

工學碩士 學位論文

해양 부유물 차단막의 구조해석 기법에  
관한 연구

A Study on Structural Analysis Method  
of Marine Debris Boom

指導教授 朴 漢 一

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 開 發 工 學 科

吳 俊 憲

本 論 文 을 吳 俊 憲 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로  
認 准 함 .

主 審 工 學 博 士 崔 慶 植 (印)

委 員 工 學 博 士 姜 信 榮 (印)

委 員 工 學 博 士 朴 漢 一 (印)

2002年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

海 洋 開 發 工 學 科

吳 俊 憲

# A Study on Structural Analysis Method of Marine Debris Boom

by

*Jun Heon Oh*

Division of Ocean Development Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## ABSTRACT

Marine wastes are solid bodies in ocean and mostly originate from land. Marine debris is a kind of marine wastes such as log, wood piece, fish net, wire rope, etc. This study introduces a debris boom for collecting or recovering these floating debris. Generally, the debris boom consists of floater, wire net, tension member and fabric connector.

This debris boom is deployed in symmetric or asymmetric configuration like an oil boom. In this study, axial stress and deformation of deployed booms is analysed by applying a theoretical method and using a commercial finite element analysis program, ANSYS Release 5.5. The results of the finite element analysis program are compared with those of the theoretical method. The results of this study can be used for the debris boom design with some basic data.

# 목 차

Abstract .....	i
기 호 설 명 .....	iv
그 립 목 차 .....	vi
표 목 차 .....	vii
1. 서론 .....	1
2. 차단막의 구조 및 특성 .....	4
3. 차단막에 작용하는 주요 환경하중 .....	5
4. 이론 해석 및 유한요소 해석 .....	8
4.1 이론 해석 .....	8
4.2 유한요소 해석 .....	15
4.2.1 차단막의 유한요소 해석을 위한 가정과 접근방법 .....	15
4.2.2 차단막의 유한요소 해석을 위한 요소 선정 및 경계 조건 .....	15
4.2.3 차단막의 초기 전장형상 모델링 .....	16
5. 결과 및 토론 .....	20
5.1 상용 유한요소해석 프로그램 구동 결과 .....	20
5.1.1 대칭구조의 차단막 .....	20
5.1.2 비대칭구조의 차단막 .....	24
5.2 토론 .....	28
5.2.1 차단막의 전장형상 .....	28
5.2.2 차단막에 작용하는 축방향 응력 .....	30
6. 결론 .....	36

참 고 문 헌 ..... 38

# 기 호 설 명

$A, B$	차단막 미소요소의 양끝단 지점
$A_1, A_2$	환경 하중에 의한 흐름력이 작용하는 차단부 면적
$A_b$	차단막 구성요소(장력지지요소, 와이어 넷, 금속 연결부)의 단면적
$A_f$	바람에 대한 부체의 투영면적
$B$	설치된 차단막의 개구부(mouth opening)
$C_D$	흐름에 대한 항력계수(drag parameter)
$C_{D_{wind}}$	바람에 대한 부체의 항력계수
$C_{D_{wire}}$	흐름에 의한 차단부 와이어의 항력계수
$C_{D_c}$	흐름에 대한 부체의 항력계수
$D$	와이어의 직경
$d$	차단부의 깊이
$d_f$	차단막 부체의 잠긴 높이, 흘수(draft)
$ds$	차단막 단위요소의 길이
$dx$	차단막 미소요소의 $x$ 축 방향의 단위길이
$dy$	차단막 미소요소의 $y$ 축 방향의 단위길이
$dl_1, dl_2$	차단부 열(column)방향 와이어의 미소길이
$dl_r$	차단부 행(row)방향 와이어의 미소길이
$dT_c$	차단막의 미소요소에 작용하는 장력
$E$	와이어의 탄성계수(elasticity parameter)
$F_w$	차단막에 작용하는 풍력
$F_D$	차단막에 작용하는 흐름력
$dF_{D_w}$	차단부의 미소요소에 작용하는 흐름력
$h$	설치해역의 수심
$l$	차단막의 전체길이
$N$	차단부의 열방향 와이어 수
$R_{gc}$	차단막의 형상계수(shape parameter)
$T_c$	차단막에 작용하는 장력

$T_0$	뉴턴-랩슨 반복법(Newton-Raphson iteration Method)을 이용한 차단막의 초기 장력
$t$	금속 연결부(fabric connector)의 두께
$U$	흐름의 유속
$U_w$	바람의 유속
$U_s$	각 축방향 변위의 합
$x$	차단막의 한 끝단으로부터 $x$ 축 방향의 거리
$y$	차단막의 부채 형상곡선(shape curve)
$y_h$	차단막의 끝단과 중앙지점까지의 수직거리(sag)
$\alpha$	차단막의 전장각도
$\delta_c$	차단막의 굽은 변위
$\theta, \theta'$	$x$ 축과 차단막의 접선방향이 이루는 각
$\theta_1, \theta_2$	와이어의 $x$ 축과 이루는 각
$\nu$	와이어와 금속 연결부의 포아송
$\rho$	해수의 밀도
$\rho_a$	공기의 밀도
$\rho_d$	해양 부유물의 평균밀도
$\sigma$	차단부의 상하단 장력지지요소에 걸리는 축방향 응력
$\tau_c$	흐름에 대한 장력계수(tension parameter)
$\mu$	$\theta=0$ 일 때 차단막의 단위길이당 흐름력

# 그 림 목 차

그림 2-1 차단막의 구조 .....	4
그림 3-1 차단부의 구성요소 .....	6
그림 3-2 차단부의 미소요소 .....	7
그림 4-1 차단막의 전장형상 .....	9
그림 4-2 차단막의 미소요소에 대한 환경 하중의 형형조건 .....	10
그림 4-3 형상계수와 장력계수의 관계곡선 .....	13
그림 4-4 차단막의 전장방법 .....	17
그림 4-5 대칭구조의 차단막 초기 전장형상 .....	18
그림 4-6 비대칭구조의 차단막 초기 전장형상 ( $\alpha=45^\circ$ ) .....	18
그림 5-1 대칭구조의 차단막 전체 변형(유속= $3m/s$ ) .....	21
그림 5-2 대칭구조의 차단막 상하단 장력지지요소의 비대칭구조의 $x$ 축 방향의 변위 .....	22
그림 5-3 최대 변위가 발생된 대칭구조의 차단막 중앙지점에서 $x$ 축 방향의 변위(깊이방향) .....	23
그림 5-4 비대칭구조의 차단막 전체 변형(유속= $3m/s$ ) .....	24
그림 5-5 유속별 비대칭구조의 차단막 상하단 장력지지요소의 $x$ 축 방향의 변위 .....	25
그림 5-6 유속별 비대칭구조의 차단막 상하단 장력지지요소의 $z$ 축 방향의 변위 .....	26
그림 5-7 유속별 최대 변위가 발생된 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 $x$ 축 방향의 변위(깊이방향) .....	27
그림 5-8 적용 방법에 따른 대칭구조의 차단막인 경우, $x$ 축 방향의 전장형상 결과(상단 장력지지요소, 유속= $3m/s$ ) .....	28
그림 5-9 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 비대칭구조의 차단막에 대한 유속별 전장형상(상단) .....	29
그림 5-10 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 비대칭구조의 차단막에 대한 유속별 전장형상(하단) .....	29
그림 5-11 유속별 $x$ 축 방향의 최대 변위가 발생된 대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력 결과 .....	32
그림 5-12 유속별 $x$ 축 방향의 최대 변위가 발생된 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력 결과 .....	34
그림 5-13 상용 유한요소해석 프로그램에서 동일지점에 대한 비대칭구조와 대칭구조시 축방향 응력 결과 비교 .....	35

# 표 목 차

표 4-1	연구수행을 위한 가정과 접근방법 .....	15
표 5-1	상용 유한요소해석 프로그램을 구동하기 위한 입력치 .....	20
표 5-2	뉴턴-랩슨 반복법을 이용한 차단막의 장력( $T_0$ ) 계산 .....	30
표 5-3	유속별 $x$ 축 방향의 최대 변위가 발생하는 대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력( $\sigma$ ) 계산 결과 .....	31
표 5-4	유속별 $x$ 축 방향의 최대 변위가 발생하는 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력( $\sigma$ ) 계산 결과 .....	34
표 5-5	비대칭구조시 최대 변위가 발생된 지점에 대한 대칭구조시 축방향 응력 결과 비교 .....	35

# 1. 서론

해양 폐기물이란 광범위한 의미로 인간의 활동이나 자연재해로부터 발생되어 해양에 유입되는 모든 고형물질을 말한다. 전세계 해양오염의 주 발생원은 인간의 육상활동에 의한 기인이 77%(육상으로부터 44%, 대기유입 33%), 해상수송(선박)기인이 12%, 그리고 해양투기가 10% 등으로 조사되었다. 오늘날 국내의 연안해역은 산업화 및 도시화에 따라 해양폐기물 등의 해상 유입으로 급속히 오염되고 있으며 도시를 배후지로 하고 있는 항만은 육상 폐기물의 다량 유입으로 오염이 더욱 심화되고 있는 실정이다.

국내에서는 육상으로부터 유입되는 해양 폐기물 중 발포성 스티로폼이나 플라스틱, 나무 조각, 그리고 유목(流木) 등과 같은 해양 부유물에 의한 해양오염 문제가 점차 심각해지고 있는 실정이다. 특히 장마철과 홍수시에는 해양 부유물의 막대한 해양 유입으로 인하여 매우 심각한 해양 오염을 초래하고 있다. 이러한 해양 부유물은 초기에는 내부에 있는 공기의 영향으로 부유된 상태로 있으나 시간이 경과함에 따라 물이 스며들거나 해양 부유물의 경화 및 해양생물의 부착으로 결국 수중에 침강하게 된다. 이로 인하여 선박의 안전운항 및 쾌적성을 저해할 뿐 아니라 바다의 미관을 훼손하여 국민의 여가공간 및 관광자원으로서 해양의 가치를 저하시킨다. 그리고 어로작업시 해양 부유물이나 수중에 침강된 해양 부유물들이 함께 포획됨으로써 어획능률과 수산물 품질을 저하시키고, 바다 밑으로 퇴적됨으로써 바닥 양식장의 피해를 유발시킨다.

해양에 유입된 부유물이 해류나 조류에 의해 광역적으로 이동함으로 해양 부유물 수거 및 처리에 적극적인 대응체계가 수립되어 있지 않다. 그리고 해양 부유물 수거에 사용되고 있는 어항청소선 등이 절대적으로 부족하며 수거성능도 저조하여 효율적인 수거작업이 곤란하며, 어장 청소 또는 해양 부유물 수거에 참여하고 있는 전문업체도 부족한 실정이다. 그리고 해양 부유물 처리를 위한 전용시설이 미흡하고 스티로폼 부자나 나무 등 난분해성 해양 부유물의 처리대책이 부족하며 해양 부유물의 재활용에 대한 기술 및 지원미비로 재활용율이 극히 저조한 실정이며, 하천 등의 해양 부유물 관리체계가 미흡함으로써 해양에서 최종적으로 수거하는데 과도한 비용이 소요되며 지방자치단체간의 해양 부유물 관리책임 회피문제가 발생되고 있다.

최근에 국내의 연안어장 및 해양 공간의 국토가치가 새롭게 부상되면서 연근해 어업자원 조성 및 기르는 어업의 확대가 요구되고 있다. 그리고 수산업, 항만운영 등 경쟁력 있는 해양경제활동의 기본적인 토대인 건강한 연안환경의 조성을 위해서는 육상으로부터 해상에 유입되는 부유물 등과 같은 해양폐기물의 수거 및 처리가 시급한 현안으로 부각되고 있으며 이에 대한 연구가 국내적으로 활발히 수행되어야 한다.

해양 부유물과 같은 해양 폐기물의 수거기술에 대한 국외사례로서 일본의 경우, 기본적으로 선박을 활용하여 해저폐기물의 종류 및 특성에 따라 수거장비를 개발하고 있으며 원자력 발전소의 온배수 출입구에 붙어 있는 폐각류를 수거하는 장치 등의 첨단 수거장비를 개발하여 실용화하고 있다. 미국의 경우, 연안 부유 폐기물 수거를 위한 다목적 정화선을 개발하고 있으며 자국내 여러 대학을 중심으로 그랩작업을 기초로 한 수거작업의 자동화 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 네덜란드의 경우, 해저면 준설작업용 펌프시스템

의 개발 등 특정한 목적에 적합한 특수장비의 개발에 착수하였으며 준설한 해저 오염물질을 이용하여 인공섬을 만들어서 관리하고 있다.

국내에서의 해양 폐기물에 관련한 수거 및 처리 기술연구는 국외보다 초기단계라고 볼 수 있다. 그러나 최근에 국내 정부기관과 민간회사의 노력으로 인하여 해양 부유물과 같은 해양폐기물의 수거와 처리에 관한 기술이 개발되어 시제품화 단계에 접어들었다. 특히 기존의 오일분과 유사한 방법으로 운용하며 해상에 유입된 부유물을 포집하는 해양 부유물 수거망이 개발되었다. 또한 강어귀나 하천 등에 설치하여 육상으로부터의 해양 부유물을 사전에 차단 및 포집하는 해양 부유물 차단막(이하 차단막)이 개발되었다. 이와 아울러 포집된 해양 부유물의 처리를 위한 전처리 시스템과 소각기술을 개발되었으며 침단 수거장비도 개발 중에 있다.

본 논문에서는 국내의 지방자치단체에서 활발히 적용하고 있고 시제품화 단계에 있는 차단막에 대한 연구를 수행하였다.

이에 관련된 연구로서 국내에서의 차단막의 구체적인 사례는 거의 없으며, 선진국에서도 활발하게 수행되고 있지 않은 실정이다. 그러나 이와 유사한 형태로 유출된 기름의 확산을 방지하는 오일분배에 대한 연구사례는 많이 있다. 조일형 등(1993)은 오일분의 운동응답해석의 시도로서 각각 강체의 부체와 스키투가 힌지로 연결되어 있다고 가정한 2차원 오일분 모델에 대해 경계요소법(BEM)을 적용하여 수치 실험을 수행하였다. S. S. Badesha 등(1999)은 일반적인 오일분배에 대하여 오일분의 부체와 스키투를 플레이트(plate)요소로, 주요 장력지지 요소와 밸러스트 체인을 트러스(truss)요소, 그리고 오일분의 금속 연결부(fabric connector)를 빔(beam)요소로 모델링하고 오일분 단면에 대한 유한요소(FE) 모델중 하나인 COSMOS FEA code를 적용하였다. 또한 오일분의 여러 경우의 유한요소 모델에 대한 수치해석을 수행함에 있어서 각 오일분 단면(예인지점(tow point)에 근접한 단면, 환경 하중을 가장 크게 받는 중앙지점의 단면, 부체의 연결지점의 단면)에 대해 외부환경하중으로 인한 오일분의 장력과 응력 분포, 그리고 변형을 연구하였다. Arvid Naess(1977)은 U자형 전장형태의 오일분배에 대한 수조예인시험을 통하여 예인시 오일분배와 수면간의 상대운동과 오일분의 장력을 선박의 예인속도(towing speed)와 파조건(wave condition), 그리고 오일분의 탄성(elasticity)의 함수로 표현하여 각 파라미터간의 통계학적인 분석을 수행하였고 실험시 예인선박의 썩지(surge) 운동을 예인로프(towing rope)의 끝단에 주기(periodic) 운동으로 적용하였다.

차단막에 대한 연구로서, 조일형(1999)은 연안용 차단막을 개발, 흐름중의 비대칭 형상을 가지는 차단막에 작용하는 장력을 계산하기 위하여 비선형 미분방정식을 푸는데 많이 사용되는 뉴턴-랩슨 반복법(Newton-Raphson iteration method)을 이용한 수치해석, 차단막의 유속별 형상설계와 실험적 시험을 수행하였다. 이에 대한 국내 사례로서 1998년 대청댐과 충주댐에서 차단막을 설치하였다. 또한 조일형(1999)은 유사한 개념으로 해상 유입된 부유물을 선박이 예인함으로서 포집할 수 있는 해양 부유물 수거망에 대한 견인시 간편한 장력계산방법의 개발과 수거망의 형상설계에 대한 연구를 수행하였다.

이 뿐만 아니라 차단막의 포집 대상인 해양 부유물에 대한 연구도 최근에 활발하게 연구되고 있는 실정이다. 송무석 외(2001)는 실내 수조실험을 통하여 해양 폐기물의 부유와 침강 형태에 따라 해양 폐기물을 분류하였으며 이에 대한 해수유동모델을 개발함으로써 해양폐기

물의 침적을 수치적으로 추정하였다.

본 논문에서 수행할 연구 대상인 차단막은 강어귀나 하천, 댐 등과 같이 내륙에서 설치하며 파도보다는 흐름과 바람에 영향을 많이 받는다. 그리고 이러한 환경하중으로부터 차단막이 손상을 입을 가능성이 있다. 차단막의 손상은 포집된 해양 부유물의 유출로 이어지므로 외부 환경하중을 지지할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 장력지지요소를 적절히 설계하기 위해서는 바람이나 흐름 등과 같은 환경 하중을 정확히 평가하는 기술이 필요하다. 그리고 환경하중에 의해 차단막에 걸리는 장력은 차단부의 형상과 깊이, 그리고 차단막의 설치 형상과 밀접한 관련이 있다.

기존의 차단막 설계에서는 환경하중으로서 단지 흐름만을 고려했으며, 부유 쓰레기를 차단하는 기능을 가진 차단막의 차단부를 오일분과 같이 유연한 막으로, 그리고 이러한 환경하중을 부체 상단의 장력지지요소가 모두 지지한다고 가정하였다. 이로부터 차단막의 장력 및 전장형상을 계산 및 추정하였다. 그러나 실제 현장에서 차단막 설치할 경우, 흐름뿐만 아니라 바람에 의한 영향도 매우 클 것으로 예상되며, 이에 대해 차단막에 작용하는 환경하중도 크게 달라질 것이다. 그리고 차단막의 차단부를 유연한 막으로 가정하여 계산된 환경하중을 실제 형상에 맞게 와이어 네트로 하여 보다 엄밀하게 계산되어야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 해양 부유물 차단막 설계를 위한 구조 해석을 수행한다. 차단막에 작용하는 주요 환경하중으로서 풍력과 흐름력을 고려한다. 그리고 이러한 환경하중을 기존에 도출된 일반식과 본 논문에서 변형한 식을 이용하여 계산한다. 상용 유한요소해석 프로그램의 모델링 경우에 부유물을 포집하는 차단부를 기존의 오일분과 같이 가정된 유연막 대신에 상하단 장력지지요소와 와이어 네트로 모델링함으로써 보다 실제적인 모델을 구현한다. 밀그램(Milgram, 1971)의 장력 계산이론으로부터 유도되어진 기존의 이론식에서는 환경하중을 모두 부체 상단의 장력지지요소에서만 지지한다고 가정하였다. 그러나 본 논문에서는 이러한 환경하중이 차단부를 구성하는 상하단 장력지지요소와 와이어 네트에 균일하게 작용한다고 가정한다. 그리고 기존에 도출된 뉴턴-랩슨 반복법과 장력계수와 형상계수의 관계곡선을 이용한 이론 해석을 수행하고, 이로부터 차단막의 전장형상(대칭 및 비대칭구조), 주요 환경하중 적용방법, 그리고 유속에 따른 차단막의 축방향 응력, 장력, 변형 등을 추정한다. 그리고 이론 해석의 결과와 상용 유한요소해석 프로그램에서 구동된 결과를 서로 비교 분석한다. 또한 상용 유한요소해석 프로그램 구동으로 기존의 이론식으로 구할 수 없었던 깊이방향의 변형에 대해서도 해석한다.

## 2. 차단막의 구조 및 특성

차단막은 육상으로부터 해양 부유물이 해양으로 유입되는 것을 사전에 차단 및 포집하는 장비로서 그 형상은 기존의 오일붐과 유사하다. 그림 2-1은 해양 부유물 차단막의 전체 구조를 나타낸 것이다. 차단막은 부체(floater)와 건현(freeboard), 해양 부유물 차단부(와이어 넷(wire net)와 그물망으로 구성) 그리고, 장력지지요소(tension member)로 구성되었다. 부력재는 차단막이 설계된 흘수(draft)와 건현을 갖고 수면중에 부상해 있도록 부력을 주는 부분으로, 차단막이 무거울수록 해황이 나쁠수록 더 많은 부력이 요구된다. 재질로는 스티로폼이나 공기가 채워진 섬유재질(PVC, PU, Rubber)이 이용된다. 유연성을 갖는 부력재는 딱딱한 부력재에 비하여 파에 대한 응답이 좋으므로 해양 부유물 포획 능력면에서 유리하다. 부력재의 단면 형상은 해상에 떠 있는 해양 부유물이 부착되거나 와류(vortex)가 발생하지 않도록 원형이 효과적이다. 건현은 수면과 수거망의 수직 높이로 정의되며 해양 부유물이 수거망 상부로 빠져나가는 것을 방지한다. 건현을 너무 높게 잡으면 바람에 의하여 수거망이 뒤집어진다. 잘 설계된 차단막은 높은 파도중에 일정한 건현을 유지해야 한다. 해양 부유물 차단부는 부체 아래에 설치되며 해양 부유물을 차단 및 포집하는 부분이며 와이어 넷과 그물망으로 구성되어 있다. 차단부의 깊이가 깊수록 해양 부유물을 차단 및 포집하는데 유리하다. 그러나 차단막에 작용하는 흐름력은 차단부 면적에 비례하므로 차단부가 필요이상으로 너무 길면 차단막에 큰 힘이 걸려 구조상의 문제점이 발생된다. 장력지지요소는 차단막의 길이방향으로 작용하는 장력을 지지하는 부분으로 케이블이나 체인 그리고 섬유막이 주로 이용된다. 장력지지요소의 위치는 환경 하중에 의한 차단막의 운동성능에 영향을 준다.

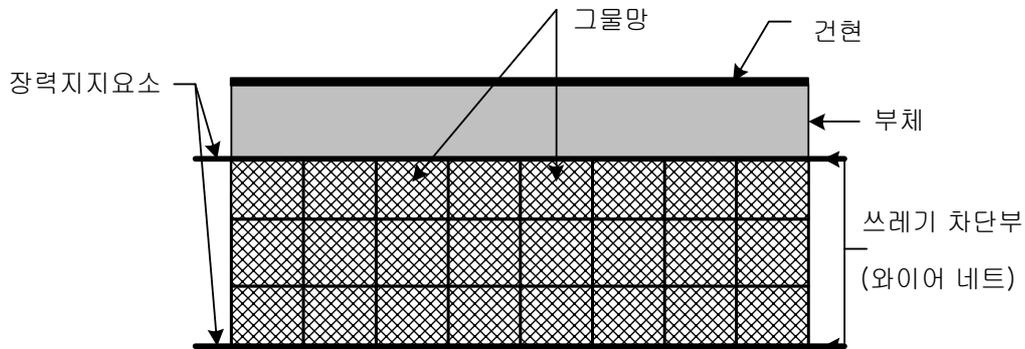


그림 2-1 차단막의 구조

강이나 하천, 댐 등에 설치된 차단막의 성능은 여러 가지 환경조건에 따라 영향을 받는다. 예를 들면, 흐름으로 인하여 해양 부유물이 차단부 밑으로 빠져나가는 경우와 파도나 흐름에 의하여 차단막의 상부로 해양 부유물이 유출되는 경우가 있다. 차단막의 형태를 결정하는 여러 가지 환경인자들에는 바람, 흐름, 파도 그리고, 조석이 있다. 흐름은 차단부의 깊이를 결정하는 인자이며 바람은 부력부에 영향을 주는 인자이다. 그리고 파도는 건현 부분의 높이를 결정하는 인자이며 조석은 차단막의 설치에 영향을 주는 인자이다.

### 3. 차단막에 작용하는 환경하중

해양 부유물 차단막은 주로 내륙의 강이나 하천, 댐 등에 설치되어진다. 따라서 차단막에 작용하는 주요 환경하중은 크게 바람과 흐름에 의한 항력이다. 그러나 본 논문에서는 차단막의 파도와 조석의 환경하중에 대한 영향을 무시하였다. 이는 차단막의 설치장소의 특성상 파도와 조석의 영향이 상대적으로 작기 때문이다. 따라서 바람, 흐름에 의한 환경하중을 계산하기 위해 기존의 이론식과 환경하중의 적용방법 및 지지요소에 따라 변형된 계산식을 이용하였다.

오일분과 동일한 부체 형상을 가진 차단막에 작용하는 풍하중은 전체 환경하중의 약 15%에 달한다. 실제 강한 바람은 강한 파도를 동반하기 때문에 환경하중에 있어 우선 고려되고 있다. 오일분과 기학적 형상이 유사한 차단막의 부체에 작용하는 풍력은 오일분과 동일하게 계산할 수가 있다. 그리고 부체의 형상, 치수 그리고, 마찰 저항계수에 따라 달라진다. 일반적으로 풍력을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a C_{D_{wind}} (U_w \cos \theta)^2 A_f \quad (3.1)$$

여기서, 풍속  $U_w$  는 일반적으로 wind scale 4, 5.5~7.9  $m/s$ (11~16 *knots*)이며, 공기 밀도  $\rho_a$  는 대략 1.29  $kg/m^3$ 이다. 그리고,  $A_f$  는 바람에 대한 부체의 투영면적이다.

항력계수  $C_{D_{wind}}$  는 레이놀드 수( $Re$ )와 표면 거칠기에 따라 다르며, 본 연구에서는 기존의 차단막의 모형 실험에 대한 연구(조일형, 1999)에서 얻어진 물에 대한 항력계수 ( $C_D=1.5$ )를 적용하였다.

일반적으로, 단위 폭당 차단막에 작용하는 흐름력( $F_{D_c}$ )은 아래와 같이 모리슨(Morison) 방정식으로 구할 수 있다. 차단막에 작용하는 장력( $T_c$ )는 차단막의 길이방향에 따라 일정하고 그 전체길이는 장력에 의해 늘어나지 않는다고 가정하였다. 그리고 흐름속도는 일정하다고 가정하였다. 단, 본 연구에서 파도에 의한 부체 운동을 무시하였으므로 유체 가속도 변동에 의한 관성력을 고려하지 않았다.

차단막의 설계시 실제로 작용하는 외부 환경하중 중에 어떤 하중 종류를 고려하느냐에 따라 차단막의 성능에 큰 영향을 미친다. 강어귀나 하천, 댐에 설치되는 차단막과 같은 부유체는 바람과 흐름에 대한 영향을 가장 많이 받는다. 만일 바람과 흐름의 속도변화가 없다고 한다면 모리슨 방정식의 점성항력 항만이 존재한다.

단위 폭당 차단막에 작용하는 흐름력( $F_D$ )은 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a C_{D_c} d_f (U \cos \theta)^2 \quad (3.2)$$

여기서,  $C_{D_c}$ 는 항력 계수로서 대략 1.5로 가정하였으며,  $\rho_d$ 는 포집된 해양 부유물의 평균 밀도이다. 그리고  $d_f$ 는 차단막의 부체의 잠긴 깊이로서 흘수(draft)라고 하며  $U$ 는 유속,  $\theta$ 는  $x$ 축과 차단막의 접선방향이 이루는 각이다.

차단막의 부체에 작용하는 풍력의 계산은 기존의 이론식과 동일하다. 그러나 차단막에 작용하는 흐름력 계산은 차이가 있다. 기존이 이론식에서는 해양 부유물을 차단하고 포집하는 차단부를 오일붐과 같이 유연한 막으로 가정하였으나, 본 논문에서는 실제 모델과 유사하게 장력지지요소와 와이어 네트로 모델링하였다. 일반적으로 차단막의 부체로서 고힘식과 자동팽창식 등이 사용된다. 하지만 이에 대해 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 어떤 요소를 선정할 것인가에 대해 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 차단막 모델링시 부체에 대한 모델링을 생략하였다. 그림 3-1은 해양 부유물을 포집하는 차단부의 구성요소를 나타낸 것이다. 이는 앞의 그림 2-1과는 달리 차단부의 그물망과 부체를 생략하여 나타낸 것이다.

본 논문에서는 차단부의 전면에 물이 통과하지 못할 만큼의 해양 부유물이 차단부의 길이방향과 깊이방향으로 충분히 많이 포집되어 있다고 가정하였다. 그리고 환경하중에 의해 차단부에 작용하는 흐름력은 차단부의 와이어 네트와 장력지지요소에서 모두 균등하게 지지한다고 가정하였다.

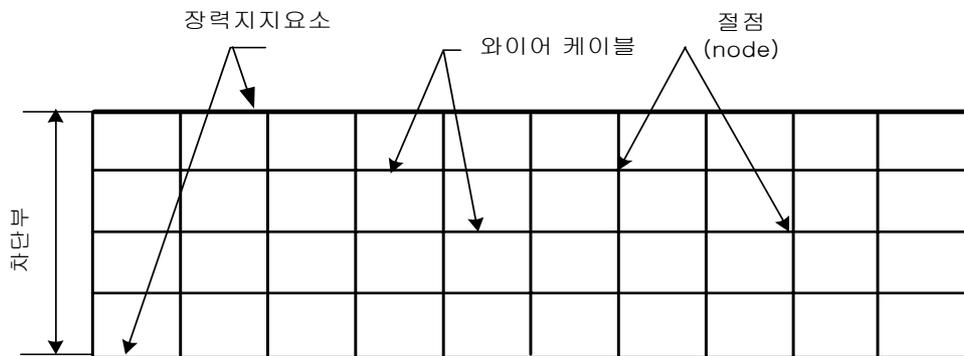


그림 3-1 차단부의 구성요소

본 논문에서는 유한요소해석 프로그램 구동시 부체에 작용하는 풍력을 상단의 장력지지 요소에 적용하였고, 부체에 작용하는 흐름력을 차단부 와이어 네트와 상하단 장력지지 요소에 균등하게 적용하였다. 그림 3-2와 같이 차단부의 미소요소에 작용하는 흐름력( $F_{D_w}$ )은 앞의 식 (3.2)으로부터 구할 수가 있다. 그리고, 만일 환경하중에 대해 차단부 wire의 길이의 변형이 아주 미소하여 그 길이가 변하지 않는다고 가정하면,  $A_1 = A_2 = A_b$ ,  $dl_1 = dl_2 = dl$  이므로 차단부에 작용하는 법선 방향의 단위 요소당 흐름력은 식 (3.3)에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF_{D_w} = \frac{1}{2} \rho_d C_{D_{wire}} \frac{A_b}{Ndl + 2d_r} U^2 \cos^2 \theta \quad (3.3)$$

여기서  $dl_1$ 과  $dl_2$ 는 차단부 와이어의 미소길이,  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 와이어 네트의 각 단위 요소가  $x$ 축과 이루는 각,  $N$ 은 열(column)방향의 와이어의 개수,  $d_r$ 은 행(row)방향의 와이어 길이,  $A_1, A_2$ 는 흐름력이 작용하는 면적,  $U$ 는 차단막에 작용하는 유속 그리고,  $C_{D_{wire}}$ 는 차단부 와이어 네트와 장력지지요소의 항력계수로서 대략 1.3으로 가정하였다.

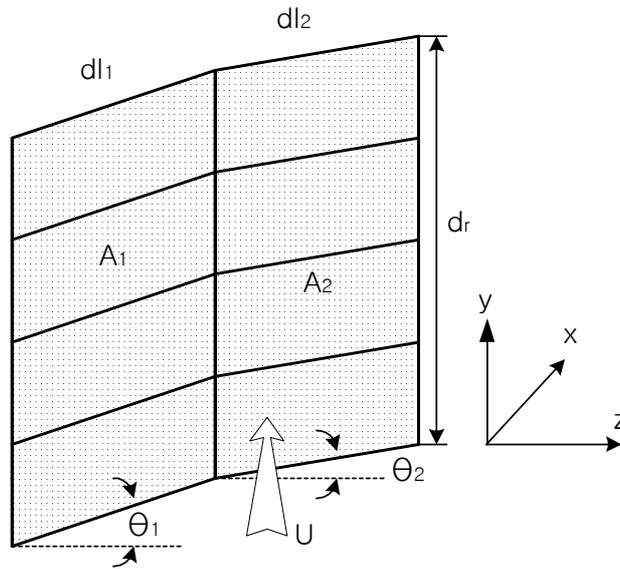


그림 3-2 차단부의 미소요소

본 논문에서는 차단막의 차단부에 작용하는 흐름력을 차단부에 법선 방향의 힘만을 계산하였다. 이는 차단부를 구성하는 와이어 네트의 항력계수  $C_D$ 가 접선 방향으로서는 상대적으로 아주 작게 나타나기 때문이다.

## 4. 이론 해석 및 유한요소 해석

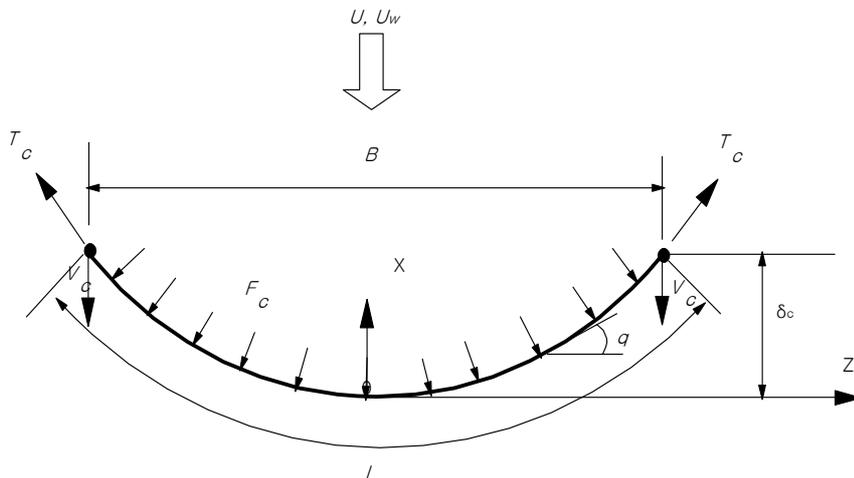
### 4.1 이론 해석

기존의 차단막 설계를 위해 적용된 이론 해석의 경우에는 단지 흐름만을 고려하였으며 차단부를 오일붐의 스키투와 같이 유연한 막으로 가정하였다.

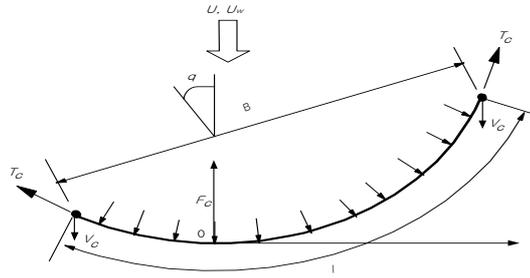
본 논문에서는 주요 환경인자로서 흐름과 함께 실제 현장에서 차단막을 설치할 때 영향을 많이 주는 바람을 추가하였다. 그리고 차단부의 형상과 차단막의 장력지지요소 선정 등에 대한 적용 방법(application method)에 따라 두 가지 경우의 이론 해석을 각각 수행하였다.

적용 방법 I은 풍력, 흐름력과 같은 환경하중을 고려하였다. 그리고 이러한 환경하중이 차단부의 장력지지요소와 와이어 네트에 균일하게 분포하고, 부체 상단의 장력지지요소에서 환경하중을 모두 지지한다고 가정하였다. 적용 방법 II는 밀그램 식으로부터 유도된 기존의 식을 이용하였다. 환경하중은 적용 방법 I과 동일하다. 그리고 차단부를 오일붐의 스키투와 동일하게 유연막으로 가정하였으며, 부체 상단의 장력지지요소가 차단막에 작용하는 환경하중을 모두 지지한다고 가정하였다.

차단막의 초기 전장형상은 차단막에 대한 두 개의 비율로서 결정되어진다. 이는 차단막 양단 계류지점간의 거리와 차단막 길이에 대한 비율인 입구 간격비(gap ratio)와 차단막 양단 계류지점간의 거리와 차단막 끝단에서 차단막 임의의 지점까지의 수직거리에 대한 비율인 처짐비이다.



(a) 대칭



(b) 비대칭

그림 4-1 차단막의 전장형상

그림 4-1은 차단막의 전장형상을 나타낸 것으로 (a)는 차단막의 대칭구조, (b)는 대칭 구조로부터  $\alpha$  각도만큼 기울어진 차단막의 비대칭구조를 나타낸 것이다. 차단막에 작용하는 장력은 유속과 차단막의 전장형상, 그리고 차단부의 깊이의 함수이다. 이러한 관계를 무차원된 변수로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{T_c}{\frac{1}{2} \rho C_D U^2 dl} = f(B/l, d/h) \quad (4.1)$$

여기서  $U$ 는 유속,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $T_c$ 는 차단막에 작용하는 장력,  $C_D$ 는 항력계수,  $d$ 는 차단부의 깊이,  $h$ 는 설치해역의 수심,  $B$ 는 설치된 차단막의 개구(mouth opening)의 거리,  $l$ 는 차단막의 전체 길이이다.

밀그람은 무차원된 변수  $B/l$ 의 영향을 나타내는 새로운 변수인 장력계수(tension parameter)  $\tau_c$ 를 도입하여 차단막에 작용하는 장력을 아래의 식과 같이 표현하였다.

$$T_c = \frac{1}{2} \rho C_D \tau_c U^2 dl \quad (4.2)$$

$B/l$ 의 함수인 장력계수  $\tau_c$ 는  $B/l$  값이 클수록 커지고 작을수록 작아진다. 항력 계수  $C_D$ 는 실험을 통하여 얻어지며  $d/h$ 와 밀접한 관계를 가지고 있다. 항력계수는  $d/h$ 가 클수록 커지며 작을수록 작아진다.

본 논문에서는 차단막에 작용하는 장력( $T_c$ )이 차단막 길이방향에 따라 일정하고 차단막 전체길이는 장력에 의하여 늘어나지 않는다고 가정하였다( $dT_c=0$ ). 그리고 차단막의 미소

요소에 작용하는 환경하중의 평형조건을 이용하여 차단막에 작용하는 장력에 대해 이론 해석을 수행하였다.

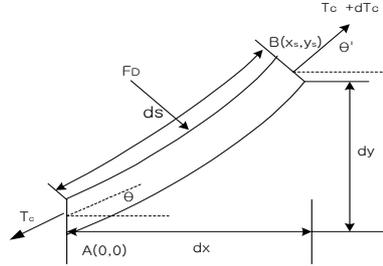


그림 4-2 차단막의 미소요소에 대한 환경하중의 평형조건

그림 4-2는 차단막의 미소요소에 작용하는 환경하중의 평형조건을 나타낸 것이다. 차단막의 접선 방향의 힘에 대한 평형식은 다음과 같이 얻어진다.

$$(T_c + dT_c) \cos(\theta' - \theta) - T_c = F_D \cos \theta \sin \theta ds \quad (4.3)$$

그림 4-2에서 차단막의 법선 방향의 힘에 대한 평형식은 다음과 같이 얻어진다.

$$(T_c + dT_c) \sin(\theta' - \theta) = F_D \cos^2 \theta ds \quad (4.4)$$

$(x, y)$  평면에서 차단막의 부채 형상을 나타내는 곡선을  $y = f(x)$ 라 가정하면,

$$\begin{aligned} \tan \theta &= f'(x) \\ \tan \theta' &= f'(x + dx) \\ &\simeq f'(x) + f''(x) dx \\ &= f'(x) + f''(x) \frac{ds}{\sqrt{1 + f'(x)^2}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

위 식을 이용하여 다음과 같은 식을 구하면

$$\sin(\theta' - \theta) \simeq \tan(\theta' - \theta) = \frac{\tan \theta' - \tan \theta}{1 + \tan \theta' \tan \theta} \simeq \frac{f''(x)}{[1 + f'(x)^2]^{3/2}} \quad (4.6)$$

이다. 위 식을 식 (4.4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$F_D = T_c \frac{f''(x)}{\{1 + f'(x)^2\}^{3/2}} \quad (4.7)$$

만일 차단막의 중앙지점에 작용하는 흐름력  $F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a d U^2 = \mu$  이다.

흐름 방향이 y축과 평행하므로 차단막의 법선 방향의 유속은  $U \cos \theta$  이다. 따라서 흐름력( $F_D$ )는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a d U^2 \cos^2 \theta = \frac{\mu}{\{1 + f'(x)^2\}} \quad (4.8)$$

식 (4.8)을 식 (4.7)에 대입하면 다음의 미분 방정식이 얻어진다.

$$T_c f''(x) - \mu \{1 + f'(x)^2\}^{1/2} = 0 \quad (4.9)$$

또한, 식 (4.3)은  $\cos |\theta' - \theta| \ll 1$ 이기 때문에 다음과 같이 다르게 표현할 수 있다.

$$dT_c = F_D \cos \theta \sin \theta' ds = F_D \cos \theta \tan \theta' dx = F_D \cos \theta f'(x) dx \quad (4.10)$$

양변을 적분한 후,  $x=0$ 에서  $T_{x=0} = T_0$ ,  $y=f(0)=0$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$T_c = F_D \cos \theta f(x) + T_0$$

x축과 이루는 각  $\theta=0$ 일 때  $T_0 = T_c$ 이고, 이 때 차단막 부체에 작용하는 흐름력은  $F_D \cos \theta = F_D$  이므로, 결과적으로 다음 식이 얻어진다.

$$T_c = F_D f(x) + T_0 = \mu y + T_0 \quad (4.11)$$

위 식으로부터 차단막의 최하단 지점 A에서 장력이 최소가 되며 지점 B에서 최대가 됨을 알 수가 있다. 차단막의 전체길이는 구해야 할 변수로 다음과 같은 관계를 이용한다.

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan \theta = \frac{F_D \cos \theta ds}{T_0} = \frac{\mu ds}{T_0} \\ ds^2 &= dx^2 + dy^2 \\ \frac{dy}{dx} &= \sqrt{\left[\left(\frac{ds}{dx}\right)^2 - 1\right]} \end{aligned} \quad (4.12)$$

그리고 경계조건( $x=0$ 일 때,  $s=0$ )을 적용하면 차단막 전체길이  $l$ 은 다음과 같이 얻을 수 있다. 단,  $s$ 는 차단막의 중앙에서부터 한 끝단까지의 길이이다.

$$s = \frac{T_0}{\mu} \sinh\left(\frac{\mu x}{T_0}\right) \quad (4.13)$$

$$l = \left(\frac{2T_0}{\mu}\right) \sinh\left(\frac{\mu B}{2T_c}\right) \quad (4.14)$$

식 (4.13)을 식 (4.12)에 대입해서 풀면 아래의 식이 얻어진다.

$$\frac{dy}{dx} = \sinh\left(\frac{\mu x}{T_0}\right) \quad (4.15)$$

위 식을 다시 적분하여 경계조건( $x=0$ 일 때,  $y=0$ )을 적용하여 풀면

$$y = f(x) = \left(\frac{T_0}{\mu}\right) \left[ \cosh\left(\frac{\mu x}{T_0}\right) - 1 \right] \quad (4.16)$$

이 얻어진다.

위 식에  $x=B/2$ 을 대입하면 차단막의 중앙지점의 굽은 변위인  $\delta_c$ 을 구할 수 있다. 여기서  $B$ 는 설치된 차단막의 개구부(mouth opening)의 폭이다. 그리고 다음과 같은 장력계수와 형상계수의 관계를 이용하여

$$\tau_c = \frac{T_c}{\mu l}, \quad R_{gc} = \frac{B}{l} \quad (4.17)$$

식 (4.14)을 다시 나타내면 다음의 식이 얻어진다. 단,  $T_c = T_0$ ( $x=0, y=0$ 일 때)이다.

$$\tau_c \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} = \frac{1}{2} \quad (4.18)$$

일반적으로 형상계수  $R_{gc}$ 가 주어지면 식 (4.18)를 계산하여 장력계수  $\tau_c$ 를 구할 수 있다. 장력계수  $\tau_c$ 가 구해지면 식 (4.17)에 의해 차단막에 작용하는 장력( $T_c$ )을 구할 수 있다. 그리고 식 (4.17)과 식 (4.18)을 이용하면, 중앙지점의 차단막의 굽은 변위량  $\delta_c$ 은 결과적으로 아래의 식과 같이 얻어진다.

$$\frac{\delta_c}{B} = \frac{\tau_c}{R_{gc}} \left( \cosh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} - 1 \right) \quad (4.19)$$

차단막이  $y$ 축에 대해 비대칭인 경우에 위와 유사한 방법으로 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$4 \tau_c^2 \sinh^2 \left( \frac{R_{gc}}{2\tau_c} \right) \cos \alpha + R_{gc}^2 \sin^2 \alpha = 1 \quad (4.20)$$

경사각도  $\alpha=0$ 일 때 식 (4.19)과 식 (4.20)은 서로 같아진다. 이 식들의 해는 뉴턴-랩슨 반복법을 이용하여 구할 수 있다.

그림 4-3은 밑그림 식으로부터 유도된 기존의 식으로부터 얻어진 관계곡선으로, 경사각도에 따른 형상계수  $R_{gc}$ 와 장력계수  $\tau_c$ 의 관계를 나타낸 것이다. 이 관계곡선을 이용하여 차단막을 비대칭구조로 전장시킬 경우, 차단막에 작용하는 장력을 간편하게 계산할 수가 있다. 여기서  $x$ 축은 형상계수이며  $y$ 축은 식 (4.18), (4.20)을 사용하여 계산한 장력계수이다.

그림 4-3과 같이, 형상계수가 같을 때 경사각도가 클수록 장력계수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 유속이 강할 때 차단막에 큰 장력이 걸리지 않도록 충분한 경사각도를 주고 설치하면  
경사각도를  
 주기 위해서는

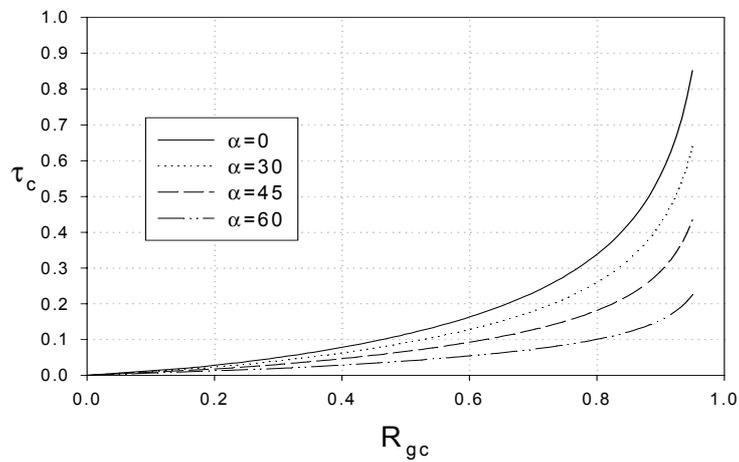


그림 4-3 형상계수와 장력계수의 관계곡선

위의 식 (4.18)과 식 (4.20)은 환경하중에 의해 발생된 장력에 대해 차단막의 주요 장력 지지요소가 늘어나지 않는다는 가정으로부터 얻었다

본 논문에서는 차단막의 전장형상, 유속, 환경하중의 적용방법, 차단부의 형상에 따라 이론 해석을 수행하였다. 대칭구조시 차단막의 유속별 전장형상과 변형, 그리고 축방향 응력을 구하기 위하여 앞에서 얻어진 결과식을 수치 해석방법인 뉴턴-랩슨 반복법을 이용하여 차단막에 작용하는 장력을 구하였다. 그리고 이를 이용하여 차단막의 변형 및 전장형상과 장력, 그리고 축방향 응력을 구하였다. 그리고 비대칭구조시 그림 4-3과 같이 차단막의 장력을 간편하게 구할 수 있는 형상계수 및 장력계수 관계곡선을 이용하였다. 이로부터 얻어진 결과는 본 논문에서 수행할 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 얻어진 결과와 비교 분석하였다.

## 4.2 유한요소 해석

### 4.2.1 차단막의 유한요소 해석을 위한 가정과 접근방법

일반적으로 해상에 확산된 기름을 포집하는 오일붐의 부체와 스키투에 대한 모델링시 모두 강체(rigid body)로 가정하거나 강체와 힌지로 연결된 유연체(flexible body)로 가정한다.

본 논문에서는 부유폐기물 차단막을 서로 힌지로 연결되어 있는 부체와 차단부에 대해 각각 강체와 유연체로 모델링하였다. 차단부를 유연체로 가정한 이유는 차단부의 수평방향에 대한 강도가 장력에 비해 비교적 작기 때문이다.

오일붐의 경우에는 환경하중에 의해 오일붐에 걸리는 장력은 오일붐의 주요 장력지지요소(tension member)와 스키투부의 발라스트 체인에서 지지하나, 차단막의 경우에는 차단막 부체의 굽힘 강성(bending rigidity)이 거의 없으며 아주 유연하고 그 길이가 일정하다고 가정함으로써 환경하중에 의해 차단막에 걸리는 장력을 와이어 넷 및 상하단의 장력지지요소로 구성된 차단부에서 지지한다고 볼 수 있다.

환경하중에 의해 차단부에서 실제 발생하는 와류현상으로 인해 엄밀한 계산을 수행하기 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 그러나 차단부의 2차원 해석만으로도 차단막 제작을 위한 유용한 설계자료를 구할 수가 있다.

본 논문에서는 기존의 이론식과 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 차단막의 전장형상 및 변형과 응력을 해석하기 위해 표 4-1과 같이 가정 및 접근방법을 통하여 문제를 단순화시켰다.

표 4-1 연구수행을 위한 가정 및 접근 방법

가 정	접 근 방 법
주요환경인자 : 바람, 흐름 (부체운동 무시)	모리슨 방정식과 뉴턴-랩슨 반복법을 이용한 차단막의 항력 및 장력, 변위 계산
차단막에 해양 부유물이 완전히 포집된 상태 흐름 : 등류(uniform flow) 차단부 전후면 유체 동일	상용 유한요소해석 프로그램(ANSYS Release 5.5)을 이용한 차단막 전장형상의 변형, 축방향 응력 해석

### 4.2.2 차단막의 유한요소 해석을 위한 요소 선정 및 경계 조건

일반적으로 오일붐에 대한 유한요소해석을 위한 모델링시, 부체와 스키투를 플레이트 요소, 그리고 장력지지요소와 발라스트 체인을 트러스 요소, 끝단간의 금속 연결부를 빔 요소로 적용한다. 그리고 플레이트와 빔 요소에 환경하중의 분포하중을 적용시킨다. 환경하중을 지지하는 요소들과 경계조건에 따라 상용 유한요소 프로그램에서 구현되어진 주요 오일붐의

유한요소 모델들은 다음과 같이 분류되어진다.

- Base line model : 두 개의 주요 장력지지요소가 장력을 지지
- Additional tension carrying chain  
: Base line model에서 추가적으로 벨러스트 체인이 장력을 지지
- No tension carrying members : 유연막의 스커트부가 장력을 지지
- Additional wave loading : Base line model에서 추가적으로 파 하중을 적용
- Fabric connector(between two flotation chambers) : 두 부체 간의 연결부까지 고려
- Tension on tube, in addition to skirt : 부체와 스커트가 장력을 지지
- Tension at two discrete points, representing tow points  
: 불연속적인 예인지점에서 장력을 지지
- Multiple Cells : 한 세트와 다른 세트를 금속 연결부로 모델링

본 논문에서는 그림 4-5와 같이 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 차단막을 두 개의 장력지지요소와 함께 구성된 와이어 네트로 모델링하였다.

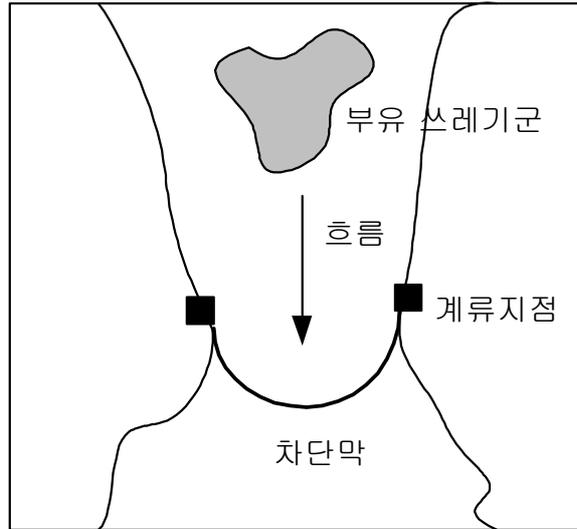
차단막에 작용하는 환경하중은 수면상 부체에 작용하는 풍력과 수면하 부체에 작용하는 흐름력, 그리고 차단부에 작용하는 흐름력이 분포한다.

본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 하중을 적용할 때 차단막의 부체에 작용하는 하중을 차단부 상단의 장력지지요소에 모두 수직(normal)하게, 그리고 차단막의 미소요소에 균일하게 작용한다는 가정하에 적용하였다.

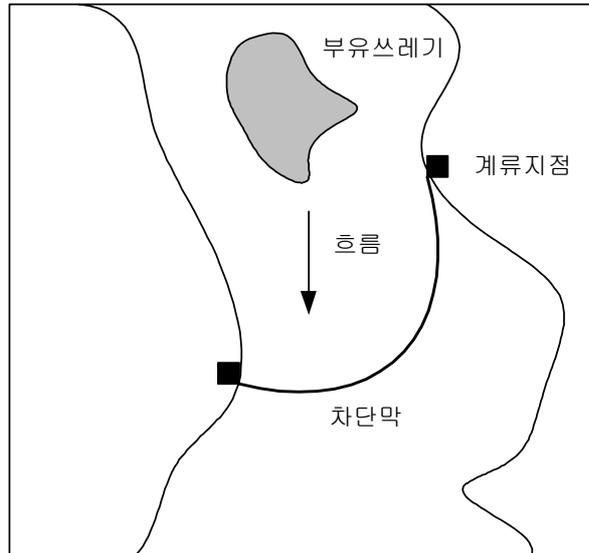
본 논문에서의 차단막의 유한요소 모델에 대한 경계조건(boundary conditions)으로, 차단부와 고리로 연결된 금속 연결부 지점은 수평과 수직 변위를 제외한 회전 변위만을 고려하였다. 그리고 부체와 고리로 연결된 차단부 연결지점은 수평과 수직변형, 그리고 회전방향 변위 모두를 고려하였다. 그리고 상용 유한요소해석 프로그램을 구동하기 위하여 일반적인 요소 형태로서, 금속 연결부를 빔 요소인 BEAM4로 하였으며 와이어 네트와 장력지지요소를 물속에 잠긴 파이프 또는 케이블(Immersed pipe or cable) 요소인 PIPE59로 설정하였다.

#### 4.2.3 차단막의 초기 전장형상 모델링

차단막이 설치될 지점은 실제로 파도, 흐름, 그리고 바람 등에 의한 환경하중이 지속적으로 작용함으로 차단막의 구조적인 손상(break down)을 입을 가능성이 있다. 차단막의 손상으로 된 해양 부유물의 유출을 초래할 수 있으므로 이러한 환경하중을 지지할 수 있도록 설계되어야 한다. 그림 4-4는 일반적인 해양 부유물 차단막의 전장방법을 나타낸 것이다.



(a) U자형 차단막 전장방법



(b) J자형 차단막 전장방법

그림 4-4 차단막의 전장방법

일반적으로 그림 4-4와 같이 강이나 하천에 설치하는 차단막은 대칭구조인 U자형, V자형, 그리고 비대칭 구조인 J자형과 같이 전장한다. 차단막의 성능은 목측으로 “U” 혹은 “J”자의 정점에서 판단되어진다. J자형 전장은 초보자에게 어려운 방법으로 풍향과 진로 방향에 따라 변화한다. 원활한 회수를 위해 외부환경조건이 좋은 경우에는 해양 부유물군의 방향을 편향시키는 것이 훨씬 우수하다.

U자형 전장구조시 오일분과 마찬가지로, 차단막의 전장시 처짐비( $\delta_c/B$ )는 한 계류지점과 차단막의 중앙지점간의 수직거리인 처짐( $\delta_c$ )과 차단막의 두 계류지점 사이의 수평거리

인 스패(B)에 대한 비율이다. 그 비율은 일반적으로 0.1보다는 크다. 균일한 분포하중으로 차단막에 작용하는 흐름력과 장력은 일반적으로 흐름의 속도와 방향, 설치된 차단막의 형상, 그리고 수면아래의 차단부의 형상 및 깊이에 따라 달라진다. 환경하중을 계산함으로써 차단막에 걸리는 최적의 계류지점을 선정할 수 있으며 차단막에 걸리는 장력으로부터 주요 장력 지지요소의 재질과 강도를 최종적으로 설계할 수가 있다.

그림 4-5, 4-6은 상용 유한요소해석 프로그램에서의 차단막 초기 전장형상을 나타낸 것이다.

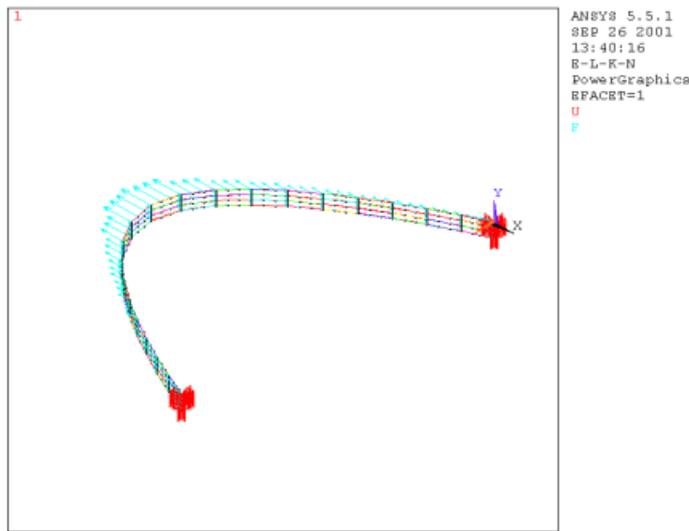


그림 4-5 대칭구조의 차단막 초기 전장형상

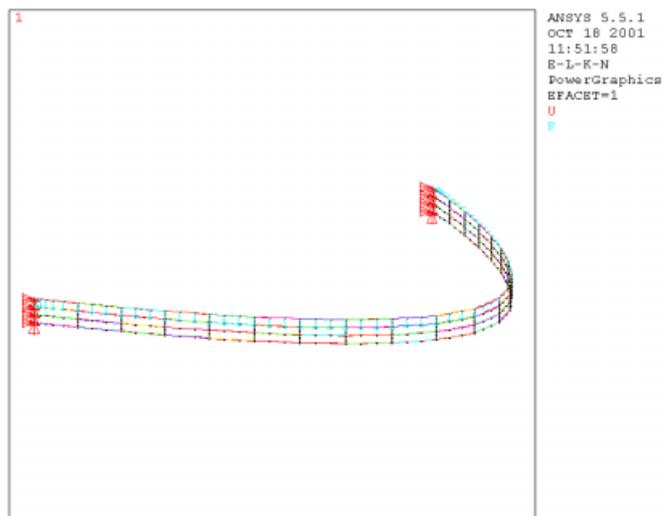


그림 4-6 비대칭 구조의 차단막 초기전장형상( $\alpha=45^\circ$ )

본 논문에서는 그림 4-5, 4-6과 같이 차단부의 변형과 응력 해석을 위하여 부체와 금속 연결부를 제외하였다. 그리고 부체에 작용하는 하중을 차단부 상단의 장력지지요소에 균등하게 분포시켰다.

차단막의 전장형상은 식 (4.16)과 같이 코사인 하이퍼볼릭(cosine hyperbolic) 함수로서 포물선과는 다르다. 그러나 원점을 중심으로 차단막의 길이와 같이 유한한 범위 내에서는 포물선 방정식으로도 표현이 가능하다.

본 논문에서는 U자형 대칭구조인 경우에 유한요소해석을 위한 차단막의 초기 전장형상은 입구 간격비(gap ratio)와 처짐비를 이용하여 상용 유한요소해석 프로그램에서 지원하는 line 요소중 spline으로 나타냈다. 그리고 비대칭구조인 경우에는 대칭구조 초기전장형상으로 부터 흐름방향에  $45^\circ$ 로 기울여진 형상이다.

$$\text{입구 간격비} = \frac{B}{l} = \frac{1}{3} \quad (4.21)$$

$$\text{처짐비} = \frac{\text{sag}(=y_h)}{B} = 0.5 \sim 0.6 \quad (4.22)$$

여기서, B는 차단막의 개구부로서 양단 계류지점간의 거리이다. 처짐은 한 끝단의 계류 지점과 중앙지점간의 거리이다. 본 논문에서는 처짐비를 0.6으로 하였다.

## 5. 결과 및 토론

### 5.1 상용 유한요소해석 프로그램 구동 결과

본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램의 PIPE59 요소를 이용하여 차단부에 작용하는 환경하중에 대한 각 요소의 변형과 응력을 구하기 위해 비선형 해석(nonlinear analysis)을 수행하였다. 차단부의 미소 요소에 대한 변형을 나타내기 위하여 대변형 효과(large deformation effect)를 고려하여 전 뉴턴-랩슨 반복법(Full Newton-Raphson Iteration Methods)을 적용하였다.

#### 5.1.1 대칭구조의 차단막

상용 유한요소해석 프로그램에서 구동할 차단막의 전체길이는 100 m이고 차단막 구성요소에 대한 주요 재원의 입력치는 다음과 같다.

표 5-1. 상용 유한요소해석 프로그램을 구동하기 위한 입력치

구성요소	재원	
상/하단 장력지지요소	D	0.02m
	E	$10^{10} \text{ kg/m}^2$
	A	$3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
와이어 네트의 와이어	D	0.016m
	E	$10^{10} \text{ kg/m}^2$
	A	$2.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
금속 연결부	E	$21 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$
	A	$10^{-3} \text{ m}^2$

여기서  $D$ 는 와이어의 직경,  $E$ 는상하단 장력지지요소와 와이어 네트의 탄성계수 그리고,  $A$ 는 차단막 구성요소(장력지지요소, 와이어 네트, 금속 연결부)의 단면적이다.

차단막의 전장형상은 U자형이고 풍속은 15m/s이고 유속은 3m/s, 4m/s, 5m/s 로 각각 적용하였다. 차단막 부체의 단면형상은 원형이며 흘수는 대략 0.25m로 결정하였다. 차단막에 포집된 해양 부유물의 밀도는 일반적인 형태의 목재의 평균 밀도로서  $0.7 \text{ kg/m}^3$ 로 하였으며, 차단부를 구성하는 와이어의 포아송 비  $\nu=0.3$ 으로 하였다.

상용 유한요소해석 프로그램 구동에서는 위의 표를 각 요소에 대한 물성치 등으로 대입하고, 차단막에 작용하는 환경하중은 직접 계산한 후에 각 절점에 적용한다. 그 계산 결과, 부체에 작용하는 풍력은 1626.82kgf, 흐름에 의한 수면하 부체에 작용하는 흐름력은 35.31kgf, 차단부 와이어네트와 상하단 장력지지요소에 작용하는 흐름력은 9.21kgf이다.

미소 요소당 환경하중을 고려하여 식 (4.11)과 식 (4.19), 그리고 형상계수  $R_{gc}$ 와 장력계수  $\tau_c$ 을 이용함으로써 차단부의 중앙지점에서의 변위  $\delta_c$ 는  $19.86m$ 로 계산되었다. 이는 앞에서 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 차단부의 초기 전장형태를 결정하기 위해 형상계수와 처짐비만을 이용하여 구하였던  $sag=19.80m$ 와 거의 일치하였다.

본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램을 구동한 결과로 차단막의 전체형상,  $x$ ,  $y$ , 그리고  $z$ 축 각 방향의 변위를 각각 구하였다. 차단부의 전체 형상은 유속별로 크게 다르지 않았다. 그리고 대칭구조일 경우에  $y$ ,  $z$ 축 변위는 아주 미소하였다. 그림 5-1은 한 예로서, 유속이  $3m/s$ 일 때 차단막의 전체 변형된 형상을 나타낸 것이다.

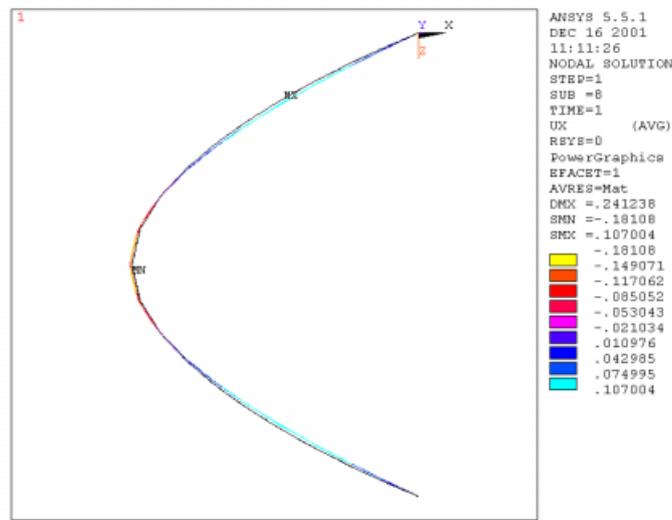
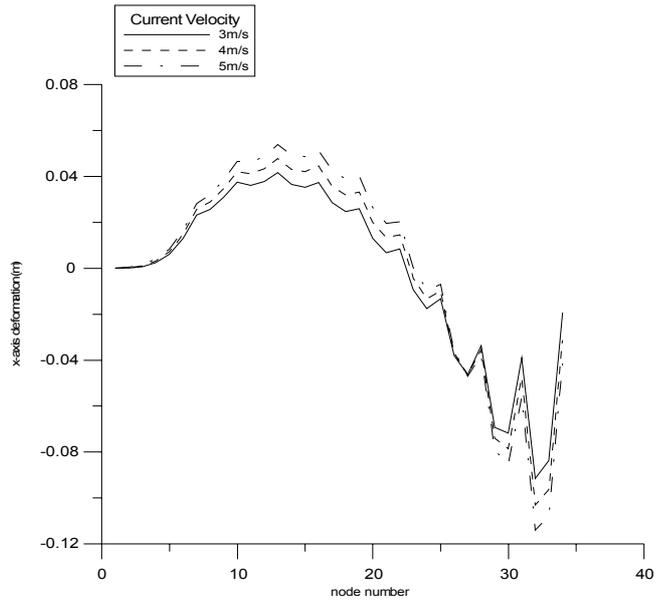


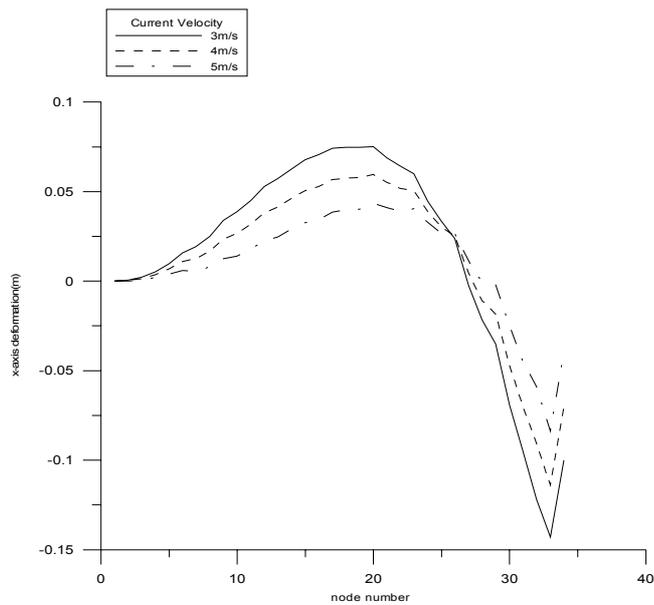
그림 5-1 대칭구조의 차단막 전체 변형(유속=3m/s)

그림 5-1로부터 대칭구조의 차단막에 대한 변형된 전장형상을 대략적으로 알 수가 있다. 환경하중이 가장 크게 작용하는 차단막의 중앙지점이 환경하중의 작용방향으로 밀리는 변형이 되었으며 이로 인해 차단막의 끝단 계류지점으로부터 중앙지점까지의 중간부에서는 상대적으로 차단막의 안쪽으로 당겨지는 변형이 발생되었음을 알 수가 있다. 그리고 최대 변위는 환경하중이 가장 크게 작용하는 차단부 중앙지점에서 발생되었다.

그림 5-2는 그림 11에서와 같이 유속별 차단막의 초기 전장형상으로부터  $x$ 축 방향의 변위를 나타낸 것이다. 그리고  $x$ 축은 차단막 끝단으로부터 중앙지점까지의 절점 번호(node number)이다.



(a) 상단 장력지지요소



(b) 하단 장력지지요소

그림 5-2 대칭구조의 차단막 상하단 장력지지요소의  $x$ 축 방향의 변위

여기서  $x$ 축은 차단부의 길이방향의 절점 번호이며, 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 차단막의 끝단 계류지점에서 중앙지점까지 절점을 34개로 메쉬(mesh)하였다. 유속에 따라 상단 장력지지요소의 절점 10번에서 20번까지는 점차  $x$ 축 양의 방향으로 변형이 증가하였다. 이와 반대로 절점 21번에서 34번까지는 점차  $x$ 축 음의 방향으로 변형이 증가하였다. 그리고 하단의 장력지지요소의 절점 10번에서 20번까지는 유속에 따라 상단 장력지지요소의 변형과 달리 점차 감소하였으며 절점 21번에서 34번까지는 그 변형이 감소하였다. 따라서

유속에 따라 차단막의 깊이방향의 기울기가 점차 감소함을 알 수가 있다. 또한 절점 27번을 기준으로 차단막 계류지점과 중앙지점간의 변형 방향이 서로 반대가 되어 발생하였다. 그리고 위의 그림 5-3(a)와 같이 중앙지점에서 상단 장력지지요소의 변형이 끝단 계류지점 부근의 절점의 변형과 다르게 발생된 이유로는 차단부 요소를 전체 길이에 대해 메쉬할 때 상용 유한요소해석 프로그램의 기본값으로 하였기 때문이다. 그리고 이에 작용하는 환경하중이 계류지점 부근 절점에 따라 차이가 거의 없으나 중앙지점의 절점으로 갈수록 그 환경하중의 차이가 상대적으로 크게 차이가 발생되어 변위차가 커지게 되었기 때문이다.

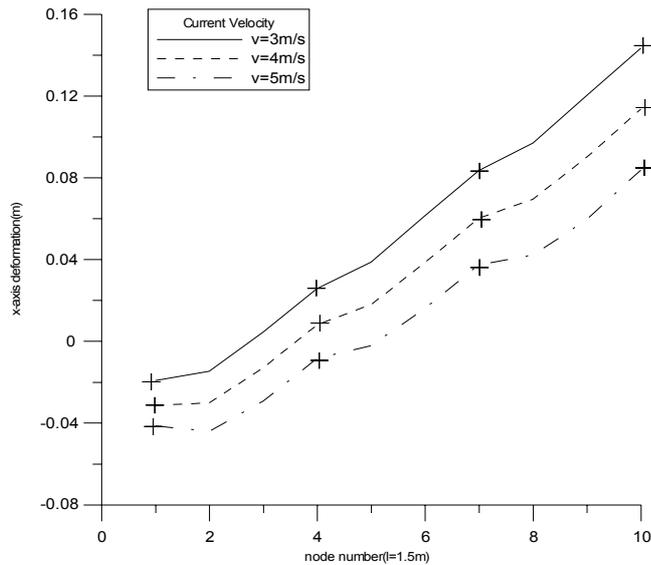


그림 5-3 최대 변위가 발생된 대칭구조의 차단막 중앙지점에서  $x$ 축 방향의 변위(깊이방향)

그림 5-3은 대칭구조의 차단막의 초기 전장형상으로부터 차단막 중앙지점의 깊이 방향에 따른 유속별  $x$ 축 변위를 정량적으로 나타낸 것이다. 절점 1번은 상단 장력지지요소의 절점이다. 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 깊이방향 와이어 네트의 절점을 8개로 메쉬하였다.  $x$ 축은 깊이 방향의 와이어 네트의 절점 번호이다. + 표시는 열 방향과 행 방향의 와이어 케이블이 교차하는 절점이다. 깊이가 증가함에 따라 차단부의 상하단 장력지지요소의 절점 변위가  $x$ 축 양의 방향으로 점차 변형되었다. 그리고 유속이 증가함에 따라 차단부 상단의 변위는 점차  $x$ 축 음의 방향으로 점차 증가하였다. 또한 깊이방향의 와이어 네트에서 발생된 최대 변위는 각 와이어 교차점 사이에서 발생되었다. 이는 차단부의 와이어 케이블이 서로 연결된 부분으로서 환경하중에 의한 장력에 대해 와이어 케이블 상의 절점보다 강성이 크기 때문이다. 또한 이 부분들은 실제 모델에서 클립으로 고정되어 있다. 그러나 각 교차점간의 요소에 대한 최대 변위 절점들을 이르면 차단부 깊이방향에 따른  $x$ 축 방향의 전반적인 변형을 알 수가 있을 것이다. 그리고 상단 장력지지요소의 유속에 따른 변위량은 하단보다 작게 발생하였다. 따라서 유속이 증가할수록 차단막의 전장형상은 상단보다는 하단에서 그 변형이 크게 일어남을 알 수가 있었다.

### 5.1.2 비대칭구조의 차단막

상용 유한요소해석 프로그램 구동시 차단막의 초기 전장형상의 유한요소 모델은 대칭구조의 초기 전장형상으로부터  $\alpha=45^\circ$ 로 기울어져 있는 형상이다.

그림 5-4는 비대칭구조의 차단막에 대한 상용 유한요소해석 프로그램 구동결과의 한 예로서 유속이  $3m/s$ 일 때의 차단막의 변형된 전장형상을 나타낸 것이다.

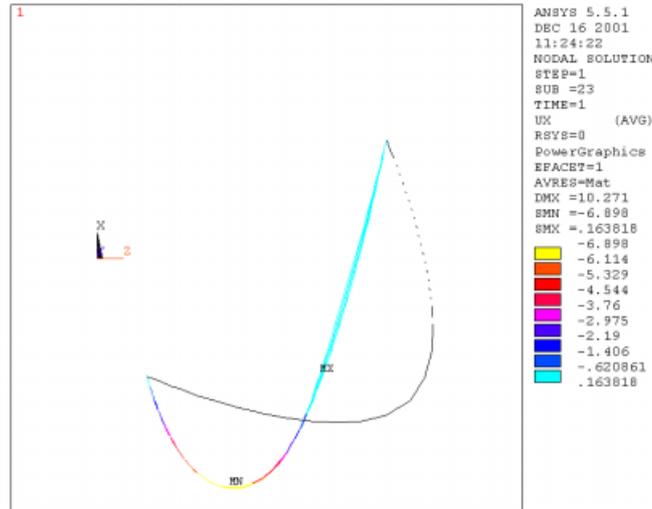
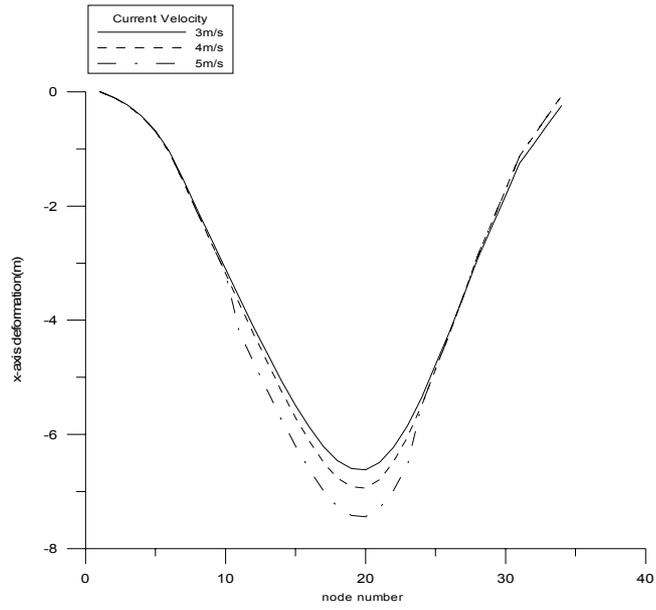


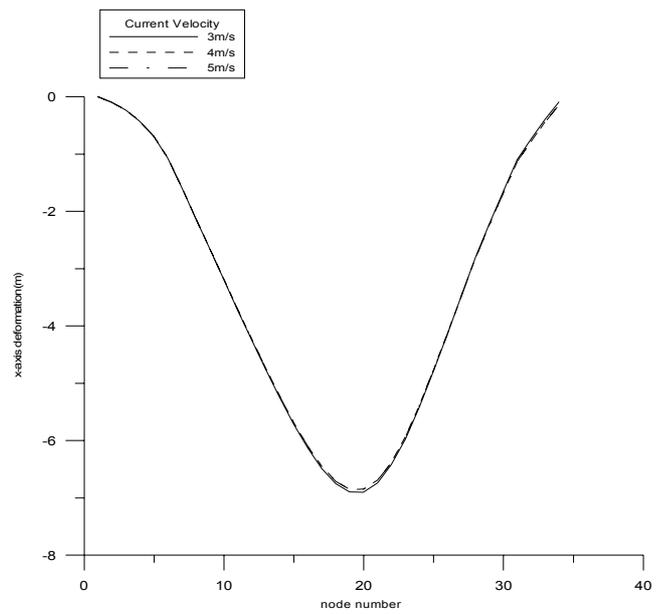
그림 5-4 비대칭구조의 차단막 전체 변형(유속=  $3m/s$ )

그림 5-5와 같이, 비대칭구조의 경우에는 대칭구조와는 달리  $z$ 축 변위가 크게 발생됨을 알 수가 있다. 이는 환경하중에 영향을 많이 받는 차단막의 면적이 대칭구조와 달리 상대적으로 작아졌기 때문에 환경하중이 차단막 일부분에 집중되면서 환경하중이 작용하는 방향으로 변위가 크게 발생되었다. 이와 동시에 환경하중을 상대적으로 많이 받지 않는 부분이 차단막 안쪽으로 변형되었다.

그림 5-5는  $x$ 축 방향의 차단막 초기 전장형상으로부터의 유속별 변위를 나타낸 것이다. 절점 0번은 차단막의 계류지점이며 32번은 차단막의 중앙지점이다.  $x$ 축 방향의 최대 변위는 절점 21번에서 발생하였다. 이 절점은 대칭구조와는 달리 차단막에 작용하는 환경하중을 가장 크게 받는 지점이 아니다. 이는 환경하중을 상대적으로 크게 받지 않는 차단막 우측부분에서  $z$ 축 방향의 변위가 크게 발생함으로써 환경하중을 집중적으로 받는 차단막 좌측부분이 상대적으로  $x$ 축 음의 방향으로 많이 변형되었기 때문이다. 중앙지점으로부터 우측 지점들(절점 32번 이후)의 유속별 변위는 초기 변형으로부터 크게 변하지 않았다.



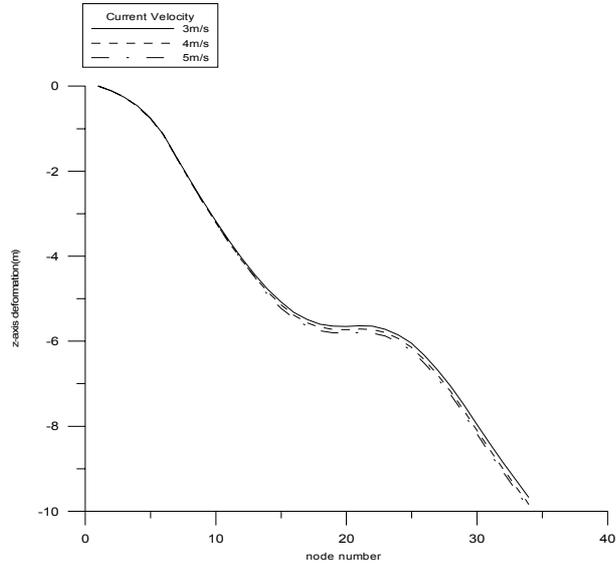
(a) 상단 장력지지요소



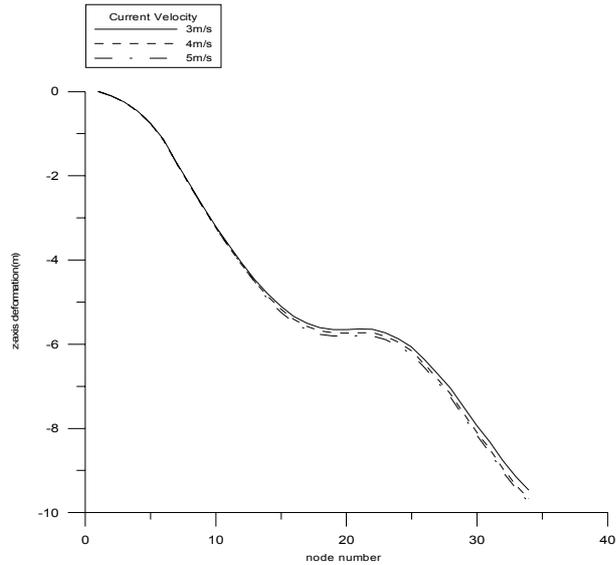
(b) 하단 장력지지요소

그림 5-5 유속별 비대칭구조의 차단막 상하단 장력지지요소의  $x$ 축 방향의 변위

그림 5-6는  $z$ 축 방향의 차단막 초기 전장형상으로부터의 유속별 변위를 나타낸 것이다.



(a) 상단 장력지지요소



(b) 하단 장력지지요소

그림 5-6 비대칭구조의 차단막 상하단 장력지지요소의  $z$ 축 방향의 변위

그림 5-6과 같이 유속에 따라 차단막의  $z$ 축 변위는 점차 증가함을 알 수가 있다. 그리고  $z$ 축 방향의 최대 변위는 절점 34번에서 발생하였다. 이는 차단막 중앙지점의 요소상의 절점이다. 대칭구조에서  $x$ 축 방향의 최대 변위는 환경하중이 가장 크게 받는 부분, 즉  $\theta=0$ 인 지점에서 발생되었지만, 비대칭구조인 경우에 최대 변위는 환경하중이 가장 크게 받는 부분이 아닌 그 인접 부분, 즉  $\theta \neq 0$ 인 지점에서 발생되었다. 이는 환경하중을 가장

크게 받는 차단막의  $\theta=0$ 인 지점과 함께 이 지점의 우측부분이 차단막 안쪽으로 당겨지면서 상대적으로 차단막 좌측부분이 뒤로 많이 밀리게 되었기 때문이다. 그리고 최대 변위가 발생된 절점 20번 부근에서는  $z$ 방향의 변형이 거의 일정하였다. 이로부터 최대 변위가 발생된 지점에서는 환경하중의 방향과 거의 동일한 방향에 대한 변형이 지배적임을 알 수가 있다.

그림 5-7은 환경하중에 의해 최대 변위가 발생된 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 깊이방향의 유속별 변위를 나타낸 것이다.

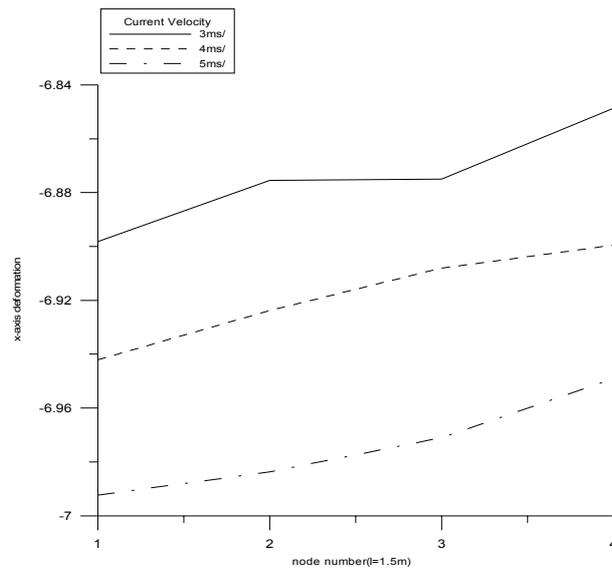


그림 5-7 유속별 최대 변위가 발생된 비대칭구조의 차단막 지점인 경우,  $x$ 축 방향의 변위(깊이방향)

그림 5-7은 그림 5-3과 다른 형상이 나타났다. 이는 최대 변위가 발생된 지점이 대칭구조인 경우에는 차단막 중앙지점이지만, 비대칭 경우에는 차단막의 중앙지점이 아닌 그 부근의 요소상의 지점인 절점 21번에서 발생되었기 때문이다. 그림 5-7과 같이 최대 변위가 발생된 절점의  $x$ 축 방향 변위는 깊이방향에 따라 하단보다 상단이 더 크며 유속이 증가함에 따라 그 변위도 점차 증가하였다. 그리고 차단막의 깊이방향으로의 기울기는 유속에 따라 점차 차단막 뒤로 굽어지는 형상이 나타났다. 이는 대칭구조시 발생된 차단막 중앙지점의 깊이방향에 대한 변형과 유사하였다.

## 5.2 토론

### 5.2.1 차단막의 전장형상

#### 5.2.1.1 대칭구조의 차단막

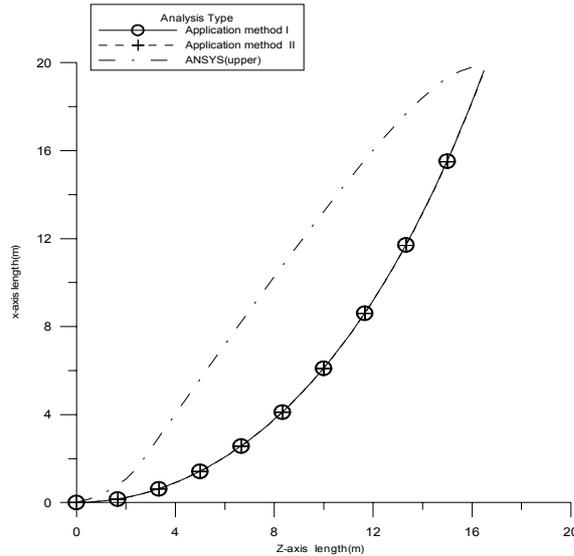


그림 5-8 적용 방법에 따른 대칭구조의 차단막인 경우,  $x$ 축 방향의 전장형상 결과  
(상단 장력지지요소, 유속=3  $m/s$ )

그림 5-8은 유속이 3  $m/s$ 일 때, 환경하중의 적용 방법에 따른 대칭구조의 차단막 상단 장력지지요소인 경우에  $x$ 축 방향의 전장형상 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 위의 그림 5-8과 같이 차단부를 와이어 네트로 가정하여 환경하중을 계산한 적용 방법 I과 오일붐과 같이 유연막으로 가정한 적용 방법 II와의 전장형상 결과는 거의 일치하였다. 그러나 상용 유한요소해석 프로그램의 구동으로 얻어진 결과는 적용 방법 I, II의 전장형상 결과와 다르게 나타났다. 그림 5-2와 같이 상하단 장력지지요소의 절점 27번을 기준으로 서로 반대방향의 변위가 발생함으로써 굽힘 모멘트가 차단막 중앙지점과 계류지점 부근에서 나타났기 때문이다. 그리고 차단부의 요소인 물 속에 잠긴 파이프 또는 케이블 요소(PIPE59)의 굽힘강성(bending rigidity)와 탄성 등의 물리적인 특성이 고려되었기 때문이다. 이로부터 차단막에 작용하는 환경하중을 상단 장력지지요소에서만 지지한다고 가정한 적용 방법 I, II의 전장형상 결과가 차단막에 작용하는 환경하중을 차단부 와이어 네트와 상단장력지지요소에서 균등하게 지지한다고 가정한 상용 유한요소해석 프로그램의 전장형상 결과보다 크게 변형되었음을 알 수가 있다. 따라서 차단막의 전장변형은 환경하중의 종류보다는 환경하중을 지지하는 요소의 선정에 더 많은 영향을 받음을 알 수가 있다.

### 5.2.1.2 비대칭구조의 차단막

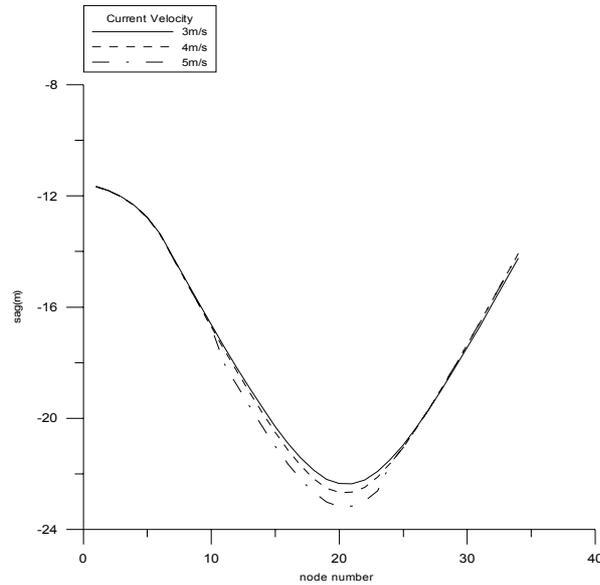


그림 5-9 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 유속별 비대칭구조 차단막인 경우,  $x$ 축 방향의 전장형상(상단)

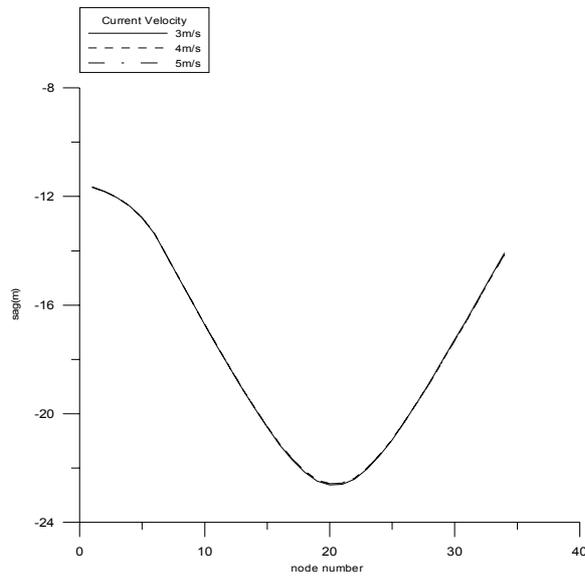


그림 5-10 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 유속별 비대칭구조의 차단막인 경우,  $x$ 축 방향의 전장형상(하단)

그림 5-9, 5-10은 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 유속에 따른 비대칭구조의 차단막 전장형상을 나타낸 것이다. 최대 변위가 발생된 절점 21번에서 유속에 따라 점차 뒤로 밀리는 형상이 나타났으며, 이와 동시에 차단막 상단에서는 차단막 좌측부분이 차단막 안쪽으로 당겨졌다. 그리고 하단에서는 유속에 따라 거의 변형이 일어나지 않았다. 상하단의 전장형상의 차이는 차단막의 깊이방향의 기울기를 나타낸다. 그리고 최대 변위가 발생된 절점

21번에서는 유속에 따라 상하단 장력지지요소의 변위차가 작아짐을 알 수가 있다. 따라서 차단막의 깊이방향의 기울기가 점차 감소됨을 알 수가 있었다.

## 5.2.2 차단막의 축방향 응력

### 5.2.2.1 대형구조의 차단막

본 논문에서는 차단막의 중앙지점에 걸리는 장력을 앞에서 유도된 이론식과 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 각각 구하였다. 차단부에 작용하는 장력을 계산하는 방법으로서 식 (4.18), (4.20) 등을 이용하여 수치해석 프로그램을 만들거나 식 (4.11)과 식 (4.16)을 이용한 반복법이 있다.

본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램으로부터 얻어진 축방향 응력 결과와 비교분석을 위하여 기존의 이론식에서 구한 중앙지점의 장력으로부터 축방향 응력을 구하였다.

식 (4.18)에 대한 첫 번째 해는 포물선에 대한 다음의 식을 이용하여 구하였다.

$$T_0 = \frac{\sigma_c B^2}{8h} \quad (5.1)$$

여기서,  $\sigma_c$ 는 바람과 흐름에 의해 차단부에 작용하는 단위 요소당 환경하중으로서  $223.44kg$ 이고  $B$ 는 양단 지점간의 거리로  $33m$ 이며  $y_h$ 는 차단막의 한 끝단과 중앙지점까지의 수직거리로서  $19.8m$ 이다. 위 식을 이용하여 구한 초기 해를 식 (4.16)에 대입하여 예러가 가장 작은 값을  $T_0$ 로 하였다. 한 예로서 유속이  $3m/s$ 일 때의 차단막의 장력 계산 결과는 표 5-2와 같다.

표 5-2 뉴턴-랩슨 반복법을 이용한 차단막에 작용하는 장력( $T_0$ ) 계산

$T_0$	$T_0/\mu$	$\cosh\left(\frac{\mu B}{2T_0}\right)$	$\frac{T_0}{\mu} \left[ \cosh\left(\frac{\mu B}{2T_0}\right) - 1 \right]$ (m)	$y_h$ (m)	Error(%)
1536.15	6.875	5.557	31.33	19.8	+58.23
1900	8.503	3.553	21.71	19.8	+9.65
2000	8.951	3.238	20.03	19.8	+1.16
2025	9.063	3.169	19.68	19.8	-0.61
2100	9.399	2.980	18.61	19.8	-6.01

식 (4.11)으로부터 차단막에 작용하는 장력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_c = T_0 + \mu y_h = 2025 + 223.44y_h \quad (5.2)$$

따라서 차단막 중앙지점에 작용하는 장력은  $y=0$ 일 때이므로,  $T_c = T_0 = 2025kgf$ 이다 이 때 환경하중이 가장 크게 작용하는 차단부 중앙지점에 걸린 축방향 응력은 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{T_0}{A} = \frac{2025}{3.14 \times 10^{-4}} = 6.45 \times 10^6 kgf/m^2 = 6.45 kgf/mm^2$$

기존의 이론식으로부터 차단부를 유연막으로 본 경우에서 흐름과 바람에 의한 항력은 단 위길이당  $225.96kgf$ 이다. 이 때의 흘수는 차단막의 수면하 깊이로서,

$$d = 0.25 + 1.5 = 1.75m$$

이다.

위의 반복법을 이용하여 얻어진 차단막에 작용하는 장력은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_c = T_0 + \mu y_h = 2050 + 225.96y_h \quad (5.3)$$

따라서 차단막 중앙지점에 발생하는 축방향 응력은  $\sigma = 6.53kgf/mm^2$ 이다.

이와 마찬가지로, 유속이  $4m/s$ ,  $5m/s$ 일 때의 축방향 응력을 구하여 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 결과와 비교하여 표 5-3과 그림 5-11로 나타내었다.

표 5-3 유속별  $x$ 축 최대 변위가 발생하는 대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력( $\sigma$ ) 계산결과

유 속 ( $m/s$ )	와이어 넷 ( $kgf/mm^2$ )			유연막 ( $kgf/mm^2$ )
	ANSYS		적용 방법 I	적용 방법 II
	상 단	하 단		
3	4.36	0.088	6.45	6.53
4	4.56	0.089	6.61	6.69
5	4.78	0.104	6.77	6.93

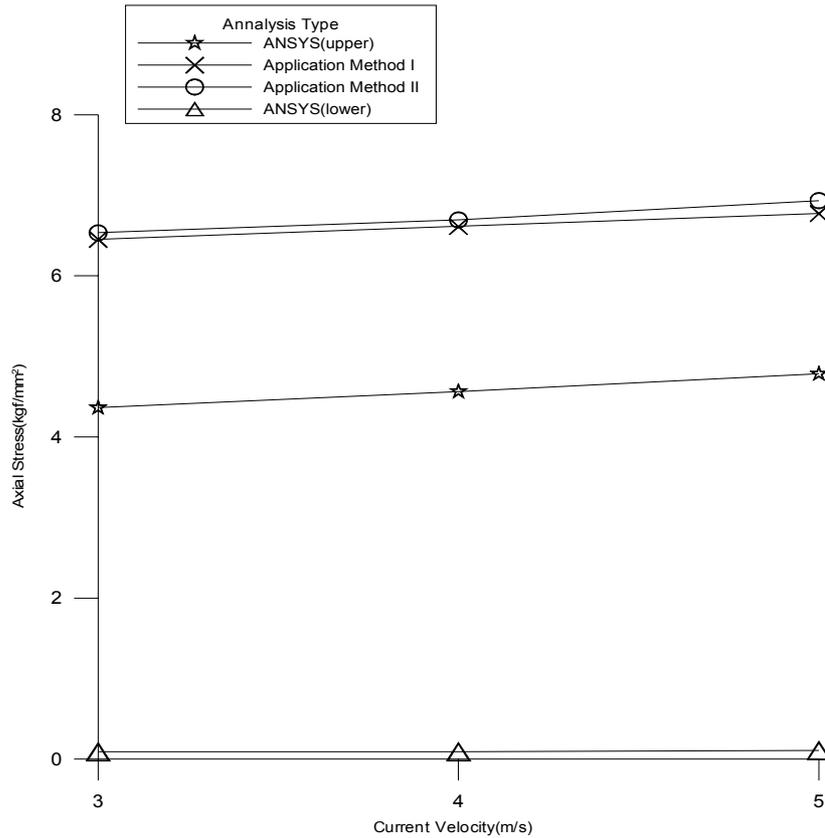


그림 5-11 유속별 x축 방향의 최대 변위가 발생된 대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력 결과

그림 5-11은 차단막의 적용 방법과 유속에 따라 최대 변위가 발생된 차단막의 중앙지점에서의 축방향 응력 결과를 나타낸 것이다. 위의 그림과 같이 차단막의 중앙지점에 작용하는 응력이 차단막의 적용 방법에 따라서 차이가 발생하였다.

적용 방법 II의 경우에는 차단부를 기존의 오일분과 동일한 유연막으로 가정함으로써 차단막에 작용하는 환경하중(풍력, 흐름력)이 다른 적용 방법보다 크게 계산되었다. 그리고 이러한 환경하중을 지지하는 요소로 부체 상단의 장력지지요소에서만 모두 지지한다고 가정하였기 때문에 차단막에 작용하는 축방향 응력이 적용 방법 중 가장 크게 나타났다.

이와 달리, 적용 방법 I인 경우에는 적용 방법 II과 달리 차단부의 형상을 와이어 넷으로 가정하고 차단막에 작용하는 환경하중이 균등하게 작용한다고 가정하였다. 그러나 이러한 환경하중을 기존의 이론식의 가정과 마찬가지로 부체 상단의 장력지지요소에서만 모두 지지한다고 가정하였다. 그 결과, 이 흐름력은 차단부를 구성하고 있는 장력지지요소와 와이어 넷에 균일하게 분포한다고 가정함으로써 적용 방법 II 경우의 환경하중보다 작게 계산되었다. 따라서 차단막 상단의 장력지지요소에 걸리는 축방향 응력은 적용 방법 II보다 더 작게 나타났다. 그리고 상용 유한요소해석 프로그램의 구동결과 중 축방향 응력 결과는 적용 방법 I과 동일한 환경하중을 적용하였으나, 단 흐름력이 차단부 미소요소의 길이방향과 깊이 방향으로 균일하게 작용한다고 가정함으로써 얻어진 것이다. 그리고 상용 유한요소해석 프로그램의 구동으로 얻어진 축방향 응력 결과는 적용 방법 I, II에서 얻어진 결과보다 작게 나타났다. 따라서 차단막에 걸리는 응력은 환경하중의 적용방법, 그리고 장력지지요소와 차

단부의 형상 설정에 따라 차이가 발생함을 알 수가 있었다.

### 5.2.2.2 비대칭구조의 차단막

차단막의 전장형상이 비대칭인 경우에는 그림 4-3과 같이 기존의 이론식으로부터 얻어진 장력계수와 형상계수에 대한 관계곡선을 이용하여 차단막에 걸리는 장력과 응력을 간편하게 계산할 수 있다.

식 (4.17)과 같이 형상계수  $R_{gc}$ 와 장력계수  $\tau_c$ 의 관계식과 그림 4-3의 관계곡선을 이용하여 차단막에 걸리는 장력을 구하였다. 이때 비대칭구조의 차단막에서 최대 변위가 발생 한 지점의 각  $\theta=17.29^\circ$ 이다. 그리고 차단막 길이  $l$ 은 100 m이고 양단계류지점간의 거리  $B$ 는 약 23 m이다.

형상계수  $R_{gc}$ 는

$$R_{gc} = \frac{B}{l} = \frac{23}{100} = 0.23$$

이다. 이 때 형상계수  $R_{gc}$ 와 장력계수  $\tau_c$ 의 관계곡선을 이용하면 장력계수  $\tau_c$ 는 대략 0.04이다.

본 논문에서는 앞에서 얻어진 장력계수  $\tau_c$ 를 이용하여 적용 방법에 따라 유속이 3m/s 일 때 최대 변위가 발생된 지점의 축방향 응력을 구하였다.

적용 방법 I의 경우, 최대 변위가 발생된 지점에 작용하는 단위 길이당 환경하중은  $\mu=224.56kgf$ 이며 이에 걸리는 장력  $T_c=\tau_c\mu l=0.04\times 224.56\times 100=898.24kgf$ 이다. 따라서 최대 변위가 발생된 지점의 축방향 응력은

$$\sigma = \frac{T_c}{A} = \frac{898.24}{3.14\times 10^{-4}} \approx 2.86kgf/mm^2$$

이다. 그리고 적용 방법 II의 경우, 최대 변위가 발생된 지점의 단위 길이당 환경하중은  $\mu=225.22kgf$ 이며 이에 걸리는 장력  $T_c=900.88kgf$ 이다. 따라서 최대 변위가 발생된 지점의 축방향 응력은  $\sigma=2.87kgf/mm^2$ 이다. 앞에서 구한 방법과 같이 유속이 4m/s, 5m/s 일 때의 응력을 구하여 표 5-4와 그림 5-12로 나타내었다. 표 5-4는 유속별 x축 최대 변위가 발생하는 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력 계산결과를 나타낸 것이다.

표 5-4 유속별  $x$ 축 최대 변위가 발생하는 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력( $\sigma$ ) 계산결과

유 속 ( $m/s$ )	와이어 네트 ( $kgf/mm^2$ )			유연막 ( $kgf/mm^2$ )
	ANSYS		적용 방법 I	적용 방법 II
	상 단	하 단		
3	1.20	0.51	2.86	2.87
4	1.85	0.52	2.91	2.94
5	2.54	0.54	2.98	3.04

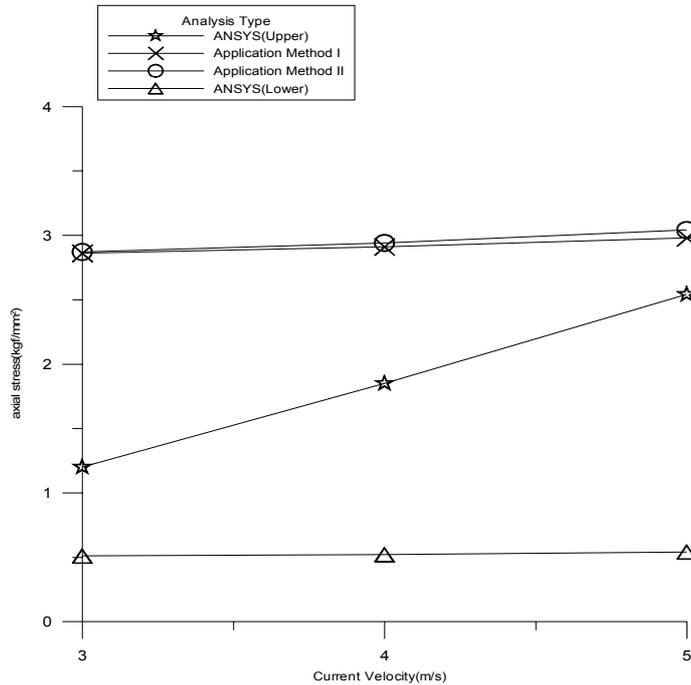


그림 5-12 유속별  $x$ 축 방향의 최대 변위가 발생된 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력 결과

최대 변위가 발생하는 비대칭구조의 차단막 지점에 대한 축방향 응력 결과가 적용 방법에 따라 차이가 발생하였다. 대칭구조의 경우에는 유속에 따른 축방향 응력의 증가폭이 일정하다. 그러나 위의 그림과 같이 비대칭구조의 경우에는 상용 유한요소해석 프로그램의 구동으로 얻어진 축방향 응력 결과의 증가폭이 적용 방법 I, II의 축방향 응력에 대한 증가폭보다 크게 나타났다. 이는 차단부 와이어 네트와 장력지지요소의 탄성으로 인하여 길이와 유속에 따른 장력 변화가 크게 발생되었기 때문이다.

표 5-5는 비대칭구조시 최대 변위가 발생된 지점에 대해 대칭구조시 축방향 응력 결과를 나타낸 것이다.

표 5-5 비대칭구조시 최대변위가 발생된 지점에 대한 대칭구조시의 축방향 응력 결과

유 속(m/s)	상 단( $kgf/mm^2$ )	하 단( $kgf/mm^2$ )
3	3.9	0.034
4	4.0	0.035
5	4.2	0.037

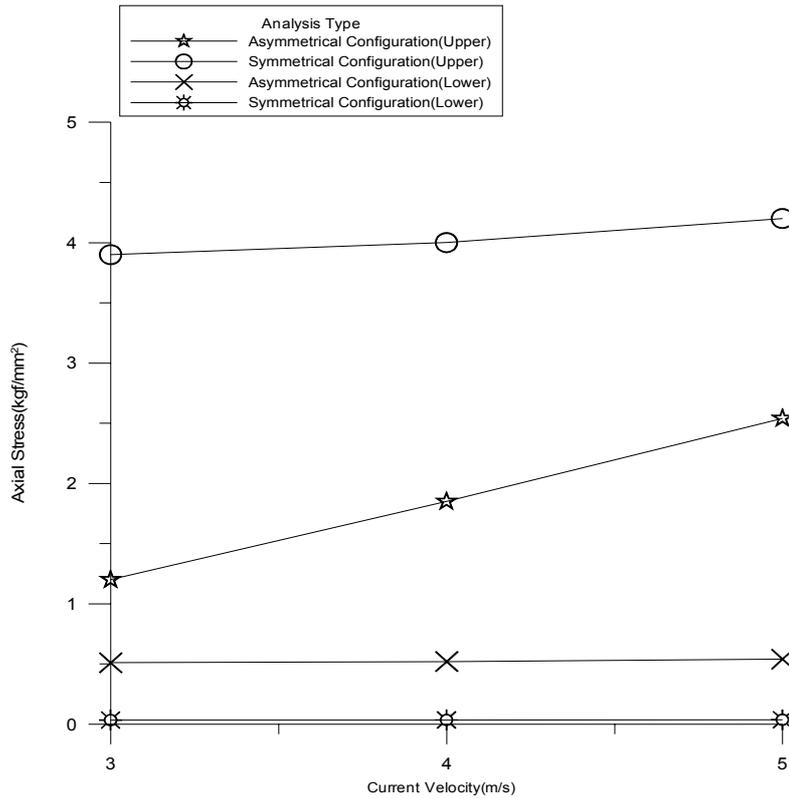


그림 5-13 상용 유한요소해석 프로그램에서 동일지점에 대한 비대칭구조와 대칭구조시의 축방향 응력 결과 비교

그림 5-13은 상용 유한요소해석 프로그램 구동 결과로, 비대칭구조시 차단막의 최대 변위가 발생된 지점에 대한 대칭구조시의 축방향 응력 결과와 비교한 것이다. 차단막 상단에 대칭구조시 축방향 응력 결과가 비대칭구조의 축방향 응력 결과보다 크게 나타났다. 이는 대칭구조와는 달리 비대칭구조시 차단막에 환경하중이 상대적으로 차단막의 좁은 면적에 집중적으로 작용하여 축방향 응력이 커질 것으로 예상되었다. 그러나 차단막의 우측부분이 차단막 안쪽으로 크게 변형되고 이와 동시에 차단막 중앙지점에서 뒤로 변형되었다. 이는 차단막의 좁은 범위에 집중되는 환경하중에 대한 영향을 상대적으로 감소시킬 수가 있었기 때문이다. 따라서 위의 그림 5-13으로부터 동일한 환경하중이 작용할 경우에는 대칭구조보다는 비대칭구조로 차단막을 전장하는 것이 차단막의 구조적인 안정성을 높이는 데 우수함을 입증할 수가 있었다.

## 6. 결 론

본 논문은 기존의 이론 해석과 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 차단막의 구조해석 기법에 대한 연구를 수행하였다. 차단막에 대해 기존에 도출되어진 이론식은 해양 부유물 차단 및 포집하는 차단부를 오일붐의 스키투부와 같이 유연막으로 가정하였고, 차단막에 작용하는 환경하중을 단지 흐름만을 고려하였다. 이 환경하중에 대해 차단막 부체에 위치한 장력지지요소가 모두 지지한다고 가정하였다. 이로부터 얻어진 차단막의 장력과 변위를 계산하여 실험을 수행한 사례가 있다.

본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 차단막의 비선형 해석을 위하여 기존의 차단부를 유연막 대신에 물 속에 잠긴 파이프 또는 케이블 요소인 PIPE59를 선택하였다. 그리고 차단부의 실제 모델과 유사하게 와이어 네트형으로 모델링하였다. 외부환경의 주요 인자로서 바람과 흐름을 고려하였으며 기존의 이론식과 본 논문의 변형식을 이용하여 차단막에 작용하는 환경하중을 계산하였다. 그리고 해양 부유물이 완전히 포집되었을 때의 차단부의 변형과 응력을 구하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 비선형 해석을 수행하였다. 그리고 유속에 따른 차단막의 전장형상과 차단부의 변형과 응력 해석을 수행하였다. 그리고 환경하중에 의해 최대 변위가 발생한 차단막의 지점에 대하여 기존의 이론식으로부터 얻어진 결과와 비교 분석하였다.

본 논문에서 수행한 상용 유한요소해석 프로그램의 구동시 차단막 변형 및 축방향 응력 결과는 기존의 이론식으로부터 유도된 적용 방법 I, II와 차이가 나타났다. 이는 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 차단막에 작용하는 환경하중의 종류와 적용방법의 차이, 차단막의 깊이방향의 변형 그리고 차단부의 장력지지요소와 와이어 네트의 물리적인 특성 등의 이유가 원인인 것으로 추정된다. 차단막 전장형상은 적용 방법 I, II에서 거의 차이가 나지 않았다. 그러나 상용 유한요소해석 프로그램의 구동 결과에서는 적용 방법 I, II과 다른 변형이 발생하였다. 이는 상용 유한요소해석 프로그램 구동시에 풍력, 흐름력을 차단부에 균등하게 적용하였으며, 차단막의 물리적인 특성과 유속에 따른 차단막의 깊이방향의 영향 등이 고려되었기 때문이다.

따라서, 기존의 차단막 설계에 적용되었던 이론 해석방법과 같이 단지 흐름만을 고려하기 보다는 해양 부유물 차단막의 엄밀한 설계를 위해 차단막에 작용하는 환경하중으로서 흐름 뿐만 아니라 풍력을 함께 고려해야 하며, 환경하중을 지지하는 요소로서 부체 상단의 장력 지지요소 뿐만 아니라 차단부를 구성하는 와이어 네트 요소를 함께 고려해야 한다. 그리고 차단막에 작용하는 흐름력의 정확한 계산을 위해 차단부를 오일붐의 스키투 대신에 실제적인 형상인 와이어 네트로 고려되어야 한다.

본 논문에서 위의 내용들을 고려함으로써 보다 엄밀한 이론 해석을 수행하였으며, 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용함으로써 유속에 따른 차단막의 상하단 장력지지요소의 변형으로부터 차단막의 실제적인 전장변형을 추정할 수가 있었다. 그리고 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 유한요소 해석을 수행함으로써 이론 해석만으로 알 수 없었던 차단막 와이어 네트의 깊이방향에 대한 변형과 축방향 응력을 추정할 수가 있었다.

본 논문의 추후 연구과제로서 상용 유한요소해석을 위한 차단막의 모델링시 생략되었던 부체를 모델링함으로서 보다 실제적인 차단막의 유한요소 모델을 구현함과 동시에 상용 유한요소해석 프로그램 구동시 차단막 부체의 요소 선정에 대한 연구가 우선 수행되어야 한다. 또한 파도를 포함한 차단막에 작용하는 환경하중의 실제적인 적용과 함께 차단막의 동적 운동과 그 변형에 대한 연구도 수행되어야 할 필요성이 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 강창구 외, “해양폐기물 종합처리시스템 연구용역 중간보고서”, 한국해양연구원, 1999.
- [2] 강창구 외, “해양폐기물 종합처리시스템 개발(I)”, 한국해양연구원 · 한국해양수산개발원, 2000.
- [3] 강창구 외, “해양폐기물 종합처리시스템 개발(II)”, 한국해양연구원 · 한국해양수산개발원, 2001.
- [4] 박한일 외, “예인중인 오일펜스의 형상 및 장력해석”, 한국해양환경공학회 1998년도 춘계학술대회 논문집, 1998.
- [5] 홍기용 외, “해양유입 부유쓰레기 수거시스템 개발”, 한국해양환경공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, 2000.
- [6] 송무석 외, “한강 및 낙동강 해역의 해저 쓰레기분포에 관한 연구”, 한국해양환경공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, 2001.
- [7] 류창혁, “계류시스템 설계를 위한 3차원 정적해석 범용 수치프로그램 개발”, 한국해양대학교 대학원 해양공학과, 1999.
- [8] 성홍근, “2차원 오일붐 모델의 운동 응답 해석”, 서울대학교 대학원 조선해양공학과, 1995.
- [9] 기계설계편람편집위원회 편, “기계설계편람 제 3판”, 대광서림, 1992.
- [10] Peter Kohnke 편, “*Theory Reference Release 5.3*”, SAS IP, Inc., 1996.
- [11] ANSYS®, “*Basic Analysis Procedures Guide Release 5.3*”, SAS IP, Inc., 1996.
- [12] ANSYS®, “*Structural Analysis Guide Release 5.3*”, SAS IP, Inc., 1996.
- [13] ANSYS®, “*Verification Manual Release 5.3*”, SAS IP, Inc., 1996.
- [14] 신종계 외 공역, “*Logan의 유한요소법 첫걸음*”, 시그마프레스, 1998.
- [15] T. Sawaragi, “*Coastal Engineering—Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions*”, Elsevier, 1995.
- [16] M. H. Patel, “*Dynamics of Offshore Structures*”, Butterworths, 1989.
- [17] Arvid Naess, “*Model tests in waves of oil booms in catenary configuration*”, The Ship Research Institute Of Norway(report R-66.77), 1977.
- [18] J. W. Leonard, “*Tension Structures Behavior & Analysis*”, McGraw-Hill Book Com., 1988.
- [19] J. W. Doerffer, “*Oil Spill Resopnse In The Marine Environment*”, Pergamon Press, 1992.