

단일파의 최대 처오름높이

Maximum Run-Up Heights of Single Waves

조 용 식* / 이 봉 희**

Cho, Yong-Sik / Lee, Bong-Hee

Abstract

The maximum run-up heights of single waves are investigated in this study. A boundary integral equation model is used to calculate the maximum run-up heights of both solitary and N-waves. The effect of the bottom friction is considered in the model through a boundary layer theory. The calculated run-up heights are compared with available laboratory measurements, and other numerical and approximate analytical solutions. They are in good agreement.

요 지

본 논문에서는 단일파의 최대 처오름높이에 관하여 연구하였다. 경계요소법을 이용한 수치모형으로 고립파와 N-파의 처오름높이를 계산하였으며, 수치모형에서는 바닥마찰저항 효과를 고려하였다. 계산된 최대 처오름높이는 기존의 수리모형실험 관측자료, 다른 수치모형 및 근사 해석에 의한 결과와 비교하였으며, 경계요소법에 의해 계산된 처오름높이는 다른 결과들과 매우 잘 일치한다.

Keywords: run-up height, solitary wave, N-wave, boundary integral equation method

-
- * 세종대학교 토목공학과 조교수 및 수운산업연구소 연구위원
 - ** 건설교통부 경인운하과 서기관

1. 서 론

외해로부터 근해로 진입한 파랑은 해안선을 따라 끊임없이 초오름내림을 반복하면서 일부는 쇠퇴되고 일부는 외해로 반사된다. 일반적으로 해안선에서 파랑이 초오를 때 기존의 해수면으로부터 최대로 올라가는 연직높이를 최대 초오름높이로 정의하며, 파랑이 해안선을 따라 내려갈 때 가장 많이 내려간 연직높이를 최저 처내림높이로 정의한다. Fig. 1은 해안경사와 조파기 및 수조를 간략히 도시한 것으로, θ 와 R 은 각각 해안경사 각과 최대 초오름높이를 나타낸다.

최대 초오름높이와 최저 처내림높이는 항만시설 뿐만 아니라 연안에 건설되는 화력발전소와 원자력발전소 등과 같은 해안구조물의 높이와 취수구의 최저높이를 설계하는데 반드시 고려해야 한다. 아울러, 경인운하와 같

은 내륙운하에서도 선박의 운행에 따라 발생하는 파랑에 의한 제방에서의 최대 초오름높이를 계산하여 제방의 높이를 결정해야 한다. 따라서, 최대 초오름높이와 최저 처내림높이의 정확한 산정은 해안구조물과 내륙운하 제방 설계시 매우 중요하다.

단일파에 의한 최대 초오름높이는 주로 고립파(solitary wave)와 N-파(N-shaped wave)를 이용하여 연구되어 왔다. 고립파는 특히 지진해일의 초오름높이를 가장 잘 재현하는 것으로 알려져 있을 뿐만 아니라 파고만 주어지면 파형이 결정되기 때문에 주기파와 비교하여 수리실험 또는 수치모형에서 발생 시키기가 상대적으로 쉽기 때문에 많은 연구에서 입사파로 사용되어 왔다. Fig. 2는 고립파, N-파, 크노이드파(cnoidal wave) 및 정현파(sinusoidal wave)의 파형을 도시한 것으로 크노이드파와 정현파

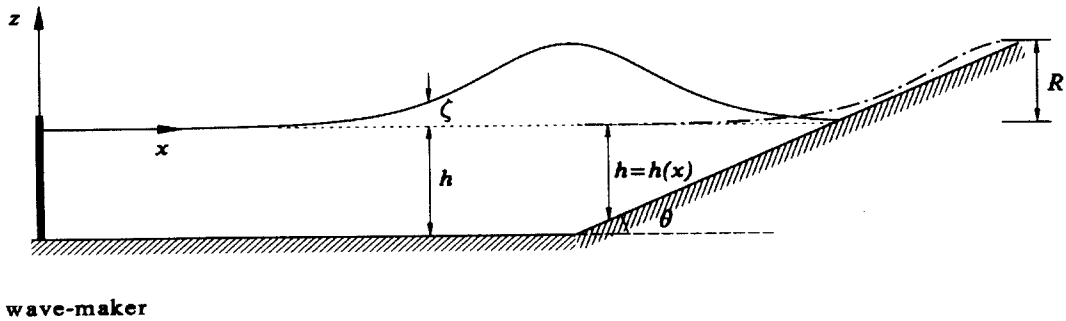


Fig. 1. The Definition Sketch of the Wave Tank. The Wave-Maker and the Maximum Run-Up

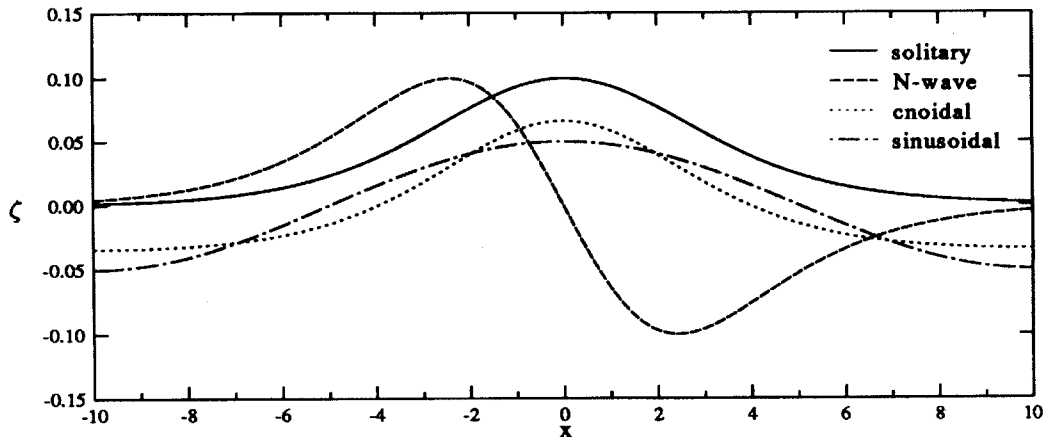


Fig. 2. The Surface Profiles of Single and Periodic Waves ($H=0.1$, $L=20$)

의 파장은 $20h$ 이 사용되었으며, 모든 파의 파고는 $0.1h$ 이다. 정수면으로부터 파봉까지의 높이는 고립파와 N-파가 가장 높으며, 정현파가 가장 낮다. 또한, 고립파를 제외한 모든 파의 정수면 위의 면적과 정수면 아래의 면적이 같다. 참고로, N-파의 파고는 정수면으로부터의 파봉까지의 높이로 정의한다.

본 논문에서는 먼저 기존의 수리모형실험, 해석적 방법 및 수치모형에 의한 단일파의 처오름높이 산정에 관한 연구를 조사한 후, 기존의 연구를 바탕으로 고립파 및 N-파의 최대 처오름높이에 관하여 연구한다. 본 연구에서는 또한 Kim 등(1983)과 Liu와 Cho (1994)가 사용하였던 경계요소법(boundary ntegral equation method, BIEM)을 확장하여 급경사를 포함하는 지형에서 고립파와 N-파(Tadepalli와 Synolakis, 1994)의 최대 처오름높이를 계산한다. 경계요소법 수치모형에서는 바닥마찰저항은 고려하나 쇄파(breaking)는 고려하지 않는다. 참고로, Synolakis(1991)에 따르면 해안가에 도달하는 지진해일의 75%는 쇄파하지 않는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 제 2장에서 고립파의 최대 처오름높이에 대하여 기존의 연구를 조사하고, 경계요소법을 이용하여 여러 해안경사에 대한 고립파의 최대 처오름높이와 최저 처내림높이를 계산한다. 계산된 처오름높이는 기존의 수리모형실험, 수치모형 및 근사 해석에 의한 처오름높이와 비교한다. 제 3장에서는 경계요소법을 이용하여 N-파의 처오름높이를 계산하여 기존의 근사 해석에 의한 처오름높이 및 고립파의 처오름높이와 비교한다. 마지막으로 제 4장에서는 결론을 기술한다.

2. 고립파의 처오름높이

본 연구에서는 먼저 다음과 같은 무차원변수를 사용하여 단일파의 최대 처오름높이에 대하여 조사한다.

$$t = t' \sqrt{g/h'} \quad (1a)$$

$$(x, z) = (x', z') \frac{1}{h'} \quad (1b)$$

$$(\zeta, H, R) = (\zeta', H', R') \frac{1}{h'} \quad (1c)$$

식 (1)에서 ζ 는 자유수면변위, H 는 파고, R 은 최대 처오름높이, h 는 수심을 나타낸다. 고립파의 파형은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta(x, t) = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4}} (x - ct) \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 ζ 는 고립파의 파형, H 는 파고를 나타내며, $c = (h + \zeta)^{1/2}$ 는 고립파의 파속이다. 따라서, 고립파는 파고만 주어지면 파형을 결정할 수 있어 수리실험 또는 수치모형에서 상대적으로 발생시키기가 쉬울 뿐만 아니라 해석 또한 쉽다.

Hall과 Watts(1953)는 고립파를 이용하여 콘크리트 급경사에서 처오름높이에 관한 수리모형실험을 수행하였다. 이들의 수리모형실험에 사용된 해안경사는 10° , 15° , 25° 및 45° 였으며, 입사파의 일부는 쇄파가 된 것도 포함하고 있다. 이들의 수리모형실험 관측치는 여러 경우의 급경사에서 수행되었을 뿐만 아니라 상대적인 정확도 또한 매우 높은 것으로 평가되어 많은 수치모형 및 해석적 방법의 검증자료로 이용되고 있다. 이들은 또한 수리실험 관측자료를 회귀분석하여 고립파의 최대 처오름높이에 관한 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$R = 3.43 H^{1.042}, \quad \theta = 10^\circ \quad (3a)$$

$$R = 3.75 H^{1.120}, \quad \theta = 15^\circ \quad (3b)$$

$$R = 3.35 H^{1.123}, \quad \theta = 25^\circ \quad (3c)$$

$$R = 3.10 H^{1.150}, \quad \theta = 45^\circ \quad (3d)$$

Pedersen과 Gjevik(1983)은 경사각이 20° 인 해안에 고립파가 처오름 경우 최대 처오름높이를 결정하기 위한 수리실험을 수행하였다. 실험결과는 Boussinesq 방정식을 유한차분법으로 해석한 최대 처오름높이와 비교하여 잘 일치하는 것으로 보고되었다. 수치기법에서는 바닥마찰저항은 고려되지 않았으며, 수리실험 및 수치모형 결과를 이용하여 다음과 같은 고립파의 최대 처오름공식을 제안하였다.

$$R = 3.88 H^{1.140}, \quad \theta = 20^\circ \quad (4)$$

Kim 등(1983)은 경계요소법을 이용하여 급경사에서의 고립파의 처오름높이를 계산하여 Hall과 Watts (1953)의 수리실험결과와 비교하였다. 그러나, Kim 등(1983)의 수치모형에서는 시간 및 공간에서 다소 커다란 격자를 사용하여 일부 결과는 Hall과 Watts (1953)의 수리실험 관측치와 상당한 차이를 보이고 있으며, 바닥마찰저항은 고려하지 않았다. Synolakis (1987)는 Carrier와 Greenspan(1957)이 제안했던 hodograph 좌표변환을 이용하여 비선형 천수방정식의 해석해를 구하고 이를 경사 2.86° 를 갖는 해안가에 처오르는 고립파에 적용하여, 완만한 경사에서의 최대 처오름높이를 산정하는 공식(run-up formula)을 유도하였다. 경사각이 작을 경우 처오름공식에 의한 최대 처오

름높이는 수리모형실험의 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 보고되고 있으나, 상대적으로 급경사인 지형에서는 부정확한 결과를 제공한다. Synolakis (1987)가 제안한 고립파의 최대 처오름공식은 다음과 같다.

$$R = 2.831(\cot \theta)^{0.5} H^{1.25} \quad (5)$$

식 (5)는 일반적으로 $H^{0.5} > 0.288 \tan \theta$ 인 경우에 바람직한 결과를 제공하는 것으로 알려져 있다.

Zelt(1991)는 Boussinesq 방정식에 바닥마찰항과 쇄파항을 첨가한 후 유한요소법을 이용하여 20°의 경사를 갖는 해안에서 고립파의 최대 처오름높이를 계산하였다. Zelt는 또한 수리모형실험을 수행하여 관측한 최대 처오름높이를 수치해석에 의한 결과와 비교하여 수치모형의 정확도를 검증하였다. Zelt는 해안경사각이 대략 20°보다 작으면 바닥마찰저항을 고려해야 한다고 제안하였다.

최근에 Liu와 Cho(1994)는 Kim 등(1983)의 2차원 경계요소법을 이용한 수치모형을 확장하여 급경사 지형에서 고립파의 최대 처오름높이를 연구하였다. Liu와 Cho(1994)는 경계층 이론을 이용하여 바닥마찰저항을 고려하였으며, Zelt(1991)와 마찬가지로 경사각이 20°보다 작으면 바닥마찰저항을 고려해야 한다고 보고하였다. Liu와 Cho(1991)는 여러 경사지형에서 고립파의 처오름높이를 계산하였으며, 콘크리트 구조의 바닥마찰저항을 고려한 후 다음과 같은 고립파의 최대 처오름공식을 제안하였다.

Table 1. The Run-Up Heights of Solitary Waves ($\theta = 10^\circ$)

H	BIEM	HW - E	HW - F	Synolakis
0.050	0.1435	0.1460	0.1512	0.1594
0.056	0.1621	0.1540	0.1702	0.1837
0.064	0.1867	0.1880	0.1956	0.2170
0.068	0.1990	0.2030	0.2083	0.2341
0.072	0.2114	0.2290	0.2211	0.2514
0.074	0.2176	0.2350	0.2275	0.2602
0.076	0.2239	0.2220	0.2339	0.2690
0.082	0.2422	0.2610	0.2532	0.2958
0.086	0.2550	0.2540	0.2661	0.3140
0.088	0.2611	0.3040	0.2725	0.3231
0.091	0.2708	0.2540	0.2822	0.3370
0.095	0.2835	0.3040	0.2952	0.3556
0.098	0.2928	0.2940	0.3049	0.3697
0.104	0.3121	0.2960	0.3244	0.3982
0.107	0.3214	0.3230	0.3341	0.4126
0.109	0.3282	0.3350	0.3406	0.4222
0.114	0.3438	0.3820	0.3569	0.4466

$$R = 3.561 H^{1.109}, \quad \theta = 15^\circ \quad (6a)$$

$$R = 3.530 H^{1.133}, \quad \theta = 20^\circ \quad (6b)$$

$$R = 2.906 H^{1.129}, \quad \theta = 45^\circ \quad (6c)$$

Table 1과 2는 경사각이 10°와 45°일 때 고립파의 최대 처오름높이를 비교한 것으로 BIEM은 바닥마찰저항을 고려한 경계요소법에 의한 수치해석 결과이며, HW-E와 HW-F은 Hall과 Watts(1953)의 수리모형실험 관측자료와 처오름공식 (3)에 의한 계산된 결과를 나타낸다. 또한, Synolakis는 처오름공식 (5)에 의해 계산한 처오름높이를 의미한다. Table 1과 2에서 경계요소법에 의한 결과는 수리실험 관측자료와 전체적으로 잘 일치하고 있으나, Synolakis의 처오름공식에 의한 결과는 다소 크게 계산되고 있음을 알 수 있다. 즉, 앞에서 언급한 것과 같이 경사각이 20°보다 작으면 바닥마찰저항을 고려해야 하나 Synolakis의 처오름공식은 이를 포함하고 있지 않기 때문이다.

Table 2. The Run-Up Heights of Solitary Waves ($\theta = 45^\circ$)

H	BIEM	HW - E	HW - L	Synolakis
0.054	0.1160	0.098	0.1080	0.0737
0.061	0.1325	0.115	0.1243	0.0858
0.064	0.1394	0.132	0.1314	0.0911
0.065	0.1419	0.130	0.1337	0.0929
0.067	0.1463	0.159	0.1385	0.0965
0.076	0.1681	0.141	0.1601	0.1130
0.082	0.1828	0.170	0.1747	0.1242
0.086	0.1924	0.177	0.1845	0.1318
0.092	0.2073	0.172	0.1994	0.1434
0.096	0.2167	0.236	0.2094	0.1513
0.101	0.2298	0.212	0.2220	0.1612
0.106	0.2425	0.241	0.2347	0.1712
0.107	0.2451	0.204	0.2372	0.1732
0.117	0.2700	0.265	0.2679	0.1937
0.121	0.2806	0.256	0.2733	0.2020
0.132	0.3094	0.273	0.3020	0.2252
0.134	0.3144	0.318	0.3073	0.2295
0.136	0.3188	0.330	0.3126	0.2338
0.138	0.3238	0.283	0.3179	0.2381
0.147	0.3475	0.282	0.3418	0.2577
0.154	0.3677	0.340	0.3606	0.2731
0.156	0.3728	0.322	0.3660	0.2776
0.172	0.4146	0.374	0.4095	0.3136
0.188	0.4574	0.424	0.4536	0.3505
0.210	0.5220	0.495	0.5151	0.4025
0.212	0.5281	0.467	0.5208	0.4072
0.242	0.6102	0.601	0.6064	0.4805
0.243	0.6130	0.613	0.6093	0.4830
0.296	0.7742	0.803	0.7644	0.6181
0.304	0.8009	0.778	0.7883	0.6390

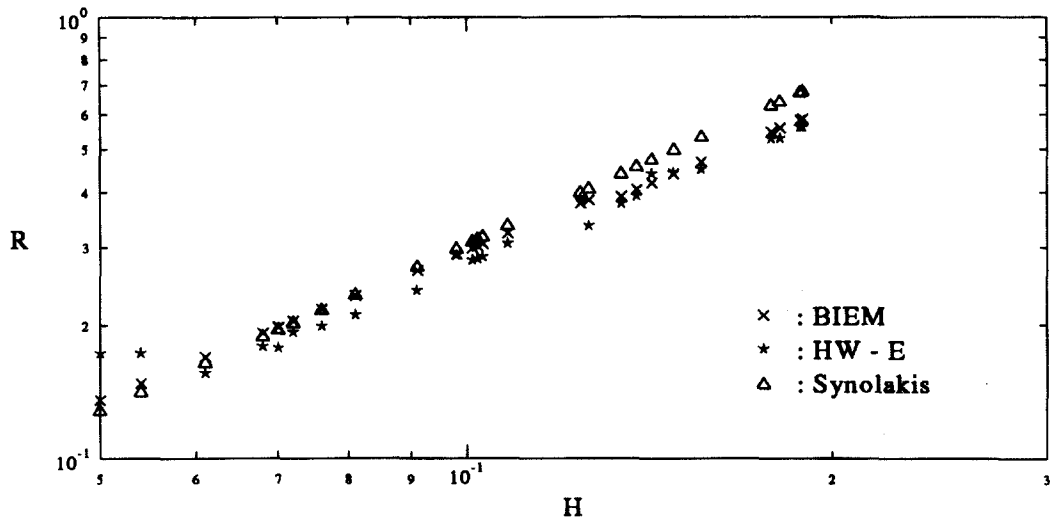


Fig. 3. The Maximum Run-Up Heights of Solitary Waves ($\theta = 15^\circ$)

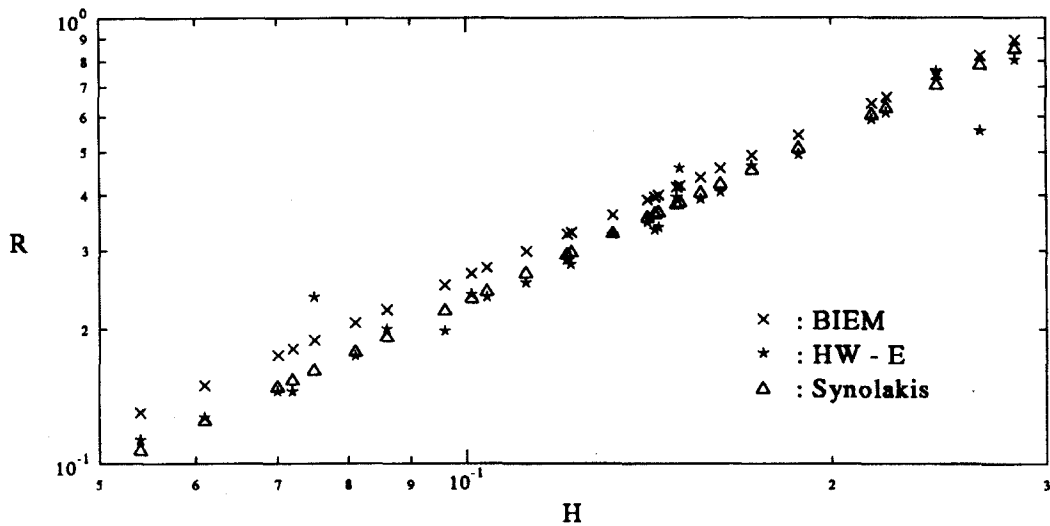


Fig. 4. The Maximum Run-Up Heights of Solitary Waves ($\theta = 25^\circ$)

본 연구에 사용된 경계요소법에 관한 보다 상세한 설명은 조용식(1995)을 참조할 수 있으며, Table 2의 처오름높이는 조용식(1995)의 Fig. 3과 같은 자료를 이용한 것이다. Figs. 3과 4는 각각 $\theta = 15^\circ$ 와 $\theta = 25^\circ$ 일 경우 고립파의 최대 처오름높이를 비교하여 도시한 것이다. Table 1과 2에서와 마찬가지로 경계요소법에 의한 수치해는 Hall과 Watts(1953)의 수리실험 관측치와 매우 잘 일치하고 있다. 그러나, Synolakis

(1987)의 근사 해석해는 다소 작거나 큰 처오름높이를 제공하고 있음을 알 수 있다. Table 3은 경계요소법 수치모형을 이용하여 여러 경사에 대한 고립파의 최저 처내림높이를 계산한 것이다. 앞에서 언급한 것과 같이 임해발전소의 냉각수 공급을위한 취수구의 높이는 반드시 최저 처내림높이보다 아래에 있도록 설계되어야 한다. 즉, 예상치 못한 지진해일 등으로 해수면이 갑자기 내려갈 때 냉각수의 공급을 원활히 하기 위해서는 취수

Table 3. The Run-Down Heights of Solitary Waves

H	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 25^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
0.05	- 0.0271	- 0.0103	0.0000	0.0000
0.10	- 0.0825	- 0.0666	- 0.0183	- 0.0012
0.15	-	- 0.1314	- 0.0739	- 0.0025
0.20	-	-	- 0.1400	- 0.0382

구의 위치가 최저 처내림높이보다 낮도록 설계하는 것이 바람직하다. Table 3에서는 쇄파가 되는 것은 계산에서 제외되었으며, 고립파가 처내릴 때의 쇄파한계는 조용식(1995)을 참조할 수 있다.

3. N-파의 처오름높이

N-파에 관한 연구는 기체역학에서는 오래 전부터 다루어 왔으나(Whitham, 1974), 해안공학에서는 거의 다루어지지 않고 있었다. 최근에 Tadepalli와 Synolakis(1994, 1996)는 상대적으로 완만한 경사에서 N-파의 최대 처오름높이를 1차원 비선형 천수방정식에 Carrier와 Greenspan (1958)의 hodograph 변환을 적용하여 이론적으로 계산하였다. 1992년 9월 Nicaragua 해안에서 100 km 정도 떨어진 해저에서 발생한 지진으로 인한 지진해일의 초기 파형은 N-파의 형태를 갖는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 이와 같은 초기 파형이 N-파의 형태를 갖는 지진해일이 해안가에 도달하였을 때 해안선을 따라 최대로 치오르는 높이를 산정하여 적절한 방어대책을 수립하기 위해서는 최대 처오름높이를 포함한 N-파의 특성을 연구할 필요가 있다.

Tadepalli와 Synolakis(1994)는 N-파를 일반형 N-파(generalized N-wave), 이변형 N-파(isosceles N-wave) 및 합성형 N-파(double N-wave) 등으로 구분하여 각각에 대하여 최대 처오름높이를 구하는 공식을 근사적으로 유도하였으나, 본 연구에서는 이변형 N-파에 대해서만 처오름높이를 연구한다. 이변형 N-파는 앞선 파의 형태에 따라 파봉이 파곡보다 앞선 파형일 경우의 N-파(leading-elevation N-wave)와 파곡이 앞서고 파봉이 뒤따르는 형태의 N-파(leading-depression N-wave)로 구분한다. 이변형 N-파의 파형중에서 leading-depression N-wave의 파형은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta(x, 0) = \frac{3}{2} \sqrt{3} H \sec h^2 [\gamma(x-x_1)] \tan h^2 [\gamma(x-x_1)] \quad (7)$$

식 (7)에서 $\gamma = 1.5(3H/4)^{0.25}$, H 는 최대 파고이며, x_1 는 파봉의 좌표이다. Tadepalli와 Synolakis는 Carrier와 Greenspan의 hodograph 좌표변환을 이용하여 다음과 같이 주어지는 leading-elevation N-파의 최대 처오름높이를 산정하는 공식을 유도하였다.

$$R = 3.86 (\cot \theta)^{0.5} H^{1.25} \quad (8)$$

일반적으로 N-파는 단일파일지라도 고립파와는 달리 진행과정에서 파형과 파고가 끊임없이 변하기 때문에 수치실험 또는 수치모형에서 입사파로 이용하는 것이 쉽지 않다. 본 연구의 수치모형에서는 진행과정에서의 변화를 최소화하고 입사파의 파고를 유지하기 위해 해안경사로부터 10h 떨어진 지점에 조파기를 설치하여 N-파를 발생시킨다. 참고로, N-파는 고립파와는 달리 진행과정에서 끊임없이 변화하기 때문에 본래의 파형과 파고를 유지하는 것이 불가능하기 때문에 여러 번의 시행착오를 거쳐 본래의 파고를 가장 잘 유지하는 지점으로부터 입사하는 것으로 고려하였다.

Table 4는 leading-elevation N-파와 고립파의 최대 처오름높이를 비교한 것이다. Table에서 BIEM은 바닥마찰저항을 고려한 경계요소법에 의한 수치해이며, formula는 식 (8)을 이용하여 계산한 값이며, solitary는 동일한 파고를 갖는 고립파의 처오름높이로 식 (6)을 이용하여 계산하였다. 상대적으로 파고가 작을 때는 수치해와 근사 해석해가 서로 잘 일치하나 파고가 증가하면 두 처오름높이는 서로 크게 차이가 나고 있음을 알 수 있는데 이는 첫째, 경계요소법은 바닥마찰을 고려한 반면에 공식을 이용한 처오름높이는 이를 무시했기 때문이다. 둘째, 앞에서 언급한 것과 같이 수치해석에서는 파랑의 진행과정에 따른 변화가 고려된 반면 근사 해석해에서는 이를 고려할 수 없기 때문이다. 전체적으로 N-파(leading-elevation)의 처오름높이는 동일한 파고를 갖는 고립파보다 다소 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Table 4. The Run-up Heights of N-shaped and Solitary Waves ($\theta = 20^\circ$)

H	BIEM	formula	solitary
0.02	0.0446	0.0481	0.0420
0.04	0.0955	0.1144	0.0920
0.06	0.1501	0.1900	0.1457
0.08	0.2066	0.2722	0.2018
0.10	0.2650	0.3598	0.2599

4. 결 론

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 고립파와 N-파의 최대 처오름높이와 처내림높이에 관하여 조사하였다. 고립파는 지진해일의 특성을 가장 나타낼 뿐만 아니라 주기파의 처오름높이의 접근값을 제공하기 때문에 수리모형실험 또는 수치모형실험에서 입사파로 자주 이용된다. 고립파는 또한 파고만 주어지면 파형이 결정되기 때문에 발생시키는 것이 상대적으로 쉬울 뿐만 아니라 해석 또한 용이하다. 일반적으로 고립파의 처오름높이는 N-파의 처오름높이보다는 작다. 경사가 급한 지역에서는 바닥마찰저항이 중요한 역할을 못하지만 경사가 작아지면 해안의 길이가 상대적으로 길어지므로 바닥마찰저항이 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 따라서, 수치해석을 이용하여 처오름높이를 산정할 때는 바닥마찰을 고려하는 것이 바람직하다.

지진해일의 특성을 재현하기 위해서는 단일파외에도 주기를 갖는 파랑의 처오름높이에 관해서도 조사되어야 한다. 현재 크노이드파와 정현파를 이용하여 주기파의 처오름높이에 관한 연구를 진행중이며, 결과는 추후 발표될 예정이다.

참 고 문 헌

조용식 (1995). "급경사에서 고립파의 처오름과 진행과정." *한국수자원학회지*, 제 28권, 제 6호, pp. 159-168.

Carrier, G.F., and Greenspan, H.P. (1958). "Water waves of finite amplitude." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 17, pp. 97-109.

Hall, J.V. and Watts, J.W. (1953). "Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes." *Technical Memorandum 33*, Beach Erosion Board, US Army of Corps of Engineers, USA.

Kim, S.-K., Liu, P.L.-F., and Liggett, J.A. (1983). "Boundary integral equation solutions for solitary wave generation, propagation and runup." *Coastal Engineering*, Vol. 7, pp. 299-317.

Liu, P.L.-F., and Cho, Y.-S. (1994). "Integral equation model for wave propagation with bottom frictions." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 594-608.

Pedersen, G., and Gjevik, B. (1983). "Run-up of solitary waves." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 135, pp. 283-299.

Synolakis, C.E. (1987). "The runup of solitary waves." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 185, pp. 523-545.

Synolakis, C.E. (1991). "Tsunami runup on steep slopes: How good linear theory really is." *Natural Hazards*, Vol. 4, pp. 221-234.

Tadepalli, S., and Synolakis, C.E. (1994). "The run-up of N-waves on sloping beaches." *Proceedings of Royal Society, London, Series A*, Vol. 445, pp. 99-112.

Tadepalli, S., and Synolakis, C.E. (1996). "Model for the leading waves of tsunamis." *Physical Review Letters*, Vol. 77, pp. 2141-2144.

Whitham, G.B. (1974). *Linear and nonlinear waves*. Wiley.

Zelt, J.A. (1991). "The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves." *Coastal Engineering*, Vol. 15, pp. 205-246.

(최종본 접수일 : 1997년 8월 26일)