

한반도 근해의 상대적 위치에너지 편차 변화를 이용한 성층화의 특성과 계절별 변화에 대한 연구

Seasonal Variations and Characteristics of the Stratification Depth and Strength in the Seas Near the Korea Peninsular using the Relative Potential Energy Anomaly

조창봉* 김영규* 장경일**
Chang-Bong Cho Young-Gyu Kim Kyung-Il Chang

Abstract

In this paper, we have proposed a method for quantization of the stratification strength in the sea water and analysing the distributions of the maximum stratification depths calculated by the method at the seas near the Korean peninsular. For calculating the stratification strength, modified and applied the potential energy anomaly formular which was suggested by Simpson in 1977. The data had been collected by NFRDI from 1971 to 2008 were used to determine the maximum vertical density gradient depth and the relative potential energy anomaly at that depth. In the East Sea, the stratification depth has become deepened about 20m in February and April since 1971. In Yellow-South Sea, the maximum density gradient depth has been deepened about 10m only in December during the same period and the difference of the stratification depth between summer and winter has been enlarged. These trends of variation of stratification strength and depth near the Korean peninsular should be investigated more carefully and continuously. And the results of these studies could be adopted for the more efficient operation of underwater weapon and detection systems.

Keywords : Stratification(성층화), Relative Potential Energy Anomaly(상대적 위치에너지 편차), Maximum Vertical Density Gradient Depth(최대 밀도구배 수심)

1. 서론

해군 작전에 참여하는 수상 및 수중 세력에 있어서

소나를 이용한 탐지 및 피탐지와 수중 세력간의 상호 식별 성능은 그 어떤 무기체계 분야보다도 중요하다. 정보통신 기술의 발달로 소나 장비 자체의 기계적인 성능과 신호처리 기법 및 소프트웨어의 처리 능력 등 소나 프로세서의 성능이 지속적으로 개선되고 있으나^[1], 전장이 대양에서 연안중심으로 변화함에 따라 다양한 해양환경 변동에 의해 소나의 성능이 제한받고 있다. 따라서 해양환경 영향을 극복하기 위한 많은 연

† 2010년 11월 20일 접수~2011년 3월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 서울대학교

책임저자 : 조창봉(cbcho@add.re.kr)

구가 있어왔으며, 특히 수중 혼합층의 깊이(Mixed Layer Depth)에 따른 운송 소나의 효율과 성능에 미치는 영향에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다^{16,8)}.

혼합층의 깊이를 정하는데 있어, 수온의 수직 구배가 가장 큰 수온약층을 기준으로 하는 경우가 많으며, XBT 관측을 이용한 수직 수온 구조를 파악해서 음파의 전달 및 감쇠를 예측한다. Jang & Lim(2010)은 동해에서의 수치모델을 이용하여 표층으로부터 1°C 차이를 보이는 수심을 해양 혼합층으로 정의하여 계산한 결과를 Levitus 자료와 비교하였다. 하계의 경우, 수심 50m 이내에서 수온약층이 발달하고 동계의 경우 한반도 부근 해역에서 50m~100m 수심에서 성층이 발달한다고 보고하였다¹⁴⁾. 그러나 음파의 전달 및 감쇠는 밀도구배 구조에 의해 직접적으로 결정되며, 밀도는 수온의 변화 뿐 아니라, 염분 그리고 수압으로 나타는 압력의 함수로 계산된다. Kim and Cho (1983)는 부력주파수를 이용하여 동계(2월) 동해의 수직구조가 수심 200m에서 2층 구조를 보인다고 하였다¹⁵⁾.

지금까지 한반도 근해에 대한 성층화에 대한 연구는 국지적으로 어느 한 해역이나 특정 연안에 대해 국한되어 왔으며, 수온을 기준으로 성층의 특성을 대변하는 연구가 주를 이루었으며, 수심 년 주기의 장기 변화에 대한 성층의 변화 경향에 대한 연구는 미비하였다.

본 연구에서는 한반도 근해(해안으로부터 300km 이내)의 해역에 대해서 기존 관측 자료를 활용하여 성층이 가장 강하게 발달하는 수심을 정의하고 정량화하는 방안을 제안하고, 제안된 방법에 의해 추정된 한반도 근해 성층 발달의 특성과 계절별, 연도별 그리고 해역별 분포 및 변화 경향을 분석하여, 성층의 특성과 대표적인 변화 경향을 제시하고자 한다.

2. 자료수집과 자료처리

가. KODC 자료처리

1) KODC 자료의 특성

국립수산과학원(NFRDI : National Fisheries Research and Development Institute)에서는 1960년대부터 한반도 근해에 대해 격월 간격으로 정선관측을 실시하여, 수온, 염분 및 용존산소량 등의 물리/생물학적 자료를 축적하여 왔으며(Fig. 1), 국립수산과학원이 운영하는

KODC(Korean Oceanographic Data Center)를 통해 2010년 현재 2008년까지의 물성 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 비교적 안정적으로 자료 수집이 이루어진 1971년부터 2008년까지 38년간의 격월 관측 자료를 분석하였으며, 분석에 이용된 자료의 범위와 성격은 Table 1과 같다.

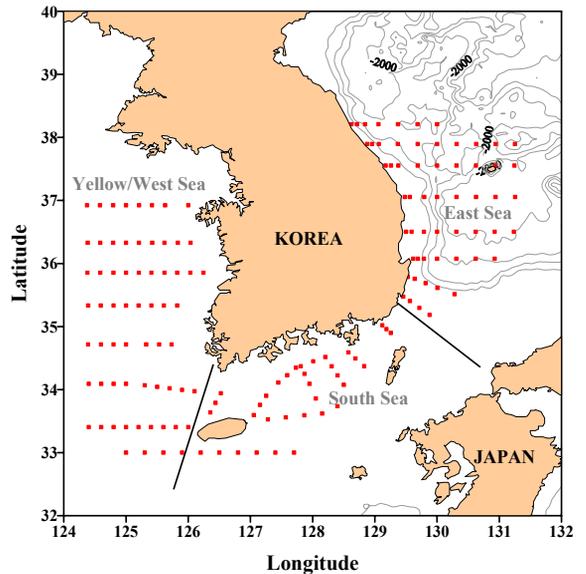


Fig. 1. 국립수산과학원 정선관측 정점과 한반도 근해 수심 분포 및 동/남/서해의 해역구분

Table 1. 분석에 적용된 KODC 자료 범위와 특성

		자료 수집 정점		수직자료 분포	적용 자료
		수평	수직포함		
해역구분	동해	58	697	14개 표준수심 [0m~500m]	수온, 염분, 수심
	서해	60	425		
	남해	39	217		
기간		1971. 2. ~ 2008. 12			
정보		관측 날짜 정보			

2) KODC 자료 전처리

1971년 2월부터 격월로 관측된 정선관측 자료의 경우, 모든 정점을 동시에 관측할 수 없었고, 관측이 수행되는 기간의 해상 날씨 등을 고려하여, 모든 관측 자료가 격월의 중앙값으로 대표될 수 없다. 따라서 각

해역별 관측 자료의 시간 간격을 동기화하여 동일한 시간 조건에서 계절 별 및 격월 별 변화량을 추정해야 한다¹⁹⁾.

이를 위해 총 1391 관측점(수평, 수직)의 시간 자료(Time Series Data)를 각 정점별 관측이 수행된 날짜를 Julian Days로 계산하고, Akima Cubic Spline 내삽법을 적용하여, 모든 자료의 시간이 동기화되는 각 정점별 228개의 시간자료를 재구성하였다¹⁷⁾. 내삽을 이용하여 자료를 재구성한 결과 관측 자료와 시기적으로 거의 일치하는 기간이 대부분이지만, 일치하지 않는 기간(홀수 월에 관측한 경우)도 있으며, 이를 보정하면 0.5°C~1°C의 관측 시기 차이로 발생하는 오차를 산출해 낼 수 있고, 이 값을 시간 동기화하여 재구성된 자료에 반영하였다(Fig. 2).

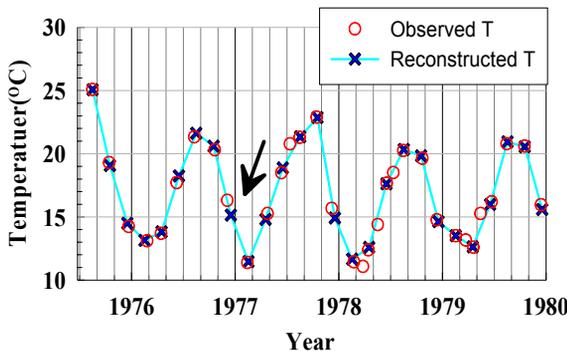


Fig. 2. 내삽법을 이용한 시간 동기화 및 자료 재구성 결과

염분도 수온과 동일한 방법으로 보정하였고, 주어진 수온과 염분, 수심 값을 이용하여 한반도 주변의 동기화된 밀도 구조를 계산하였다. 밀도 계산식은 1983년 Gill이 제공한 경험식을 이용하였다³¹⁾.

나. 성층화(Stratification) 강도

1) 위치에너지 편차를 이용한 성층화 크기 계산

성층화 정도를 계산하거나 표현하기 위해 수온이 급격히 변화하는 수온약층의 깊이와 기준 수심간의 수온차를 관측하거나 추정한다. 해수에서 대부분의 밀도 분포는 수온 구조와 유사한 경우가 많고, 때문에 수온약층의 수심 및 수온차로 성층화를 대표하는 경향이 있다. 그러나 실질적인 성층의 정도는 수심에 따른 밀도차에 의해 발생하며, 수온과 더불어 염분의 분포 및 구조가 밀도 분포에 영향을 준다.

Simpson(1977년) 등은 영국 근해에서의 성층화 정도를 표현하기 위해 식 (1)과 같이 계산하는 해수의 위치에너지 편차(Potential Energy Anomaly)를 제안하였다. 해수가 수직 방향으로 전 층이 균일하게 혼합되었을 경우의 위치에너지와 성층화된 해수의 위치에너지의 차이를 계산한 것으로 2차원(수평방향) 성층 맵을 구성할 수 있다^{2,10)}.

$$\phi = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 (\bar{\rho} - \rho)gzdz \quad (1)$$

여기서, H 는 수심, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도,

밀도의 평균은 $\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 \rho dz$ 이다.

성층 형성 정도의 계산 결과는 단위 체적 당 일의 양(J/m^3)으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 Simpson 등이 제안한 성층화의 크기를 대표하는 식으로부터 일정 수직 구간의 상대적 위치에너지 편차를 표층부터 최대 수심 500m까지 연속적으로 계산하여, 상대적 위치에너지 편차가 가장 큰 수심을 성층의 경계 수심으로, 이때의 위치에너지 편차를 성층의 강도로 정의한다. 계산식은 식 (1)로부터 다음과 같이 정의한다.

$$\phi_{max} = Max \left[\frac{1}{D} \int_{z+D/2}^{z-D/2} (\bar{\rho} - \rho)gzdz \right] \quad (2)$$

여기서, D 는 수직적 기준 수심 간격,

수심 z 는 $z = -H + D/2, -H + D/2 + 1, \dots, 0 - D/2$,

수직 구간별 밀도평균은 $\bar{\rho} = \frac{1}{D} \int_{z+D/2}^{z-D/2} \rho dz$ 이다.

본 논문에서는 기준수심간격(D)을 원 자료(KODC)의 최소 기록간격인 10m로 하였다. 기준수심간격(D)을 5m로 하였을 경우 상대적 위치에너지의 표층부와 저층부의 포함 범위가 5m 증가하나, 최대 밀도 변화층이 대부분 수심 5m와 495m 사이에 대부분 존재하고, 한반도 주변해역에서의 위치에너지 편차 및 상대적 위치에너지 편차가 큰 변화를 보이지 않았다. 표층부터 수심 500m까지 1m 간격으로 10m 수직 구간의 상대적인 위치에너지 편차를 구하여 성층화의 크기로 사용하였다. 관측 해역에서 밀도의 공간구조에 따라 등압면이 모두 수직 방향으로 존재하지는 않지만 수

직적 기준 간격간의 상대적 밀도차이에 의한 위치에너지 편차를 성층화의 크기로 간주하는데 무리가 없을 것으로 사료된다. 다만 기준 체적 당 일양의 절대값은 기준이 되는 수심($z - D/2$)의 위치에너지의 절대값에 따라 차이를 보일 수 있다.

2) 한반도 근해의 위치에너지 편차의 크기

Simpson의 식 (1)을 적용하여 계산한 한반도 근해의 위치에너지 편차는 계절별로 큰 차이를 보이며, 동해의 위치에너지 편차의 변동양이 서해와 남해에 비해 크게 나타난다. 이는 수심이 깊을수록 전층에 해당하는 밀도 편차가 크기 때문인 것으로 판단되며, 그 크기는 동해에서 10월 평균 약 $200J/m^3$ 정도로 나타나며, 이는 Simpson에 의해 제시된 영국 연안의 여름철 평균 위치에너지 편차의 크기와 유사하다^[10]. 비교적 수심이 낮은 서해와 남해의 경우 8월에 최대 $100J/m^3$ 까지 강화되며, 2월, 4월 그리고 12월에는 평균 $20J/m^3$ 이내로 약화된다(Fig. 3). 동해와 서/남해의 성층의 세기는 계절적으로 약간의 시차를 두고 강도가 다르게 나타난다. 동해의 경우 10월에 가장 성층이 심화되는 반면에 서/남해의 경우는 8월에 가장 강하게 성층이 발달한다.

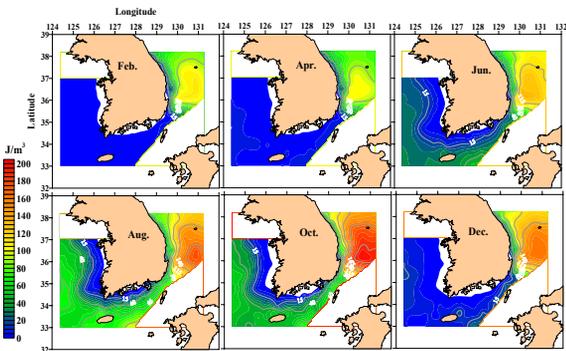


Fig. 3. 한반도 근해역의 격월 평균 해수중 위치 에너지 편차 분포

수심 전체에 대해 계산된 위치에너지 편차의 분포를 통해 한반도 근해의 성층화의 계절적 변화를 확인할 수 있지만, 해역별 차이의 대부분이 관측 수심에 의한 밀도차에 의해서 발생하므로(수심이 깊을수록 위치에너지 편차가 크게 계산되므로), 식 (1)에 의한 절대값을 근거로 각 해역을 비교하기는 부적절하다고 판단된다. 따라서 계절적 성층의 강도를 해역별로

상대적으로 비교하기 위해 본 논문에서 제안된 식 (2)의 결과를 이용해서 성층이 가장 강하게 형성되는 수심과, 이 수심에서의 상대적 위치에너지 편차를 분석하는 것이 보다 타당할 것으로 사료된다.

3. 한반도 근해 성층화 특성 및 계절 변화

가. 한반도 근해 성층 경계 수심 형성

본 논문에서 제안된 변형된 상대적 위치에너지 편차식(식 (2))으로 계산된 한반도 근해 성층 경계 수심의 계절적 형성 수심 및 크기 분포를 도시하였다(Fig. 4). 성층 경계 수심 및 성층의 크기 분포로 볼 때, 계절적으로 2월, 4월, 12월의 동계와 6월, 8월 10월의 하계로 확연하게 구분된다.

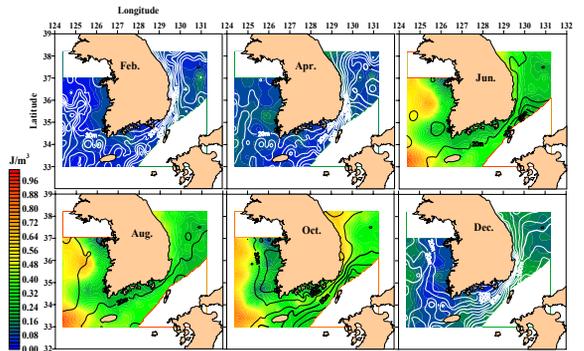


Fig. 4. 한반도 근해역의 격월 평균 성층 경계 수심과 (Line and Numbers in Figure) 성층 경계 수심에서의 상대적 위치 에너지편차

동계의 경우 성층이 가장 강하게 형성되는 깊이는 동해가 100m 이상이며, 2월에 가장 깊은 수심에서 강한 성층이 발달하며, 평균적으로 120m 정도의 깊은 수심에서 형성된다. 서/남해는 주로 20m~30m 수심에 분포한다. 또한 동해 연안으로부터 50km 이내의 경우 서/남해와 유사한 수심에서 성층이 강하게 발달한다. 성층의 강도는 해역 및 수심에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 $0.15J/m^3$ 이내로 매우 약한 것으로 나타났다.

하계의 경우 가장 강한 성층이 발달하는 수심이 동해와 서/남해의 해역별 차이가 크지 않고, 시기적으로 8월에 약 20m 수심에서 연중 가장 낮게 발달하며, 이 기간의 성층 강도가 가장 크게 나타난다. 8월 평균분

포에서, 동중국해와 인접한 서/남해에서 $0.9J/m^3$ 이상의 강한 성층이 발달하고, 같은 시기에 동해 중부 해역에서도 연중 가장 강한 성층이 발달하며, $0.4J/m^3 \sim 0.5J/m^3$ 범위의 크기를 보인다. 10월에는 평균적으로 성층이 가장 강하게 형성되는 수심의 강도는 제주도에서 대한해협을 가로지르는 방향의 수직인 방향으로 차이가 크며, 최대 70m 수심에서 발달한다. 6월의 성층의 강도 분포와 유사하게 10월의 경우에도 서/남해의 성층 강도가 동해보다 크고, 동해 연안을 따라서 외해에 비해 강한 성층이 발달한다.

수심효과(수심이 깊을수록 위치에너지 편차가 크게 계산되는 효과)를 포함하지 않은 상태의 성층의 강도는 하계 전체적으로 동해가 서/남해 보다 약한 것으로 나타났으며, 이는 실질적인 성층의 강도에 해당한다고 사료된다.

나. 격월별 성층 경계 수심의 변화

격월별로 산출된 성층의 변동성을 분석하기 위해 각 격월별 성층이 가장 강하게 형성되는 수심의 변화를 도시하였다(Fig. 5). 이러한 수심 및 성층의 발달 경향 분석을 통해, 크게 동해와 서/남해로 구분하여, 각 해역의 각 격월별 경향을 살펴보았다. 각 해역의 성층이 가장 강하게 생성되는 수심의 대표 값을 구하기 위해 각 해역에 포함된 관측점의 최대 밀도 구배 수심을 산술평균하였다.

1) 한반도 동해 근해의 성층 경계 수심 변화

격월별로 산출된 동해 성층의 중심 수심은 6월과 8월의 경우 약 20m 깊이에서 발달하여 1971년부터 2008년까지 관측 연도별로 15m 내외의 변동성을 보일 뿐, 뚜렷한 장기 변화 경향을 보이지 않는다. 10월의 경우, 평균 40m에서 강한 성층이 발달하나 6월 및 8월의 경우와 마찬가지로, 동 기간 지속적으로 깊어지거나 낮아지는 경향을 보이지 않는다. 그러나 2월과 4월의 경우는 다른 기간에 비해 성층 경계 수심의 연간 변동이 크고, 1971년에서 2008년으로 가면서 성층이 강하게 형성 수심(최대 밀도 구배 수심)이 약 20m 깊어지고 있음을 볼 수 있다. 또한 2월과 4월의 수심차이는 35m 정도로 거의 일정하며, 경향이 유사한 것으로 보아, 성층 수심이 깊어지고 있는 현상임을 알 수 있다. 그러나 동계 기간에 포함되지만, 12월의 경우 평균 80m에서 강한 성층이 발달하고, 성층 중심 수심은 연간 30m 정도의 변동을 보이나, 2월이나 4월과 같이

깊어지는 경향을 보이지는 않는다. 격월 별 밀도 구배의 크기로부터 산출되는 성층의 크기는 하계에 높고 ($0.3J/m^3 \sim 0.8J/m^3$) 동계에 낮음($0.2J/m^3$ 이하) 특성을 보이며, 시기에 따라 4배 이상의 차이를 보인다.

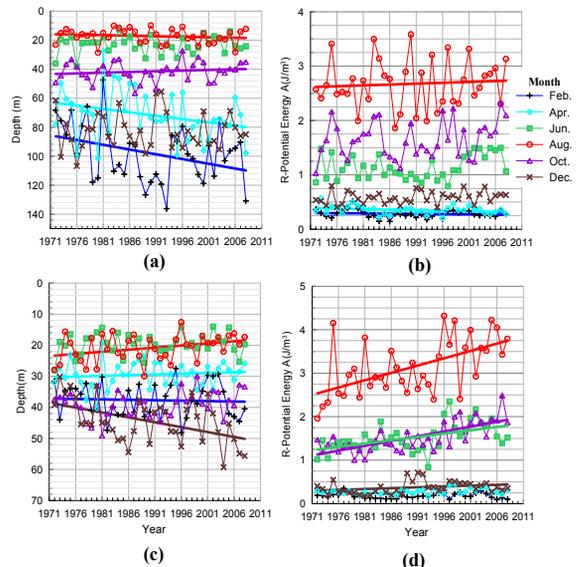


Fig. 5. 한반도 근해역 격월별 동해역의 성층 생성 수심 변화(a)와 성층 수심에서의 상대적 위치에너지 편차(b)와 서/남해역의 성층 생성 수심변화(c)와 상대적 위치에너지 편차의 시간적 변화(d)

2) 한반도 서/남해 근해의 성층 수심 변화

서/남해역에서 6월과 8월의 경우 동해와 유사한 수심에서 가장 강한 성층이 형성되며, 동해에서 약 5m 깊어지는 것에 반하여 서/남해에서는 약 6m 정도 낮아지고 있음을 알 수 있다. 또한 동해에서와 달리, 서/남해에서는 2월과 4월에 가장 강한 성층 생성 수심이 뚜렷하게 깊어지거나 낮아지는 경향을 보이지 않으며, 다만 12월의 경우, 1971년에 비해 2008년에 약 10m 깊어지고 있음을 알 수 있다. 성층 경계 수심에서 성층의 강도는 8월의 경우 1971년보다 2008년에 $0.5J/m^3$ 이상 증가하는 경향을 보이며, 8월의 성층의 강도가 70% 이상 큰 폭으로 증가하고 있다는 것을 의미한다. 8월의 보다는 약하지만, 6월과 10월의 성층의 강도, 즉 최대 밀도 구배 수심에서의 밀도 구배에 의한 상대적 위치에너지 편차는 $0.2J/m^3$ 정도 증가하며, 이는 1971년도에 비해 2008년도의 성층의 강도가 50% 이상 증가한 것으로 해석된다.

3) 성층 경계 수심에서의 성층 강도 변화

경험적 직교함수 분석(EOF 분석, Empirical Orthogonal Function)을 통해 동해와 서/남해의 성층 경계 수심에서의 성층 강도 변화에 대한 모드 구조를 분석하였다. 첫 번째 EOF 모드에서 계절 변화를 포함한 전체 변동의 약 11%를 설명하며, 대한해협과 동해 연안선을 기준으로 동해와 서/남해의 성층 경계 수심에서의 성층 강도가 서로 반대 위상으로 변동하는 것으로 나타났다(Fig. 6).

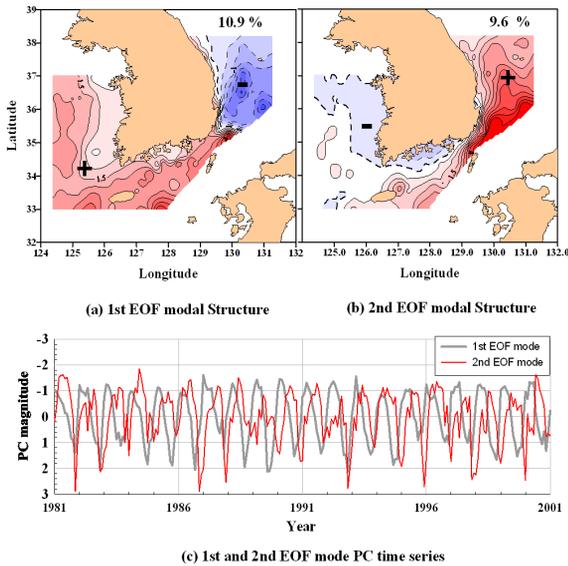


Fig. 6. 한반도 근해 성층 경계 수심에서 성층 강도 변화의 경험적 직교함수 분석 결과 중 1모드의 공간구조(a)와 2모드 공간구조(b), 1모드와 2모드의 PC(Principle Component) 시간 계수 변화(c)

1모드 시간 계수의 변동이 연중 계절 변화를 포함하고 있으므로, 동해와 서/남해의 성층 경계 수심의 성층 강도 변동이 동해와 연중 또는 연간 반대 방향으로 발달한다는 것을 의미한다. Fig. 4의 격월 평균 성층 경계 수심에서의 성층 강도 분포에서도 6월과 8월에는 서/남해의 성층강도가 동해에 비해 크고, 10월에 두 해역이 유사하게 강도로 발달하며, 12월 그리고 2월의 일부에서 동해의 성층 경계 수심에서 성층 강도가 서/남해보다도 강하게 분포하는 것을 알 수 있다.

2모드 구조는 1모드와 다르게 동해와 남해의 외해가 동일한 위상으로 변동하며, 서해와 남해 연안이 이

와 반대 위상으로 변동하는 구조를 보인다. 변동성은 전체 변동성의 약 10% 정도 설명하고 있으며, 시간계수의 변화에 1모드와 마찬가지로 계절적 변화가 포함되어 있음을 알 수 있다.

동해와 서/남해의 성층 경계 수심에서의 성층 강도 변화의 1 모드 변동 구조가 서로 반대 방향으로 나타나는 것은, 비록 1 모드 변화가 전체 변동량에 비해 크지 않은 부분을 설명하고 있지만, 첫 번째 모드로서 동해와 서/남해의 변동 양상이 반대로 나타난 것은 동해와 서/남해의 성층변화를 연구하는데 있어서 중요한 단서를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 이는 동해와 서/남해의 수심에 따른 위치에너지의 계절 변화에 대한 열에너지 반응 감도에 의한 것으로 생각되며, 수심이 깊을수록 상대적 위치에너지의 변화가 수심이 낮은 해역에 비해 적으므로 나타나는 현상이라 사료된다.

다. 수온 약층 형성 수심 변화

본 연구에 이용된 자료와 동일한 자료를 이용하여 해수층 밀도 변화 및 분포에 가장 큰 영향을 주는 물성인 수온에 의한 수온약층의 형성 수심과 수온 구배에 대해서 분석하여 밀도구배로 인한 상대적 위치에너지 편차에 기인한 성층 경계 수심 및 크기와 비교하였다(Fig. 7).

하계의 경우 동해 및 서/남해에서의 수온약층 형성 수심은 최대 밀도 구배에 의해서 구분되는 성층 경계 수심과 유사한 깊이 분포를 보인다. 특히, 서/남해의 경우, 성층 경계 수심이 10m 깊어지는 경향을 보이는 12월뿐 아니라 2월에도 유사한 경향이 수온약층 수심 변화에서 나타난다.

그러나 동계, 동해의 경우 성층 경계 수심의 장기 변화에서 보이는 경향(성층 경계 수심 시간에 따라 20 m 깊어짐)이 보이지 않으며, 본 연구에서 사용한 자료의 시작 시점인 1971년부터 성층 경계 수심에 비해 깊은 수심에서 수온약층이 형성된다.

수온약층의 온도편차는 동해에서 2월, 4월, 8월에 전 기간에 걸쳐 약 0.7°C 감소하는 경향을 보이며, 서/남해에서 8월에 0.2°C 정도 증가한다. 또한 서/남해의 계절별 수온약층 생성 수심 차이가 1971년의 약 15m에서 2008년의 30m 이상으로 두 배 정도 더 커지는 것으로 나타났다(Fig. 7c). 이는 서/남해의 수온약층의 깊이가 하계에는 더 얕아지고 동계에는 더 깊어지는 경향을 보이고 있음을 의미한다.

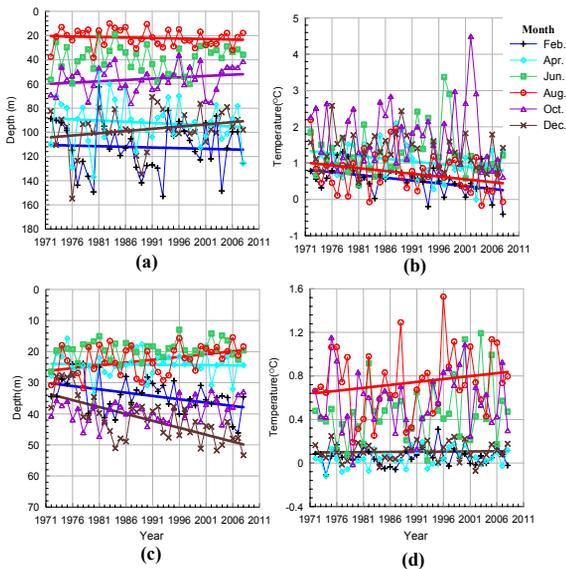


Fig. 7. 한반도 근해역 격월별 동해역의 수온약층 수심 변화(a)와 수온 표준편차(b)와 서/남해역의 수온약층 수심변화(c)와 수온 표준편차의 시간적 변화(d).

4. 결론 및 고찰

한반도 근해의 성층화 정도 및 변동성을 분석하기 위해 1971년부터 2008년에 이르는 38년간의 KODC 정선관측 자료를 각 격월의 중심에 맞게 모든 관측점에서의 시간이 동기화 되도록 재구성하였다. 각 해역의 성층 경계 수심과 성층의 강도를 최대 밀도 구배가 발생하는 수심과, 그 수심에서의 단위 체적 당 상대적 위치에너지 편차로 새롭게 정의하고, 제안된 식을 이용하여 한반도 근해의 성층변화에 대한 계절별 장기 변화 경향을 최초로 기술하였다.

계절별 및 연도별 성층 경계 수심의 변동과 성층의 강도 변화를 분석하였다. 월별로 성층이 발달하는 수심의 변화 경향 분석을 통해, 동계 동해의 경우 성층의 수심이 깊어지고 있으며, 하계 서/남해의 성층이 강화되고 동계와 하계의 계절적 특성이 강화되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그동안 한반도 근해역의 국지적이고 비교적 단기관측 자료를 통해 연구된 성층에 대한 연구결과로는 알 수 없는 계절별 연간 성층의 변동 특성을 이해하는데 중요 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 성층의 정도를 에너지의 양으로 표현하고, 성층화 정도의 정량화를 통해 성층의 상대적 비교와 이해가 보다 용이할 것으로 판단되며, 계절별 성층 경계 수심의 변동과 성층의 크기 변화 및 경향에 대한 정보는 각종 수중/수상 세력에서 운용하는 소나의 계절별, 시기별 효율을 극대화 할 수 있도록, 운용수심을 선정하는데 중요 고려사항으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

본 논문에서 사용된 자료인 KODC 자료는 비교적 장기간 동안 한반도 근해에 대해 지속적으로 관측을 수행하여 축적되어 있으나, 기본적으로 연간 6회의 격월 간격으로 구성되어있고, 정리되어 있는 자료의 수심 간격이 표준수심의 14개 층으로 제한된다는 제약이 있다. 그러나 1971년부터 38년간 장기간의 자료를 통해 한반도 주변해역의 장주기 변동 경향을 설명하기에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

동계, 동해의 수온약층에서 수온구배가 작아지는 것은 염분 분포 변화와 함께 밀도 변화에 영향을 주고 있음을 의미하며, 동계(2월과 4월) 기온 및 바람의 영향으로, 수온약층의 깊이 변화는 연간 변화가 크지 않을 수 있으나, 수온약층에서의 수온편차가 감소하는 경향을 보이고(Fig. 7b), 상대적 위치에너지의 편차가 가장 큰 수심(밀도약층)에서의 에너지 편차에 큰 변화가 없는 것은 염분의 수직 구배가 성층 깊이를 형성하는데 더욱 중요한 역할을 하고 있다는 해석을 할 수 있다. 동해의 경우, 수온을 수직 평균으로 동일한 상태에서 염분의 수직 분포만으로 밀도의 변화량을 계산하면, 하계의 경우 10%~20%, 동계의 경우 30%~40% 위치에너지 편차 변화를 염분의 수직 분포에 의해서 발생하는 것으로 나타났다.

한반도 서/남해역 수온약층의 계절별 깊이 차이가 증가하는 경향을 보이는 것은 동계와 하계의 특성 차이가 점차 커지고 있는 것으로 보이며, 동계에 더 추워지고 하계에 더 더워지는 기후 변화 경향의 영향이 수심이 낮은 서/남해에서 민감하게 반응한 결과인 것으로 사료된다.

최대 밀도 구배가 형성되는 성층 경계 수심 및 그 수심의 변화를 이해하기 위해 각 물성의 역할을 시·공간적 특성 분석이 추가로 필요할 것으로 사료된다.

Reference

- [1] Akima, H., "A Method of Univariate Interpolation that Has the Accuracy of a Third-degree Polynomial", *ACM Transactions on Mathematical Software*, 17(3), pp. 341~366. 1991.
- [2] Bowden, K. F., "Physical Oceanography of Coastal Waters", pp. 234~249, Halsted Press, 1983.
- [3] Gill, E. A., *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, pp. 599~603, 1983.
- [4] Jang, C. J. and S. H. Lim, "Effect of Vertical Mixing Scheme on Upper Ocean Simulation of the East Sea", *J. KIMST.*, 13(6), pp. 1034~1042, 2010.
- [5] Kim, H. J. and K. D. Cho, "Inversion Phenomena of Density in the Japan Sea", *J. Ocean. Soc. Kor.*, 17(2), pp. 51~58 1982.
- [6] Kim, Y. H., S. H. Nam, S. J. Lyu, Y. g. Kim and T. B. Shim, "2002~2003 Observation on the Short-period Internal Waves Near and Off the Donghae City", *Korea 18th Underwater Acoustics Symposium Proceedings*, 2003.
- [7] Lie, H. J. and S. Lee, "Reconstruction of Regular Time Series from Bi-monthly Temperature Data in the Yellow Sea and the Northwestern East China Sea", *Ocean Science Journal*, 45(2), pp. 139~149, 2010.
- [8] Na, Y. N., C. B. Cho, and S. G. Han, "Modeling Environment Effects on Detection Performances for Variable Depth Sonars in the East Sea of Korea, *J. Acoust. Soc. Kor.*, 23(2E), pp. 24~30, 2004.
- [9] Na, Y. N., Y. G. Kim, S. I. Kim, C. B. Cho, H. S. Kim, Y. G. Lee and S. H. Lee, "Development of Submarine Acoustic Information Management System", *J. Acoust. Soc. Kor.*, 24(2E), pp. 46~33, 2005.
- [10] Simpson, J. H., Hughes, D. G. and Morris, N. C. G., "The Relations of Seasonal Stratifications to Tidal Mixing on the Continental Shelf", In *A Voyage of Discovery*, ed M. Angel, pp. 327~340, Pergamon Press, Oxford, 1977.
- [11] Waite, A. D., *SONAR for Practising Engineers*, 3rd edition, pp. 49~66. 2002.