

제주해협의 해수유동특성에 관한 연구

김상현 · 노홍길*

제주대학교 해양과학대학, *제주대학교 해양과학대학 어업학과

A Study on the Residual Current in the Cheju Strait

Sang Hyun KIM and Hong Kil RHO*

College of Ocean Sciences, *College of Ocean Sciences Department of Fishery

Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

The general flow patterns in the Cheju Strait have been investigated by analyzing the current observations measured in 1986~1989 by current meter mooring in 3 north-south sections in the Cheju Strait and at 4 observation points around Cheju Harbour, and measured in 1981~1987 by drogue tracking.

1. In the Cheju Strait, there are eastward or northeastward residual currents, which implies that sea waters flow into through the whole western section and flow out through the whole eastern section in the Cheju Strait. The velocity of residual currents are 5.2~30 cm/sec in 10 m layer and 1.3~24 cm/sec in mid-bottom layer. Generally, the flow is strong along the deepest through and the northern part, and weak in the shallow areas near Chuja Islands and Bogil Island.

2. In the western entrance of the Cheju Strait, the observed mean residual velocity is 6.93 cm/sec and the volume transport is 0.384 Sv. There are a big discrepancy between the observed residual currents and the geostrophic currents.

3. Near the frontal areas northwest to Chuja Islands, warm and saline offshore waters, flow northward about 5 miles into the southern coastal areas of the Korean Peninsula in flood, and flow back rather eastward or southeastward than southward in ebb. So, warm and saline waters flow along coastal areas, being mixed with coastal waters. As a result, the northwestern area of Chuja Islands plays a role of the entrance of influx of warm and saline offshore water to the southwestern coastal areas of the Korean Peninsula. It should be stressed that this flow pattern is not due to the residual flows, but to the temporal (tidal) flows.

Key words : Cheju strait, residual current, geostrophic current, volume transport

서 론

제주해협은 한국남해, 황해, 동중국해와 접하는 수역으로써 대마난류수, 황해난류수, 황해냉수, 황해저층냉수, 혼합수, 한국남해연안수, 중국대륙연안수 등이 출현하므로 이들 수괴에 서식하는 회유성 어종들 중 어업적으로 중요한 여러 어종들이 시기별, 계절별로 출현상황을 달리하고 있는 해역이다. 따라서 제주도 주변해역에는 고등어·전갱이 선망어장이 형성될 뿐만 아니라 (Rho, 1985), 5월~12월까지 갈치어장이 형성된다 (Kim, 1995). 또한 조기, 돔, 오징어, 옥돔 등을 대상으로 하는 유자망, 안강망, 주낙, 일본조어선 등의 좋은 조업장이 되기 때문에 이 해역의 해수유동특성은 어구의 어획성능, 어군의 이동방향, 난치어의 수송 및 물질수송 등을 결정하는 가장 중요한 환경요인이 된다. 제주해협은 동서 양쪽 입구로부터 대마난류수가 유입해와 해협의 중앙부에서 서로 마주치는 양상의 수온·염분분포를 하고 있고 (Rho and Hirano, 1983. Rho, 1985), 하계가 되면 저층에는 11~13℃의 저온수 (Rho, 1985), 표층 (0~30 m)에는 저염분수인

중국대륙연안수 (Kim, 1986), 해협북측에는 한국남해연안수 (Rho, 1985)가 각각 출현하는 등 좁은 해역에서 매우 복잡한 해황이 나타나므로 이러한 해황출현의 기구해명을 위해서도 해수유동에 관한 구체적인 연구가 필요하다. 해협내의 해수유동에 관한 연구는 Lee (1968), Lee and Bong (1969), Lee (1974)의 해류병에 의한 표층해류 연구가 있지만 이들 연구는 해류병의 투하점은 알 수 있지만 중간의 표류경로를 정확히 알 수 없고 바람의 영향을 받기 쉬우며 표층해류의 정보에 국한되는 등 해류연구방법의 근원적인 결점 때문에 복잡한 해황을 갖고 있는 제주해협의 유동실태를 정확히 설명하기에는 미흡한 점이 많다. 해류계 관측자료를 분석한 三井田 (1976), Kim (1979), Chang (1984), Kim (1987), Chang et al. (1995)의 연구가 있지만 측류정점이 해협내의 일단면이나 몇 개의 정점에 국한되어 있기 때문에 해협의 유동특성에 대한 정확한 형태를 제시하지는 못했다.

그러므로 본 연구에서는 제주해협 전역의 유동 형태를 정확하게 제시할 수 있도록 측류정점을 조밀하게 설정하고 각 정점에서 해류계나 해류판을 이용하여 얻은 자료

를 바탕으로 해협전체의 해수유동특성을 총체적으로 규명하는 데 목적을 두었다.

재료 및 방법

1. 해류계에 의한 유속관측

제주해협의 해류특성을 규명하고자 1986년부터 1989년까지 4년간에 Fig. 1의 해류계 계류 위치도와 같이 해협의 해수유동특성을 대표할 수 있는 제주해협 동·서쪽입구와 중앙부에 남북방향의 횡단정선(B, C, E Line)을 설정하고, 각 관측점에 해류계(Interocean Model Type 135)를 설치시켜, Table 1과 같이 25시간 이상 연속 측류를 실시했다. 3개의 정선(B, C, E Line)외의 제주항 주변의 연안역에서는 해수유동 및 수온, 염분의 변화가 심해 이곳의 유향을 보다 상세히 파악할 목적으로 Fig. 2와 같이 제주항 동쪽의 연안쪽 50m와 100m의 등심선 부근에 4개점에서 해류를 관측하였다.

2. 해류관 추적 조사

제주해협에서 수립자의 실질적인 이동상황을 바로 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 해류관을 10m층에 투하하고 그 이동경로를 실습선(제주 401호, 389톤)이 추적하

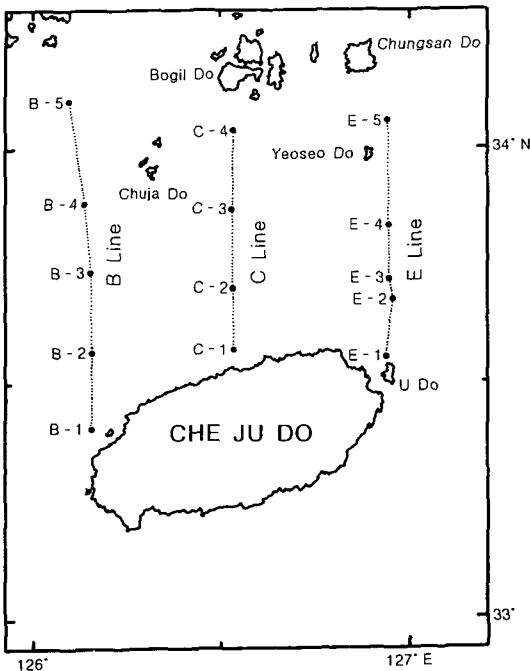


Fig. 1. Location of mooring stations of current meter in the Cheju Strait.

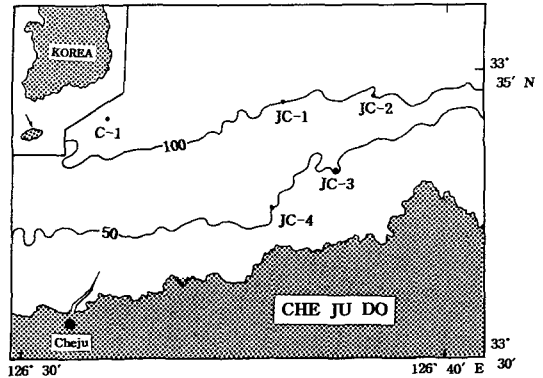


Fig. 2. Location of mooring stations of current meter. The numerals attached to contour indicate the depth in meter.

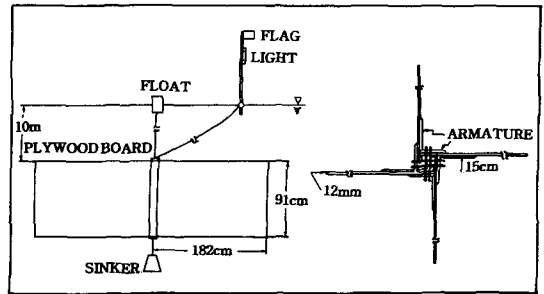


Fig. 3. Construction of a drogue.

면서 Radar와 Loran에 의해 1시간 간격으로 확인하는 해류관 추적조사를 4회(1981년 7월 17일~18일, 1982년 11월 13일~14일, 1982년 11월 14일~15일, 1987년 5월 25일~26일) 실시했다.

3. 지형류 계산

지형류는 Helland-Hansen & Sandström (1903)에 의해 유도된 식으로 구했으며, 또 해수의 수송량(지형유량)T ($10^6 m^3/sec = Sv$)는 $T = L \cdot \int_0^d V dz$ 에 의해 계산했다. 여기서 V는 단면에 수직인 유속이고 d는 기준면까지의 수심이다. 기준면은 저층에서는 거의 흐름이 없다는 가정하에 관측한 단면내의 최대수심인 110m를 택했으며, 이 보다 수심이 얇은 정점에서는 그 정점의 저층과 같은 깊이에 해당되는 인접정점의 역학심도편차(Dynamic depth anomaly)를 그 저층 값으로 부여하여 계산했다.

4. 실습선에 의한 해양관측

제주해협내의 해수유동특성과 관련한 일반적인 해황을 파악하기 위하여 제주대학교 실습선 제주 401호(389톤)와 402호(153톤)을 이용하여 1986년 1월 30일~2월 6일,

Table 1. Summary of moored current observation

Station	Year	OD/TD*	Observed Period (Length of hours)	Location (Lat. & Long.)
B-1	1986	10/64	8/16 18 h-8/18 6 h (37)	33° 24'N, 125° 09'E
	1987	10/64	3/20 14 h-3/21 15 th (26)	〃
		50/64	〃	〃
B-2	1986	10/96	8/16 17 h-8/18 7 h (39)	33° 34'N, 126° 09'E
		50/96	〃	〃
	1987	10/96	3/20 14 h-3/21 15 h (26)	〃
B-3	1986	10/110	8/16 10 h-8/17 11 h (26)	33° 44'N, 126° 09'E
		50/110	〃	〃
		80/110	〃	〃
1987	50/110	3/21 17 h-3/21 18 h (25)	〃	
B-4	1986	10/92	8/16 14 h-8/17 16 h (27)	33° 53'N, 126° 08'E
		50/92	8/16 14 h-8/17 15 h (26)	〃
B-5	1986	10/50	8/16 12 h-8/17 13 h (26)	34° 06'N, 126° 07'E
C-1	1986	10/100	11/18 18 h-11/19 19 h (26)	33° 34'N, 126° 32'E
		50/100	11/18 13 h-11/21 7 h (27)	〃
C-2	1986	10/100	11/19 18 h-11/19 15 h (38)	33° 42'N, 126° 32'E
		50/100	〃	〃
C-3	1987	10/72	7/19 15h- 7/20 16 h (26)	33° 52'N, 126° 32'E
		40/72	〃	〃
C-4	1986	10/47	12/1 18 h-12/2 19 h (26)	34° 02'N, 126° 32'E
		20/47	〃	〃
		30/47	〃	〃
JC-1	1987	10/100	6/11 9 h-6/12 10 h (26)	33° 33'N, 126° 35'E
		50/100	〃	〃
		80/100	〃	〃
JC-2	1987	10/100	6/12 17 h-6/13 18 h (26)	33° 34'N, 126° 37'E
		80/100	〃	〃
JC-3	1987	10/50	6/16 14 h-6/17 15 h (26)	33° 33'N, 126° 36'E
		35/50	〃	〃
		50/50	〃	〃
JC-4	1987	10/50	6/15 12 h-6/16 13 h (26)	33° 32'N, 126° 35'E
		35/50	〃	〃
		50/50	〃	〃
E-1	1988	10/113	7/17 14 h-7/18 14 h (26)	33° 33'N, 126° 56'E
		50/113	〃	〃
		80/113	〃	〃
	1989	10/113	4/2 16 h- 4/3 17 h (25)	〃
		50/113	〃	〃
E-2	1988	50/124	7/4 10 h- 7/5 10 h (25)	33° 41'N, 126° 57'E
		80/124	〃	〃
		1989	10/124	4/1 14 h- 4/2 16 h (26)
	50/124	〃	〃	
	80/124	〃	〃	
E-3	1988	50/117	5/16 8 h- 5/17 8 h (25)	33° 43'N, 126° 57'E
E-4	1988	10/97	7/10 21 h-7/11 21 h (25)	33° 50'N, 126° 56'E
		40/97	〃	〃
		70/97	〃	〃
E-5	1986	10/53	10/16 18 h-10/17 19 h (26)	34° 03'N, 126° 57'E
		30/53	〃	〃

* OD : Observation Depth (m)

* TD : Total Depth (m)

1986년 5월 26일~6월 8일에 Fig. 4 (a, b)와 같은 정점에서 수온·염분조사를 실시하였다.

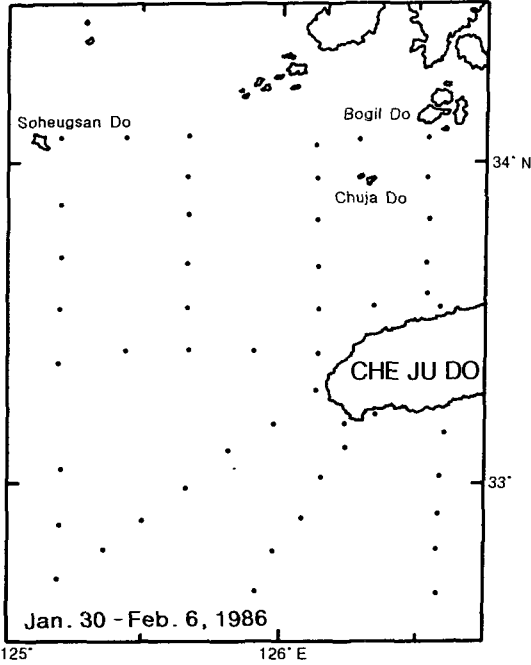


Fig. 4a. Oceanographic stations observed by the training ship of Cheju National University in Jan. 30-Feb. 6, 1986.

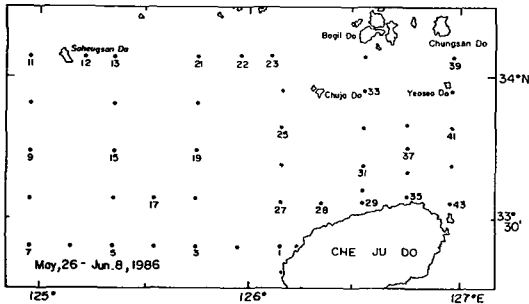


Fig. 4b. Oceanographic stations observed by the training ship of Cheju National University in May 26-Jun. 8, 1986.

결 과

1. 제주해협의 해류

1-1. 서쪽입구 (B Line)의 유동특성

제주해협 서쪽입구 남북단면인 B Line (Fig. 1)에서 1986년 8월과 1987년 3월에 실시한 측류결과로부터 조화 분석에 의한 해류상황을 Fig. 5에 나타냈다.

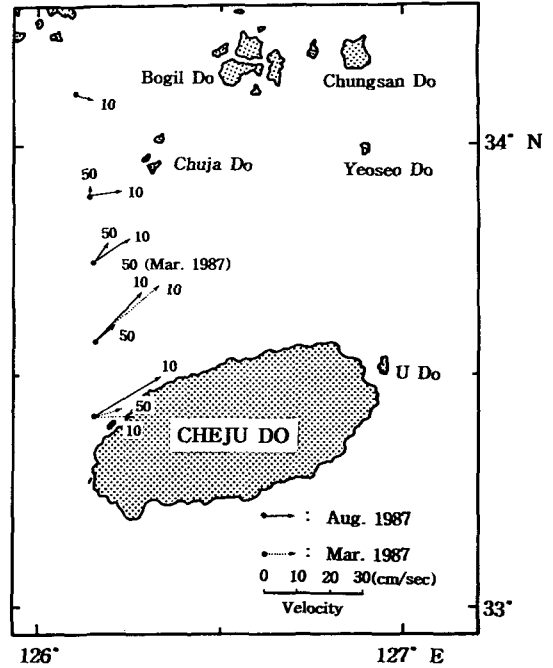


Fig. 5. Residual current vector at each stations in B Line. The numerals attached to an arrow indicate the depth (m) moored current meter.

10 m층에서는 8월의 경우, 제주도 연안에서 북방 20 mile 범위인 해협의 중간해역 (Sta. B-1~B-3)까지는 유향 40°~58°이고, 유속 12.3 cm/sec~22.0 cm/sec의 북동류가 출현하고 추자도 부근인 Sta. B-4 및 해협의 가장 북쪽인 한국남해 연안천해역 (Sta. B-5)에서는 유향 84°~107°이고, 유속 5.6 cm/sec~9.7 cm/sec의 약한 동류를 나타내고 있다. 그러므로 하계 (8월) 10 m층에서는 제주해협 서쪽 입구의 전단면을 통해 해협 서쪽에서 해협내로 해수가 유입되고 있으며, 제주도 연안역에서 약 16 mile의 범위인 해협의 중앙역까지는 유속이 강하며, 해협의 북쪽인 한국남해안 천해역으로 갈수록 유속이 약해졌다.

50 m층의 경우는 Sta. B-1과 B-5의 자료가 없어 전단면에 대한 항류상황을 파악할 수는 없지만, 제주도 연안역과 추자도간의 중앙부인 Sta. B-2 및 B-3에서는 10 m층의 항류방향과 거의 비슷한 북동류 (38°~47°)인데 비해 추자도 부근인 Sta. B-4에는 10 m층과는 매우 다른 북류 (354°)가 출현했고, 또 제주도 연안에서 추자도쪽으로 갈수록 북향류로 바뀌는 경향이 있다. 유속도 1.7 cm/sec (Sta. B-4)~6.6 cm/sec (Sta. B-3)로 10 m층보다는 2~5배 훨씬 약하였다. 그러므로 하계의 경우는 제주도연안에서 추자도 사이에 대부분은 표·중층 모두 거의 같은 유향의 항류가 존재하지만 추자도 및 그 이북의 연안역에는 표층수와는 다른 북류성 항류가 존재할 가능

성을 시사한다.

동계인 3월(1987년)의 10 m층은 Sta. B-2의 경우 하계(1986년 8월)와 거의 같은 북동류(49°)이지만 유속은 오히려 하계(20.5 cm/sec)보다 강한 26.7 cm/sec 였다. 그러나 Sta. B-1의 경우는 하계보다 유향이 동향류(91°)이고 유속도 훨씬 약했다. 50 m층은 Sta. B-1 및 B-3에는 유향 63°~69°의 동북동류로 1.3 cm/sec (Sta. B-3)~6.6 cm/sec (Sta. B-1)의 약한 항류가 출현했다. 또 동계에도 하계와 같이 해협 서쪽 입구에서 해협내로 유입하는 항류가 출현했다.

이상의 결과를 요약하면 제주해협 서쪽 입구중 제주도 연안에서 추자도 사이의 대부분의 해역에서는 동·하계 모두 해협 서쪽에서 해협내로 유입되는 북동~동류의 항류가 있고, 그 유속은 표층(10 m)에서는 5.6 cm/sec~26.7 cm/sec, 중층(50 m)에서는 1.3 cm/sec~6.7 cm/sec로 표층과 중층간의 유속차가 약 4~7배 정도 매우 큰 것이 특징이다. 또한 추자도 주변해역에서는 북류성의 항류가 출현할 가능성을 나타내고 있다.

1-2. 중앙부 (C Line)의 유동특성

제주항에서 정북방향으로 이은 중앙단면에 있는 Sta. C-1, C-2, C-4에서 1986년 11월 18일~1986년 12월 2일 사이에 조사된 측류결과와 1987년 7월 19일~20일에 조사된 Sta. C-3의 측류결과로 부터 조화분석에 의해 구한 항류를 Fig. 6에 나타냈다.

10 m층의 경우 제주항 부근 (Sta. C-1)과 북단인 보길도 부근 (C-4)에서는 동(88°, Sta. C-1)~동북동(64°, Sta. C-4) 방향인 유속 5.8 cm/sec~8.7 cm/sec의 약한 항류가 출현했지만 제주항에서 약 10 mile 북쪽에 위치한 Sta. C-2에서는 27.1 cm/sec의 강한 북류(5°)가 출현했다. 또, 50 m층에서는 제주도 연안쪽인 Sta. C-1에는 약한 북서류(338°)가 있고, Sta. C-2에서는 21.5 cm/sec의 강한 북동류(43.4°)가 출현했다. 그러므로 추계의 경우 이 해역에는 Sta. C-1의 표층(10 m)을 제외하면 표·중층에 북~북동방향의 항류가 출현했고 보길도 부근의 저층(30 m)에서는 6.4 cm/sec의 약한 동류(101°)가 출현했다. Sta. C-3의 경우는 하계(7월)에 조사된 자료로서 10 m층에는 5.2 cm/sec의 약한 남서류(239°), 40 m층에는 6.8 cm/sec의 약한 동남동류(116°)가 출현했다. 제주해협 중앙부에서 조사된 결과는 매우 복잡한 흐름이 있음을 시사하고 있으며, 특히 중층(50 m층)에서는 제주도 서방으로부터 제주도 연안을 따라 유입하는 외해수가 Sta. C-1, Sta. C-2에서 북~북동쪽으로 흐르기 때문에 Sta. C-3과 Sta. C-2사이에 연안수와 외해수가 수렴하는 해역이 된다.

이처럼 제주해협의 중앙부에서 매우 복잡한 흐름이 있음을 나타내지만, 특히 Sta. C-1에서와 같이 실제로 제주해협 중앙단면의 유동 특성 중 북~북서류가 출현하는가를 고찰하기 위하여 Sta. C-1의 동쪽으로 2 mile내에 있는 Sta. JC-1~JC-4에서 1987년 6월의 측류결과 (Fig. 2, Sta. JC-1~JC-4 참조)로 부터 조화분석에 의해 구한 항류를 Fig. 7에 나타냈다.

대체로 제주도 연안에서 1~3 mile 범위에 분포하고 있는 이들 측정의 10 m층은 6.7 cm/sec~11.4 cm/sec의 비교적 약한 동~남동류가 출현했다. 이처럼 Sta. C-1에 인

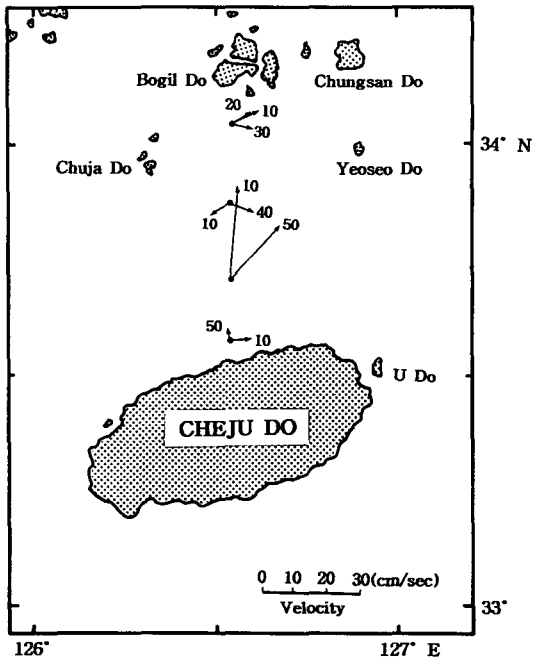


Fig. 6. Residual current vector at each stations in C Line. The numerals attached to an arrow indicate the depth (m) moored current meter.

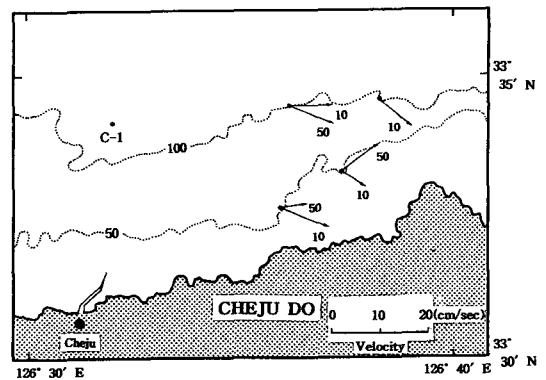


Fig. 7. Residual current vector at each station from JC-1 to JC-4. The numerals attached to an arrow indicate the depth (m) moored current meter.

접한 이들 연안역에는 동향류뿐이고 Sta. C-1의 중층에서 나타나는 북향류는 출현하지 않는다. 그러므로 제주해협 서쪽 입구로부터 제주도 북쪽 연안을 따라 유입된 해수는 제주항 외측에서 표층수는 그대로 동쪽으로 흐르지만 중층수는 북~북동방향으로 그 유향을 바꾸는 것 같다. 또한 제주해협에서 일시적으로 단기적인 유동특성의 변화양상 등에 대해서는 앞으로 자세하게 연구되어야 한다.

1-3. 동쪽 입구 (E Line)의 유동특성

제주해협 동쪽 입구의 E Line에 대한 측류결과 (Fig. 1, Sta. E-1~E-5 참조)로부터 해류상황을 Fig. 8에 나타냈다.

조사기간이 4월 (Sta. E-1, 2), 5월 (Sta. E-3), 7월 (Sta. E-1, 2, 4), 10월 (Sta. E-5)로 분산되어 있기는 하지만, 우도 바로 북쪽인 Sta. E-1을 제외하면 모두 북동~동남동 방향의 동향류뿐이므로 해협 서쪽 입구를 통하여 해협내로 유입된 해수가 동쪽 입구를 통하여 유출되고 있음을 잘 나타내고 있다. 그러나 우도북방 2 mile 해역 (Sta. E-1)의 표층에는 7월에 9.3 cm/sec의 서류가 출현했고, 또 4월의 경우에도 유속이 1.6 cm/sec~9.8 cm/sec로 약하기는 하지만 표층에서 저층까지 전층에서 북~북서류가 출현했다. 또 7월의 50 m 및 80 m층에는 9.1 cm/sec~9.8 cm/sec의 남향류가 출현해 단면내의 다른 측정

과는 항류의 양상이 다르다. 이와 같이 우도연안역은 해류의 유향이 크게 변하며, 이 해역을 통하여 제주도 동쪽해역의 고온·고염분수가 제주해협내로 유입될 가능성이 있다.

단면의 가장 북쪽인 Sta. E-5의 중층에는 동북동류 (30°)가 있어 여서도 부근의 중층수가 청산도 동쪽 연안역으로 공급되고 있고, 10 m층에는 이 단면에서는 가장 강한 23.9 cm/sec의 북동류 (74°)가 출현해 여서도와 청산도 사이를 통하여 상당량의 해수가 유출되고 있음을 나타냈다.

지금까지의 해류조사결과 제주해협내 중층에는 Sta. C-2 (21.5 cm/sec)와 Sta. JC-1 (10.5 cm/sec)의 50 m층을 제외하면 모두 10 cm/sec 이하의 약한 흐름인데 비해, 제주해협 동쪽입구의 Sta. E-2와 E-3의 50 m 및 80 m층에는 10.8 cm/sec~19.4 cm/sec의 강한 항류가 있다.

2. 해류판 추적조사 결과

Fig. 9는 해수 입자의 연속적인 이동 경향을 추적한 제주해협내의 10 m층에 대한 해류판 추적 조사결과 (D-1, 2, 3, 4) 이다.

D-1의 경우 1981년 7월 23일 09시 20분부터 7월 24일 16시 20분까지 31시간 동안 해류판 추적 결과로 투하지점 (Lat. 33° 35.5'N, Long. 126° 21.8'E, 제주도 애월항 북방 약 10 mile)은 해협내에서 수심이 100 m를 넘는 장소로서 해협내로 유입하는 난류수의 주축이 통과하고 있다고 판단되는 해역 (Rho and Kim, 1983)이다.

투하지점은 제주항 저조시 (09시 15분, 수로국 조석표, 1981)와 거의 같지만 해류판은 11시까지 약 1시간 40분 동안 빠르게 동쪽으로 이동했다. 11시 이후 해류판은 거의 제자리에서 맴돌거나 약간 서쪽으로 이동하는 정도의 정체가 약 6시간 지속됐다. 17시 이후부터 24시까지 약 7시간 동안 다시 동쪽으로 빠르게 이동했으나 24시 이후부터 7월 24일 07시까지 다시 정체했으며, 이후 13시

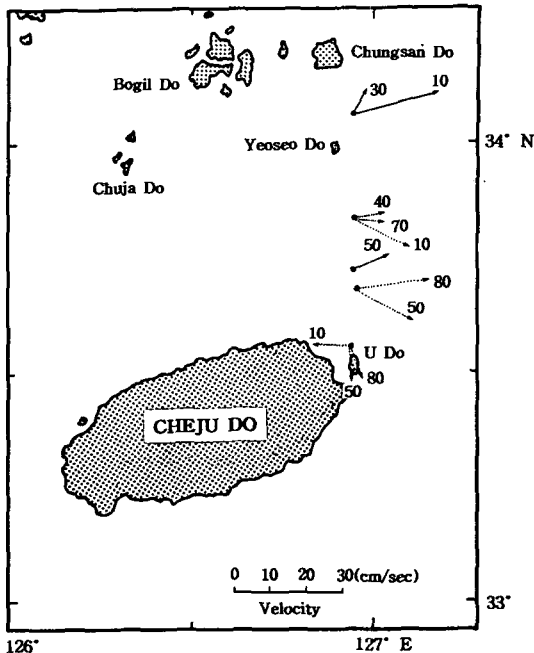


Fig. 8. Residual current vector at each stations in E Line. The numerals attached to an arrow indicate the depth (m) moored current meter.

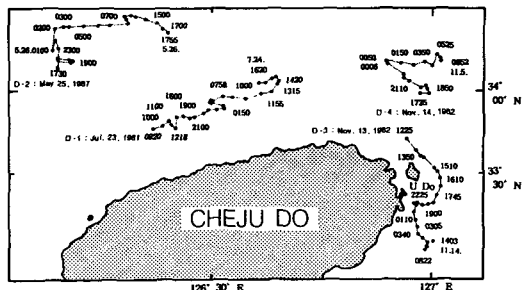


Fig. 9. The tracking of drogue at a depth of 10m in the Cheju Strait.

까지 6시간 동안을 빠르게 이동했다. 그러나 13시 이후부터는 앞의 2회의 정체기의 이동 양상과는 달리 약 1시간 정도 정체했다가 방향을 바꾸어 16시 20분까지 빠른 속도로 서쪽으로 이동했다.

이상의 해류판(D-1의 경우) 이동 상황을 정리하면 최초의 투하점으로부터 25시간후(24일 10시 20분)에는 동쪽으로 약 12 mile 이동하여, 평균유속이 약 25 cm/sec인 해류가 제주도의 북쪽 해안선과 거의 평행하게 동쪽으로 흐르고 있음을 알 수 있다. 또 해류판이 거의 이동하지 않는 정체기가 6~7시간 동안 지속되는 것은 유속이 거의 같은 서향류의 조류가 있음을 뜻하며 특히 투하점에서 제주항 외해까지의 구간에서 2회의 정체기가 출현한 것은 이 해역에서는 동쪽으로는 해수이동은 있지만 서쪽방향의 이동은 거의 없음을 시사하고 있다. 또한 이 현상은 제주해협내 해류계 관측정점 Sta. B-1 및 B-2에서 서향류가 거의 출현하지 않는 것과도 잘 일치하며, 약 25 cm/sec의 평균유속이 출현한 것은 제주해협 서쪽입구에서 유입된 해수가 D-1 지점의 해류판 추적 위치를 따라 이동되는 것으로 판단된다. 그러나 제주항을 경계로 동쪽해역에서는 정체기가 출현하지 않고(24일 13시~16시 20분까지의 예) 조류에 의한 서쪽으로의 일시적인 이동이 나타났다. 해류판의 빠른 이동과 정체가 시작되는 시간과 제주항의 고·저조시와를 비교하면 대체로 2~3시간의 차가 있다.

D-2의 경우는 제주해협 서쪽 입구에 있는 해류계 관측정점 Sta. B-3 (Lat. 33° 44'N, Long. 126° 09'E)에서 1987년 5월 25일 17시 30분에 투하하여 1987년 5월 26일 17시 55분까지(24시간 25분) 추적한 결과이다.

최초투하 시간(25일 17시 30분)은 제주항의 저조시(15시 30분)보다 2시간 10분 늦기 때문에 전술한 바와 같이 해협내의 전류시차가 제주항의 저·고조시보다 2~3시간 늦게 출현함을 고려하면 해류판의 초기 이동상황은 밀물 때의 수립사 이동 궤적이 된다. 해류판은 초기에는 북쪽으로 약 5 mile쯤 이동하다가 26일 02시 이후 그 방향을 바꾸어 동류가 되어 해협내로 들어가게 되고 해협내에서는 D-1의 경우와 같이 빠른 동류가 지속되다가 밀물때가 되면 정체(26일 08시~14시)하고 썰물 때 다시 남동방향으로 빠르게 이동했다. 그러므로 해협 서쪽 입구에서는 밀물 때 약 5 mile 정도 북쪽으로의 이동이 있지만 썰물 때 그만큼 남하하지 않고 바로 동쪽으로 이동하므로 서쪽 입구 부근에서는 조석류에 의한 북쪽방향으로의 물질수송효과가 생길 수 있다. 투하점과 회수점을 직선으로 연결하여 얻은 향류의 평균유속은 30 cm/sec였으며 유향은 북동방향이었다.

D-3의 경우는 제주해협 동쪽 입구인 우도북방 3 mile 지점 (Lat. 33° 34.2'N, Long. 126° 56.6'E)에서 1982년 11월 13일 12시 25분에 투하하여 14일 14시 03분까지 25시간 38분 동안 추적한 결과이다.

최초 투하가 제주항 고조(09시 18분) 약 3시간 후이므로 제주해협의 전류시차 2~3시간을 감안하더라도 썰물 때 투하되었기 때문에 투하점으로부터 16시 10분까지는 평균 1knot의 매우 빠른 남향류가 출현하지만 시간이 경과함에 따라 점차 이동 속도가 느려졌고 우도 남쪽에서는 서향류로 변했다. 그러나 20시부터 24시까지의 거의 이동하지 않는 정체기가 되고, 24시부터 익일 08시 22분까지 남하하다가, 그 후 14시 03분까지 아주 느리게 북쪽으로 이동했다. 이상의 해류판 이동 상황은 이 해역에 평균유속 25.1 cm/sec의 남류성 향류가 제주도 동쪽 연안은 따라 흐르고 있음을 뜻한다. 또 14일 03시 04분부터 08시 22분까지 아주 느린 속도로 남하하다가 다시 북상을 하면서 천천히 외해로 이동한 것은 이 해역에서 제주도 남쪽에서 북상하는 대마난류와 연안 남하류가 마주치기 때문에 일어나는 현상인 것 같다.

D-4의 경우는 1982년 11월 14일 17시 25분부터 11월 15일 06시 52분까지 13시간 27분 동안 추적한 결과로서 기상악화로 도중에 추적을 포기했지만 최소한 1회 조석주기 동안의 이동 상황은 파악됐다. D-4의 해류판 투하점의 우도 북쪽 9.5 mile 지점 (Lat. 33° 39.8'N, Long. 126° 58.3'E)으로 D-3의 최초투하점으로부터 불과 6.2 mile 북쪽으로 투하일도 D-3의 조사역일로 거의 같은 시기에 조사된 데도 불구하고 해류판 이동 양상이 매우 다르다. 이것은 제주해협 동쪽 입구에는 국지적으로 유황이 매우 다를 수 있음을 시사하고 있다. 특히 최초 17시 25분에서 20시까지의 썰물 때(제주항 저조 10시 12분+전류시차 2~3시간)로 D-1, 2, 3에서는 빠른 이동시기였는데 비해서 이 해역에서는 거의 이동하지 않는 정체기가 됐고 20시~24시까지의 D-1, 2, 3에서 정체기가 되는 밀물 때, 이곳에는 빠르게 북서쪽으로 이동했으며 15일 01시부터 05시까지의 D-1, 2, 3의 썰물 때와 같이 동쪽으로 빠르게 이동했다. 이처럼 다른 해역과는 달리 썰물 때(17:25~20:00) 정체기가 되고 밀물 때(20:00~00:06) 북서쪽으로 이동한 것은 이 해역에 서향류의 향류성분이 있을 가능성을 시사하고 있다. 그러므로 제주해협의 동쪽 입구에는 우도북방 10 mile내의 좁은 해역에서 해류계에 의한 관측결과에서와 같이 남향류, 서향류, 동향류 등이 향류가 출현해 매우 복잡한 유황이 나타나므로 이 해역의 유황을 명확하게 규명하는 것은 제주해협의 해황을

이해하는 데 매우 중요한 일로 판단된다.

3. 지형류 및 수송량

제주해협내에서 지형류 계산에 의한 해수유동 특성 해석이 적용되는가를 파악하기 위해서 제주해협 서쪽 입구인 B Line에서 1986년 8월에 해류관측 시기와 거의 같은 시기(1986년 8월 16일)에 조사된 Section B (Fig. 1 참조)의 수온, 염분 자료를 이용하여 110 m를 기준면으로 계산한 지형류의 유속연직분포는 Fig. 10과 같고, 이 시기의 해류계에 의해 얻어진 항류의 유속 연직 분포는 Fig. 11과 같다. Fig. 10의 사선부분인 부(-)의 유속은 서류를 뜻하고 정(+)의 유속은 동류를 뜻한다. 그러므로 이 단면에는 동류와 서류의 지형류가 있고 동류의 최강 유속은 제주도 연안으로부터 약 20 mile 북쪽인 Sta. B-3와 B-4의 중간역 표층(20 cm/sec)에 있으며 서류의 최강 유속은 제주도 연안쪽(B-1과 B-2의 중간) 표층(12 cm/sec)에 있다. 그리고 50 m 이하의 중·저층유속은 4 cm/sec 이하로 아주 느리며 단면내의 평균 유속은 동류가 4.23 cm/sec, 서류가 2.94 cm/sec로서 동·서류에 의한 해수 수송량은 각각 $0.11 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Sv)과 $0.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Sv)로 단면을 통해서는 동·서항류의 차인 $0.03 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Sv)의 해수가 동쪽으로 이동되고 있다는 계산이 된다.

그러나 Fig. 11에 나타낸 해류계의 실측 결과에 의하면 이 단면에는 서류는 없고 동류 뿐이며 제주도 연안쪽 10

mile이내인 B-1과 B-2와의 표층(지형류의 경우에는 12 cm/sec의 서류가 출현한 곳)에 20 cm/sec의 최강 동류가 있으며, 50 m 이심의 중·저층유속도 10 cm/sec 이하이지만 지형류(4 cm/sec 이하)보다 강한 유속분포를 나타내고 있다. 해류계의 실측결과에 의한 단면 전체의 평균 유속은 6.93 cm/sec로 이때의 총수송량은 $0.384 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Sv)로 지형류보다 거의 13배 정도 많다. 따라서 해류계에 의한 실측치와 지형류간에는 유속분포상태와 유량 등에 큰 차가 있기 때문에 제주해협의 경우 지형류 계산에 의해 해류 특성을 분석해도 괜찮은지에 대해 좀 더 구체적인 연구가 요구된다.

고찰

1. 밀물과 썰물 때의 최강류 분포특성에 따른 유동특성

제주해협내의 해류상황을 제주해협의 동·서 및 중앙부근 해역에 대한 유동상황은 제시 하였으나 각 정점별로 해협전체의 측득류 특성을 일목요연하게 제시 못한 점이 있어 Fig. 12에서는 각 정점별로 밀물과 썰물 때에 나타나는 주류의 최강류에 대한 유향과 유속을 구해 해협내에서 조석주기별(밀물·썰물때로 구분)로 실제 나타날 유향을 파악하고자 했다. 물론 해협내의 유향은 조석의 진행상태에 따라 다소 변화하고 있으며 특히 Sta. B-1, B-2, Sta. C-1, Sta. E-1 등 제주도 연안역에서 그 변화 정도가 크지만 밀물 때나 썰물 때에 최강류가 나타나는 유향은 그 정점의 밀물 및 썰물 때의 흐름 방향을 비교적 바르게 대표할 것으로 가정했다.

해협내의 조석주기별 측득류 경향을 보면, 밀물 때는 중앙부근 C Line 및 동쪽 입구인 E Line에서는 서 또는 북서류가 나타나 동쪽에서 서쪽 입구를 향하여 흐르고 있는 데 반해, 서쪽 입구인 B Line에서는 북서, 북, 북동류 등의 북향류가 출현하므로 B Line과 C Line사이에서는 자연적으로 해수의 수렴현상이 일어나 해수의 유출이 원활하지 못하므로 해류관 추적 결과(Fig. 9)에서 나타나듯이 해수의 이동이 거의 없는 해역이 된다. 그러므로 밀물 때는 해협 동 및 남동쪽에서 해협내로 해수가 유입되고 유출은 서쪽 입구인 B Line 전체에서 이루어 지는 것이 아니고 해협의 북서쪽인 추자도 주변 및 추자도와 보길도 사이를 통하여 한국남서연안역으로 유출되고 있다. 썰물 때는 제주해협 해류관측 정점 중 Sta. C-1 및 E-1을 제외하면 대체로 제주해협 서쪽입구를 통하여 유입된 해수가 동, 북동 및 남동류를 나타내어 제주해협을 빠져나가는 현상을 나타내나, Sta. C-1 및 E-1에서는 남류 및 남동류가 출현하여 유향들이 복잡하게 출현하고 있어

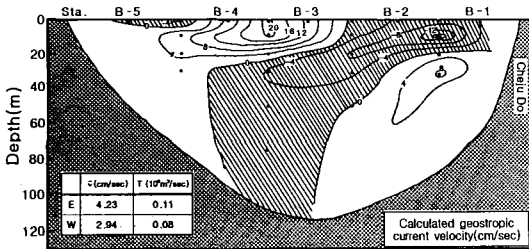


Fig. 10. Calculated geostrophic current velocity profile in section B.

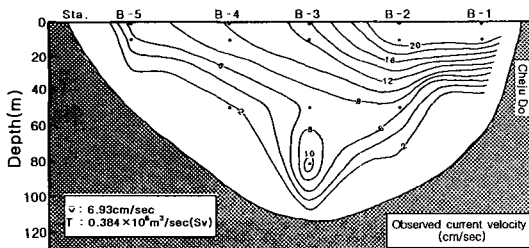


Fig. 11. Observed residual current velocity profile in section B.

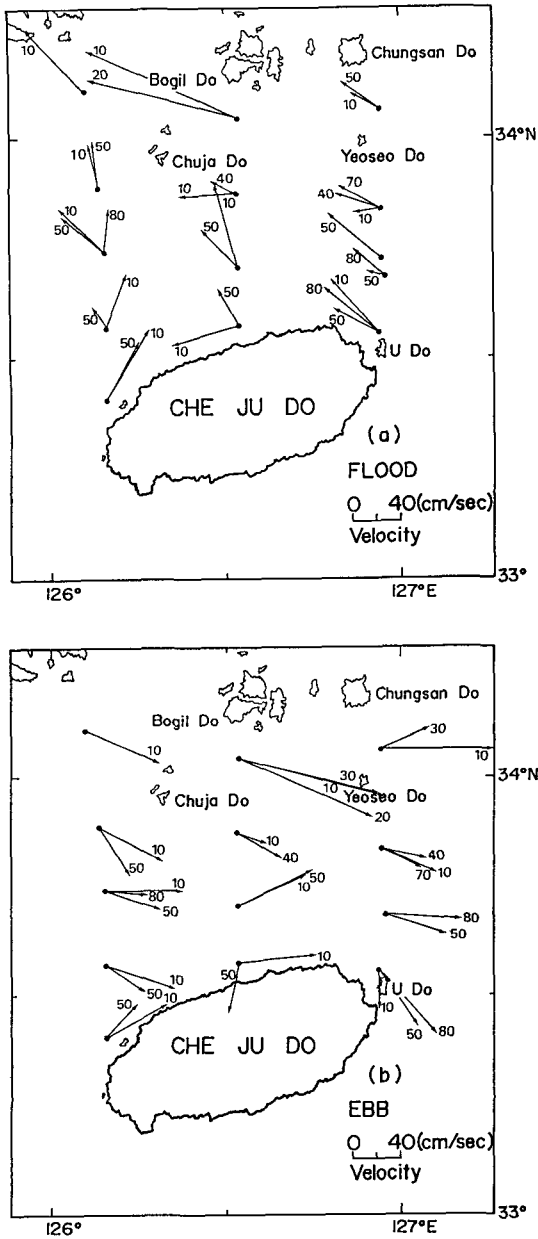


Fig. 12. Maximum flood (a) and ebb (b) current speed in the Cheju Strait. The numerals attached to an arrow indicate the depth (m) of moored current meter.

이 해역의 측류 상황은 매우 복잡함을 알 수 있다. 이처럼 조석주기별 최강류의 변동 특성에서도 제주도 북부 연안역 (Sta. C-1) 및 우도북부 연안역 (Sta. E-1)의 유동 특성이 단기적인 변동특성을 보이므로, 제주해협내에서 이러한 단기적인 변동특성에 대하여 구체적인 연구가 요망된다.

2. 해협내의 항류 Vector분포

제주해협내에서는 본 연구 이외에도 여러 연구자 (三井田, 1976; Kim, 1979, KOSEC, 1983; KORDI, 1984; 1987)에 의해서 해류계에 의해 실측된 자료를 바탕으로 한 단면 또는 몇 개 정점의 항류에 관한 연구가 있다. Fig. 13은 현재까지 연구된 기존 항류자료와 본 연구에서 제시한 항류자료를 이용하여 해협내의 해류상황을 종합적으로 고찰할 수 있도록 작성한 그림이다.

정위측류 자료로부터 계산한 항류는 일반적으로 바람이나 지형 및 육수나 외해수의 유입에 영향을 받을 뿐만 아니라 장주기의 조류도 포함하고 있어서 엄밀한 의미의 해류를 나타내는 것은 아니다. 그러므로 이러한 오차를 가급적 제거시키기 위해서는 장기간의 관측이 요망되지만 대체로 25시간의 측류 결과를 바탕으로 자료를 분석하고 있는 실정이다. 1회 측류 결과로부터 어떤 결론을 유도하는 것은 매우 위험하지만 기존 항류자료와도 비교 검토해 보는 것이 필요하다고 판단된다.

Fig. 13은 해협내에서 여러 연구자가 각각 다른 시기에 조사한 항류 Vector 분포인데도 불구하고 항류양상이 거의 같게 나타났다. 제주해협내에는 기본적으로 해협 서쪽 입구에서 유입된 해수가 해협중앙부를 거쳐 동쪽 입구를 통하여 모두 유출되는 동~북동류의 항류가 있고 이들의 유속은 10 m층에서 5.2 cm/sec~30 cm/sec이고, 중·저층은 1.3~24 cm/sec로 대체로 해협의 심소 및 그 약간 북측에 강류대가 있고 추자도 및 보길도 부근의 연안천소역에 약한 항류가 있다.

그러나 우도 북쪽 2 mile 부근의 10 m층에서는 서류, 50 m층에서는 남류가 제주항 북방 2 mile 및 10 mile 부근과 추자도 남서방 9 mile 부근에서 북류가 관측된 것은 해협

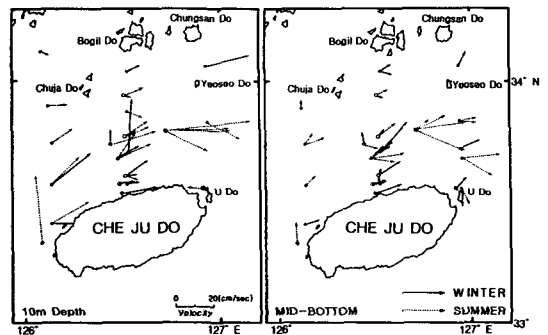


Fig. 13. Distribution of residual current vector observed at 10m depth (a) and mid-bottom (b) layer in the Cheju Strait. Miida (⊗) Aug., 1976, Kim (○) Mar., 1974, KOSEC (⊙) Apr., May, Oct., 1983, KORDI (⊠) Mar., Aug., 1984, May 1987, (●) Observed Data.

내의 특정지역에는 시기별로 유향 변화가 있음을 시사하며, 특히 우도 북방 2 mile 부근 해역에 이러한 변화가 심함을 암시하고 있다. 이러한 항류의 시기별 변화에 대해 三井田 (1976)는 1943년 8월에 제주항 북동방 20 mile 해역에서 실시한 4회의 측류 결과로부터 유향, 유속에 단기변동이 있음을 지적했다. 이와 같은 단기적인 유동특성의 변동이 하계의 해류풍 혹은 기상변화에 기인한 것인지, 혹은 일시적인 해류 형태의 변화에 기인된 것인지는 앞으로 연구되어야 한다고 판단된다.

3. 추자도 북서부 연안역의 외해수 공급기구

제주해협에서의 해류자료는 제주해협 서쪽입구를 통하여 유입된 해수가 제주도 연안쪽의 심소 및 서쪽입구의 중앙부에서는 대부분 동쪽으로 유입되는 양상을 나타내나, 추자도 북서쪽 해역 및 추자도 이북의 연안역에서는 북향류성 항류 및 합성류가 출현하는 특이성을 나타냈다. 1986년 1월 30일~2월 6일 사이에 관측된 제주도 주변해역의 50 m층 수온 (a), 염분 (b)의 수평분포에 의하면 (Fig. 14), 추자도 주변해역에는 제주해협의 고온, 고염분수와 한국남서 연안역의 연안수 사이에 수온, 염분전선이 형성되고 있어 이 해역이 연안수와 외해수가 서로 마주치는 경계역임을 알 수 있지만, 두 수괴가 마주치는 양상이 추자도 북서방 10 mile 부근의 경우 제주해협쪽의 외해수가 연안역 깊숙이 설상으로 관입되고 있어 다른 곳과는 구별된다. 이와 같은 현상은 1986년 5월의 표층수온 (Fig. 15a) 및 50 m층의 염분 (Fig. 15b) 수평분포에서도 나타났다.

이와 같은 추자도 북서연안역의 동계에 제주해협에 출현하는 고온, 고염분의 외해수가 설상으로 유입되는 것은 제주해협 서쪽 입구의 합성류와 관련된 현상이라고 해석된다. 즉 해협 서쪽 입구에서는 밀물 때는 북향류가, 썰물 때는 동향류의 합성류가 주된 흐름이 되므로, 밀물 때는 북쪽으로 약 5 mile 정도의 수렴자 이동이 있지만, 썰물 때는 반대방향인 남향류는 나타나지 않고 주로 동향류만 나타나므로, 밀물 때 이동한 만큼 남쪽에서의 이동이 없기 때문에 결과적으로 추자도 북서해역 부근에서는 때 밀물 때 마다 약 5 mile 정도의 북쪽에서의 이동이 있을 수 있어, 추자도 북서쪽의 전선역에서는 밀물 때마다 고온, 고염분의 외해수를 연안역으로 유입시키는 작용을 하게 되며, 이것이 추자도 북서쪽에 설상의 고온, 고염분수의 유입 양상으로 나타나는 것으로 해석된다. 따라서 동계의 경우, 추자도 북서쪽의 전선역에서는 항류가 아닌 합성류에 의해 조석주기마다 한국남해 연안역으로의 외해수 유입이 일어날 수 있다. 그러므로 추자도 주변해역

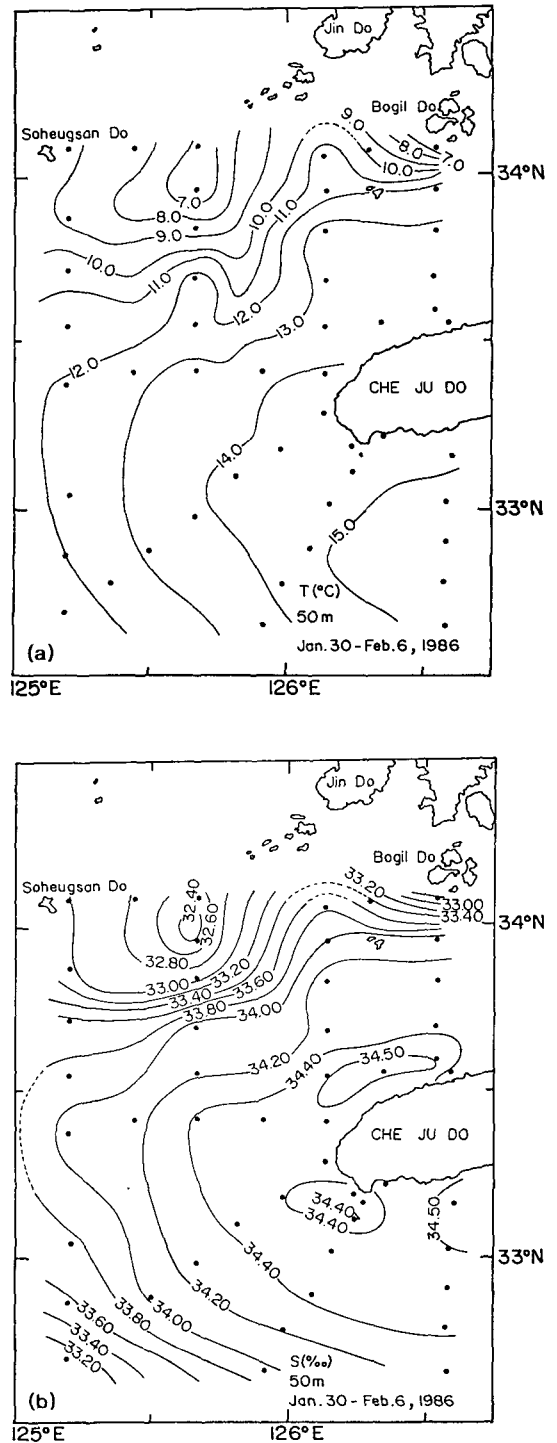


Fig. 14 (a, b). Horizontal distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) (a) and salinity (‰) (b) at a depth of 50 m Jan. 3~Feb. 6, 1986.

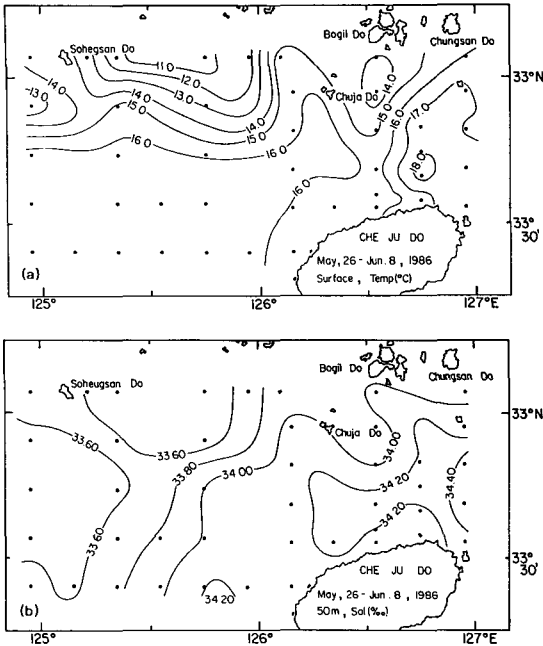


Fig. 15 (a, b). Horizontal distribution of temperature (°C) (a) of surface and salinity (‰) (b) at a depth of 50 m May 26~Jun. 8, 1986.

은 외해수를 연안역에 공급하는 창구와 같은 중요한 해역이다. 이처럼 연안역에 공급된 외해수는 연안역에서 밀물 때는 북서~북류, 썰물 때는 남동~동류의 합성류에 의해 연안수와 혼합되면서 서해 및 한국 남해연안역으로 분산되는 것 같다.

요 약

제주해협내에 설정한 3개의 남북 단면상에 배열한 13개의 관측정점과 기타 4개의 제주항 부근의 연안정점에서 1986~1989년까지 실시한 해류계에 의한 해류조사결과와 1981~1987년 사이에 실시된 해류관 측적조사, 일 반해양관측 등에 의하여 얻어진 자료들을 종합적으로 분석하여 정리한 제주해협의 유향을 요약하면 다음과 같다.

1. 제주해협내에는 주로 동~북동류의 향류가 있어, 해협 서쪽 입구의 전단면을 통하여 해협내로 유입된 해수가 동쪽 입구의 전단면을 통하여 유출되고 있으며, 이 향류의 유속은 10 m층에서 5.2 cm/sec~30 cm/sec이고, 중·저층은 1.3~24 cm/sec로 대체로 해협의 심소 및 제주도 북측에 강류대가 있고, 추자도 및 보길도 부근의 연안 천소에 약한 향류가 있다.

2. 제주해협 서쪽 입구의 전단면에서 실측한 향류의

하계 평균유속은 6.93 cm/sec로, 이것을 기초로 계산한 이 단면의 해수수송량은 $0.384 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Sv)이며, 단면의 향류분포와 지형류 유속 분포간에는 많은 차를 보였다.

3. 추자도 북서쪽의 전선역에서는 밀물 때는 북향류에 의해 고온·고염분의 외해수가 5 mile 정도 연안역으로 이동 하지만, 썰물 때는 북상 거리만큼 다시 남하하지 않고 동~남동향류 때문에, 연안수와 혼합하면서 전선 북쪽의 연안역으로 이동하므로, 결과적으로 추자도 북서해역은 제주도 서방해역으로 부터 북상해온 외해수가 한국남해연안수로 유입하는 창구가 되며, 이것을 일으키는 주된 작용은 향류가 아닌 조류이다.

사 사

본 연구를 수행함에 있어 조언을 아끼지 않으신 이석우 박사님께 진심으로 감사의 말씀을 드리며, 본 연구는 1986년도 교육부 학술연구조성비에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Chang, K. I. 1984. The structure of currents and its flow dynamics of the Jeju Strait. M. S. Thesis, Seoul National Univ., pp.62.

Chang, K. I., K. Kim, S. U. Lee and T. B. Shim. 1995. Hydrography and Sub-tidal Current in the Cheju Strait in Spring, 1983. J. Oceanol. Soc. Korea, 30 (3), 203~215.

Kim, B. K. 1979. A study on the currents in the Jeju Strait. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 21, 7~21.

Kim, I. O. 1986. A study on coastal water of the China Continent appeared in the neighbouring seas of Cheju Island. M. S. Thesis, Cheju National Univ., pp.63.

Kim, S. H. 1987. A study on the current in the Cheju Strait. M. S. Thesis, Cheju National Univ., pp.61.

Kim, S. H. 1995. Studies on the Assembling Mechanism of Hairtail, *Trichiurus lepturus*, at the Fishing Ground of the Cheju Strait. Ph. D. Thesis, Cheju National Univ., pp.168.

KORDI. 1984. A study on the Atlas of Marine Resources in the Adjacent Seas to Korea, BSPG00019-70-7.

KORDI. 1987. A study on the Atlas of Marine Resources in the Adjacent Seas to Korea, BSPG00046-163-7.

KOSEC. 1983. Unpublished technical report, KOSEC.

Lee, C. K. 1968. The drift bottle experiment in the east of the Yellow Sea (the west coast of Korea) during the year of the 1962~1966. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 3, 27~41.

Lee, C. K. 1974. The drift bottle experiment in the sou-

- thern sea of Korea. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 12, 7~26.
- Lee, C. K. and J. H. Bong. 1969. A study on the surface current of the Korean southern sea by drift bottle experiments. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 4, 45~58.
- Rho, H. K. and K. Kim. 1983. Variations of sea surface temperature between Jeju and Mogpo and between Jeju and Wando. J. Oceanol. Soc. Korea, 18 (1), 64~72.
- Rho, H. K. and T. Hirano. 1983. Tongue-like warm water appeared in the east entrance of the Jeju Strait. Bull. Korean Fish Soc., 16 (4), 299~304.
- Rho, H. K. 1985. Studies on Marine Environment of Fishing Grounds in the Waters around Jeju Island. Ph. D. Thesis, Tokyo Univ., pp.215.
- 三井田恒博. 1976. 定置測流からみた流れ. 水産海洋研究會 昭和50年度秋季 シンポジウム, 「九州西方海域における卵・稚仔の輸送」, 水産海洋研究會報 28, 38~58.

1997년 4월 19일 접수

1997년 9월 2일 수리