

# 파랑에 의한 피복재의 거동에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Behavior of Capping Material by Sea Waves

공진영<sup>1)</sup> · 김영택<sup>2)</sup> · 강재모<sup>1)</sup> · 이장근<sup>†</sup>

Jinyoung Kong · Youngtak Kim · Jaemo Kang · Janguen Lee

Received: April 28<sup>th</sup>, 2014; Revised: May 13<sup>th</sup>, 2014; Accepted: June 17<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : In-situ capping is a method to stabilize contaminated sediments by isolation. Few researches on the in-situ capping have been performed, although the engineering approach is still required to prevent the release of contaminants. In this study, hydraulic model test were conducted by using a wave generator to observe the change of cap thickness which is important factor in design of capping. Sands with particle size between 0.075 to 2 mm as capping materials were used to observe the change of capping thickness by waves. The experimental results show that the surface of capping materials is similar to wave form. The more wave height increases, the more erosion of capping materials increases.

**Keywords** : In-situ capping, Wave, Cap thickness, Erosion, Contaminated sediments

**요지** : 피복공법은 해저 퇴적오염물질을 차단하고 안정화시켜 처리하는 방안이다. 국내에서는 피복공법에 대한 연구가 부족하나, 오염물질이 방출되지 않기 위한 공학적 접근법이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 피복설계 시 중요 인자인 피복재 침식을 확인하기 위해 조파장치를 이용한 수리모형실험을 실시하였다. 1:10의 실험축척을 적용하여 0.07~2 mm 크기의 모래를 피복 재료로 사용하였고, 모형 수조 내 강사한 후 파랑을 발생시켜 피복재의 형상변화를 관측하였다. 실험결과, 피복재의 표면은 파랑의 파형과 유사하게 변형이 발생하였으며, 파랑의 파고가 증가할수록 대체적으로 침식되는 피복재의 깊이가 증가하였다.

**주요어** : 피복공법, 파고, 피복 두께, 침식, 퇴적오염물질

## 1. 서론

해양수산부에 따르면 항만개발 오염해역 정화 등의 목적으로 2007년 약 2,000 m<sup>3</sup> 등 매년 수천만 m<sup>3</sup>의 퇴적물이 준설되고 있으며, 그중 90%가 넘는 양이 투기장 및 외해 투기에 의한 방법으로 처리되고 있다. 기존의 준설 및 매립의 방법으로는 막대한 양의 오염퇴적토를 처리할 수 없고 런던 조약으로 해양투기가 금지되었기 때문에 오염퇴적토 처리를 최소화하기 위해 정부는 유용토사를 선별하여 적극 활용하고 잔여 오염퇴적토는 매립하는 방식으로 진행하고 있다. 그러나 각종 규제에 의한 매립 부지의 한계와 사업규모에 따른 막대한 양의 준설퇴적토를 감안하였을 때, 지역적 특성에 따라 준설을 대체할 수 있는 오염퇴적토 정화기법이 요구된다.

오염퇴적토 처리 기법으로 준설 및 매립에 의한 방법이 일반적으로 많이 이용되고는 있지만, 준설과정에서 발생하

는 퇴적층의 교란, 매립지 선정문제, 고비용 공사비 등으로 인한 많은 제약이 따르고 있다. 미국에서는 이러한 문제로 인하여 협소한 지역의 오염퇴적토에 대해서는 오염물질의 용출 저감을 위한 현장캡핑 또는 피복 공법(in-situ capping)이 근래 들어 많이 사용되고 있다. 피복 공법은 기존 퇴적층 위에 오염되지 않은 새로운 층의 모래, 퇴적토, 또는 자갈과 같은 재료를 포설하여 오염물질이 상부 수층으로 이동하는 것을 제한하는 기술로서, 오염된 퇴적물을 상부수층과 물리적으로 분리하거나 퇴적토를 안정화하여 유해물질이 저서 생물 또는 상부 수층으로 이동하는 것을 감소시키는 역할을 한다(Palermo, 1991).

국내에서는 피복공법에 대한 연구가 사실상 전무하며 (Lee et al., 2011; Baek & Lee, 2011), 이는 피복공법이 단순히 오염퇴적물을 “덮어둔다”는 인식에서 기인한다. 반면 미국에서는 1970년부터 현장 피복공법이 사용되어 왔으며, 1990년 이후 피복공법의 적용사례가 급격히 증가하고 있다.

1) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

2) River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

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

오염퇴적물이 주로 배출되는 상업지역에 접한 연안과 하천에서 피복공법이 사용되고 있으며 피복재의 두께는 10 cm 이하에서 3 m 이상까지 다양하게 시공되었다(Palermo et al., 1998b). 미국에서 1970년부터 2010년까지 수행된 피복 공법을 분석한 결과, 피복층의 두께 60 cm 이상이 전체 시공 사례의 46 %를 차지한다.

미공병단(U.S. Army Corps of Engineers)에서는 피복형상 결정과 피복재 포설에 관한 실증적 연구를 실시하였다(Palermo et al., 1999). 또한 미공병단에서 수행한 피복공법 연구는 Los Angeles(LA)에 위치한 Palos Verdes Shelf에 1, 1, 1-trichloro-2, 2-bis(p-chlorophenyl) ethane(DDT)과 polychlorinated biphenyl hydrocarbon(PCB)으로 오염된 퇴적토를 대상으로 피복공법의 타당성을 평가하고 설계하였으며, 연구결과를 바탕으로 시험 적용하였다(Fredette et al., 2002). 피복공법의 장기 안정화 분석을 위해서는 피복재의 침식에 대한 영향평가가 반드시 선행되어야 한다. 그러나 기존 연구에서는 이러한 피복재의 침식에 대한 연구를 수치해석에만 의존하고 있어 실내실험을 통한 검증이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 피복재 침식에 미치는 다양한 현장조건들을 반영하여 수리모형실험을 수행하였다. 이를 통해 피복공법의 시공성과 장기 안전성에 미치는 중요 설계인자를 도출하고 향후 현장적용을 위한 설계기법을 정립하고자 한다.

## 2. 실험방법 및 조건

### 2.1 유력후보지 현장조건

본 연구에서 검토한 피복공법 적용 예상후보지는 수심이 12 m로 얇고, 비교적 소규모 선박이 이용하고 있어 특별한 준설이 필요 없는 것으로 확인되었다. 대상후보지 인근의 준설선은 펌프/호퍼 준설선, 그레브 준설선, 그리고 디퍼 준설선이 일반적으로 사용되고 있었다. 펌프/호퍼 준설선의 경우, 약 6,400 m<sup>3</sup>의 대용량으로 피복재를 현장에 이동하여 포설할 수 있으며 한 번 피복재 투하를 통해 대규모 피복형상(두께와 확장범위)을 획득할 수 있는 장비이나, 세립토(실트와 점토)의 함량이 높을 경우(전체 중량의 10 % 이상), 주변 오탁발생으로 환경오염이 심각하다. 그레브 준설선의 경우, 1회 포설량은 약 10~20 m<sup>3</sup>로 펌프/호퍼 준설선에 비해 작지만, 해저 지반에 가깝게 피복재를 포설하여 세립질 함량에 영향을 받지 않는 장점이 있다. 본 연구에서는 피복재 포설장비로 그레브 준설선의 경우를 가정하였다.

대상 후보지의 파랑조건을 검토하기 위해 “전 해역 심해설계파 추정보고서 II”(KIOST, 2005)의 50년 빈도와 10년

빈도 심해설계파랑에서 K항에 주 영향을 미칠 것으로 사료되는 5개 파랑(E, ESE, SE, SSE, S)을 선정하였다. 상세역 파랑변형해석 결과 연구대상 항 내 수역에서 SE 방향 50년 빈도 썬해 파랑 내습 시 1.00 m, 10년 빈도 파랑 내습 시 0.65 m 규모의 파고가 계산되었다. 또한 대상 후보지인 컨테이너터미널 전면 해상에서 창, 낙조류 모두 약 0.10 m/sec(0.2 knot)의 유속이 분포하는 것으로 나타났다.

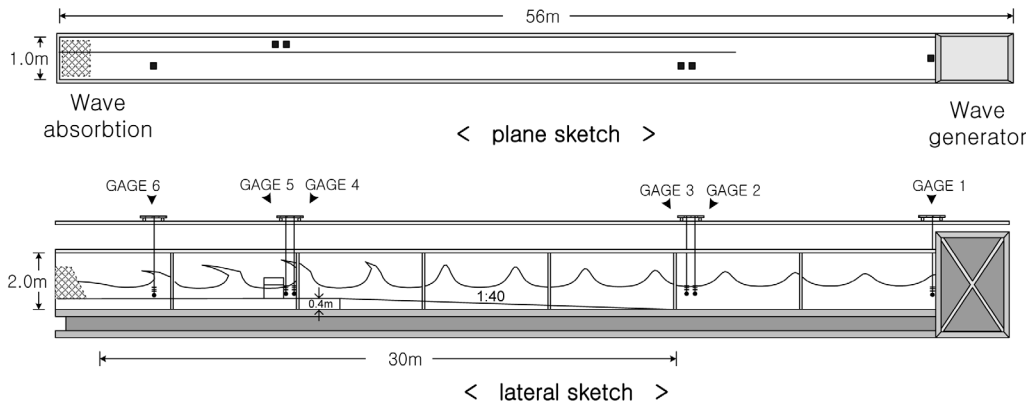
### 2.2 침강 및 침식실험

본 연구에서는 피복공법 현장 적용성을 분석하기 위해 실험축척 1:10의 수리모형실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 조파기 및 단면수로에서는 규칙파, 불규칙파 및 고립파의 조파가 가능하다. 조파수로의 제원은 길이 56 m, 폭 1 m, 깊이 2 m이며, 피스톤식 조파기가 한쪽 끝단에 설치되어 있다.

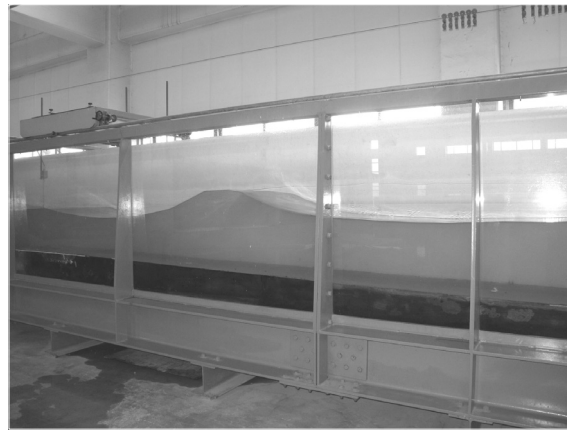
최대재현파고는 0.5 m이며, 재현주기는 0.5 sec~5.0 sec이다(Fig. 1 참조). 조파장치는 컴퓨터, 증폭기 및 A/D converter 등으로 구성되어 있으며, 실험파 제원에 따라 생성된 조파신호를 조파기로 송신하고, 파고계로부터 녹취된 자료를 주파수 스펙트럼 및 파고 등으로 분석이 가능하다. 실험파 설정 및 파고계측에 사용된 파고계는 용량식 파고계이며, 길이는 0.6 m이고 측정범위는 0~±0.3 m이다.

피복재는 윈터치 강사기를 이용하여 포설하였다(Fig. 2). 그레브 준설선의 경우와 유사하게 수중에서 포설할 수 있도록 강사기는 모터를 이용하여 상하로 움직인다. 실내실험에서는 현장에서 사용되는 그레브 준설선의 1회 포설량을 고려하여 1:10의 상사율을 적용 시 강사박스 내 피복재의 1회 최대 포설량을 약 0.0220 m<sup>3</sup>(30 kgf 기준, 원형상 22 m<sup>3</sup>)로 선정하였다.

파랑에 대한 실험조건은 피복공법 적용 대상 후보지의 파랑조건을 참고하고, 1:10의 축척을 적용하여 수심은 1.2 m(대상 지역 수심 약 12 m), 피복재는 파랑이 없는 조건에서 포설 완료 후 2시간 동안 파랑을 적용한 후 피복재의 변형을 확인하였다. 파랑의 파고 조건은 50년 빈도 심해설계파 내습 시 대상 해역에서 발생하는 파고(원형상 1.0 m)를 고려하여 실험 시 파고 0.1 m로 예비실험을 실시하였다. 예비실험 시 피복재 변형이 거의 없음을 확인하였으며, 침식의 영향을 확인하기 위하여 모형상 0.2, 0.25, 0.30 m(원형상 2, 2.5, 3 m)의 파고를 각 38분(원형상 2시간)씩 조파하였다. 이는 피복재의 변형을 발생시킬 수 있는 극단적인 조건으로 설정하기 위함이다. 실험파 주기는 대상해역에서 자주 계측되는 대표 주기인 10초(모형실험상 3.16초)를 적용하였다. 본 실험에서 적용한 실험조건은 Table 1과 같으며, 규칙파 조건을 적용하였다.

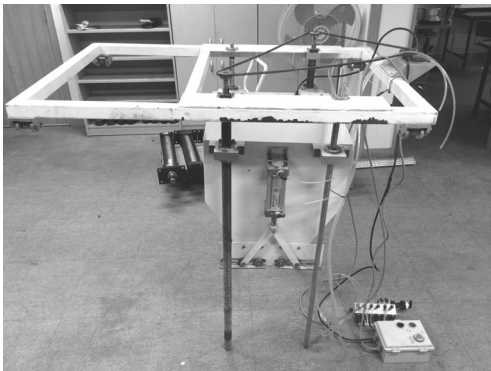


(a) Schematic sketch of wave flume

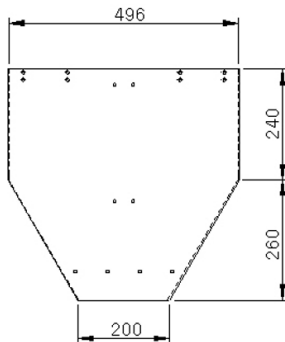


(b) Wave generation

Fig. 1. Wave flume



(a) Side view of falling sand model



(b) Size of falling sand model (unit: mm)

Fig. 2. Model of sand rainfall

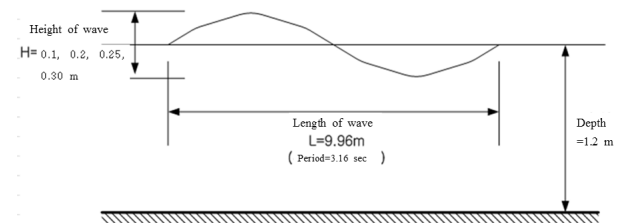


Fig. 3. Height and length of wave

Table 1. Incident wave conditions

Case	Prototype conditions		Model conditions	
	Period (sec)	Height (m)	Period (sec)	Height (m)
RE-T10H0	10	1.0	3.16	0.10
RE-T10H1	10	2.0	3.16	0.20
RE-T10H2	10	2.5	3.16	0.25
RE-T10H3	10	3.0	3.16	0.30

### 2.3 실험재료

피복 재료로 실트나 점토와 같은 세립토와 모래와 같은 조립토를 사용하고 비교한 여러 연구결과가 있다(Brannon et al., 1985; Klapper, 1991). 세립질 재료의 경우 조립질 재료에

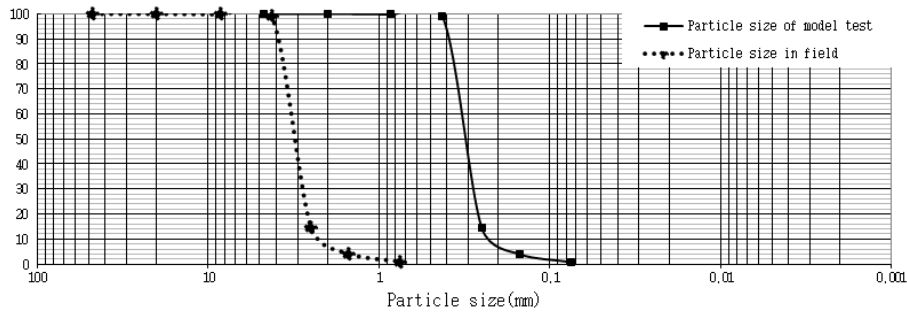


Fig. 4. Particle size distribution of capping material

비하여 입자 크기가 작고 흡착능력이 커서 화학적으로 보다 안정적으로 폐기물 피복이 가능한 장점이 있다(Suszkowsk, 1983). 반면 모래는 입자 크기가 작은 세립질 재료에 비하여 포설 후 수중에서 부유하는 시간이 짧고, 유속을 따라 이동되어 퍼지는 폭이 좁아서 시공에 유리한 장점이 있다(Palermo et al., 1998b). 따라서 피복 재료는 피복하려는 오염물질, 수역조건, 시공성 등을 고려하여 결정한다. 일반적으로 피복재 포설 시 오탁발생이 미미하고 수중에서 안정된 피복두께를 확보할 수 있는 조립질 재료를 피복 재료로 많이 사용한다(Palermo et al., 1998b). 본 연구에서는 중간크기의 모래(0.425~2 mm)와 가는 모래(0.075~0.425 mm) 범위의 모래를 사용하였다.

1회 실험 시 필요한 피복재의 두께 및 포설량은 예비실험을 통하여 수중에 포설되는 피복재의 최대 목표두께를 0.1 m(실제 1.0 m)로 선정할 경우 총 360 kgf이 사용되는 것으로 확인되었다. 1회 포설되는 피복재량에 따른 피복형상 변화를 관찰하기 위하여 10, 20, 30 kgf씩 3가지 경우로 나누어 실험을 실시하였다. 1회 피복재 포설속도는 3가지 경우 모두 10초로 고정시켰다. 포설속도를 약 10초 이상으로 할 경우 1회 포설량에 관계없이 침강 후 피복재의 폭은 약 8 m로 유사하였다. 파고 적용 시점은 포설이 완료된 후 1시간 이상 경과하여 육안으로 피복재 형상을 확인한 이후부터이다.

또한 수조 안에는 높이 0.3 m, 길이 6 m의 아크릴 눈금을 삽입하여 육안으로 침식깊이를 확인할 수 있게 하였다. 강사기는 수조의 3.1~3.6 m 구간에 고정하여 위치시켰다. 수조 내부에 LED 조명등을 설치하여 피복재 형상 및 눈금 확인을 용이하도록 조치하였다.

피복재 형상변화는 Shape Metrix 3D 시스템을 이용한 사진계측으로 파악하였다. 사진계측은 사진을 찍어서 그로부터 3D 좌표 및 형상을 만들어내는 기술로서 촬영 각도를 달리한 2장 이상의 사진을 이용하면 카메라 위치와 피사체의 위치가 해석된다.

Table 2. Minimum cap thickness

No.	References	Cap thickness (m)	Mat	Condition
1	Palermo (1991)	0.3	Sand, Silt	Chemical isolation
		0.3~0.6	Sand, Silt	Prevention of most organisms
		0.9~1.2	Sand, Silt	Centional dredging operations
2	Palermo et al. (1998b)	0.3	Sand, Gravel	Physical isolation
		0.6	Sand	Chemical isolation
3	Palermo et al. (1998a)	0.15~23	Sand	Sprinkling techniques needed
		0.3~0.6	Sand, Silt	Prevention of most infaunal organisms
		0.75~1.2	Sand	Most cases
4	Fredette et al. (2002)	0.15	Sand	Thin cap
		0.60	Sand	Isolation cap

## 2.4 피복두께의 산정

선행연구자들에 의하여 제안된 최소피복두께는 Table 2와 같다. 피복의 목적에 따라서 단순히 물리 화학적인 분리만 할 경우 0.15~0.3 m 이내, 유기물이나 오염물의 침투를 고려한다면 0.6 m 이내, 분리와 침투를 모두 고려하는 통상적인 경우는 약 0.75~1.2 m 이내를 제안하고 있다. 본 연구에서는 선행연구자들의 연구를 고려하여 피복두께를 1.0 m(실험 시 0.1 m)로 산정하였다.

## 3. 실험결과분석

### 3.1 1회 포설량 변화에 따른 피복재 침강형상

Fig. 5는 침강이 완료되고 파고를 적용하기 전의 피복재 형상으로 전체 6 m 구간 중 중앙부에 해당하는 2~4 m 구간이다. 이를 수조 바닥면을 기준으로 피복재 두께를 연속적으로 도식화하면 Fig. 6과 같은 피복재 침강형상을 얻을 수 있다. 침강형상은 강사기가 설치된 3.0 m 전후 구간에서

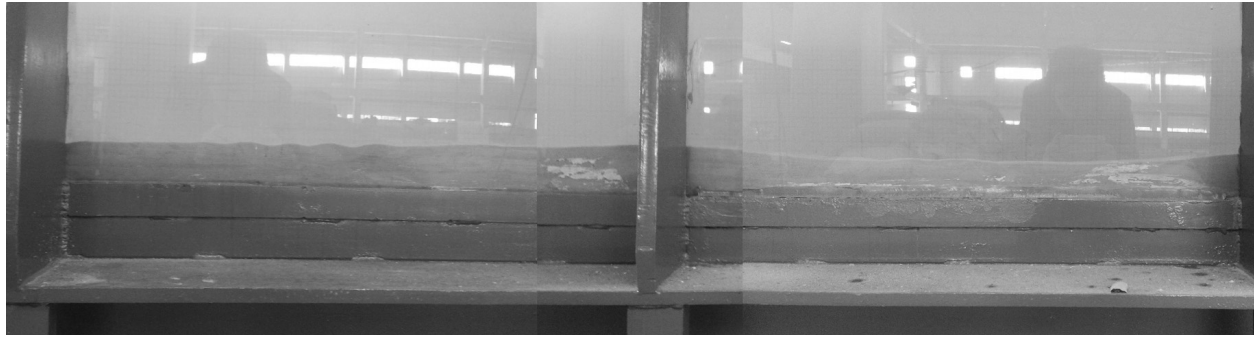


Fig. 5. Shape of capping after settlement

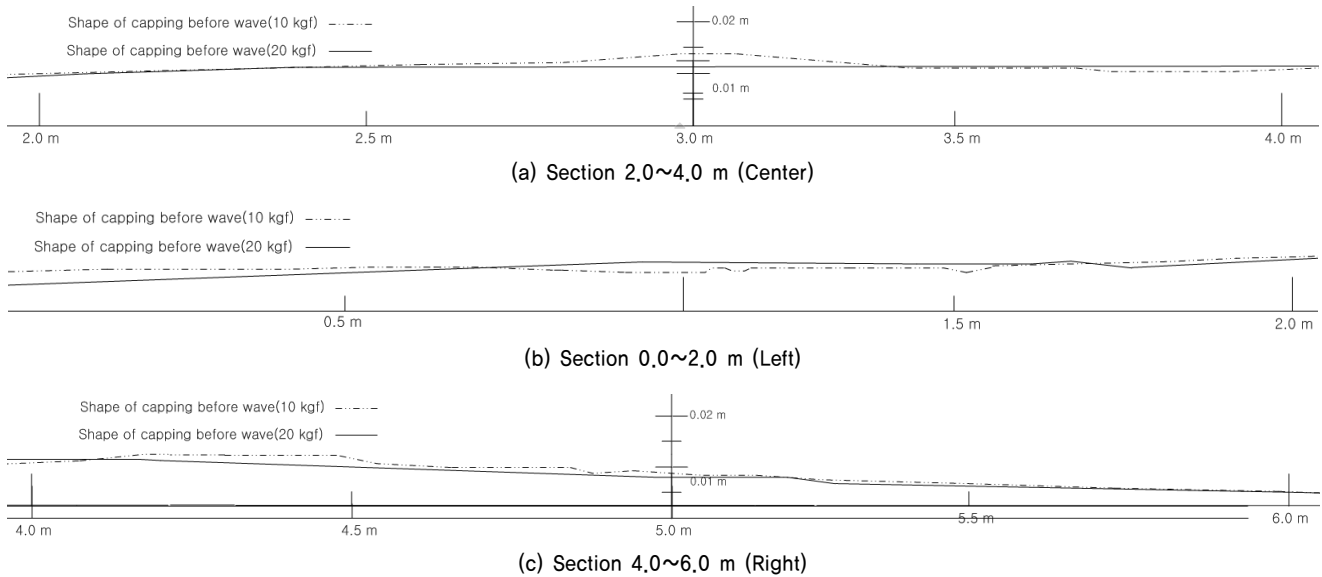


Fig. 6. Comparison of the shape of capping settlement between 10 kgf and 20 kgf per each sand fall

Table 3. Conditions of capping after settlement

Case	Sand per 1 fall (kgf)	Area of capping (m <sup>2</sup> )	Width of capping (m)	Volume of capping (m <sup>3</sup> )	Dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Void ratio
1	10	0.5330	0.50	0.267	13.251	0.95
2	10	0.5330	0.50	0.267	13.251	0.95
3	10	0.5330	0.50	0.267	13.251	0.95
4	20	0.5690	0.50	0.285	12.412	1.08
5	20	0.5690	0.50	0.285	12.412	1.08
6	20	0.5690	0.50	0.285	12.412	1.08
7	30	0.5714	0.50	0.286	12.360	1.09
8	30	0.5714	0.50	0.286	12.360	1.09
9	30	0.5714	0.50	0.286	12.360	1.09

위로 블록하였으며, 1회 포설량에 관계없이 대체적으로 약 8 m로 퍼지는 경향을 보였다. Fig. 6은 1회 10 kgf 및 20 kgf를 타설한 경우 피복재 형상을 비교한 것이다. 10 kgf씩 포설한 경우 강사기가 위치한 중앙부에서 최대 0.11 m로 20 kgf씩 포설한 경우(0.09 m)에 비하여 약 0.02 m 높고, 좌측

일부 구간에서 약 0.02 m 낮았으며, 우측부 일부 구간에서 약 0.02 m 높았다. 즉 1회 포설량을 10, 20, 30 kgf으로 변화시켜 가면서 침강형상의 차이점을 분석했으나, 전체적인 형상은 변화가 거의 없었다.

Table 3은 침강이 완료된 후(파고 적용 전) 피복재의 변형을 반영한 피복재의 단위중량, 간극비의 변화를 나타내었고, Table 4는 포설 전 피복재의 포설량, 횡수, 건조단위중량, 간극비를 정리하였다. 실험결과, 피복재의 체적은 침강 과정을 거치면서 증가하였고, 파고가 커지면서 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.2 파고변화에 따른 피복재의 형상변화

본 연구에서는 태풍과 같은 파랑이 작용한 후 피복재의 변형 및 침식 등의 거동 특성을 규명하고자 하였다. 형상변화 관측실험은 파고가 없는 조건에서 피복재 포설이 최대목표 두께에 도달 후 점진적으로 파고를 높이며 수행하였다. Fig. 7은 1회 포설량 10 kgf를 36회 투하하여 피복두께 0.11

Table 4. Conditions of capping before settlement

Case	Sand per 1 rainfall (kgf)	Counts of rainfall	Total amount of sand (kgf)	Volume of sand per 1 rainfall (m <sup>3</sup> )	Total volume of sand (m <sup>3</sup> )	Dry unit weight of sand (kN/m <sup>3</sup> )	Void ratio	Max. thickness (m)
1	10	36	360	0.0070	0.252	14.014	0.84	0.11
2	10	36	360	0.0070	0.252	14.014	0.84	0.11
3	10	36	360	0.0070	0.252	14.014	0.84	0.11
4	20	18	360	0.0145	0.261	13.531	0.91	0.09
5	20	18	360	0.0145	0.261	13.531	0.91	0.09
6	20	18	360	0.0145	0.261	13.531	0.91	0.09
7	30	12	360	0.0220	0.264	13.377	0.93	0.09
8	30	12	360	0.0220	0.264	13.377	0.93	0.09
9	30	12	360	0.0220	0.264	13.377	0.93	0.09

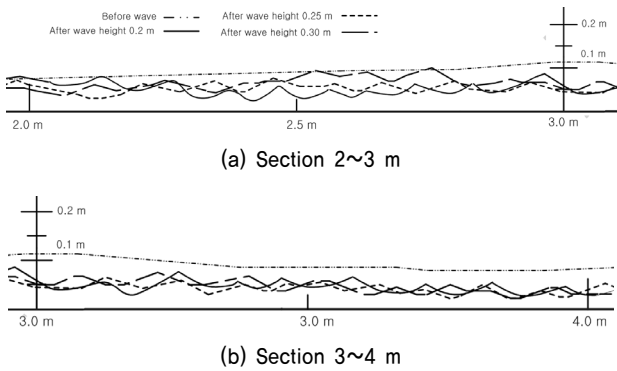


Fig. 7. Capping shape due to change of waves (case 1~case 3)

m를 확보하고 입사파고를 순차적으로 0.2, 0.25, 0.3 m(실제 2, 2.5, 3 m)로 증가함에 따른 피복재의 형상 변화를 보여주고 있다. 파고 0.1 m로 실험한 경우는 피복재 변형이 거의 없어 제외하였다. 파고가 높아짐에 따라 피복재의 변형은 점점 증가하는 것으로 나타났으며, 그 표면 형상은 파랑의 형상과 유사하게 나타났다. 중앙부가 볼록한 초기 형상은 파고 증가에 따라 피복재가 좌우측부로 퍼져나가는 형상을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 결과적으로 중앙부가 가장 많이 침식되었고, 파랑에 밀려난 피복재는 좌우측으로 이동하여 피복재의 전체폭도 점점 넓어지는 경향을 보였다.

1회 10 kgf의 피복재를 포설한 경우의 피복재 형상을 Fig. 8과 같이 정리하였다. 1회 10 kgf를 포설한 경우(Fig. 7)와 비교해 보면 Fig. 8의 중앙부가 Fig. 7보다 최대 0.02 m 정도 볼록하나 전체적인 형상은 중앙이 다소 볼록하고 좌우가 완만하게 경사진다는 점에는 유사한 경향을 보인다. 파랑이 증가함에 따라 피복재의 형상은 중앙부에서 침식이 크게 발생하고 좌우 측면으로 피복재가 밀려나가면서 전체적으로 피복재가 횡 방향으로 퍼지는 경향을 보였다. 30 kgf의 피복재를 포설한 경우도 20 kgf의 경우와 형상이 아주 유사하여 형상변화 그래프는 생략하였다.

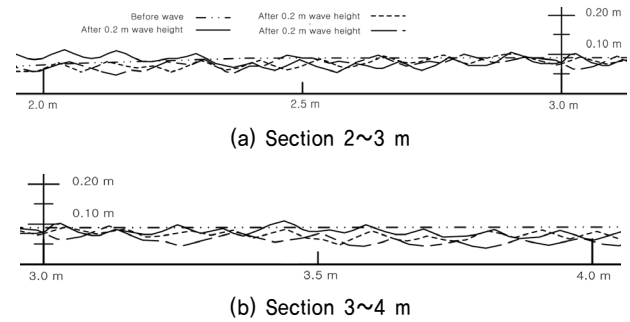


Fig. 8. Capping shape due to change of waves (case 4~case 6)

Fig. 6과 같이 초기 포설된 피복재는 파랑작용에 의하여 Fig. 7, 8과 같이 변형이 발생하게 된다. 특히 파랑작용에 의하여 피복재 표면에 ripple이 생성된다. 파랑작용에 의해 생성된 ripple의 규모에 대한 연구결과(Dingler & Inman, 1976; Nielsen, 1981; Dean & Dalrymple, 2002; Gallagher et al., 2005)를 이용하여 본 실험을 통하여 생성된 ripple의 크기를 비교하고자 한다. Dingler & Inman(1976)은 ripple의 생성과 관련된 Mobility Number( $\Psi_m$ )를 제시하였다(Eq. (1), (2)).

$$\Psi_m = \frac{(A\omega)^2}{gd(s-1)} \quad (1)$$

$$A = \frac{H}{2\sinh kh} \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 미소진폭파이론에 있어 바닥에서 입사파 주기에 대한 파랑 입자의 운동궤적이며,  $d$ 는 모래 입자의 직경,  $s$ 는 모래 입자의 비중( $s=2.63$ ),  $\omega$ 는 각속도( $\omega=2\pi/T$ )이다.  $H$ 는 입사파의 파고,  $k$ 는 파수(wave number,  $k=2\pi/L$ ),  $h$ 는 수심이다.

Nieslen(1981)은 ripple의 높이( $\eta$ )와 길이(파장,  $\lambda$ )에 대하여 Eq. (3), (4)를 제시하였다.

$$\eta = \begin{cases} 21.4\Psi_m^{-1.85} & , \Psi_m > 10 \\ 0.275 - 0.22\Psi_m^{0.5} & , \Psi_m < 10 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda = A \exp\left(\frac{693 - 0.371n^8\Psi_m}{1,000 + 0.751n^8\Psi_m}\right) \quad (4)$$

위 식에 의하면, 본 실험 조건에 의한 ripple의 높이와 길이는 Table 5와 같이 계산된다. 결과에 의하면 Nielsen (1981)의 방법으로 ripple의 형상을 계산할 경우 입사파고(H)가 증가함에 따라 ripple의 높이(η)는 감소하나, ripple의 파장(λ)은 증가하는 것으로 계산되었다.

Fig. 9는 파고 적용 전과 파고 0.2 m 적용 후 중앙부 피복재 형상을 확대한 것이다. 피복재 변형 형상에 일정한 주기가 있다고 가정하고, 최대점과 최저점을 연결하여 반복주기를 산정해 본 결과, 중앙부(2.0~3.0 m)에서는 반복주기가 약 0.10~0.14 m로 나타났다. 중앙부에서 벗어난 주변부(3.0~4.0 m)에서는 약 0.09~0.13 m로 산정되었으며, 따라

서 주기는 약 0.09~0.14 m로 추정된다.

Table 6은 이론식과 실험을 통하여 관측된 파고에 따른 ripple 형상을 정리하고 있다. 이론식과 유사하게 파고가 높아질수록 침식형상의 주기가 증가하는 경향을 볼 수 있지만 실험에서 ripple 높이는 전체적으로 침식과 연계된 형상변화로 이론식과 비교는 어렵다.

### 3.3 피복재의 침식

Table 7은 실험조건에 따른 피복재 최대침식결과를 정리한 것이다. 실험조건에 따라 침식깊이는 최소 0.045 m에서 최대 0.077 m로 나타났다. 피복재 포설에 따른 초기 두께와 대비하여 최소 50 %에서 최대 72 %까지 침식되는 것으로 확인되었다. 본 연구의 현장대상 지역의 50년 빈도 태풍파고(1.00 m)를 고려하여 파고 0.1 m로 실험한 경우(Case 1) 피복재 침식은 관측되지 않을 정도로 미미하였다.

Table 5. Calculation of capping ripple due to wave height

H (m)	A	$\Psi_m$	Ripple	
			Height (η, m)	Length (λ, m)
0.2	0.120	17.685	0.026	0.132
0.25	0.150	27.633	0.014	0.117
0.3	0.180	39.792	0.009	0.123

Table 6. Comparison of ripple length between equation and measurement

Case	Height (m)	Ripple length (m)	
		Equation	Measurement
4	0.2	0.132	0.09~0.14
5	0.25	0.117	0.12~0.15
6	0.3	0.123	0.14~0.17

Table 7. Maximum erosion depth

Case	Wave (m)	Sand per 1 fall (kgf)	Cap thickness (m)	Depth of water (m)	Max. erosion depth (m)	Accumulated waving time (hr)	Width of sand spreading (m)
0	0.1	10	0.1	1.2	0.0	2	8
1	0.2	10	0.11	1.2	0.070	2	9
2	0.25	10	0.11	1.2	0.075	4	10
3	0.3	10	0.11	1.2	0.077	6	11
4	0.2	20	0.09	1.2	0.045	2	8
5	0.25	20	0.09	1.2	0.047	4	9
6	0.3	20	0.09	1.2	0.050	6	10
7	0.2	30	0.09	1.2	0.050	2	8
8	0.25	30	0.09	1.2	0.060	4	9
9	0.3	30	0.09	1.2	0.065	6	10

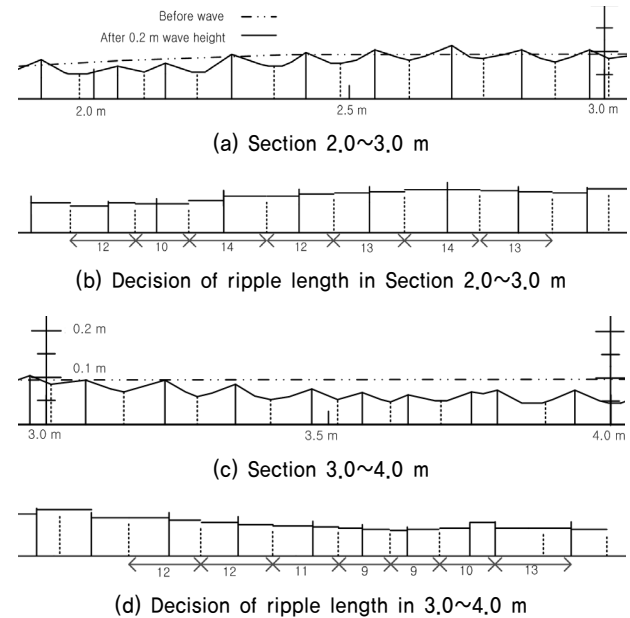


Fig. 9. Test results of ripple length in case of 0.2 m wave height

## 4. 결 론

본 연구에서는 피복공법의 적용성을 검토하기 위하여 국내 적용 후보지의 현장조건을 분석하고, 실험 모형실험에 반영하여 파랑이 피복재에 미치는 영향 및 침식량을 파악하고자 하였다

- (1) 피복재를 수중에서 1회 포설량을 10, 20, 30 kgf 씩 늘려 갔을 때 침강되어 시공되는 피복재 형상은 큰 차이가 없었다. 이는 현장조건인 그래브 준설선의 경우, 피복재의 단위중량을 약  $15 \text{ kN/m}^3$  내외로 가정할 때,  $10 \text{ m}^3$ 나  $20 \text{ m}^3$ 로 타설하여도 피복재 형상에 미치는 영향이 미미하므로 1회 타설 시 가능한 많은 피복재를 타설하는 방안이 시공성이 높다. 그러나 해저지반의 강도와 압밀특성에 따라 공학적 해석이 추가적으로 필요하다고 판단된다.
- (2) 연구대상 지역의 파고 조건인 50년 빈도 태풍파고(실파고 1.00 m)를 고려한 실험에서는 피복재의 변형이 거의 없었기 때문에, 연구대상 지역에는 피복재 3 mm 이하 모래를 피복두께 1.0 m 적용하는 것이 가능한 것으로 나타났다.
- (3) 파고 적용 후 피복재의 형상은 전반적으로 중앙부가 가장 많이 침식되었고, 파랑에 밀려난 피복재가 파고 진행 방향으로 이동하여 피복재의 전체 폭도 점점 넓어지는 경향이 나타났다. 또한 전체적인 ripple의 형상은 이론식과 유사하게 파고가 높아질수록 침식형상의 주기가 증가하는 경향을 볼 수 있다.
- (4) 파고를 임의로 증가시켜 파랑에 의한 피복재의 과변위를 유도한 결과, 파랑이 피복재 변형 및 침식에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 피복공법을 적용할 경우 대상 지역의 파랑 등 조건을 고려하여 실험을 실시하여 설계에 반영하는 것이 바람직하겠다.

## 감사의 글

본 논문은 2014년 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. Brannon, J. M., Hoeppel, R. E., Sturgis, T. C., Smith, I. and Gunnison, D. (1985), Effectiveness of capping in isolating contaminated dredged material from biota and the overlying water, Technical report, D-85-10, US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 10~25.

3. Dean, R. and Dalrymple, R. (2002), Coastal process with engineering applications, Cambridge University Press, pp. 90~91.

4. Dingle, J. R. and Inman, D. L. (1976), Wave-formed ripples in near shore sands, *Proceedings of International Conference on Coastal Engineering*, Honolulu, Hawaii, ASCE, pp. 2109~2126.

5. 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., Schauffler, 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. 20~50.

6. Gallagher, E. L., Elgar, S., Guza, T. R., and Thornton, E. B. (2005), Estimating nearshore bedform amplitudes with altimeters, *Marine Geology*, Vol. 216, Issues 1-2, 51~57.

7. Klapper, H. (1991), Sand overlaying for bottom sediment improvement by sand spreader, In *Proceedings of the 7th Annual US/Japan experts meetings*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 79~103.

8. KIOST (2005), Bioremediational method for reducing organic-pollutants in estuarine sediments with electronacceptor, *Korea Institute of Ocean Science & Technology*, pp. 5~35 (in Korean).

9. Lee, J. G., Kim, D. Y. and Park, J. W. (2011), Long-term effect of consolidation on contaminant transport, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 1, pp. 35~40 (in Korean).

10. Nielsen, P. (1981), Dynamics and geometry of wave-generated ripples, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. C7, pp. 6647~6472.

11. Palermo, M. R. (1991), Design requirements for capping, dredging research technical notes. US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 10~75.

12. Palermo, M. R., Clausner, J. E., Rollings, M. P., Williams, G. L., and Myers, T. E. (1998a), Guidance for subaqueous dredged material capping, Technical Report DOER-1, Army engineer Waterways Experiment Station, pp. 69~78.

13. Palermo, M. R., Maynard, S., Miller, J. and Reible, D. D. (1998b), Guidance for in-situ subaqueous capping of contaminated sediments, EPA 905-B96-004, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 23~41.

14. Palermo, M. R., 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. 5~85.

15. Suszkowski, D. J. (1983), Studies on capping of contaminated dredged material by the New York district corps of engineers, In *Proceedings of the 7th Annual US/Japan experts meetings*, New York, USA, US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 134~145.