

대기유래 유황이 농경지 토양에 미치는 영향 스코틀랜드와 U.K의 사례

S. Langan, T. Edwards, D. Bain and M. J. Wilson
Macaulay Land Use Research Institute,
Craigiebuckler, Aberdeen AB9 2QJ, Scotland, UK.

요 약

영국을 비롯한 유럽의 많은 농경지에서는 대기 중으로 아황산가스의 방출량 감소로 유황의 천연공급이 적어짐에 따라 일부 농작물의 수량 감소로 이어졌다. 반대로 자연식생하의 토양에서는 이같은 산성물질의 강하로 산성화가 진행되고 있다. 산성화의 범위와 정도를 규명하기 위하여 산성 물질의 임계부하량 연구를 추진하게 되었다. 이 결과 스코틀랜드의 많은 지역의 토양이 부하량 이상으로 산성물질이 강하되어 식물 및 생태계생존과 다양성을 위협하는 것으로 나타났다.

서 론

대기로부터의 유황공급은 해안파도, 화산폭발, 기타 자연 방출에 의한 미미한 유황공급과 함께 산업화와 연계된 화석연료의 급증된 사용으로 급격하게 증가되었다. 이와 같이 인간활동에 의한 유황의 대기로의 추가 투입은 토지이용 및 이를 수용하는 토양 관리에 따라 여러 가지 반응을 보이게 된다. 집약적으로 관리하는 농경지에서 추가로 공급되는 유황은 대량원소로 작물생산에 유익하게 작용한다.

반대로 조방적인 토양관리 및 자연생태계를 유지할 수 있는 이상으로 공급되는 유황은 토양염기를 과도하게 용탈시켜 토양의 산성화를 유발시킨다. 산성물질에 민감한 대부분의 지역에서는 산성화로 산림의 피해를 주고 수생생태계와 담수 어족에 영향을 끼친다. 이와 같은 피해는 유럽과 북미의 습윤온대 지역에서는 흔히 발생된다. 이런 지역에서는 조방적인 토양관리 및 자연생태에서 대기 유황은 해롭기 때문에 유럽에서는 유황의 대기 방출을 규제하는 정책을 시행하고 있다. 1980년대 초부터 증가되는 대기로의 유황배출 피해를 줄이기 위한 국제적인 인식이 이해되면서

대기오염의 유황 배출을 규제하는 2개의 국제 규약이 발효되었다. 첫째는 유황 의정서로서 1985년 장거리이동 대기오염 국제회의에서 21개국이 서명하였는데 미국, 영국을 비롯한 대부분의 공업국은 이 의정서에 반대하였다.

최근 영국은 EU의 대형 연소공장 관리 지침에 의거 2003년까지 아황산가스 배출을 1980년 기준의 60%까지 줄이는 목표를 설정해 놓고 있다. 영국을 비롯한 몇 개 국가는 이와 같은 절감을 매우 어려운 것으로 이를 이행하기 위해서 보다 집중적인 목표 접근을 위한 논의가 있었다. 1994년 제2차 유황 의정서에서는 임계부하량 연구에 기초하여 목표의 접근 방식에 동의하였다. 여기서는 스코틀랜드의 집약적 농업 지역의 일부 작물에서 유황결핍이 발생한 것은 대기중에서 투입량이 감소한 것과 목표로 설정한 임계부하량의 개념 및 적용성 등이 예로 제시되었는데 이는 유황이 자연생태계에 부정적인 영향을 줄이는 접근 방법에 대해서 주로 다뤘다는데 의의가 크다.

농경지에서의 반응

유럽과 북미의 일부지역에서 대기로부터 유래된 유황 부하를 줄이기 위한 정책으로 자연 유황 공급이 줄어들면서 일부 작물의 생산성이 낮아지고 있다. 동시에 과석과 같이 유황을 함유한 비료가 인산 함량이 높고 유황을 함유하고 있지않은 중과석 등으로 대체되고 있는 경향이다. 유황 결핍 현상이 점차 증가되고 있음은 시용 유황에 대한 수량 반응을 나타내는 작물재배지역 및 작물의 범위에 의하여 확인된다.

대기에서 유래된 유황은 20kg/ha로서 대부분의 작물이 요구하는 양에 상당하다. 유황배출량 감소에 따라 흡착력이 낮은 조립질 토양이 특히 유황의 용탈 및 부족현상이 심하다. 토양 특성과 유황을 특별히 요구하는 작물인 유채의 경우 시용 유황의 수량반응이 뚜렷하게 나타났다. 영국 농경지 토양 조사에서 유황의 부족범위가 조사되었다. 6391 토양지점에서 조사한 자료에 기초한 위험 지표를 분석한 결과, 기상 및 토양자료를 고려한 영국 국토의 15%가 유황부족이 심한 위험군으로 예측이 가능하였고 22%가 위험 중위군으로 분류되었다. 이러한 지역에서는 앞으로 아황산가스 배출 감소에 대한 유황시용 필요가 있을 것이다. 유효 유황의 양을 평가하는 여러 가지 토양검정 방법은 흡착된 황산염의 일부를 제거하는 토양표면 능력에 좌우된다. 이는 대부분 인산을 주축으로한 침출 방법으로 특별히 작물반응위에서 지수가 작성되었다.

대부분의 조립질토양 심토에서의 황산염은 흡착이 이루어질 것이다. 예측의 정확도와 신뢰도는 다른 유황의 잠재 자원의 평가 등에 의하여 제고 될 수 있다. 유황 시비가 추천될 때 일반적으로 ha당 10-20kg 수준이 될 것이다.

Table 1. The relationship between crop response index and extractable soil sulphur (after MISR/SAC,1985).

Available S Index	Very Low	Low	Medium	High	Extremely High
Extractable S (mg S kg ⁻¹)	<4	4-8	8-14	14-30	30+

토양비옥도를 유지하면 대기에서 추가되는 산성 물질에 의한 염기의 지나친 용탈은 매우 적다.

고지대에서의 반응

집약적으로 경작하는 저지대 토양과는 달리, 고지대 토양이 산성화의 민감도를 결정하는 기초과정은 화학적인 풍화속도이다. 토양 광물의 풍화속도는 식물에 의한 흡수 및 토양 중 용탈에 의한 염류 손실을 보충할 수 없다면 산성화 과정은 필연적인 것이다. 스코틀랜드의 많은 지역이 자연과 반자연 식생에서 강우량이 많고 척박한 모재에서 발달된 토양으로 이런 지역에서는 산성화가 자연적으로 진행되고 있다. 대기로부터 산성 물질의 강하는 비교적 짧은 시간에 자연 산성화를 강화시킨다. 임계부하량은 환경에 특히 민감한 요소에 현저하게 해로운 영향이 발생하지 않는한 중정도 또는 그 이상의 오염물질의 양적 평가로 정의된다. 임계부하량선과 XY 기본선으로 생긴 공간 부분에서는 생태계에 피해를 주지 않는다. 그러나 산성 물질이 강하가 축을 따라 증가할 때 임계부하량을 일단 넘어서면 피해가 증가하게 된다. 육상 생태계에서 임계부하량은 토양 산성화가 그곳 생태계의 악 영향을 주지 않는 강하 물질과 일치한다. 이와같은 개념은 산성화에 대한 생태계의 영향을 평가하는 방법으로 수질 또는 토양 측정을 통하여 수생 및 육상생태계의 가능한 피해 지표로 이용된다.

임계부하량 접근 방법

유럽에서 임계부하량의 연구는 이를 산출하는 3개 방향으로 추진되고 있다. 각 방법은 복잡성, 규모, 자료 요구도에 따라 다양하다. 국가적인 규모에서 0수준의

임계부하량은 기존 자료를 활용하여 토양에 따라 정하게 된다. 강하물질의 투입과 지출 자료가 있는데 이는 질량 균형계산 또는 단면 등을 통한 정류상태 모형의 적용으로 가능하다. 생지화학적 변화물에 관한 보다 정밀한 정보는 수준 2에서 MAGIC과 같은 동적 모형을 이용 접근할 수 있다. 위에 제시된 방법 중 후자의 두 접근 방법으로부터 전국적인 지도를 작성하기에 필요한 자료를 수집한다. 대형연구 계획을 착수하기전에 0수준의 접근법을 이용하여 지역적으로 민감한 지역을 선정하는 것

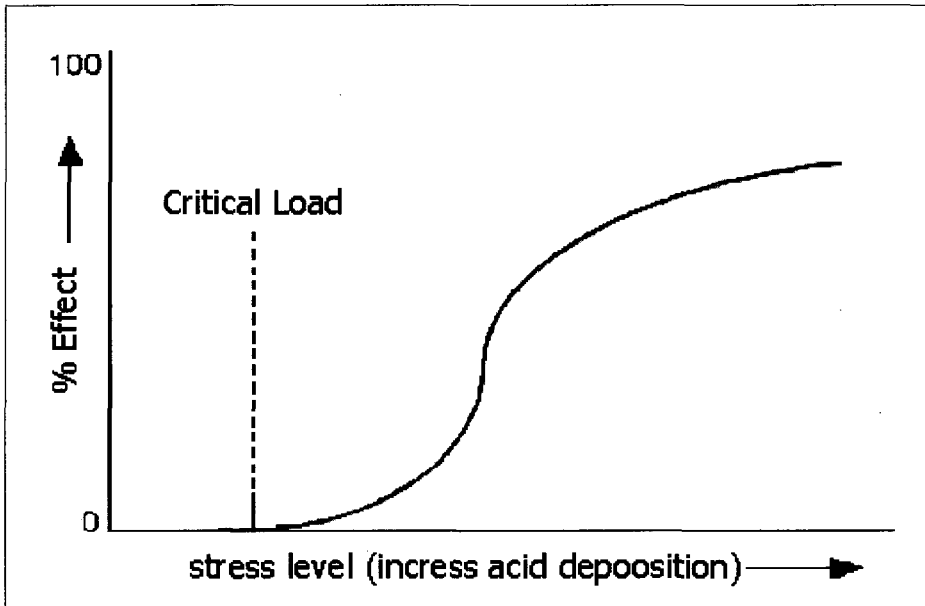


Figure 1. The relationship between acid deposition, critical load and ecosystem damage.

이 우선 필요하다. 임계부하량에 대한 스코크로스토회의에서는 토양에 대한 임계부하량을 5등급으로 분류하였다.

이 등급은 토양이 발달한 모암의 주 광물에 기초하여 구분되었고 염기를 방출하는데 있어 화학적 풍화 속도가 중요한 영향을 준다. 산성화에 가장 민감한 1등급은 규암 또는 K장석이 많은 화강암과 같이 규산 함량이 높은 모암에서 발달된 토양으로 구성되고 민감도가 가장 낮은 5등급은 탄산염 광물을 가진 석회암, 이암 등에서 유래된 토양이고 이 사이에는 사장석을 주로한 화강암 및 화강편마암이 2등급이고, 화강섬록암, 편암, 잡사암 등이 3등급 그리고 반려암 및 현무암이 4등급에 속한다. 광물에 추가하여 토양의 임계부하량은 기타 인자에 의하여 영향을 받는다. 토성, 배수, 또는 토양관리에 의하여 임계부하량이 변화가 있게 된다.

대기로부터 산성물질의 강하를 산정하여 토양의 임계부하량의 초과 지역의 작도가 가능하고 초과 지역의 지도를 만들 수 있다. 이 지도는 산성물질 강하가 임계부하량 이상인 지역을 나타내고 토양 산성화와 생태계 피해가 진행되고 있음을 지적해 준다. 스코크로스터 등급을 스코틀랜드 토양에 적용할 때에는 2개상으로 구분된다. I 상에서는 118개의 토양군이 5등급의 임계부하량 중 하나로 각각 지정되었다. 주로 모암의 광물에 기초하여 구분되었으며 자료는 토양조사 편람 및 맥컬리 토지이용 연구소의 준칙을 적용하여 분석되었다.

Table 2. The critical loads of soils as assessed by empirical estimates of weathering rates (after Nilsson and Grennfelt, 1988).

Skokloster Classes (indicating sensitivity of forest soils to acidification)	Minerals Controlling Weathering	Parent Rock	Critical Load (Keq H ⁺ ha ⁻¹ yr ⁻¹)
1 (most sensitive)	Quartz, K-feldspar	Granite Quartzite	<0.2
2	Muscovite Plagioclase Biotite(<5%)	Granite Gneiss	0.2-0.5
3	Biotite Amphibole (<5%)	Granodiorite Greywacke Schist Gabbro	0.5-1.0
4	Pyroxene Epidote Olivine(<5%)	Gabbro Basalt	1.0-2.0
5 (least sensitive)	Carbonates	Limestone Marl	>2.0

토양 군내에서도 형태적 차이로 인해 임계부하량에 영향을 미쳤다. 토양의 군내 기본 광물학적 임계부하량을 구체화하고 기타 인자를 고려하여 작업의 II 상에서는 580토양 단위의 분석을 통하여 250,000축적의 스코틀랜드 지도를 작성하였다.

토양 단위에 대해서 산성화 민감도에 가장 영향을 주는 속성은 토양특성 및 관리 사항으로 특히 경운깊이, 토성, 지형 및 경사 등이다. 토양의 민감도를 증가시키는 주요 인자는 돌, 암석 등이 많은 급경사에 분포한 얇은 표층으로 토양 발달이 약한

랭거 토양에서 볼 수 있다. 토탄층으로부터 생·지화학적 풍화로 재 충전된 양이온은 충분하지 못해 이런 토양에서 스코크로스터 방법에 의한 산성화 평가는 적절치 못한 것으로 되어 있다. 유기질 토양에 대한 임계부하량 측정은 현재 애버딘 대학에서 수행 중이다. 토탄의 표면 화학은 강우중 양이온 구성에 영향을 받고 이는 임계부하량과 관계가 있을 수 있다. 이런 원리에 의해 전국적인 임계부하량 평가를 채택하므로써 토양 산성화의 위험도와 지리적 범위를 알 수 있게 되고 상이한 생태계의 상대적인 민감도를 현재와 미래 강하에 의한 투입량의 관계에서 알아낼 수 있다. 스코틀랜드에서 스코크로스터 민감도 등급은 표 4와 같다. 스코틀랜드 토양은 염기가 적은 모암에서 발달되어 임계부하량이 연간 ha당 0.5~1.0kg H⁺인 것이 주로 많이 분포한다.

Table 3. Factors modifying the sensitivity of soils to acidic inputs and therefore influencing critical loads (modified from Nilsson and Grennfelt., 1988).

Modifying Factors	Decreasing Critical Load Increasing Critical Load	
	(more sensitive)	(less sensitive)
Types of vegetation	coniferous	deciduous
Elevation/Slope	high	low
Soil Texture	coarse-sandy	fine
Soil Drainage	free	impeded
Soil/Till Depth	shallow	thick

앞으로는 대기에서 유래되는 유황 유입은 최근 국제적인 배출 감소 정책으로 현저하게 감소될 것이다. 그러나 임계부하량과 비교하여 70%의 심한 감량에도 불구하고 산성화에 약한 스코틀랜드 및 유럽의 일부 토양 및 생태계에 아직 영향을 주게 될 것이다. 더욱이 상대적으로 유황이 작물에 증가된 역할과 질소 및 유황의 상호작용등이 이 지역에서 갖는 의미에 대해서는 불분명하다.

Table 4. Areas (percentage) of Scotland with soils in different sensitivity (Skokloster) classes.

Soil Types Arranged by Sensitivity Class	Percentage Cover
1 (most sensitive)	3.3
2	53.4
3	18.7
4	11.5
5 (least sensitive)	3.1
Organic Peat Soils	10.0

결론

대기유래 유황은 유익한 면과 해로운 면이 있다. 효과적인 면은 저지대 농경지에서 집약적 농업으로 유황을 많이 요구하는 작물에서는 대기에서 추가되는 유황의 공급이 유효하게 작용한다. 영국과 유럽서 대기유래 유황의 감소는 유황부족 농경지의 면적을 증가시키게 된 것이다. 반대로 고지대에서의 지속적인 유황의 투입으로 산성화에 민감한 토양 및 식생의 면적과 크기가 결정될 것이다. 고지대 및 저지대 토양에서 대기유래 유황의 차별적인 영향에 대한 많은 연구결과는 한국과 동남아에 적용이 가능할 수 있을 것이다.

References

ApSimon, H.M., Warren, R.F., and Wilson, J.J.N. 1994. The abatement strategies assessment model-ASAM: Applications to reductions of sulphur dioxide emissions scarless Europe. *Atmospheric Environment* 28, 649-663.

Bull, K.R. 1992. Critical loads/levels approach to gaseous emission control. *Environmental Pollution* 69, 109-123

Chaney, K. and Kershaw, C.D. 1986. The Sulphur status of soils from S. E. Scotland. *Research and Development in Agriculture* 3, 39-42.

Cosby, B.J., Wright, R.F., Hornberger, G.M., and Galloway, J.N. 1985 Modelling the effects of acid deposition: assessment of a lumped parameter model for soil water and stream water chemistry. *Water Resources Research* 21, 51-63.

Havas, M. and B.O. Rosseland. 1995. Response of zooplankton, benthos and fish to acidification: an overview. *Water, Air and Soil Pollution*, 85, 51-62.

Hornung, M., Bull, K.R. Cresser, M.C, Ulyett, J., Hall, J.R., Langan, S.J., Loveland, P.J., and Wilson, M.J. 1995. The sensitivity of surface waters of Great Britain to acidification predicted from catchment characteristics. *Environmental Pollution* 87, 207-214.

Langan, S.J, and Wilson, M.J. 1994. Critical loads of acid deposition to Scottish soils. *Water Air and soil Pollution* 74, 1-15.

MISR/SAC 1985 Fertiliser recommendations (revised edition). The Macaulay Institute for Soil Research and Scottish Agricultural College publication 160. ISSN 0308-5708.

MacDonald, D.R. 1994. Diagnosis of S-status in Soils and crops. Unpublished PhD thesis, University of Aberdeen, Scotland.

Matzner, E, and D. Murach. 1995. Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in central Europe. *Water, Air and*

Soil Pollution, 85, 63-76.

Mcgrath, S.P., and Zhao. F.J. (1995) a risk assessment of sulphur deficiency in cereals using soil and atmospheric deposition data. *Soil Use and Management*, 11, 110-114.

Morris, R.J. 1988 sulphur - The fourth major plant nutrient. *Proceedings of an International symposium on sulphur for Korean agriculture*, Seoul, Korea, May, 1988.

Nilsson, J., and Grennfelt, P. (Eds.).1988. Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a workshop held at Skoklosetr, Sweden, March, 1988, Published by Nordic Council of Ministers, Copenhagen

Sverdrup, H. and P. Warfvinge. 1988. Weathering of primary silicate minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model. *Water, Air and Soil Pollution* 38, 387-408

Turnbull, D., Soulsby, C., Langan, S.J. Owen, R. and D.J. Hirst. 1995. Macroinvertebrate status in relation to critical loads for freshwaters. A case study from N.E. Scotland. *Water Air, and Soil Pollution*, 85, 2461-2466.

Ulrich, B. 1994. Effects of acid rain on forest processes. D.L. Godbold and A.Huttermann (Eds.). Wiley Liss Inc.

Withers, P.J.A. and O'Donnell. F.M. 1994. The responses of double-low winter oilseed rape to fertiliser sulphur. *Journal of Food Agriculture*, 66, 93-101.