

수치해석기법을 이용한 지오텍스타일 튜브의 거동분석 Behavior of Geotextile Tube by Numerical Analysis

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 오영인²⁾, Young In Oh, 조인휘³⁾, In Hui Cho

- ¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
- ²⁾ 캘리포니아 주립대 Post Doc. 연구원, Post Doctoral Program Research Scholar, Dept. of Civil Engineering, California State University at Sacramento
- ³⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon

SYNOPSIS : Traditional forms of river and coastal structures have become very expensive to build and maintain, because of the shortage of natural rock. Geotextile tubes hydraulically or mechanically filled with dredged materials have been applied in hydraulic and coastal engineering in recent years(shore protection structure, detached breakwater, groins and jetty). Recently, new preliminary design criteria supported by model and prototype tests, and some stability analysis calculations have been studied. In this study, the numerical analysis was performed to investigate the behavior of geotextile tube with various properties of geotextile and hydraulic pumping conditions. Numerical analysis was executed to compare with the results from the large-scale field model tests, and also compared the results of 2-D plane strain analysis and 3-D FEM analysis. A geotextile tube was modeled using the commercial finite element analysis program ABAQUS and the one-quarter of tube was modeled. Behavior of geotextile tube during the hydraulic pumping procedure was analyzed by comparing the large-scale field model test and numerical analysis. The shape variation and maximum tube height between the numerical analysis results and large-scale filed test results are turned out to be a good agreement.

Key words : Geotextile tube, Numerical analysis, Hydrostatic pressure, GeoCoPS, ABAQUS

1. 서론

본 연구에서는 수치해석기법을 활용하여 지오텍스타일 튜브의 시공과정에서의 형태변화에 대하여 연구를 수행하였으며, 수치해석결과를 기존 연구 발표된 실대형 현장 모형시험 결과와 비교 분석하였다. 실대형 현장시험은 본 연구진에 의하여 수행되었으며, 우리나라 서·남해안에 많이 분포하고 있는 세립질 토사를 채움토사로 적용할 경우 지오텍스타일 튜브의 시공과정에서의 거동과 시공 후 침강, 배수, 압밀에 의한 거동분석을 실시하였다. 본 연구의 수치해석은 2차원 평면변형 해석과 3차원 유한요소해석 기법을 이용하여 채움 과정에서 발생하는 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 형태변화와 실대형 현장시험 결과를 비교 분석하였다. 또한, 3차원 유한요소해석에서는 정수압과 지오텍스타일의 강성변화에 따른 매개변수 해석을 통하여 지오텍스타일 튜브공법의 3차원 유한요소해석 기법을 제시하였다. 2차원 평면변형 해석이론에 의한 수치해석은 지오텍스타일 튜브 전용해석프로그램인 GeoCoPS(version 2.0)을 활용하였으며, 3차원 유한요소 해석은 다양한 구조해석과 고급해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS(version 5.88)를 이용하였다. 본 연구의 수치해석 결과는 정수압 변화에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이 변화를 비롯한 폭, 길이 등의 형태변화와 지오텍스타일의 강성 변화에 따른 영향을 분석하였다.

2. 수치해석 이론

2.1 2차원 평면 변형 해석

지오텍스타일 튜브의 2차원 평면변형 해석이론은 Silvester, Liu, Leschinsky and Leshchinsky 등에 의하여 연구되었다. 2차원 평면변형 해석이론은 길이방향의 변형을 무시하는 평면변형 조건을 적용하였으며, 토목섬유 셸(Shell)모델은 얇고 유연하며, 단위길이 당 단위중량은 무시하여 해석하였다. 지오텍스타일 튜브의 외부 경계조건은 슬러리와 지오텍스타일 접촉면의 전단응력은 발생하지 않는 것으로 가정하였으며, 내부의 경계조건은 슬러리로 채워져 있는 수리학적 응력상태로 가정하여 해석하였다. 그림 1은 2차원 평면변형 해석 개념 및 기호를 나타낸 것으로 외부에서 작용하는 힘은 없으며, 내부채움은 한 종류의 슬러리로 구성되어 있다. 여기서, h_{GT} 는 튜브의 최대 채움시 높이, B 는 최대 폭, b 는 바닥면과의 접지폭, p_0 는 수리학적 펌핑압, v_{av} 는 슬러리의 평균단위중량을 나타낸다. 따라서, 튜브의 정점으로부터 임의심도까지의 수리학적 압력 및 평형방정식은 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

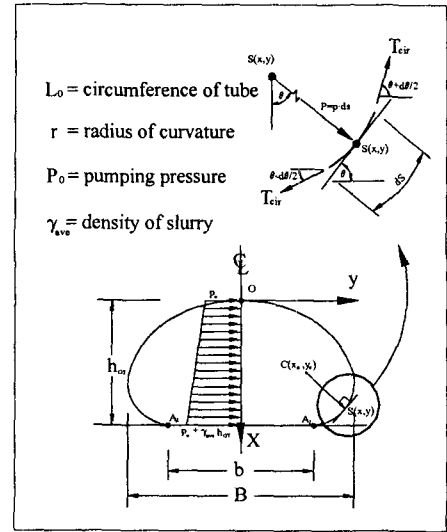


그림 1 2차원 평면변형해석 기호

$$p(x) = p_0 + v_{av} x, \quad r(x) = T_g/p(x) \quad (1)$$

상기 평형방정식을 방향에 따른 미분방정식의 향으로 정리하면 다음 식 (2)와 같다.

$$T_g \cdot y'' - (p_0 + v_{av} \cdot x) \cdot [1 + (y')^2]^{3/2} = 0 \quad (2)$$

식(2)의 비선형 미분방정식은 인장응력 T_g , 펌핑압 p_0 , 슬러리의 평균단위중량 v_{av} , 튜브의 높이 h_{GT} 등의 함수로 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = f(x | T_g, p_0, h_{GT}, v_{av}) \quad (3)$$

각각의 설계변수들의 입력을 통하여 설계 매개변수인 $y(x)$ 값을 얻을 수 있다. 또한 전체 길이 $L_0 = b + \int_s ds$ 이므로 접촉면 길이를 전체길이에 대입하면 다음 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$L_0 = \frac{2v_{av}}{p_0 + v_{av}h_{GT}} \int_0^h y(x) dx + 2 \int_0^4 [1 + (y')^2]^{1/2} dx \quad (4)$$

경계구속조건과 지오텍스타일의 인장강도 T_g , 튜브의 최대높이 h_{GT} , 수리학적 펌핑압 p_0 가 주어질 경우, 초기 비선형 미분방정식의 해를 시탐착오법을 통하여 얻을 수 있으며, 단위길이 당 축방향 인장응력 T_{axial} 과 수직평면에 작용하는 전체 작용력 P 는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{axial} = (2/L_0) \int_0^{h_{GT}} (p_0 + v_{av}x) y(x) dx, \quad P = \int_0^{h_{GT}} (p_0 + v_{av}x) \cdot y(x) \cdot dx \quad (5)$$

2.2 3차원 유한요소해석

2.2.1 적용모델

본 연구의 유한요소해석에서는 지오텍스타일 튜브 구조물의 외접을 구성하고 있는 지오텍스타일을 모델링하기 위하여 셸요소(shell element)를 사용하였으며, 하부지반과 지오텍스타일 튜브의 접촉면에 스프링요소를 적용하였다. ABAQUS 프로그램은 판(plate)형태의 재료를 모델링하기 위한 요소로 멤브레인 요소(membrane element)와 셸요소를 제공하지만 멤브레인 요소는 인장만을 받는 요소로 압축과 인장을 동시에 받는 지오텍스타일 구조물에는 적합하지 않는 요소이다. 본 연구에서는 ABAQUS 프로그램에는 제공하는 셸요소 중 지오텍스타일 튜브의 형태와 하중조건을 고려하여 얇고 휨작용을 받는데 적합한 4절점 S4R 요소와 셸과 셸의 경계면에 적용하는 3절점 S3R 요소를 적용하였다. S4R 4절점 셸요소에 대한 개념도는 그림 2에 나타낸 바와 같으며, 각 절점의 자유도는 다음 식 (6)과 같다.

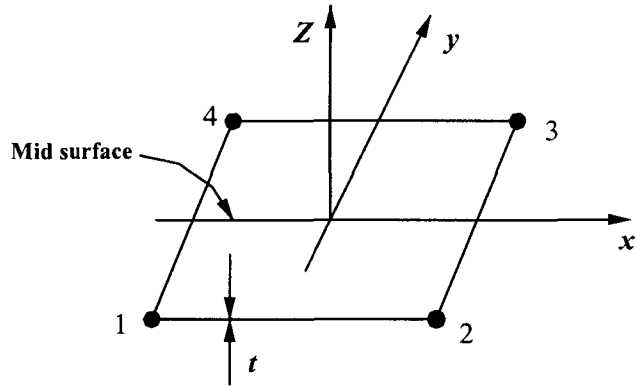


그림 2 4절점 셸요소

$$DOF = \left(w, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}, \theta_x, \theta_y \right) \quad (6)$$

유한요소해석에 사용한 셸요소는 변형 Kirchhoff의 요소이론에 기초하며, 변형 Kirchhoff의 셸이론은 셸요소를 아주 얇은 판으로 가정한 이론으로 각 절점의 자유도는 다시 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, 각 요소에서의 변형 $w(x,y)$ 는 식 (8)과 같다.

$$DOF = \left(w, \theta_x = \frac{\partial w}{\partial x}, \theta_y = \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$w(x,y) = \sum_{i=0}^4 \left[N_i w_i + N_{xi} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_i + N_{yi} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_i \right] \quad (8)$$

여기서, N_i , N_{xi} , N_{yi} 는 형상함수이며, 해석을 위한 강성 매트릭스는 식 (10)에 나타낸 바와 같다.

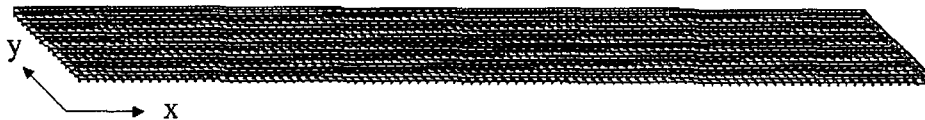
$$k = \int_v [B]^T [E] [B] dV \quad (10)$$

여기서, $[B]$ 는 변형율-변위관계 매트릭스이며, $[E]$ 는 응력-변형관계 매트릭스이다.

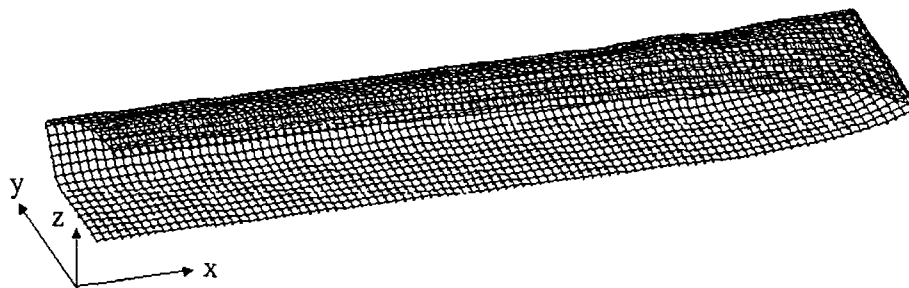
2.2.2 유한요소망 형태 및 경계조건

지오텍스타일 튜브 구조물의 수리학적 채움 과정에 대한 수치해석은 비선형 응력-변위해석 방법을 적용하였으며, 지오텍스타일 튜브의 유한요소망은 X축과 Y축에 대한 축대칭으로 실물모형의 1/4모델에 대하여 해석을 수행하였다. 수리학적 채움작업에 의한 정수압이 가해지기 전의 초기 지오텍스타일 튜브의 3차원 유한요소망과 변위가 발생된 후의 유한요소망은 그림 3에 나타낸 바와 같다. 초기 지오텍스타일 튜브의 유한요소망은 셸모델로 구성된 2점의 쉬트로 구성되어 있으며, 튜브 중심부의 좌표를 $X=0$, $Y=0$ 로 설정하였다. 여기서, X축 방향이 튜브의 길이방향이며 Y축 방향이 폭방향을 의미한다.

초기 지오텍스타일 튜브의 유한요소망은 내부에 정수압이 가해질 수 있도록 측면부분과 조인트로 연결 하였으며 측면부는 반경 $R=2.0\text{cm}$ 인 반원형태로 모델링 하였다. 해석에 적용한 지오텍스타일 튜브의 크기는 실대형 모형실험에 사용한 튜브의 크기와 동일한 형태로 모델링 하였다. 따라서, 해석모델의 크기는 X방향 길이 12.5m, Y방향 폭 2.0m이다. 본 연구의 수치해석에 적용된 경계조건은 상기 기술한 바와 같이 X축과 Y축에 대한 축대칭 조건으로 X축의 경계면 절점은 Y축방향으로 이동하지 않으며, X축과 Z축에 대하여 회전하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 또한, Y축의 경계면 절점은 X축방향으로 이동하지 않으며, Y축과 Z축에 대하여 회전하지 않는다.



(a) 초기 변형전 지오텍스타일 튜브



(b) 변형후 지오텍스타일 튜브

그림 3 지오텍스타일 튜브의 3차원 유한요소망

2.2.3 입력변수 및 해석 과정

본 연구의 유한요소해석은 지오텍스타일 튜브의 외경을 이루는 지오텍스타일의 비선형적 재료특성과 해석과정에서 발생하는 대변위량을 고려하여, 비선형 응력-변위해석을 수행하였다. 지오텍스타일 튜브의 3차원 비선형 응력-변위해석은 채움작업에 따른 정수압변화와 재료의 탄성계수 및 포아송비 변화에 따른 해석을 수행하였다. 지오텍스타일 튜브의 채움작업 시 가해지는 펌핑압은 외부토사의 이송에 사용되며, 실제적으로 지오텍스타일에 가해지는 압력은 토사와 물이 혼합된 슬러리의 정수압으로 가해지게 된다. 따라서 채움작업에 따른 정수압 입력변수는 슬러리의 단위중량과 작용수두를 입력변수로 사용하였다. 슬러리의 단위중량은 실대형 현장모형실험 시 계측한 결과를 바탕으로 1.20tonf/m^3 을 적용하였으며, 작용수두는 예비해석결과를 바탕으로 0.25m~1.50m까지 고려하여 해석을 수행하였다. 각각의 해석조건 및 재료특성변화에 따른 입력변수는 표 1에 나타난 바와 같다. 본 연구의 수치해석은 수리학적 펌핑작업 시, 지오텍스타일 튜브내부에 가해지는 정수압에 의한 튜브의 형태분석, 튜브높이변화 등을 분석하기 위하여 수행하였다. 수치해석의 전체적인 과정은 총 8단계로 (1) 상판, 저판 모델구성, (2) 측면 모델구성, (3) 조인트모델구성, (4) 요소매개변수입력, (5) 경계조건입력, (6) 초기 중력단계 해석, (7) 정수압 재하 및 해석, (8) 출력분석으로 구성된다.

표 1 3차원 유한요소해석의 입력변수

입력정수	입력값
정수압 수두, $h(\text{m})$	0.25~1.50
탄성계수, $E(\text{tonf/m}^2)$	$7.0 \times 10^5 \sim 100.0 \times 10^5$
두께, $t_G(\text{cm})$	0.3
단위질량, $d(\text{kgf/m}^3)$	1350
하부지반강성, $K(\text{tonf/m}^2)$	1,000
포아송비, ν	0.25, 0.45

3. 실험 현장시험 결과

그림 4는 각각의 채움재료에 따른 단계별 시공과정 및 채움작업 완료 후의 튜브높이 변화에 대한 계측결과를 나타낸 것이다. 계측 결과에서 보는 바와 같이, 준설토를 채움토사를 사용한 경우는 단계별 채움작업이 없이 1시간 이내에 채움작업이 완료되었다. 한편, 실트질 점토의 경우, 점토입자의 침강 및 배수시간이 지연되어 10시간 동안 채움작업이 진행되었으며, 시공 시 최대의 높이를 채우기 위하여 3단계의 단계별 채움작업이 진행되었다.

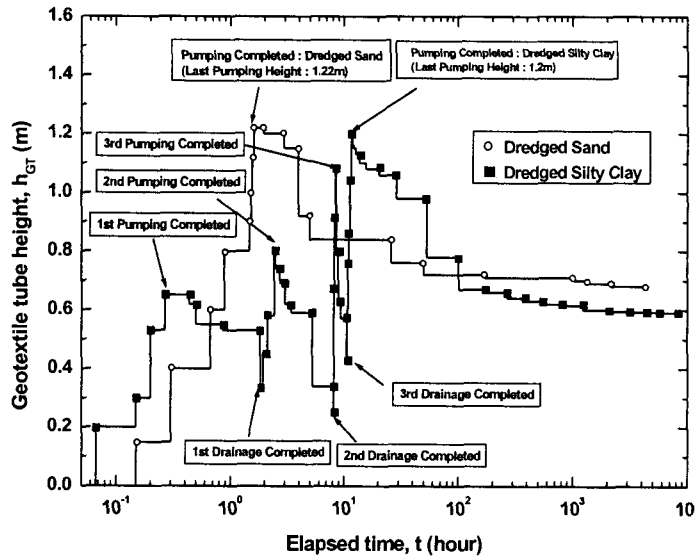
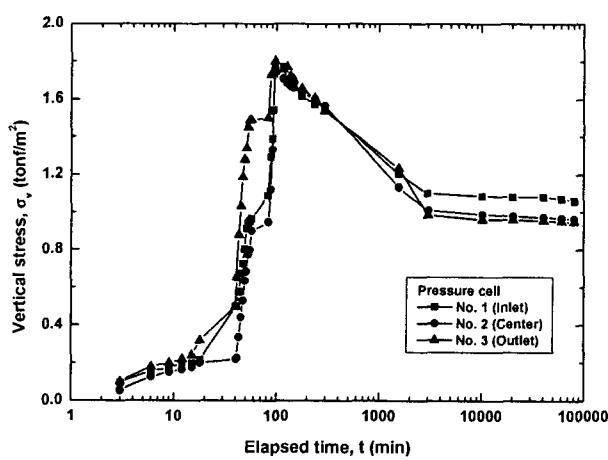
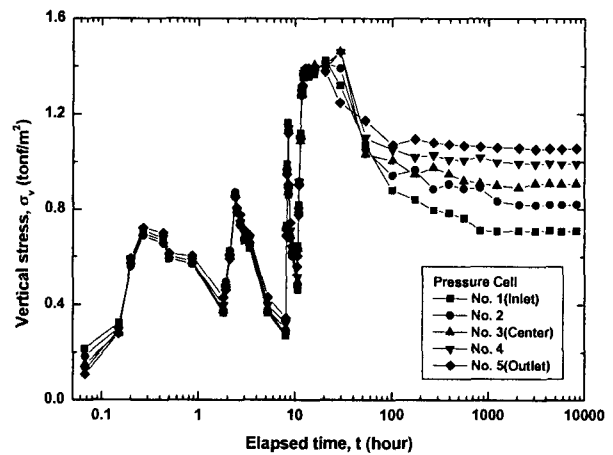


그림 4 수리학적 펌핑과정에 따른 튜브 높이 변화

채움토사 종류에 따른 수리학적 펌핑과정 진행에 따른 튜브내 정수압 변화 계측결과는 그림 5에 나타낸 바와같다. 지오텍스타일 튜브 하부에 작용하는 정수압은 채움작업과 함께 증가하며, 배수 및 튜브 높이 감소에 따라 점차 감소하였다. 튜브의 위치에 따른 정수압은 채움작업 초기에는 유입구측의 크게 나타났으나 채움작업 종료 후 유출구측이 크게 나타났다. 이러한 결과는 채움작업 종료 시, 수리학적 펌핑압에 의하여 토사가 유출구 쪽으로 많이 이동하여 발생된 것으로 판단된다.



(a) 준설토 채움시



(b) 실트질 점토 채움시

그림 5 채움토사 종류에 따른 정수압 분포

4. 수치해석 결과

4.1 2차원 평면변형 해석

2차원 평면 변형해석은 지오텍스타일 튜브의 종방향 변형을 무시하며, 중심부의 종단면에서 작용하는 힘의 평형방정식으로부터 튜브의 거동을 해석한다. 본 연구에서는 실대형 현장실험과 동일한 경계조건상태에서 채움과정 시 발생하는 정수압변화에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이와 폭 변화에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 그림 6은 GeoCoPS 해석결과에 따른 지오텍스타일 튜브의 종단도를 나타낸 것이다. 또한, 그림 7과 그림 8은 채움작업 시의 정수압 변화에 따른 지오텍스타일의 높이와 폭 변화를 각각 나타낸 것이다. 지오텍스타일 튜브의 높이변화는 정수압이 낮은 경우에는 튜브의 높이가 급격히 변화하지만, 정수압이 높은 경우에는 큰 변화를 보이지 않았다. 정수압을 매개변수로 한 2차원 평면변형 해석결과, 지오텍스타일 튜브의 높이를 1.20m까지 채움작업을 하는데 필요한 정수압은 1.55tonf/m²으로 도출되었다. 실대형 현장실험의 정수압 분포는 그림 5에서 나타낸 바와 같이 준설모래의 경우 1.77tonf/m², 실트질 점토의 경우 1.40tonf/m²로 계측되었다. 따라서, 실대형 현장실험의 정수압 분포와 2차 평면변형 해석에 의한 정수압은 준설모래의 경우 약 12.4% 작게 도출되었으며, 실트질 점토의 경우 약 10.5% 크게 나타났다. 실대형 현장실험과 2차원 평면변형 해석에 의한 지오텍스타일 튜브의 거동이 차이를 보이는 것은 2차원 평면변형해석의 이론적 가정사항에 기인한 것으로 판단된다. 실제 현장적용 시에는 수리학적 채움이 진행되는 동안, 튜브 외측으로는 지속적인 배수가 진행되며, 내부토사는 재료분리를 이루며 침전이 발생된다. 특히, 세립질 토사를 채움재료로 사용하는 경우에는 단계별 채움작업으로 인한 하부에 토사침강이 이루어진다. 따라서, 길이방향의 응력 및 변형거동을 무시하는 평면변형조건이 성립되지 않으며, 단계별 시공으로 인한 토사침전으로 튜브내부의 응력상태가 수리학적 정적상태를 유지하지 못한다.

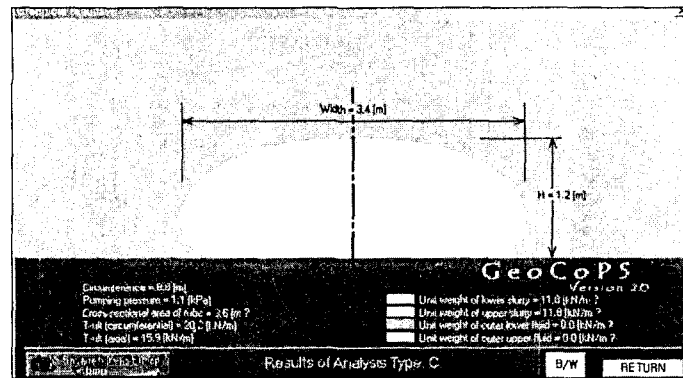


그림 6 GeoCoPS에 의한 2차원 평면변형해석결과

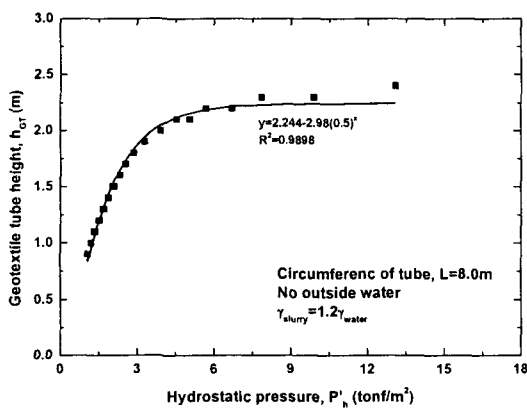


그림 7 정수압에 따른 튜브높이변화

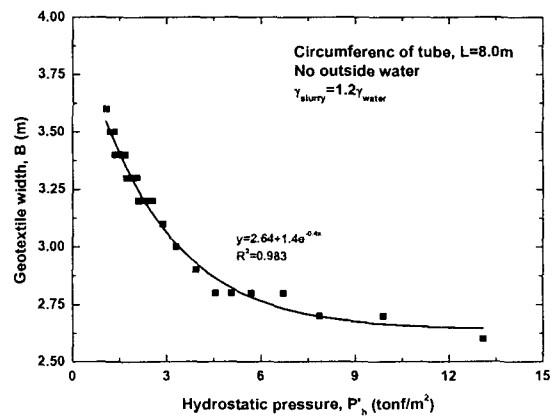


그림 8 정수압에 따른 튜브폭 변화

4.2 3차원 유한요소 해석 결과

지오텍스타일의 재료특성과 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이변화는 그림 9에 나타낸 바와 같다. 지오텍스타일 재료특성에 따른 높이변화는 포아송비 변화에 따라서는 큰 영향이 없으나 탄성계수에 따라서는 많은 차이를 보이고 있다. 지오텍스타일의 탄성계수를 $20.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$ 로 해석한 경우의 최종높이가 $7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$ 로 해석한 경우에 비하여 최대 14% 작게 발생되었다. 동일한 기하형상을 갖는 실대형 현장실험 시의 계측결과와 수치해석에 따른 높이변화의 비교결과, 지오텍스타일의 탄성계수가 $7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, 포아송 비가 0.45, 정수압이 1.66tonf/m^2 일 때 실대형 현장실험 결과와 가장 근접한 결과를 나타내었다. 따라서, 형태변화분석 및 응력분포의 분석 시에 탄성계수 $7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, 포아송 비 0.45, 정수압 작용수두 1.50m의 해석결과를 적용하였다. 그림 10은 지오텍스타일의 탄성계수 $E=7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, 포아송비 $\nu=0.45$ 일 때, 정수압 변화에 따른 튜브의 형태변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 작용수두 1.50m의 정수압이 작용하였을 때, 지오텍스타일 튜브 상판은 약 1.35m 부풀어 올랐으며, 저판은 0.02mm의 침하가 발생하였다. 또한, 그림 10에서 보는 바와 같이 낮은 정수압에서는 조인트 부분의 좌굴이 없으나 정수압이 증가함에 따라 조인트 부분의 응력집중으로 인한 좌굴이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 그림 11과 그림 12는 지오텍스타일의 탄성계수 및 포아송비 변화에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이변화를 나타낸 것이다. 지오텍스타일 튜브의 재료강성인 탄성계수값에 따른 영향은 재료강성이 클수록 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이가 작게 도출되었다. 반면, 상대적으로 포아송 비의 변화는 지오텍스타일 튜브의 높이변화에 큰 영향을 미치지 않는 요소로 나타났다.

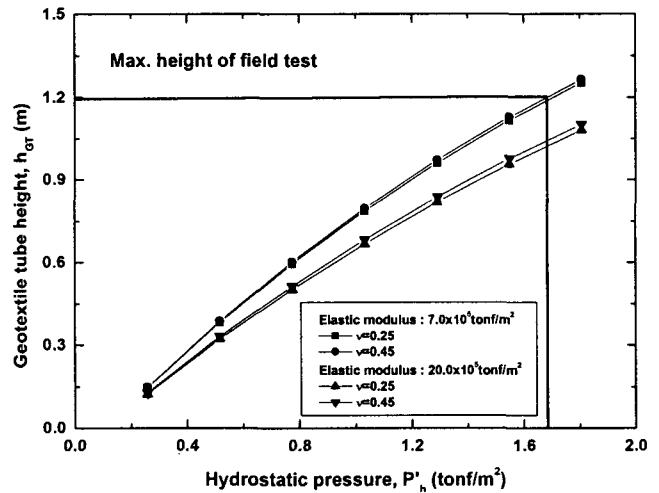
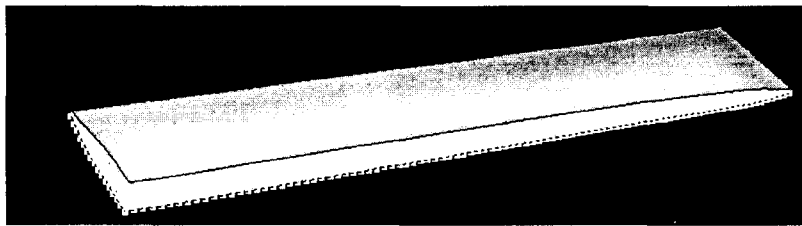
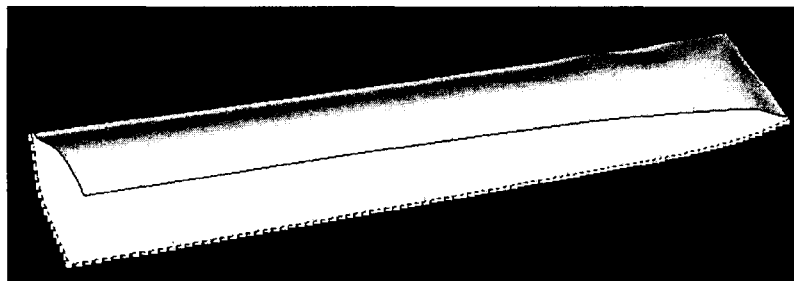


그림 9 정수압변화에 따른 튜브높이



(a) 정수압 수두 = 0.25m



(c) 정수압 수두 = 1.50m

그림 10 정수압 수두변화에 따른 튜브의 형태변화

($E = 7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, $\nu = 0.45$)

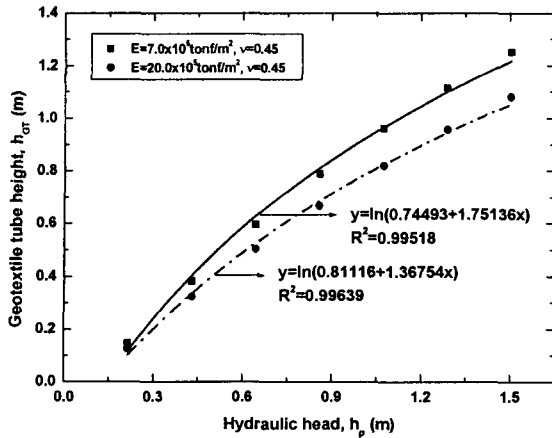


그림 11 탄성계수에 따른 해석결과

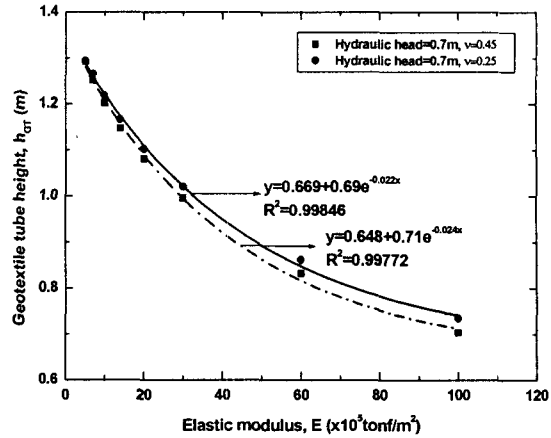


그림 12 포아송비 변화에 따른 해석결과

5. 결론

2차원 평면변형해석 및 3차원 유한요소 해석을 통한 지오텍스타일 튜브의 거동분석 결과와 실대형 현장모형시험을 통한 예측결과의 비교분석결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 채움토사 종류에 따른 수리학적 펌핑과정 진행에 따른 튜브내 정수압 변화 예측결과, 지오텍스타일 튜브 하부에 작용하는 최대정수압은 준설토의 경우 1.77tonf/m², 실트질 점토의 경우 1.40tonf/m²로 예측되었다.
2. 정수압을 매개변수로 한 2차원 평면변형 해석결과, 지오텍스타일 튜브의 높이를 1.20m까지 채움작업을 하는데 필요한 정수압은 1.55tonf/m²으로 도출되었다. 실대형 현장시험의 정수압 분포와 2차 평면변형 해석에 의한 정수압은 준설토의 경우 약 12.4% 작게 도출되었으며, 실트질 점토의 경우 약 10.5% 크게 나타났다. 실대형 현장시험과 2차원 평면변형 해석에 의한 지오텍스타일 튜브의 거동이 차이를 보이는 것은 2차원 평면변형해석의 이론적 가정사항에 기인한 것으로 판단된다.
3. 3차원 유한요소 해석결과, 지오텍스타일의 탄성계수가 7.0×10⁵tonf/m², 포아송 비가 0.45, 정수압이 1.66 tonf/m²일 때 실대형 현장시험 결과와 가장 근접한 결과를 나타내었으며, 지오텍스타일 튜브의 형태 및 높이변화에 주요 영향인자는 튜브내부에 가해지는 정수압과 지오텍스타일의 탄성계수로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 2001~2002년도 인천지역 환경기술개발센터 정책연구과제의 일환으로 수행된 “환경 생태 계보존 및 복원을 친환경적 지오텍스타일공법개발” 연구의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Liu, G. S. (1981) "Design Criteria of Sand Sausages for Beach Defense", *Proceedings of 19th Congress of the International Association for Hydraulic Research*, Vol. 3, New Delhi, India, pp. 123-131.
2. Silvester, R. (1986) "Use of Grout-filled Sausages in Coastal Structures", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 112, No. 1, pp. 95-114.
3. Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling H. I., Gilbert, P. A. (1996) "Geosynthetics Tubes for Confining Pressurized Slurry: Some Design Aspect", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 8, pp. 682-690.
4. 신은철, 오영인(2002) "실대형 현장시험을 통한 지오텍스타일 튜브의 형태변화 및 거동특성" 대한토목학회지, Vol. 22, No.6-C, pp.661~671.