

대기오염의 장거리 이동 사례연구 : 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적

On Long Range Transport of Air Pollutants — Sources and Observations of Yellow Sand, TSP and Sulphate in Korea

정 용 승 · 김 태 군

한국교원대학교 환경과학연구소
(원고접수 : 1991. 10. 18)

Yong-Seung Chung, Tae Koon Kim

Environmental Science Institute, Korea National University of Education,
Khangnae, Chongwon, Choongbook 363-791, Korea
(Received 18, October 1991)

Abstract

It is observed that the outbreak of dust storms (yellow sand) from Northern China and Mongolia occurs a few times in April 1988 and 1990. It is found that a dust storm initiated with strong gusty winds after the passage of a cold front, particularly after defrost of the ground surface of a source region in the early spring. According to meteorological chart, satellite images and trajectory analyses, dust clouds invaded Korea in April 1988 and 1990 were landing in the sink area after 2~4 days travelling for 2,000~3,000 km from a source region.

It was also observed that in the west coast total suspended particulates (TSP) were $100\sim 200 \mu\text{g m}^{-3}$ and sulphates ($\text{SO}_4^{=}$) were $3\sim 10 \mu\text{g m}^{-3}$. These values clearly exceed the concentrations of a background level measured in the Arctic and Atlantic Ocean. Trajectory analyses and meteorological analyses suggest that the high values occurred with prevailing westerly flows coming from anthropogenic sources in China. High concentrations of air pollutants occurred in the backside of an anticyclone and in the area "col".

1. 서 론

대기오염의 장거리 이동에 관한 실증은 산불과 화산에서 나오는 자연적인 분출물과 도시와 공업단지에서 배출되는 인위적인 오염체의 이동을 풍하측으로 수백-수천 km 추적하였으며, 부가적으로 사막지방에서 발생하는 사하라 사막의 모래먼지와 아시아의 황사를 풍하측으로 수천 km 추적하였다(Chung, 1986).

대기오염체의 장거리 이동에 관한 연구는 자연적으로 발생하는 오염물질과 인위적으로 발생하는 오

염물질을 추적할 수 있다. 특히 자연적인 것으로는 황사의 발생, 이동 및 침전이 좋은 사례이며, 인위적인 것으로 TSP, sulphate의 연구가 좋은 사례이다.

한국은 중위도 편서풍 지대에 위치하여 서풍계열의 기류에 큰 영향을 받고 있으며, 따라서 중국에서 발생하는 대기오염물질의 일부는 편서풍과 함께 동진하면서 한반도와 그 주위를 지나 침전할 수 있다. 이와 같은 대기환경하에서 아시아 대륙의 중국 등에서 발생하는 자연적·인위적인 대기오염물질의 이동은 우리에게 큰 관심을 갖게 하며 대기 중의 오염농도(예 : 분진, 황산염, 질산염, 납)의 증대는 국가

적 환경문제로 대두되고 있다. 현재 중국에서 가장 문제가 되는 오염물질은 TSP, SO₂ 등이며 이들의 농도는 증가일로에 있다.

이 연구는 황사의 발생과 이동을 조사연구하고 한반도에 이동되는 황사의 발원지를 추적하였다. 또한 서해안에서 관측한 TSP와 sulphate 농도로(김희강, 1989), 대기오염의 장거리 이동과 지나온 자취(경로, trajectory)를 논의하였다.

2. 관 측

2.1 황사의 발생과 이동

황사는 Altai 등 아시아 대산맥군의 풍하측에 전개되는 중국과 몽고의 사막 또는 건조한 황토지대에서 발생된다. 황사는 3~5월에 발생하며, 특히 4월에 몽고와 그 주위의 사막과 토양표면은 해빙과 함께 강한 바람이 모래와 토양표면을 들어올려 우세한 기류를 타고 풍하측으로 이동되는 현상으로, 대개 강한 이동성저기압이 한랭전선을 동반하고 발원지를 통과할 때 발생한다(정용승, 1990). 황사의 직경은 0.1~20.0 μm로서 황사발생시 수평시정이 1~2 km 이하로 악화될 수 있다. 일기도, 인공위성영상, trajectory 분석에 의하면 1988년과 1990년 4월 한국에 발생한 황사현상은 발원지를 떠나 2~4일에 2,000~3,000 km를 이동하여 한반도와 일본 등지에 상륙하였다.

2.2 황사의 관측

한국에서 관측된 황사의 3가지 사례를 표 1에 수록하였다. 1988년 4월 한국에 상륙한 황사구름(S1)은 인공위성 영상으로 확인할 수 있다. 당일의 황사구름은 한반도는 물론 제주도 북쪽 황해 전역을 뒤덮고 있었으며, 중국의 양자강 이북과 화북 및 산서성 이남의 광범위한 영역이 그 영향을 받고 있었다. 위성영상의 황사구름으로 덮힌 영역은 1.52 M km² 이상으로 그 면적이 한국의 약 7배에 해당한다.

분석된 일본기상청의 일기도에 의하면 4월 20일 황사현상은 남한과 황해지역, 북경부근의 광범위한 영역, 그리고 양자강 유역에서 일본남부까지 확장되었다. 이 황사구름은 4월 15일 Altai 산맥의 풍하측에서 생성된 저기압의 후면에 일기 시작한 강한 북서풍에 의해 발생하였다. 그림 1은 4월 20일 한국에 유입되는 기류의 자취를 표시한 trajectory이다. 당시 한국에 유입되는 하층의 기류는 대체적으로 상하이 부근의 양자강 유역에서 왔고 중층(1,500 m) 및 상층(3,000 m)의 기류는 발해만, 북경 그리고 몽고

쪽에서 유입되었음을 제시한다.

Table 1. 3 Cases of yellow sands studied.

Case number	Period of occurrence	Minimum visibility, km	Atmospheric loading, μgm ⁻³
S1	1988. 4. 2~24	<1	838~1,105*
S2	1990. 4. 8~10	<1	700~ 753**
S3	1990. 4. 24~27	<2	220~ 275**

*이민희 등(1988)과 **김희강(1990)

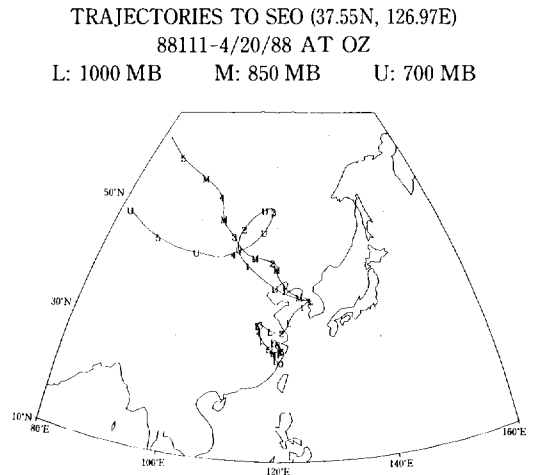


Fig. 1. Backward trajectories arriving at the west coast in central Korea (00 GMT, 20 April 1988).

이상의 일기도, 인공위성 영상과 trajectory 분석에 의하면 황사구름은 몽고와 중국의 북서지방에서 발생하여 황해를 거쳐 한반도 및 일본 등지에 이동되었음을 알 수 있다. 황사는 발원지에서 침전지역까지 3,000~5,000 km 거리를 3~5일에 이동한 후 며칠간 계속 침전되고 있었다.

두번째 사례로서 S2는 1990년 4월 8일부터 한국에 3~4일간 황사현상을 발생시킨 것이다. 인공위성 사진은 황사구름이 중국의 장수성을 지나 황해에 이동되고 있음과 한반도의 남부에 상륙됨을 보여주고 있다. 이 황사구름의 발생에 선행되었던 한랭전선과 동반된 구름대가 일본열도를 통과하고 있음을 볼 수 있다. 그림 2에 보여준 trajectory 분석에 의하면 한반도의 서해안에 도착되는 기류는 대체적으로 북서기류임을 알 수 있다.

사례 S3은 1990년 4월 26일 황사구름이 동해안지역, 황해남부, 남한 및 일본남부를 덮고 있는 것이

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)
90098-4/8/90 AT OZ
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

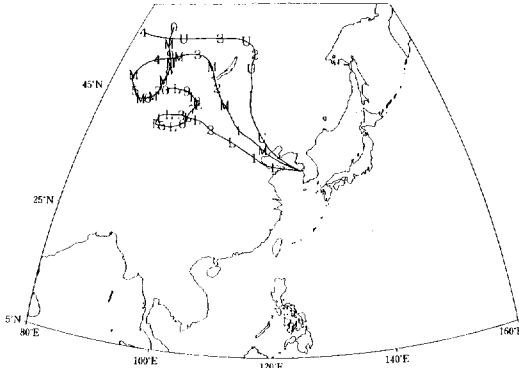


Fig. 2. Same as Fig. 1, but for 8 April 1990.

다. 이 황사구름이 덮은 면적은 약 1.27 M km²의 광범위한 영역이며, 황사는 한랭전선 후면의 고기압대에서 발생하였다. 일기도 역시 산둥반도 부근에 위치한 고기압과 함께 황사구름이 있음을 보여주었다. 그림 3의 trajectory 분석에 의하면 황사와 함께 한반도로 유입되는 기류는 황해와 발해만을 거쳐 중국 북부의 황토지대와 몽고에서 유입되었음을 제시한다.

2.3 TSP와 sulphate 관측

표 2는 국립환경연구원의 보고서 중 김희강(1989)의 관측결과를 발췌하여 3개의 사례를 조사하였다. 첫번째 사례(PS1)는 1989년 4월 6~7일 태안에서

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)
90116-4/26/90 AT OZ
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

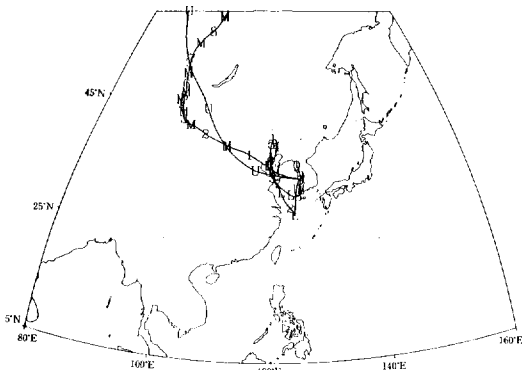


Fig. 3. Same as Fig. 1, but for 26 April 1990.

Table 2. Total Suspended Particulate (TSP) and Sulphate (SO₄²⁻) measured in μg m⁻³ at Tae-Ahn and Kang-Wha in western Korea.

Case	Date	Site	TSP	SO ₄ ²⁻
PS1	6-7 April 1989	Tae-Ahn	105	3.12
		Kang-Wha	137	5.32
PS2	26-27 Oct. 1989	Tae-Ahn	103	4.99
		Kang-Wha	196	5.60
PS3	20-21 April 1989	Tae-Ahn	176	7.45
		Kang-Wha	202	8.83

TSP 105, 강화 137 μg m⁻³을 기록하였으며, sulphate(SO₄²⁻)는 태안 3.12, 강화 5.32 μg m⁻³을 기록하였다. 그림 4의 trajectory 분석결과 태안에 도착하는 지상과 1.5~3.0 km 상층의 기류는 대체적으로 황해-산둥반도-랴오둥반도-셴양-베이징 등을 거쳐 북서쪽에서 유입되는 것이다. 그러므로 이 경우는 장거리에 발원지를 둔 오염물질(Long-Range Transport of Air pollutants)이 한국 서해안지역에 도착되어 background 값보다 높게 나타난 것이다. 풍상측에 오염원이 없는 대서양과 북극지방에서 SO₄²⁻의 background 농도 값은 0.1~1.0 μg m⁻³을 기록한다(Chung, 1978; 1986; 1989). 특히 태안과 강화

TRAJECTORIES TO TAE (36.77N, 126.27E)
89097-4/7/89 AT 12Z
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

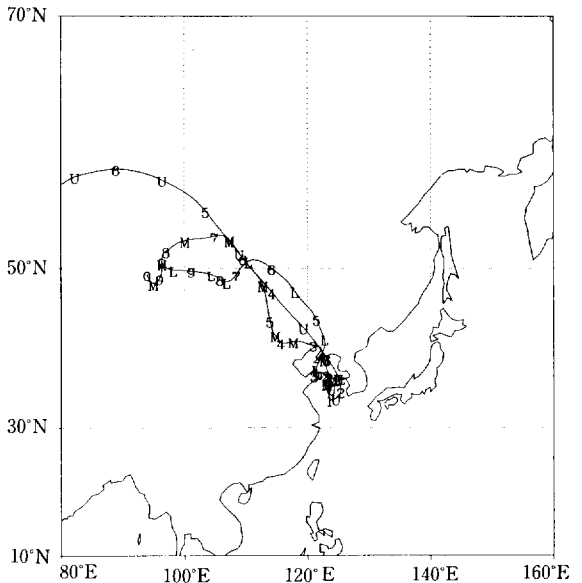


Fig. 4. Backward trajectories arriving at the western coast in central Korea (12 GMT, 7 April 1989).

의 서해안에서 관측된 TSP가 $100 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 넘는 것은 황해를 거쳐 유입되는 기류에 높은 TSP 농도가 있음을 제시한다. 현재 중국에서 배출되는 오염체의 주요성분은 TSP와 SO_2 이며, 북미의 경우 미국에서 남풍을 타고 오는 기류는 캐나다의 Ontario 남부에 TSP $50\sim 100 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상을 자주 발생시키고 있다 (Chung, 1989).

일기도는 4월 7일 한반도가 일본 동해 $\sim 400 \text{ km}$ 에 위치한 고기압후면에 들어 있음을 보여준다. 4월 8일에도 한국은 이 고기압과 중국 화북지방에 위치한 다른 고기압 사이에 놓여 있고 또한 일본 규슈남부와 북만주에 위치한 2개의 저기압 사이에 있어, 지상 기압배치는 한국이 "col"의 중심부에 있게 되어 바람이 약하고 따뜻한 날씨가 2~3일 계속되었다. 고기압의 후면과 저기압의 전면, 특히 온난지역과 "col" 등은 대기오염 농도가 높게 나타나는 지역이다 (Chung, 1977).

1989년 10월 26~27일에 서해안에서 관측된 TSP (사례 PS2)는 태안 103 , 강화 $196 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록하였고, sulphate는 태안 4.99 , 강화 $5.60 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록하였다. 기상도에 의하면 10월 26일의 지상기압배치는 한·중 국경지대에 위치한 이동성고기압 ($1,024 \text{ mb}$)의 영향으로 한국이 고기압 중심축에 위치하여 맑은 날씨와 변동성의 약한 기류가 유입되었다. 10월 27일에는 이 고기압의 후면에 들게 되어 온

화한 날씨를 보여준다. 중국 북부지방에 이동성고기압이 발달하고 있었으며, 북만주에 저기압과 일본 남해 $1,000 \text{ km}$ 에 위치한 태풍의 기압배치는 한국이 전형적인 "col"의 영향권에 있게 했다. 그림 5의 trajectory 분석에 의하면 한국으로 유입되는 $1,000 \text{ mb}$ 와 850 mb 기류는 황해에서 다소 정체적으로 맴돌다가 중국의 난징과 우한 부근에서 유입된 것이다. $3,000 \text{ m}$ 상공의 기류는 황해-상하이-장사-하노이-통킨만-필리핀의 투존에서 오고 있었음을 제시한다. 그러므로 이 경우 한국 서해안에서 관측된 오염농도는 한국에 근원지를 둔 것도 일부 가능하지만, 주로 중국 상하이 부근과 우한을 비롯한 남부지방에서 오염물질이 한반도로 유입되었음이 명백하다.

사례 PS3은 1989년 4월 20~21일 관측된 TSP 농도가 태안 176 , 강화 $202 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록하였고, sulphate는 태안 7.45 , 강화 $8.83 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 기록하였다. 이 값은 서해안의 background 농도로는 매우 높은 값이다. 4월 20일 지상 기압배치는 한국이 동해안에 위치한 고기압의 후면에 놓여 기온이 높고 대기오염이 전형적으로 높게 관측될 수 있는 경우이다 (Chung, 1977).

그림 6의 trajectory 분석에 의하면 하층의 기류는 한국의 남서해안-남해안-상하이지역에서 태안과 강화에도 도착되었음을 제시한다. 한편 $3,000 \text{ m}$ 의 기

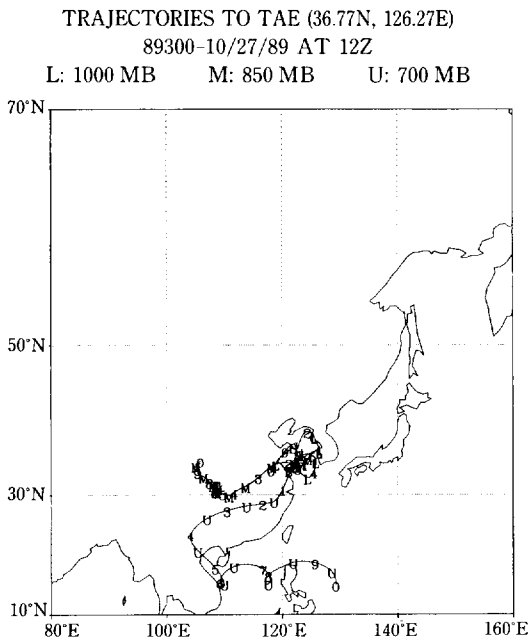


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for 27 October 1989.

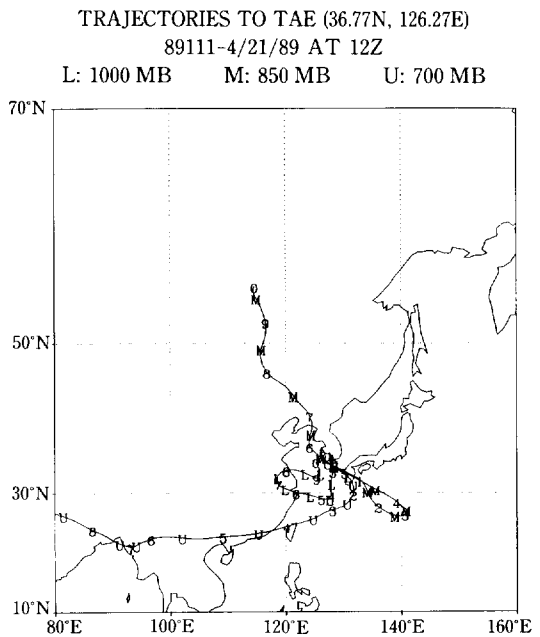


Fig. 6. Same as Fig. 4, but for 21 April 1989.

류는 한국의 남해안-일본규슈-대만-홍콩-하노이-켄터다 지역에서 오는 것으로 분석하였다. 그러므로 한국 서해안에 도착하는 대기오염의 근원지는 한국의 남서 및 남해안지방과 일본의 규슈지방은 물론 중국의 상하이 및 광둥지역에서 온 것으로 해석된다. 환언하면 이 경우는 주로 3개국에서 발원되는 대기오염이 혼합되어 다른 한 지역에 침전 및 영향을 줄 수 있는 사례이다.

3. 토 론

3.1 활 사

황사의 발생 및 이동은 자연적인 대기오염 물질의 장거리 이동을 연구할 수 있는 대표적인 것이며, 인위적 오염물질의 장거리 이동에 관한 이해에 유용하다. 1988년과 1990년 4월에 발생한 황사현상은 대기오염물질이 기상조건에 따라 2,000~3,000 km의 장거리를 2~4일에 이동하여 한반도에 침전하였음을 확증한다. 황사현상 발생시 수평시정은 1~2 km로 감소되는 것으로 관측되었으며, 황사먼지의 직경은 대개 0.1~20.0 μm 이다.

공군의 항공 기상자료에 의하면, 황사현상시 주간 수평시정은 매우 악화되었으나 야간에는 많이 개선되었다. 이는 야간 중에 발생된 약한 육풍과 생물권 고도의 하강이 황사입자를 지면에 침전시키는 역할을 한 것으로 해석된다. 그러나 낮에는 해풍과 함께 황사구름이 유입되어 시정이 다시 악화되었다.

1988년 4월 20일 황사구름의 두께는 최소한 1,000~1,500 m이며, 덮고 있는 수평면적은 1.52 M km² 이상이였다. 이날 관측한 황사의 대기중 농도는 838~1,105 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이므로 당일 공기중에 떠 있던 황사의 총량은 127~252 M ton으로 계산된다. 이 값은 Arao와 Ishizaka(1986)가 일본 상공의 황사 총량이 1년에 4.1~5.3 M ton으로 계산한 것에 비교될 수 있다. 한편 D'Almeida(1986)가 아프리카의 사하라 사막에서 이동되는 TSP의 총량을 매년 630~730 M ton으로 계산한 것은 황사의 1회 총량과 역시 비교될 수 있다.

3.2 TSP와 Sulphate

중국은 많은 먼지와 분진을 발생시키며, 특히 중국 북부내륙은 건조지역으로 분진이 자연적으로 많이 발생한다. 또한 중국이 산업화를 기도함에 따라 화석연료와 유황의 연소량이 대단히 많으며, 연기와 이의 일부가 SO₂로 되어 황해로 이동하면서 수분을 얻어 sulphate로 변한다. 그러므로 서풍기류와 함께

태안과 강화에서 관측된 TSP와 sulphate 농도가 background 값을 훨씬 능가한다. 2차적인 오염물인 sulphate(SO₄⁼)가 원거리에 발원지를 두고 장거리 이동하는 사례가 유럽과 북미에서 관측되었다(Chung, 1978).

이민희 등(1990)은 수용성 이온성분의 구성비를 조사하였으며, 서울에서 관측된 결과는 SO₄⁼가 47%, NO₃⁻가 21%, Cl⁻ 30%이며 Na⁺ 32%이었다. 서울의 대기는 지역적인 영향을 받아 SO₄⁼와 NO₃⁻가 많이 함유되어 있으나, 서해안의 태안은 황해의 영향으로 Cl⁻와 Na⁺가 많았다. 서해안에서 SO₄⁼가 많으나 NO_x가 적다함은 중국에서 유입되는 오염체의 구성비를 말해준다. 중국은 차량이 적어 NO_x 배출량이 적고, SO_x 배출량이 많은 것이 그 원인이 된다. 그러므로 한국 서해안에서 관측된 SO₄⁼와 TSP는 주로 중국 기원의 장거리를 이동해 온 오염물질로 해석된다.

태안에서 관측한 높은 농도의 TSP와 sulphate는 한반도가 고기압 후면과 "col"의 기압배치에 있을 때 중국에 근원을 둔 오염체들이 유입되어 발생하였다.

4. 결 론

대기오염의 장거리 이동에 대한 자연적 기원의 황사와 인위적 기원의 TSP, sulphate의 일기도, 인공 위성영상, trajectory 분석결과 다음의 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 황사의 발원지는 몽고와 중국북부의 사막 및 황토지대에서 발생하며, 특히 큰 산맥군의 풍하측에서 발생한 저기압의 한랭전선 후면에 강풍이 일 때 발생한다.
- 2) 황사는 2,000~3,000 km의 거리를 2~4일에 이동한 후 한국에 상륙한다.
- 3) 1988년 4월에 발생한 황사는 한국에 10일 정도 영향을 주었고, 수평적인 크기는 1.52 M km²를 능가하며 이때 대기중에 부유한 황사의 총량은 평균 190 M ton으로 추산된다.
- 4) 태안에서 관측한 높은 농도의 TSP와 sulphate는 중국에 근원을 둔 오염체들이 고기압 후면과 "col"의 기압배치에 있을 때 발생하였다.

참 고 문 헌

김희강(1989) 황사 및 분진의 일반특성 조사, 대기오염 물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(1)

- 중에서, 국립환경연구원, 107 — 140.
- 김희강(1990) 황사 및 분진의 일반특성조사. 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II) 중에서, 국립환경연구원, 111 — 151.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석(1988) 황사현상시 분진의 입도분포와 화학조성에 관한 연구. 한국대기보존학회지, 4, 57 — 66.
- 이민희(1990) 산성비 및 강하물질 분석. 대기오염의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II) 중에서, 국립환경연구원, 59 — 110.
- 정용승(1990) 대기오염의 장거리 이동사례 및 황사 발원지 추적. 대기오염의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II) 중에서, 국립환경연구원, 195 — 253.
- Arao K. and Ishizaka Y. (1986) Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64, 79 — 63.
- Chung Y.S. (1977) Ground-level ozone and regional transport of air pollutants. *J. Appl. Meteor*, 16, 1127 — 1139.
- Chung Y.S. (1978) The distribution of atmospheric sulphates in Canada and its relationship to long-range transport of air pollutants. *Atmos. Environ.*, 12, 1471 — 1480.
- Chung Y.S. (1986) Air pollution detection by satellites: The transport and deposition of air pollutants over ocean. *Atmos. Environ.*, 20, 617 — 630.
- Chung Y.S. (1989) Concentrations of atmospheric constituents observed at Alert, Canada in relation to air trajectories and synoptic system. *J. Atmos. Chemistry*, 9, 317 — 330.
- D'Almedia G.A. (1986) A model for Saharan dust transport. *J. Clim. and Meteor.*, 25, 903 — 916.