

강변수림에 미치는 대기환경의 영향에 대한 연구 (위성사진과 spectroradiometer를 이용하여)

장은미¹⁾

1. 서론

산업혁명이 시작되면서 지구의 대기환경변화는 크게 이산화탄소의 증가와 微量 오염물질의 증가로 특징 지워 질 수 있다. 급격한 대기환경의 변화는 직접적으로 식물생태계의 종에 따라 차별적으로 영향을 미치거나 간접적으로 기후변동을 유발하여 영향을 미치기도 한다. 이산화탄소는 광합성의 원료가 되므로 이러한 대기의 변화는 식물성장에 긍정적이라고 할 수 있다. 반면에, 미량오염물질은 기체상태로 기공에 장애를 일으키거나, 식물내부에 흡수되어 광합성효율을 저하시키거나, 혹은 산성비를 통해 토양의 산성화로 무기질의 용탈을 일으켜 식물의 생장에 부정적인 영향을 가져왔다고 할 수 있다. 하지만 이 상반된 현상을 동시에 고려하는 연구가 농업, 생태학, 생물지리학, 임학, 식물생리학 어느 분야에서도 미흡하다.

대기오염이 수목생장에 미치는 영향을 평가하는 방법은 인공산성비를 식물 개체에 뿌리거나 chamber속에 식물을 넣고 아황산가스를 분사하는 실험적 방법이 주로 사용되어왔다. 90년대에 와서는 closed chamber에서 open-top chamber로, 초본류와 농작물류보다 목본류를 대상으로, 고농도의 급성분사에서 저농도의 만성분사로, 단일오염원에서 다중오염원을 사용하는 등 실제 대기상황에 가깝게 시뮬레이션 하고자 하는 시도가 있었다.

국내에서는 여천공단 중심지역과 주변지역의 해송의 활력에 미치는 대기오염의 영향을 분석하였으며(이창석: 1993), 임업 연구원에서 도시지역, 공단지역, 산림지역의 대기오염과 강우의 산성화실태를 비교 분석하고, 인공산성비에 대한 수종별 내산성을 조사하고, 암석 모재에 따른 완충작용에 대해 보고한 바 있다 (이수옥 외, 1992). 또한 공단지역의 수목의 나이테를 분석한 결과 공단가동시기부터 생장이 현저히 둔화되었다는 연구보고도 있었다. 서울 주변의 구립공원지역의 식물 추이대의 변화추출에도 NDVI를 사용한 연구에서도 대기오염의 영향이 있으리라

는 추측도 거론되었다 (박종화 외: 1995)

엽색의 변화, 생체량의 감소 등과 같은 가시적인 변화와 더불어 토양산도의 증가에 따른 樹種多様性(biodiversity)의 감소와 병충해저항도의 저하등 식물의 생장에 대기환경의 변화가 부정적이라는 추측이 끊임없이 제기되어 왔다.

이러한 실험적 방법과 더불어 보다 넓은 지역에 걸쳐 장기적인 식생의 활력도를 객관적으로 측정하고자 위성사진과 항공기탑재 분광계(Airborne Visual and Infra-Red Imaging Spectrometer, AVIRS)데이터를 이용하기도 한다 (Westman and Preston 1988, Clark et al. 1994). 근적외선과 적색밴드의 차이 값과 합 값의 비로 표시되는 인덱스인 NDVI(normalized difference vegetation index)는 지형의 사면과 경사도로 인한 절대적 반사값의 차이를 나타내지 않고 식생의 활력도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 공간해상도가 낮은 위성 영상의 NDVI의 경우에는 식생의 계절적 생장에 따른 차이와 식생 밀집도, 토양의 특성을 반영하므로 대기환경변화에 따른 식물의 활력도를 가늠하기에 부적합하다. 하지만 유사한 조건 아래서, 공간해상도가 비교적 높은 위성의 촬영일자와 같은 날에 지상조사를 병행함으로써 유의한 결과를 얻기도 하였다(Westman and Price 1988). 보다 스케일이 작은 범위의 spectroradiometer로 식물의 활력도를 측정하거나 계절적 추이에 따른 spectral signature의 변화를 감지하는 방법을 대기오염원 분사 실험시 엽상에 적용한 경우(Gemmell and Coll 1993)에도 가시적인 엽색의 변화가 관찰되기 이전에 분광특성의 변화를 감지할 수 있었다.

2. 연구목적

본 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째로 다양한 scale에서 여러 종류의 조사방법을 사용하여 이중적인 대기변화 즉 CO2 증가의 비료효과와 대기오염원의 증가라는 억제효과 중 어느 쪽이 더 우세한가를 조사하고자 했다. 둘째로 온실실험과 야외조사시 분광복사계를 이용한 의 분광특성 변화를 비교하고자 했다. 셋째로 야외의 청정지역과 오염지역의 TM 데이터로부터 나온 NDVI값을 비교하고 spectral signature로부터 계산된 NDVI와 비교하고자 하였다.

3. 연구지역 및 연구대상식물

미국 중서부 Kansas city의 화력 발전소 밀집지역의 강변수림(riparian forest) 세 지역과 이 곳으로부터 50 마일 서쪽으로 떨어진 주립공원주변의 강변수림 세 지역을 선택하였다. 지역 선택의 이유로는 이 두 지역은 모두 동부 활엽수림과

장초초원의 점이지대(ecotone)로서 일반적인 경우에는 강수량의 변화에 민감한 식생대를 보이고 있으나 강변의 親水性 버드나무 군락의 경우에는 상대적으로 물수지 변화에 크게 영향을 받고 있지 않는 점이다. 둘째로 동부지역의 경우에는 고도의 변화를 고려해야 하는 어려움이 있으며, 중서부 공업단지의 경우에는 같은 기후조건외의 청정지역을 찾기가 쉽지 않은 데 비해서, 본 지역은 청정지대가 존재하며 고도의 변화가 적어 다른 변수를 줄일 수 있었다. 셋째로 Kansas 는 다른 주에 비해 대기환경관리가 느슨하여 고유황 석탄을 원료로 하는 화력 발전소가 존재하며, 탈황시설도 미비하므로 발전소 주변의 국지적인 대기상태가 고농도의 이산화탄소와 아황산가스 질산화합물이 관찰되었다.

연구대상 식물은 흑버드나무(black willow, *Salix nigra* March.)로 정하였는데 이종은 본 지역의 자생종 교목으로 강변수림의 우점종일 뿐더러 대기중 이산화탄소의 증가에 따른 생체량의 변화와 기공밀도의 변화 등이 보고 된 바 있으며 (Beerling et al.: 1992) 내오염도가 극히 낮은 식물로 분류되었다 (Davis:1976).

4. 연구 방법

(1) 대기환경변수측정

청정지역 세 지역과 오염지역 세 지역의 30년간의 월 평균 기온, 강수량 자료를 분석하여 유의한 차이가 없음을 확인하였다. (K-S test, $p < 0.05$)에 대기의 이산화탄소의 농도는 IRGA(Infrared Red Gas Analyzer CS 301, Vancouver)로 미량 원소는 화학물질로 코팅한 denuder tube를 사용하여 연구 지역에서 1995년 3월부터 10월까지 매달 10이상 채집한 후에 IC(Ion Chromatograph 2000, Washington)를 이용하여 아황산가스 량과 아질산가스 농도를 구하였다. 온실의 chamber 석탄 연소실험의 경우에도 각 chamber의 대기성분도 같은 방법으로 구하였다.

(2) 실험재료 준비와 chamber 디자인

연구지역 여섯 곳으로부터 각각 120 개의 직경 1cm 내외, 길이 20cm 정도의 버드나무줄기를 무작위표본추출방식으로 수집하였으며 유사 동절기처리 (cold treatment) 이후에 루팅 호르몬 처리를 하였다. 인공 분무시설에서 3주간 뿌리가 성장한 후에 4.8 리터 크기의 백색화분에 식재하였다.

온·습도가 조절되는 온실 내에서의 분사실험을 위하여 1m³의 chamber를 plexiglass를 가지고 4개 제작하였으며, 각 chamber는 광합성측정기 probe가 들

여 갈 수 있도록 여러 개의 창문이 설치되어 있고 상위에는 공기의 입구와 출구가 있어 flowmeter가 연결된 튜브로 외부와 연결되게 하였다.

(3) 석탄연소실험과 분광특성 측정

연구지역의 발전소에서 사용되는 고유황 석탄을 매일 10 gram을 5 시간에 걸쳐 고산소환경하에서 1000도씨의 튜브형 furnace에서 연소시켰다. 온도가 낮아진 배출가스에서 미립물질을 제거한 후 다음과 같은 처리를 거친 후, chamber 내로 확산되게 하였다.

- *(처리A) 배출가스 전체,
- *(처리B) 탈이산화황처리 후 배출가스,
- *(처리C) 탈이산화황, 탈이산화탄소 배출가스,
- *(처리D) 배출가스 추가 안함.

Spectroradiometer(Personal spectroradiometer II)를 사용하여 10nm의 인터벌로 300nm에서 850nm까지의 각 chamber의 10개의 식물마다 잎의 분광 에너지 분포를 측정하였다. 이 외에도 연소 중 광합성량, 증산량, 잎의 온도, 대기온도, 상대습도도 CIS310 IRGA 시스템을 이용하여 측정하였다.

(4) 야외실험과 분광특성 측정

청정지역과 오염지역에 각각 open-top chamber를 설치하고 화분(반은 청정지역에서 꺾꽂이한 것이고 반은 오염 지역에서 꺾꽂이한 것임)을 위치시키고 매주 비료와 물을 주어 대기환경 이외의 스트레스를 줄인 상태에서 10월말까지 자라게 하였다. 매달 2회씩 광합성량 등 식물생리학적 특성을 측정하였으며, 분광특성도 같은 기기를 이용하여 측정하였다.

(5) 위성사진분석

1994년도 TM(Thematic Mapper)데이터를 입수하여, Imagine 8.2(Erdas, Atlanta, GA)을 사용하여 최소가감법으로 대기보정을 하고 nearest neighbor resampling 방법으로 1: 25000지형도를 사용하여 지상 기준점을 잡고 위치 보정을 하였다. 각 강변수립의 NDVI를 계산하여 대기환경에 따른 활성도 차이가 존재하는지 조사하였다.

5. 연구 결과

(1) 대기환경변수 결과

오염 지역의 이산화탄소의 농도(398.2 ppm, s.d.=13.7)는 계절별로 시간별로 일정하지는 않지만 평균적으로 청정지역에 비해 높았으며(366.6, s.d.=7.2), 오염지역이 아황산 가스와 아질산가스(0.01, s.d.=0.0012)의 농도도 예상대로 청정지역(0.001 미만)에 비해 높았다. 온실 실험의 결과로는 처리1의 경우 아황산가스의 농도와 이산화탄소의 농도가 평균적 다른 처리에 비해 유의하게 높았으며, 처리2의 경우 이산화탄소의 농도는 처리1 과 유사하게 400 ppm 내외로 처리3 과 처리4(control) 의 경우에 비해 높았다.

(2) 생리학적 관찰 결과

오염지역 수목의 광합성양은 청정지역에서 자라는 수목의 광합성 양과 생육 초기에는 거의 차이가 없었고 8월 이후에는 약간 높았지만, 증산량이 많아 수용효율(Water Use Efficiency)은 상대적으로 낮았다. 온실 실험의 경우, 배출가스를 거르지 않은 경우에는 실험 3일 후부터 일부 葉端에서 탈색화(discoloration)를 관찰할 수 있었고, 다른 처리에 비하여 광합성양은 현저히 줄고 증산 양도 다소 감소하여 수용효과도 낮았다. 처리3이나 처리4에 비해 광합성 양이 처리2의 경우 높으리라 기대하던 이산화탄소의 비료효과는 관찰할 수 없었다. 처리1의 결과를 보면 이산화탄소의 비료효과에 비해 대기 오염원에 의한 생육감소효과가 더 큰 것으로 해석할 수 있다.

Preston (1993)의 주장한, 꺾꽂이의 근원지역에 따라 적응양태가 다르리라는 가설, 즉 오염지역 출신의 나무가 오염상황에서 청정지역 출신의 나무보다 생산력과 수용효과에서 우위에 있으리라는 가설도 기각되었다. 이는 기존 연구의 대상이 변종가능성이 높은 초본 유에 비해 목본유의 적응기간이 더 길기 때문인 것으로 추측된다.

(3) 위성영상 분석결과

Gorham 과 Gordon 에 의해, 구리제련소 주변의 식생변화가 위성영상을 통해 확인 연구된 것(1960)과 Rock 과 Vogelmann(1986) 결과와는 다르게, 본 연구지역의 강변수림의 NDVI값은 청정지역과 오염지역이 통계적으로 다르지 않았다. 오염지역과 청정지역의 흑버드나무의 광합성양, 수용효과, 생체량의 차이에도 불구하고 동종수림내의 NDVI값은 다르지 않았다. 30미터 해상도를 가진 영상으로는 강변수림을 주변 장초초원지와 농경지와의 구별이 가능할 뿐 대기오염에 의

한 활력도까지는 구별할 수 없었다.

(4) 분광복사계자료 분석 결과

야외조사 자료는 계절별로 분광복사계의 분포 곡선이 다르기에 표준편차가 커서, 생육기간 전체 평균은 통계적으로 두 집단이 다르지 않았다. 하지만 오염지역에서 자라는 잎의 근적외선의 반사율은 청정지역에 비해 낮았다. IRGA 분석 결과 잎의 온도가 오염지역의 것이 청정지역의 것에 비해 다소 높게 나타났지만 분광복사의 분포는 크게 차이가 나지 않았다. 온실 실험의 경우에는 처리1의 분포곡선은 다른 처리와 달리 적색밴드대의 함몰이 관찰되지 않는 경우도 있으며 시각적으로는 같은 엽색일지라도 함몰정도도 다르고 근적외선 반사율의 차이도 표준편차가 컸다. 나머지의 처리의 경우는 같은 형태의 분포를 하고 있었다. 즉 이산화탄소의 비료효과를 분광특성에서는 광합성 양에서와 마찬가지로 관찰되지 않았으며(처리2와 처리4의 비교), 아황산가스를 제외한 다른 미세 가스의 영향도 광학적 특성에 별로 영향을 주지 않는다고 할 수 있다 (처리3과 4의 비교).

6. 결론 및 논의

대기환경의 변화에 따른 흑 버드나무의 활력도가 광합성 양과 수용효율, 생체량에 충분히 반영된다면 파괴적인 방법을 사용하지 않고 인공위성 사진분석이나 분광특성을 가지고 그 영향을 평가할 수 있을 것이다. 하지만 이 연구와 같이 현실적 상황과 유사한 환경 조건에서의 실험과 야외조사는 대기환경 변화에 대한 유의한 영향을 증명하기에는 미흡하였다.

위성 영상에서 추출한 NDVI와 잎의 광학특성은 식물의 활력도를 잘 반영하나, 이산화탄소의 증가와 대기오염의 증가라는 이중적 대기환경의 변화를 유의하게 분별해주는 도구로서 유용하다고 하기에는 다른 요인이 너무 많이 작용한다. 인과관계에 근거하여, 모든 조건이 철저히 조절되는 생리학적 실험을 야외에 적용하기란 매우 힘들다. 이와 마찬가지로 실험실에서의 물질의 분광적 특성도 실제 야외에서 그대로 적용하는 데는 많은 어려움이 있다. 계절의 변화, 토양수분상태, 잎의 생육상태 등이 종합적 고려되어야 한다는 원칙은 전에도 제시된 바 있다 (Clark et al.: 1989, Schultz et al. 1993). 이 연구의 결과는 향후 위성에 탑재될 미세분광센서의 응용방안의 한 예를 제시하면서 동시에 위성사진 분석과 더불어 진행이 되어야 할 지상에서의 다양한 속성정보의 추출의 필요성이 제시되었다. 고해상도 위성을 통해 종별 구분이 가능해지고 미세분광정보를 통해 동종간의 환

경영향조건에 대한 다양한 반응을 시공간적으로 분석할 시기에는 NDVI보다 더 세밀한 인덱스가 필요할 것이며, 구현하기 위한 다양한 모듈개발이 병행되어야 할 것이다.

- 참고문헌 -

1. 박종화, 명수정, 박영임 1995, GIS 및 원격탐사기법을 이용한 북한산국립공원 주변부 추이대 탐지. 한국 GIS학회지 3 (2)
2. 이수욱, 장관순 1994, 산성우에 대한 산림생태계의 민감도 및 자정기능 (I)-강우의 산성화도와 식생의 활력도 (TVI)를 중심으로 한국임학회지 83:1
3. 이창석 1993, 대기오염으로 교란된 여천공단의 소나무 군락의 재생. 한국생태학회지 16:3.
4. Beerling, D.J Charlener, W.E. Hundley, b. Pearson, J.A. and Woodward, F.I., 1992 Variation in stomatal densities of *Salix Herbacdea* L. under change atmopsheric CO2 concentration. Phylosophical Transactions of Royal Society of London. B136.
5. Clark, P.N., King, T.V.V. Ager, C., Swayze, G.A 1995 Initial Vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Valley, Colorado using imaging spectrometer data. Proceedings: Summersville Forum'95
6. Davis, D.D and Gerhold, H., 1976, Selection of trees for tolerance of air pollutants. USDA Forest Service General technical report NE 22.
7. Gemmell and Colls 1992, The Effects of sulphur dioxide on the spectral characteristics of leaves *vicia fava* L. International Journal of Remote Sensing 13(2).
8. Westman, W.E. and Price, C.V 1988, Detecting air pollution stress in Southern California vegetation Using Landsat TM band data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54(9).