韓國海岸・海洋工學會誌
第3卷 第2號, pp. 108~115, 1991年 6月

沿岸流速分布 形狀에 미치는 諸因子
Factors Affecting Longshore Current Profile

金京鎬*・尹永鎬*・曺在熙*
Kyoung Ho Kim*, Young Ho Youn* and Jae Hee Cho*

要 旨 : 碎波後 發生하는 에너지 損失과 밀접한 관계를 가지며 또한 碎波帶內에 국한되어 분포하고 있는 沿岸流 分布形狀과 그 形狀에 影響을 미치는 諸因子에 대해서 考察하였다. 沿岸流는 沿岸域의 物質擴散에 관계하며 沿岸漂砂와 밀접한 관계가 있어 이에 대한 究明은 공학상으로 커다란 의미를 갖는다. 計算結果로부터 水平擴散係數, 摩擦係數, 波向角, 波形傾斜 및 海底傾斜 등의 沿岸流의 流速分布形狀에 미치는 影響을 검토하고, 計算의 妥當性을 검토하기 위해 旣往의 硏究結果와 본 연구에서의 計算結果를 비교 검토한다.

Abstract □ This paper aims at the elucidation of the characteristics of longshore current profile after wave breaking. Wave breakers are always accompanied by complex turbulent process, wave energy losess occur and the mean water level also varies due to the gradient of radiation stress. These with other factors result in the development of longshore currents. Longshore currents have relations to the alongshore sand transport and to the diffusion of contaminants in nearshore region, thus the understanding and elucidation of them are very important from the engineering point of view.

Using the calculated results, the factors such as lateral mixing cofficients, bed shear stress, wave angle, wave steepness and bottom slope, which are influencing the longshore current profile, are examined. Also, by comparing the results of longshore currents with the experimental data obtained by other investigators, the procedure proposed in the present study is shown to be valid.

1. 서 론

천해역으로 경사지게 입사되는 파는 정선(Shoreline)을 향하여 진행해감에 따라 여러 가지 요인에 의해서 변형한다. 지형변화에 의한 굴절, 구조물에 의한 반사와 회절 및 내부점성 혹은 저면마찰에 의한 에너지손실 등의 과정을 거치게 되어 수심이 더욱 얕아지면 천수효과(Shoaling)로 인해 파가 공기를 혼입하면서 부서지게 되는데 이러한 현상을 쇄파라고 한다. 이와 같은 쇄파현상은 파고가 어느 한계 이상으로 크게 되어 파형의 안정성을 잃어버리기 때문에 일어나는 현상이다. 이러한 쇄파대내의 유속장에 관한 연구는 다수 행해져 왔지만 난해하기 때문에 충분한 구명은 되었다고 볼 수 없다.

연안류는 정선에 대해 파가 경사지게 입사될 때 정선에 거의 평행한 방향으로 흐르는 흐름으로 해안 근방에서의 흐름 중 연안류는 쇄파에 수반해서 생기는 에너지 손실과 밀접한 관계가 있으며, 거의 쇄파대에 국한되어 분포하는 것이 특징이라 할 수 있다. 연안류는 연안류의 물질확산에 관계하며 연안표사를 유발하여 해안침식 또는 항만매몰, 하구폐쇄 등의 주요한 요인이 되고 있다. 특히, 대부분의 해안구조물이 쇄파대내에 축조된다고 하는 관점에서 볼 때 연안류에 대한 이해와 그 특성 구명은 공학적으로 커다란 의미를 갖는다고 하겠다.

연안류에 대해서는 Putnam 등(1949)에 의해서 처음으로 그 예측식이 제안된 이래 Longuet-Higgins와 Stewart(1969), Thornton(1970), Longuet-Higgins (1970), James(1972), Battjes(1974), Jonsson 등 (1974), Liu와 Dalrymple(1978), Kraus와 Sasaki

* 忠北大學校 土木工學科(Department of Civil Engineering., Chung Buk National University, Cheongju 360-763, Korea)

(1978) 등이 그 대표적인 예이다. Bowen(1969)과 Longuet-Higgins(1970)는 유속에 관한 해저마찰을 선형화 하는 것에 의해 입사각이 작은 경우의 해석해를 유도했고, 비선형 해저마찰을 고려한 수치해도 Thornton(1970), Jonsson 등(1974)에 의해 구해지고 있다. 1970년대 이후에 들어서면서 그 이론적인 취급이 더욱 다양해졌으며, 유속의 측정도 각종 유속계를 사용하게 되었다. 水口 등(1978)은 propeller식 유속계를 사용해서 연안류의 연직단면분포의 특성을 고찰하였고, 田中과 和田(1980)은 초음파식 유속계를 사용해서 연안류 및 이안류의 발생기구를 구명하고 있다. 최근에는 Huntely와 Bowen(1974), Thornton 등(1976), Huntely(1976), 掘川 등(1979)에 의해서 전자유속계를 이용한 연안류의 현지관측도 보고되고 있다. 연안류에 대한 수리실험 및 현지관측은 많은 시간과 경비를 요하므로 연안류의 분포특성을 실험적으로 구명하는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서 대부분의 연구들도 주로 정선에 수직한 방향으로의 연안류의 분포형상만을 다루어 온 것이 주류를 이루었다.

본 연구에서는 정선에 평행 방향으로 수심이 변화하지 않는 연직해안에 대해 파와 흐름이 공존하는 2차원 파동장을 설정하고, 질량, 운동량 및 에너지 보존식으로부터 radiation stress의 경사변화와 파고감쇠로 인해서 발생되는 연안류의 기본식을 유도한 다음, 이를 계산하고 연안류의 분포형상에 미치는 제인자에 대해서 고찰한다. 또한 계산의 타당성을 검토하기 위해 기존의 연구결과와 본 연구에서의 계산결과를 비교 검토한다.

2. 2차원 연안류 모델

2.1 기초방정식

파와 흐름이 공존하는 경우를 고려하여 Fig. 1과 같은 좌표계를 생각한다.

2.1.1 파수 및 방향각

어떤 지점에서 흐름과 함께 이동하는 좌표계로부터 파를 관측할 때, 그 주기 T^* 및 각주파수 ω^*는 미소진폭파 이론에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\omega^* = \frac{2\pi}{T^*} = \sqrt{gk\ \tanh(h+\eta)} \qquad (1)$$

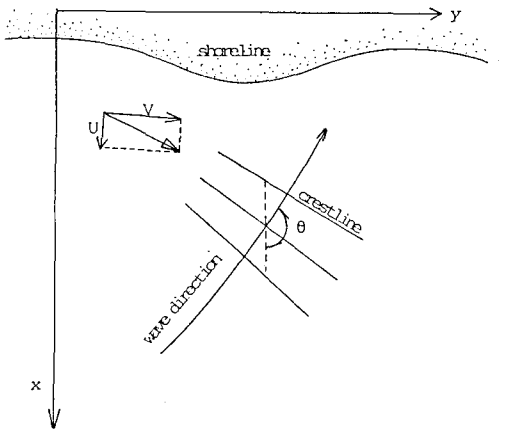

Fig. 1. Coordinate system.

여기서 $k=2\pi/L$(L은 파장) : 파수

h=정수심

η=평균수위 상승

또한 고정좌표계에서 보면 각주파수는, 파수의 보존식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\omega^* = \frac{2\pi}{T} = \omega^* + k(U\cos\theta + V\sin\theta) \qquad (2)$$

여기서 U, V는 각각 평균유속의 x, y축 방향성분, θ는 x축과 파향선이 이루는 각이다. 파의 굴절에 관한 Snell의 법칙은 직교좌표계에서 파수의 비회전성을 적용하면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\ \sin\theta) - \frac{\partial}{\partial y}(k\ \cos\theta) = 0 \qquad (3)$$

2.1.2 파고분포

파고분포는 에너지 보존식을 Fig. 1과 같은 좌표계에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[E(C_{gx}+U)] + \frac{\partial}{\partial y}[E(C_{gy}+V)]$$

$$+ S_{xx}\frac{\partial U}{\partial x} + S_{xy}\frac{\partial U}{\partial y} + S_{yx}\frac{\partial V}{\partial x} + S_{yy}\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \qquad (4)$$

여기서 $E=1/8\,(\rho g H^2)$ (H는 파고), 단위 면적당 평균파동 에너지

$C_{gx}=n\ C\cos\theta$: x 방향의 군속도

$C_{gy}=n\ C\sin\theta$: y 방향의 군속도

C=파속(Celerity)

$$n=\{1+2k(h+\eta)/\sinh\ 2k(h+\eta)\}/2$$

또한 radiation stress의 각 성분은 미소진폭파 이론을 적용하면 다음과 같다.

$$S_{xx}=E[n\ (\cos^2\theta+1)-1/2] \tag{5}$$

$$S_{yy}=E[n\ (\sin^2\theta+1)-1/2] \tag{6}$$

$$S_{xy}=S_{yx}=En\ \cos\theta\sin\theta \tag{7}$$

2.1.3 연안류 및 평균수위 변동

흐름의 계산에 있어서는 평균류에 관한 운동방정식 및 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}+g\frac{\partial \eta}{\partial x}+R_x+F_x+M_x=0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+g\frac{\partial \eta}{\partial y}+R_x+F_y+M_x=0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}[U(h+\eta)]+\frac{\partial}{\partial y}[V(h+\eta)]=0 \tag{10}$$

윗식에서 R_x, R_y는 파동으로부터 생겨나는 외력항으로서 다음과 같이 표시된다.

$$R_x=\frac{1}{\rho(h+\eta)}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) \tag{11}$$

$$R_y=\frac{1}{\rho(h+\eta)}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) \tag{12}$$

F_x, F_y는 각각 x 및 y 방향의 마찰응력항으로서 일반적으로 다음과 같은 값을 사용한다.

$$F_x=F[U(1+\cos^2\theta)+V\cos\theta\sin\theta] \tag{13}$$

$$F_y=F[U\cos\theta\sin\theta+V(1+\sin^2\theta)] \tag{14}$$

여기서 F는 다음과 같으며 f는 마찰계수이다.

$$F=\frac{2fH}{T(h+\eta)\ \sinh\ k(h+\eta)}$$

또 M_x 및 M_y는 수평확산항으로 다음과 같이 표시된다.

$$M_x=-\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_{xx}\frac{\partial U}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_{xy}\frac{\partial U}{\partial y}\right) \tag{15}$$

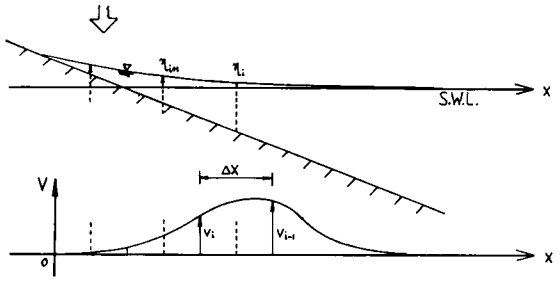

Fig. 2. Two-dimensional model coordinate.

$$M_y=-\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_{xx}\frac{\partial V}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_{xy}\frac{\partial V}{\partial y}\right) \tag{16}$$

여기서 ε_{xx}, ε_{xy}, ε_{yx} 및 ε_{yy}는 확산계수이다.

2.2 연안류의 계산

정선방향으로 수심이 변화하지 않는 평행 해안인 경우에는 y축의 미분항이 없어지고, x축 방향으로의 흐름 U가 0이므로 2차원 해석이 가능하게 된다. 계산은 Fig. 2와 같은 좌표계를 설정하고, 심해방향에서 정선방향으로 향하여 계산을 수행했다. 계산은 우선 전구간에 대해서 Wave set-up과 연안류 V가 존재하지 않는다는 가정하에 식 (1)과 (2)로부터 파수 k를 구하고 식 (3)으로부터 파향각, 식 (4)~(10)로부터 각각 파고분포, 평균수위 변동 및 연안류를 계산하여 처음 계산으로 돌아가는데 이때 파수, 파향각, 파고분포 및 평균수위 상승에 연안류의 효과가 고려된다. 계산에 사용된 Program은 5개의 Sub program으로 이루어졌으며, 그 흐름도는 Fig. 3과 같다. 특히 파고를 계산할 때 쇄파한계로서는 Miche가 제안한 다음식을 이용했다.

$$H_b=\frac{\gamma}{k}\tanh\ k(h+\eta) \tag{17}$$

여기서 γ는 계수이고, Miche는 $\gamma=0.284\pi$를 제안하고 있다. 또 수평혼합계산에 있어서는 다음과 같은 확산항으로 표시하여 사용 하였다.

$$M_y=-\varepsilon_{yx}\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \tag{18}$$

ε_{yx}에 대해서는 Longuet-Higgins가 제안한 다음식을 이용 하였다.

$$\varepsilon_{yx}=Nx\ \sqrt{g(h+\eta)} \tag{19}$$

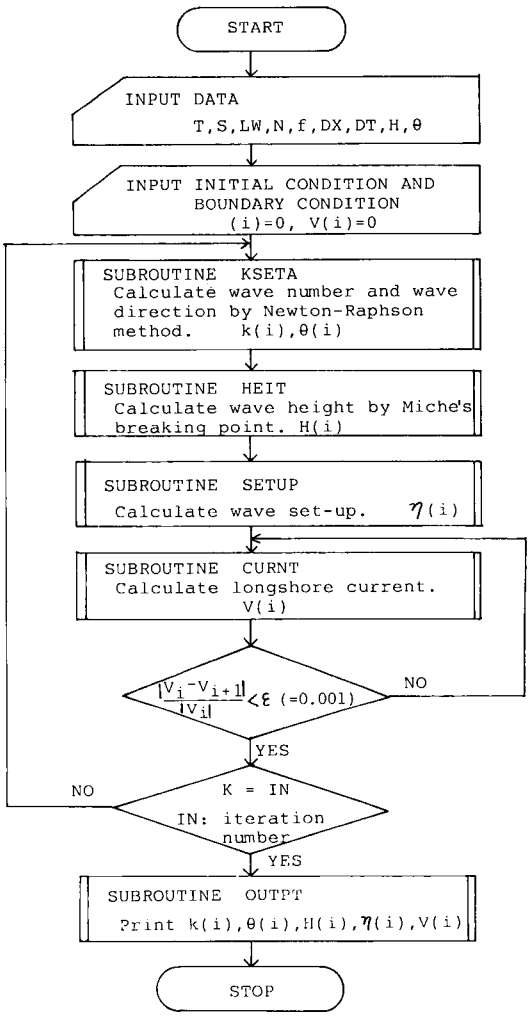

Fig. 3. Flow chart.

여기서 N은 수평혼합에 대한 무차원 계수로서 Longuet-Higgins는 $0<N\leq0.016$을 제안했으며, x는 정선으로부터 떨어진 거리를 나타낸다.

3. 계산결과 및 고찰

본 계산에서는 수평확산계수, 마찰계수, 파향각, 파형경사 및 해저경사를 달리해 가면서 여러가지 경우에 대해 계산을 수행하고, 그 결과 중 몇 가지 예에 대해서 검토하기로 한다. 그리고 본 계산의 타당성을 검증하기 위해 Kim and Sawaragi(1986), 水口 등(1978)의 실험결과와 계산결과를 비교 검토 하였다.

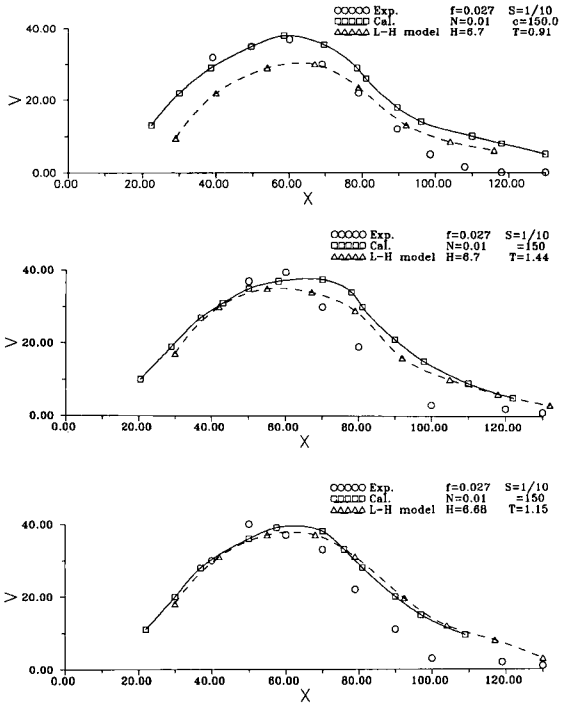

Fig. 4. Comparisons of computed longshore current with the experimental data of Kim and Sawaragi(1986).

3.1 계산결과와 실험치와의 비교

Fig. 4과 Fig. 5는 Kim and Sawaragi(1986)와 水口 등(1978)의 평면수조에서 행한 연안유속의 측정치와 본 연구에서의 계산결과를 비교한 것이다. 계산결과를 살펴보면 쇄파대 밖에서는 연안류가 아주 미약하고 정선측으로 향하면서 증가하다가, 쇄파대 중간지역 부근에서 최대유속이 나타나고 다시 정선측으로 감소하는 등의 경향이 있는데 이는 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

3.2 파고, 평균수위 변동 및 파향각

연안류와 더불어 연안류에 영향을 미치는 파고, 평균수위 변동, 파향각에 대한 계산도 함께 행했다. Fig. 6은 상기한 파고, 평균수위 변동, 파향각의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 (a), (b), (c)는 조건을 조금씩 달리한 경우이며, 계산조건은 그림 중에 표시되어 있다. 파고는 심해측으로부터 쇄파점 근방까지는 거의 일정하게 유지하다가 쇄파점 이후부터 감소하는 경향을 알 수 있다. 평균수위 변동은 점차 작아지다가 쇄파점 부근에서 set-down이 가장 크게 되었다가 정

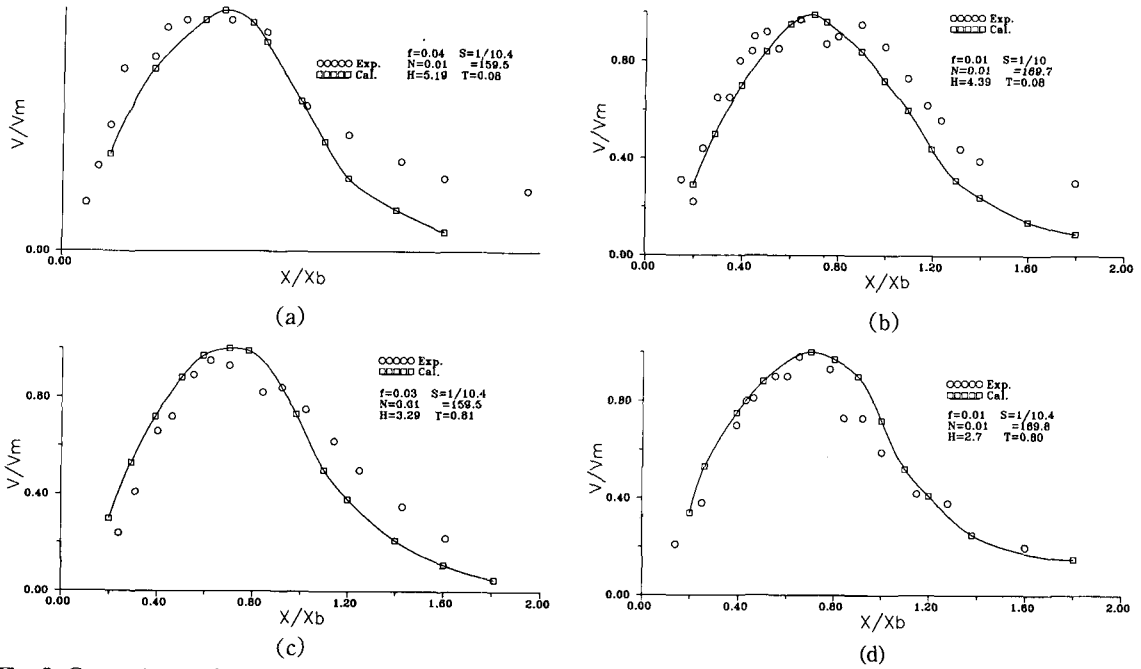

Fig. 5. Comparisons of computed longshore current with the experimental data of Mizuguchi *et al.* (1978).

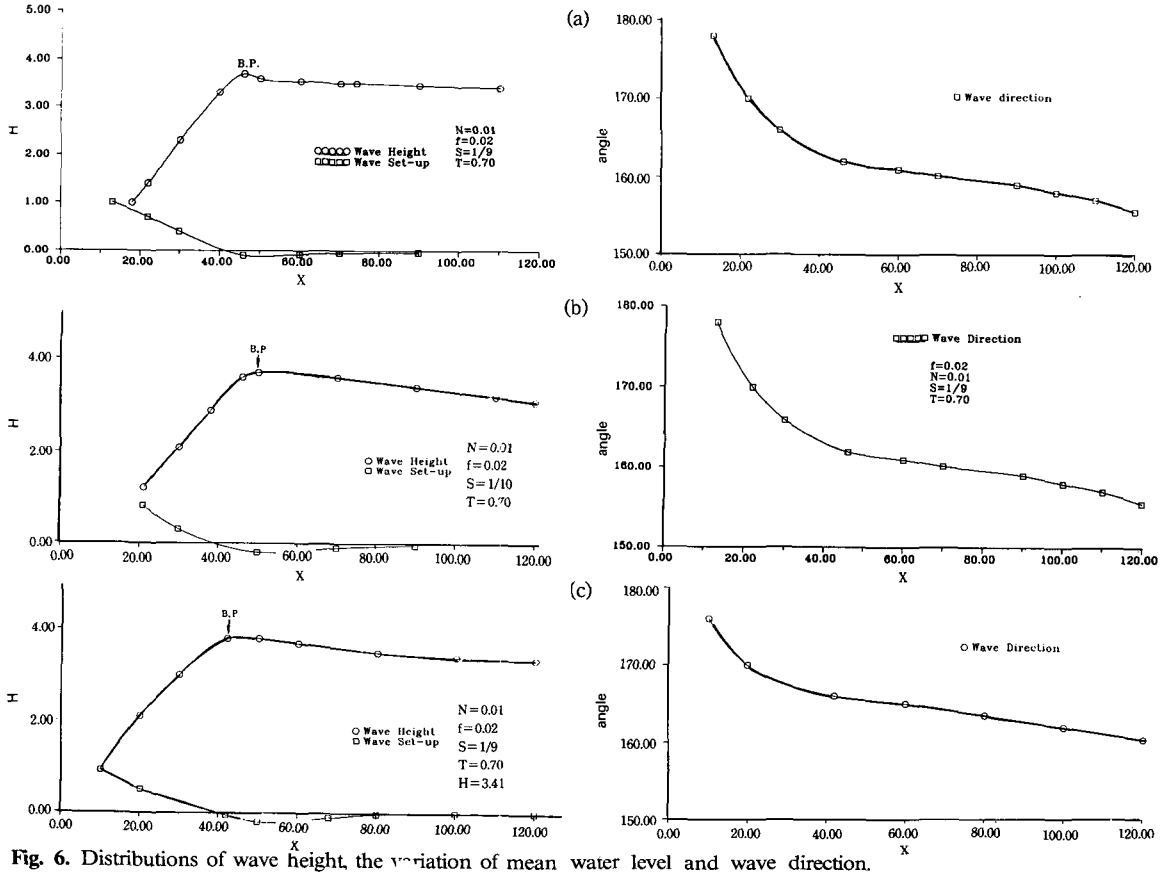

Fig. 6. Distributions of wave height, the variation of mean water level and wave direction.

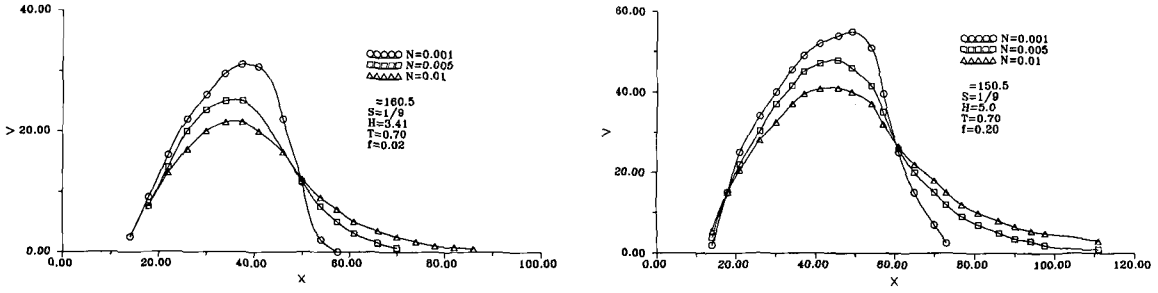

Fig. 7. Effects of N-values on longshore currents profile.

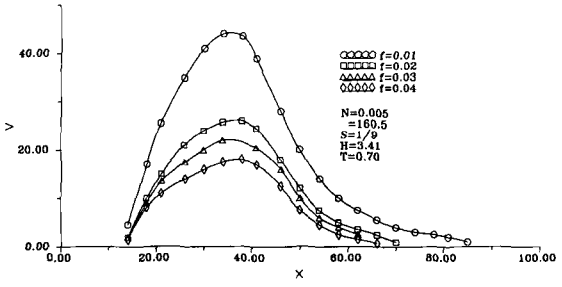

Fig. 8. Effects of f-values on longshore currents profile.

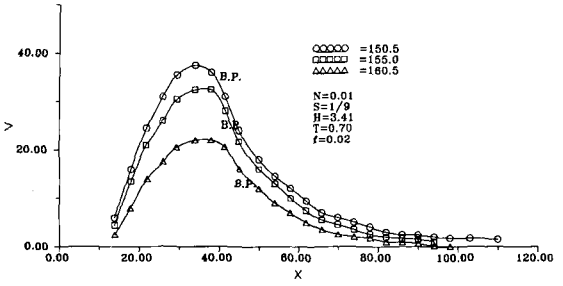

Fig. 9. Effects of wave direction on longshore currents.

선을 향해 파가 진행해 감에 따라 서서히 Set-up이 일어나고 있는 것을 볼 수 있다. 파향각은 심해에서 정선으로 향하여 진행해감에 따라 굴절되어 정선에서는 거의 수직으로 입사함을 알 수 있다.

3.3 N치가 연안 유속분포 형상에 미치는 영향

여러 가지 주어진 조건에 대해 수평확산에 대한 계수 N을 변화해 가면서 계산을 수행한 결과를 Fig. 7 (a), (b)에 도시한다. N의 값이 클수록 연안 유속이 작아지고, 최대유속의 발생위치가 심해에서 정선측으로 옮겨가는 등의 성질이 기존의 연구 결과와 잘 일치하고 있다(金과其, 1986)

3.4 f치가 연안 유속분포 형상에 미치는 영향

다른 조건은 동일하게 하고, 마찰계수 f를 달리했을 경우의 계산결과를 Fig. 8에 도시한다. 저부 전단력이 연안유속에 대해서 저항력으로 작용한다고 하는 사실을 볼 때, f가 클 수록 연안유속이 작게 나타나는 것은 계산결과에서 보듯 당연하다. 그러나 최대유속의 발생위치가 f가 클 수록 심해측으로 이동한다고 하는 새로운 사실을 알 수 있다.

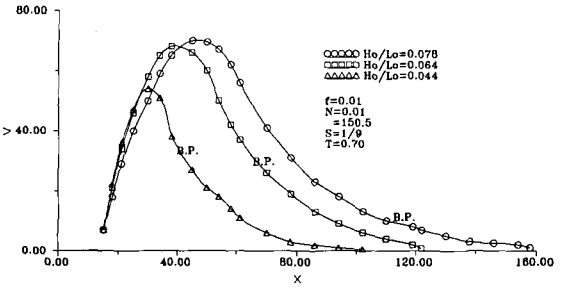

Fig. 10. Effect of wave steepness on longshore currents (T=constant).

3.5 파향각이 연안 유속분포 형상에 미치는 영향

일반적으로 파향각 θ가 작아지면 연안유속이 증가함을 알 수 있고, Fig. 9에서도 알 수 있는 바와 같이 파향각이 클 수록 쇄파점의 위치와 최대유속의 발생위치가 심해측으로 후퇴하고 있음을 알 수 있다.

3.6 파형경사가 연안 유속분포 형상에 미치는 영향

Fig. 10은 주어진 조건에서 주기를 일정하게 하고 파고를 달리했을 때, 즉 파형경사를 달리했을 때의 경우이다. 파고가 연안유속의 외력이라는 점을 생각할 때 파고가 크면, 즉 파형경사가 큰 경우 연안유속이 크게 나타나는 것은 당연한 사실이나 파형경사가 작은

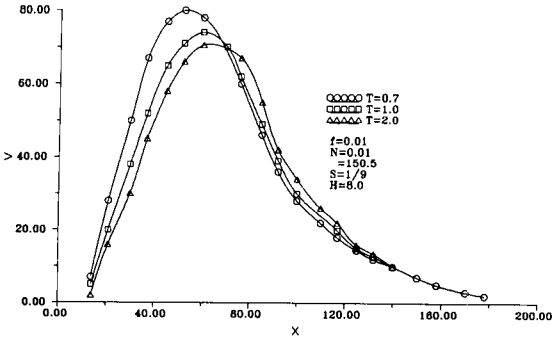

Fig. 11. Effect of wave steepness on longshore currents (H=constant).

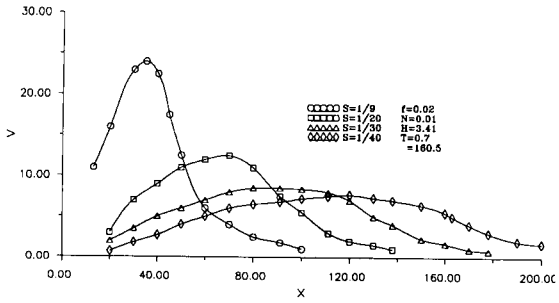

Fig. 12. Effect of bottom slope on longhshore currents.

경우에 비해 쇄파점의 위치 및 최대유속의 발생위치가 심해측으로 후퇴하고 있음을 그림을 통해서 알 수 있다. 또 파형경사가 작은 경우 유속분포 형상이 첨예화 되고 있는 사실도 알 수 있다. Fig. 11은 동일 조건에서 파고를 일정하게 하고 주기를 달리하여 파형경사를 다르게 했을 경우이다. 이 경우 주기를 일정하게 했을 경우 보다는 파형경사가 연안 유속분포 형상에 미치는 영향은 그다지 큰 차를 보이고 있지 않으나 최대유속의 발생위치는 파형경사가 클 수록 정선측으로 이동하고 있다.

3.7 해저경사가 연안 유속분포 형상에 미치는 영향

Fig. 12는 해저경사를 달리했을 때의 연안 유속분포 형상에 대한 계산결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 해저경사는 연안 유속분포 형상에 크게 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있으며, 해저경사가 급할 수록 연안유속은 커지고, 최대유속의 발생위치는 정선측으로 이동하며 연안 유속분포 형상은 첨예화 되는 것을 알 수 있고, 해저경사가 완만한 경우 평탄한 분포형상을 하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 질량, 운동량 및 에너지 보존식으로부터 연안류에 대한 기본식을 이용하여 연안류의 계산을 행했다. 계산의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 실험자료와 비교하고, 연안 유속분포 형상을 알아보기 위해서 연안 유속분포 형상에 미치는 제 인자들에 대해서 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 연안류는 거의 쇄파대내에 국한되어 분포하고, 쇄파대 밖에서는 미약함을 알 수 있다.

2) 연안 유속분포는 N이 클 수록 또 f가 클 수록 작게 나타나며 최대유속 발생위치는 N이 크면 정선측으로, f가 클 때는 심해측으로 이동한다.

3) 파향각 θ가 증가하면 연안유속이 감소하고, 쇄파점의 위치와 최대유속의 발생위치가 심해측으로 후퇴한다.

4) 파형경사가 크면 일반적으로 유속분포가 크게 되며, 최대유속의 발생위치는 주기를 일정하게 하고 파형경사를 변화시켰을 경우에는 최대유속의 발생위치는 파형경사가 클 수록 심해측으로 이동하며, 그 분포형상이 첨예화 되고 있다. 한편 파고를 일정하게하고 주기를 달리하여 파형경사를 달리했을 경우에는 최대유속의 발생위치는 파형경사가 클 수록 정선측으로 이동하며 분포형상의 변화는 거의 없다.

5) 앞에서 언급한 제 인자 중 연안 유속분포 형상에 미치는 인자 중 해저경사의 영향이 가장 크다고 볼 수 있다. 해저경사가 급할 수록 최대유속의 발생위치는 정선측으로 이동하고 연안 유속분포 형상은 첨예화되며, 해저경사가 완만할 수록 분포형상은 평탄하게 나타나고 있다.

사 사

본 연구는 문교부 학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었다.

參考文獻

Battjes, J.A., 1974. Computation of Set-up, Longshore Current, Run-Up and Overtopping due to Wind-Generated Waves, *Comun. on Hydraulics, Dep. of Civil Eng., Delft Univ. of Techn. Rep.*, No. 74-2, 244.

Bowen, A.J., 1969. The Generation of Longshore Currents on a Plane Beach, *J. of Mar. Res.*, **27**: 206-215.

Huntley, D.A. and Bowen, A.J., 1974. Field Measurement of Nearshore Velocities, *Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng.*, 538-557.

Huntley, D.A., 1976. Lateral and Bottom Forces on Lone-shore Currents, *Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng.*, 645-659.

James, I.D., 1972. Some nearshore Effects of Ocean waves, *Univ. of Cambridge, diss.*, 130.

Jonsson, I.G., Skovgaard, O. and Jacobsen, T.S., 1974. Computation of Longshore Currents, *Proc. 14th Conf. Coastal Eng., Copenhagen*, 699-711.

Kim, K. and Sawargi, T., 1986. Lateral mixing and wave direction in the wave-current interaction region. *Proc. of 20th Conf. on Coastal Eng.*, 366-380.

Kraus, N. and Sasaki, T. 1978. 海岸流速分布に及ほす入射角の影響について、第27回 海岸工學講演會論文集, pp. 425-429.

Liu, P.L-F and Dalrymple, R.A., 1978. Bottom Frictional Stresses and Longshore Currents due to Waves with Large Angles of Incidence, *J. of Mar. Res.*, **36**: 357-375.

Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W., 1964. Radiation Stress in Water Wave; A Physical discussion, with Applications, Deep sea Research, **11**: 529-562.

Longuet-Higgins, M.S., 1970. Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves, 2, *J. of Geophys. Res.* **75**: 6790-6801.

Putunam, J.A., Munk, W.H. and Traylor, M.A., 1949. The Prediction of Longshore Currents, *Trans. A.G.U.*, **30**(3): 337-345.

Thornton, E.B., 1970. Variation of Longshore Currents across the Surf Zone, *Proc. of 12th Conf. on Coastal Eng.*, 291-308.

Thornton, E.B., Galvin, J.J., Bub, F.L. and Richardson, D.P., 1976. Kinematic of Gravity Waves, *Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng.*, 461-476.

金京鎬, 具奉權, 1986. 碎波後 發生하는 海岸流의 流速分布에 관한 硏究, 大韓土木學會論文集 第6港, 第4號, 11-19.

水口 優, 大嶼義降, 堀川清司, 1978. 沿岸流速の斷面分布について, 第25回 海岸工學講演會論文集, 425-429.

田中寬好, 花田 明, 1980. 海兵流の發生幾講に關する實驗的硏究, 第27回 海岸工學講演會論文集, 153-157.

堀川清司, 堀田新太郎, 水口 優, 磯部雅彦, 1979. 碎波後の波にともなら流速場に關する現地觀測, 第26回 海岸工學講演會論文集, 46-50.