간척지 인근 농경지에서의 비산 및 부유먼지 확산 모니터링(I) : 군산 모니터링

Monitoring of the Fugitive and Suspended Dust Dispersion at the Reclaimed Land and Neighboring Farms : Monitoring in Gunsan

황현섭* · 이인복*,† · 신명호*** · 홍세운* · 서일환* · 유재인* · 이승기**

H-S, Hwang* · I-B, Lee*,† · M-H, Shim*** · S-W, Hong* · I-H, Seo* · J-I, Ryu* · S-K, Lee**

Abstract

A study on fugitive dust dispersion was conducted at Saemangeum reclaimed area located at the west coastal area of Jeon-buk Province. Total reclaimed area is 40,100ha developed by building a 33km long sea dike through Gunsan, Gimje, and Buan. (Land: 28,300ha, Fresh Water Lake: 11,800ha) After this area was completely reclaimed in 2006, there has been high possibility of dust generation and dispersion to the neighboring area. The dust generated at the reclaimed land was composed mainly of minerals with high salinity, and it could make harmful effect on crop production as well on to human's health such as eye irritation and respiratory disease. Especially, when those aerosol particles are reached on the leaves of farm crops, the photosynthesis and respiration of the plants can be under restraint resulting in the decrease of agricultural productivity of the nearby farm areas. Furthermore, highly concentrated salty particles can directly damage the leaf cells. In this study, field experiment has been conducted to regularly measure the locally suspended dust particles and analyze how they were dispersed to the neighboring areas. The collected dust particles were analyzed to examine their sizes, concentrations, and components. The SPSS statistical program was also used to separate the dust concentration generated by the reclaimed land from the total dust concentration measured at the measuring locations.

Keywords : Dust dispersion, Fugitive dust, Reclaimed land, Saemangeum

I. 서 론

새만금 간척사업은 1991년부터 시작하여 2011년 까지 20여 년간 계속되는 사업으로서, 방조제의 총 연장이 33km에 달하며, 전북 군산시 · 김제시 · 부안 군에 걸쳐 총 40,100ha가 개발되고 있다. 2006년 4월에 체질이 완공되었으며, 사업지구 안에는 28,300ha의 토지자원이 새롭게 조성되는 세계 최대 규모의 간척사업이다. 새만금 간척사업으로 네 개의 방조제가

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학대학 농업생명과학연구원

** 공주대학교 생물산업공학부 생물산업기계공학전공

*** 한국농촌공사 새만금 사업단 친환경관리팀

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

Fax: +82-2-873-2087

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

2008년 6월 16일 투고

2008년 7월 5일 심사완료

2008년 7월 28일 게재확정

완공된 2006년 이후에는 침수와 노출이 반복되던 간척지 일부가 대기에 노출되었으며, 이 지역의 내부개발이 완료되기 전까지는 지표가 건조하고 식물의 피복이 빈약하여 비산먼지 발생의 가능성이 높을 것으로 판단된다. 이로 인하여 대기 중에 입자상 물질이 다량 존재함으로써, 가시거리를 단축시키고 불쾌감을 줄뿐 아니라 인체나 동물의 건강에 악영향을 줄 수 있다. 특히 식물의 잎에 침착하면 잎의 기공을 막아 동화, 호흡, 증발작용을 방해하는 등 생태계 환경에 악영향을 줄 수 있다 (강공언 등, 2005). 이와 유사한 사례로 2004년 시화지구 간척지에서 비산먼지 발생에 대한 민원제기 사례가 있었던 바, 규모가 훨씬 방대한 새만금에서도 유사한 사례가 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 새만금 간척지에 대한 비산먼지 대책 및 방풍 환경립 조성 연구의 일환으로 이루어진 1단계 연구 결과(한국농촌공사, 2005), 새만금 간척지구의 토성은 사질계가 많아, 대기에 노출될 경우, 풍식에 의한 비산 먼지 발생 가능성이 있어, 풍식 방지 대책으로 방풍림의 조성, 지피 식물의 조기 피복, 지하수 조절에 의한 토양 수분 관리 등의 필요성이 제기되었다.

비산먼지는 대기에 노출된 표면에서 바람의 풍속력(wind shear)에 의한 풍식(wind erosion)으로 발생하거나 인위적인 작업 또는 차량통행에 따른 도로 표면의 먼지 재비산에 의해 발생하는 먼지이다. 새만금에서 발생하는 먼지의 경우 인위적인 발생보다는 장기적인 자연발생원에 가까우며, 이는 기상요인이나 지형적 조건에 따라서 한정된 공간이나 장소에 집적되어 높은 오염도를 나타낼 수 있다. 새만금을 친환경적으로 개발하고 인근지역의 피해를 최소화하기 위하여, 우선적으로 기상별, 시기별, 지역별 분진 발생량 및 확산범위를 예측하고 확산의 메커니즘을 정확하게 분석하여, 이를 토대로 한 간척지 피복관리, 먼지 확산 예측시스템 개발 등 구체적인 대책수립이 요구된다. 그러나 비산먼지 발생 및 이의 확산에 대한 국내 연구는 먼지의 물리·화학적 특성에 관한 연구에 국한되어 있고 먼지의 환경적 유해성이나 재확산 측면에서의 특성에 초점을 맞추어 진행되었으며, 기상 조건 및 지형 조건에 따른 먼지의 확산 현

상에 대한 연구는 부족한 실정이다 (최 등, 1998; 박 등, 2003; 허, 2005). 또한 비산 및 부유먼지의 확산 현상을 연구한 사례들은 대부분 산업 시설의 높은 굴뚝에서 배출되어 확산되는 현상을 다루므로, 발생성분과 배출구가 명확하지 않기 때문에 새만금과 같이 자연적인 지면에서의 발생을 연구하는 데는 적합하지 못하다(Eltayeb and Hassan, 2000). 또한 WRF, MM5와 같은 인공위성 데이터를 활용한 모델들은 종관 규모 또는 그 이상의 영역을 다루는 모델과 비교하여 높은 정확도를 요구하게 되어 새만금 지역의 비산 및 부유먼지의 이동을 다루는데 한계가 있다(Etyemezian, 2004).

공기유동분석 등 공학적 접근을 통한 확산예측 시스템을 구축하기 위한 기초연구로서 본 연구에서는 현장실험을 통하여 새만금 지역에서의 비산 및 부유먼지 모니터링을 2006년 5월부터 2007년 11월까지 실시하였다. 본 논문에서는 새만금 지역 중 군산지역에서 수행된 현장 모니터링을 중심으로 측정 및 분석 결과를 중심으로 서술하였다. 이들 결과를 통하여 새만금 체절지 내에서 발생하는 비산먼지가 기상조건에 발생하는 양을 분석하고 인근 지역에 영향을 미치는 인자를 분석하고자 하며, 추후에 공기유동학적 시뮬레이션 모델의 설계 및 정확도 검증에도 활용할 계획이다.

II. 실험 장비와 실험 방법

1. 실험 장비

대상 지역의 기상을 관측하기 위하여 간이기상대가 설치되었고 인근 지역에서 발생하는 비산 및 부유 먼지를 포집하기 위하여 각종 장비가 이용되었다. 광범위한 새만금지역의 기상 조건을 기상청의 측정 자료에만 의존하는데는 한계가 있으므로, 실험 지역 주변에 추가적으로 간이 기상대를 설치하여 기상인자를 수집하였다. 새만금 지역의 기상 인자 조사용 간이 기상대 (CR10X, Campbell, USA)를 군산시 옥서면사무소 옥상에 설치되었고(Fig. 1), 이를 이용하여 측정 지점의 풍향, 풍속, 일사량, 온도, 습도, 강

우량 등을 매 10분 간격으로 측정하였다. 또한 기상청 산하 군산기상대에서 측정된 데이터를 추가로 활용하여 군산지역의 기상을 분석하였다.

비산 및 부유 먼지 모니터링 장비는 샘플 채취를 위한 저용량 포집기와 장시간 포집으로 펌프의 손상을 막기 위한 케이스로 구성되어 있다(Fig. 2). 약 1m 길이의 PVC 파이프를 이용하여 흡입부를 장비 케이스로부터 분리함으로써, 주변의 지형이나 케이스로 인하여 공기 포집에 영향을 받지 않도록 설치하였다(Fig. 3). 비산 및 부유먼지 포집기(PCR8X, Universal Sample Pump, SKC Inc. USA)는 대기 중에 비산 및 부유 먼지가 여과지상에 흡입되도록 공기를 포집하는 장비로서, 이번 연구에서는 실시간 다점 측정을 위하여 비용이 상대적으로 저렴한 저용량 포집기를 다수 사용하였다.

또한, 발생지점에서의 높이별 입자 농도 및 입자특성을 알아보기 위하여 Fryrear(1986)의 연구결과를

Fig. 1 Weather station installed at Gunsan

Fig. 2 Universal sample pumps equipped with sensors of air temperature and humidity

Fig. 3 Universal sample pumps installed at 3m height

Fig. 4 BSNE and weather station at a reclaimed land of Saemanguem

참고하여 높이별 입자 포집기(BSNE : Big Spring Number Eight)를 자체 제작하였다. BSNE 포집기는 공기유속을 저감시켜 입자상 물질을 포집시킬 수 있는 포집부로 구성되어 있으며, 이 포집부들은 풍향에 따라 무동력으로 회전할 수 있도록 높이별로 부착되어 있다. 체절지 내 지표면 가까이에서 부유 혹은 굴러오는 큰 먼지 입자는 체절지 바로 인근에 있는 주거지나 경작지 등에 큰 피해를 줄 수 있으므로, 높이별로 이를 포집하여 무게 칭량 및 입자형상을 분석하였다. BSNE 실험 시에는 휴대용 간이기상대(Watchdog 2900ET, Spectrum Technologies Inc., USA)를 함께 설치하여 분석을 실시하였다(Fig. 4). 또한, 포집된 시료는 유도결합 플라즈마(inductively coupled plasma: ICP, ICPS-7510, Shimadzu Inc, Japan), 이온크로마토그래피(Ion Chromatograph: IC,

Fig. 5 Locations of measurement at Gunsan area in 2006 and 2007

Fig. 6 Potential area(shown in black color) of dust generation at Saemangeum reclaimed land

DX-500, Dionex Inc, USA), 주사식전자현미경(SEM, JSM-5410LV, JEOL Inc, Japan), 등을 이용하여 화학적 조성 및 입자의 형상을 분석하였다.

2. 실험 방법

군산 지역의 모니터링은 2006년 5월부터 2007년 11월까지 이루어졌으며, 각 측정지점에는 저용량 분진 포집기 2대(TSP, PM_{10})가 설치되었다. 2006년 5

월부터 9월까지의 저용량 포집기 4대를 이용하여 비응도 폐수처리장, 군산시내의 해양수산지방청, 김제의 광활 방조제, 군산 옥서면사무소, 등을 대상으로 매번 4 측정지에서 TSP만을 측정하였으며, 2006년 10월부터 저용량 포집기를 추가로 구입하여 총 7 지점(포집장치 14대)에서 TSP와 PM_{10} 을 동시에 모니터링 하였다 (Fig. 5). Fig. 6(a)의 검게 표시된 부분은 2006년 간척지 내 비산 먼지 발생 위험 지역(먼지발생원)으로 선정된 지역으로서, 2007년까지 연구가

진행되면서 간척지 내의 지표면이 드러난 위험 지역은 계속적으로 변하고 있음을 확인하였다. 이에 공동연구수행기관인 한국농촌공사 새만금 사업단에서는 지표면이 드러난 지역에 염생 식물을 파종하여 비산 먼지 발생을 줄이는 조치를 취하였으며, 이에 2007년의 경우 위험 지역의 면적은 2006년에 비하여 현격히 줄어들었다. Fig. 6(b)에 나타나 있듯이 2006년과 2007년의 위험 지역의 면적이 증가하였으며, 군산과 김제 지역은 면적이 줄어든데 반하여 부안 지역은 발생지의 면적이 확대된 것을 알 수 있다. 연구시기의 염생 식물 파종면적은 새만금의 파종대상 면적의 28%인 403ha가 식생으로 포장되었다.

2006년 5월부터 9월까지 측정 장치는 새만금 간척지 경계 지역으로부터 약 20km 거리의 군산 시가지에 걸쳐 설치하였고 분실 등을 고려하여 각 관공서의 협조를 얻어서 관공서들의 옥상에 설치하였다. 그러나 시가지의 경우 발생하는 먼지의 발생원이 다양하고 고층건물들로 인하여 풍속 및 풍향이 자주 바뀌는 등 실험의 관측이 용이하지 않았다. 2006년 하반기 부터는 실측과 동시에 수행된 확산 예측 시뮬레이션의 결과(한국농촌공사 2006)를 토대로 하여 측정 지점을 선정하였다. 간척지와 내륙의 경계지역 중에 설치가 용이한 군산공항 옆 수라 방조제 독에 측정 지점(A0)을 선정하였고, A0측정지점을 기준으로 하여 내륙으로 새만금 채적 후 간척지를 통과하는 풍계로 인근 지역의 영향을 줄 수 있는 서풍계와 북서풍계로 각각 2km 간격으로 직선거리 약 6km 까지를 대상으로 하였다. 설치 장소 선정 조건으로는 설치가 용이하고, 주변에 먼지 발생 요건이 매우 적으며 또한 자연풍에 영향을 미치는 시설이나 지형이 적은 것을 고려하였다. 측정시간의 정확한 기상조건을 알기 위하여 측정지점 A1과 B1사이에 위치한 군산시 옥서면사무소의 옥상에 기상대를 설치하여 기상관측을 실시함과 동시에, 기상청으로부터 새만금 지역의 30년간의 기상자료를 입수하여 분석하였다. Fig. 6은 군산 지역에서의 비산 및 부유 먼지 농도 측정을 위한 2006년과 2007년의 측정지점을 나타낸 것이다. 설치는 Fig. 3과 같이 전신주를 이용하였으며, 높이는 지상에서 약 3m 높이로 별도의 지지시설

없이 고정하여 월 1회 약 16시(12:00~익일 04:00) 간 포집을 실시하였다. 각 측정 지점에 저용량 포집기를 2대씩 설치하여 총량(TSP)과 PM_{10} 을 각각 포집하도록 하였다. 이때 포집유량은 총량(TSP)과 PM_{10} 은 장비의 권장유량인 2 L/min과 4 L/min로 설정하였다. 포집 필터는 테프론 필터(PTFF)를 사용하였으며, 시료 채취 전·후로 데시케이터에서 48시간 이상 건조 후 정밀도가 $1\mu g$ 의 정밀한 저울로 무게를 칭량하여 농도를 산정하였다. 부유 먼지의 포집과 동시에 각 지점에서 표토를 채집하여 그 성분을 분석하고자 하였다.

또한, 포집된 샘플은 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원(NICEM)에서 SEM 분석(입자 및 형상 분석) 및 시료의 화학분석을 실시하였다. 확보된 성분 데이터를 기초로 하여 통계 프로그램인 SPSS를 이용하여 환경요인, 기상요인, 입자 함유성분 요인 등 각 요인간의 상관관계를 분석하고 이를 통하여 비산 및 부유 먼지의 발생원을 추정 하였다. 포집된 먼지와 표토 성분을 분석하기 위하여 전처리 는 토양화학분석법(농촌진흥청 농업과학기술원 편저)을 따랐다. 음이온 분석시 테프론(PTFF) 필터는 질량농도 분석을 마친 후 초순수 10mL를 가하여 초음파 추출기로 60분간 $45^{\circ}C$ 로 중탕하였다. 추출액은 $0.2\mu m$ 여지로 여과한 후 그 여액을 분석 액으로 사용하여 이온크로마토그래피(Ion Chromatography)를 이용하여 수용성 이온을 분석하였다. 양이온 분석은 비산 먼지입자를 채취한 필터를 100mL 비커에 넣고 1.03몰(mol) 질산과 2.23몰(mol) 염산의 혼합액(1:1)을 30ml 가하였으며, 밀봉막(Sealing film)으로 비커를 덮은 후에 초음파 추출기로 2시간이상 추출 후 여과지(5A)를 이용하여 시료용액을 여과하였다. 그 여액을 유도결합플라즈마분광계(Inductively Coupled Plasma)를 이용하여 분석하였다. 채취된 표토는 그늘에서 건조하고 2mm체로 걸러낸 후 4g를 취하여 1M 암모늄 아세테이트(CH_3COONH_4)을 가하고 1시간동안 중탕한 후 여과지로 여과하여 여과액을 양이온 분석에 사용하였다. 측정 장비로는 유도결합플라즈마분광계(ICP)를 이용하였다. NICEM(농생명공동기기원)에 의뢰하여 분석을 실시하였으며, 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 음이온(Cl^- , SO_4^{2-}) 분석을 실시하였고 유도 결합플라즈마 발광광도법(ICP)을

이용하여 양이온(Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+})의 분석을 실시하였다. 분석된 성분 분석 데이터를 기초로 하여 통계분석프로그램인 SPSS를 이용하여 체절지에서 발생한 먼지를 분리하고 발생원을 추정하였다.

간척지 내의 발생특성을 알아보고 또한 체절지와 내륙의 경계에 위치한 지역에 미치는 영향을 분석하기 위하여 BSNE 포집기를 이용하였다(Fig. 4). 실험은 2006년 11월 군산의 수라방조제와 2007년 11월 김제 방조제 경계선에서 간척지 안쪽으로 약 1km 지점을 선정하여 약 5시간 동안 염생 식물의 피복 상태에 따라서 측정을 실시하였으며, 기상대를 함께 설치하여 측정시간동안 기상관측데이터를 수집하였다. 2006년 실험은 염생식물의 초기 피복단계로 피복이 이루어지고 있는 단계로 피복상태는 고려하지 않았다. 포집높이는 35cm, 40cm, 126cm, 187cm 이었으며, 채취된 입자는 포집량을 측정하여 높이별 농도를 분석하였으며, SEM을 이용하여 입경 및 형상의 차이를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 비산 및 부유 먼지 발생량 분석

비산먼지의 발생과 확산은 기상조건에 가장 지배적인 영향을 받기 때문에 비산먼지의 발생 양상과 확산거동을 정확하게 이해하기 위하여 기상분석이 필수적으로 요구된다. 새만금 지역은 서쪽으로 열려 있는 개활 지형으로 측정 위치에 따라 풍향과 풍속의 변동이 크게 나타난다. 실제 기상청의 관측 자료와 새만금 측정 지점(군산옥서면사무소 옥상)에 설치한 간이 기상대에서 측정한 풍향 및 풍속이 동일 시간에 다르게 나타났다. 옥서면에 설치된 간이 기상대에서 측정한 풍속은 기상청의 자료보다 약 1 m/s 정도 높은 풍속을 나타내었는데, 이는 기상청의 관측 자료가 새만금 지역 내부의 세부 기상을 표현하는 데는 한계가 있음을 나타낸다. 이 이유는 측정 높이는 지상 약 10m로 동일하지만, 옥서면 설치 간이기상대는 해안선에서 더 가깝고 주변에 높은 건물이 없는 개활지이므로 군산기상대와 같이 군산 외곽(금강 하류지역에 위치)에서 측정된 기상데이터와는 상당한

차이를 보였다. 이에 새만금 지역의 영향 조사를 위하여 군산기상대의 관측자료 보다는 옥서면 설치 기상대의 데이터가 대상 지역을 대표할 수 있을 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 비산 및 부유 먼지 모니터링 결과의 분석은 군산 옥서면사무소 옥상에 설치된 간이 기상대의 데이터를 사용하였으며, 기상청의 데이터는 참고자료로 활용하였다. 실험기간 동안 온도는 계절적인 영향으로 하절기에 25~35℃를 보이며, 동절기에는 -5~7℃의 분포를 보였다. 습도는 온도와 마찬가지로 계절적인 영향으로 봄과 겨울철에는 낮은 분포를 보였다. 풍속은 2006년과 2007년 평균 약 3.8 m/s로 우세 풍향은 북풍계를 보였다. 군산 지역의 우세 풍계는 Fig. 6과 Fig. 7과 같으며, 이는 전체 실험기간 동안의 우세풍이다. 군산 지역은 북풍계가 빈도가 가장 많으며 측정일마다 차이는 있지만, 대부분의 북풍과 북서풍계가 유지되는 것으로 나타났다.

Fig. 8에서는 2007년도 비산 및 부유 먼지 모니터링의 분진량 분석 결과를 계절별로 보여주고 있다. 시기는 5월부터 8월까지를 여름으로, 그 이후부터 11월까지를 가을로 가정하여 각각의 평균농도로 그 그래프에 나타내었다. 여름철의 경우는 시기적으로 6월말부터 8월초까지 우기로 주변 토양이 습도가 높고, 인근 농경지에서도 농업 활동이 적은 시기이다. 이로 인하여 그래프에서도 나타나 있듯이 가을철이 여름철의 TSP와 PM_{10} 보다 약 1.4배가 높은 농도를

Fig. 7 Wind distribution in Gunsan during experiment period (Sep.~ Nov., 2006)

Fig. 8 Wind distribution in Gunsan during experiment period (May ~ Dec., 2007)

나타내었다. 이는 가을철의 경우 습도가 여름철에 비하여 낮고 건조하며, 시기적으로 수확작업 등 농업 활동과 같은 주변 요인이 많았던 것이 높은 농도의 원인으로 판단된다. TSP와 PM₁₀의 비율은 여름철은 평균 69%, 가을철은 60%를 나타내었다. 이는 가을철에 토양이 건조하고 농업활동이 많은 시기로 큰 입자의 발생으로 인하여 영향이 많았던 것을 의미하며, 그로 인하여 TSP의 질량 농도가 증가한 것으로 보인다. 또한, PM₁₀ 농도의 경우 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하는 “좋음”, 50~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 “보통”으로 일반적으로 도시 기준으로 발생하는 농도이며, 101~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 “민감한 사람에게 영향”으로 기상청에서는 예보를 하고 있다. 실험지역의 경우는 미세먼지인 PM₁₀은 50~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이로 “보통 및 민감한 사람에게 영향”의 예보단계로 실험지역이 농업지역임을 감안한다면, 도시의 보통 단계와 유사할 것으로 보인다. 또한, 황사시 최고 미세먼지(PM₁₀) 농도는 200~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도가 우리나라에서 측정되고 있다.

Fig. 8은 계절별 농도를 나타낸 결과로 가을철 A0 측정지점에서 최대값을 보였으며, 여름철 A0에서 최소값을 보였다. PM₁₀의 농도는 86.9~114.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 보였고, 가을철 A3 측정지에서 최대값, 여름철 A0에서 최소값을 보였다. Fig. 9와 10은 2007년 10월 30일 측정된 결과로 군산 지역의 지형적 특성이 잘 드러난 결과이다. 측정일 풍향이 다양하게 분포하는 것을 알 수 있다. 각 측정지점별 농도 분

Fig. 9 Seasonal comparisons of dust concentrations at the measuring points in 2007

Fig. 10 Distribution of wind direction on Oct. 30, 2007

포를 보면, 총량(TSP)의 농도는 137~202.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 보이고 있으며, TSP와 PM₁₀의 농도 비율을 보면 평균 약 61%의 비율을 보였다. 측정지점별로 살펴보면 측정일 평균 풍속은 약 1.5m/s이었으며, 전체적으로 TSP 및 PM₁₀ 값은 체절지로부터 멀어짐에 따라서 감소하는 경향을 보였으나, A3에서 높게 측정되는 결과를 보였다. A3 지점은 다른 측정지점에 비하여 지형 상 서쪽에 작은 구릉이 위치하고 있으며, 이에 북서풍이나 서풍계의 바람이 불어올 경우 골짜기 바람이 형성되면서 풍속이 증가하고, 다양한 풍계의 바람의 불어오면서 주변의 비포장 도로, 농기구 창고, 군산시가지 및 북쪽의 주거지역이 측정시 영향을 주었을 것으로 판단되었다. 군산시 외곽의 북서쪽에 위치한 군장산업단지의 영향을 보기 위하여 내초도 입구에 측정지점을 선정하여 측정하였다. 군장산업단지 측정지점의 농도는 주변의 여진상 도

로가 인접해 있고, 북쪽으로 공장들이 있어 다른 내륙 지점들 보다 높게 농도가 측정될 것으로 예상하였으나, 매우 낮은 농도 분포를 보였다. 그 원인을 살펴보면, 측정지점의 남쪽으로 도로와 간척지가 위치하고 있고, 북쪽으로 갈대 공원이 조성되어 있다. 측정과 같이 북풍과 북서풍계가 우세풍일 경우 도로와 간척지의 영향은 적으며, 북쪽에서 발생한 먼지 입자의 갈대공원의 풀과 갈대로 인하여 양이 많이 줄어든 것으로 판단된다. 이에 군장지구의 영향을 보기 위해서는 군장산업단지 경계부에 다점의 측정을 통하여 새만금 지역의 영향과 별도의 실험이 필요할 것으로 판단된다.

Table 1에서 보면 2006년과 2007년의 유사한 시기의 A0지점의 농도변화를 보면 큰 입자가 포함된 TSP의 농도가 감소경향을 보였으며, 풍향이 유사한 시기라 할지라도 계속적으로 변하고 있는 것을 알 수 있다. 각 년의 5월의 보면 2007년에 0.6배 감소하였으며, 주변의 모내기에 같은 농업활동이 시기인 6월에는 유사한 농도를 보였다. 또한, 10월의 경우

Table 1 Monthly concentrations of A0 point

	TSP($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Wind direction
May-2006	125	WNW, SSE
Jun-2006	250	S
Oct-2006	113.7	N
May-2007	74.1	NNW
Jun-2007	57.3	NW
Oct-2007	192.8	NW

Fig. 11 Fugitive dust concentrations of Gunsan area on Oct. 30, 2007

는 풍향이 2006년 북풍에서 2007년 북서풍으로 바뀌면서 체질지를 통과하는 바람의 빈도가 높아 발생량이 증가하는 것으로 판단된다. 전체적으로 A0 지점의 2006년과 2007년 비교시 평균 66.2%의 농도 감소를 보였으며 이는 기상 환경의 영향과 줄어든 발생지의 면적 그리고 염생 식물의 피복으로 인한 것으로 판단된다.

2. 성분 분석 및 발생원 추정

음이온 분석을 위하여 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 의 표준용액을 만들어 이온크로마토그래피를 이용한 음이온 검출시 표준용액으로 사용하였다. 표준 용액에서 검량선 방정식의 R^2 값은 Cl^- 의 경우 $R^2=0.9998$ 이었으며, SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 경우는 각각 $R^2=0.9997$ 와 $R^2=0.99971$ 이었다. 양이온은 유도결합 플라즈마 분광계(ICP)를 사용하여 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 를 분석하였다. Table 2와 3은 측정지점별 표토와 포집의 성분결과를 나타낸 것이다. 해안 지대에서는 해수 성분인 해염 입자가 영향을 미치게 된다. 이중 염화물 이온의 증가에 따라서 식물 및 주변의 부식 등에 영향을 크게 미치게 된다. 염화물 이온¹⁾을 주성분으로 하고 있는 해염 입자의 양은 해안으로부터의 거리, 풍향, 풍속 등에 따라서 달라지지만 해안으로부터 멀리 떨어져 위치할수록 감소하는 경향을 보인다(김기태, 1996).

Table 2 IC & ICP analysis of topsoil components of Gunsan area on Oct.09, 2007 (mmol/kg)

Point	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+
A0	16.28	2.13	6.82	0.66	2.13	0.16
A1	6.84	2.50	5.70	0.38	1.19	2.02
A2	6.62	2.72	4.98	1.05	4.08	1.35
A3	6.55	2.28	5.15	0.51	1.12	0.85
B1	7.56	2.65	5.04	0.81	2.64	0.08
B2	8.14	3.51	8.68	0.99	3.61	1.85
B3	7.77	2.64	5.59	0.82	3.04	0.24
Gun-jang	5.75	1.99	8.14	1.16	4.30	4.40

1) 염화물에서 염소 원자가 전자 한 개를 얻어 생기는 음이온. 'Cl'로 나타냄.

Table 3 IC & ICP analysis of collected dust components of Gunsan area Oct.30, 2007 (mmol/kg)

Point	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺
A0	3.96	0.87	15.84	10.37	69.34	6.89
A1	2.33	0.85	14.78	17.30	46.70	55.87
A2	5.18	0.81	14.77	17.19	46.54	55.50
A3	0.34	0.44	17.15	14.27	18.63	3.87
B1	2.79	0.34	16.34	3.72	25.67	3.12
B2	1.97	1.26	1.52	7.87	30.74	2.71
B3	0.46	0.35	0.79	2.49	54.15	2.68
Gun-jang	1.49	0.81	6.41	6.46	16.31	4.34

해염 인자인 Cl⁻의 농도를 보면 간척지와 인접한 A0 측정지점이 다른 지점에 비하여 높게 나타나고 있으며, 인근 농가가 분포한 내륙지역에는 비슷한 농도 분포를 나타내고 있다.

간척지 인근에서 포집되는 비산 및 부유 분진의 입자 특성을 파악하기 위하여 간척지에서 가장 가까운 지점인 A0 지점에서 채취한 시료의 경우 SEM-EDX 분석에서도 Na⁺와 Cl⁻의 성분이 검출되었으며, 또한 Mg²⁺이 검출된 것으로 보아 해염성분이 NaCl과 MgCl의 성분이 존재 할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 간척지 경계선에 인접한 A0에서 채집된 SEM 분석 시료에서도 Cl⁻과 Na⁺가 검출되었으며, Fig. 11에 SEM-EDX분석 결과를 나타내었다.

대기 중 포집한 먼지의 기원을 추적하기 위하여 포집한 먼지를 간척지 표토와 상관성을 파악하여 보고 해당지역의 표토와 상관 분석을 시도하였다. 그러나 포집된 먼지와 간척지 내 토양과 유사성 및 상관관계가 나타나지 않았다. 이에 각 지점의 표토와의 상관분석과 체질지 경계부에 위치한 A0지점의 비교를 통하여 분석을 실시하였다. 이는 표토가 그대로 부유하지 않기 때문으로 판단된다. A0 측정지점에서 포집된 먼지는 간척지와 인접해 있기 때문에 거의 대부분이 간척지에서 발생한 먼지라 판단할 수 있기 때문에 A0 측정지점에서 포집된 먼지와 비교하였다 (Table 4). 각 측정지점에서 포집한 먼지를 A0 측정지점에서 포집된 먼지와 비교함으로써, 각 측정지점의 먼지가 A0에서 기인한 것인지를 판단할 수 있었다. 2006년 이후로 지속적인 염생 식물 파종이 이루어졌기 때문에, 2006년의 위험지역에 비하여 2007년의 발생원은 현격하게 줄어든 상태이며 또한, 경계부(방조제)로 바다쪽으로 거리가 더 멀어졌다(Fig. 6).

Table 4 Standard interrelation analysis (SPSS) of dust collected at A0 (OCT, 30, 2007)

Point	Pearson correlation coefficient	P-value
A1	0.923	0.009
A2	0.930	0.007
A3	0.802	0.051
B1	0.897	0.015
B2	0.712	0.113
B3	0.876	0.022
Gun-jang	0.411	0.418

* Significant at 5% level.

Fig. 12 SEM-EDX analysis of dusts collected at A0 measurement point (OCT, 30, 2007)

간척지 경계의 A0와 다른 지점간의 상관관계를 분석한 결과, A계열과 B1에서 높은 유의성을 보였다. 이는 측정일 풍향을 보면 일사량이 많은 낮 시간의 풍향을 보면 북풍과 북서풍이었으며, 위험지역(발생원)과 가까울수록 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 12에서와 같이 2007년 비산먼지 발생원을 고려한 전산유체역학 시뮬레이션의 결과와 비교해 보면, 북서풍이 불어 올 경우를 시뮬레이션을 통하여 나타낸 것을 보면 직접적으로 새만금 지역을 통과하여 내륙으로 확산이 이루어 질 때 A0과 A1, B1이 통과되는 지점으로 나타났다. 이는 통계분석(상관관계분석)에서 처럼 A0와 A1, B1이 다른 측정지점과 비교하여 보다 연관성을 가질 수 있음을 의미한다. 화학적 분석 결과를 이용한 통계결과를 보면, A0지점과 연관성이 높게 나타난 측정지점은 A1, A2, B1로 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 북풍의 시뮬레이션 결과는 북풍이 불어올 경우 발생원에서 남쪽으로 측정지점이 위치하고 있지 않아 군산

지역에 복풍이 불어올 경우, 시뮬레이션을 수행해 보면 거의 모든 측정지점이 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Fig. 13).

Fig. 13 3D Computational Fluid Dynamic simulation of Gunsan area with prevailing the wind direction of North-West

Fig. 14 3D Computational Fluid Dynamic simulation of Gunsan area with prevailing the wind direction of North

3. BSNE 측정 및 이의 분석

BSNE 샘플러를 이용하여 2006년 11월 18일에 군산의 수라방조제에서 간척지 내로 약 1km 지점 위치에서 5시간 동안 높이별 비산 및 부유먼지 농도를 측정하였으며, 2007년 11월 23일 염생 식물 파종

후 식생의 밀집도가 낮은 지역과 높은 지역을 선정으로 동일 실험을 수행하였다. 김제 광활면 방조제의 식생 파종이 잘 이루어진 지역을 선정하여, 차량 통행이 용이한 김제 방조제에서 실험을 수행하여 결과를 비교하였다. 측정결과를 보면 바닥면에 가까운 포집통에서 가장 많은 포집량을 보이고, 위쪽의 포집통일수록 적은 포집량을 나타내었다. 포집 후 건조한 여지의 외형에서도 잘 드러났다. 지표면에서 가장 가까운 0.35m에서 포집된 입자들은 크고 불규칙한 편이었으며, 가장 상층부에서 포집된 입자는 입경이 작고 포집량 또한 적었다. 높이별 포집량을 보면 지상 2m 이내 군산 측정점에서 포집한 먼지의 약 77%, 김제 측정점에서 포집한 먼지 중 약 79%가 바닥 근처의 낮은 높이(40~45cm 이내)에서 도약(saltation) 및 포행에 의해 이동되는 것으로 파악되었다. Fig. 15와 같이 측정된 결과를 토대로 경향을 보면, 피복이 없는 경우는 $y = -0.45\ln(x) + 2.060$, 피복도가 낮은 경우는 $y = -0.50\ln(x) + 2.298$, 피복도가 높은 경우는 $y = -0.64\ln(x) + 2.144$ 로 나타났다. 수식의 절편의 경우는 측정당시의 발생량과 관련이 있으며, 측정이 환경조건이 다르기 때문에 경향을 분석하기 위하여 수식의 기울기만을 비교할 경우 피복도가 없는 곳> 피복도가 낮은 곳> 피복도가 높은 곳 순으로 염생 식물의 피복 상태가 높을수록 높이별 비산 먼지의 양은 감소하는 추세를 보이는 것을 알 수 있었다. 그러나 김제, 군산 지역 간척지내에서 측정한 BSNE의 측정값은 측정일의 환경조건과 토양상태가 다르기

Fig. 15 Dust concentrations distribution at measuring heights

때문에 절대 비교는 어려울 것으로 사료된다.

Fig. 16~19는 간척지에서 포집된 입자를 여지 건조 후 주사식 전자 현미경(SEM)을 이용하여 200 배로 확대하여 분석한 이미지이다. Fig. 16을 보면 육안으로 낮은 높이에서 포집된 시료의 입자가 큰 것 알 수 있으며, 바닥 쪽으로 내려갈수록 입자 크기가 크고 불규칙하며 입자 수도 많게 나타났다. 또한, 초순수로 포집이 이루어지기 때문에 Fig. 18과 같이 작은 입자들이 건조과정에서 뭉치는 현상이 나타나기도 하였다.

Fig. 16 Filter by height

Fig. 17 SEM captured particle-size analysis collected at 0.35m height

Fig. 18 SEM captured particle-size analysis collected at 0.4m height

Fig. 19 SEM captured particle-size collected at 1.26m height

Fig. 20 SEM captured particle-size collected at 1.69m height

IV. 결 론

본 연구에서는 새만금 지역 중 군산의 비산먼지 모니터링을 실시하였다. 비산 및 부유먼지 발생은 직접적으로 영향을 미치는 수확이아 농작업, 차량의 통행 등의 자료 수집이 무엇보다 중요한 것으로 분석되었다. 본 연구를 통하여 새만금 지역에서 체절이후 사막화 되어 가는 간척지 내에서 발생하는 먼지를 모니터링을 하였으며, 이 자료는 앞으로 공기유동분석 등 공학적 접근을 통한 비산 및 부유 먼지 확산 예측을 위한 기초자료로 활용할 계획이다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 새만금 지역 중 군산지역의 현장 모니터링 결과를 보면, TSP 농도가 2006년에는 약 $162.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였으나, 2007년에는 약 $107.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 보여 평균 66.2%의 농도 감소를 보였다. 발생지 면적과 염생 식물의 피복이 발생량을 줄이는 영향 인자로 보인다.
2. 모니터링 결과 중 화학성분 분석으로 통하여 내륙의 농경지와 농작물에 영향을 미칠 수 있는 해염 인자인 염화물 이온(Cl^-)의 농도를 보면, 내륙으로 갈수록 감소하는 것으로 나타났다. 간척지에서 가장 가까운 지점과 먼 지점의 농도는 A계열의 경우 약 24.9%의 농도 차이를 보였고, B계열은 약 47.7%의 농도 차이를 보였다.
3. 군산 지역의 기상을 보면 우세풍이 북풍계의 풍계를 유지하며, 측정 기상대와 기상청의 기상데이터가 차이를 보이는 것으로 나타났다. 모니터링 결과 풍향이 다양하게 변하고 주변 지형에 따라 영향을 많이 받는 것으로 확인할 수 있었다.
4. 간척지 내 높이별 측정 결과 바닥에 가까울수록 입경이 크며 농도 또한 높게 측정되었고, SEM

분석결과 입자가 불규칙함을 알 수 있었고, 높이가 높아질수록 입경이 작아지는 경향을 확인 할 수 있었다.

5. 새만금 지역의 비산 및 부유 먼지 모니터링을 통하여 지속적인 발생량 및 화학성분 분석으로 다량의 자료를 확보함으로써 간척지에서 발생된 비산 및 부유 먼지가 미칠 수 있는 영향을 정량화 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 한국농촌공사 새만금사업단 2006년, 2007년 ‘식생을 이용한 비산먼지 대책을 위한 현장시험연구’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. 김기태. 1996. 대기 및 담수 환경에서의 부식 및 방식 대책. 한국부식학회. 부식 및 방식강습회.
2. 최진수, 전찬준, 백성옥. 1998. 구미지역 대기 중 부유분진 농도측정 및 발생원별 기여도 추정. 대한환경공학회지. vol.20. No.4 519-532.
3. 박진수, 김신도, 최금찬. 김중호, 김태식. 2003. 수도권 대기 중 미세먼지의 특성 파악에 관한 연구. 대한환경공학회 2003. 춘계학술연구발표회 논문집, KAIST, 605-607.
4. 한국농촌공사 새만금사업단. 2004. 비산먼지 대책 및 방풍 환경립 조성. 새만금 친환경 조사연구 보고서
5. 허화영. 2005. 인천시 대기 중 미세먼지 농도측정 및 발생원별 기여도 추정에 관한 연구. 인하대학교 대학원. 석사학위논문.
6. 강공연, 이상복. 2005. 호흡기 침착부위에 따른 미세먼지 중 수용성 이온성분의 일별 농도 측정. 한국환경보건학회지, vol 31(5,86), pp.387-397
7. 한국농촌공사 새만금사업단. 2005. 비산먼지 대책 및 방풍 환경립 조성. 새만금 친환경 조사연구 보고서
8. 농업기반공사 농어촌연구원. 2006. 비산먼지 대책 및 방풍 환경립 조성. 새만금 친환경 조사연구 보고서
9. 한국농촌공사 새만금사업단. 2007. 비산먼지 대책 및 방풍 환경립 조성. 새만금 친환경 조사연구 보고서
10. Eltayeb. I. A. and M. H. A. Hassan. 2000. Diffusion of dust particles from a point source above ground level and line source at ground level. geophys. J. int. 142, 426-438.
11. Etyemezian, V.. 2004. Deposition and Removal of fugitive dust in the Arid southwestern United States : Measurements and Model Results. J. Air & Waste Manage. Assoc. vol.54, 1099-1111.
12. Fryrear, D.W. 1986. A field dust sampler. journal of soil and water conservation. March-April. 117-120.