

토목섬유 구조의 거동에 대한 수리모형실험 및 수치해석

심도식, 이종호*

본 연구는 토목섬유 구조체의 해안선 적용성을 알아보기 위한 수리모형실험 및 수치해석적 연구이다. 수리모형실험은 토목섬유 구조체를 설치한 경우와 일반 토목섬유 구조체를 설치하지 않은 경우, 투수성을 개량한 토목섬유 구조체를 설치한 경우 3가지에 대하여 실시하였다. 실험결과 개량된 토목섬유 구조체를 설치한 경우 해안침식 방지효과가 발현되는 것으로 확인되었다. 한편, 토목섬유 구조체의 모래충진시 거동을 알아보기 위한 수치해석 결과 모래충진시 전단응력은 구조체 하부 측면방향으로 집중되었으며 상재하중의 영향으로 구조체 하부에 응력이 증가되는 것으로 분석되었다. 또한 뒷채움지 구조체 배면하부에서 전단응력이 증가하였고 뒷채움 하중의 영향으로 측면만곡부에서 변위증가가 최대로 발생되었다.

주제어: 토목섬유, 수리모형실험, 해안침식

1. 서론

최근 기후 변화와 해안내 인공구조물 증가 등의 요인으로 인해 해안침식이 가속되는 상황으로 침식 방지 및 보호를 위해 콘크리트 제품과 같은 보호공법과 토목 섬유제품 및 기타 다른 제품들이 사용되고 있다. 그러나 사석과 콘크리트 등을 활용하는 기존의 해안침식방지공법은 재료 확보의 어려움, 공사비 및 유지관리비 상승, 파도와 조수의 영향에 의한 파괴사례 증가 등의 문제를 야기하므로 기존 공법의 한계를 개선하기 위한 대체 재료 및 공법의 개발 적용에 많은 노력이 시도되고 있다.

토목섬유(Geosynthetics)는 고분자 재료를 이용하여 만든 재료로서, 특히 지반공학 분야에서 토목섬유는 필터, 배수, 지반보강, 차수 등 다양한 목적으로 광범위하게 사용되고 있다.

지오텍스타일튜브공법은 1970년대 네덜란드의 Delft 수공학연구소에서 초기 개념적 연구가 이루어졌으며 1980년대 초반 브라질에서 최초의 현장적용이 시도된 이래 네덜란드와 독일, 미국을 비롯한 세계 각국에서 하천 및 해안구조물, 제방등으로 활용되어지고 있다.

지오텍스타일 튜브공법에 대한 연구는 크게 실험적 연구와 수치해석 연구 및 시공사례분석이 수행

* 교신저자.

되어져 왔다. 실험적 연구는 지오텍스타일의 특성에 관한 연구와 축소모형에 대한 수리모형시험이 주로 수행되어졌으며 수치해석 연구는 2차원 해석을 바탕으로 매개변수적 해석이 주를 이루고 있다.

Koerner(1996)는 지오텍스타일튜브의 설계시 원단강도보다 상대적으로 작은 봉합강도를 기준으로 설계하여야 하며, 봉합강도는 원단강도의 최소 90% 이상이 확보되어야한다고 보고하였다. 또한 그는 Beaufort 해안의 인공섬의 해안선 보호구조물로 제안된 계비온과 모래 채움 튜브에 대한 비교연구와 수리 동역학적 안정성시험 연구를 통해, 해안 비탈면 경사 1:3 튜브 충전율 90%, 불규칙 파조건에서에서 계비온에 비하여 모래채움 튜브가 더 안정하다고 보고하였다.

Perry(1993), Pault, *et. al.*(1998)는 해안 제방 및 제방코어 재료로서 지오텍스타일의 활용가능성에 대하여 연구를 수행하였다. 지오텍스타일 튜브공법에 대한 수치해석연구는 주로 지오텍스타일을 무게가 없으며 비신축성의 얇은 멤브레인으로 가정한 2차원 해석이 수행되어졌다. 또한 채움 작업에 의한 내부에 압력과 지오텍스타일의 인장력에 대한 평형해석을 통하여 튜브의 높이와 폭 등의 형태를 예측하였다.

Liu(1981)는 모래채움 튜브에 대한 수치해석연구를 통하여 지오텍스타일에서 발생하는 응력과 평형 해석방정식을 제시하였으며, 실내모형시험을 통하여 지오텍스타일 신율의 영향을 분석하였다. 또한 토사지오텍스타일간의 접촉면 마찰특성에 따른 모래채움튜브의 형태변화에 대하여 보고하였다.

Caroll(1994)은 원통형상의 지오텍스타일튜브에 단위중량이 다른 두 종류의 슬러리가 포함 될 경우에 대하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 몇 가지의 예제해석을 통하여 원주방향의 응력 및 원주 직각방향으로 작용하는 응력과 지오텍스타일튜브의 형상과의 관계방정식을 제시하였다.

지오텍스타일튜브에 관한 국내연구는 이희재(2001)는 국산 지오텍스타일을 활용한 지오텍스타일튜브공법의 적용성에 대하여 다양한 실내실험과 환경실험을 수행하여 국내 생산 폴리에스터 지오텍스타일 경우의 재질기준, 유실율, 접촉 마찰특성, 환경적 영향 등에 대하여 보고하였다. 신문섭 외(2003)는 지오텍스타일튜브를 해안 침식방지를 위한 인공 리프형태로 연안에 설치 할 경우의 수리모형시험을 수행하여 효과적인 파랑 감쇄효과를 얻었으며 설치 조건 및 형태에 따른 안정성 확보 방안을 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 수리모형실험 및 수치해석을 통하여 토목섬유 구조인 지오텍스타일 튜브를 해안에 적용하였을때의 거동을 알아보고자 하였다.

II. 수리모형실험

1. 실험개요

1) 조파수로

토목섬유 구조를 해안에 설치하였을때의 거동을 알아보기 위하여 수리모형실험을 실시하였다. 실험은 폭 0.7m, 높이 1.5m, 길이 40m의 수로에서 수행되었으며, 조파수로에는 전기 서보피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한 단면수로는 주기와 파고를 연속적으로 변화시킬 수 있게 설치되어 있으며, 전면 40m 구간을 강화유리로 처리하여 실험장면 관찰이 용이하도록 되어있다. 실험수로에는 수로 끝단부에는 각각 경사식으로 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다.

2) 모형제작

구조물 인근 해역의 해저경사를 현장조건과 유사하게 재현함으로써 수심의 영향을 받아 변형되면서 튜브에 도달하는 입사파의 형태를 현장조건과 유사하게 재현하였다. 실험실에서 재현되는 파의 파고는 조파판의 움직임에 따라 밀고 당겨지는 것에 의해 결정되므로 조파판의 이동거리와 조파판 위치에서의 수심은 파고 결정에 중요한 요소가 되므로, 제한된 길이의 수로를 이용해 구조물 위치에서 설계 파 및 안정성 검토시의 안정성의 여유 정도를 확인하기 위해 설계파보다 큰 파고를 발생시키기 위해서는 조파판에서의 수심이 구조물 위치에서의 수심보다 클 필요가 있다.

한편, 실험에 사용된 토목섬유 구조체는 <그림 1>에 도시하였으며 내부는 주문진 표준사를 이용하여 충전하였다. 시험에 사용된 튜브제원은 폭 4.8m 높이 2.4m크기의 실물제원을 기준으로 축척 1/30로 제작되었다. 실험은 3가지로 토목섬유를 설치하지 않은 경우와 토목섬유 구조체를 2가지로 변화시켰는데 일반적인 토목섬유 구조체에 대한 경우와 토목섬유 구조체의 투수성을 향상시킨 개량된 토목섬유 구조체의 경우를 비교하고자 하였다.

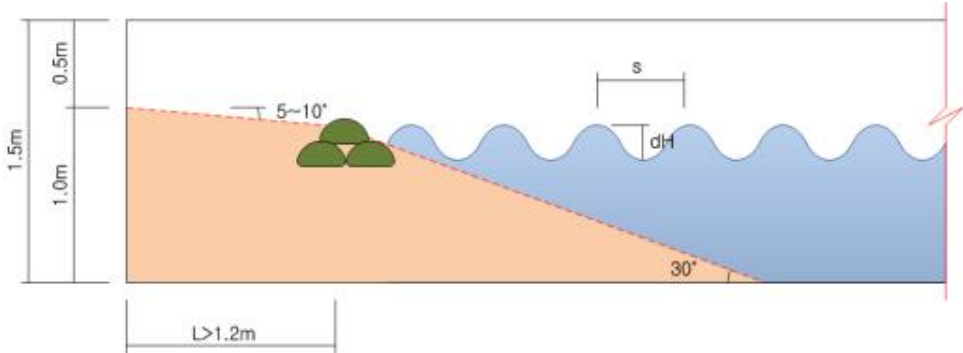


<그림 1> 토목섬유로 제작한 구조체

3) 실험 단면 결정

토목섬유 구조물 설치조건에 따른 구조체 배면의 침식량을 평가하기 위하여 수리모형실험을 수행하

였다. <그림 2>, <그림 3>에 나타낸 바와 같이 축소된 토목섬유 구조체 모형을 해안선에 배치하고, 시험파를 가하여 구조체주변의 지반 침식변화를 주기적으로 측정하였다.



<그림 2> 실험단면도



<그림 3> 조파수로의 실험단면

4) 실험방법

계측된 파고자료를 검증하기 위하여 매회 입반사 분리법을 통해 분리된 입사파를 목표치와 비교하여 5%오차 범위 내의 파랑자료를 사용하였다. 불규칙파는 Bretschneider-Mitsuyasu스펙트럼을 이용하였으며, 구조물 설치위치에서의 통과파에 대한 통계분석은 Zero-up-Crossing방법으로 해석하였으며, 500sec를 조파한 후 100sec~500sec사이의 400sec동안의 자료를 분석하여 설정하였다. 또한 모든 실험파랑을 이론적통계특성($H_{max}/H_{1/3} = 1.8$, $H_{1/10}/H_{1/3} = 1.3$)과 근사하게 설정하였다.

본 실험에서는 0.05초의 시간간격을 선택하여 디지털 신호를 제작하였으며 총 신호수는 FFT를 이

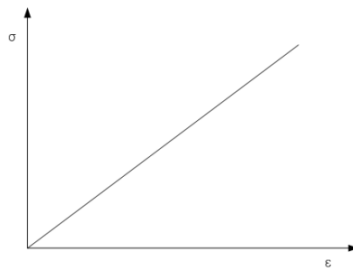
용한 자료의 처리를 위해 2의 자승의 신호수를 이용하며, 실험에서는 $2048(2^{11})$ 의 총 신호수를 선택하여 파랑신호를 제작하였다. 제작된 디지털 신호는 D/A변환기를 이용하여 전기적 신호로 변환되어 조파기의 제어부로 전달되며, 이 신호를 이용하여 조파를 수행한 후 파고계로 관측한 신호에 의해 조정을 실시했다.

III. 수치해석

본 장에서는 토목섬유 구조의 시공단계별 변위 및 전체 활동에 대한 평가를 하기 위하여 유한요소 해석 프로그램인 Midas SoilWorks v3.5를 사용하여 침투해석을 연계한 시공단계별 변위해석을 수행하였다.

1. 구성모델의 특성

본 해석에서 토목섬유 구조의 거동을 모사하기 위하여 탄성모델을 적용하였다. 선형탄성모델은 지반 재료를 모델링하는 구성모델중 가장 단순한 구성모델로서 응력이 변형률에 직접적으로 비례하는 관계로 구성되며, 비례상수는 탄성계수(E)와 포아송 비(ν)이며, 3차원 거동에 대한 응력 변형률 관계는 다음과 같다.



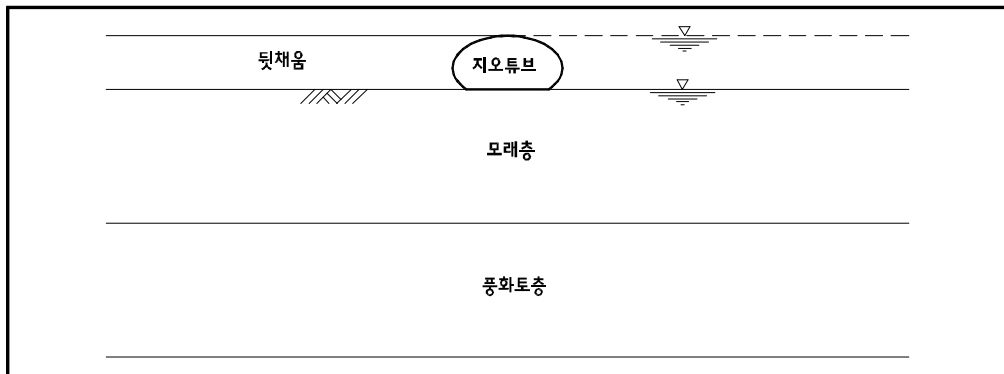
<그림 4> 선형 탄성 모델의 응력-변형률 거동

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & & & \\ \nu & 1-\nu & \nu & & & \\ \nu & \nu & 1-\nu & & & \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & & \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} \quad (1)$$

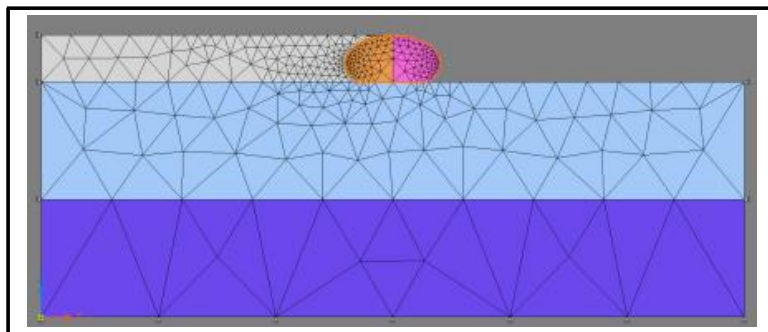
위식에서 2차원 해석에 대하여 $\tau_{yz} = \tau_{zx} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ 이고, 특히 평면해석에 대하여 $\epsilon_x = 0$ 이다.

2. 해석 모델링

현장에 설치된 토목섬유 구조체를 모사하기 위하여 <그림 5>와 같은 지층조건을 가정하여 <그림 6>과 같이 유한요소 격자망을 구성하였다. 수치해석 과정은 절점좌표 입력 및 유한요소망을 구성한 후 경계조건과 지반물성치를 입력한다. 이후 원지반상태의 변위를 초기화하고 토목섬유 구조체의 시공 및 뒷채움 등 시공단계에 따른 침투해석을 단계시공이 완료될때까지 반복한다. 유한요소해석은 불평형 하중벡터 계산과 강성매트릭스를 형성하고 변위와 변형률, 응력 증가량의 계산을 위하여 수립될 때까지 반복계산하게 된다. 한편, 지오투브와 뒷채움재와의 경계면에 대한 경계면 요소는 사용하지 않았으며 뒷채움재의 물성은 연약지반을 고려하여 채움재와 다른 물성을 입력하여 해석하였다.



<그림 5> 해석 단면조건



<그림 6> 유한요소 격자망의 구성

3. 지반 물성 입력자료

수치해석시 적용된 토목섬유 구조체의 재료적 특성 및 지반물성값은 기존적용 사례 및 각종 문헌자료를 참고하여 <표 1>과 같이 적용 하여 해석하였다.

<표 1> 수치해석시 적용된 지반정수

| 구분 | 단위중량 (kN/m^3) | 점착력 (kPa) | 내부마찰각 (ϕ) | 변형계수 (kPa) | 포아송비 |
|------|----------------------|--------------|---------------------|-----------------|------|
| 채움모래 | 18.0 | 0 | 25 | 10000 | 0.35 |
| 모래층 | 18.5 | 0 | 28 | 15000 | 0.35 |
| 뒷채움 | 19.0 | 10 | 25 | 20000 | 0.35 |
| 풍화토층 | 19.0 | 20 | 25 | 50000 | 0.30 |
| 토목섬유 | - | - | - | 7×10^6 | 0.45 |

IV. 실험 및 해석결과

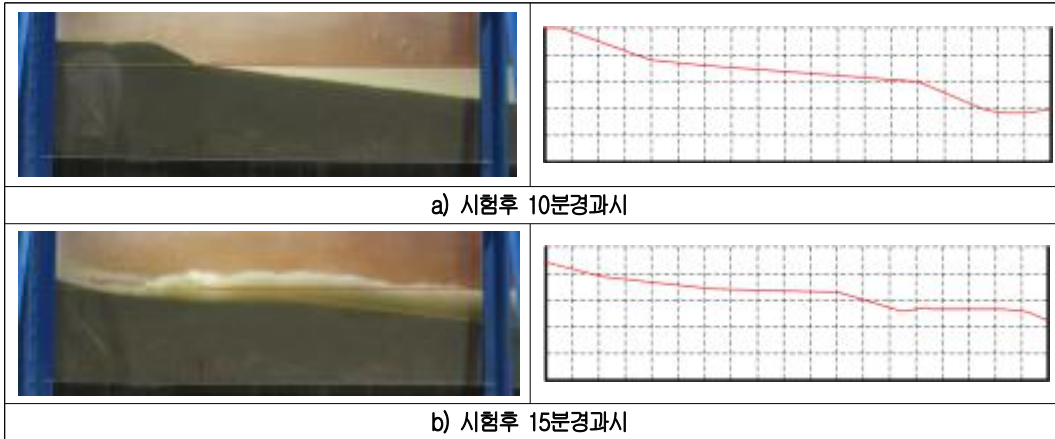
1. 실험결과

토목섬유 구조체의 해안설치시 너울성 파랑에 대한 해안침식에 대한 거동을 분석하기 위하여 수리모형시험을 실시하였다. 3m 10sec 조건의 너울성 파랑을 발생시킨 다음 침식량을 분석하여 시험방법에 대한 적용성을 검증하였다.

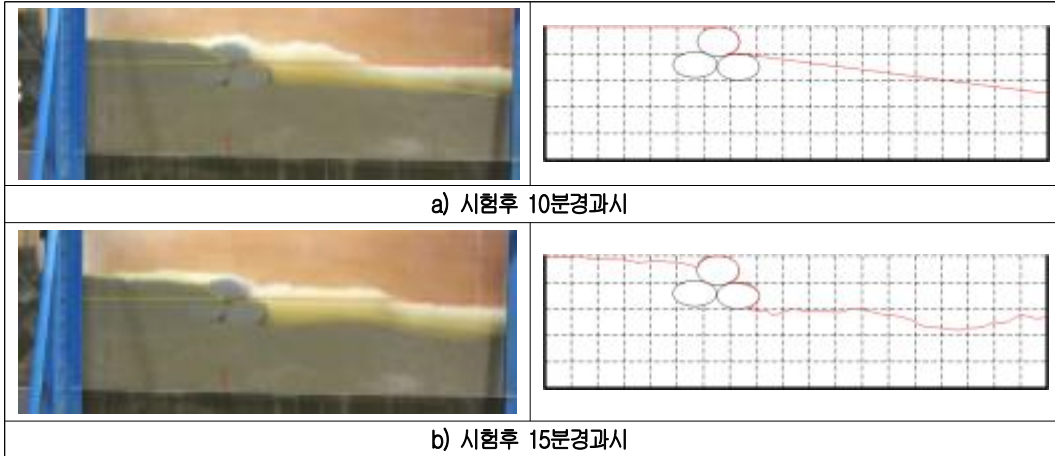
시험결과, 토목섬유 구조체를 설치하지 않은 무보강 조건(Case-1)의 경우 시험시작 후 부터 지속적으로 침식이 발생되었으며, 시간이 경과함에 따라 해안선에서의 급격한 침식현상이 수리모형실험을 통하여 나타났다.

또한 일반적인 토목섬유 구조체를 모델링한 Case-2 시험조건의 경우 시험초기 구조체 전면의 침식은 지속적으로 발생하는 것으로 나타났으나, 배면의 침식억제효과는 10분간 유지되다 이후시점부터 점진적으로 침식이 발생하는 것으로 나타났다.

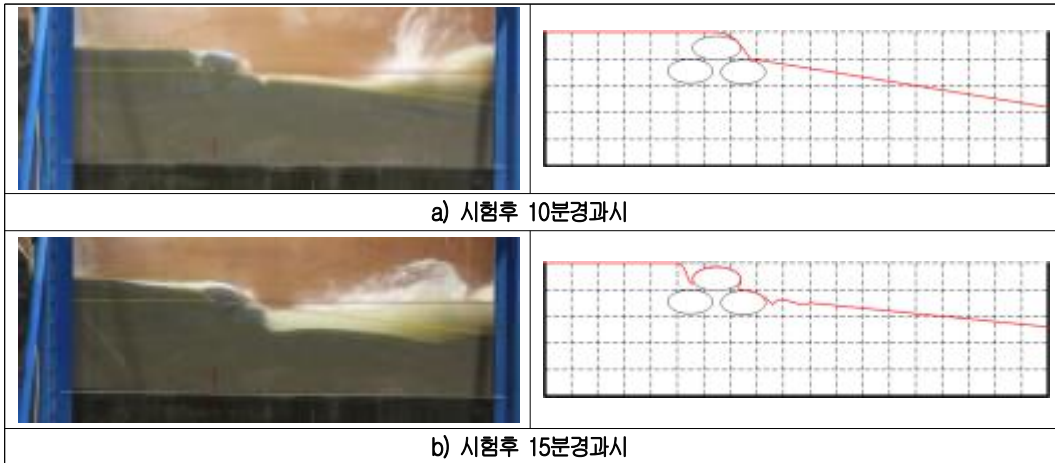
그리고 개량된 토목섬유 구조체 조건을 모델링한 Case-3 시험조건의 경우 Case-2시험에 비하여 2~3분의 시차를 두고 유사하게 침식이 발생하는 것으로 나타나, 침식방지효과가 발현되는 것으로 나타났다. 전반적으로 조파후의 지형의 변화정도는 가파른 해안경사와 많은 모래가 유실, 파랑의 도달거리 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 너울성 파랑은 해안선을 기준으로 1.5~2.0m 부근에서 검파에 의한 침식깊이가 증가함에 따라 파랑에너지가 증가하는 특징을 보이고 있으며, 파랑은 해안에서 멀리 떨어져 있는 곳까지 피해를 주었다. 초기 단면과 비교하였을 때 그 차이가 확연히 나타났고 상당한 양의 모래와 해변이 침식이 되었다. 해수면 근처에서 발생한 침식의 경향은 모두 비슷하였고 그 차이가 미소하였다.



<그림 7> 시험결과(Case-1)



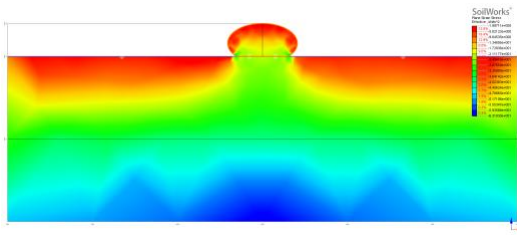
<그림 8> 시험결과(Case-2)



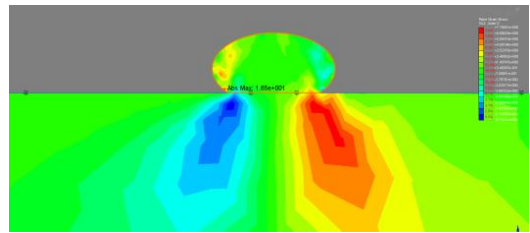
<그림 9> 시험결과(Case-3)

2. 수치해석 결과

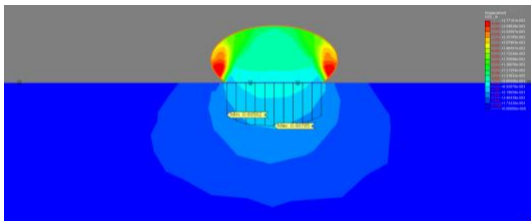
유한요소해석을 통해, 토목섬유 구조체내 모래충진을 모델링한 결과, 구조체 충진에 따른 응력-변위도를 <그림 10>~<그림 13>에 나타내었다. 그림에 도시한 바와 같이 내부 충진된 구조체의 상재하중의 영향으로 구조체 하부에 응력이 증가하는 것으로 나타나며, 전단응력은 구조체의 변형률이 큰 하부 측면 방향으로 집중되는 것으로 나타났다.



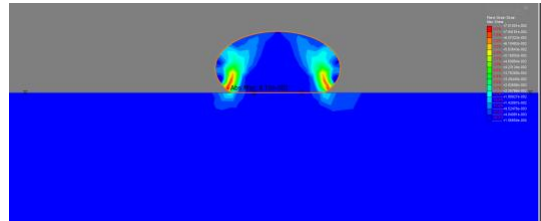
<그림 10> 충진시 전응력 분포도



<그림 11> 충진시 전단응력 분포도

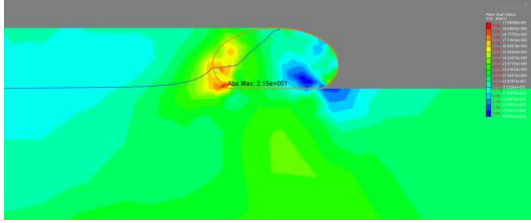


<그림 12> 충진시 전체변위 분포도

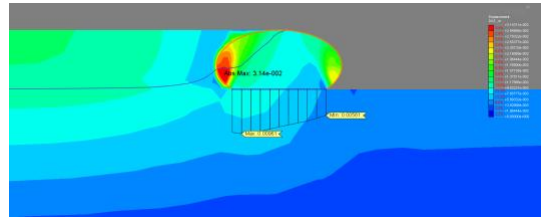


<그림 13> 충진시 최대 전단변형률 분포도

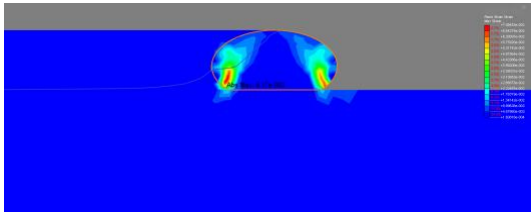
또한 토목섬유 구조체 배면에 뒷채움을 실시한 경우, 구조체와 주변지반에서의 응력-변형 분포도를 정리하여 <그림 14>~<그림 16>에 나타내었다. 전반적으로 뒷채움에 의해 구조체 배면 하부에서의 전단응력이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 뒷채움 하중의 영향으로 측면 만곡부에서의 변위 증가가 최대로 발생되는 것으로 나타났으며, 튜브 측면 하부 양측에서 전단변형이 증가하는 것으로 나타났다.



<그림 14> 배면 매립시 전단응력 분포도



<그림 15> 배면 매립시 전체변위 분포도

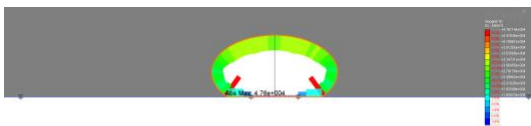


<그림 16> 배면 매립시 최대 전단변형률 분포도

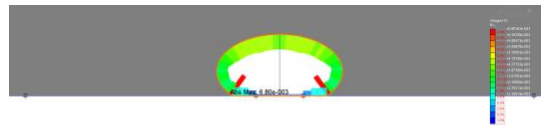
1. 토목섬유 구조체의 응력-변형 거동

<그림 17>, <그림 18>은 토목섬유 구조체 충전시 토목섬유에서 발생하는 응력 변형률 분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 지반에 안치된 구간 외측의 하부 측면 구간에서 응력과 변형률이 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 앞서 모형시험과 현장시험 결과에서와 같이 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

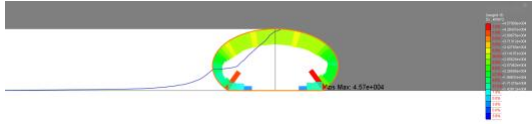
또한 토목섬유 구조체 배면 뒷채움시 하중에 의해 발생하는 구조체의 축응력과 변형률 분포도를 <그림 19>, <그림 20>에 나타내었으며, 하중증가에 따라 전체적으로 응력과 변위가 증가하는 것으로 볼 수 있다.



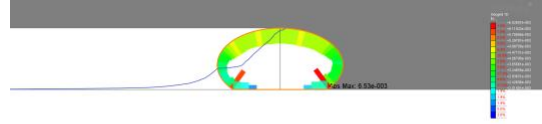
<그림 17> 토목섬유 구조체의 축응력 분포도



<그림 18> 토목섬유 구조체의 변형률 분포도



<그림 19> 뒷채움시 토목섬유 구조체의 축응력 분포도



<그림 20> 뒷채움시 토목섬유 구조체의 변형을 분포도

V. 결론

본 연구에서는 토목섬유 구조체에 대한 수리모형실험 및 수치해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수리모형실험 결과, 토목섬유 구조체를 설치하지 않은 무보강 조건의 경우 시간경과에 따라 해안선에서 급격한 침식현상이 관찰되었고, 일반 토목섬유 구조체를 설치한 경우 구조체 전면의 침식은 발생하였으나 배면의 침식 지연 효과가 나타남을 확인하였다.

2) 개량된 토목섬유 구조체에 대한 수리모형실험결과 침식방지 효과가 발현되는 것으로 확인되었다.

3) 수치해석 결과 토목섬유 구조체 내부에 모래충진시 전단응력은 구조체 하부 측면방향으로 집중되었으며 상재하중의 영향으로 구조체 하부에 응력이 증가하는 것으로 분석되었다.

4) 뒷채움에 의한 토목섬유 구조체의 거동을 수치해석한 결과 전반적으로 구조체 배면하부에서 전단응력이 증가하였고 뒷채움 하중의 영향으로 측면만곡부에서 변위증가가 최대로 발생되었다.

참고문헌

- 신문섭, 안경수, 신은철. 2003. 토목섬유를 활용한 인공리프의 기능에 관한 연구. 한국수자원학회. 36(4): 623-631.
- 이희재. 2001. 국산지오텍스타일을 활용한 환경지오투브의 적용성 평가에 관한연구. 인천대학교 석사 학위 논문.
- Koerner, R. M. and G. R. Koerner. 1996. Geotextiles used as Flexible Forms, *Geotextiles and Geomembranes*. 14(6): 301-311.
- Perry, E. B. and M. Myers. 1993. Innovative Methods for Levee Repair. *The REMR Bulletin, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station*. 10(3): 1-6.
- Plaut, R. H., S. I. Liapis, and D. P. Telionis. 1998, When the Levee Inflates, *Civil Engineering*.

ASCE. 68(1): 62-64.

Liu, G. S. 1981. *Design Criteria of Sand Sausages for Beach Defense*. Proceedings 19th Congress of the International Association for Hydraulic Research. New Delhi: India.

Carroll, R. P. 1994. Submerged Geotextile Flexible Forms using Noncircular Cylindrical Shapes, Geotechnical Fabrics Report. *Industrial Fabrics Association International*. 12(8): 4-15.

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

李鍾昊: 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목: 준설매립지반의 압밀거동에 관한 수치해석 및 실험적 연구, 2000. 2)를 취득하였으며, 현재 경동대학교 토목공학과에서 교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 연약지반, 사면안정분야이며, 현재 대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(kwcon@k1.ac.kr).

투 고 일: 2013년 10월 30일

수 정 일: 2013년 11월 26일

게재확정일: 2013년 11월 28일

Numerical Analysis and Hydraulic Model Experiment for Structural Behavior of Geotextile

Do Sik Shim, Jong Ho Lee

The objective of this study is to investigate coastal applicability of geotextile through numerical analysis and hydraulic model experiment. Hydraulic model experiments were conducted in three cases: geotextile installed, normal geotextile installed, and modified geotextile permeability. Test result shows that installation of geotextile has prevention effect for coastal erosion. Furthermore, in numerical analysis results to investigate behavior of geotextile in case of sand filling, shear stresses concentrate and increase the lateral direction under the geotextile as effect of overburden load. Also, shear stresses increase under the backface of backfill structure and displacement was occurred the maximum value at the side flexure as influence of backfill load.

Key words: geotextile, hydraulic model experiment, coastal erosion