

한국 동해 연안에서 하계 바람에 의해 발생하는 연안용승에 관한 수치실험

서호산* · 임우현** · 김동선***†

* 부경대학교 해양산업공학(협), ** 부경해양기술, *** 부경대학교 생태공학과

Numerical Experiments of Coastal Upwelling Occurred by Summer Winds in the East Sea of Korea

Ho-San Seo* · Woo-Hyun Lim** · Dong-Sun Kim***†

* Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

** Bukyeong Ocean Engineering & Consultants Co., LTD, Busan 48547, Korea

*** Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약 : 본 연구에서는 연안용승이 발생하는 한국 동해연안을 대상으로 용승류 발생분포와 용승유량을 파악하고자 수치실험을 실시하였다. 여기서 연안용승이 발생한 2013년 하계의 CTD 관측자료 및 정선자료(NIFS)에서 수온·염분 값을 모델에 적용하였다. 또한, Case별 실험은 하계에 가장 높은 빈도를 보이는 남풍과 남서풍에 풍속의 변화(3, 6 m/s 그리고 9 m/s)를 주었다. 풍속이 강한 조건일수록 상승류의 강도와 분포범위가 넓게 나타났다. 그리고 남서풍은 남풍에 의한 용승역의 분포와 상승유속의 강도에 비해 강하고 넓었다. 동해안의 5개 연안에서 용승유량을 산정한 결과 포항, 영덕, 후포, 부산, 그리고 울산 순으로 나타나며 남풍에 비해 남서풍의 조건에서 용승유량이 약 1.5배 크게 나타났다. 남서풍 9 m/s에 의한 용승역은 약 17~22 km/day의 수평적 확산 속도로 바람이 1주일 이상 지속된다면 포항 남쪽 연안에서 발생된 용승현상에 의해 발생된 냉수대는 울릉도 근해까지 확장한다.

핵심용어 : 연안용승, 한국 동해연안, 용승류, 용승역, 냉수대

Abstract : In this study, numerical experiments were conducted to identify distribution of rising flow and flux in the East Sea of Korea, where the coastal upwelling occurs. Temperature and salinity data from CTD observations and NIFS during summer 2013 were applied to the model. Numerical experiments were carried out with different wind speed (3, 6 m/s and 9 m/s) and direction (southerly and southwesterly), which represent the most frequent in summer conditions. As a result of calculation, upwelling flow rate was found to be highest in Pohang between five coasts(Hupo, Youngduk, Pohang, Ulsan and Busan). Comparing with southerly wind conditions, the rising flow rate is about 1.5 times greater when southwesterly wind was applied. Horizontal diffusion of the upwelling area is expected to have a speed of 17~22 km/day when a 9 m/s southwesterly wind is applied. If this wind continues over one week, a cold pool will be generated by upwelling that may reach to the Ulleung area.

Key Words : East Sea of Korea, Coastal upwelling, Upwelling flow, Upwelling area, Cold pool

1. 서 론

용승(upwelling)이란, 해류, 바람 등의 외력에 의한 영향으로 표층수가 외해로 발산하여 유출되면 질량보존법칙에 의해 그 공간을 채우기 위하여 심층의 해수가 표층으로 상승하는 현상이다.

용승해역은 저층에 다량 분포하는 영양염이 유광층으로 부상하기 때문에 생물활동이 활발하게 나타난다. 용승역은 해양 전체 면적의 0.1%에 불과하지만 세계 총 어획량의 50% 이상을 차지한다(Ryther, 1969). 용승해역은 역학적인 측면으로 보면, 에너지와 물질교환이 활발하여 생물밀도의 시·공간적인 운동량 구배가 크게 나타난다. 물질순환 측면에서 보면, 심층이나 외부에서 영양염과 같은 물질을 공급하는 역할을 한다.

* First Author : sasa9668@nate.com, 051-629-7071

† Corresponding Author : kimds@pknu.ac.kr, 051-629-7374

한국 동해에서 연안용승이 발생하는 요인과 원인에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 한국 남동해역은 하계에 냉수대(cold water mass)가 빈번히 출현하는 곳으로 알려져 있으며, 냉수대의 표면수온은 주변해역에 비해 5°C 이상 낮은 저수온대를 형성한다(Lee, 1983). 울기연안에 인접하여 남하하는 냉수대가 용승의 발생에 기여한다(Lim and Chang, 1969). 동해 남부해역에서의 울산에서 감포로 갈수록 등수심대가 넓어지고 경사가 완만해지는 해저 지형 특성에 의한 영향 그리고 남서풍의 강도 등이 복합적으로 기인하여 형성된다. 넓고 완만한 해저 지형은 포텐셜와도 보존에 의해 외해로 흐르는 시계방향의 성분이 최대가 되어 발생한다(Lee and Na, 1985). 또한 울기연안에서 100~150 m 수심대가 넓어져 나타나는 반시계방향의 와류에 의해서도 용승이 일어 수 있다고 하였다.

바람의 영향이 용승발생의 주 요인으로 연구된 결과를 보면 동해 남부해역의 하계 남서계절풍에 의한 용승의 결과라는 주장이 지배적이다(An, 1974; Lee, 1983; Lee and Na, 1985). 4 m/s의 남서풍이 3일간 지속적으로 불었을 때 나타나거나(Lee, 1983), 평균 3 m/s의 남서풍이 7일 이상 지속적으로 유지될 때 용승현상이 발생한다(Seung, 1974). 동해 전 연안역에서 3 cm/s의 남서풍이 지속적으로 불면 수온은 평균적으로 약 1~3°C 감소하였으며 5 m/s의 경우 평균수온이 2~7°C 감소하였다(Suh et al., 2001).

지금까지 한국 동해 연안용승과 관련하여 다양한 연구가 진행되어왔으나 용승이 발생하는 시기에 맞추어 현장 관측을 시행하는 것이 매우 어렵기 때문에 지금까지 한국 동해안에서 용승현상의 발생 및 공간규모 변동에 대한 연구는 부족한 부분이 많다. Kim and Kim(2008)은 동해 남부 울산과 감포 연안을 대상으로 비교적 좁은 해역을 대상으로 연안용승현상에 관한 수치실험을 실시하였다. 그러나 Seung(1974)은 간단한 수치실험을 통하여 남서풍이 불 때 저층에서 남향류가 생성되고 또한 바람에 의한 Ekman Transport에 의해 동해 남부 연안 뿐 아니라 동해 여러 해역에서 연안용승이 발생할 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 수행하는 한국 동해연안을 대상으로 용승역에서 용승을 발생시킬 수 있는 바람장을 적용하여 수치실험을 통해 연안용승이 발생 가능한 해역의 분포를 파악하고 용승유량을 정량적으로 산정하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 모델 개요 및 입력

해수유동 수치실험에 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하였다(Blumberg and Mellor, 1987). POM은 외양뿐만 아니라

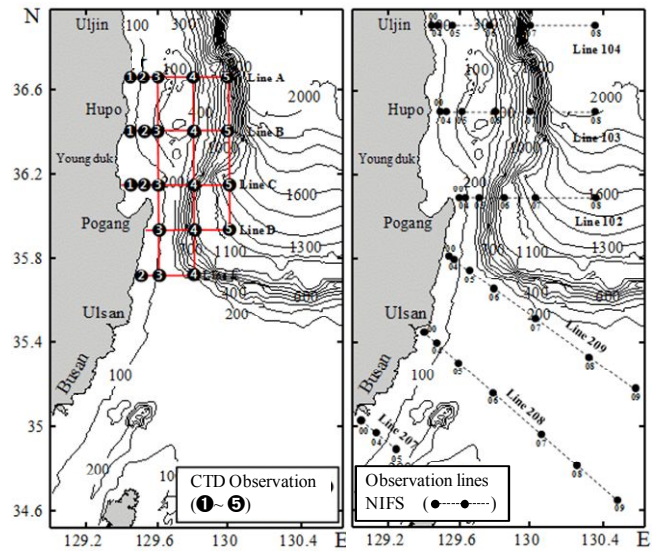


Fig. 1. Location of bottom topography and observation (temperature and salinity) points in East Sea of Korea.

하구, 대륙붕 등 연안역에 주로 적용되어 왔다(Ezer et al., 2002). 수직 방향에 대하여 음해법의 사용과 mode splitting 방법을 통해서 계산의 효율성이 높다는 장점이 있다.

연구해역의 수심자료는 국립해양조사원의 전자해도 138와 139를 사용하였다. 수치해도상의 수심자료를 보간하여 모델 각 격자의 수심으로 사용하였다(Fig. 1). σ -coordinate를 사용하는 POM은 급격한 지형 경사를 가지는 해역에서 계산 충돌의 문제가 발생한다. 따라서 지형 경사가 크게 나타나는 200 m 수심부터 실제 지형 경사의 1/5로 smoothing 하였다.

해수유동 수치실험 영역은 동-서(x 축), 남-북(y 축) 방향으로 각각 150×273 km로 설정하였다. 계산격자는 가로·세로 1000 m의 정방격자를 사용하여 모델영역내의 주요 지형과 수심을 잘 반영할 수 있도록 하였다. 연직 방향의 σ -layer 개수는 총 7개의 층으로 나누었다. 표층인 1층부터 6층까지는 동일한 수심 간격이며 최 저층인 7층은 격자 boundary 유동 계산 시 해저면에 의해 크게 왜곡되므로 총 수심의 4%의 비율로 산정하였으며 모델 결과 재현에서는 사용하지 않았다. 조류와 해류의 계산하지 않았고 바람에 의한 영향을 고려하여 모델을 구동하였다. 계산의 시간간격은 CFL 조건 ($\Delta t = dx / \sqrt{2gh}$)을 고려하여 external time step은 2초, internal time step은 15초로 10일간 계산하여 유동결과를 파악하였다.

2.2 수온 및 염분 자료

용승현상이 발생하는 해역의 수온·염분 분포를 파악하기 위해 CTD(Sea-Bird Electronics, SBE-19 Seacat Profiler)를 사용하여 2013년 하계 6월과 8월의 수온·염분 관측을 실시하였다.

북쪽에 위치한 울진부터 남쪽에 위치한 울산 까지 5개의 관측 정선을 선정하였다. 각 정선은 3개 또는 5개의 정점을 가지고, 총 21개의 정점을 포함한다(Fig. 1 (left)).

연구해역인 동해의 수온·염분 자료는 2013년 하계 8월의 CTD관측 자료와 국립수산과학원 정선관측점(102, 103, 104, 207, 208, 209 Line)의 (2013년) 8월 자료를 사용하였으며 전 연구해역을 포함할 수 있도록 수온·염분자료를 모델 격자에 맞추어 보간하여 사용하였다(Fig. 1 (right)).

2.3 바람 자료

동해안은 계절풍의 영향으로 동계에는 북서풍계열, 하계에는 남풍계열의 바람에 주로 영향을 받는다. 동해안에 남서풍이 지속적으로 불 때 냉수대가 출현한다는(Seung, 1974) 기존의 연구가 있다. 기상청의 기상월보에서 제공하는 울산(35°33'N, 129°19'E), 포항(36°59'N, 129°24'E), 울진(36°01', 129°22')의 육상 기상관측소에서 관측된 최근 5년(2009~2013년)의 관측 결과에 따르면 남서풍이 가장 높은 빈도로 나타나며 평균풍속은 약 3 m/s로 나타났다. 지상에서 관측한 풍속 값이 해상에서는 2배 이상 크게 나타난다는 연구가 있다(Yanagi, 1980). 또한 기상청에서 제공하는 포항 해상부이에서 관측된 자료를 따르면 하계의 풍향은 남서풍이 월등히 우세하다.

이러한 자료들을 참고하여 풍향과 풍속 변화에 따라 용승이 발생하는 공간적인 분포와 강도를 파악하기 위해 하계 가장 빈도가 높게 나타나는 남풍과 남서풍 계열의 바람에 풍속의 변화(3, 6 그리고 9 m/s)를 주어 모델의 전 영역에 일괄적용 하여 Case 별 수치모델실험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수온 분포

한국 동남해안의 6월과 8월의 수온의 연직 분포를 파악하기 위하여 각 정점의 층별 수심과 수온 데이터를 이용하여 계절에 따른 수온의 연직분포를 contour로 나타내었다(Fig. 2).

연구해역의 2013년 6월의 A Line의 연직 수온 분포를 보면, 연안 수심 20 m 이내에서 6~22°C의 범위로 급격한 수온 변화를 보이고, 외양에서는 16~22°C의 범위로 연안역에 비해 수심이 깊어짐에 따라 수온의 변화가 완만하게 나타났다. 15°C의 등수온선을 기준으로 아래층의 등수온선 분포는 육지의 형태를 따라 연안에서 외양으로 갈수록 깊어진다. B Line은 기상 악화로 인한 결측으로 자료를 얻지 못하였다. C Line의 수온 분포는 외양으로 C5 해역까지 20~22°C의 범위로 혼합층이 나타나고 혼합층의 깊이는 연안에서 5 m, 외양에서 15 m로 나타난다. 연안해역(C1 ~ C3)은 30~50 m 수심에

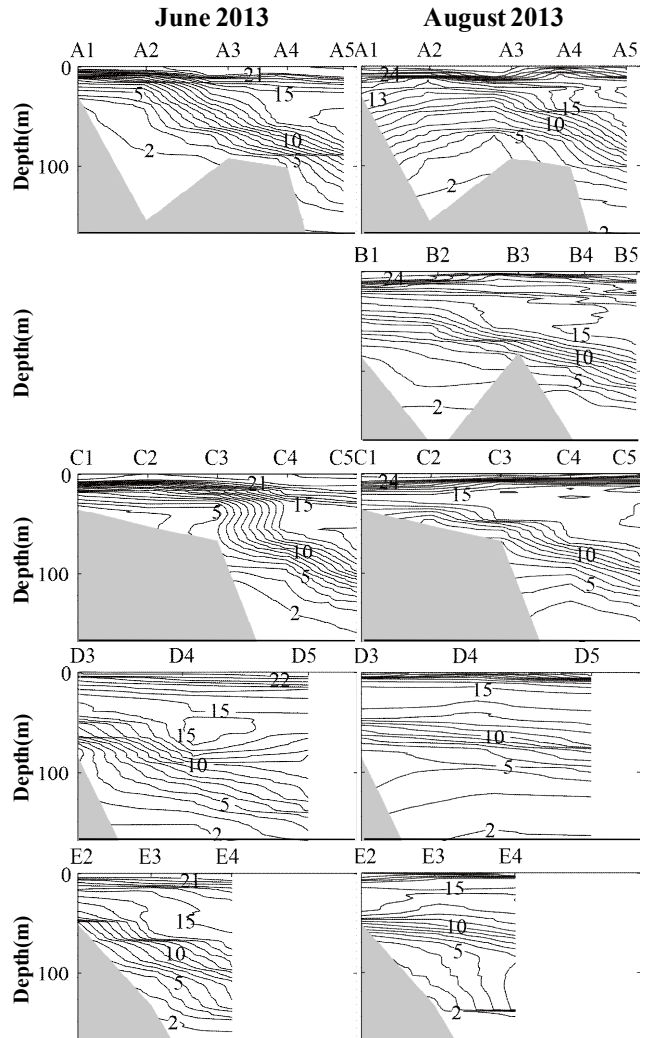


Fig. 2. Vertical distribution of water temperature (°C) obtained by CTD observation on June, 2013 (left) and August, 2013 (right).

서 6°C 이하의 냉수대가 분포하고 외양에서는 100 m 이심에서 4°C 이하의 저층 냉수가 분포한다. C line과 A line의 수온 연직분포는 유사한 형태를 보인다. D Line의 수온 분포는, 30 m 수심 이내에 6~22°C의 범위로 급격한 수온 변화를 보이고 수심 50 m 이상의 저층에서 등수심선이 해저지형과 유사하게 나타난다. E Line의 수온분포는 수심 100 m까지 완만한 변화를 보이며 감소한다. 30 m 수심까지 해수면과 평행한 등수온선이 16~22°C의 범위로 나타나고 30 m 이상의 수심역에서 해저 지형과 유사한 형태의 등수온선이 나타난다. D line과 E line의 수온연직분포 형태가 유사하다.

2013년 8월의 A Line의 연직 수온 분포를 보면, 연안 수심 20 m 이내에서 12~22°C의 범위로 급격한 수온 변화가 나타

나고, 외양에서는 연안역에 비해 수심이 깊어짐에 따라 수온의 변화가 완만하게 나타났다. 18°C의 등수온선을 기준으로 아래층의 등수온선 분포는 해저면을 따라 연안에서 외양으로 갈수록 깊어진다. B Line의 연직 수온 분포는 연안수심 80 m 이내에 4~24°C의 범위로 수온 변화가 나타나고, 외양에서는 연안역에 비해 수온의 변화가 완만하게 나타났다. 16°C의 등수온선을 기준으로 아래층의 등수온선은 외양으로 갈수록 깊어지고 외양 100 m 이상의 수심에서는 5°C 이하의 저층 냉수가 분포한다. C Line의 수온 분포는 연안역 20 m 수심 이내에서 16~24°C의 범위로 급격한 수온 변화를 보이며 B line과 유사한 분포 형태를 보인다. D Line의 수온 분포는 10 m 수심 이내에 16~22°C의 범위로 급격한 수온 변화를 보이고, 등수온선의 형태가 다른 line에 비해 안정적인 형태를 보인다. E Line의 수온분포를 보면 70 m 이상의 수심역에서 해저 지형과 유사한 형태로 등수온선 경사가 커지고 6°C 이하의 저층냉수가 분포한다.

연구 해역의 북측에 위치한 A, B, 그리고 C Line에서 연안에서 표층 20 m 이내에 형성되는 수온약층이 강하고 남쪽에 위치한 D, E Line에서는 상대적으로 약하게 나타났다. 10°C 등수온선 주변에서 수온변화가 비교적 강하여 경계층을 형성하고 있다. Lim and Chang(1969)은 남동해역 저층에는 해저면을 따라 남하하는 냉수괴가 존재하며 그 냉수괴는 10°C 이하로 나타난다고 하였다. 북측의 A, B, 그리고 C Line에서 10°C 등수온선이 형성되는 수심이 D와 E Line에 비해 얕다. 따라서 북쪽 연안에서 냉수대가 남쪽 연안에 비해 강하게 출현한 것으로 판단된다.

Lee and Na(1985)에 의하면 동해 남·중부 연안에서는 동한 난류의 유입으로 인한 등수온선의 baroclinic tilting 현상이 발생되며, 이는 연안에 냉수대가 표층 아래(subsurface) 머물게 한다고 하였다. 이 현상은 울기부터 감포까지의 해역에서 크게 발생하고, 20~40 m 수심층에 냉수대가 존재하며 짧은 기간의 남서풍에도 용승이 발생할 수 있다고 하였다. Fig. 2에 나타난 수온관측 결과는 선행된 연구와 같이 하계 출현한 냉수대의 분포와 형태를 잘 나타낸다. 관측시기와 같이 냉수대가 출현한 상태에 남서풍이 지속적으로 불어준다면 얕은 수심층에 위치한 냉수대가 표층으로 상승할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

3.2 바람 변화에 따른 상승류

남풍과 남서풍 3, 6 m/s 그리고 9 m/s 풍속에 대한 상승류 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 남풍 3 m/s일 경우 상승류의 수평 분포를 보면, 표층에서는 부산, 울산, 포항, 영덕 연안에서 상승류는 $2 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 이하로 범위가 좁게 나타났다. 풍속 6 m/s의 경우 상승류는 3 m/s의 풍속에 비해 넓게 분포하였

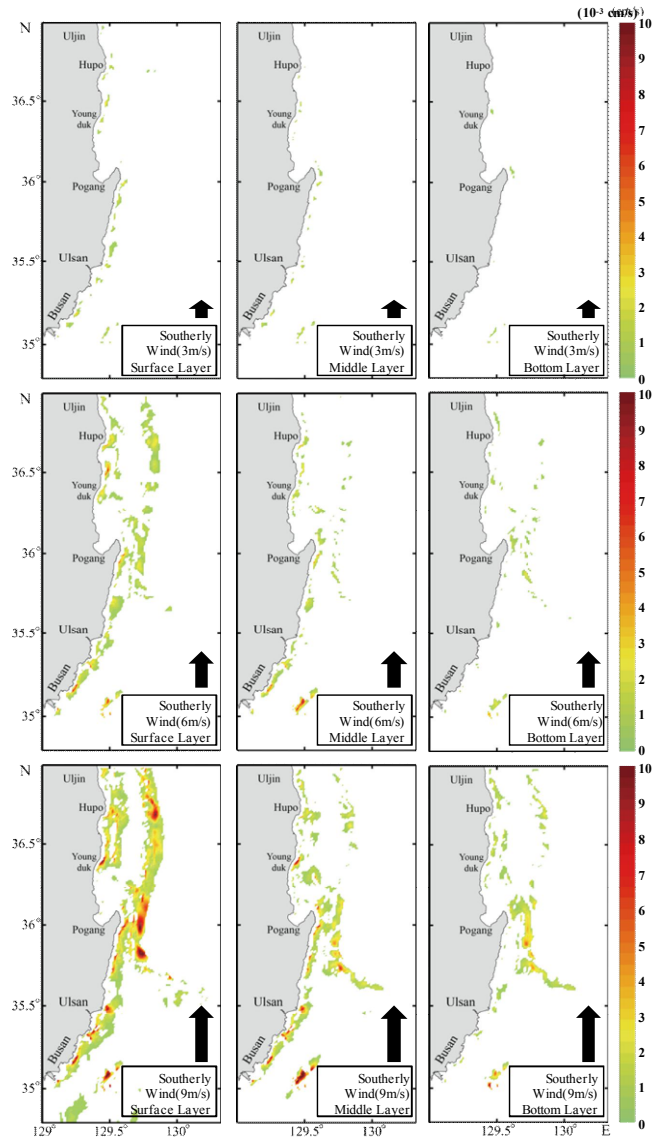


Fig. 3. Horizontal distributions of rising flows generated by southerly wind of 3 m/s (upper), 6 m/s (middle) and 9 m/s (lower) at each layers.

다. 부산, 포항, 영덕 연안에서 최대 $6.5 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 의 상승류가 발생하였다. 또한 후포 외해에 위치한 후포퇴(Hupo Bank) 부근에서도 상승류가 발생하였다. 그러나 9 m/s 풍속의 경우 포항~영덕 남부 앞바다를 제외하고 전 연안에서 상승류가 발생하였다. 특히 포항, 영덕 연안에서의 상승류는 최대 $8.2 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 로 나타났다.

남서풍 3 m/s의 경우 상승류는 표층에서 부산, 울산, 포항, 영덕, 후포 등의 연안에서 $3 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 이하로 나타났다. 풍속 6 m/s의 경우 상승류는 풍속 3 m/s에 비해 넓은 범위로 분포하였다. 울산, 영덕, 후포연안, 후포퇴 부근에서 최대 $8 \times$

한국 동해 연안에서 하계 바람에 의해 발생하는 연안용승에 관한 수치실험

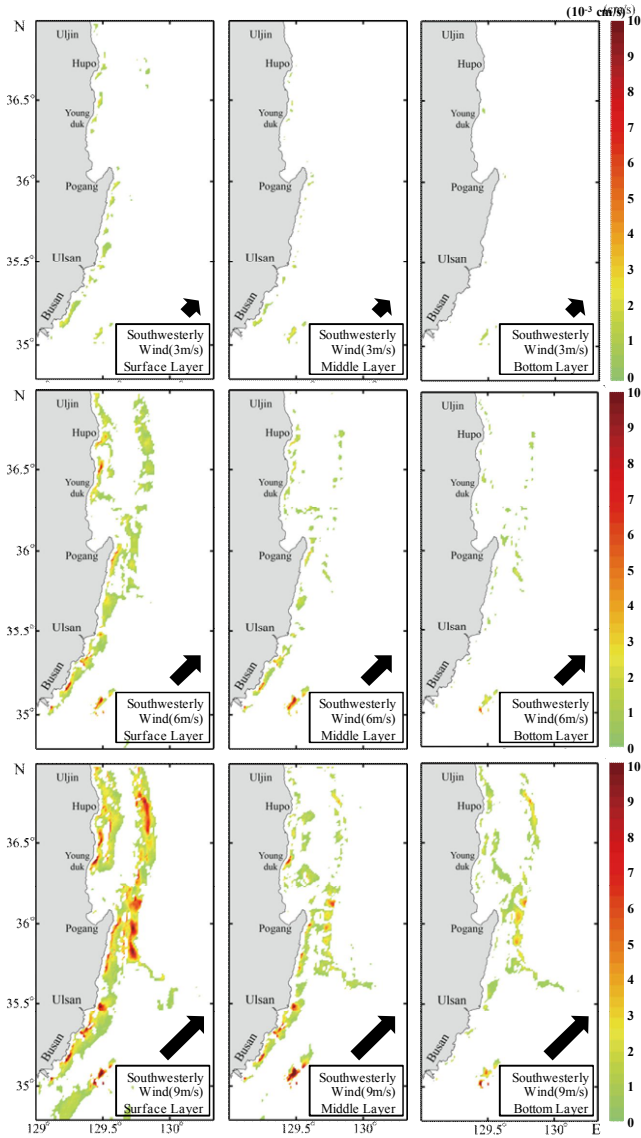


Fig. 4. Horizontal distributions of rising flows generated by southwesterly wind of 3 m/s (upper), 6 m/s (middle) and 9 m/s (lower) at each layers.

$10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 상승류가 발생하였다. 한편 풍속 9 m/s의 경우 상승류는 포항~영덕남부 해역을 제외하고 전 연안에서 발생하였다. 특히 울산, 포항, 영덕, 후포에서 최대 $9.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 강한 상승류를 보인다. 남서풍에 의한 상승류는 전반으로 남풍에 의한 상승류의 분포 형태는 유사하게 나타났다. 그러나 상승류 세기와 분포범위는 남풍에 비해 강하고 넓게 나타나는 특징을 볼 수 있다.

연구해역에서 2013년 7월과 8월에 용승현상이 일어났으며, 용승이 가장 강하게 발생한 시기는 7월 초순이다. NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 표층

수온영상(NIFS, 2013)을 보면 연구 해역의 전 연안을 따라 17°C 이하(2013년 7월 2~8일)의 저수온대가 분포해 있다(Fig. 5 (a)). 해면 4 m 상공에서 관측된 포항 해상부위의 바람자료를 보면 2013년 7월 평균풍속이 5.7 m/s로 나타났다. 모델에서 취송류를 발생시키는 바람장은 해면 10 m 상공에서 발생하는 바람이다. 해면 10 m 상공의 풍속으로 계산하기 위해 풍속의 지수법칙으로 알려진 Sutton 방정식으로 추출한 9.1 m/s의 바람장을 이용하여 취송류를 계산하였다.

남서풍 9.1 m/s 조건에서 수치모델을 실시한 결과에 따른 상승류 분포 범위(Fig. 5 (b))와 위성영상에서 나타난 2013년 하계 표층 냉수대의 범위를 비교해 보면 위성영상에 나타난 냉수대의 분포 범위가 넓다. 모델결과는 상승류가 발생하는 위치를 나타내지만 위성영상은 상승류로 인해 표층으로 냉수가 부상하여 바람에 의해 확장되기 때문에 나타나는 결과이다. 남서풍 9.1 m/s 조건으로 실시한 수치실험 중 표층 취송류의 유동분포(Fig. 5 (c)) 결과 연안역에서 20~25 cm/s의 유속범위로 북동향한다. 이때 용승현상에 의해 발생한 냉수대의 수평적 확산 속도는 약 17~22 km/day 정도로 예측되며 Fig. 5 (d)와 같이 용승 발생 3일 후 냉수대가 확장할 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

SST 위성영상(Fig. 5 (a))과 용승 발생 3일 이후 냉수대 확장 예측 결과(Fig. 5 (c))를 비교해 보면 포항~영덕 연안을 제외한 타 해역에서 유사한 분포를 나타내고 있으며 특히 후포포를 중심으로 좌측과 우측에서의 냉수대 분포가 일치한다.

3.3 용승유량 산정

취송류에 의한 하계의 용승유량을 산정하였다. 용승유량을 산정하기 위해 취송류에 의한 상승류의 수평 분포에서 연구해역을 대표할 수 있으며 용승현상이 활발히 발생하고 상승류의 유속이 강한 5개의 연안(부산, 울산, 포항, 영덕 그리고 후포)을 선정하였다. 또한 5개 정점에서의 일일 용승유량을 Flux($10^5 \times \text{m}^3/\text{day}$)로 환산하여 나타내었다(Table 1).

Table 1. Upwelling flux in the East of Korea ($10^5 \times \text{m}^3/\text{day}$)

Wind dir. - m/s	Pusan	Ulsan	Po hang	Young duk	Hupo	Average
S-3	9.45	5.89	12.53	14.03	12.80	10.94
S-6	19.44	8.70	32.35	29.52	25.46	23.09
S-9	26.28	9.75	51.90	46.04	32.58	33.31
SW-3	13.57	10.53	19.05	18.73	17.71	15.92
SW-6	30.09	22.84	50.84	46.36	38.55	37.74
SW-9	40.26	28.12	70.60	64.99	57.98	52.39

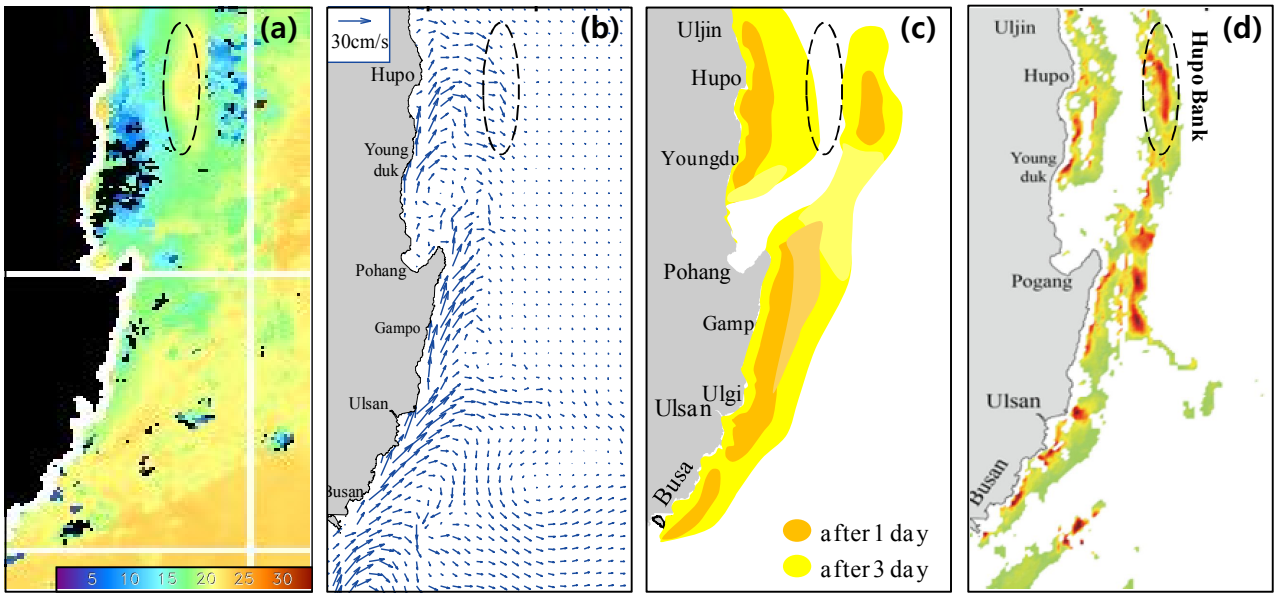


Fig. 5. Satellite image of SST in July 02~08, 2013 by NIFS (a). Horizontal distributions of rising flows generated by southwesterly wind 9 m/s (b). Wind-driven currents of southwesterly 9 m/s (c). Prediction of cold water extension range after 3 days (d).

모든 연안역에서 풍속이 강할수록 상승유량이 많고 남서풍의 경우 남풍에 비해 발생하는 상승유량이 더 크다. 남서풍 9 m/s의 경우 포항 연안에서 $70.60(10^5 \times \text{m}^3/\text{day})$ 로 최대값을 보이고 영덕, 후포, 부산, 그리고 울산 순으로 나타난다. 남풍의 경우 또한 상승유량 순으로 나열하면 남서풍과 같다. 5개 연안에서 일일 평균유량은 남서풍의 경우 남풍에 비해 평균적으로 약 1.5배 크게 나타났다. 바람 방향에 대한 표층의 흐름은 북반구에서 오른쪽으로 $20^\circ \sim 45^\circ$ 의 범위에서 나타난다. 동해 연안의 형태가 남북 방향으로 위치하기 때문에 남풍에 비해 남서풍에 의한 표층수의 흐름이 해안선과 이루는 각이 커져 외해로 유출되는 유량이 증가하므로 나타나는 결과로 판단된다.

Picard and Emery(1990)에 의하면 일반적으로 용승현상이 발생하는 해역의 연직 속도는 $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 11.6 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 이며 하루 동안 $40 \sim 100(10^5 \times \text{m}^3/\text{day})$ 의 유량이 상승한다는 것을 의미한다. 이 결과는 수치실험에서 남서풍 9 m/s 경우 용승현상의 연직유량과 유사한 값을 나타내어 실제 연안용승이 발생하는 현상을 모델로 잘 재현 하였다.

자연에서 일어나는 현상은 다양하고 복잡한 요인들에 의해 나타난다. Lee(1978)에 의하면 Tsushima current의 반시계방향의 순환이 용승에 간접적인 기여를 한다고 하였고, Byun(1989)은 Csanady(1982)의 용승모델을 이용하여 냉수대가 발생하는 위치가 바람의 영향 뿐 아니고 해안선 구조에 의해서도 결정될 수 있음을 밝힌 바 있다. 반면 본 연구에서는 용승현상에 주요원인인 바람에 의한 영향만을 고려하였다. 향후 연

구에서는 선행연구에서 수행된 결과를 바탕으로 바람 외 다양한 요인(쓰시마난류 등)들을 수치모델에 반영한다면 보다 정량적인 계산이 가능 할 것이다. 또한 정량적으로 산정된 용승유량은 저층에서 유광층으로 공급되는 영양염변동에 의한 기초생산력 메커니즘을 이해하는데 기초자료로 활용 가능할 것이다.

4. 결론

한국 동해 연안을 대상으로 용승류의 공간적인 분포를 파악하고 이에 따른 용승유량을 산정하기 위해 연구를 수행하였다. 연구해역에서 용승현상을 발생시키는 주된 요인을 바람이라 가정하고 연구를 진행하였다.

풍향과 풍속의 변화를 주어 실험한 결과 풍속이 강한 조건일수록 상승류의 강도와 분포범위가 넓게 나타났다. 그리고 남서풍의 경우 남풍에 의한 상승류의 분포와 상승유속의 강도가 남풍의 조건에 비해 강하고 넓게 나타났다. 모델 결과에 따라 용승현상이 가장 활발하게 발생하는 연안의 5개 연안에서 용승유량을 산정한 결과 포항, 영덕, 후포, 부산, 그리고 울산 순으로 작아져 연구해역 북쪽 연안역이 남쪽 연안역에 비해 용승유량이 크게 나타났다. 그리고 남풍의 조건에 비해 남서풍의 조건에서 상승유량이 전 해역에서 약 1.5배 크게 나타났다.

남서풍 9.1 m/s 해상풍에 의한 용승역의 수평적 확산 속도는 약 $17 \sim 22 \text{ km/day}$ 정도로 예측된다. 바람이 1주일 이상 지

속된다면 포항 남쪽 연안에서 발생된 냉수대가 울릉도 근해까지 확장된다.

사 사

본 논문 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] An, H. S.(1974), On the cold water mass around the southeast coast of Korean peninsula, J. Oceanol. Soc. Korea, Vol. 9, No. 2, pp. 10-18.
- [2] Blumberg, A. F. and G. L. Mellor(1987), A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three dimensional Coastal Models (N. S. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 1-16.
- [3] Byun, S. K.(1989), Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect, The journal of the oceanological society of Korea, Vol. 24, No. 3, pp. 121-131.
- [4] Csanady, G. T.(1982), On the structure of transient upwelling events, Journal of Physical Oceanography, Vol. 12, No. 1, pp. 84-96.
- [5] Ezer, T., H. Arango and A. F. Shchepetkin(2002), Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects, Ocean Modelling, Vol. 4, No. 3, pp. 249-267.
- [6] Kim, D. S. and D. H. Kim(2008), Numerical simulation of upwelling appearance near the Southeastern Coast of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 14, No. 1, pp. 1-7.
- [7] 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, Vol. 18, No. 2, pp. 149-160.
- [8] Lee, J. C. and J. Y. Na(1985), Structure of upwelling off the southeast coast of Korea, J. Oceanol. Soc. Korea, Vol. 20, No. 3, pp. 6-19.
- [9] Lee, K. B.(1978), Study on the coastal cold water near Ulsan, J. Oceanol. Soc. Korea, Vol. 13, No. 2, pp. 5-10.
- [10] Lim, D. B. and S. D. Chang(1969), On the cold water mass in the Korea Strait, The journal of the oceanological society of Korea, Vol. 4, No. 2, pp. 71-82.
- [11] Picard, G. L. and W. J. Emery(1990), Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. Elsevier, pp. 276-290.
- [12] Ryther, J. H.(1969), Photosynthesis and fish production in the sea, The production of organic matter and its conversion to higher forms of life vary throughout the world ocean, Science (Washington), Vol. 166, pp. 72-76.
- [13] Seung, Y. H.(1974), A dynamic consideration on the temperature distribution in the east coast of Korea in August, J. Oceanol. Soc. Korea, Vol. 9, No. 2, pp. 52-58.
- [14] Suh, Y. S., L. H. Jang and J. D. Hwang(2001), Temporal and spatial variations of the cold waters occurring in the eastern coast of the Korean Peninsula in summer season, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 34, No. 5, pp. 435-444.
- [15] Yanagi, T.(1980), Variability of the constant flow in Osaka Bay, J. Oceanogr. Vol. 36, No. 5, pp. 246-252.

Received : 2017. 05. 25.

Revised : 2017. 06. 26.

Accepted : 2017. 06. 28.