

ORIGINAL ARTICLE

남해 서부 연안해역의 난류 확산 특성

최양호* · 이미진¹⁾ · 이명선²⁾

국립수산과학원 서해수산연구소, ¹⁾전라남도해양수산과학원, ²⁾목포지방해양수산청

Characteristics of Eddy Diffusion in the Southwest Coastal Zone of Korea

Yang Ho Choi*, Mi Jin Lee¹⁾, Myong Sun Lee²⁾

West Sea Fisheries Research Institute, NIFS, Incheon 22383, Korea

¹⁾Jeollanamdo Ocean & Fisheries Science Institute, Wando 59116, Korea

²⁾Mokpo Regional Office of Oceans and Fisheries, Mokpo 58746, Korea

Abstract

Seawater movement analyses and dye diffusion experiments were conducted to understand the characteristics of eddy diffusion in the southwest coastal zone of Korea. The findings indicate that pollutants entering the study area were most influenced by tidal currents and showed temporal and spatial variations according to the turbulent characteristics of the tidal current. Pollutants entering the study area are likely to travel a distance of approximately 2 km (within 1 h) following the direction of the tidal currents and show a spreading distance (diameter of the diffusion area) of within 10% of the travel distance (within 200 m). The dispersion of the diffusion area is expected to increase in proportion to the elapsed time raised to a power of 1.19 to 1.23. The results are expected to provide a basis for using the eddy diffusion coefficient as a temporally variable value (previously assumed to be a constant based on empirical data), thereby contributing to improving the predictive accuracy of ocean diffusion models.

Key words : Pollutant, Diffusion, Diffusion coefficient, Tidal current

1. 서론

국내에서 가장 활발하게 해조류(미역, 다시마 등)와 전복 양식이 이루어지고 있는 남해 서부 연안역은 대규모 임해공업단지 조성 및 연안 개발 등으로 해안지형이 변화하고 오염물질의 해양유입이 점점 증가하면서 연안 양식장의 어장환경이 위협을 받고 있다(Kang et al., 2015; Lee et al., 2016; Choi et al., 2019; Jeong et al., 2019).

해양에 유입된 오염물질은 주변 해역으로 확산되면서 영향을 미치게 되는데, 오염물질의 확산은 해류와 조류(tidal current) 등에 의한 수송과 난류적 확산에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다. 해양에서의 확산은 분자 운동에 의한 확산과 구분되며, 흐름의 난류 성분에 의한 현상을 표현하기 위하여 난류(turbulence) 혹은 와동(eddy) 확산이라고 한다. 즉, 해양에서의 확산은 유체의 고유 특성이 아니라 흐름의 특성에 기인한 것이기 때문에 시간과 공간에 따라 그 정도가 달라

Received 9 July, 2024; Revised 3 August, 2024;

Accepted 6 August, 2024

*Corresponding author : West Sea Fisheries Research Institute, NIFS, Incheon 22383, Korea
Phone : +82-32-745-0652
E-mail : plumechoi@gmail.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지게 된다. 따라서 특정 해역의 확산 특성을 정량화해서 수치적으로 표현하는 것은 쉽지 않다(Lee and Kang, 1997).

해양에서의 난류적 유동 특성에 수반된 물질의 불규칙한 확산 정도는 와동확산계수(eddy diffusion coefficient)로 표현된다. 기존에는 와동확산계수를 상수(constant)로 취급함으로써, 확산 모델 등에서 난류적 확산의 분산이 시간에 따라 선형적으로 증가하는 결과를 낳았다. 그러나 실제 해양에서 관측된 난류(와동) 확산은 시간에 따라 지수함수로 증가하는 특성을 보인다. 특히 난류 확산의 분산에 대한 시간의 거듭제곱은 특정 상수값이 아니고 흐름 양상에 따른 난류의 시공간적인 규모나 상황에 따라 다르게 나타난다. 연안역에서의 염료 확산 실험 결과에 의하면, 난류 확산 면적의 분산은 평균적으로 시간의 2.34 제곱에 비례하여 증가한 것으로 보고 되었으며(Okubo, 1971), 수시간 이내의 시간규모에서의 난류 확산 면적의 분산은 시간의 1.5~2.0 제곱에 비례하여 증가한다고 알려져 있다(Bowden et al., 1975). 연안역과 외해역을 비교할 때 전반적으로 외해역의 난류 확산의 분산이 큰 경향을 보이는데, 연안역에서 난류 확산의 분산은 시간의 거듭제곱이 1 부근의 값을 갖고, 외해역은 3 부근의 값을 갖는다(Pasmanster, 1988). 한반도 주변 연안역에서의 부표 분산 실험 결과에 의하면, 난류 확산의 분산은 시간의 1.25~3.46 제곱에 비례하여 증가한 것으로 산정되었으며, 해역에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(Kang and Lee, 1994; Lee and Kang, 1997).

해역별 확산 특성에 대한 정보는 오염물질의 해역별 거동 특성 및 영향 범위를 파악하는데에 필수적이다. 그러나 본 연구 해역에서의 확산 특성을 이해할 수 있는 난류 확산에 대한 연구는 전무한 상태이다. 난류 확산 정도를 표현할 수 있는 와동확산계수를 추정하기 위한 방법으로는 염료 확산 실험을 통한 확산 면적의 분산을 이용하는 방법과 고정점 연속 측류 자료를 이용한 방법 및 여러개 부표를 추적하는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 형광 염료를 이용한 확산 실험을 통해서 연구 해역의 난류적 유동 특성에 수반된 확산 면적의 시간적인 변화를 관측하고 와동확산계수를 추정할 결과를 고찰하고자 한다.

2. 재료 및 방법

남해 서부 연안역의 확산 특성을 이해하기 위하여 전남 해남군 송지면 인근 해역에서 확산 실험을 실시하였다(Fig. 1). 실험 해역은 해조류 및 전복 양식이 활발한 해역으로 해안선에서 약 3 km 정도 떨어져 있고 평균 수심은 약 10 m 정도이다. 확산 실험은 확산 효과가 가장 클 것으로 예상되는 대조기 최강 낙조류시(2007년 6월 18일 16:00~17:00)와 창조류시(2007년 6월 19일 11:40~12:40)에 각각 1시간 동안 실시하였으며, 연구해역의 해수유동(해류 및 조류) 특성을 파악하기 위하여 도플러유속계(acoustic doppler current profiler)를 이용하여 표층 수심 1 m 지점에서 32일(2007년 6월 27일~7월 29일) 동안 연속 관측한 유향-유속 자료를 분석하였다. 실험 당시의 바람은 풍속 2~3 m/s의 남동풍이 우세하였으며, 파고는 0.3 m 정도로 잔잔한 해면 상태를 보였다.

염료 확산 실험을 위하여 형광 염료 Rhodamine WT를 사용하였으며, 희석된 염료를 투입한 후 선박을 이용해 흐름 방향을 따라 가면서 퍼진 정도를 GPS를 이용하여 위치 정보를 기록하고, 각 위치에서 채수한 시료는 형광측정기를 이용하여 염료의 농도를 측정하였다. 투입된 염료는 투입지점부터 조류를 따라 이동하면서 원에 가까운 형태를 유지하면서 퍼지는 양상을 보여 시간에 따른 이동거리 및 퍼지는 정도(확산 거리)를 측정할 수 있었다.

본 연구에서는 확산된 거리를 직경으로 하는 원의 면적을 확산 면적으로 가정하고, 확산 면적의 분산(σ^2)에 대하여 $\sigma^2 = At^m$ 관계식을 이용하여 시간에 대한 지수관계를 조사하였으며(Bowden et al., 1975), 와동확산계수(K)는 확산 면적의 분산(σ^2)의 시간에 대한 변화율로 다음과 같이 정의하였다.

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \quad (1)$$

여기에 $\sigma^2 = At^m$ 의 관계를 적용하면 와동확산계수(K)는 다음과 같이 표현된다(Bowden et al., 1975).

$$K = \frac{1}{2} A m t^{m-1} \text{ 또는 } K = \left(\frac{2m-1}{m}\right) \sigma^m \quad (2)$$

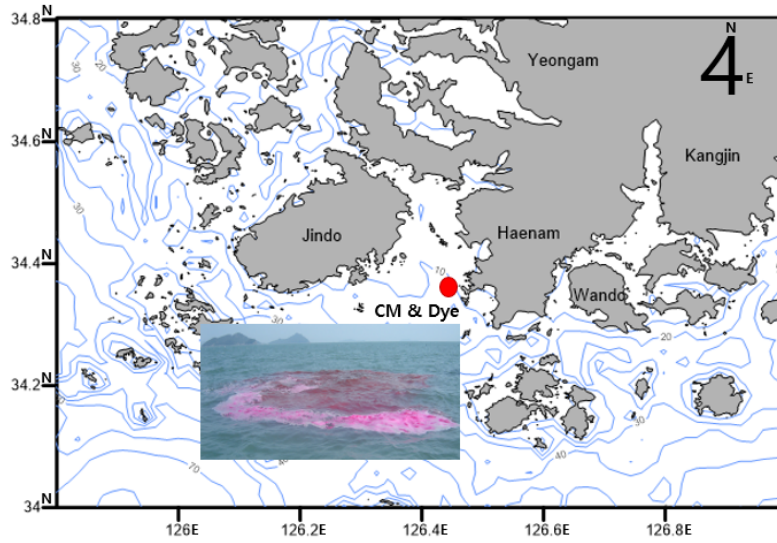


Fig. 1. Bottom topography of the study area and Station (CM & Dye) of the tidal current observation and Dye experiments.

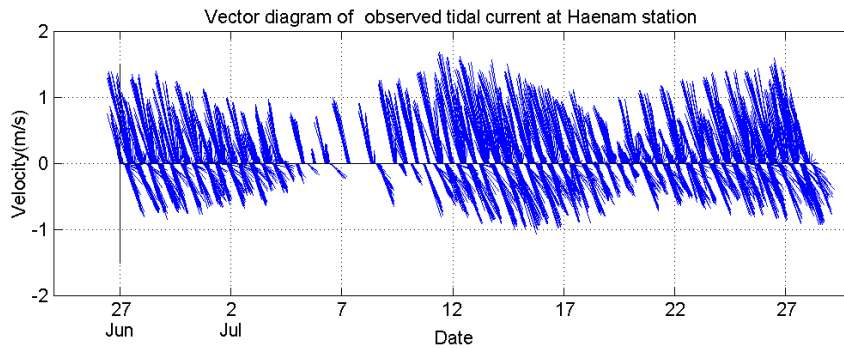


Fig. 2. Vector diagram of the observed tidal current at Haenam.

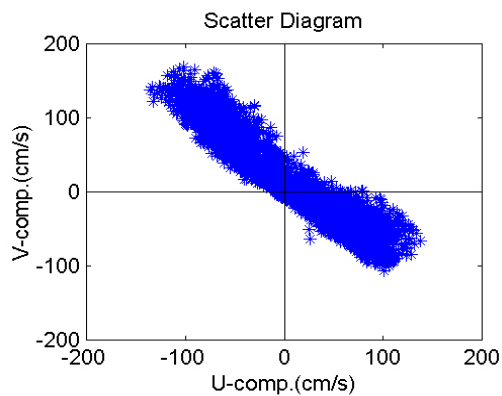


Fig. 3. Scatter diagram of the observed tidal current at Haenam.

3. 결과 및 고찰

3.1. 해수유동 특성

Fig. 2는 해수유동 자료에 대한 벡터도를 보여주는 것으로, 연구해역은 조류에 의한 해수유동이 지배적이며 대조기와 소조기, 창조류와 낙조류에 따라 주기적으로 변화하는 유향-유속 특성을 잘 보여주고 있다. 연구해역의 조류는 수로의 방향을 따라 창조시와 낙조시에 각각 북서방향과 남동방향으로 흐르며, 창조류 최강 유속은 1.93 m/s, 낙조류 최강 유속은 1.53 m/s로 낙조류에 비해 창조류의 유속이 우세하였다. 유속의 성분별 특성에 의하면, 동-서 성분의 유속은 비슷한데

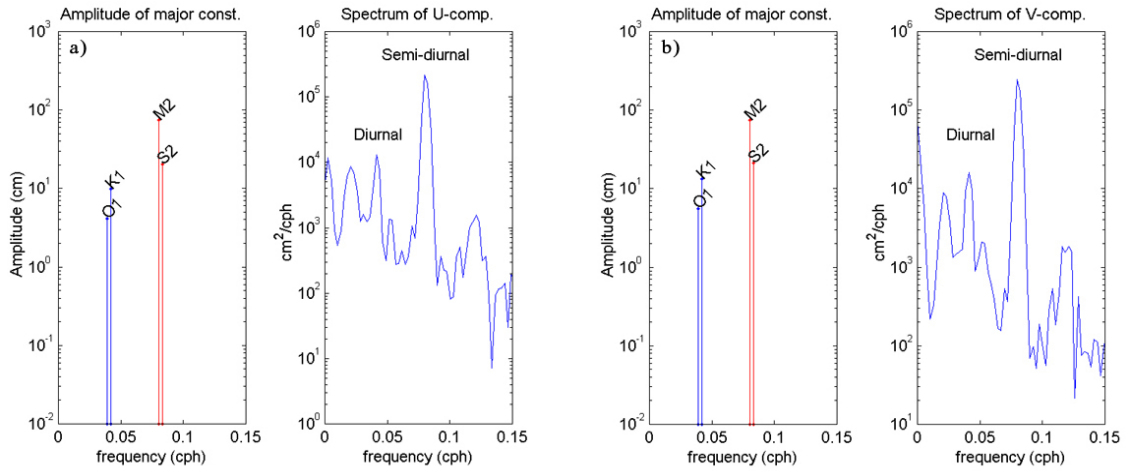


Fig. 4. Results of the harmonic and spectrum analysis for U-comp. (a) and V-comp. (b) of the observed tidal current at Haenam.

남-북 성분의 유속은 북향 성분의 세기가 우세한 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 각 정점별 유향-유속 자료의 남-북 성분과 동-서 성분에 대한 산점도(scatter diagram)를 통해 더 정확하게 파악되며, 수로가 놓여 있는 북서 및 남동 방향으로 주 흐름이 형성되어 있음을 알 수 있다(Fig. 3).

Fig. 4는 유속 자료의 동-서 성분과 남-북 성분에 대한 조화분해 및 스펙트럼 분석 결과를 도시한 것이다. 32개 분조에 대한 조화분석 결과 중에서 주요 4대 분조에 대한 결과를 비교한 결과, 동-서 및 남-북 성분 모두 1일 2회의 반일주조(M2, S2) 성분의 진폭(20.2 ~ 75.1 cm)이 1일 1회의 일주조(O1, K1)의 진폭(4.1 ~ 13.2 cm)에 비해 크게 나타남을 보여주었다. 스펙트럼 결과에서도 동-서 및 남-북 성분 모두 반일주조와 일주조에서 의미있는 스펙트럼 피크를 보여주었다.

3.2. 와동확산계수 추정

Fig. 5는 염료 확산 실험시 확산되는 염료를 추적한 궤적을 도시한 것으로, 1차 실험(a)이 실시된 낙조류(2007년 6월 18일 16:00~17:00)에는 남쪽 방향으로 이동되면서 확산이 이루어지고, 2차 실험(b)이 실시된 창조류(2007년 6월 19일 11:40~12:40)에는 북쪽 방향으로 이동되면서 확산되는 양상을 보여주고 있다. 이러한 결과는 실험 당시 관측된 70 cm/sec 내외의

창조류와 낙조류의 주기적인 해수유동 변화에 의한 것으로, 실험 당시의 바람은 강하지 않아 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 낙조류 실험시 염료는 투입 지점으로부터 남동쪽으로 약 2.1 km 이동하였으며, 최대로 확산된 거리는 약 170 m 정도로 확산된 거리가 조류(tidal current)에 의한 이동거리의 8%에 해당되는 것으로 나타났다. 창조류 실험시 염료는 투입 지점으로부터 북쪽으로 약 1.8 km 이동하였으며, 최대로 확산된 거리는 약 112 m 정도로 확산된 거리가 조류에 의한 이동거리의 6%에 해당되는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 낙조류 염료 확산 실험(a)과 창조류 염료 확산 실험(b)에서 얻어진 결과를 바탕으로 시간별 확산 면적의 분산을 도시한 것이다. 확산 면적의 분산과 시간과의 관계를 근거로 식(1)을 이용하여 와동확산계수를 추정한 결과, 낙조류 1시간 동안의 실험에 의한 와동 확산 면적의 분산(σ^2)은 $\sigma^2 = 2.51t^{1.23}$ 이었으며, 와동확산계수(K)는 $K = 1.54t^{0.23}$ 로 추정되었다. 창조류 1시간 동안의 실험에 의한 와동 확산 면적의 분산(σ^2)은 $\sigma^2 = 1.31t^{1.19}$ 이었으며, 와동확산계수(K)는 $K = 0.78t^{0.19}$ 로 추정되었다. 이때 확산 면적의 분산(σ^2)의 단위는 m^2 이며, 시간(t)의 단위는 초(sec), 와동확산계수(K)의 단위는 m^2/sec 이다.

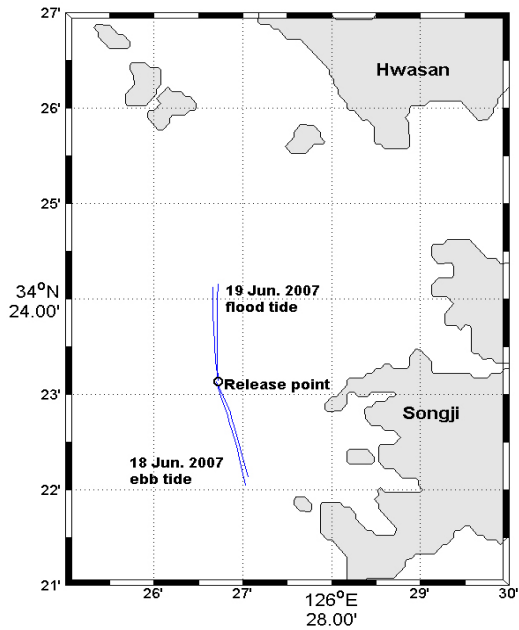


Fig. 5. Trajectory of spreading distance of the fluorescence dye (Rhodamine WT).

4. 결론

연구해역은 해조류와 전복 양식이 국내에서 가장 활발한 곳으로 대규모 연안 개발과 임해공업단지 조성으로 인하여 오염물질의 해양 유입이 증가하면서 여장 환경이 위협을 받고 있다.

연구해역에 대한 해수유동 관측 결과, 조석에 의한 조류(tidal current)가 지배적임을 보였다. 조류는 수로의 방향을 따라 창조시와 낙조시에 각각 북서방향과 남동방향으로 흐르며, 낙조류보다 창조류의 유속이 우세하였다. 유속의 성분별 특성에 의하면, 동-서 성분의 유속은 비슷한데 남-북 성분의 유속은 북향 성분의 세기가 우세하였다. 이는 해안선과 해저지형의 영향이 반영된 결과로 해석된다. 유속 자료에 대한 조화분해 및 스펙트럼 분석 결과, 동-서 및 남-북 성분 모두 1일 2회의 반일주조 진폭이 1일 1회의 일주조에 비해 크게 나타났고, 반일주조와 일주조에서 의미있는 스펙트럼 피크를 보였다. 이러한 주기적인 해수유동 특성은 해수 중의 보존성 물질의 이동 및 확산에 영향을 주고 수온과 염분 등의 분포와 단주기 변동에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

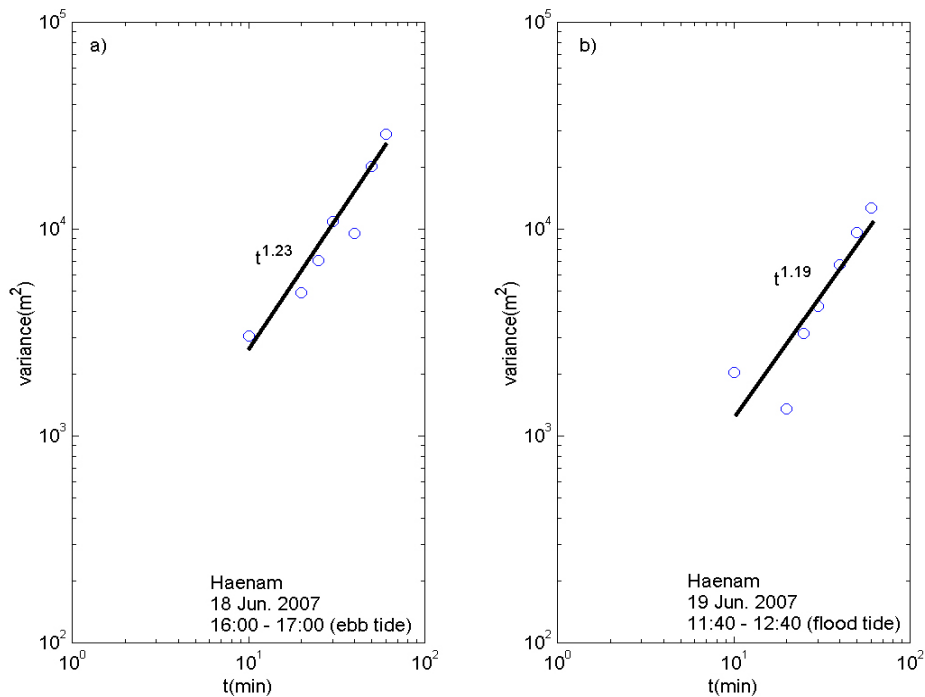


Fig. 6. Temporal variance of spreading area for ebb tide (a) and flood tide (b) by the fluorescence dye (Rhodamine WT) experiments.

염료 확산 실험 결과, 조석에 의한 창조류와 낙조류에 따라 염료가 확산되는 양상을 보였으며, 바람은 강하지 않아 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단되었다. 낙조류시 염료의 최대 확산 거리는 조류에 의한 이동거리의 8%를 보였고, 창조류시는 조류에 의한 이동거리의 6%를 보였다. 확산된 거리가 조류 이동거리의 10% 이내를 보인 것은 일반적으로 20% 내외를 보이는 타 해역에 비해 상대적으로 작은 값이다(Kang and Lee, 1994; Lee and Kang, 1997). 이러한 결과는 타 해역에 비해 유속의 공간적인 경사(gradient)가 크지 않은 실험 해역의 특성이 반영된 것으로 해석된다.

염료 확산 면적의 분산과 시간과의 관계를 이용하여 와동확산계수를 추정된 결과, 낙조류 확산 실험에 의한 와동 확산 면적의 분산(σ^2)은 $\sigma^2 = 2.51t^{1.23}$ 이었으며, 와동확산계수(K)는 $K = 1.54t^{0.23}$ 로 추정되었다. 창조류 확산 실험에 의한 와동 확산 면적의 분산(σ^2)은 $\sigma^2 = 1.31t^{1.19}$ 이었으며, 와동확산계수(K)는 $K = 0.78t^{0.19}$ 로 추정되었다. 즉, 실험 해역에서 확산 면적의 분산은 시간의 1.19 제곱과 1.23 제곱에 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 일반적으로 연안역에서 1 부근의 값을 갖는다는 Pasmanster(1988)의 연구결과와 잘 부합되지만, 한반도 주변 연안역에서 1.25~1.99 제곱의 범위 값을 보고한 Kang and Lee (1994)의 결과에 비해서는 작은 값이다. 이는 타 해역에 비해 유속의 공간적인 경사가 크지 않은 실험 해역의 해수유동 특성이 반영되었기 때문으로 판단된다.

본 연구 결과에 의하면, 연구 해역으로 유입된 오염물질의 확산 영역은 일차적으로 조류에 가장 큰 영향을 받으며 흐름의 난류적 특성에 따라 시-공간적인 변화를 보일 것으로 판단된다. 연구 해역으로 유입된 오염물질은 유입 당시의 조류의 방향에 따라 약 2 km(1 시간 동안) 내외를 이동하면서 이동거리의 10% 이내(직경 약 200 m 이내)의 확산 면적을 보일 것으로 예상되며, 이때 확산 면적의 분산은 시간의 1.19~1.23 제곱에 비례하는 값을 보일 것으로 예상된다. 본 연구 결과는 기존의 경험적인 상수값으로 가정했던 와동확산계수를 연구해역에 적합하고 시간에 따른 변화를 반영해 주는 값으로 적용할 수 있는 근거를 마련하였으며, 평균류에 의한 수송을 계산하는 수리역학 모델과 연계한 해양 확산 모델에서 상수값 대신 사용함으로써 보다 정확한 확산 면적을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년 국립수산과학원 수산과학연구소업(R2024009) 지원으로 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- Bowden, K. F., Krauel, D. P., Lewis, R. E., 1975, Some features of turbulence diffusion from a continuous source at sea, *Adv. Geophys.*, 18, 315-329.
- Choi, J. U., Lee, Y. G., Jeong, D. U., Choi, Y. H., Woo, H. J., 2018, Effects of abalone farming cage removal on the benthic foraminiferal assemblages, *J. Coast. Res. Special Issue*, 85, 321-325.
- Choi, Y. H., Jeong, D. U., Lee, Y. G., Choi, J. U., Kim, S., Lee, J. S., 2019, Opportunistic species and seasonal variation in epiphytic foraminiferal assemblages in abalone farm nets, *J. Coast. Res.*, 35, 559-573.
- Jeong, D. U., Wee, D. H., Choi, Y. H., Lee, Y. G., 2019, Abalone farm activities and eutrophication of benthic foraminiferal assemblage, *Kor. J. Malacol.*, 35, 45-57.
- Kang, J. K., Lee, Y. G., Jeong, D. U., Lee, J. S., Choi, Y. H., Shin, Y. K., 2015, Effect of abalone farming on sediment geochemistry in the shallow sea near Wando, South Korea, *Ocean Sci. J.*, 50, 669-682.
- Kang, Y. Q., Lee, M. J., 1994, Fractals in the spreading of drifters: Observation and simulation, *J. Oceanol. Soc. Kor.*, 29, 392-401.
- Lee, Y. G., Choi, Y. H., Jeong, D. U., Lee, J. S., Kim, Y. W., Park, J. J., Choi, J. U., 2016, Effect of abalone farming on seawater movement and benthic foraminiferal assemblage of *Zostera marina* in the inner bay of Wando, South Korea, *Mar. Poll. Bull.*, 109, 205-220.
- Lee, M. J., Kang, Y. Q., 1997, Eddy diffusion in coastal seas: Observation and fractal diffusion modelling, *J. Kor. Soc. Coast. and Ocean Eng.*, 9, 115-124.
- Okubo, A., 1971, Oceanic diffusion diagram, *Deep Sea Res.*, 18, 789-802.
- Pasmanster, R. A., 1988, Deterministic diffusion, effective shear and patchiness in shallow tidal flows. in: J. Dronkers, V. van Leussen(eds.), *Physical process in Estuaries*, Springer-Verlag, New York, 42-52.

- Researcher. Yang Ho Choi
West Sea Fisheries Research Institute, National Institute
of Fisheries Science
plumechoi@gmail.com

- Researcher. Mi Jin Lee
Jeollanamdo Ocean & Fisheries Science Institute
appletree005@gmail.com
- Researcher. Myong Sun Lee
Mokpo Regional Office of Oceans and Fisheries
003276@hanmail.net