

득량만의 해수 교환 및 물질 순환에 관한 연구 I. 해수의 수송량 및 교환 시간

조규대·이충일·이병걸·조광우·김동선*
부경대학교 해양학과·제주대학교 해양토목공학과·*부경대학교 해양산업개발연구소
(1997년 12월 31일 접수)

Study on the Water and Material Exchange in Deukryang Bay I. Volume Transport and Turnover Time of Sea Water

Kyu-Dae Cho, Chung-II Lee, Byung-Gul Lee¹, Kwang-Woo Cho², and Dong-Sun Kim^{3*}
¹Dept. of Oceanography, Pukyong Univ. 608-737, Korea
²Dept. of Ocean Civil Engineering, Cheju Nat. Univ. 690-756, Korea
³Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong Univ. 608-737, Korea
(Manuscript received 31 December 1997)

The volume transport and turnover time of the Deukryang Bay, located at the southern area of Korea, were calculated based on the current meter(RCM-7, ACM 16M) data observed at the three gateways of the Bay in May and October of 1996. Dominant tidal current component was calculated through harmonic analysis from raw data to estimate influence tidal current and also residual current was measured by integrating observed data and then averaging on time.

Maximum speed of current was about 100cm/sec during the spring tide at the waterway between Kumdangdo and Kogumdo. The total water volume transports through three entrances of the bay in May and October were $3.9 \times 10^{12} \text{ Sv}$, $3.4 \times 10^{12} \text{ Sv}$ ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and turnover time were 0.97day, 1.12day, respectively. Semidiurnal tides were predominant (70~85%). The water volume transports by residual currents were 2~4% of total water volume transports.

The average fraction of fresh water calculated by tidal prism method using salinity difference between inflow current and outflow current through three entrances in Deukryang Bay was about 0.06% of total volume and the flushing time of fresh water was estimated as 0.97day.

Key words : volume transport, turnover time, residual currents

1. 서 론

본 연구 해역인 득량만은 우리나라 남해안의 고흥 반도 서쪽에 위치하는 반폐쇄적인 만으로서 만 입구부는 각각 남서-북동, 남동-북서 그리고 동-서 방향의 3개로 열려 있다. 만 중앙부에는 득량도가 위치하고 있으며 만의 길이는 남서-북동 방향으로 약 50km이다. 남쪽 만 입구에서 만 내부로 들어 갈수록 폭이 좁아지는 형태를 가지는 득량만은 최고 수심이 약 40m(평균 수심은 약 7.8m)로 만의 서쪽 보다 동쪽의 수심이 깊으며 만의 용적은 약 3.27 km^3 이다(Fig.1). 득량만은 주위에 산업 시설이 적어 진해만을 비롯한 다른 만보다 오염이 덜 된 곳으로 해조류 및 패류의 생산이 많은 곳이다(최 등 1995).

연안역은 외해에 비하여 수심이 아주 얇아서 혼합이 잘되어 표층에서 저층까지 균일한 경우가 많다. 이처럼

성층이 발달하지 않는 경우 표저층간의 영양염 분포가 거의 균일하게 되어 태양광에 의한 광합성 활동이 활발하며 기초생산력도 증가하게 된다(이 등, 1996). 따라서 정착 생활을 하는 패류 및 해조류 양식에 있어서 해수의 유동은 이러한 생물의 생태에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

해수 또는 물질의 다양한 공급원으로부터 일어나는 연안 지역의 물질 교환 및 물질 수송을 이해하기 위한 연구들이 이루어지고 있다(Takeoka, 1984; Takeoka and Hashimoto, 1988.). Takeoka(1984)는 물질 순환 및 물질 수송의 개념으로서 교환시간(turnover time)을 어떤 공간 내에 존재하는 물질이 새로 유입되는 물질에 의해 교체되는데 걸리는 시간으로 것으로서 정의하였다. Gross (1993), Paul(1996), 그리고 Takeoka(1984)는 이러한 개념을 어떤 공간으로 유입되는 물질의 양과

Table 1. Instruments deployed at each station and position of observation

Station & position	Deployed depth (m)	Cross section (m ²)	Mean depth (Max. depth) (m)	Instrument (company)
A: 34° 27' 34.9" (N) 127° 00' 09" (E)	5	49.237	11.6 (20)	★ RCM-7 (Recording Current Meter, Aanderra instruments) : Accuracy temp. : ± 0.05°C cond. : ±0.02%mmho/cm direc. : ± 5 speed : ± 2cm/sec
B: 34° 25' 27.5" (N) 127° 06' 13.8" (E)	5.20	74.150	21.6 (40)	★ ACM 16M (Alec Current Meter, Alec Electronics) : Accuracy temp. : ± 0.05°C cond. : ± 0.05ms/cm direc. : ± 2 speed : ± 1cm/sec
C: 34° 30' 14.5" (N) 127° 11' 41.3" (E)	5	44.850	11.21 (20)	

유출되는 양이 같은 안정한 상태를 가정하여 설명하고 있으며, 어떤 물질이 해수에 대해 상대적인 속도를 가지지 않는다는 것을 조건으로 하였다. 또한 이러한 가정은 불규칙적이며 계절적으로 변화하는 밀도류와 취송류 등이 우세한 지역보다는 조류가 우세한 지역에서 잘 적용된다 하였다.

지금까지의 득량만에 관한 연구로는, 김 등(1995)의 1992~1993년의 득량만의 수온과 염분의 분포, 정 등(1994)의 득량만의 해수 유동에 관한 수치 실험, 최 등(1995)의 키조개 어장의 환경 특성, 양(1994)의 득량만에서 영양 염류의 계절 변화와 생물 제한 인자, 허 등(1995)의 득량만 이매패류 자원량 분포 그리고 공 등(1994)의 득량만의 퇴적물 및 부유물 특성과 같은 득량만의 해양학적 특성에 관한 연구들이 수행되었다. 그리고 이러한 연구들은 대부분 만 내에 집중되어 있으며, 각각의 해양학적 인자들을 이용하여 만 내의 수괴 분석이나 수역별 특성을 조사한 것이었다. 그러나 만 내의 해양학적 인자들의 특성 및 변동에 중요한 영향을 끼치는 해수 순환과 이에 따른 물질 분포 특성 그리고 육지로부터 영양염을 공급하는 하천수에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 또한 득량만 내·외 해수사이의 수송량 및 물질 교환량이 어느 정도인지에 대한 정량적인 평가는 이루어지지 않았다.

본 연구는 우리 나라의 중요한 연안 어장중의 하나인 득량만의 해수 교환과 물질순환에 관한 연구의 일환으로 실시되었다. 이를 위하여 만 내의 전체적인 수괴의 분포와 만 내외로의 물질 순환에 영향을 미치는 해수 수송과 교환시간을 규명하려고 시도하였다. 그리고 조석 주기 동안 만 입구를 통해 유·출입되는 해수의 특성을 이용하여 득량만 내의 담수율을 추정하였다.

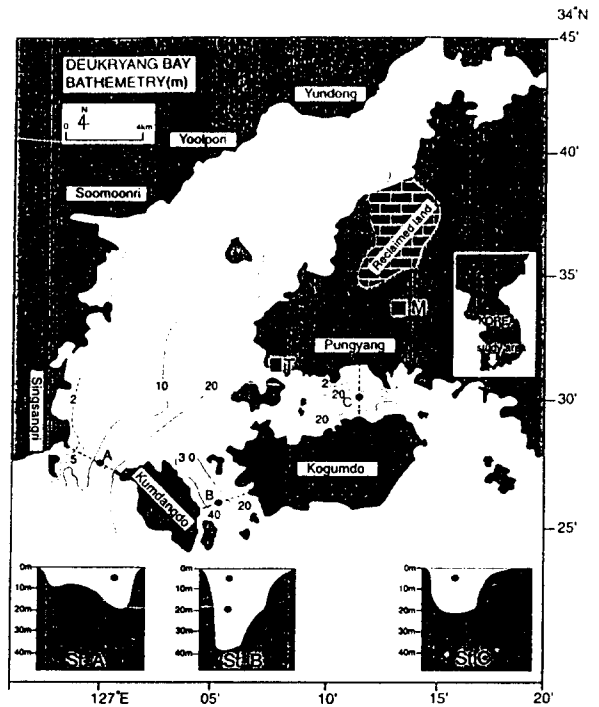


Fig. 1. Stations and Bathymetric map in Deukryang Bay. (closed circles indicate the observational stations of RCM-7 and ACM) (■ T:tidal station, ■ M:Metereological station)

2. 자료 및 방법

2.1 해양 관측

우리 나라의 남해안에 위치하며, 특히 패류와 해조류의 생산이 많은 득량만의 해수 수송량 및 교환 시간들

Table 2. Current velocity(cm/sec) at each stations of Deukryang Bay in May and October 1996

	May 18 ~ 19 : spring tide				May 25 ~ 26 : neap tide			
	St. A	St. B(5m)	St. B(20m)	St. C	St. A	St. B(5m)	St. B(20m)	St. C
Max	54.28	101.35	76.37	86.83	34.52	48.47	39.46	4.01
Min	4.59	4.3	6.62	1.39	1.39	2.26	1.68	1.39
Mean	27.32	45.46	34.86	39.97	15.46	19.98	18.32	2.28
	Oct. 5 ~ 7 : neap tide				Oct. 12 ~ 15 : spring tide			
	St. A	St. B(5m)	St. B(20m)	St. C	St. A	St. B(5m)	St. B(20m)	St. C
Max.	27.66	20.57	36.96	22.6	64.74	95.25		82.18
Min.	0.75	3.13	0.68	1.09	3.13	2.26		1.68
Mean	11.65	8.96	17.32	8.43	29.45	47.55		39.58

측정하기 위하여 Fig. 1에 표시한 만의 남쪽에 위치하고 있는 세 개의 만 입구에서 5월과 10월에 해양 관측을 실시하였다. 관측된 시기는 최 등(1995)과 이 등(1996)이 해수 유동의 변화가 크다고 밝힌 바 있는 대·소조기에 해당하며 5월과 10월 각각 2회에 걸쳐 25시간 10분 간격으로 유속, 유향 및 염분을 측정하였다.

사용된 관측기기의 특성과 설치 위치 그리고 각 만 입구별 단면적은 Table 1과 같다. 수심이 가장 깊은 금당도와 거금도 사이에는 표층과 저층에 각각 유속계를 설치하였으나, 10월 12~15(대조기)일 사이의 저층은 유속계 부족으로 관측하지 못하였다.

2.2 자료의 해석 방법

관측된 자료로부터 관측지점에서의 해류 특성을 파악하기 위해 유향, 유속을 나타내는 stick vector diagram을 작성하였다. 만 입구별 단면적은 stick vector diagram에서 나타난 결과를 바탕으로 하여 각 관측점의 지배적인 유향에 대해 연직인 면으로 설정하였다(Fig. 1). 그리고 단면적을 기준으로 만 내부로의 흐름을 유입으로 보았으며, 그 반대의 경우를 유출로 보았다. 만의 전체 용적은 수로국 간행 해도 No.257을 참고로 하여 격자간의 간격을 500m로 정하여 계산하였다.

2.2.1 해수 수송량(volume transport) 계산

대·소조기별 세 개의 만 입구를 통한 해수수송량 계산(Isobe, 1994; Paul, 1996)은 다음과 같다.

$$\text{해수 수송량(m}^3\text{/sec)} = \text{단면적(m}^2\text{)} \times \text{평균 유입 속도(m/sec)} \quad (1)$$

단면적은 해표면의 거리에다 평균 수심을 곱하여 계산하였으며, 평균 유입 속도는 창조류 동안의 유속을 평균하여 계산되었다. 그리고 평균적인 해수수송량을 보기 위하여 대·소조기를 평균하였다.

2.2.2 해수 교환 시간(turnover time) 계산

본 연구에서는 해수교환시간(turnover time)을 유·출입량이 같은 안정한 상태를 가정하여, 만 내부의 해수가 새로 유입되는 외해수에 의해 교체되는 시간으로 정의하였다(Takeoka, 1984). 즉 창조류 동안 외해수의 유입이 일어나며, 낙조류시에는 만 내에 존재하는 성질이 다른 해수가 유입량과 같은 동일한 양이 유출된다는 것을 가정하였다.

$$\text{해수 교환 시간(sec)} = \text{전체 용적(m}^3\text{)} \div \text{해수수송량(m}^3\text{/sec)}$$

$$\text{잔차류(cm/sec)} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (2)$$

그리고 조화분해를 통해 반일주조가 전체 해수수송량 및 해수교환에 미치는 영향을 평가하였으며, 관측 자료를 시간에 대해 적분하여 시간 평균함으로서 잔차류 성분을 계산하였다.

$$\text{잔차류(cm/sec)} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (3)$$

여기서 T는 M₂ 분조의 주기, v는 유속값을 나타낸다.

2.2.3 담수율 추정

창조류와 낙조류동안의 유·출입수의 염분 변동 특성을 살펴보았다. 그리고 이러한 유·출입수의 염분 변화 요인을 파악하기 위해 tidal prism method(Officer, 1976)을 적용하여 만 내부의 담수율 및 담수의 체류 시간을 추정하였다(식 4, 5, 6)

$$V_{p0} = (V_p + V_R) \text{ 또는 } \bar{s} = \frac{V_p}{V_p + V_R} \sigma \quad (4)$$

$$\bar{f} = 1 - \frac{\bar{s}}{\sigma} = \frac{V_p}{V_p + V_R} \quad (5)$$

$$T_t = \frac{\bar{f} V}{R} = \frac{V}{R} \frac{V_p}{V_p + V_R} = \frac{V}{P} T \quad (6)$$

V_p: 창조류 동안 만 내로 유입된 해수량(m³)

σ : 외해수의 평균 염분(‰)

V_R: 낙조류 동안 만 내로 유입된 담수량(m³)

\bar{s} : 혼합수의 평균 염분(‰)

\bar{f} : 평균 담수율(%) P : V_p + V_R

T_t : tidal prism flushing time(day)

R : 단위 시간당 유입되는 담수량(m³/sec)

3. 결과 및 고찰

3.1 만 입구에서 측정한 유속 특성

1996년 5월과 10월의 대조기와 소조기에 관측된 유속 자료를 이용하여 시간에 따른 유속과 유향의 변화를 나타내는 stick vector diagram을 나타내었다(Fig. 2). St. C에서는 만 입구의 방향을 고려하여 해수의 유입과 유출을 쉽게 파악할 수 있게 하기 위해 동·서 성분으로 나타내었다. 그림에서 반일주조가 강하게 나타남을 알 수 있다. Table 2는 5월과 10월의 관측시기별 만 입구에서의 최대, 최소 및 평균 유속을 나타낸다.

5월 대조기때의 만 입구 최대 유속은 50(St.A)~101(St.B)cm/sec 였으며, 평균 유속은 27(St.A)~

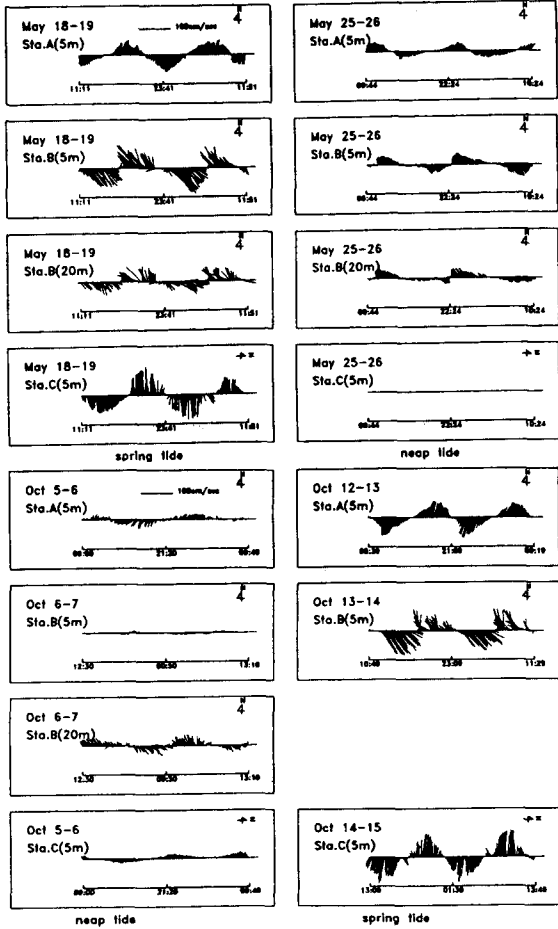


Fig. 2. Stick vector diagram at each stations in May and October.

46(St.B)cm/sec 였다. 소조기때의 최대 유속을 보면 4(St.C)~49(St.B)cm/sec로 대조기때와 20(St.A)~50(St.C)cm/sec 차이를 보였다. 세 개의 만 입구별 평균 유속은 2(St.A)~20(St.C)cm/sec로 나타났으며, 대조기때와 12(St.A)~37(St.C)cm/sec 정도의 차이가 있었다. 최대 유속은 대·소조기 모두 수심이 가장 깊은 St.B에서 나타났다. 대·소조기때의 큰 유속차는 만 내로의 해수 수송량 및 교환 시간 그리고 만 내의 투명도의 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이 등(1996)은 득량만의 조석 주기별 투명도의 변동 특성에서 대조기때가 소조기때보다 투명도가 약 1m 낮게 나타남을 밝혔다. Fig. 3은 관측이 실시된 1996년 5월과 10월의 녹동항(Fig.1)의 조위값(수로국, 1996)으로서 득량만에서 대조기때의 조위는 거의 4m인 반면 소조기때는 2~3m로서 대조기때의 진폭이 2배정도 크게 나타났다. 조위의 변화는 유속의 변동을 보이는데, 조석 주기별 투명도의 변동은 유속 크기의 변화에 따른 해저면 전단응력의 변화로 인하여 해저면의 부유물질이 재부유되는 정도가 다르기 때문인 것으로 사료된다.

10월의 경우 소조기때의 유속 특징을 보면 St.B의 저

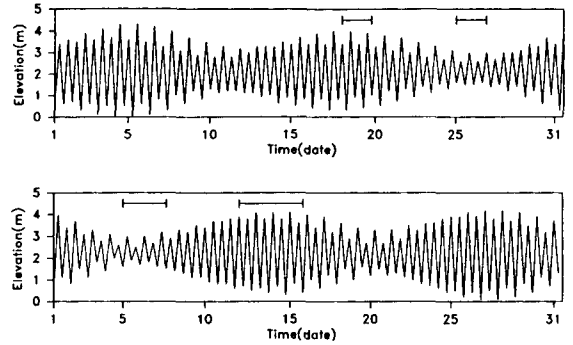


Fig. 3. Tidal elevation of observation periods in May(upper) and Oct.(lower), 1996.

(— : observation periods)

층부에서 최대 유속(36.96m/sec)이 나타났으며, 만 입구별 평균 유속은 8.43(St.C)~17.32(St.B) cm/sec로 나타났다. 관측 정점별 최대 유속은 64.74(St.A)~95.25(St.B)cm/sec 였으며, 평균 유속은 29.45(St.A)~47.55(St.B)cm/sec로 나타났다.

이상과 같이 1996년 5월과 10월에 나타난 만 입구의 유속 특징을 보면 St. B에서 해수 흐름이 가장 빠르게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 외양에서는 해류가 연안에서는 조류가 발달한다. 조류는 천해파의 성격을 띠는데, 이 경우 파속은 수심에 비례하기 때문에 상대적으로 수심이 얇은 다른 두 관측점보다 유속이 빠르게 나타난 것으로 사료된다. 그리고 다른 만 입구와 달리 동서 방향으로 놓여 있는 금당도와 풍양면사이(Fig. 1)에서는 대조기와 소조기때 평균 유속의 차이가 40cm/sec로 가장 크게 나타났으며 소조기때에는 해수의 흐름이 아주 미약하였다. 이러한 유속의 차이는 대·소조기별 해수 수송량의 차이에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. 각 만 입구부의 지배적인 유향을 보면 신상리와 금당도 사이는 북동-남서향류, 금당도와 거금도 사이는 북서-남동향류, 거금도와 풍양면 사이는 동-서향류가 우세한데 이는 지형의 영향을 많이 받는 것으로 여겨진다.

그리고 동시 관측이 실시된 5월의 각 만 입구에서의 시간별 유향의 변화를 살펴보면 세 개의 만 입구에서 해수 유·출입이 동시에 일어나지 않고 약간의 시간차를 두고 일어났다. 5월 대조기때 해수의 유·출입 경향을 보면 노력도와 금당도 사이(St.A)의 만 입구부에서 가장 빨리 해수 유입 있으며, 금당도와 거금도 사이(St.B)에서는 약 2시간 정도 그리고 거금도 풍양면 사이의 만 입구(St.C)를 통해서 거의 3시간정도의 시간 지연이 있었다. 만 외로의 해수 유출도 먼저 유입된 순서대로 발생하였다. 소조기의 경우 St.C, St.A, St.B의 순으로 해수의 유출이 있었으며, 해수의 유입도 같은 순서로 발생하였다. 이와 같이 대조기와 소조기때 세 개의 만 입구를 통한 해수 유·출입 순서가 다르게 나타났으며, 금당도와 거금도(St. B)에서 가장 늦게 해수의 유입과 유출이 일어났다. 이러한 유·출입시간의 지연은 만 내의 해수 유동의 변화에 영향을 미칠 것으로 사료되며, 앞으로 유·출입 시간 지연의 원인 규명 및 이것에 의한 만 내

Table 3. Calculated volume transport and turnover time in Deukryang Bay in May and October, 1996

Period of observation		Volume transport (1Sv = $1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)		Turnover time (day)
May	May 18~19	5.7×10^{-2}	St.A : 1.4×10^{-2} St.B : 2.4×10^{-2} St.C : 1.7×10^{-2}	0.67(16hr)
	May 25~26	2.1×10^{-2}	St.A : 0.48×10^{-2} St.B : 1.39×10^{-2} St.C : 0.03×10^{-2}	1.81(43hr)
	Mean	3.9×10^{-2}	St.A : 1.1×10^{-2} St.B : 1.9×10^{-2} St.C : 0.87×10^{-2}	0.97(23hr)
Oct.	Oct. 5~7	1.6×10^{-2}	St.A : 0.48×10^{-2} St.B : 0.94×10^{-2} St.C : 0.18×10^{-2}	2.25(54hr)
	Oct. 12~15	5.1×10^{-2}	St.A : 1.4×10^{-2} St.B : 1.9×10^{-2} St.C : 1.8×10^{-2}	0.73(17hr)
	Mean	3.4×10^{-2}	St.A : 0.94×10^{-2} St.B : 1.42×10^{-2} St.C : 0.99×10^{-2}	1.1(26hr)

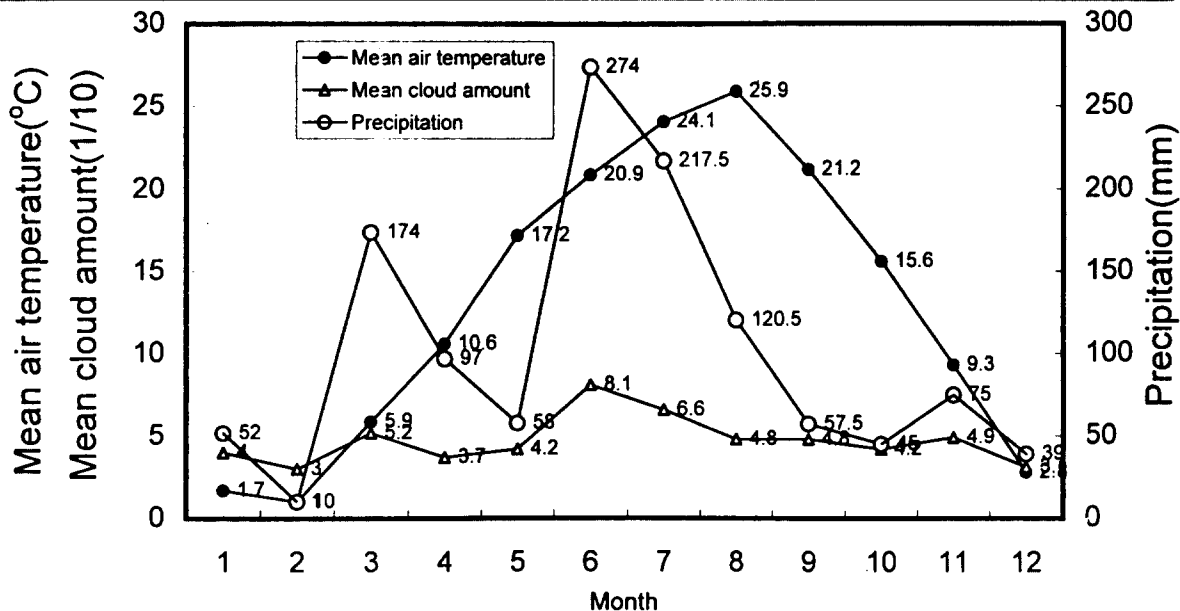


Fig. 4. Monthly variation of precipitation, mean air-temperature and cloud amount in Kohung, 1996(meteorological monthly report, 1996).

해수 유동 구조의 특성을 밝히는 연구가 이루어져야 할 것이다.

3.2 해수의 수송량과 교환 시간

3.2.1 실측치에 의한 해수의 수송량과 교환 시간

득량만과 같은 반 폐쇄적인 환경에서의 물질 수송 및 순환은 적조 및 빈 산소 상태를 초래하는 부영양화의 문제와 깊은 관련을 가지고 있다.

Table 3은 5월과 10월의 각 관측 시기별 평균 해수 수송량 및 교환 시간을 보여 준다. 5월 대조기때 세 개

의 만 입구를 통한 단위 시간당 해수 수송량은 $5.7 \times 10^{-2} \text{ Sv}$ ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)로 해수 교환 시간은 0.67일 정도였다. 그리고 소조기에는 각각 $2.1 \times 10^{-2} \text{ Sv}$ 와 1.81일였다. 이러한 결과로 보아 대조기가 소조기 보다 해수 교환이 2.7배정도 빠른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 조석 주기에 따라 만의 수괴 특성이 크게 변한다는 연구결과(이 등 1996)와 연관성이 높은 것으로 사료된다. 해수 유입률이 빠르면 빠를수록 만 내의 해수 체류 시간이 짧아지는데 이것은 해수 유입량이 많아짐에 따라 만 내 해수의 순환이 빨라지기 때문인 것으로 생각된다. 그리고

Table 4. Volume transport and turnover time by residual current

Period of observation		Volume transport (1Sv = 1×10 ⁶ m ³ s ⁻¹) (- : outflow)		Turnover time (day)
May	May 18~19	2.8×10 ⁻³	St.A : 2.1×10 ⁻³ St.B : -1.1×10 ⁻³ St.C : 1.8×10 ⁻³	14
	May 25~26		1.9×10 ⁻³	
Oct.	Oct. 5~7	-0.8×10 ⁻³	St.A : 0.6×10 ⁻³ St.B : -0.8×10 ⁻³ St.C : -0.6×10 ⁻³	46
	Oct. 12~15		-0.83×10 ⁻³	

Table 5. Daily wind speed and direction during observation periods in Kohung (meteorological monthly report, 1996)

Speed & Direction Period of observation	WIND		
	Mean Wind Speed (m/sec)	Max.	
		Speed (m/sec)	Direct. (16)
May 18	1.1	3.9	SE
19	0.7	2.7	SSW
May 25	0.9	3.8	SSW
26	0.6	3.6	NW
Oct. 5	1.0	4.9	SSE
6	1.9	5.3	NW
7	1.4	5.5	NW
Oct. 12	0.5	2.6	NNE
13	0.8	3.6	SE
14	1.2	4.1	WNW
15	3.0	6.6	WNW

대조기와 소조기때를 평균한 해수 수송량 및 교환 시간은 각각 3.9×10⁻²Sv와 약 0.97일 정도였다. 만 입구별 평균 해수 수송량은 신상리와 금당도를 통하여 1.1×10⁻²Sv정도, 금당도와 거금도를 통하여서는 1.9×10⁻²Sv, 거금도와 풍양면 사이에서는 0.87×10⁻²Sv의 수송량을 나타내었다. 그리고 각각 한 곳의 만 입구만을 통해서 해수의 유·출입이 일어난다고 가정 하였을 때의 교환 시간은 각각 3.6일(St.A), 2일(St. B)3.87일(St.C)로 나타났다.

10월 소조기때의 결과를 보면 해수 수송량은 1.6×10⁻²Sv로 2.25일 정도의교환 시간이 걸렸다. 그리고 10월 대조기에 관측된 해수 수송량은 5.1×10⁻²Sv (교환 시간은 약 0.73 일)정도였다. 10월 평균 해수 수송량은 3.4×10⁻²Sv로 교환 시간은 약 1.1 일 정도이다. 만 입구별 해수 수송량을 보면 St. A에서는 0.91×10⁻²Sv, St.B에서는 1.4×10⁻²Sv 그리고 St.C에서는 1×10⁻²Sv를 나타내었다. 그리고 한곳의 만 입구만을 통한 교환 시간을 계산하면 4일(St.A), 2.7일(St.B), 3.8일(St.C)로 나타났다. 10월 대조기 관측 시에는 금당도와 거금도 사이(St.

B)의 저층부에는 유속을 측정하지 못하여, 10월 평균 유·출입량 계산시 소조기에 측정된 값을 평균값으로 취하였다. 따라서 실제 대·소조기때의 평균 해수 수송량과 해수 교환 시간보다는 작게 평가된 것으로 생각된다.

5월과 10월달 4회의 해류 관측을 통한 결과를 보면 득량만은 내·외해수 간의 해수 교환에 걸리는 시간은 평균적으로 하루 정도였다. 심이 가장 빠른 금당도와 거금도 사이를 통하여 가장 많은 해수의 수송이 일어나며, 해수 순환 또한 빠르게 일어남을 알 수 있다. 그리고 소조기때 풍양면과 금당도를 통하여 다른 두 개의 만 입구 보다 상대적으로 해수 교환이 미약하게 나타났다. 이것은 소조기때 동-서 방향으로 놓인 만 입구에서 유속이 느리게 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구 결과는 Pickard (1982)가 계산한 Mediterranean Sea(용적:3.8×10⁶km³, 평균 수심:1500m, 해수 수송량:1.75Sv)의 70년과 Black Sea(용적:0.6×10⁶km³, 평균 수심:1200m, 해수 수송량:6×10⁻³Sv)의 3000년과 비교했을 시에 해수 교환이 아주 빠르게 일어남을 알 수 있다. 그리고 Takeoka(1984)가 Seto Inland (Japan)에 대해 계산한 8개월에 비해서도 훨씬 짧은 기간에 걸쳐 해수 교환이 일어남을 알 수 있다. 이러한 차이는 각 연구 해역의 전체 용적과 평균 수심 그리고 해수 수송량의 차이 등으로 인하여 생기는 것으로 사료된다. 실제로 해수 교환 시간이 3000년이 걸리는 Black Sea의 수심 200m 이하에는 용존 산소가 거의 존재 하지 않으며 황화수소의 농도가 6ml/l로 높게 나타났다.

그리고 도덕면과 고흥읍 일대 0.037km³이 매립되었는데, 매립되기 전 만의 해수 교환시간을 보면 5월과 10월의 경우 0.98일와 1.13일로 각각 매립후의 0.97일, 1.12일와는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 만의 일부 매립지가 해수 교환 시간에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

득량만의 해수 교환량 측정에 있어서 해수의 유·출입 경로는 각각 만 입구를 통한 유입과 유출만을 고려하였다. 하지만 만 내에 위치하는 하천으로부터의 담수의

유입이나, 증발 등으로 인한 해수의 손실 등은 본 연구에서는 고려하지 못하였다. Fig. 4는 고흡기상관측소에서 측정된 1996년의 월별 평균 대기 온도, 강우량 그리고 고운량의 변동치를 보여 준다. 강수량을 보면 96년 총 강수량은 1186.4mm였으며, 하계(6월, 7월, 8월)에 강수량이 612mm로 전체 연 강수량의 약 52%를 차지하고, 동계(12월, 1월, 2월)에는 83.5mm로서 약 7%에 불과한 하계 집중형 강수 특성을 잘 나타내고 있다. 관측달인 5월달과 10월달 각각 58mm, 52mm로 적은 양을 나타내었으며, 이것으로 보아 해수수송량에 미치는 강수의 영향은 적었던 것으로 사료된다.

3.3.2 잔차류에 의한 해수의 수송량과 교환 시간

일반적으로 잔차류는 바람, 담수량, 외해로부터의 흐름 그리고 조류의 비선형성인 조석응력(tidal stress)에 의한 조석 잔차류 성분을 모두 고려한 흐름이다. 특량만과 같은 반 폐쇄적인 만의 잔차류는 외해의 흐름으로부터 직접적인 영향을 받지 않기 때문에 대부분의 잔차류는 조석, 밀도 구배, 바람 등에 기인한다(정 등, 1994).

Table 4는 5월과 10월 대·소조기때 관측된 자료를 시간에 대해 적분하여 시간 평균함으로서 계산된 잔차류 성분을 보여 준다. 5월 대조기때의 관측치로부터 계산된 세 개의 만 입구를 통한 잔차류에 의한 해수 수송량은 약 $2.8 \times 10^3 \text{ Sv}$ 정도이다. 만 입구별로 보면 St.A, C를 통해서만 내부로의 흐름이 있는 반면 St.B를 통해서만 외부로의 유출이 있었다. 소조기(25~26일)의 경우 만 입구를 통한 전체 해수수송량은 $1.9 \times 10^3 \text{ Sv}$ 였으며 세 개의 만 입구에서 모두 만 내부로의 유입이 있었다. 대·소조기때의 해수 수송량에 따른 해수 교환 시간을 보면 각각 14일, 20일 이었다.

10월 소조기에는 전체적으로 만 외부로의 유출($0.8 \times 10^3 \text{ Sv}$)이 있었다. 대조기에는 세 개의 만 입구를 통하여 $0.83 \times 10^3 \text{ Sv}$ 만큼의 해수 유출이 있었다. 그리고 각 시기별 해수 교환 시간은 소조기때가 46일, 대조기에는 47일로 나타났다.

5월과 10월 대·소조기 관측에서 나타난 잔차류에 의한 해수의 유·출입을 보면 5월에는 만 내부로, 10월은 만 외부로의 흐름이 있었음을 알 수 있다. 이러한 현상은 관측 당시의 주요 풍향이 5월달의 경우 남풍계열이 10월의 경우에는 북풍계열의 바람이 우세하게 분 것 과 연관성이 있는 것으로 사료된다(Table 5). 본 연구에서 계산된 잔차류는 10분간격의 관측된 자료를 관측시간(M_2 조 주기)에 대해 적분한 후 평균한 것이기 때문에, 반일주조 성분외의 조류 및 기타 요인에 의한 영향이 포함되어 있는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구의 결과는 장기간의 잔차류 성분으로 평가하기는 힘이 드나 단 기간의 잔차류 흐름 및 잔차류에 의한 해수 수송량 그리고 교환 시간을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.3 반일주조에 의한 해수의 수송량

Fig. 5(a)와(b)는 5월과 10월 각 관측 시기별 실제 해수 수송량에서 반일주조에 의한 영향을 비교한 것이다. 5월 대소조기때를 평균한 값을 보면 $3.4 \times 10^2 \text{ Sv}$ 로 전체

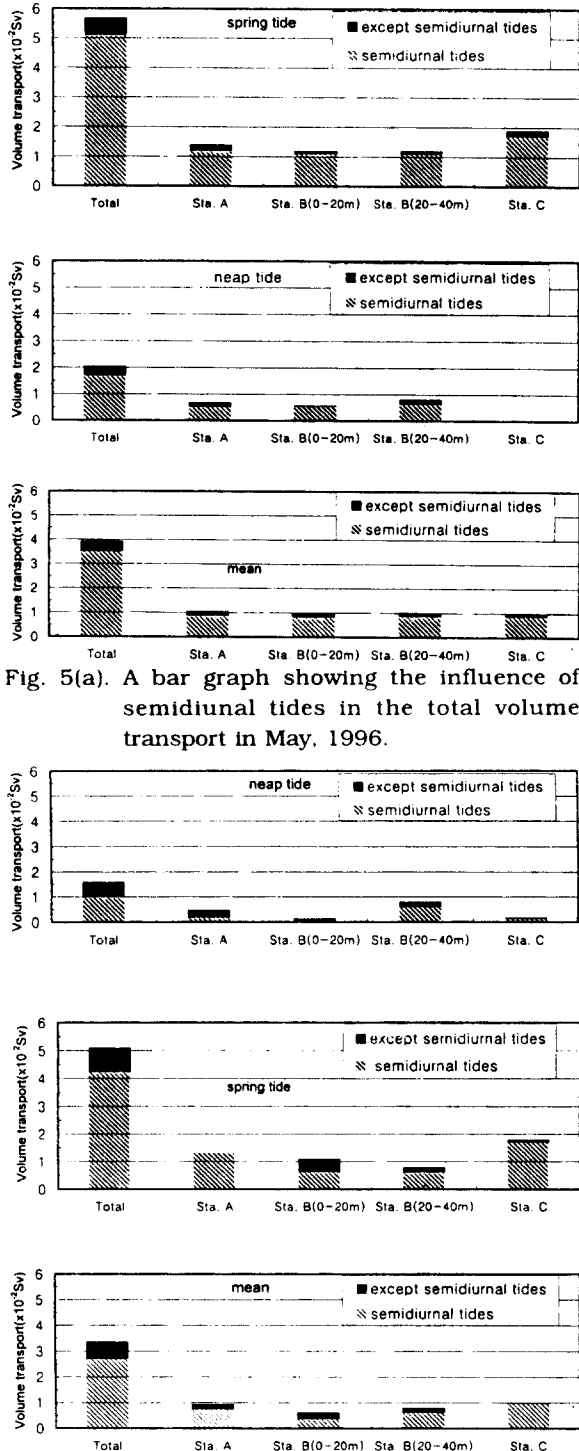


Fig. 5(a). A bar graph showing the influence of semidiurnal tides in the total volume transport in May, 1996.

Fig. 5(b). Same as fig. 5(a) in October, 1996.

해수 수송량($3.9 \times 10^2 \text{ Sv}$)의 85% 이상을 차지하는 것으로 나타났으며 이것은 특량만에서 반일주조의 영향이 탁월함을 보여 준다. 10월의 경우 2회에 걸친 관측 값을 평균하여 보면 반일주조에 의한 해수 수송량은 2.4×10^2

^{252}Sv 로 전체($3.4 \times 10^{12}\text{Sv}$)의 71%정도를 차지하였다. 만 내의 해수 유동이나 물질 순환에 크게 영향을 미치는 것으로 고려되는 만 입구를 통한 해수의 유·출입에 있어서 반일주조가 차지하는 비중은 전체적으로 보았을 때 70~85%정도를 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Lee and Rho(1993)가 득량만에서 태풍과 같은 강한 바람의 영향이 없을 경우, 조류에 의한 해수 유동이 전체 에너지의 85~90%정도를 차지하며 반일주조의 경우는 70~82%정도 차지한다고 한 연구 결과와 잘 일치한다.

앞서 제시하였듯이, 해수 수송 및 교환 시간 계산은 안정 상태(steady state)를 가정하여 계산되었다. 실제로 이러한 가정은 조류가 우세하게 나타나는 연안역에서 잘 적용이 된다. 밀도류와 취송류에 의한 해수 수송의 경우 단기간의 변동은 평균함으로써 제거되는 경향이 있지만 계절에 따라 크게 변화한다(Takeoka, 1984). 따라서 이러한 경우에 조류는 밀도류와 취송류에 비해 상대적으로 약하기 때문에 해수 교환 시간은 계절에 따라 다르게 나타날 것이다.

실제로 본 연구에서 5월과 10월에 계산된 평균 해수 수송량 및 해수 교환시간을 보면 어느 정도 일정하게 나타났다는데, 이것은 득량만의 경우 조류가 우세한 지역임을 잘 보여 주는 것으로 생각되며, 또한 해수 교환 시간에서 가정한 안정 상태의 적용이 어느 정도 적합한 것으로 생각된다.

3.3. Tidal prism methods를 이용한 담수율 추정

연안역에서 일어나는 물리해양학적인 현상들 중에서 가장 중요한 것 중의 한가지는 이류와 순환 그리고 확산 등을 통해 일어나는 혼합 현상일 것이다. 실제로 연안역의 경우 일반적으로, 육지로부터 저밀도의 담수의 유입과 조류의 영향에 기인하여 표층은 해양 쪽으로 그리고 저층에는 육지 쪽으로의 흐르는 형태의 구조를 가진다.

Officer(1976)는 연안역에서의 혼합 현상을 설명하기 위해 몇 가지 간단한 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 tidal prism method의 원리를 적용하여 득량만 내의 담수율과 담수의 체류시간을 대해 파악하였다. Tidal prism method는 창조류 동안 estuary내로 유입되는 해수가 전적으로 외양수의 성격을 가지며, 조석 주기 동안에 유입된 담수와 완전히 혼합된 후, 낙조류 동안에 완전히 외해로 빠져나간다는 것을 전제로 하고 있다.

5월 대·소조기때 만 내로 유입되는 해수의 평균 염분 농도(약 34.14‰)는 낙조류 동안 외해로 유출되는 해수의 평균 염분 농도(약 34.11‰) 보다 높게 나타났으며 그 차이는 0.03% 였다. 이러한 염분 농도의 차이는 육지로 둘러싸인 반폐쇄만에서는 하천수 등 육지로부터 유입되는 담수의 영향으로 인해 만 내의 해수가 저염분을 띠는 것과 연관성이 있는 것으로 보여 진다. 실제로 일본의 Ooka Bay에서 Yanagi(1987)의 연구에서 나타난 것처럼 육지와 인접해 있는 연안역에서의 최소 염분이 나타나는 현상은 육지로부터의 담수의 영향이 크며, 만 내의 해수를 고염수로 만드는 것은 외해수로 부터의 염수의 유입 때문이라고 한 것과 잘 일치하는 것으로 생

각된다.

해수 증발로 인한 영향을 무시한 상태에서 관계식 (4), (5), (6)을 이용하여 득량만 내의 5월 대·소조기의 평균 담수율을 계산하면 담수가 차지하는 비중은 득량만 전체 용적의 약 0.06%이며, 담수가 만 내에서 체류하는 시간(tidal prism flushing time)은 약 0.97일로 나타났다. 그러나 실제 자연 현상에서는 조석 주기 동안에 만 내부 전체가 완전히 혼합이 된다고 보기는 힘들며, 또한 낙조류 동안 만 외부로 유출된 혼합수의 일부는 연이어서 발생하는 창조류때 다시 만 내로 유입될 수도 있다. 따라서 계산에 의한 담수 체류 시간은 실제로 관측된 시간 보다 항상 작을 것이다(Takeoka, 1984). 즉 관측된 담수의 체류시간이 계산에 의한 것보다 길어질 것이라는 것이다. 그러므로 본 계산에서 나온 결과는 득량만의 담수의 체류 시간을 표현하는데 있어서 optimum value로 고려하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

4. 요 약

본 연구에서는 수산물의 생산량이 많은 득량만의 해수 수송량 및 해수 교환시간을 규명하기 위하여 1996년 5월과 10월의 대조기와 소조기에 만의 남쪽에 위치하는 세 개의 만 입구에서 유속을 측정하였다.

그 결과 관측시기별 유속을 비교하여 보면 수심이 가장 깊은 금당도와 거금도 사이에서 만 입구(95~100cm/sec)에서 나타났으며, 만 입구와 평행한 흐름이 강하게 나타났다. 세 개의 만 입구를 통한 해수의 유·출입 위상을 보면, 대조기의 경우 St. A, St. B, St. C의 순으로 해수의 유입과 유출이 빠르게 일어났다. 또 소조기의 경우는 St. C, St. A, St. B의 순으로 유입과 유출이 빠르게 일어났다.

5월의 대조기 및 소조기의 해수 수송량은 각각 $5.7 \times 10^{12}\text{Sv}$, $2.1 \times 10^{12}\text{Sv}$ 였으며, 대조기와 소조기의 평균값은 $3.4 \times 10^{12}\text{Sv}$ 였다. 10월의 대조기와 소조기해수 수송량은 각각 $5.1 \times 10^{12}\text{Sv}$, $1.63.9 \times 10^{12}\text{Sv}$ 였으며, 수송량의 평균값은 $3.4 \times 10^{12}\text{Sv}$ 였다.

해수 교환 시간은 5월 대조기때가 0.67일 였으며 소조기에 1.81일로 나타났으며, 이들에 대한 평균 교환 시간은 0.97일 이었다. 10월의 대조기에는 0.73일 였으며 소조기에는 2.25일로 나타났다. 평균 교환 시간은 1.1일 이었다. 그러므로 득량만의 평균 해수 교환 시간은 약 하루로 나타났다. 5월과 10월의 대조기 평균 시간은 약 0.7일 이었으며 소조기 평균은 약 2일로, 대조기가 소조기 보다 2.73배 빠르게 해수 교환이 일어났다. 만 입구별로 보면 금당도와 거금도를 통하여 해수 수송이 가장 많았고 교환 시간도 빠르게 나타났다. 반일주조가 해수 유동에 있어서 차지하는 비중이 70~85%로 높게 나타났다.

잔차류에 의한 해수 수송량은 전체 수송량의 겨우 2~4% 였다. 잔차류에 의한 해수 교환 시간을 보면 5월 대조기에는 14일, 소조기에는 20일 이었고 10월 대조기에는 47일로 나타났다.

5월달 만 입구를 통해 유입되는 해수의 염분은 고염의 외해수 였으며, 유출시에는 저염의 만 내해수와 혼합

되어 유입수 보다 저염수로 되어 유출되고 있었다. 유입수와 유출수의 염분의 차이를 이용하여 득량만 내의 담수율을 추정한 결과 전체 용적의 약 0.06%로 추정되었다.

감사의 글

이 연구는 1996년도 부경대학교 해양산업개발연구소의 연구지원금에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

김상우, 조규대, 노홍길, 이재철, 김상현, 신상일, 1995, 1992~1993년의 득량만의 수온과 염분의 분포, 한국수산학회지, 28(1), 7~14.
 공영세, 이병걸, 1994, 득량만의 퇴적물 및 부유물 특성, 한국해양학회지, 29(3), 269~277.
 대한민국수로국, 1996, 조석표, 1, 43~44.
 양한섭, 1994, 득량만에서 영양염류의 계절 변화와 생물제한인자, 부경대학교 해양산업개발연구소 연구결과 보고서, 8~10.
 이병걸, 조규대, 김동선, 1991, 수영만에 유입된 담수의 체류시간과 그 계절적 변동 특성, 한국어업기술학회지, 27(3), 170~177.
 이병걸, 조규대, 최용규, 1996, 득량만의 조석주기 및 계절 변동에 따른 투명도의 변동 특성, 한국어업기술학회지, 32(4), 386~394.
 정은진, 홍철훈, 이병걸, 조규대, 1994, 득량만의 해수 유동에 관한 수치 실험, 한국수산학회지, 27(4), 397~403.
 최용규, 조규대, 이병걸, 홍철훈, 1995, 수심에 따른 득량만 키조개 어장의 환경특성, 한국어업기술학회지, 31(2), 127~141.
 허성범, 권승배, 1995, 득량만 이매패류 자원 개발에 관한 연구, 제5회 연안어장의 생산성 향상을 위한 국

내학술발표회 요약문, 부경대학교, 39~52.
 Charles B. Officer, 1976, Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters), 55~60.
 George L. Pickard, 1982, Descriptive Physical Oceanography (fourth edition), Pergamon Press, 53~54.
 Hidetaka Takeoka, Toshiya Hashimoto, 1988, Average residence time of matter in coastal waters in a transport system including biochemical processes, *Continental shelf research*, 8 (11), 1247~1256.
 Hidetaka Takeoka, 1984, Fundamental concepts of exchange and transport time scale in coastal sea, *Continental shelf research*, 3(3), 311~326.
 Isobe, 1994, Seasonal variability in the Tsushima Warm Current, Korea Strait, *Continental shelf research*, 14(1), 23~35.
 Jae Chul Lee and Hong Kil Rho, 1993, Physical feature of the Multidisciplinary Oceanographic Studies in Deukryang Bay, Korea. Abstracts of FOID'93, 55~66.
 John A. Knauss, 1997, Introduction to Physical Oceanography (second edition), Prentice Hall, 245~262.
 M. Grant Gross, 1993, Oceanography (sixth edition), Prentice Hall, 446pp.
 Paul R. Pinet, 1996, Invitation to Oceanography, West publ., 508pp.
 Yanagi, T., 1987, Seasonal Variations of water temperature and salinity in Osaka Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 43, 244~250.