

## 동해 죽변 연안해역에서 조석주기의 내부수온변동

이홍재 · 신창웅\* · 송영호\*

한국해양연구소

\*인하대학교 해양학과

### Internal Tidal Oscillations of Temperature off Jukbyun on the East Coast of Korea

HEUNG-JAE LIE, CHANG-WOONG SHIN\* AND YOUNG HO SEUNG\*

*Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea*

*\*Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

동해 죽변 연안역에서 수직성층이 비교적 잘 형성된 1980년 6월 15일부터 8월 8일까지 thermistor chain을 이용하여 관측한 수온의 조석주기 변동을 분석하였다. 각 관측수심에서 수온의 스펙트럼은 반일주기 성분이 전층에서 우세하게 나타났으며 반일주기 주파수대에 포함된 스펙트럼 밀도는 수심에 따라 증가하여 저층에서 최대로 나타났다. 반일주기 주파수의 각 층별 상관성은 높고 위상차는 작은 것으로 나타났다. 이것은 연구해역에서 성층이 잘 이루어졌을 때 반일주기 내부조석이 존재한다는 것을 의미한다. 진폭은 10 m 정도이며 내부조석이 사라지기 직전에 최대로 나타났다.

Internal temperature oscillations of tidal periods were studied using data observed by a thermistor chain in summer of 1980 off Jukbyun on the mid-east coast of Korea. The vertical stratification was well established during the observation period. The spectral energy was found to be predominant in the semidiurnal tidal band and its energy increased with depth with maximum near the bottom. The coherence in the semidiurnal band between different depths is high with a small phase difference. The results suggest the existence of the internal tide of semidiurnal period. The amplitude of internal tide was of the order of 10 m and the largest just before the disappearance of the internal tide signal.

### 서 론

조석주기의 내부수온변동에 대한 조사 및 연구는 세계 여러 곳에서 수행되었다. 일례로 Summers and Emery(1963), Cairns(1967)는 California 연안에서 그리고 Jones and Padman(1983)은 호주 연안에서 수온 연속관측으로 내부조석의 존재 및 특성에 대하여 보고하였다.

Baines(1986)는 내부조석에 대한 관측 및 발생이론에 대하여 정리하였다. 대륙사면과 같이 지형이 급격히 변하는 해역에서 등수심선에 수직한 조류성

분에 의한 성층수의 이류에 의해 내부조석파가 발생하며 연안과 외양으로 전파된다. 내부조석은 지구자전효과에 의한 관성주기와 조석주기가 같게되는 위도보다 고위도에서는 전파되지 않는다. 여러 해역에서 관측한 내부조석에 대한 특징을 요약하면 다음과 같다(Baines, 1973).

1) 대부분의 표층조석(surface tide)과 같이 일주기 성분의 내부조석보다 반일주기 성분이 더 두드러진다.

2) 연안에서 내부조석의 진폭이 대조기에는 크고 소조기에는 작다.

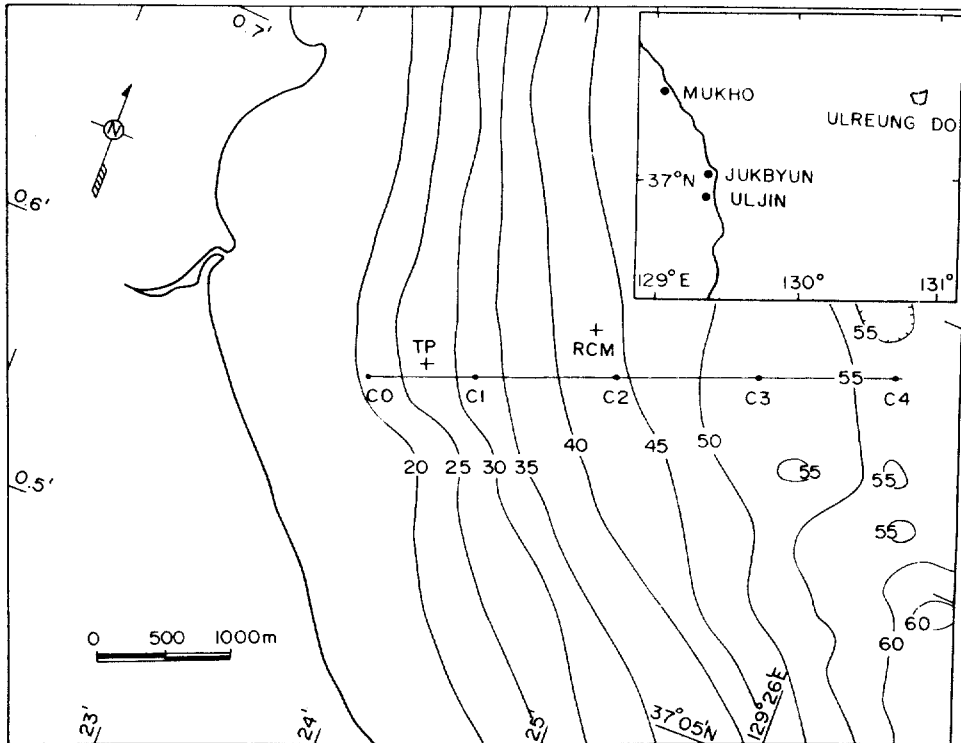


Fig. 1. Map showing mooring locations of thermistor chain (TP) and currentmeter (RCM) and hydrographic stations (C0~C4).

3) 대륙사면에서는 뚜렷이 발견되나 외양에서는 식별하기 어렵다.

4) 대륙붕에서 연안에 평행하게 전파된다.

내부파는 퇴적물의 이동과 침전, 수중음향 전파에 중요한 역할을 하며 생물환경에도 영향을 준다. 내부파가 불안정해지는 경우 혼합을 일으켜 하층의 영양염을 상층으로 전달시켜 주기도 한다. Kamykowski(1974)에 의하면 내부조석은 식물성플랑크톤 운동에 영향을 주며 집적현상을 일으킬 수 있다고 보고했다.

동해연안역은 계절에 따라 다양한 수온분포 양상을 나타내고 죽변-축산 연안은 여름철에 연안냉수가 발달하여 강한 계절수온약층이 형성된다. 따라서 큰 연직밀도 변화로 내부파가 존재할 가능성이 높다. 최근 Lim(1991)은 동해를 원통형으로 고려하여 해수의 성층화에 근거를 둔 수직구조함수를 이용하여 내부조석 발생모델을 제시하였다. 이 모델에 따르면 동해에서 반일주기의 내부조석은 제일 순압 모드

(baroclinic mode)로 보여지고, 정압 모드(barotropic mode)에서 전달된 거의 모든 에너지를 포함하고 있다. 그러나 한국 근해에서 내부조석에 대한 관측은 보고된 바 없다.

본 논문은 동해 죽변연안역에서 성층이 비교적 잘 형성된 1980년 6월 15일부터 8월 8일까지 한국 해양연구소가 관측한 수온자료(KORDI, 1980)를 분석하여 내부조석의 존재여부에 대하여 논하였다.

### 자료 및 방법

연구해역은 동해 죽변 연안해역으로 수심 60 m 이내의 천해로 등수심선이 대체로 해안에 평행하다 (Fig. 1). 수직 수온은 Aanderaa thermistor chain (Temperature Profile Recorder)으로 관측하였고 계류위치는 연안으로부터 약 1.5 km 떨어진 곳으로 수심은 27 m이다. 유속과 유향은 Aanderaa 유속계 (RCM-4)로 측정하였으며 연안으로부터 약 2.8 km

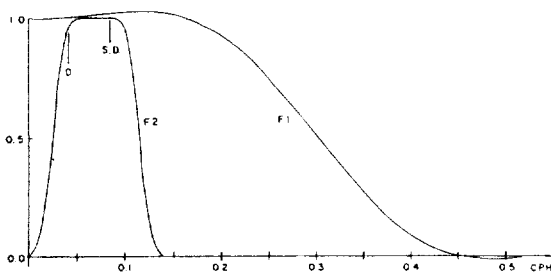


Fig. 2. Response functions of smoothing filter (F1) and band-pass filter (F2). D. and S.D. indicate diurnal and semidiurnal periods, respectively.

떨어진 수심 43 m 해역에 계류하였다. 계류기간은 1980년 6월 15일부터 8월 8일까지 53일간이며, 수온은 수면하 3 m부터 23 m까지 2 m간격으로 배열된 11개의 sensor로 20분 간격으로, 유속은 수면하 3 m에서 10분 간격으로 측정하였다.

수온자료에서 짧은 주기의 고주파 성분을 제거하기 위하여 smoothing filter를 사용하였고 조석주기대의 분석을 위하여 band-pass filter를 사용하였다. Fig. 2는 두 filter의 특성을 나타낸다. smoothing은 0.3 cph(cycles per hour)에서 50%, 0.39 cph에서 10%를 통과하는 Lanczos taper형 filter를 사용하였으

며 1시간 간격으로 자료를 재정리 하였다. Band-pass filter는 0.025 cph와 0.115 cph에서 50%, 0.0125 cph와 0.1275 cph에서 10%를 통과하는 filter이다.

자료분석은 시간변화곡선, 스펙트럼 등 시계열 분석방법을 이용하였다. 스펙트럼은 piece-average 방법을 사용하였고 각 piece별 스펙트럼은 FFT(Fast Fourier Transform)방법으로 계산 하였다. 조석과의 관계를 파악하기 위하여 수온과 유속이 관측된 같은 기간에 교통부 수로국이 목호항(37°33'N, 129°07'E)에서 관측한 조석자료를 사용하였다. 바람은 중앙관상대의 울진(36°59'N, 129°25'E)과 울릉도(37°29'N, 130°54'E) 측후소에서 관측한 기압자료를 이용하여 지균풍(geostrophic wind)을 계산하였다.

### 결과 및 고찰

Fig. 3은 smoothing filter를 통과시킨 수온의 시간변화곡선이다. 전체적으로 볼 때 6월에서 8월로 가면서 계절변화가 나타나 수온이 높아지는 경향을 보인다. 6월 30일부터 7월 30일 사이의 자료를 살펴보면 7월 2일~4일, 15~16일을 제외하고 조석주기의 변동이 나타나며 수온변화가 10°C 이상 달하

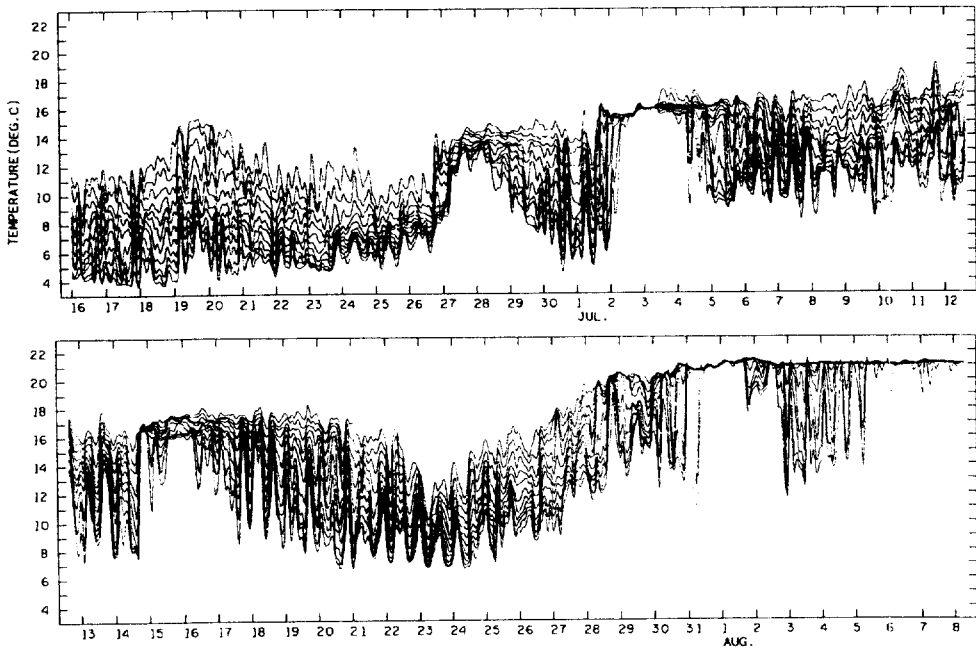


Fig. 3. Time plots of smoothed temperature data at TP in Fig. 1.

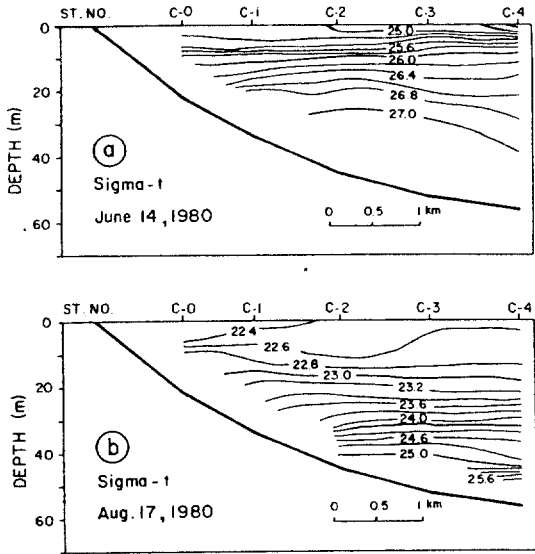


Fig. 4. Vertical density sections observed on June 14 and August 17, 1980.

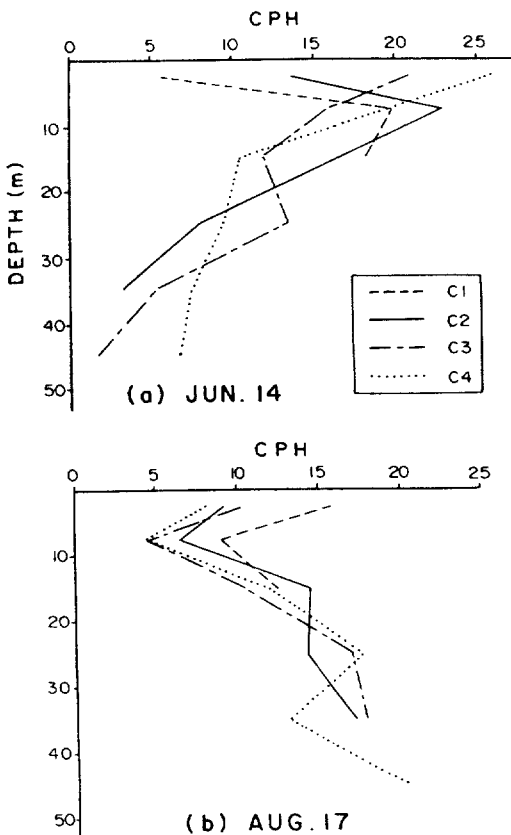


Fig. 5. Brunt-Väisälä frequency profiles at hydrographic stations on June 14 and August 17, 1980.

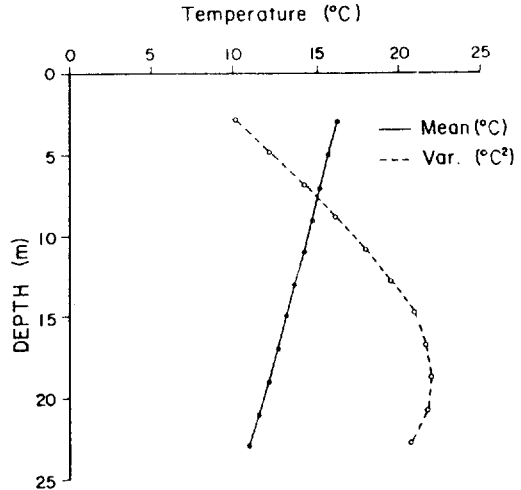


Fig. 6. Mean and variance profiles of smoothed temperature. The solid and dashed lines indicate mean and variance, respectively.

기도 하였다.

Fig. 4는 수온연속관측 전후 연구해역의 수직밀도 분포를 나타낸다. 6월 중순에는 10 m층을 중심으로 밀도의 수직변화가 크고 8월 중순에는 30~35 m로 밀도약층이 하강하는 것으로 나타난다.

수온연속관측 전후의 밀도 자료로 Brunt-Väisälä 주파수  $N$ 을 다음과 같이 계산하여 Fig. 5에 제시하였다.

$$N^2 = g \left( -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \text{ (radians s}^{-1}\text{)}^2$$

여기서  $g$ 는 중력가속도( $9.8 \text{ ms}^{-2}$ ),  $\rho$ 는 평균밀도이다. 부력주파수는 6월에는 10 m층에서 8월에는 25 m층 아래에서 최대를 나타낸다. 따라서 6월에서 8월로 가면서 수온약층이 깊어짐을 의미하며, Fig. 3에서 보는바와 같이 8월 수온이 상층에서는 일정하고 하층에서는 급격히 낮아진다.

Fig. 6은 smoothing한 수온의 평균과 분산을 나타낸다. 평균수온은 3 m에서  $16^\circ\text{C}$ , 23 m에서  $11^\circ\text{C}$ 로 수심에 대한 평균수온의 변화율은  $0.25^\circ\text{C m}^{-1}$ 이다. 분산은 3 m에서 최저( $10.08^\circ\text{C}^2$ )이고 19 m에서 최대( $22.16^\circ\text{C}^2$ )로 나타나 수온변동이 수온약층 부근에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

조석주기의 변동이 비교적 잘 나타나는 7월 5일부터 7월 30일까지 smoothing한 수온자료의 스펙

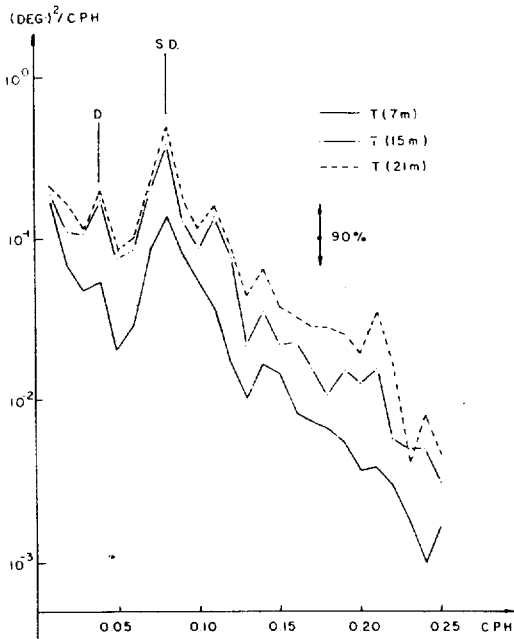


Fig. 7. Spectra of smoothed temperature at 7 m, 15 m and 21 m during July 5-July 30, 1980.

트럼을 계산하였다. Fig. 7은 수심 7 m, 15 m, 21 m 층에서의 스펙트럼을 나타낸다. 전 주파수대에 걸쳐 수심이 증가할수록 스펙트럼 밀도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반일주기 성분의 스펙트럼에너지가 공통적으로 가장 우세하게 나타나고 일주기의 피크가 하층(21 m)에서 미약하게 나타난다. 북호의 조석 스펙트럼을 보면(Fig. 8) 일주기가 반일주기 보다 조금 우세하지만 수온변동은 반일주기가 우세하게 나타난다. 이것은 반일주기 내부조석이 존재한다는 것을 암시한다. 본 연구해역에서는 일주기가 관성주기보다 크므로 일주기성분의 내부조석파는 발생할 수 없기 때문에 수온의 일주기 스펙트럼 에너지가 뚜렷하게 나타나지 않는다.

조석주기대의 수온변동을 보기위해 band-pass한 수온과 조석을 Fig. 9에 제시 하였다. 수온의 변화 폭이 상층보다는 하층에서 더 크게 나타난다. 수온 변동폭이 대조와 소조에 따라 변하는 양상은 뚜렷하게 나타나지는 않는다.

반일주기성분의 주파수대(0.0773~0.0867 cph)의 스펙트럼에너지와 band-pass한 수온의 분산을 Fig. 10에 제시하였다. 수심에 따라 분산과 스펙트럼에너지가 선형적으로 증가하여 저층에서 최대로 나타

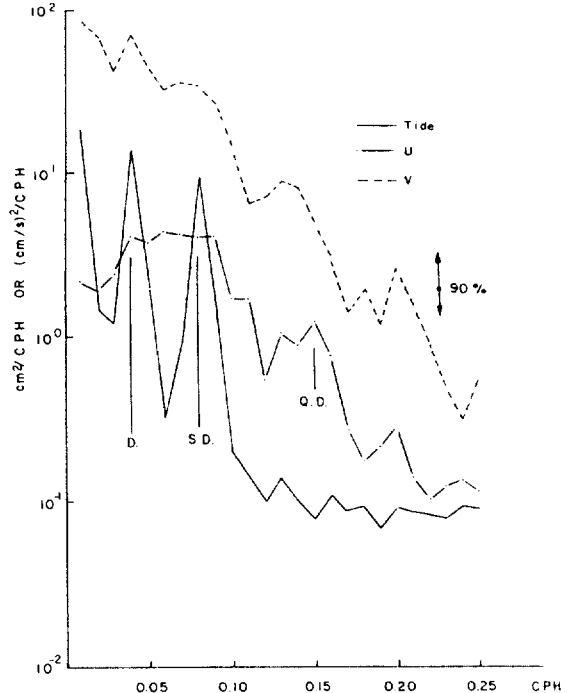


Fig. 8. Spectra of tide at Mukho, and onshore (U) and alongshore (V) current components.

나서 19 m 이하의 저층에서 반일주기 내부수온변동이 크게 일어나는 것을 알 수 있다.

0.08 cph에서 각 관측수심 사이의 상관성(Table 1)과 위상차(Fig. 11)를 보면, 대체로 상층(9 m 이상)과 상층, 하층(17 m 이하)과 하층 사이의 상관성은 높고 위상차는 적으나, 상층과 하층 사이의 상관성은 약간 낮게 나오고 위상차는 약 35°이다. 위상차 ( $\theta$ )와 주파수 ( $f$ )에서 시간지연 ( $\tau$ )은  $\tau(f) = \theta(f)/2\pi f$ 이므로 하층이 상층보다 약 1시간 빠르게 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 smoothing한 자료로부터 계산한 등온선의 시간변화 이다. 반일주기 내부조석이 나타나는 것을 잘 알아 볼 수 있으며 보통 진폭이 10 m 이상일 때도 있다. Fig. 3과 Fig. 9에서도 알 수 있듯이 7월 3일, 15일 그리고 7월 31일 이후에는 수온이 상하 균질하여 등온선의 변화가 거의 없다. 울진과 울릉도에서 관측한 해면기압으로부터 계산한 지균풍을 보면(Fig. 13), 발달한 저기압이 조사해역을 통과한 7월 2일~3일 그리고 태풍 IDA가 온대성 저기압으로 변하여 중부지방을 통과한 7월 14일~16일(중앙

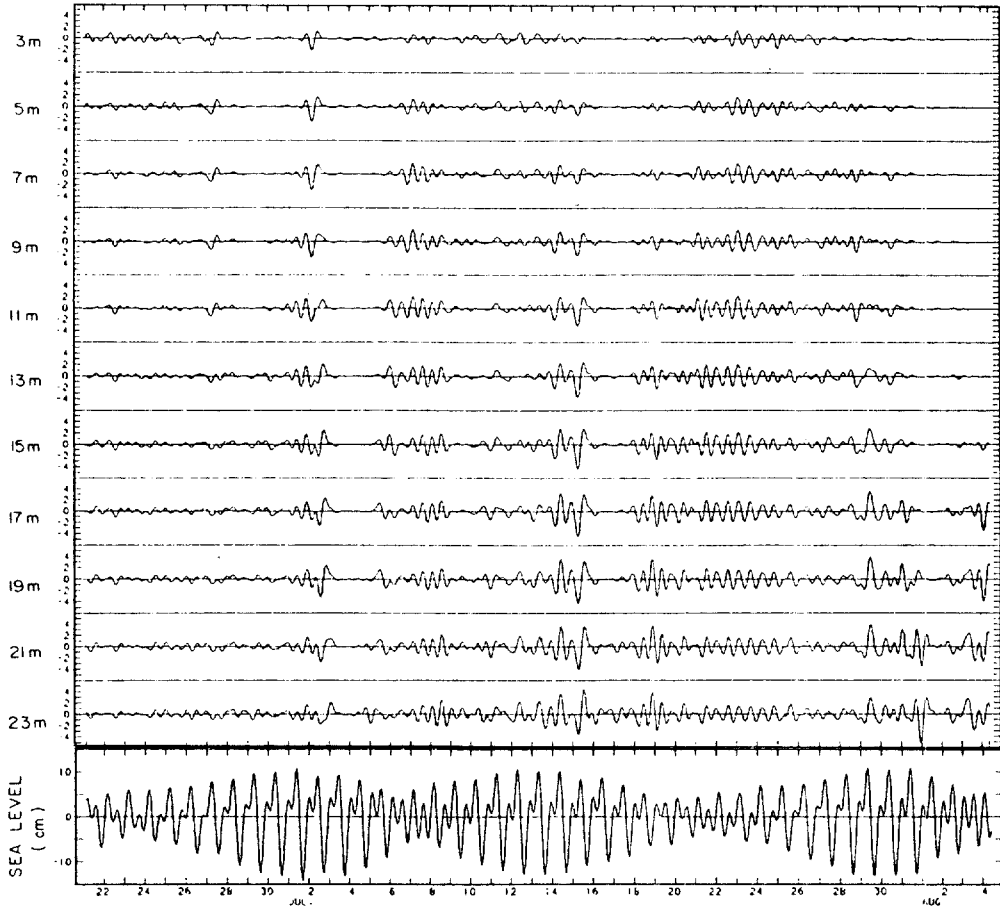


Fig. 9. Time plots of band-passed temperature at TP in Fig.1 and sea level changes at Mukho.

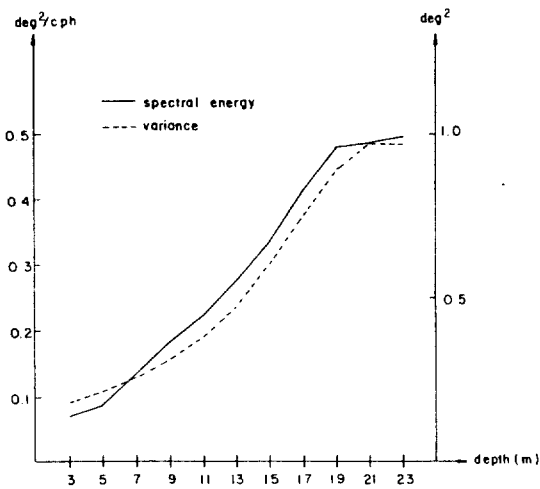


Fig. 10. Spectral energy (solid line) contained in 0.0773-0.0867 cph and variance (dashed line) of the band-passed temperature.

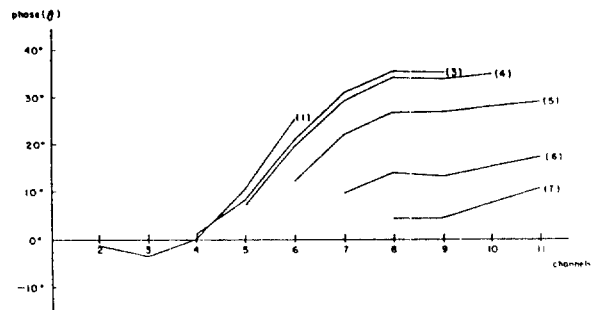


Fig. 11. Phase differences of the smoothed temperature between thermistor channels at 0.08 cph. The positive phase differences mean that the series of channels in the abscissa lead the series of channels in the parentheses.

Table 1. Coherences between smoothed temperatures at 0.08 cph. The confidence limit for 90% is 0.53. The subscripts of "T" denote temperature profiler sensor channels

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>11</sub>
T <sub>1</sub> ( 3 m)		0.85	0.81	0.76	0.61	0.50	0.39	0.33	0.30	0.27	0.20
T <sub>2</sub> ( 5 m)			0.99	0.95	0.83	0.70	0.61	0.56	0.52	0.47	0.36
T <sub>3</sub> ( 7 m)				0.98	0.88	0.76	0.67	0.66	0.56	0.52	0.41
T <sub>4</sub> ( 9 m)					0.95	0.85	0.77	0.69	0.62	0.59	0.49
T <sub>5</sub> (11 m)						0.96	0.91	0.81	0.70	0.68	0.58
T <sub>6</sub> (13 m)							0.95	0.81	0.69	0.67	0.61
T <sub>7</sub> (15 m)								0.93	0.81	0.77	0.69
T <sub>8</sub> (17 m)									0.96	0.88	0.81
T <sub>9</sub> (19 m)										0.96	0.88
T <sub>10</sub> (21 m)											0.96
T <sub>11</sub> (23 m)											

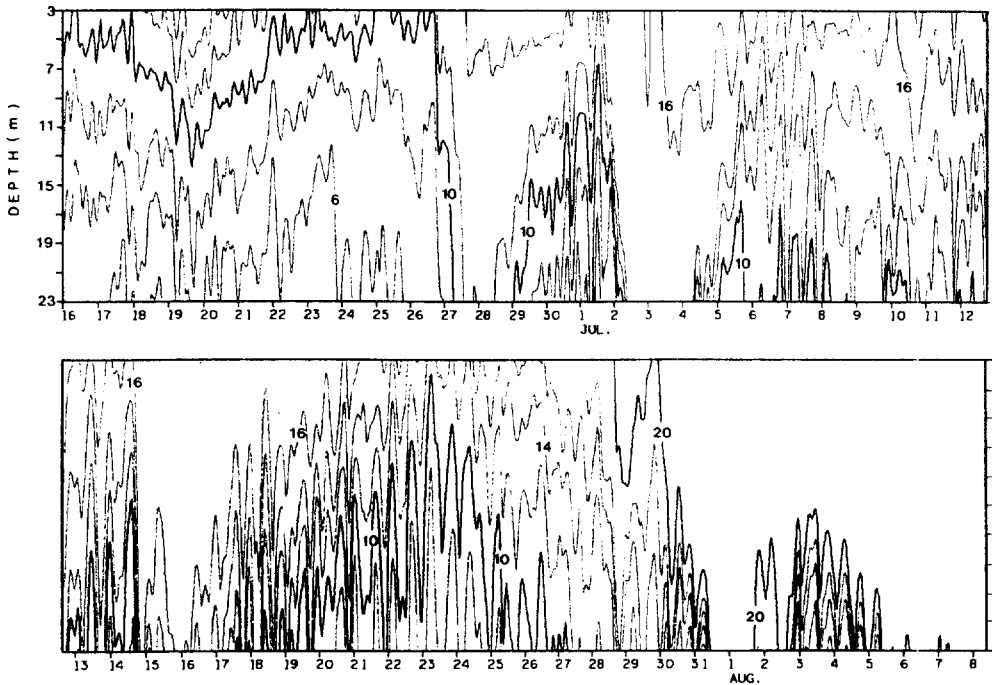


Fig. 12. Time plots of isotherms computed from smoothed temperature data.

관상대, 1980)에는 연안에 거의 평행한 북풍계열이 우세하다. 따라서 강한 북풍에 의하여 따뜻한 외양의 표층수가 연안으로 축적되어 온도가 균일해져 수온 변동이 거의 나타나지 않고, 7월말 부터는 전체적인 수온상승으로 혼합층이 깊어진 것으로 생각된다. 연안에서 바람에 의해 혼합이 이루어져 내부조석이 나타나지 않게 되는 경우는 일본의 우치우라만에서도 관측된 바 있다(Matsuyama, 1985).

Fig. 12에서 10°C 등온선을 살펴볼 때, 7월 23일의 경우 내부조석의 진폭이 10 m 이상으로 0.8 m/h 이상의 상승속도를 갖고 있다. 전체적으로 7월 16일부터 23일까지 약 6일 동안 10°C 이하의 냉수가 저층에서 상층으로 상승하여 평균 0.14 m/h 정도의 속도를 보인다.

Table 2는 0.08 cph와 0.04 cph에서의 수온과 조석 그리고 수온과 유속의 상관성과 위상차를 나타낸다.

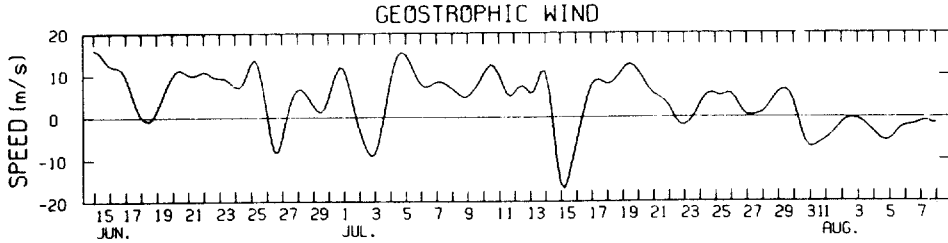


Fig. 13. Geostrophic wind speed calculated using sea surface pressure between Uljin and Ulreung Do. Positive values correspond to the southerly wind.

Table 2. Coherences and phase differences between temperatures and tide and between temperature and current velocity at 0.08 cph and 0.04 cph. The confidence limit for 90% is 0.47. "U" and "V" indicate onshore and alongshore current components, respectively

series	freq.	0.04 cph		0.08 cph	
		coherence	phase(°)	coherence	phase(°)
T( 7 m)-TIDE		0.433	133	0.480	31
T(15 m)-TIDE		0.749	148	0.238	13
T(21 m)-TIDE		0.719	132	0.282	4
T( 7 m)-U		0.387	54	0.004	42
T(15 m)-U		0.661	82	0.145	106
T(21 m)-U		0.643	64	0.142	106
T( 7 m)-V		0.223	-144	0.382	85
T(15 m)-V		0.580	-122	0.277	87
T(21 m)-V		0.628	-140	0.351	83

상관성은 대체로 반일주기보다 일주기성분에서 높게 나타나며, 상층보다 하층에서 높게 나타난다. Holloway(1983)는 호주 북서 대륙붕해역의 내부조석 관측에서 표층조석(surface tide)과 내부조석의 상관성이 낮은 이유를 내부조석이 대륙사면 수심 약 900 m의 넓은 해역에서 발생되기 때문인 것으로 설명하였다. 반면 Jones and Padman(1983)은 여러번 관측을 통하여 호주 Bass Strait에서 내부조석이 표층조석과 0~6시간의 위상차를 보이는 것은 내부조석의 발생해역이 관측점에서 멀지 않기 때문인 것으로 설명하였다. 본 연구에서는 0.08 cph에서 상관성이 낮게 나타나는데 이것은 내부조석과의 발생해역이 관측해역과 상당히 멀리 떨어져 있다는 것을 암시한다. 이러한 관계는 내부조석과가 발생한 해역에서 전파되면서 굴절 및 수평적인 밀도분포에 의한 영향 등 여러가지 원인과 관계있을 것으로 추측되나 이에 관해서는 앞으로 상세한 조사.연구가 필요하다.

관측기간 동안 목호의 조석과 유속의 스펙트럼을 보면(Fig. 8) 조석의 경우 일주기와 반일주기에서 뚜렷한 피크가 존재하며 일주기의 스펙트럼에너지가 반일주기 보다 약간 높게 나타난다. 그러나 유속의 경우는 뚜렷하게 우세한 피크가 나타나지 않는다. 내부조석은 등수심선에 수직인 조류성분에 의해 발생되며 내부조석에 의한 조류(baroclinic tidal current)는 발생해역에서 가장 강하게 흐르고 발생해역에서 멀어질수록 그 세기가 감소 한다(Lim, 1991). 또한 연안에 평행한 유속의 스펙트럼에너지 보다 연안에 수직한 유속성분의 스펙트럼에너지가 작은 것은 유속관측점이 해안에 가까워 조류가 등수심선에 평행하게 흐르기 때문인 것으로 생각된다.

결 론

동해 주변 연안역에서 수직성층이 비교적 잘 형성된 1980년 6월 15일부터 8월 8일까지 thermistor



chain을 이용하여 수심 27 m 해역에서 해면하 3 m와 23 m 사이를 2 m 간격으로 관측한 수온의 단주기 변동성을 분석하였다. 각 관측수심에서 수온의 스펙트럼은 반일주기와 일주기에서 피크를 나타내는데 특히 반일주기 성분이 전층에서 우세하게 나타난다. 반일주기 주파수대에 포함된 스펙트럼 밀도는 표층에서 최저이며 수심에 따라 증가하여 저층에서 최대로 나타났다. 반일주기 주파수의 각 수심별 수온의 상관성과 위상차는 9 m 이내의 상층과 17 m 이하의 하층에서는 상관성은 높고 위상차는 적으나 약층을 경계로 상층과 하층 사이에서 상관성은 약간 낮고 위상차는 35° 정도로 하층의 수온이 상층의 수온보다 약 1시간 정도 빠르게 변하는 것으로 나타났다. 이러한 것은 연구해역에서 성층이 잘 이루어졌을 때 반일주기 내부조석의 존재한다는 것을 의미한다. 반일주기에서 조석과 수온의 상관성이 높지 않은 것은 내부조석이 관측점 근방에서 발생한 것이 아니고 다른 곳에서 발생하여 전파된 것임을 암시한다.

강한 북풍계열의 바람으로 약층이 2~3일간 소멸되는 기간동안은 내부조석이 사라지나 소멸되기 직전에 진폭은 최대가 되어 최대수온 변화폭이 10°C 이상 나타나기도 하였다.

수심이 얇은 조사해역에 내부조석의 진폭이 10 m 정도로 관측되어 정선해양관측에 의해 한번 관측한 수온.염분 구조가 그 정점에서 대표적이라고 말하기 어려우며 역학적 해류계산에서도 오류가 발생할 수 있다. 그 오차를 보정하기 위해서는 조석주기 이내에

일정한 시간 간격으로 반복 관측하는 것이 바람직하다.

## 참고문헌

- 중앙관상대, 1980. 기상월보 6, 7, 8월호.  
 Baines, P.G., 1973. The generation of internal tides by flat-bump topography. *Deep-Sea Res.*, **20**: 179-205.  
 Baines, P.G., 1986. Internal tides, internal waves, and near-inertial motions, In: Baroclinic processes on continental shelves, edited by C.N.K. Mooers, American Geophysical Union, Washington, D.C., 19-31.  
 Cairns, J.L., 1967. Asymmetry of internal tidal waves in shallow coastal waters. *J. Geophys. Res.*, **72**: 3563-3565.  
 Holloway, P.E., 1983. Internal tides on the Australian north-west shelf : A preliminary investigation. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**: 1357-1370.  
 Jones, Ian S.F. and L. Padman, 1983. Semidiurnal internal tides in eastern Bass Strait. *Aust. J. Mar. Freshw. Res.*, **34**: 159-171.  
 Kamykowski, D., 1974. Possible interactions between phytoplankton and semidiurnal internal tides. *J. Mar. Res.*, **32**: 67-89.  
 KORDI, 1980. Current and temperature data near the Buku site. Part 1 and Part 2. BPSI 00022-39-1, 711 pp.  
 Lim, K.S., 1991. Internal tides in an axially symmetric basin. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **26**: 133-143.  
 Matsuyama, M., 1985. Internal tides in Uchiura Bay. Subsurface temperature observations near the bay head. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**: 135-144.  
 Summers, H.J. and K.O. Emery, 1963. Internal waves of tidal period off southern California. *J. Geophys. Res.*, **68**: 827-839.

Accepted August 30, 1992