

## 해안침식 방지를 위한 지오텍스타일의 실내모형실험\*

박병수\*\*, 정길수, 심도식, 윤영호

본 연구는 최근 해안침식현장의 대책공법으로 주목받고 있는 지오텍스타일 튜브의 모래주입시 발생하는 변형 특성 및 토사유출특성에 대한 실험적 연구이다. 지오텍스타일 튜브 충전시 거동특성을 알아보기 위하여 실제튜브 형상을 기준으로 반단면조건으로 실물튜브이 1/40 규모의 축소된 모형을 제작하고 계측기를 설치한 후 주문진 규사를 이용한 충전시험을 실시하였다. 실험결과 시험초기에는 하단부에 모래가 퇴적됨에 따라 상부에서 인장변형이 증가하였으나 충진이 완료됨에 따라 하중은 균등하게 분포하였고 시험초기 충전률이 낮을수록 유출되는 모래중 조립질 비율이 높았으나 충전률이 증가할수록 세립분 비율이 높을 것으로 분석되었다. 또한 현장시험 결과 충전초기 하단부에서 인장변형이 발생되었으나 충전 모래양의 증가에 따라 튜브 바닥이 해저면에 안착되면서 압축변형이 발생되었다.

**주제어:** 지오텍스타일 튜브, 충전율, 토사유출

### 1. 서론

최근 해안선은 지구온난화 등으로 인한 기상이변과 인공구조물의 설치 등으로 해안의 변화와 침식 현상이 가속화되고 있으며 특히 강원도 해안은 총해안선 연장이 길고 해안의 모래 비율이 전국에서 가장 높아 해안침식이 빈번하게 발생하고 있는 실정이다.

동해안에서의 백사장 침식현황은 약 20여개소로 보고되고 있고 대부분 해안구조물과 해안도로 건설에 따른 모래이동 및 상류하천에서의 모래채취에 의한 모래감소가 그 원인으로 파악되고 있다(김경남, 2010).

기존의 해안침식 방지 공법은 연안방향의 표사이동을 저지시켜 표사의 위쪽에 퇴사시키는 기능을 하는 돌제, 파를 소파시켜 배후의 해안선을 전진시키는 목적으로 해안선에 평행하게 설치하는 이안제 공법과 침식이 발생한 곳에 퇴적된 모래를 운반하여 침식량을 감소시키는 Sand bypassing, 면적보호

\* 본 연구는(재)강원지역사업평가원의 강원도 지역기반육성기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

\*\* 교신저자.

공법등이 있다. 최근에는 인공해안 증가로 연안의 경관 가치 및 재난예방기능 저하 등의 문제가 우려되고 있으며 이에 대한 대책으로 제시되고 있는 방파제, 호안 등의 강성공법은 주변지역의 침식 및 서식지 훼손 등의 2차 환경피해 유발가능성이 있어 자연방호림 조성, 망그로브 식재, 지오투브 등의 연성공법에 국제사회가 주목하고 있다(국토해양부, 2011).

이와 같이 해안침식을 방지하려는 연구가 국내외적으로 많이 이루어지고 있으며 최근에 박세진(2009)은 수치모형실험 및 3차원 수리모형실험으로 부터 파력발전 기능을 겸비한 해안침식 공법에 대해 검토하여 향후 침식제어 뿐만 아니라 전력생산량이나 파력발전 가능성에 대한 연구를 실시하였다. 지오텍스타일 튜브는 초기 재난복구에 많이 이용되었으나 이후 그의 효용성이 입증되면서 호안, 하천 제방보호 등에 이용되고 해안침식 분야에 적용하기 위한 연구도 많이 보고되었다(신은철, 2003; Gutman, 1979; Pilarczyk, 1995; Koerner & Soong, 1997).

한편, 지오텍스타일 튜브에 의한 해안침식 방지 대책은 최근 국제사회가 주목하고 있는 연성대책공법이나 지오텍스타일 튜브에 대한 변형특성이나 충전시 토사유출특성 등에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지오텍스타일 튜브의 변형특성과 토사유출특성에 대해 알아보기 위하여 지오텍스타일 튜브 충전 실내모형실험을 실시하였다. 또한 해안현장에 지오텍스타일 튜브의 설치시험을 통하여 그의 적용성을 알아보려고 하였다.

## II. 기본물성시험

본 연구의 튜브 충전에 사용된 시료는 주문진 규사중 주물 주강용으로 사용되는 5호사를 사용하였으며, 물리적 성질은 <표 1>에서와 같이 비중 2.60, 유효경 0.34mm, 0.075mm 체 통과율 0.79%로 나타났으며 통일분류법상 SP로 분류된다. 또한 지오텍스타일 튜브는 <표 2>에 나타난 바와 같이 폴리프로필렌 재질의 직조된 섬유로서 단위면적당 중량 9.49N/m<sup>2</sup>, 두께 3.79mm, 직조된 섬유 직물의 유효구멍 크기 509μm이며, KS K ISO 에 의한 인장강도 시험결과 경사 및 위사방향 인장강도는 각각 197.9, 179.9 kN/m로 측정되었다.

<표 1> 주문진 규사의 기본 물성

구분	측정값	구분	측정값
유효입경(mm)	0.34	통일분류법(USCS)	SP
균등계수( $c_u$ )	1.71	비중( $G_s$ )	2.60
곡률계수( $c_c$ )	1.07	#200체 통과율(%)	0.79

<표 2> 지오텍스타일 튜브의 물리 역학적 특성

구분(시험방법, 단위)	측정값	구분(시험방법, 단위)	측정값
중량(KS K ISO9864, $N/m^2$ )	9.49	인장신도 (KS K ISO 10319, %)	20.9(경사)
유효구멍크기 (KS K ISO 12956, $\mu m$ )	509		10.6(위사)
인장강도 (KS K ISO 10319, $kN/m$ )	197.9(경사)	투수계수 (KS K ISO 11058, $cm/sec$ )	$2.6 \times 10^{-1}$
	179.9(위사)	두께 (KS K ISO 9863-1 A법, $mm$ )	3.79

### III. 모형실험

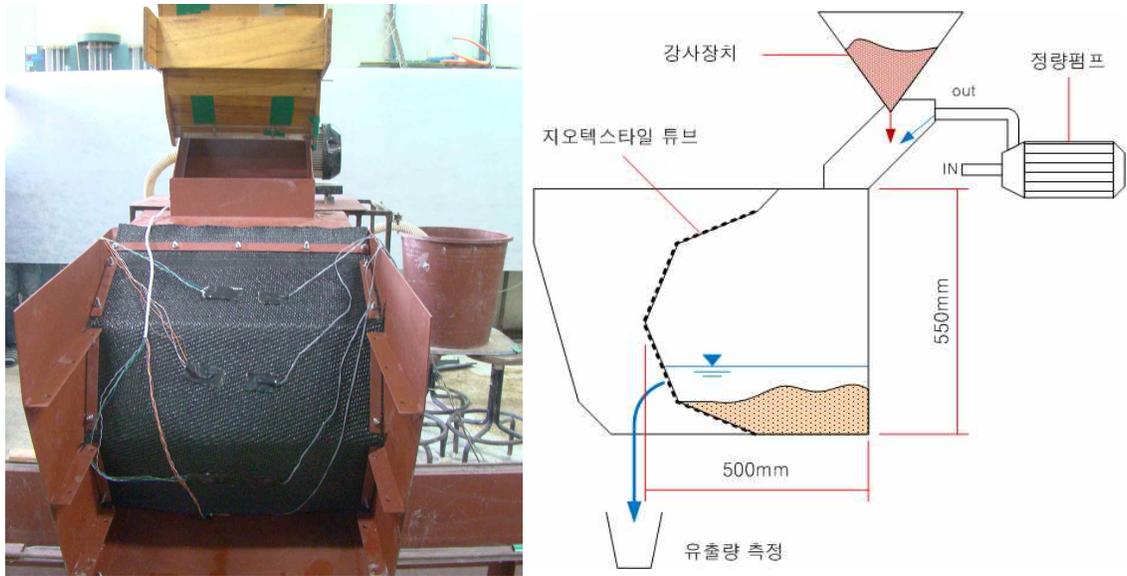
#### 1. 실험조건

실내모형실험을 통하여 지오텍스타일 튜브 충전시 거동특성을 분석하고자, <그림 1>에서와 같은 시험조건으로 실내 모형시험을 실시하였다. 먼저 모형토조는 길이 25~50cm, 폭 50cm, 높이 55cm 크기로, 내부체적은  $0.112m^3$ 으로 실제 H=2.5m 규모의 실제 튜브 형상을 기준으로 반단면 조건으로서 실물 튜브의 1/40의 규모의 축소된 모형을 사용하였으며, 토조 측면 일부를 감싸고 있는 튜브를 통해 배수될 수 있도록 밀폐된 구조를 지니고 있다.

충진용 모래는 <표 2>에 제시된 물성 조건의 주문진 규사를 사용하였으며, 지오텍스타일 튜브의 경우 충전재료로 사용되는 주문진 규사가 실제 현장에서 사용되는 모래와 유사함을 감안하여 실물을 사용하였다.

또한, 튜브내부 모래충진 방법은 강사장치와 정량펌프를 이용하여 실제 현장에서 샌드펌프 등의 고압펌프를 사용하여 물과 모래를 혼합주입하여 모래를 충전하는 방법을 모사하였다. 일반적으로 모래 충전시 사용되는 샌드펌프의 제품규격은  $1.7 \sim 2.5m^3/min$ 의 배수용량을 지니고 있으며, 실제 작업시 양정은 제품규격의 60% 내외인 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 시험에서는 실물 제원 기준으로 1/40 수준으로 축소된 모형토조를 사용하는 시험조건임을 고려하여 시험시 펌프를 통해 튜브내부로 주입되는 물의 양은  $1.25m^3/min$ 의 1/40 수준인 31.04 l/min 조건을 유지하였다.

그리고, 모래의 주입은 함수비 500~550%조건을 기준으로 시간에 따른 주입량을 일정하게 유지하기 위하여 <그림 1>에서와 같이 강사법(Raining method)를 이용하였으며, 강사장치의 경우 삼각형 형태의 용기 하단에 간격조절이 가능한 슬릿(Slit)이 부착되어 있으며, 슬릿의 간격을 폭 5mm로 유지하는 조건에서 유출되는 모래의 양을 반복 측정한 결과, 낙하되는 모래는 5.56~5.78kg/min 범위로 평균 주입량 5.7kg/min으로서 함수비는 544% 조건을 유지하는 것으로 측정되었다.

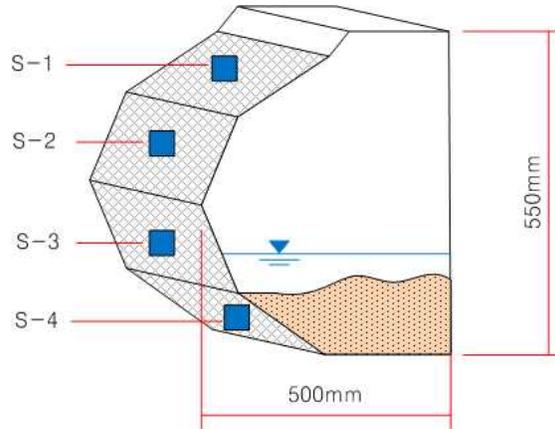


<그림 1> 모형시험 개요도

## 2. 계측기 설치

모형토조 내부에 모래충진시 충전율에 따른 튜브의 변형특성을 분석하기 위하여 <그림 2>에서와 같이 지오텍스타일 튜브 외부 4개 지점에 스트레인게이지(Strain gauge)를 설치하였다. <표 1>에서와 같이 파괴시 지오텍스타일 튜브의 신도가 10.6~20.9% 임을 고려하여 모형시험에서는 15~20% 범위의 큰 변형률 조건에서도 변형량을 측정할 수 있는 섬유용 스트레인 게이지를 사용하였다.

시험준비가 완료되면, <그림 1>에서와 같이 강사장치와 정량펌프를 이용하여 주기적으로 물-모래 혼합물을 튜브 내부에 주입하면서, 튜브 내부에 모래가 충전됨에 따라 발생하는 튜브의 변형량을 계측하였다. 또한 튜브를 통해 외부로 배출되는 물은 2.5분 주기로 각각 20리터씩 채수한 다음 5일간 침강과정을 거쳐 용기 바닥에 침전된 모래의 건조중량을 측정하여 충전율과 시간변화에 따른 유출량 변화량을 분석하였다.



<그림 2> Strain gauge 설치 개요

### 3. 현장시험

실제 토사 충전시 지오텍스타일 튜브의 변형특성을 분석하고자 현장 실물시험을 실시하였다. 시험은 강원도 강릉시 해안 현장에서 실시하였으며, 튜브 충전시 주입압력에 의한 튜브의 변형과 외형적 변화를 관찰하기 위하여 시험은 해안선에 튜브를 설치하였다.

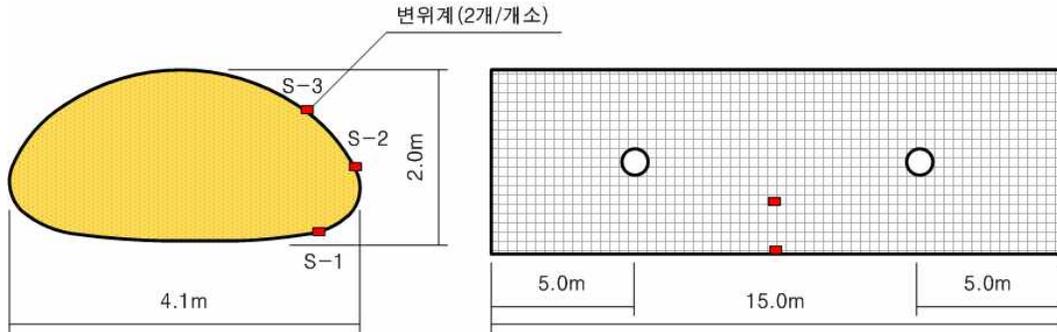
<표 3>에서와 같이 현장시험에 사용된 튜브는 칸막이가 없는 것으로 제원은 직경 3.2m, 높이 2.0m, 길이 15m 규모이며, 시험주입에 사용된 샌드펌프 용량은 관직경 150mm, 출력 15kW, 토출량 2.5m<sup>3</sup>/min의 규격을 사용하였다.

<표 3> 현장시험 개요

구분	시험조건
시험위치	강원도 강릉시 해안 현장
튜브 제원	직경 3.2m, (충진후 예상높이 2.0m, 폭 4.1m) 길이 15m
펌프 제원	관직경 150mm, 출력 15kW, 길이 15m
계측기 설치	스트레인게이지(YEF형) - 3개소 - 6개(개소당 2개) 간극수압계 - 2개소

토사충진에 의한 튜브의 변형특성을 측정하기 위하여 <그림 3>, <그림 4>에 나타난 바와 같이 튜브 주변에 모두 6개소에 변위계를 설치하였으며, 현장의 불확실한 시험여건을 고려하여 측정위치별로 2개의 변위계를 설치하여 평균값을 적용하고자 하였다. 또한 시험에 사용된 변위계는 실내시험에서와 같이 지오텍스타일 튜브의 신도를 고려하여 15~20% 범위의 큰 변형률 조건에서도 변위를 측정할 수 있는 섬유용 변위계(YEF형)를 사용하였으며, 변위계 설치후 외부충격에 의한 변위계 손상을 방지하고자 보호커버와 보호관으로 피복하였다. 이때 보호커버와 보호관이 변형거동의 억제효과를 주지 않도록

록 설치하였다.



<그림 3> 지오투브 규격 및 계측위치



<그림 4> 튜브의 계측기 설치 및 현장시험

## IV. 실내실험 결과

### 1. 변형특성

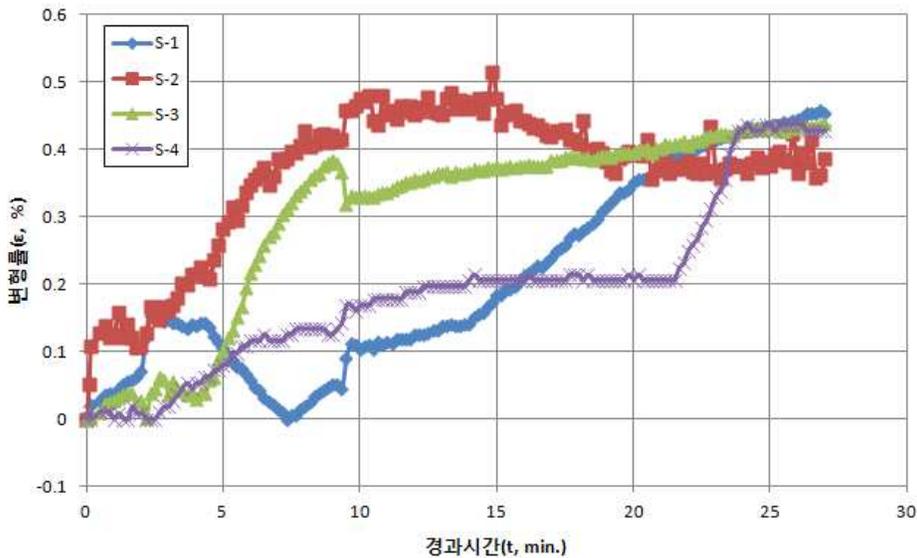
전술한 바와 같이 튜브를 충전하기 위한 모래의 함수비를 54% 조건으로 분당 5.7kg/min로 주입한 결과, <표 4>에서와 같이 0.112m<sup>3</sup>의 토조내부를 충전하는데 27분의 시간이 소요되었으며, 내부에

충진된 모래의 건조중량은 153.9kg으로 단위중량은  $13.43kN/m^3$ 으로 계산되었다.

또한 튜브 내부에 모래가 충진되는 시간동안 튜브외부에 설치된 스트레인게이지를 통해 측정된 튜브의 변형률을 정리하여 <그림 5>에 나타내었다. 그림에서 변형률은 양수는 인장 음수는 압축을 의미한다. 시험초기 5분간의 경우 튜브 하단부에 모래가 퇴적됨에 따라 하부보다는 상부에서 인장에 의한 변형이 증가하는 경향을 보이고 있다.

<표 4> 지오텍스타일 튜브내 모래 충진 결과

소요시간 (min)	소요 모래량 (kg)	충진모래 건조단위중량 ( $kN/m^3$ )
27	153.9	13.43



<그림 5> 충진시간-튜브 변형률 관계곡선

이는 시험에 사용된 측면 및 상하부 벽체에 고정된 튜브 하단부에 모래가 퇴적됨에 따라 모래 자중에 의한 하중은 1차적으로 상부로 전달되나, 상부에 고정되어 있어 상부부터 인장이 발생하는 것으로 사료된다. 5분 이후 시점부터 충진되는 모래의 양이 증가함에 따라 바닥과 상부보다는 측면부(S-2, S-3)에서의 인장변형의 증가가 두드러지며, 충진시간이 누적됨에 따라 상하부의 인장변형도 점진적으로 증가하여 25분 이후 시점부터 위치에 따른 변형률 차이는 줄어들어 0.359~0.459% 범위로 수렴하는 것으로 측정되었으며, 충진율이 100%에 도달할수록 하중은 균등하게 작용하는 것으로 나타났다.

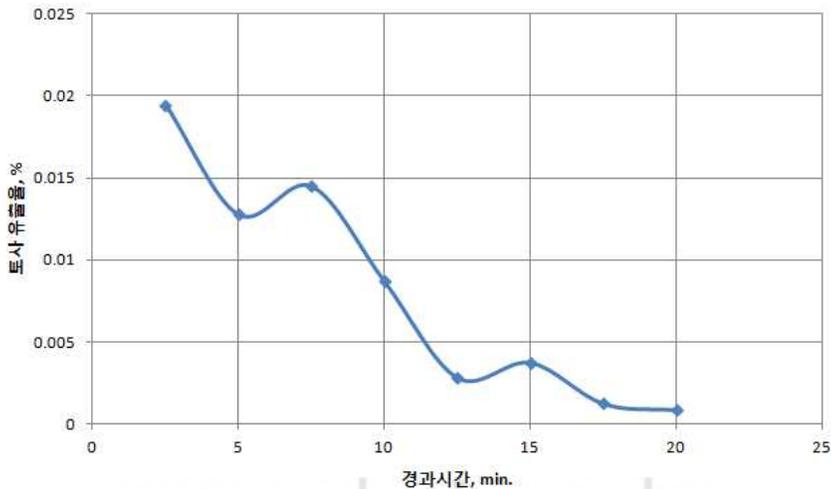
## 2. 토사 유출 특성

모래 주입시 직조된 튜브직물을 통해 유출되는 토사량을 측정하기 위하여 2.5분 주기로 20리터의 유출수를 채수하여 5일간 침강기간을 거쳐 용기 바닥에 침전된 모래의 건조무게를 측정하고 그 결과를 <표 5>와 <그림 6>에 정리하였다. 시험시작후 2.5분 경과시점에서 채수한 20리터의 유출수에는 3.892g의 모래가 유출된 것으로 측정되었으며, 이후 배수되는 물에 의해 유출되는 모래의 양은 점진적으로 줄어들어 12.5분 시점부터 1g 미만으로 줄어들어 20분에 0.169g으로 감소하며 20분 이후부터 유출되는 모래의 양은 제안된 시험방법으로는 측정이 불가능한 수준으로 감소되는 것으로 확인되었다.

또한 직조된 튜브의 유효구멍의 크기가 509 $\mu\text{m}$  임을 고려하여 40번체(425 $\mu\text{m}$ )와 200번체(75 $\mu\text{m}$ )에 잔류하는 시료량을 측정하여 튜브를 통해 유출된 모래에 대한 입경 특성을 분석하였다. 먼저 시험초기 40번체 잔류율은 29.6%으로 시험에 사용된 주문진 규사의 40번체 잔류율인 21.82%보다 증가한 것으로 나타났으며, 이후 충전시간이 경과함에 따라 40번체 잔류율은 점진적으로 감소하는 것으로 측정되었다. 또한 200번체 잔류율의 경우 시험초기 2.5~7.5분간 96.72~93.62%로 나타났다. 유출된 모래의 입도를 분석한 결과, 시험 초기 충전률이 낮을수록 유출되는 모래중 조립질 비율이 높게 나타나며, 충전률이 증가할수록 점진적으로 세립분 비율이 높을 것으로 분석되었다.

<표 5> 모래 유출량 측정결과

경과시간 (min)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
모래유출량 (g/20l)	2.892	1.552	1.898	1.237	0.564	0.748	0.248	0.169
#40체(425 $\mu\text{m}$ ) 잔류율(%)	29.60	27.06	23.50	17.91	측정불가			
#200체(75 $\mu\text{m}$ ) 잔류율(%)	93.72	93.62	96.15	77.12	측정불가			



<그림 6> 충전시간-토사유출률 관계곡선

### 3. 현장시험 결과

해당 규격의 충전시 예상되는 튜브의 용량은  $75m^3$ 으로 펌프의 규격의 60% 효율을 기준으로 토출량을 적용할 때 충전 소요시간은 3시간으로 예상되었다. 그러나, 주입구 이동설치(30분소요)와 펌프 흡입구 주변으로 해조류가 유입되어 작업효율이 저하됨에 따라 실제 충전시간은 5시간이 소요되었다.

충진시 튜브 주입되는 모래에 의해 측정된 계측결과는 변위계의 경우 수중작업조건에 의해 파랑의 영향 등 외부 시험 환경의 영향으로 인하여 설치된 6개의 변위계중 2개가 망실되어 이를 제외한 데이터를 분석하였다.

먼저 하단부의 경우, 충전초기 인장변형이 발생하는 것으로 나타나나, 충전 모래의 양이 증가함에 따라 튜브바닥이 해저면으로 안치되면서 압축 변형이 발생하는 것으로 측정되었다. 이는 지면의 굴곡의 영향으로 인하여 변위계에서 압축량이 측정된 시험적 오차로 추정된다.

측면에 위치한 변위계의 경우 최초 부력의 영향으로 수면근처에 튜브가 위치하나 모래 충전에 의해 튜브가 수면 아래로 가라 앉으면서 인장이 발생하는 것으로 나타나며 주입이 완료되었을 때 2.15%의 인장변형이 발생된 것으로 측정되었다. 또한, 중상단부의 경우 측면에 상대적인 변형은 적으나 0.58~1.35%의 인장변형이 발생하는 것으로 나타나나 측정위치가 5cm 근거리에서 위치함에도 불구하고 측정 편차가 크게 발생되었다.

한편, 설치된 간극수압계는 시험기간에 발생한 태풍으로 유실되어 계측데이터를 획득하지 못하였다.

<표 6> 위치별 변형률

측정시간		위치별 변형률(%)						비 고
		하단부		측면		중상단부		
Hr	Min	S-1-1	S-1-2	S-2-1	S-2-2	S-3-1	S-3-2	
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0	30	0.05	0.01	0.34	0.20	0.01	0.02	
1	0	0.01	0.03	0.62	0.46	0.01	0.08	
1	30	0.01	0.01	0.85	파손	0.03	0.11	
2	0	-0.01	파손	1.43		0.03	0.11	
2	30	-0.15		0.91		0.02	0.19	
3	0	-0.20		0.95		0.02	0.19	주입구 이동
3	30	-0.30		1.20		0.49	1.21	
4	0	-0.30		1.57		0.45	0.95	
4	30	-0.35		1.85		0.58	1.45	
5	0	-0.34		2.15		0.58	1.35	

### V. 결론

본 연구에서는 지오텍스타일 튜브의 변형특성과 토사유출특성에 대해 알아보기 위한 실내모형실험과 해안현장에서의 적용성을 알아보기 위하여 현장설치 시험을 실시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시험초기 충전률이 낮을 때는 튜브 하단부에 모래가 퇴적됨에 따라 상부에서 인장에 의한 변형이 증가하는 경향을 나타내며 충전되는 모래의 양이 증가함에 따라 바닥과 상부보다는 측면부에서의 인장변형 증가가 두드러지는 것으로 나타났다.

2) 충전시간이 누적됨에 따라 상하부의 인장변형도 점진적으로 증가하여 충전률 100%에 도달시 하중은 균등하게 분포하는 것으로 나타났다.

3) 유출된 모래의 입도분석 결과, 시험초기 충전률이 낮을수록 유출모래의 조립질 비율이 높았으나 충전률이 증가할수록 점진적으로 세립분 비율이 높을 것으로 분석되었다.

4) 현장 시험시공 된 지오텍스타일 튜브의 충전에 따른 변형을 분석한 결과 충전초기 하단부에서 인장변형이 발생되었으나 충전 모래양의 증가에 따라 튜브 바닥이 해저면에 안착되면서 압축변형이 발생되었다.

## 참고문헌

국토해양부. 2011. 해안침식 등에 대비한 연안해역 완충구역 제도 도입. 보도자료.

김경남. 2010. 강원 동해연안의 해안침식 피해 예방 방안. 강원발전연구원.

박세진. 2009. 파력발전시설을 이용한 해안침식제어, 관동대학교 대학원 석사학위 논문.

신은철. 2003. 수리모형실험을 통한 이안제형 지오텍스타일 튜브의 특성 분석, 대한토목학회 논문집 23(1C): 23-33.

Gutman, A. L. 2009. Low Cost Shoreline Protection in Massachusetts. *Coastal Structures*79. 1: 373-387.

Koerner, R. M. and T. Y. Soong. 1997. The Evolution of Geosynthetics. *Civil Eng., ASCE*. 67(7): 62-64.

Pilarczyk, K. W. 1995. Geotextile Systems for Coastal Protection-an Overview, Proceedings. *4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries*. Rio De Janeiro.

**朴柄洙**: 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목: “직접법에 의한 지반공학문제의 System Identification”, 1999년 8월)를 취득하였으며, 현재는 강원도립대학 건설토목과 조교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 사면안정, 준설매립, 토석류 재해 분야이며, “강원 영서지역 산사태 및 강우특성 분석”(2012), “강원 인제지역 토석류 사방시설의 준설 및 퇴적특성 분석”(2012), “토석류 발생 사면의 불포화도 사면안정해석”(2012)등의 논문을 게재한 바 있다. 현재

대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(bspark@gangwon.ac.kr).

**鄭吉洙:** 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목: “특별직교 이방성 복합판 이론에 의한 연속 콘크리트 슬래브교의 자유진동해석”, 1997년 8월)를 취득하였으며, 현재는(주)테라텍 대표이사로 재직 중이다. 주 연구분야는 사면보강, 연약지반 분야이며, 현재 대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(ksjeong3@chol.com).

**沈度植:** 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목: “특별직교 이방성 복합판 이론에 의한 연속 콘크리트 슬래브교의 자유진동해석”, 1997년 8월)를 취득하였으며, 현재는 강원도립대학 건설토목과 교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 복합재료, 콘크리트분야이며, 현재 대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(kbmq527@hanmail.net).

**尹永鎬:** 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고, 현재 강원도립대학 건설토목과에서 교수로 재직 중이다. 쇄파대 내에서의 연안류 및 해안재해방재분야에 관심을 가지고 있으며 수리학(2002), 기초수문학(2004)과 항만공학(공저, 2009) 등의 저서가 있다(yhyoon@gw.ac.kr).

투 고 일: 2013년 05월 30일

수 정 일: 2013년 06월 26일

게재확정일: 2013년 06월 29일



## Experiment of Geotube for the Prevention of Beach Erosion

Byung Soo Park, Gil Soo Jeong, Do Sik Shim, Young Ho Yoon

This study is experimental research according to sand injection about the deformation and debris yield characteristics of geotextile tube which is focused as an alternative prevention method of beach erosion recently. Model of 1/40 scale to prototype was made to analyze the behavior of geotextile tube according to filling rate. At the beginning of experiment, stress deformation was increased at the upper tube when the sand was deposited at the bottom of tube. Load was uniformly distributed and the rate of coarse particle was high when the filling rate was low at the beginning of experiment. However, rate of fine particle was high when the filling rate was high. Furthermore, it was found that stress deformation was occurred at the bottom of tube from the beginning of filling. Bottom of tube was settled and compress deformation was occurred when the amount of filling sand was increased.

**Key words:** geotextile tube, filling rate, debris yield