

제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스

정창수 · 홍기훈 · 김석현 · 박준건 · 김영일 · 문덕수 · 장경일 · 남수용 · 박용철¹

한국해양연구소 해양환경 · 기후연구본부
¹인하대학교 생물해양학부

Biogeochemical Fluxes Through the Cheju Strait

CHANG SOO CHUNG, GI HOON HONG, SUK HYUN KIM, JUN KUN PARK, YONG IL KIM,
DUK SOO MOON, KYUNG IL CHANG, SU YONG NAM AND YONG CHUL PARK¹

Marine Environment and Climate Change Laboratory Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

¹Department of Biology and Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

한국 남해대륙붕에서의 물질순환을 이해하기 위해 남해연안의 보길도와 제주도를 잇는 제주해협에서 1997년부터 1999년까지 3년간 화학물질 플럭스에 대한 조사를 실시하였다. 제주해협의 입자성부유물질, 용존무기영양염류, 입자성유기탄소 및 질소는 전계절에 걸쳐 90% 이상이 동향류에 의해 황해 및 동중국해로부터 제주해협을 통해 남해로 유입된다. 제주해협을 통해 남해로 유입되는 화학물질들의 연간 플럭스는 부유물질이 $22.9 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$, 암모니아이온은 $0.52 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 질산이온은 $6.05 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 인산이온은 $0.36 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 규산은 $10.27 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ 이다. 해수수송량(Sv)당 입자성부유물질 연간 플럭스는 제주해협($44.48 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)이 대한해협($26.08 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)보다 약 1.7배 크다. 또한 제주해협 통과 질산이온 연간 플럭스($11.60 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)는 대한해협($9.72 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)보다 약 1.2배, 동중국해에서 쿠로시오에 의한 수송량($18.55 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)에 비해서는 2/3 수준으로 높다. 결론적으로 풍부한 화학물질들을 함유한 제주해류는 남해 및 동해의 생지화학적 과정들에 있어 상당히 중요함을 시사한다.

The estimated total material transports through the Cheju Strait using all data which investigated in 1997 and 1999 are as follows; A large amount of suspended sediments and dissolved inorganic nutrients are carried to the South Sea through the Cheju Strait by a persistent eastward flow (Cheju Current) from the Yellow Sea and the East China Sea. The annual material transports by the Cheju Current are as follows; $22.9 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$ (SS), $0.52 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ (NH_4^+), $6.05 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ (NO_3^-), $0.36 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ (PO_4^{3-}), $10.27 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ ($\text{Si}(\text{OH})_4$). The annual suspended sediment flux per water transport in the Cheju Strait ($44.48 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$) is about 1.7 larger than that in the Korean Strait ($26.08 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$). The annual nitrate flux per water transport ($11.60 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$) is about 1.2 larger than that in the Korean Strait ($9.72 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$) and 2/3 of that by Kuroshio in the East China Sea ($18.55 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$). It suggests that chemical rich Cheju Current will play a significant role in the biogeochemical processes in the South Sea where the huge land-based waste are introduced.

서론

동서 길이가 약 70 km인 제주해협은 황해 및 동중국해와 남해를 연결시키는 길목에 위치하여 이곳을 통과하는 해수 및 화학물질 수송량의 변화는 남해 해황 및 생태환경에 큰 영향을 준다. 제주해협중 제주도 서쪽해안을 따라서는 동중국해로부터 확장하는 고염빈영양의 대마난류가 유입이 되며, 하계에는 저염고영양의 양자강 희석수가 제주해협을 통해 유입되어 대한해협을 통해 동해로 빠져나간다(Chang *et al.*, 1995; Suk *et al.*, 1996). 보길도의 한

반도 연안을 따라서는 황해 및 한반도 연안 및 하천으로부터 고부유물고영양 연안수가 유입되어(Suk *et al.*, 1996), 남해의 퇴적물 수급 및 화학물질 농도분포에 상당한 영향을 미친다(Wells and Huh, 1984; Chough, 1983; Lee *et al.*, 1990). 또한 저온저염고영양의 황해 저층 냉수는 계절에 따라 남하 확장하여 제주해협을 통과하여 남해에 영향을 미친다(Cho and Kim, 1994). 이와같이 제주해협을 통해 남해로 유입되는 화학물질은 총량적으로도 중요하고 시공간적인 변이 또한 크기 때문에 제주해협을 통해 이동되는 화학물질 플럭스에 대한 연구는 남해에서의 화학물질 순환 및 생지화학적 과정을 이해하는데 있어서 선행적으로 이해되어야 한다. 일반적으로 해양에서 물질의 이동은 이류와 와류확산에 의하고

*Corresponding author: cschung@kordi.re.kr

이중 이류에 의하여 장거리를 이동하게 된다. 대륙붕 해양을 포함하는 표층해양에서는 표층해류에 의한 물질이동이 중요하다. 동북아 해역에서 쿠로시오, 대마난류가 전통적으로 중요한 해류로 여겨져 왔다. 이러한 중요성 때문에 인접국인 중국 및 일본에서는 쿠로시오로부터 운송되는 화학물질(Chen *et al.*, 1994, 1995; Wunsch *et al.*, 1983; Kan *et al.*, 1994)에 대한 연구가 1990년 이후부터 활발히 진행되어 오고 있다.

그러나 제주해협에서 제주난류(Cheju Warm Current)와 제주한류(Cheju Cold Current)의 존재가 ADCP 관측을 통하여 밝혀진 이래(Suk *et al.*, 1996), 제주해류의 화학물질 수송 플럭스가 동북아 해역에서 차지하는 비중은 비교적 클것으로 사료되었다. 따라서 본 연구는 1계절(춘계)의 측정 결과만을 토대로 한 Suk *et al.* (1996)의 연구에 대한 후속 보완으로 3년간 5회에 걸친 조사결과를 토대로 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스의 시간적 변이와 연간 수송량을 추정하는데 중점을 두었다.

방법 및 재료

본 연구지역은 제주도와 남해연안의 보길도를 잇는 제주해협(126°32'E)으로서(Fig. 1), 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스를 산정하기 위한 해양조사는 한국해양연구소 이어도호를 이용하여 3년간 5회에 걸쳐 수행되었다(1997년 3월과 9월; 1998년 9월과 11월; 1999년 8월).

해수시료는 표준수심(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m 저층)에서 니스킨 해수 채수기를 이용하여 채수하였다. 화학물질 측정 항목으로는 용존산소, 입자성부유물질, 용존 무기영양염류 및 입자성 유기탄소와 질소이다.

용존산소는 Winkler 적정법(Carpenter, 1965)으로 선상에서 측정하였다(정확도 250 mmol kg⁻¹에서 ±0.5% mg L⁻¹). 입자성부유물질은 사전에 무게 측정된 Nucleopore 여과지로 해수시료를 여과한 후, 증류수로 5~6회 세척하여 염분을 제거한 후 냉동보관하여 실험실로 운반, Parsons *et al.* (1984)에 의거하여 측정하였다(정확도 ±0.02 mg L⁻¹). 질산염을 포함한 용존무기영양염류는 선상에서 해수시료를 유리섬유여과지(GF/F)로 여과한 후 사전에 10% 염산으로 미리 세척한 20 mL 고밀도 폴리에틸렌 병에 담아 -20°C 이하의 저온에서 냉동보관 후 실험실에서 영양염 자동분석기(Aliance)를 이용하여 Grassoff(1983) 방법에 따라 측정하였다. 해

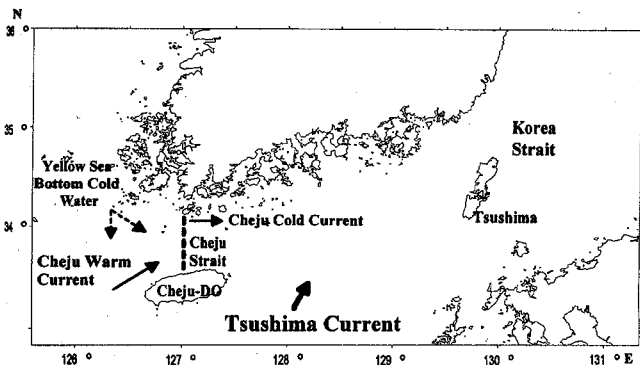


Fig. 1. Study section in the Cheju Strait.

수 중 입자성 유기탄소 및 유기질소는 550°C에서 3시간 태운 후 무게 측정된 유리섬유 여과지(GF/F; 공극구경, 0.45 μm)를 이용하여 해수시료를 여과한 다음 증류수로 5~6회 세척하여 염분을 제거하였다. 여과된 시료를 냉동보관한 후 실험실로 운반하여 산증기로 무기 탄산염을 제거한 다음 원소분석기(Carlo Erba CNS)로 정량측정하였다(정확도 ±0.3% 이하).

해류 자료는 연구선에 부착된 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 획득하였다. 제주해협에서는 왕복성 조류가 우세하기 때문에 조류성분이 제거된 해류분포를 측정하는 것이 필수적이다. 따라서 ADCP 조사시 연구선의 속도를 8~9 노트로 유지하여 조류성분을 제거하기 위해 조석 1주기(25시간)에 걸쳐 8회 반복관측하였다. ADCP 자료는 시간적으로 매 1분마다 수평적인 거리상으로는 약 300 m 간격으로, 그리고 수직적으로는 8 m 간격으로 자료를 획득하였다.

결 과

해수 및 생지화학 특성

제주해협의 연평균 수온, 염분 및 화학성분들에 대한 수직분포

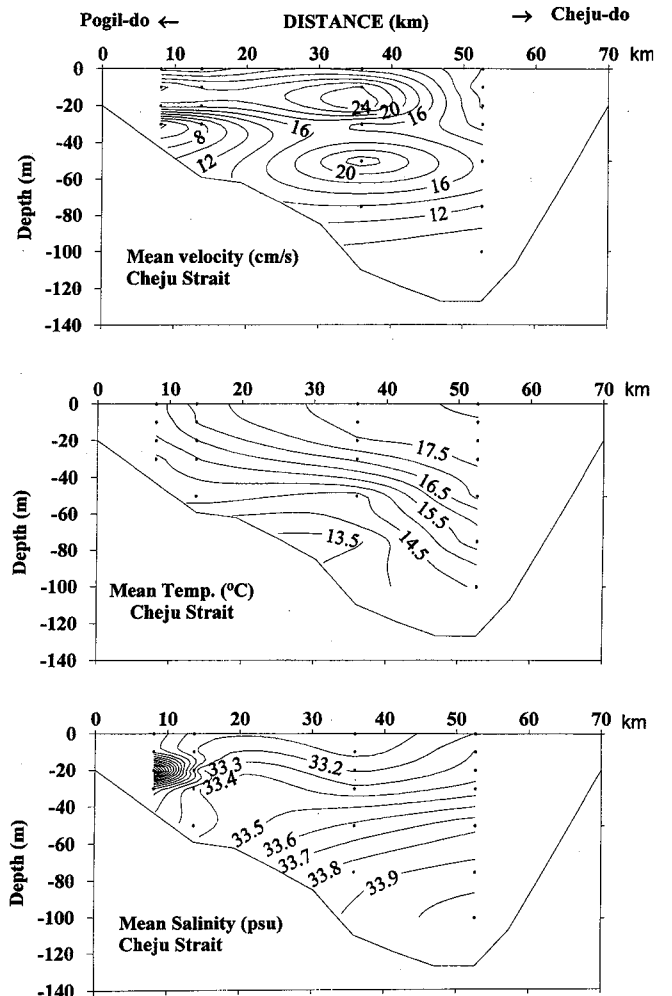


Fig. 2. Annual average velocity, temperature and salinity in the Cheju Strait.

를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 산정된 연평균은 춘계(1995년 4월; Suk *et al.*, 1996), 하계(1998년 8월), 추계(1997년 9월, 1998년 9월, 1998년 11월)로 구분하여 같은 정점 및 수심별로 평균하였다. 동계는 관측 미실시로 인하여 비교적 동계 해양 특성에 가장 근접한 1997년 3월 자료로 대체하였다.

입자성 유기탄소 및 질소는 자료부족으로 인하여 하계(8월) 및 추계(11월) 자료를 평균한 값을 사용하였다.

연평균 수온 분포는 제주도쪽으로 갈수록 고온의 제주난류로 인해 점차 증가하는 경향을 보였다. 그러나 수심이 증가할 수록 수온은 급격히 감소하여 보길도 남쪽 15 km 정점의 30 m 수심 이하에서는 15°C 이하로 낮다(Fig. 2). 연평균 염분 분포는 수온과 비슷하여 제주도쪽으로 갈수록 증가하였다. 그러나 수온 최소값을 보인 보길도 남쪽 15 km 정점의 저층에서는 수심 증가에 따라 평균 염분은 증가하여 저층에서 약 33.3 psu로서 전형적인 황해냉수 특성을 보였다(Fig. 2).

연평균 유속분포는 전정점에 걸쳐 동향류가 우세하며, 보길도 남쪽 40 km 부근 해역(33°40'N)에서 20 cm s⁻¹ 이상의 최대값을 보였다. 해류속은 수심이 증가할 수록 감소하여 75 m 이상의 수심에서는 10 cm s⁻¹ 이하이다(Fig. 2).

연평균 용존산소함량 분포는 표층부근에서 230 μM 이상으로 높다. 수심이 증가할 수록 평균 용존산소 함량은 급격히 감소하여

황해 냉수특성 보인 보길도 남쪽 15 km 정점의 저층에서 180 μM 이하이다(Fig. 3).

연평균 암모니아이온 함량 분포는 고염의 해수가 우세한 제주도 부근해역에서 0.5 μM 이상으로 높고 한반도 해안쪽으로 올수록 점차 감소한다(Fig. 3).

연평균 엽록소 a 함량은 표층에서 높으나 유광대 수심 이하(>20 m)에서는 0.1 μg L⁻¹ 이하이다(Fig. 3).

연평균 질산이온 함량 분포는 전반적으로 표층에서 낮고 제주도쪽으로 갈수록 급격히 감소한다. 수직적으로는 수심증가에 따라 급격히 증가하여 수심이 깊은 제주도 북쪽 사면골의 80 m 수심 이하에서는 7 μM 이상이다(Fig. 3). 연평균 인산이온 함량분포는 질산이온과 유사하여 제주도쪽으로 갈수록 감소하여 제주도 부근 표층에서는 0.1 μM 이하이다. 그러나 수심증가에 따라 급격히 증가하여 수심 80 m 이하에서는 0.5 μM 이상으로 높다(Fig. 3). 연평균 규산함량 분포 또한 질산 및 인산이온 분포와 유사하여 표층에서는 낮다. 수심증가에 따라 급격히 증가하여 질산 및 인산이온이 최대값을 보인 제주도 사면골에서 12 μM 이상으로 높다(Fig. 3).

연평균 입자성부유물질 함량분포는 수심이 40 m 이하인 보길도 인접 해역에서 2 mg L⁻¹ 이상으로 높고 수직적으로는 균질하다. 그러나 제주도쪽으로 갈수록 점차 감소하여 고온 고염의 특성을 보이는 제주도 부근 해역의 표층에서는 0.5 mg L⁻¹ 이하이다

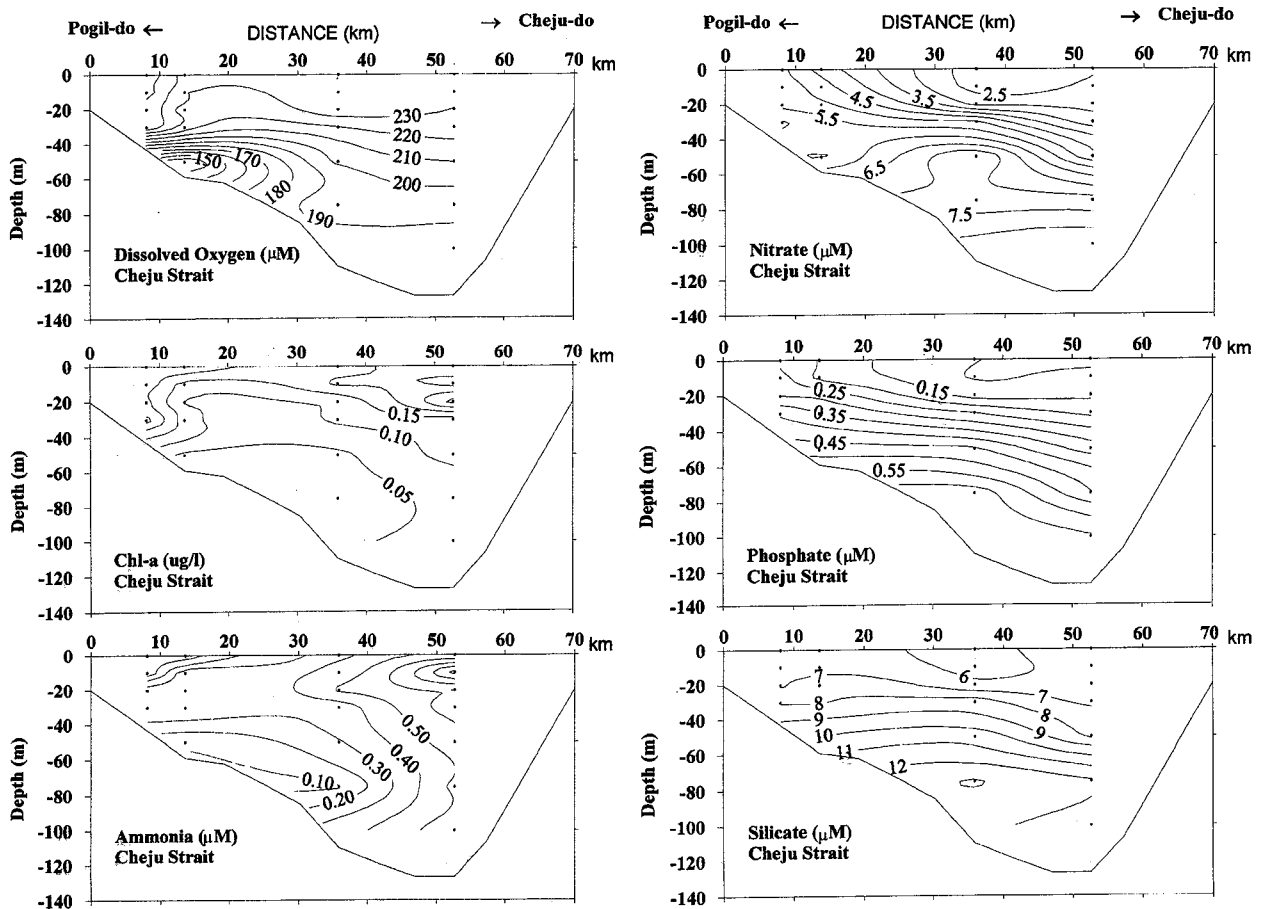


Fig. 3. Annual average DO, Chl-a, NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻, Si(OH)₄, in the Cheju Strait.

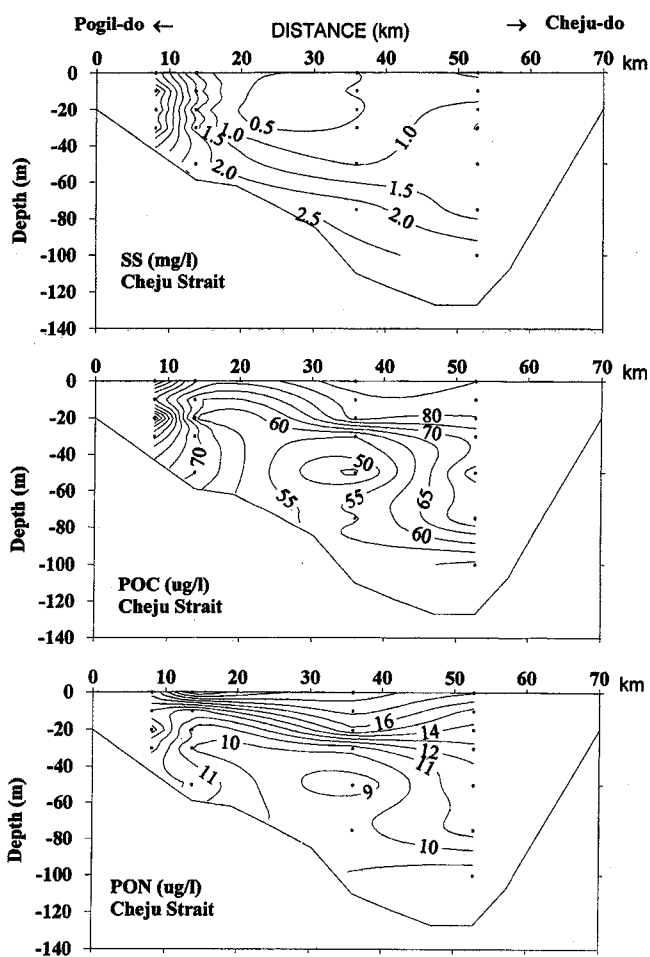


Fig. 4. Annual average suspended sediments (SS), particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON) in the Cheju Strait.

(Fig. 4). 연평균 입자성 유기탄소 및 질소함량 분포는 표층에서 각각 70, 17 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 높으나 수심 20~30 m를 경계로 급격히 감소하였다(Fig. 4).

제주해협 통과 평균 단위면적당 화학물질 플럭스

제주해협을 통해 남해로 들어오는 연간 해수 순 수송량은 1997년 3월 및 9월에 각각 0.45, 0.58 Sv, 1998년 9월과 11월에 각각 0.51, 0.46 Sv, 그리고 1999년 8월에 0.66 Sv로서 계절 변동이 심해 하계(평균 0.58 Sv)가 춘계(0.37 Sv; Suk *et al.*, 1996) 및 추계(0.46 Sv)에 비해 해수 순 수송량이 크다. 이는 일본 큐슈 서쪽 쿠로시오역에서의 수송량에 대한 연구에서 하계가 가장 크다는 Kan *et al.*(1994)의 결과와도 일치한다.

연평균 해류속에 평균 화학성분 농도를 곱한 단위면적당 물질 플럭스 수직분포를 Fig. 5와 6에 나타내었다.

연평균 단위면적당 암모니아이온 플럭스 범위는 5~91 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로서 입자성부유물질 분포와 유사하여 보길도 인접 표층에서 높고, 제주도 북쪽 사면골 저층에서 최소값을 보였다(Fig. 5).

연평균 단위면적당 질산이온, 인산이온 및 규산 플럭스는 각각 69~935, 5~58, 93~1572 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 범위로서 입자성부유물

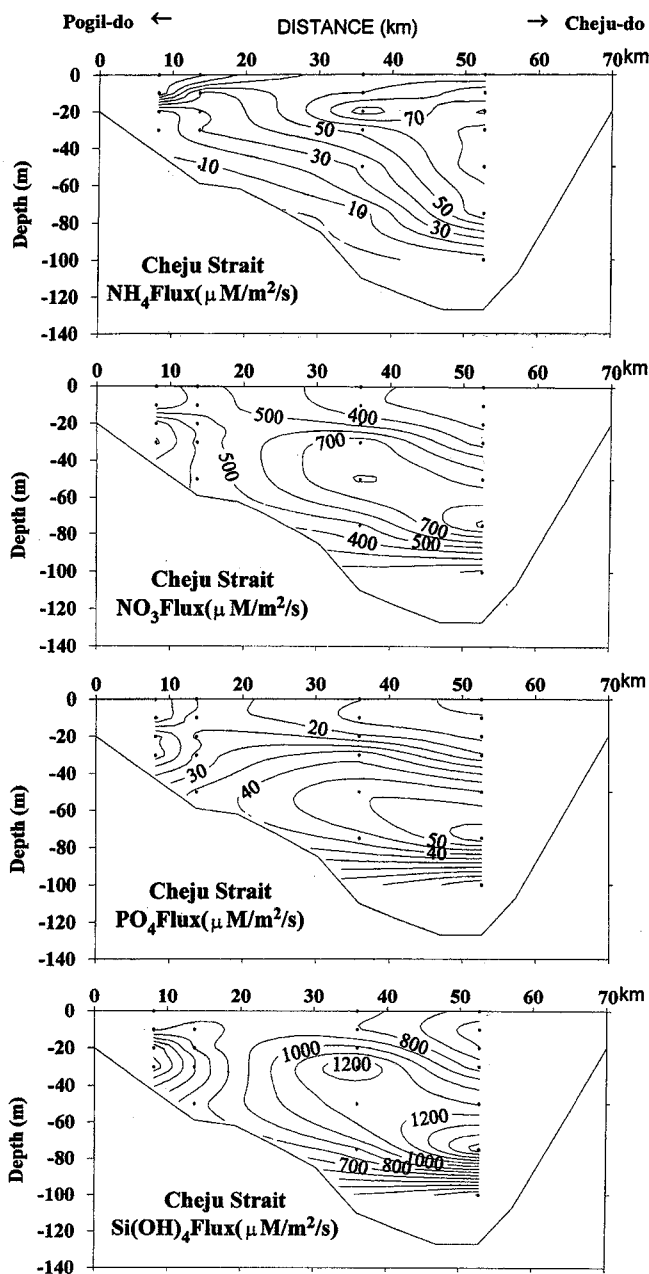


Fig. 5. Annual average material fluxes per unit area (flux-density) of NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , Si(OH)_4 , in the Cheju Strait.

질 및 암모니아 이온 분포와는 달리 이들 농도가 높은 제주도 북쪽사면골 30~75 m 수심에서 최대값을 보였으나, 수심증가에 따라 감소하여 최소의 유속(0.8 cm s^{-1})을 보인 저층(>75 m)에서 최소값을 보였다(Fig. 5).

연평균 단위면적당 입자성부유물질 플럭스 범위는 18~712 $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로서 입자성부유물질 농도 및 유속이 높은 보길도 인접 표층에서 최대값을 보였으나, 제주도쪽으로 갈수록, 또한 수심증가에 따라 감소하여, 제주도 북쪽 사면골의 저층에서 최소값을 보였다(Fig. 6).

연평균 단위면적당 입자성 유기탄소 및 질소 플럭스 범위는 각각 0.4~14, 0.07~2.7 $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로서 대체로 표층에서 높고, 수

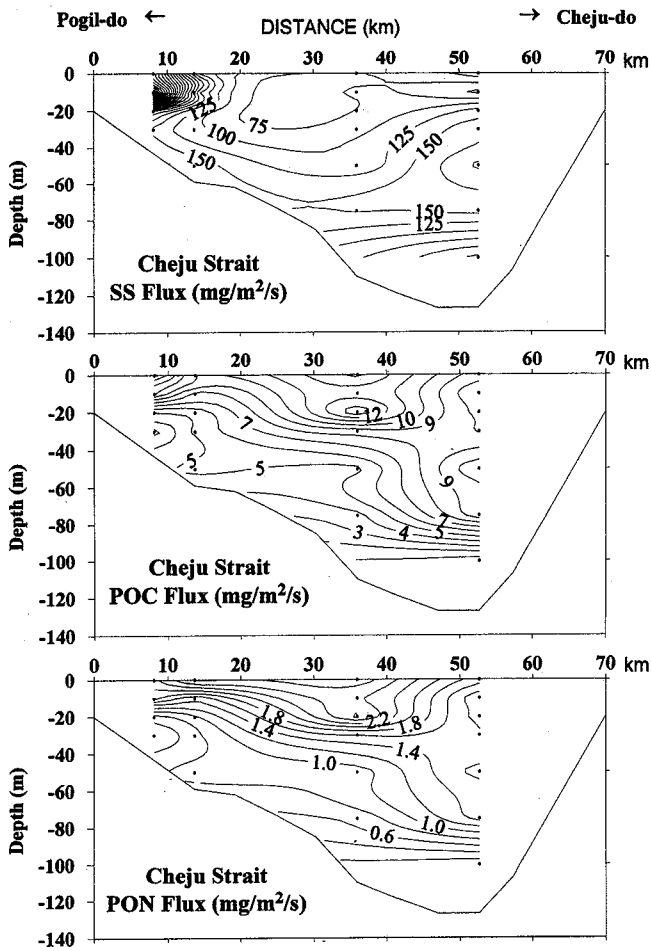


Fig. 6. Annual average material fluxes per unit area (flux-density) of SS, POC, PON ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$) in the Cheju Strait.

심층가에 따라 감소하였다(Fig. 6).

이러한 계절별 해수 순 수송량 및 화학물질 농도의 차이로 인해 해수 순 수송량에 화학성분 농도를 곱한 각 화학성분별 플럭스 또한 계절에 따른 차이를 보여준다. 이러한 계절변동에 따라 하계 및 추계에 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스는 춘계에 비해 부유물질은 약 2배, 규산은 약 4배 크다. 연평균 해류속과 단위면적당 화학물질 플럭스간의 관계를 Fig. 7에 나타내었다.

연평균 입자성부유물질, 질산이온 및 인산이온 플럭스는 해류 속간에는 상관관계(R^2)가 0.3 이하로서 뚜렷한 상관관계는 보이지 않았다. 이는 이들 물질들의 플럭스는 해류속보다는 물질농도 분포에 의존한다는 것을 의미한다. 그러나 규산 특히 입자성유기탄소 및 질소 플럭스는 해류속과의 상관관계(R^2)가 0.7 이상으로서 입자성유기탄소 및 질소 플럭스는 해류속에 따라 좌우된다. 제주해협을 통한 화학물질 이동량을 Table 1에 나타내었다.

제주해협을 통해 교환되는 총 입자성부유물질 플럭스 중 9월(78%)을 제외하고는 90% 이상, 질산이온을 포함한 용존무기영양염류는 전 계절에 걸쳐 93% 이상이 동향류에 의해 황해 및 동중국해로부터 남해로 유입된다. 즉 서향류에 의해 제주해협을 통해 남해에서 황해 및 동중국해로 빠져나가는 화학물질의 양은 동향

류에 의해 황해에서 남해로 들어오는 화학물질의 양의 1% 미만으로 무시할 만 하다.

토 의

남해분지규모의 화학물질 플럭스

남해로 유입되는 주요 해류로는 제주해협을 통해 유입되는 제주해협류와 제주~큐슈 사이를 통해 유입되는 대마난류들을 들 수 있다.

현재까지 조사된 국내의 해류 및 화학물질 농도자료들을 인용하여 남해분지규모의 화학물질 플럭스를 추정하였다(Table 2).

여기서 하천 및 강우에 의해 남해로 유입되는 담수 및 화학물질 유입량은 자료 부족으로 인해 제외되었으나, 남해 해수 총부피 중 강우 및 하천으로부터 유입되는 담수량은 미미할 것으로 사료된다.

제주-큐슈간 해협을 통한 해수수송량 자료는 전무하여 대한해협(동, 서수도 포함) 수송량에서 제주해협을 통한 수송량을 뺀 나머지를 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 들어오는 해수수송량으로 산정하였고, 화학물질 농도들은 본 연구결과와 동중국해 자료(홍 등, 1997, 1998, 1999)를 인용하였다.

제주해협(제주해협)을 통해 남해로 들어오는 평균 입자성부유물질, 질산이온, 인산이온 및 규산 플럭스는 각각 $0.73 \times 10^9 \text{ mg s}^{-1}$, $1.92 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$, $0.12 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$, $3.26 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$ 이다.

반면에 대한해협을 통해 동해로 나가는 입자성부유물질, 질산이온, 인산이온 및 규산 플럭스는 각각 $1.5 \times 10^9 \text{ mg s}^{-1}$, $10.7 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$, $1.0 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$, $24.2 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$ 이다. 제주-큐슈간 해협을 통해 들어오는 입자성부유물질, 질산이온, 인산이온 및 규산 플럭스는 각각 $0.9 \times 10^9 \text{ mg s}^{-1}$, $8.0 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$, $0.59 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$, $17.4 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$ 이다.

따라서 대마난류에 의해 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 들어오는 화학물질들의 총 플럭스는 제주해협을 통한 유입량보다 약 3~4배 크다. 제주해협과 제주-큐슈간 해협을 통해 남해로 유입되는 질산이온 플럭스는 약 $10.6 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$ 로서 대한해협을 통해 동해로 빠져나가는 양($10.7 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$)과 거의 같다. 그러나 인산이온($0.75 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$) 및 규산($22.3 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$)의 경우에는 대한해협을 통해 나가는 인산이온($1.0 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$)과 규산($24.2 \times 10^9 \mu\text{mol s}^{-1}$)의 양보다 약간 작다.

해수 순 수송량에 계절별 화학물질 평균농도를 곱하여 구한 제주해협 통과 연간 화학물질 플럭스는 부유물질이 $22.9 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$, 암모니아이온은 $0.52 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 질산이온은 $6.05 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 인산이온은 $0.36 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 규산은 $10.27 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ 이다. 이것은 양자강(3.0×10^{10} , $0.06 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$) 및 황하강(0.5×10^{10} , $0.002 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$)을 통한 연간 방출량보다 질산이온은 약 2~12배, 인산이온은 약 6~180배 정도 높다(Zhang, 1996; Chung et al., 1999).

해양에서 이러한 플럭스는 해수수송량의 차이에 따라 달라질수 있기 때문에 제주해협에 의한 화학물질 수송량의 상대적인 기여도를 추정하기 위해 해역별 화학물질 플럭스를 해수수송량으로 나누어 해역별로 비교하였다(Table 2d).

해수수송량(Sv)당 입자성부유물질 연간 플럭스는 제주해협($44.48 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)이 대한해협($26.08 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)보다 약 1.7배 크다.

또한 제주해협 통과 질산이온 연간 플럭스($11.60 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1} \text{ Sv}^{-1}$)

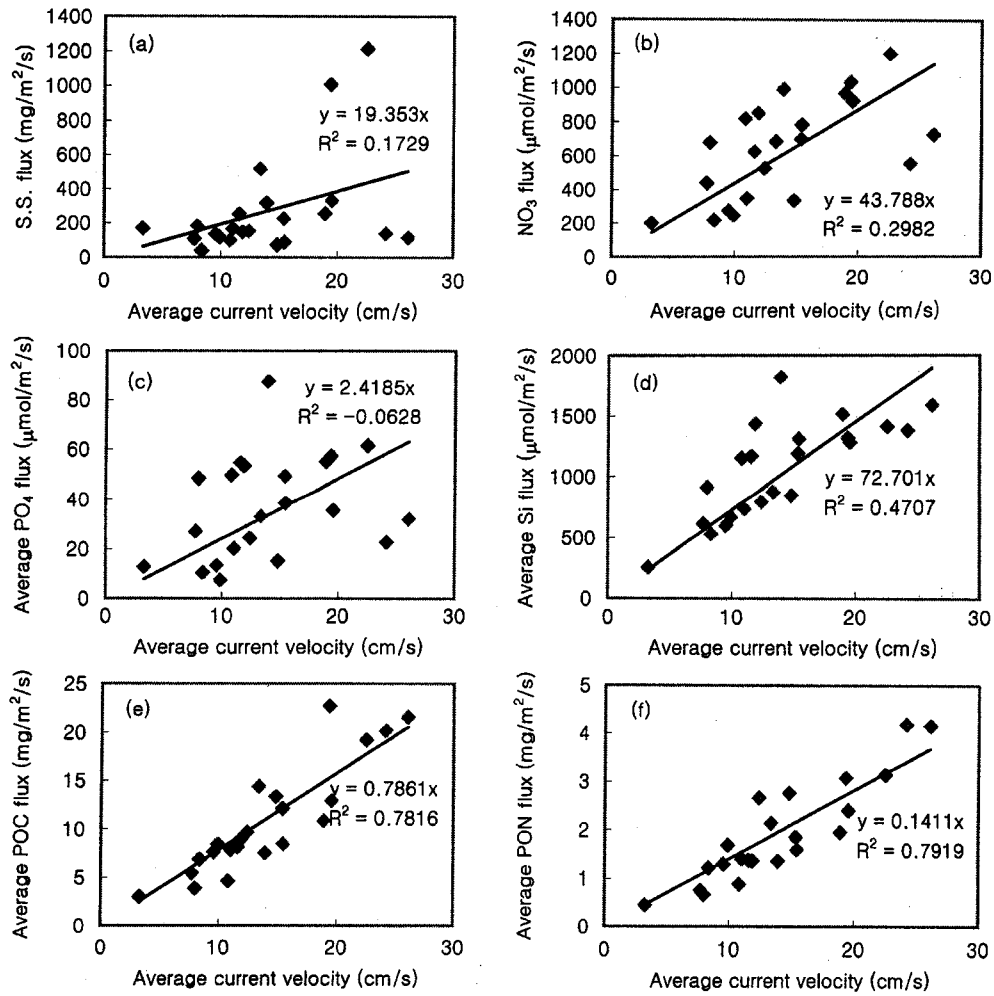


Fig. 7. The relationships between average current velocity and average SS(a), NO₃⁻(b), PO₄³⁻(c), Si(OH)₄(d), POC(e), PON(f) fluxes per unit area in the Cheju Strait.

Table 1. Along-strait material fluxes in the Cheju Strait

	S.S	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
	(10 ⁸ mg s ⁻¹)		(10 ⁸ mol s ⁻¹)		
Mar. 1997					
Eastward	3.79	1.80	13.63	31.24	15.71
Westward	-0.56	-0.07	-0.78	-0.08	-1.16
Net	3.23	1.73	12.85	1.16	14.55
Sep. 1997					
Eastward	4.28	2.91	25.06	1.61	36.19
Westward	-0.11	-0.09	-0.64	-0.04	-0.77
Net	4.17	2.82	24.42	1.57	35.42
Sep. 1998					
Eastward	6.97	1.55	37.02	2.36	57.02
Westward	-1.92	-0.44	-2.14	-0.19	-5.17
Net	5.05	1.11	34.88	2.17	51.85
Nov. 1998					
Eastward	17.80	2.10	30.00	1.60	53.40
Westward	-1.20	-0.10	-1.60	-0.10	-2.60
Net	16.60	2.00	28.40	1.50	50.80
Aug. 1998					
Eastward	9.28	1.16	27.10	1.10	58.20
Westward	-0.30	-0.05	-0.60	-0.01	-1.86
Net	8.98	0.56	27.50	1.09	56.34

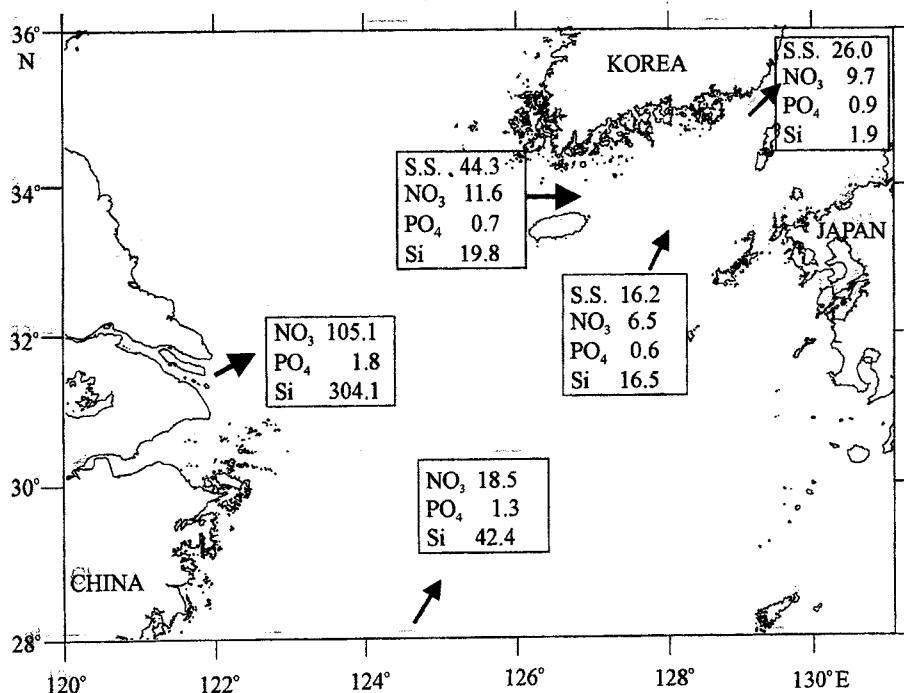
는 대한해협(9.72×10¹⁰ mol yr⁻¹ Sv⁻¹)보다 약 1.2배, 쿠로시오에 의한 수송량(18.55×10¹⁰ mol yr⁻¹ Sv⁻¹; Chen *et al.*, 1994)에 비해서는 2/3 수준으로 높다(Fig. 8). 이와같이 제주해협을 통과하는 화학물질 플럭스가 타 해역보다 높은 이유는 비교적 빈영양의 쿠로시오 표층수의 기여도가 큰 큐슈~제주간 및 대한해협보다 상대적으로 저염고영양염을 함유한 황해 연안수 및 양자강 유출수가 제주해협을 통해 제주해협으로 유입되기 때문이다. 라둡동위원소를 이용하여 제주해협 표층수에서 양자강 희석수의 기여도는 1998년 9월에 약 27%에 달하는 것으로 알려져 있어(홍등, 1999), 제주해협에서 양자강 희석수에 의한 기여가 상당함을 알 수 있다. 이러한 제주해협을 통과하는 풍부한 화학물질들을 함유한 해수는 남해의 생지화학적 과정들에 있어서 상당히 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다. 따라서 차후 제주해협 통과 화학물질 플럭스에 대한 장기적인 자료확보와 지속적인 연구가 요망된다.

결론

1. 입자성부유물질, 질산이온 및 인산이온 플럭스는 해류속보다 는 농도에 의존하지만, 규산 특히 입자성유기탄소 및 질소 플럭스

Table 2. The comparison of chemical material transport in the Cheju-Korea Strait region.

Current	Cheju Current	Tushima Current	Cheju+Tushima	Kuroshio (Chen <i>et al.</i> 1994)
Area	Cheju Strait	Cheju-Kushiu	Korean Strait	East of Taiwan
Area width (km)	100	200	166.2	300
Water depth (m)	100	150	101	1000
Water transport (Sv)	0.52	2.97	3.49	29.5
Average NO ₃ (μM)	4.91	2.68	3.08	5.88
Average PO ₄ (μM)	0.31	0.2	0.29	0.40
Average Si(OH) ₄ (μM)	9.41	5.88	6.94	13.43
Average S.S. (mg/l)	0.75	0.3	0.44	-
a. Total material flux				
NO ₃ (×10 ⁹ mol/s)	1.92	7.96	10.75	173.5
PO ₄ (×10 ⁹ mol/s)	0.12	0.59	1.01	11.8
Si(OH) ₄ (×10 ⁹ mol/s)	3.26	17.46	24.22	396.3
S.S. (×10 ⁹ mg/s)	0.73	0.89	1.54	-
b. Normalized with width and depth				
NO ₃ (×10 ⁹ mol/s)	1.92	3.70	6.40	5.78
PO ₄ (×10 ⁹ mol/s)	0.12	0.28	0.60	0.39
Si(OH) ₄ (×10 ⁹ mol/s)	3.26	8.12	14.43	13.21
S.S. (×10 ⁹ mg/s)	0.73	0.41	0.91	-
c. Normalized with water transport				
NO ₃ (×10 ⁹ mol/s)	1.92	1.39	1.60	3.06
PO ₄ (×10 ⁹ mol/s)	0.12	0.10	0.15	0.21
Si(OH) ₄ (×10 ⁹ mol/s)	3.26	3.06	3.61	6.99
S.S. (×10 ⁹ mg/s)	0.73	0.16	0.23	-
d. Annual fluxes per water transport				
NO ₃ (×10 ¹⁰ mol yr ⁻¹ Sv ⁻¹)	11.6	8.45	9.72	18.55
PO ₄ (×10 ¹⁰ mol yr ⁻¹ Sv ⁻¹)	0.73	0.63	0.91	1.26
Si(OH) ₄ (×10 ¹⁰ mol yr ⁻¹ Sv ⁻¹)	19.77	18.54	21.89	42.37
S.S. (×10 ⁶ ton yr ⁻¹ Sv ⁻¹)	44.27	18.19	26.08	-

**Fig. 8.** Relative contribution of annual material fluxes per water transport through the Cheju Strait compared to those through the Changjiang River and other straits (unit: S.S. 10⁶ ton yr⁻¹ Sv⁻¹; NO₃, PO₄, Si(OH)₄, 10¹⁰ mol yr⁻¹ Sv⁻¹).

는 해류속에 따라 좌우된다.

2. 제주해협을 통해 교환되는 총 입자성부유물질 플럭스중 9월 (78%)을 제외하고는 90% 이상, 질산이온을 포함한 용존무기영양 염류는 전 계절에 걸쳐 93% 이상이 동향류에 의해 황해 및 동중국해로부터 남해로 유입됨으로서 황해 및 동중국해의 환경변화에 따라 남해에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

3. 제주해협을 통과하여 남해로 들어오는 연간 화학물질들의 플럭스(gross flux)는 부유물질이 $22.9 \times 10^6 \text{ ton yr}^{-1}$, 암모니움이온은 $0.52 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 질산이온은 $6.05 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 인산이온은 $0.36 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$, 규산은 $10.27 \times 10^{10} \text{ mol yr}^{-1}$ 이다.

4. 해역별 화학물질 플럭스를 비교하기 위하여 해수수송량(Sv) 당 입자성부유물질 연간 플럭스는 제주해협이 대한해협보다 약 1.7배 크다. 또한 제주해협 통과 질산이온 연간 플럭스는 대한해협보다 약 1.2배, 쿠로시오에 의한 수송량에 비해서는 2/3 수준으로 높아 제주해협을 통한 물질 유입이 상당히 중요하여 제주해협이 남해의 생지화학적 과정들에 있어서 상당히 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다.

사 사

본 연구는 과학기술부(PN99383) 및 한국해양연구소(PE97612, 98706, 99752, 00784-01) 지원으로 수행되었다. 논문의 수정과 보완에 큰 도움을 주신 김경렬 교수님과 김기현 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

홍기훈 등, 1997. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구, 1차년도 연차보고서, BSPE97612, 442 pp.
 홍기훈 등, 1998. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구, 2차년도 연차보고서, BSPE98706-00-1139-4, 647 pp.
 홍기훈 등, 1999. 남해대륙붕 물질순환과 생지화학 환경연구, 3차년도 연차보고서, BSPE99725-00-1235-4, 569 pp.
 Capenter, J.M., 1965. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Limnol. Oceanogr.*, **10**: 141-143.
 Chang, K-I, K. Kim, S.W. Lee. and T.B. Shim, 1995. Hydrography and sub-tidal current in the Cheju strait in spring, 1983. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 203-215.
 Chen, C.T.A., C.T. Liu. and S.C. Pai, 1994. Transport of oxygen, nutrients and carbonates by the Kuroshio Current. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, **12**: 220-227.
 Chen, C.T.A., C.T. Liu. and S.C. Pai, 1995. Variation in oxygen,

nutrient and carbonate fluxes of the Kuroshio Current. *La mer*, **33**: 161-176.
 Civitarese, G., M. Gacic, A. Vetrano, A. Boldrin, D. Bregant, S. Rabitti. and E. Souvermezoglou, 1998. Biogeochemical fluxes through the Strait of Otranto (Eastern Mediterranean). *Cont. Shelf Res.*, **18**: 773-789.
 Cho, Y.K. and K. Kim, 1994. Characteristics and origin of the cold water in the South Sea of Korea in summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **29**: 414-421.
 Chough, S.K., 1983. Marine Geology of Korean Seas. *IHRDC Publ., Boston*, 156 pp.
 Chung C.S., G.H. Hong, S.H. Kim, J.K. Park, Y.I. Kim, D.S. Moon, I.K. Bang, B.D. Wang, G.Y. Wang and D.B. Yang, 1999. The distributional characteristics and budget of dissolved inorganic nutrients in the Yellow Sea. In: Biogeochemical processes in the Bohai and Yellow Sea, edited by G.H. Hong, J. Zhang, and C.S. Chung, the Dongjin Publication Ass., Seoul, Korea, 274 pp.
 Grasshoff, K., M. Ehrhardt and K. Kremling, 1983. Methods of seawater analysis. *Verlag. Chemie*, 419 pp.
 Lee, H.J., S.K. Chough and S.J. Han, 1990. Recent sedimentation in the South Sea, Korea. Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology, Shanghai, September 7-10, 1998. *China Ocean Press*, Beijing, 367-386.
 Kan O., S. Takeshi and Y. Yaochu, 1994. Volume and nutrient transports of the Kuroshio South of Japan. *Proceeding of Chinese-Japan JSCRK*. 361 pp.
 Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. *Pergamon Press, USA*, 173 pp.
 Suk M.S., G.H. Hong, C.S. Chung, K.I. Chang and D.J. Kang, 1996. Distribution and transport of suspend particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 55-63.
 Wells J.T. and O.K. Huh, 1984. Fall-season patterns of turbidity and sediment transport in the Korea Strait and southwestern Yellow Sea. In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas, edited by T. Ichiye, *Elsevier Oceanography Series*, **39**: 387-397.
 Wunsch C., D. Hu and B. Grant, 1983. Mass, heat and nutrient fluxes in the South Pacific Ocean. *J. Physic. Oceanogr.*, **13**: 725-753.
 Zhang J., 1996. Nutrients elements in large Chinese estuaries. *Cont. Shelf Res.*, **16**: 1023-1045.

2000년 3월 3일 원고접수
 2000년 5월 30일 수정본채택
 담당편집위원: 김기현