

서해안의 해저표면형상 예측 경험식 제안

김 효 섭* / 유 호 준** / 장 창 환***

Proposal of Empirical Formula for Bedform Size on West Coast of Korea

Kim, Hyoseob* / Yoo, Hojun** / Jang Changhwan***

요지 : 우리나라 서해 근해역 4개지역의 해저표면형상 자료를 분석하였다. 우리나라 서해안은 조차가 클 뿐 아니라 파랑 또한 상당히 크며, 해저질의 입도가 약 1.2 ~ 1.6 ϕ 의 분포로 상대적으로 입경이 큰 사질의 형태이다. 자료를 취한 해역에서의 수심은 10 ~ 65 meters로서 해저면의 표면형상이 잘 발달해 있는 편이며, 해저표면형상에서 모래결 길이(ripple length)는 약 6 ~ 13 meters 범위이다. 기존의 모래결 길이를 예측할 수 있는 예측식 중 파랑과 흐름이 공존할 때에 적용할 수 있는 예측식으로는 Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 가 있다. 조사한 모래결 길이를 이 두 식으로 예측한 결과 두 식 모두 실제 측정값보다 작은 값을 나타내었다. 이는 기존의 두 예측식이 우리나라 서해안과는 다른 해역에서 구한 자료로부터 얻은 식이거나 실험실에서 얻어졌기 때문으로 판단된다. 기존의 예측식에 일정한 보정계수를 곱하여 수정한 결과 우리나라 서해안에서 관측한 모래결 길이를 잘 표현할 수 있게 되었다.

핵심용어 : 해저표면형상, 모래결의 길이, 파랑과 흐름 공존, 보정계수

Abstract : Bedform data at 4 shallow zones in the Yellow Sea where waves as well as tidal range are high and bed material is relatively coarse were collected and analyzed here. Water depths in the study area where the bedform data were collected are 10 ~ 65 meters, and ripple lengths well developed are between 6 ~ 13 meters. Existing empirical formula for prediction of ripple length as for coexistence of waves and currents include Khelifa and Ouellet(2000) and Soulsby(2005), both of which have been based on laboratory measurements, or field measurements at different physical environment from the Yellow Sea with respect to tidal range, wave strength, and bed material. New scaling factors are proposed here for better prediction of the ripple length on coastal zone in the Yellow Sea.

keywords : bedform, ripple length, coexistence of waves and currents, scaling factor

1. 서 론

지금까지 해역에서의 해수유동 및 퇴적물 이동을 정확하게 예측하여 여러 방면으로 연구가 진행되었으며, 그 중에서도 해저면에 형성되는 해저표면형상을 예측하기 위한 노력도 있어왔다. 해저표면형상과 해저 조도(bed roughness)는 해수의

흐름, 해안 및 해양의 퇴적물이동과 인한 지형변화에 크나큰 영향을 미치므로 해저면 조도계수를 정확하게 예측하는 것은 매우 중요한 문제라고 할 수 있다(Catano and Garcia, 2006). 해저면 조도는 해저면 인근 파랑경계층 내의 복잡한 흐름을 해석하고자 할 때, 해저면 인근에서의 전단 응력을 산출하고자 할 때, 해저면으로부터 부상하는

+ Corresponding author : cjang@kipo.go.kr

* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · Email : hkim@kookmin.ac.kr

** 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 석사 · Email : atssa112@hanmail.net

*** 정회원 · 특허청 건설기술심사관 심사관/공학박사 · Email : cjang@kipo.go.kr

부유사랑을 산출하고자 할 때, 조류, 밀도류, 쓰나미, 해일등 해수유동장을 계산하고자 할 때, 퇴적물 이동과 지형변화를 예측하고자 할 때 필요한 변수로서, 관련 계산의 정밀도를 좌우할 핵심적인 변수로 인식되고 있다(Smith, 1977; Grant and Madsen, 1979,1982; Glenn and Grant, 1987; Wiberg and Nelson, 1992; Li, 1994). 해안에서의 저면 응력 및 해저면 조도 등의 변화는 크게 해안선 환경에서 와류 방출과 모래 재부유등의 영향을 미치는 것으로 판단한 연구도 제시되고 있다(Drake and Cacchione, 1989; Vincent, 1991; Li, 1996). 해저표면형상은 파랑의 영향을 받아 형성된 경우, 흐름만의 영향을 받아 형성된 경우, 파랑과 흐름의 영향을 동시에 받아 형성된 경우로 대별할 수 있다(김과 장, 2009).

많은 연구자들은 파랑만의 영향에 의하여 형성된 해저표면형상을 분석한 결과 파의 해저면 응력이 증가함에 따라 해저표면형상 중 모래결 길이 및 높이는 증가한다고 하였다. 이 단계에서의 모래결 길이는 파에 의한 수입자 궤도 직경에 비례하고 해저 형상과의 침도(steeptness)는 최대에 있으며 대략 변하지 않는다. 파의 저면응력이 더욱 증가되면 모래결 높이와 길이는 최대치에 도달하고 더 이상 증가하지 않는다. 모래결 길이는 대략 일정하게 유지되거나 약간 감소하는 동안 모래결 높이는 최대치에서부터 응력의 감소와 함께 줄어든다(Inman, 1957; Carstens, 1969; Mognridge and Kamphuis, 1972; Dingler, 1974; Miller and Komar, 1980; Boyd, 1988; Faraci and Foti, 2002). 파의 전단 응력이 일정시간이 지나 포상류(sheet flow) 흐름에 도달하면, 모래결은 사라지거나 상향면에 포상류가 발생되기도 한다. 많은 학자들은 이러한 특징을 수식화하여 파랑의 영향으로 형성된 해저면 형상을 예측하는데 사용해왔다(Nielsen, 1981,1992; Grant and Madsen, 1982; Wiberg and Harris, 1994). 하지만 파랑만에 의한 영향으로 분석한 경우 복잡한 흐름에서의 실험적 자료와의 분석에 적용하는 범용적 해석은 어렵다.

흐름만의 영향에 의하여 형성되는 해저면 형태, 퇴적물형상, 모래결 길이 및 높이의 크기에 관한 연구도 별도로 진행되어 왔다. 연구들에 의하면 수심은 해저면 형상에 있어 제한적 변수로 작용하고, 흐름의 변수 중 유량의 크기가 해저면 형상의 주요 요인이라고 말한다. 또한 하상 전단응력이 증가할수록 해저 형상과의 침도는 점진적으로 증가하다가 전단응력의 감소와 함께 급격히 줄어든다는 주장을 제시한다(Yalin, 1964; Simons and Richardson, 1960; Mclean, 1990). 하지만 흐름만의 영향에 의하여 해저면 형상을 예측할 수 있더라도 이 관계를 파랑과 흐름이 공존하는 경우에는 확대적용 할 수 없다.

파랑과 흐름의 공존시 해저면 형상 및 조도를 예측한 경우는 대표적으로 Davies and Villaret(2002), Khelifa and Ouellet(2000), Soulsby(2005), Li and Amos(1998)을 들 수 있다. 이 중 기존 모델과 개발된 모델의 측정치를 비교하여 오차범위를 개선한 경험적 상수를 제시한 것으로 구체적인 예측을 생략하고 조도에 관하여서만 취급하였으므로 Davies and Villaret 은 본 연구에서는 언급하지 않기로 한다. 경계층 내의 유속, 파랑의 주기, 파고, 파의 입사각등을 입력조건으로 사용하고 기존의 연구자의 검토된 식과 비교한 Khelifa and Ouellet 과 여러 해역에서의 검토된 자료를 바탕으로 실제해역에서의 경험적 상수를 제시한 Soulsby 와는 다르게 실제 해역에서의 비교하였으나 파랑과 흐름의 입사각을 입력조건에서 무시하고 파랑과 흐름이 동일한 방향에서 흐를 때 모래결의 높이, 길이 및 침도를 예측할 수 있는 제한된 조건에서의 식을 제시한 Li and Amos 의 경우는 본 연구에서 고려하지 않기로 한다.

해외의 경우 캐나다의 위치한 Sable Island Bank 의 지역에서 파랑과 흐름의 공존시 해저면 형상을 관측 후 Khelifa and Ouellet(2000)의 식으로 예측하여 비교한 사례가 있다. 표준화된 해저표면 형상의 모래결 길이 및 높이는 파랑만의 영향에 의한 형상을 범용적으로 해석한

Nielsen(1992)의 예측 식보다는 크고, Khelifa and Ouellet 의 예측식과 잘 부합하다고 하였다 (Smyth and Li, 2005).

반면 우리나라 해안에서의 기존의 연구는 대부분 퇴적물의 특성에 관한 연구로서 저자가 아는 한 퇴적물의 특성에 추가하여 해저표면형상을 연구한 사례가 전무한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 우리나라 해안 중 계절적으로 발생하는 폭풍 및 태풍 등이 매우 복잡하게 나타나는 서해안 중 대표지역(경기안산 풍도 인근, 태안 앞바다, 선감도 인근, 어청도 인근)에서의 기존의 해저표면형상 관측 자료를 모아 이들의 특성을 파랑과 흐름의 공존시 해저면 형상을 예측한 Khelifa and Ouellet 와 Soulsby 의 예측식으로 분석하기로 한다.

선정된 대표지역의 해저표면형상은 골채채취 및 규사채광을 위한 해역이용협약서 보고서((주)장강산업개발, 2011; 한국골지협회인천지회, 2009; 한국 수자원공사, 2009; 충남골재협회, 2011)에서 확보하였다. 위 보고서에 제시된 해저지형도 및 해저표면형상을 분석하고 모래결의 길이를 측정하였다. 파랑과 흐름 공존시의 형성되는 해저면 형상 예측식을 사용하여 대상해역에서의 표면형상을 예측하여 보며, 현장관측 자료 재현 정도를 검토하기로 한다.

2. 해저표면형상 자료

2.1 자료의 근거

본 논문에서 우리나라 서해안에서 해역의 특성에 관한 연구 내용 중 해저표면형상 자료는 4권의 기존 자료조사 보고서로부터 구하였다. 기존자료의 취득 대상 해역은 우리나라 서해의 경기도 안산시 풍도인근 해역, 경기만 인근 용진군 선감도 남남동쪽 10.0 km 지점해역, 태안군 관할해역, 서해 태안 앞바다 인근 어청도 등 총 4 지역이다(Fig. 1참조). 해저표면 형상인 모래결은 대상해역의 표층퇴적물의 특성과 관계가 있으므로 이

러한 퇴적물 특성을 조사선을 설정하여 조사한 자료가 가용되었다. 이러한 표층퇴적물 자료는 퇴적물의 교란을 방지하기 위해 건조시에 라이너(Linar)를 퇴적물 속에 삽입하여 1.0 m 이내의 퇴적물 시료를 채취한 현장에서 상하부를 스트로폼 마개를 이용하여 밀폐시킨 후 테이프로 밀봉하여 실험실로 운반, 표층퇴적물의 항목에 준하여 층별로 시료를 분석한 결과이다. 태안인근의 해저표면 퇴적물의 분석결과 비교적 일정한 사질의 형태이며 평균입도가 1.78 ϕ 이었다. 풍도 인근의 해저표면 퇴적물은 사질 우세 해역이고 평균입도는 1.66 ϕ , 선감도 인근은 사질 우세 해역으로 조사되어 있고 평균입도는 1.22 ϕ , 어청도 인근은 비교적 일정한 사질의 형태를 보이고 평균 입도가 1.89 ϕ 로 대부분의 지역이 분급도가 나쁜 편으로 조사되었다. 입도 등급은 아래의 식을 사용하여 입자의 직경으로 변환 후 해저표면형상 예측식에 적용된다.

$$\phi = -\log_2(d_{50}) \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 입도 조직변수 중 입도 등급, d_{50} 는 평균 입경[mm]이다.

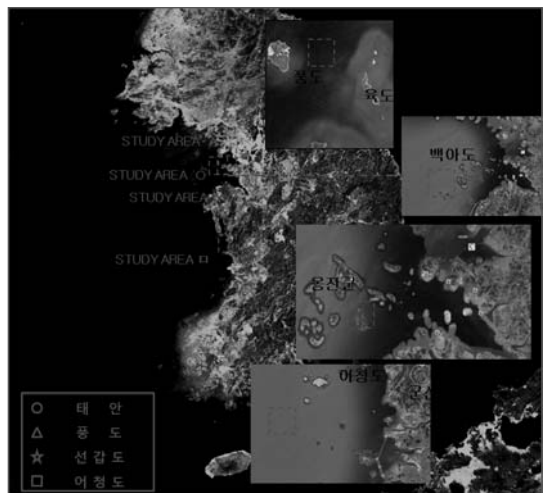


Figure 1. Location of Study Area

2.2 기존 해저면형상 자료의 측정 장비

본 논문에서 사용한 해저면형상자료 중 모래결 길이(ripple length)는 Reson(U.S.A)사에서 제조된 모델명 Seabat 8124인 다중빔 음향측심기(Multibeam Echo Sounding Survet)와 DSME E&R 제조사의 Side Scan Sonar Survey 로 관측된 정밀표면수심 및 형상으로부터 구하였다. 선박의 움직임을 파악할 수 있는 자이로 컴퍼스, 모션센서 및 해수의 물리적 특성을 예측하여 수중 음속도를 산출하는 음속도 측정기가 부가적으로 사용된다. 모든 기기들은 GPS 시각으로 동기화되어 있으며, 각 각의 시스템들은 자료처리함수 및 성과함수들이 포함된 소프트웨어에 의하여 제어된다. 다중빔 음향측심 시스템은 복수의 소나 트랜듀서 배열로 구성되어 있으며, 각 소나 배열의 위상차를 조절하여 지향각을 갖는 매우 좁은 빔을 생성한다. 전자적으로 생성되는 다중의 빔을 사선방향으로 투사하여 조사선박의 현방으로 수심의 3 배 이상 거리까지 수심을 동시에 측정한다. 사선방향으로 투사된 빔이 수온경계층에서 굴절되므로, 물리적 해양특성에 대한 정보가 실시간 요구되며, 현 방향으로 탐사하기 때문에 정확한 선수방향 및 탐사선의 움직임을 대한 계측이 필요하

다. 이를 위하여 정밀 전자 계측 장비의 통합시스템 DGPS 와 연계되어 운영된다. 자료 처리는 국립해양조사원의 자료를 이용하여 조위 보정을 실시하였으며, 수심별 연속수증음파 전달 속도를 이용하여 수층 내에서의 속도변화를 보정, 실제 수심에 가장 근접한 값을 획득하였고, 위와 같은 결과의 자료를 본 연구에서 사용하였다(Fig. 2참조, Table. 1 ~ 2참조). 해저면 측사는 조사선 스크류에서 발생하는 수중 물거품을 최소화시키기 위하여 수중 예인체(Tow-fish)를 조사선 후미에서 약 10m 정도 이격시켜 수행된 조사이며, 400 kHz의 주파수가 사용된 고해상도 영상을 획득하였다. 본 자료는 스왈스(swath)의 50 %에 해당하는 간격의 측선을 설정하여 모든 지역이 200 %의 유효지역 중복비율을 갖는다. 획득된 자료는 XTF 형태로 되어 있으며, SonarWiz Map 소프트웨어의 포맷으로 변환하여 자료처리에 이용되었다. 획득된 해저면 측사 자료는 속도보정과 경사거리 보정을 실시한 후, 모든 음향 영상 자료를 종합하여 모자이크(Mosaic)음향영상을 작성하였다. 모자이크 영상 위에 좌표계를 결합하여 해저면 측사 영상 도면이 완성되었고, 본 연구의 해저면 형상 중 모래결 길이의 측정에 사용되었다(Fig. 3~4참조).

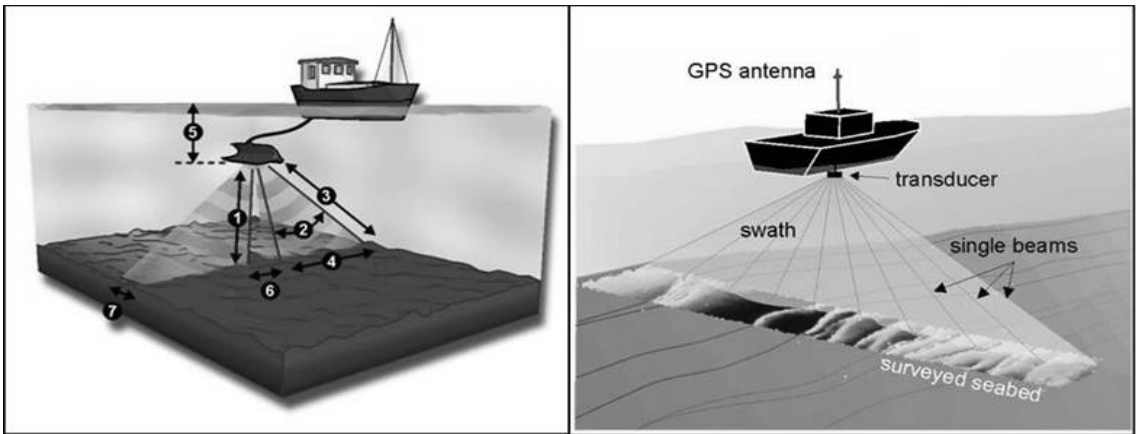



Figure 2. Methods of seabed exploration

Table 1. Specifications of Multibeam Echosounder

구 분	내 용
모델명	Seabat 8124
제작사	Reson(U.S.A.)
소나 주파수	200 kHz
관측최대수심	300 m
관측거리비율	3.5 배
거리분해능	1 cm
장비	

Table 2. Specifications of underwater sound velocity meter

구 분	내 용
모델명	SVP 15
최대 수심 범위	200 m
음속도 범위	1,350~1,600 m/s
장비	

2.3 측정 결과

조사된 지역 중 대표적으로 경기 안산 풍도 인근해역을 해저면 측사 모자이크 도면은 CAD의 UTM 좌표계에 적용되어 나타낸 것이고 본 연구의 해저표면형상 예측식과의 비교에 사용되었다. 측사 영상은 대규모 모래결은 물론 소규모의 모래결까지도 잘 나타내었다. 해저면 측사 영상을 각

종 보고서에서 참조 후 각 지역에서의 평균을 산정하였고, 모래결 길이의 측정 길이의 예시는 다음과 같다(Fig. 4 A-A'참조). 대부분 6 ~ 12 m 정도의 모래결의 길이가 측정되었으며 이는 추후에 Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 해저표면형상 예측식에 각 해역에서의 초기조건을 적용, 실제해역의 측정치와 해저표면형상 예측식의 이론치를 비교하는데 사용된다.

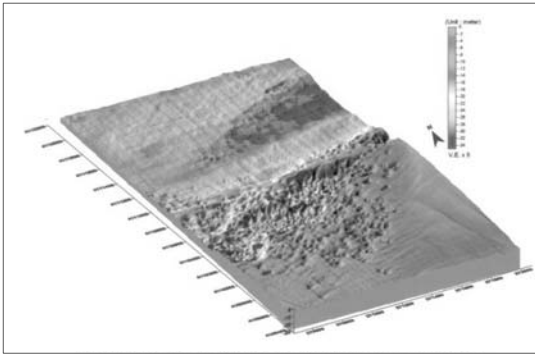


Figure 3. Three-dimensional submarine topography with bedforms (Near PungDo area, Depth : D.L. base)

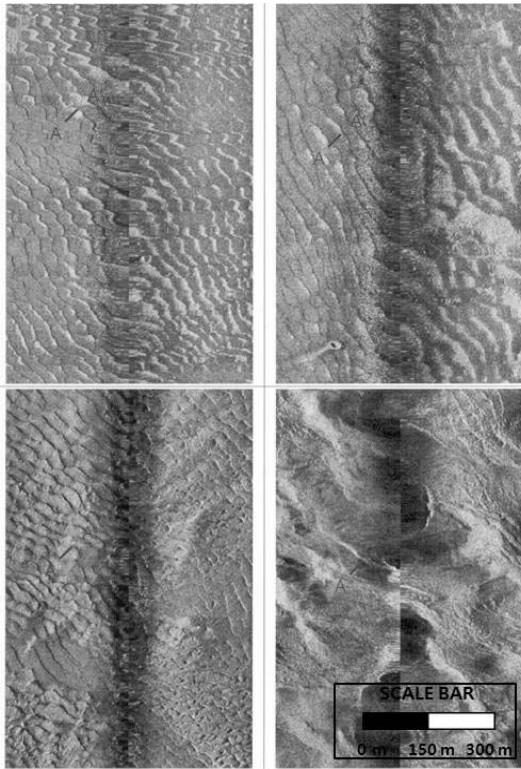


Figure 4. Observed bedforms at PungDo area

3. 특정한 해저형상길이와 예측식과의 비교

3.1 Khelifa and Ouellet 의 경험식

Khelifa and Ouellet(2000)는 실험실의 2차원

조파수조를 활용, 파랑과 흐름의 공존 시 해저표면형상 중 모래결 길이를 측정하고 측정된 자료와 여러 이론자들의 경험식을 비교 후 새로운 예측식을 제시하였다.

$$d_{wc} = (d_w^2 + (T\bar{u}_\delta)^2 - 2d_w(T\bar{u}_\delta)\cos\theta)^{0.5} \quad (2)$$

여기서 d_{wc} 는 길이의 척도, d_w 는 경계층 가장자리의 유체 입자 궤적의 직경, T 는 파랑주기, \bar{u}_δ 는 파랑경계층 가장자리에서 유속이다. \bar{u}_δ 를 수심평균 유속 \bar{u} 으로 변환하고, d_w 를 $U_\delta T/\pi$ 로 변환하면 위 식은 식 (3)과 식 (4)로 변환될 수 있다.

$$d_{wc} = TU_{wc}^{0.5} \quad (3)$$

$$U_{wc} = \left(\frac{U_\delta}{\pi}\right)^2 - \bar{u}^2 + 2\frac{U_\delta\bar{u}}{\pi}\cos\theta \quad (4)$$

여기서 U_{wc} 는 파랑과 흐름 혼합시 유속, U_δ 는 경계층 가장자리에서의 유속, \bar{u} 는 수심평균 유속, θ 는 파랑과 흐름이 상호작용하는 각도이다. 흐름과 연계된 모래결 길이와 높이는 각도 θ 에 대하여 대칭적인 모습을 보인다. 이러한 특성은 식 (4)에는 표기되지 않기 때문에 U_{wc} 는 다음과 같이 사용하는 경우가 있다.

$$U_{wc} = \left(\frac{U_\delta}{\pi}\right)^2 - \bar{u}^2 + 2\frac{U_\delta\bar{u}}{\pi}|\cos\theta| \quad (5)$$

$||$ 는 절대치를 표시하는 구간이다. 또한, 식 (3)과 식 (5)를 연계하여 흐름과 관계된 매개변수인 ψ_{wc} 가 간단히 정리된다.

$$\psi_{wc} = \frac{U_{wc}^2}{(s-1)gD} \quad (6)$$

Khelifa and Ouellet 은 Tanak and Dang(1996)이 제안했던 모래결 길이 예측식을

분석 후 변수를 조정하여 해저면 형상에 관한 새로운 예측식을 제안하였다.

$$\frac{2\lambda}{d_{wc}} = 1.9 + 0.08\text{Ln}^2(1 + \psi_{wc}) - 0.74\text{Ln}(1 + \psi_{wc}) \quad (7)$$

본 예측 식은 파도와 흐름이 비스듬하거나 수직인 경우에도 적용이 가능하다. 그러나 실험실 실험 자료는 단주기(0.9 ~ 4.2 s)파랑에 대하여만 실험을 수행한 결과로서 현장에 대하여서는 비교한 바가 없다.

3.2. Soulsby 의 경험식

Soulsby 는 취득된 3500개 이상의 많은 자료를 해저면형상 자료를 바탕으로 실험실에서의 동일한 조건에서 재현한 후 흐름에 대한 모래결 길이, 파랑에 대한 모래결 길이, 파랑과 흐름의 공존시 모래결 길이, 모래결의 형태 등을 분석한 바가 있다. 이를 토대로 파랑과 흐름 공존시 다음과

같은 마찰면 계수를 사용하였다.

$$\theta_c = \tau_c / [(\rho_s - \rho)gd_{50}] \quad (8)$$

$$D_* = d_{50} [(s - 1)g/\nu^2]^{(1/3)} \quad (9)$$

여기서 D_* 는 무차원 입경계수, d_{50} 는 평균 입경, $s = \rho_s/\rho$, ν 는 물의 동점성계수, τ_c 는 바닥면 마찰크기, ρ 그리고 ρ_s 는 물의 밀도와 각 각의 침전물 밀도, g 는 중력가속도이다. 이 계수를 결정하는 식은 Kleinhans(2005)에 무차원 입경계수 산정식에 의하여 결정되었다. Soulsby가 제시한 파랑과 흐름 공존시 해저면형상 중 모래결 길이 예측 경험식은 다음과 같다.

$$\lambda = a \cdot d_{50} \cdot \exp(-b \cdot D_*^2) \quad (10)$$

여기서 λ 은 모래결 길이, a, b 는 기존의 분석된 자료를 바탕으로 산정한 경험계수이다. 모래결 길이 예측식에 적용된 경험계수는 다음과 같다.

Table 3. Suggested coefficient values for a and b of Soulsby's equation

Percentile	Currents		Waves		Currents+Waves	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
50 th	1000	0.0029	1100	0.0016	2500	0.006
90 th	1500	0.001	2800	0.004	3800	0.0048

그러나 Soulsby의 예측식은 주로 유럽의 천이역에서 계측된 자료를 통합한 데이터베이스로부터 바탕으로 산정한 식으로서, 주로 소규모 해저표면형상(모래결 길이 : 1.0 m 이하, 평균 0.2 m)을 대상으로 산정한 해저표면형상 예측식이다. Soulsby의 예측식의 가장 큰 특징은 해저면 저질의 입경이 해저면 형상에 큰 영향을 미친다는 것이다. 경험식의 근거가 되는 자료군이 특정해역에만 국한되어 있는 경우, 입경, 파랑장, 조류장의 규모가 다른 경우에는 경험식의 일반성이 떨어질 우려가 있으므로, 우리나라 서해안의 해저표면형

상에 적용시 경험식의 확인이 필요하다.

4. 비교 결과

실제 해역에 정밀한 해저면 형상을 기존의 4개의 보고서를 통하여 분석하였다. Khelifa and Ouellet(2000)과 Soulsby(2005)의 해저표면형상 중 모래결 길이 예측에 적용될 변수들 중 수심, 입경 등은 각 각의 해역에서의 조사된 보고서 자료를 바탕으로 적용하였고, 파고 및 주기는 해상 파랑관측 및 조사(해양조사원, 2003)와 각 지역의

보고서에 포함된 파랑벡터도 및 내용 등을 참조하였다. 모래결 길이의 각도는 보고서의 그림을 참조하여 파악하였다. 또한, 조류속은 기존 4 편의 보고서의 관측일시 중에서 평균대조기의 최대 유

속값을 취하여 사용하였으며, 공간적인 변화가 있는 경우에는 국립해양 조사원의 동일위치 자료를 보간하여 사용하였다.

Table 4. Comparison of measured and calculated results

No (ST)	Area	Depth (m)	Wave Height (m)	Current velocity (m/s)	Period (sec)	Anale (Degree)	D_{50} (mm)	Kinematic viscosity (m^2/s)	Measured Ripple Length (m)	Khelifa & Oullet exp formula (m)	Soulsby exp formula (m)
1	Pung Do	23.07	1.24	1.25	6	45	0.31	1.00×10^{-6}	7.63	1.32	0.54
2	Pung Do	23.69	1.43	1.19	6	30	0.31	1.00×10^{-6}	6.87	1.19	0.54
3	Pung Do	25.33	1.31	1.19	6	10	0.31	1.00×10^{-6}	7.58	1.17	0.54
4	Pung Do	25.09	1.21	1.27	6	45	0.34	1.00×10^{-6}	9.61	1.40	0.55
5	Pung Do	20.17	1.30	1.19	6	45	0.46	1.00×10^{-6}	6.82	0.94	0.51
6	Pung Do	20.19	1.29	1.23	6	60	0.32	1.00×10^{-6}	9.11	1.30	0.54
7	Pung Do	17.68	1.33	1.41	6	30	0.37	1.00×10^{-6}	6.81	2.06	0.55
8	Uchung Do	65	1.5	1.04	7.3	10	0.37	8.94×10^{-7}	4.41	1.1	0.51
9	Taeang-Gun	45	1.5	1.17	5	45	0.22	1.14×10^{-6}	6.38	1.20	0.47
10	Taeang-Gun	65	1.5	1.31	5	45	0.15	1.17×10^{-6}	9.61	1.89	0.36
11	Taeang-Gun	40	1.5	1.14	5	60	0.15	1.22×10^{-6}	6.51	1.35	0.36
12	Taeang-Gun	40	1.5	1.23	5	60	0.14	1.29×10^{-6}	6.25	1.85	0.34
13	Sungab Do	10	1.44	1.42	5.56	10	0.45	1.63×10^{-6}	12.04	2.25	0.75
14	Sungab Do	25	1.58	1.32	5.56	10	0.41	1.61×10^{-6}	8.75	1.44	0.73
15	Sungab Do	40	1.58	1.43	5.56	11	0.44	1.63×10^{-6}	9.52	1.82	0.75
16	Sungab Do	41	1.61	1.44	5.56	9	0.38	1.57×10^{-6}	10.43	1.88	0.70
17	Sungab Do	35	1.75	1.40	5.56	8	0.48	1.58×10^{-6}	9.88	1.54	0.74
18	Sungab Do	55	1.77	1.50	5.56	9	0.31	1.62×10^{-6}	11.21	2.00	0.64
19	Sungab Do	47	1.78	1.40	5.56	10	0.35	1.59×10^{-6}	10.48	1.74	0.72
20	Sungab Do	32	1.83	1.34	5.56	10	0.39	1.59×10^{-6}	9.01	1.40	0.73
21	Sungab Do	34	1.87	1.37	5.56	9	0.42	1.57×10^{-6}	9.48	1.52	0.72
22	Sungab Do	43	1.90	1.40	5.56	7	0.39	1.58×10^{-6}	10.26	1.74	0.72
23	Sungab Do	48	1.93	1.45	5.56	4	0.38	1.59×10^{-6}	10.99	2.00	0.70
24	Sungab Do	60	1.97	1.59	5.56	5	0.36	1.52×10^{-6}	12.55	2.85	0.67

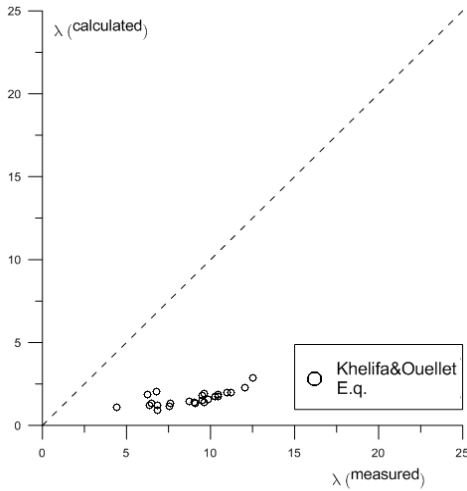


Figure 5. The results of experience Khelifa and Ouellet equation

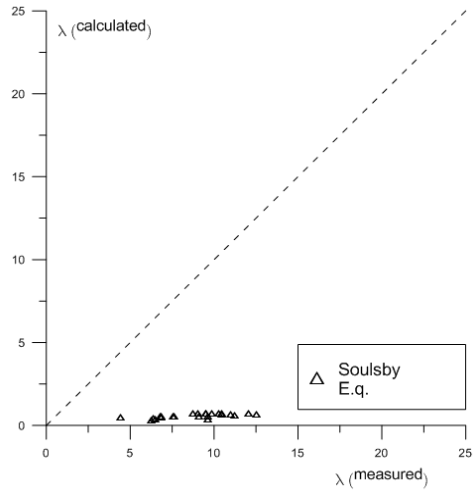


Figure 6. The results of experience Soulsby equation

각 예측식에 변수들을 입력하여 적용한 결과 모래결 길이는 유속에 큰 연관성이 있다고 판단되었다. 유속의 변화량이 클수록 모래결 길이는 그 크기가 더욱 증가하고, 형상 또한 또렷함을 해지면 형상 자료를 통하여 확인할 수 있었다. Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 경험식을 실제 해지면 형상의 모래결 길이와 비교한 결과 실제 현장자료와 경향은 비슷하였으나, 전체적으로 과소 평가하는 결과를 얻었다. 이는 기존의 두 경험식이 실험실 자료 및 특정해역에서의 자료를 기반으로 하였기 때문으로 추측된다. Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 경험식은 실제 천이역 수심에 적용 시 계수 조정이 필요한 것으로 판단되었다(Table. 4, Fig. 5 ~ 6참조).

4.2 계수조정제안

적용 결과 모래결 길이는 조류속의 크기에 큰 연관성이 있다고 분석되었다. 유속이 클수록 모래결 길이는 그 크기가 더욱 증가하고, 형상 또한 또렷함을 해지면 형상 자료를 통하여 확인할 수 있었다. 파랑과 흐름의 공존시 해저표면형상 예측식 적용결과도 그와 동일하였으나, 실험실 자료

및 특정해역에서의 적용된 자료를 기반으로 하였기에 계측된 모래결 길이와는 다소 차이가 있었으므로 Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 경험식은 실제 우리나라 서해의 천이역 수심에 적용시 계수 조정을 제안한다. 계수조정은 각 실험역 자료의 분포를 파악 후 적절히 계수조정안을 제시하였고, 실측지와 비교하였다. 계수조정 후 적용 결과 자료의 위치에 따른 분포차이는 존재하였으나, 실제 해역의 모래결 길이와 매우 유사한 경향을 나타내었음을 확인하였다. 실제해역의 해저표면형상 중 모래결 길이와 Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 해저표면형상 예측식의 상관계수를 아래의 식을 적용하여 분석하였다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (11)$$

여기서 r_{xy} 는 x, y 사이의 상관계수, \bar{x}, \bar{y} 는 각각 x, y 의 평균값, s_x, s_y 는 각각 x, y 의 표준편차이다. 상관계수 r_{xy} 는 부등식 $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ 을 만족시키며, 상관계수가 1에

가까울수록 자료의 분포도는 양호하다. 경험식에 적용하여 분석결과 Khelifa and Ouellet 경험식과 현장분석 자료의 상관계수는 0.64였고, Soulsby

의 경험식과 현장분석 자료의 상관계수는 0.66으로 두 식 모두 현장분석 자료와 상관관계가 매우 유의하다고 사료된다.

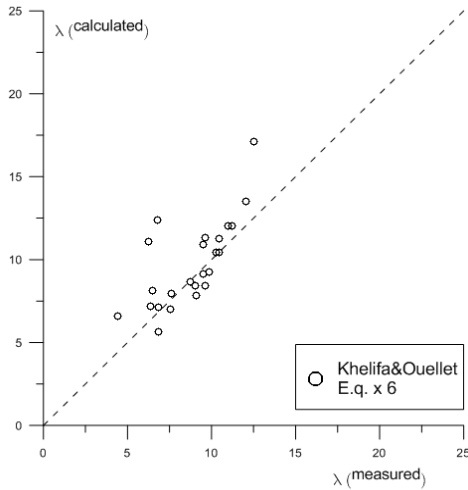


Figure 7. Application of the adjusted results of the experience Khelifa and Ouellet equation($\times 6$)

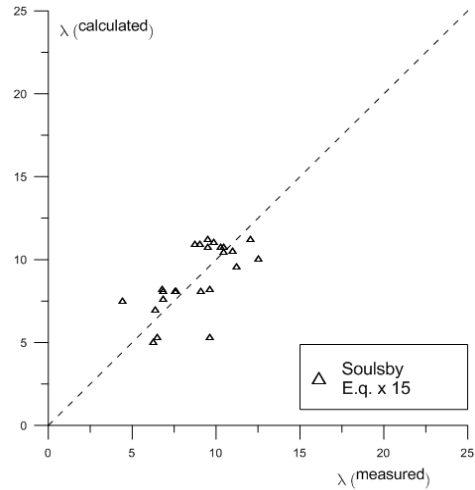


Figure 8. Application of the adjusted results of the experience Soulsby equation($\times 15$)

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 4편의 보고서에 제시된 Side Scan Sonar 및 MultiBeam Echo Sounder를 이용한 현장 해저지형 자료로부터 해저표면형상자료를 독취하여 활용하였다. Khelifa and Ouellet(2000)과 Soulsby(2005)의 경험식에 적용될 계수들 중 수심과 입경, 각 각의 해역에서의 조사된 자료로부터 구하였고 파고 및 주기는 해상파랑관측 및 조사(해양조사원, 2003)를 참조하였으며, 조류속은 기존 4편의 보고서의 관측일시 중에서 평균대조기의 최대 유속값을 취하여 사용하였으며, 공간적인 변화가 있는 경우에는 국립해양조사원의 동일위치 자료를 보간하여 사용하였다. 적용 결과 모래결 길이는 조류속의 크기에 큰 연관성이 있다고 분석되었다. 유속이 클수록 모래결 길이는 그 크기가 더욱 증가하고, 형상 또한 또렷함을 해저면 형상 자료를 통하여 확인할 수 있었

다. Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 예측식을 실제 해저면 형상의 모래결 길이와 비교한 결과 경향은 비슷하였으나 전체적으로 과소평가하는 결과를 얻었다. 이는 기존의 두 경험식이 실험실 자료 및 천해에 적용된 자료를 기반으로 하였기 때문으로 추측된다. Khelifa and Ouellet 과 Soulsby 의 예측식은 실제 우리나라 서해의 천이역 수심에 적용 시 계수 조정이 필요한 것으로 판단되었다. 기존의 경험식에 계수를 취하였으며, 이 조정 경험식으로부터 예측한 해저면 형상 길이는 자료의 위치에 따른 차이는 존재하였으나, 실제 해역의 모래결 길이와 매우 가까운 값을 나타내었다. 실제해역의 모래결 길이와 위 두 예측식을 적용하여 예측한 모래결 길이와의 상관계수를 구하였으며 현장자료와 Khelifa and Ouellet 예측식의 상관계수는 0.64였고, 현장자료와 Soulsby의 경험식 상관계수는 0.66으로 상관관계가 매우 유의하다고 사료된다. Soulsby 의 경험식에서 해

저면 입경이 주로 큰 영향을 미침에도 불구하고 Khelifa and Ouellet 의 경험식과 거의 같은 상관 계수를 보이는 것은 파랑, 조류와 같은 여러변수의 영향이 입경에 이미 간접적으로 반영되었기 때문으로 추정된다. 하지만, 다양한 해역에서 천이 역에서의 모래결 길이를 측정하고 자료를 취득하였다는 것은 매우 의미 있게 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 타 해역에도 유용하게 적용되리라 예상된다. 서해안 인근의 다양한 해역을 적용하였으나 계측된 자료가 많지 않았기에 추후 후속 논문을 통한 다양한 해역에서의 분석이 필요하다. 또한, 해저표면형상의 첨도(steeptness) 및 모래결 높이(ripple height)에 관하여서도 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 재원으로 “(재)한국해양과학기술진흥원”의 지원을 받아 수행된 “인공구조물 설치/제거에 의한 해양환경 예측모델링 기술개발”의 연구결과 중 일부이고, 2012년 국민대학교 교내연구비 지원 사업으로 이루어졌습니다. 또한, 보고서의 내용이 일부 포함된 (주)장강산업개발, 한국골재협회인천지회, 한국수자원공사, 충남골재협회에도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김효섭, 장창환, 2009. 범용 파랑·흐름 공존시 비점착성 퇴적물이동 예측식. 한국해양·해양공학회 논문집. 6권, pp 462-469.
2. 장강산업개발(주). 2011. 경기안산풍도 43·44 광구규사채광을 위한 해역이용협의서.
3. 충남골재협회. 2011. 태안군 관할해역 바다골재채취사업 해역이용영향평가서.
4. 한국골재협회인천지회. 2009. 옹진군 관할해역 해사채취사업 해역이용영향평가서.
5. 한국수자원공사. 2009. 서해 EZZ 골재채취단지 변경지정 해역이용영향평가서.

6. 해양조사원. 2003. 해상파랑 관측 및 조사.
7. Bijker, E.W. 1971. Longshore transport computations. Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, American Society of Civil Engineers Vol 97, pp. 687-701.
8. Boyd, R. and Forbes, D.L. and Heffler, D.E. 1988. Time-sequence observations of wave-formed sand ripples on an ocean shoreface. Sedimentology Vol 35, pp. 449-464.
9. Catao-Lopera, Y. A. and Garcia, M. H. 2006. Geometry and migration characteristics of bedforms under waves and current. Part 1: Sandwave morphodynamics. Coastal. Eng., Elsevier. Vol 53, pp. 767-780.
10. Carstens, M.R. and Neilson, R.M. and Altinbilek, H.D. 1969. Bedforms generated in the laboratory under oscillatory flow: analytical and experimental study. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum 28, 39 pp.
11. Davies, A.G. and Li, Z. 1997. Modelling sediment transport beneath regular symmetrical and asymmetrical waves above a plane bed. Continental Shelf Research Vol 17 (5), pp. 555-582.
12. Davies, A.G. and Villaret, C. 2002. Prediction of sand transport rates by waves and currents in the coastal zone. Journal of Continental Shelf Research Vol 22 (C1), pp. 2725-2737.
13. Daltymple, R. W. and Knight, J. R. and Lambiase, J. J. 1978. Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. Nature Vol 275, pp. 100-104.
14. Dingler, J.R. 1974. Wave formed ripples

- in nearshore sands. Ph.D Thesis, University of California, San Diego, 136 pp.
15. Drake, D.E. and Cacchione, D.A. 1989. Estimates of the suspended sediment reference concentration (C_a) and resuspension coefficient (c) from near-bed observations on the California shelf. *Continental Shelf Research* Vol 9, pp. 51-64.
 16. Farci, C. and Foti, E. 2002. Geometry, migration and evolution of small-scale bedforms generated by regular and irregular waves. *Coastal Eng., Elsevier*. Vol 47, pp. 35-52.
 17. Glenn, S.M. and Grant, W.D. 1987. A suspended sediment stratification correction for combined wave and current flows. *Journal of Geophysical Research* Vol 92, pp. 8244-8264.
 18. Grant, W.D. and Madsen, O.S. 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research* Vol 84, pp. 1797-1808.
 19. Grant, W.D. and Madsen, O.S. 1982. Moveable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research* Vol 87, pp. 469-481.
 20. Grasmeijer, B. T. and Kleinhans, M. G. 2004. Observed and predicted bedforms and their effect on suspended sand concentrations. *Coastal Eng., Elsevier*. Vol 51, pp. 351-371.
 21. Inman, D.L. 1957. Wave-generated ripples in nearshore sands. U.S. Army Corps Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo. 100, Washington, D.C., 66 pp.
 22. Khelifa, A. and Ouellet Y. 2000. Prediction of Sand Ripple Geometry Under Wave and Currents. *J.Waterw. Port Coast and Ocean Eng., ASCE*, Vol 126(1)(2000), pp. 14-22.
 23. Li, M.Z. 1994. Direct skin friction measurements and stress partitioning over movable sand ripples. *Journal of Geophysical Research* Vol 99, pp. 791-799.
 24. Li, M.Z. and Wright, L.D. and Amos C.L. 1996. Predicting ripple roughness and sand resuspension under combined flows in a shoreface environment. *Marine Geology* Vol 130, pp. 139-161.
 25. Li, M. Z. and Amos, C. L. 1998 Predicting ripple geometry and bed roughness under combined waves and currents in a continental shelf environment. *Journal of Continental Shelf Research* Vol 18 (C1), pp. 941-970.
 26. Mclean, S.R. 1990. The stability of ripples and dunes. *Earth-Sci. Rev.*, 29, pp. 131-144.
 27. Miller, M.C. and Komar, P.D. 1980. A field investigation of the relationship between oscillation ripple spacing and the near-bottom water orbital motion. *Journal of Sedimentary Petrology* Vol 50, pp. 183-191.
 28. Mogridge, G.R. and Kamphuis, J.W. 1972. Experiments on bed-form generation by wave action. In: *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conf., ASCE, Vancouver*, pp. 1123-1142.
 29. Nicholson, J. and Broker, I. and Roelvink, J. A. and Price, D. and Tanguy, J. M. and Moreno, Li. 1997. Intercomparison of coastal area morphodynamic models. *Coastal Engineering, Elsevier*. Vol 21, pp. 97-123.
 30. Nielsen, P. and Svendsen, I. and Staub, C. 1978. Onshore-Offshore sediment movement on a beach. *Coastal Eng., Chapter* Vol 87,

- pp. 1475-1492.
31. Nielsen, P. 1981. Dynamics and geometry of wave-generated ripples. *Journal of Geophysical Research* Vol 86, pp. 6467-6472.
 32. Nielsen, P. 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *World Sci., River Edge, NJ*.
 33. Rakha, K. A. and Deigaard, R. and Broker, I. 1997. A phase resolving cross shore sediment transport model profile evolution. *Coastal Eng., Elsevier, Vol 31*, pp. 231-261.
 34. Simon, D.B. and Richardson, E.V. 1960. Resistance to flow in alluvial channels. *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 86(HY5)*, pp. 73-99.
 35. Smith, C.E. and Li, M.Z. 2005. Wave-current bedform scales, orientation, and migration on Sable Island Bank. *Journal of Geophysical Research, Vol 110, C02023*.
 36. Smith, J.D. 1977. Modelling of sediment transport on continental shelves. In: Goldberg et al., E.D. (Eds), *The Sea, Vol. 6*. pp. 539-577.
 37. Soulsby, R. L. 2005. Prediction of ripple properties in shelf seas. HR Wallingford. Report TR 150.
 38. Sunamura, T. 1984. Onshore-Offshore sediment transport rate in the swash zone of laboratory beaches. *Coastal Engineering in Japan., Vol. 27*.
 39. Tsujimoto, G. and Hayakawa, N. 1986. Modeling of Onshore-Offshore sediment transport mechanism under the presence of vortical motion. *Coastal Engineering in Japan., Vol. 29*.
 40. Tanaka, H. and Dang, V.T. 1996. Geometry of sand ripples due to combined wave-current flows. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, Vol 122(6)*, pp. 298-300.
 41. Van Rijn, L. C. 1984. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering Vol 110(12)*, pp. 1733-1754.
 42. Vincent, C.E. and Hanes, D.M. and Bowen, A.J. 1991. Acoustic measurements of suspended sand on the shoreface and the control of concentration by bed roughness. *Marine Geology Vol 96*, pp. 1-18.
 43. Wiberg, P.L. and Nelson, J.M. 1992. Unidirectional flow over asymmetric and symmetric ripples. *Journal of Geophysical Research Vol 97*, pp. 12,745-12,761.
 44. Whitmeyer, S. J. and Fitzgerald, D. 2007. A relic sand wave field in a tidal channel. *Proceeding Coastal Sediment '07 Conference, ASCE Press, Reston., VA*, pp. 2164-2176.
 45. Yalin, S. M. 1964. Geometric properties of sand waves. *Journal of the Hydraulics Division Vol 90(HY5)*, pp. 105-120.
- 논문접수일 : 2012년 06월 26일
○ 심사의뢰일 : 2012년 07월 05일
○ 심사완료일 : 2012년 11월 14일