한국지반공학회논문집 제18권 5호 2002년 10월 pp. 251 ~ 260

지오텍스타일 튜브의 2차원 평형해석 및 수리모형시험을 통한 안정성 분석

2-Dimensional Equilibrium Analysis and Stability Analysis of Geotextile Tube by Hydraulic Model Test

신 은 철*1 Shin, Eun-Chul
오 영 인*2 Oh, Young-In

Abstract

Geotextile tubes are made of sewn geotextile sheet and hydraulically or mechanically filled with dredged materials. They have been applied in hydraulic and coastal engineering in recent years(shore protection structure, detached breakwater, groins, and jetty). Therefore, it is composed of geotextile and confined fill material. Recently, new preliminary design criteria supported by model and prototype tests, and some stability analysis calculations have been studied. The stability analysis of geotextile tube is composed of geotechnical and hydrodynamic analysis. The stability check points are sliding failure, overturning, bearing capacity failure against the wave attack. In this paper are presented the stability analysis method by empirical equation and 2-D equilibrium analysis for geotextile tube. Also, the hydraulic model tests were performed to verify the theoretical stability analysis with geotextile tube shape, filling ratio, significant wave height, and so on. The results of this study show that the stability of geotextile tube depends on the tube shape, contact area, projection area. The theoretical analysis and hydraulic model test show almost the same results.

요 지

지오텍스타일 튜브공법은 고강도 토목섬유인 지오텍스타일을 튜브모양으로 봉합하여 수리학적 방법이나 기계적인 방법으로 내부에 토사를 채워 구조물을 형성하는 공법으로, 지오텍스타일 튜브구조물은 지오텍스타일에 구속된 토사체로 구성되며, 지오텍스타일과 토사의 복합거동 특성을 나타낸다. 또한, 구조물의 활용분야가 해안 및 호안 침식방지 구조물이나 방파제, 제방 등에 적용되어지므로 설계 및 안정해석 시, 지반공학적 검토와 파도에 의한 수리동역학적 검토가 필요하다. 본 연구에서는 지오텍스타일 튜브의 효율적인 안정해석방법에 대하여 분석하기 위하여, 방파제(Breakwater), 이안제(Detached breakwater), 돌제(Groin)등과 같은 해안구조물의 경험 및 2차원 평형해석방법을 검토 및 적용하였으며, 해석결과의 실험적 분석을 위하여 이안제형태의 지오텍스타일 튜브에 대한 수리모형시험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 경험식 및 2차원 평형해석 분석은 기존의 수리모형시험을 통하여 도출된 경험식과 파도의 작용을 외력으로 한 2차원 평형해석이론을 적용・검토하였다. 또한, 수리모형시험을 통한 안정해석은 지오텍스타일 튜브의 형태(채움비율 변화), 유의파고(Significant wave height), 천단고(구조물 상부수심)의 확보유무 등의 해석변수조건을 적용하였다. 2차원 평형해석에 의한 지오텍스타일 튜브의 안정해석결과, 활동 및 전도에 대한 안정성은 튜브형태, 접지면적, 유의파고, 투영면적 등의 복합상관관계로 비선형적인 변화를 나타내었으며, 수리모형시험을 통한 안정성 검토결과, 경험식 및 2차원 평형해석결과와 근접한 결과를 나타내었다.

Keywords : Geotextile tube, Hydraulic model test, Significant wave height, Stability, 2-D equilibrium analysis

*1 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Univ. of Incheon)
*2 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Univ. of Incheon, yioh2010@incheon.ac.kr)

1. 서 론

지오텍스타일을 활용한 튜브공법의 핵심내용은 습지나, 해안, 하천, 항만분야에서 석재나 콘크리트 구조물로 축조되는 제방을 고분자 합성섬유인 지오텍스타일을 특수 봉재하여 튜브형태의 포대로 만들어, 내부에 해저퇴적토사 및 기타 해저오염토사 등을 수리학적 방법(준설펌핑)으로 충진하여 제방 및 방파제를 건설하는 공법이다. 지오텍스타일 튜브를 구성하는 요소는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 지오텍스타일 튜브의 재질인 토목섬유(지오텍스타일)이고, 두번째는 내부채움재로 사용되는 토사이다. 일반적으로 지오텍스타일 튜브공법에서 사용되는 지오텍스타일은 재질분류로는 폴리에스터와 폴리프로필렌 재질이 있으며, 직조 및 생산방법에 따른 종류로는 직포, 부직포, 복합포 등 3종류로 구분할 수 있다. 내부채움재로 사용되는 토사는 시공성과 경제성을 고려하여 현장가용재료(준설토, 모래)를 사용하거나 환경적 적용이나 산업폐기물의 처리와 같은 특수한 목적일 경우, 준설오니나 산업폐기물과 같은 폐기물이 사용된다.

지오텍스타일 튜브에 대한 초기 개념적인 연구는 1970년대부터 네덜란드 Delft 수공학연구소에서 연구되어졌으며(Delft Hydraulics, 1975), 실제 적용사례를 살펴보면, 1980년대 초반 브라질에서 처음으로 시도된 이래 네덜란드와 독일을 비롯한 세계 각국에서 수중제방 또는 해안 및 호안보호 등에 활용되고 있다(Bogossian, et. al., 1982). 특히 최근 들어, 지오텍스타일 튜브를 활용한 해안구조물의 거동 및 설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Silvester(1990)와 Pilarczyk(1995)는 지오텍스타일 튜브를 활용한 방파제 구조물에 대한 연구를 수행하였으며, Gutman(1979)과 Pilarczyk(1995)은 해안침식방지를 위하여 돌제형태로 설치된 지오텍스타일 튜브에 대하여 연구를 수행한 바 있다. Koerner and Soong(1997)은 해안선과 일정거리를 두고 수중에 설치하는 이안제형태의 적용에 대하여 연구하였으며, Perrier (1986)과 John(1987)은 해안 제방 및 제방코어재료의 활용 가능성에 대하여 연구를 수행하였다. 또한, 국내에서도 강원도 강릉시 연곡동 영진만 해안에 해안선 침식방지 및 토사퇴적을 유도할 목적으로 설치한 이안제형태의 지오텍스타일 튜브에 대한 연구가 진행되었다(신은철 등, 2002).

지오텍스타일 튜브의 설계는 크게 소요 구조물의 기능적 요구와 설계자의 경험적 요소를 바탕으로 하여 이루어진다. 구조물의 형태 및 기능설계를 수행할 경우, 설계자는 일차적으로 구조물의 파괴에 대한 규준설정 및 분석을 수행하여야 하며, 둘째는 작용 외력에 대한 구조물의 거동분석, 마지막으로 외력과 구조물의 상호작용에 대하여 분석하여야 한다. 구조물에 작용하는 하중 및 외력은 수리동역학적 요소, 지반공학적 요소, 구조공학적 요소의 복합적 고려를 통하여 결정된다.

본 연구에서는 해안구조물로 설치되는 지오텍스타일 튜브의 효율적인 안정해석방법에 대하여 분석하기 위하여, 방파제, 이안제, 돌제 등과 같은 해안구조물에 적용하는 경험식과 파도의 작용에 의한 파압을 외력으로 작용시켜 평형해석을 수행하는 2차원 평형해석방법을 검토 및 적용하였으며, 해석결과의 실험적 분석을 위하여 이안제형태의 지오텍스타일 튜브에 대하여 튜브 채움비율, 접촉면적, 유의파고, 천단고 변화 등에 대한 수리모형시험을 실시하였다.

2. 지오텍스타일 튜브의 안정해석 이론

2.1 지오텍스타일 튜브의 형태분석

지오텍스타일 튜브의 시공 후 형태변화는 소요의 구조물 특성 및 기능수행에 있어서 중요한 요소로 작용한다. 또한, 형태변화에 대한 예측 및 분석은 지오텍스타일 튜브 구조물의 응력해석과 안정해석 및 수량산출을 통한 경제성 평가 등을 위하여 구조물의 설계 시 반드시 수행되어져야 한다. 지오텍스타일 튜브의 형태변화의 영향요소는 크게 채움재료, 채움비율, 펌핑압력, 지오텍스타일 특성 등을 들 수 있으며, 형태변화 예측방법은 튜브가 완전히 채워진 원형의 경우, 타원형태로 채워진 경우, 직사각형 형태로 채워지는 경우로 가정하여 산정할 수 있다. 예측방법은 지오텍스타일 튜브의 재봉형태, 시공방법에 따라 각각 다른 경우로 산정 할 수 있으며, 일반적으로 타원형태로 채워지는 경우가 현장의 경우와 가장 유사하게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 안정해석 및 수리모형시험 시, 타원형태의 지오텍스타일 튜브 형태변화 예측방법을 적용하였다. 그림 1은 유도과정의 기호부약을 나타낸 것이다.

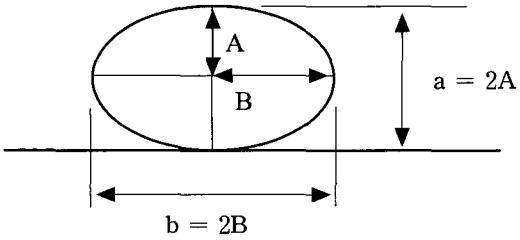


그림 1. 튜브 형태분석을 위한 기호부약

또한, 유도과정에서 사용된 함수들은 최대직경: D; 둘레: $S=\pi D=S_0$; 채움비: $\phi=A_f/A_0\leq 1$; 단면적: $A_0=\pi D^2/4$ ($=100\%$); A_f: 채움 후 단면적; 형상비: $\varphi=A_f/S_0^2$ 등이 있다.

2.1.1 최대 채움 시(원형)

지오텍스타일 튜브의 채움비를 최대로 하였을 경우는 이론적으로 가능한 경우이며, 튜브의 형상은 원형의 형태를 갖는다. 이때 지오텍스타일 튜브의 최대 형상비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi = A_f / S_0^2 = A_0 / S_0^2 = (\pi D^2/4)/(\pi D)^2 = 1/(4\pi) = 0.08 \quad (1)$$

2.1.2 채움 비율에 따른 유효높이 산정(타원형)

본 연구의 지오텍스타일 튜브의 안정성 분석을 위한 해석조건은 설계조건을 바탕으로 크게 2가지 조건으로 분류할 수 있다. 첫 번째는 지오텍스타일 튜브의 채움비율에 따른 유효높이와 폭 변화이며, 두 번째는 구조물에 가해지는 유의파고 높이이다. 지오텍스타일 튜브의 채움비율에 따른 유효높이와 폭은 다음과 같은 과정을 통하여 도출할 수 있다. 지오텍스타일 튜브의 채움비, ϕ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{A_f}{A_0} \quad (2)$$

$$= \frac{\frac{\pi}{4} a \cdot b}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{a \cdot b}{D^2} \quad (3)$$

여기서, A_f는 지오텍스타일 튜브가 채워진 후의 면적이므로 $A_f = \pi A \cdot B = \pi(a/2)\cdot(b/2)$이다. 따라서, 상기 식 (3)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\phi D^2 = a \cdot b \quad (4)$$

식 (4)를 타원체의 길이와 폭에 대하여 다시 정리하여 풀면 다음과 같다.

$$b = \frac{\phi D^2}{a} \quad (5)$$

$$a + b = 2D \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음 식 (7)과 같으며, 해는 식 (8)에 나타낸 바와 같다.

$$a^2 - 2aD + \phi D^2 = 0 \quad (7)$$

$$a = D(1 \pm \sqrt{1-\phi}) \quad (8)$$

만약, 채움비 $\phi = 1$, $a = b = D$일 경우, $D = S_0/\pi$이므로 상기해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = S_0/\pi(1 \pm \sqrt{1-\phi}) \quad (9)$$

식 (8)의 해를 이용하여, 각각의 채움비에 따른 유효높이와 폭은 $\phi=0.85$일때 $a_1=0.61D$, $\phi=0.90$일 때 $a_2=0.68D$, $\phi=0.95$일때 $a_3=0.77D$를 통하여 얻을 수 있다.

2.1.3 구형형태 변화

지오텍스타일 튜브가 구형형태 변화를 갖을 경우, 각각의 매개변수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = 2(a+b) = S_0 \quad (10)$$

$$A_f = \phi A_0 = ab \quad (11)$$

$$b = \phi A_0 / a \quad (12)$$

$$\varphi_0 = A_0 / S_0^2 \quad (13)$$

$$a = 0.25 S_0(1 \pm \sqrt{1-16\pi\varphi_0}) \quad (14)$$

2.2 안정해석 이론

2.2.1 수리모형시험을 통한 경험적 안정해석

네덜란드의 Delft 수공학연구소에서는 1973, 1994년 방파제 및 돌제에 대한 안정성 수리모형시험을 실시하였다. 시험에 사용한 방파제 및 돌제구조물을 지오텍스타일 튜브 구조물과 유사한 콘크리트 채움 호스(Concrete filled hoses)를 적용하였다. Delft 수공학연구소에서는 천단고가 없는 경우에 대하여 호스의 폭과 길이, 유의파

고 등의 다양한 조건을 변화시켜가며 수리모형시험을 실시하였으며, 시험결과를 바탕으로 하여 다음과 같은 안정해석기준을 제시하였다.

① 파가 구조물에 직각방향으로 유입될 경우

$$\frac{H_s}{\Delta b} = 1.0 \qquad (15)$$

여기서, H_s는 유의파고, Δ는 채움 슬러리의 단위중량비, l은 구조물의 폭을 나타낸다. 일반적으로 구조물의 폭은 1.1~1.2D를 적용한다.

② 파가 구조물에 수평방향으로 유입될 경우

$$\frac{H_s}{\Delta l} = 1.0 \qquad (16)$$

여기서, H_s는 유의파고, Δ는 채움 슬러리의 단위중량비, l은 구조물의 길이를 나타낸다.

2.2.2 수리동역학적 파압산정

지오텍스타일 튜브에 작용하는 파압의 산정방법은 해안의 소파구조물에 작용하는 파압산정이론을 바탕으로 한다. 경험적으로 가장 많이 사용되는 수리학적 파압산정이론은 Hiroi식(1920), Minikin식(1950), Honma식(1963), Goda식(1973) 등이 있다. 특히 Hiroi식은 일본과 아시아지역에서 많이 적용되며 Minikin식은 미국과 유럽에서 주로 적용된다(U.S. Army Corps of Engineers, 1984).

(1) Hiroi 식

Hiroi식은 정상인 분류가 평면에 작용하는 동압을 모델로 하여 운동량의 식에서 유도한 것으로 Hiroi가 제시한 후 여러 차례 경험적으로 수정되어 다음 식 (17)과 같이 제시되었다.

$$P_w = 1.5 \times w_0 \times H_{1/3} \qquad (17)$$

여기서, P_w는 파압, w_0는 해수의 단위중량, $H_{1/3}$는 유의파고를 나타낸다.

(2) Minikin의 식

Minikin은 충격쇄파압에 관한 연구성과 및 현지 방파제에 대한 관측데이타를 근거로 하여 식 (18)~식 (21)와 같이 제안하였다. 혼성제를 대상으로 하고, 압력을 충격압의 수위상승에 따른 정압(정수압과 다름)으로 나누어 구하는 것이 특징이다(그림 2 참조).

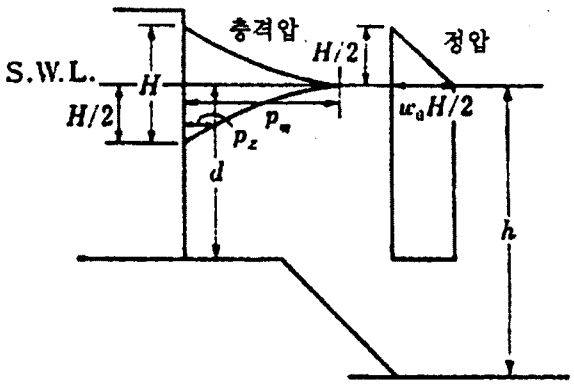


그림 2. Minikin의 파압분포

① 충격압

$$p_m = 102.4 w_0 d\left(1+\frac{d}{h}\right)\frac{H}{L} \qquad (18)$$

$$p_z = p_m\left(\frac{H-2|z|}{h}\right)^2 \qquad (19)$$

② 정압

$$p_s = w_0\left(\frac{H}{2}-z\right) \qquad (20)$$

$$p_s' = \frac{1}{2} w_0 H \qquad (21)$$

여기서, p_z : 정수면에서 상하 0 ~$H/2$의 범위에서의 충격압(t/m^2), p_m : 정수면에 발생하는 최대충격압(t/m^2), p_s : 정수면위의 정압(t/m^2), p_s' : 정수면 아래의 정압(t/m^2), z : 정수면으로부터 연직상향의 거리(m), d : 직립부 수심, L : 마운드 전압의 수심 h에서의 파장, H : h에서의 진행파로서의 파고(m)이다. 본 연구에서는 식 (17)과 같은 Hiroi식에 의하여 파압을 산정하였다. 또한 지오텍스타일 튜브의 자중은 채움 후, 유효높이를 바탕으로 한 타원체의 면적을 등가의 직사각형으로 환산하여 산정한다.

2.2.3 활동과 전도에 대한 안정성

활동에 대한 안전율은 지오텍스타일 튜브 자중과 상재하중인 수직력과 외력으로 작용하는 수평파압의 비

로 나타내어진다. 활동에 의한 안전율은 다음 식 (22)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(sliding)} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan\phi'}{P_w \times H_e} \quad (22)$$

여기서, P_h는 수평력, F는 수직력, P_v는 상재하중과 지오텍스타일 자중에 의한 수직력, P_w는 파도에 의한 파압, H_e는 지오텍스타일 충진 후 유효높이, ϕ'는 채움토사와 지오텍스타일의 포화시 접촉마찰각이다. 활동에 대한 안전율은 1.0 이상일 경우 안전한 것으로 판정한다. 지오텍스타일 튜브의 전도에 대한 안전율은 파도에 의한 전도모멘트와 자중에 의한 저항모멘트의 비로 나타내어지며, 다음 식 (23)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(overturning)} = \frac{M_R}{M_o} = \frac{P_v \times \frac{B}{2}}{P_h \times \frac{H_e}{2}} \quad (23)$$

여기서, M_R은 저항모멘트, M_o는 전도모멘트, P_w는 파도에 의한 수평력, H_e는 유효높이, P_v는 상재하중과 자중에 의한 수직력, B는 지오텍스타일 튜브의 등가 직사각형 폭이다. 전도에 대한 안전율은 1.0이상일 경우 안전한 것으로 판정한다.

2.2.4 지지력에 대한 안정성

하부 지반의 지지력에 대한 안전율은 일반적인 지지력에 대한 안전율 산정방법을 사용한다. 즉, 하부기초지반의 극한지지력과 파압에 의하여 발생되는 편심하중 작용 시 허용지지력의 비로 나타내어진다. 지지력에 대한 안전율은 다음 식 (24)에 나타낸 바와 같다.

$$SF_{(bearing\ capacity)} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{cN_c + \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_s B N_\gamma}{\frac{F}{B-2e}}$$

$$e = \frac{P_w \times H_e}{3F} \quad (24)$$

여기서, Q_u는 극한지지력, Q_a는 허용지지력, c는 하부기초지반의 점착력, N_c, N_γ는 포화 시 내부마찰각에 따른 지지력계수, γ_s는 하부 기초지반의 수중단위중량, B는 지오텍스타일 튜브의 등가직사각형 폭, F는 수직력, e는 파압에 의한 편심거리이다. 지지력에 대한 안전율은 1.0 이상일 경우 안정한 것으로 판정한다.

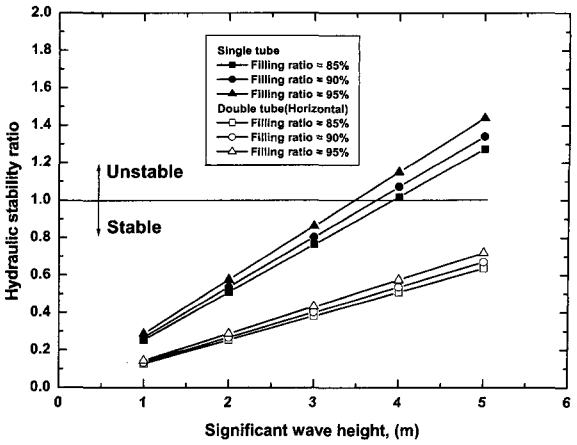


그림 3. 경험식에 의한 안정해석 결과

3. 이론적 안정해석 분석

3.1 경험식에 의한 안정해석

본 연구에서 수행한 경험식에 의한 안정해석은 식 (15)를 이용하여 지오텍스타일 튜브의 설치조건 변화, 접지면적 및 구조물의 폭에 영향을 미치는 채움비율 변화에 따른 안정해석을 수행하였다. 설치조건은 직경 3.0m의 단일튜브를 파에 직각방향으로 배치하는 경우와 두 개의 지오텍스타일 튜브를 파에 직각방향으로 병열 배치하는 경우를 적용하였으며, 채움비율은 85%, 90%, 95%에 대하여 수행하였다. 그림 3은 각각의 해석조건과 유의파고 변화에 따른 안전율 변화를 나타낸 것이다. 안정해석 계산에 따른 안정도는 1.0 이하일 경우가 수리동역학적 안정성을 확보한 경우이며, 1.0 이상일 경우, 구조물의 안정성을 상실한 경우가 된다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 두 개의 지오텍스타일 튜브를 병열 배치한 경우는 충분한 안정성을 확보하는 것으로 나타났으며, 단일튜브의 경우, 채움비율에 관계없이 유의파고가 4.0m 이상일 경우 안정성을 상실하는 것으로 나타났다.

3.2 2차원 한계평형해석 분석

본 연구에서 수행한 지오텍스타일 튜브의 2차원 평형해석 결과는 그림 4~그림 5에 나타낸 바와 같다. 지오텍스타일 튜브에 대한 2차원 평형해석은 파압에 대한 튜브 구조물의 활동, 전도, 지지력에 대한 안정성을 검토하였다. 또한, 해석조건은 경험식에 의한 분석과 동일하게 직경 3.0m의 지오텍스타일 튜브를 단독 배치하는 경우와

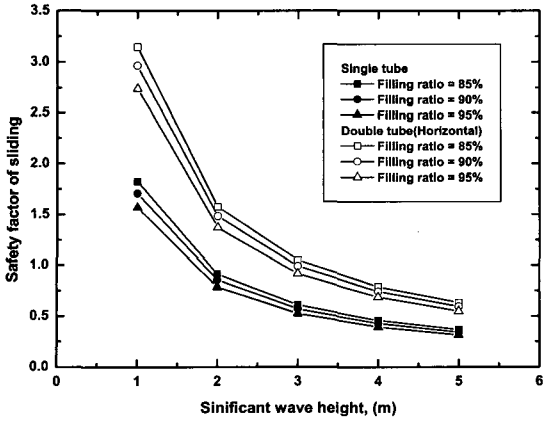


그림 4. 활동에 대한 안전율 변화곡선

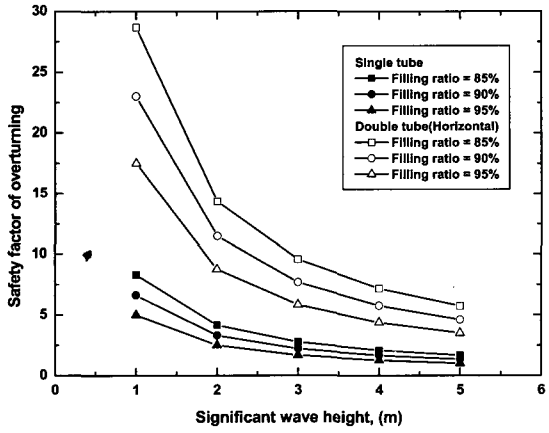


그림 5. 전도에 대한 안전율 변화곡선

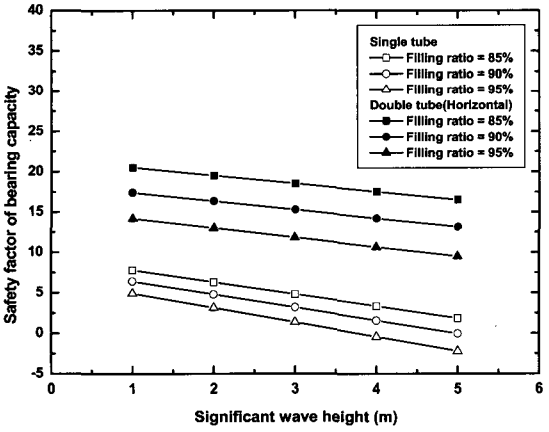


그림 6. 지지력에 대한 안전율 변화곡선

2열 병열 배치하는 경우를 검토하였으며, 유의파고 변화에 대한 안전율을 도출하였다. 안정성 분석 시 적용한 채움토사와 하부기초지반 특성은 모래질 토사의 특성을 적용하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 활동에 대한 안전율은 단일튜브의 경우, 유의파고 2.0m이상에서는 불안정한 것으로 도출되었으며, 2열 병열배치의 경우도 유의파고 3.0m 이상에서는 안정성을 상실하는 것으로 나타났다.

반면, 전도에 대한 안정성은 그림 4에서 보는 바와 같이, 각각의 경우 모두가 유의파고 5.0m까지 전도되지 않는 것으로 나타났다. 지지력에 대한 안전율은 유의파고 4.0m 이상에서 단일 튜브의 경우가 지지력 파괴가 되는 것으로 도출되었다.

각각의 해석조건에 따라 2차원 평형해석을 분석하여 보면, 단일 튜브로 설치하는 경우 유의파고 및 채움비율 변화에 따라 구조물의 안정성이 크게 영향을 받고 있으며, 2열 병열배치의 경우, 접지면적 및 중량의 증가로 인하여 충분한 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 또한, 채움비율에 따른 안전율은 채움비율이 85%인 경우가 가장 안정하게 나타나 채움비율에 따른 중량의 영향요소 보다 채움비율에 따른 접지면적 및 파의 투영면적이 안정성에 중요하게 작용하는 것으로 나타났다.

4. 수리모형시험

4.1 수리모형시험 장비

4.1.1 수리모형시험 장비 및 조건

본 연구에서 사용한 수리모형시험 장비는 국립 군산대학교의 수리모형시험 장비로 폭 7m, 길이 30m, 깊이 1.5m의 수로를 이용하였다. 조파수로는 조파기 후면과 수로 말단부에 경사식 소파장치 시설을 갖추고 있으며, 조파기는 피스톤형으로 서브모터 구동방식으로 작동된다. 조파판에는 파고계가 설치되어 있어 직립구조물의 반사파를 흡수하는 기능을 갖고 있다. 본 시스템은 정현파와 불규칙파를 발생시킬 수 있으며, 발생파고의 결정 및 보정을 자동계측시스템을 통한 시산법을 이용하여 설계 파고 및 시험파고를 발생시킬 수 있다. 또한, 본 수리모형시험 장비는 반사파 흡수식으로 파고계측에 의해 반사파를 계산, 제어장치에서 연산 제어하여 반사파의 영향을 최소화한다. 반사파 흡수 시스템은 구조물로

표 1. 수리모형시험기 제원

항 목	제 원
수로크기	폭 7m, 길이 30m, 깊이 1.5m
조파판의 크기	폭 7m, 높이 1.4m
최대수심, 파고	1.0m, 0.3m
주기	0.5~5.0
제어방식	반사파흡수식 제어
조파형식	정현파 및 불규칙파

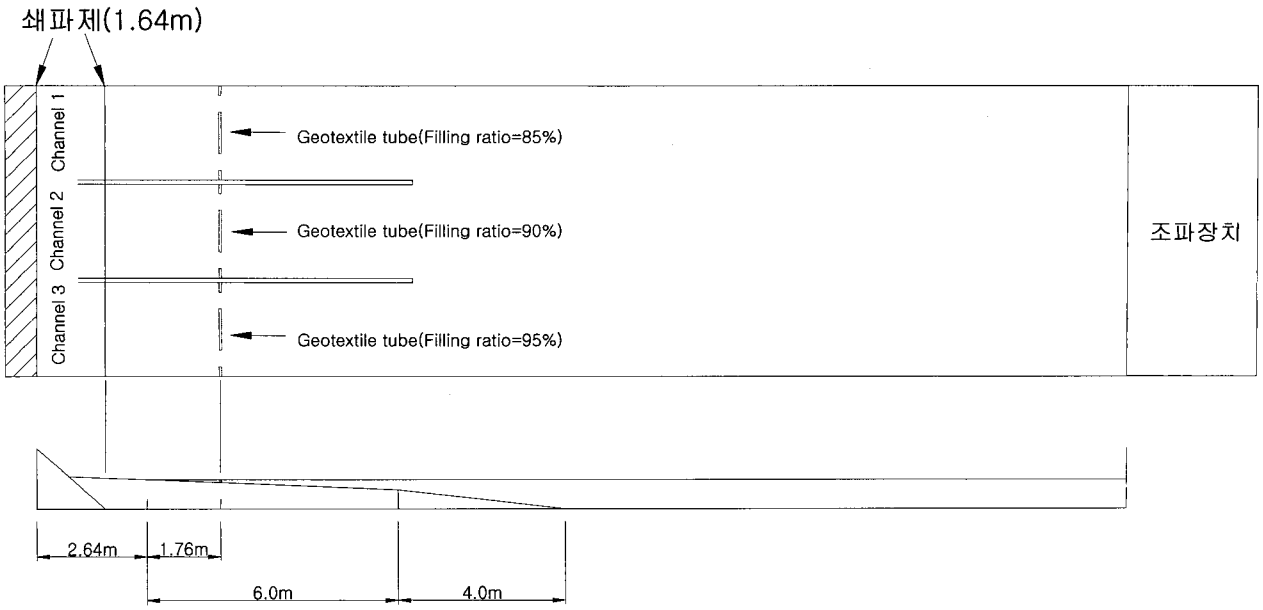


그림 7. 수리모형시험의 채널구성도

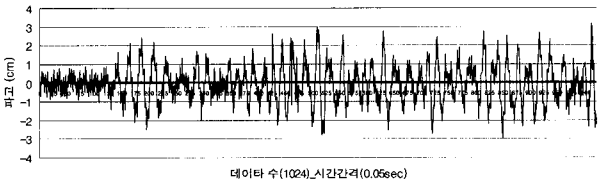
부터 반사되어 조파판에 도달한 반사파를 조파판 전면에 부착된 파고계가 감지하여 조파판의 움직임을 계속적으로 보정하여 조파판의 재 반사를 억제시키며 다중반사에 의한 수조내의 에너지 누적현상을 저감시켜 장시간의 불규칙파 발생을 가능하게 한다. 표 1은 본 연구에 사용된 수리모형시험 장비의 제원을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 폭 7m의 수조를 3조의 채널로 재구성하여 동시에 3조건의 지오텍스타일 유효높이를 동시에 시험을 실시할 수 있도록 재구성하였다. 그림 7은 재구성된 채널의 구상도를 나타낸 것이다.

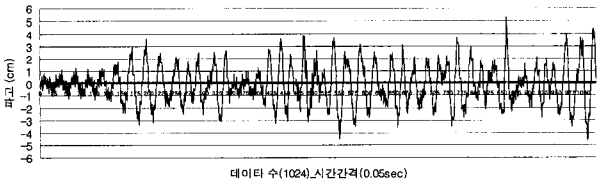
지오텍스타일 튜브 수리모형시험의 모형축척은 실험파의 제원, 수로의 크기, 조파장치의 성능 등을 고려하여 점성, 표면장력이 중력에 비해 무시할 수 있도록 정상모형의 1/50으로 선정하였다. 해안구조물에 대한 수리모형의 모형 축척비는 축척효과에 관한 많은 연구성과의 경험에 의하여 대략적으로 선택될 수 있는 범위가 알려져 있으므로 이러한 범위를 고려하여 모형축척을 선정하였다. 무게에 의한 상사는 축척의 세제곱에 의하여 상사를 실시하였다. 세부적인 시험조건은 경험식 및 2차원 평형해석 조건과 동일하며, 다른 조건은 지오텍스타일 튜브의 설치위치(천단고)를 변화시켜가며 추가적인 수리모형실험을 실시하였다.

4.1.2 유의파고 및 스펙트럼

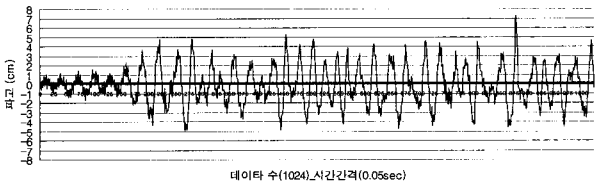
본 연구에서 적용한 유의파고는 시험조건에서 기술한 바와 같이 2.0m, 2.5m, 3.0m, 4.0m, 5.0m를 재현하여 실험을 실시하였다. 조파장치를 이용한 유의파고 재현은 조파기의 작동방법에 의거 조파를 수행하고 이에 따라 파고를 계측하여 실시하였다. 제어방식은 AWACS(Active Wave Absorber Control System)를 가동하여 반사파의 영향을 저감시킨 상태에서 유의파고 재현실험을 수행하였다. 유의파고 재현을 위한 스펙트럼은 Bretschneider-Mitsuyasu 형태의 스펙트럼을 재현하고 이에 대한 구조물 전면해



(a) 유의파고 2.0m의 파고분석자료



(b) 유의파고 3.0m의 파고분석자료



(c) 유의파고 4.0m의 파고분석자료

그림 8. 유의파고 파고분석자료

역에서의 설계파고를 계측하였다. 또한, 본 연구에서 적용한 유의파 주기는 다음 식 (28)을 통하여 산정하였으며, 그림 8은 유의파고 2.0m, 3.0m, 4.0m에 대한 파고자료 분석결과를 나타내 것이다(김남영 1999).

$$T_{1/3} = 3.86\sqrt{H_{1/3}} \qquad (28)$$

여기서, $T_{1/3}$은 유의파 주기, $H_{1/3}$은 유의파고이다.

4.2 수리모형시험에 의한 안정성 분석

수리모형시험을 통한 해안구조물의 안정성은 모형구조물의 변위량을 측정하여 안정성을 검토한다. 안정성 검토의 기준은 구조물의 종류에 따라 많은 차이가 있으나, 일반적으로 변위가 발생하면 구조물의 안정성을 상실한 것으로 판정한다. 또한, 해안구조물의 안정성은 파의 지속시간과 큰 관련을 가지고 있다. 바람이 계속 불고 있는 시간을 취송 시간(duration)이라 한다. 그리고 파는 진행하면서, 바람으로부터 에너지를 공급받아 발달하기 때문에, 그 동안 파가 진행할 수역이 필요하다. 파가 바람을 받아 발달하면서 진행하는 거리를 취송거리(fetch)라 한다. 본 연구에서는 기존의 취송시간에 대한 연구를 바탕으로 취송시간을 3시간으로 산정하였으며, 이를 시간축적 $l_r^{1/2}$에 맞게 환산하여 25분 동안 파를 발생시켜 실험을 진행하였다(Horikawa, 1978). 그림 9와 그림 10은 수리모형시험 장비 및 수로전경과 안정성 분석을 위한 변위측정장면을 나타낸 것이다.

수리모형시험을 통한 단독 배치시 안정성 시험결과는 그림 11과 그림 12에 나타낸 바와 같다. 그림 11은 지오텍스타일 튜브의 설치수심이 유효높이와 같은 천단고가 없는 경우, 그림 12는 설치수심이 지오텍스타일 튜브 유효높이의 1.5배의 수심을 확보한 경우의 유의파고와 채움비율에 따른 변위측정 결과를 나타낸 것이다. 각각의 시험결과에서 보는 바와 같이, 유의파고 2.0m까지는 변위량이 없어, 안정성을 유지하였으며, 유의파고 2.5m부터 미세한 변위량이 발생하기 시작하였다. 유의

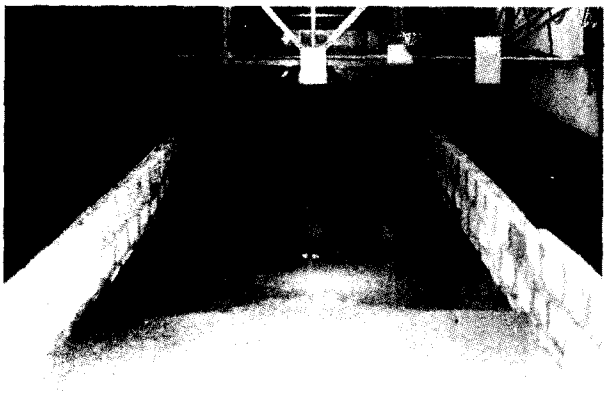


그림 9. 수리모형시험 장치 및 수로전경

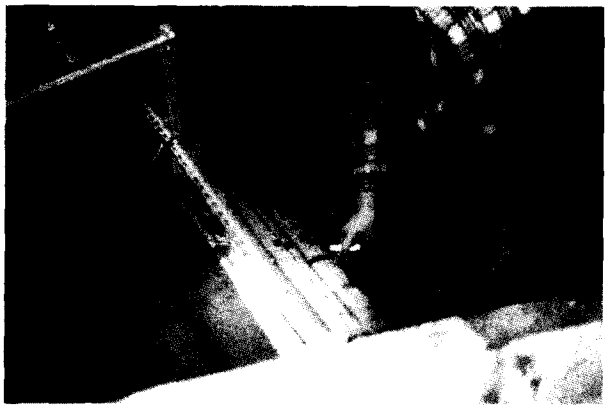


그림 10. 지오텍스타일 튜브 변위량 계측

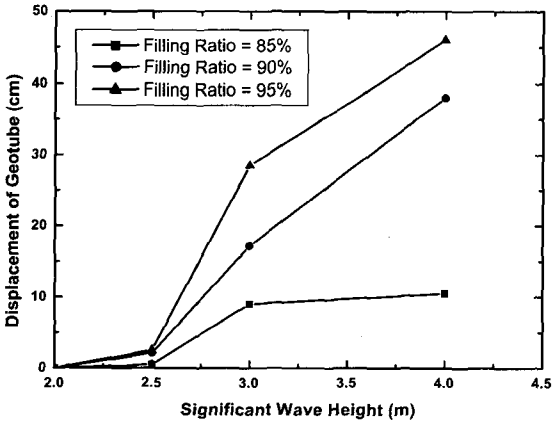


그림 11. 안정성 시험 결과(천단고가 없는 경우)

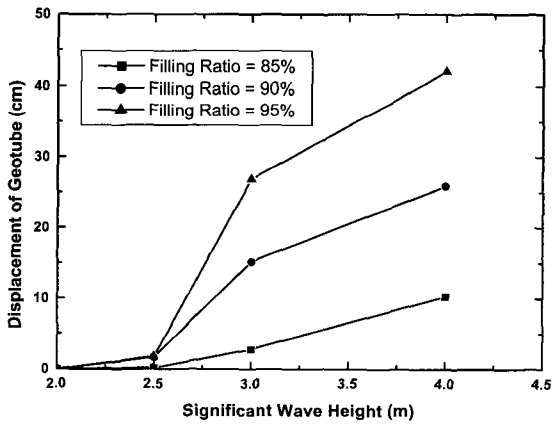


그림 12. 안정성 시험 결과(천단고가 있는 경우)

파고 2.5m 이상의 경우, 지오텍스타일 튜브 구조물은 안정성을 잃어 유의파고가 증가할수록 변위량도 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 천단고의 유무에 따른 안정성은 천단고를 확보한 경우가 변위량이 더 작게 발생하는 것으로 나타났다. 천단고가 있는 경우의 지오텍스타일 튜브는 해안선에서 더 멀리 위치하므로 상대적으로 쇄파가 적게 일어난 파에 접하지만, 상부의 천단고가 확보되어 상재하중으로 작용하며, 구조물 배면에도 수심이 확보되어 변위량이 적게 발생된 것으로 판단된다. 지오텍스타일 튜브의 채움비율에 따른 안정성은 채움비율 95%인 경우가 가장 변위량이 많이 발생하였으며, 자중이 가장 작은 채움비율 85%인 경우가 변위량이 가장 적게 발생하여 안정적인 것으로 나타났다. 자중이 가장 무거운 채움비율 95%의 지오텍스타일 튜브는 자중에 비하여 하부의 접지면적이 상대적으로 작으며, 파압이 작용하는 투영면적이 크기 때문에 채움비율이 85%인 지오텍스타일 튜브에 비하여 안정성이 떨어지는 것으로 판단된다. 즉, 채움비율이 85%인 지오텍스타일 튜브는 자중은 가장 작으나, 투영면적이 작고, 바닥의 접지면적이 넓어 변위량이 작게 발생된 것이다. 상기 기술한 바와 같이 수리모형시험을 통한 안정성 분석결과는 경험식과 2차원 평형해석을 통하여 얻은 결과와 전체적으로 잘 일치하고 있다. 수리모형시험을 통한 2열 병열 배치시의 안정성 시험 결과는 유의파고 4.0m까지 육안조사에 의한 변위량이 발생하지 않아 안정성을 유지하였으나, 유의파고 5.0m에서 미소한 변위가 발생하였다. 즉, 2열 병열 배치의 경우는 경험식 및 2차원 평형해석 결과에서 도출된 바와 같이 유의파고 4.0m까지 충분한 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

전체적인 안정성 시험결과, 지오텍스타일 튜브의 안정성은 천단고가 확보된 경우가 천단고가 없는 경우에 비하여 안정적이며, 채움비율에 따른 안정성은 채움비율이 증가할수록 안정성이 감소하는 것으로 도출되어, 지오텍스타일 튜브의 안정성은 내부 채움을 통한 자중 확보와 바닥접지면적의 확보가 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지오텍스타일 튜브공법을 활용한 해안 침식방지구조물, 방파제, 제방구조물의 안정성분석에 관하여 경험식 및 2차원 한계평형방법에 의한 해석적 연구와 수리모형시험을 통한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출한 결과의 요약 및 결론은 다음과 같다.

(1) 경험식에 의한 지오텍스타일 튜브의 안정성 분석결과, 두 개의 지오텍스타일 튜브를 병열 배치한 경우는 충분한 안정성을 확보하는 것으로 나타났으며, 단일 튜브의 경우, 채움비율에 관계없이 유의파고가 4.0m 이상일 경우 안정성을 상실하는 것으로 나타났다.

(2) 파도에 의하여 발생되는 파압을 외력으로한 2차원 평형 해석결과, 단일 튜브로 설치하는 경우 유의파고 및 채움비율변화에 따라 구조물의 안정성이 크게 영향을 받으며, 2열 병열배치의 경우, 접지면적 및 중량의 증가로 인하여 충분한 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 또한, 채움비율에 따른 안전율은 채움비율이 85%인 경우가 가장 안정하게 나타나 채움비율에 따른 중량의 영향요소 보다 채움비율에 따른 접지면적 및 파의 투영면적이 안정성에 중요하게 작용하는 것으로 판단된다.

(3) 단독튜브로 설치하는 경우에 대한 수리모형시험 결과, 유의파고 2.5m 이상의 경우, 지오텍스타일 튜브 구조물은 안정성을 상실하여, 유의파고가 증가할수록 변위량도 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 천단고의 변화에 따른 안정성은 천단고를 확보한 경우가 변위량이 더 작게 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 상부의 확보된 천단고는 구조물에 대한 상재하중으로 작용하며, 배면에도 수심이 확보되어 변위량이 적게 발생된 것으로 판단된다. 채움비율에 따른 수리모형시험 결과는 채움비율 95%인 경우가 가장 변위량이 많이 발생하였으며, 자중이 가장 작은 채움비율 85%인 경우가 변위량이 가장 적게 발생하여 안정적인 것으로 나타났다.

(4) 수리모형시험을 통한 2열 병열 배치시의 안정성 시험 결과, 유의파고 4.0m까지 변위량이 없이 안정성을 유지하였으며, 유의파고 5.0m에서 미소한 변위가 발생하였다. 즉, 경험식 및 2차원 평형해석 결과에서 도출된 바와 같이 유의파고 4.0m까지 충분한 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

(5) 경험식과 2차원 평형해석에 의한 안정해석결과와 수리모형시험을 통한 안정성 분석결과를 비교한 결과, 구조물의 안정성에 영향을 미치는 배치조건, 경계유의파고, 한계채움비율 등 전반적인 부분에서 상호 일치하는 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 김남영(1999), *소파구조물*, 도서출판 과학기술, pp. 172-202,
2. 신은철, 오영인, 이명호(2002), "영진만 지오텍스타일 튜브의 현장 시공계측 및 수리모형시험을 통한 안정성 분석", *한국지반공학회 2002 봄 학술발표회 논문집*, pp. 549-556.
3. Bogossian, F., Smith, R. T., Vertematti, J. C., and Yazbek, O. (1982) "Continuous Retaining Dikes by Means of Geotextiles," *Proceedings, 2nd International Conference on Geotextiles*, Vol. I, Las Vegas, pp. 211-216.
4. Delft Hydraulics Laboratory(1975), "Artificial island in the Beaufort Sea: Stability of Shore Protection with Sand Sausages on a Circulat Island," *Report*, M1271 part V, May.
5. Gutman, A. L.(1979), "Low-cost Shoreline Protection in Massachusetts," *Coastal Structures '79*, Vol. 1, ASCE, NY, pp. 373-387.
6. Horikawa, K. (1978), "Coastal Engineering An Introduction to Ocean Engineering" University of Tokyo, Univ. of Tokyo Press, Tokyo, pp. 70-77.
7. John, N. W. M.(1987), "*Geotextiles*" Blackie & Son, Glasgow.
8. Koerner, R. M. and Soong, T. Y.(1997), "The evolution of Geosynthetics," *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 67, No. 7, pp. 62-64.
9. Perrier, H.(1986), "Use of Soil-filled Synthetic Pillow for Erosion Protection," *Proceedings, 3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna, pp. 1115-1119.
10. 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.
11. U.S. Army Corps of Engineers(1984), "*Shore Protection Manual*," Dept. of The Army US Army Corps of Engineers, Washington, DC.

(접수일자 2002. 8. 2, 심사완료일 2002. 9. 30)