

## 유속 분포식의 요소에 관한 연구

장 원 일\*

### A Study for the Elements of the Flow Velocity Profile

Won - Yil Jang

목 차	
Abstract	3. 분 석
1. 서 론	4. 요 약
2. 이 론	참고문헌

#### Abstract

The flow velocity profiles are investigated on the basis of laboratory and field data by Bakker & Van Doorn(1978), Grant & Madsen(1979). Investigation of the velocity profile to connect with the bottom boundary is important because it reveals the stirring mechanism of the sand in the surf zone and determining the sand transportation and sedimentation.

In this paper, the governing equation of a horizontally uniform combined wave - current flow and the equation for the intrusion of the shear stress into the fluid are used. And the factors of the flow velocity profiles is analyzed, and then compared with the velocity profiles.

#### 1. 서 론

계산을 통한 저층 유속 분포 예측을 위한 연구는 바닥 경계층 및 와점성구조와 연계되어

\* 한국해양대학교 교양과정부 부교수

Lundgen(1972), Bakker(1973), Bakker & Van Doorn(1978) Grant and Madsen(1979), Myrhaug and Slat(1989), Sleath(1991), Nielsen(1992) You Z.J.(1994)등에 의해 다양하게 이루어져 왔다. 저층유속분포를 경계층과 연관시켜 연구하는 것은 경계층해석 등 유속과의 직접적인 관련뿐 아니라, 경계층에서의 현상이 surf 구역에서의 퇴적물의 이동 즉, 파의 운동에 의한 바닥경계층으로 부터의 부유, 침식, 퇴적등의 결정적 요인으로 볼 수 있기 때문이다. 이러한 연구결과는 퇴적물 이동비 계산 및 해양구조물 주위의 토사운동으로 인한 안정성 문제 해결 등에 다양하게 적용될 수 있다. 그러나, 저층유속분포의 수학적 표현과정은 흐름과 파의 결합, 확산, 바닥과의 관계등 대단히 복잡하므로 일련의 수학적인 과정만으로 유속분포의 결과를 표현하기는 불가능하다.

본 논문은 Prandtl가설의 mixing length이론을 이용하여 개발된 바닥경계층 모델의 수학적 표현식<sup>9)</sup>과 Grant, Navier등의 식을 분석하여, 와점성계수와 경계층 두께등의 요소로 흐름속도 계산에서 반복적인 계산부분을 가능한한 제외시켜 비교적 단순화한 류<sup>11)</sup>의 식을 적용하였다. 결과를 보다 정확한 유속분포 모델의 개발에 이용하기 위하여, 유속분포식에 대하여 적용 가능한 조건, 특성 및 각 요소에 대한 영향등을 검토하고, 1m 이하의 유속분포와 바닥상부의 유속분포를 비교하였다.

## 2. 이 론

유속분포 특히 저층유속의 경우 실측에 의한 방법은 어려움이 많으므로 계산에 의한 추정방법이 유용하다. 계산에 의한 방법에서의 지배방정식은 크게  $Z \ll h$ 인 바닥부근에서 퇴적물 이동등을 다룰 경우에 유용한 식으로, 수평적으로 결합시킨 파 존재하의 관계식  $\partial T / \partial Z = \partial P / \partial X$  (T ; time averaged shear stress, P ; time averaged fluid pressure)를 압력기울기가 수심에 대해 일정하다고 가정하여 단순화시킨 (1)식과 shear stress velocity를 속도항으로 표현한  $S_v = k_s Z (\partial U / \partial Z)$ 의 관계식을 수심에 대해 적분한 (2)식을 지배방정식으로 사용할 수 있다.

$$\bar{U} = \int_{z_0}^z \frac{\bar{U}^*}{\epsilon_c} dz \quad (1)$$

$$\bar{U} = \int_{z_0}^z \frac{\bar{P}}{k_s z} dz \quad (2)$$

상기 (1)식에서 current friction velocity  $\bar{U}^*$ 는  $\bar{U}^* = \frac{\sqrt{\bar{\tau}_b}}{\rho}$  ( $\rho$  ; fluid density), time averaged bed shear stress  $\bar{\tau}_b$ 는  $\bar{\tau}_b = h(\partial P / \partial X)$ ,  $Z_0$ 는 흐름유속이 0이 되는 위치로  $k_s$ 가 bed roughness일 때  $Z_0 = k_s/30$ 의 값을 대부분의 계산에서 사용한다. 따라서 (1)식에서 흐름마찰속도  $U^*$ 와 와점성확산계수  $\epsilon_c$ 가 주어지면 파 존재하의 흐름유속 분포가 계산 가능하다. 류(1994)는 Van Doorn의 실험과 wave-current 결합 흐름에서의 안정성분에 대한 확산계수  $\epsilon_c$ 를 표현하였다. 아래 (3)식에 따른 계산결과, Von karman 상수( $\approx 0.4$ )를  $\kappa$ , 파의 운동에만 관계되는 파의 마찰속도

를  $U_w^*$ , Josson and Carlsen(1976)에 의해 정의된 wave boundary layer thickness를  $\delta_1$ , boundary interaction layer thickness를  $\delta$ 로 나타낼 때  $\epsilon_c$ 의 분산은  $Z_0 \leq Z \leq \delta_1$ 일 경우  $\epsilon_c = \kappa U_w^* \delta_1$ ,  $\delta \leq Z \leq h$ 일 경우  $\epsilon_c = \kappa U_w^* Z$ ,  $\delta \leq Z \leq h$ 일 경우  $\epsilon_c = \kappa U_w^*$ 로 가정하였다.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} = \frac{\bar{U}^{*2}(1-Zh)}{\epsilon_c} \quad (3)$$

와점성계수에 대한 결과를 (1)식과 경계조건을 사용하여 정리하면 흐름유속분포는 다음식으로 예측 가능하다.

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}^*}{\kappa} \left( \frac{\bar{U}^*}{U_w^*} \right) \ln \frac{Z}{Z_0} \quad Z_0 \leq Z \leq \delta_1 \quad (4)$$

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}^*}{\kappa} \left( \frac{\bar{U}^*}{U_w^*} \right) \left( \frac{Z}{\delta_1} + \ln \frac{\delta_1}{Z_0} - 1 \right) \quad Z_0 \leq Z \leq \delta \quad (5)$$

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}^*}{\kappa} \ln \frac{Z}{Z_1} \quad \delta \leq Z \leq h \quad (6)$$

여기서 wave friction velocity  $U_w^*$ 는 각진동수가  $W$ , wave friction factor가  $f_w$ 일 때  $U_w^* = \sqrt{0.5 f_w} AW$ 로 주어지며, 파의 경계층 외부의  $A$ 는 선형 wave theory로 부터  $A = H / (2 \sinh kh)$  ( $H$ ; 파고,  $k$ ; 파수,  $h$ ; 수심) 식으로 계산될 수 있고,  $AW$ 값은 최대흐름속도가 된다. 또한 wave friction factor  $f_w$ 는 1991년 류에 의해 다음 (7)식으로 유도된 바 있다.

$$f_w = 0.108 \left( \frac{A}{k_s} \right)^{-0.343} \quad (7)$$

또한 Lundgren는 지배방정식 (2)식을 apparent roughness와 관련시켜 다음의 유속 분포식을 제안하였다.

$$\bar{U}(Z) = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \left( \frac{1}{k_s} \ln \frac{Z}{Z_0} - \zeta \right) \quad (8)$$

상기 (8)식에서, level  $Z$ 와는 무관한 반면 shear stress velocity와는 밀접한 연관이 있는  $\zeta$ 는 퇴적물 이동과 관련된 저층 유속분포의 경우 friction factor  $f_w$ 값이 전체에 미치는 영향이 지대하므로, 수학적인 모델에서  $f_w$ 값의 오차를 줄이고자 할 경우에는 아래식을 사용하는 것이 타당한 것으로 알려져 있다.

$$\zeta = \frac{1}{k_s} (k_1 + k_2 \ln Z_0^* + k_3 Z_0^*) \quad (9)$$

(9)식에서  $k_1, k_2, k_3$ 는 shear stress, fluid density, shear stress velocity와 관련된 값이며, 파와 흐름 사이의 각  $\phi$ 에 따라,  $k_1 = k_2 \ln Z_0^* - k_3 Z_0^*$ ,  $k_2 = 1 - (S_v / \dots)$ ,  $k_3 = \beta / \dots$ 로 표현된다. Shear stress velocity  $S_v$ 는 지배방정식 (2)식으로 부터 moderate 흐름에서 유속 및 주기와 관련된

stroke length  $\sigma (= \overline{UT}/2\pi)$ 와 바닥조도계수  $k_s$  사이에 다음과 같은 유일한 관계가 성립한다. (10)

$$\frac{\sigma}{U} = \exp \left[ \sum_{j=1}^3 j_n (\ln(\sigma/k_s))^{j_n} \right]$$

(10)식에서  $j_0, j_1, j_2, j_3$ 는 상수로  $j_0 = -1.092, j_1 = -0.3364, j_2 = 0.01876, j_3 = -4.621 \times 10^{-4}$ 이다. 또한  $Z_s$ 와 초기전단응력속도  $S'$ 는 파와 흐름의 각이  $\phi$ 일 때 다음식과 같이 주어지고 이때  $\beta$

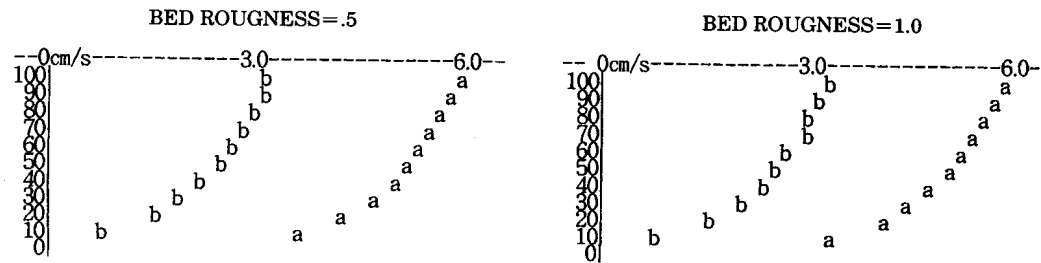
는  $\beta = (S' \cdot g \cdot S_v) / Z_s$ 의 관계가 성립한다. 
$$Z_s = -\frac{3\pi^3}{\ln\left(\frac{T}{1+(m+n\cos^2\phi)^2}\right)}, S' = \sqrt{\frac{T}{1+(m+n\cos^2\phi)^2}} \quad (11)$$

### 3. 분 석

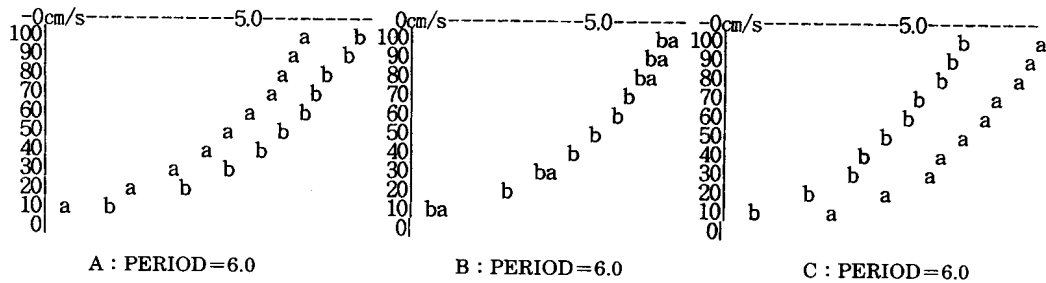
이론에서 언급된 각 식에서의 특성을 분석하여 보다 정확한 유속분포식을 개발하기 위해서는, 제반식과 관련된 요소들의 영향을 분석할 필요가 있으므로, 저층(1m 이하)에서의 유속분포를 중심으로 하여 주기, 파장, 조도계수 등에 따른 변화특성 및 유속분포를 검토하였다. 전산프로그램을 통한 조도계수, 최대흐름속도에 따른 흐름마찰속도  $U'$ , apparent roughness 값을 계산한 결과, 최대흐름속도 AW가 20.4cm/s, 25.1cm/s, 110.0cm/s일 때 <표 1>과 같다. <표 1>에 의하면 apparent roughness는 (4)-(6)식과 관련된 식  $Z_1 = 2\delta_1(e\delta_1/Z_0)^{-U'/U_c}$ 로 계산된 경우는 AW가 적을 때 0.05 - 0.1의 값으로서, 상대조도계수  $k_s/A$ 의 함수로 나타낸  $Z_1 = 0.0465 A(k_s/A)^{0.172}$ 로 계산한 경우의 0.02 - 0.1과 비슷하다. 그러나 (8)식과 관련된  $\ln Z_2 = \zeta$ 식으로 계산

<표 1>

BED ROUGHNESS	.500	.800	1.000	2.000	3.000
(AW = 20.4cm/s)					
FRICITION VELOCITY	.26095	.26578	.26806	.27513	.27925
APP ROUGHNESS $Z_1$	.46927	.53935	.57506	.69655	.77538
APP ROUGHNESS $Z_2$	2.31	1.99	1.85	1.43	1.19
SHEAR STRESS	69.5	72.0	73.3	77.2	79.5
SHEAR STRESS VELOCITY	.957	1.09	1.16	1.44	1.64
(AW = 25.1cm/s)					
FRICITION VELOCITY	.20050	.20638	.20916	.21771	.22264
APP ROUGHNESS $Z_1$	.04655	.06184	.07034	.10240	.12551
APP ROUGHNESS $Z_2$	2.10	1.81	1.67	1.27	1.05
SHEAR STRESS	41.0	43.4	44.6	48.3	50.6
SHEAR STRESS VELOCITY	.957	1.09	1.16	1.44	1.64
(AW = 110.0cm/s)					
FRICITION VELOCITY	.33077	.33915	.35282	.35936	.36550
APP ROUGHNESS $Z_1$	2.36624	2.74745	3.45265	3.82808	4.20324
APP ROUGHNESS $Z_2$	2.46	2.00	1.33	1.05	.813
SHEAR STRESS	112.0	117.0	127.0	132.0	136.0
SHEAR STRESS VELOCITY	.957	1.16	1.64	1.96	2.32



<그림 1>



<그림 2>

된 값 1.0-2.0의 값과는 상당한 차이를 보인다. 최대흐름유속 AW값이 적을 경우는 조도계수 값에 따라 상이하게 나타난다. 그러나 최대흐름속도가 클 경우는 AW=110cm/s의 예와 같이 조도계수가 작은 경우는 비슷하게 나타난다.

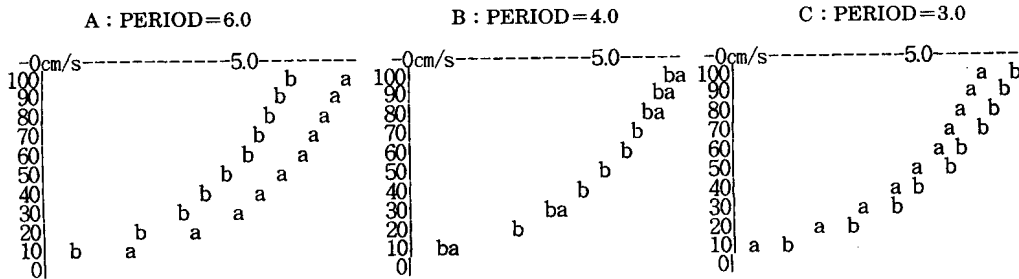
$Z_1$ 과  $Z_2$ 가 차이가 나타나는 것은  $Z_2$ 의 경우, 그래프상의 교점에 의한 기하학으로 산출된 방법을 활용한 것이고,  $Z_1$ 은 이론식으로 계산된 값으로써 흐름속도가 클 경우는  $Z_2$ 의 값이 커짐으로써 비교적 일치하는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 흐름속도가 빠를 경우는 무관하나 느릴 경우의 apparent roughness 평가는  $Z_1$ , 즉 이론식에 의한 방법이 보다 타당할 것으로 사료된다. Friction velocity는 AW 및 조도계수값에 따라 차이는 있지만 0.1cm/s 전후의 오차를 가지므로 앞에서 언급된 두식에 의한 방법 모두 적용가능한 것으로 볼 수 있다. 이와같이 friction velocity, apparent roughness, 최대흐름속도가 서로 상이한 값의 분포를 가지지만, 조도계수와는 관계없이 동일한 경향을 나타낸다. 그러나 유속분포에서는 <그림 1>에서와 같이 1m이하의 저층에서 유속값 자체는 (4)-(6)식에 의한 a값과 (8)식에 의한 b값과는 차이가 있다. 이와같이 유속값에서 차이가 나타나는 것은 파장, 파고등이 달라짐에 따라, 이러한 수치가 계산과정에 영향을 미치는 결과로 사료되므로 이 요소들의 계산상 특성을 파악할 필요가 있다.

<그림 2>는 파장에 따른 1m이하 저층의 유속분포를 나타낸 것으로 파장이 40m, 최대흐름 유속이 20.4cm/s일 때 (4)-(6)식에 의한 유속분포와 (8)식에 의한 유속분포는 <그림 2-b>와 같이 바닥 상부 70cm부분에까지는 일치하며 상부로 갈수록 차이가 나타난다. 반면, 파장이 길 경우(그림 2-a)는 (8)식에 의한 유속값이 크게 나타나고, 파장이 짧아지면(그림 2-c) (8)식에

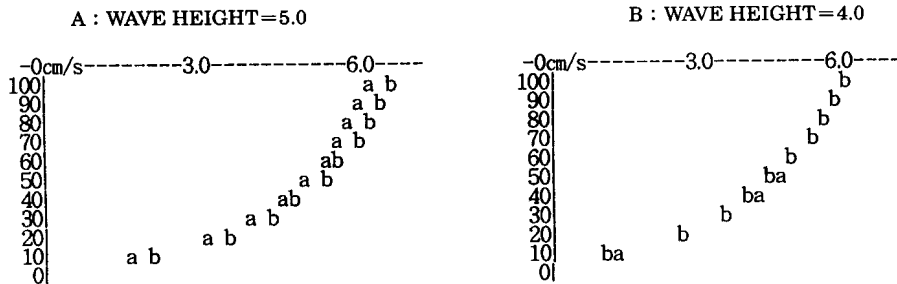
장 원 일

< 표 2 >

BED ROUGHNESS	.500	.800	1.000	2.000	3.000
(PERIOD=8.0 AW=4.65cm/s)					
FRICITION VELOCITY	.22243	.22882	.23185	.24123	.24669
APP ROUGHNESS Z <sub>1</sub>	.12447	.15999	.17934	.25084	.30132
APP ROUGHNESS Z <sub>2</sub>	2.69	2.37	2.22	1.78	1.53
SHEAR STRESS	50.50	53.40	54.80	59.40	62.10
SHEAR STRESS VELOCITY	.7990	.9010	.9570	1.160	1.320
(PERIOD=4.0 AW=9.30cm/s)					
FRICITION VELOCITY	.44487	.45764	.46370	.48247	.49338
APP ROUGHNESS Z <sub>1</sub>	.12447	.15999	.17934	.25084	.30132
APP ROUGHNESS Z <sub>2</sub>	2.96	2.63	2.48	2.03	1.77
SHEAR STRESS	202.0	214.0	219.0	237.0	248.0
SHEAR STRESS VELOCITY	1.60	1.80	1.91	2.33	2.63



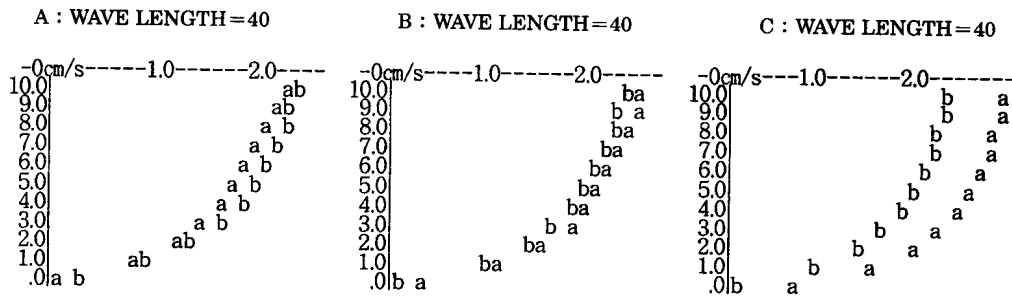
<그림 3>



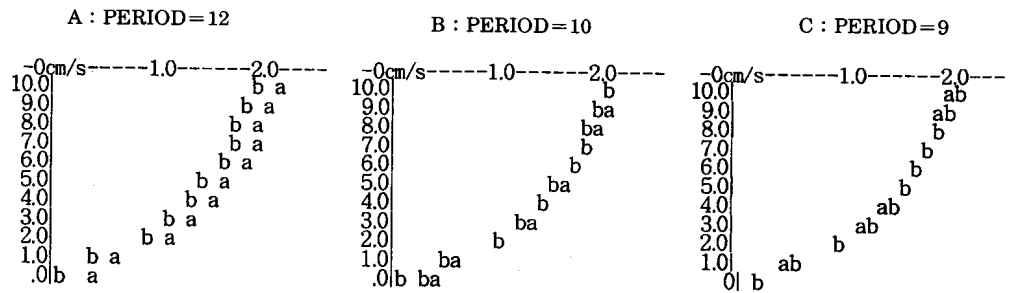
<그림 4>

의한 유속값이 작게 나타난다.

<표 2>는 <표 1>에 비해 최대흐름속도를 아주 작게 주었을 때 주기의 변화에 따른 friction velocity, apparent roughness, shear stress, shear stress velocity의 계산결과를 나타낸 것이다. Apparent roughness는 Z<sub>1</sub>이 Z<sub>2</sub>/10 - Z<sub>2</sub>/20의 값을 유지하고, 최대흐름속도가 9.3cm/s에서의 shear stress는 4.65cm/s일 경우와 비교할 때 약 4배로 나타난다. 최대흐름속도가 작을 때 주기에 따른 유속분포는 <그림 3>과 같다. 주기가 4초일 때 (4)-(6)식에 의한 유속분포와 (8)식에 의한 유속분포는 <그림 3-b>와 같이 하부에서 일치한다. 주기가 길 경우(그림 3-a)는 파장



<그림 5>



<그림 6>

에서와 반대현상으로, (8)식에 의한 유속값이 작게 나타나고, 파장이 짧아지면(그림 3-c) (8)식에 의한 유속값이 크게 나타난다. 이러한 결과는 (8)식에 의한 유속분포는 shear stress계산에만 파장이 영향을 주는 결과로 사료된다.

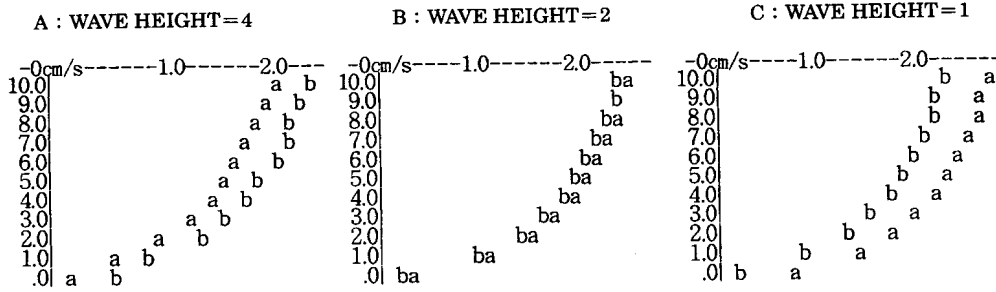
파고의 영향은 <그림 4>에서와 같이 파고가 4m일 경우 유속분포식에 의한 결과가 일치하게 나타난다. 파장 및 주기의 변화에 따른 결과에 비해 파고가 높아질 경우는 <그림 4-a>에서 처럼 바닥과 인접한 부분에서의 분포가 상당히 완만한 변화를 나타내고, 이것은 파고가 저층의 마찰속도에 영향을 미쳐 실제 유속분포와 접근된 양상을 나타내는 것으로 보여진다.

<그림 5>는 바닥 상부의 유속분포를 파장값에 따라 나타낸 것이다. 1m이하의 유속분포에 비해 파장이 35일 경우(그림b) 비교적 일치하는 결과를 나타내고 있다. 이것은 바닥상부의 경우는 파의 영향을 적게 받는 결과 이러한 현상이 발생되며, 파장이 긴 (그림a) 경우에 비해 파장이 짧을수록(그림c) 또한 상부로 갈수록 (4)-(6)식에 의한 유속값과 (8)식에 의한 유속값의 차이가 크게 나타난다.

<그림 6>은 바닥상부의 주기에 따른 유속분포로서 <그림 3>의 경우와 비교하면 주기가 훨씬 길어진 10초일 경우 (4)-(6)식에 의한 유속분포와 (8)식에 의한 유속분포가 일치함을 보여준다. 이 현상을 <그림 5>의 파장의 변화에 따른 결과와 비교하면, 주기의 경우는 <그림 6-a>에서 나타난 바와 같이 주기가 길수록 두 방법에 의한 유속값의 차이가 크게 나타난다.

<그림 7>은 파고값에 따른 유속분포로서 상부에 비해 저층으로 갈수록 파고가 낮아짐에 따

## 장 원 일



<그림 7>

라 (4)-(6), (8)식에 의한 계산결과가 일치하는 경향이 있다. 특히 파고가 2m일 경우 거의 일치하는 양상을 보인다. 또한 파고가 높아질수록 (4)-(6)식에 의한 유속값이 상부로 갈수록 커짐을 알 수 있다.

## 4. 결 론

저층유속분포의 수학적 표현과정은 흐름과 파의 결합문제, 바닥과의 관계등 대단히 복잡하나, 퇴적물 이동비의 추정계산 및 해양구조물의 안정성 문제 해결등에 반드시 필요한 부분이다. 저층부분의 유속분포 계산에 유리하다고 볼 수 있는  $\bar{U} = \int_{Z_0}^Z (\bar{U}^{*2} / \epsilon_c) dZ$  를 지배방정식으로 이용한 식과 전 수심에 걸쳐 비교적 정확한 계산이 가능하다고 볼 수 있는  $\bar{U} = \int_{Z_0}^Z (\bar{P} / k_s Z) dZ$  를 지배방정식으로 사용한 유속분포식에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 흐름속도가 빠를 경우는 무관하나 느릴 경우의 apparent roughness 평가는 이론식  $Z_1 = 2\delta_1(\epsilon\delta_1/Z_0)^{-0.75}$ 에 의한 계산방법이 보다 정확하다고 볼 수 있다.
- (2) 최대흐름유속이 20cm/s 전후일 경우 두방법에 의한 유속분포는 1m이하에서 일치하며 상부로 갈수록 차이가 나타난다
- (3) 상부일 경우는 주기가 짧을수록, 하부일 경우는 주기가 길수록 두식에 의한 계산결과가 비교적 일치한다.
- (4) 파고값에 따른 유속분포는 상부에 비해 저층으로 갈수록, 파고가 낮아짐에 따라 계산결과가 일치하는 경향이 있다. 또한 파고가 높아질 경우는 바닥과 인접한 부분에서의 분포가 상당히 완만한 변화를 나타낸다.

## 참 고 문 헌

- 1) A. D. Heathershaw and D. N. Langhorne, 1988, Observations of Near-bed Velocity Profiles and Seabed Roughness in Tidal Currents Flowing over Sandy Gravels, Coastal and Shelf Science
- 2) Bakker, W. T. and Van Doorn, Th., 1978, Near Bottom Velocities in Waves with a Current, Proc.



- 16th. Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1394 – 1414
- 3) Dyer. K. R., 1970, Current Velocity Profiles in a Tidal Channel, *Geophysys, J.Roy. Astronom. Soc.* 22
  - 4) Grant, W. D. and Madsen, 1979, Combined Wave and Current Interaction with a Rough Bottom, *J. Physics Res.*, 84
  - 5) John F. A. Sleath, 1988, Transition in Oscillation Flow over Rough Beds, *Journal of Water way, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 114, No. 1
  - 6) Lundgren, H., 1972, Turbulent Currents in the Presence of Waves, *Proc. 13th. Int. Conf. on Coastal Eng.* pp. 623 – 634
  - 7) V. A. Ern and M. D. Smooke, 1993, Vorticity – Velocity Formulation for Three – Dimensional Steady Compressible Flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 105, No. 1, March
  - 8) Van Doorn, Th., 1982, Experimental Investigation of the Velocity Field in the Turbulent Bottom Boundary Layer in the Oscillatory Water Channel, *Delta Hydraulics Laboratory*, M1562 – b
  - 9) W. G. M. Van Kesteren and W. T. Bakker, 1984, Near Bottom Velocities in Waves with a Current ; Analytical and Numerical Computation, *Coastal Engineering*, pp. 1161 – 1177
  - 10) Wright, L. D., Boon, J. D., Xu, J. P. and Kim, S. C., 1992, The Bottom Boundary Layer of the Bay Stem Plains Environment of Lower Chesapeake Bay, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 35, No. 1, July
  - 11) You Z. J., 1994, A Simple Model for Current Velocity Profiles in Combined Wave – Current Flows, *Coastal Engineering* 23, pp. 289 – 304

