

κ - l 난류모형을 이용한 연안류 수치해석 Numerical Modelling of Longshore Currents using κ - l Turbulence Closure

유동훈* · 김창식**

Dong Hoon Yoo* and Chang Shik Kim**

要 旨 : 2-방정식 난류모형을 이용하여 단순파에 의해 발생하는 연안류를 해석하였다. 난류운동에 관한 2-방정식으로 κ - l 보존식을 사용하여 계산된 유속분포 뿐 아니라 확산계수 분포도 비교하여 보았는데, 두 분포 모두 상당히 만족스러웠다. l 보존식을 구성하는데 있어 몇 가지 항들은 난류운동과 관련되는 여러 변수들을 조합하여 경험식으로 만들어야 하는데 본고에서 l 보존식에 사용되는 난류발생주파수로 새로운 형태를 제시하며, 제 경험상수들은 실험자료와 대비하여 추정하였다. 적용된 각 경험상수에 대하여 여러 수치를 적용하여 민감도분석을 실시하였으며, 여러 조건의 실험자료에 공통적으로 일치하는 상수를 추출하여 수치모형의 예측성을 높이고자 하였다.

Abstract □ Longshore currents driven by monochromatic waves have been described using 2-equation κ - l turbulence transport model. When using κ - l closure both profiles of eddy viscosity and current velocity are found to be satisfactory. Several terms of l equation are related to various variables concerned with turbulence mechanism. New form of turbulence frequency used in l equation is suggested in the present approach, and non-dimensional parameters are evaluated by comparing the computational results with the laboratory measurements. Various values of a large range are applied to the non-dimensional parameters for the sensitivity test and in order to improve the predictability common values of constants are deduced, which produce similarly good computational results for the well-controlled laboratory measurements.

1. 서 론

해안선 가까이 파도에 의해서 발생하는 연안류는 오랫동안 해안수리학자의 주 관심사항 중의 하나였으며, 이의 정확한 산정은 해안선의 침식, 항로 매몰, 오염물질의 이동 확산 등 제 연안환경 수리문제의 기본자료로서 매우 중요한 연구분야로 인식되어 오고 있다. 연안류를 정확히 산정하기 위하여는 천해파의 변이, 쇄파조건, 파와 연안류의 합성에 의한 해저면 마찰력, 확산계수 등의 정확한 산정이 전제되어야 하는데 본고는 확산계수의 정확한 산정에 주안점을 두고 연구한 결과를 제시한다.

쇄파대에서 파도에 의하여 발생하는 연안류는 완만한 곡선분포를 보이는데 단순파인 경우 이의 해석은

확산계수의 도입으로만 가능하다는 점은 널리 알려진 사실이다. 불규칙파에 의한 연안류의 분포는 파고 자체의 분포 특성 때문에 난류확산의 영향이 상대적으로 작아지기는 하지만 난류확산의 영향이 분명히 존재할 것으로 예상된다. Table 1에는 쇄파대 확산계수를 정량화한 연구자의 가설들이 요약되어 있다.

Harris(1967)는 이 분야 초기연구로서 현장관측과 수조실험을 실시하여 쇄파대 확산계수의 공간변이를 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 균속도와 같다고 가정하였다.

*아주대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea)

**한국해양연구소 해양공학부 (Ocean Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

Table 1. Various approaches for the evaluation of surf zone mixing coefficient

$\nu = M \langle U \rangle \langle L \rangle$		
Researchers	$\langle U \rangle$	$\langle L \rangle$
Harris (1967)	H_b/T	H_b
Longuet-Higgins (1970)	$C = C_g = \sqrt{gd}$	l_x
Thornton (1970)	U^*_{Max}	A_b
Battjes (1975)	$(D_b/\rho)^{1/3} = U_+$	d
Wind & Vreugdenhil (1986)	$\kappa^{1/2}$	$\kappa^{3/2}/\epsilon$
Yoo & O'Connor (1988)	$\kappa^{1/2}$	$\text{MIN}(\kappa^{3/2}/\epsilon, d)$
Yoo (1994)	$\kappa^{1/2}$ U_+	l d

국내에서도 김 등(1991)이 Longuet-Higgins 방법을 사용하여 연안류를 해석한 바 있다. 한편 Thornton (1970)과 Jonsson *et al.*(1974)은 해저면에서의 파운동거리를 특성길이로 해저면유속을 특성속도로 취하였다. 이상의 방법들은 쇄파대확산의 주요 요인이 되는 쇄파에너지손실률을 간접적으로 표현하는 것으로 판단되는데 Battjes(1975)는 쇄파에너지손실률의 삼승근이 유속과 차원이 같음을 인식하고 이를 난류 특성속도로 적합하다고 판단하였다(Yoo & O'Connor (1988)는 쇄파에너지손실률의 삼승근을 손실속도라 명함). 또한 난류운동의 1차적 제한이 수평거리보다는 수심에 따르기 때문에 특성길이로는 연안선으로부터의 거리보다 수심이 더욱 적합하다고 판단하였다.

Battjes(1975)의 초기접근방법은 쇄파대 확산현상을 충분히 인지하고 특성치를 도출하였으므로 선택된 특성치들이 적절한 것으로 판단되나 확산계수분포가 쇄파점 부근에서 불연속하게 나타난다. 실제로 쇄파에 의한 난류에너지도 확산되어 쇄파점 부근에서 완만한 곡선분포를 가질 것으로 예상되는데, 이는 난류에너지보존식의 도입으로 해결할 수 있을 것으로 인식되어 왔다. Battjes(1986)는 κ 보존식의 도입으로, Wind & Vreugdenhil(1986)은 κ-ε 보존식의 도입으로 난류에너지의 확산을 고려하고자 했다. O'Connor & Yoo (1987)는 이상의 방법들을 비교하였는데 κ-ε 보존식을 이용할 때 와동점성계수가 쇄파대 밖으로 계속 증가하는 등의 문제점을 발견하였으며 이의 개선책으로서 Yoo & O'Connor(1988)는 확산계수 계산시 파고를

최소확산거리로 취할 것을 제안하였다. 개선된 κ-ε 보존식의 도입으로 불규칙파에 의한 연안류 계산에도 부분적인 성공을 거두었으나(유, 1990), 여타 경우에 적용하였을 때 문제점이 도출되었다.

κ-ε 보존식의 문제점은 이로써 계산되는 확산계수가 쇄파대 밖에서도 계속해서 증가하는 것으로 나타난다는 사실이다(유, 1993a). 이는 우리가 인식하고 있는 쇄파대확산현상과 매우 다른 것으로 판단되며, 더욱이 κ-ε 보존식에 사용되는 제 계수치의 변이가 매우 커서 κ-ε 보존식의 예측능에 많은 의문점을 갖게 된다. 따라서 파도에 의한 연안류를 보다 올바르게 해석하고 예측하려면 난류에너지보존식을 개선하여 제 경험상수들이 만유상수(universal constant)되거나 적어도 일정범위 이내에 한정될 수 있도록 관계식을 유도하거나 새로운 난류에너지보존식을 사용하여야 할 것이다.

불규칙파에 의한 연안류 해석에 있어 Yoo(1994)는 κ-l 보존식을 사용하여 수치모형을 개발하였으며, Thornton과 Guza(1986)가 보고한 현장관측자료와 비교하여 만족스러운 계산결과를 얻었다. Thornton과 Guza는 미국 Santa Babara에 위치한 Leadbetter 해안에서 5일간 각기 다른 조건에서 관측된 자료와 그들의 수치모형 계산결과와 비교하여 제시하였는데 확산계수를 무시하고도 관측자료와 유사한 결과를 얻었다. 이에 반하여 Yoo(1994)는 확산계수를 도입하여만 관측결과와 유사한 계산결과를 얻었는데 이는 Thornton-Guza의 불규칙파 수치모형이 실제보다 더 많은 확산효과를 가져다 주기 때문인 것으로 판단된다. 왜냐하면 단순파에 의한 연안류나 불규칙파에 의한 연안류에나 쇄파에너지에 의한 난류확산효과는 두 경우 모두 존재하기 때문이다. Yoo(1994)는 또한 쇄파대확산에서 난류확산 뿐 아니라 전단확산의 영향도 중요한 역할을 하는 것으로 유추하였으며 전단 확산의 특성길이로 수심, 특성속도로 쇄파와 마찰에 관련된 손실속도 U_+ 를 취할 것을 제의하였다.

Yoo(1994)가 개발한 κ-l 보존식에 있어 가장 큰 문제점은 쇄파에 의한 난류발생주파수의 선택이다. 선택의 어려움 때문에 1차로 난류발생주파수가 파주파수에 비례한다고 가정하였는데 Thornton(1993)의 관측경험에 의하면 난류발생주파수는 파주파수와 무관한 것으로 알려지고 있다. 본고에서 파주파수와 직접적으로는 무관한 난류발생주파수 산정식을 제시

하며, 가장 변이의 폭이 클 것으로 예상되는 경험상수를 두 가지 택하여 민감도분석을 실시하였다. Visser(1984, 1991)의 잘 제어된 실험자료와 대비하여 두 경험상수 모두 적용 수치를 폭 넓게 취하여 적정수치를 추출하고자 하였다. 또한 본고에는 단순파의 쇄파조건을 양해법으로 구하는 약산식도 개발 제시하였다.

2. 확산계수

본 쇄파대확산 연구에 사용된 파변형에 관한 지배방정식은 파에너지보존식과 파에 의한 잉여응력(radiation stress) 영향을 포함한 운동량보존식이다. 파잉여응력에 의한 수위의 상승과 하강(set-up/set-down)에 따른 영향이 크고 이로부터 연안선 가까이 육상이 침수되는데 연안침수는 연안류의 유속에 상당한 감소효과로 작용한다. 따라서 연안류를 정확하게 산정하기 위하여 또는 제 경험계수의 올바른 산정을 위하여 연안침수에 대한 고려는 필수적이며, 이는 시간변환방정식을 도입하여야만 가능하다. 파운동을 지배하는 시간변환방정식으로 파수벡터보존식과 파에너지보존식을 사용하는데 단조해안(uniform planar beach)에서 단순파의 변형에 대하여는 O'Connor & Yoo(1987)에 제시되어 있으며, 불규칙파의 변형에 대하여는 유(1990)와 Yoo(1994)에 제시되어 있다.

운동량보존식에는 난류운동과 전단변이에 의한 확산효과를 고려하기 위하여 확산계수를 도입하는데, 쇄파대 확산효과는 두가지 요인에 의한다고 가정하였다. 그중 하나는 쇄파에너지에 의한 난류확산(turbulent diffusion)이며 다른 하나는 전단흐름(shear flow)에 의한 전단확산(shear flow dispersion)이고 두 인자를 서로 합성하여 최종확산계수를 구할 수 있다고 가정하였다. 즉,

$$v = v_t + v_s \quad (1)$$

여기서 v_t 는 난류확산성분이며, v_s 는 전단확산성분이다. 또한 전단확산은 연안류를 수심적분하는 과정에서 도출되는 성분 뿐 아니라 파잉여응력을 이론적으로 산정하는 과정에서 나타날 수 있는 오차로부터 연유한 것도 있을 수 있다고 추론하였다(Yoo, 1994). 이는 전단확산성분의 관계식이 평균마찰력으로부터 산정되는 마찰속도(Vector량) 보다 마찰손실에너지로부터

산정되는 손실속도(Scalar량)와 상관관계를 이룰 때 더 좋은 계산결과가 얻어지기 때문이다. 즉, 전단확산계수는 다음과 같이 산정된다.

$$v_s = M_s(D_t/\rho)^{1/3} d \quad (2)$$

여기서 M_s 는 무차원상수이며, D_t 는 마찰력에 의한 에너지손실률, ρ 는 밀도, d 는 수심이다.

난류확산계수는 난류운동과 관련된 특성속도와 특성길이의 곱으로 구해지며, 이의 비례상수는 특성길이 산정에서 미리 조정되는 것으로 가정했을 때 다음과 같다.

$$v_t = \kappa^{1/2} l \quad (3)$$

여기서 κ 는 난류운동에너지이고 l 은 특성길이이다. 난류운동에너지와 특성길이 보존식은 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도되는데 단조해안에서 해안선과 평행한 방향으로의 공간변화는 없으므로 수심평균할 경우 다음과 같이 단순화된다(Yoo, 1994).

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right) + v_t \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \frac{D_t}{\rho d} - C_d \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (4)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_l \frac{\partial l}{\partial x} \right) + C_1 \frac{l}{\kappa} v_t \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + C_1 \kappa^{1/2} - C_2 f_l \quad (5)$$

여기서 C_1 , C_2 , C_3 , C_d 등은 무차원수이며, f_l 는 난류발생주파수이다. 식 (4)의 넷째항은 수심평균한 난류운동에너지 κ 의 생성률이며, 다섯째항은 κ 의 손실률이고, 식 (5)의 넷째항은 난류특성길이 l 의 생성률이며, 다섯째항은 l 의 손실률이다.

불규칙파 연안류 해석에 있어, Yoo(1994)는 상기 식이 κ - ε 보존식과 유사함을 고려하여 무차원수 C_1 과 C_2 를 Launder & Spalding(1974)이 추천한 $C_1=1.44$, $C_2=1.92$ 를 사용하였으며, Thornton & Guza가 보고한 다섯가지 관측자료에 적용하였을 때 C_1 와 C_d 모두 단위치 즉, $C_1=1.0$, $C_d=1.0$ 를 사용하여 양호한 결과를 얻었다. 다음 절에 제시된 바와 같이 단순파 연안류인 경우 적정수치가 약간 다르지만 $C_1=1.0$, $C_d=0.5$ 와 $C_2=0.5$ 로 유사한 최적수치를 구하였다. 이때 난류주파수 f_l 에 대하여 불규칙파인 경우에는 스펙트럼파의 평균- f_l 파수를 사용하였으며, 단순파인 경우에

는 파의 주파수를 사용하였다. Thornton(1993)은 관측경험으로 난류운동의 발생주파수는 파주파수에 단순비례하지 않는 것으로 확인하였다. 따라서 난류주파수가 파주파수에 단순 비례한다는 가정은 바람직하지 않은 것으로 판단되며, 이의 개선책으로 난류주파수를 산정하는 관계식을 도출할 필요가 있다.

주파수 산정식으로 차원을 일치시키며 κ, l, v_t 등을 이용 여러 형태의 식을 도출하여 적용하여 보았으나 성공적이지 못하였으며, 최종적으로 중력가속도를 도입하여 만족할만한 결과를 얻었다. 즉 난류주파수는 (g/l)^{1/2}에 비례한다고 가정하면 식 (5)의 다섯째항은 (g)^{1/2}에 비례하는 것으로 표기된다. 각각 κ와 l에 대하여 수평전단력에 의한 생성물인 식 (4)와 (5)의 셋째항들은 다른 항들에 비하여 상대적인 비중이 아주 작다. 따라서 이들을 무시하면 식 (4)와 (5)는 다음과 같이 수정되어 더욱 간단히 표기될 수 있다.

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right) + \frac{D_t}{\rho d} - C_d \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (6)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_l \frac{\partial l}{\partial x} \right) + C_1 \kappa^{1/2} - C_2 (g l)^{1/2} \quad (7)$$

κ의 확산계수 v_k와 l의 확산계수 v_l가 연안류의 난류 확산계수 v_t에 비하여 큰 변이가 없다고 가정하여도 미확정의 경험상수는 C₂, C₁, C_d 등 세가지이다.

3. 쇄파조건과 마찰계수

천해파에 의한 연안류의 해석은 쇄파대내 천해파에 대한 정확한 해석이 전제되어야 하며 이는 쇄파조건식의 정밀도에 많이 좌우된다. 천해 단순파(Monochromatic Waves)의 쇄파조건식은 Miche의 식에 기초하며, 이후 여러 연구자들이 해저경사에 의한 영향을 고려하여 Miche식을 수정하였다. Iribarren이 제시한 파형경사에 대한 해저경사비는 쇄파형태, 처울림높이(Run-up height) 등 쇄파수리조건을 결정해주는 무차원상수로 인식하여 왔다. 유(1990)는 쇄파지점에서의 쇄파점 쇄파지수(Surf Parameter)인 Local Iribarren Number를 제시하고 이를 Miche식에 도입하여 해저경사가 큰 천해역에서의 쇄파조건을 정확히 산정하고자 하였다. 유(1990)의 쇄파조건식은 다음과 같다.

$$\frac{H}{L} = \frac{1}{7} \tanh(sKd) \quad (8)$$

여기서 H는 쇄파고, L은 쇄파점에서의 파장, K는 쇄파점에서의 파수, d는 쇄파점 수심이며 s는 Local Iribarren Number와 상관관계를 취하여 구해지는 계수로서 실험자료를 회귀분석하여 다음과 같은 관계식이 구해졌다.

$$s = 0.8 + \tanh(1.06I_b) \quad (9)$$

여기서 I_b는 Local Iribarren Number, 즉 해저경사가 m일 때 I_b = m/(H/L)^{1/2}이다.

상기 쇄파조건식에서 계수 s에도 쇄파고 H가 포함되므로 음해법으로만 해를 구할 수 있다. 이는 수치해석상 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 상기식은 양해법으로의 전환이 가능하며, 쇄파고가 양변에 존재하더라도 수심, 파장, 해저경사 등 세 변수의 함수임이 분명하다. 여러 조건에 대한 계산결과를 분석한 결과 양함수의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{H}{L} = \frac{1}{7} \tanh \left[\left(0.8 + \tanh \left(\frac{c m}{(Kd)^{1/2}} \right) \right) Kd \right] \quad (10)$$

여기서 상수 c는 Kd > 1일 때 c = 3.75이고 Kd < 1일 때 c = 2.65이다. 해저경사 m = 0.001, m = 0.005, m = 0.01, m = 0.1에 대하여 식 (8)로 구한 결과와 식 (10)으로 구한 결과가 Fig. 1에 제시되어 있다. 전 구간에 대하여 최대오차가 4% 내외이며, 대부분의 경우 오차는 1% 이내이다.

쇄파고 산정식 이외에 단조해안(plane beach)에서 천해파의 변이, 파와 연안류에 의한 해저마찰력 계산에 관하여 Bijker(1966, 1967), Yoo & O'Connor(1987), O'Connor & Yoo(1987), 유(1989), 유와 이(1992) 등에 자세히 설명되어 있다. 쇄파대에서 연안류는 항상 침입파와 간섭하게 되며 해저전단력은 두 인자의 합성에 의하여 생성된다. 따라서 연안류의 운동량보존식에 사용되는 마찰계수는 파와의 합성효과를 고려하여 산출하여야 하며 이는 일방향 흐름에 의한 마찰계수에 증폭계수를 도입하여 산출될 수 있다. 즉,

$$C_v = \beta C_c \quad (11)$$

여기서 C_v는 합성류에 대한 마찰계수, β는 증폭계수,

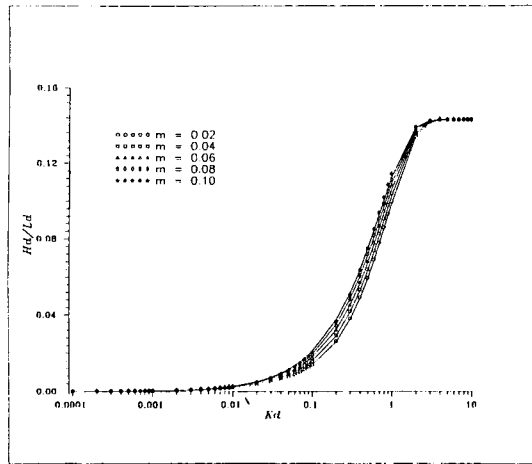


Fig. 1. Comparison of breaking criterion between exact form (circles, Eq. 8) and approximate explicit form (solid lines, Eq. 10).

C_c 는 일방향 흐름만 작용할 때의 마찰계수이다.

일방향 흐름에 의한 마찰력 또는 개수로 마찰력은 Manning식과 같은 경험식이나 Keulegan의 가정에 의한 유속의 대수분포식으로부터 조고대 수심비의 함수를 취하여 마찰계수를 구하는데, 제 경험식들은 관로 흐름에서 분명히 밝혀진 흐름의 다섯가지 조건이 고려되지 못하였으며(유, 1993b), Prandtl의 혼합장 이론을 바닥에서부터 수면까지 선형비례 관계로 적용한 Keulegan의 가정은 실제와 많은 차이점을 보이므로 신뢰성에 의문이 제기된다. 따라서 이 분야에 대하여는 앞으로 많은 연구가 수행되어야 할 것이며, 본 연구에서는 쇄파대확산 문제에 주안점을 두었기 때문에 기존관계식을 그대로 적용한다. Strickler-Manning식을 1방향 흐름에 의한 마찰력산정에 사용하며 이는 대수분포식으로 유도되는 Keulegan식의 해와 유사하다. Strickler-Manning식으로 유도된 마찰계수 산정식은 다음과 같다.

$$C_c = 0.016 (k_s/d)^{1/3} \quad (12)$$

여기서 k_s 는 등가조고, d 는 수심이다. 상기 상수를 0.016 대신에 0.02 이상을 사용하기도 하는데 등가조고 산정의 어려움 때문에 정확한 수치의 판명은 매우 지난한 문제이다.

다음 절에서 논의하는 무차원 상수의 민감도 분석에 있어 상기 상수의 수치에 따라 제 경험상수의 절대치는 달라질 수 있으나 상대적인 분포 경향은 유사할

것으로 예상된다.

증폭계수 β 는 Prandtl의 혼합거리 이론에 기초하여 Bijker와 Yoo 등이 개발한 BYO Model을 이용하여 산정한다. BYO 모형은 혼합거리 이론에 기초하여 경계층내의 유속벡터 합성을 수치적으로 적분하여 양해법근사식을 도출하였으며, 이때 합성할 때의 난류증폭에 의한 유속감소를 고려하기 위하여 에너지 손실비를 참조하였으며, 유속감소율의 산정도 양해법 근사식을 추출하여 이용의 편의를 도모하였다.

4. 민감도분석에 의한 연안류 해석

단순파에 의한 연안류 해석에 관한 실험연구는 여러 연구자가 수행하였는데 그중 Visser(1984, 1991)의 실험자료가 가장 신뢰할만한 것으로 판단된다. 본 수치모형에서 해석하고자 하는 연안류는 수심적분하였을 경우 완전 1차원적인 흐름이며 모든 단면에서의 연안류분포는 동일하다. 그러나 실험수조에서 완전 1차원적인 연안류를 재현하는 것은 매우 어려운 문제이다. Visser는 2차원 수조내 순환계통(re-circulating system) 장치를 개발하여 각 단면의 연안류 분포가 동일해지도록 유도하였다. 또한 그는 순환량이 최소가 되는 조건이 이상적으로 무한대인 일정해빈에서의 연안류 발생조건과 같다고 주장하였으며, 이때의 연안류 유속분포와 파고분포를 제시하였다. 1984년도 1차에는 7가지 조건의 실험결과에 대하여 발표하였으며, 1991년도 2차에는 추가로 실시한 8번째 실험 결과를 포함하여 관측방법과 관측결과에 대한 해석을 자세히 언급하였다. 실험조건에 대한 설명은 Table 2에 제시되어 있으며 각 경험계수에 대하여 최적화하여 구한 수치들이 함께 제시되어 있다.

Table 2에 제시된 바와 같이 Visser의 실험에서 몇 가지 주목할 점이 있는데, 우선 제조건이 유사하면 서로 각 경우 한두가지 조건을 달리하여 각 조건의 영향을 뚜렷이 파악할 수 있도록 한 점이다. 연안류에 대한 마찰력의 영향을 뚜렷이 살펴볼 목적으로 처음 여섯가지 경우의 수조바닥은 콘크리트면이며, 나중 두 경우는 바닥에 조약돌을 깔아 조고를 상당히 증가시켰다. 특히 Case 4와 Case 7, Case 5와 Case 8은 다른 조건은 동일하며 단지 바닥면의 조도상태만 달랐던 점에 주목할 필요가 있다. Visser(1991)는 콘크리트면의 조고를 $\Phi_{90} = 0.6$ mm, 조약돌의 조고를 $\Phi_{90} = 8$

Table 2. Various cases of Visser's laboratory experiments (1991)

Case	Beach condition	Bed slope	Wave height mm	Wave period sec	Incid. angle degree	Values applied to		
						k_s mm	C_d	C_2
1	smooth concrete	0.101	72	2.01	31.1	0.6	0.5	0.5
2	smooth c.	0.101	95	1.00	30.5	0.6	0.5	0.45
3	smooth c.	0.101	89	1.00	15.4	0.6	0.5	0.58
4	smooth c.	0.050	78	1.02	15.4	0.6	0.5	?
5	smooth c.	0.050	71	1.85	15.4	0.6	0.5	0.58
6	smooth c.	0.050	59	0.70	15.4	0.6	0.5	?
7	gravel	0.050	78	1.02	15.4	8.0	0.5	0.38
8	gravel	0.050	71	1.85	15.4	8.0	0.5	?

mm으로 추정하였는데 일반적으로 등가조고를 Φ_{90} 의 배율로 정하며, 배율은 1에서 2까지 정도인 것으로 알려졌다. 본 연구에서도 콘크리트면의 등가조고를 0.6 mm로 가정하였으며, 조약들의 등가조고를 8 mm로 가정하였다. 또한 경사면의 기울기를 Cases 1~3는 0.101, Cases 4~8은 더욱 완만하게 0.05로 조치하였으며, Cases 2, 3, 4, 7은 파주기가 약 1초, Case 1, 5, 8은 2초 내외, Case 6은 0.7초이다.

Yoo(1994)는 이미 불규칙파에 의한 연안류 해석에 κ -1 2방향식 난류모형을 적용하여 대체적으로 만족스러운 해석결과를 얻었으나, 몇 가지 미비점을 보완하여 수식 (4)와 (5)를 개선한 식 (6)과 (7)을 사용하여 단순파에 의한 연안류를 해석하고자 한다. Thornton(1993)이 제기한 바와 같이 난류발생주기가 파주기와 일치하지 않으리라는 점은 저자도 동감하고 있으며 이에 따라 κ -1 보존식을 식 (6)과 (7)과 같이 수정하였다. 식 (6)과 (7)을 사용할 때 경험계수 C_1 는 1로 가정하였다. 즉 난류에너지의 평방근 전체가 혼합장의 발생원으로 생각하며, 경험계수 C_d 와 C_2 만 조정하여 관측된 최대유속과 산정된 최대유속이 일치하는 수치를 구하였다. 계산효율을 증대하기 위하여 수조중 일부구간만 수치모형격자에 포함시켰으며, 총 길이는 5.5 m이고, 0.1 m 크기의 격자를 이용하였다. 쇄파대내 수류가 급격히 변하고 천해파와 연안류가 서로 상대에 미치는 영향이 심대하므로 계산시간 간격은 Courant 조건으로 구해지는 수치 0.05초 보다 훨씬 작은 0.01초를 취해야 했으며, 정상상태(steady state)는 5000번 이상 즉 50초 이상의 반복계산이 필요했다. 다음에 제시된 모든 계산결과는 반복과정

5000번에서의 결과이다.

물리적인 관점에서 혼합장은 평균수심을 넘지않을 것이며, 최대혼합장은 쇄파점 또는 그 근처에서 나타날 것이다. M_s 는 전단확산을 결정하여 주는 경험계수로서 $M_s=0.4$ 가 모든 경우에 대하여 조정되어 결정된 수치이며, 이보다 상당히 작으면 다른 계수를 아무리 크게 조정하여도 쇄파대 밖의 확산이 충분치 못한 것으로 나타나며, 이보다 상당히 크면 다른 계수를 아무리 작게 조정하여도 연안류가 너무 작게 산정된다. 난류에너지 κ 의 손실계수인 C_d 는 0.09, 0.5, 1.0, 3.0, 10.0 등 5가지 수치를 적용하고 각각의 C_d 에 대하여 C_2 는 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0 등 8가지를 적용하여 산정된 최대유속을 관측된 최대유속과 비교하여 적절한 경험상수를 도출하고자 하였다. Fig. 2에는 각 경험상수의 조합에 따라 계산된 최대 유속의 분포를 도시하였으며, 각 경우에 대한 경험상수들의 최적치는 계산된 최대유속이 관측치와 일치하는 수치들을 취하여 Table 3에 제시하였다.

Table 3에서 -부호는 산정된 결과가 관측결과보다 과소 산정하는 경우이고 +부호는 과대 산정하는 경우이다. Case 4와 6인 경우 관측결과와 비교하였을 때 어느 수치를 적용하여도 항상 과소 산정하고 Case 8인 경우 항상 과대 산정하므로 이상의 세가지 경우 C_d 와 C_2 의 최적치는 없다. 그러나 그밖의 경우에는 적용된 C_d 의 수치에 따라 각기 C_2 의 최적치가 결정되는데 Case 1과 Case 2에서는 동일한 C_d 에 대하여 C_2 의 최적치가 두가지씩 결정된다. 상기 표에 제시된 바와 같이 C_d 의 수치가 커지면서 C_2 의 최적한 수치는 작아지는데 Cases 4, 6과 8을 제외하고도 정확히 모든

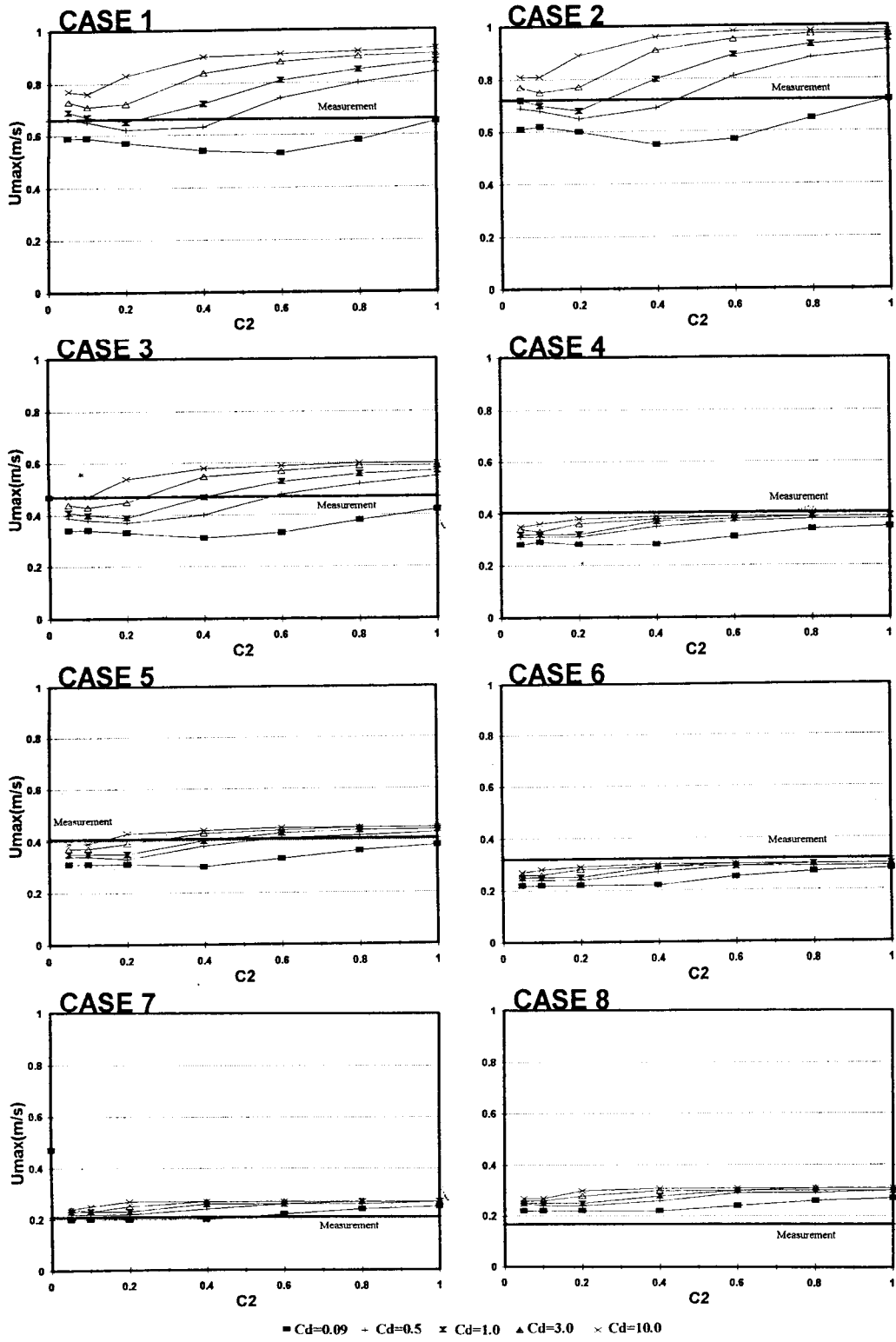


Fig. 2. Maximum longshore current velocities computed using various values of C_d and C_2 .

Table 3. Optimum values of C_2 with various values of C_d

Case	C_d				
	0.09	0.5	1.0	3.0	10.0
1	-	0.05 & 0.50	0.15 & 0.23	+	+
2	-	0.46	0.05 & 0.27	+	+
3	-	0.58	0.4	0.24	0.07
4	-	-	-	-	-
5	-	0.58	0.44	0.28	0.14
6	-	-	-	-	-
7	0.96	0.38	0.30	0.14	+
8	+	+	+	+	+

경우에 최적한 상수는 없다. 그러나 $C_d=0.5$ 와 $C_2=0.5$ 는 거의 모든 경우에 적절한 수치가 될 것으로 예상된다. $C_d=0.5$ 는 Launder와 Spalding(1974)이 추천한 수치 0.09와 큰 차이를 보이는 것으로서 Dong의 2인(1989)도 쇄파대 확산계산에서 유사한 수치를 발견하였으며 그 근본이유는 다음과 같이 연유된다.

난류확산에 있어 생성과 소멸이 완전평형을 이룰 때 난류에너지의 손실률 ϵ 은 다음과 같이 표기된다.

$$\epsilon = \overline{uv} \frac{\partial V}{\partial x} \tag{13}$$

여기서 x 는 연안선에 연직방향의 좌표이다. 식 (13)은 Navier-Stokes 방정식으로부터 κ 보존식을 유도할 때 추출되며, 이를 식 (4)의 마지막 항과 같다고 가정하고 $\epsilon = \kappa^{3/2}/l$ 를 고려하였을 때

$$C_d = (\overline{uv}/\kappa)^2 \tag{14}$$

가 된다. 즉 κ 의 손실계수 C_d 는 정방향응력 κ 에 대한 전단응력 \overline{uv} 비의 제곱이다. 실험수조에서 관측결과 수류가 1방향으로만 흐를 때 정방향응력에 대한 전단응력의 비는 약 30%가 됨을 확인하였으며, 이로부터 일반적인 상황에서 $C_d=0.08-0.09$ 임을 알 수 있다. 그러나 쇄파대 확산에서와 같이 난류의 발생원이 되는 쇄파의 진행방향과 연안류가 이루는 각도가 클때 전단응력은 정방향응력과 거의 크기가 같아지며, 이로써 κ 의 손실계수 C_d 는 0.1 이상이 되는 것으로 판단된다.

C_d 의 최적치가 Cases 1과 2에서는 약 0.5인 반면에 그밖의 경우에는 대부분 0.5를 상회하는데, 그 이유는 입사각의 크기와 무관하지 않은 것 같다. 즉 Cases

1과 2에서는 입사각이 약 30°이나 그밖의 경우에는 15.4°이다. 입사각이 작을수록 정방향응력 κ 에 대한 전단응력 uv 비가 커져서 C_d 가 더욱 커지는 경향을 보인다. 그러나 그 증가율은 두가지 경우를 제외하고 그다지 높지 않은 것으로 계산되었다.

이상의 최적화 기법으로 선택된 경험상수 $C_d=0.5$ 와 $C_2=0.5$ 를 공히 사용하여 Visser가 실험관측한 8가지 모든 경우에 대하여 연안류를 산정하였다. Fig. 3에는 Case 1과 Case 2에 대하여 $C_d=0.5$ 와 $C_2=0.5$ 로 가정하고 수치모형으로 산정된 제 변수의 분포를 도시하였으며, Fig. 4에는 모든 경우에 대하여 계산된 유속분포를 관측된 유속분포와 비교하여 제시하였다. Fig. 3에는 산정된 혼합거리 l 의 분포가 함께 도시되어 있다. 산정된 바와 같이 l 의 공간변화가 상당히 있으므로 난류발생주파수(g/l)^{1/2}의 공간변화가 상당히 있는 것을 알 수 있으며, 동시에 이들의 변이폭과 크기가 파주파수와는 무관하게 나타남을 알 수 있다. 예를 들어 Case 1의 파주파수는 0.5 Hz이며, Case 2의 파주파수는 1.0 Hz인데 반하여 두 경우 모두 쇄파점 부근에서 난류발생 주파수는 전자의 경우 20.4 Hz, 후자의 경우 20.8 Hz로 산정되었다(여기서 난류발생 주파수는 절대치가 아니라 상대치이다). 따라서 난류발생주파수를 파주파수에 비례한다고 하였을 때 확산길이 손실률 산정에 상당한 오차를 범했던 것으로 판단된다(Yoo, 1994).

Fig. 4에 도시된 바와 같이 Cases 1, 2, 5, 6, 7은 산정된 유속분포가 관측된 유속분포와 아주 흡사하며, 이밖에 Cases 3과 4는 산정된 유속분포가 관측된 유속분포에 비하여 약간 과소 산정된 경향이 있으며 Case 8은 약간 과대 산정하는 경향이 있다. 그러나 Case 8을 제외하고 큰 오차를 갖지 않고 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

쇄파대 확산의 주 원인은 파도의 쇄파에 의한 에너지손실이며, 확산계수 산정에 사용된 κ - ϵ 보존식은 상당한 문제점을 노출하였다. 즉 우리가 이해하기에 확산은 쇄파대 근처에 한정적으로 강할 것으로 예상되는데 κ - ϵ 보존식을 사용한 계산결과는 난류확산계수가 쇄파대 밖으로도 계속해서 증가추세를 보인다는 점이다. 이는 확산계수가 ϵ 에 역비례관계를 이루는데

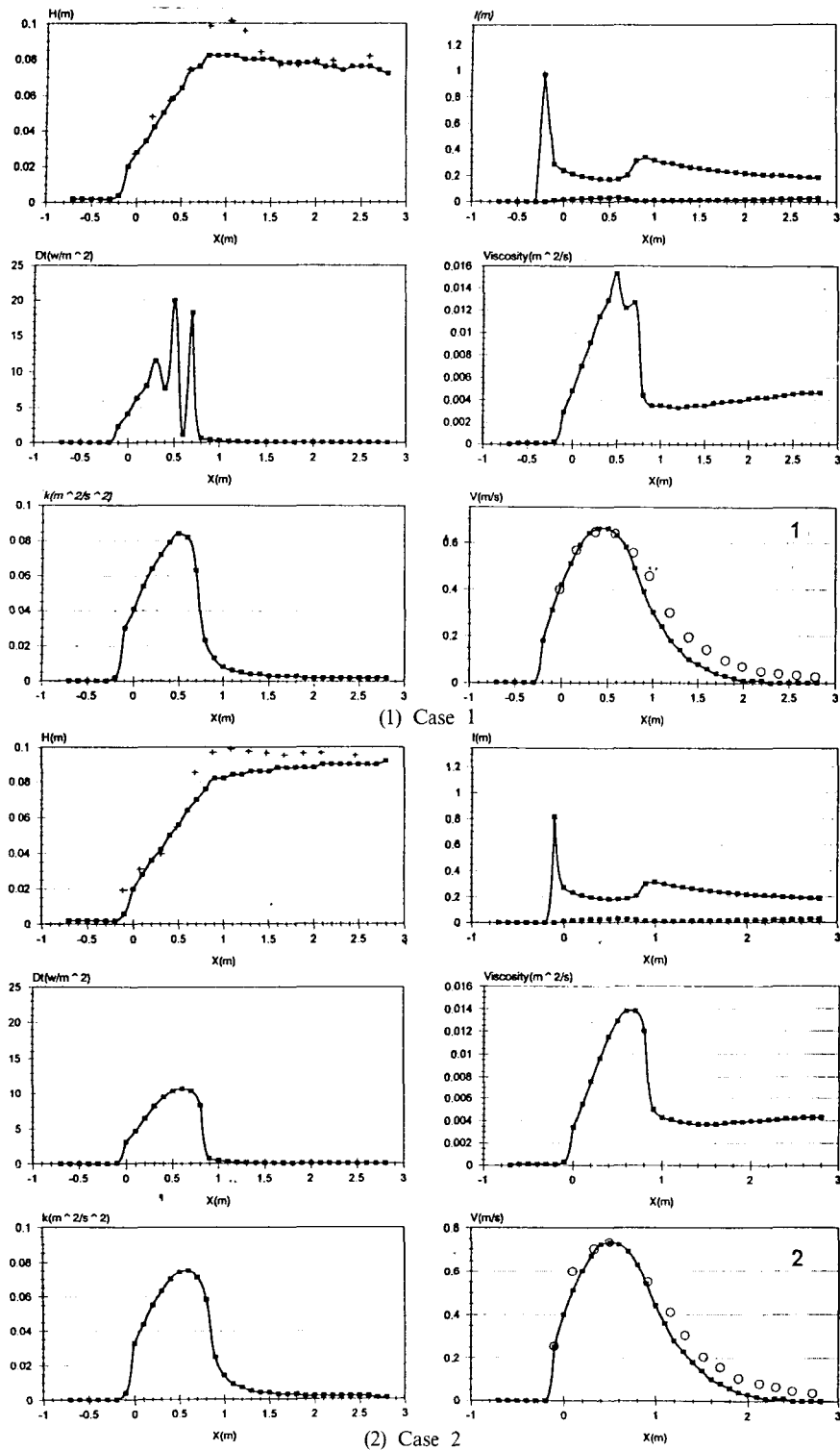


Fig. 3. Cross-shore distribution of H , D , κ , l , f , v and V . ($C_d=0.5$ and $C_s=0.5$, solid lines from computed results and plus signs and circles from measurements) (1) Case 1 and (2) Case 2.

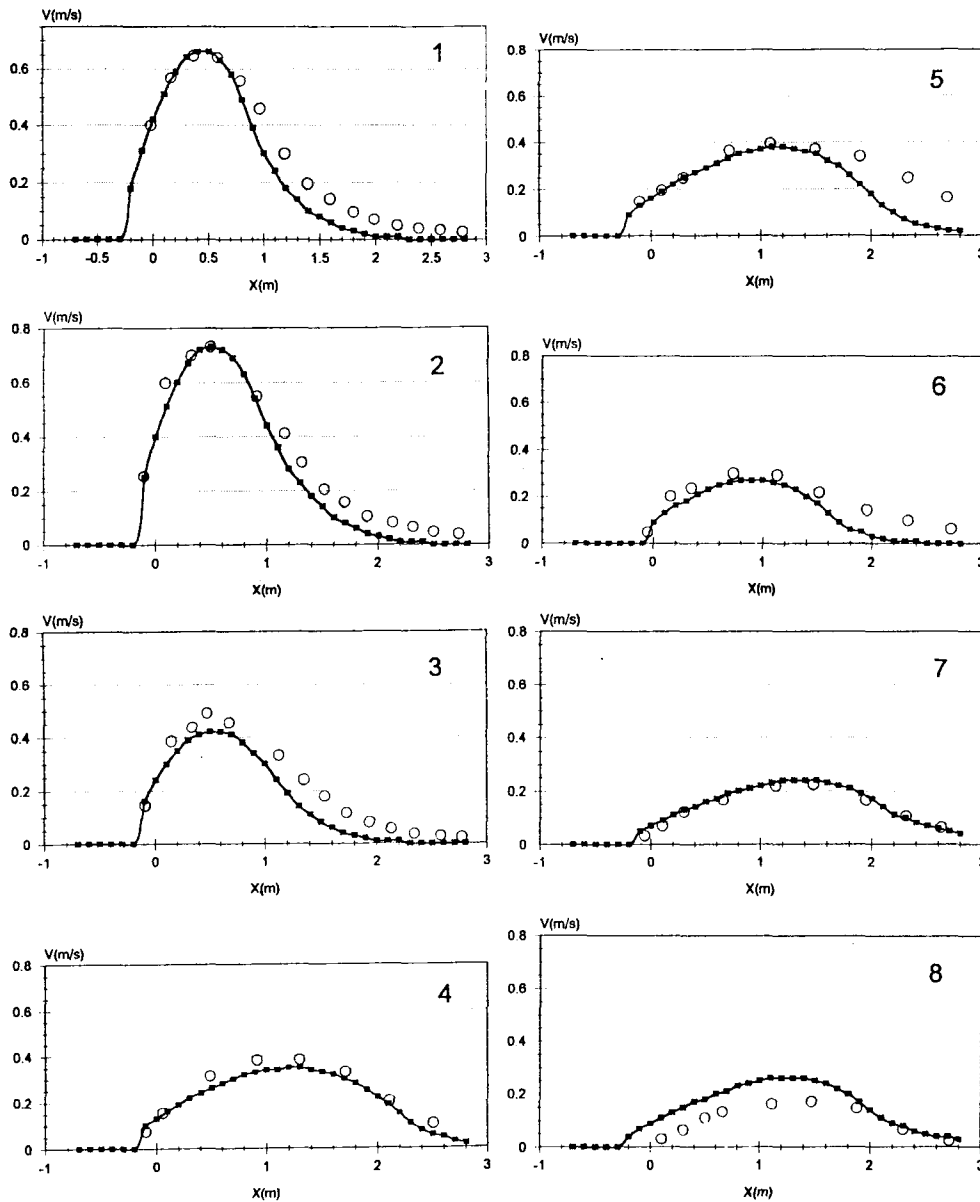


Fig. 4. Cross-shore distribution of longshore current velocity ($C_d=0.5$ and $C_2=0.5$, solid lines from computed results and circles from measurements).

연유하는 것으로 판단된다. κ - l 보존식은 확산계수가 두 변수 κ 와 l 모두에 비례관계를 이루기 때문에 계산에 상당한 이점이 있으며, 산정된 확산계수의 분포가 우리가 이해하고 있는 쇄파대현상과 거의 일치하는 것으로 사료된다. 그러나 난류확산계수의 도입만으로는 연안류의 유속분포가 쇄파점 부근에서 관측치에 비하여 작게 산정되는데 이는 또 다른 현상

에서 연유한 확산이 존재함을 시사한다.

추가 확산계수를 마찰에너지손실률의 삼승근에 비례한다고 가정하여 산정된 연안류의 유속분포는 관측치와 거의 일치하며, 이러한 추가확산은 연안류의 연직변화와 잉여응력계산의 오차에 연유한 것으로 판단된다. κ - l 보존식을 사용하여 난류확산계수를 구하고 연안류 연직변화 및 잉여응력 오차에 기인한

추가확산을 고려하여 실험자료에 적용하였을 때 κ - l 보존식에 사용된 제 경험계수들을 거의 일정하게 취하여 연안류 유속분포를 예측할 수 있었다. 특히 이전 Yoo(1994)의 수치모형에서는 l 보존식의 손실항에 포함되는 난류발생 주파수를 파주파수에 비례하는 것으로 가정하였는데, 이는 관측결과와 일치하지 않는 결과였다. 더욱이 파주파수에 단순 비례한다고 가정하였을 때 Case 1의 경우에 제 경험계수의 수치를 타 경우에 비하여 상당히 다른 수치를 적용하여야 적절한 유속분포를 산정할 수 있었는데, 난류발생 주파수가 $(g/l)^{1/2}$ 에 비례한다고 가정하여 거의 모든 경우에 대한 경험계수에 동일한 수치를 사용하여 관측결과와 유사한 유속분포를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 제 경험계수의 적절한 수치를 최적화 기법으로 구하여 평균치가 대략 $C_d=0.5$ 와 $C_2=0.5$ 였는데, 마찰계수와 같이 난류에너지 보존식에 사용되는 C_d 와 C_2 등도 어느 경우에도 일정한 절대상수는 아닌 것으로 사료된다. 이들도 레이놀즈수나 입사각의 크기에 따라 변이할 가능성이 있다(물론 쇄파에 의한 난류정도는 전난류에 가까우므로 레이놀즈수에는 거의 독립적인 경향을 가질 수도 있으며, 논의된 바와 같이 입사각에 따라 최적 수치의 경향이 뚜렷이 나타나고 있다). 그러나 이들의 변이가 실험자료에 적용하여 구한 수치에서 크게 벗어나지는 않을 것으로 예상된다.

참고문헌

- 김경호, 윤영호, 조재희, 1991. 연안유속분포 형상에 미치는 제인자, 한국해양·해양공학회지, 3(2): 108-115.
- 유동훈, 1989. 합성류 전단력 계산을 위한 혼합거리 모델, 한국해양·해양공학회지, 1(1): 8-14.
- 유동훈, 1990. 불규칙파에 의한 연안류, 대한토목학회논문집, 10(4): 151-158.
- 유동훈, 1993a. 쇄파대 내의 확산, 한국해양·해양공학회 학술발표회 논문초록집: 146-151.
- 유동훈, 1993b. 천이류에서의 관마찰, 대한토목학회 논문집, 13(4): 165-172.
- 유동훈, 이동수, 1992. 이동상 해저면에서의 마찰력, 한국해양·해양공학회지, 4(2): 63-71.
- 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.
- Bijker, E.W., 1966. The increase of bed shear in a current due to wave motion, *Proc. 10th Conf. Coastal Eng.*, ASCE, 1: 746-765.
- Bijker, E.W., 1967. Some considerations about scales for coastal models with movable bed, Delft Hydraulics Laboratory, Publ. No. 50.
- Dong, P., Walker, D.J. and Anastasiou, K., 1989. The modelling of wave breaking induced turbulent mixing using depth averaged turbulence transport equation, *Proc. 23rd IAHR Congress*, Ottawa, A181-A189.
- 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., 1993. Personal communication with the present writer.
- Thornton, E.B. and Guza, R.T., 1986. Surfzone longshore currents and random waves: models and field data, *J. Phys. Ocn.*, 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., 1989. Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, *Coastal Eng.*, 13: 325-340.
- Yoo, D., 1994. Wave-induced longshore currents in the surf zone, *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE (in print).
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1987. Bed friction model of wave-current interacted flow, *Proc. Spec. Conf. Coastal Hydrodynamics*, ASCE: 93-106.
- 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.