Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No. 2, pp. 70-75, April 2016
Copyright@2016 by The Korean Society of Safety (pISSN 1738-3803, eISSN 2383-9953) *All right reserved.* *http://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.2.70*

Sluice Gate를 이용한 고립파 발생조건에 따른 형상 및 압력 특성에 관한 실험적 연구

조재남 · 김동현 · 이승오†

홍익대학교 토목공학과

(2015. 12. 17. 접수 / 2016. 2. 23. 수정 / 2016. 2. 28. 채택)

Experimental Study of Shape and Pressure Characteristics of Solitary Wave generated by Sluice Gate for Various Conditions

Jae Nam Cho · Dong Hyun Kim · Seung Oh Lee†

Department of Civil Engineering, Hongik University

(Received December 16, 2015 / Revised February 23, 2016 / Accepted February 28, 2016)

Abstract : Recently, coastal erosion has been widely in progress and the erosion level becomes also serious in the world wide, espeically in East Sea in Korea. Since it would threaten the life, economics and security risk, it is necessary to much comprehend the reason why coastal erosion has occurred according to the geographical characteristics. Meanwhile, analysis about hydrodynamics of the solitary wave such as tunami in swash zone is needed for the best management practice of coastal erosion. Solitary wave is nonlinear wave and can be reproduced in the laboratoy scale by openning suddenly a sluice gate with water head difference, of which methodology was found in the literature, since it could be simply determined by a significant wave height. Thus, in this sutdy the generation of solitary wave was experimentalized using the sluice gate. Experimental conditions were classified by angles of a beach slope, a water level in a beach slope and a difference of water level between in a headtank and a channel bed. Two kinds of dimensionless analyses based from experimental results in this study were presented; the first analysis indicates nondimensionalization between the wave height and the water level in a beach slope in order to investigate characteristics of solitary wave approaching the beach. The second shows the other nondimensionalization between dynamic pressure and static pressure on a beach slope to investigate the relationship between wave breaking and wave pressure. Under the same conditions as laboratory experiments, the numerical results computed with a SWAN model embedded in FLOW 3D were compared in terms of wave height, and pressure on the beach slope, which shows good agreement with each other. Overall results from this study could provide fundamental hydraulic data for the reliabile verification of numerical simulation results about coastal erosion in swash zone caused by solitary waves.

Key Words : solitary wave, sluice gate, water depth, coastal erosion

1. 서 론

최근 연안지역을 따라 침식 현상이 광범위하게 진행 중이며, 침식 수준 또한 극심하다. 침식 현상이 발생하는 원인으로 기후변화에 따른 지구온난화에 따른 수온 상승으로 고파랑 발생빈도가 증가하고 있으며, 또한 해수면의 상승으로 연안침수 등 해안선 변화가 발생하고 있다. 또한 구조물에 따른 연안표사 차단, 해저지형의 변화에 따른 파랑장, 해빈류장의 변화가 그 원인이 된다. 주요연안의 120개소에 대한 2003년 이후 침식 모니터링, 약 17% 20개소에 대하여 침식 현상이 진행되고 있으며 현장조사 결과 백사장 침식, 토사포락, 호안 유실, 사구 포락 등 다양한 형태로 침식이 발생하고 있으며, 수심경사가 급한 동해안지역에서 심화되었다. 내습파랑으로 인하여 남해안 일대에서 호안의 붕괴가 발생으로 도로피해 발생, 붕괴 등 안전이 문제되고 있다. 지형적 특성별로 연안침식 발생 유형은 다르지만 파랑과 침식현상의 관계 분석이 필요하다. 본 연구에는 고립파로 인한 침식현상에 초점을 두고 있다. 고립파는 이론적으로 주기와 파장이 무한대이므로 실험적으로 최대파고의 5%가 되는 지점사이의 거리를 파장으로 정의한다[1].

† Corresponding Author : Seung Oh Lee, Tel : +82-51-5257-3046, E-mail : Seungoh.lee@hongik.ac.kr
Department of Civil Engineering, Hongik University, 94, Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

시・공간적으로 급변하는 불연속 흐름으로 정의되는 단파(bore)는 지진해일파, 조석파 혹은 댐붕괴 등에서 선단부의 전후에 형성되는 큰 수위차에 의해 발생하고, 경우에 따라 매우 빠른 전파속도를 갖는 충격파가 세굴을 발생시켜 해빈의 침식을 발생시킨다[2]. 단파의 붕괴로 인한 높은 처오름과 급격한 지형변동이 발생되고 특히 연안저지대로의 내습시에는 많은 인적・물적 피해를 유발할 수 있다. Foda은 파랑의 압력에 따른 하상 유사거동 특성에 관한 연구를 수행하여 파랑의 특성에 따른 유사거동관계를 수식으로 제시하였다[3]. Yeh *et. al* 은 수리실험을 통하여 고립파의 세굴 메커니즘에 관한 연구를 수행하였으며, 유사거동에 있어 유속, 전단응력은 상대적으로 영향이 적었다. 또한 바닥면 유사에 작용하는 압력을 주요 인자로 간주하였다[4]. 이러한 연구들을 통해서 연안지역에서 발생되는 침식과 퇴적현상의 경향을 분석하기 위해서는 경사면에 작용하는 고립파의 압력에 관한 수리실험이 세밀하게 수행되어야 한다는 것을 확인할 수 있다.

단파의 특성과 유사한 고립파는 초기 파형의 변형없이 진행하는 특징을 해석적으로 분석하였다[5]. 실험적 접근방법은 수문을 개방하는 방법과 조파기를 활용하여 고립파를 생성하는 방식 중 본 연구에서는 수문은 순간적으로 개방하는 방식을 통하여 급작스러운 수위의 변화를 유도하여 고립파를 발생시키는 방법을 사용하였다. 향후 수문을 이용한 고립파 연구에 기초적인 연구자료를 제공하고자 수리실험 조건에 따른 재현 고립파 특성을 분석하였다. 실험조건을 상류 Headtank 수위와 하류 수심과의 수위차를 이용하는 경우와 sluice gate 개방 속도에 따라 고립파를 생성하는 두 가지 경우로 나누어 실험을 수행하였다.

2. 고립파 수리실험

2.1 지배방정식

심해에서의 고립파는 주기가 긴 장주기파로 장파나 천해파의 특성을 가진다. 일반적으로 비선형 천해파 방정식은 x축에 관하여 식(1) 및 (2)와 같이 정의 할 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial[(h+\eta)u]}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial \eta}{\partial x}=0 \tag{2}$$

여기서, h는 수심, η는 파랑의 진폭, u는 수심 평균 유속, t는 시간, g는 중력가속도를 나타낸다.

Carrier와 Greenspan, Synolakis가 제안하는 방정식은 고립파를 파주기가 일정하고 수심에 비해 파고가 작은 선형 천해파로 가정하여 비선형 천수방정식을 해석하여 식(3), (4) 및 (5)와 같이 제시하였다[6,7].

$$\eta = H sech^2\sqrt{\frac{3H}{4h^3}}(x-ct) \tag{3}$$

$$c=\sqrt{g(H+h)} \tag{4}$$

$$u=\eta\sqrt{\frac{g}{h}} \tag{5}$$

여기서, H와 h는 파고와 수심이고 c는 파속을 나타낸다.

2.2 수리실험

본 연구에서 사용된 2차원 수조에서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 단면수로의 길이는 9.0 m, 폭이 0.8 m, 깊이 0.75 m, 경사면 10°이며, 수로측면은 강화유리로 되어있어 고립파의 변화와 진행을 가시적으로 관측할 수 있도록 제작되었다. Fig. 2에 나타내는 바와 같이 Headtank 전면에 있는 Sluice gate를 개방하여 고립파를 발생시키는 방식을 사용하였다.

본 연구에서 실험적으로 좌우대칭을 이루는 고립파를 생성함에 한계가 있어 고립파 생성완료 시점을 고립파의 중심에서 좌우 수위의 차이가 파고의 5%이하가 되었을 경우로 정의하였다.

Sluice gate의 개방속도를 조절하기 위하여 모터(2 HP, 2 P, 3600 rpm)의 동력을 조절나사(control screw)에 전달하여 인버터를 통하여 모터의 회전수를 조절하여 조절나사 회전 속도에 따라 수문개방속도가 결정되는 방식을 채택하여 설계하였다. 이러한 수문개방 방식으로 0.2 ~ 0.75 m/s 범위에서 조절이 가능하여, Sluice gate를 개방할 수 있는 최대 가동범위를 고려하여 수심을 변화시키고 고립파의 파고를 측정하였다. 파고를 수심에 대해 무차원화한 상대파고(수심 대 파고비)를

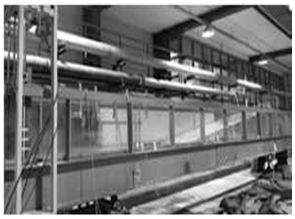


Fig. 1. Experimental channel.

Fig. 2. Sluice gate.

기준으로 수심변화에 따라 생성되는 고립파의 파고에 대한 분석을 수행하였다. 상대파고는 주기 혹은 파장에 영향을 받지 않는 매개변수로써, 고립파 해석에 사용하는 무차원 매개변수이다. 고립파의 진행에 있어 파고/수심에 따라 변형 또는 쇄파현상 없이 전파할 수 있는 범위를 선별하여 정확한 고립파가 생성될 수 있도록 설정하였다.

수리실험에서 사용된 고립파 발생조건은 Headtank수위와 하류측 수위와의 차이와 수문개방속도에 따라 실험조건을 설정하였으며, 세부조건은 Table 1에 제시하였다. 수위차를 각 실험조건에 맞추어 0.05 m 간격으로 설정하였으며, 수문개방속도는 0.1 m/s 간격으로 수행하였다.

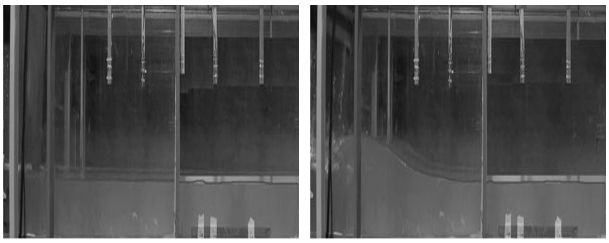


Fig. 3. Opening Sluice gate and generation of solitary wave.

Table 1. Experimental conditions

	Channel water depth (d_1)	Headtank water depth (d_2)	Sluice gate opening speed
Case A	0.10 m	0.15 ~ 0.20 m	0.2 ~ 0.7 m/s
Case B	0.15 m	0.20 ~ 0.30 m	
Case C	0.20 m	0.25 ~ 0.40 m	

고립파에 관한 다른 연구에 따르면 수문개방속도를 조절하지 못하여 수문개방속도에 따른 고립파 발생사이의 관계를 분석하지 못한 한계가 있었다[8]. 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 Sluice gate 개방속도를 조절 가능한 수리실험 장치를 개발하여 수문개방속도를 조절하였다. 수문개방속도와 고립파 파고에 관한 상관성을 분석하였으며, 이를 정량적인 방법으로 결과를 제시하였다.

2.3 수치모의 (FLOW-3D)

수리실험의 적용 한계성, 복잡성 등을 극복하기 위하여 많은 연구자들이 수치모의를 통한 고립파의 연구를 수행해 왔다[9]. 본 연구에서도 고립파에 관한 수리실험결과의 비교검증 및 추가 연구를 위하여 Flow Science사에서 개발한 FLOW-3D를 이용하여 고립파 특성을 모의하였다. 연속방정식과 운동량방정식을 지배방정식으로 사용하고 있다[10].

연속방정식(Continuity Equation)

$$V_F\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial X}(\rho u A_X)+\frac{\partial}{\partial Y}(\rho v A_Y)+\frac{\partial}{\partial Z}(\rho w A_Z)=0 \qquad (6)$$

여기서, V_F는 유체 요소체적, ρ는 유체 밀도, u,v,w는 각 방향 유속, A_x, A_y, A_z는 각 방향 요소 면적을 나타낸다.

운동량 방정식(Momentum Equation)

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_X\frac{\partial u}{\partial X}+vA_Y\frac{\partial u}{\partial Y}+wA_Z\frac{\partial u}{\partial Z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial X}+G_X+f_X \qquad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_X\frac{\partial v}{\partial X}+vA_Y\frac{\partial v}{\partial Y}+wA_Z\frac{\partial v}{\partial Z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial Y}+G_Y+f_Y \qquad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_X\frac{\partial w}{\partial X}+vA_Y\frac{\partial w}{\partial Y}+wA_Z\frac{\partial w}{\partial Z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial Z}+G_Z+f_Z \qquad (9)$$

여기서, G는 체적력, f는 점성력을 나타낸다.

본 연구에서는 수치모의에서 Sluice gate를 개방하는 방식을 동일하게 적용하기 위해 GMO(General Moving Object) 기능을 이용하여 고립파를 재현하였다 (Fig 4 참조). 이는 수리실험의 특성을 재현하기 위하여 사용한 기법이다. 계산상 FLOW-3D의 격자망은 직사각형 격자망을 사용하였고, 총 격자의 수는 1,027,500이고, 수문개방에 따른 고립파의 적절한 모의를 위하여 난류거동을 해석은 LES(Large Eddy Simulation) 난류모형으로 적용하여 해석하였다.

본 연구에서는 수문개방속도를 0.1 m/s간격으로 0.2 ~ 0.7 m/s의 범위로 설정하였다. 고립파의 생성과 경사

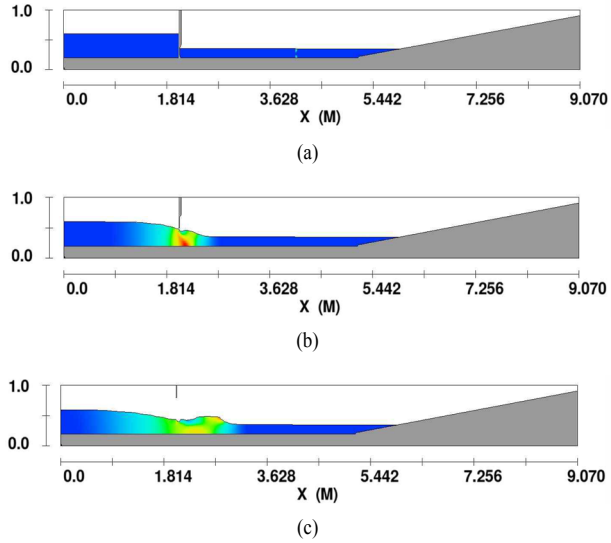


Fig. 4. Solitary wave generated by numerical simulation with GMO, (a) t=0.0 s, (b) t=0.5 s, (c) t=1.0 s

면에서 쇄파의 형태에 따라서 경사면에 작용하는 압력을 측정하였다.

3. 결과 및 분석

경사면에 작용하는 고립파의 압력 특성을 분석하기에 앞서 Sluice gate를 이용한 고립파 생성 특성에 관하여 수문개방속도를 달리하여 수리실험과 수치모의를 수행하였다. 수문개방속도를 조절하는 장치의 기작에 관한 성능 검증과 FLOW-3D 수치모의 결과 값에 관한 신뢰도 검증을 위하여 모든 실험조건에 대하여 수리실험과 수치모의 고립파의 특성인 파고, 파속을 비교하였다. 이때, 수위차와 고립파 파고에 대한 비교한 결과는 수위차 0.05 ~ 0.20 m의 범위에 대해서 Fig. 5와 같이 나타났다.

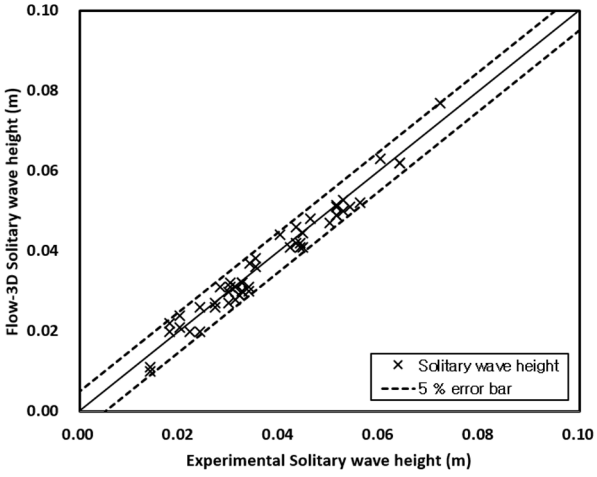


Fig. 5. Comparison of numerical results from FLOW 3D with experimental results.

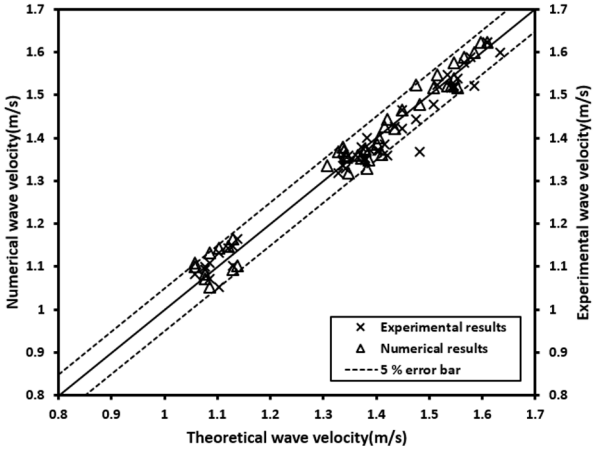


Fig. 6. Multivariate comparison of wave velocities among theoretical, experimental, and numerical results.

동일한 조건에서 고립파의 재현에 관한 이론적 검토와 수리실험결과를 이용하여 수치모의 결과를 비교하였다. 고립파의 파고에 대한 수리실험과 수치모의를 비교한 결과, $R^2=0.966$의 값을 가지며, 고립파의 파속에 관한 비교 결과, $R^2=0.957$로 선형적인 경향을 보였다. 오차는 5%이내의 오차범위를 보이며, 오차에 따라 수리실험 결과가 수치모의 결과보다 다소 낮은 값을 가지는 경향을 보였다. 이는 수리실험에서 사용된 Sluice gate 표면저항의 영향이 고립파 형성에 영향을 미치는 것이라고 판단한다.

3.1 쇄파형태에 따른 침식 연계성 검토

본 수리실험에서 경사면에 접근하는 고립파의 쇄파형태에 따라 연안지역의 침식과 퇴적현상과 영향이 있다고 판단한다. 또한 쇄파의 형태에 따라 발생할 수 있는 최대압력의 분포가 다르기 때문에 Iribarren 수를 이용하여 고립파의 쇄파구간을 나누었다.

Fig. 7에서와 같이 Iribarren 수가 0.4 이하의 경우, 파편형 (spilling) 형태로 쇄파되었으며 0.4 이상 2.0이하의 구간에서는 돌진형 (plunging) 형태로 쇄파하였다.

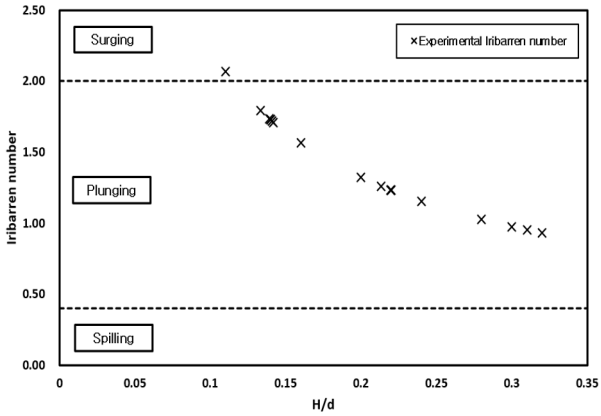
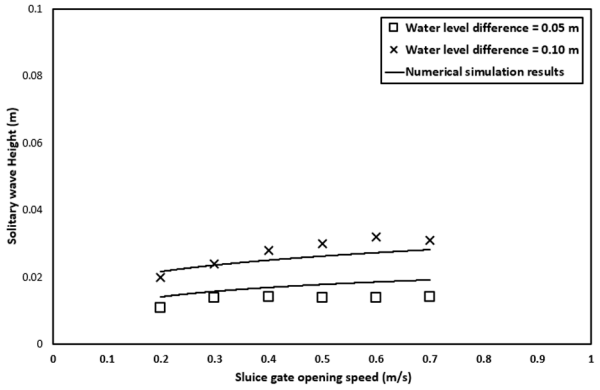


Fig. 7. Variation of (Iribarren number) against the (H/d).

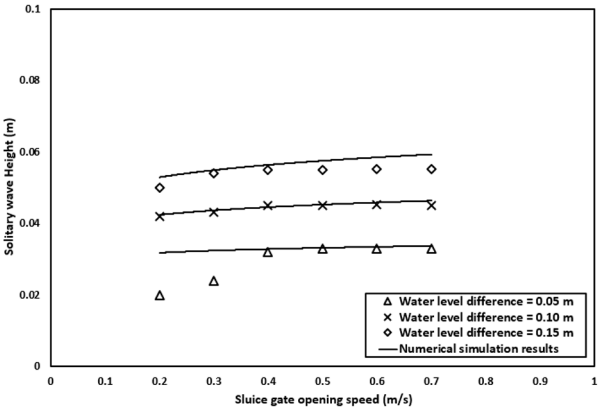
3.2 고립파 특성에 관한 분석

수문개방조절 장치의 기작에 관한 분석을 위하여 Headtank의 수위(d_1)과 수로의 수심(d_2)을 수리실험과 수치모의 변수로 각 조건에 따른 고립파 대표적 특성인 파고를 도출하였다.

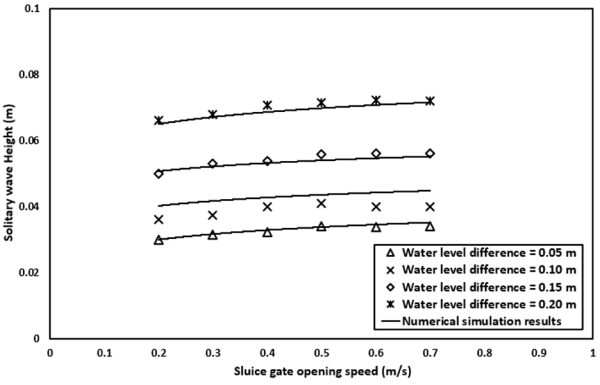
Sluice gate를 이용한 고립파의 특성인 파고는 수문개방속도를 증가시킬수록 파고가 증가하였으나, 수문개방속도가 0.5 m/s 이상에서는 값의 변화가 적어지는 경향을 나타내었다. 또한, 수리실험 수행이 어려운 구간에 대하여 수치모의를 통하여 결과 값을 선형적으로 도출하여 나타내었다.



(a)



(b)



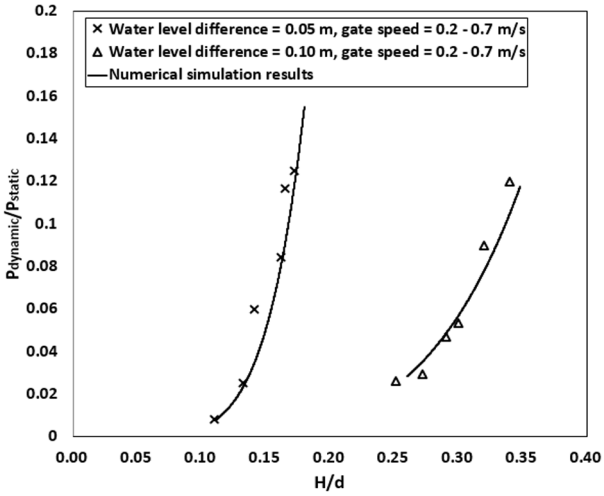
(c)

Fig. 8. Sluice gate opening speed – Solitary wave height curve, (a) channel Water depth (d_2) = 0.10 m, (b) channel Water depth (d_2) = 0.15 m, (c) channel Water depth (d_2) = 0.20 m.

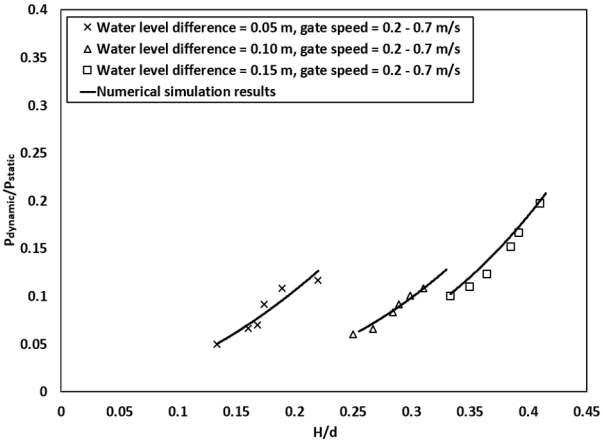
3.3 경사면에 작용하는 압력 특성 분석

고립파는 일반적인 파랑에 비하여 상대적으로 긴 파장을 가진다. 이러한 특징을 이용하여 고립파 수리실험에서 상대파고(고립파 파고(H)/수로 수심(d_2))를 적용하여 고립파 특성을 무차원화 하여 분석하였다.

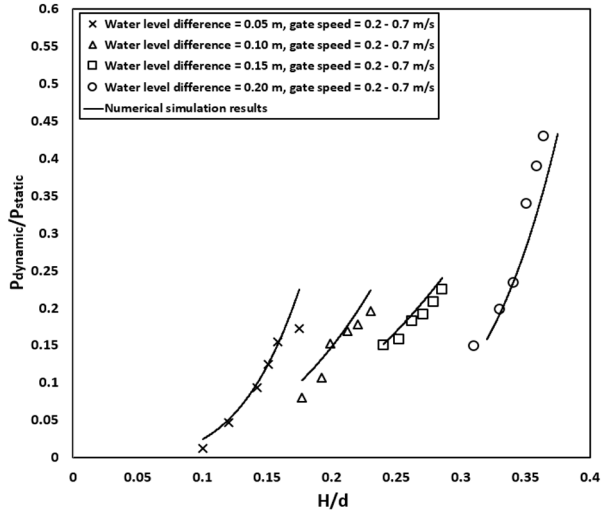
Fig. 9 (a)에서와 같이 수로 수심(d_2)이 0.10 m의 조건에



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Variation of ($P_{dynamic}/P_{static}$) against the (H/d), (a) Channel water depth (d_2) = 0.10 m, (b) Channel water depth (d_2) = 0.15 m, (c) Channel water depth (d_2) = 0.20 m.

서는 동수압과 정수압의 비로 나타낸 압력비가 지수형태로 증가하는 경향을 보였다. 상대수심(H/d)의 값이 0.1 ~ 0.2 구간에서는 형태로 압력비의 값이 상대적으로 급하게 증가하였으나, 상대수심(H/d)이 큰 0.25 ~ 0.35의 구간에서는 낮은 기울기로 압력비가 증가하였다.

Fig. 9 (b) 및 (c)의 조건에서는 상대수심(H/d)이 0.32 이하의 파편형(spilling) 형태로 쇄파하는 구간에서는 Fig. 9 (a)와 같은 경향을 보였다. 상대수심(H/d)의 값이 0.32 이상의 돌진형 (plunging) 형태로 쇄파하는 구간에 대하여 상대수심(H/d)이 커질수록 압력비 값의 기울기가 커지는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 파랑에 의한 연안지역 침식현상에 관한 기초 연구로 고립파를 발생시켜 파랑의 특성을 분석하였다. 또한, 수리실험과 수치모의 결과를 비교 검증하였다.

일반적인 고립파 재현에 관한 수리실험 방법인 상하류 수위차가 있는 수문개방을 통하여 고립파를 생성하였으나, 수문개방 속도에 관한 수리실험은 상대적으로 부족하여 수문개방속도를 조절할 수 있는 장치를 이용한 수리실험을 독자적으로 수행하였다. 수문개방속도에 따라 생성되는 고립파의 파고는 증가하다가 수문개방속도가 0.4 m/s 이상의 구간에서는 일정한 파고를 형성하였다. 또한 3차원 수치모의를 통하여 수리실험 결과와 비교분석을 수행하여, 수문에서 발생하는 표면마찰로 인하여 발생된 고립파 에너지의 미소 손실이 발생함을 확인하였다. 수문개방을 통하여 생성된 고립파는 경사면에 접근하면서 쇄파의 형태를 보이며 경사면의 압력을 증가시킨다. 각 초기조건에 따라 경사면에 작용하는 압력, 접근 고립파의 파고, 수로 수심을 이용하여 무차원화하여 결과 값을 제시하였다. 수로수심(d_2)에 따라 3가지 실험조건으로 나누었으며 수로수심(d_2) = 0.10 m에서는 파고가 증가함에 따라 경사면에 작용하는 $P_{dynamic}/P_{static}$의 값이 지수의 형태로 증가하는 경향을 보였으며, 수로수심(d_2) = 0.15, 0.20 m의 경우에서는 상대수심(H/d)이 0.32 이상의 구간에서는 압력비 값의 경향이 변하는 것을 확인하였다. 이는 쇄파의 형태에 따라 $P_{dynamic}$의 값이 P_{static}에 대하여 증가하는 것으로 판단된다.

침식과 퇴적 메커니즘에 관한 분석을 수행하기 위하여 경사면에 작용하는 고립파의 압력측정치는 연안지역 유사거동 특성을 분석하기 위한 기초가 되는 연구자료로 활용할 수 있으며, 향후 침식현상을 설명하는데 활용 가능하다. 유사의 부유현상에 깊게 관여하는 양력은 연안지역 침식현상 예측을 위한 수치모델의 검증에 활용이 가능하며, 고립파에 의한 부유사 거동 특성분석을 위한 기초자료로 활용가능하다. 향후 실험수조와 경사면에 다양한 유사를 포설하여 고립파에 따른 유사거동 특성 수리실험을 진행한다면, 해당연구결과와 함께 본 연구결과는 압력과 부유사 발생 및 이송 현상을 분석하는 이다. 또한, 고립파의 대표적인 파랑인 지진해일에 관한 수리실험을 수행할 시 본 연구결과를 활용하여 연안지역 침식현상 뿐만 아니라 구조물에 직접적, 간접적으로 안정성에 문제를 해결에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의연구비지원(16RDRP-B076564-03)에 의해 수행되었습니다.

References

1) D. G. Goring, “Tsunamis-the Proagation of Long Waves Onto a Shelf”, California Institute of Technology, 1978.
2) S. Tonkin *et al.*, “Tsunami Scour Around a Cylinder”, Journal of Fluid Mechanics 496, pp.165-192, 2003.
3) M. A. Foda, “Role of Wave Pressure in Bedload Sediment Transport”, Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, Vol. 129, No. 6, pp. 243-249, 2003.
4) H. Yeh, F. Kato and S. Sato, “Tsunami Scour Mechanisms Around a Cylinder”, Tsunami Research at the End of a Critical Decade, pp. 33-46, 2001.
5) D. H. Peregrine, “Calculations of the Development of an Undular Bore”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 25, Issue 2, pp. 299-320, 1966.
6) G. Carrier and H. Greenspan, “Water Waves of Finite Amplitude on a Sloping Beach”, Journal of Fluid Mechanics, pp. 97-109, 1958.
7) C. E. Synolakis, “The Run-up of Solitary Waves”, Journal of Fluid Mechanics, pp. 523-545, 1987.
8) H. Chanson, “An Experimental Study of Tsunami Runup on Dry and Wet Horizontal Coastlines”, Science of Tsunami Hazards, Vol. 20, No. 5, pp. 278-293, 2003.
9) S. T. Grilli et al., “Numerical Modeling And Experiments For Solitary Wave Shoaling And Breaking Over a Sloping Beach”, In The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004.
10) Flow Science, “Flow-3D User’s Manual”, Los Alamos, 2003.