

2차원 한계평형 및 평면변형해석을 통한 지오텍스타일 튜브 복합구조물의 거동분석

Behavior of Geotextile Tube Composite Structure by 2-D Limit Equilibrium and Plane Strain Analysis

신 은 철*

Shin, Eunchul*

Abstract

The geotextile have been used in filtration and drainage for over 30 years in many applications of civil and environmental projects. Geotextile tube is compound technology of filtration and drainage property of geotextile. Geotextile have been used for various types of containers, such as small hand-filled sandbags, 3-dimensional fabric forms for concrete paste, large soil and aggregate filled geotextile gabion, prefabricated hydraulically filled containers, and other innovative systems involving containment of soils using geotextile. They are hydraulically filled with dredged materials. It have been applied in 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. This paper presents the behavior of geotextile tube composite structure by 2-D limit equilibrium and plane strain analysis. 2-D limit equilibrium analysis was performed to evaluate the stability of geotextile tube composite structure for the lateral load and also the plane strain analysis was conducted to determine the design and construction factors. Based on the results of this paper, the three types of geotextile tube composite structure is stable. And the optimum tensile strength of geotextile is 151kN/m and maximum pumping pressure is 22.7kN/m.

Keywords : Tube composite structure, Limit equilibrium, Plane strain, Stability, Pumping pressure

요 지

지난 30여년간 지오텍스타일은 토목분야의 건설현장에서 필터 및 배수기능을 위한 효과적인 재료로 활용되어 왔으며, 최근에는 다양한 환경 분야에서도 그 활용이 증가되고 있다. 지오텍스타일 튜브공법은 지오텍스타일의 필터 및 배수기능을 복합적으로 활용하는 공법으로 과거의 모래주머니, 웨브릭 폼, 게비언 등의 개념에서 최근 수리학적 채움기법을 적용하여 해안침식방지 구조물, 슬러지의 탈수, 오염물질의 격리처리 구조물 등의 신구조물 공법으로 자리매김 하고 있다. 본 연구에서는 지오텍스타일 튜브와 지반재료와의 복합구조물의 거동 및 설계인자에 대하여 2차원 한계평형 및 평면변형 해석방법을 통하여 분석하였다. 2차원 한계평형이론을 통하여 설계영향인자 및 현장여건에 따른 지오텍스타일 튜브 복합구조물의 지반공학적인 안정성을 분석하였으며, 지오텍스타일 튜브 전용해석 프로그램인 GeoCoPS를 이용한 2차원 평면변형 해석에서는 지오텍스타일 튜브 구조물의 설계 및 시공기법에 대하여 검토하였다. 2차원 한계평형해석 및 평면변형해석 방법을 통한 분석결과, 세가지 형태의 지오텍스타일 튜브구조물 모두 안정성을 확보하고 있으며, 지오텍스타일의 소요인장강도는 151kN/m, 펌핑압은 최대 22.7kN/m로 도출되었다.

주요어 : 지오텍스타일 튜브 복합구조물, 2차원 한계평형해석, 평면변형해석, 활동안정성, 펌핑압

* 정회원, 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수(E-mail : ecshin@incheon.ac.kr)

1. 서론

기존제방은 자연 석재 및 골재의 부족으로 인하여 건설 및 유지관리에 많은 비용이 발생한다. 또한 조수 이동에 의한 해안침식, 태풍이나 폭풍 등 자연재해로 인한 하천 및 해안구조물의 파괴가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 기존구조물을 대체할 수 있고, 자연재해로 인하여 훼손된 구조물의 신속한 복구 및 해안침식 방지 등이 가능한 기술개발이 요구되고 있다. 지오텍스타일 튜브공법은 경제적이며 시공성이 우수하고 환경 친화적인 하천 및 해안구조물 축조공법으로 기존의 사석 및 콘크리트 구조물을 대체할 수 있는 공법이다. 그러나, 주요 활용분야라 할 수 있는 수리 및 항만분야를 비롯하여 전반적인 토목분야에서 인지도가 낮으며, 사석 및 콘크리트 활용구조물과 비교하여 제시되어 있는 설계기준이 없는 실정이다.

지오텍스타일 튜브공법의 설계는 크게 소요 구조물의 기능분석과 2차원 한계평형해석에 의한 안정성 검토, 시공과정 및 시공 후의 거동분석이 이루어져야 한다. 따라서, 설계자는 일차적으로 구조물의 필요성과 해안침식방지, 파랑 감쇄 효과, 매립제방 등과 같은 기능분석을 수행하여야 하며, 둘째는 수리동역학적 요소와 지반공학적 요소가 복합적으로 고려되어 작용하는 외력에 대한 구조물의 안정검토가 이루어져야 한다. 또한 최종적으로는 상재하중과 구조물의 상호작용 및 공용 후의 지오텍스타일 튜브 복합구조물의 거동 해석을 수행하여야 한다(Pilarczyk 등, 1998).

지오텍스타일 튜브 및 복합구조물의 거동분석에 대한 연구로서 실험적 연구와 수치해석 연구 및 시공사례 분석 등이 수행되었다. 실험적 연구는 축소 모형에 대한 수리모형시험 연구가 주로 수행되었으며, 수치해석연구는 2차원 한계평형해석을 바탕으로한 매개변수 해석이 수행되었으며, 지오텍스타일을 무게가 없고 비신축성의 얇은 멤브레인으로 가정한 2차원 해석이 주로 수행되어졌다. 또한, 채움작업에 의한 내부에 압력과 지오텍스타일의 인장력에 대한 한계평형해석을 통하여 튜브의 높이와 폭 등의 형태를 예측하였다.

Silvester(1990)는 2차원 한계평형해석을 통하여 지오텍스타일의 튜브의 둘레, 압력, 접촉면적, 채움높이와 폭 등의 관계를 도출하였으며, 지오텍스타일에

발생되는 인장력 계산방법을 제시하였다. 또한, 모형실험 연구에 따른 결과와 2차원 평형해석 결과가 잘 일치한다고 보고하였다.

Liu(1981)는 모래채움 튜브에 대한 수치해석연구를 통하여 지오텍스타일에서 발생하는 응력과 평형해석 방정식을 제시하였으며, 실내 모형시험을 통하여 지오텍스타일 신율의 영향을 분석하였다. 미공병단(1996)과 Leshchinsky and Leshchinsky(1996)는 미공병단의 CPAR(Construction Productivity Advanced Research) 프로그램의 일환으로 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 결정할 수 있으며, 지오텍스타일의 안전율, 튜브외측의 하중 등을 영향인자로 고려할 수 있다. 또한, 부피-단위중량 관계를 통한 지오텍스타일 튜브의 압밀 후의 형상에 대한 예측이 가능하다. Plaut and Suherman(1998)은 하부지반조건의 변화와 지오텍스타일 튜브의 설치조건을 네 가지로 구분하여 해석을 수행하였다. 이 연구에 따르면, 지오텍스타일 튜브가 강성 기초지반에 설치된 경우보다 연성기초지반에 설치될 경우 지오텍스타일에 발생하는 인장력이 크며, 외측면에서 작용하는 수압 등의 외력이 있을 경우 인장응력은 감소한다고 보고하였다.

삼면이 바다와 접해있는 우리나라의 경우, 서남해안을 중심으로 가용용지의 확보를 위한 준설매립공사가 빈번히 진행되고 있음에도 지오텍스타일 튜브공법의 활용은 거의 전무하였으나, 최근 들어 동해안에서 침식방지용 이안제 구조물로 최초로 시공된 바 있다. 대규모 지오텍스타일 복합구조물이 일산대교 교각공사를 위한 가도축조공사에서 최초로 시공되었으며, 해안지역 공사시 다양한 분야에서의 설계 및 적용성 검토가 확대되고 있다.

본 연구에서는 00대교 연결도로 건설공사 중 가도로 설계된 지오텍스타일 튜브 복합구조물의 안정성 및 설계인자 분석을 실시하였다. 연구대상지역의 지반공학 조건 및 수리동역학적 조건을 분석하며, 이를 바탕으로 2차원 평형해석기법을 활용하여 지오텍스타일 튜브구조물 안정성 분석을 수행하였다. 또한, 지오텍스

타일 튜브 전용해석 프로그램을 활용하여 튜브공법의 각종 설계인자를 도출하며 최종적으로 지오텍스타일 튜브 복합 가도구조물의 전반적 안정성, 시공성, 경제성 등을 고려한 최적의 지오텍스타일 튜브 설계 및 시공방법을 제시하였다.

2. 2차원 한계평형 및 평면변형 이론

2.1 지오텍스타일 튜브의 안정해석

활동에 대한 안전율은 지오텍스타일 튜브 자중과 상대하중인 수직력과 외력으로 작용하는 수평과압의 비로 나타낸다. 활동에 의한 안전율은 다음 식 (1)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(sliding)} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan \phi'}{P_w \times h_{GT}} \quad (1)$$

여기서, P_h 는 수평력, F 는 수직력, P_v 는 상대하중과 지오텍스타일 자중에 의한 수직력, P_w 는 파도에 의한 과압, h_{GT} 는 지오텍스타일 충전 후 높이, ϕ' 는 채움토사와 지오텍스타일의 포화시 접촉마찰각이다. 활동에 대한 안전율은 1.0이상일 경우 안전한 것으로 판정한다. 지오텍스타일 튜브의 전도에 대한 안전율은 파도에 의한 전도모멘트와 자중에 의한 저항모멘트의 비로 나타나며, 다음 식 (2)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(overturning)} = \frac{M_R}{M_o} = \frac{P_v \times \frac{B'}{2}}{P_w \times \frac{h_{GT}}{2}} \quad (2)$$

여기서, M_R 은 저항모멘트, M_o 은 전도모멘트, P_w 는 파도에 의한 수평력, h_{GT} 는 튜브높이, P_v 는 상대하중과 자중에 의한 수직력, B' 는 지오텍스타일 튜브의 등가 직사각형 폭이다. 전도에 대한 안전율은 1.0이상일 경우 안전한 것으로 판정한다(오영인, 2003).

2.2 2차원 평면변형 해석이론

지오텍스타일 튜브의 2차원 평면변형 해석이론은

Silvester(1990), Liu(1981), Leschinsky and Leshchinsky 등(1996)에 의하여 연구되었다. 2차원 평면변형 해석 이론은 길이방향의 변형을 무시하는 평면변형 조건을 적용하였으며, 토목섬유 쉘(Shell)모델은 얇고 유연하며, 단위길이 당 단위중량은 무시하여 해석하였다. 지오텍스타일 튜브의 외부 경계조건은 슬러리와 토목섬유 간의 전단응력은 발생하지 않는 것으로 가정하였으며, 내부의 경계조건은 슬러리로 채워져 있는 수리학적 응력상태로 가정하여 해석하였다. 그림 1은 평면변형 해석 개념 및 기호를 나타낸 것이다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 외부에서 작용하는 힘은 없으며, 한 종류의 슬러리로 구성되어 있다. 중심선을 기준으로 최고높이 h_{GT} , 전체 최고 폭 B , 바닥면과의 접지폭 b' , 펌핑압 p_0 , 슬러리의 평균단위중량 γ_{av} 일 때 튜브의 정점으로부터 임의심도까지의 수리학적 압력은 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

$$p(x) = p_o + \gamma_{av}x \quad (3)$$

임의의 토목섬유 쉘 지점에서 작용하는 토목섬유의 인장응력과 수리학적 압력과의 관계에 대한 x 방향과 y 방향의 평형방정식은 식 (4)에 나타낸 바와 같다.

$$r(x) = T_g/p(x) \quad (4)$$

여기서, T =토목섬유의 인장응력이며, $p(x)$ =임의심도까지의 수리학적 압력이다.

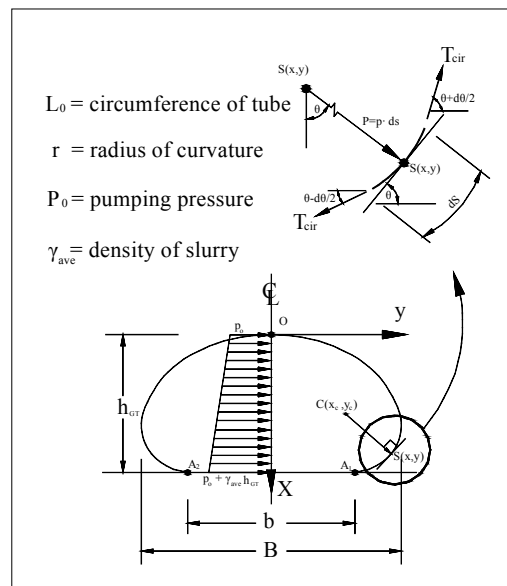


그림 1. 지오텍스타일 튜브의 단면(부호규약 및 표기법)

상기의 방정식은 실제적으로 A_1OA_2 면에서만 적용되지만 해석의 간편함을 위하여 바닥면에 닿는 폭 b' 에 대해서도 동일하게 작용한다고 가정하였다. 상기의 방정식을 다시 각각의 방향에 대한 미분방정식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$r(x) = [1 + (y')^2]^{3/2} / y'' \quad (5)$$

여기서 $y' = dy/dx, y'' = d^2y/dx^2$ 이다. 또한, 미분방정식 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$T_g \cdot y'' - (p_0 + \gamma_{av} \cdot x) \cdot [1 + (y')^2]^{3/2} = 0 \quad (6)$$

상기의 비선형미분방정식은 인장응력 T_g , 펌핑압 p_0 , 슬러리의 단위중량 γ_{av} , 튜브의 높이 h_{GT} 등의 함수로 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = f(x | T_g, p_0, h_{GT}, \gamma_{av}) \quad (7)$$

각각의 설계변수들의 입력을 통하여 설계 매개변수인 $y(x)$ 값을 얻을 수 있다. 2차원 평형해석의 가정사항에 따른 경계구속조건은 식 (8)과 식 (9)에 나타내었다.

$$1/y'(0) = 0 \quad (8)$$

$$b' = \frac{2\gamma_{av}}{p_0 + \gamma h} \int_0^4 y(x) dx \quad (9)$$

또한 전체 길이 $L_0 = b + \int_s ds$ 이므로 접촉면 길이를 전체길이에 대입하면 다음 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$L_0 = \frac{2\gamma_{av}}{p_0 + \gamma_{av} h_{GT}} \int_0^h y(x) dx + 2 \int_0^4 [1 + (y')^2]^{1/2} dx \quad (10)$$

상기 제시한 경계구속조건과 토목섬유의 인장강도 T_g , 지오텍스타일 튜브의 최대높이 h_{GT} , 펌핑압 p_0 가 주어질 경우, 초기 비선형 미분방정식의 해를 시행착오법을 통하여 얻을 수 있다. 단위길이당 축방향 인장응력(T_{axial})과 수직평면에 작용하는 전체 작용력(P)은 다음 식 (11)과 식 (12)와 같이 나타낼 수

있다.

$$T_{axial} = (2/L_0) \int_0^{h_{GT}} (p_0 + \gamma_{av} x) y(x) dx \quad (11)$$

$$P = \int_0^{h_{GT}} (p_0 + \gamma_{av} x) \cdot y(x) \cdot dx \quad (12)$$

토목섬유는 생산과정 및 재료특성에 따라 비등방성 성질을 가지며, 현장조건에 따라 비등방성 적용이 이루어질 수 있다. 따라서, 토목섬유의 선정이나 봉합 등에서 오는 강도감소를 고려하여 해석이론에서 구한 축방향 인장응력(T_{axial})과 수직면에 작용하는 전체 작용력(P)에 안전율을 고려하여 적용하여야 한다.

3. 튜브 복합구조물의 안정해석

3.1 튜브구조물의 형태분석

지오텍스타일 튜브구조물의 형태분석은 크게 기하학적 형태분석과 시공후 변형에 따른 형태분석으로 구분하며, 채움재료가 잔류침하가 적은 사질토일 경우, 형태분석에 의하여 튜브구조물의 형상을 설계한다. 지오텍스타일 튜브 구조물의 채움비율에 따른 높이는 다음식 (13)을 통하여 도출할 수 있다(신은철과 오영인, 2002).

$$h_{GT} = D(1 \pm \sqrt{1 - R_f}) \quad (13)$$

여기서, h_{GT} 는 튜브의 높이, D 는 튜브의 원형직경, R_f 는 채움비율을 의미한다. 각각의 채움비율에 따른 높이와 폭은 $R_f = 0.85$ 일 때 $h_{GT} = 0.61D$, $R_f = 0.90$ 일 때 $h_{GT} = 0.68D$, $R_f = 0.95$ 일 때 $h_{GT} = 0.77D$ 를 통하여 얻을 수 있으며, 표 1은 본 연구에 적용된 튜브의 형태분석결과를 정리한 것이다.

표 1. 지오텍스타일 튜브의 형태분석결과

구분	단위	GT300	GT400	GT500
원주장	m	9.5	12.5	15.7
직경	m	3.0	4.0	5.0
시공높이 (60%)	m	1.8	2.4	3.0
환산폭	m	3.2	4.4	5.5

3.2 튜브 복합구조물 안정해석단면

일반적인 튜브구조물의 안정해석은 주로 과압 및 수리동역학적 하중에 대한 안정해석이 주를 이루나, 튜브 복합구조물의 안정해석은 복합구조물에 작용하는 하중조건 및 작용토압 등 지반공학적 요소에 대한 안정검토가 요구된다. 본 연구에서는 시공과정 중, 후에 발생될 수 있는 지반공학적 조건에 대한 안정해석을 수행하였다. 시공과정 중의 안정해석 단계는 2단의 지오텍스타일 튜브가 설치된 후 1차 준설성토가 진행되는 단계를 설정하였다. 1차 준설성토단계는 수리동역학적 안정성을 확보한 지오텍스타일 튜브구조물에 준설성토에 따른 토압이 가장 먼저 작용하는 단계로 해석단면은 종단위치에 따라 그림 2에 나타난 바와 같다. 그림 2(a)는 하부에 GT500으로 구성되어 있으며, 그림 2(b)와 2(c)는 하부에 각각 GT400, GT300으로 구성되어 있다. 3가지 종류의 지오텍스타일 튜브의 구성은 천단고를 확보하기 위하여 조합된 결과이며 본 연구의 추가 안정성검토에서는 하부 지오텍스타일 튜브의 크기에 따라 구분하여 검토를 수행하였다.

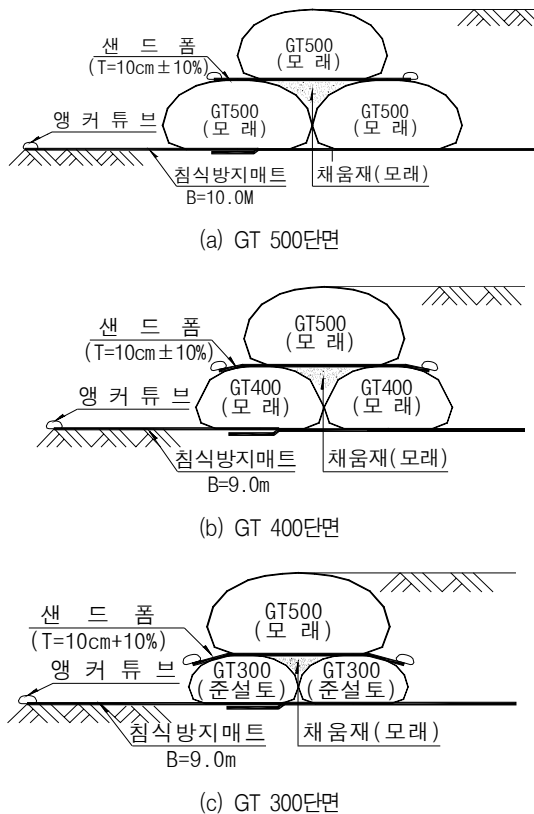


그림 2. 지오텍스타일 튜브 복합구조물단면도

3.3 튜브 복합구조물의 안정해석

튜브 복합구조물의 지반공학적 안정해석은 다양한 설계영향요소와 현장여건에 따라 단면 및 하중조건이 다르므로, 현재까지 통합적용 가능한 설계방안이 부재한 실정이다.

따라서, 튜브 복합구조물의 특성을 최대한 고려하며 안전측의 설계가 될 수 있도록 현장여건에 대한 적절한 가정이 요구된다. 본 연구대상 튜브 복합구조물은 준설성토에 따라 발생하는 토압을 고려하며, 튜브구조물의 활동특성에 따라 횡하중에 가장 활동이 발생되기 쉬운 최해측 하단에 위치한 지오텍스타일 튜브의 안전율을 계산하여 검토하였다. 활동에 대한 안전율은 지오텍스타일 튜브 자중과 상재하중인 수직력에 의한 전단저항력과 외력으로 작용하는 수평력의 비로 나타난다. 활동에 의한 안전율은 다음 식 (14)를 적용하여 도출하였다. 최해측 하단부에 위치한 지오텍스타일 튜브의 안정해석을 위한 단면가정은 최해측 하단부에 위치한 튜브의 평탄한 상부쪽에 대한 2단 튜브의 유효중첩율을 고려하여 설정하였다. 중첩율의 계산은 다음 식 (14)를 이용하였으며, 유효중첩율은 표 2에 나타난 바와 같다.

$$R_{OR} = \frac{l_{\text{유효중첩길이}}}{B_{\text{최해측튜브}}} \quad (14)$$

표 2에서 보는 바와 같이, 최해측 하단부의 지오텍스타일 튜브가 GT500, GT400인 단면은 유효중첩율이 30% 이하로 상부 2단 튜브의 자중이 하부튜브의 전단저항력에 큰 영향을 주지 못하나 GT300의 경우, 유효중첩율이 50%이상으로 상단 튜브의 자중을 하단 튜브의 전단저항력에 큰 영향을 미치므로 상단튜브의 중첩부 하중을 자중으로 고려하여 안정해석을 수행하였다. 또한, 유효 중첩율이 30% 이하인 GT500, GT400단면의 횡토압 작용높이를 상단튜브 높이의 50%만 고려하

표 2. 유효중첩율

최해측 튜브	유효중첩 길이 (m)	최해측 튜브 접지폭 (m)	유효 중첩율 (%)
GT500	0.811	6.430	12.6
GT400	1.425	5.144	27.7
GT300	1.991	3.858	51.6

표 3. 튜브복합 구조물의 안정해석결과

단면	P_v	P_h	ϕ'	FS
GT500	27.9	6.9	20	1.47
GT400	17.85	5.3	20	1.24
GT300	23.99	7.95	20	1.1

였으며, 중첩율이 높은 GT300단면의 경우, 횡토압의 작용높이를 상단 튜브 높이 전체를 고려하여 안정계산을 수행하였다. 각각 단면에 대한 안정해석 결과는 표 3에 나타난 바와 같다. 최해측 튜브의 활동 안전율은 전체적으로 GT500, GT400, GT300단면이 모두 활동에 대하여 안정한 것으로 도출되었다. 그러나, GT300 단면의 경우, 가장 작은 GT300 튜브 상단에 GT 500이 위치하여 구조적으로 불안정한 느낌을 주고 있으며, 안전율도 1.1로 가장 작게 도출 되어 향후 추가적인 검토와 시공 시 면밀한 계측 및 시공관리가 요구된다.

4. 평면변형해석에 의한 설계인자분석

4.1 해석방법

본 연구에서는 지오텍스타일 튜브의 채움작업 시 발생하는 인장강도와 튜브의 단면변화, 펌핑압력 등을 분석하기 위해 2차원 평면해석을 실시하였다. 2차원 평면 해석에는 미국의 ADAMA Eng.사에서 Leshchinsky and Leshchinsky의 이론을 바탕으로 개발한 GeoCoPS (Version2.0)를 활용하였다.

GeoCoPS는 지오텍스타일 튜브공법에 대한 2차원 평면변형 해석 프로그램으로 설계인자 분석은 다음의 세가지 방법으로 분석하였다. 첫째 지오텍스타일의 극한인장강도인 175.2kN/m까지 주었을 때 튜브높이와 펌핑압, 둘째 설계소요높이인 채움비율 60%까지 채웠을 때의 펌핑압과 인장강도, 셋째 최대펌핑압 34.47kPa까지 주었을 때의 튜브높이와 그에따른 인장강도를 분석하였다. 설계조건으로는 하부슬러리밀도를 12.0kN/m³, 상하부슬러리를 같은 재질로 보았으며, 해수에 해당하는 외부 하부유체밀도는 10N/m³, 압밀해석시 포화단위 중량은 12.1kN/m³, 모래의 비중은 2.7로 적용하여 해석하였다. 해석과정에서 고려 가능한 지오텍스타일의 강도 감소계수는 튜브의 설계시 고려할 수 있는 안전계수로

시공시 지오텍스타일의 손상에 의한 계수, 지오텍스타일의 내구성과 크리프 계수, 튜브 봉재선의 축방향 및 원주 방향의 봉압강도를 고려한 계수로 구분되어 사용된다. 본연구의 해석에 사용된 시공시 지오텍스타일의 손상에 의한 계수로서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 값인 1.3을 사용하였고, 내구성과 크리프 계수는 시공을 위해 채택될 여러 가지 지오텍스타일과 안전치를 고려하여 각각 2.0의 값을 사용하였다. 또한 봉합선의 축방향 및 원주 방향의 봉합강도계수로는 각각 2.0을 사용하였다.

본 연구의 해석과정은 1단계에서 기하학적 형태에서 주어진 지오텍스타일 튜브의 둘레와 설계높이로부터 지오텍스타일의 강도를 계산한다. 이때 구해진 인장강도와 튜브의 둘레를 사용하여 2단계에는 펌핑압력을 계산한다. 수리학적 펌핑압력은 일차적으로 채움토사를 원거리로부터 튜브내부로 이송시키는 압력을 의미하며, 지오텍스타일 내부의 압력은 수리학적 펌핑으로 인하여 발생하는 펌핑압력과 정수압의 합이다. GeoCoPS 해석프로그램을 통하여 도출되는 펌핑압력은 최종높이 시공 시 조절된 펌핑압력이며, 과다 펌핑압력은 지오텍스타일 튜브 봉합부분의 파손을 유발할 수 있다. 최종적으로 이러한 해석과정을 통해 도출된 단면을 이용하여 구조물을 설계하고, 시공단면을 제시한다.

4.2 재료특성에 따른 설계변수분석

재료특성에 따른 설계변수분석은 토목섬유의 극한 강도가 주어졌을 때 튜브의 형상을 분석하는 방법으로 진행하였으며 표 4는 최대인장강도 175.2kN/m가 될 때까지 주입하였을 때의 값을 나타내고 있다. GT300의 경우 해수가 없는 상태에서 시공직후 H=2.8m, 압밀후 2.4m로 낮아졌으며 최대폭은 3.4m, 접지면적 6.4m로 나타났다. 또한 수위가 높아짐에 따라 최대높이 및 최종높이는 증가하고 최대폭은 감소하였으며, 접지면적은 증가하였다. GT400의 경우 해수가 없는 상태에서 시공직후 최대높이 2.8m, 최대폭 4.8m, 접지면적은 10.7m를 나타내고 있다. GT500의 경우 최대높이 3.1m, 최대폭 6.2m 압밀후 높이는 3.0m로 이론상의 최대높이 5m의 60%에 해당하는 높이임을 알 수 있다. 펌핑압은 작은 튜브 구조물일수록 값이 높게 나타났으나, 한계펌핑압 34.47kPa 이하로 모두 안전

측으로 해석되었다.

수위가 높아짐에 따라 튜브의 높이와 접지면적이 증가하는 것으로 도출되었다. 수위가 높아짐에 따라 구속압이 작용하여 측면의 처짐은 줄어드는 반면 수직력 증가하기 때문으로 판단된다. 그림 3은 GT500 튜브의 재료 특성에 따른 설계인자 해석 및 시공 후 침하거동 해석 결과를 나타낸 것이다. GT500 튜브의 시공 후 침하량은 10~20cm의 침하가 발생하는 것으로 나타났으며, 침하의 양상은 지오텍스타일 튜브를 채운 후,

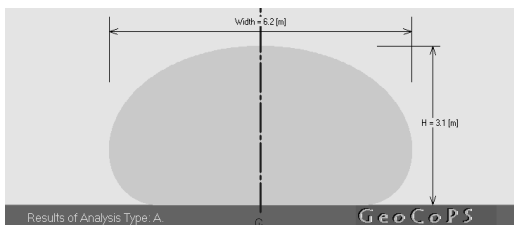
모래의 침강 및 간극수 배제에 따라 즉각적으로 발생되는 침하량으로 판단된다.

4.3 형상조건에 따른 설계변수 분석

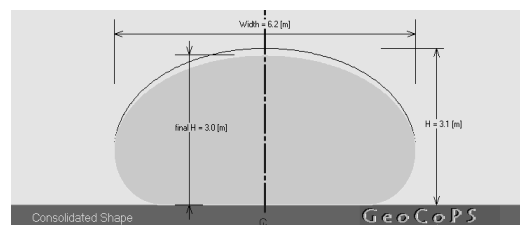
형상조건에 따른 설계변수분석은 최대높이에 대한 튜브의 인장강도를 분석한 것으로 GT300의 경우 최대 설계높이를 1.8m로 주었을때 원호방향으로 53kN/m, 축방향으로 38kN/m로 나타났다. 이는 최대극한강도

표 4. 재료특성에 따른 설계변수분석

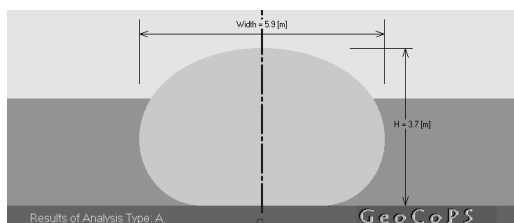
튜브의 외부조건		극한강도(kN/m)		최대높이 (m)	최대폭 (m)	최종높이 (m)	펌핑압 (kPa)
종류	수위((m)	원호방향	축방향				
GT300	0.0	175.0	107.0	2.4	3.4	2.4	22.7
	1.5	175.0	107.0	2.6	3.3	2.5	23.4
	3.0	175.0	93.0	2.8	3.1	2.7	28.3
GT400	0.0	175.0	116.0	2.8	4.8	2.7	14.1
	2.0	175.0	116.0	3.2	4.6	3.0	15.0
	4.0	175.0	96.0	3.6	4.2	3.5	20.3
GT500	0.0	175.0	124.0	3.1	6.2	3.0	10.1
	2.5	175.0	123.0	3.7	5.9	3.5	16.4
	5.0	175.0	100	4.3	5.4	4.2	25.4



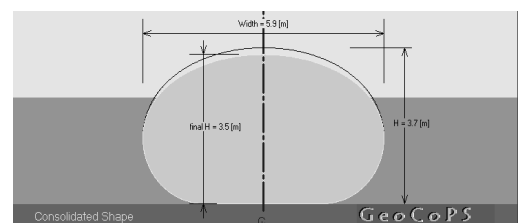
(a) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=0.0m)



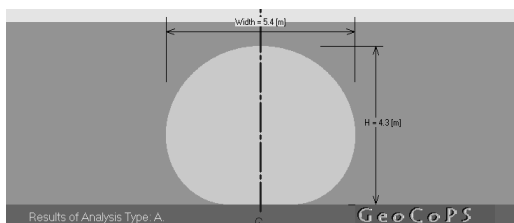
(b) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=0.0m)



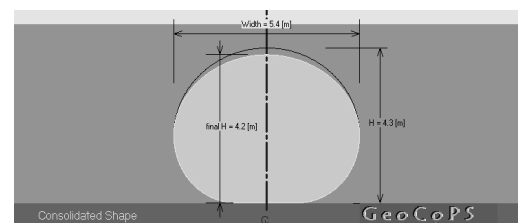
(c) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=2.5m)



(d) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=2.5m)



(e) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=5.0m)



(f) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=5.0m)

그림 3. 재료특성에 따른 설계변수분석(GT500)

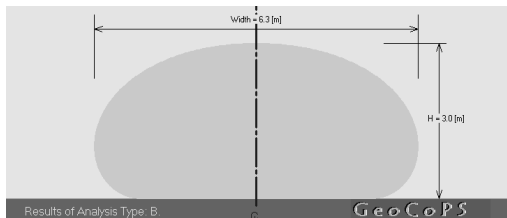
175kN/m의 30%정도임을 알 수 있다. GT400의 경우 인장강도는 95kN/m로 최대극한강도의 54%, GT500의 경우 151kN/m로 최대극한강도의 86%까지 발현되었으며 수위가 상승할수록 감소하였다. 또한, 시공시 60%의 채움모래를 적용할 때 외부수위에 관계없이 기하학적 형상변화는 미미하며 이는 안전한 시공이 가능함을 보여주고 있다.

표 5는 각각의 튜브에 60% 모래를 채웠을 때의 최대높이와 침하후의 높이를 나타낸다. GT300의 경우

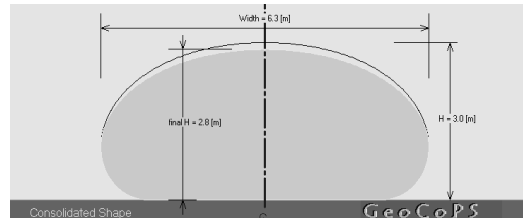
60%채움 시 최대높이는 1.8m이고 압밀후의 높이는 1.6m로 나타났다. GT400은 60% 채움시 2.4m 압밀 후 2.2m, GT500의 경우 60%채움시 3.1m, 압밀후 2.6m까지 낮아짐을 확인할 수 있다. 수위가 중간일때 튜브의 높이가 가장 높게 도출되었으며, 이는 수위가 없을 때는 자중에 의해, 수위가 높을때는 수압에 의해 침하가 더 발생한 것으로 사료된다. 그림 4는 GT500 튜브의 형상조건에 따른 설계인자 해석결과 및 시공 후 침하거동 해석결과를 나타낸 것이다.

표 5. 형상조건에 따른 설계변수 분석

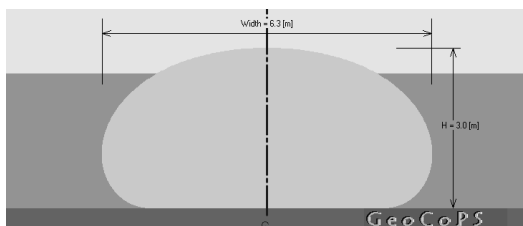
튜브의 외부조건		극한강도(kN/m)		시공직후 형상		압밀후 형상	
종류	수위(m)	원호방향	축방향	최대높이(m)	최대폭(m)	최종높이(m)	침지면적(m ²)
GT300	0.0	53.0	38.0	1.8	3.8	1.6	5.5
	1.5	21.0	16.0	1.8	3.8	1.8	5.6
	3.0	11.0	8.0	1.8	3.9	1.6	5.7
GT400	0.0	95.0	67.0	2.4	5.1	2.3	9.8
	2.0	36.0	28.0	2.4	5.1	2.3	10.2
	4.0	18.0	13.0	2.4	5.1	2.3	9.8
GT500	0.0	151.0	106.0	3.0	6.3	2.8	15.1
	2.5	55.0	43.0	3.0	6.5	2.9	16.2
	5.0	30.0	21.0	3.0	6.3	2.9	15.1



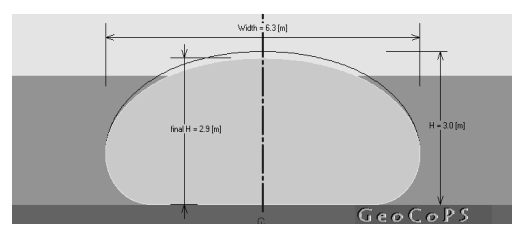
(a) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=0.0m)



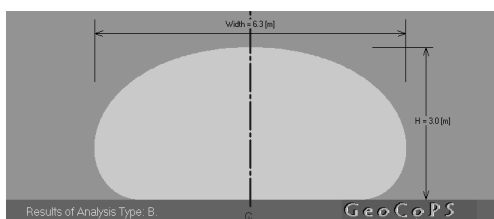
(b) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=0.0m)



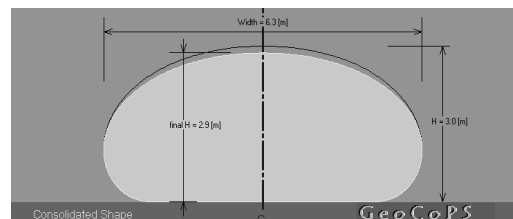
(c) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=2.5m)



(d) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=2.5m)



(e) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=5.0m)



(f) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=5.0m)

그림 4. 형상조건에 따른 설계변수분석(GT500)

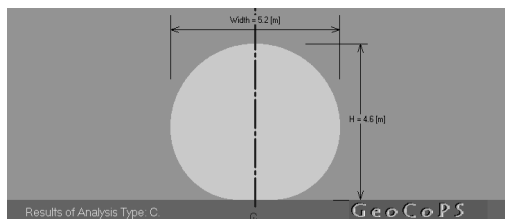
4.4 시공압에 대한 설계변수 분석

시공압에 따른 설계변수분석은 시공 가능한 최대 펌핑압을 주었을 때 나타나는 기하학적 형상 및 요구되는 극한강도에 대하여 분석하였다. 최대시공압을 34.47kPa를 주었을 때 압밀전 후 형태변화가 없었으며 압밀에 의해 최종높이만 감소하였다. 또한, 3종류 모두 타원형이 아닌 원형의 형상을 보여주고 있으며, 수위에 관계없이 모두 같은 형상을 보여주고 있다. 표 6은 시공압에 따른 설계변수분석결과를 나타낸 것이다.

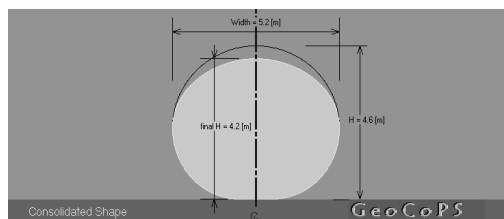
시공압을 최대로 주었을 때 형상은 GT300의 경우 시공직후 3.1m, 압밀후 2.7m, GT400의 경우 시공직후 3.8m 압밀후 3.6m, GT500의 경우 최대 4.6m, 압밀후 4.4m로 나타났다. 펌핑압을 일정하게 유지할 경우 수위에 상관없이 인장력 및 높이변화가 일정하게 유지되나 과도한 시공압이 가해질 경우 봉합부위 강도저하 및 파손이 예상된다. 따라서 펌핑압의 적절한 조절이 필요할 것으로 사료된다. 그림 5는 GT 500 튜브의 시공압에 따른 설계인자 해석결과 및 시공 후 침하거동 해석결과를 나타낸 것이다.

표 6. 시공압에 따른 설계변수 분석

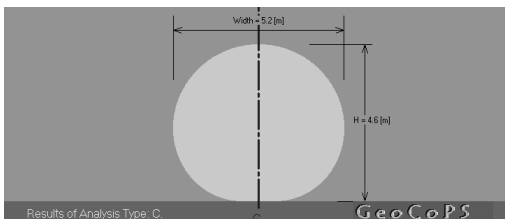
튜브의 외부조건		극한강도(kN/m)		시공직후 형상		압밀후 형상	
종류	수위(m)	원호방향	축방향	최대높이(m)	최대폭(m)	최종높이(m)	접지면적(m ²)
GT300	0.0	209.0	109.0	2.8	3.1	2.7	6.7
	1.5	209.0	115.0	2.8	3.1	2.7	6.7
	3.0	209.0	109.0	2.8	3.1	2.7	6.7
GT400	0.0	291.0	154.0	3.8	4.2	3.6	12.1
	2.0	291.0	164.0	3.8	4.2	3.6	12.1
	4.0	291.0	154.0	3.8	4.2	3.6	12.1
GT500	0.0	363.0	195.0	4.6	5.2	4.4	18.4
	2.5	363.0	209.0	4.6	5.2	4.4	18.4
	5.0	363.0	195.0	4.6	5.2	4.4	18.4



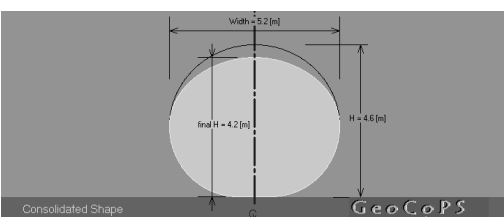
(a) 펌핑과정석결과(Height of outside fluid H=0.0m)



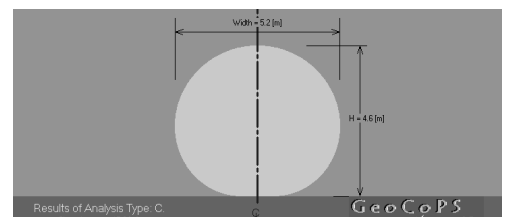
(b) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=0.0m)



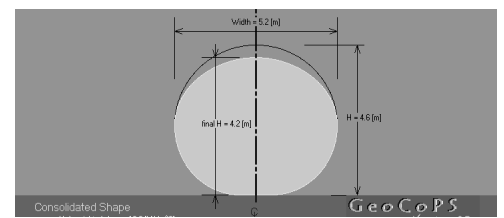
(c) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=2.5m)



(d) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=2.5m)



(e) 펌핑과정해석결과(Height of outside fluid H=5.0m)



(f) 압밀후 튜브형태(Height of outside fluid H=5.0m)

그림 5. 시공압에 따른 설계변수 분석(GT500)

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 평형해석기법을 활용하여 지오텍스타일 튜브구조물에 대한 지반공학적인 안정성 검토를 수행하였으며, 지오텍스타일 튜브 전용해석 프로그램을 활용하여 튜브공법의 각종 설계인자를 도출하였다. 총괄 연구 분석에 따른 결론사항은 다음과 같다.

(1) 연구대상 튜브 복합구조물의 지반공학적인 안정검토는 튜브 구조물 중 안정성이 가장 불확실한 최해측 튜브의 준설성토 단계에서의 활동안전율 검토를 수행하였다. 전체적으로 GT500, GT400, GT300단면이 모두 활동에 대하여 안정한 것으로 도출되었으나, 하단 튜브가 상대적으로 작은 GT300 단면의 경우, 구조적으로 비교적 불안정하게 나타났다. 안전율도 1.1로 가장 작게 나타났다.

(2) 지오텍스타일 튜브 전용해석 프로그램을 통한 설

계인자 분석결과, 각각의 튜브단면별로 소요인장강도가 GT500은 151kN/m, GT400은 95kN/m, GT300은 53kN/m로 도출되었으며, 시공시 적정 소요 펌핑압력은 GT500은 22.7kN/m, GT400은 20.3kN/m, GT300은 16.4kN/m으로 도출되었다.

(3) 시공 후 지오텍스타일 튜브의 변형 및 침하거동에 대한 분석결과, 각각의 단면별로 시공 후 침하량은 10~20cm내의 침하가 발생하는 것으로 도출되었으며, 침하의 양상은 장기간 압밀에 의한 침하가 발생하는 것이 아니라 지오텍스타일 튜브를 채운 후, 모래의 침강 및 간극수 배제에 따라 즉각적으로 발생하는 침하량으로 판단된다.

(4) 튜브복합 구조물의 안정해석은 현재까지 정확한 설계방법이 부재하여 튜브특성 및 현장여건을 충분히 고려한 안전측 설계가 요구된다.

(접수일 : 2006. 2. 24 심사일 : 2006. 3. 3 심사완료일 : 2006. 6. 15)

참 고 문 헌

1. 신은철, 오영인(2002), 지오텍스타일 튜브의 2차원 평형해석 및 수리모형시험을 통한 안정성 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 5호, pp. 251~260.
2. 오영인(2003), *친환경적 지오텍스타일 튜브의 거동 분석*, 인천대학교 대학원, 박사학위 논문. pp. 14~15.
3. Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H. I. and Gilbert, P. A.(1996), Geosynthetic Tubes for Confining Pressurized Slurry: Some Design Aspect, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 8, pp. 682~690.
4. 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.
5. Pilarczyk, K. W., Breteler, M. K. and Stoutjestijk, T.(1998), Stability Criteria for Geosystems -an Overview-, *Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetic*, Atlanta, Georgia, USA, Vol. 2, pp. 1165~1172.
6. Plaut, R. Ho and Suherman, S.(1998), *Two-dimensional Analysis of Geosynthetic Tubes*, Acta Mechanica, pp. 207~218.
7. 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.
8. U.S. Army Corps Engineers.(1996), *Geosynthetic 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., pp. 18~29.