

감포-울기 연안해역에서 발생하는 냉수대 현상과 해상풍과의 관계

이동규 · 권재일 · 한상복*
 부산대학교 해양학과, *국립수산진흥원 어장환경과

The Wind Effect on the Cold Water Formation Near Gampo-Ulgi Coast

Dong-Kyu LEE, Jae-Il KWON and Sang-Bok HAHN*

Dept. of Marine Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

*Fisheries Oceanography Division, National Fisheries Research and Development Institute, Pusan 619-900, Korea

The cold water events near Gampo-Ulgi coast in summers between 1987 and 1994 are studied using sea surface temperature records at the coastal stations, ocean winds measured by SSM/I and AVHRR SST images. The response time of the cold water events by upwelling is less than two days and surface cold water expands up to the Ulleung Island. An analysis of 61 upwelling favorable winds indicates that the surface water temperature drops more than 1°C in 80 % of the south-westerly wind events. The linear correlation coefficient between wind impulses and the maximum temperature drops is good (0.6). It is found that the major cause of the cold water events is the along-shore wind in summer. The bottom topography and off-shore direction of the East Korean Warm Current by the potential vorticity conservation near Gampo coast also contribute the formation of the cold water along the southeast coast of Korea.

Key words: upwelling, Gampo-Ulgi

서 론

우리나라 동해남부 해안에서는 용승현상으로 인한 냉수대가 감포-울기를 중심으로 매년 여름철에 출현하며 이에 대한 많은 연구 결과가 있다 (An; 1974, Lee; 1978, Lim; 1973). Kim and Kim (1983)은 용승하는 저층수에 대한 수괴 분석을 하였는데 염분도가 상대적으로 낮고 용존산소가 높은 특성을 가지는 북한한류(NKCW)라고 주장하였고, Lee (1983)는 한국 남동해안의 정점에서 5년 동안의 부산의 바람, 해수면 높이 (sea level), 해표면 온도 자료를 분석한 결과, 감포-울기 근해에서의 냉수현상은 강한 남서풍이 3일 이상 계속되었을 때 생성되었고 이때의 해안에 평행한 성분의 평균 바람속도는 4 m/s이었다고 발표하였다. Lee and Na (1985)는 감포-울기 주변 해역에서의 냉수대 현상을 동한난류(EKWC)에 의한 경계층 경사 (baroclinic tilting), 울산 앞바다에서 100~150 m 수심대가 넓어지고 경사가 완만해지는 해저 지형 그리고 남서풍의 세기 등이 복합적으로 작용하여 형성되는 것으로 설명하였으며, Seung (1974)은 냉수대 발생의 주원인은 표층수와 하층수의 속도차에 의해 경계층이 해안 쪽에서는 수심이 얕고 외해에서는 수심이 깊게 형성되는 경계층 경사와 약한 바람의 상호작용에 의한 것이라고 하였다. Seung (1984)은 간단한 수치모델을 이용하여 남서풍이 불 때 저층에서 남한류가 생성되고 또한 바람에 의한 Ekman 수송에 의해 용승 현상이 동해 남부 해안

뿐만 아니라 동해 여러 군데에서 일어날 가능성을 보였다. 그러나 해저지형을 고려하지 않아 포항 이북에서도 용승 현상이 일어나는 실제와는 차이가 있는 결과를 보여주었다. Byun (1989)은 Csanady (1982)의 용승모델을 이용하여 냉수대가 발생하는 위치가 바람의 영향 뿐 아니고 한국 남동해안 부근의 해안선 구조에 의해서도 결정될 수 있음을 보였고, 부산에서의 바람자료를 이용한 바람합력 (바람응력을 시간으로 적분한 것)을 계산하여 여름철 냉수는 최소 바람합력인 10 m²/s 이상일 때에만 해표면에 나타날 수 있다고 하였다. 그러나 위에서 열거한 이제까지의 연구는 육지에 위치한 부산의 바람자료를 이용한 것으로 해상 10 m 높이에서의 바람응력 추정에는 어려움이 있어 바람에 의한 해수의 반응 속도나 반응 형태, 용승과 해상풍과의 정량적인 상관 관계를 정립하지는 못하였다.

본 연구는 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)를 이용한 해상풍 자료, 국립수산진흥원에 의해 관측된 울기와 감포의 일일 연안정지 수온관측자료, 정선 관측자료 및 NOAA위성의 해표면 온도 자료를 이용하여 감포-울기부근의 냉수대 출현과 바람과의 상관관계를 정량적으로 규명하는 데에 있다. 제 2장에서는 자료 및 자료 처리에 대한 상세한 설명을 하였다. 3장에서는 위성온도 사진을 이용하여 바람에 의한 용승현상의 반응 형태와 반응 속도 등을 분석하였고, 1987년부터 1994년까지 8년 동안의 울기와 감포의 여름철 수온과 해상풍 자료를

이용하여 바람과 냉수대 출현과의 상관 관계를 설명하였고 4장에서는 요약과 결과에 대한 토의를 하였다.

자 료

울기와 감포의 수온자료는 국립수산진흥원의 연안정지 관측자료로서 매일 오전 10시에 측정된 표층수온 값이며 1987년부터 1994년까지 8년간 여름철 (6월~9월) 4개월 간의 자료가 이용되었다. 바람자료는 같은 기간동안 그림 1에 표시한 해상 격자점 A (36°N, 130°E)에서의 SSM/I

바람자료를 사용하였다(그림 1). SSM/I 해상풍 자료는 인공위성에서 초단파를 쏘아 반사되는 양을 측정하여 바람에 의한 해표면의 산란 상태를 추정함으로써 계산한 풍속 (Atlas; 1996)과, ECMWF (European Center for Medium Weather Forecasting)에서 위성으로 관측한 구름의 이동방향을 사용한 수치모델 (numerical model)의 결과에서 나온 풍향을 합성한 자료이다.

본 연구에서는 격자점에서의 바람자료를 조사해역인 남동해안에 평행하도록 좌표이동을 하여 Ekman 수송에 직접적인 영향을 주는 연안에 평행한 방향 (y성분)의

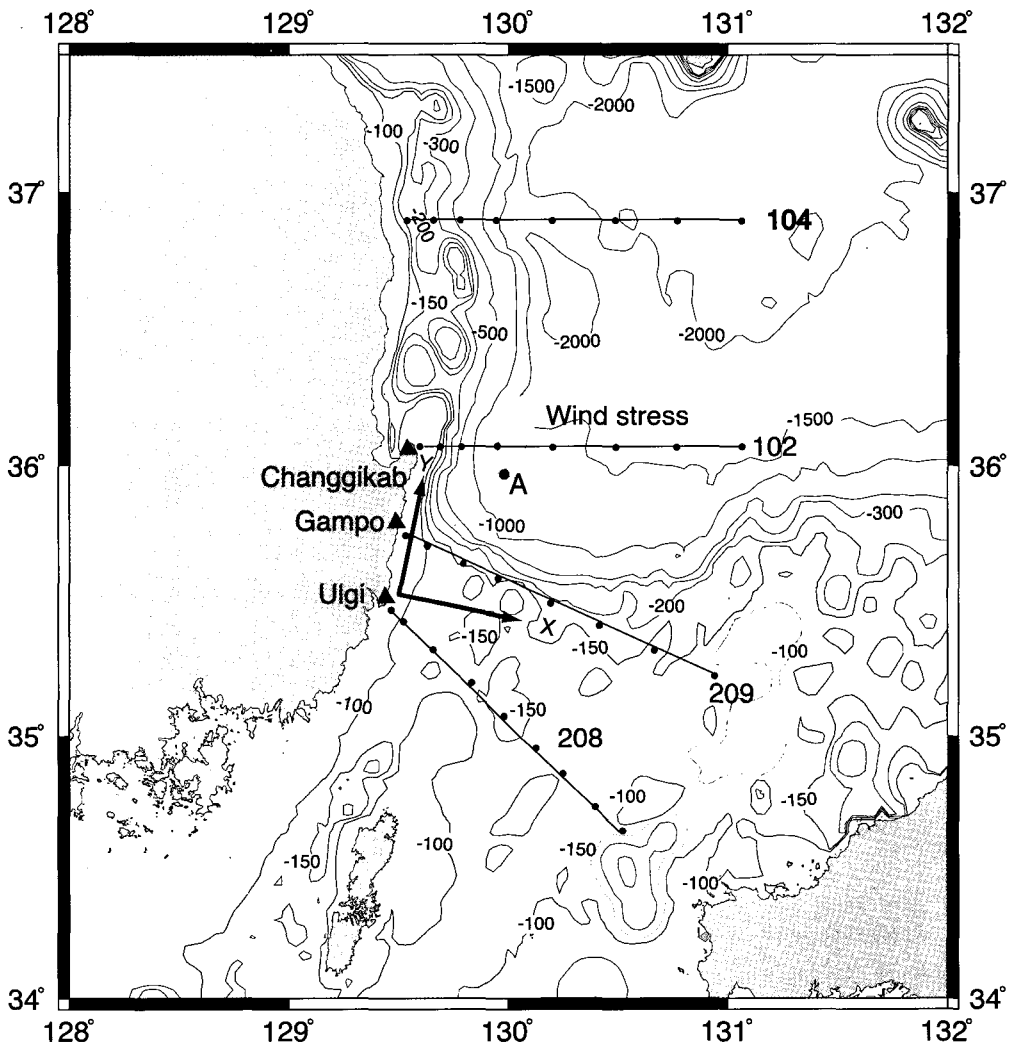


Fig. 1. Locations of SSM/I data point (A), daily sea surface temperature observation (black triangles) and routine hydrographic stations (black dots) used in this study. Gray colored area represents the bottom depth between 100 and 150 m and the transformed coordinate for the wind stress parallel to the coast line is drawn near Ulgi station.

바람응력을 식 (1)로 계산하였다.

$$\tau_s = C_D \cdot \rho_{air} \cdot |W| \cdot W, \quad (1)$$

여기서 τ_s 는 바람응력, C_D 는 항력계수 (drag coefficient), ρ_{air} 는 대기의 밀도, W 는 바람의 속도 성분 (wind speed), $|W|$ 는 연안에 평행한 성분의 풍속이다. 여기에서 사용된 항력계수는 바람의 속도와 수온과 기온의 온도차를 이용한 함수로 나타낸 것으로 식 (2)에 나타내었다 (Bunker, 1976).

$$C_D \times 10^3 = A_1 + A_2 W + A_3 T - A_4 W^2 - A_5 T^2 - A_6 W T \quad (2)$$

상수인 $A_1=0.934$, $A_2=0.0788$, $A_3=0.0868$, $A_4=0.000616$, $A_5=0.0012$, $A_6=0.00214$ 이며 W 는 wind speed, T 는 기온과 해표면 온도 차이이다.

그림 2는 1992년 여름 부산 기상대에서 관측된 바람과 SSM/I에 의한 해상 격자 점 A에서의 해상풍과의 비교이며 다른 해에도 거의 같은 경향을 보이고 있다. 남서풍이 불 때에는 대체적으로 부산의 바람과 SSM/I에 의한 해상풍이 잘 일치하나 북풍이 불 때에는 잘 일치하지 않는 것으로 나타났다. 이는 부산의 지형이 남쪽으로는 바다쪽으로 터져있으나 북쪽은 산에 의해 막혀져 있어 바람이 지형의 영향을 받기 때문이다. 따라서 SSM/I에 의해 추정된 해상풍은 비록 격자 간격 ($2.5^\circ \times 2^\circ$)이 조밀하지 못한 결점이 있으나 기압도로 계산한 해상풍보다는 실측치에 근접한 것으로 보인다.

결 과

1. 30년 평균 수온의 일변화와 바람응력

그림 3은 장기갑, 감포 그리고 울기에서의 1966년부터 1995년까지 30년동안 수산진흥원 연안 정지자료 (한 외; 1997, 한 외; 1997)를 평균한 일평균 수온과, 1987년부터 1994년까지 8년동안 해상점 A에서의 여름 4개월동안 평균한 일평균 해상풍이다. 장기갑과 감포에서의 일평균 수온을 비교해보면, 2월 초 겨울철 연 최저 수온은 장기갑이 감포보다 약 3도가량 낮으나 9월 초 여름철 최고 수온은 장기갑과 감포가 비슷하다. 여름 3개월 특히, 냉수대 현상이 시작되는 5월 중순부터 8월 하순 까지는 감포-울기가 장기갑보다 남쪽에 위치하는 데에도 불구하고 평균 $1.5 \sim 3^\circ\text{C}$ 정도 수온이 낮아, 여름철 용승현상이 감포-울기 앞 해상에 미치는 영향을 잘 보여준다. 감포-울기에서는 특히, 7월 중순에 약 10일 정도 평균수온이 7월 상순이나 7월 하순보다 1°C 정도 하락하는 것을 보여 냉수대 현상이 7월 중순에 가장 빈번히 일어나는 경향을 나타낸다. 이 7월 중순의 빈번한 냉수대 현상은 바람과도 일치하는데, 7월 5일부터 7월 24일까지 20일간 평균 바람은 남서풍이었으며 응력은 평균 0.2 dyne/cm^2 정도였다. 평균 응력 0.7 dyne/cm^2 는 약 7 m/s 정도의 강한 남서풍이 불었을 때 생기는 응력을 나타낸다. 7월의 강한 남서풍은 7월에 빈번히 발생하는 장마 전선의 영향으로 보인다. 장기갑이 감포나 울기보다 북쪽에 위치하면서도 냉수대 발생의 영향을 거의 보이지 않는 것은 해안선의 방향이 감포의 북북동 방향에서 북북서 방향으로 바뀌

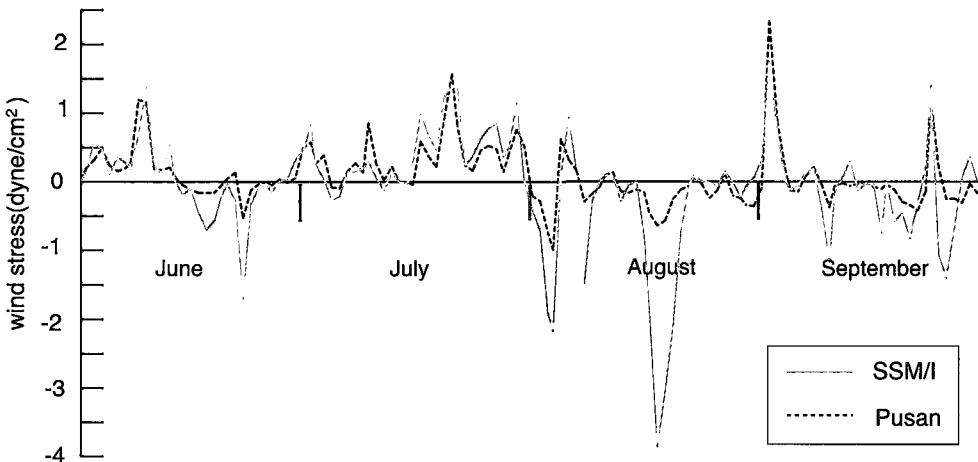


Fig. 2. The wind stress measured at Pusan meteorological station and at station A in Figure 1 by SSM/I in summer of 1992.

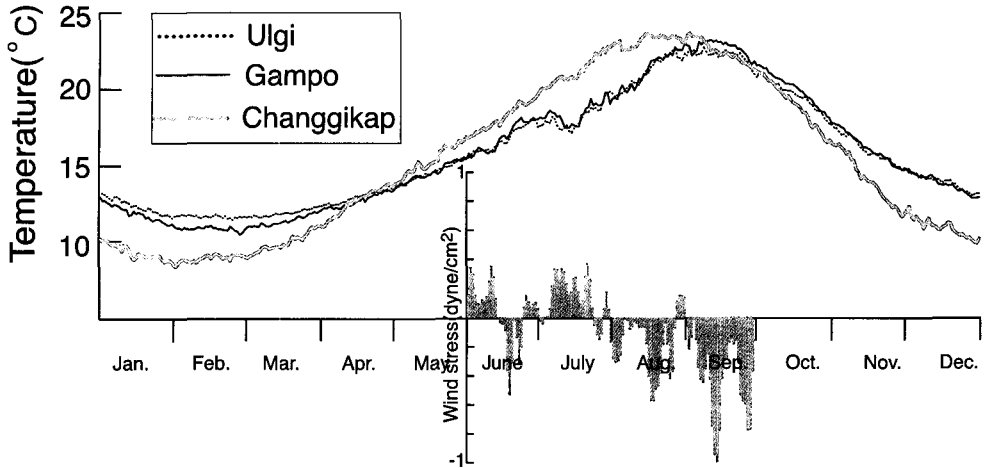


Fig. 3. Daily mean temperature at three coastal stations averaged over 30 years (1966~1995) and daily mean wind stress (dyne/cm^2) averaged over 8 years (1987~1994) in summer at SSM/I data point A.

었으며, 또한 연안에서 형성된 냉수대가 외해로 확산되는 것을 나타낸 그림 4와 같이 냉수대는 해안선에 평행하게 확산되다가 해안선의 방향이 바뀌는 감포 북부 해안에서 해안선을 떠나 울릉도 방향인 북동방향으로 주로 확산하기 때문이다. 그러나 감포-울기에서 냉수대 현상이 가장 빈번히 일어나는 7월 중순에 약 0.5°C 정도의 수온 하강 현상을 보여 장기잡에서도 냉수대 현상의 영향이 나타났다.

8월부터 9월 초순까지 연구기간 8년 동안의 평균 바람이 북풍이었는데도 감포-울기 해안의 수온이 장기잡보다 낮은 이유는 이 기간 중에도 남풍으로 인한 냉수대 현상이 빈번히 일어났다는 점이다. 연구기간 8년 중 남풍이 3일 이상 분 남풍 이벤트 중 약 30%가 8월과 9월에 발생했다(그림 6 참조). 연구기간동안 8월부터 9월 10일까지 총 328일 중 남풍이 분 날 수는 절반에 조금 못 미치는 157일이었으나 남풍이 불 때의 평균 바람응력(0.3 dyne/cm^2)은 북풍 때의 바람응력(0.6 dyne/cm^2)보다 절반 정도로 약하여 평균적으로는 북풍이 분 것으로 나타났다. 이 기간 중 북풍일 때 바람이 강한 이유는 주로 8월 중 우리나라를 내습하는 태풍의 영향으로 보인다.

2. AVHRR SST자료와 냉수대의 발달 상황 비교

그림 4는 1994년 7월 11일부터 16일까지 진행된 냉수대로 20°C 등온선을 따라 바람에 의한 냉수대 발달상황을 나타내었다. 이 때 주변해역의 수온은 약 23°C 였다. 그림 4의 우측편의 화살표는 해안선에 평행한 성분의 바람응력을 나타내고 있으며 각 그림에서 굵은 점선, 점선, 실선이 날짜 순으로 표시되어 있다. 94년 7월은 초순부터 강한 남서풍이 불기 시작하여 울기와 감포 모두에서 냉

수대가 발생하였으며 7월 10일은 바람응력이 0.45 dyne/cm^2 이었고 10일 이전까지 계속 불어온 남서풍의 영향으로 7월 11일의 냉수대는 감포에서 거제도 연안까지 넓게 발달하여 남동해안을 길게 감싸고 있는 모습을 보이고 있다. 7월 12일 06시경에는 11일 남서풍이 약해져 냉수대 세력이 많이 감소하였으나 감포-울기 해역에서 외해쪽으로 혀 모양을 띄며 퍼져 나가는 형상이다. 7월 11일과 12일에 바람이 0.1 dyne/cm^2 정도로 약해진 관계로 7월 13일에는 냉수대의 세력이 연안쪽으로 후퇴되었다. 7월 13일 0.67 dyne/cm^2 의 강한 바람이 불기 시작하여 14일 05시경에는 울산 앞바다를 중심으로 거제도와 포항으로 이르는 거대한 냉수대로 확장된 모습을 보인다. 14일에도 비슷한 크기의 바람이 (0.65 dyne/cm^2) 불었으며 15일 바람이 약해지면서 다시 냉수대가 혀 모양으로 북동방향의 외해로 확장하는 모습을 보여준다. 15일에 바람이 줄어들면서 16일에는 바람이 방향이 북풍으로 바뀌었고 냉수대의 세력은 연안 좁은 해역으로 완전히 후퇴하였다. 바람에 의한 해수의 반응시간이 하루나 이틀 정도로 지금까지 발표되어온 반응시간 보다 빠르게 반응하는 것으로 보이며 바람의 방향이나 응력 크기의 변동으로 인한 냉수대의 변화가 잘 나타난다. 즉, 남서풍이 강한 하루나 이틀 후에는 냉수대 세력이 포항 앞 바다에서부터 거제도 부근까지 확장되었고 남서풍이 약해지면 그 다음날 바로 감포-울기 연안으로 세력이 후퇴되는 반면 혀 모양으로 연안을 떠나 외해쪽으로 세력이 확장된다. 한(1995)은 위성 온도 사진을 이용하여 감포 연안에서의 냉수대 확장속도를 계산하였는데 약 30 km/s 정도였다. 이 속도는 하루 25 km 정도의 확장속도이며 같은 방향의 바람이 지속적으로 7일 정도 분다면 울릉도 근해까지

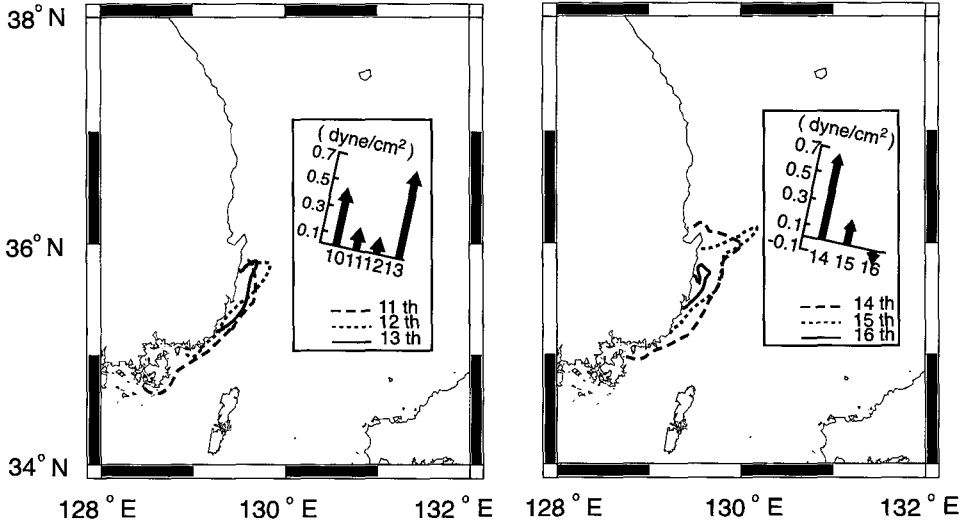


Fig. 4. The horizontal distribution of the sea surface temperature less than 20°C from AVHRR images and the wind stresses from 11th to 16th of July, 1994.

확산된다는 것을 의미한다. 이러한 혀 모양의 냉수대 확장은 위성사진에 의해 잘 관측되는데, 그림 5는 94년 8월 2일부터 9일까지 발생한 냉수대가 혀 모양으로 확장되어 울릉도 주변 해역까지 퍼져있고 울기 앞바다의 냉수대는 연안으로 후퇴된 모양을 잘 보여주고 있다.

3. 감포-울기 해역에서의 일일 수온 변화와 바람응력
 그림 6은 1987년부터 1994년까지 8년간 여름 4개월 동안의 감포와 울기에서의 수온과 바람응력을 나타낸 것이다. 수온과 바람응력은 다음과 같은 Gaussian필터를 사용하여 기록이 큰 일일 변화를 제거한 다음 그림에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 (\bar{\tau}, \bar{T})_d &= w_1 \times (\tau, T)_{d-1} + w_2 \times (\tau, T)_d + w_3 \times (\tau, T)_{d+1}, \\
 w_1 &= 0.2778, w_2 = 0.4444, w_3 = 0.2778
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

가는 실선은 1966년부터 1995년까지 평균한(한 외, 1997) 일평균 수온을 나타내고, 그 전날보다 2°C 이상 수온이 하강하였을 때 바람응력과 감포-울기의 수온을 검은 굵은 선으로 표시하였다.

1987년은 엘니뇨가 발생한 해로 7월과 8월에 계속적으로 남서풍이 불어 냉수대가 2개월동안 계속되었다. 최저로 9.5°C까지 수온이 내려가 겨울철의 수온인 2월초의 연중 최저온도에 육박하였다. 이 여름 2개월 동안의 남서풍은 바람의 방향이 바뀐 9월 초순까지 영향을 주어 9월 중순이 되어서야 평년 수온을 회복하였다. 1988년과 1989년은 라니냐(동태평양 적도부근 해역의 수온이 평년

보다 1.5°C 높았음) 해로서 냉수현상이 극히 적게 발생하였고 8월과 9월은 북풍이 우세하여 평년보다 평균 수온이 3°C정도 높았다. 1990년부터 1994년까지는 1993년을 제외하고는 남서풍에 의한 냉수대 현상과 북풍에 의한 온수대 현상이(상층수의 하강으로 평년보다 수온이 높아지는 현상) 발생하는 날들이 반복되었고 1994년 8월 초에는 27°C에서 14.5°C로 수온이 하강하여 연구기간 8년 중 가장 하강 폭이 큰 12.5°C 정도 수온이 하강하였다. 연구 기간중 북풍이 불 때 냉수대 현상이 일어난 경우가 단지 2회 였는데 89년 9월 초에는 약한 남서풍 후 불기 시작한 북풍으로 수온이 약 3°C정도 하강하였고 90년 8월 초에는 바람이 거의 없는 날이 7월 말과 8월 초에 10여일 계속되다가 8월 5일부터 8월 8일까지의 약한 북풍에 울기에서 수온이 약 3°C정도 하강하였다(그림 6-a에 화살표로 표시). 위의 경우 모두 2-3일 정도의 짧은 냉수대 현상이었으며 바람 이외의 영향으로 수온이 하강하였다고 본다.

남서풍과 용승 현상과의 상관관계를 알아보기 위하여 남서풍이 3일 이상 계속적으로 불었을 경우를 통계처리하였는데, 연구기간 8년 동안에 총 61회였다. 이 중 수온이 1°C 이상 떨어진 횟수는 감포가 42회(69%)였으며 울기는 31회(50%)여서 울기보다 감포에서 냉수대 현상이 잘 일어난다는 것을 볼 수 있다. 이것은 해저 지형의 영향으로 추측되며 Lee and Na(1985)가 지적한 100~150m의 수심대가 울산 앞에서 감포 앞까지 넓어지고 경사가 완만해져 포텐셜 와도 보존에 의해 외해로 흐르는 시계 방향의 성분이 감포 앞에서 최대가 되어 일어나는

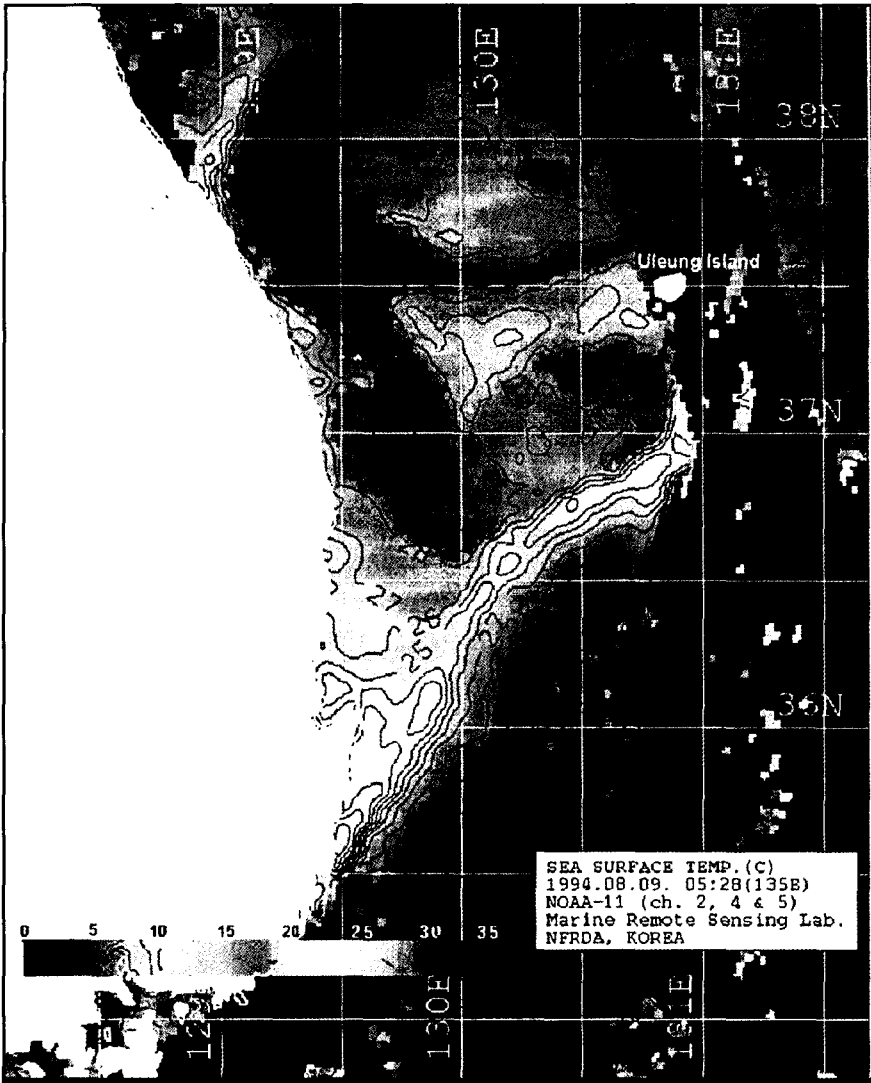


Fig. 5. The satellite image of the sea surface temperature on August 9, 1994.

현상이라고 볼 수 있다(그림 1 참조). 수온이 1°C 이상 떨어졌을 때를 냉수대 현상으로 본다면 냉수대 출현 중 평균 하강온도는 감포에서 3.9°C였고 울기에서는 3.4°C여서 크게 차이는 나지 않았다. 그림 7은 연구기간 중 남서풍이 분 61회 경우의 바람합력(wind impulse; 바람우력을 시간으로 적분한 값)과 용승이 일어나기 전과 냉수대가 형성되었을 때의 최저 수온과의 차와의 상관관계를 그린 그림이다. 온도차는 울기와 감포중 온도차가 큰 경우를 택했으며, 바람 합력은 Csanady(1982)에 의해 사용된 값으로 Byun(1989)이 울기에서 발생하는 냉수대 발생을 연구하는데 사용한 바 있으며 다음과 같이 계산한다.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\rho_a}{\rho_w} C_{DN} |\vec{W}| dt \tag{4}$$

여기서 C_{DN} 은 식(1)에서 사용한 CD와 값은 같으나 단위가 없는 항력계수(neutral drag coefficient)이며, ρ_a 는 공기의 밀도, ρ_w 는 해수의 밀도를 의미한다. 그림 7에 나타난 바람합력은 남서풍이 불기 시작한 날부터 수온이 최대로 떨어졌을 날까지 바람우력을 적분한 값이다. Byun(1989)은 해수를 3개 층으로 단순화한 2차원 모델을 이용하여 냉수괴인 중층수의 경계가 해표면에 올라오는 경우에 필요한 최소 바람합력을 계산하였는데 그가 사용한 표층의 밀도는 1983년 8월 관측한 실측치로서(1.0215 g/cm³) 여름철 양자강수와 섞인 남해저염수의

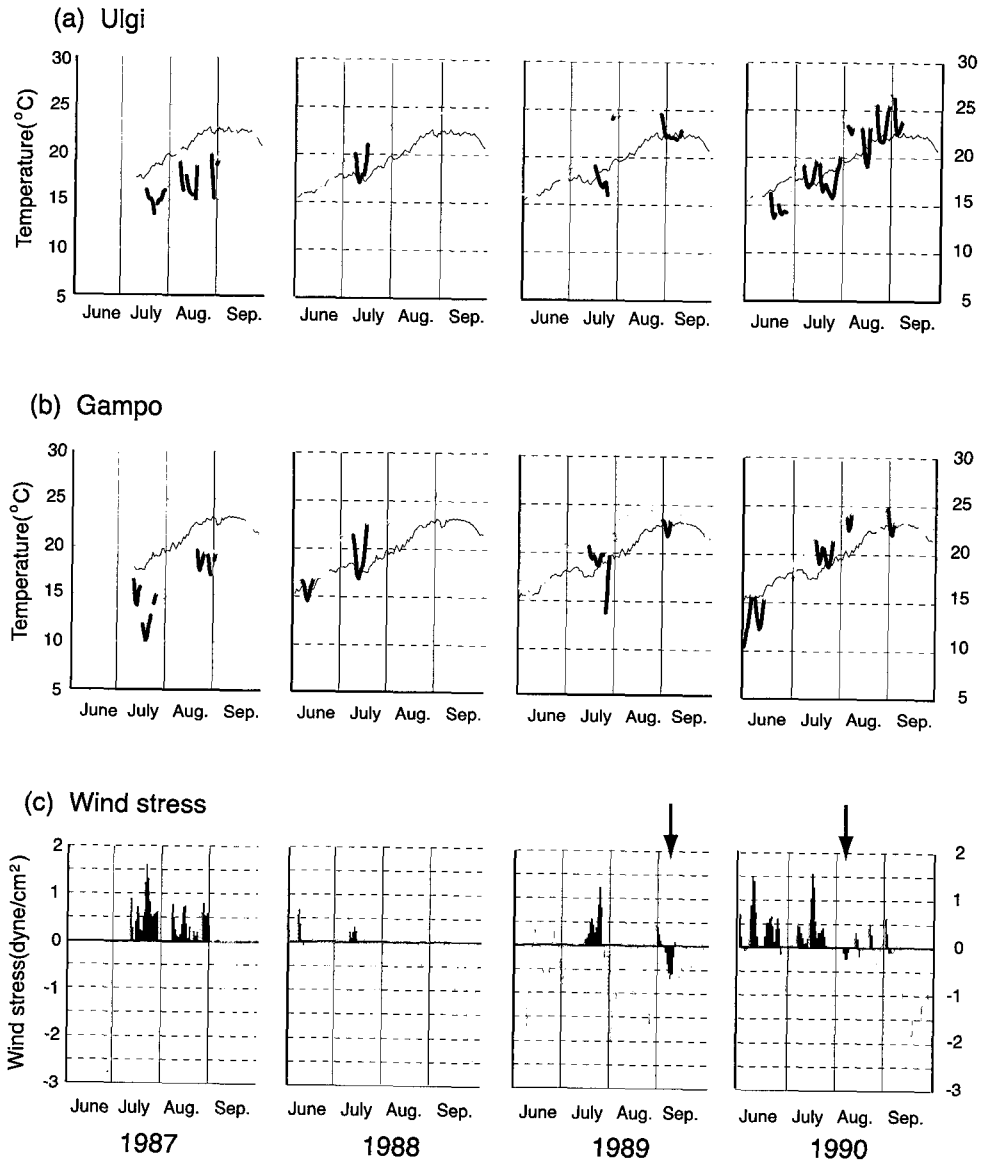


Fig. 6-a. Daily sea surface temperatures and wind stresses at SSM/I data point A from 1987 to 1990. Thin lines, thick black lines (bars) and thick gray lines (bars) represent daily mean SST averaged over 30 years, SST (wind stress) during upwelling events and SST (wind stress) during non-upwelling events, respectively. Arrows in 1989 and 1990 mark the upwelling events by the north-westerly winds.

영향으로 표층의 밀도가 용승 현상이 가장 잘 나타나는 6월과 7월 (1.0245 g/cm^3)보다 낮은 값이었다. 그의 계산에 의하면 울기 앞바다에서 냉수현상이 일어날 최소 바람합력은 $27.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 였으나, 대한해협을 통과하여 북쪽으로 흐르는 대마난류의 영향을 감안하면 최소 바람합력은 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 가 적당하다고 주장하였다. 본 연구에서는 남풍 이벤트 총 61회 중 22회가 바람합력이 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 보다 적은 값을 나타냈으나 4회의 경우를 제외하고는 대부분

1°C 에서 2°C 정도의 온도하강을 보여 약한 남서풍에도 중층수의 용승으로 표층수와 중층수가 섞이는 현상을 보여주었다. 6월과 7월의 상층과 중층의 밀도차가 Byun (1989)이 용승에 필요한 최소 바람합력 계산에 사용한 값보다 작아 Byun (1989)이 주장한 최소 바람합력보다 작은 값에도 냉수 현상이 일어난다고 할 수 있다.

용승 현상으로 인한 냉수대 출현을 감포 또는 울기에서 수온이 1°C 이상 떨어졌을 때로 정의하면 연구기간

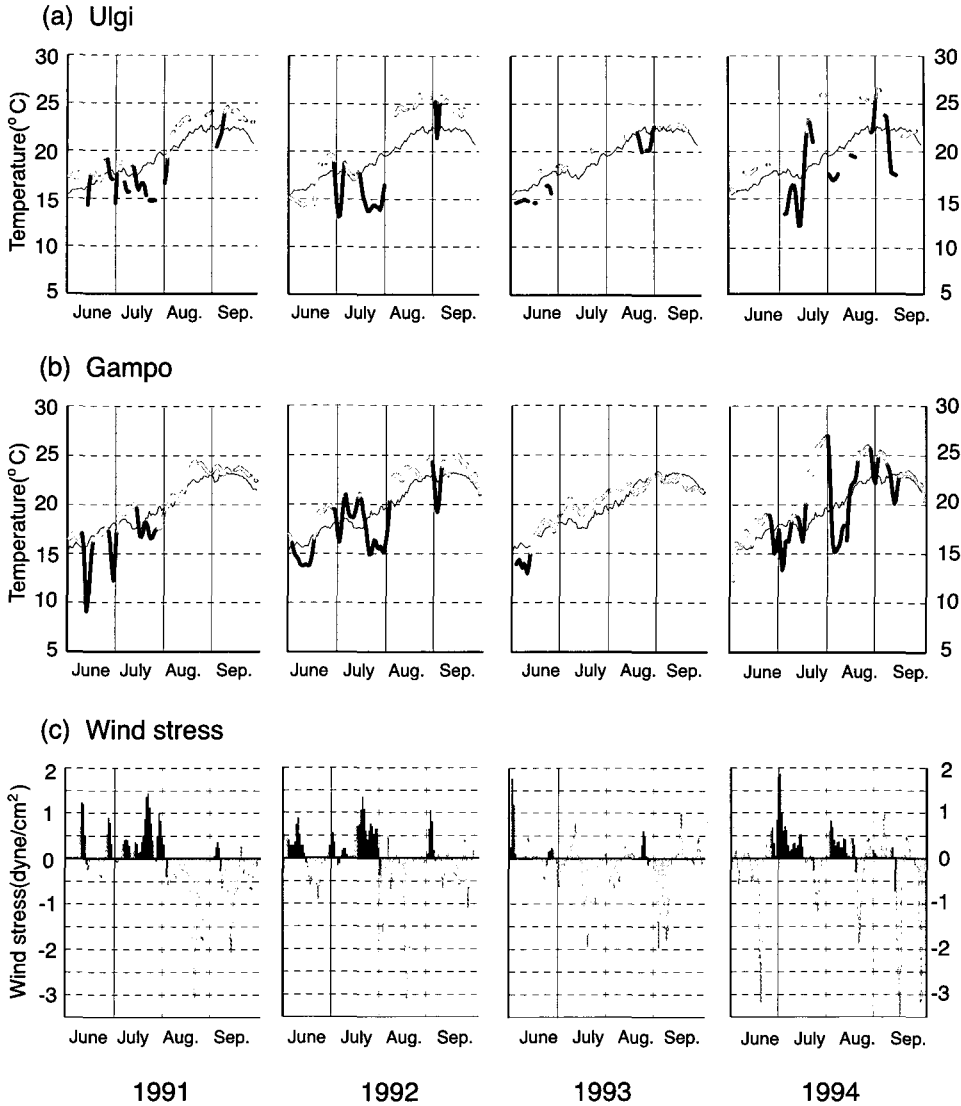


Fig. 6-b. Daily sea surface temperatures and wind stresses at SSM/I data point A from 1991 to 1994. Thin lines, thick black lines (bars) and thick gray lines (bars) represent daily mean SST averaged over 30 years, SST (wind stress) during upwelling events and SST (wind stress) during non-upwelling events, respectively.

8년동안 약 80%의 경우 남서풍에 의해 냉수대가 출현하였다. 이것은 미국 남캘리포니아 해안에서 (Dorman and Palmer, 1981) 발생하는 냉수대 현상보다 (약 50%) 감포-울기 앞바다에서의 바람과 냉수대의 상관관계가 훨씬 크다는 것을 보여준다. 바람합력과 최대 수온차와의 상관관계는 상관계수 (correlation coefficient)가 0.63으로 상당히 높았으며, 회귀계수 (regression coefficient)는 바람합력에 대해 -0.124 여서 수온이 1°C 이상 낮아지려면 바람합력이 $8\text{ m}^2/\text{s}$ 는 되어야 하는 것으로 나타나 평균

적으로는 Byun (1989)이 주장하는 $10\text{ m}^2/\text{s}$ 값과 근사하였다. 6월과 7월에 남서풍이 대체로 강하였고 수온이 5°C 이상 떨어지는 주요 냉수대 현상이 일어났다. 그림 7에서 8월 (그림의 네모로 표시)에는 그림의 상관관계를 나타내는 중간선 보다 위쪽에 많이 위치해 바람합력에 대한 온도하강은 상대적으로 적었다. 이것은 8월에는 남해 저염수의 동해 유입으로 상층과 중층의 밀도 차이가 6월에는 평균 $1 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ 인데 비해 8월은 $4 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ 정도로 (Byun, 1989) 더 커서 안정도 (stability)가 상대적

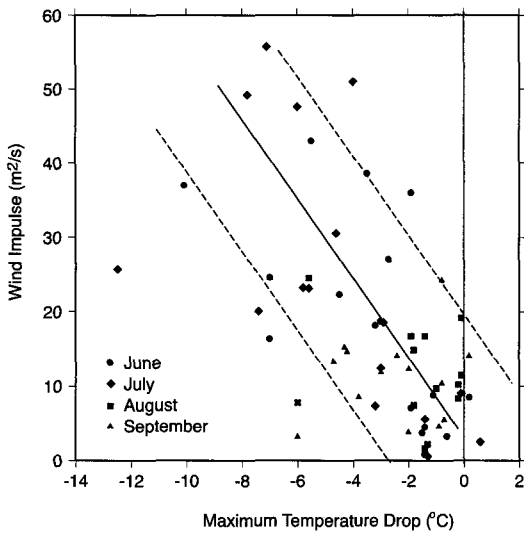


Fig. 7. Scatter plot of the wind impulses and the maximum temperature drops in the events when the upwelling favorable wind blows along the Gampo-Ulgi coast. The solid line represents the regression line and dashed lines are drawn for emphasizing the linear relationship between temperature drop and wind impulse. Gray colored area denotes the temperature drop between -1 to 1°C .

으로 높기 때문이다. 9월 (그림의 세모로 표시)에는 8월과 반대로 중간선 보다 아래 쪽에 많이 위치해 온도하강이 같은 바람에 크며 약한 바람에도 수온 하강 폭이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 이것은 표층수온의 계절 변화에 의해 9월의 수온이 최대가 되어 계절 변화가 적은 저온의 중층수와 섞일 때 온도의 하강폭이 섞이기 전보다 크기 때문인 것으로 생각된다. 온도하강이 1°C 이하인 경우 (총 13회)중 5회는 6월과 7월에 일어난 경우인데 이 경우도 바람합력이 $5\text{ m}^2/\text{s}$ 이었으나, 8월과 9월의 경우 바람합력이 $5\sim 20\text{ m}^2/\text{s}$ 이었는데도 냉수대가 형성이 되지 않아 6, 7월과 구분이 되었다. 즉, 남서풍의 바람합력이 $5\text{ m}^2/\text{s}$ 이상인 경우에도 8월과 9월에는 냉수대 현상이 일어나지 않은 경우가 7회인데 이것은 8월과 9월에는 주로 북풍이 불어 표층수 경계의 수심이 상대적으로 깊어진 영향과 표층과 중층의 밀도차가 커져 안정도가 커진 영향으로 본다. 강한 북풍이 분 후 남서풍이 불 경우에는 냉수대 현상이 일어나기 위해서 필요한 최소 바람합력이 커지는 것으로 생각된다. 그림 8은 수산진흥원에서 관측한 연안 정선 관측선에서의 수온의 수직분포도로 92년 6월 3일부터 17일까지 15일간 관측된 냉수대의 수직구조를 알아보기 위해 나타내었다. 이 냉수대를 일으킨 바람은 냉수대 시작 3일 전부터 시작일까지 바람

용력의 평균값은 $0.25\text{ dyne}/\text{cm}^2$, 냉수대 발생기간 중에는 $0.28\text{ dyne}/\text{cm}^2$ 였다. 이 냉수대 기간동안의 208선과 104선에서 $14\sim 15^{\circ}\text{C}$ 사이의 해수 (그림에서 등수온선을 색칠한 부분)는 연안에서 수심 20 m 정도였는데 209선과 102선에서는 해안에서 약 20 km까지 표층에 형성되어 있다. 208선 (울기선)에서는 바람에 의한 14°C 선부터 시작되는 수온약층의 외해쪽에서 연안 표층쪽으로 올라가는 경계층 기울기가 해안에서 100 km까지 보이나 209선 (감포선)에서는 80 km로 줄어 경사가 좀 더 급해지는, 이것은 해저 지형의 영향으로 보인다. 해안 쪽으로 기울어 진 수온약층은 102선에서 35 km 정도로 줄었고 104선에서는 25 km 정도였다. 이 그림으로 보면 Kim and Kim (1983)에 의해 주장된 북한한류계수가 용승하여 냉수대를 형성한다고 보기 보다는 Lee and Na (1985)에 의해 주장된 대마난류의 중층수가 용승하여 표층수와 섞인다고 보는 편이 타당하다. 물론 10°C 이상 수온이 떨어진 경우 (연구기간 중 2회 발생)는 북한 한류의 영향을 받았다고 보나, 감포-울기 냉수대 현상의 모델로는 Kim and Kim (1983)의 2층 (2-layer) 모델 보다는 Byun (1989)의 3층 (3-layer) 모델이 적합하다고 본다.

4. 포텐셜와도 보존에 의한 용승

감포-울기 연안에서 다른 해역보다 용승에 의한 냉수대 현상이 잘 일어나는 요인으로 포텐셜와도 보존에 의해 감포-울기 연안의 중층과 표층의 경계면이 평형상태 (equilibrium status)에서 해안 쪽으로 기울어져 있는 것을 들 수 있다. 표층난류가 대한해협 서수도를 통과하여 같은 수심대를 따라 북상하다가 감포 앞 해상에서 포텐셜 와도 보존을 위해 같은 수심을 유지하려면 동해안의 대륙사면을 따라 흐르는 경우와 오른쪽으로 방향을 바꾸어 대륙붕을 따라 흐르는 경우 등 두 형태로 흐르게 된다. Katoh (1994)는 ADCP에 의한 해류 관측치와 수산진흥원에 의해 관측된 수온 및 염분도 자료를 이용하여 대한해협의 서수도를 통과하는 대마해류의 형태들을 제시하였는데 서수도를 통과한 해류는 해안선을 따라 북상하지 않고 울릉분지로 진입하거나 등 수심도를 따라 일본 쪽으로 방향을 바꾸던지 하여 감포 연안에서 해류의 방향은 항상 해안으로부터 이루어지는 방향이었다. 해안으로부터 이루어지는 해류 성분이 커지면 중층과 표층의 경계면이 해안에서 표층과 가까워져 표층과 중층의 경계면이 연안에서 얕고 외해에서 깊은 형태가 된다. 이러한 감포-울기 앞 해상에서 해안선으로부터 떨어져 외해로 흐르는 현상은 위성에 의한 해표면 온도 사진 (그림 5)에 감포 연안의 냉수가 울릉도 근처까지 흘러가는 것에 의해

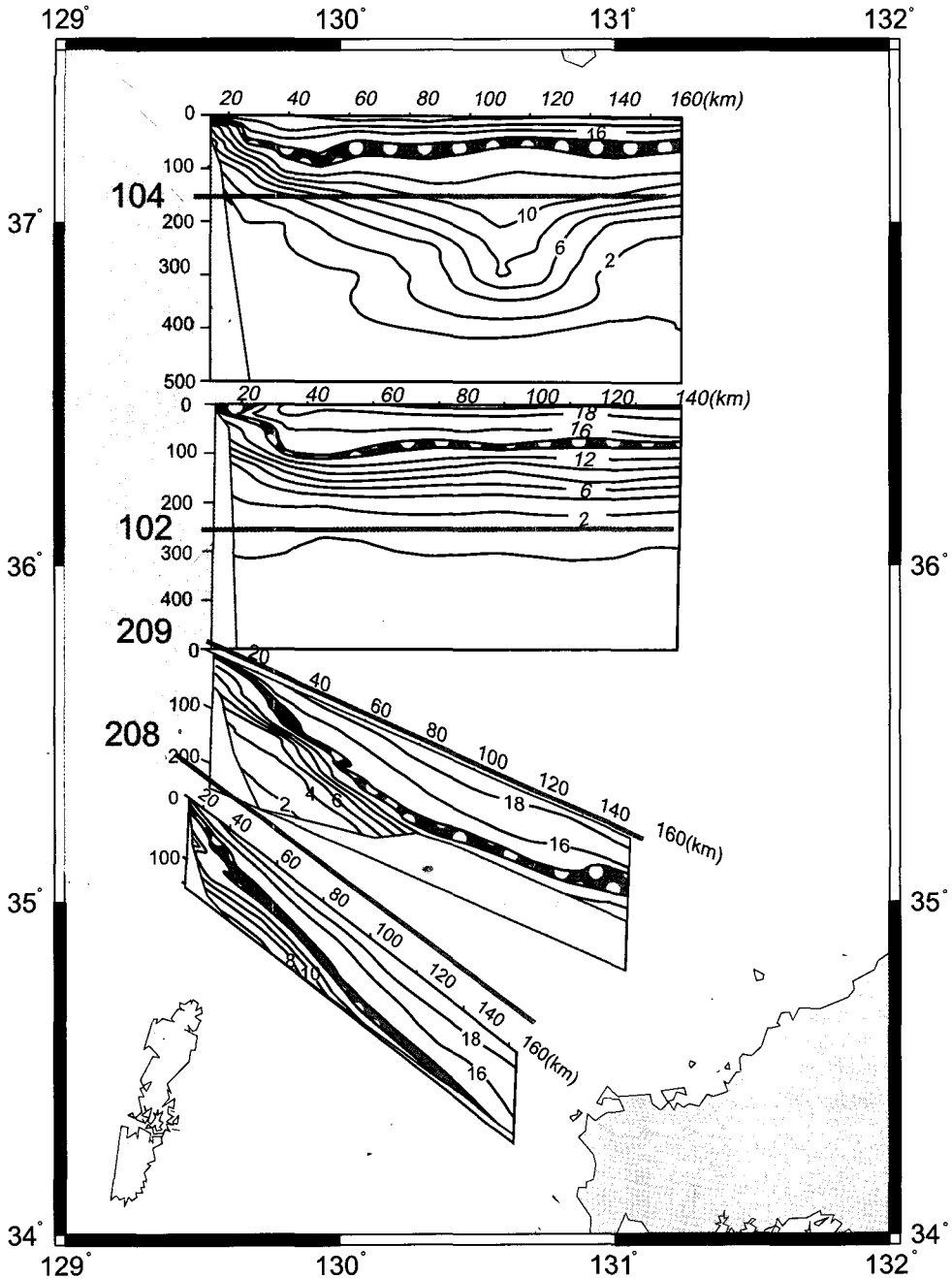


Fig. 8. Vertical distribution of temperature along NFRDI cruise lines in June, 1992. Hatched areas are the layers of temperature (14~15°C) same to the mean temperature at Gampo during upwelling period (3-17 June, 1992).

잘 나타난다.
 포텐셜와도는

$$\Phi = \frac{\zeta + f}{H}$$

로 정의되며 포텐셜와도 Φ 는 해류가 흘러감에 따라 변하지 않고 값을 보전한다. 해류가 북상하면서 감포 앞 해상에서 100~150 m 수심대가 급격히 좁아져 ζ 는 값이 커진다. 수심 H는 변하지 않는다고 가정하고 해류가

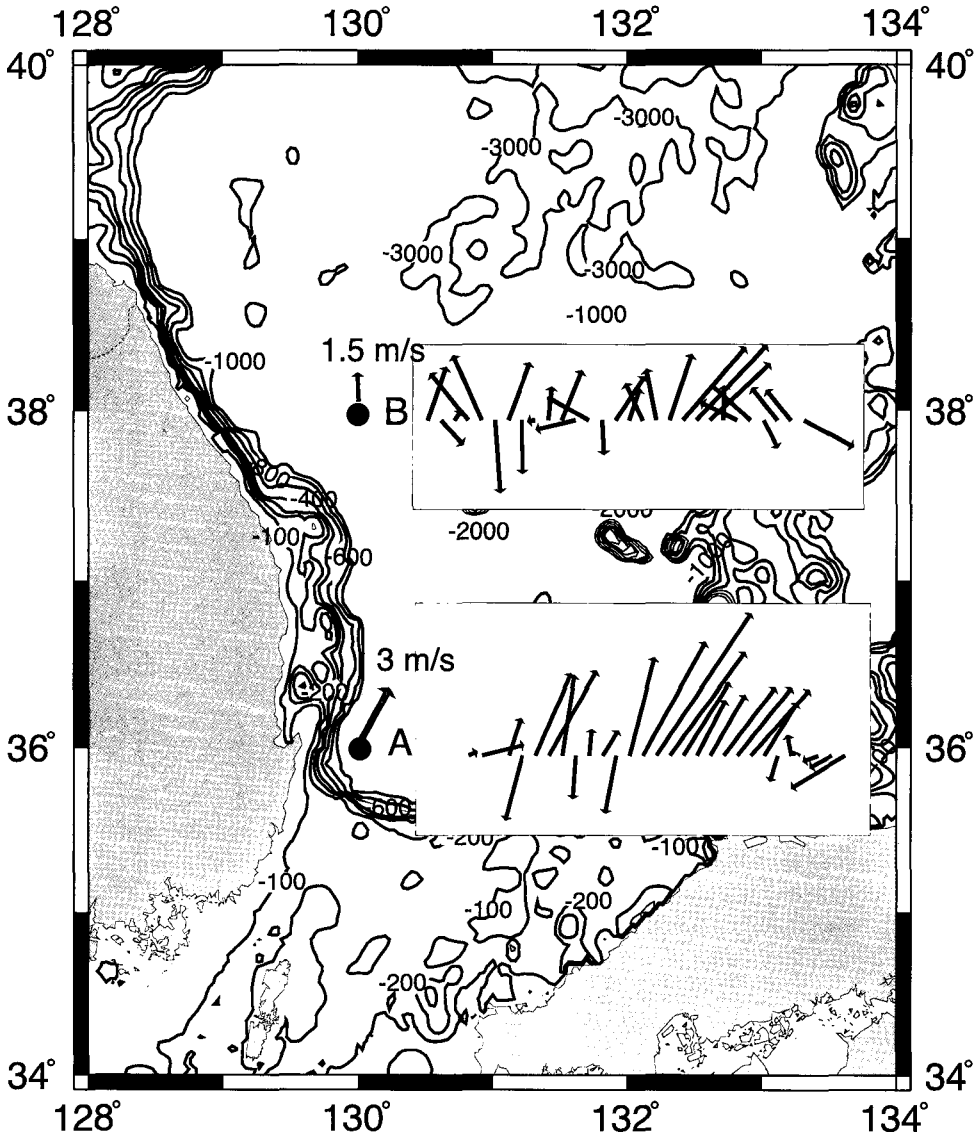


Fig. 9. The daily wind measured by SSM/I at two data points (black circles) in July, 1990. Note that the mean wind at point A is parallel to the coast line and it is two times stronger than the mean wind at point B.

복상하면서 f 는 증가하고 상대와도 ($\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$) 중 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 도 증가하여 $-\frac{\partial v}{\partial y}$ 의 값이 커져야 포텐셜와도가 보존이 되어 해류의 u 성분 (동쪽으로 향하는 해류 성분)이 커져야 한다. 이 해안으로부터 이루어지는 해류 중 수심이 깊은 바다인 울릉분지로 들어간 해류는 수심 H 가 증가하면 상대와도도 증가하여야 함으로 다시 연안쪽으로 흐르는 성분이 생긴다. 이러한 현상으로 울릉분지에서는 시계방향의 울릉와류가 형성되는데 Katoh (1994)에 의한 대마해류의 형태도 울릉분지에서 시계방향의 형태이다. Lee and Na (1985)는 울기 연안에서 100~150 m 수심대

가 넓어져 반시계 방향의 와류에 의해 용승이 일어난다고 주장했는데 그림 1에 보인 바와 같이 그 수심대가 울기 연안에서 약간 넓어지기는 하나 그 변화가 그리 크지 못하고 감포에서 용승 현상이 울기보다 더욱 자주 일어난 것에 대해서는 설명이 되지 못한다. 반면 그림 6에 보인 바와 같이 같은 바람에 감포 연안이 울기 연안보다 용승현상이 잘 일어나며 온도하강 폭도 커 이 해역의 용승현상은 100~150 m의 수심대가 감포 연안에서 급격히 좁아져 일어난 현상이라고 해석하는 것이 타당하다. 그러나 이 이론을 충분히 뒷받침하기 위해서는 포텐셜

와도를 계산하기 위한 적어도 네 정점에서의 장기 계류 해류계 자료가 필요한데 현재까지 3일 이상의 해류 자료는 이 해역에 드문 실정이다.

토 의

포텐셜와도 보존에 의한 대마해류의 해안으로부터 이류현상으로 표층과 중층의 경계면이 해안 쪽으로 기울어져 있는 상태에서 6월부터 9월초까지 부는 남서풍이 갑포-울기 연안에서 발생하는 냉수대 발생의 주요 요인으로 위성에 의한 해상풍 자료와 연안정지 일일 수온 관측치를 이용하여 본 논문에 제시되었다. 용승을 유발시킬 수 있는 남서풍이 아닌 북풍이 불었을 때 출현한 냉수대 현상은 연구기간 8년동안 단지 2회였으며 그 때에도 냉수대 지속기간은 2~3 일로 매우 짧았고 수온 하강폭도 3°C 이하였다. 종래의 연구에서 본 연구해역에서의 냉수대 출현의 요인 중 바람 이외의 것은 Seung (1974)이 주장한 대한해협에서 유입되는 강한 대마난류에 의한 중층 경계의 상승과 바람에 의한 약한 용승의 상호작용이었다. 본 연구에서 바람합력과 최대하강온도와의 상관관계가 큰 것으로 보면 냉수대 현상의 주 원인은 바람이고, 용승이 많이 발생하는 세계의 다른 해역과는 달리 3일 정도 부는 약한 남서풍에도 (바람합력이 10 m²/s 이하인 경우) 용승이 일어나는 것으로 보아 100~150 m 수심대가 급격히 좁아지는 해저지형 등이 추가적으로 바람과 함께 작용하여 일어나는 것으로 본다. 같은 바람에 울기와 갑포에서의 차이는 해저 지형적 영향에 기인한 것으로 보이며 남서풍이 불어도 (바람합력이 7 m²/s 이상) 냉수대가 형성이 안된 이유는 남서풍이 불기 시작하기 전 북풍이 상당기간 불어 표층수의 하강현상이 일어나 표층수의 두께가 두꺼워진 경우로 볼 수 있다. 바람 조건이 충분한데도 냉수 현상이 일어나지 않은 경우는 대부분 남해 저염수의 유입으로 인한 상층과 중층의 밀도차가 커지고 북풍이 부는 날 수가 남풍과 비슷하나 북풍이 남풍보다 2배 정도 세계 부는 8월과 9월에 일어났다.

우리나라 동해에서 유일하게 갑포-울기 앞 바다에서 용승현상이 빈번히 발생하는 이유는 첫째, 그림 8에 나타난 바와 같이 7월 평균 바람의 방향과 속도를 보면 갑포 앞 해상에서는 해안에 평행하게 약 3 m/s 이었으나 동해 북부 연안에서는 해안선이 북서 방향이면서 평균 바람은 정남풍이고 속도도 1.5 m/s로 해안에 평행한 성분은 단지 갑포-울기 연안 해상보다 1/3 정도 약해 바람의 영향이 적다. 둘째, 갑포-울기 앞 해저지형의 영향으로서 대한해협부터 등수심선을 따라 흐르는 동한난류의

포텐셜 와도 보존에 의해 해류가 북상하면서 갑포-울기 연안에서 해안에서 이루어지는 대마해류의 형태 때문이다.

요 약

갑포-울기 연안에서 1987년부터 1994년까지 일어난 여름철 냉수대 현상을 수산진흥원의 연안정지 수온 관측치와 위성에 의한 해표면 사진, 그리고 SSM/I에 의한 해상풍 자료를 이용하여 연구하였다. 남서풍에 의한 냉수대의 반응 시간은 하루나 이틀정도로 아주 짧았고 냉수대는 울릉도 근해까지 세력을 확장하였다. 연구기간 8년 중 남서풍 이벤트는 총 61회였는데 그 중 80%의 경우 수온이 1°C 이상 떨어졌다. 바람합력과 최대하강온도와의 상관관계는 0.6으로 비교적 높았으며, 바람이 이 해역의 냉수대 발생 주 원인으로 밝혀졌다. 갑포 앞 해상에서 급격히 변하는 해저지형과 포텐셜 와도 보존 법칙에 의해 해안선과 분리되어 외해로 향하는 동한난류의 영향도 갑포-울기 연안의 냉수대가 자주 출현하는 원인인 것으로 연구되었다.

사 사

본 연구는 수산업분야 첨단기술개발사업의 일환으로 원격탐사에 의한 적조탐색기술 개발연구의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문을 세밀하게 검토하시고 지적해주신 심사위원들과 편집위원장께 감사드리며 자료처리에 애써준 김태훈, 강윤정양에게 고마움을 전합니다.

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: 10~18.
- Atlas, R., R.Hoffman, S.Bloom, J.Jusem and J.Ardizzone. 1996. A Multi-year Global Surface Wind Velocity Data Set Using SSM/I Wind Observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, N5, 869~882.
- Bunker, A. F., 1976: Computations of surface energy flux and annual air-sea interaction cycles of the North Atlantic Ocean. *Mon. Weather Rev.*, 104, 1122~1139
- Byun, S. K., 1989: Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 24: 121~131.
- Csanady, G. T., 1982: On the structure of transient upwelling events. *J. Phys. Oceanogr.*, 12: 84~96.
- Dorman C. E. and D. P. Palmer, 1980: Southern California

- summer coastal upwelling in Coastal Upwelling, F. Richards editor, AGU, Washington.
- Katoh, O., 1994: Structure of the Tsushima Current in the southwestern Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 50: 317~338.
- Kim C.H., Kim K., 1983: Characteristics and origin of the cold water mass along the east coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18 : 73~83.
- Lee, D. K., J. C. Lee, S. R. Lee and H. J. Lic, 1997: A circulation study of the East Sea using satellite-tracked drifters. Part 1: Thushima Current. *J. Korea Soc. Fish.*, in press.
- Lee, K. B., 1978: Study on the coastal cold water near Ulsan. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 13: 5~13.
- Lee, J. C., 1983: Variations of sea level and sea surface temperature associated wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18: 149~160.
- Lee, J. C. and J. Y. Na, 1985: Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20: 6~19.
- Lim, D. B., 1973: The Movement of the cold water in the Korea Strait, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 8: 46~52.
- Seung Y.H., 1974: A dynamic consideration on the temperature distribution in the east coast of Korea in August. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 9 : 52~58.
- Seung, Y. H., 1984: A numerical experiment of the effect of coastline geometry on the upwelling along the east coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19: 24~30.
- 한상복, 1995: 동해남부 냉수대의 변동형태. *새어민*, 1월: 99~101.
- 한상복, 강청미, 서영상, 진현국, 하성학, 김정희, 1997. 울산해역의 일일수온 변화. 국립수산진흥원
- 한상복, 강청미, 서영상, 진현국, 하성학, 김정희, 1997. 감포해역의 일일수온 변화. 국립수산진흥원.
- 한상복, 안유환, 강청미, 서영상, 진현국, 전경암, 하성학, 1997. 장기갑 해역의 일일수온 변화. 국립수산진흥원

1998년 2월 5일 접수
1998년 5월 4일 수리