

## 碎波帶内の 擴散

유 동 훈\*

### 1. 서 론

쇄파대에서 발생하는 연안류의 분포는 완만한 곡선분포를 보이는데 단순파인 경우 이의 해석은 확산계수의 도입으로만 가능하다는 점은 널리 알려진 사실이다. Harris (1967)는 현장관측과 수조실험으로 이 분야 초기연구로서 쇄파대 확산의 변이를 무시하고 평균확산계수치만을 고려하였다. 연안류해석의 확고한 이론적 기초를 마련한 Longuet-Higgins(1970)는 그의 이론식 도출과정에서 확산계수 도입의 필요성을 인식하였으며, 특성길이로서 연안선으로부터의 거리를 택하고 특성속도로서 파속을 택하였으며 쇄파대내에서 파속은 군속도와 같다고 가정하였다. 한편 Thornton (1970)과 Jonsson, et al.(1974)은 해저면에서의 파운동거리를 특성길이로 해저면유속을 특성속도로 취하였다. 이상의 방법들은 쇄파대확산의 주요 원인이 되는 쇄파에너지손실률을 간접적으로 표현하는 것으로 판단되는데 Battjes(1975)는 쇄파에너지손실률의 삼승근이 유속과 차원이 같아 이를 난류특성속도로 적합하다고 판단하였으며, 난류운동의 1차적 제한이 수평거리보다는 수심에 따르기 때문에 특성길이로는 연안선으로부터의 거리대신에 수심이 적합하다고 판단하였다.

Battjes(1975)의 초기접근방법은 쇄파대 확산현상을 충분히 인지하고 특성치를 도출하였으므로 선택된 특성치들이 적절한 것으로 판단되나 확산계수분포가 쇄파점부근에서 불연속하게 나타난다. 이는 난류에너지보존식의 도입으로 해결할 수 있을 것으로 인식되어 왔으며, Battjes(1983)는  $\kappa$  보존식의 도입으로, Wind & Vreugdenhil(1986)은  $\kappa-\epsilon$  보존식의 도입으로 해석하고자 했다. O'Connor & Yoo (1987)는 이상의 방법들을 비교하였는데  $\kappa-\epsilon$  보존식 이용의 문제점을 발견하였으며 이의 개선책으로서 Yoo & O'Connor(1988)는 확산계수 계산시 파고를 최소확산거리로 취할 것을 제안하였다. 개선된  $\kappa-\epsilon$  보존식의 도입으로 불규칙파에 의한 연안류 계산에도 부분적인 성공을 거두었으나 (참조 유, 1990), 여타 경우에 적용하였을 때 문제점이 도출되었다.

---

\* 아주대학교 토목공학과

$\kappa$ - $\varepsilon$  보존식의 문제점은 이로써 계산되는 확산계수가 쇠파대 밖에서도 계속해서 증가하는 것으로 나타난다는 사실이다. 이는 우리가 인지하고 있는 쇠파대 확산현상과 매우 다른 것으로 판단되며, 더욱이  $\kappa$ - $\varepsilon$  보존식에 사용되는 제 계수치의 변이가 매우 커서  $\kappa$ - $\varepsilon$  보존식의 예측능에 많은 의문점을 갖게 된다. 따라서 파도에 의한 연안류를 보다 올바르게 해석하고 예측하려면 난류에너지보존식을 개선하여 제 경험상수들이 만유상수(universal constant)가 될 수 있도록 관계식을 유도하거나 새로운 난류에너지보존식을 사용하여야 할 것이다.

## 2. 확산계수

난류에너지보존식  $\kappa$ - $\varepsilon$  을 사용하여 확산계수는 다음과 같은 관계식으로 구해진다 (Launder and Spalding, 1974):

$$\nu_t = C\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

여기서  $\kappa$  는 난류운동에너지,  $\varepsilon$  는  $\kappa$ 의 손실률이며,  $C\mu$  는 상수이다. 상기식에서 확산계수는  $\kappa$ 의 제곱에 비례하는 반면에  $\varepsilon$ 에는 역비례함을 알 수 있다.  $\kappa$ - $\varepsilon$  보존식을 사용하여 식 (1)로 구한 확산계수와 연안류의 계산예가 Fig.1(a)에 도시되어 있다 (O'Connor & Yoo, 1987).

상기 결과에서 알 수 있듯이 확산계수가 쇠파대 밖에서도 계속해서 증가추세를 보이고 있는데 이는 우리가 이해하고 있는 쇠파대 확산현상과 상당한 차이를 갖는 것이다.  $\kappa$ - $\varepsilon$  보존식의 문제점은 확산계수가  $\varepsilon$ 에 역비례하는 사실에 연유하는 것으로 판단된다. 즉  $\varepsilon$ 이 작아질 때  $\kappa$ 도 자동적으로 작아져야하나 수치해석상의 오차누적으로 매우 작은  $\varepsilon$ 에도 불구하고 상당한  $\kappa$ 량의 존재로 확산계수가 몹시 크게 산정되고 있다.

초기 난류해석모형연구에서, 확산계수는 난류에너지  $\kappa$ 의 근과 확산거리  $l$ 에 비례하는 것으로 제안하였으며 다음과 같다.

$$\nu_t = C'\mu \kappa^{1/2} l \quad (2)$$

식 (2)는 잘 알려진 Kolmogorov-Prandtl 관계식이며, 상수  $C'\mu$ 는 보통 단위치 1로 대

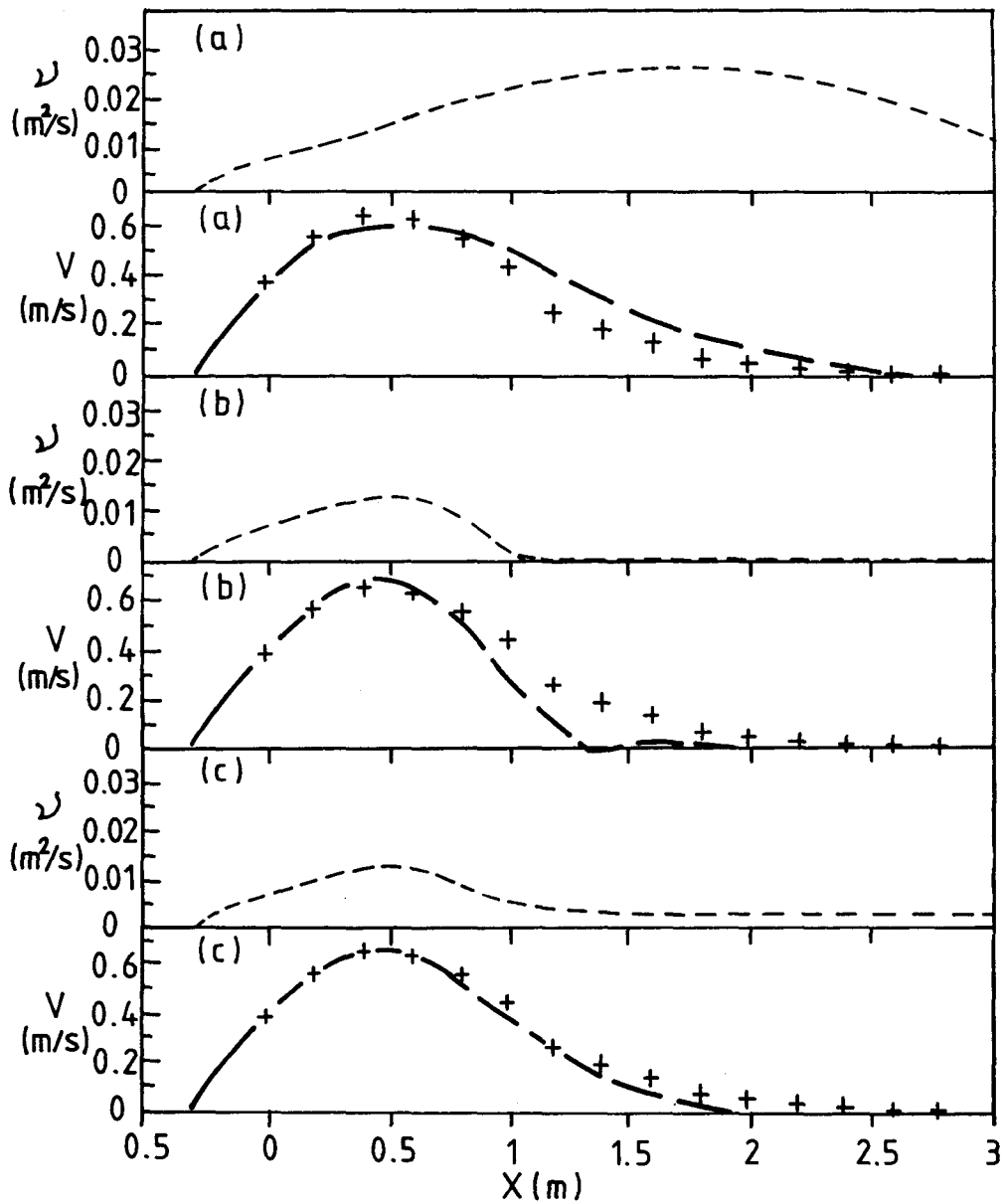


Fig.1 Cross-shore profiles of eddy viscosity and current velocity, using (a)  $\nu = \nu_t$  from  $\kappa$ - $\epsilon$  equations, (b)  $\nu = \nu_t$  from  $\kappa$ - $l$  equations, (c)  $\nu = \nu_t + \nu_s$ ,  $\nu_t$  from  $\kappa$ - $l$  equations ( Data after Visser (1984, 1991), Case 1 )

치한다. 상기 관계식은 확산계수가  $\kappa$ 와  $l$  모두에 비례하기 때문에 수치해석상 다루기에 훨씬 편리할 것이다.

Launder and Spalding (1974)은  $l$ 의 보존식도  $\kappa$ 의 보존식과 유사한 형태를 취할 수 있을 것으로 제안하였으며, 그들의 제안에 기초하여 다음과 같은  $\kappa$ - $l$  보존식을 사용한다.

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\nu_k \frac{\partial \kappa}{\partial x}) + \nu_t (\frac{\partial V}{\partial x})^2 + \frac{D_t}{\rho d} - C_d \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (3)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\nu_l \frac{\partial l}{\partial x}) + C_1 \frac{l}{\kappa} \nu_t (\frac{\partial V}{\partial x})^2 + C_t \kappa^{1/2} - C_2 f_t l \quad (4)$$

여기서  $D_t$ 는 쇄파와 마찰에 의한 에너지손실률,  $\rho$ 는 밀도,  $d$ 는 수심,  $\nu_k$ 는  $\kappa$ 와 관련된 확산계수,  $\nu_l$ 는  $l$ 에 관련된 확산계수이며,  $C_d$ ,  $C_t$ ,  $C_1$  and  $C_2$ 는 상수들이고  $f_t$ 는 난류특성주파수이다.

상기식 (2), (3), (4)를 사용하여 구한 확산계수와 연안류의 유속분포가 Fig.1(b)에 도시되어 있다.  $\kappa$ - $l$  보존식을 사용하여 구한 확산계수의 분포가  $\kappa$ - $\epsilon$  보존식을 사용하여 구한 확산계수의 분포보다 양호한 것으로 판단되나 쇄파점부근에서 확산계수가 급격히 떨어져서 연안류 유속이 관측치보다 상당히 작게 산정하는 경향이 있다. 이는 연안류확산에 난류운동뿐만아니라 유속의 연직변화율이 추가적인 역할을 하며 또한 잉여응력(radiation stresses) 산정에 있어 일반 Potential Theory는 상당한 오차를 발생하게 되는데 이러한 오차를 확산계수의 도입으로 조정할 수 있을 것으로 가정한다. 즉 총 확산계수는 다음과 같이 구해진다.

$$\nu = \nu_t + \nu_s \quad (5)$$

여기서  $\nu_t$ 는 난류운동에 연유된 확산계수이며,  $\nu_s$ 는 유속의 연직변화율과 잉여응력의 오차에 기인하는 확산계수이다.

$\nu_s$ 를 마찰에너지손실률의 삼승근과 수심에 비례한다고 가정한다. 즉

$$\nu_s = M_s (D_f / \rho)^{1/3} d \quad (6)$$

여기서  $D_f$ 는 마찰에너지손실률,  $M_s$ 는 상수이다. 상기식 (5)를 도입하였을 때 계산된

확산계수와 연안류의 유속분포가 Fig.1(c) 에 도시되어 있다. 산정된 유속분포가 관측 자료와 거의 일치할 뿐만아니라 확산계수의 분포도 만족스러운 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

쇄파대 확산의 주 원인은 파도의 쇄파에 의한 에너지손실이며, 확산계수 산정에 사용된  $\kappa-\epsilon$  보존식은 문제점을 노출하였다. 즉 우리가 이해하기에 확산은 쇄파대 내에 한정적으로 강할 것으로 예상되는데  $\kappa-\epsilon$  보존식을 사용한 계산결과는 난류확산 계수가 쇄파대 밖으로도 계속해서 증가추세를 보인다는 점이다. 이는 확산계수가  $\epsilon$ 에 역비례관계를 이루는데 연유하는 것으로 판단된다.  $\kappa-l$  보존식은 확산계수가 두 변수  $\kappa$ 와  $l$  모두에 비례관계를 이루기 때문에 계산에 상당한 이점이 있으며, 산정된 확산 계수의 분포가 우리가 이해하고 있는 쇄파대현상과 거의 일치하는 것으로 사료된다. 그러나 난류확산계수의 도입만으로는 연안류의 유속분포가 쇄파점 부근에서 관측치에 비하여 작게 산정되는데 이는 또 다른 현상에서 연유한 확산이 존재함을 시사한다.

추가확산계수를 마찰에너지손실률의 삼승근에 비례한다고 가정하여 산정된 연안류의 유속분포는 관측치와 거의 일치하며, 이러한 추가확산은 연안류의 연직변화와 잉여 응력계산의 오차에 연유한 것으로 판단된다.  $\kappa-l$  보존식을 사용하여 난류확산계수를 구하고 연안류 연직변화 및 잉여응력 오차에 기인한 추가확산을 고려하여 여타 실험자료와 불규칙파에 대한 현장관측자료 ( Thornton and Guza, 1986 ) 에 적용하였을 때  $\kappa-l$  보존식에 사용된 계 경험계수들을 거의 일정하게 취하여 연안류 유속분포를 예측할 수 있었다 ( Yoo, 1993 ).

### 참 고 문 헌

- 유 동 훈, 1990, 불규칙파에 의한 연안류, 대한토목학회논문집, 10-4: 151-158.
- Battjes, J.A., 1975, Turbulence in the surf zone, Proc. Modelling Techniques, ASCE: 1050-1061.
- Battjes, J.A., 1983, Surf zone turbulence, Proc. Seminar on Hydrodynamics of Waves in Coastal Areas, I.H.A.R., Moscow: 139-140.
- Harris, S., 1967, Field and model studies of the nearshore circulation, Ph.D.

- Thesis, University of Liverpool.
- Jonsson, I.G., et al., 1974, Computation of longshore currents, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE: 699-714.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, The numerical computation of turbulent flow, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, p. 269.
- Longuet-Higgins, M.S., 1970, Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, J. Geoph. Res., 75(33): 203-248.
- O'Connor, B.A. and Yoo, D., 1987, Turbulence modelling of surf zone mixing processes, Proc. Conf. Coastal Hydrodynamics, Delaware, ASCE: 371-383.
- Thornton, E.B., 1970, Variation of longshore current across the surf zone, Proc. 12th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE: 291-308.
- Thornton, P.J. and Guza, R.T., 1986, Surfzone longshore currents and random waves: models and field data, J. Phys. Oceanogr., 16: 1165-1179.
- Visser, P.J., 1984, Uniform longshore current measurements and calculations, Proc. 19th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE: 2192-2207.
- Visser, P.J., 1991, Laboratory measurements of uniform longshore currents, Coastal Eng., 15: 563-593.
- Wind, H.G. and Vreugdenhil, C.B., 1986, Rip-current generation near structures, J. Fluid Mech., 171: 459-476.
- Yoo, D., 1993, Wave-induced longshore currents in the surf zone, J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE (submitted).
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1988, Turbulence transport modelling of wave-induced currents, Proc. Int. Conf. Computer Modelling in Ocean Eng., Venice, IAHR-UNESCO: 151-158.