

한반도 근해의 해류 및 해수특성

— 한국 동해의 수온의 수직구조 —

나정열 · 이성욱 · 조규대*

한양대학교 지구해양과학과 · *부산수산대학교 해양학과

A Study on Sea Water and Ocean Current in the Sea Adjacent to Korea Peninsula

— The Vertical Structure of Temperatures in the East Sea of Korea —

Jung-Yul NA · Seong-Wook LEE and Kyu-Dae CHO*

Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University

Ansan, Kyunggi-do 425-791, Korea

**Department of Oceanography, National Fisheries University of Pusan*

Nam-gu, Pusan 608-737, Korea

In the East Sea of Korea the vertical structure functions of the temperature field were evaluated and the characteristic thermal zone was classified by the use of the empirical orthogonal function(EOF) method. The East Sea of Korea within the hydrographic lines of 102~107 of the Fisheries Research and Development Agency of Korea(FRDA) can be divided into three thermal regions by the characteristics of the vertical temperature variability. They are the North Korean Cold Current(NKCC) region near the coast which extends parallel to the north-south direction, the Warm-Core(WC) region which dominates almost all the hydrographic stations of the Line 104 of the FRDA and occupies a few stations of the Line-103 and -105 with its axis at the Line 104, and the East Korea Warm Current(EKWC) region which is bisected into the northern and the southern part by the WC region, respectively. Considering the two most important modes, 85.20~98.20% of the total variance of temperature variation are explained in the NKCC region, 85.20~92.90% in the EKWC region, and 83.50~91.70% in the WC region. The first mode has its peak value at the surface with the annual cycle of variation. The spatial pattern of the first mode portrays a coherent vertical variation in the EKWC region and a clear anti-correlation both in the NKCC region and in the WC region where the zero-crossing depths are 100m and 200m, respectively. The second mode of the NKCC region is particularly noticeable, having its peak at 100m with coherent vertical variation. To study the time dependency of the vertical structure functions, the extended EOF(EEOF) method was used. The persistence of the first mode is less than 4 months in the study area. The annual variation of the first mode in the NKCC region is different from those in the WC region and in the EKWC region.

서 론

한국동해(Fig. 1)는 한반도 주변해역 중에서 시공간 변동성이 가장 현저한 해역으로서 이 해역에서의 해황은 동해 남서해역(대한해협-포항)과 동해 중서부해역(포항-속초)에서의 현상으로 구분 이 가능하다.

동해 남서해역은 대한해협을 통하여 유입되는 대마난류수의 계절적 변동성과 이의 분지설 및 사행설, 저층에 출현하는 저층냉수, 그리고 울기-감포 연안역의 용승현상 등에 대하여 많은 연구가 집중된 해역이다. 이 해역에서의 연구결과는 Ro (1989)에서 충분히 요약되었다.

동해 중서부해역의 해황은 연안을 따라 남북방향으로 발달하는 수온전선에 의하여 특징지어지며, 수온전선의 연안쪽에 분포하는 냉수대는 북한 한류수가 남하한 것으로(Park, 1978), 북한한류는 동계보다 하계에 더욱 우세하게 남하하며(Lee and Chung, 1981), 남하하한은 축산-장기갑 해역으로 알려져 있다(Kim and Kim, 1982). 또한 북한한류는 100m 등수심선을 따라 남하한다고 보고된 바 있으나(An, 1974), 최근의 표층 및 심층류 관측결과(Lee and Byun, 1985, Lie et al., 1989)는 한국 동해안을 따라 남하하는 남향류는 표층에만 국한된

현상이 아니라 상당한 수심에서도 존재함을 보여 주었다.

수온전선의 외해역은 동한 난류수역으로 지칭되며 동한 난류의 북상한계는 40°N이남 해역으로 보고된 바 있다(Hong and Cho, 1983). 한편 울릉도 남쪽해역의 150m 이하 수심에서는 주변해역에 비하여 고온의 수괴가 존재하는데, Na(1988)는 이러한 수괴를 '난수괴'라 하였으며, 난수괴는 계절에 관계없이 그리고 동한난류의 북상유무에 관계없이 존재함을 지적하였다. 아울러 난수괴의 형성과정에 바람응력의 분포가 중요한 작용을 함을 보였으며(Na, 1988; Na and Han, 1988), 이를 회전한 유체 실험을 통하여 설명하였다(Na and Kim, 1990).

이러한 일련의 연구결과 동해 중서부해역은 수온전선을 경계로 북한 한류의 영향을 받는 연안 냉수역과 외해쪽의 동한 난류수역으로 구분되지만 난수괴를 고려할 경우 이 해역에서의 해황은 보다 세분화될 필요가 있다.

수직적인 수온변화의 관점에서 Suk(1987)은 동해를 대상해역으로하여 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 방법을 적용하여 수온의 수직구조 함수를 산출하였으며, 각각의 함수가 지니는 물리적 의미를 부여하였다. 한편 Kang and Kang(1987)은 조화분석을 통하여 수온의 연변동의 수평적 비균질성을 지적하였다. 이는 동해와 같이 변동성이 심한 해역에서는 각 해역에 고유한 수온의 수직구조함수가 존재할 수 있음을 시사한다.

해표면의 수온분포로부터 수온의 수직적인 변동성을 추측하기 위해서는 수온의 변동성이 특징적인 해역의 구분과 동시에 각 해역에 고유한 수온의 수직구조 함수를 산출하여야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 정점별 직교함수분석을 적용하여 동해 중서부해역의 해황을 보다 세분화하고 수온의 수직구조 함수의 공간적 변동성을 파악하고자 한다. 또한 확장된 경험적 직교함수(Extended EOF)를 이용하여 수직구조 함수의 시간적인 변화를 알아 보고자 한다.

자료 및 방법

수온의 시공간 변동성을 파악하기 위해 본 논문에서 사용한 자료는 수산진흥원이 동해 중서부해역에서 격월별로 관측한 자료 중에서 1975~1984 동안의 10년 자료를 이용하였다. 자료의 관측범위와 구체적인 관측점의 위치는 Fig. 1에 나타내었으며 실제적으로 분석에 이용된 자료는 102정선에서

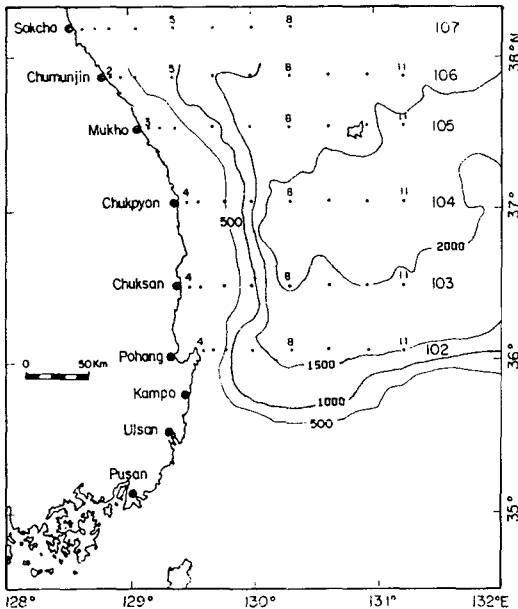


Fig. 1. Bottom topography and hydrographic stations of which data are used for determination of the vertical structure functions.

107정선까지의 43개 관측점을 대상으로 하였다. 분석은 각각의 정점에 대하여 경험적 직교함수(EOF) 방법과 확장된 직교함수(Extended EOF) 방법을 적용하였다.

경험적 직교함수는 기상학에서 주로 이용되어 왔으며, 최근에는 해류의 수직구조 및 수온 염분의 수직적인 변동성을 파악하기 위해 적용되고 있다(Kundu et al., 1975; Filyushkin, 1984; Suk, 1987). 이러한 접근에서는 변량이 수심의 영향을 받으며 수직적으로 분포한다. 그러므로 경험적 직교함수는 본 논문에서와 같이 각 수심간의 교차 공분산 행렬의 고유벡터로 정의된다.

자료처리 과정은 임의의 정점의 임의의 수심층($z=1,2,\dots,N$)에서 시계열($t=1,2,\dots,k$) 수온 관측값의 평균을 구한 후, 관측값과 평균값의 차이인 잔차분 값(T')을 구하였다. 잔차분값을 이용하여 주어진 정점의 교차 공분산 행렬을 구성하면

$$C(z_i, z_j) = \sum_{t=1}^k T'_t(z_i) T'_t(z_j) / k - 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

으로 표현된다.

본 논문에서는 6개의 수심층을 고려하였으므로 6×6 정방행렬이 된다. 공분산 행렬의 해를 구하는 과정은

$$\sum_{i=1}^N C(z_i, z_j) \Phi_n(z_i) = \lambda_n \Phi_n(z_j) \quad \dots\dots\dots (2)$$

와 같은 고유값(λ_n) 문제로 귀착되며, 이 때 구해지는 고유벡터 $\Phi_n(z_j)$ 를 '경험적 직교함수'라 한다. 하지만 관측자료의 제약으로 인해 경험적으로 산출되는 직교함수에는 오차가 포함되어 있으며 이론적 직교함수와는 차이가 있다(Preisendorfer, 1989). 계산된 고유값의 표준편차는

$$\delta \lambda_n \approx \lambda_n (2/k)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

으로 주어진다. 여기서 인접한 고유값의 차이($\lambda_n - \lambda_{n+1}$)가 편차($\delta \lambda_n$)보다 클 경우 안정된 직교함수라 할 수 있다(North et al., 1982). 본 논문에서 고려한 모든 관측점에서 제3모드 함수까지는 이 조건을 만족하였다.

한편 공간적 직교함수의 시간에 따른 변화를 보기 위해서는 (1)식에서의 공분산 행렬을 수정할 필요가 있다. 이러한 목적에 부합되는 변형된 공분산 행렬은

$$\Gamma(z_m, z_n) = C(z_{ik}, z_{jl}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$i, j = 1, \dots, N$
 $k, l = 0, \dots, n_l$
 $m = i + (N \times k)$

$$n = j + (N \times l)$$

으로 정의되며 n_l 은 2개월 간격으로 6회 주어진 시간지연의 회수를 나타낸다. 변형된 공분산 행렬은 시간지연이 없을 때의 공분산((1)식)과 시간지연을 주었을 때의 공분산이 블록형식으로 구성되어 전체 공분산 행렬을 이룬다. 본 논문에서는 수심층이 6개이고 시간지연을 2개월 간격으로 6회 적용하였으므로 42×42 공분산 행렬이 된다. 이러한 시간지연 효과가 가미된 공분산 행렬로부터 계산되는 고유벡터를 확장된 경험적 직교함수(Extended EOF)라 한다(Weare and Nasstrom, 1982; Artemyev, 1987). 확장된 직교함수는 시공간 상관성을 고려하는 함수로서 통상적인 직교함수보다 압축된 정보를 얻을 수 있어 다른 통계적 처리에 적용하기도 간편할 뿐만 아니라 직교함수의 시간적인 변화를 볼 수 있는 장점이 있다.

결 과

1. 수온의 수직구조의 공간적 변동성

Fig. 2는 106-4, 102-11, 104-11의 3개 관측점에서 격월별로 10년간 관측한 격월별 수온의 평균과 표준편차의 수직적 분포를 나타내었다. 106-4 관측점의 위치는 북한한류계수의 영향을 받는 곳으로 간주할 수 있으며(Fig. 1) 수온의 변동폭은 수심이 증가함에 따라 점차로 감소하다가 200m 이하 수심에서는 수온의 변동성을 거의 찾아보기가 어렵다. 102-11 관측점은 동한 난류수의 영향을 지배적으로 받는 곳으로 볼 수 있다. 이 지점에서의 수온변화의 특징적인 양상은 200m 이하 수심에서도 수온의 변화량이 매우 크게 일어남을 알 수 있다. 400m 이하 수심에서 부터는 큰 변화를 보이지 않는다. 한편 104-11은 '난수괴'가 출현하는 해역으로 간주될 수 있다. 표준편차의 수직적인 분포에서 알 수 있는 것처럼 106-4는 수온변화의 수직구조에 있어서 102-11과 104-11과는 뚜렷이 구별되며 102-11과 104-11은 매우 유사하지만 104-11에서는 전층에서 변화가 크다는 점이 특징적이다. 이러한 사실은 수온의 수직적인 변화양상이 공간적으로 다르게 일어남을 암시한다고 할 수 있다.

Table 1은 동한난류의 영향을 지배적으로 받는다고 가정된 102-11에서의 EOF 분석을 통하여 산출한 각각의 모드가 설명할 수 있는 분산을 나타낸다. 제1모드가 60.48%, 제2모드가 28.78%로서 제2모드까지 고려할 경우 전체 분산의 89.25%를 설

명할 수 있다. 아울러 제3모드가 설명할 수 있는 분산은 8.8%이며, 제3모드까지 고려할 경우 전체 분산의 98.05%를 설명할 수 있으며 이는 원래자료가 지니는 거의 대부분의 분산에 해당한다. 아울러 수온의 수직구조를 나타내는 고유벡터와 이에 해당하는 시간계수를 Fig. 3에 나타내었다. 고유벡터가 가지는 물리적 의미는 Suk(1987)이 제시한 바 있으며 이에 의하면 제1모드는 표층에서 극값을 갖고 수심이 깊어짐에 따라 진폭이 점점 감소하는 경향을 보이고 있으며 전 수심에 걸쳐 동일한 부호를 가진다. 즉, 해면에서의 변동성이 가장 크며 수심이 깊어짐에 따라 변동성이 점차 감소한다. 이를 물리적 현상으로 설명하면 태양복사열 또는 난류수의 이류 등에 의한 효과가 해면으로부터 수심이 깊어짐에 따라 감소하는 효과라고 할 수 있으며 수온의 상승 또는 하강이 전수심층에서 동시에 일어남을 의미한다. 또한 제2모드는 수심 약 40m 부근을 경계로 하여 상하층이 서로 반대부호를 가지며 200m 수심에서 극값을 보인다. 성질이 다른 수괴가 침입할 경우 이러한 변동성의 형태가 나타날 수 있으며 40m를 경계로 하여 수온의 상승과 하강

이 반대로 일어남을 의미한다. 시간계수는 각 모드에 실제 수온의 잔차분값을 곱하여 산출되는 것으로서 수직구조 함수의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 제1모드의 시간계수는 계절적인 변화가 뚜렷함을 보인다. 제1모드의 부호가 음수임을 고려할 때 2월에 최저, 10월에 최대임을 알 수 있다. 따라서 제1모드는 계절적인 변화의 영향을 받는 변수라고 할 수 있다. 제2모드에서는 뚜렷한 주기성을 찾아보기가 어렵지만 약 2년 주기로 극값을 가지는 경향을 보인다.

수온의 수직구조의 공간적인 변동성을 파악하기 위하여 북한 한류계수의 영향이 지배적이라고 생각되는 관측점(106-4)에서도 경험적 직교함수 분석을 하였다(Table 2, Fig. 4). 106-4에서 제1모드의 기여도는 82.49%이고 제2모드는 15.83%이다. 제2모드까지로 설명이 가능한 분산은 총 분산의 98.32%이다. 102-11 관측점과는 달리 제2모드까지만 고려하더라도 대부분의 수온변동성을 설명할 수 있다. 102-11에서의 제3모드의 기여도는 8.80%인데 비하여 북한 한류수역에서는 1.25%로서 상대적으로 낮다. 이는 102-11에서의 수직적인 수온변

Table 1. Eigen value, sampling error, percentages, and cumulative percentages of total variance explained by the first four modes of EOFs at 102-11.

Mode	Contribution(%)	Cumulative sum(%)	Eigen value	Difference	Error
1	60.48	60.48	31.72	16.63	5.84
2	28.78	89.25	15.10	10.48	2.78
3	8.80	98.05	4.61	3.74	.85
4	1.67	99.72	.88	.87	.16

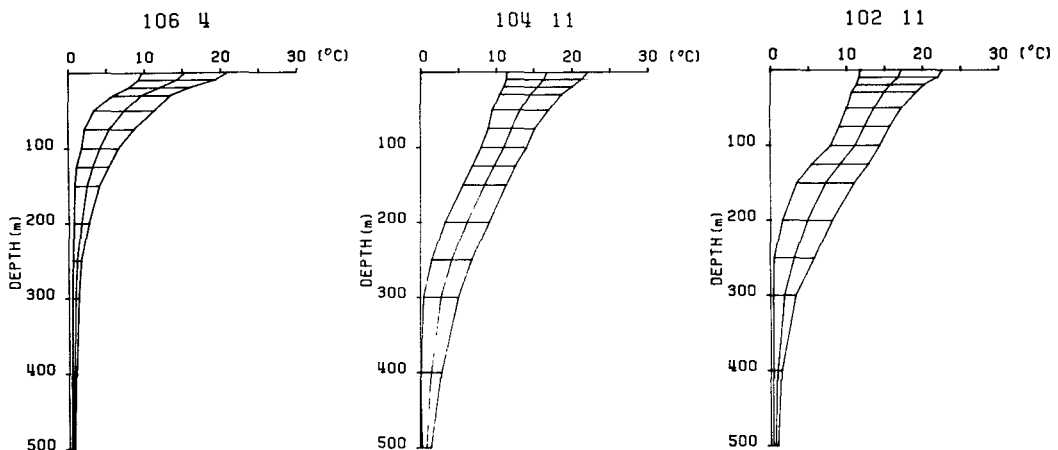


Fig. 2. Vertical profiles of long-term(10 years) mean temperature with the standard deviation at 106-4(the left), 104-11(the middle) and 102-11(the right).

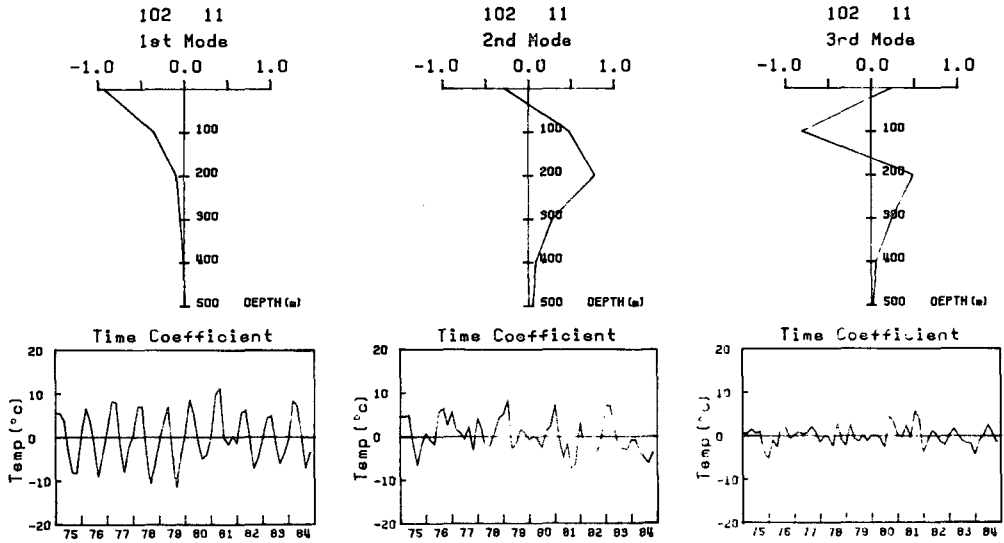


Fig. 3. Three 'most important' empirical orthogonal functions at 102-11, together with its corresponding time coefficients. Functions are based on departures from long-term mean. Tics in the time series identify February of the respective year starting with February 1975 and ending with October 1984.

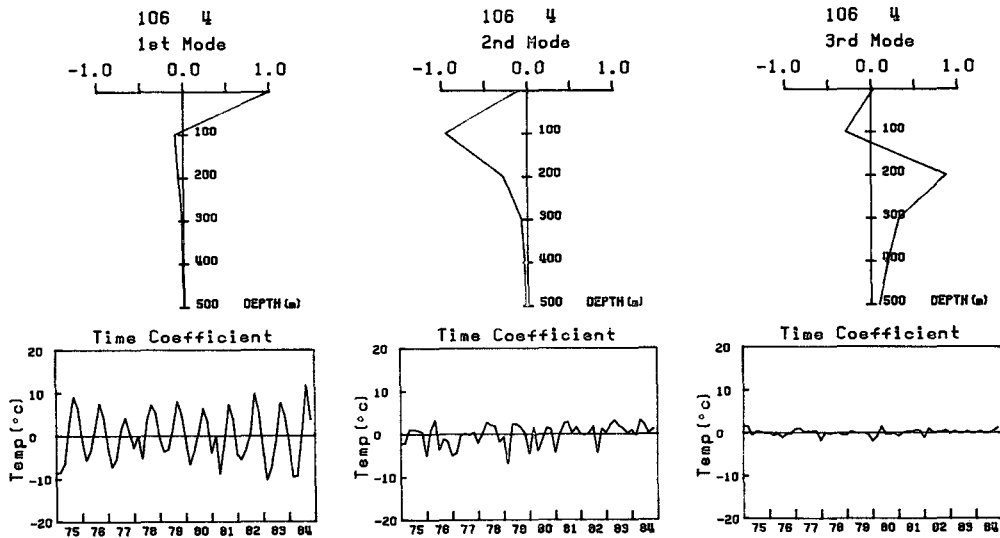


Fig. 4. Three 'most important' empirical orthogonal functions at 106-4, together with its corresponding time coefficients.

Table 2. Eigen value, sampling error, percentages and cumulative percentages of total variance explained by the first four modes of EOFs at 106-4.

Mode	Contribution(%)	Cumulative sum(%)	Eigen value	Difference	Error
1	82.49	82.49	32.06	25.90	6.17
2	15.83	98.32	6.15	5.67	1.18
3	1.25	99.57	.48	.33	.09
4	.39	99.95	.15	.14	.03

화의 특성을 설명하는데 있어서 제3모드가 지니는 중요성을 시사한다고 할 수 있다.

한편 수직구조 함수의 특성은 매우 특징적이다. 제1모드는 해표면에서 극값을 가지며 수심 약 100m 층을 경계로 하여 상하층이 서로 반대로 작용한다. 수직구조 함수의 이러한 형태는 102-11에서의 제2모드와 유사하다. 하지만 극값이 표면에서 나타나는 양상은 제1모드와 같다. 이를 물리적 현상과 결부지어 생각하면 해표면으로 부터의 효과(복사열, 난류수의 이류)는 수심 약 100m 부근까지 작용하며 그 이하 수심에서의 수온 변화는 상층과는 반대로 작용한다고 할 수 있다. 제1모드의 시간계수의 특성에는 계절적 변동성이 뚜렷함을 알 수 있다. 제2모드는 전체 분산의 15.83% 밖에는 설명하지 않지만 수직구조 함수의 형태는 매우 특이하다. 전 수심에 걸쳐 동일한 방향으로 작용한다는 점에서는 동한 난류수역의 제1모드와 유사하지만 106-4에서는 수심 100m 층에서 극값을 가진다. 즉, 수온의 변동성을 야기시키는 원인이 해표면이 아니고 수심 100m 층에 있다고 할 수 있다. 북한한류수는 100m 등수심선을 따라 남하하며(An, 1974) 표층뿐만 아니라 저층에서도 동일한 남향류가 존재한다는 연구결과(Lie and Byun, 1985; Lie et al., 1989)를 고려할 때 이는 북한한류수의 특성을 매우 잘 나타내주는 수직구조 함수라고 볼 수 있다. 제3모드 이하는 기여도가 매우 낮다.

지금까지는 동해 중서부해역에서 동한난류수와

북한한류수의 영향을 지배적으로 받는다고 설정한 관측점에서의 수온의 수직구조를 살펴보았으며 각 해역에서의 수온의 수직구조가 특징적인 양상을 띠음을 알 수 있었다. 울릉도 남쪽해상에 존재하는 난수괴해역에서의 수온의 수직구조를 알아보기 위하여 104-11 관측점을 선택하여 경험적 직교함수 분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. 104-11 관측점에서 제1모드의 기여도는 55.89%이고 제2모드의 기여도는 28.85%이다. 제2모드까지로 설명이 가능한 분산은 84.74%이다. 이로부터 106-4의 98.32%, 102-11의 89.25%과 비교했을 경우 제2모드까지로 설명할 수 있는 분산이 가장 작음을 알 수 있다. 이는 104-11에서는 수온의 수직적 변동성이 보다 더 복잡하게 전개됨을 시사한다. 제3모드까지를 고려하면 95.08~97.27%를 설명할 수 있으며 이는 102-11과 마찬가지로 104-11에서도 제3모드의 비중이 상대적으로 크게 차지함을 나타내준다.

한편 수직구조함수의 특성은 앞의 두 경우와는 또 다르게 나타난다. 제1모드는 북한 한류수역의 제1모드와 유사한 형태이기는 하지만 104-11에서는 200m 수심을 경계로하여 상하층이 반대로 작용한다는 점이 다르다. 부호가 바뀌는 교차점이 106-4보다 깊은 곳에서 생기는 원인은 동한난류의 영향을 더욱 많이 받는 때문으로 판단된다. 시간계수가 지니는 특성은 앞의 두 경우와 마찬가지로 뚜렷한 계절적 변동성을 나타낸다. 따라서 어느 경우어나

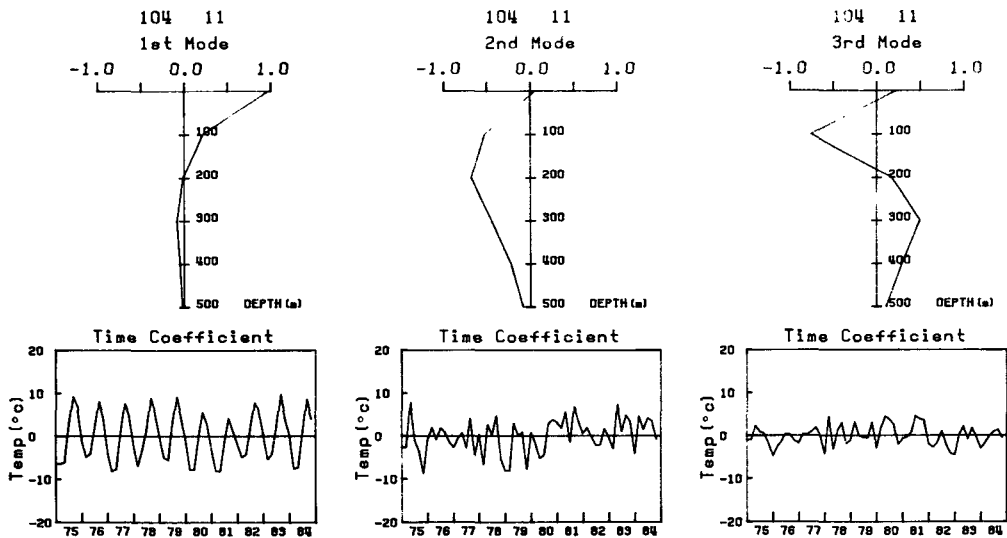


Fig. 5. Three 'most important' empirical orthogonal functions at 104-11, together with its corresponding time coefficients.

제1모드는 약 1년의 변동주기를 가지는 함수이기는 하지만 수직적 구조는 3가지 경우에 모두 다르게 나타났다. 104-11에서의 제2모드는 수심 200m 부근에서 극값을 가지며 수심 10m 부근을 경계로 하여 반대로 작용한다. 한편 104-11의 제2모드는 106-4의 제2모드와 유사하다. 이는 104-11의 모드함수는 106-4와 102-11의 모드함수의 상호작용에 의해 결정될 수 있음을 암시한다고 할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 선택적인 동한난류수역, 북한 한류수역, 난수괴역에서의 경험적 직교함수 분석을 통하여 고찰한 결과 수온의 수직구조는 공간적인 변동성이 뚜렷하며 수직구조 함수의 형태는 각 해역에서의 특징적인 수온변동 양상을 제시할 수 있음을 보였다. 따라서 대상해역의 43개 정점에서 각각 EOF분석을 하였으며, 그 결과는 모두 위의 3가지 범주내에 포함되었다(Fig. 6). 제1모드는 2월에 최저, 10월에 최대의 계절적인 변동주기를 가지며 수직구조는 해면에서 변동성이 가장 크다. 동한 난류수역에서는 수온의 상승 또는 하강이 전 층에서 동시에 일어나고 난수괴역과 북한 한류수역에서는 각각 200m, 100m 수심층을 경계로 하여 상하층의 수온변화가 반대임을 나타낸다. 해면수온의 연변동을 야기시키는 원인은 태양복사열의 연변동과 계절풍과 해류 등에 의한 열의 이류를 들 수 있다. 한국 주변해역에서는 해류의 이류에 의한 열전달도 중요한 요인으로 작용한다(Kang and Jin, 1984)는 점과 해류와 계절풍에 의한 열이송으로 인하여 한국 주변 해양 저열량의 시간적변화의 연진폭은 태양복사에너지의 연진폭 보다 크다(Kang, 1985)는 것을 고려할 때 동한 난류수역의 제1모드를 '동한난류수 모드'라고 할 수 있을 것이다. 제2모드의 주기는 뚜렷하지는 않다. 북한 한류수역에서의 제2모드는 100m 수심층에서 극값을 가지며 표층과 저층으로 가면서 감소하는 경향을 보이며 전 층에서 동일한 부호를 가진다. 북한 한류수가 100m 등 수심선을 따라 남하하는 점을 고려하면 '북한한류수 모드'라고 할 수 있을 것이다. 제2모드까지만 고려하여 연구대상 해역에서의

43개 관측점에서 각각 경험적 직교함수 분석을 한 결과, 모든 결과는 위의 3가지 형태의 서로 다른 수직구조 함수의 범주 내에서 변화하였으며 이를 근거로 동해 중서부해역을 구분하였다(Fig. 7). Fig. 7은 동한 난류수의 북상한계가 북위 40°N 이 남이라는 Hong and Cho(1983)과 북한 한류수의 남하하한을 장기갑해역까지라고 본 Kim and Kim

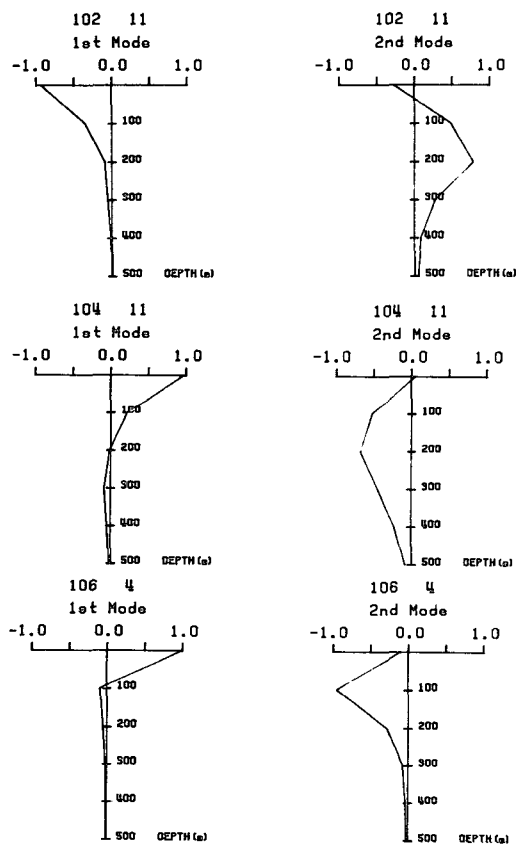


Fig. 6. Typical vertical structure functions at three different regions(EKWC including 102-11, NKCC including 106-4, and Warm Core region including 104-11, respectively) considering the first two EOFs.

Table 3. Eigen value, sampling error, percentages and cumulative percentages of total variance explained by the first four modes of EOFs at 104-11.

Mode	Contribution(%)	Cumulative sum(%)	Eigen value	Difference	Error
1	55.89	55.89	30.19	14.61	5.61
2	28.85	84.74	15.58	9.99	2.89
3	10.34	95.08	5.59	3.27	1.04
4	4.29	99.38	2.32	2.23	.43

(1983)의 결과를 동시에 나타내고 있으며 울릉도 남쪽해상의 난수괴가 출현하는 해역의 범위도 함께 제시해 주고 있다. 북한한류수의 특성이 분포하는 해역은 연안에 국한되어 있으며 북쪽에서 남쪽으로 남하하면서 영향권이 감소하는 경향을 보인다. 103정선 부근에 이르러서는 북한 한류수역의 범위가 외해로 확장하는 경향을 보인다. 이는 남하하는 북한 한류수가 외해로 빠져 나가는 경로일 가능성이 크다. 외해역에서는 동한 난류수역과 난수괴역으로 구분된다. 난수괴가 출현하는 범위는 104정선을 축으로 하여 103-105정선에서 나타나며 지형(Fig. 1)과 매우 긴밀한 상관성이 있는 것으로 판단된다. 동한 난류수의 영향이 압도적인 해역은 난수괴 해역의 남쪽과 북쪽에서 찾아볼 수 있다.

각 해역에서의 수온의 수직구조의 변동성을 파악하기 위하여 Fig. 7의 각 해역에서의 모든 정점에서 제2모드까지로 설명이 가능한 분산을 Table 4에 나타내었다. 북한 한류수역에서는 2개의 수직구조 함수로 총 분산의 85.20~98.20%를 설명할 수 있으며 동한 난류수역에서는 85.20~92.90%, 난수괴해역에서는 83.50~91.70%를 설명할 수 있다. 이는 수온의 수직적인 변동성이 북한 한류수역, 동한 난류수역, 난수괴역으로 가면서 더욱 복잡하게 전개됨을 시사한다. 난수괴해역에서는 제3모드까지를 고려하면 95.1~95.8%의 분산을 설명할 수 있으며

이는 북한 한류수역에서 제2모드까지 고려했을 경우의 분산량과 비슷한 수준이다. 따라서 같은 정도의 분산을 설명하기 위해서 난수괴해역에서는 3개의 모드를 고려해야 함을 의미하며 제3모드가 지니는 중요성을 시사한다.

지금까지 경험적 직교함수 분석을 통하여 수온의 수직구조의 공간적인 변동성을 고찰하였으며 아울러 수직구조 함수의 형태가 특징적인 해역을 구분하였으며 각 해역에서의 특징적인 제2모드까지의 수직구조 함수를 제시하였다. 다음 절에서는 이러한 수직구조 함수의 시간에 따른 변화를 알아보기 위하여 확장된 경험적 직교함수(Extended EOF)를 적용한다.

2. 수온의 수직구조의 시간적 변동성

수직적인 수온분포의 시간에 따른 변화를 파악하기 위해 북한 한류수역(106-4), 동한 난류수역(102-11), 난수괴역(104-9)에서의 10년간 수온변화를 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 각각 나타내었다. 102-11에서의 수온의 수직적 분포를 보면 동한 난류수의 영향수심은 약 300m까지이며 수온의 수직적인 시간지연은 매우 미약하게 나타난다. 즉, 전층에서 수온의 상승 또는 하강이 동시에 일어나는 경향이 강하다. 이러한 수온변동 양상은 102-11의 제1모드(Fig. 3)에서 잘 나타나 있다. 북한 한류수역(106-4)에서는 수온의 수직적인 전달과정에서 시간지연이 매우 크게 작용함을 알 수 있다. 이로부터 앞 절의 106-4(Fig. 4)에서 제1모드가 수심 약 100m를 경계로 수온의 상승(하강)이 반대로 일어난 원인은 수온의 수직적인 전달과정에서 시간지연이 생겼기 때문으로 볼 수 있다. 난수괴역(104-9)에서도 106-4보다는 약하지만 시간지연이 있다.

Fig. 11은 102-11에서의 제1모드의 시간에 따른 변화이다. 제1모드가 설명할 수 있는 분산은 32.3%이다. 확장된 공분산 행렬에서는 원래변수에 시간지연이 가미된 변수를 첨가하기 때문에 변수의 갯수가 많아지게 된다. 즉, 42×42공분산 행렬이

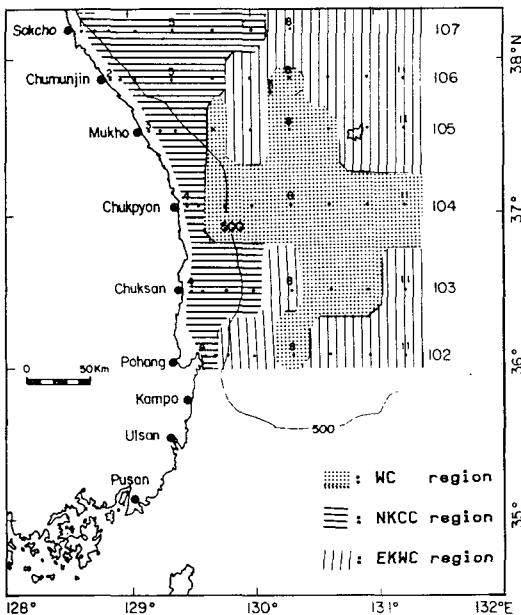


Fig. 7. Characteristic thermal regimes, resulting from the types of the vertical structure functions.

Table 4. Percentages of variance explained by the first two EOFs, considering all station of each thermal regime.

Thermal Regime	Explained Variance
NKCC Region	85.20~98.20%
EKWC Region	85.20~92.90%
Warm-Core Region	83.50~91.70% (95.10~95.80%)

The parenthesis including the third mode.

되므로 제1모드가 설명하는 분산이 감소하는 것은 당연하다. 시간지연이 있을 때의 제1모드의 형태는 경험적 직교함수의 제1모드와 진폭의 차이는 있지만 거의 같은 수직적 분포를 보인다. 2개월의 시간지연을 주었을 때 수직구조 함수의 형태는 많이 변화하였다. 해면에서의 변동성은 감소한 반면에 100m와 200m에서의 변동성이 증가하였다. 아울러 해면으로 부터의 효과가 작용하는 영향수심도 증가하면서 해면에서의 변동성이 수직적으로 전달된 양상을 잘 나타내고 있다. 시간지연이 4개월 일때

수직구조 함수는 상하층이 반대로 작용하는 구조로 바뀌었다. 시간지연이 6개월과 8개월 일때에는 처음의 모드형태를 회복하지만 위상이 반대이다. 시간지연이 10개월 일때 2층구조를 하며 12개월의 시간지연을 줄때에는 처음과 동일한 구조를 가진다. Fig. 12는 104-9의 제1모드의 변화를 나타내었다. 제1모드가 설명할 수 있는 분산은 35.0%이며 직교함수 분석을 통하여 산출한 모드와 같은 형태이다. 시간지연이 2개월 일때에는 해면의 변동성이 감소하면서 100m의 변동성이 증가하였고 4개월 일

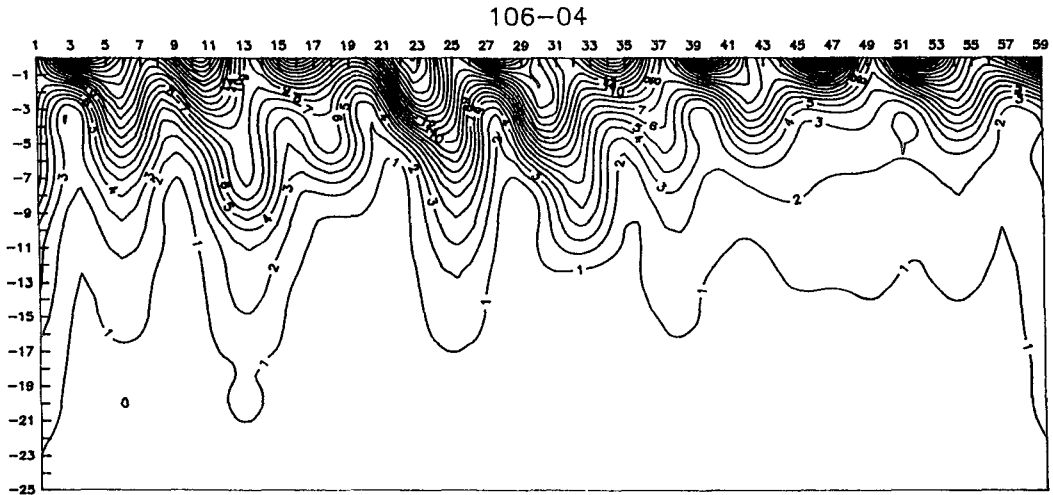


Fig. 8. Year to year variation of temperatures of FRDA St. 106-4. Vertical tic indicates depth, representing 25m tic interval. Horizontal tic identify time interval of 2 month starting with February 1975 and ending with October 1984.

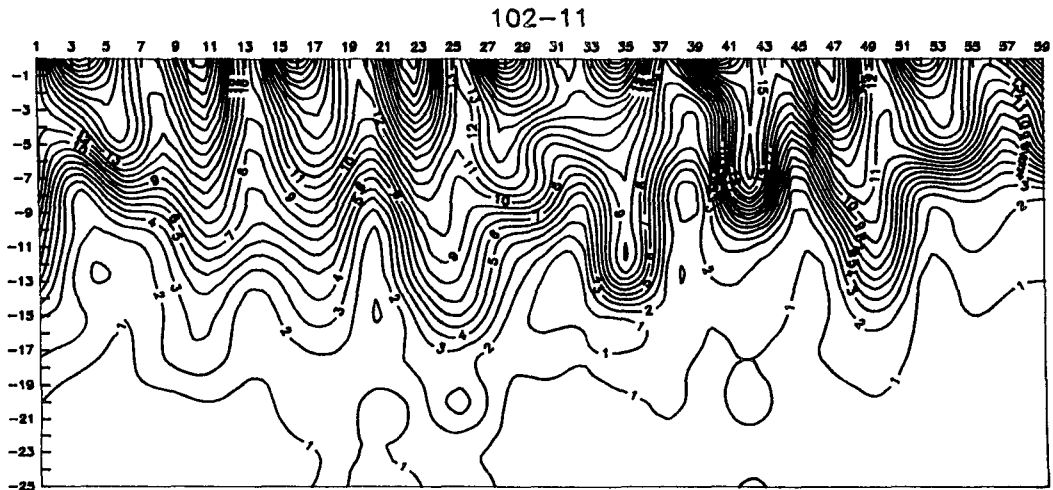


Fig. 9. Year to variation of temperatures of FRDA St. 102-11.

때 모드함수는 해표면이 반대 위상을 가지면서 3층구조를 하게 된다. 6개월 후에는 다시 난수괴역에서의 특징적인 모드형태를 가지게 된다. 106-4에서의 모드함수를 Fig. 13에 나타내었다. 제1모드가 설명할 수 있는 분산은 전체의 44.8%로서 앞 절의 경우처럼 가장 많은 분산이 설명된다. 시간지연이

2개월 일때 해면으로 부터의 효과가 전층에 동일한 방향으로 작용하는 함수로 바뀌었음을 알 수 있다. 4개월과 6개월의 시간지연이 있을 때는 처음의 모드형태를 회복하지만 위상은 반대로 나타난다. 8개월의 시간지연이 있을 경우 다시 모드형태가 바뀌지만 10개월과 12개월의 시간지연이 있을 때는 다

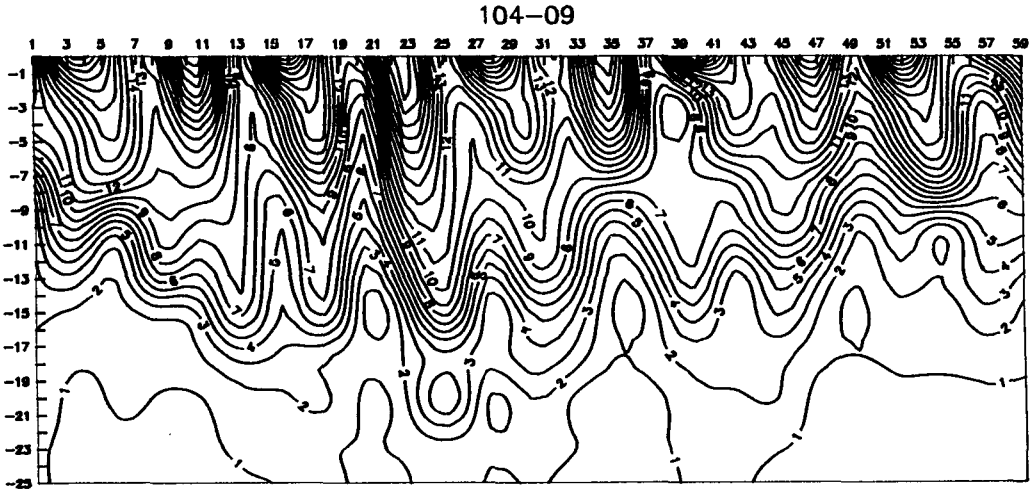


Fig. 10. Year to year variation of temperatures of FRDA St. 104-9.

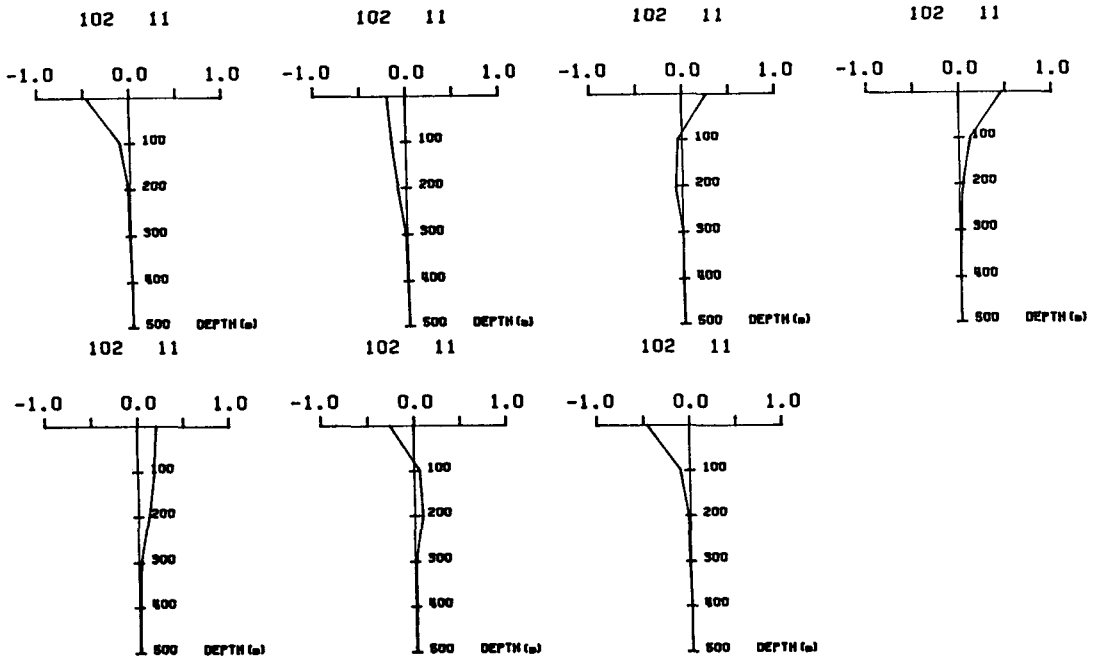


Fig. 11. Variation of most important extended EOF of FRDA St. 102-11, explaining 32.3% of total variance. Time increases by two month in successive(left to right) profiles.

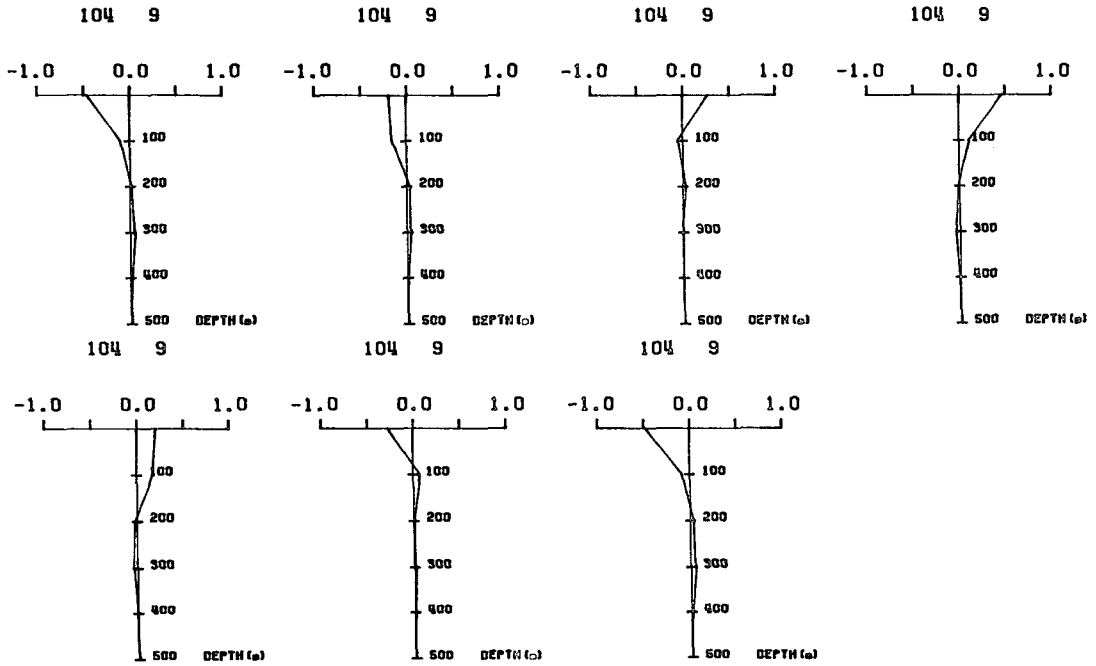


Fig. 12. Variation of most important extended EOF of FRDA St. 104-9, explaining 35.0% of total variance.

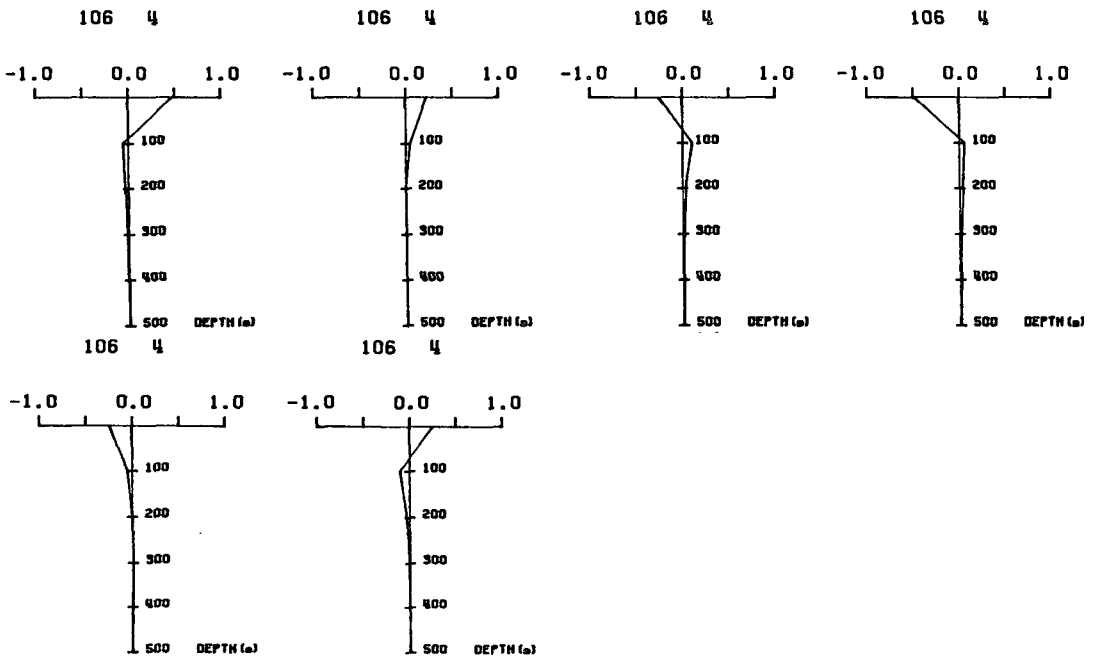


Fig. 13. Variation of most important extended EOF of FRDA St. 106-4, explaining 44.8% of total variance.

시 처음의 모드형태로 돌아간다. 이상에서 알 수 있듯이 확장된 경험적 직교함수의 시간에 따른 변화를 통하여 각 해역에서 가장 많은 변동량을 설명하는 수직구조 함수의 지속성은 4개월 미만임을 알 수 있다. 또한 106-4의 수직구조 함수의 시간에 따른 변화는 102-11과 104-9와는 다르게 전개됨을 알 수 있다. 이는 해안으로부터 수심해리 이내인 연안역의 수온 연변동은 외해의 수온 연변동과는 다르다(Kang and Kang, 1987)는 사실과도 일치한다.

고 찰

인공위성에서 관측한 해양의 물리적 요인들을 이용하여 해표면에서의 단주기 변동성을 파악함과 동시에 이들 제반현상의 수직적인 구조를 이해하고 아울러 장기간 누적되어온 관측자료를 이용하여 예보체계를 개발하려는 노력은 현재 활발히 연구되고 있는 분야의 하나이다.

원격탐사에 의한 해표면 수온 관측은 넓은 범위에 대한 동시성 있는 관측이 가능한 반면에 수온의 수직구조에 대하여는 아무런 정보를 제공하지 않는다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 객관성 있는 방법을 도입하여 장기간의 관측자료에 대한 면밀한 분석을 통하여 수온의 수직구조의 특징에 따른 해역의 구분에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 경험적 직교함수(EOF)와 확장된 경험적 직교함수(EEOF)를 이용하여 한국 동해 중서부해역에서 수온의 수직적 변동성이 특징적인 해역의 구분과 각 해역의 범위를 제시하였다(Fig. 7). 동해 중서부해역은 연안을 따라 남북 방향으로 분포하는 북한 한류수역, 외해쪽의 울릉도 남쪽 해상에 존재하는 난수괴역, 난수괴역의 남북에 각각 위치하는 동한 난류수역으로 구분이 가능하였다. 북한 한류수역은 남쪽으로 내려오면서 범위가 줄어들다가 103정선 부근에서 외해로 확장하는 경향을 보인다. 이는 북한 한류수가 외해로 확장하는 경로일 것으로 판단되나 이에 대해서는 보다 충분한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다. 104정선은 연안쪽의 2개 정점을 제외한 모든 정점이 난수괴역으로 구분되었다. 즉, 난수괴는 104정선을 축으로 하여 103-105정선에 걸쳐 분포하며 지형(Fig. 1)과도 매우 밀접한 관련이 있음을 나타낸다.

각 해역에서 수온의 수직적인 변동성은 모드함수가 지나는 고유값으로 설명이 가능하다(Table 4). 제2모드까지 고려할 경우 북한 한류수역에서는

전체 변동성의 85.20~98.20%가 포함된다. 동한 난류수역에서는 85.20~92.90%, 난수괴역에서는 83.5~91.70%를 설명할 수 있다. 수온의 수직적인 변화양상은 북한 한류수역, 동한 난류수역, 난수괴역 순으로 점차 복잡하게 전개됨을 알 수 있다. 난수괴역에서 제3모드까지 고려할 경우 총 분산의 95.10~95.80%를 설명할 수 있으며 북한 한류수역에서 제2모드까지 고려했을 경우의 변동성과 유사한 수준이다. 이는 난수괴해역에서 보다 세밀한 수온변동 특성을 설명하는데 있어 제3모드가 지나는 중요성을 시사한다고 볼 수 있다. 관측자료의 제약으로 인해 야기되는 고유값에 내재된 오차는 North et al.(1982)가 제시한 근사법을 통하여 검정한 결과 산출된 모드함수는 근사식을 만족하였다(Table 1, Table 2, Table 3).

수온의 수직구조는 공간적인 변동성이 뚜렷하게 나타났으며 각 해역에서 물리적 의미를 부여할 수 있는 제2모드까지의 수직구조 함수를 제시하였다(Fig. 6). 제1모드는 약 1년의 변화주기를 가지는 함수이다. 동한 난류수역에서는 해면에서 변동성이 가장 크고 수심이 증가함에 따라 진폭은 감소하며 전 수심층에서 수온의 상승(하강)이 동시에 일어난다. 난수괴역과 북한 한류수역에서는 표층에서 극값을 갖고 200m(난수괴역)와 100m(북한 한류수역)을 경계로 수온의 상승과 하강이 반대로 일어난다. 북한 한류수역에서의 제2모드 함수는 매우 특징적인 구조를 가진다. 수심 100m 부근에서 극값을 가지며 전층이 동일한 부호를 가진다. 난수괴역과 북한 한류수역에서는 수온의 변화가 반대로 전개되는 교차점을 가진다. 제1모드의 교차점은 동한 난류수의 영향수심과 제2모드의 교차점은 북한 한류수의 남하특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 따라서 동한 난류수역의 제1모드를 '동한 난류수 모드', 북한 한류수역의 제2모드를 '북한 한류수 모드'라고 할 수 있을 것이다.

수직구조 함수의 시간에 따른 변화(Fig. 11~13)는 수온 변동성의 수직적인 전달과정을 잘 나타내준다. 동해에서 제1모드의 지속성은 4개월 미만으로 판단되며 북한 한류수역에서 수직구조의 연변화 과정은 동한 난류수역과 난수괴역과는 다르게 변화한다. 확장된 직교함수 분석은 수온의 시간적인 변동양상을 알려줄 수 있을 뿐만 아니라 구조함수의 지속성을 나타내준다. 수직구조 함수의 지속성을 보다 세밀히 연구하기 위해서는 관측간격이 보다 세밀한 자료가 요구된다고 할 것이다.

본 논문에서 적용한 경험적 직교함수와 확장된 직교함수 이외에 복소평면에서의 직교함수(Comp-

lex EOF)와 정준상관분석 및 회귀분석 등을 결합하면 수온, 염분 등의 스칼라량 뿐만 아니라 바람, 해류 등의 벡터량에 대한 파악 및 예측모델 개발이 가능하며 이는 한국 주변해역에서 관측된 해양자료의 분석과 동역학적 모델개발에 새로운 시각을 제공하리라 믿는다.

요 약

본 연구는 경험적 직교함수 방법을 적용하여 동해 중서부 해역에서 수직적인 수온 분포의 공간적 특성을 해역별로 구분한 후 특징적인 수온의 수직구조 함수를 제시하였다. 수산진흥원 관측범위 중에서 102~107 정선을 포함하는 동해 중서부 해역은 연안을 따라 남북방향으로 발달하는 북한한류수역, 외해쪽의 동한난류수역과 104정선을 축으로 동서방향으로 발달하는 난수괴역으로 구분되며 동한난류수역은 난수괴역에 의해 남북으로 양분된다. 제2모드함수까지 이용하여 설명되는 수온의 변동성은 북한한류수역에서는 총 분산의 85.20~98.20%, 동한난류수역에서는 85.20~92.90%, 난수괴역에서는 83.50~91.70%이다. 가장 많은 분산을 설명하는 수직구조함수의 제1모드는 약 1년의 변동주기를 가지며 해표면에서 극값을 가지는 함수이다. 동한난류수역에서는 수온의 변동이 전층에서 동시에 일어나며 북한한류수역과 난수괴역에서는 약 100m 수심과 200m 수심을 경계로 하여 수온의 변동이 반대로 일어난다. 제2모드는 북한한류수역에서는 100m 층에서 극값을 가지며 전 층에서 수온의 변동이 동시에 일어난다. 난수괴역과 동한난류수역에서는 수온의 변화가 반대로 전개되는 교차점을 가진다. 확장된 경험적 직교함수를 적용하여 수직구조함수의 시간에 따른 변화를 고찰한 결과 동해에서 제1모드의 지속성은 4개월 미만이며 북한한류수역에서의 수직구조함수의 연변화 과정은 동한난류수역과 난수괴역과는 다르게 나타났다.

참 고 문 헌

- An, H. S. 1974. On the cold water mass around the Southeast Coast of Korean Peninsula, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 9(1~2), 10~18.
- An, H. S. and J. Y. Chung. 1982. The fluctuation of the thermal front in the Southeastern Area off Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 17(2), 33~40.
- Artemyev, A. V. 1987. Spatial and Temporal Analysis of Oceanic Fields Using a Modification of the Method of Empirical Orthogonal Functions, *Oceanology*, 27(2), 147~152.
- Filyushkin, Y. B. 1984. Representation of temperature and salinity field by statistically orthogonal functions, as exemplified by POLYMODE data, *Oceanol.* 24(5), 570~574.
- Hong, C. H. and K. D. Cho. 1983. The northern boundary of the Tsushima Current and its fluctuations, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18(1), 1~9.
- Kang, Y. Q. and M. S. Jin. 1984. Seasonal variation of surface temperatures in the neighbouring seas of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19(1), 31~35.
- Kang, Y. Q. 1985. Seasonal variation of heat content in the neighbouring seas of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20(3), 1~5.
- Kang, Y. Q. and O. G. Kang. 1987. Annual variation of water temperatures in the upper 200m off Southeast Coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 22(2), 71~79.
- Kim, C. H. and K. Kim. 1983. Characteristics and origin of the cold water mass along the East Coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18(1), 73~83.
- Kundu, P. K., J. S. Allen and R. L. Smith. 1975. Modal decomposition of the velocity field near the Oregon Coast, *J. Phys. Oceanogr.* 5, 683~704.
- Lee, J. C. and W. Chung. 1981. On the seasonal variations of surface current in the Eastern Sea of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 16(1), 1~11.
- Lie, H. J. and S. K. Byun. 1985. Summertime southward current along the East Coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20(2), 22~27.
- Lie, H. J., M. S. Suk and C. H. Kim. 1989. Observation of southeastward deep current off the East Coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 24(2), 63~68.
- Na, J. Y. 1988. Wind stress distribution and its application to the upper-layer structure in the East Sea of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 23(3), 97~109.
- Na, J. Y. and S. K. Han. 1988. Spatio-temporal distributions of the wind stress and the thermocline in the East Sea of Korea, *Bull. Korean*

- Fish. Soc. 21(6), 307~316.
- Na, J. Y. and B. H. Kim. 1990. A laboratory study of formation of 'The Warm Core' in the East Sea of Korea, Bull. Korean Fish. Soc. 22(6), 415~423.
- North, G. R., T. L. Bell, R. F. Cahalan and F. J. Moeng. 1982. Sampling errors in the estimation of EOFs, Mon. Wea. Rev. 110, 699~706.
- Park, C. K. 1978. Chemical oceanographic aspect of the cold water mass in offshore of the East Coast of Korea, Bull. Korean Fish. Soc. 11(2), 49~54.
- Preisendorfer, R. W. 1988. Principal component analysis in meteorology and oceanography, Elsevier, 89~156.
- Ro, Y. J. 1989. Interannual variability of sea water temperatures in the southern waters of the Korean East Sea, J. Oceanol. Soc. Korea, 24(1), 1~14.
- Suk, M. S. 1987. On the dynamical processes of the ocean circulation in the South East Sea of Korea, KORDI Rep., BSPE00083-147-1, 67pp.
- Weare, B. C. and J. S. Nasstrom. 1982. Examples of extended empirical orthogonal function analyses, Mon. Wea. Rev. 110, 481~485.

1991년 7월 13일 접수

1991년 7월 20일 수리