

피복공법 적용 시 파랑에 의한 피복재 침식 실험 연구

Experimental Investigation on In-Situ Capping Erosion by Waves

공진영¹⁾ · 김영택²⁾ · 유병현¹⁾ · 이장근[†]

Jin-Young Kong · Young-Taek Kim · Byung-Hyun Ryu · Janguen Lee

Received: August 2nd, 2016; Revised: August 8th, 2016; Accepted: September 23rd, 2016

ABSTRACT : The determination of in-situ capping materials is one of the most important factors to design in-situ capping in order to protect capping materials from erosion. Previous studies have established relationship between the velocity induced by wave energy and effective diameter of sediments, but they are mostly empirical and numerical researches which is too complicated for field engineers to analyze the erosion of in-situ capping materials. This study provides simple analytical solutions and reliability based on hydraulic model test results. Experimental results show that measured flow velocities with respect to depth induced by wave energy are almost the same as estimated velocities and the erosion resistances of the different effective particle diameters can be estimated.

Keywords : Erosion, In-situ capping, Effective diameter, Wave, Velocity, Hydraulic model test

요지 : 피복공법의 설계에서 피복재의 선정은 중요한 설계 변수로 파랑에너지로 발생하는 해저면 유속에도 피복재가 침식되지 않게 설계되어야 한다. 피복공법 관련된 기존 연구는 파랑에너지에 따른 깊이별 유속과 유효입경을 주로 시공경험과 수치해석에 의존하여 수행되었기 때문에 현장에서 시공경험이 미흡한 기술자가 사용하기에는 어려움이 예상된다. 본 연구에서는 파랑에너지에 따른 깊이별 유속과 피복재의 입경에 따른 침식을 판단할 수 있는 간편식을 제시하고 모형수조를 이용한 실내실험을 통해 신뢰성을 확인하고자 한다. 실내실험에서 측정된 깊이별 유속은 이론식과 상당히 일치하며, 유속추정 이론식을 침식 해석에 적용하여 유효입경을 예측하면 침식 유무 판단이 가능하다.

주요어 : 침식, 피복공법, 유효입경, 파랑, 유속, 수리모형실험

1. 서론

미국에서는 준설매립 외에 현장에서 오염퇴적토를 정화하는 공법으로 피복공법(in-situ capping)을 적용하고 있다. 피복공법은 기존 오염퇴적물 위에 오염되지 않은 모래, 자갈 등의 재료를 포설하여 오염물질이 확산되는 것을 방지하는 기술이다(Palermo, 1991). 미국에서는 1970년부터 현장 피복공법이 사용되어 왔으며, 1990년 이후 피복공법의 적용사례가 급격히 증가하고 있다(Fredette et al., 2002). 피복공법이 적용되는 해양에서는 주기적으로 파랑 및 태풍, 쓰나미와 같은 비주기적인 환경외력으로 발생하는 파랑에너지가 해저면에 전달되어 유속의 증가로 오염퇴적물을 덮고 있는 피복재의 침식이 발생할 수도 있다. 따라서 피복공법을 설계할 때에는 파랑과 같은 환경적 외력에 충분히 저항할 수 있도록 피복재의 자중을 고려한 입자크기와 두께를 선정해야 한다.

일반적으로 피복재 포설 시 오탁발생이 미미하고 수중에서

안정된 피복두께를 확보할 수 있는 가는 모래 크기(0.425mm) 이상의 조립질 재료를 피복재료로 많이 사용한다(Palermo et al., 1999). 다만, 오염물의 누출의 우려되는 경우 실트, 점토를 사용할 수도 있다. 이런 경우 수질의 오탁이 발생하기에 최근에는 반응성 피복재를 이용한 다층형 피복공법이 사용되고 있다. 유럽, 미국 등에서는 피복공법에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. Dortch et al.(1990)은 준설토사를 이용한 오염물의 피복을 할 경우 준설재료가 주변환경에 미치는 영향에 대한 연구를 하였고, 뉴베드포드항에서의 준설토사를 이용한 피복 시공에 대한 연구가 있었다(Teeter, 1988). 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers)에서는 피복형상 결정과 피복재 포설에 관한 실증적 연구를 실시하였다(Palermo et al., 1999).

국내에서는 쇄파대(Breaker zone), 해안파대(surfzone) 및 포말대(swash zone)와 같은 연안역(near shore zone)에서의 침식과 퇴적에 관한 연구는 활발히 진행 중이나(Yang, 2015; Lee et al., 2016), 상대적으로 피복공법이 진행되는 연안역

1) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2) River and Coastal Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : jlee@kict.re.kr)

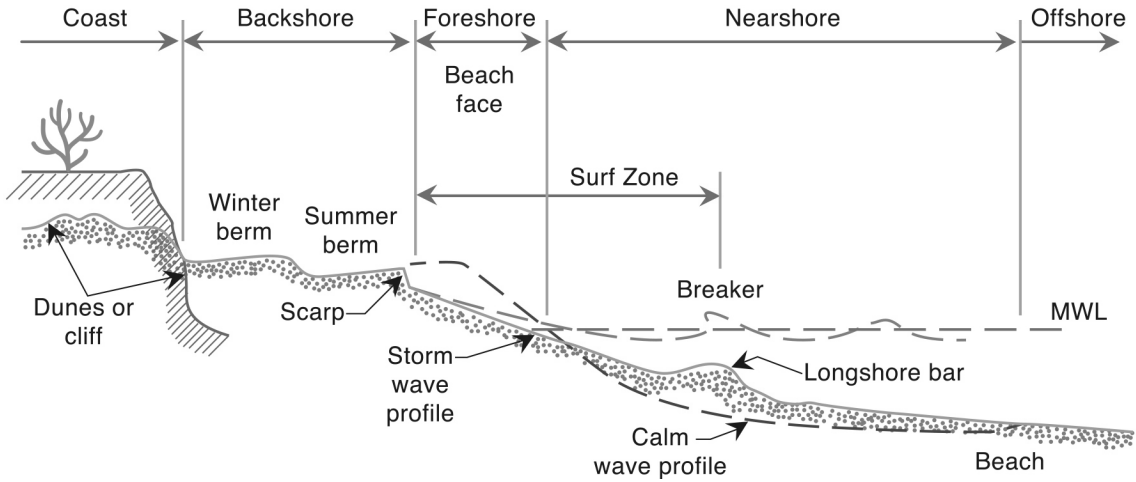


Fig. 1. Schematic typical beach profile, terminology and zonation (Sorensen, 2006)

이외의 영역에서의 연구는 상대적으로 많지 않다(Fig. 1). 특히 본 연구에서 수행한 피복공법에 대한 피복재의 침식에 대한 안정성 검토는 드물다(Baek & Lee, 2011; Kong et al., 2014). 해외에서도 피복재료의 침식에 대한 연구가 복잡한 수치해석과 경험식 위주로 되어 있어 국내에서 적용하기에는 어려움이 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 지반공학적인 측면에서 파랑을 고려하여 피복공법에 대한 설계방법을 다루었다. 내용을 검증하기 위하여 파랑조건을 변화시켜가면서 실내실험을 수행하였다. 깊이별 유속을 측정하고, 유속 변화에 따른 피복재의 침식 발생 여부를 검토하여 현장적용이 가능한 간단한 설계기법을 제시하고자 한다.

2. 유속과 피복재 입경의 상관관계

피복재료를 공학적으로 선정하는 기준은 자중과 입자의 크기이며, 일반적으로 사용되는 조립질 재료는 비중이 일정하여 자중은 결국 입자의 크기에 지배적이다. 파랑의 속도는 해수면에서 가장 빠르고 수심이 깊어질수록 점차 감소하여 바닥면에서 가장 느려진다. 피복재가 포설될 해저면에 작용하는 유속이 파랑에너지의 변화로 점차 증가하다 일정 유속 이상이 되면 물과 바닥면의 입자가 같이 유동하게 된다. 따라서, 해양 환경에서는 파랑에도 피복재가 부유하지 않게 충분한 입경과 무게를 가지는 피복재료를 선정해야 한다.

해안공학에서의 퇴적물 이송은 피복공법 시공 후 피복재 침식과정과 다소 다르지만 유사한 부분이 많다. Bagnold(1946)와 Manohar(1955)는 탱크 내부에 유속을 발생시킨 상태에서 바닥면 침전물 이동에 대한 연구를 하였고, 한번 퇴적된 침전물이 일정 속도 이상에서 재부유하게 되는 현상을 관측하였다. Rance & Warren(1969)은 4.8cm 직경의 굵은 재료

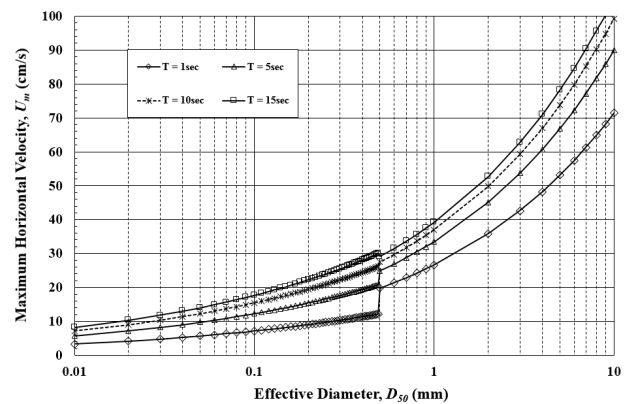


Fig. 2. The near-bottom orbital velocity U_m and particle diameter of sediment (Komar & Miller, 1974)

를 사용하여 진동을 줄 수 있는 물 터널에서의 한계속도에 대한 연구를 하였다. Horikawa & Watanabe(1967)는 25m 길이의 웨이브 탱크를 활용해 7cm 파고로 2.19 초에서 8.5 초까지 주기를 변화시키면서 연구를 하였다. Komar & Miller (1973, 1974)는 기존 연구자들의 데이터를 이용하여 주기적으로 파랑이 작용하는 조건하에서 유속과 침전물 입경과의 관계를 Fig. 2와 같이 제시하였다.

또한, Komar & Miller는 입경 0.5mm를 기준으로 Eq. (1), (2)와 같은 2가지 상관식을 제시하였다. Eq. (1), (2)는 피복재의 입경, 파의 회전반경과 파랑조건 하에서 최대 수평유속과의 관계를 나타낸 식이다. 미소진폭파 이론 수립자의 타원 및 원운동 반경에 대한 식은 단순히 수립자에 대한 운동으로서 본 연구에서는 파랑 운동에 대한 피복재의 운동이 포함된 수립자 운동의 예측이 필요하므로 Eq. (1), (2)를 사용하였다.

$$\frac{\rho_w U_m^2}{(\rho_s - \rho_w)gD} = \alpha \left(\frac{d_o}{D}\right)^{1/2} \quad (D < 0.5 \text{ mm}) \quad (1)$$

$$\frac{\rho_w U_m^2}{(\rho_s - \rho_w)gD} = \beta \left(\frac{d_o}{D}\right)^{1/4} \quad (D > 0.5 \text{ mm}) \quad (2)$$

여기서, D=피복재 입경, d_o=파의 회전직경(orbital diameter of wave motion), U_m=최대수평유속(maximum horizontal velocity of water motion), g=중력가속도, ρ_s=피복재 입자의 밀도, ρ_w=물의 밀도, α=상수(통상 0.21), β=상수(통상 0.463π≒1.454)

Eq. (1), (2)를 계산하기 위하여 필요한 d_o를 결정하기 위해서는 해역의 수심(h)과 파장(L)의 비에 따라 결정되는 심해와 천해인 조건으로 나눌 수 있다. 심해에서 물입자의 회전운동은 원이지만, 천해인 경우 타원운동을 하기 때문이다 (Robert & Robert, 1991). 본 연구에서 적용하고자 하는 피복공법의 경우는 연안 근해역에서 오염물 처리를 목표로 하고 있기 때문에 천해인 경우가 많다. 물입자의 타원운동을 가정하고 파의 회전반경의 최대는 타원운동의 장축이며, 최소는 단축이다. 따라서 d_o는 천해조건(h/L<1/2)에서의 타원운동을 상정하면 장축길이, 즉, 장축방향계수(A)의 2배가 된다. 장축방향계수(A)는 Eq. (3)과 같기 때문에 d_o는 Eq. (4)로 정리할 수 있다.

$$A = \frac{H}{2} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}\right)(h+z)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} = \frac{d_o}{2} \quad (3)$$

$$d_o = 2A = H \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)(h+z)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} = \frac{T}{\pi} U_m \quad (4)$$

유속 U는 선형파 이론에 따른 수심 z에서의 물입자의 x 방향 유속은 Eq. (5)와 같다.

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}\right)(h+z)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} \cos(kx - wt) \quad (5)$$

여기서, H=파랑의 파고, h=수심, L=파랑의 파장, z=수면에서 피복재 표면까지의 수심(-부호), T=파랑의 주기, x=파랑이 전파되는 축방향, t=시간

침식이 발생하는 최대유속조건에서 cos(kx-wt)=1일 경우 이므로, 최대유속(U_m)은 Eq. (5)로 부터 Eq. (6)과 같이 정리된다.

$$U_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}\right)(h+z)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} \quad (6)$$

상기 식에서 최대유속(U_m)을 결정하기 위하여 해역의 수심(h)과 파장(L)을 알아야 한다. 수심(h)은 계측이 필요하고, 파장(L)은 계측자료가 없다면 주기(T)와 수심(h)을 이용하여 선형파 이론에 따라 Eq. (8)로 계산이 가능하다.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (7)$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \frac{2\pi}{L} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right) \quad (8)$$

여기서, ω=각속도(ω = 2π/T), k=파수(k = 2π/L), g=중력가속도(g = 9.8m/s²), L=파장(m), T=주기(s), h=수심(m)

Eq. (4)와 (6)을 Eq. (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 Eq. (9), (10)과 같다.

$$D = \frac{\pi}{\alpha^2 T} \left[\frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)g} \right]^2 U_m^3 \quad (D < 0.5 \text{ mm}) \quad (9)$$

$$D^3 = \left[\frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)g} \right]^4 \frac{\pi}{T} U_m^7 \quad (D > 0.5 \text{ mm}) \quad (10)$$

Table 1. Input data to determine the diameter of capping material

Name	Description	Unit	Name	Description	Unit
h	Depth of water	m	g	Gravity coefficient	m/s ²
T	Wave period	s	ρ _s	Density of capping material (≒2.65 g/cm ³ , quartz sand)	g/cm ³
H	Height of wave	m	ρ _w	Density of water (≒1 g/cm ³)	g/cm ³
L	Wave length	m	U _m	Maximum horizontal velocity	m/s
α	Coefficient (usually 0.21)		β	Coefficient (usually 0.46π)	

Eq. (9)와 (10)은 피복공법이 주로 적용될 천해조건을 가정하여 Eq. (1)과 (2)에서 유도해 낸 것으로 d_0 대신 지반공학에서 익숙한 피복재의 입경(D)을 바로 구할 수 있다. 이상의 과정에서 피복재 입경(D)을 구하기 위하여 필요한 설계변수를 정리하면 Table 1과 같다.

3. 실험방법

3.1 침식실험

본 연구에서는 피복공법 현장 적용성을 분석하기 위해 수리실험을 실시하였다. 최대재현 파고는 0.5m이며, 재현주기는 0.5s~5.0s이다(Fig. 3 참조). 실험과 설정 및 파고계측에 사용된 파고계는 용량식 파고계이며, 길이는 1.0m이고 측정범위는 $0 \sim \pm 0.5m$ 이다.

파랑에 대한 실험조건은 피복공법 적용 대상 후보지의 파랑조건을 참고하고(Kim, 2015), 실험장비의 성능을 고려하여 1:10의 축척을 적용하였으며, 제반 실험조건은 Froude 상사법칙을 적용하여 원형값을 실험값으로 환산하였다. 실험에 적용된 수심은 원형상 12m(모형상 1.2m)이며, 피복재는 파랑이 없는 조건에서 포설 완료 후 원형상 2시간 동안(모형상 약 720파, 약 38분) 파랑을 적용한 후 피복재의 변형을 확인하였다. 파랑의 파고조건은 50년 빈도 심해설계파 내습시 대상 해역에서 발생하는 파고(원형상 1.0m)를 고려하여 실험 시 파고 0.1m로 예비실험을 실시하였다. 실험과 주기는 대상해역에서 자주 계측되는 대표 주기인 10초(모형실험상 3.16초)를 적용하였다. 본 실험에서 적용한 실험조건은 Table 2와 같으며, 규칙파 조건을 적용하였다.

본 실험의 목적은 특정 파랑 조건에서 피복재의 침식 발

생여부를 확인하기 위한 것이다. 이에 따라 불규칙파를 적용할 경우 파랑의 불규칙성으로 크고 작은 파가 동시에 발생함에 따라 그 양상을 판단하기가 쉽지 않으므로 규칙파를 적용하였다. 주기 조건에 있어 원형상 10s 한가지의 대표조건을 적용하였다. 본 실험의 주요 목적은 파고 변화에 따른 피복재의 침식 여부의 판단이다. 주기에 의하여 유속이 변할 수 있으나, 본 연구에서는 파고 변화에 따른 유속변화와 이에 따른 침식여부를 실험으로 판단하였다. 피복법에 대한 현장시험시공 및 모니터링이 진행 중이며, 향후 모니터링 결과에 따라 주기변화를 고려하여 추가실험을 수행할 계획이다.

본 연구에서는 유속이 피복재 입경에 미치는 영향을 검토하기 위하여 현장에서 구할 수 있는 피복재 입경을 고려하여 대표적인 3가지 경우로 유효입경을 $D_{50}=0.21mm$, $D_{50}=0.54mm$, $D_{50}=0.96mm$ 의 모래를 사용하였다. 피복층은 인위적으로 조성한 이후에 물을 채웠다.

실내실험에서는 파고 0.1m로 실시한 예비 실험 시 피복재 침식이 거의 없음을 확인하였으며, 유속과 피복재 입경에 따른 침식의 영향을 확인하기 위해 모형상 $H=0.15, 0.20, 0.30m$ (원형상 1.5, 2.0, 3.0m)의 파고를 각 38분(원형상 2시간)씩 조파하였다. 이는 피복재의 변형을 발생시킬 수 있는 극단적인 조건으로 설정하기 위함이다.

Table 2. Incident wave conditions

Case	Prototype conditions		Model conditions	
	Period (s)	Height (m)	Period (s)	Height (m)
RE-T10H0	10	1.0	3.16	0.10
RE-T10H1	10	1.5	3.16	0.15
RE-T10H2	10	2.0	3.16	0.20
RE-T10H3	10	3.0	3.16	0.30

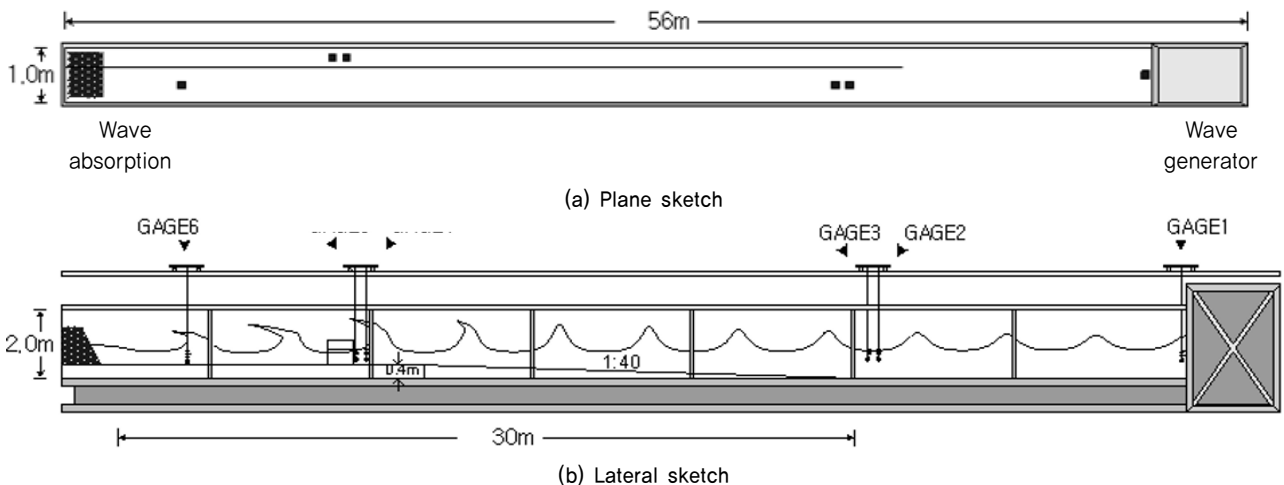


Fig. 3. Schematic sketch of wave flume

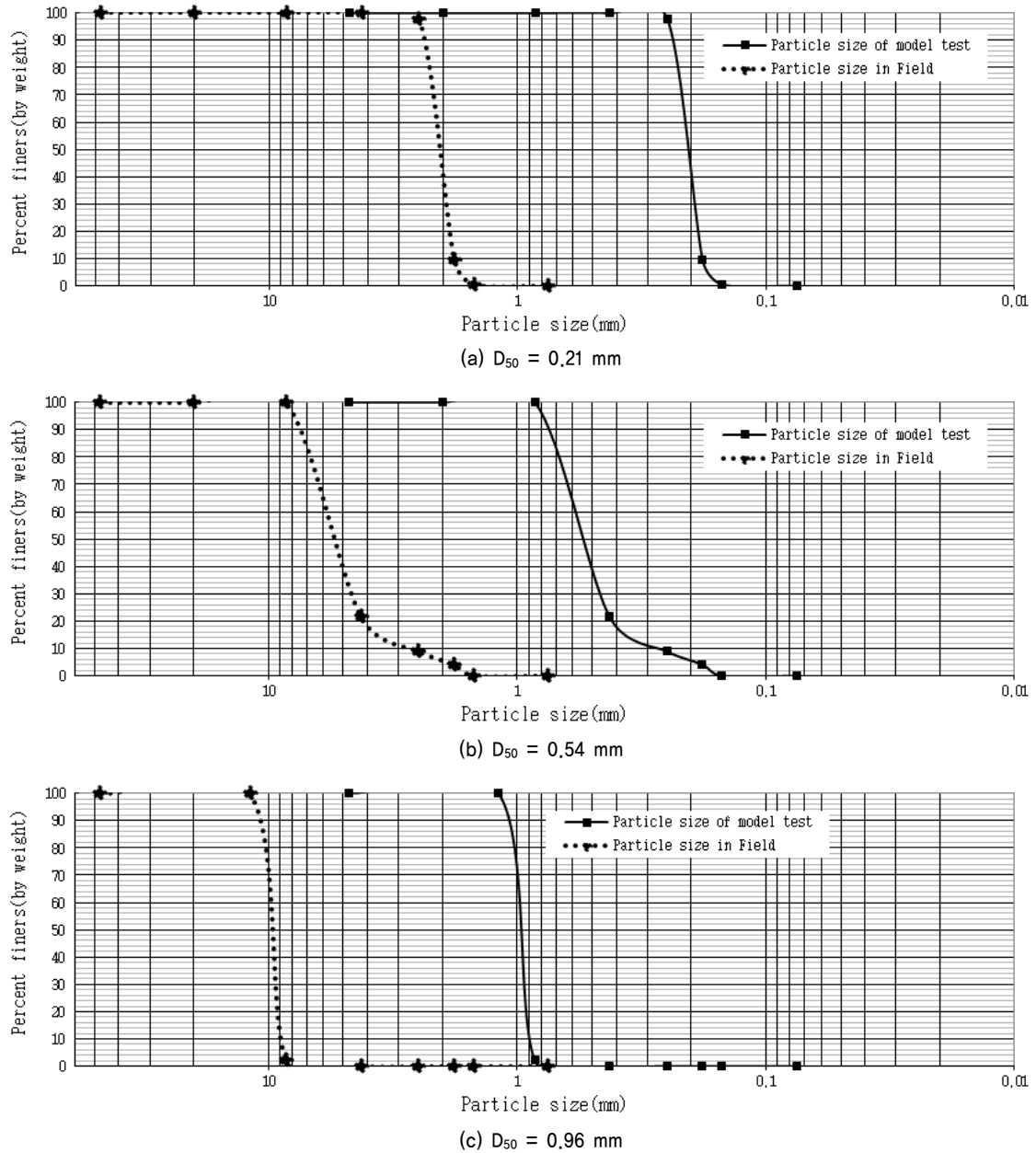


Fig. 4. Particle size analysis of capping material

Table 3. Cases of model tests

Case	D_{50} (Mean diameter of sand, mm)	Wave height (m)	Cap thickness (m)	Depth of water (m)
A-1	0.21	0.1	0.11	1.2
A-2	0.21	0.15	0.11	1.2
A-3	0.21	0.20	0.11	1.2
A-4	0.21	0.30	0.11	1.2
B-1	0.54	0.1	0.11	1.2
B-2	0.54	0.15	0.11	1.2
B-3	0.54	0.20	0.11	1.2
B-4	0.54	0.30	0.11	1.2
C-1	0.96	0.1	0.11	1.2
C-2	0.96	0.15	0.11	1.2
C-3	0.96	0.20	0.11	1.2
C-4	0.96	0.30	0.11	1.2

이상의 조건을 요약하여 실험조건을 정리하면 Table 3과 같이 피복재 입경 3종류(A, B, C), 파고조건 4가지, 총 12가지 경우에 대하여 모형실험을 실시하였다.

3.2 유속측정

파랑에 대한 유속계측은 일본 Kenek사의 2차원 유속계 (VP1200)를 사용하였다. 유속계의 측정범위는 $\pm 2\text{m/s}$ 이며, 유속측정 간격은 0.02s 이고, 측정 정도는 0.01m/s 이다. 유속계가 설치된 수심은 모형상 $z=-1.0, -1.025, -1.05, -1.075, -1.1, -1.125, -1.15, -1.175, -1.199\text{m}$ 이다. 유속계측을 위한 실험에서는 4대의 유속계를 설치하여 동시간대 수심별 유속변화를 분석할 수 있도록 하였다(Fig. 5).

3.3 파장의 계산

최대유속(U_m)을 산정하기 위하여 파장 L 을 알아야 한다. 주

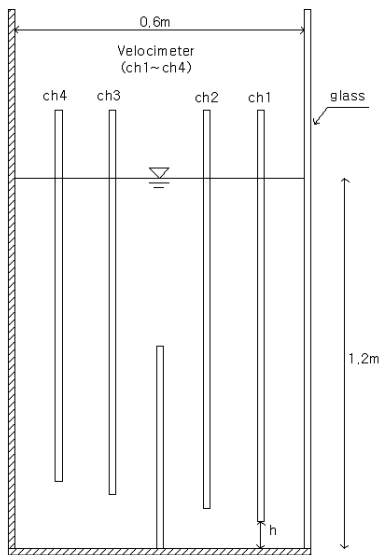


Fig. 5. Schematic view of measuring the velocity of wave

기(T)는 3.16s , 모형수조의 수심(h)은 1.2m 에서 파장은 Eq. (8)을 이용하여 구할 수 있다. Eq. (8)의 양변을 파장(L)에 따른 식으로 정리하면, \tanh 항과 직선식의 항으로 양쪽 식에서 일치하는 조건을 찾으면 파장(L)은 약 9.96m 로 계산된다.

4. 결과분석

4.1 유속측정결과

파고변화에 따른 깊이별 최대유속계측 결과와 추정된 최대 유속결과는 Table 4와 Fig. 7과 같이 나타났다. 계측결과 파고 $H=0.1\text{m}$ 인 경우 유속은 $0.13\sim 0.108\text{m/s}$ 로 파고 $H=0.2\text{m}$ 인 경우 유속은 $0.239\sim 0.211\text{m/s}$, 파고 $H=0.25\text{m}$ 인 경우 유속은 $0.319\sim 0.276\text{m/s}$, 파고 $H=0.3\text{m}$ 인 경우 유속은 $0.391\sim 0.334\text{m/s}$ 로 나타났다. 이와 유사하게 이론식에 의한 결과는 파고 $H=0.1\text{m}$ 인 경우 유속은 $0.121\sim 0.120$, 파고 $H=0.2\text{m}$ 인 경우

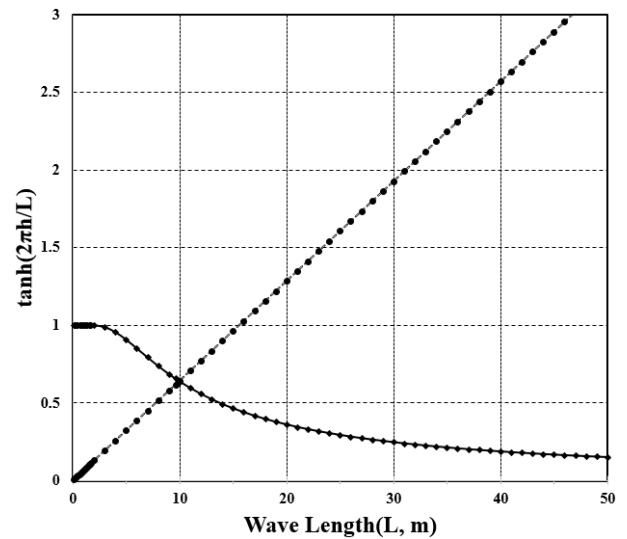


Fig. 6. Calculation of wave length

Table 4. Measuring results of particle velocity (depth = $1.0\sim 1.2\text{ m}$)

Depth from water surface (m)	u (m/s) in case of wave height =0.1 m		u (m/s) in case of wave height =0.2 m		u (m/s) in case of wave height =0.25 m		u (m/s) in case of wave height =0.30 m	
	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated
-1.000	0.130	0.121	0.239	0.241	0.319	0.301	0.391	0.362
-1.025	0.113	0.120	0.239	0.241	0.315	0.301	0.383	0.361
-1.050	0.108	0.120	0.215	0.240	0.293	0.300	0.362	0.360
-1.075	0.116	0.120	0.227	0.240	0.297	0.300	0.365	0.360
-1.100	0.121	0.120	0.239	0.240	0.310	0.300	0.383	0.360
-1.125	0.113	0.120	0.239	0.239	0.302	0.299	0.370	0.359
-1.150	0.108	0.120	0.215	0.239	0.276	0.299	0.353	0.359
-1.175	0.112	0.120	0.211	0.239	0.285	0.299	0.349	0.359
-1.120	0.108	0.120	0.211	0.239	0.276	0.299	0.334	0.359

유속은 0.241~0.239, 파고 H=0.25m인 경우 유속은 0.301~0.299, 파고 H=0.3m인 경우 유속은 0.362~0.359로 추정되었다. 계측결과와 추정유속과의 최대 +0.02m/s, 최소 -0.029m/s이며, 파고가 증가할수록 실측된 유속의 편차가 증가하여 이론식 결과와 편차도 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 경우 모형상 수심(h) 1.2m에 피복두께가 0.1m로 피복재 상단에서의 수심은 1.1m이기 때문에 모형상 파고(H) 0.2m가 적용된 경우 피복재표면에 작용하는 수평방향 유속은 이론식의 계산결과는 약 0.240m/s이고, 실측유속

은 0.239m/s로 매우 유사하게 나타났다. 모형상 파고 0.25m가 적용된 경우는 이론식의 경우 0.3m/s이고, 실측유속은 0.31m/s이었으며, 모형상 파고 0.3m가 적용된 경우도 실측값과 이론식은 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구의 대상수심인 모형상 약 1.1m 전후에서의 유속 이론결과와 실측값은 유사한 것으로 보여 이론식에 의한 유속결과 값을 사용하여도 무방한 것으로 나타났다.

4.2 침식실험 결과

입경과 유속 변화에 따른 침식실험결과를 Figs. 8~10에서 보여주고 있다. 파고 적용 전후 피복재 표면의 침식 여부를 직접적으로 관찰할 수 있도록 수조표면에 흰색 마커로 표기하였다.

실험결과, 모형상 피복재 유효입경이 0.21mm를 사용한 경우 파고 0.1m에서는 변화가 없었으나(A-1), 파고 0.15m에서 0.3m까지는 모두 피복재 침식이 관측되었다(A-2, A-3, A-4). 모형상 피복재 유효입경이 0.54mm를 사용한 경우 파고 0.1m에서는 변화가 없었으나(B-1), 파고 0.15m에서 0.3m까지는 모두 침식이 관측되었다(B-2, B-3, B-4). 모형상 피복재 유효입경 D=0.96mm를 사용한 경우 파고 0.1~0.2m에서는 변화가 없었으나(C-1, C-2, C-3), 파고가 0.3m에서는 침식이 관측되었다(C-4).

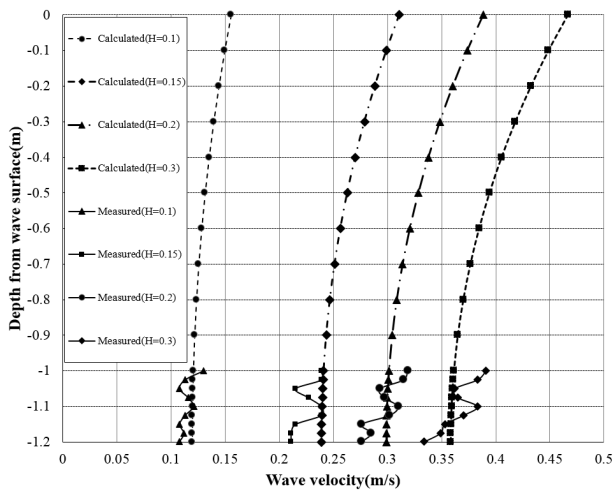
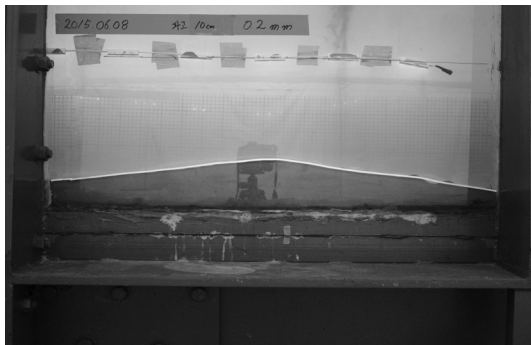
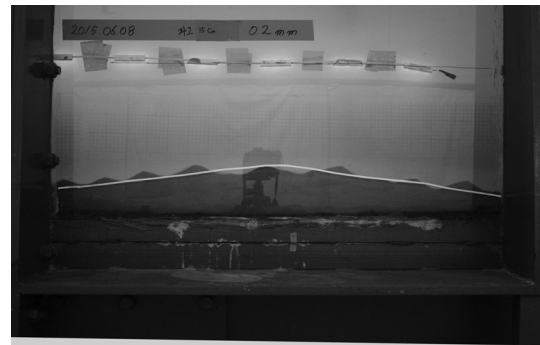


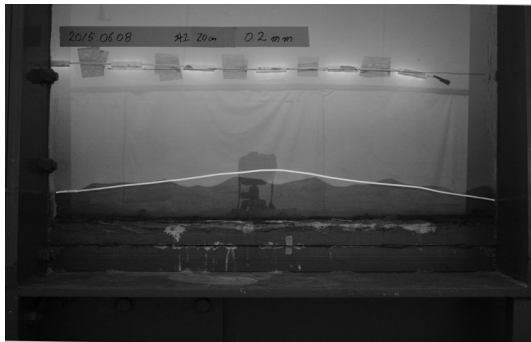
Fig. 7. Comparison of calculated and measured wave velocity



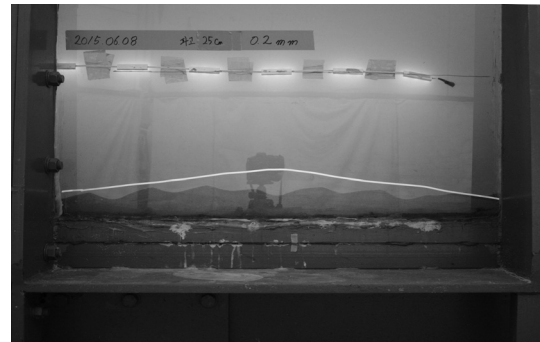
(a) After applying wave height=0.1 m



(b) After applying wave height=0.15 m



(c) After applying wave height=0.2 m

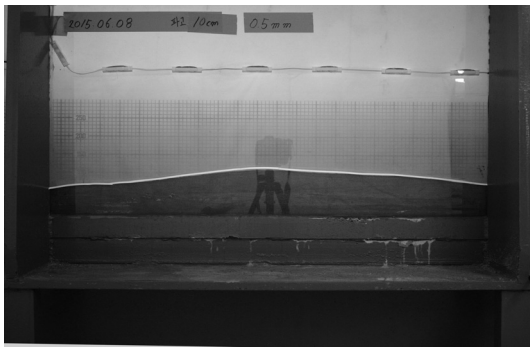


(d) After applying wave height=0.3 m

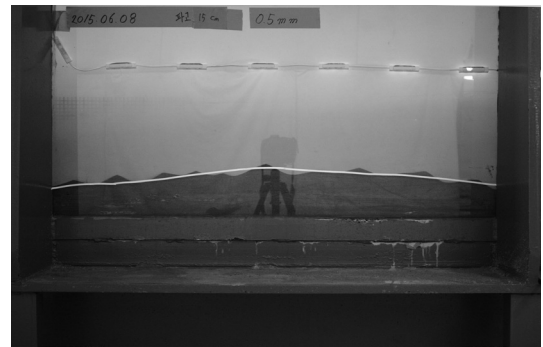
Fig. 8. Test results in case of $D_{50}=0.21$

이 실험 결과를 Eq. (9)와 (10)을 이용한 유속과 입경간의 관계그래프 상에 표기하면 Fig. 10과 같다. Eq. (9)와 (10)을 이용한 그래프 아래에 입경에 따른 유속이 위치하면 침식이

발생하지 않음을 의미하고, 그래프 위로 위치하면 침식 발생을 의미한다. 유효입경이 0.21mm를 사용한 경우(A군, A-1이 그래프 아래에 있어 침식이 발생하지 않을 것으로 예측



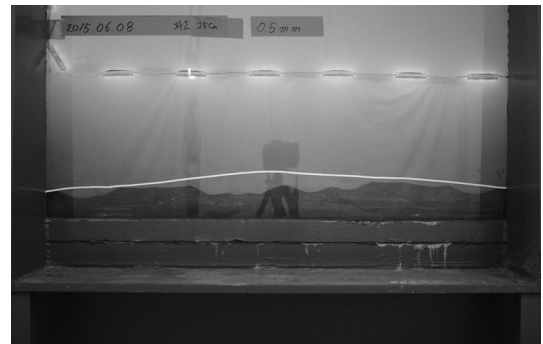
(a) After applying wave height=0.1 m



(b) After applying wave height=0.15 m

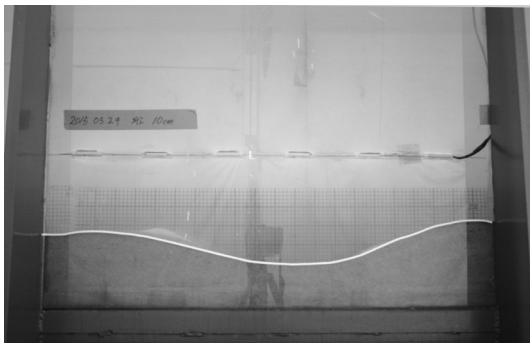


(c) After applying wave height=0.2 m

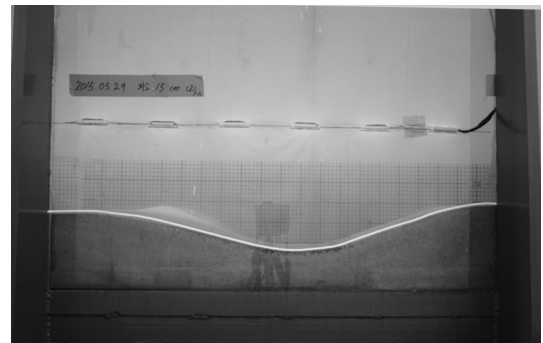


(d) After applying wave height=0.3 m

Fig. 9. Test results in case of $D_{50}=0.54$



(a) After applying wave height=0.1 m



(b) After applying wave height=0.15 m



(c) After applying wave height=0.2 m



(d) After applying wave height=0.3 m

Fig. 10. Test results in case of $D_{50}=0.96$

되고, A-2, A-3, A-4는 모두 그래프 위에 위치하여 침식이 발생할 것으로 예측되어 실내실험 결과와 모두 일치하였다.

유효입경 0.54mm를 사용한 경우(B군), B-1, B-2가 그래프 아래에 있어 침식이 발생하지 않을 것으로 예측되고, B-3, B-4는 모두 그래프 위에 위치하여 침식이 발생할 것으로 예측되었다. 실내실험에서는 B-1은 침식이 발생하지 않았고, B-3, B-4는 침식이 발생하여 일치하였다. 그러나 B-2인 경우 실내실험에서 침식이 발생하여 침식이 발생하지 않을 것으로 예측한 결과와 상이하였다.

유효입경이 0.96mm를 사용한 경우(C군)의 C-1, C-2, C-3가 그래프 아래에 있어 침식이 발생하지 않을 것으로 예측되고, C-4는 모두 그래프 위에 위치하여 침식이 발생할 것으로 예측되었다. 실내실험 결과 C-1, C-2, C-4는 예측결과와 일치하였다. C-3의 경우는 얇은 두께이긴 하나 피복재 변형이 발생한 것으로 확인되어 침식이 발생한 것으로 나타났고, 예측결과와 실험결과는 상이하였다.

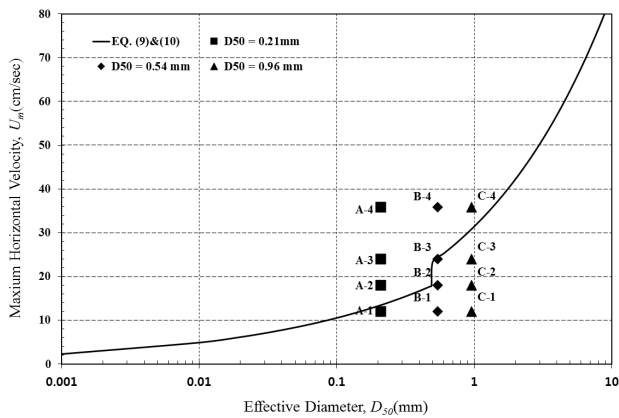


Fig. 11. Test results with the diagram of maximum horizontal velocity and diameter

Table 5. Comparison between model test results and prediction of Eq. (9), (10)

Cases of model	Period of wave (s)	Length of wave (m)	Wave height (m)	Water depth (m)	Capping thickness (m)	U_{cal} (m/s)	Diameter of capping (mm)	U_m (m/s)	Prediction (= $U_m - U_{cal} > 0$)	Test results
A-1	3.16	9.96	0.1	1.2	0.1	0.1198	0.21	0.1345	Stable	Stable
A-2	3.16	9.96	0.2	1.2	0.1	0.1797	0.21	0.1345	Unstable	Unstable
A-3	3.16	9.96	0.25	1.2	0.1	0.2995	0.21	0.1345	Unstable	Unstable
A-4	3.16	9.96	0.3	1.2	0.1	0.3594	0.21	0.1345	Unstable	Unstable
B-1	3.16	9.96	0.1	1.2	0.1	0.1198	0.54	0.241	Stable	Stable
B-2	3.16	9.96	0.2	1.2	0.1	0.1797	0.54	0.241	Stable	Stable
B-3	3.16	9.96	0.25	1.2	0.1	0.2995	0.54	0.241	Unstable	Unstable
B-4	3.16	9.96	0.3	1.2	0.1	0.3594	0.54	0.241	Unstable	Unstable
C-1	3.16	9.96	0.1	1.2	0.1	0.1198	0.96	0.3084	Stable	Stable
C-2	3.16	9.96	0.2	1.2	0.1	0.1797	0.96	0.3084	Stable	Stable
C-3	3.16	9.96	0.25	1.2	0.1	0.2995	0.96	0.3084	Stable	Stable
C-4	3.16	9.96	0.3	1.2	0.1	0.3594	0.96	0.3084	Unstable	Unstable

4.3 원형상 환산결과 및 이를 반영한 계수값의 제안

본 연구의 모형실험결과와 Eq. (9), (10)을 이용한 예측값의 비교를 Table 5로, 원현장조건으로 환산한 결과를 Table 6으로 정리하였다. 실험축척 1/10을 적용하고, Froude 상사 법칙을 적용함에 따라 모형값을 원형값으로 환산 시 시간에는 $\sqrt{10}$ (≈ 3.16)을 곱하여 원형으로 환산하였으며, 길이의 경우 10을 모형상에 곱하여 원형으로 환산하였다. 이에 따라 실험조건을 원형으로 환산하면 피복재 두께는 1m, 파고는 1~3m, 최대수심은 12m, 피복재 입경은 2.1, 5.4, 9.6mm이다. 피복재에 작용하는 유속은 Eq. (6)을 이용하여 수심 11m에서 값을 적용하였다. 모형실험 조건 A, B, C 군은 원형상으로 환산된 경우 P, Q, R 군으로 대응하도록 표기하였다.

피복재 침식여부에 대한 평가결과는 원현장조건으로 환산한 결과도 모형실험결과 동일하게 Q-2(모형실험 B-2), R-3(모형실험 C-3)에서 불일치하였다. Eq. (9), (10)을 이용한 결과 침식이 발생하지 않을 것으로 예측되었지만 실험결과에서는 침식이 발생하였다.

Komar & Miller(1974)의 제안식 Eq. (1), (2)는 기존 연구자들의 실험결과를 경험적 관계식으로 정리한 결과이다. 특히, 입경 0.5mm를 기준으로 제시되어 있는데, 이는 층류흐름과 난류흐름조건에 대한 기존 연구자들의 실험결과를 정리하면서 제안된 사항이다. Eq. (1)은 Bagnold(1946)의 실험결과(층류경계 조건)를 Eq. (2)는 Manohar(1955)의 실험결과(난류흐름 조건)를 각각 반영한 것으로 서로 제안식이 다르다. Bagnold(1946)와 Manohar(1955)의 연구결과를 사용하려면 유체의 흐름특성도 같이 고려해야 하는데 복잡하므로 Komar & Miller(1974)는 Eq. (1)과 (2)로 단순화시켰고, 퇴적물의 직경 0.5mm를 기준으로 구간별로 Eq. (1)과 (2)를 각각 다르게 적용할 것을 제안하였다. 그 이유로 직경

Table 6. Comparison between test results and prediction of Eq. (9), (10) in case of prototype condition

Cases of prototype	Period of wave (s)	Length of wave (m)	Wave height (m)	Water depth (m)	Capping thickness (m)	U_cal (m/s)	Diameter of capping (mm)	Um (m/s)	Prediction (=Um-U_cal>0)	Test results
P-1	10	99.65	1	12	1	0.379	2.1	0.5085	Stable	Stable
P-2	10	99.65	2	12	1	0.7581	2.1	0.5085	Unstable	Unstable
P-3	10	99.65	2.5	12	1	0.9476	2.1	0.5085	Unstable	Unstable
P-4	10	99.65	3	12	1	1.1372	2.1	0.5085	Unstable	Unstable
Q-1	10	99.65	1	12	1	0.379	5.4	0.7622	Stable	Stable
Q-2	10	99.65	2	12	1	0.7581	5.4	0.7622	Stable	Stable
Q-3	10	99.65	2.5	12	1	0.9476	5.4	0.7622	Unstable	Unstable
Q-4	10	99.65	3	12	1	1.1372	5.4	0.7622	Unstable	Unstable
R-1	10	99.65	1	12	1	0.379	9.6	0.9754	Stable	Stable
R-2	10	99.65	2	12	1	0.7581	9.6	0.9754	Stable	Stable
R-3	10	99.65	2.5	12	1	0.9476	9.6	0.9754	Stable	Stable
R-4	10	99.65	3	12	1	1.1372	9.6	0.9754	Unstable	Unstable

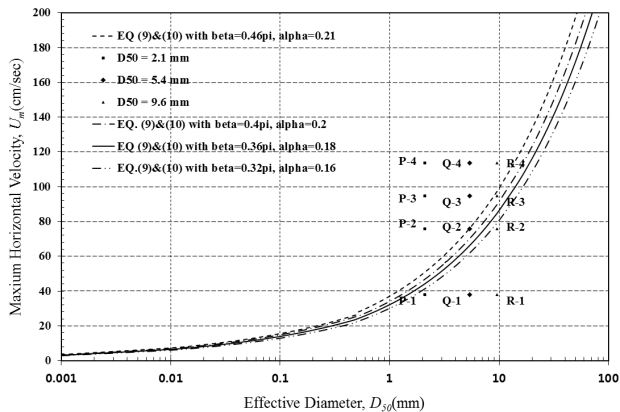


Fig. 12. Diagram of maximum horizontal velocity and diameter with α , β variation (T=10 s)

0.5mm 보다 “가는 퇴적물(fine sediment)”에서는 층류흐름특성을 보이고, 직경 0.5mm 보다 “굵은 퇴적물(coarse sediment)”은 와류가 발생하여 난류흐름특성이 나타난다고 설명했다.

이와 같이 2개의 경험식을 조합시킨 Komar & Miller(1974)의 제안식 Eq. (1), (2)에서 계수 α 와 β 는 그래프의 기울기를 결정하는 상수로 각각 0.21, 0.46 π 로 제안되어 있다. 그러나 Horikawa & Watanabe(1967)는 계수 α 를 0.3으로 제안하였고, Komar & Miller(1973)의 제안식에서는 0.3으로 제시되어 있는 등 연구자에 따라 계수 α 와 β 계수값에 대한 이견이 존재한다.

본 연구결과에서는 Komar & Miller(1974)가 제안한 β 값 0.46 π 는 다소 큰 것으로 판단되며, 본 실험결과에 맞게 계수를 수정하면 주기 T가 5초에서 10초이고, 피복재로 중간크기 모래(2mm)에서 10mm 자갈에 대해서 β 값으로 0.36 π 를 계수 α 값은 0.18로 제안하고자 한다.

실험결과를 Komar & Miller(1974)의 제안식($\beta=0.46\pi$)과 β 를 0.4에서 0.32까지 변화시켜서 그래프를 그려보면 Fig. 12와

같다. Fig. 12에서 β 가 0.46 π 인 경우 Q-2, R-3가 그래프보다 아래에 위치하지만, β 가 0.32 π 에서 0.40 π 이내인 경우 Q-2, R-3가 그래프 위에 위치하게 되어 침식 발생하는 것으로 예측할 수 있게 된다. 계수 β 는 0.32 π 에서 0.4 π 까지 계수 α 는 0.16에서 0.20까지 변화시켜도 실험결과와 일치하였고, 그 이하로 낮추면 P-1(모형실험 A-1), R-2(모형실험 C-2)도 그래프 위에 위치하는 등 실험결과와 불일치하게 된다. 따라서, 평균값으로 계수 β 는 0.36 π , 계수 α 는 0.18로 제안하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 피복공법의 설계에 필요한 피복재 입경을 결정하기 위하여 Komar & Miller(1974)의 연구에서 천해조건을 상정하여 유속과 피복재의 입경의 관계식을 유도하였고, 검증에 위하여 실내실험을 통하여 유속 측정 및 유속 변화에 따른 피복재의 침식 발생 여부를 검토하였다. 즉, 피복공법을 적용하는 데에 필요한 이론식들을 제시하였고, 실내실험을 통하여 검증하여 보았다. 또한, 실험결과를 바탕으로 Komar & Miller(1974) 계수 α , β 값을 제시하여 보완하였다. 실험결과 제시된 유도된 식들이 파랑 조건에 따른 침식여부를 판정하는데 적용이 가능할 것으로 판단되며, 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유속과 유효입경과의 관계를 정립하고 정확한 값을 산출하기 위해 필요한 파장 및 유속 예측식을 정리하여 향후 피복공법 설계에 활용이 가능하도록 제시하였다. 따라서 복잡한 수치해석을 사용하지 않고 간단한 이론적 해법을 적용하여 해저면에 침식을 평가할 수 있는 기법을 제시하였다.

- (2) 모형상 파고조건 0.3m 이내인 파랑의 유속을 계측한 결과와 2차원 선형파 이론식에 따른 유속 예측은 거의 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 항만 내부와 같이 정상조건을 가정할 수 있는 환경에서 유속은 이론식을 사용하여도 예측이 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 모형상 피복재 유효입경 0.21, 0.54, 0.96mm를 사용한 12가지 경우의 침식실험 결과는 기존 Komar & Miller 식으로부터 유도된 Eq. (9), (10)으로 예측 결과와 10가지 경우에서 일치하여 전체적으로 적용이 가능하였으나, 2가지 경우에는 불일치하였다.
- (4) 불일치한 실험결과에 대하여 원형 조건으로 환산하고, Komar & Miller식을 보완하기 위하여 주기 10초 이하이고, 피복재로 중간크기 모래(2mm)에서 10mm 자갈에 대해서 β 값으로 0.36 π 를 계수 α 는 0.18로 제안하였다. 제안된 계수로 다시 산정한 예측결과는 실험결과와 일치하였다.

향후 보다 다양한 주기 조건에 대한 피복재 변형에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구결과에 대한 현장적용성을 평가하기 위한 현장시험시공 및 모니터링이 진행되고 있어 향후 현장모니터링 결과와 비교할 필요가 있겠다.

감사의 글

본 논문은 2015년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(지속가능 해양오염 퇴적물 정화기술 개발)로 이에 감사드립니다.

References

1. Baek, S. C. and Lee, S. Y. (2011), A study on the behaviour characteristics of the Saemanguem sea dyke coastal covering stones by sea waves, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 12, No. 7, pp. 67~76 (in Korean).
2. Bagnold, R. A. (1946), Motions of waves in shallow water; interaction between waves and sand bottoms, Proc. Royal Soc. London, Vol. 187, Series A, pp. 1~15.
3. Dortch, M. S., Hales, L. Z., Letter, J. V. and McAnally, W. H. (1990), Methods of determining the long-term fate of dredged material for aquatic disposal sites, Technical Report D-90-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 10~50.
4. Fredette, T. J., Clausner, J. E., Palermo, M. R., Bratos, S. M., Prickett, T. L., Johnson, B. H., Brouwer, M. S., Ryan J. A., Smith, L. J., Nevarez, E. E., Schaffler, F. K. and McDowell, S. (2002), Field pilot study of in-situ capping of Palos Verdes shelf contaminated sediments, Technical Report, ERDC TR-02-5, US Army Corps of Engineers, pp. 5~25.
5. Horikawa, K. and Watanabe, A. (1967), A study of sand movement due to wave action, Coastal Engineering in Japan, Vol. 10, pp. 38~57.
6. Kim, Y. K. (2015), Development of sustainable remediation technology of contaminated marine sediments: capping and in-situ treatment technology, Technical report 4/5 (Korea Institute of Marine Science Technology), Hankyong National University, pp. 10~30.
7. Kong, J. Y., Kim, Y. T., Kang, J. M. and Lee, J. G. (2014), An experimental study on the behavior of capping material by sea waves, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 15, No.7, pp. 51~58 (in Korean).
8. Komar, P. D. and Miller, C. M. (1973), The threshold of sediment movement under oscillatory water waves, Journal of Sedimentary petrology, Vol. 43, No. 4, pp. 1101~1110.
9. Komar, P. D. and Miller, C. M. (1974), Sediment threshold under oscillatory waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 756~775.
10. Lee, K. H., Ryu, H. W., Kim, D. W., Kim, D. S. and Kim, T. H. (2016), Regular waves-induced seabed dynamic responses around submerged breakwater, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 28, No. 3, pp. 132~145 (in Korean).
11. Manohar (1955), Mechanics of bottom sediment movement due to wave action, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. No. 75, p. 121.
12. Palermo, M. R. (1991), Design requirements for capping, Dredging Research Technical Notes. US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 5~15.
13. Palermo, M., Schroeder, P., Rivera, Y., Ruiz, C., Charke, D., Gailani, J., Clausner, J., Hynes, M., Fredette, T., Tardy, B., Peyman-Dove, L. and Risko, A. (1999), Options for in situ capping of palos verdes shelf contaminated sediments, Technical Report EL-99-2, US Army Corps of Engineers, pp. 11~29.
14. Rance, P. J. and Warren, N. F. (1969), The threshold movement of coarse material in oscillatory flow, 11th conf. on Coastal Engineering Proc., pp. 487~491.
15. Robert, G. D. and Robert, A. D. (1991), Water wave mechanics for engineers and science, World Scientific Publishing Co., pp. 78~83.
16. Sorensen, R. M. (2006), Basic coastal engineering, 3rd ed. Springer Science, pp. 1~50.
17. Teeter, A. M. (1988), New bedford harbor superfund project, acushnet river estuary engineering feasibility study of dredging and dredged material disposal alternatives, Report 2 (Technical Report EL-88-15), US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 5~45.
18. Yang, S. H., Lee, S. J. and Hwang, K. N. (2015), A laboratory study on erosional properties of the deposit bed of saemankeum sediments, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 27, No. 2, pp. 105~112.