

동해 울릉분지에서 봄과 여름동안 시계방향 와류가 영양염과 엽록소에 미치는 영향

김동선* · 김경희 · 심정희 · 유신재
한국해양연구원 해양환경연구본부

The Effect of Anticyclonic Eddy on Nutrients and Chlorophyll During Spring and Summer in the Ulleung Basin, East Sea

DONGSEON KIM*, KYUNG HEE KIM, JEONGHEE SHIM AND SINJAE YOO
Marine Environment Research Department, Kordi, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

동해 울릉분지에서 봄과 여름 동안 난수성 시계방향 와류가 영양염과 엽록소에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 2005년 7월과 2006년 4월에 5개 정점에서 표층부터 수심 200 m까지 수온, 염분, 영양염, 엽록소 등을 관측하였다. 봄에는 와류 내부해역에서 표층 혼합층의 깊이가 150 m 이상으로 매우 깊은 반면, 외부해역에서는 20~60 m로 비교적 얇았다. 와류 내부해역에서 수직혼합이 활발히 일어나 표층해수에 영양염이 풍부한 반면, 외부해역에서는 표층에서 성층화가 생겨 심층에서 표층으로 영양염 공급이 충분하지 않아 농도가 낮았다. 봄에는 와류 내부해역에서 표층 혼합층 깊이가 유광층 깊이보다 훨씬 더 깊어서 엽록소 농도가 낮았으며, 와류 외부해역에서 측정된 총 엽록소(depth-integrated chlorophyll) 양은 내부해역에서 측정된 것보다 보다 두 배 이상 높았다. 여름에는 봄과 달리 모든 정점에서 표층 성층화가 강하게 발생하여, 영양염이 표층에서 완전히 고갈되었다. 여름에 관측한 엽록소는 모든 정점 수심 30 m 내외에서 최고 농도를 나타내어, 아표층 엽록소 최대(subsurface chlorophyll maximum)를 보였으며, 와류 내부해역에서 측정된 총 엽록소 양은 외부해역에서 측정된 것보다 두 배가량 높았다. 동해 울릉분지에서 거의 매해 나타나는 시계방향 와류는 식물플랑크톤 생물량에 매우 큰 영향을 미치는데, 그 영향이 봄과 여름에 다르게 나타났다; 봄에는 시계방향 와류가 식물플랑크톤 생물량을 제한하는 반면, 여름에는 반대로 식물플랑크톤 생물량을 증가시킨다.

In order to find out the effects of the anticyclonic eddy on the distribution of nutrients and chlorophyll concentrations in the Ulleung Basin during spring and summer, we measured temperature, salinity, nutrients, and chlorophyll from the surface to 200 m water depth at five stations in July 2005 and April 2006. In spring, surface mixed layer was very deep inside the eddy, about 200 m, but it was relatively shallow outside the eddy, about 20~60 m. Inside of the eddy, nutrients in the surface waters were sufficient by supply from the deep layer, whereas outside of the eddy, they were fairly depleted due to the stratification in the surface layer. In spring, chlorophyll concentrations were relatively low inside of the eddy due to the deeper surface mixed layer compared with the euphotic depth, and the depth-integrated chlorophyll concentrations outside of the eddy were twice as much as those inside of the eddy. In summer, nutrients in the surface waters were completely depleted at all stations due to the well stratification in the surface layer. The typical distribution pattern of subsurface chlorophyll maximum was observed at all stations, and the depth-integrated chlorophyll concentrations inside of the eddy were almost twice as much as those outside of the eddy. The anticyclonic eddy appearing in the Ulleung Basin every year significantly affects the phytoplankton biomass, with the opposing effects in spring and summer; in spring, the anticyclonic eddy suppresses phytoplankton growth, but in summer, it enhances the phytoplankton biomass.

Keywords: Anticyclonic Eddy, Nutrients, Chlorophyll, Ullenug Basin

*Corresponding author: dkim@kordi.re.kr

서론

동해 울릉분지에서는 난수성 시계방향 와류(anticyclonic eddy)가 매년 한, 두차례 나타난다(안 등, 1994; Shin *et al.*, 2005). 이 난수성 와류는 높은 수온과 염분을 나타내기 때문에 대마난류(Tsushima Warm Current) 또는 동한난류(East Korean Warm Current)에서 유래하였다. 이 와류는 울릉분지 내에서 생성되어 동쪽에서 서쪽으로 또는 북쪽으로 이동하며, 타원형태를 유지하고 평균 지름이 130 km 정도이다(안 등, 1994). 와류가 한 바퀴 회전하는 데 13.6일이 소요되며, 평균 회전속도는 24 cm/s이다(이 등, 1995).

와류는 해양생태계, 즉 영양염, 식물플랑크톤 생물량, 일차생산력, 신생산력(new production) 등에 직·간접적으로 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 반시계방향 와류(cyclonic eddy)에서는 해수가 수리물리적으로 와류 중앙에서 분산(divergence)하기 때문에 심층 해수가 표층으로 융승하며, 이 때 심층 해수에 풍부한 영양염을 표층으로 공급하여 일차생산력, 신생산력, 식물플랑크톤 생물량이 증가한다(McGillicuddy and Robinson, 1997; Seki *et al.*, 2001; Vaillancourt *et al.*, 2003; Fernandez *et al.*, 2005). 이와 반대로, 시계방향 와류(anticyclonic eddy)에서는 해수가 와류 중앙으로 수렴(convergence)하기 때문에 표층 해수가 심층으로 침강하여, 일차생산력, 신생산력, 식물플랑크톤 생물량에 별다른 영향을 미치지 않는다(Yentsch and Phinney, 1985; Franks *et al.*, 1986). 하지만, 최근에 현장관측과 모델결과에 따르면, 시계방향 와류에서도 심층으로부터 표층으로 영양염이 공급되어 일차생산력과 식물플랑크톤 생물량이 증가하였다는 보고가 있어, 아직까지 시계방향 와류가 해양생태계에 미치는 영향에 대해서는 논란이 많다(Martin and Richards, 2001; Zhang *et al.*, 2001; Mizobata *et al.*, 2002).

현재까지 동해 울릉분지에 매년 나타나는 난수성 시계방향 와류의 물리적 특성에 대한 연구를 많이 수행하였지만(안 등, 1994; 이 등, 1995; Shin *et al.*, 2005), 이 와류가 해양생태계에 미치는 영향에 대해서는 연구를 전혀 수행하지 않았다. 본 논문에서는 동해 울릉분지에서 봄과 여름동안에 난수성 시계방향 와류가 해양생태계, 특히 영양염과 엽록소(식물플랑크톤 생물량)에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 2005년 7월과 2006년 4월에 울릉분지, 5개 정점에서 표층부터 수심 200 m(여름에는 100 m)까지 수온, 염분, 영양염, 엽록소 등을 관측하여, 그 결과를 보고하고자 한다.

재료 및 방법

여름철인 2005년 7월 19일부터 8월 1일까지, 봄철인 2006년 4월 3일부터 4월 17일까지 한국해양연구원 연구선 *이여도호*를 이용하여 두 차례 현장조사를 수행하였다. 조사 정점은 모두 5정점으로 울릉분지 한가운데 위치한다(Fig. 1). 각 정점 마다 SeaBird CTD를 이용하여 수온과 염분을 측정하였고, 표층에서 수심 200 m(여름에는 100 m)까지 표준수심에서 니스킨(Niskin) 채수병을 이용하여 해수를 채집하였다. 해수 1000 ml를 구멍크기 0.7 µm의 Whatman GF/F 여과지로 거른 후, 여과 해수 60 ml는 영양염 분석을 위해 냉동하였고, GF/F 여과지도 엽록소 분석을 위해 냉동하였다.

질산염+아질산염(이후부터 질산염이라 명칭함), 인산염, 규산염

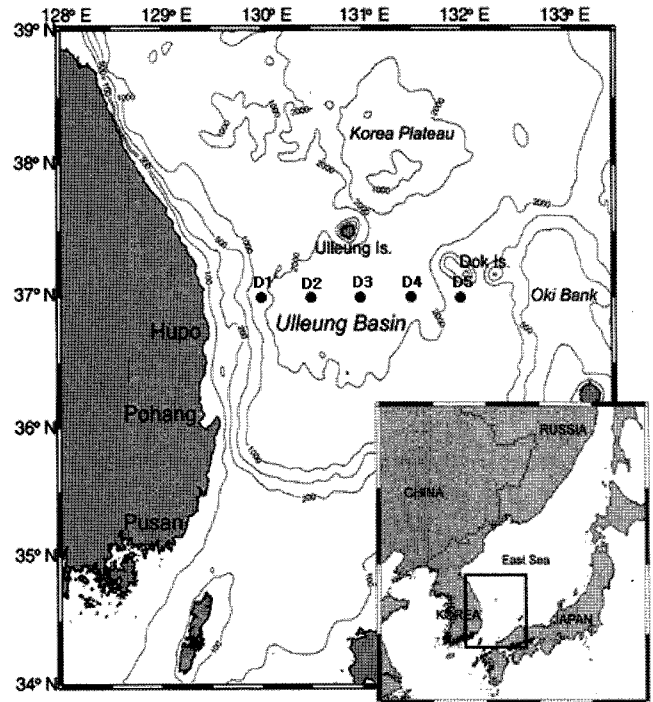


Fig. 1. Study area and sampling stations in July 2005 and April 2006.

농도는 자동이온분석기(LaChat model, QuikChem AE)를 이용하여 측정하였으며, 각각의 측정값은 표준 해수시료(SRM)를 이용하여 검증하였다. 두 번 이상 분석하여 얻은 질산염, 인산염, 규산염의 정밀도는 5% 이내였다. 엽록소 농도는 90% 아세톤 10 ml로 24시간 동안 추출한 후에 TD-700 fluorometer(excitation filter 436 nm, emission filter 680 nm)를 이용하여 측정하였다. Phaeopigment 농도는 아세톤으로 추출한 엽록소에 1N 염산을 넣고 1분 30초 후에 Turner-designed fluorometer로 측정하였다. 본 연구에서는 엽록소 측정값에서 phaeopigment 농도를 뺀 보정된 엽록소(corrected chlorophyll) 값을 이용하였다. 크기가 5 µm 이하의 엽록소 분석을 위하여, 해수를 구멍크기 5 µm의 Nuclepore polycarbonate 여과지를 이용하여 여과하였고, 여과 해수는 Auquafluor fluorometer(Turner Design Co.)를 이용하여 엽록소 농도를 분석하였다. 크기가 5 µm 이하의 엽록소 비율은 위의 방법으로 측정된 5 µm 이하의 엽록소 농도를 여과하지 않은 해수를 Auquafluor fluorometer를 이용하여 측정된 총 엽록소 농도로 나누어서 계산하였다.

결과 및 토의

해수의 물리 특성

봄철인 2006년 4월에 울릉분지에서 난수성 시계방향 와류가 관측되었으며, 정점 D2와 D3는 와류 내부해역에 위치하였고 정점 D1, D4, D5는 외부해역에 위치하였다(Fig. 1). 표층 200 m 수심에서 해수의 물리적 수직구조는 와류 내부와 외부해역에서 매우 큰 차이를 나타냈다. 와류 내부해역에 위치한 정점 D2와 D3에서는 수온과 염분이 표층에서 수심 200 m까지 큰 변화없이 거의 일정하였지만, 와류 외부해역에 위치한 정점 D1, D4, D5에서는 수

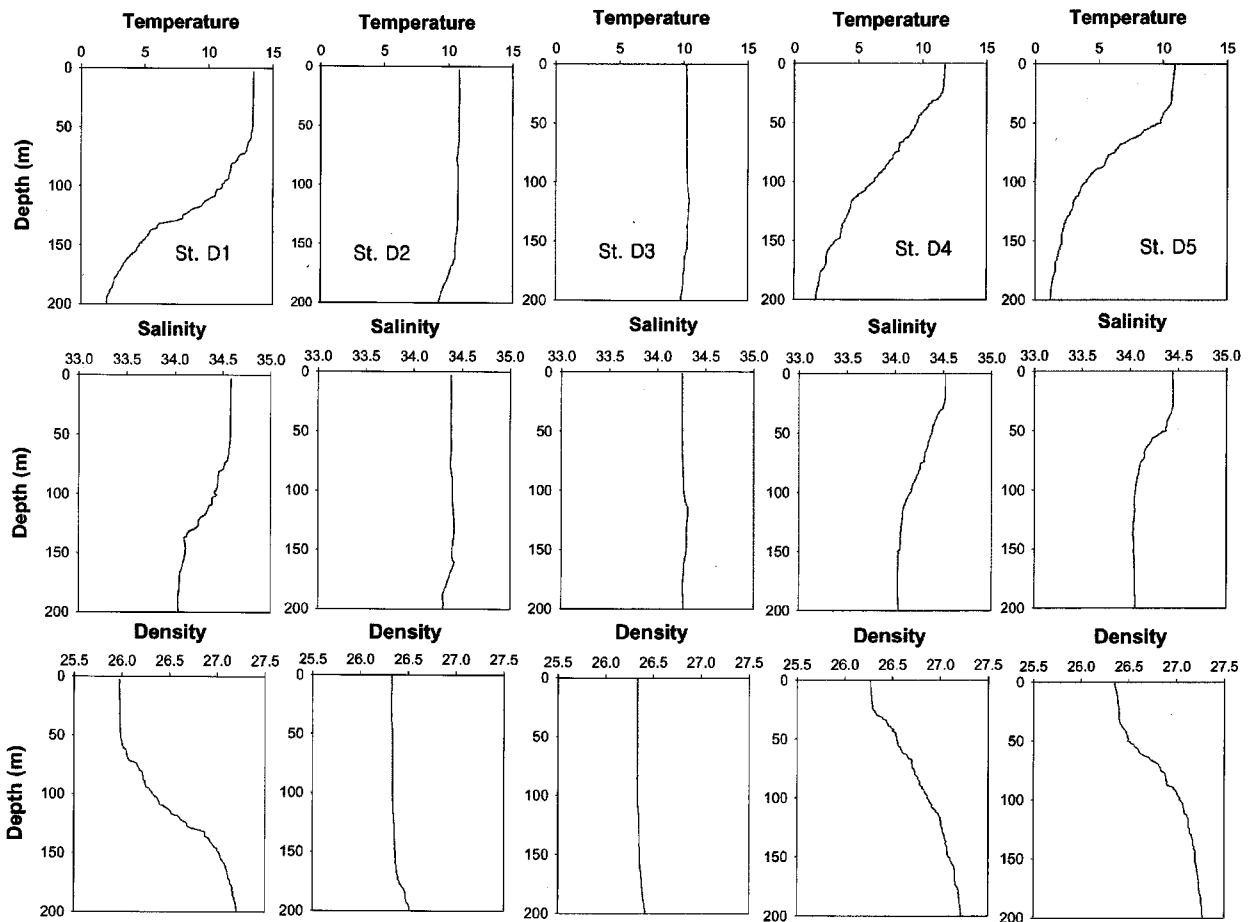


Fig. 2. Vertical profiles of temperature, salinity, and density in the Ulleung Basin during spring.

온이 수심 20~60 m 이하에서 급격히 감소하였고 염분도 약간 감소하였다(Fig. 2). 따라서 외류 내부해역에서는 표층 혼합층(surface mixed layer)의 깊이가 150 m 이상으로 깊은 반면, 외부해역에서는 20~60 m 정도로 얇았다. 이처럼 봄 동안에 외류 내부해역이 외부해역과 다른 물리적 특성을 보이는 것은 표층에서 수심 250 m 까지 일정한 수온과 염분을 나타내는 겨울 동안에 외류가 형성되었고 외류 내부해역이 외류에 의해 외부해역과의 교환이 차단되어 겨울의 물리적 특성이 봄 동안에도 계속 유지되었기 때문이다 (Shin *et al.*, 2005).

여름철인 2005년 7월에도 울릉분지에서 난수성 시계방향 외류가 관측되었다. 정점 D2와 D4에서 뜰개(drifter)를 이용하여 24시간 동안 외류를 관측하였는데, 정점 D2에서는 북서 방향으로 이동한 반면, 정점 D4에서는 남동 방향으로 이동하여 이 두 정점이 외류의 경계임을 지시했다. 따라서 여름철 외류는 봄철인 2006년 4월보다 좀 더 크기가 커서, 정점 D2, D3, D4는 외류 내부해역에 위치하였고 정점 D1과 D5는 외부해역에 위치하였다. 여름에 관측한 해수의 물리적 수직구조는 봄과는 전혀 달리, 외류 내부와 외부해역에서 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 3). 모든 정점에서 표층에서 수심 20 m까지 수온은 급격히 감소하였고 염분은 급격히 증가하여, 밀도약층(pycnocline)이 이 깊이에서 나타났다. 따라서 여름에는 표층 20 m에서 성층(stratification)이 강하게 발생하

여, 해수의 수직혼합이 거의 일어나지 않았다. 결국, 봄에는 외류 내부해역에서 표층 혼합층의 깊이가 150 m 이상으로 매우 깊었지만 여름에는 수 m 밖에 되지 않아 계절적으로 매우 큰 차이를 보였다. 또한, 봄에는 외류의 내부와 외부해역에서 해수의 물리적 수직구조가 매우 큰 차이를 나타냈지만, 여름에는 큰 차이를 보이지 않았다.

영양염의 분포 특성

봄에 관측한 영양염의 수직분포는 외류 내부와 외부해역에서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 외류 내부해역에 위치한 정점 D2와 D3에서 영양염 농도는 표층에서 수심 200 m까지 거의 일정하거나 약간 증가하였다(Fig. 4). 하지만 외류 외부해역에 위치한 정점 D1, D4, D5에서는 표층 50 m까지 거의 일정하다가 그 이하 수심에서 급격히 증가하였으며, 수심 200 m에서 정점 D2와 D3보다 3배 가량 높았다(Fig. 4). 정점 D2와 D3에서 영양염 농도가 표층에서 수심 200 m까지 크게 변하지 않는 것은 표층 혼합층의 깊이가 매우 깊어서, 표층에서 200 m까지 해수가 완전히 혼합되었고, 이렇게 수직적으로 완전히 혼합된 해수는 외류에 의해 외부해역과 해수 교환이 차단되어 그 특성을 잘 보존하였기 때문이다. 따라서 외류 내부해역에서는 해수의 수직혼합이 활발히 일어나기 때문에 표층 30 m에서도 영양염이 고갈되지 않고 충분히 존재한다. 하지만 외

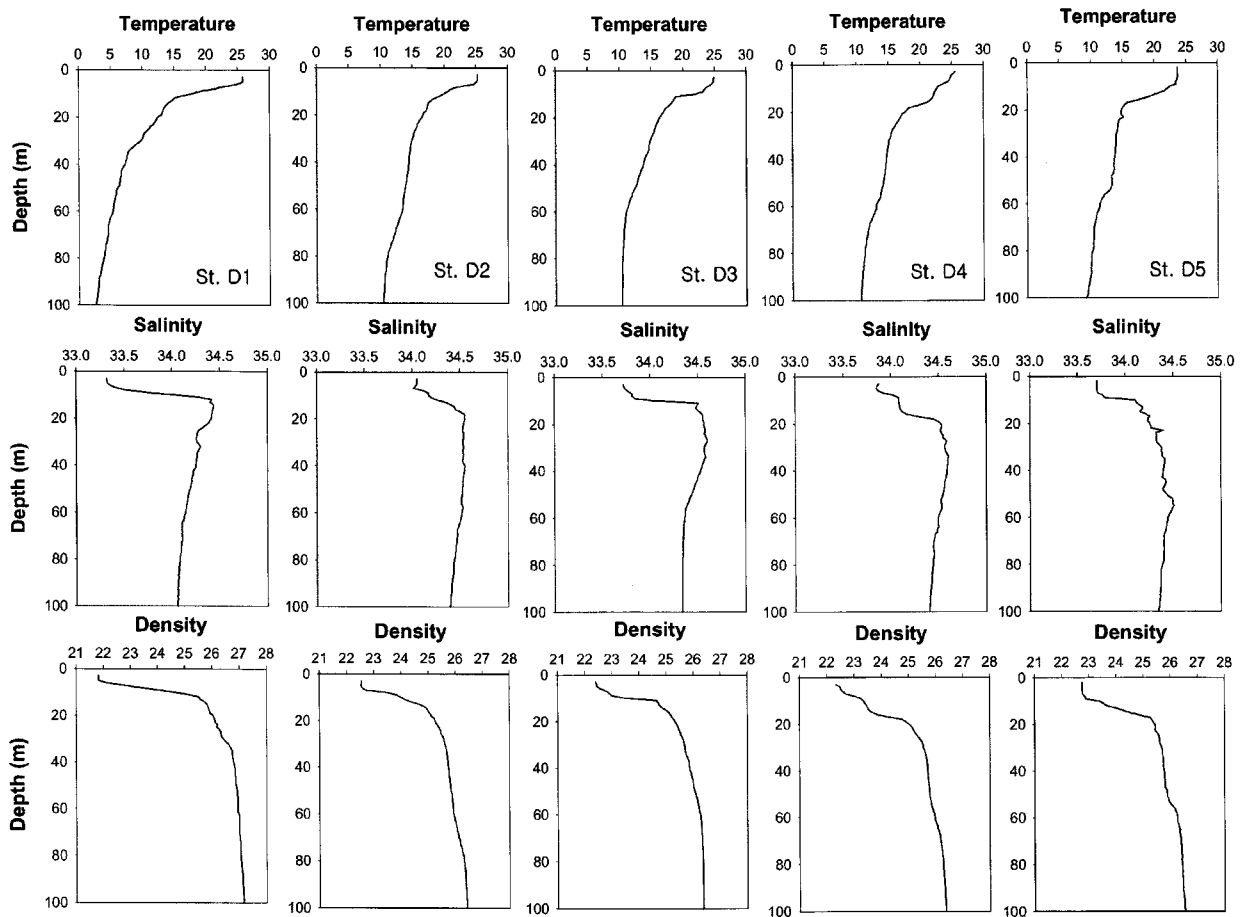


Fig. 3. Vertical profiles of temperature, salinity, and density in the Ulleung Basin during summer.

류 외부해역에 위치한 정점 D1과 D4에서는 영양염이 표층 30 m 이내에서 상당히 낮은 농도를 나타냈는데, 이것은 표층에서 식물플랑크톤이 영양염을 섭취하였고, 수직혼합도 활발히 일어나지 않아 심층에서 표층으로 영양염을 충분히 공급하지 못하였기 때문이다. 정점 D1과 D4에서 질산염 농도는 표층 30 m에서 $2 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이하의 낮은 값을 나타냈고 질산염/인산염 비율이 10 이하로, Redfield ratio(16)보다 확실히 낮게 관측되었는데, 이것은 질산염이 식물플랑크톤 성장을 제한하는 영양염이라는 것을 지시해준다. 정 등(1989)도 동해에서는 질산염 부족이 식물플랑크톤 성장을 제한한다고 보고한 바 있다. 외류 외부해역에 위치한 정점 D5에서는 질산염과 인산염 농도가 표층 30 m에서 비교적 높은 반면, 규산염 농도는 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 값을 나타냈다.

여름에 관측한 영양염의 수직분포는 봄에 관측한 것과는 상당히 다른 양상을 나타냈다. 질산염과 인산염의 수직분포는 외류 내부와 외부해역에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았지만, 규산염의 수직분포는 두 해역에서 뚜렷한 차이를 나타냈다(Fig. 6). 모든 정점에서 질산염과 인산염 농도는 전반적으로 표층 20 m에서는 비교적 낮은 값을 나타냈고 그 이하 수심에서 급격히 증가하였다(Fig. 5). 규산염 농도는 외류 내부해역에 위치한 정점 D2, D3, D4의 표층에서 수심 100 m까지 거의 일정하거나 약간 증가하였지만, 외류 외부해역에 위치한 정점 D1과 D5에서는 수심에 따라 급격히 증가하였다(Fig. 6). 봄과 달리, 여름에 외류 내부해역의 표

층 20 m에서 질산염과 인산염 농도가 매우 낮은 것은 표층에서 식물플랑크톤의 섭취에 의해 질산염과 인산염이 고갈되고, 표층해수가 강하게 성층화되어 심층에서 표층으로 질산염과 인산염의 공급이 거의 일어나지 않기 때문이다. 질산염과 인산염과는 달리, 규산염은 모든 정점, 표층 20 m에서 $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 내외의 비교적 높은 농도를 나타냈는데, 이것은 여름에는 규조류가 많이 존재하지 않아 규산염 섭취가 많이 일어나지 않기 때문인 것으로 생각된다. 여름에 측정된 $5 \mu\text{m}$ 이하의 엽록소가 총 엽록소에서 차지하는 비율은 68.9~84.7%로(Table 1), 모든 정점에서 $5 \mu\text{m}$ 이하 극미소 식물플랑크톤이 우세하게 존재하고 있어, 여름에는 규조류가 많이 존재하지 않는다는 설명을 입증해준다. 여름에는 모든 정점에서 질산염과 인산염이 표층에서 고갈되어 있기 때문에 식물플랑크톤 성장이 영양염 부족으로 인해 크게 제한받는 것으로 판단된다.

엽록소의 분포 특성

봄에 관측한 엽록소는 외류 외부해역에 위치한 정점 D1과 D4에서 높은 농도를 나타냈고 외류 내부해역에 있는 정점 D2와 D3에서는 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 6). 하지만 정점 D5는 외류 외부해역에 위치하고 있음에도 불구하고 엽록소 농도는 정점 D2와 D3보다 낮았다. 정점 D1에서 엽록소 농도는 표층에서 4.0 mg m^{-3} 로 최고값을 나타냈고 수심에 따라 점차적으로 감소하였다. 정점 D4에서 엽록소 농도는 수심 30 m에서 최고값, 3.4 mg m^{-3} 을 나타냈

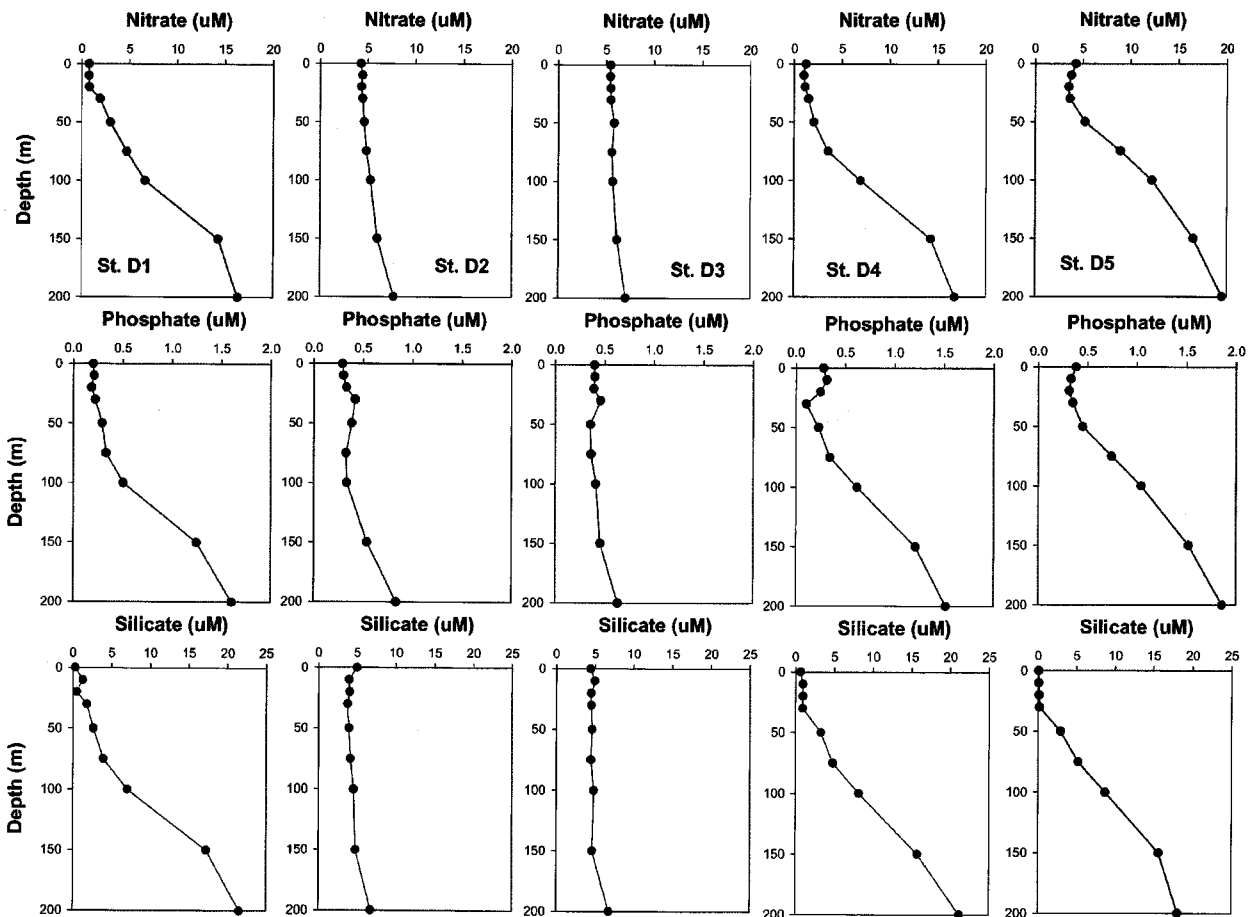


Fig. 4. Vertical profiles of nitrate, phosphate, and silicate in the Ulleung Basin during spring.

다. 외류 내부해역에 위치한 정점 D2와 D3에서 엽록소 농도는 표층에서 $1.0\sim 1.2\text{ mg m}^{-3}$ 으로 최고값을 나타냈고 수심에 따라 점차적으로 감소하였다. 표층에서 수심 100 m까지 엽록소를 모두 합한 총 엽록소 양은 정점 D2와 D3에서는 $79.5\sim 104\text{ mg m}^{-2}$ 이었고 정점 D1과 D4에서는 $216\sim 222\text{ mg m}^{-2}$ 로, 정점 D2와 D3에 비해 2배 이상 높았다(Table 1). 정점 D5에서 총 엽록소 양은 42.4 mg m^{-2} 로, 정점 D2와 D3보다도 낮았다. 따라서 외류 외부해역인 정점 D1과 D4에서는 식물플랑크톤의 봄철 대번성이 일어난 반면, 내부해역인 정점 D2와 D3에서는 대번성이 일어나지 않았다. 외류 내부해역에서 식물플랑크톤 대번성이 일어나지 않은 것은 표층 혼합층의 깊이가 150 m 이상으로 매우 깊어서 식물플랑크톤이 유광층에 체류하는 시간이 충분하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 봄에 외류 내부해역에서 관측한 유광층의 깊이는 40 m 가량으로 표층 혼합층의 깊이에 비해 매우 얇았다. 하지만 외류 외부해역에서는 유광층의 깊이가 표층 혼합층의 깊이와 유사하기 때문에 식물플랑크톤이 유광층에 체류하는 시간이 충분하여 식물플랑크톤 대번성이 일어난 것으로 생각된다. 정점 D2와 D3에서 $5\text{ }\mu\text{m}$ 이하의 엽록소가 총 엽록소에서 차지하는 비율은 $69.5\sim 81.2\%$ 로 비교적 높은 반면, 정점 D1과 D4에서 이 비율은 $29.8\sim 33.6\%$ 로, 정점 D2와 D3에 비해 절반도 되지 않았다(Table 1). 외류 내부해역에서는 크기가 아주 작은 식물플랑크톤이 많이 존재하였고 외류 외부해역에서는 크기가 비교적 큰 식물플랑크톤이 많이 존재하였다.

외류 내부해역에서 크기가 아주 작은 식물플랑크톤이 많이 존재하는 것은 수직혼합이 활발히 일어나고 있음을 지지해준다(Morel and Bricaud, 1981). 이런 사실은 외류 내부해역에서 식물플랑크톤 대번성이 일어나지 않은 이유가 수층 안정도가 낮아 수직혼합이 활발히 일어나기 때문인 것을 뒷받침해준다. 정점 D5는 외류 외부해역에 위치하고 있음에도 불구하고 엽록소 농도가 정점 D2와 D3보다도 낮았다. 정점 D5에서 규산염 농도는 표층 30 m에서 $0.5\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ 이하로 다른 정점들에 비해 매우 낮았으며(Fig. 4), $5\text{ }\mu\text{m}$ 이하 엽록소 비율도 91.2% 로, 정점 D2와 D3보다 높았다(Table 1). 따라서 정점 D5에서 총 엽록소 양이 가장 작은 것은 표층 해수에서 규산염 부족으로 인해 식물플랑크톤 성장이 크게 제한받았기 때문인 것으로 생각된다.

여름에 관측한 엽록소는 정점 D4를 제외한 모든 정점에서 수심 30 m 내외에서 최고 농도를 나타내 아표층 엽록소 최대를 보였다(Fig. 7). 정점 D4에서는 아표층 엽록소 최대가 관측되지 않았지만, CTD에 부착된 수중 형광측정기의 측정결과에 의하면, 수심 40 m에서 정점 D2와 유사한 크기의 아표층 엽록소 최대가 관측되었다. 따라서 정점 D4에서는 아표층 엽록소 최대가 존재하지 않는 것이 아니라 아표층 엽록소 최대가 나타나는 수심에서 시료채집을 하지 못한 것이다. 외류 내부해역에 위치한 정점 D2와 D3에서 아표층 엽록소 최대는 각각 3.2 와 5.3 mg m^{-3} 으로, 외류 외부해역에 위치한 정점 D1과 D5에서 관측한 것(각각 1.4 와 2.4 mg

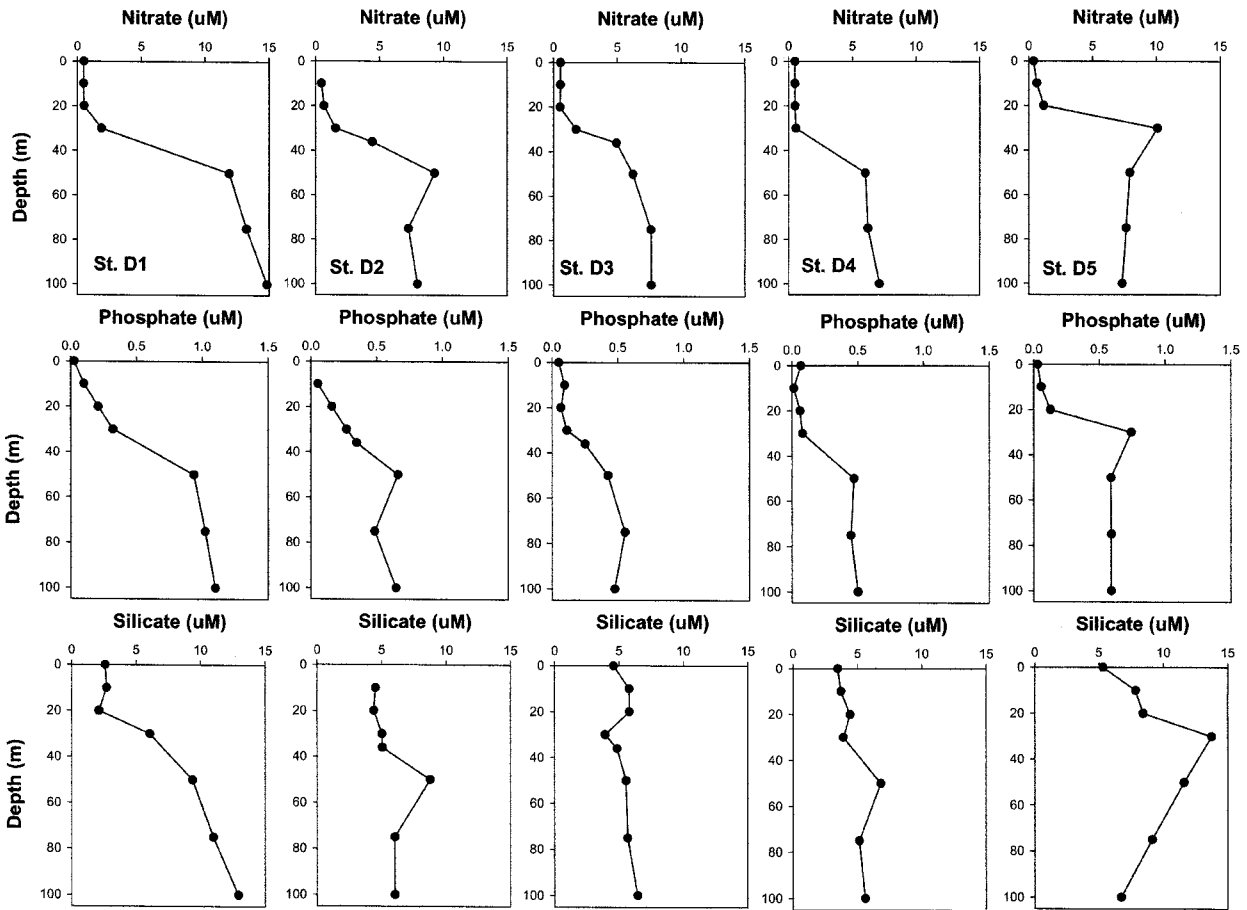


Fig. 5. Vertical profiles of nitrate, phosphate, and silicate in the Ulleung Basin during summer.

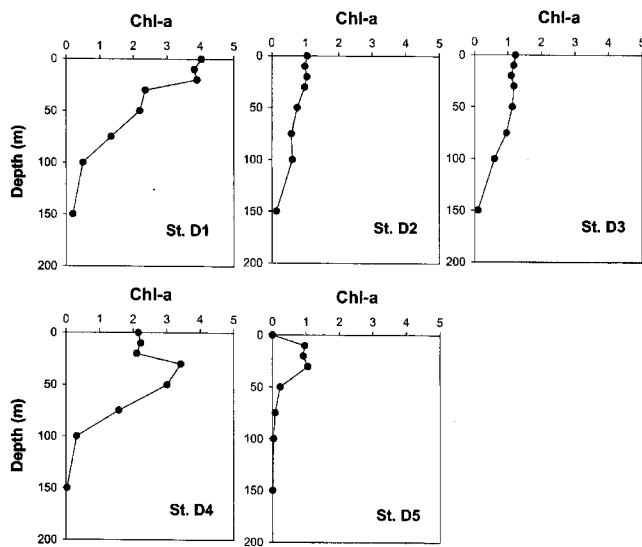


Fig. 6. Vertical profiles of chlorophyll in the Ulleung Basin during spring.

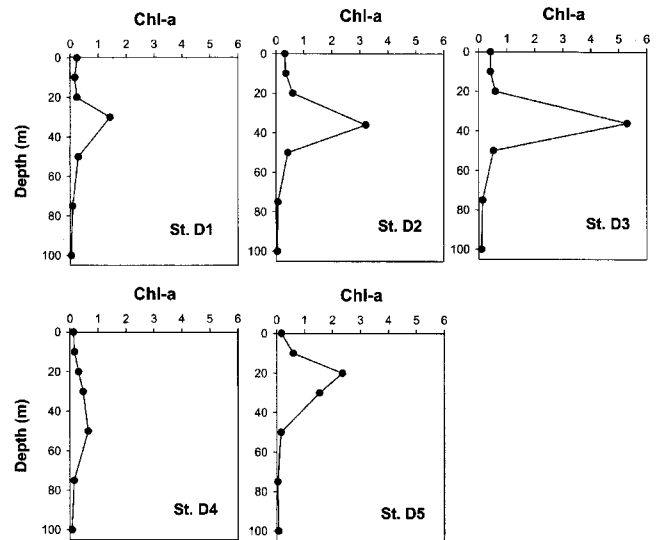


Fig. 7. Vertical profiles of chlorophyll in the Ulleung Basin during summer.

m^{-3})보다 높았다. 만약 수중 형광 측정기의 측정결과에 따라, 정점 D4에서 아표층 엽록소 최대값이 정점 D2에서 측정된 것과 같다고 가정하면, 와류 내부해역에서 측정된 평균 아표층 엽록소 최대값은 와류 외부해역에서 측정된 값보다 두 배가량 높았다. 또한, 표층에서 수심 100 m까지 합한 총 엽록소 양도 정점

D2와 D3에서 각각 71.8 과 $108 \text{ mg } m^{-3}$ 으로, 정점 D1과 D5에서 측정된 값들(각각 35.9 와 $59.0 \text{ mg } m^{-3}$)보다 두 배가량 높았다 (Table 1). 따라서 와류 내부해역에서 측정된 총 엽록소 양도 와류 외부해역에서 측정된 것보다 두 배가량 높게 관측되었다. Zhang *et al.* (2001)은 시계방향 와류 내부에서 “eddy turbulence-

Table 1. Percentages of < 5 μm size-fractionated chlorophyll and depth-integrated chlorophyll in the Ulleung Basin during spring and summer.

	Spring		Summer	
	< 5 μm chl (%)	total chl (mg m^{-2})	< 5 μm chl (%)	total chl (mg m^{-2})
D1	29.8	222	70.4	35.9
D2	81.2	79.5	78.4	71.8
D3	69.5	104	71.8	108
D4	33.6	216	84.7	31.8
D5	91.2	42.4	68.9	59.0

induced diffusive flux”에 의해 심층에서 표층으로 영양염이 공급되어 일차생산력과 식물플랑크톤 생물량이 증가한다고 보고하였다. 따라서 여름동안에 시계방향 와류 내부에서 관측한 엽록소 농도가 와류 외부해역에 비해 두 배가량 높은 것은 와류 내부에서 “eddy turbulence-induced diffusive flux”에 의해 심층으로부터 엽록소 최대가 관측되는 수심으로 영양염이 공급되기 때문인 것으로 판단된다. 와류 중앙에 위치한 정점 D3, 수심 36 m에서 관측한 엽록소 농도는 5.3 mg m^{-3} 으로 매우 높은 값을 나타내는데, 이렇게 높은 엽록소 농도가 유지되기 위해서는 심층에서 영양염이 공급되어야 한다. 따라서 여름에는 봄과는 달리, 와류가 심층에 풍부한 영양염을 표층으로 공급하여 식물플랑크톤 생물량을 증가시켰다.

결 론

동해 울릉분지에서 거의 매해 나타나는 시계방향 와류는 식물플랑크톤 생물량에 매우 큰 영향을 미치는데, 그 영향이 봄과 여름에 다르게 나타났다; 봄에는 시계방향 와류가 식물플랑크톤 생물량을 제한하는 반면, 여름에는 반대로 식물플랑크톤 생물량을 증가시킨다. 시계방향 와류가 식물플랑크톤 생물량에 미치는 영향은 다음과 같은 과정을 통해 봄과 여름에 다르게 나타났다. 봄에는 와류 내부해역이 와류에 의해 외부해역과 해수교환이 거의 일어나지 않아 겨울 해수특성을 그대로 유지하여 수온, 염분, 밀도가 표층에서 수심 150 m까지 큰 변화없이 거의 일정하였다. 이런 해수특성 때문에 와류 내부해역에서 표층해수에 영양염이 풍부함에도 불구하고 수직혼합이 활발히 일어나 식물플랑크톤이 유광층에 체류하는 시간이 충분하지 않아서 봄철 대번성이 일어나지 않았다. 여름에는 와류 내부해역에서도 표층 20 m에 성층이 강하게 생겨서 수직혼합이 거의 일어나지 않아 표층해수의 영양염이 고갈되었으며, 이로 인해 엽록소는 아표층 엽록소 최대를 나타냈다. 와류 내부해역에서 측정된 총 엽록소 양은 와류 외부해역에서 측정된 것보다 두 배가량 높았는데, 이렇게 와류 내부에서 식물플랑크톤 생물량이 높게 관측된 것은 시계방향 와류 내부에서 “eddy turbulence-induced diffusive flux”에 의해 심층으로부터 엽록소 최대가 관측되는 수심으로 영양염이 공급되기 때문이다.

감사의 글

본 연구에 많은 도움을 주신 연구선 이어도호 선장님과 승조원 여러분께 감사드립니다. 또한 현장조사에 많은 도움을 주신 한국

해양연구원 노재훈, 신창용, 양은진, 최동한 박사님께도 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구원의 일반사업인 ‘동해 탄소순환 연구(PE97603)’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 정창수, 김재형, 박용철, 박상갑, 1989. 한국 동해의 기초생산력과 질소계 영양염의 동적관계. *한국해양학회지*, **24**: 52-61.
- 안희수, 심경신, 신흥렬, 1994. 동해 남서해역에서의 난수성 소용돌이에 대하여. *한국해양학회지*, **29**: 152-163.
- 이홍재, 변상경, 방인권, 조철호, 1995. 동해남서해역 와류의 물리적 구조. *한국해양학회지*, **30**: 170-183.
- Fernandez, C., P. Raimbault, G. Caniaux, N. Garcia and P. Rimmelin, 2005. Influence of mesoscale eddies on nitrate distribution during the POMME program in the northeast Atlantic Ocean. *J. Mar. Syst.*, **55**: 155-175.
- Franks, P.J.S, J.S. Wroblewski and G.R. Flierl, 1986. Prediction of phytoplankton growth in response to the frictional decay of a warm-core ring. *J. Geophys. Res.*, **91**: 7603-7610.
- Martin, A.P. and K.J. Richards, 2001. Mechanisms for vertical nutrient transport within a North Atlantic mesoscale eddy. *Deep-Sea Res. II*, **48**: 757-773.
- McGillicuddy, D.J. and A.R. Robinson, 1997. Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res.*, **44**: 1427-1450.
- Mizobata, K., S.I. Saitoh, A. Shiimoto, T. Miyamura, N. Shiga, K. Imai, M. Toratani, Y. Kajiwaru and K. Sasaoka, 2002. Bering Sea cyclonic and anticyclonic eddies observed during summer 2000 and 2001. *Prog. in Oceanogr.*, **55**: 65-75.
- Morel, A. and A. Bricaud, 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, **28**: 1375-1393.
- Seki, M.P., J.J. Polovina, R.E. Brainard, R.R. Bidigare, C.L. Leonard and D.G. Foley, 2001. Biological enhancement at cyclonic eddies tracked with GOES thermal imagery in Hawaiian waters. *Geophys. Res. Lett.*, **28**: 1583-1586.
- Shin, H.-R., C.-W. Shin, C. Kim, S.-K. Byun and S.-C. Hwang, 2005. Movement and structural variation of warm eddy WE92 for three years in the Western East/Japan Sea. *Deep-Sea Res.*, **52**: 1742-1762.
- Vaillancourt, R.D., J. Marra, M.P. Seki, M.L. Parsons and R.R. Bidigare, 2003. Impact of a cyclonic eddy on phytoplankton community structure and photosynthetic competency in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. I*, **50**: 829-847.
- Yentsch, C.S. and D.A. Phinney, 1985. Rotary motions and convection as a means of regulating primary production in warm core ring. *J. Geophys. Res.*, **90**: 3237-3248.
- Zhang, J.-Z., R. Wanninkhof and K. Lee, 2001. Enhanced new production observed from the diurnal cycle of nitrate in an oligotrophic anticyclonic eddy. *Geophys. Res. Lett.*, **28**: 1579-1582.

2007년 9월 7일 원고접수

2007년 10월 25일 수정본 채택

담당편집위원: 최만식