

중국의 서부 대개발에 따른 중국의 아황산가스 배출량과
주 배출 지역의 변화가 동아시아 황 침적량에 미치는 영향:
RAINS-Asia 모델을 통한 분석

Effects of Regional SO₂ Emission Change due to the Western
Development in China on the Deposition of sulfur in East Asia:
Analysis Using the RAINS-Asia Model

여민주 · 김용표*

이화여자대학교 환경학과

(2004년 9월 23일 접수, 2005년 1월 31일 채택)

M.J. Yeo and Y.P. Kim*

*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University,
11-1 Daehyundong Seodaemungu, Seoul, 120-750, Korea*

(Received 23 September 2004, accepted 31 January 2005)

Abstract

It is widely accepted that, at present, the SO₂ emissions in China are not increasing thanks to the rigorous Chinese government policies. However, with the development of western China, it is possible that the SO₂ emission amounts might increase in regional scale. In this study, changes of sulfur deposition pattern and unprotected ecosystem in east Asia due to the sulfur emission pattern changes in China are studied by using the RAINS-Asia model. Five scenarios have been postulated to understand the effects on east Asia, especially, on Korea and Japan. It is found that the increase of SO₂ emission in western China might increase the total emission in whole China. And the amount of sulfur deposition from western China on east Asia would be higher than those from eastern China. The deposition amount of sulfur species on Asia is 3.2 Mt when SO₂ are emitted from western China only while 2.6 Mt from eastern China only. Generally, Korea and Japan are influenced more by emissions from eastern China than western China. However, if the SO₂ emissions from western China increase by 100% while those decrease by 10% in eastern China compared to the base case, the deposition amount of sulfur species on Korea and Japan would be higher than the base case. The fraction of unprotected ecosystem in Korea and Japan for the base case are 50 and 5%. However, if the emissions from western China increase by 100% while those decrease by 10% in eastern China, the fraction of unprotected ecosystem in Korea and Japan would be 52 and 6%.

Key words : SO₂ emission pattern in China, Western development in China, RAINS-Asia model, Sulfur deposition, Unprotected ecosystem

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3277-2832. E-mail : yong@ewha.ac.kr

1. 서론

중국 정부의 환경정책의 성과로 1990년대 중반을 기점으로 중국의 황 화합물 배출량은 감소하고 있다 (Streets *et al.*, 2000). 그러나 중국 정부가 50년간 계획으로 추진하고 있는 서부대개발로 인해 중국의 대기오염물질 배출 경향 및 그 양에 변화가 있을 가능성이 높다.

이 연구에서는 중국 서부 대개발에 따른 중국의 대기오염물질의 배출 경향 및 침적 경향에 대해서 예측해보고자 한다. 중국의 황 배출량의 변화가 동아시아에 어떠한 영향을 미칠 지에 대해서 알아보기 위하여 IIASA (International Institute for Applied System Analysis)에서 개발한 RAINS-Asia (Regional Air pollution INformation and Simulation) 모델을 이용하였다.

RAINS-Asia 모델을 이용하여 다양한 배출 시나리오에 따른 중국의 황 배출량, 동아시아에의 황 침적량 및 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비에 대한 2010년 추세를 예측하였다. 예측을 통해 중국의 동부와 서부 가운데 어느 지역이 동아시아 전체의 황 침적에 영향을 더 크게 미치는지를 알아보았고,

중국의 동쪽에 위치한 일본과 한국의 경우에는 어느 지역의 영향을 많이 받는지를 알아보았다.

중국 정부의 개발 대상이 되는 서부 지역은 그림 1과 같이 러시아, 인도 등 14개국과 접경하고 있는 12개의 성(省), 자치구(自治區), 직할시(直轄市)이다. 중국 정부는 제7차 5개년 계획이 발표된 1980년대 중반에 동, 중, 서부의 개념을 도입하였고, 네이멍구자치구(內蒙古自治區), 광시장족자치구(廣西壯族自治區)를 비롯한 쓰촨성(四川省), 충칭직할시(重慶直轄市) 등이 이에 포함된다. 동부 지역은 산둥성(山東省), 베이징직할시(北京直轄市), 상하이직할시(上海直轄市) 등 11개 성과 직할시를 포함하며, 나머지는 중부 지역이다(삼성경제연구소, 2003).

2. RAINS-Asia 모델을 이용한 예측

RAINS-Asia 모델은 세계은행과 아시아개발은행의 지원으로 IIASA에서 개발한 아시아에서의 황화합물의 배출, 이동, 침적량 계산과 그에 따른 영향과 제어 비용을 평가하는 모델이다 (Shah *et al.*, 2000). 모델 영역은 북위 55도에서 남위 10도, 동경 60도에서 150도내의 아시아이며, 격자는 1°×1°이다. 1990



Fig. 1. Classification of western, middle, and eastern China.

년부터 2030년까지 결과를 5년 단위로 제공한다. 모델은 EMCO (EMission Cost Module, 황화합물의 배출량 평가), DEP (DEPosition and critical loads assessment Module, 황화합물의 침적량과 임계 부하량 평가), 그리고 OPT (OPTimization Module, 배출 제어를 위한 최소비용평가)로 이루어져 있다 (IIASA, 2000).

EMCO 모듈에서는 연료 종류와 경제 섹터, 그리고 제어 기술 등을 고려하여 연료 사용량과 황 함유율, 그리고 제거율을 이용하여 배출량을 계산한다. DEP 모듈은 3차원의 Lagrangian ATMOS 모델을 이용한 것으로 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 BAT (Branching Atmospheric Trajectory) 모델의 침적 속도 확산 계수, 반응비 등을 아시아에 맞게 수정하여 화학 기작, 이동 성분, 그리고 제거 기작을 고려하여 계산한다 (Arndt *et al.*, 1998; Arndt *et al.*, 1995).

본 연구에서는 RAINS-Asia Project Phase 2를 통해 기능이 향상된 RAINS-Asia 7.52 버전을 사용했고, 배출 시나리오 생성을 위해 EMCO, 그리고 침적량과 배출원 기여도에 따른 분석을 위하여 DEP를 사용하였다.

2.1 배출량 변화 예측 시나리오 및 각 지역별 배출량의 합

모델에서 제공하는 기본 시나리오는 세가지이다. NFC (No Further Control)는 경제활동에 따른 발생량 증가와 이 외에도 1990년대의 배출 제어 정도를 유지하여 제어한다는 가정을 하고 있다. NFC 외에도 최대제어의 경우와 제어가 없는 경우에 대해서도 시나리오를 제공하지만, 중국 환경청의 2000년 황 배출량 자료 (중국 환경청 홈페이지)와 Streets 등에 의해 산정된 2010년의 중국 황 배출량 자료 (Streets *et al.*, 2002)와 비교했을 때, 전자의 경우 배출량이 지

나치게 낮게 산정되는 경향을 보이고, 후자의 경우 배출량이 높게 산정되는 경향을 보이므로 NFC 시나리오를 기본 시나리오로 정하였다. 이 외에 중국 동부 및 서부의 배출량 변화를 전망하여 표 1에서 보듯이 네가지 시나리오를 더 고려하였다.

중국 정부는 서부 지역을 동부 지역만큼 개발할 것을 목표로 삼고 있고, 개발 과정에서 대기오염물질의 배출은 증가할 것이라고 예상할 수 있으므로 시나리오 2부터 시나리오 5까지의 서부 지역 황 배출량은 2010년 NFC 경우의 황 배출보다 증가할 것이라고 가정하였다. 그에 반해, 중국 동부의 경우 배출량 변화에 대해 다양한 의견이 제시되고 있으므로 (김용표, 1999) 증가하는 경우, 그대로인 경우, 그리고 감소하는 경우에 대해 각각 가정하였다. 연료 사용량과 황 함유율, 그리고 제거율인 배출량의 입력 자료는 모델에서 제공되는 NFC의 경우를 그대로 사용하였으며, 배출량의 증감을 위해서는 배출량 결과를 수정하였다. 각 시나리오의 배출량 증가율은 2010년의 NFC 배출량의 50%, 감소율은 33%이다. 증감율에 따라 결과는 달라질 수 있으므로 결과에서, 특히 시나리오 5에 대하여, 다양한 증감율에 대해 분석하였다.

배출량은 연료 사용량과 황 함유율, 그리고 제거율을 이용하여 (1)과 같이 계산한다.

$$Q_i^s(t) = \sum_j \left(\sum_k 2(1 - P_{i,j(k),f}^s(t))(1 - r_{j(k),f}^s) S_{i,f}(t) F_{j(k),f}(t) + Q_i^p(t) \right) \quad (1)$$

여기서 Q_i^s 는 전체 SO_2 배출량, Q_i^p 는 비연소 산업공정에서의 SO_2 배출량, F 는 연료 사용량, S 는 황 함유율, P^s 는 오염제어에 의한 황 제거율, r^s 는 재에 남아 있는 황의 분율, 그리고 t 는 시간, i 는 국가, j 는 경제 섹터, $j(k)$ 는 각 경제 섹터에서의 배출원 영역에서의 배출, f 는 연료 타입을 의미한다 (Kato *et al.*, 1992). 각 배출 시나리오에 따른 중국 전체와 동, 중, 서부의

Table 1. Emission scenarios used in this study.

Scenarios	Scenario 1 (NFC)	Scenario 2 (I. China) ¹⁾	Scenario 3 (E.I.W.I.) ²⁾	Scenario 4 (E.S.W.I.) ³⁾	Scenario 5 (E.D.W.I.) ⁴⁾
Eastern China	NFC	Increase in China	Increase	No Change	Decrease
Western China			Increase	Increase	Increase

¹⁾I. China = Increase in all regions of in China
²⁾E.I.W.I. = Increase in Western China and Increase in Eastern China
³⁾E.S.W.I. = Increase in Western China while Same in Eastern China
⁴⁾E.D.W.I. = Increase in Western China while Decrease in Eastern China.

Table 2. The emission amount of SO₂ in different source areas of China in 2010 for various scenarios.

Emission (Unit: Mt SO ₂ · yr ⁻¹)	Scenario 1 (NFC)	Scenario 2 (I. China)	Scenario 3 (E.I.W.I.)	Scenario 4 (E.S.W.I.)	Scenario 5 (E.D.W.I.)
Whole China	29.5	44.2	40.0	38.3	30.3
Eastern China	11.7	17.6	17.6	11.7	7.80
Western China	9.45	14.2	14.2	14.2	14.2
Middle China	8.30	12.4	8.30	8.30	8.30

2010년 황 배출량은 표 2와 같다.

표 2에서 NFC의 경우인 시나리오 1과 중국 서부의 황 배출은 증가했지만, 동부의 배출은 감소하는 경우인 시나리오 5를 보면, 시나리오 5의 결과가 시나리오 1의 결과보다 배출량이 더 많다는 사실을 알 수 있다. 곧, 중국 동부의 배출량이 감소했음에도 불구하고, 서부 배출량의 증가로 인해 중국 전체의 배출량이 NFC 경우보다 늘어났음을 알 수 있고, 이를 통해 중국의 서부대개발에 따른 황 배출량의 증가는 중국 전체의 황 배출량을 증가시킬 가능성이 큰 것을 알 수 있다. 만일 중국 서부의 배출량이 NFC 경우보다 2.2배 이상 증가하게 되면, 동부의 배출량은 0이더라도 중국 전체의 배출량은 늘어나게 된다.

동부에서의 황 배출량의 감소에는 한계가 있을 것이므로, 앞으로 중국 전체의 황 배출량은 서부에서의 배출에 의해 많은 영향을 받을 것이다.

2.2 시나리오별, 배출원별 침적량 변화

RAINS-Asia 모델의 DEP 모듈을 통해 각 배출 시나리오에 따른 지역별 침적량을 구하고, 배출원 기여도의 결과를 분석하였다.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i c_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{ij} \frac{\partial c_i}{\partial x_j} \right) + R_i + E_i + G_i \quad (2)$$

(2)는 황 침적량을 구하기 위한 물질 수지식으로 여기서 C_i 는 가스상의 농도, U_i 는 속도, x_i 는 공간축, K_{ij} 는 Eddy 확산 계수, R_i 는 화학반응비, E_i 는 배출비, 그리고 G_i 는 질량 전이비를 나타낸다. 액상의 경우에는 Liquid Water Content를 고려하여 동일한 식을 이용한다. 곧, 황 침적량을 구하기 위해서는 속도와 확산 계수 등과 같은 이동 성분, 반응과 관련된 화학기작, 그리고 전식 및 습식 침적의 제거 기작이 고려된다(Armdt *et al.*, 1995).

배출원 기여도란 배출원 가운데 일부만 선택하여,

선택된 배출원에서만 황이 배출되었을 경우의 침적 경향을 살펴보는 것이다. 앞에서 설명한 것처럼 RAINS-Asia 모델에서는 Lagrangian ATMOS 모델을 이용하여 각 배출 위치(대단위 점 오염원이나, 격자)에서의 배출된 황의 이동, 변환, 침적을 각각 추적하므로 배출원 기여도 계산이 용이하다. 중국 동부와 서부 가운데 동아시아 전체와 한국 및 일본에 영향을 많이 미치는 지역이 어느 곳인지를 알아보기 위하여, 아시아 전체에서만 황이 배출되는 경우, 중국 전체에서 황이 배출되는 경우, 중국 동부에서만 황이 배출되는 경우, 그리고 중국 서부에서만 황이 배출되는 경우의 침적 패턴에 대해 알아보았다. 침적량 및 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비를 계산하는 모델의 DEP에는 기상자료와 강우자료, 그리고 배출량 자료가 입력자료로 쓰인다.

표 3은 2010년의 각 시나리오에 대한 침적량을 배출원 기여도에 따라 살펴본 것이다. 모든 시나리오에 대해 중국 서부에서만 황이 배출되는 경우의 침적량이 아시아 전체에서 황이 배출되는 경우 침적량의 30% 가량으로, 아시아 전체에서 황이 배출되는 경우인 20% 가량이 침적되는 중국 동부에서만 황이 배출되는 경우보다 아시아 전체에 침적되는 양이 많다는 사실을 알 수 있다. 이 역시 표 2에서의 결과와 마찬가지로 아시아에 중국 서부의 영향이 크다는 사실을 말해주며, 중국 서부의 배출량의 증가할 경우, 중국 본토를 포함한 아시아 전체의 침적량이 많아질 것임을 시사한다. 또한, 중국 전체에서 황이 배출되는 경우가 아시아 전체에서 배출되었을 경우 침적량의 70% 정도를 차지할 만큼 아시아에서 중국의 배출 기여가 높다는 사실을 보여준다.

그럼 2는 NFC의 경우에 대한 2010년의 배출원 기여도를 보여준다. 중국 서부에서만 배출되는 경우(c)와 중국 동부에서만 배출되는 경우(d)를 비교해보면, 중국 서부에서만 배출되는 경우가 아시아 전체의

Table 3. Deposition amount of sulfur species in Asia from different source areas.

Deposition amount (Unit: Mt SO _x · yr ⁻¹)	Emissions from whole Asia	Emissions from China only	Emissions from western China only	Emissions from eastern China only
Scenario 1 (NFC)	12.6 (100%)	8.35 (67%)	3.21 (25%)	2.63 (21%)
Scenario 2 (I.China)	16.8 (100%)	12.5 (74%)	4.81 (29%)	3.94 (23%)
Scenario 3 (E.I.W.I.)	15.5 (100%)	11.3 (72%)	4.81 (30%)	3.85 (25%)
Scenario 4 (E.S.W.I.)	14.2 (100%)	9.90 (70%)	4.66 (33%)	2.73 (19%)
Scenario 5 (E.D.W.I.)	13.0 (100%)	8.75 (68%)	4.49 (35%)	1.75 (14%)

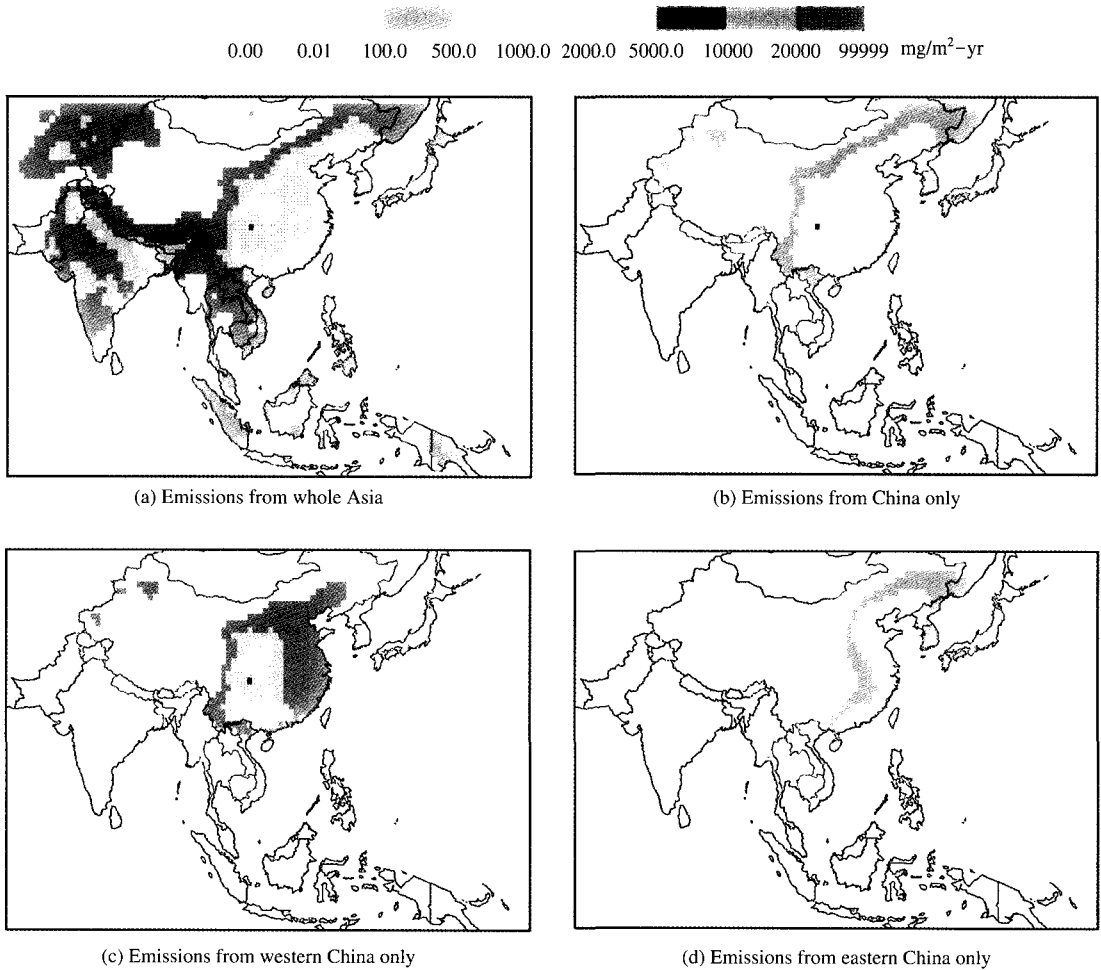


Fig. 2. Deposition patterns of sulfur species in East Asia in 2010 for scenario 1 with emissions from different source areas.

더 많은 지역에 영향을 주고 있다는 사실을 알 수 있다. 그리고 아시아 전체에서 배출되는 경우 (a)와 중국 전체에서 배출되는 경우 (b)를 통해 아시아 전

체에 중국의 영향이 크다는 사실을 확인할 수 있다. 중국의 동쪽에 위치한 한국과 일본의 경우에는 중국 동부에 의한 영향을 많이 받고 있음을 그림 2를

Table 4. Estimated deposition amount of sulfur specie in China, Japan, and Korea in 2010 for different emission patterns.

Deposition amount ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)	Countries	Emissions from whole Asia	Emissions from China only	Emissions from western China only	Emissions from eastern China only
Scenario 1 (NFC)	China	927 (100%)	870 (94%)	341 (37%)	264 (28%)
	Japan	688 (100%)	309 (45%)	33 (5%)	186 (27%)
	Korea	1399 (100%)	491 (35%)	51 (4%)	313 (22%)
Scenario 5 (동감서중)	China	975 (100%)	918 (94%)	477 (49%)	176 (18%)
	Japan	637 (100%)	258 (41%)	44 (7%)	124 (19%)
	Korea	1312 (100%)	405 (31%)	69 (5%)	209 (16%)

통해 확인할 수 있다. 배출원 기여도에 따른 나라별 침적량을 살펴본 표 4에서도, 중국 동부에서만 황이 배출되는 경우에는 일본과 한국에 황이 침적되는 양이 NFC의 경우 아시아 전체에서 배출되는 경우의 20% 이상인데 반해, 중국 서부에서만 황이 배출되는 경우에는 이들 두 나라에 침적되는 양이 아시아 전체에서 배출되는 경우 침적되는 양의 10%에도 미치지 않는다는 사실을 통해 이들 두 나라는 중국 동부에 의한 영향을 많이 받고 있다는 사실을 알 수 있다. 또한 중국 서부에서의 황 배출은 증가하지만 동부에서의 배출은 감소하는 경우인 시나리오 5에서의 침적량이 NFC 경우인 시나리오 1의 침적량보다 낮다는 사실을 통해서도 한국과 일본의 경우에는 중국 동부에 의한 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

그렇지만 중국 서부의 배출량이 크게 증가한다면, 한국과 일본도 중국 서부의 영향을 많이 받게 될 것이다. NFC 경우인 시나리오 1에서 중국 동부의 배출량은 10% 감소하고, 중국 서부의 배출량이 두 배로 증가한다고 가정하여 배출량을 산정하면, 한국과 일본의 침적량은 NFC 경우보다 증가한다. NFC의 경우, 일본의 침적량은 $688 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, 한국의 침적량은 $1300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 인데, 중국 동부의 배출량이 10% 감소하고, 중국 서부의 배출량이 2배 증가할 경우, 이 두 나라의 침적량은 각각 $762 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, $1419 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 로 증가한다.

3. 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비

각 시나리오의 경우에 대하여 중국과 일본, 그리고 한국에서의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비율을 알아보았다. 모델에서는 중국의 면적을 916 만 km^2 ,

일본의 면적을 38 만 km^2 , 그리고 한국의 면적을 9.7 만 km^2 로 고려하는데, 각 국가의 생태계의 면적은 중국의 경우에는 전체 면적의 67%, 일본은 59%, 그리고 한국은 65%이다. 표 5는 전체 생태계 면적 가운데 산성화된 생태계의 면적의 비를 보여준다.

중국 배출량의 변화에 따라 세 국가의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비율도 바뀐다는 사실을 알 수 있다. 중국전체의 황 배출량이 증가한다고 가정할 시나리오 2의 경우에 세 국가의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비율이 가장 많이 증가하는데, 중국의 경우에는 2% 가량의 변화가 있고, 일본의 경우에도 2% 가량의 변화가 있으며, 한국의 경우에는 8% 가량의 변화가 있다. 이 변화율을 생태계 면적으로 고려하면 증가된 산성화된 생태계의 면적을 구할 수 있는데, 중국의 경우에는 12 만 km^2 , 일본은 4500 km^2 , 그리고 한국은 5000 km^2 이다. 중국의 동부와 서부의 황 배출량이 모두 증가한다는 가정을 한 시나리오 3과 중국 동부의 황 배출량은 그대로이지만, 서부의 배출량은 증가한다는 시나리오 4의 경우에도 비율이 중국의 경우에는 1~2% 가량 증가하였고, 일본의 경우에는 0.5~1.5% 가량 증가하였으며, 한국의 경우에는 2~6% 가량 증가하였다. 비율은 0.5~6%로 낮더라도, 앞서 보여준 시나리오 2와 같이 생태계 면적으로 환산하면, 수천~수만 km^2 로 낮다고 볼 수 없다. 곧, 중국의 황 배출량의 증가는 넓은 생태계의 면적을 산성화시킬 가능성을 증가시킬 것이다.

산성화될 가능성이 있는 생태계의 비율은 임계 부하량을 통하여 구하는데, 임계 부하량은 크게 식생과 토양 등을 고려하여 두 단계로 계산한다. 첫 번째 단계에서는 산성화에 대한 생태계의 상대적인 민감도를 고려한다. 이 방법에서는 생태계의 민감도를 고려하기 위해 암석학, 토양 종류, 토지 이용, 그리고 연간

Table 5. Ratio of unprotected ecosystem in China, Japan, and Korea.

Unit (%)	Scenario 1 (NFC)	Scenario 2 (I. China)	Scenario 3 (E.I.W.I.)	Scenario 4 (E.S.W.I.)	Scenario 5 (E.D.W.I.)
China	8.3	10	10	9.4	8.3
Japan	5.6	7.7	7.0	6.0	5.0
Republic of Korea	50	58	56	52	50

강우의 네 가지 지표를 이용한다. 두 번째 단계에서는 상대적인 민감도를 지역별로 구분하여 할당하기 위해 SSMB (Steady State Mass Balance Method) 모델을 이용한다. 이 모델에서는 산성도에 대한 토양의 완충 능력이 고려되어, 토양 용액 속의 양이온 Ca, Mg, K의 농도와 알루미늄의 농도비를 적용한다 (IIASA, 2000; Hettelingh *et al.*, 1995). 황 침적량이 임계 부하량을 넘어서면 산성화 될 수 있다고 본다.

강우 자료는 NCAR (USA National Center for Atmospheric Research)에서 제공된 것을 사용하며, 기상 자료는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NMC (National Climatic Center)의 1990년 자료를 기본으로 한다.

표 5에서 중국 서부의 황 배출량은 증가하고 동부의 배출량은 감소하였다고 가정한 시나리오 5에서 NFC 경우인 시나리오 1보다 일본의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비율이 낮다는 사실을 통해, 일본은 중국 동부에 의한 영향을 많이 받고 있다는 사실을 알 수 있다. 배출원 기여도를 통해 침적량을 살펴 보았을 때에도 한국과 일본은 중국 동부에 의한 영향을 더 많이 받는다는 사실을 알 수 있었는데, 이를 통해, 한국과 일본의 경우에는 중국 동부의 배출이 더 큰 영향을 줄 수 있다는 사실을 알 수 있다.

그렇지만 NFC의 경우보다 중국 동부의 배출이 10% 감소하고, 중국 서부의 배출이 두 배로 증가하는 경우와 중국 동부의 배출이 10% 감소하고, 중국 서부의 배출이 25% 증가하는 경우를 살펴보면, 한국과 일본의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비는 전자는 52.6.1%로 시나리오 1인 NFC의 경우보다 크고, 후자는 50.5.5%으로 NFC 경우와 거의 유사하다. 곧, 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비를 통해서도 중국 서부의 황 배출의 절대적인 양의 증가는 한국과 일본에 큰 영향을 줄 수 있다는 사실을 알 수 있다.

Table 6. Critical load of sulfur species in China, Japan, and Korea.

Critical load (S eq./ha)	25% of ecosystems area is under risk of damage	50% of ecosystems area is under risk of damage	100% of ecosystems area is under risk of damage
China	2081	2639	7699
Japan	1675	3569	11536
Korea	569	1054	5066

한국의 경우, 표 5를 통해 NFC의 경우에도 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비가 50%를 넘을만큼 많은 부분이 산성화될 수 있다는 것을 알 수 있다. 한국의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비율이 높은 원인에 대해서 생각해보면, 우선 임계 부하량의 크기에 대해서 생각해볼 수 있다. 임계 부하량에 의해서 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비가 달라질 수 있는데, 한국의 경우 표 6과 같이 임계 부하량이 일본과 중국에 비해 낮기 때문에 산성화될 수 있는 비율이 높아진다고 볼 수 있다.

한국의 배출 강도가 높은 것도 하나의 이유로 생각할 수 있는데, 한국의 배출 강도는 10 t km^{-2} 로 중국, 일본의 배출 강도인 2 t km^{-2} , 3 t km^{-2} 보다 훨씬 높다.

그리고 모델의 한국 황 배출량을 0으로 두더라도 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비는 15% 정도로 중국과 일본과 비교해 보면 높은데, 이를 통해 중국 및 다른 지역에서의 황 화합물질의 장거리 이동 영향을 고려해볼 수 있다. 모델의 배출원 기여도를 통해 살펴보면, 한국에의 황 침적량 가운데 59%만이 자국 배출에 의한 영향이고, 중국에 의한 영향이 35%, 그리고 그 밖의 지역에 의한 영향이 6%로 다른 지역에 의한 영향이 41% 가량이다. 따라서 한국의 황 배출량이 0이 되더라도, 다른 지역의 영향으로 인해 생태계는 산성화될 수 있다.

3. 결 론

중국 서부대개발에 따른 중국의 지역별 황 배출량 변화가 동아시아 및 일본과 한국에 어떤 영향을 미칠 것인지를 다양한 배출 시나리오를 가정하여 RAINS-Asia 모델을 이용하여 알아보았다. 중국의 지역별 황 배출의 다양한 변화를 반영하기 위하여 5가지의 시나리오를 가정하였다.

NFC 경우인 시나리오 1을 제외하고는 서부의 황 배출은 모두 증가한다고 가정하였고, 동부의 배출에 대해서는 다양한 가정을 하였다. 시나리오 5에서는 중국 서부의 황 배출량은 증가하지만, 동부의 배출량은 감소할 것이라는 가정을 하였는데, 그럼에도 불구하고 중국 전체의 황 배출량은 NFC 경우보다 증가하였다. 다른 시나리오의 결과에서도 중국 전체의 배출량은 NFC 경우보다 증가하였다. 또한, 배출원 기여도를 통해 살펴본 침적량에서도 중국 서부에서의 황 배출이 동부에서의 배출에 비해 동아시아 전체에 더 많은 영향을 준다는 결론이 나왔다.

산성화될 가능성이 있는 생태계의 비에서도 중국의 황 배출량 변화가 동아시아 및 한국과 일본에 영향을 준다는 사실을 알 수 있는데, 중국 서부의 황 배출량은 증가하지만 동부의 배출은 감소한다고 가정한 시나리오 5에서 한국과 일본의 산성화될 가능성이 있는 생태계의 비가 다소 줄어드는 것을 통해 한국과 일본의 경우에는 중국 동부의 영향을 많이 받고 있다는 사실을 알 수 있다. 배출원 기여도를 통한 침적량의 결과에서도 이들 두 국가는 중국 동부의 영향을 더 많이 받고 있다는 사실을 알 수 있었다. 그렇지만 중국 서부에서의 배출량이 크게 증가하게 되면 이들 두 나라도 중국 서부에 의한 영향을 많이 받게 될 것이다.

중국의 황 배출량의 변화에 의한 산성화된 생태계 비의 변화는 0.5~8% 가량으로 그리 크지 않지만, 이를 면적으로 고려한다면, 변화가 작다고 할 수는 없을 것이다.

중국 동부의 연료 사용량은 앞으로도 계속 증가할 것으로 예상되며, 중국 정부 제어 정책이 연료 사용량 증가를 상쇄시킬만큼 발전하기 위해서는 장기간의 노력이 필요할 것이다. 따라서 중국 서부의 황 배출량은 증가하지만 동부의 배출량은 감소한다는 시

나리오 5의 가정보다는 중국 서부의 황 배출량은 증가하지만 동부의 배출량은 증가하거나 그대로일 것이라고 가정하는 시나리오 3과 4의 가정이 현실에서는 더 가능할 것이다.

따라서 중국의 서부대개발에 따른 중국 서부의 황 배출량의 증가는 아시아의 황 침적량을 증가시킬 것이고, 산성화되는 생태계의 비를 증가시킬 것이다. 이에 따라 중국 정부는 더욱 엄격한 환경 정책을 실시하고, 자국의 황화합물을 비롯한 대기오염물질의 영향을 받는 국가들과의 협력을 시도해야 할 것이다.

사 사

이 연구는 기후환경시스템 연구센터(SRC)와 BK 21의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 김용표(1999) 동북아시아지역 대기오염 현황 : 중국을 중심으로, 한국대기환경학회지, 15(2), 211-217.
- 삼성경제연구소(2003) 21세기 중국의 대역사, 서부대개발, Issue Paper, 서울.
- Arndt, R.L. and G.R. Carmichael (1995) Long-Range transport and deposition of sulfur in Asia. *Water, Air and Soil Pollution* 85, 2283-2288.
- Arndt, R.L., G.R. Carmichael, and J.M. Roorda (1998) Seasonal Source-Receptor Relationships in Asia, *Atmospheric Environment*, 32, 1397-1406.
- Hettelingh, J.P., M.J., Chadwick, H. Sverdrup, and D. Zhao (1995) Assessment of Environmental Effects of Acidic Deposition. Chapter 6 of the Report on the World Bank Sponsored Project "RAINS-ASIA: An Assessment Model for Air Pollution in Asia".
- IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), 2000, Regional Air pollution INformation and Simulation-Asia manual, Austria.
- Kato, N. and H. Akimoto (1992) Anthropogenic Emissions of SO₂ and NO_x in Asia: Emission Inventories, *Atmospheric Environment* 26A, 2997-3017.
- Shah, J., T. Nagpal, T. Johnson, M. Amann, G. Carmichael, W. Foell, C. Green, J.P. Hettelingh, L. Hordijk, J. Li, C. Peng, Y. Pu, R. Ramankutty, and D. Streets

- (2000) Integrated Analysis For Acid Rain in Asia: Policy Implications and Results of RAINS-ASIA Model, Annual Review Energy Environment 25, 339-375.
- Streets, D.G., N.Y. Tsai, H. Akimoto, and K. Oka (2000) Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985 ~ 1997, Atmospheric Environment 34, 4413-4424.
- Streets, D.G., N.Y. Tsai, and K.F. Yarber (2002) Decision and Information Sciences Division Argonne National Laboratory http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA.
- 중국 환경청 홈페이지 - <http://www.zhb.gov.cn>.