에 농도가 높게 나타났으며, 내륙 지역에서는 각 지역별 차이

로 보이는 것을 나타냈다. 이러한 차이들은 지역별, 지점별 가
상환경 및 주변 발생원, 특히 봄과 가을 시기에 발생하는 농작
업 (모내기, 수확 등) 등이 그 요인으로 판단된다.

실시간 입자 측정기를 이용한 분석을 보면, 부안지역을 제외
한 군산, 김제 지역에서 입경분석의 특징을 보면, 대체로 5~
10 μm 범위와 25 μm 부근의 큰 입자가 높은 농도 분포를 나
타내었다. 그 농도를 비교한 결과 저용량 포집기의 결과와 유
사한 농도 범위를 보이는 것으로 나타났다. BSNE를 이용한 높
이별 분석에서는 낮은 지점에서 농도가 높고 입자 크기가 크게
나타났으며, 포집 위치에 따른 결과에서는 피복도가 낮은 위치
에서 포집된 농도가 높게 측정되는 결과를 보였다. 따라서 염
생 식물의 피복도에 따라 비산 및 부유 먼지의 억제 효과가 뚜
렷이 나타나는 것으로 판단된다.

연구결과를 통하여 비산 및 부유먼지를 포집하고 성분을 분석
하는데 포집의 양을 늘릴 수 있는 채취 방안 등 대책 마련이
필요할 것이다. 또한 추가로 체절지 내에서의 측정이 더 필요
하며, 새만금 체절 이전부터 존재하던 조풍피해에 대하여 조사
하고 이를 분리하는 연구가 필요하다. 체절지 내로부터 비산된
부유물질이 인근 지역의 작물에 입히는 피해 중에는 체절 전부
터 자연적으로 발생해 온 염해가 존재할 것이다. 인근 지역의
과거부터의 조풍피해사계를 조사하고, 농작물의 수확량 및 과
거 토양 성분 분석 자료 등을 조사함으로써, 체절 이전 기존의
조풍피해를 규명해 낼 필요가 있다. 또한 새만금 체절 이후 발
생한 조풍 피해 사례 및 먼지 성분 등을 조사하여 새롭게 발생
된 조풍 및 해염 피해를 분리하여 규명해 낼 필요가 있다.

본 연구는 한국농촌공사 새만금사업단 2006년, 2007년,
2008년 '식생을 이용한 비산먼지 대책을 위한 현장시험연
구'의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Citizens Institute for Environmental Studies, 1998. Contiguity crops damage cause searching examination study at Sihwa lake: final report. (in Korean)
2. Koo, J. W., J. K. Choi, and J. G. Son, 1998. Soil properties of reclaimed tidelands and tidelands of western sea coast in Korea, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 31(2): 120-127 (in Korean).
3. Hwang, H. S., I. B. Lee, M. H. Shin, S. W. Hong, I. H. Seo, J. I. Yoo, and S. K. Lee, 2008. Monitoring of the fugitive and suspended dust dispersion at the reclaimed land and neighboring farms: monitoring in Gunsan. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(4): 39-50 (in Korean).
4. Hwang, H. S., I. B. Lee, M. H. Shin, S. W. Hong, I. H. Seo, J. I. Yoo, and S. K. Lee, 2009. Monitoring of the fugitive and suspended dust dispersion at the reclaimed land and neighboring farms: monitoring in Gimje. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 59-67 (in Korean).
5. J.P. Bitog, I. B. Lee, M. H. Shin, S. W. Hong, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. I. Yoo, K. S. Kwon, Y. H. Kim, J. W. Han, 2009. Numerical simulation of an array of fences in Saemangeum reclaimed land. *Atmospheric Environment* (in Print).
6. SPO (Saemangeum Project Office), 2005. A Study on dispersing dust measures and environmental windbreak development. Korea Rural Community & Agriculture Corporation (in Korean).
7. Wikipedia, <http://ko.wikipedia.org>