

Undertow를 고려한 해변단면지형 변화에 관한 연구

손 창 배* · 김 창 제**

A Study of Beach Profile Change in the Consideration of Undertow

C. B. Son · C. J. Kim

Key Words : Undertow, 소류표사(Bed Load Transport), 부유표사(Suspended Load Transport), 쇄파대(Surf Zone), 해변단면(Beach Profile), 폭풍해일(Storm-Surge)

Abstract

A Numerical model is developed in order to predict cross-shore beach profile change. In this model, it is assumed that sediment transport is generated by waves (bed load transport, suspended load transport) and undertow which is defined as offshore directional steady flow in the surf zone.

In addition, wave tank experiments which reproduce storm-surge were performed. By comparing resulting profile of calculation with experiments, the applicability of this method is verified.

1. 서 론

쇄파대는 파가 쇄파함으로 인해 난류장이 형성됨과 동시에 활발한 저질(底質)의 이동으로 지형 변화도 큰 영역이다. 80년대 이후, 측정기술의 발달과 함께 쇄파대내의 수리현상에 대한 연구가 활발해지고 있으며, 특히 흐름 및 표사현상에 큰 영향을 미치는 난류특성 및 쇄파대 특유의 외해방향

의 정상류 성분인 Undertow의 존재가 중요시되고 있다. Undertow는 파동운동에 의한 파곡 이상에서 발생하는 해안방향 질량수송 및 파봉부근에서 형성되는 水平渦에 의한 해안방향 질량수송과 균형을 이루는 補償流로서¹⁾, 여러 연구자들^{2),3),4),5)}에 의해 Undertow의 쇄파대내 분포에 관한 실험이 이루어졌다. 이들 실험에 의하면 Undertow는 쇄파대내 거의 전 영역에서 외해방향을 향하고

* 정회원, 한국해양대학교 강사

** 정회원, 한국해양대학교 해사대학 해사수송과학부 교수

있으며, 그 유속분포는 bore의 발생역에서 최대이며, 상층에 비해 저면 부근에서 큰 것으로 보고되고 있다. 또한 진행파에 의한 해안방향 표사와 Undertow에 의한 외해방향 표사가 균형을 이루어 연안사주의 형성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁶⁾

본 연구에서는 쇄파대내 지형변화의 중요한 외력이 되는 Undertow에 의한 표사 및 파동성분에 의한 표사(소류표사, 부유표사)를 고려한 2차원 해빈단면변화 모델을 구축하여 수치계산을 실시하였으며, 폭풍해일의 내습과정 재현실험 결과와 비교하였다. 폭풍해일의 재현실험은 수위를 변동시키면서, 고파랑을 작용시키는 방법으로 이루어졌으며, 이 과정에서 발생하는 연안사주의 형성 및 수위변동에 따른 이동 등, 평균 수위변동에 따른 해빈단면지형 변화를 수치 모델을 통해 재현함으로써 그 적용성을 검토하였다.

해빈단면지형의 계산과정은 1) 평균수위상승을 고려한 에너지 보존칙으로부터 파랑장을 계산하고, 2) 이를 바탕으로 파동성분에 의한 표사량 및 Undertow에 의한 표사량을 각각 계산하여 3) 이들을 더함으로써 실제 표사량을 계산하였으며, 4) 표사의 연속식으로부터 해빈단면지형을 계산하였다.

또한 해안선 부근의 지형변화는 swash zone에 가상수심역 및 가상파고역을 설정하여 계산하였다.

2. 파랑장의 계산

해저의 단면 기울기가 일정하고 구조물이 존재하지 않는 조건에서 해안으로부터의 반사파가 입사파에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다면 파랑조건은 단일 진행파로 생각할 수 있으며, 파고의 장소적 변화는 식 (1)의 미소진폭의 단일 진행파의 에너지 보존칙으로부터 구할 수 있다.⁷⁾

$$\frac{\partial EC_g}{\partial x} + \Gamma = 0 \tag{1}$$

여기서, $E = \rho g H^2 / 8$: 파의 에너지 밀도

C_g : 파의 군속도

x : 외해로부터 해안방향으로의 수평거리

Γ : 에너지 감쇄률,⁸⁾ 쇄파대외 ($\Gamma = 0$)

H : 파고 ρ : 해수의 밀도

$$\Gamma = [\sqrt{2} (2n - 1) C_r + C_t] \sqrt{\frac{2n - 1}{\rho} \left(\frac{E}{d}\right)^3} \tag{2}$$

여기서, n : 파의 군속도와 위상속도의 비

C_r : 저면마찰계수 (=0.01)

d : 평균수위 상승을 고려한 실수심 ($h + \eta$)

h : 정수심 η : 평균수위 상승량

C_t 는 쇄파대내의 난류의 효과를 대표하는 계수로 파의 재생역의 존재를 고려하여 식 (3)으로 주어지며, 쇄파대외 및 근호속이 음일 때는 $C_t = 0$ 으로 둔다.

$$C_t = 1.8 \sqrt{nE / \rho g d^2 - 0.09} \tag{3}$$

식 (2) 및 (3)의 실수심 d 는 radiation stress S_{xx} 를 이용한 에너지 보존칙 (4)로부터 계산된다.

$$\frac{dS_{xx}}{dx} + \rho g (h + \eta) \frac{d\eta}{dx} = 0 \tag{4}$$

$$S_{xx} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(2n - \frac{1}{2}\right) \tag{5}$$

한편, 수심에 따른 파고의 변화는 천수변형에 의한 파고의 산정식 (6)을 이용했으며, 계산한 파고가 식 (7)의 쇄파조건식의 계산결과보다 큰 경우, 쇄파가 일어나는 것으로 가정하여 식 (2)에 따라 에너지 감쇄가 발생하는 것으로 간주하였다.

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0}{2nC}} \tag{6}$$

여기서, H : 실수심 d 에서의 파고

H_0 : 심해파 파고

C : 실수심 d 에서의 파속

C_0 : 심해파 파속

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \times \left(1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right] \right) \quad (7)$$

여기서 H_b : 쇄파점에서의 파고
 h_b : 쇄파점 수심
 L_0 : 심해파 파장
 $\tan \theta$: 해저면 기울기

한편, 해안선 부근의 지형변화를 보다 정확히 재현하기 위하여 清水(1996)⁹⁾를 참고로 하여 Fig. 1에 표시한 것처럼 가상 수심역 및 가상 파고역을 설정하여 계산하였다. 파의 처오름 높이(run-up height)는 Hunt의 식 (8)을 이용하였으며, 정선에서의 평균수위 상승 높이 및 파고와 직선으로 연결하여 수심 및 파고 가정하였다.

$$\frac{R}{H} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (8)$$

여기서, R : 정수면으로부터의 파의 처오름 높이
 $\tan \alpha$: 사면의 기울기

3. 표사량의 산정

파동 성분에 의한 표사량의 계산은 천해역에서의 파의 비대칭성에 주목한 野田·松原¹⁰⁾의 식을 수정하여 이용하였으며, 저면 수립자 속도의 계산은 식 (9)로 주어지는 Stokes의 3차 근사해를 이용하였다.

$$u = u_{01} \cosh k(h+z) \cos(kx-\omega t) + u_{02} \cosh 2k(h+z) \cos 2(kx-\omega t) + u_{03} \cosh 3k(h+z) \cos 3(kx-\omega t) \quad (9)$$

여기서, z : 정수면으로부터 연직상방향 거리
 k : 파수 ($2\pi/L$) ω : 각주파수 ($2\pi/T$)
 t : 시간

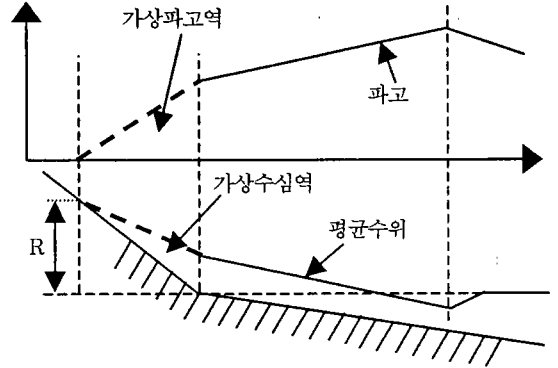


Fig. 1 Imaginary wave height and mean water level in swash zone

$$u_{01} = C \frac{ka}{\sinh kh}$$

$$u_{02} = \frac{3}{4} u_{01} \frac{ka}{\sinh^3 kh}$$

$$u_{03} = \frac{3}{64} u_{01} \frac{(ka)^2 (13 - 4 \cosh^2 kh)}{\sinh^6 kh}$$

여기서,

$$\frac{H}{2a} = 1 + \left(\frac{\pi a}{L} \right)^2 \frac{3}{16} \frac{8 \cosh^6 kh + 1}{\sinh^6 kh}$$

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh kh \times \left(1 + \left(\frac{2\pi a}{L} \right)^2 \frac{\cosh 4kh + 8}{8 \sinh^4 kh} \right) \quad (10)$$

저면 수립자 속도 u_b 는 $z=-h$ 를 대입하고 $kx-\omega t = \theta$ 로 두면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\pm u_b = u_{01} \cos \theta + u_{02} \cos 2\theta + u_{03} \cos 3\theta \quad (11)$$

한편 저질의 이동한계유속 u_c 의 계산은 파랑 및 저질의 특성으로 주어지는 Komar and Miller¹¹⁾의 식 (12)를 이용하였다.

$$\frac{u_c^2}{sgD} = 0.21 \left(\frac{u_c T}{\pi D} \right)^{1/2} \quad (12)$$

여기서, s : 저질의 수중비중
 ($\rho_s / \rho - 1$, ρ_s : 저질의 밀도)
 D : 저질의 입경
 T : 파의 주기

3.1 소류표사량

파에 의한 저질의 단위폭, 단위시간당 무차원 소류표사량 Δq_B 는 수립자 속도의 제곱에 비례한다는 간단한 형태로 천해역에서의 파의 비대칭성에 주목한 野田·松原¹⁰⁾의 식을 수정하여 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta q_B}{w_0 D} = K \frac{(u_b - u_c) |u_b - u_c|}{sgD} \quad (13)$$

$(u_b < u_c : \Delta q_B = 0)$

여기서, w_0 : 저질의 침강속도
 K : 소류표사량 계수

소류표사는 식 (13)에 의한 저면 수립자 속도 u_b 가 저질의 이동한계유속 u_c 를 상회할 경우, 발생하는 것으로 정의된다.

Fig. 2는 식 (11)에 의해 정의된 저면 수립자 속도의 1주기분을 나타낸 것이다. 위의 가정에 의하면 $u_b > u_c$ 인 위상, 즉 Fig. 1의 빗금부분 ab 및 fg 에서는 해안방향의 표사가 발생하고, 빗금부분 cde 에서는 외해방향의 표사가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 해안 및 외해 방향으로 표사가 발생하는 위상에 대해 식 (13)을 적분하면 파의 한 주기 동안에 실제 발생하는 평균 소류표사량 q_B 를 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$\frac{q_B}{w_0 D} = K F_B \left(\frac{u_{01}}{\sqrt{sgD}} \right)^2 \quad (14)$$

여기서,

$$F_B = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{\theta_1} \left(\frac{u_b}{u_{01}} - v_c \right)^2 d\theta - \int_{\theta_2}^{\pi} \left(\frac{u_b}{u_{01}} - v_c \right)^2 d\theta \right\} \quad (15)$$

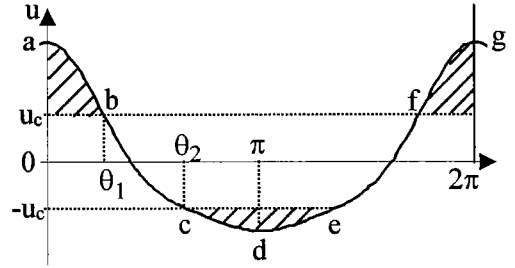


Fig. 2 Water particle velocity on the bottom under Stokes's 3rd order approximation

여기서, $v_c = u_c / u_{01}$

Stokes의 3차 근사해를 이용하는 경우, 일반적으로 $F_B > 0$ 이므로 소류표사량은 해안방향임을 알 수 있다.

3.2 부유표사량

부유표사량 q_S 는 砂村¹²⁾의 실험결과를 수정하여 소류표사량과 같은 형식으로 저면 수립자 속도가 이동한계유속을 상회할 때 발생한다고 가정한 野田·松原⁹⁾의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{q_S}{w_0 D} = \beta F_S \left(\frac{u_{01}}{\sqrt{sgD}} \right)^3 \quad (16)$$

여기서, β : 부유표사량 계수

$$F_S = v^2 + (2 - v_c)v + 1 - v_c$$

$$v = \frac{u_{02} + u_{03}}{u_{01}}$$

3.3 Undertow 에 의한 표사량

Undertow는 파꼭 아래 영역에서 발생하는 외해 방향의 평균정상유속으로써 파봉 전면에서 형성되는 대규모渦의 효과를 포함한 쇄파에 의한 해안방

향 질량 유속과 균형을 이루고 있다. Undertow의 쇄파대내 분포^{3),5)}는 bore의 발생영역(Svensen et al.¹³⁾의 구분에 의하면 inner region)에서 최대가 되며, 특히 표사이동에 많은 영향을 미치는 저면 부근에서 최대가 된다.

본 연구에서는 Undertow에 의한 표사량으로 파 및 흐름에 의한 합성저면마찰응력이 한계치를 넘게되면, 그 초과분에 비례하는 양의 저질이 이동상태가 되어 평균류에 의해 수송된다는 Power 모델¹⁴⁾의 개념을 이용한 식 (17)을 이용하였다.

$$q_c = Q_c U_b \quad (17)$$

여기서, U_b 는 Undertow의 저면 유속이며, bore의 단면적이 파고의 제곱에 비례한다고 가정하여 제안된 bore 발생영역에 대한 佐藤·光信(1990)¹⁵⁾의 Undertow의 저면 유속 산정식 (18)을 쇄파대 전 영역으로 확장한 黒岩·野田(1996)¹⁶⁾의 식 (19)를 이용하였다.

$$U_b = -A_b \frac{H^2}{Td} \quad (18)$$

여기서, A_b : 비례상수

$$U_b = -3.5 \frac{H^2}{Td} \left(1 - \frac{H^2}{H_b^2} \right) \quad (19)$$

한편, 이동상태가 되는 저질의 양은 식 (20)의 Q_c 에 의하여 결정된다.

$$Q_c = A_c (u_*^2 - u_{*c}^2) / g \quad (20)$$

여기서, A_c : 비례상수

u_* : 파 및 흐름의 공존장에서의 저면마찰속도

u_{*c} : 저면의 이동한계 마찰속도

$u_* \leq u_{*c}$ 이면 $Q_c = 0$ 으로 둔다.

$$u_*^2 = \frac{1}{2} f_{cw} \widehat{u}_w^2 \quad (21)$$

여기서, \widehat{u}_w 는 경계층 외연의 유속으로 저면조건($z=-h$)을 고려하면 식 (22)로 주어지며, f_{cw} 는 파 및 흐름의 공존장에서의 저면마찰계수로 田中(1990)¹⁷⁾의 제안식 (23)을 이용하였다.

$$\widehat{u}_w = \frac{\pi H}{T \sinh kh} \quad (22)$$

$$f_{cw} = f_c + 2 \sqrt{f_c \beta_f f_w} \cos \phi + \beta_f f_w \quad (23)$$

여기서, f_c 및 f_w 는 각각, 흐름이 지배적인 경우와 파동 성분이 지배적인 경우의 마찰계수로 식 (24) 및 (25)에 나타내었다.

$$f_c = \frac{2 \kappa^2}{[\ln(h/z_0) - 1]^2} \left(\frac{\overline{u_c}}{\widehat{u}_w} \right)^2 \quad (24)$$

$$f_w = \exp \left(-7.53 + 8.07 \left(\frac{\widehat{u}_w}{\alpha_f z_0} \right)^{-0.1} \right) \quad (25)$$

$$\beta_f = \frac{1}{0.769 \alpha_f^{0.83} + 1} \times \left\{ 1 + 0.863 \alpha_f e^{-1.43 \alpha_f} \left(\frac{2\phi}{\pi} \right)^2 \right\} \quad (26)$$

여기서, κ : Karman 계수 (=0.4)

$z_0 = k_s/30$ (k_s : 상당조도)

$\overline{u_c}$: 정상류 성분의 단면평균유속

ϕ : 파 및 흐름의 진행방향 사이의 각도

$$\alpha_f = \frac{1}{\ln(h/z_0) - 1} \frac{\overline{u_c}}{\widehat{u}_w}$$

한편, 식 (20)의 저면 이동한계 마찰속도 u_{*c} 는 다음과 같다.

$$u_{*c} = \sqrt{sgD\phi_c} \quad (27)$$

여기서,

$$\phi_c = 0.11 \quad (D/\sqrt{\nu T/\pi} < 1/6.5 : \text{細砂})$$

$$\phi_c = 0.06 \quad (D/\sqrt{\nu T/\pi} > 1/4.5 : \text{粗砂})$$

ν : 동점성계수

3.4 해빈단면지형 변화의 계산

전 표사량 q_T 는 식 (14) 및 (16)에 표시된 파동 성분에 의한 표사량과 식 (17)에 표시된 Undertow 에 의한 표사량의 합으로 식 (28)로 가정하였으며, 지형변화는 표사의 연속식 (29)를 이용하여 계산하였다.

$$q_T = q_B + q_S + q_C \quad (28)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda'} \frac{\partial q_T}{\partial x} \quad (29)$$

여기서, λ' : 저질의 공극률

4. 수리실험

실험은 단면 2차원 파동수조(24×0.6×1.1 m)에 기울기 1/10의 사면을 설치하고 그 위에 중앙입경 0.17 mm의 모래를 10 cm 두께로 깔아 규칙파를 이용하여 실시하였다. 저면의 단면지형은 광학식 砂面計를 사용하여 수조의 폭방향 중앙지점 및 좌우 5 cm 지점의 3축선을 2 cm 간격으로 측정하여

Table 1 Experimental conditions

case	H cm	T sec	SL cm	storm-surge duration, dr
1	8.78	1.0	10	40 min
2	6.54	1.0	5	3 hr

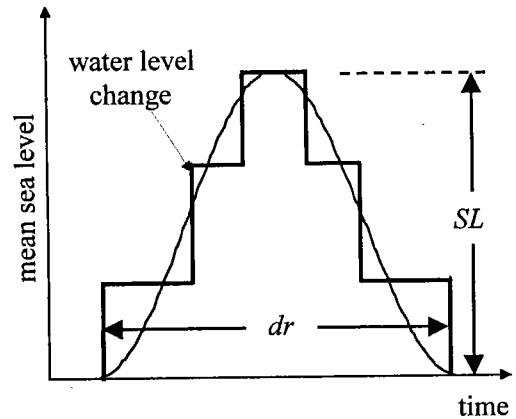


Fig. 3 Modeling of water level change during storm-surge

그 평균치로 표시하였다.

일반적으로 폭풍해일은 저기압과 강풍을 동반하며 이로 인한 연속적인 평균 수위의 변동을 일으키지만, 실험의 제약상, Fig. 3과 같은 간단한 수위변동 함수를 가정하여 Table 1에 표시된 최대수위 상승량(SL)을 Fig. 3과 같이 3단계로 나누어 각 수위에 대해 고파랑을 작용시키는 방법으로 폭풍해일을 재현하였다.

5. 실험결과 및 계산결과의 비교

Fig. 4는 수위를 3단계에 걸쳐 10 cm 상승 및 하강시킨(수심으로 표시하면 h=40 cm 에서 h=50 cm 까지) case 1 의 실험 및 계산에 의한 단면지형을 나타낸 것이다. 각 그림의 좌측 하단에 표시된 단계별 수위변화를 나타낸 그림중의 기호 ○는 각 단면에서의 파랑작용 수위를 나타낸 것이며, Δt 는 해당 수위에서 파의 작용시간을 나타낸다.

Fig. 4의 최종단면으로부터 연안사주 근방의 표사량이 실험결과보다 작게 계산되는 등, 표사량이 파소평가되는 문제는 있으나 수위의 상승 및 하강에 따른 수심변화로 인한 연안사주의 위치 이동은 비교적 잘 재현되었다.

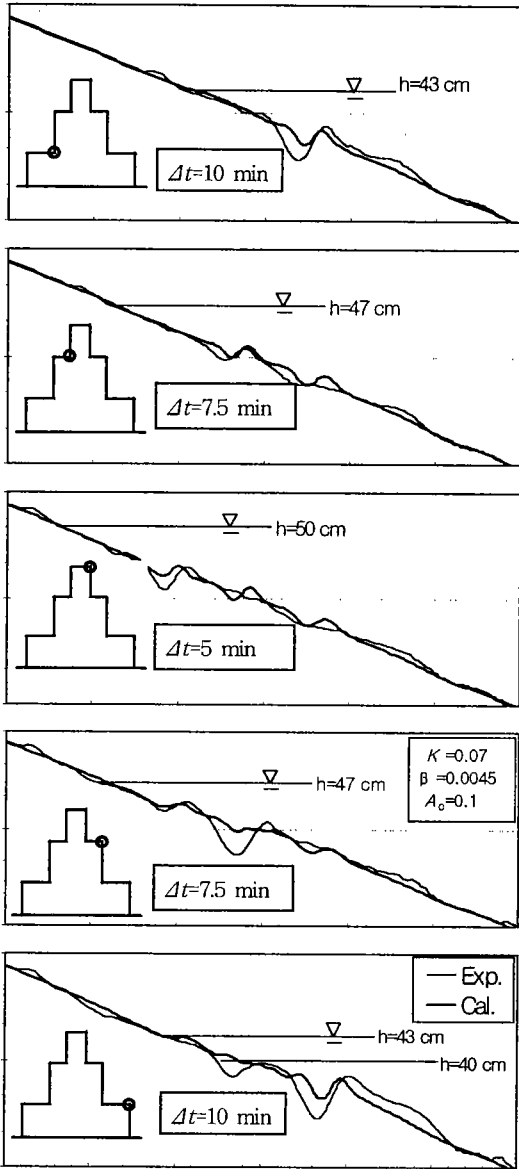


Fig. 4 Comparison of profile between experiment and calculation (case 1)

Fig. 5는 수위를 5 cm 변화시킨 case 2의 결과로 파랑작용 시간이 비교적 길게 설정되어 정선 부근에서 침식된 저질이 깊은 곳으로 퇴적된 경우로 실험결과를 비교적 잘 재현하고 있다.

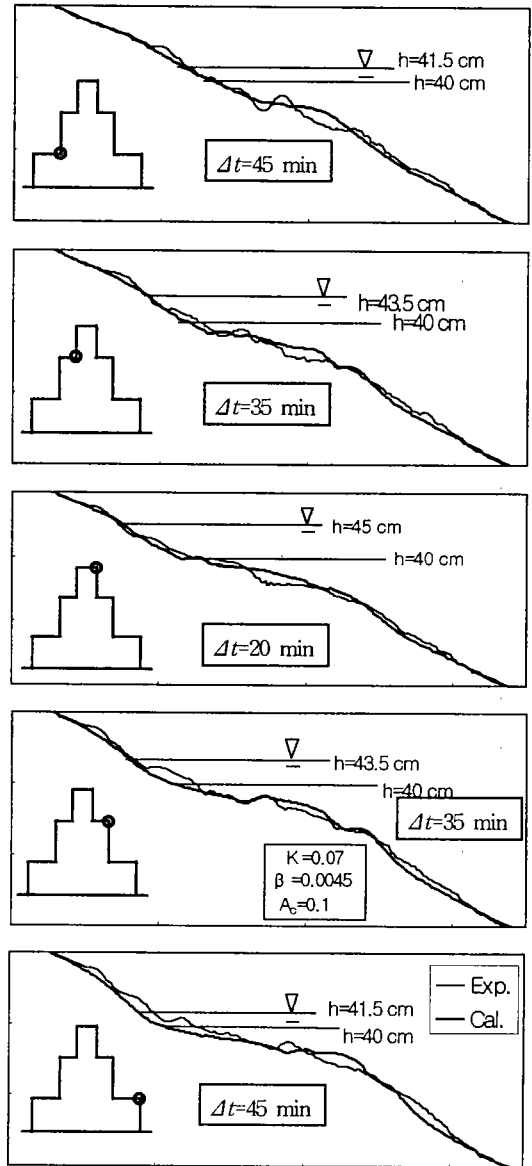


Fig. 5 Comparison of profile between experiment and calculation (case 2)

Fig. 6은 파의 초오름을 고려한 경우 및 고려하지 않은 경우의 계산 결과를 비교한 것으로, 가상수심역 및 가상 파고역의 설정을 통해 swash zone의 지형변화를 더 잘 재현할 수 있음을 알 수 있다.

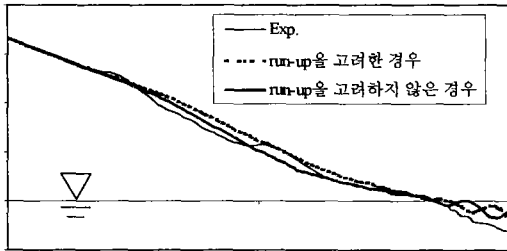


Fig. 6 Profile change of swash zone

6. 결론

본 연구에서는 쇄파대내 지형변화의 중요한 외력이 되는 Undertow에 의한 표사 및 파동성분에 의한 표사(소류사, 부유사)를 고려한 2차원 해빈단면지형 변화 모델을 통해 수위변동을 동반하는 폭풍해일의 내습과정을 재현하였으며, 그 결과를 실험 결과와 비교하였다. 본 연구의 2차원 해빈단면지형 변화 모델은 실제의 표사량을 과소 평가하는 문제점은 남아 있으나, 해수면 변동을 동반한 고파랑 작용시의 연안사주의 거동을 재현하는 등, 침식형 지형변화의 예측에 적용할 수 있을 것으로 생각되며, 향후 Undertow의 연직분포 및 쇄파대내의 난류장이 표사이동에 미치는 영향에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) 日本土木學會, 漂砂環境の創造に向けて, 1998, pp. 31-44.
- 2) 渡辺 晃·磯部雅彦·野澤是幸, 斜面上で碎破する波の底面流速に関する研究, 第27回海岸工学講演會論文集, 1980, pp. 40-45.
- 3) 泉宮尊司, 碎波帯における定常流に関する實驗的研究, 第28回海岸工学講演會論文集, 1981, pp. 34-38.
- 4) 灘岡和夫·近藤降道·田中則男, LDAを用いた碎波帯内の流速場に関する實驗的研究, 第28回海岸工学講演會論文集, 1981, pp. 24-28.
- 5) Okayasu, A., T. Shibayama and N. Mimura, Velocity field under plunging waves, Proc. 20th Conf. Coastal Eng., 1986, pp. 660-674.
- 6) Dibajnia, M.·清水琢三·渡辺 晃, シートフロー状態が卓越する海岸における縦断面地形の數値計算, 第39回海岸工学講演會論文集, 1992, pp. 301-305.
- 7) 西村仁嗣·砂村繼夫, 二次元海浜變形の數値シミュレーション, 第32回海岸工学講演會論文集, 1985, pp. 340-343.
- 8) 泉宮尊司·堀川清司, 破帯における波のエネルギー方程式のモデリング, 第30回海岸工学講演會論文集, 1983, pp. 15-19.
- 9) 清水琢三, 海浜變形シミュレーション, 水工学シリーズ96-B-5, 土木學會, 1996, pp. 14.
- 10) 野田英明·松原雄平, 岸沖漂砂量に関する研究, 第27回海岸工学講演會論文集, 1980, pp. 197-200.
- 11) Komar, P. D. and Miller, M. C., The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane bed at high shear stresses under waves, J. Sedimentary Petrology, Vol. 45, No. 3, 1975, pp. 697-703.
- 12) 砂村繼夫·阪東浩造·堀川清司, 非對稱砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する實驗的研究, 第25回海岸工学講演會論文集, 1978, pp. 246-249.
- 13) Svensen, I. A., P. A. Madsen and J. Buhr Hansen, Wave characteristics in the surf zone, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., 1978, pp. 520-539.
- 14) 堀川清司編, 海岸環境工学, 1985, pp. 274-276.
- 15) 佐藤慎司·光信紀彦, 不規則波による海浜断面地變化の數値計算, 第37回海岸工学講演會論文集, 1990, pp. 309-313.
- 16) 黒岩正光·野田英明, 戻り流れを考慮した断面地形變化計算, 土木學會第51回年次學術講演會概要集, Vol. 2, 1996, pp. 142-143.
- 17) 田中 仁, 波・流れ共存場における底面摩擦係數の陽形式近似式, 土木學會論文集, 1990, pp. 285-288.