

여름철 南海의 低鹽化와 輸送量 Salinity Decrease and the Transport in the South Sea of Korea in Summer

조양기* · 김 구* · 노홍길**

Yang Ki Cho*, Kuh Kim* and Hong Kil Rho**

要 旨 : 국립수산진흥원이 관측한 염분자료를 분석하여 여름철 남해의 저염화 현상을 규명하였다. 6월과 8월에 남해 전 수심의 저염화는 강수량과 강물의 유입으로는 설명될 수 없고, 주위 해역 중 유일하게 저염수가 존재하는 제주해협 서편 해역 저염수의 유입으로만 설명이 가능하다. 염보존 Box 모델의 결과에 의하면, 대한해협 서수도의 수송량을 $1.4 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이라고 할 때, 이 수송량의 31~36% 정도인 $0.5 \sim 0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (평균유속은 10~13 cm/sec)의 수송량이 제주해협을 경유하여 남해로 유입되고, 나머지는 제주도와 대마도 사이로 유입된다.

Abstract □ The salinity data taken by Fishery Research Development Agency were analyzed to investigate the salinity decrease in the South Sea of Korea in summer. Decrease of depth-averaged salinity in June and August can not be accounted for the input of river discharge and rainfall. The low salinity water in the Cheju Strait is the only possible source for the decrease of salinities in the South Sea. A box model of the salt conservation shows that the transport in the Cheju Strait is $0.5 \sim 0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (mean velocity is 10~13 cm/sec) which is 31~36% of the transport in the western channel of Korea Strait and the transport in the section between Cheju island and Tsushima island is $0.9 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$, when the transport in the western channel of the Korea Strait is $1.4 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$.

1. 서 론

남해의 해수특성은 계절적으로 크게 변하여 겨울에는 저온고염이고 여름에는 고온저염이다. 수온과 염분의 계절변화 폭은 약 17°C와 3%에 이른다(공, 1971; 강, 1974). 수온변화는 대부분 대기와의 열 교환에 의한 것이라고 알려져 있다(Kang, 1984; 봉, 1976; 이, 1987). 하지만 염분의 계절변화 원인을 빗물이나 강물의 영향이라고만 추정하였을 뿐(강, 1974), 이에 대한 정량적인 연구는 없었다.

남해의 해수순환에 관한 연구는 해수의 특성분석, 해류관측 등을 통하여 수행되었다. 해수의 특성분석을 통한 연구결과로는 쿠로시오 기원의 대마난류가 큐슈 서쪽을 거쳐 대한해협을 통과한다는 Uda(1934)의 연구결과가 제주도 동남쪽과 대한해협에서는 아직도

그대로 받아들여지고 있으나, 제주해협 부근 해역에서는 최근 새로운 연구결과들이 발표되었다. 제주도를 우회한 고온고염의 해수가 제주해협의 남부해역을 통과하여 동쪽으로 향한다고 알려졌고(김, 1982; 노와 김, 1983; Rho, 1985; Lie, 1986; 김 등, 1991), 여름철 제주해협의 표층에 출현하는 저염수는 중국대륙연안에서 기원하여 제주해협을 거쳐 남해로 흐른다는 사실도 보고되었다(김, 1986). 본 연구에 앞서 수행된 조와 김(1994)의 연구결과는 여름철 남해의 저온수가 제주해협의 북부를 거쳐 남해로 유입됨을 보여주어, 해수특성분석에 의한 연구결과들은 제주해협 내 모든 해역에서 해수가 남해 쪽으로 흐르고 있음을 시사한다.

남해에서 해류관측은 주로 대한해협과 제주해협에서 이루어졌다. 이(1970, 1974)는 대한해협 서수도의

*서울대학교 해양학과 (Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

**제주대학교 어로학과 (Department of Fishing Technology, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea)

여러 지점에서 해류를 정선 관측하여 여름철 수송량을 약 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이라고 계산하였다. 이는 지형류 계산에 의해서 산출된 여름철 수송량과 비슷하다(이, 1966). 지금까지 제주해협에서 직접 해류관측은 해협의 남부에서 주로 실시되었다. 제주해협 내에서 유속은 표층에서 가장 크며 수심이 깊어질수록 작아져, 표층의 유속은 저층의 약 1.5배이다(김, 1979). 남해에서 해류관측은 대부분 25시간의 짧은 기간 동안 이루어졌는데, 해양연구소(1987)는 22일간의 비교적 오랜 기간 동안 거문도부근의 약 30m 층에서 해류를 관측하였다. 평균 항류는 동북동쪽으로 약 16 cm/sec였다. Miita and Ogawa(1984)는 1974년까지 대마난류 해역에서 하루 이상 관측된 모든 해류자료들을 이용하여 몇 개의 단면에서 각각 수송량을 구한 바 있다. 그 결과에 의하면 제주해협을 거쳐 남해로 흐르는 수송량은 $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 대한해협 서수도를 통과하여 동해로 흐르는 수송량은 $1.7 \sim 1.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다.

해수특성분석의 결과는 해수의 흐름을 정량적으로 보여주지 못하고 직접 관측된 해류자료는 시공간적으로 한정된 자료이기 때문에 변화가 큰 해수의 흐름을 전체적으로 이해하기에는 많은 어려움이 있다. 염보존 Box모델을 이용하면 해수의 평균적인 흐름의 크기를 정량화 할 수 있다(Knauss, 1978; Proudman, 1953). 본 연구에서는 국립수산진흥원이 관측한 염분

자료(Fig. 1의 ● 정점들)를 이용하여 여름철 남해 저염화 원인을 규명하고 이와 관련된 수송량을 염보존 Box모델을 이용하여 구해보고자 한다.

2. 여름철 남해 해수의 저염화

남해 해수의 염분 변화와 그 원인을 구체적으로 파악하면 남해의 해수순환을 추정할 수 있다. 1976년부터 1985년까지 10년 평균한 자료 중 표층과 50m 층 염분의 시간적 변화는 Fig. 2와 같다. 표층의 경우 6월의 염분이 4월보다 제주해협쪽에서 최고 1.4%, 남해안쪽에서 최저 0.5% 낮아져 전체적으로 1.0% 정도 낮아졌고(Fig. 2a), 8월의 염분은 6월보다 남해의 남부에서 최고 1.9%에서, 남해안쪽 최저 1.2%까지 평균적으로 1.6% 정도 낮아졌다(Fig. 2b). 50m층의 경우 6월의 염분은 4월보다 지역에 따라 큰 차이 없이 0.4% 정도 낮아졌고(Fig. 2c), 8월의 염분은 6월보다 제주해협 쪽이 최고 0.7%가 낮아졌고 부산연안에서는 오히려 0.1%의 증가를 보였으며 평균적으로 0.4% 정도 낮아졌다(Fig. 2d). 수심 평균한 염분은 6월의 염분이 4월보다 제주해협 쪽의 최고 0.8%에서 수심이 깊은 남해의 남부에서 최저 0.4%까지 평균 0.5%가 낮아졌고 8월의 염분은 6월보다 제주해협 쪽의 최고 1.1%에서 대한해협 쪽의 최저 0.3%까지 평균 0.7% 정도 염분이 낮아졌다. 대기나 강물의 영향을 쉽게 받는 표층뿐만 아니라, 저층이라 할 수 있는 50m층에서도 저염화가 일어난다.

해수의 저염화를 일으키는 요인으로는 빗물이나 강물의 유입과 저염수의 유입을 생각할 수 있다. 먼저 남해 해수의 여름철 저염화의 요인으로 빗물에 대해 그 가능성을 조사해보자. 남해의 평균수심이 약 75 m이므로 이 기간동안 빗물에 의해서만 염분이 변한다고 가정하자. 강수량을 X m라 하고 저염화되기 전의 평균 염분을 4월에 34.4%, 6월에 33.9%라고 하고 염분의 변화량을 4월과 6월 사이에 평균 0.5%, 6월과 8월 사이에 0.7%라고 하며 해수의 유입과 유출이 없고 저염화가 강수에 의해서만 일어난다고 가정하자. 저염화되기 전과 후의 전체 염량은 같아야 하므로 아래와 같은 관계식이 성립한다.

4월과 6월 사이

$$75.0\text{m} \times 34.4\% = (75.0 + X) \text{ m} \times (34.4 - 0.5)\%$$

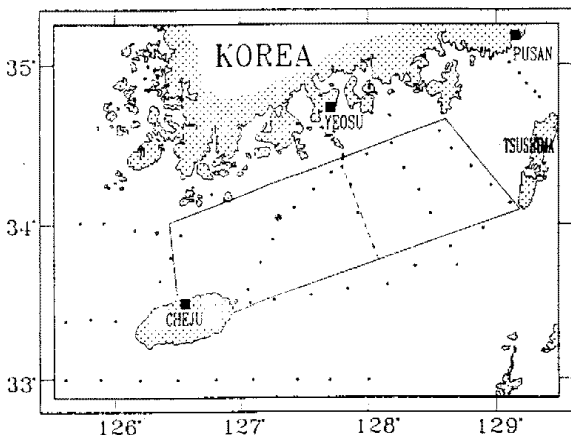


Fig. 1. Locations of hydrographic stations occupied by Fishery Research Development Agency (● marks). Precipitation and evaporation data are from Pusan, Yeosu and Cheju (■ marks). Solid line represent the boundary used in box model. Dashed line is new boundary used in two box model.

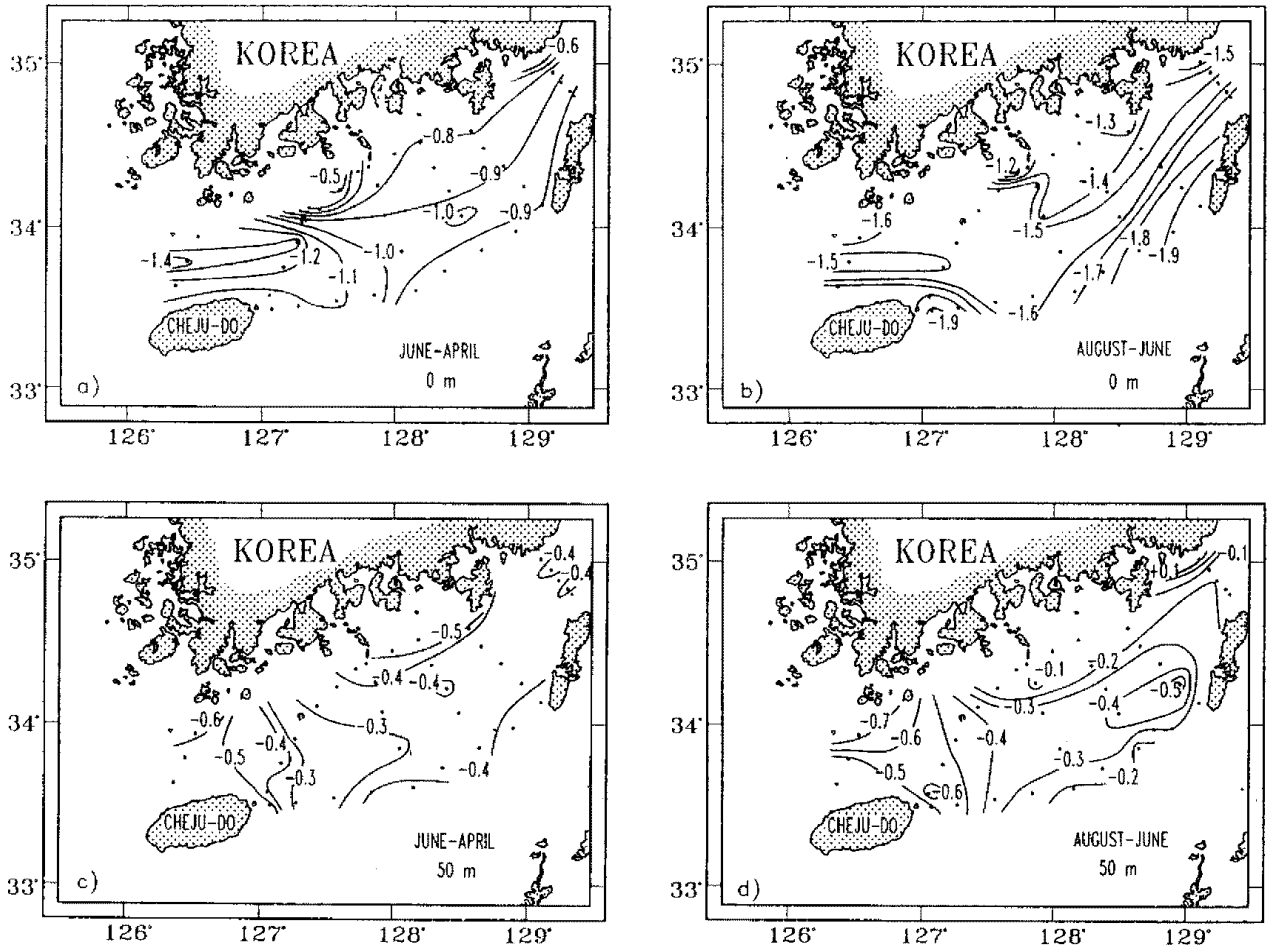


Fig. 2. Mean salinity change from April to June and from June to August at surface (a, b) and at 50 m (c, d) for 1976-1985. Negative signs mean the decrease of the salinity.

X=1.1m

6월과 8월 사이

$$75.0m \times 33.9\% = (75.0 + X) m \times (33.9 - 0.7)\%$$

X=1.6 m

즉 남해에서 염분 변화는 4월과 6월 사이 약 1,100 mm, 6월과 8월 사이 약 1,600 mm 정도의 강수량으로 설명이 가능하다. 남해의 실제 강수량과 증발량을 구하기 위하여 제주, 여수, 부산의 세 지점(Fig. 1의 ■ 정점들)의 강수량과 증발량의 차이를 평균한 값을 다시 1976년부터 1985년까지 10년간 평균하였다. 그 결과 4월에서 6월 사이와 6월에서 8월 사이의 10년 평균한 값은 각각 1100 mm와 1600 mm 보다 훨씬 적은 0.7 mm와 214 mm이며, 이러한 양으로는 남해 해수의 저염화를 설명할 수 없다.

지형적으로 남해 해수의 염분에 가장 큰 영향을

미칠 수 있는 강은 섬진강이며, 이 강의 배수구역 (drainage area)은 전라남도와 경상남도의 일부지역으로 남해 전체 면적의 절반도 안된다. 그러므로 섬진강의 유출량은 남해에 직접 영향을 미치는 강수량의 절반 미만으로 사료된다.

해수의 유동을 고려하지 않은 염보존방정식을 이용하여 강수량에 의한 저염화를 계산한 결과 여름철 남해 전 층 해수의 저염화는 강수량, 육수의 유입 등 지역적인 원인으로 설명될 수 없음이 분명하고, 주변 해역으로부터 저염수가 남해로 흘러 들어온 결과일 수밖에 없다.

남해의 주위 해역중 전 층에 걸쳐 남해보다 더 저염의 해수가 존재하는 곳을 알아보기 위하여 Fig. 3 처럼 1976년부터 1985년까지 10년간 평균한 염분을 다시 각 정점별로 최대 수심까지 수심 평균하였다. 4월의 경우(Fig. 3a) 전 해역의 염분이 34.0% 이상이

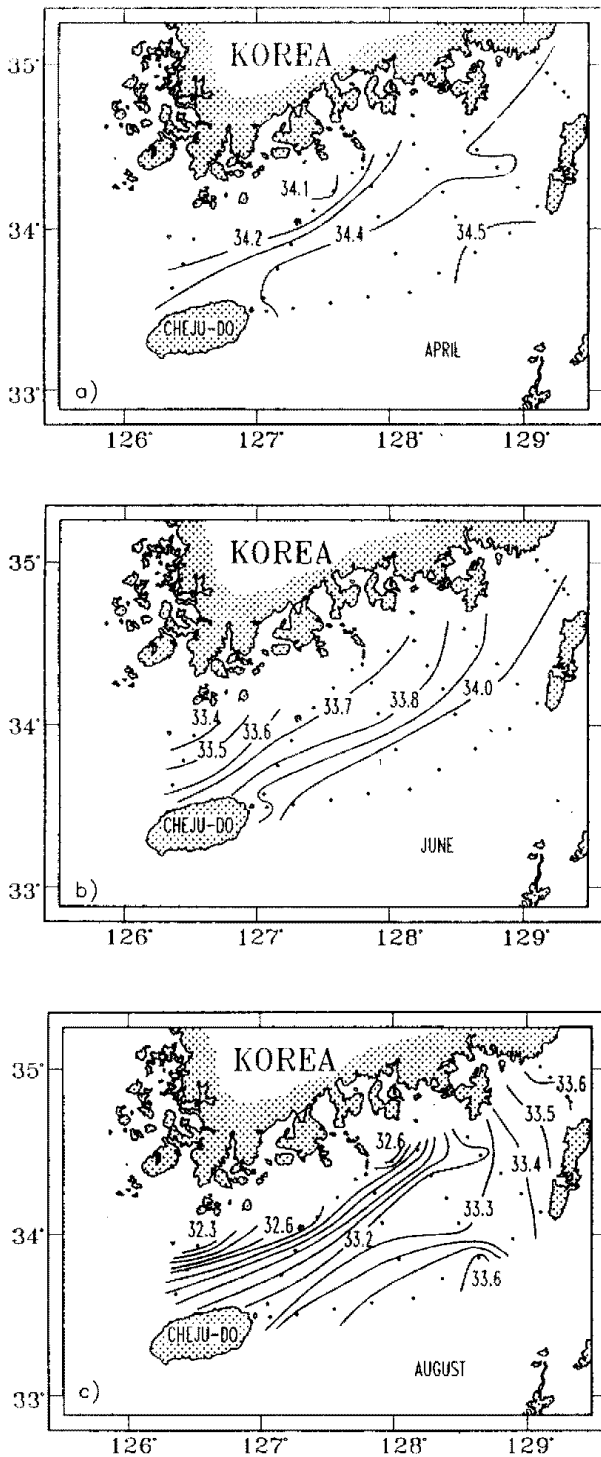


Fig. 3. Depth-averaged mean salinity for 1976-1985 in April (a), June (b) and August (c).

다. 대마난류 경로인 외해역과 대한해협은 남해 중앙해역보다 염분이 높고 제주해협 쪽만 염분이 더 낮다. 앞에서 이미 언급한 바와 같이 6월의 경우(Fig. 3 b) 전 해역의 염분이 크게 낮아졌으나 4월처럼 외해역과 대한해협 쪽은 남해 중앙해역보다 염분이 높은

반면 제주해협은 낮다. 이러한 염분분포는 8월까지 (Fig. 3c) 지속되어 남해의 주위 해역 중 남해보다 저염의 해수가 존재하는 곳은 제주해협 서편 해역뿐임을 보여준다. 그러므로 여름철 남해 전 층 해수의 저염화는 제주해협 서편 해역에서 저염수의 유입으로만 설명될 수 있다.

3. 염보존 BOX 모델

앞에서 제주해협 서편 해역에서 저염의 해수가 남해로 유입되어 여름철 남해 해수의 저염화 현상을 일으킴을 알았다. 여기에서는 남해를 3개의 출입구를 갖는 간단한 Box로 만들어 염보존과 질량보존의 원리를 이용하여(Knauss, 1978; Proudman, 1953) 각 출입구에서의 수송량을 정량적으로 구해보고자 한다. Box와 세 출입구(B1: 제주해협, B2: 대한해협, B3: 제주도과 대마도 사이)의 크기는 실제 지형과 최대한 잘 일치하도록 결정하였다(Fig. 1의 실선). 단면 B1의 염분은 제주해협 내 수산진흥원 203관측선의 3개 정점에서 얻어진 염분의 평균치를 이용하였으며, 단면 B2에서는 206선의 5개 정점의 평균자료를 이용하였다. 그리고 단면 B3에서는 제주도와 대마도 사이 9개 정점의 평균 자료를 이용하였다.

Box내의 해류를 ΔT 시간(약 2개월)동안 정상류라고 가정하고 단면에서 염분의 변화가 일정하다고 가정하며 확산은 무시한다. Box내부의 질량은 각 단면을 통과하는 질량의 유출입, 증발량 그리고 강수량에 의해 변하며 Box내부의 해수면 변화로 나타난다. Box내부의 염분변화는 강수와 증발에 의한 것과 각 단면에서 염의 유입과 유출에 의하여 발생되나, 앞에서 살펴 본 바와 같이 강수와 증발에 의한 염분 변화의 영향은 실제 변화의 10% 정도이므로 무시한다. 각 단면에서 시간과 공간적으로 유속과 염분이 평균 값으로 대표된다고 가정한다.

이용할 수 있는 식은 두 개이고 수송량을 구해야 할 단면은 세 개이므로 각 단면에서의 수송량의 절대값을 구할 수 없다. 그러나 본 연구에서 저염화 현상을 설명하기 위해서는 제주해협에서 해류(V1)가 남해로 향해야 함을 알았다. 기존의 많은 연구결과들은 대한해협 서수도의 해류(V2)와 대마도와 제주도 사이의 해류(V3)가 각각 동해와 남해로 향함을 보여준다(Uda, 1934; Miyazaki and Abe, 1960; Lim, 19

Table 1. Values of each variable used in box model

Variable	April	June	August
S1 (%)	34.20	33.50	32.76
S2 (%)	34.41	33.96	33.30
S3 (%)	34.48	34.04	33.51
ΔS (%)	-0.49		-0.67
Δξ (mm)	82.52		61.84
ΔR (mm)	0.70		214.00
ΔT (day)	62.30		62.50

71). V1과 V3의 유속을 임의의 비율(α)로 가정함으로써 질량보존식과 염분보존식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$V1 \times (B1 + \alpha \times B3) - V2 \times B2 + \frac{\Delta R \times A}{\Delta T} = \frac{\Delta \xi \times A}{\Delta T} \quad (1)$$

$$V1 \times (B1 \times S1 + \alpha \times B3 \times S3) - V2 \times B2 \times S2 = \frac{\Delta S \times H \times A}{\Delta T} \quad (2)$$

- B1: 제주해협 의 단면(4.85 km²)
- V1: 제주해협 의 평균 유속
- S1: 제주해협 의 평균 염분
- B2: 대한해협 서수도의 단면(6 km²)
- V2: 대한해협 서수도의 평균 유속
- S2: 대한해협 서수도의 평균 염분
- B3: 제주도 와 대마도 사이의 단면(21 km²)
- V3: 제주도 와 대마도 사이의 평균 유속
- S3: 제주도 와 대마도 사이의 평균 염분
- ΔT: 2개월
- ΔR: 강수량-증발량
- Δξ: 해수면의 변화
- ΔS: Box내부의 염분변화
- A: Box의 평면크기(14600 km²)
- H: Box의 평균수심(75m)

여기에서 이용된 염분은 국립수산진흥원이 관측한 남해의 염분자료 중 1976년에서 1985년까지 10년간 염분의 월별 평균한 값이다. Box내부의 염분변화는 Box내부의 모든 정점들의 염분변화의 평균값을 이용하였다.

각 단면 정점들의 평균염분에 수평적인 거리를 고

Table 2. Transports of the Cheju Strait (T1) according to the transports of the western channel of the Korea Strait (T2)

T2 (10 ⁶ m ³ /sec)	Between April and June		Between June and August	
	T1(10 ⁶ m ³ /sec)	T1/T2 (%)	T1(10 ⁶ m ³ /sec)	T1/T2 (%)
1.00	0.44	44	0.41	41
1.20	0.48	40	0.45	38
1.40	0.51	36	0.50	36
1.60	0.55	34	0.54	34
1.80	0.58	32	0.59	33
2.00	0.62	31	0.63	32
3.00	0.80	27	0.85	28
4.00	0.98	25	1.07	27

려하여 각 출입구에서의 평균염분을 구했으며 다시 4월과 6월 그리고 6월과 8월 사이의 평균염분은 염분의 변화가 각 단면에서 정해진 시간동안 일정하다고 가정하고 4월과 6월 그리고 6월과 8월의 염분을 평균한 값을 이용하였다. 각 정점에서 최대 수심까지 수심 평균(depth average)하여 그 정점의 평균 염분으로 취했다(Fig. 3). 해수면 변화량, 증발량 그리고 강수량은 부산, 여수, 제주의 세 정점에서 관측한 값을 1976년에서 1985년까지 10년 동안 평균하여 이용하였다. 이러한 과정을 거쳐 얻은 값들은 Table 1에 정리하였다.

대한해협 서수도의 수송량(T2)이 1.0×10⁶ m³/sec에서 4.0×10⁶ m³/sec까지 변할 때 제주해협 의 수송량(T1)을 구한 결과가 Table 2이다. 대한해협 서수도의 수송량이 1.0×10⁶ m³/sec일 때 제주해협 의 수송량은 대한해협 서수도 통과 수송량의 41~46%, 1.4×10⁶ m³/sec일 때는 36%, 2.0×10⁶ m³/sec일 때는 31~32%, 4.0×10⁶ m³/sec일 때는 25~27%이다. 대한해협 서수도의 수송량을 지금까지 알려진 여러 연구결과들과 비슷한 1.4~2.0×10⁶ m³/sec이라면(이, 1966; 이, 1970; 이, 1974, Miita and Ogawa, 1984) 제주해협 의 수송량은 대한해협 서수도 통과 수송량의 31~36%인 0.5~0.6×10⁶ m³/sec(4~6월에 0.5~0.6×10⁶ m³/sec, 6~8월에 0.5~0.6×10⁶ m³/sec)이며 이 때의 평균 유속은 10~13 cm/sec로 관측치의 수송량과 유속 0.5×10⁶ m³/sec, 10 cm/sec(장, 1984; Miita and Ogawa, 1984)와 비슷하다. 이때 B3에서 유속은 제주해협 유속의 약 0.5배이고 수송량은 약 2배(0.9~1.4×10⁶ m³

/sec)이다.

제주해협에서 해류관측은 주로 해협의 남부에서 이루어져 해협의 남부는 해수가 동북동쪽으로 흐른다는 사실이 잘 알려졌으나(김, 1982; 장, 1984) 해협의 중부와 북부에 대해서는 많은 연구가 실시되지 않아 해수의 흐름에 대하여 상대적으로 잘 알려지지 않았다. Box모델에서 제주해협 남부의(제주도로부터 25 Km, 제주해협의 단면적은 4.85 Km²에서 2.5 Km²로 줄었다.) 해수만 남해로 흐르고 해협의 중부와 북부의 유속은 없다고 가정하고 나머지 조건은 앞의 경우와 모두 같게 하여 결과를 구했다. 여기에서도 대한해협 서수도의 수송량을 1.4~2.0×10⁶ m³/sec이라고 가정하면 제주해협에서 수송량은 해협 전체에 흐름이 있다고 가정하였을 경우보다 약 0.1×10⁶ m³/sec이 증가하고 평균 유속은 실제 관측치인 약 3.5~12.5 cm/sec(김, 1979; 장, 1984)보다 훨씬 큰 20~30 cm/sec이다. 이와 같이 제주해협의 전체에서 남해로 해수가 흐른다고 가정하여 구한 제주해협의 수송량은 실제 관측치와 거의 일치한 반면 제주해협 남부에만 해수의 흐름이 있다고 가정하여 얻은 결과는 실제 관측치와 큰 차이가 있다. 그러므로 이들 결과는 제주해협 남부에 고온고염의 해수가 남해로 흐른다는 연구 결과들(김, 1982; 노와 김, 1983; 장, 1984, 김 등, 1991)과 함께 해협의 중부와 북부에도 보다 저염의 해수가 남부와 비슷한 크기로 흐르고 있음을 시사한다. 이는 여름철南海의 저온저염수가 제주해협의 북부를 거쳐 남해로 흐른다는 조와 김(1994)의 연구 결과도 일관성이 있다.

4. BOX 모델의 오차 추정

Box모델에서는 간단한 방법으로 수송량을 구할 수 있는 장점이 있는 반면 여러 가지 가정이 필요하고 자료의 빈약으로 인해 여러 가지 오차가 발생할 수 있다. 모델에서 발생할 수 있는 오차의 요인으로 자료 자체의 오차와 정상류가 아닐 때 각 지점에서 염분 자료의 시간과 공간에 대한 대표성여부, 2개월간 염분 변화율의 일정성 여부, Box내부의 염변화 값을 구하는데 있어서 발생할 수 있는 오차, 각 출입구에서 수평적인 유속 차이로 인한 오차들이 있다.

각 단면에서 2개월간 염분의 변화율을 일정하다고 가정하여 각 단면을 통해 유입 유출되는 평균 염을

2개월 간격의 두 개 자료를 산술평균하여 구했는데 염분의 변화율이 일정하지 않을 경우 평균 염의 값이 변한다. 이런 경우의 오차를 추정해 보기 위하여 1개월 간격의 자료가 있는 1970년과 1971년의 자료를 이용하여 각 단면에서 염분을 구하면 4~6월의 경우 B1과 B2에서 0.5% 그리고 B3에서 0.6%의 차이가 있고, 6~8월의 경우 모두 0.5%의 차이가 있다. 이 값들을 고려하고 나머지 조건들은 앞의 모델에서 이용한 값들을 이용하여 제주해협을 통과한 수송량을 구하면 4~6월에 0.58~0.73×10⁶ m³/sec, 6~8월에 0.48~0.61×10⁶ m³/sec이 되어 앞의 모델 결과에 비해 각각 13~17%, 3~4%의 수송량이 증가한다.

Box내부의 각 정점들이 공간적으로 거의 균일하게 분포하고 있어 Box내부의 염변화 값은 각 정점들의 변화 값을 깊이를 고려하여 평균한 값을 이용하였다. 그러나 이렇게 구한 염변화 값이 실제 공간적인 염변화 값을 정확하게 고려하여 구한 평균적인 염변화 값을 나타낸다고 생각할 수 없으므로 정점들 사이의 공간적인 표준편차(σ)의 범위에서 Box내부의 염변화 값이 변할 수 있다고 가정하자($\Delta S + \sigma$). Box내부의 염변화 값이 표준편차(4~6월에 0.05, 6~8월에 0.11)만큼 증가나 감소하고 나머지 조건은 앞의 경우와 같게 하면 제주해협에서 4~6월에 + σ 일 때 0.49~0.60×10⁶ m³/sec, - σ 일 때 0.54~0.64×10⁶ m³/sec, 6~8월에 + σ 일 때 0.46~0.59×10⁶ m³/sec, - σ 일 때 0.53~0.66×10⁶ m³/sec이 되어 앞의 모델결과에 비해 4~6월에 4%, 6~8월에 5~7% 수송량의 변화가 있다.

각 단면에서 수직 수평적인 유속의 차이로 인한 오차를 유속의 수직 수평적인 차이를 파악할 수 없어 정확하게 추정하기 어렵다. 제주해협의 수평적인 유속분포는 깊은 골 부근의 유속이 남해안쪽 유속에 대해 평균적으로 약 2배이고 수직적인 유속 분포는 상층이 하층의 1.5배 미만의 크기이다(장, 1984). 단면 B2와 B3에서도 수직 수평적인 유속 차이가 있을 것으로 예상된다. 이러한 해류 관측치의 결과를 이용하여 오차를 추정하기 위하여 각 단면에서의 유속 차이를 수직적으로는 50m를 기준으로 두 층으로 나누어 위 층과 아래 층의 유속 비율을 1.5대 1로 가정하였다. 수평적으로는 B1과 B2를 셋으로 그리고 B3를 둘로 나누어 B1에서는 관측된 해류 자료에서 나타난 바와 같이 깊은 골의 유속을 남해안쪽 유속의

Table 3. Values of each variable of box 1 (right box: see Fig. 1) used in two box model

Variable	April	June	August
S1 (%)	34.34	33.86	33.24
S2 (%)	34.44	33.99	33.61
S3 (%)	34.50	34.05	33.53
ΔS (%)	-0.52		-0.67

Table 4. Values of each variable of box 2 (left box: see Fig. 1) used in two box model

Variable	April	June	August
S1 (%)	34.20	33.50	32.76
S2 (%)	34.34	33.86	33.24
S3 (%)	34.48	34.04	33.51
ΔS (%)	-0.47		-0.63

2배라고 가정하고 B2와 B3에서는 수평적으로 유속의 비율을 2대 1의 범위 내에서 변화시켜 주면서 제주해협 수송량을 구했다. 이 때 가장 큰 수송량의 차이를 보이는 경우 4월과 6월 사이에는 $0.58 \sim 0.71 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 앞의 모델 결과에 비해 12~15% 차이를 보이며, 6월과 8월 사이에는 수송량이 $0.34 \sim 0.39 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 앞의 모델 결과에 비해 32~38%의 차이를 보인다.

위에서 언급한 여러 오차요인들이 복합되어 오차가 가장 큰 경우는 4월과 6월 사이에 $0.65 \sim 0.82 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 앞의 모델 결과에 비해 27~33%의 차이를 보인다. 6월과 8월 사이에서는 수송량이 $0.28 \sim 0.33 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 앞의 모델 결과에 비해 44~48%의 차이를 보인다.

Box모델의 오차를 간접적으로 알아보기 위하여 Box를 Fig. 1의 점선(국립수산진흥원의 205선)을 중심으로 두 개의 Box로 나누어 오른쪽을 Box 1이라 하고 왼쪽을 Box 2라 하여 Table 3, 4와 같은 값들을 이용하여(나머지 값은 Table 1과 동일) 앞의 방법과 같이 먼저 오른쪽 Box에서 대한해협 서수도의 수송량을 $1.4 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 가정하여 오른쪽 Box의 나머지 두 단면의 수송량을 구하고 그 결과를 다시 왼쪽 Box에 이용하여 제주해협 수송량을 구하였다. 4~6월에 $0.51 \sim 0.60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 앞의 모델 결과에 비해 1~7%가 작았으며 6~8월의 경우 $0.47 \sim 0.59 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 앞의 모델 결과에 비해

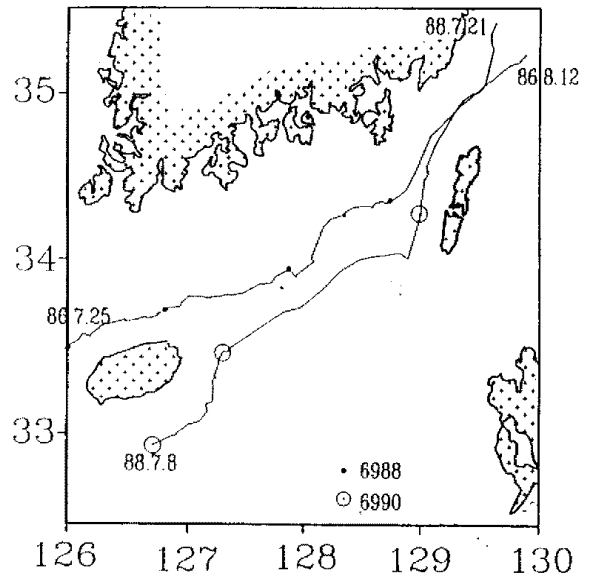


Fig. 4. Drifter trajectories in the South Sea of Korea. The number at beginning and end of each trajectory represents the date. Drifter numbers are printed at the bottom with their symbols. Closed circle represents drifter 6988 and open circle drifter 6990. Marks are placed along each trajectory every five days. Drifter 6988 is from Beardsey *et al.* (1992).

5~7%가 작았다.

5. 결론 및 토의

여름철인 6월과 8월에 남해의 해수는 전 층에서 저염화가 일어난다. 수심평균한 염분은 4월과 6월에 비해 6월과 8월에 각각 0.5‰, 0.7‰씩 낮아진다. 주변해역으로부터 저염수의 유입없이 이 변화를 설명하기 위해서는 1000 mm 이상의 강수량이 필요하나 이 시기 남해의 증발량을 제외한 평균 강수량은 0.7~240 mm이다. 그러므로 남해의 저염화는 육수와 강수량만으로는 설명될 수 없고, 주위 해역 중 저염수가 유일하게 존재하는 제주해협 서편해역(김, 1980; 김, 1982; 김 등, 1991; Kim and Lee, 1982; Rho, 1985)에서 저염수의 유입으로만 설명이 가능하다.

여러 가지 오차요인을 포함한 간단한 염보존 Box 모델을 이용하여 남해의 용적수송량을 구해봄으로써 흐름의 크기를 추정된 결과, 여름철 대한해협 서수도의 수송량을 지금까지 보고된 값들과(이(1966): $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$, Miita and Ogawa(1984): $1.7 \sim 1.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$) 비슷한 $1.4 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이라고 할 때

제주해협 수송량은 대한해협 서수도 통과 수송량의 31~36%인 $0.5 \sim 0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (평균 유속은 10~13 cm/sec)이다. 이 결과는 제주해협에서 직접 관측된 해류와 비교할만하다. 제주해협 내 남북방향으로 세 정점에서 1974년 8월에 25시간동안 해류관측을 실시한 김(1979)은, 북동쪽으로 3.5~13.7 cm/sec 크기의 해류를 보고하였다. 장(1984)은 1983년 4월 12일부터 5월 12일까지 20일간 해협 내 30m 수심과 60m 수심에서 해류를 관측하여 북동쪽으로 각각 12.5 cm/sec와 9.2 cm/sec라고 보고하였다.

이와 같은 결과는, 제주도 서편해역에 1986년 7월에 투하된 인공위성 추적 부이가 12~22 cm/sec의 유속으로 제주해협을 거쳐 동해로 이동한다는(Fig. 4의 drifter 6988) 연구결과(Beardsely *et al.*, 1992) 및 여름철 제주도 주변에 출현하는 표층 저염수의 기원이 중국대륙연안이라는 연구결과(김, 1986)와 함께 황해 기원의 저염수가 남해를 거쳐 동해로 유출됨을 제시한다. 이 저염수들은 여름철 저염의 특성을 갖는 대마난류표층수의 중요한 부분을 차지하리라고 생각된다.

이 때 제주도와 대마도 사이에서는 고염수(그림 3 참조)가 $0.9 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (평균 유속은 4.2~6.7 cm/sec)의 크기로 남해로 들어간다. 남해를 두 개의 Box로 나누어 계산한 결과에 의하면 동쪽 Box의 남쪽 출입구의 수송량과 비슷한 크기의 수송량이 서쪽 Box의 남쪽 출입구를 통과하여 남해로 유입됨을 보여준다. 예를 들어 대한해협 서수도의 수송량을 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이라고 가정할 경우 동쪽 Box의 남쪽 출입구와 서쪽 Box의 남쪽 출입구의 수송량은 각각 4~6월에 $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 과 $0.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고 6~8월에 $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 과 $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 이와 같은 결과는 쿠로시오 기원의 대마난류가 제주도와 대마도 사이를 통과할 때 주축이 동쪽해역에 있음을 제시한 결과들(Uda, 1934; Nitani, 1972)과 상반된 것으로 서쪽해역을 경유하는 흐름도 상당 부분 존재하고 있음을 시사한다. 1988년 7월에 제주도 남쪽에 투하된 부이는(Fig. 4의 drifter 6990) 제주도 동쪽해역에서 북쪽으로 약 17 cm/sec의 속도로 이동한 후 제주해협을 통과하여 북동진하는 6988 부이의 이동경로와 평행하게 약 43 cm/sec의 속도로 남해를 가로지르며 대한해협으로 빠져나간다. 이러한 부이의 이동경로와 제주도 동쪽해역에 연중 고염의 난류수가 설상모양

으로 남해로 유입된다는 노와 히라노(1983)의 연구 결과는, 제주도 동쪽해역을 거쳐 남해를 징유하여 동해로 유출되는 해수의 흐름을 뒷받침한다.

감사의 글

한국 남해의 해류구조 연구에 관심을 갖고 인공위성 추적부이를 제공해 주신 Woods Hole Oceanographic Institution의 R.C. Beardsely 박사께 깊은 감사를 드립니다. 자료 처리를 도와준 양준용군에게 감사드립니다. 본 연구는 한국과학재단의 과제로 수행되었으며, 논문의 작성은 일주학술문화재단에서 지원하였습니다.

참고문헌

- 강철중, 1974. 한국 남해안 연안수의 계절변동에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 12: 107-121.
- 공 영, 1971. 한국 남해안 전선에 관한 연구. 한국 해양학회지, 6(1): 25-36.
- 국립수산진흥원, 1976-1985. 해양조사연보. 14-34권. 부산. 한국.
- 김 구, 1982. 한국 남서해의 해류분포와 그 영향에 관한 연구. 한국과학재단 연구보고, 29pp.
- 김 구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 해역의 수계 및 해수순환. 한국해양학회지, 26(3): 262-277.
- 김복기, 1979. 제주해협내 해류에 관한 연구. 국립 수산진흥원 연구보고, 25: 7-16.
- 김인옥, 1986. 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수에 관한 연구. 제주대학교 대학원 석사학위논문, 46pp.
- 노홍길, 김 구, 1983. 제주와 목포, 제주와 완도간의 표면수온 변화. 한국해양학회지, 18(1): 64-72.
- 노홍길, 히라노 토시유키, 1983. 제주해협 동쪽 입구에 출현하는 설상의 난수. 한국수산학회지, 16(4): 299-304.
- 봉종현, 1976. 한국 연안의 표면해수와 대기간의 열교환. 한국해양학회지, 11(2): 43-50.
- 이석우, 1966. 한국 해협을 통과하는 해수 용적 수송량의 계절 및 영년변화. 한국해양학회지, 1: 7-13.
- 이창기, 1970. 대한해협 서수도의 해류에 관한 연구. 국립 수산진흥원 연구보고, 6: 175-232.
- 이창기, 1974. 대한해협 서수도의 해류 및 조류에 관한 연구. 국립 수산진흥원 연구보고, 12: 37-106.
- 이현철, 1987. 황해 남동해역에서의 열수지에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문, 41pp.
- 장경일, 1984. 제주해협내 해류의 구조와 역학. 서울대학교 대학원 석사학위논문, 62pp.
- 조양기, 김 구, 1994. 여름철 남해 저염수의 특성과 기원. 한국해양학회지, 29(4): 414-421.
- 해양연구소, 1987. 한국 해역 종합 해양자원도 작성 연구. 남해(에비 조사) 357ppi
- Beardsely, R.C., Limeburner, R., Kim, K. and Candela, J., 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas. *La mer.* 30(3): 297-314.

- Kang, Y.Q., 1984. Atmospheric and oceanic factors affecting the air-sea thermal interaction in the East Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**(2): 163-171.
- Knauss, J.A., 1978. *Introduction to physical oceanography*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 338pp.
- Lie, H.J., 1986. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae. *Prog. Oceanog.*, **17**: 229-242.
- Lim, D.B., 1971. On the origin of the Tsushima Current water. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **6**(2): 85-91.
- Miita, T. and Ogawa, Y., 1984. Tsushima currents measured with current meters and drifts. In: *Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, edited by T. Ichiye, Elsevier, 67-76.
- Miyazaki, M. and Abe, S., 1960. On the water masses in the Tsushima Current area. *J. Oceanol. Soc. Japan*, **16**(2): 19-28 (in Japanese).
- Proudman, J., 1953. *Dynamical oceanography*. Methuen & Co. Ltd., 409pp.
- Rho, H.-K., 1985. Studies on marine environment of fishing grounds in the water around Jeju Island, Ph. D. thesis. Tokyo University. 215pp.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *Jr. Imp. Fish. Exp. St.*, **5**: 57-190.