

# 고립파에 의한 경사면에서의 부유사 제승의 불확실성에 관한 실험적 연구

조재남 · 정석일\* · 이승오\*\*

주식회사 이산 · \*홍익대학교 토목공학과

(2017. 4. 5. 접수 / 2017. 11. 6. 수정 / 2017. 11. 8. 채택)

## An Experimental Study on The Uncertainty of Suspended Sediment Pickup on Slope by Solitary Wave

Jae Nam Cho · Seok Il Jeong\* · Seung Oh Lee\*\*

Isan Corporation

\*Department of Civil Engineering, Hongik University

(Received April 5, 2017 / Revised November 6, 2017 / Accepted November 8, 2017)

**Abstract :** Suspended sediment transport plays principal roles in morphological process of natural coastals. It is needed to understand the reason why interaction characteristics of solitary wave and suspended sediment. The present study shows that suspended sediment pickup derived on solitary wave celerity. The 2D prismatic open channel length is 12 m, width is 0.8 m, height is 0.75 m and slope is 1/6. Generation of solitary wave is used by rapidly opening the sluice gate. Bottom surface sediments are laid movable slope section by 0.03 m thickness and experimental sediments are used anathracite and jumoonjin sand. Techniques of suspended sediment pickup rate are designed equipment ASC(Absorptive Suspended sediment Collector). It could directly absorb 5 points suspended sediment by channel water depth. Solitary wave celerity is measured by ADV(Acoustic Doppler Velocimeter). Mounted two video cameras(Model No. : Sony, HDR-XR550) are used to image processing of suspended sediment concentration and turbidity. Suspended sediment pickup rate(Einstein, 1950) is analyzed to nondimensionalization based on solitary wave celerity. The suspended sediment pickup rate is suggested that more effective plunging breaking type than spilling. The results indicates fundamental suspended sediment transport mechanism between solitary wave celerity and suspended sediment pickup based on laboratory experiments. Finally, the present study suggests that suspended sediment pickup rate by solitary wave is used only characteristics of sediment and solitary wave celerity.

**Key Words :** solitary wave, sluice gate, suspended sediment, pickup

### 1. 서론

국내 연안지역의 표사의 침식 및 퇴적현상은 광범위하게 발생하고 있다. 이러한 자연현상이 발생하는 원인은 지구온난화와 같은 기후변화에 따른 고파랑의 내습과 수온상승에 의하여 해수면 상승, 연안침수 등 연안 자연 특성을 변화시킨다. 또한 해안 수공구조물 설치에 따른 지형의 변화로 연안표사의 공급 및 차단, 파랑장 변화가 원인이 된다.

해양수산부는 2003년도부터 시작된 연안정비 10개년계획에 따라 침식지역으로 판단되는 229개소에 대하여 현지방문 및 과거 이력조사를 통하여 침식 모니

터링 결과 주요연안의 약 17 %에 대하여 침식 현상이 진행되고 있는 것으로 보고되었다. 현장조사 결과 백사장 표사 유실, 호안 유실, 사구 포락, 토사포락 등 다양한 형태로 침식이 진행되고 있으며, 동해안 25개소, 남해안 89개소, 서해안 64개소로 극심하게 나타나고 있다.

동해안과 남해안 일대에서 발생했었던 호안의 붕괴로 도로피해, 붕괴 등 연안지역의 안전성이 문제가 되고 있어 지형적 특성을 고려한 침식현상 발생 유형을 분석하고 내습파랑과의 상관관계에 관한 연구를 통하여 정량적인 부유사농도의 예측이 가능한 연구가 국내에는 전무하여 기초 부유사농도 예측에 관한 연구가

\* Corresponding Author : Seung Oh Lee, Tel : +82-2-325-2332, E-mail : seungoh.lee@gmail.ac.kr  
Department of Civil Engineering, Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

필요하다.

본 연구에서는 경사면에서의 고립파 입사에 의한 침식 특성에 초점을 두고 있다. 고립파는 매우 빠른 전파 속도와 파형이 유지되며 전파되는 대표적인 파랑으로 연안 유사에 직접적인 충격을 주어 세굴을 발생시켜 침식을 발생시킨다. 관련 국외 연구에서는 Mostafa<sup>1)</sup>는 하상 유사거동과 파랑이 작용하는 압력과의 상관관계를 이용하여 정량적인 유사거동 실험식을 제시하였다. Yeh et. al<sup>2)</sup>은 고립파의 세굴 메커니즘에 대한 수리실험을 수행하여 전단응력은 상대적으로 세굴에 작은 영향을 미치고 있으며, 바닥면에서의 입사파 파고를 주요 인자로 제시하였다. Einstein<sup>3)</sup>은 시간에 따른 부유사의 이송에 대하여 확률개념을 적용하여 유사 직경과 비중 등의 상관관계를 실험을 통하여 실험계수와 함께 pickup 함수 (이하 提昇(제승) 함수)을 제시하였다. 바닥면의 전단속도를 주요 인자로 설정하여 부유사의 불확실성을 분석하였다. Takahashi et al.<sup>4)</sup>은 쓰나미 (tsunami)로부터 발생하는 대량의 유사이송을 정량적으로 분석하기 위하여 수리실험을 수행하였으며 바닥면에서의 전단응력과의 관계에서 부유사 제승 함수를 제시하였다. Van rijn<sup>5)</sup>은 부유사 하강속도(fall velocity)와 유사확산계수(sediment diffusion coefficient)를 이용하여 제승 특성을 분석하였다. 부유사 입자의 제승을 연속되는 유사이송 현상 과정에서 수리실험을 통하여 실험식을 제시하였다. Van rijn<sup>6)</sup>은 단위 시간과 면적에 대하여 유사 질량의 이송이라는 제승 개념을 통하여 제승 함수를 제시하였다. 국내의 고립파에 대한 연구는 해안 구조물에 대한 안전성<sup>7-10)</sup>, 수리적인 변화 특성<sup>11-14)</sup> 등 자체의 특성변화 및 안전성 관련연구에 집중되고 있을 뿐, 하상이나 유사와 관련된 연구는 찾아보기 어려운 실정이다.

고립파로 인한 연안 경사면 유사의 침식현상을 분석하기 위해서는 고립파에 의한 부유사의 정량적 결과 도출이 수리실험을 통하여 세밀하게 수행되어야 한다. 본 연구에서는 부유사에 초점을 맞추어 제승이라는 개념을 이용하였다. 경사면에서의 파고와 수심의 특성에 따른 정량적인 부유사 제승률에 관한 연구는 부족하며, 반복 수행이 어려운 수리실험에서의 불확실성을 가지는 부유사 제승률에 관한 결과를 정량적으로 제시하기 위하여 Bayesian 확률을 이용한 연구를 수행하였다. 본 연구결과는 쓰나미 및 집중호우로 인한 홍수파로 인한 하상의 변동량을 간접적으로 확인할 수 있다고 판단되며, 극치 사상에 대한 관심이 고조되고 있고, 이를 설계에 반영하려는 최근의 움직임일 때, 기초자료 또는 설계시 참고자료로 유용할 것이라 판단된다.

## 2. 수리실험

### 2.1 지배방정식

고립파는 심해에서 주기가 무한대인 장주기파로 천해파의 특성을 가진다. 비선형 천해파 방정식을  $x$ 축에 대하여 식(1)과 (2)로 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,  $\eta$ 는 파랑의 진폭,  $h$ 는 수심,  $u$ 는 수심 평균유속,  $g$ 는 중력가속도,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

Carrier & Greenspan<sup>15)</sup>, Synolakis<sup>16)</sup>는 고립파를 주기가 일정하고 수심에 대하여 선형 천해파로 가정하여 비선형 천수방정식으로 해석하여 식(3), (4), (5)와 같이 제시하였다<sup>15,16)</sup>.

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

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

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

여기서,  $h$ 와  $H$ 는 수심과 파고이고  $c$ 는 파속을 나타낸다.

### 2.2 고립파 수리실험

고립파 수리실험에서는 2차원 개수로에서 실험을 수행하였다. 길이 9.0 m, 폭 0.8 m, 높이 0.75 m, 경사 1/6으로 측면은 강화유리 설계되어 고립파와 경사면 유사의 순간적인 변화를 가시적으로 분석할 수 있다. Fig. 2에서와 같이 고립파 재현에 적합하도록 sluice gate를 설계하였다.

Sluice gate 개방속도 특성을 분석이 가능하도록 모터



Fig. 1. Experimental channel, Fig. 2. Sluice gate.

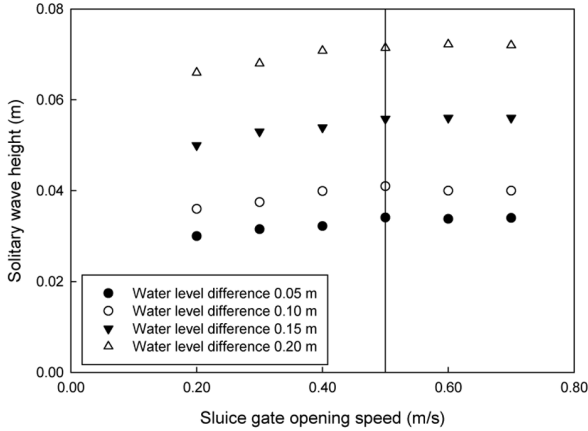


Fig. 3. Curve against sluice gate opening speed and solitary wave height.

(2HP, 2P, 3600rpm)를 이용하여 조절나사의 회전 속도에 따라 수문을 개방하는 방식으로 수문개방속도를 조절하였다. 수문개방속도는 0.2 m/s에서 0.75 m/s까지 조절이 가능하다.

수문개방속도에 따른 고립파 파고는 Fig. 3에서와 같이 나타났으며, 고립파 발생조건을 수위차로 결정하기 위하여 수문개방속도를 0.5 m/s로 고정하여 수행하였다. 동일한 실험조건에 대하여 실험용 유사를 주문진표준사와 안트라사이트 두가지 유사에 대하여 진행하였고 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental conditions

|        | Channel water depth ( $d_1$ ) | Headtank water depth ( $d_2$ ) | Sluice gate opening speed |
|--------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Case 1 | 0.15 m                        | 0.20 - 0.35 m                  | 0.5 m/s                   |
| Case 2 | 0.20 m                        | 0.25 - 0.45 m                  |                           |

본 연구에서는 수문개방을 통한 고립파의 생성과 이로 인하여 발생하는 부유사농도의 상관성을 분석하여 정량적 결과제시를 제시하고자 수리실험으로 설계되었다. 국내에서는 수행되지 않은 실험으로, 본 연구에서 제시하고 있는 실험 방법 및 체계는 향후 국내 관련 연구의 방향 설정에 일조 할 수 있을 것으로 생각된다.

### 2.3 실험용 유사 특성

일반적으로 입사되는 고립파에 의하여 유사거동이 발생될 때 소류사와 부유사로 나뉘어 거동을 하게 된다. 본 연구에서는 부유사 거동에 초점을 맞추어 이동상 조건에서의 고립파 전파에 따른 경사면의 부유사 특성을 분석하기 위하여 주문진표준사와 안트라사이트 (Anthracite)를 이용하여 수리실험을 수행하였다. 실험용

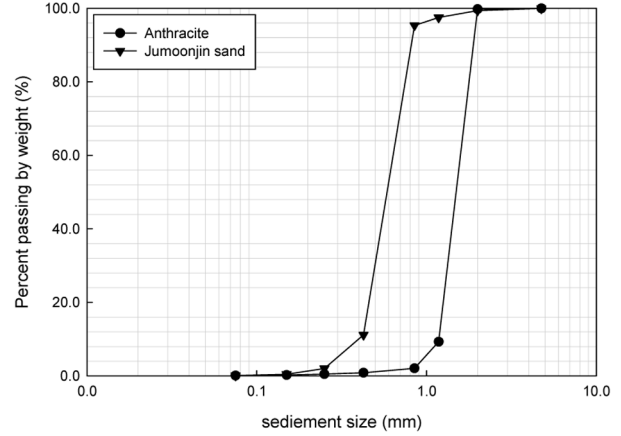


Fig. 4. Particle size distribution.

유사의 입도 분포 곡선은 Fig. 4이며  $d_{50}$  0.58, 1.55 mm, 균등계수(coefficent of uniformity) 1.68, 1.18의 비점착성 유사를 사용하였다.

부유사의 포집을 위하여 Fig. 5의 포집장치(ASC, Absorptive SSC Collector)를 설계하여 5지점에 대하여 부유사를 직접적으로 포집하도록 하였다. Xiao et al.<sup>17)</sup>이 제시한 측정기법을 기초하여 USGS(United States Geological Survey, 2013)의 분석 기술 및 과정에 따라 수행하였다. 부유사 sampling 측정방법으로 유사채집기를 이용하여 부유사를 수집하고 분석하는 방법이다. 그러나 실험실 규모에서 유사채집기의 체적은 무시하지 못할 정도이며, 이로 인하여 채집기 주변에서 난류로 인한 흐름 특성이 변화될 가능성이 있어, 장시간 채집이 불가능하다. 이에 동시에 여러 군데의 채집기를 수중에 넣은 후 순간적으로 채집을 해야 하는 번거로움이 따른다. 또한 예측이 불가능하고, 시간에 따라 지속적으로 변화하는 난류 특성과 부유사와의 관계가 매우 밀접하기 때문에, 반복 실험을 통해 평균적인 값을 취해야 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이에 3회 측정의 평균값을 이용하여 결과를 분석하였다. 측정 지점에서의 60% 수심에서 부유사를 포집하여 분석하였다. Sampling한 부유사는 오븐에서 120℃로 24시간 건조하여 측정하였다(USGS, 2013). 이때 측정된 부유사의 질량으로 부유사 농도를 도출하였다.

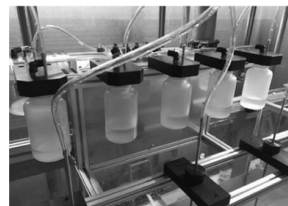


Fig. 5. ASC(Absorptive SSC Collector), Fig. 6. Turbidity device.

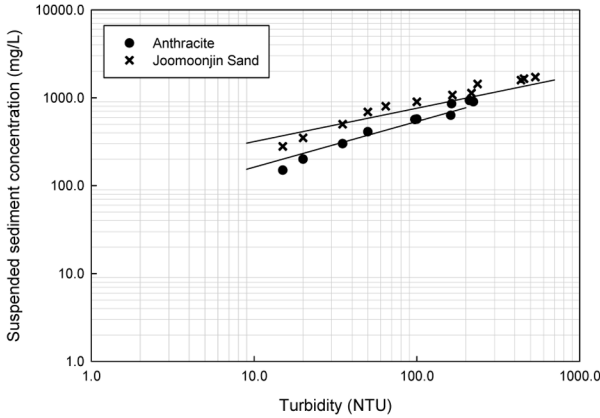


Fig. 7. Suspended sediment concentration – turbidity curve.

부유사의 질량은 미세하여 측정오차를 수반하게 되어 신뢰도 높은 부유사농도 측정을 위하여 Fig. 6 탁도 측정기기를 이용하였다. Fig. 7에서와 같이 탁도-부유사농도 상관관계에서 도출된 관계식으로 부유사농도를 검증하였다. 모든 수리실험 조건에서 부유사농도와 탁도를 최소 3회 이상 반복 측정하였다.

안트라사이트의 탁도와 부유사농도의 관계식은

$$Turbidity(NTU) = 49.0 (SSC)^{0.52} \quad (6)$$

주문진 표준사의 탁도와 부유사농도의 관계식은

$$Turbidity(NTU) = 132.0 (SSC)^{0.38} \quad (7)$$

식(6), (7)은  $R^2 = 0.9832$ ,  $R^2 = 0.9448$ 을 가지며, 해당 관계식은 유사의 물리적인 특성에 따라 다르다. 특히, 관계식의 기울기는 주문진 표준사는 안트라 사이트보

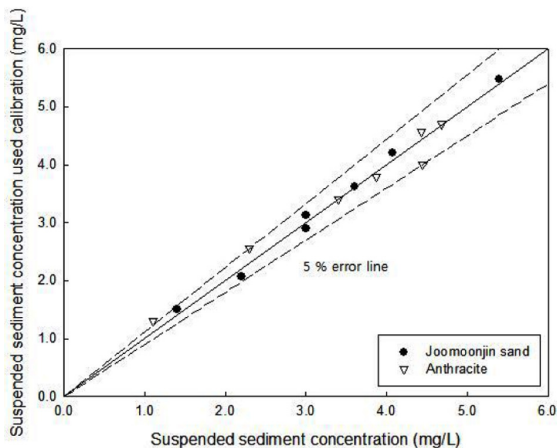


Fig. 8. Suspended sediment concentration – turbidity curve.

다 약 2.7배 크고 부유사농도의 지수는 약 1.4배 작다. 탁도를 이용하여 환산된 부유사농도는 1.130 ~ 5.472 mg/L에서 5.61% 이내의 오차를 가진다. 측정오차는 포집되는 부유사 sample의 부피, 탁도측정기기의 오차, log scale의 식(6), (7)에서의 오차가 원인이 된다.

#### 2.4 베이저안 확률(Bayesian probability)

베이저안 확률(Bayesian probability)는 지식과 믿음의 정도를 해석하는 확률론의 일종이다. 이성적, 보편적으로 증명이 가능하며 주관주의확률 이론의 관점에서 개인적인 믿음의 정도(degree of belief)로 측정할 수 있다. 통계적 추론으로 대상의 사전확률과 추가적인 관측으로 사후확률을 추론하는 방법이다. 베이저안 확률론을 기반으로 추론하는 대상을 확률변수로 하여 그 변수의 확률분포를 추정하는 것으로 정의된다. 국내에서는 수리·수문학적 댐 위험도 분석 및 불확실성 변량에 대한 수문학적 특성에 관한 연구에서 진행되고 있으며 부유사의 불확실성을 정량적으로 제시하기 위하여 본 연구에서는 고립파로 발생하는 부유사를 추적하기 위하여 image processing을 위하여 측정기기(Sony : HDR-XR550)를 이용하였다. Bayesian 확률을 분석하기 위하여 image processing에서의 빈도수(frequency)를 이용하여 제시하였다.

Video camera를 이용하여 고립파에 의한 부유사 특성을 추적하여 최대 부유사 제송이 발생되는 결과를 도출하였다. Fig. 9에서와 같이 image에서의 grayscale과 탁도와의 상관관계 결과를 이용하여 분석하였다. 고립파에 의한 image에서의 해상도 변화를 줄이기 위하여 암전에서 수리실험을 수행하였으며 고립파의 전파에 의한 image 변형은 없다고 가정하였다. 직접 포집한 부유사 질량은 미세하여 불확실성을 내포하고 있다.

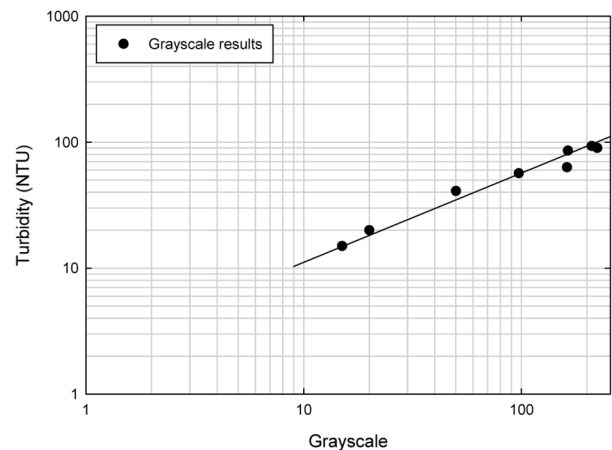


Fig. 9. Grayscale – turbidity curve.

정량적인 부유사 제송률 분석을 위하여 Bayesian 확률을 적용하여 분석하였다.

Bayesian 우도확률(likelihood)은 부유사 포집에서 발생하는 불확실성에 대한 계측오차, 포집시간(0.67 ~ 0.72 s)동안 발생하는 불확실성으로 정의하였다.

$$[grayscale | C] \propto \left( \prod_1^n [C | grayscale] \right) ([grayscale] [\sigma^2]) \quad (8)$$

각 수리실험조건에 따라 sampling된 부유사는 51 ~ 64개의 grayscale data를 가지고 있어 MCMC(Markov Chain Monte Carlo)기법으로 경사면에서의 고립파의 처오름과 처내림에 대하여 확률밀도 함수를 도출하였다. 고립파의 처오름에서 도출된 확률밀도 함수는 Fig. 10에서와 같이 정규분포(normal distribution)의 형태를 가진다. 반면 고립파의 처내림에서의 확률밀도 함수는 Fig. 11과 같이 웨이블분포(Weilbull distribution)를 나타내었다. 처오름에 의한 부유사의 발생은 바닥면의 유사의 교란에서부터 발생되어 최대 부유사농도를 발생시킨 이후 점차적으로 감소하는 결과를 나타내어 정규분포의 grayscale 값을 가졌다. 반면 경사면에서 처내림에 의한 부유사농도는 최대 처오름 발생이후 측정을 시작 고립파가 반사되어 나가는 동안 계속되는 교란으로 웨이블분포의 형태를 가진 것으로 판단된다.

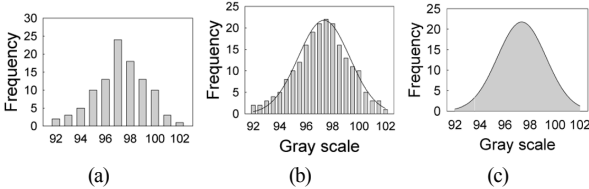


Fig. 10. Runup of solitary wave image processing results, (a), (b), (c) grayscale Bayesian probability.

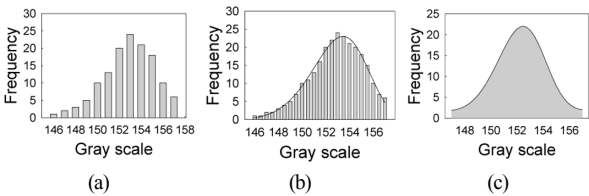


Fig. 11. Rundown of solitary wave image processing results, (a), (b), (c) grayscale Bayesian probability.

### 3. 결과 및 분석

고립파의 상대파고를 이용하여 경사면에서의 부유사 제송률을 주문진표준사와 안트라사이트에 대하여 고립

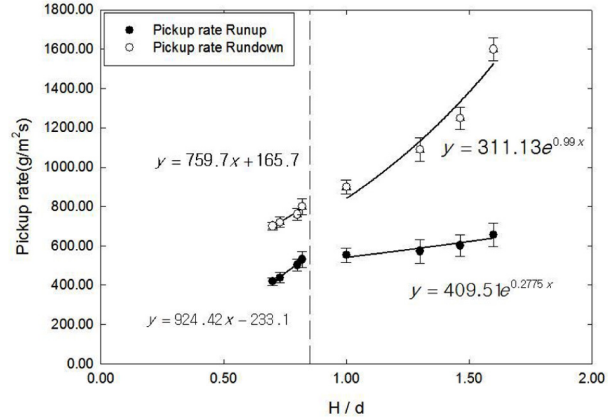


Fig. 12. H/d - pickup rate curve.

파의 전파 특성인 상대파고를 이용하여 분석하였다.

고립파의 대표적인 특성인 상대파고를 이용하여 분석하였다. 고립파의 상대파고와 부유사 제송률의 실험 결과는 Fig. 12와 같으며 경사면에서의 쇄파형태 (breaking type)에 따라 다른 결과를 나타내었다. Spilling 쇄파형태에서는 선형(linear)으로 부유사 제송률이 증가하는 결과를 가졌다. 경사면의 처오름에서 부유사 제송률은 417.9 ~ 530.1 g/m<sup>2</sup>s을 가지며 관계식의 기울기는 924.4이다. 최대 처오름이 발생한 이후 처내림에서는 703.6 ~ 814.3 g/m<sup>2</sup>s, 기울기는 759.7로 상대파고와 부유사 제송률의 선형의 상관관계를 나타내었다. Plunging 쇄파형태에서는 지수(exponential)형태로 증가하는 실험 결과를 가졌다. Li and Ferdic<sup>18)</sup>는 경사면에서의 고립파의 쇄파에 의하여 난류강도의 증가와 에너지소산의 증가로 인하여 바닥면 유사의 교란을 증가시켜 부유사 거동으로 이어지게 된다. 또한 이는 쇄파의 형태에 따라 크기가 달리 나타난다. 고립파에 의한 경사면에서의 난류강도 증가가 주요 원인으로 판단된다. 최대 처오름이 발생하는 시점에서의 부유사 제송률은 552.1 ~ 655.4 g/m<sup>2</sup>s의 범위에서 나타났으며, 처내림에서 부유사 제송률은 906.7 ~ 1613.3 g/m<sup>2</sup>s로 급격하게 증가하는 결과를 가졌다. 초기 처오름에 의하여 교란되어 있는 바닥면 유사는 처내림에서 부유사농도를 증가시키는 것으로 판단된다.

Bayesian 확률을 적용한 처오름에서의 부유사 제송률은 Fig. 13과 같으며, 처내림에서의 결과는 Fig. 14이다. 부유사의 불확실성을 68, 90, 95%로 나누어 결과를 제시하였다. Plunging 형태의 쇄파 조건에서의 부유사 pickup rate의 결과는 Spilling 형태의 쇄파조건에서의 결과보다 불확실성이 약 2.4 ~ 3.9배 증가하는 것으로 나타났다.

처내림에서의 불확실성은 처오름 조건에서 보다 불

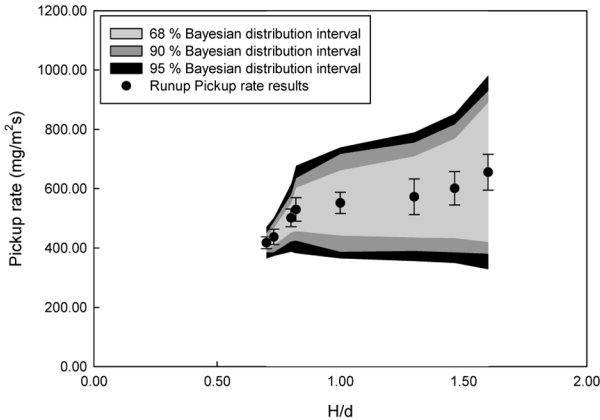


Fig. 13. H/d - runup pickup rate Bayesian probability curve.

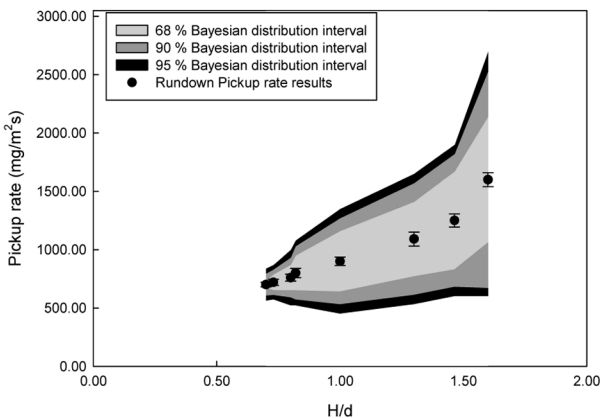


Fig. 14. H/d - rundown pickup rate Bayesian probability curve.

확실성이 증가하였으며, 초오름조건에서의 결과와는 다르게 처내림에서는 지수형태로 급격하게 증가함과 동시에 불확실성도 증가한다. 부유사의 불확실성을 반영한 제송 특성을 정량적으로 제시하였다. 상대파고의 증가에 따른 불확실성 증가는 경사면에서의 쇄파에 따른 난류강도와 에너지소산의 증가가 원인이 되는 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 통하여 연안지역에 입사되는 고립파의 상대파고와 해안 경사를 이용하여 불확실성을 내포하는 부유사 제송을 정량적으로 예측이 가능하며 침식 및 퇴적현상을 대비하기 위한 기초자료로 활용가능하다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 고립파에 의한 연안지역에서의 침식 현상에 관한 기초 연구로 파고와 수심 특성을 고려하여 부유사 제송률을 분석하였다. 고립파에 의한 부유사의 불확실성을 고려한 정량적 예측으로 연안표사의 유실에 관한 연구가 국내에서는 전무하여 부유사 제송

률 개념을 이용한 분석을 수행하였다.

고립파의 재현은 일반적으로 사용되는 수문을 개방하여 발생시키는 방식을 수문개방속도를 고려하여 독자적으로 수리실험을 설계하여 수행하였다. 경사면에서의 고립파의 spilling, plunging 쇄파형태에 따라 결과 분석을 하였다. spilling 조건에서는 상대파고가 증가함에 따라 선형적으로 부유사 제송률이 증가하였으나 plunging 조건에서는 지수형태로 급격히 증가하였다. 이는 plunging에 의한 경사면에서의 유사 교란에 의한 것으로 판단된다. 연안지역에서의 침식 메커니즘에 관한 연구에서 경사면으로 입사하는 고립파의 특성을 분석하기 위한 기초연구로 활용이 가능하며, 향후 연안 지역 침식현상의 원인을 설명하는 자료로 활용이 가능하다. 또한 Bayesian 확률을 이용하여 부유사의 불확실성을 고려하였으며, image processing을 통하여 분석하기 위한 방안을 제시하였다. Bayesian 확률을 통하여 수리실험의 한계점이 개선 가능하며 현장계측에서의 결과에 대한 Bayesian 확률 적용이 가능 할 것이다.

향후 고립파 발생조건, 경사면의 경사도, 유사 특성 등에 따른 수리실험을 수행한다면, 본 연구결과와 함께 고립파의 특성과 경사면 부유사 제송률을 더욱 정확한 예측이 가능할 것이다. 또한 지진해일과 같은 수리실험을 수행할 시 본 연구의 수리실험 결과를 활용하여 연안지역에서 발생하는 침식현상 뿐만 아니라 구조물 안정성에 관한 문제를 해결할 수 있을 것이다.

**감사의글:** 이 성과는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2B201190)

#### References

- 1) A. F. Mostafa, "Role of Wave Pressure in Bedload Sediment Transport", Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, Vol. 129, No. 6, pp. 243-249, 2003.
- 2) 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.
- 3) H. A. Einstein, "The Bed-Load 함수 for Sediment Transportation." Open Channel Flow Technical Bulletin No 1026, 1950.
- 4) T. Takahashi, N. Shuto, F. Imamura and D. Asai, "Modeling Sediment Transport due to Tsunamis with Exchange Rate between Bed Load Layer and Suspended Load Layer", Coastal Engineering 2000, pp. 1508-1519, 2001.

- 5) L. C. Van Rijn, "Sediment Transport, Part II: Suspend Load Transport", *Hydr. Engrg., ASCE* 1104.11, pp. 1613-1641, 1984.
- 6) L. C. Van Rijn, "Sedimentation of Dredged Channels by Currents and Waves", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 112, Issue 5, pp. 541-559, 1986.
- 7) G. H. Lee, C. H. Kim, S. H. Jeong and D. S. Kim, "Wave Control by Submerged Breakwater under the Solitary Wave Action", *KSCE*, Vol. 28, No. 3B, pp. 323-334, 2008.
- 8) C. U. Lee, "Stability and Sliding Motion of Armor Units on Slopes of Coastal Structures", *Journal of KSCE*, Vol. 20. No. 1B, pp. 59-71, 2000.
- 9) T. J. Ahn, Y. T. Kim, S. H. Park and Y. S. Cho, "Experimental Study on Run-up of S-berm-Typed Rubble Mound Breakwaters", *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 147-153, 2006.
- 10) C. H. Kim, H. W. Ji, J. H. Bae and G. Y. Park, "Study on Failure Mechanism of Composite Breakwater due to Tsunami(Solitary wave)", *Conference of KSCE*, pp. 365-366, 2014.
- 11) Y. S. Cho, "Run-up and Evolution of Solitary Waves on Steep Slopes", *Journal of KWRA*, Vol. 28, No. 6, pp. 59-168, 1995.
- 12) Y. S. Cho and B. H. Lee, "A Study of Maximum Run-up Heights of Periodic Waves", *Journal of KWRA*, Vol. 32, No. 6, pp. 649-655, 1999.
- 13) T. H. Ahn, G. Y. Park and Y. S. Cho, "Run-up Heights of Nearshore Tsunami based on Quadtree Grids" *Journal of KWRA*, Vol. 36, No. 4, pp. 693-701, 2003.
- 14) C. H. Jeon, B. H. Lee and Y. S. Cho, "Characteristics of Solitary Waves Acting on Slopes", *Journal of KWRA*, Vol. 36, No. 5, pp. 779-786, 2002.
- 15) G. Carrier and H. Greenspan, "Water Waves of Finite Amplitude on a Sloping Beach", *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 97-109, 1958.
- 16) C. E. Synolakis, "The Run-up of Solitary Waves", *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 523-545, 1987.
- 17) Y. F. Xiao, M. D. Anderson and J. M. Fraser, "Photoluminescence Saturation Independent of Excitation Pathway in Air-suspended Single-walled Carbon Nanotubes", *Physical Review B* 89.23, 2014.
- 18) Y. Li and R. Fredic, "Non-breaking and Breaking Solitary Wave Run-up", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 456, 2002.