

평면변형해석과 3-D FEM 기법을 통한 지오텍스타일 튜브의 거동해석

Behavior of Geotextile Tube by Plane Strain Analysis and 3-Dimensional Finite Element Method

신 은 철*¹ Shin, Eun-Chul

오 영 인*² Oh, Young-In

Abstract

Geotextile tube is hydraulically filled with dredged materials and has been applied to coastal protection and scour protection, dewatering method of slurry, and isolation of contaminated material. Recently, geotextile tube technology is no longer alternative construction technique but suitable desired solution. In this paper, the numerical analysis was performed to investigate the behavior of geotextile tube with various properties of geotextile sheet and hydraulic pumping conditions. Numerical analysis was executed to compare with the results from the large-scale field model tests, and also with those of 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 in a good agreement.

요 지

최근 들어 지오텍스타일 튜브공법은 과거의 임시공법의 한계를 극복하고 다양한 분야에서 주요적용공법으로 활용이 확대되고 있다. 본 연구에서는 수치해석기법을 활용하여 지오텍스타일 튜브의 시공과정에서의 거동에 대하여 연구를 수행하였으며, 수치해석결과를 기존 연구 발표된 현장 모형시험 결과와 비교 분석하였다. 수치해석은 평면변형 해석과 3차원 유한요소해석 기법을 이용하여 채움 과정에서 발생하는 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 형태변화와 실험형 현장시험 결과를 비교 분석하였다. 또한, 3차원 유한요소해석에서는 정수압과 지오텍스타일의 강성변화에 따른 매개변수 해석을 통하여 지오텍스타일 튜브공법의 3차원 유한요소해석 기법을 제시하였다. 평면변형 해석이론에 의한 수치해석은 지오텍스타일 튜브 전용해석 프로그램인 GeoCoPS(version 2.0)를 활용하였으며, 3차원 유한요소 해석은 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS(version 5.88)를 이용하였다. 평면변형 해석과 3차원 유한요소해석 결과 모두 실험형 현장시험 결과와 근접한 거동을 나타내었으며 적용토사의 종류 및 해석상의 가정사항으로 약간의 차이점은 발생하지만 평면변형해석 및 3차원 유한요소해석방법을 통하여 채움과정에서의 지오텍스타일 튜브의 거동을 예측할 수 있다.

Keywords : 3-D FEM, ABAQUS, GeoCoPS, Geotextile tube, Numerical analysis, Plane strain

*1 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Univ. of Incheon, ecshin@incheon.ac.kr)

*2 정회원, 캘리포니아 주립대 토목공학과 박사후 연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Dept. of Civil Eng., California State Univ. at Sacramento)

1. 서론

사석과 콘크리트 등으로 축조된 전통적인 형태의 하천 및 해안구조물은 자연 석재 및 골재의 부족으로 인하여 건설 및 유지관리에 많은 비용이 발생되고 있으며, 인간의 산업활동을 비롯하여 파도와 조수의 이동으로 인한 해안침식, 태풍이나 폭풍 등의 자연재해로 인한 하천 및 해안구조물의 파괴가 빈번히 발생되고 있다. 지오텍스타일 튜브공법은 고강도 토목섬유인 지오텍스타일을 특수 재봉하여 튜브형태의 긴 포대로 만들어, 내부에 해저 준설토사 및 기타 해저오염토사 등을 수리학적 방법으로 충전하여 하천 및 해안구조물을 건설하는 공법이다. 지오텍스타일 튜브공법은 경제적이며, 시공성이 우수하고, 환경 친화적인 하천 및 해안구조물 축조공법으로 기존의 사석 및 콘크리트 구조물을 대체할 수 있는 공법이다.

지오텍스타일 튜브공법은 개발 초기에는 중·소형 크기로 개발되어 홍수조절 및 재해복구 등의 분야에서 주로 임시 적용공법으로 사용되어졌으나, 1990년대 이후 체계적인 연구를 바탕으로 대형화되어 해안침식 방지구조물, 항만구조물, 환경적 분야 등 다양한 분야에서 적용되어지고 있다. 지오텍스타일 공법에 대한 연구 분야는 크게 구속체를 구성하는 지오텍스타일의 특성분야, 튜브 구조체의 침하거동 분야, 안정해석 및 설계분야, 환경적 적용분야 등이 있으며, 최근 환경적 분야의 적용과 수치해석기법을 이용한 거동분석이 활발하게 진행되고 있다. 지오텍스타일 튜브공법에 대한 수치해석 연구를 살펴보면, 지오텍스타일을 무게가 없으며 비 신축성의 얇은 멤브레인으로 가정한 2차원 해석이 주로 수행되어 졌다. 또한, 채움작업에 의한 내부 압력과 지오텍스타일의 인장력에 대한 평형해석을 통하여 튜브의 높이와 폭 등의 형태를 예측하였다. Liu(1981), Silvester(1990)는 2차원 한계평형해석을 통하여 지오텍스타일 튜브의 둘레, 압력, 접촉면적, 채움높이와 폭 등의 관계를 도출하였으며, 지오텍스타일에서 발생하는 응력과 평형해석 방정식을 제시하였다. Carroll(1994a, 1994b)은 원통 형상의 지오텍스타일 튜브에 단위중량이 다른 두 종류의 슬러리가 포함될 경우에 대하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 몇 가지의 예제 해석을 통하여 원주방향의 응력 및 원주 직각 방향으로 작용하는 응력과 지오텍스타일 튜브의 형상과의 관계 방정식을 제시하였다. Kazimierowicz(1994)는 지오텍스타일 튜브를 원주형 셀로 가정한 2차원 평형해석을 수행하였다. 채움작업 시에 발생하는 압력을 외압

만 작용하는 경우, 외압과 정수압이 작용하는 경우, 정수압만 작용하는 경우로 고려하여 형상과 지오텍스타일에 발생하는 응력 간의 관계식을 개발하였다.

U.S. Army Corps of Engineers(1996), Leshchinsky 와 Leshchinsky(1996)는 지오텍스타일 튜브공법에 대한 2차원 평면변형 해석 프로그램인 GeoCoPS(version 1.0)를 개발하였다. 이 프로그램은 튜브의 원주방향 및 원주 직각방향에서 발생하는 인장응력과 내부에 작용하는 외압 및 정수압의 평형해석을 통하여 지오텍스타일 튜브의 형상을 결정하였으며, 지오텍스타일의 안전율, 튜브외측의 하중 등을 영향인자로 고려하였다. Plaut와 Suherman(1998)은 하부지반조건의 변화와 지오텍스타일 튜브의 설치조건을 네 가지로 구분하여 해석을 수행하였다. 지오텍스타일 튜브에 대한 유한요소 해석 연구는 초기적 단계로 튜브해석을 위한 별도의 유한요소모델의 개발보다는 주로 범용 유한요소 해석프로그램을 활용하고 있다. Seay(1998)는 ABAQUS(Hibbit et al., 1999)를 이용하여 최초로 지오텍스타일 튜브에 대한 유한요소 해석을 수행하였으며, Cantre(2002)는 동일 프로그램을 이용하여 지오텍스타일과 토사의 복합모델에 대한 2차원 유한요소 해석을 수행하여 침하와 배수거동에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 채움 과정에서 지오텍스타일 튜브의 거동을 분석할 수 있는 수치해석모델을 개발하기 위하여 평면변형 해석과 3차원 유한요소해석 기법을 이용하여 채움 과정에서 발생하는 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 거동해석을 수행하였으며, 기존 연구 발표된 실험 현장시험 결과와 비교 분석하였다. 평면변형 해석이론에 의한 수치해석은 지오텍스타일 튜브 전용 해석프로그램인 GeoCoPS(version 2.0)을 활용하였으며, 3차원 유한요소 해석은 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS(version 5.88)를 이용하였다. 3차원 유한요소 해석은 비선형 응력-변위해석 방법을 적용하였으며, 지오텍스타일 튜브의 유한요소망은 실험 현장시험의 실험물모형을 X축과 Y축에 대한 축대칭 1/4모델로 구성하여 해석을 실시하였다.

2. 수치해석 이론

2.1 평면변형해석

지오텍스타일 튜브의 평면변형 해석이론은 길이방향

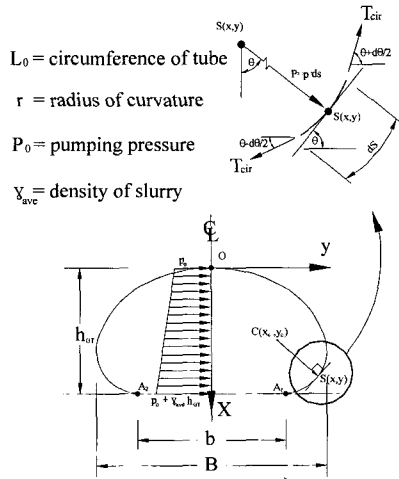


그림 1. 평면변형해석 기호

의 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 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, γ_{av} 는 슬러리의 평균단위중량을 나타낸다. 따라서, 튜브의 정점으로부터 임의심도까지의 수리학적 압력 및 평형방정식은 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

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

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

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

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

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

각각의 설계변수들의 입력을 통하여 설계 매개변수인

$y(x)$ 값을 얻을 수 있다. 또한 전체 길이 $L_0 = b + \int ds$ 이므로 접촉면 길이를 전체길이에 대입하면 다음 식 (4)를 얻을 수 있다.

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

경계구속조건과 지오텍스타일의 인장강도 T_g , 튜브의 최대높이 h_{GT} , 수리학적 펌핑압 p_0 가 주어질 경우, 초기 비선형 미분방정식의 해를 시행착오법을 통하여 얻을 수 있다. 단위길이 당 축방향 인장응력 T_{axial} 과 수직평면에 작용하는 전체 작용력 P 는 다음 식 (5)와 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{axial} = (2/L_0) \int_0^{h_{cr}} (p_0 + \gamma_{av}x) y(x) dx \quad (5)$$

$$P = \int_0^{h_{cr}} (p_0 + \gamma_{av}x) \cdot y(x) \cdot dx \quad (6)$$

2.2 3-D FEM 해석

2.2.1 구성모델

본 연구의 유한요소해석에서는 지오텍스타일 튜브 구조물의 외경을 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 튜브 해석모델에는 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 적용

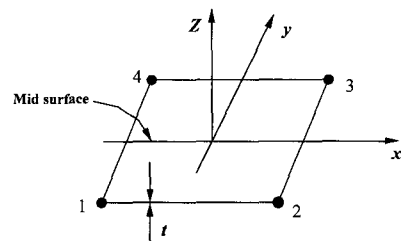


그림 2. 4절점 셸요소

하였다. 본 연구의 유한요소해석에 사용한 쉘요소는 변형 Kirchhoff의 요소이론에 기초하며, S4R 4절점 쉘요소에 대한 개념도는 그림 2에 나타난 바와 같다. 변형 Kirchhoff의 쉘이론은 쉘요소를 아주 얇은 판으로 가정 한 이론으로 그림 2에서 보는 바와 같다. 각 절점의 자유도는 다음 식 (7)과 같으며, 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 (9)에 나타난 바와 같다.

$$k = \int_v [B]^T [E] [B] dV \quad (9)$$

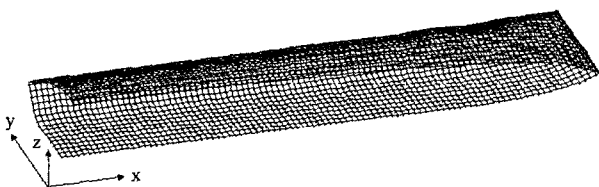
여기서, $[B]$ 는 변형을 변위관계 매트릭스이며, $[E]$ 는 응력-변형관계 매트릭스이다.

2.2.2 유한요소망의 형태 및 경계조건

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 나타난 바와 같다. 초기 지오텍스타일 튜브의 유한요소망은 쉘모델로 구성된 2겹의 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 내



(a) 변형전 초기튜브모델



(b) 변형후 튜브모델

그림 3. 지오텍스타일 튜브의 유한요소망

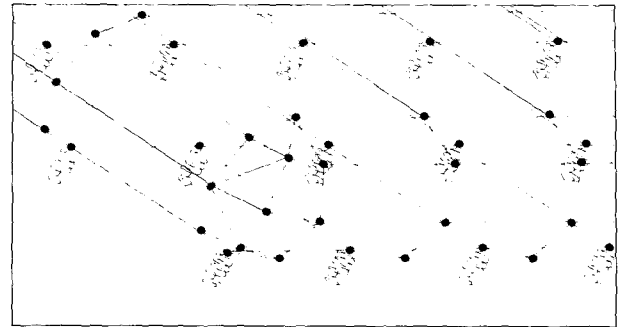


그림 4. 측면 및 조인트의 모델링 (S4R, S3R)

부에 정수압이 가해질 수 있도록 측면부분과 조인트로 연결하였으며 측면부는 반경 $R=2.0\text{cm}$ 인 반원형태로 모델링 하였다. 측면부와 조인트부분의 유한요소망은 그림 4에 나타난 바와 같다. 해석에 적용한 지오텍스타일 튜브의 크기는 실험에 사용한 튜브의 크기와 동일한 형태로 모델링 하였다. 따라서, 해석모델의 크기는 X방향 길이 12.5m, Y방향 폭 2.0m이다. 지오텍스타일 튜브의 유한요소망은 크게 상판, 저판, 측면, 측면 조인트 등으로 구성된다. 본 연구의 수치해석에 적용된 경계조건은 X축과 Y축에 대한 축대칭 조건으로 X축의 경계면 절점은 Y축 방향으로 이동하지 않으며, X축과 Z축에 대하여 회전하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 또한, Y축의 경계면 절점은 X축 방향으로 이동하지 않으며, Y축과 Z축에 대하여 회전하지 않는다.

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. 해석 초기단계에는 유한요소망의 비수렴 오차와 실제 거동과 상이한 거동이 도출되었으며, 반복적인 형상비조정, 측면과 조인트 요소 재구성 등을 통하여 최종모델을 결정하였다. 지오텍스타일 튜브의 3차원 비선형 응력-변위해석은 채움작업에 따른 정수압변화와 재료의 탄성계수 및 포아송비 변화에 따른 해석을 수행하였다. 또한, 하부지반의 특성을 의미하는 스프링은 지오텍스타일 튜브의 변위 거동만을 분석하기 위하여 침하가 발생하지 않는 강성지반으로 모델링하였으며 스프링강성은 $1,000\text{tonf/m}^2$ 값을 적용하였다. 지오텍스타일 튜브의 채움작업 시 가해지는 펌핑압은 외부토사의 이송에 사용되며, 실제적으로 지

표 1. 유한요소해석 입력값

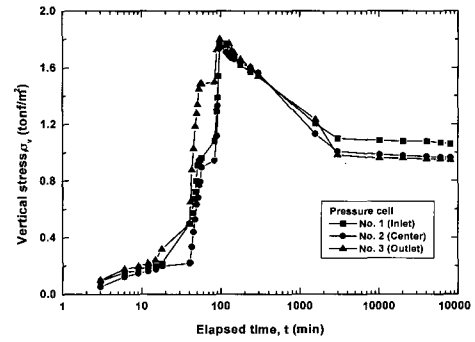
입력정수	특성값
정수압, h (m)	0.25~1.50
탄성계수, E (tonf/m ²)	$7.0 \times 10^5 \sim 100.0 \times 10^5$
두께, t_c (cm)	0.3
밀도, d (kgf/m ³)	1350
지반강성, K (tonf/m ²)	1,000
포아송비, ν	0.25, 0.45

오텍스타일에 가해지는 압력을 토사와 물이 혼합된 슬러리의 정수압이 가해지게 된다. 따라서, 채움작업에 따른 정수압 입력변수는 슬러리의 단위중량과 작용수두를 입력변수로 사용하였다.

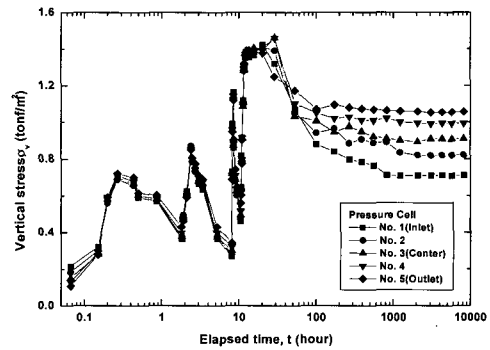
슬러리의 단위중량은 실험형 현장모형실험 시 측정한 결과를 바탕으로 1.20tonf/m³을 적용하였으며, 작용수두는 예비해석결과를 바탕으로 0.25m~1.50m까지 고려하여 해석을 수행하였다. 각각의 입력변수는 해석조건에 따른 변수를 제외하고는 기존의 연구문헌 고찰을 통하여 설정하였다. 각각의 해석조건 및 재료특성변화에 따른 입력변수는 표 1에 나타난 바와 같다. 수치해석의 전체적인 과정은 총 8단계로 (1) 상판, 저판 모델구성, (2) 측면 모델구성, (3) 조인트모델구성, (4) 요소매개변수입력, (5) 경계조건입력, (6) 초기 중력단계 해석, (7) 정수압 재하 및 해석, (8) 출력분석으로 구성된다. 하부지반의 강성은 축대칭 조건을 고려하여 중심 절점을 제외한 X축, Y축 방향의 경계절점에는 1/2의 강성을, 중심 절점에는 1/4강성을 입력하였다.

2.2.4 실험형 현장시험 결과

실험형 현장 시험결과, 채움토사 종류에 따른 수리학적 펌핑과정 진행에 따른 튜브내 정수압 변화는 그림 5에 나타난 바와 같다. 지오텍스타일 튜브 하부에 작용하는 정수압은 채움작업과 함께 증가하며, 배수 및 튜브높이 감소에 따라 점차 감소하였다. 튜브의 위치에 따른 정수압은 채움작업 초기에는 유입구측에서 크게 발생되었으나 채움작업 종료 후에는 유출구측에서 크게 나타났다. 이러한 결과는 채움작업 종료 시, 수리학적 펌핑압에 의하여 토사가 유출구 쪽으로 많이 이동하여 발생된 것으로 판단된다(신은철과 오영인, 2002).



(a) 준설토 채움시



(b) 실트질 점토 채움시

그림 5. 채움토사의 종류에 따른 정수압 분포

3. 평면변형해석의 결과 및 분석

그림 6은 GeoCoPS를 이용한 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 지수증가 함수식($R^2=0.983$)으로 나타나며, 정수압이 낮은 경우에는 튜브의 높이가 급격히 변화하지만, 정수압이 높은 경우에는 큰 변화를 보이지 않았다. 또한, 폭변화는 지수감수 함수형태로 나타났으며, 높이변화와 유사한 경향을 보였다. 정수압을 매개

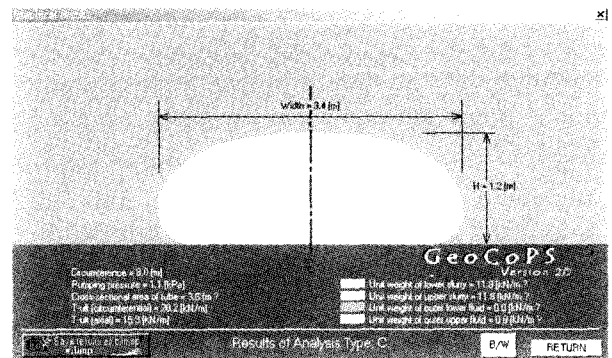


그림 6. GeoCoPS를 이용한 해석결과

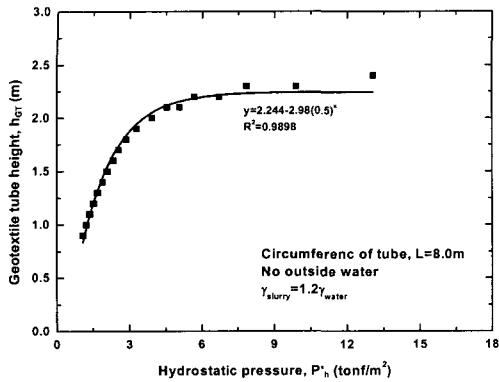


그림 7. 정수압에 따른 튜브 높이의 변화

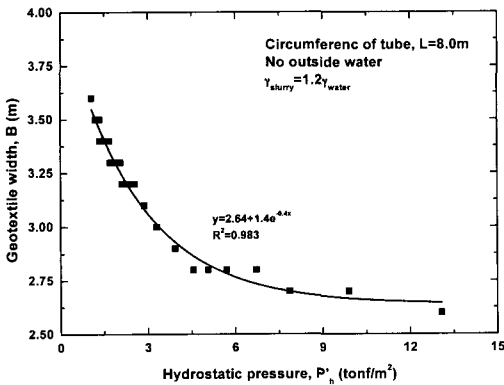


그림 8. 정수압에 따른 튜브 폭의 변화

변수로 한 평면변형 해석결과, 튜브의 높이를 1.20m까지 채움작업을 하는데 필요한 정수압은 1.55tonf/m²으로 도출되었다.

실대형 현장시험의 정수압 분포는 그림 5에서 나타낸 바와 같이 준설모래의 경우 1.77tonf/m², 실트질 점토의 경우 1.40tonf/m²로 계측되었다. 따라서, 실대형 현장시험의 정수압 분포와 평면변형 해석에 의한 정수압은 준설모래의 경우 약 12.4% 작게 도출되었으며, 실트질 점토의 경우 약 10.5% 크게 나타났다. 실대형 현장시험과 평면변형 해석에 의한 지오텍스타일 튜브의 거동이 차이를 보이는 것은 평면변형해석의 이론적 가정사항에 기인한 것으로 판단된다. 실제 현장적용 시에는 수리학적 채움이 진행되는 동안, 튜브 외측으로는 지속적인 배수가 진행되며, 내부토사는 재료분리를 이루며 침전이 발생된다. 따라서, 길이방향의 응력 및 변형거동을 무시하는 평면변형조건이 성립되지 않으며, 단계별 시공으로 인한 토사침전으로 튜브내부의 응력상태가 수리학적 정적상태를 유지하지 못한다.

4. 3-D FEM 해석결과

4.1 형태변화

지오텍스타일의 재료특성과 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이변화는 그림 9에 나타낸 바와 같다. 형태변화 분석을 위한 해석에서는 지오텍스타일의 탄성계수를 7.0×10⁵tonf/m², 20.0×10⁵tonf/m², 포아송비를 0.25, 0.45로 변화를 주었으며, 채움 작업에 따른 정수압은 작용수두를 0.20m~1.50m까지 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 지오텍스타일 재료특성에 따른 높이변화는 포아송비 변화에 따라서는 큰 영향이 없으나 탄성계수에 따라서는 많은 차이를 보이고 있다. 지오텍스타일의 탄성계수를 20.0×10⁵tonf/m²로 해석한 경우의 최종높이가 7.0×10⁵tonf/m²로 해석한 경우에 비하여 최대 14% 작게 발생되었다.

정수압에 따른 높이변화는 정수압이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 1.50m이상의 과대한 정수압을 가한 경우, 셀모델로 구성되어 있는 지오텍스타일 재료의 과대변형 등으로 인하여 해석이 수렴되지 않는 결과가 도출되었다. 동일한 기하형상을 갖는 실대형 현장시험 시의 계측결과와 수치해석에 따른 높이변화의 비교결과, 지오텍스타일의 탄성계수가 7.0×10⁵tonf/m², 포아송 비가 0.45, 정수압이 1.66tonf/m²일 때 실대형 현장시험 결과와 가장 근접한 결과를 나타내었다. 따라서, 형태변화분석 및 응력분포의 분석 시에 탄성계수 7.0×10⁵tonf/m², 포아송 비 0.45, 정수압 작용수두 1.50m의 해석결과를 적용하였다. 그림 10과 그림 11은 지오텍스타일의 탄성계수 7.0×10⁵tonf/m², 포아송

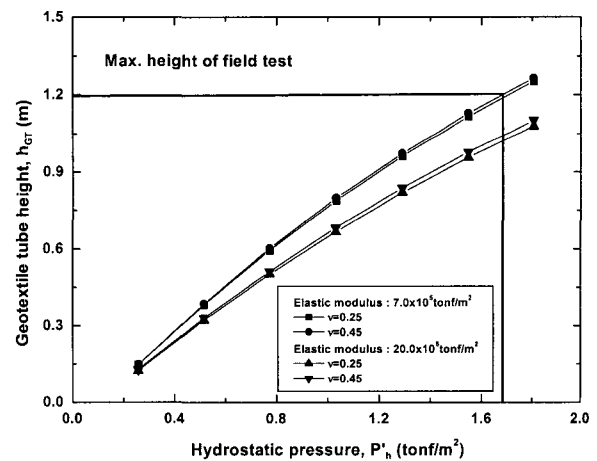
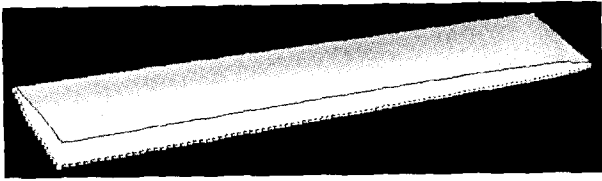
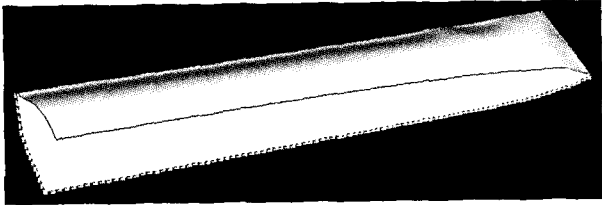


그림 9. 정수압 변화에 따른 튜브 높이의 변화



(a) 정수압 수두 = 0.25m



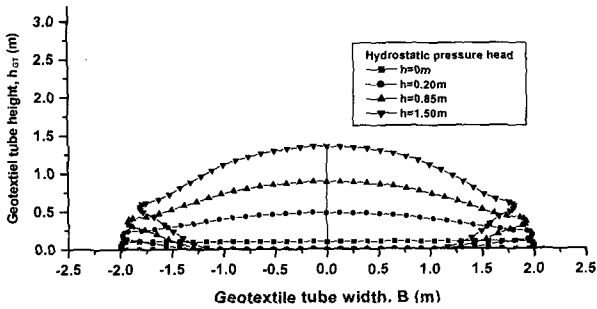
(b) 정수압 수두 = 1.50m

그림 10. 튜브의 3차원 형상변화
($E=7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, $\nu=0.45$)

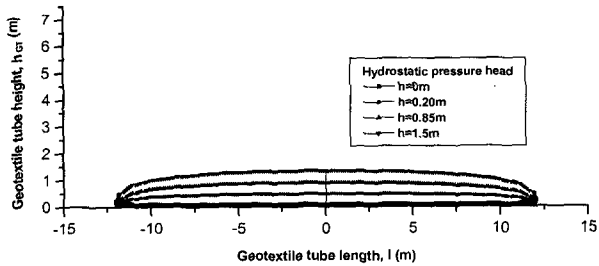
측면의 경우, 작용수두가 1.50m 작용되었을 때 폭이 약 40cm 감소하였으며 높이가 약 56cm 증가하였다. 즉, 정수압이 작용함에 따라 지오텍스타일 튜브와 하부지반과의 접촉면적이 감소하며, 상대적으로 정수압에 의하여 높이가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 길이가 긴 길이 방향은 폭 방향에 비하여 작은 변화를 보였으나, 작용수두가 1.50m의 정수압이 작용하였을 때, 측면의 폭은 약 10cm 감소하였으며 높이는 46cm로 증가하였다.

4.2 응력분포

본 수치해석의 응력분포는 각각의 대칭축에 따라 발생하는 축방향 응력과 축 직각방향 응력에 대하여 분석하였다. X축은 지오텍스타일 튜브의 길이 방향이며 σ_{11} 이 축방향 σ_{22} 가 축 직각방향 응력이다. 반대로 Y축은 지오텍스타일 튜브의 폭 방향이며, σ_{11} 이 축 직각방향 σ_{22} 가 축방향 응력이다. 응력분포의 분석은 상판, 측면, 저판을 따라 발생하는 응력분포를 분석하였다. 지오텍스타일의 탄성계수와 포아송비가 각각 $7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$,



(a) Y방향

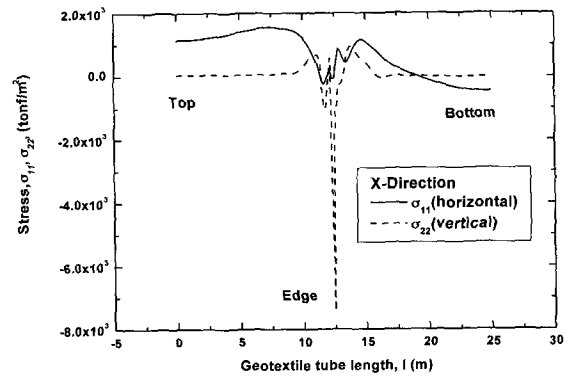


(b) X방향

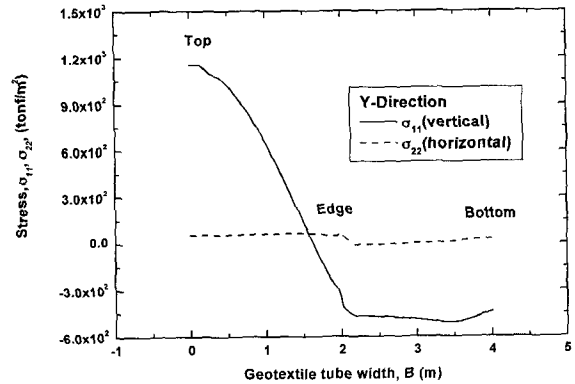
그림 11. 지오텍스타일 튜브의 단면형상변화
($E=7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, $\nu=0.45$)

비 0.45일 때, 정수압 변화에 따른 튜브의 형태변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 작용수두 1.50m의 정수압이 작용하였을 때, 지오텍스타일 튜브 상판은 약 1.35m 부풀어올랐으며, 저판은 0.02mm의 침하가 발생하였다.

그림 10에서 도시된 바와 같이 낮은 정수압에서는 조인트 부분의 좌굴이 없으나 정수압이 증가함에 따라 조인트 부분의 응력집중으로 인한 좌굴이 발생하는 것으로 나타났다. 그림 11(a)와 (b)는 각각 지오텍스타일 튜브 폭 방향과 길이방향의 변화거동을 나타낸 것이다. 폭 방향



(a) X방향



(b) Y방향

그림 12. 지오텍스타일의 응력분포

0.45이고, 작용수두 1.50m의 정수압이 작용할 때 응력 분포는 그림 12에 나타난 바와 같다. 그림 12(a)와 (b)는 튜브 길이방향과 폭방향에서 작용하는 응력분포이다. 응력변화 폭은 축 직각방향 응력이 위치에 따라 크게 변화하였으며, 튜브의 길이방향에서 발생하는 축방향 응력은 상판과 측면, 상향 이동하는 저판부분에서는 양의 값으로 발생되어 인장력이 작용하는 것으로 나타났다. 또한, 폭 방향의 축 방향 응력도 상판, 측면, 저판에서 인장력이 발생되었다. 그러나, 축 직각방향 응력은 길이 방향의 경우, 상판과 저판부분에는 인장력이 작용하지만, 측면에서는 튜브 팽창에 따른 압축력이 크게 작용하였다. 폭 방향의 축 직각방향 응력은 상판에서는 인장이 작용하지만 측면과 저판에서는 정수압에 의한 압축력이 작용하는 것으로 나타났다.

4.3 수치해석에 의한 매개변수 분석

본 연구의 수치해석에서 수행한 매개변수 영향 분석은 지오텍스타일의 재료특성 변화에 따른 영향과 지오텍스타일 튜브의 채움작업 시 발생하는 정수압변화에

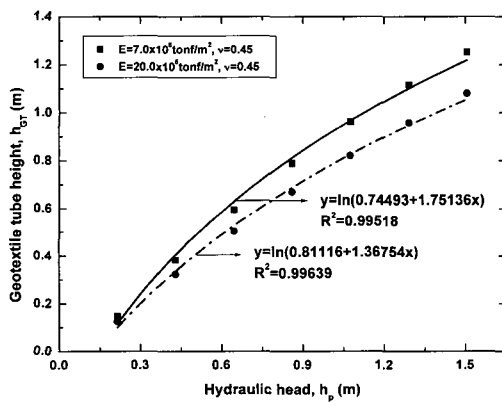


그림 13. 작용수두에 따른 튜브 높이의 변화

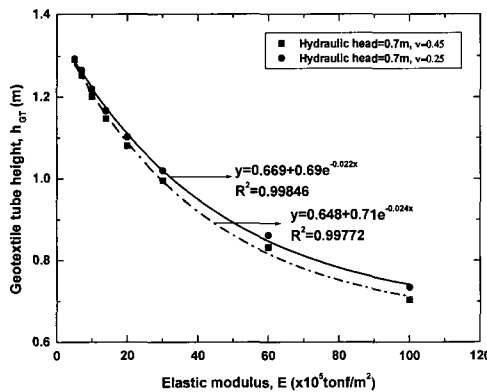


그림 14. 탄성계수변화에 따른 높이의 변화

다른 영향을 분석하였다. 그림 13은 지오텍스타일의 탄성계수가 $7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, $20.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$ 일 때, 정수압 작용수두에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이변화를 나타낸 것이다. 지오텍스타일 튜브의 재료강성 E값에 따른 영향은 재료강성이 클수록 정수압에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이가 작게 도출되었다. 실험에서 지오텍스타일 튜브의 최대높이는 채움토사의 종류에 관계없이 지오텍스타일의 파손을 고려하여 1.20m까지 가능하였다. 그림 14는 정수압 작용수두 1.50m, 지오텍스타일의 포아송 비가 0.25, 0.45일 때, 탄성계수변화에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이변화를 나타낸 것이다. 지오텍스타일 튜브의 높이는 탄성계수가 증가함에 따라 지수 감소 함수 형태로 표현되었으며, 지오텍스타일의 탄성계수가 변화함에 따라 급격히 변화하였다. 상대적으로 포아송 비의 변화는 지오텍스타일 튜브의 높이변화에 큰 영향을 미치지 않는 요소로 나타났다. 본 연구의 수치해석을 통한 매개변수 분석결과, 지오텍스타일 튜브의 형태 및 높이변화에 주요 영향인자는 튜브 내부에 가해지는 정수압과 지오텍스타일의 탄성계수로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 채움 과정에서 지오텍스타일 튜브의 거동을 분석할 수 있는 수치해석모델을 개발하기 위하여 평면변형해석 및 3차원 유한요소 해석을 통한 지오텍스타일 튜브의 거동분석 결과와 실험 현장모형시험을 통한 예측결과의 비교분석을 실시하였다. 본 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 정수압을 매개변수로 한 평면변형 해석결과, 지오텍스타일 튜브의 높이를 1.20m까지 채움작업을 하는데 필요한 정수압은 1.55tonf/m^2 으로 도출되었다. 실험 현장시험의 정수압 분포와 평면변형 해석에 의한 정수압은 준설모래의 경우 약 12.4% 작게 도출되었으며, 실트질 점토의 경우 약 10.5% 크게 나타났다. 실험 현장시험과 평면변형 해석에 의한 지오텍스타일 튜브의 거동이 차이를 보이는 것은 평면변형해석의 이론적 가정사항에 기인한 것으로 판단된다.
- (2) 3차원 유한요소 해석결과, 지오텍스타일의 탄성계수가 $7.0 \times 10^5 \text{tonf/m}^2$, 포아송 비가 0.45, 정수압이 1.66tonf/m^2 일 때 실험 현장시험 결과와 가장 근접

한 결과를 나타내었다. 지오텍스타일 튜브의 형태 및 높이변화에 주요 영향인자는 튜브내부에 가해지는 정수압과 지오텍스타일의 탄성계수로 평가되었다. 또한, 수치해석에 의한 응력분포는 축방향 응력의 경우 튜브팽창에 의한 인장력이 작용하였으며, 축직각방향 응력은 측면부에서 상판과 저판의 팽창으로 인한 압축력이 발생되었다.

- (3) 평면변형 해석과 3차원 유한요소해석 결과 모두 실험 대형 현장시험 결과와 근접한 거동을 나타내었다. 적용토사의 종류 및 해석상의 가정사항으로 약간의 차이점들은 발생하지만 평면변형해석과 3차원 유한요소해석방법을 통하여 채움과정에서의 지오텍스타일 튜브의 거동을 예측할 수 있었다. 특히, 3차원 유한요소 해석모델의 개발로 인하여 향후, 지오텍스타일 복합구조물 해석 및 지반거동해석이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 신은철, 오영인 (2002), "실험 대형 현장시험을 통한 지오텍스타일 튜브의 형태변화 및 거동특성", 대한토목학회논문집, Vol.22, No.6-C, pp.661-671.
2. Cantre, S. (2002), "Geotextile-analysis design aspect", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.20, No.5, pp.305-319.
3. Caroll. R. P. (1994a), "The Isotensile Pancake: a Unique Submerged Geotextile Flexible Form", *Geotechnical Fabrics Report*, Industrial Fabric Association International, St. Paul, MN, Vol.12. No.7, pp.12-19.
4. Caroll. R. P. (1994b), "Submerged Geotextile Forms Using Noncircular Cylindrical Shapes", *Geotechnical Fabrics Report*, Industrial Fabric Association International, St. Paul, MN, Vol.12, No.8, pp.4-15.
5. Hibbit, Karlsson, Sorensen (1999), "ABAQUS Version 5.88", *Finite Element Code*, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, RI.
6. Kazimierowicz, K. (1994), "Simple Analysis of Deformation of Sand-sausages", *Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.2, Singapore, pp.775-778.
7. 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.
8. 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.
9. Plaut, R. H., and Suherman, S. (1998), *Two-dimensional Analysis of Geosynthetic Tubes*, Acta Mechanica.
10. Seay, P. A. (1998), *Finite Element Analysis of Geotextile Tube*, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnical Institute and State University, Blacksburg, VA.
11. Silvester, R. (1990), "Flexible Membrane Units for Breakwaters", *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, J. B. Herbich, ed., Vol.1, Gulf, Houston, pp.921-938.
12. U.S. Army Corps of Engineers (1996), *Geosynthetics Confined Pressurized Slurry(GeoCoPS): Supplemental Notes for Version 1.0*, Technical Report, CPAR-GL-96-1, U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.

(접수일자 2003. 6. 20, 심사완료일 2003. 10. 6)