

수리모형시험을 통한 다단식 지오텍스타일 튜브의 수리동역학적 거동분석 Hydrodynamic Behavior Analysis of Stacked Geotextile Tube by Hydraulic Model Tests

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 오영인²⁾, Young In Oh, 김성윤³⁾, Kim Sung Yoon

- ¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
²⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정 수료, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
³⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon

SYNOPSIS : Geotextile tube is environmentally sustainable technology and has been applied in hydraulic and coastal engineering applications. Geotextile tube is composed in permeable fabrics and inside dredged materials, and hydraulically or mechanically filled with dredged materials. These tube are generally about 1.0m to 2.0m in diameter, through they can be sized for any application. The tubes can be used solely, or stacked to add greater height and usability. Stacked geotextile tubes will create by adding the height necessary for some breakwaters and embankment, therefore increasing the usability of geotextile tubes. This paper presents the hydrodynamic behavior of stacked geotextile tube by hydraulic model tests. The hydraulic model test conducted by structural condition and wave conditions. Structural condition is installation direction to the wave(perpendicular and 45°), and wave condition is varied with the significant wave height ranging from 3.0m to 6.0m. Based on the test results, the hydrodynamic behaviors such as structural stability, wave control capacity, and strain are interpreted.

Key words : Stacked Geotextile tube, Dredged materials, Significant wave height, Hydrodynamic stability, Hydraulic model tests

1. 서론

지오텍스타일 튜브공법은 자연 친화적인 해안 및 항만구조물 축조공법으로 많은 적용분야에서 활용되고 있다. 지오텍스타일 튜브공법은 물을 배수시키는 튜브 모양으로 봉재된 지오텍스타일과 내부 토사로 구성된다. 기계적 방법이나 수리학적 방법으로 토사를 채워 구조물을 축조한다. 지오텍스타일 튜브의 직경은 일반적으로 1.0~2.0m이며, 적용분야에 따라 변경하여 적용할 수 있다. 주로 1단 단독구조물로 사용되나 높이를 확보하기 위해 다단으로 설치하기도 한다. 다단식 지오텍스타일 튜브는 일정수심을 확보할 수 있어, 소형방파제나 제방구조물로도 충분히 사용이 가능하다. 본 연구에서는 수리모형시험을 통하여 다단식 지오텍스타일 튜브구조물의 수리동역학적 특성을 검토하였다. 구조물 조건은 파랑에 직각방향과 45도 방향으로 설치하였으며, 파랑조건은 유의파고를 3.0m, 4.0m, 5.0m, 6.0m로 변화시키며 실험을 진행하였다. 수리동역학적 거동분석은 구조물의 안정성, 파랑제어성능, 변형을 등을 측정하여 분석하였다.

2. 다단 튜브의 수리모형시험

2.1. 수리모형시험의 개요

수리모형시험에서는 모형에서의 현상이 일정한 규정에 따라서, 실물에서의 현상을 나타내는 것이 요구된다. 따라서, 기하학적상사, 운동학적 상사, 역학적인 상사, 즉 3종류의 상사가 성립될 필요가 있다. 기하학적 상사와 운동학적 상사는 일반적인 실물의 크기 및 자연현상에 대한 상사를 기초로 수행할 수 있으나, 역학적인 상사에 대해서는 현상에 관여하는 모든 힘을 상사시킬 수 없고, 이중 가장 지배적인 힘에 대하여 상사를 유지시켜 수리모형시험을 실시한다. 이러한 모형시험에 대한 상사는 규정되어 있는 상사율을 적용하여 실시하며, 지배적인 힘이 중력, 점성력, 표면장력, 탄성력일 때의 상사율은 각각 Froude, Reynolds, Weber 등의 상사율로 불려진다. 가장 일반적인 파에 관한 현상의 상사는 중력이 지배적이기 때문에 Froude의 상사율에 의해 수리모형시험이 조작된다. 2차원 시험은 평면 2차원의 수리모형시험으로 기하학적 상사와 파에 관한 현상을 주로 하여 수리모형시험을 실시한다. 2차원 수리모형시험은 크게 안정성 시험과 소파성능시험이 있다.

(1) 안정성 시험

안정성 시험은 하나의 단면에 대해서 연속하여 파를 작용시켜 제체 혹은 구조물의 활동, 이동 등을 계측하여 검토한다. 파의 작용시간은 현장조건에 같게 하며, 그 파의 지속시간을 표준으로 한다. 일반적으로 반사파의 영향을 받지 않은 시간 내에 멈출 필요가 있다. 구조물의 이동 혹은 파괴상황은 상세하게 관찰하고, 카메라 혹은 비디오 카메라로 촬영해 놓는 것도 필요하다. 상기와 같이 시험을 실시한 후, 미리 정한 안정한계의 기준과 비교 분석하고, 파고를 변화시켜 안정성의 한계 파고를 결정할 수도 있다.

(2) 파랑제어 성능시험

항만 및 해안에 설치된 소파구조물이 파도에 대하여 어떻게 반응하며, 파도를 작게 하는가에 대하여 분석하는 수리모형시험으로 월파량, 월파높이 등을 측정하여 분석한다. 반사율의 추정은 1대 혹은 2대의 파고계를 이동하는 방법, 고정된 2대의 파고계를 이동하는 방법 등을 적용할 수 있다. 월파량은 제체 배후에 저수조를 설치하고, 수위 혹은 중량으로 측정한다. 전달파를 구하는 경우는 제체에서 해안방향으로 파고분포를 측정하여 전달파고가 거의 일정하게 되는 것과 같은 곳의 파고를 측정하여 이용한다. 소파성능시험의 일반적인 시험조건은 안정성시험 조건과 동일하게 적용한다.

2.2. 수리모형시험의 자원 및 조건

2.2.1. 수리모형시험기의 자원

본 연구에서 사용한 수리모형시험 장비는 국립 군산대학교의 수리모형시험 장비로 폭 7m, 길이 30m, 깊이 1.5m의 수로를 이용하였다. 표 2.1은 수리모형 시험기의 장비 제원을 나타낸 것이다. 조파수로는 조파기 후면과 수로 말단부에 경사식 소파장치 시설을 갖추고 있으며, 조파기는 피스톤형으로 Servo Motor 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.

표 2.1 수리모형시험기 제원

| 항목 | 제원 |
|---------|-----------------------|
| 수로크기 | 폭 7m, 길이 30m, 깊이 1.5m |
| 조파판의 크기 | 폭 7m, 높이 1.4m |
| 최대수심 | 1.0m |
| 최대파고 | 0.3m |
| 주기 | 0.5~5.0sec |
| 구동방식 | AC Servo Motor 구동방식 |
| 제어방식 | 반사파흡수식 제어 |
| 조파형식 | 정현파 및 불규칙파 |

설계 파고 및 시험파고를 발생시킬 수 있다. 조파장치의 운전은 컴퓨터 프로그램에 의해 작성된 목적스펙트럼을 제어판으로 전송하고 컴퓨터에서 조파장치의 운전을 조절할 수 있도록 되어있다. 또한, 본 수리모형시험 장비는 반사파 흡수식으로 반사파고 계측기에 의해 반사파를 계산, 제어장치에서 연산 제어하여 반사파의 영향을 최소화한다. 반사파 흡수 시스템은 구조물

로부터 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.

2.2.2. 수리모형시험의 조건

본 시험은 유의파고 3.0, 4.0, 5.0, 6.0m의 4개의 유의 파고를 재현하여 천단고가 있을 때와 없을 때로 구분하여 안정성 및 전달파고, 각 튜브의 변형률을 측정하였다. 튜브의 채움비는 기존의 연구결과 및 현장 적용성을 고려하여 가장 안전한 채움비인 85%를 사용하였다. 다단튜브의 구조물 설치 조건은 입사파랑의 직각방향과 경사방향으로 설치하여 튜브의 설치 방향에 따른 전달파고, 변형률, 안정성을 측정하였다. 그림 2.1과 2.

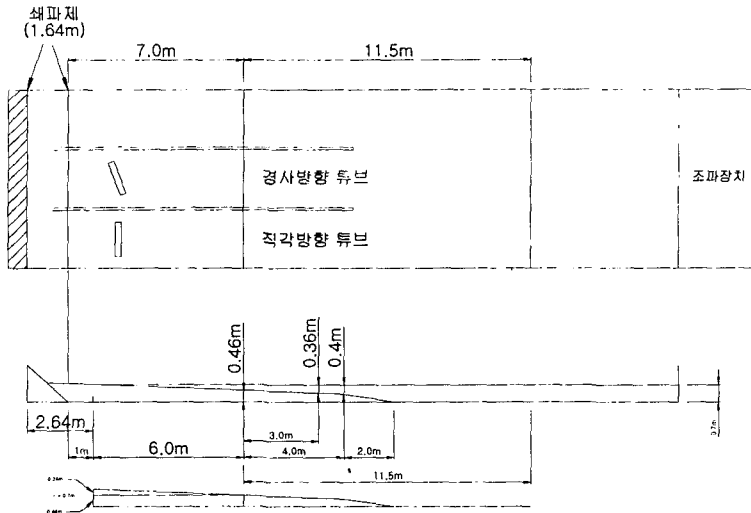


그림 2.1 수리모형시험 수로 구성도

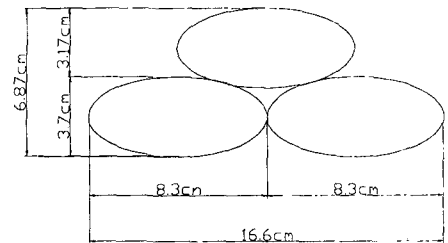


그림 2.2 다단튜브의 측면도

2.2.3. 시험 수로의 조성

본 시험수로의 조성은 먼저 그림 2.3과 같이 경사를 일정하게 유지하여 쇄파 수심이 확보되도록 사면을 조성한 뒤, 그림 2.4와 같이 내부에 수심 70cm가 되도록 물채움 작업을 수행하였다. 소요의 유의파고를 갖는 목적파를 발생시키기 위하여 그림 2.5와 같이 파고계를 설치한 뒤, 각 파의 스펙트럼 분석을 통하여 목적파를 재현하였다. 튜브는 85%의 채움비로 6개의 튜브를 제작하고, 각 튜브는 그림 2.6과 같이 45° 방향에 종·횡방향으로 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 튜브를 각 수로 위치에 수직방향과 경사방향으로 설치한 뒤 목적파를 재현시켜 각각의 계측사항을 계측하였다.



그림 2.3 사면조성

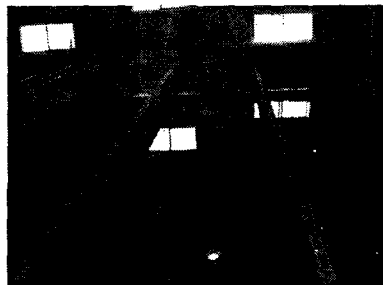


그림 2.4 물채움 작업



그림 2.5 목적파 재현

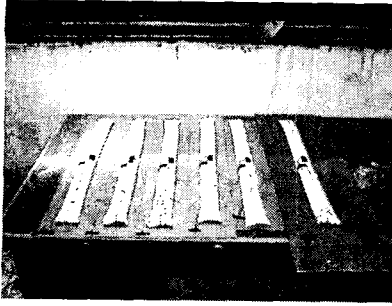


그림 2.6 변형률 게이지 설치

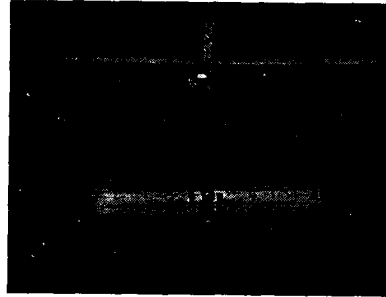


그림 2.7 파고계 설치

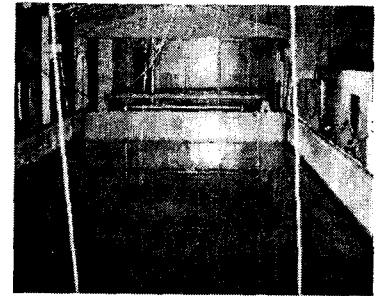


그림 2.8 조파장치 전경

3. 결과

3.1. 파랑제어성능시험 결과

본 연구에서 파랑제어성능은 목적파의 파고자료 측정 결과와 튜브 설치후 튜브 구조물에 의한 전달파를 측정하여, 구조물의 파랑제어 성능을 측정하였다. 파랑제어 성능을 하나의 수치로 도출하기 위하여, 목적파가 튜브 구조물에 의해 감소되는 양을 정량화하여 분석하였다. 각 파고자료는 0.05초 간격으로 1024개를 수집하였으며 스펙트럼 분석을 통하여 전달파의 유의파고를 계산하였다. 유의 파고별 목적파의 파고자료는 그림 3.1과 3.2에 나타낸 바와 같으며, 각각의 시험조건에 따른 전달파고 분석 결과는 그림 3.3~그림 3.6에 나타내었다. 표 3.1은 각각의 파고별 전달파고와 전달률을 표로 정리한 것이다.

파고 분석 결과를 보면 천단고가 있는 경우나 천단고가 없을 때나 목적파가 증가할 수록 전달파가 증가함을 알 수 있다. 또한, 천단고가 있는 경우가 천단고가 없는 경우보다 구조물에 의한 쇄파가 적게 나타남을 알 수 있다. 천단고가 없을 때는 45° 경사방향의 튜브가 구조물에 의한 쇄파성능이 우수하나, 천단고가 있을 때는 오히려 직각방향의 튜브가 파랑제어 성능이 우수한 것으로 측정되었다.

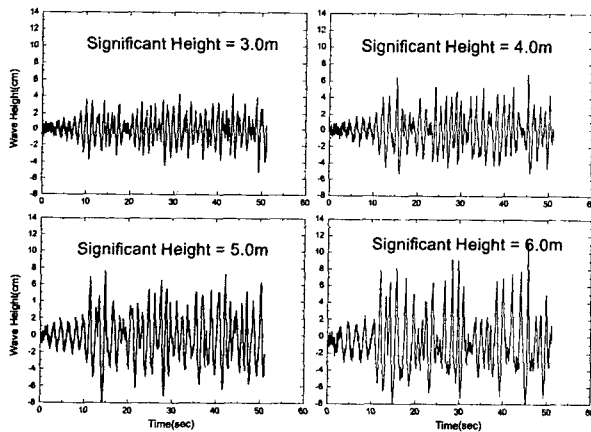


그림 3.1 수직튜브의 파고별 목적파

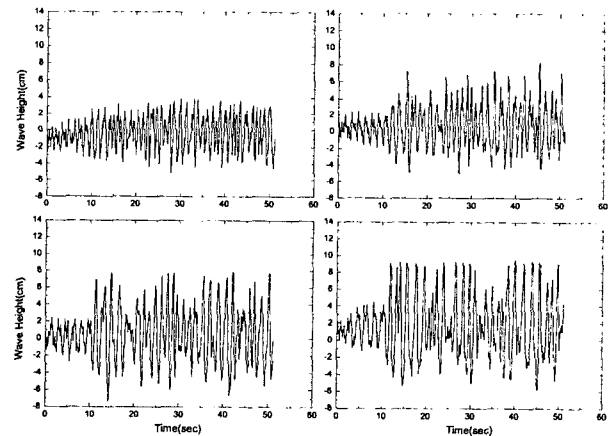


그림 3.2 경사튜브의 파고별 목적파

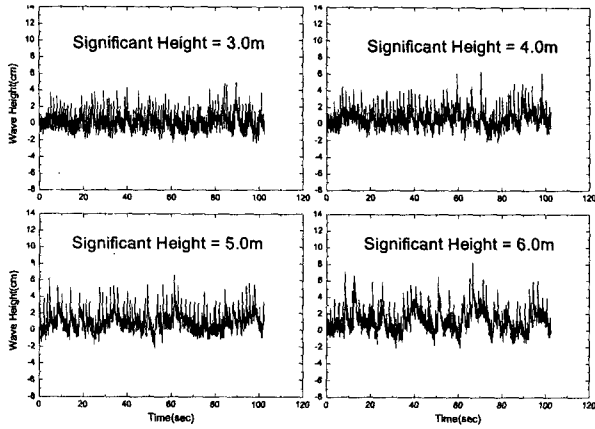


그림 3.3 수직튜브의 구조물 전달파 (천단고×)

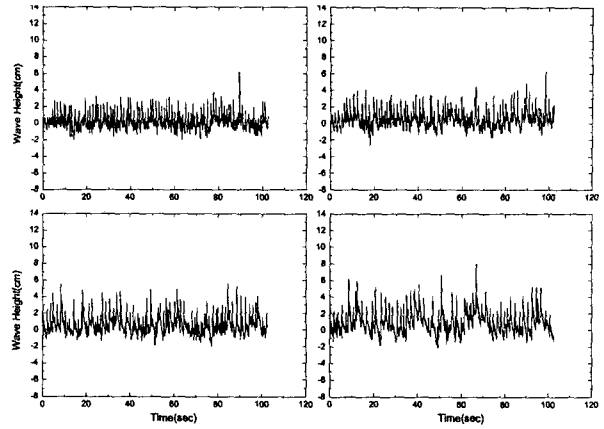


그림 3.4 경사 튜브의 구조물 전달파 (천단고×)

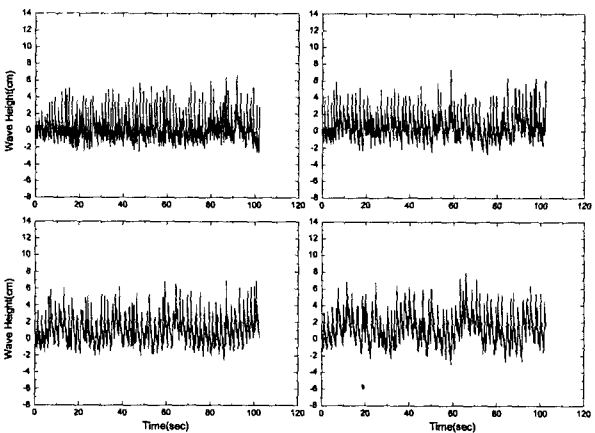


그림 3.5 수직튜브의 구조물 전달파 (천단고○)

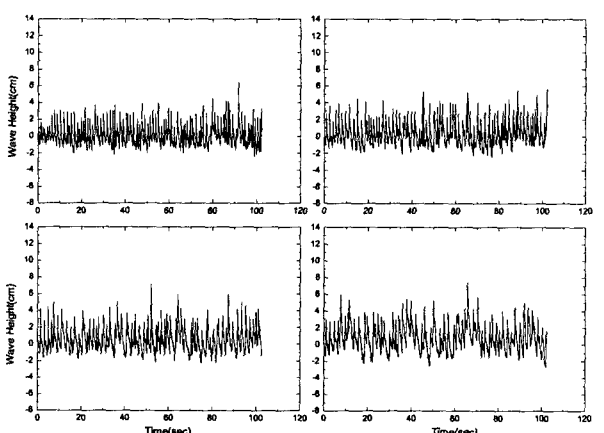


그림 3.6 경사 튜브의 구조물 전달파 (천단고○)

표 3.1 각 튜브의 파고별 전달파고와 전달률

| 유의파고(m) | 입사파고(cm) | 천단고 없을 때 | 천단고 있을 때 |
|---------|--------------|-----------------|-----------------|
| | | 전달파고(cm) | 전달파고(cm) |
| | | 튜브에 의한 전달파(전달률) | 튜브에 의한 전달파(전달률) |
| 3.0 | 6.0 (2단 경사) | 3.41(56.83%) | 4.35(72.5%) |
| | 6.0 (2단 수직) | 3.71(61.83%) | 4.64(77.33%) |
| 4.0 | 8.0 (2단 경사) | 3.81(47.63%) | 4.95(61.88%) |
| | 8.0 (2단 수직) | 3.94(49.25%) | 4.90(61.25%) |
| 5.0 | 10.0 (2단 경사) | 4.25(42.5%) | 5.57(55.7%) |
| | 10.0 (2단 수직) | 4.41(44.1%) | 5.45(54.5%) |
| 6.0 | 12.0 (2단 경사) | 5.38(44.83%) | 6.88(57.33%) |
| | 12.0 (2단 수직) | 5.55(46.25%) | 6.50(54.17%) |

3.2. 변형률 결과

튜브의 변형률 측정은 각 튜브의 응력 분포를 분석하기 위해 전면 상부 45° 방향에 종방향과 횡방향으로 변형률 게이지를 설치하여 변형률을 측정하였으며, 변형률 게이지는 일반적으로 토목섬유용으로 사용되는 YFLA-5를 사용하였고, 파고 수집시작 시간과 맞춰 시작하여 매 10초마다 측정하였다. 각각의 시험 결과에 따른 변형률 측정 결과는 그림 3.7~그림 3.14에 나타낸 바와 같다.

각각의 자료를 분석한 결과, 천단고가 없을 때의 종방향 변형률의 경우, 상단 튜브는 3.0m, 4.0m에서는 수직방향의 튜브가 더 큰 변형률을 나타내었고 5.0m, 6.0m에서는 수직방향 튜브와 경사방향 튜브가 비슷한 변형률을 나타내었다. 하단 튜브는 수직방향 튜브가 경사방향 튜브보다 항상 큰 변형률을 나타내었다. 천단고가 없을 때의 횡방향 변형률은 상단 튜브에서 수직방향의 튜브가 경사방향의 튜브보다 큰 변형률을 나타내었고, 하단 튜브에서는 경사방향 튜브의 변형률이 크게 나타났다. 한편, 천단고가 있을 때의 종방향 변형률은 상단 튜브는 모든 파고에서 수직방향의 튜브가 큰 변형률을 나타냈고, 하단 튜브의 경우 3.0m, 4.0m의 파고에서는 비슷한 변형을 보이고, 5.0m, 6.0m에서는 수직방향의 튜브가 큰 변형률을 보였다. 천단고가 있을 때 횡방향의 변형률에서 상단 튜브는 3.0m, 4.0m에서는 비슷하고, 5.0m, 6.0m에서는 수직방향의 변형률이 경사방향 튜브보다 약간 크게 나타났다. 하단 튜브에서는 모든 파고에서 경사방향의 튜브가 약간 크게 나타났다.

종방향의 변형률 게이지에서는 상단 튜브의 변형률이 하단 튜브의 변형률보다 크게 나타났고, 횡방향의 변형률값은 하단 튜브의 변형률이 상단 튜브의 변형률보다 크게 나타났다. 변형률 게이지는 수직방향의 튜브나 경사방향 튜브 모두 상단은 종방향 변형률 게이지가 횡방향 변형률 게이지보다 큰 변형률을 보인다. 1단에 설치되는 전·후방 튜브에서의 변형률은 전방 튜브보다 후방의 튜브가 더 큰 변형률을 보였다. 천단고가 없는 경우가 천단고가 있는 경우보다 더 큰 변형률 분포를 나타내었으며, 유의 파고가 증가할수록 변형률이 커짐을 알 수 있었다.

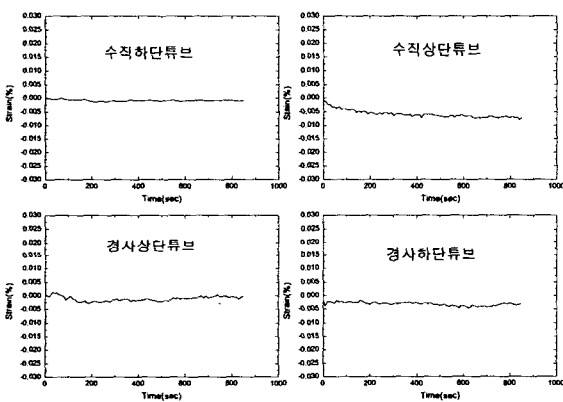


그림 3.7 3.0m일 때 종방향 변형률

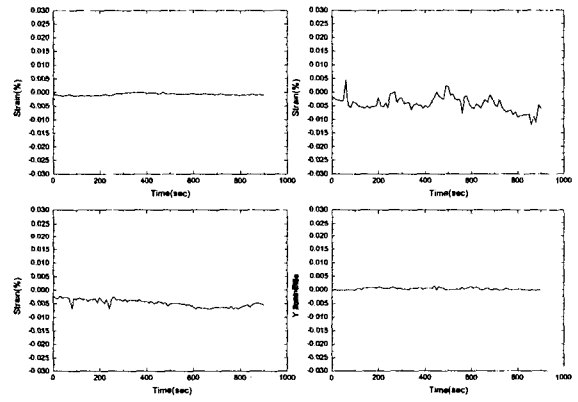


그림 3.8 4.0m일 때 종방향 변형률

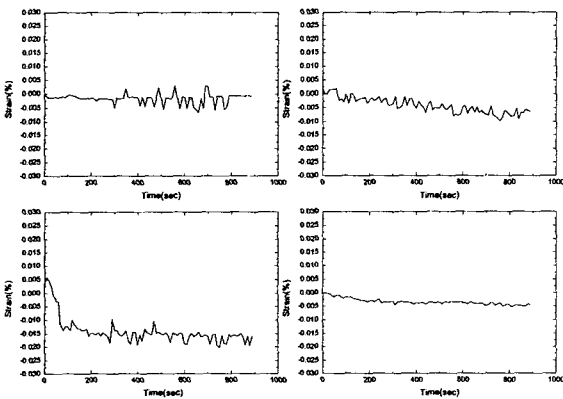


그림 3.9 5.0m일 때 종방향 변형률

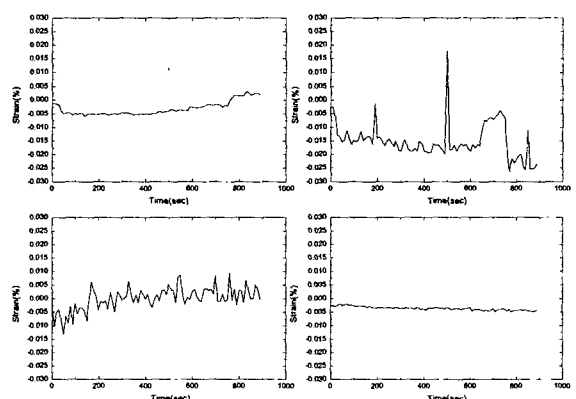


그림 3.10 6.0m일 때 종방향 변형률

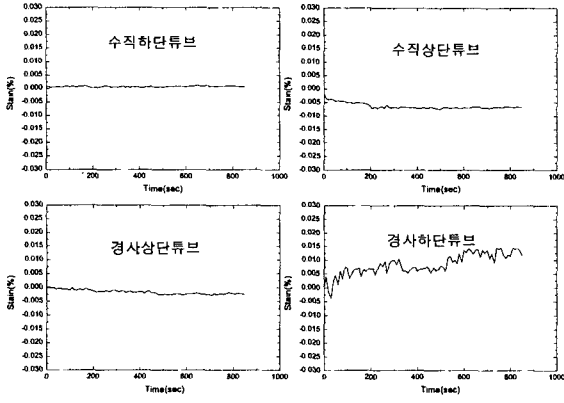


그림 3.11 3.0m일 때의 횡방향 변형률

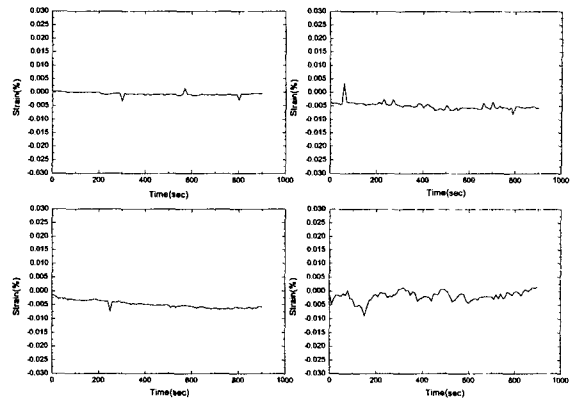


그림 3.12 4.0m일 때의 횡방향 변형률

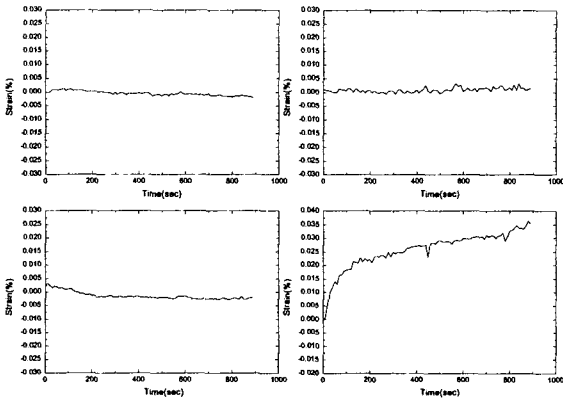


그림 3.13 5.0m일 때의 변형률

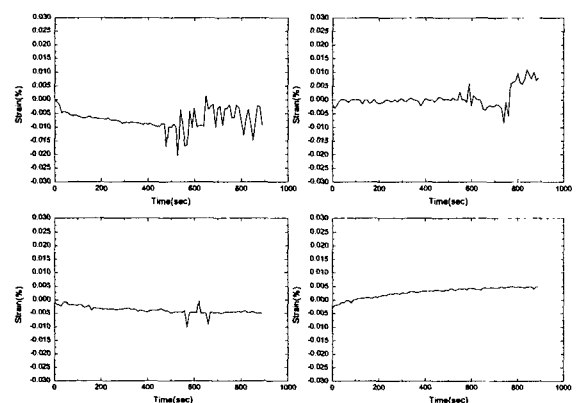


그림 3.14 6.0m일 때의 변형률

3.3 안정성 측정 결과

안정성 분석을 위한 튜브설치는 채움비가 85%인 튜브의 유효높이와 다단설치시의 수면 높이를 기준으로 하여, 천단고가 없을 때, 천단고(0.5H)가 있을 때의 사면과 수면과의 높이에 맞춰 설치하였다. 안정성 분석을 위한 계측 사항은 구조물의 초기설치 위치를 표시하고 유의파를 재현한 후, 원위치에서의 변위를 길이방향으로 11개 측정점에서 측정하였다. 안정성 분석을 위한 변위측정 결과는 다음 표 3.2에 나타난 바와 같다.

표 3.2 안정성 측정 결과

| 천단고 유무 | 천단고 없을 때 | | | | 천단고 있을 때 | | | |
|--------|----------|------|--------|----------------------|----------|--------|--------|----------------------|
| | 3.0m | 4.0m | 5.0m | 6.0m | 3.0m | 4.0m | 5.0m | 6.0m |
| 경사튜브 | 변위없음 | 변위없음 | 0.73cm | 0.75cm | 변위없음 | 0.55cm | 0.77cm | 0.85cm |
| 수직튜브 | 변위없음 | 변위없음 | 변위없음 | 10.84cm (전도 및 활동) | 변위없음 | 0.72cm | 1.01cm | 12.76cm (전도 및 활동) |

4. 결론

본 연구에서는 다단식 지오텍스타일 튜브의 수리동역학적 거동분석을 위하여 수리모형시험을 실시하였다. 각각의 구조물, 유의파고, 설치위치등에 따른 시험 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 안정성 분석결과 다단튜브에서 천단고가 없을 때는 유의파고 3.0~4.0m에서는 경사방향, 수직방향 모두 변위를 보이지 않아 안전한 것으로 분석되었다. 그러나 유의파고가 증가하면서 경사방향 튜브는 5.0m부터, 수직방향 튜브는 6.0m에서부터 변위가 발생하였다. 천단고가 있을 때는 경사방향과 수직방향 모두 4.0m의 유의파고에서부터 변위가 발생하였는데 5.0m와 6.0m에서는 수직방향 튜브는 전도 및 활동을 하여 불안정한 것으로 판단되었다.
2. 파랑제어 성능 분석결과 유의파고가 증가할수록 소파성능은 감소하는 경향을 보였고, 천단고가 없을 경우가 소파성능을 더 발휘하는 것으로 판단되었다. 천단고가 없을 때는 경사방향의 튜브가 소파성능이 우수한 것으로 판단되었고, 천단고가 있을 때는 수직방향의 튜브가 소파성능이 더 우수하게 도출되었다.
3. 변형률 측정결과 다단튜브에서 경사방향과 수직방향 모두 종방향의 변형률이 크게 도출되었고, 전면튜브보다 후면 튜브가 변형률값이 더 크게 나와 더 큰 응력을 받는 것으로 판단된다. 천단고가 없는 경우가 있는 경우보다 변형률이 크게 도출되었다.

감사의 글

이 연구는 환경부 지정 인천지역환경기술개발센터의 2002년도 연구지원으로 수행되는 “환경생태계 보존 및 복원을 위한 친환경적 지오텍스공법 개발”을 통하여 연구되었으며 수리모형시험에서 많은 도움을 받은 국립 군산대학교 신문섭 교수님과 처음부터 끝까지 변함없이 도와준 김재형 대학원생을 비롯한 연구실 학생들에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김남영 (1999), 소파구조물, 도서출판 과학기술, pp. 172~202.
2. Pilarczyk, K.W.(1996), Geosystems in hydraulic and coastal engineering - An overview, "Proceedings of the 1st European Geosynthetics Conference(EuropGeo)", Maastricht, the Netherlands.
3. Pilarczyk, K.W.(1998), "Stability criteria for geosystems -an overview-", 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA.
4. Wouter, J.(1998), "Open Taludbekleding ; stability van geosystems(Stability of geosystems), Delft Hydraulics, Report H 1930, Annex 7.