



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

모듈형 부유식 해양구조물의 연결구조에 관한 연구

A Connection Mechanism for Modular Floating Structures

지도교수 최 경 식



2012년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 공 학 과

김 정 선

本 論 文 을 金 靖 善 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 : 공학박사 서 영 교 (印)

위 원 : 공학박사 송 화 철 (印)

위 원 : 공학박사 최 경 식 (印)



2012년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 공 학 과

김 정 선

# A Connection Mechanism for Modular Floating Structures

by

JEONG-SEON KIM

Department of Ocean Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

## Abstract

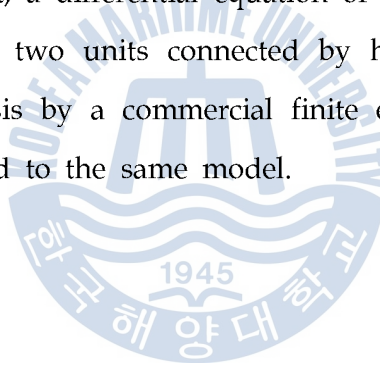
Recently, study of marine space replacing land space draws world's attention, and a concept to design large structures, such as artificial island, floating offshore structure, marine city and airport, is being concerned. These large marine structures usually divided into comparatively smaller modules, then transported to on-site and finally assembled into a designed large structure. Modular floating structures, welded or bolted, are semi-permanent and strong, however manufacturing process for welding or bolting large floating structures under various loads is very difficult. Local structures are easy to break down due to the concentrated load.

On this background, this study focuses on the various connecting mechanisms for modular floating structures and a method that can be applied to the large modular floating marine structures. It is suggested, i.e, a connecting mechanism consisting of LEGO blocks and Korea traditional

bar shape structure operating with a hydraulic cylinder. A case study of very large floating structures in this study is a possible offshore airport in Busan. It is assumed that the modular structures loaded with facilities of urban and traffic functions are integrated.

Connection structure in the form of LEGO blocks may be easier for connecting modular structures in the offshore field. The hydraulic cylindrical bar prevents the overall structure from being damaged, allowing motion between modular structures more flexible. Moreover, these modules are especially useful when a new module is added or removed.

For verification of suggested concept of connecting structures, two approaches are tried. First, a differential equation of elastic beam is solved by a simple calculating for two units connected by hydraulic cylindrical bars. Then a structural analysis by a commercial finite element analysis program NX Nastran is performed to the same model.



# 목 차

ABSTRACT .....	i
목 차 .....	iii
그림 목 차 .....	v
표 목 차 .....	vii
1. 서론 .....	1
2. 국내외 연구사례 .....	4
2.1 매립식 구조물과 부유식 구조물 .....	4
2.2 초대형 부유식 해양구조물 연구사례 .....	8
2.3 초대형 부유식 해양구조물의 연결구조 .....	13
3. 새로운 연결구조 제안 .....	19
3.1 부유식 해상공항에의 응용 .....	20
3.2 모듈형 부유식 해상공항의 개념 .....	22
3.3 주 모듈의 연결 .....	24
3.4 유닛과 유닛 연결 개념 .....	26
3.5 주 모듈과 Side 유닛의 연결 개념도 .....	30
3.6 해상공항을 위한 유닛의 제원 결정 .....	31
4. 연결구조의 설계 .....	34
4.1 유닛의 설계 .....	35
4.2 탄성보 이론을 이용한 계산 .....	36

4.3 유한요소 프로그램을 이용한 해석 .....	46
5. 결 론 .....	55
참 고 문 헌 .....	57



## 그 립 목 차

Fig. 2-1 Sketch of modular floating structure (김병완 외, 2006) .....	14
Fig. 2-2 Using rough surface method (KAIST, 2009) .....	15
Fig. 2-3 Connecting adjacent pontoons (Gerwick B. C. et al, 1991) .....	16
Fig. 2-4 Connector arrangement (Rognaas G. et al, 2001 ) .....	17
Fig. 2-5 Detail of central connector (Rognaas G. et al, 2001 ) .....	18
Fig. 2-6 Vertical/longitudinal section of wing connector (Rognaas G. et al, 2001 ) .....	18
Fig. 3-1 Modular floating structure .....	22
Fig. 3-2 Modular floating structure concept .....	23
Fig. 3-3 Modular floating structure concept(front view) .....	23
Fig. 3-4 Main unit .....	25
Fig. 3-5 Unit with thrusters .....	25
Fig. 3-6 Concept of hydraulic cylinder .....	27
Fig. 3-7 Joining of unit to unit with a hydraulic connector .....	27
Fig. 3-8 Unit connector .....	28
Fig. 3-9 Unit connector(perspective view) .....	28
Fig. 3-10 Connection of two units(front view) .....	28
Fig. 3-11 Details of unit connection .....	29
Fig. 3-12 Unit connection along side structures .....	29
Fig. 3-13 Assembled units after connect .....	29
Fig. 3-14 Join main unit to side unit .....	30
Fig. 4-1 Free body diagram .....	38
Fig. 4-2 Location of hydraulic cylinder .....	40
Fig. 4-3 Stress of hydraulic cylinder y1 .....	42



Fig. 4-4 Stress of hydraulic cylinder y2 ..... 42

Fig. 4-5 Location of hydraulic cylinders ..... 47

Fig. 4-6 Modeling of VLFS units ..... 48

Fig. 4-7 Deformed after bending ..... 48

Fig. 4-8 Calculated stresses at the position of cylinders ..... 52

Fig. 4-9 Maximum stress on unit thickness of cylinder ①, ②, ③, ④, ⑤ .. 54

Fig. 4-10 Maximum stress on unit thickness of cylinder ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩ 54



## 표 목 차

Table 2-1 Merits and demerits of floating structure (정태영 외, 1999) .....	6
Table 2-2 Examples of VLFS(양창호 외, 2003) .....	10
Table 2-3 Domestic research cases for floating structures(양창호 외, 2003) ..	12
Table 3-1 Unit specifications .....	31
Table 3-2 VLFS case study data .....	32
Table 4-1 Allowance stress standard (홍사영, 2007) .....	35
Table 4-2 Properties of dimension of the unit .....	37
Table 4-3 Maximum deflection of the unit .....	41
Table 4-4 Calculated stresses of the cylinder .....	41
Table 4-5 Calculated strain of the cylinder .....	43
Table 4-6 Force of the cylinder .....	44
Table 4-7 Calculated stresses .....	49
Table 4-8 Maximum stress of cylinder ①, ②, ③, ④, ⑤ .....	53
Table 4-9 Maximum stress of cylinder ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩ .....	53

# 1. 서론

인구의 증가와 산업의 발달로 인해 육상의 주거공간과 일상생활에 필요한 공간이 부족해짐에 따라 이러한 생활공간 수요를 충족시키기 위해 해양공간의 이용이 필요해지고 있다. 연안을 매립하여 신도시를 조성하고 교통시설을 해상에 확충하는 구체적인 사례들이 우리 주변에 나타나고 있는 현실이다. 해양공간을 이용하는 방법으로 종래에는 해안의 얕은 곳을 매립하거나 섬을 깎고 넓히는 방법을 주로 사용하였다. 하지만 이러한 매립에 의한 해양공간의 창출은 그 동안 많은 사례가 있음에도 불구하고 환경파괴와 같은 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 최근 갯벌 등 해양환경에 대한 국민적 관심 고조로 연안역 보전 정책상 공유수면 매립허가 규모가 크게 줄어들고 있는 것을 감안하면 향후 준설, 매립 형태의 건설 방식을 재검토해야 할 필요성이 있다.

매립의 문제점과 함께 급격한 산업화, 도시화의 영향으로 최근 육상공간을 대체할 수 있는 해양공간 활용 연구가 주목받고 있으며 그 예로서 대규모 인공섬 및 부유식 해양구조물, 해상도시와 해상공항 등의 기능을 가진 초대형 해상구조물에 대한 설계개념이 구체화되고 있으며, 우리나라를 비롯한 세계 각국은 초대형 부유식 해상구조물에 대한 기술개발에 노력하고 있다.

매립을 대신하는 초대형 부유식 해양구조물 (VLFS)의 예로는 히로시마 우지나항의 부유식 잔교, 요코하마의 미나토미라이 여객터미널, 캐나다 밴쿠버의 헬리포트 등 육상공간을 대치하는 목적으로 건조되고 사용된 소형 부유식 구조물이 존재해 왔고, 미국 워싱턴주 워싱턴호를 가로지르는 Lacey Murrows교, 노르웨이의 피요르드 내만에 설치된 Bergsoysund교, Nordhorland교 등과 같은 대규모 부체 구조물이 현재에도 쓰이고 있다. 일본의 Aqua Polis, Floating Island, Royal Phoenix, 석유비축기지, 노르웨이의 부유식 교량, 발전설비를 갖춘 해상

플랜트도 있다. (양창호 외, 2003 정태영 외, 1999)

최근 현재 국내의 국제공항의 한계 극복과 국가 경쟁력 강화, 국토의 균형발전을 이루기 위한 신공항 건설에 대한 관심이 증대됨에 따라 이러한 신공항을 초대형 부유식 해양구조물의 대표적인 사례인 부유식 해상공항으로 건설하고자 제안되어지고 있다. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 초대형 부유식 구조물의 사례로 부산권의 가상 해상공항을 대상으로 모듈화된 개별 부유식 구조물에 다양한 도시/교통기능을 탑재하여 현장에서 해상공항으로 일체화시키는 것을 가정하고 있다.

해상공항은 한 변의 길이가 수 km에 이르는 초대형 부유식 해양구조물의 대표적인 예시 구조물이다. 대부분의 초대형 부유식 해양구조물은 강제 구조물로서 해수순환이 가능하여 해양생태계에 미치는 영향이 적고 수심 20m이상인 경우의 해상에서는 매립식보다 경제적이다. 그러나 이러한 대형 구조물은 건설비가 많이 들고 수요의 정확한 창출을 예측하기 힘들고 안전에 대한 신뢰도가 낮다는 부정적인 시각도 만만치 않다. 이 외에도 관련 기술의 확보, 자연조건이 적합한 지역의 제한, 자연환경의 보호, 법률적인 규제 및 구조물의 안정성과 내구성, 해수에 의한 부식을 막는 방식기술과 재료의 개발, 대형 구조물의 설계·제작·관리·유지보수 기술, 구조물의 계류, 파랑 등의 외력의 산정과 대비 등도 필요하다. 또한 해양환경에 미치는 영향의 평가와 저감방안 등이 확보되어야 하고, 수명이 완료된 구조물의 해체와 대체구조물에 관한 연구도 수행되어야 한다.

이러한 대규모 해양구조물은 일체화된 형태로 운반되기 보다는 비교적 작은 모듈로 나뉘어 운반되어 현장에서 조립 설치되는 방식을 택한다. 하지만 육상에서 흔히 사용하는 용접이나 볼트 연결로 일체화되는 방식은 반영구적이긴 하

지만 일체화된 구조물의 규모가 대단히 크기 때문에 해상에서의 운동에 따라 작업이 어렵고 과도한 하중집중으로 국부구조가 파손될 가능성도 크다.

따라서 본문에서는 이러한 초대형 부유식 해양구조물에 적용 가능한 모듈식 연결방법을 제안하였다. 먼저 기존 문헌에 제안된 여러 가지 연결구조에 관한 조사를 통해 모듈화된 초대형 부유식 해양구조물에 적용할 간단한 연결방식의 하나로 레고 블록 형태의 요철을 가진 연결기구와 전통 대문의 빗장 모양 유압 실린더로 구성되는 연결구조를 제안하였다.



## 2. 국내외 연구사례

### 2.1 매립식 구조물과 부유식 구조물

현재까지 매립되었거나 매립 중에 있는 면적은 우리나라 전체 갯벌의 약 42%에 달하는 것으로 나타났으며, 매립된 곳은 대부분 항만이나 산업단지, 농지로 사용되고 있다. 또한 향후 이러한 매립식으로 구조물을 건설할 경우 매립토 확보 문제가 대두될 수 있다. 현재에도 국내 매립식 구조물의 건설시 인근지역의 환경문제, 매립재 부족, 매립토 투기장 등의 문제로 인해 100km 이상 떨어진 지역에서 매립재를 운반해 오고 있는 실정이다.

정부도 해양환경 보전대책의 일환으로 연안통합관리체제를 구축하고 갯벌 등 해양 생태계 보전에 정책적 노력을 기울이고 있다. 이에 따라 최근 공유수면 매립 기본계획 수립 시 지방자치단체 신청 매립 희망 규모의 10% 이하 정도만 매립을 허용하고 있다. (양창호 외, 2003)

국토가 협소하고 대도시에 인구가 집중된 우리나라에서 해양공간의 개발은 반드시 필요한 현실적 과제이다. 그러나 매립공법에 의한 연안역 개발은 이미 각지에서 수행되고 있으나 환경 측면에서 많은 문제를 유발시키고, 적용가능한 지역도 한정되어 있다. 또한 수심이 깊은 해안의 경우에는 경제적인 문제가 야기되며 개발대상이 되는 풍부한 해양자원으로의 공간적인 접근 능력이 부족하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 부유식 구조물에 의한 해양공간의 개발이 필요하다.

부유식 구조물은 여러 개의 구조체를 접합하여 해상에 띄워 용도에 따라 사용하는 형태로 기본적으로 선박과 마찬가지로 부력에 의해서 구조물의 자중을 지탱한다. 부유식 구조물은 구조물이 직접 해저면에 접촉하지 않으므로 해저지반의 특성에 영향을 받지 않는다. 또한 환경적인 측면에서 매립에 비해 우위성이 있고, 입체적 공간 활용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 수면 위에 떠 있는 형태를 띠고 있으므로 파랑과 바람 등 환경적 요인에 영향을 많이 받게 된다. 일반적으로 부유식 구조물의 수직 동요는 허용하되 수평 동요는 계류장치를 통해서 제어한다. 이러한 부유식 구조물 대한 장단점은 다음 Table 2-1로 정리된다.



Table 2-1 Merits and demerits of floating structure (정태영 외, 1999)

부유구조물	
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이동이 가능함</li> <li>- 구조물 자체는 해저지반의 지질에 무관</li> <li>- 계류관련시설 이외에는 수심에 무관</li> <li>- 설치장소 선택의 자유도가 큼</li> <li>- 지진에 대하여 안전</li> <li>- 증설, 확장, 제거가 용이</li> <li>- 여러 곳에서의 동시 병행 작업이 가능</li> <li>- 해역에 대한 환경영향이 적음</li> <li>- 건설공해가 적음</li> <li>- 지반침하나 부등침하에 영향이 없음</li> <li>- 경제성 향상의 여지가 많음</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 계류장치가 필요</li> <li>- 바람, 파도에 의한 다소의 운동성</li> <li>- 조수간만에 의해 절대 높이가 변화</li> <li>- 굽힘에 의한 구조물의 변위 발생</li> <li>- 구조방식에 따라 진동이 전해지지 쉬움</li> <li>- 새로운 환경변화를 일으킬 가능성</li> <li>- 내구성의 한계와 자산가치의 문제</li> <li>- 유지보수 비용에 대한 고비용 소요</li> </ul>



매립식과 부유식 구조물의 일반적인 장단점을 살펴보면 매립에 의한 해양공간 창출은 다양한 사례가 존재하며, 내구성이 우수하고 침하 완료 후 기반시설의 안정성을 확보할 수 있다는 장점이 있는 반면, 매립으로 인한 해양오염을 유발시키고, 침하 및 부등침하에 대해 상부시설의 안정성이 취약할 뿐만 아니라 구조물 건설의 최적지 부족으로 건설의 어려움이 발생할 수 있다. 또한 수심이 깊을 경우 초기 투자비가 급격히 증가되는 단점이 있다.

이에 비해 부유식 구조물의 경우는 구조물 자체가 이동가능하며 기존에 연안에 존재하는 구조물이나 항만과 연계하여 다양한 형태로 활용하는 장점이 있으며, 해저기반의 지질, 지진 등과 무관하게 건설할 수 있고, 계류시설 이외에는 수심과 무관하기 때문에 매립식에 비해 경제적일 수 있으며, 구조물의 증설, 확장, 제거가 용이하고, 설치장소 선택도 자유로울 수 있다. 또한 구조물 상부시설에 영향을 미치는 지반침하나 부등침하의 영향이 거의 없으며 해양환경에 영향을 거의 미치지 않아 환경친화적이다.

반면에 부유식 구조물을 이용한 대규모 해상공항이나 항만의 건설은 아직 검증되지 않은 기술이며, 특히 구조물의 진동으로 인해 불안정 요소가 발생할 수 있고, 매립식 구조물에 비해 유지보수비용이 과다하게 소요될 것으로 보이고, 내구성의 한계가 있을 것이라는 단점이 예상된다.

## 2.2 초대형 부유식 해양구조물 연구사례

Table 2-2에 보인 바와 같이 수 km급의 메가플로트에 대한 구상은 1942년 에드워드 암스트롱에 의해 처음으로 이루어졌다. 그는 대서양 횡단비행의 중계기지로서 반잠수식인 크기 418(L)×107(B)m 의 부유식 해상공항을 구상하였다. 이후 해상공항, 해상도시, 해상물류터미널 등의 수많은 메가플로트급의 부유식 구조물에 대한 구상, 제안이 이루어져 왔으나 현재까지 실현되지는 않고 있다.

실용화를 위해서는 실제로 구조물을 만들어서 기술을 검증하는 과정이 필수적이다. 일본에서는 이러한 점을 인식하여 메가플로트의 실현을 앞당기기 위해, 13개의 조선사와 4개의 철강회사를 조합원으로 하는 메가플로트 기술조합을 1955년 4월에 설립하고, 운수성, 일본선박진흥회 및 참여기업의 공동투자 방식으로 총 75억엔의 순수연구비를 투입하여 세계 최초로 대규모 실증적 연구 프로젝트를 3년간 (1995~1997) 수행하였다.

메가플로트 기술조합 연구 프로젝트의 주요 내용은 100(L)×20(B)×2(D)m 크기로 9개의 부유체 유닛(unit)을 제작하고, 이들 각 유닛을 해상에서 접합하여 300(L)×60(B)×20(D)m 크기의 대형 부유체 모델을 완성한 다음 실험역 실증시험을 통하여 부유식 구조물 설계기술, 해상시공기술, 초장기 (100년 이상) 수명 유지 기술, 탑재시설 기능보증 기술 및 환경 영향평가 기술의 5개 분야에 대한 연구개발을 수행하였으며, 동경만 근처 스미모토 조선소 앞바다에 실험역 실험장을 설치하였다.

일본 운수성에서는 본 연구의 후속 프로젝트로서 1998년부터 3년간에 걸쳐 동경만에 길이 1,000m의 활주로를 폰툰 방식으로 건설하여 세스나 비행기, 70인승 YS11 비행기 등의 이착륙을 실증함으로써 부유식 해상공항 건설의 실현을

위한 본격적인 활동을 시작하였다. 실증설비의 건설에 필요한 투자액은 약 114 억엔 규모이며 운수성, 참여기업 및 일본재단의 공동투자를 통해 재원을 마련 하였다. 이 계획은 메가플로트의 실용화에 불을 당긴 오키나와 미군 비행장 반환 후의 대체기지로서 제안된 부유식 해양기지 (1500(L)×450(B)m 규모) 보다도 먼저 실행되어, 해상공항을 목표로 한 메가플로트의 대규모 실증적 연구가 될 전망이다. (정태영 외, 1998; 홍사영 외, 2001; 양창호 외, 2003)



Table 2-2 Examples of VLFS (양창호 외, 2003) (continued)

구상 프로젝트명	제안자	공표 년도	개요 (규모, 구조방식 등)
SEADROME	Armstrong	1924	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대서양 횡단 비행의 중계기지로 계획된 세계 최초의 부유식 해상공항구상</li> <li>· 반잠수식 418(L)×107(B)m</li> </ul>
뉴욕 Offshore Airport	L. Lerner & Graham	1973	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 뉴욕의 연안 5마일에 본격적인 부유식 해상공항 설치를 제안</li> <li>· pontoon 방식</li> </ul>
칸사이 국제 공항 제1기 공사	일본조선공업 회	1977	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반잠수식, 돌핀 계류방식</li> <li>· 부체 위에 주 착륙대와 제설비를 설치하고, 육상에 터미널 설치</li> <li>· 면적 576ha, 강제중량 550만톤</li> </ul>
도쿄항 공항도시	공항도시연구 회	1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 동경만 횡단도로, 카와사키 인공섬 주위에 부유식 구조물을 계류</li> <li>· pontoon 방식</li> </ul>
해상복합 물류터미널	마린플로트추 진기구	1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반잠수식</li> <li>· 면적 20 ha</li> </ul>
Mutlti - Use Floating Complex	미국 Naval Ocean Systems Center	1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반잠수식</li> <li>· 해수온도차 발전설비 탑재</li> <li>· 면적 1ha, 조립식으로 이동가능</li> </ul>
오사카만 부유식 인공섬	일본 강구조협회	1993	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반잠수식</li> <li>· 면적 120 ha</li> </ul>
칸사이 국제공항 제2기 공사	마린플로트 추진기구	1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 강제 pontoon 방식의 부유체, 돌핀계류방식, 방파제 포함</li> <li>· 면적 850 ha, 강제중량 335만톤</li> </ul>

Table 2-2 Examples of VLFS (양창호 외, 2003)

구상 프로젝트명	제안자	공표 년도	개요 (규모, 구조방식 등)
Mobile Offshore Base (MOB)	Brown & Root Inc.	1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 세계 최로의 이동식 해상기지</li> <li>· 반잠수식</li> <li>· 914(L)×91(B)×65(D)m</li> <li>· 각각의 2개의 thruster &amp; RO/RO module 포함</li> </ul>
	McDermott	1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 반잠수식</li> <li>· 1500(L)×91(B)×65(D)m</li> <li>· 8개의 thruster module 포함, 이동 속도 15knots</li> </ul>
자연에너지를 이용한 해상발전시험 기지	일리오스 저팬사	1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 풍력, 파력, 해류 및 태양관의 자연 에너지를 이용한 세계최초의 해상 발전기지</li> <li>· 100 MW급의 경우 5(L)×4(B) km 규모</li> <li>· 갑판 : 태양광 발전 패널</li> <li>· 측벽 : 풍력발전</li> <li>· 수면 : 파력발전</li> <li>· 해중 : 해류발전 장치 설치</li> </ul>

국내에서는 부유식 해상구조물의 친환경성, 실현 가능성 등을 인식하고 대학교, 산업체, 연구소 등이 연구를 시작하였다. 국내에서는 지난 1999년부터 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원이 '초대형 부유식 해상구조물 기술개발' 과제를 수행하였다. 정부에서는 1999년부터 2007년까지 3단계에 걸쳐 경제적이고 환경 친화적인 대규모 해양공간 창출을 위한 초대형 부유식 해상구조물 설계기술 개발을 목표로 연구를 주도한 바 있다.

Table 2-3 Domestic research cases for floating structures  
(양창호외, 2003)

구분	형태	용도	성과	사례
국내	초대형	해상구조물	- 초대형 구조물의 하부구조에 관한 기술 연구수행	- 한국기계연구원, 한국해양연구원, 울산대학교
			- 부유식 초대형 해상구조물 기획연구 수행	- 홍익대학교, 한국해양수산개발원, 한국해양대학교, 충남대학교
	해상터미널	- 플로팅터미널의 필요성 및 황해안의 최적지 선정 - 하역 시스템 기본구상	- 황해권 수송 시스템 연구 센터 한국해양수산개발원	

## 2.3 초대형 부유식 해양구조물의 연결구조

부유식 해양구조물의 크기가 대형화될수록 제작, 운송, 설치, 시공 등에서 많은 기술적인 문제가 발생한다. 특히 길이와 폭이 수 km에 이르는 초대형 부유식 해양구조물을 건설하기 위해서는 도크에서 모든 것을 건조하는 것은 불가능하다. 따라서 일정한 크기의 모듈화된 유닛으로 분할하여 건조한 후, 정해진 해역으로 운반하여 해상에서 각 모듈을 접합시켜야 한다. 모듈을 결합하여 고정하는 방법으로는 용접, 리벳팅, 볼팅 등 여러 가지 방법이 거론되고 있지만, 본 논문에서는 그 중 연결구(connector)를 이용한 연결방법에 초점을 맞추고 있다. 먼저 기존의 연구에서 제안된 연결방법에 대해 알아본다.



### 2.3.1 연결구를 사용한 방식

Fig. 2-1의 모듈형 부유식 예시 구조물은 비교적 소규모로 길이가 120m이고 폭이 60m인 부유식 해상주차장으로 10m×10m의 철근콘크리트 박스형 유닛 72개를 강재 커넥터로 연결하여 여수 엑스포 지역에 설치할 것으로 가정한 것이다. 구조물의 용도는 해상주차장으로 주차능력이 276대로 전체 크기가 120m×60m(길이×폭)이다. 각 유닛은 10m×10m 크기이고 구조형식은 철근콘크리트 박스로 높이는 3m 이다.

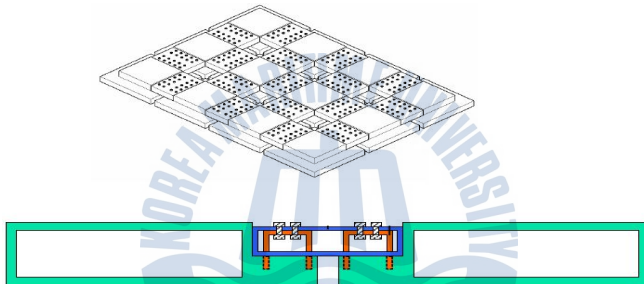


Fig. 2-1 Sketch of modular floating structure  
(김병완 외, 2006)

Fig. 2-1과 같은 방식은 유닛에 연결구를 사용하여 연결하는 방법으로 커넥터의 크기가 유닛에 비해 월등히 작기 때문에 다량 제작이 가능하고, 커넥터의 결합도가 클수록 유닛 간의 결합이 견고해진다. 또한 유닛의 연결 부분만 가공이 이루어지기 때문에 가공시간이 적게 걸리고 유닛 간 연결이 용접이 아니므로 분리가 비교적 용이하다. 그러나 커넥터가 집중하중을 받거나 힘을 너무 많이 받으면 파단 가능성이 있고 커넥터의 결합도가 떨어지면 유닛 간의 결합력 역시 떨어지기 때문에 안전에 문제가 발생할 수 있다. 그리고 커넥터에 응력집중 현상이 발생할 수 있어 연결구 형태에 대한 다양한 고려가 필요하다.



### 2.3.2 요철 형태의 연결

Fig. 2-2는 이동식 항구(mobile harbor)의 경량화를 목적으로 하는 대형 폴리머 콘크리트 데크를 위한 예시 구조물로 이동식 항구와 같은 대형 해양구조물에 적용하기 위해 샌드위치형 데크 구조로 이루어져 있다. 면내 방향의 인장, 압축하중을 지탱할 수 있는 면재와 이러한 면재를 서로 연결시켜주는 코어로 구성되어 있다. 내부가 중공 형태의 직사각형 단면 혹은 중공 형태의 원형 단면으로 구성될 수 있다. 여기서 모듈과 모듈은 접착제로 접합되어 배열될 수 있고, 블록 제작 시 철부와 요부를 만들어 끼워 넣거나 또는 그 사이에 접착제를 사용하여 조립하는 방법으로 배열될 수 있다. (KAIST, 2009)

그림은 요부가 구비된 위, 아래 판과 철부가 구비된 내부 유닛이 서로 맞물려 조립되는 것으로 샌드위치 면재 사이에 코어를 정확한 위치에 배치하고 조립 시 코어 간의 간섭을 최소화하기 위하여 그림과 같이 요부가 구비된 면재와 철부가 구비된 코어가 서로 맞물려 조립될 수 있다.

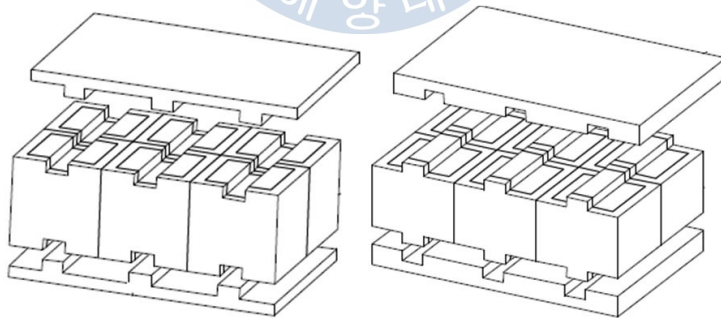


Fig. 2-2 Using rough surface method (KAIST, 2009)

Fig. 2-2와 같은 형식의 연결은 유닛에 홈을 파서 서로 끼워 넣는 요철 형태로 연결하는 방법이다. 이 방법은 유닛이 맞물리는 것만으로도 결합력이 생기고 유닛의 한 면 전체가 결합되는 것으로 아래, 위로 맞물려 태풍이나 심한 바람에도 붕괴의 위험이 적다. 반면 설치 시 홈이 크지 않으면 정교한 작업이 요구되고 유닛에 홈을 내는 작업이 시간이 많이 소요된다. 또한 홈이 정확하게 맞물리지 않으면 삐걱거릴 수 있고, 유닛 위에 설치된 상부건물의 붕괴 위험이 있다.

### 2.3.3 Post tension 공법을 이용한 연결

Fig. 2-3는 두 개의 폰툰 형식의 유닛을 밑 부분 양 끝에 나사가 절삭되어 있는 짧은 관 모양의 이음쇠인 소켓(socket)과 핀(pin)으로 고정을 시켜서 유닛 윗 부분에 deck winches를 보호한다. 그 다음 deck winches의 tension을 이용하여 두 개의 유닛 사이의 간격을 좁힌 다음 유닛 사이에 콘크리트를 부어 결합시키는 방법으로 토목, 건축계에서 사용하는 post tension 공법으로 두 개의 유닛을 결합시키는 방법이다.

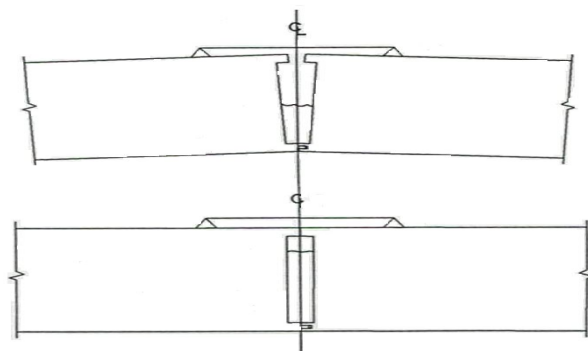


Fig. 2-3 Connecting adjacent pontoons  
(Gerwick B. C. et al, 1991)

### 2.3.4 MOB에서 제안된 연결구

Fig. 2-4는 미국의 Mobile offshore base에서 연구되어진 연결구를 이용한 연결 방법으로 다음과 같이 가정한다.

- 연결구로 연결한 모듈은 surge, sway, heave, roll motion은 허용하지 않는다.
- pitch, yaw motion은 허용한다.
- 최대 파고는  $45^\circ$  와  $H_s \leq 7.5m$ 로 제한한다.
- 강철 cable은 모듈간의 연결에서 축방향 인장력이 작용한다.

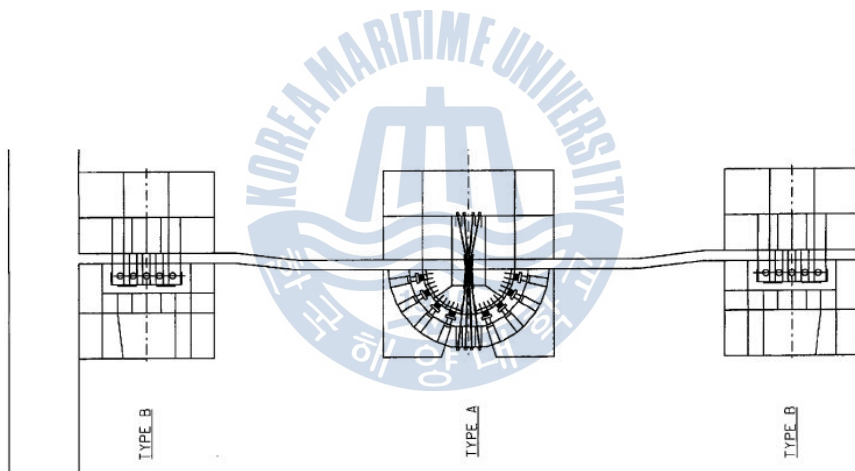


Fig. 2-4 Connector arrangement (Rognaas G. et al, 2001 )

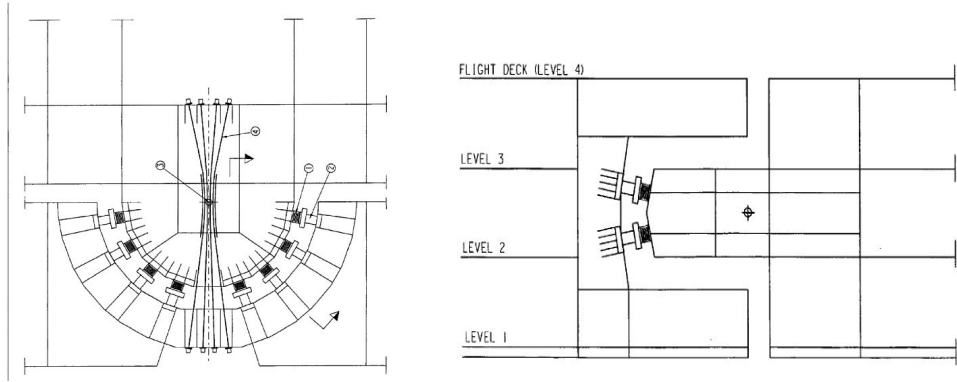


Fig. 2-5 Detail of central connector (Rognaas G. et al, 2001 )

그림에 제안된 연결방법은 모듈간에 결합이나 분리 시 수직방향의 움직임을  $\pm 2m$ 까지 허용한다. 이 연결방법은 elastomeric bearing, 유압잭, fender등을 이용한다. elastomeric bearing을 통해 연결하기 위해 유압잭이 필요하고, 유압잭은 다른 bearing에 똑같은 힘을 주기 위해서 유압회로에 연결되어 있다.

이러한 연결구를 이용한 모듈의 연결은 기상상태가 좋지 못할 경우 MOB 모듈의 빠른 분해가 가능하다.

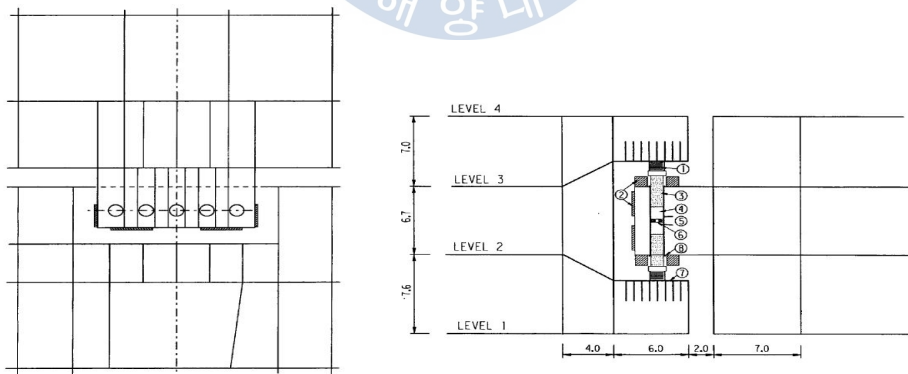


Fig. 2-6 Vertical/longitudinal section of wing connector (Rognaas G. et al, 2001 )

### 3. 새로운 연결구조 제안

기존의 연구에서 제안된 모듈 연결방법은 연결구를 사용하는 방법과 유닛을 가공해 요철 형태로 연결하는 방법이다. 연결구만을 사용하여 결합하였을 때는 연결구의 다량 제작이 가능하지만 연결구가 집중하중을 받아 파단될 가능성이 있다. 유닛을 요철 형태만으로 가공해 결합할 때는 유닛이 맞물리는 것만으로도 결합력이 생기지만, 유닛의 결합 작업 시 정교한 작업이 요구돼 시간이 많이 드는 문제가 있다.

본 연구에서는 연결구와 요철 형태 결합의 문제점을 보완하고자 연결구와 요철 형태의 장점을 결합하여 모듈을 연결하는 방법을 제안한다.



### 3.1 부유식 해상공항에의 응용

본 연구에서 제안하는 새로운 연결구의 응용 대상으로 생각하는 부유식 해상공항의 설계 시 고려사항을 정리하였다.

첫 번째 요소는 기상이다. 기상조건으로는 비행 안전을 위협하고, 결항의 원인이 되는 안개, 태풍 등이 적어야 한다. 또한 활주로의 방향은 기상, 장애물 및 항공소음 등의 요소를 동시에 고려하여 결정하되, 항공기 안전을 저해하는 측풍이 되지 않도록 바람의 방향과 동일해야 한다.

두 번째는 토지 이용이다. 해상공항의 경우 매립방식으로 공항을 건설할 시 해안 매립으로 인한 보상, 지장물 철거, 소음 등 공사에 지장을 초래할만한 소지가 없어야 하고, 토지의 추가 확보없이 확장이 가능하다.

세 번째는 해상공항을 건설할 경우 적용할 제작방식이다. 매립의 경우는 필요한 양의 매립재의 확보가 중요하지만, 모듈형의 유닛으로 나누어 부유식으로 제작할 경우 유닛에 사용되는 철강, 콘크리트 등이 많이 필요하고 규모가 크기 때문에 국내의 조선소 도크나 수심이 깊은 바닷가 안벽에 일회용 도크를 만들어 제작하는 방법을 이용해야 한다.

네 번째는 계류이다. 부유식 해양구조물 계류 방식을 선택할 때에는 구조물의 용도와 규모, 설치 장소에 따른 환경조건, 해저지반 조건, 건설비, 유지관리비 등을 고려하여 결정한다. 해상공항, 해상도시와 같이 초대형 부유식 해양구조물의 경우에는 기존의 해양구조물에 비해 규모가 매우 커서 특히 안정적인 계류시스템이 필요하다. 부유식 해양구조물의 일반적인 계류방식으로는 체인방식, 돌핀방식, 계류로프 방식 등이 있다. 그러나 초대형 부유식 해양구조물에 사용

되는 계류로는 국내·외 연구를 통해 돌핀-펜더 방식을 이용한 계류시스템이 적합한 것으로 보고되었다.

다섯 번째는 시공이다. 실제 초대형 구조물의 건조에 대한 경험은 없지만 다량의 연구자료가 존재하며 선박의 경우 해상 접합시공법은 이미 건조 사례가 있다. 초대형 해상구조물의 경우는 일본의 메가플로트 시공 사례를 참고할 수 있다.

여섯 번째 요소는 확장성이다. 추후 증가하는 공항 이용 수요를 처리하기 위해서는 언제 어떤 규모라도 공항 확장에 문제가 없어야 하고, 미래 공항 확장을 위한 부지의 이용이 쉬워야 한다. 해상공항의 경우 항공기 소음으로 인한 피해로부터 비교적 자유롭지만, 내륙 육상공항의 경우 공항의 확장을 위해서는 주변 토지의 매입이 필요하지만 항공 소음권역이 확대됨에 따라 사실상 확장이 불가능한 경우가 많다. 경쟁력을 갖춘 국제적 허브공항들은 대부분 해안지역에 건설되어 필요시 확장을 추진하고 있다.

본 논문에서는 해상공항의 설계 시 고려사항 중 확장성이 용이하고, 제작 및 시공의 편의성에 초점을 맞추어 해상공항의 하부구조 모듈식 연결방법을 다루고자 한다.

### 3.2 모듈형 부유식 해상공항의 개념

Fig. 3-1은 부유식 해양구조물 하부구조의 새롭게 제시하려는 부유체 연결구조의 개념도이다. 중간에 주 모듈을 기준으로 양옆으로 각각의 유닛을 결합시키는 방법이다. 하나의 주 모듈을 기점으로 양옆에 유닛들을 커넥터를 이용해 각각 결합시키는 것으로 면적을 늘리고 싶을 때 작은 유닛을 주 모듈에 추가로 결합 가능하다. 또한, 유닛의 분리도 가능하다. 유닛들의 결합과 분리가 비교적 자유롭기 때문에 태풍과 같은 자연 재해 시 유닛을 분리해 이동가능하며, 추가적인 기능을 갖는 구조물을 연결하여 면적을 늘리는 것도 가능하다.

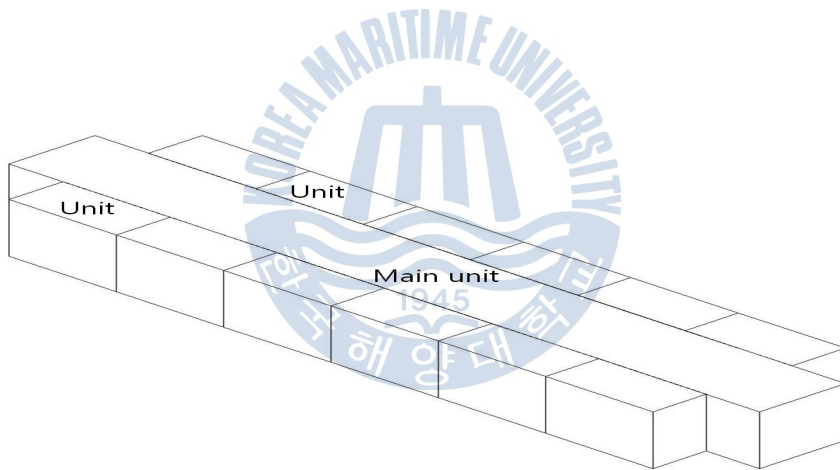


Fig. 3-1 Modular floating structure



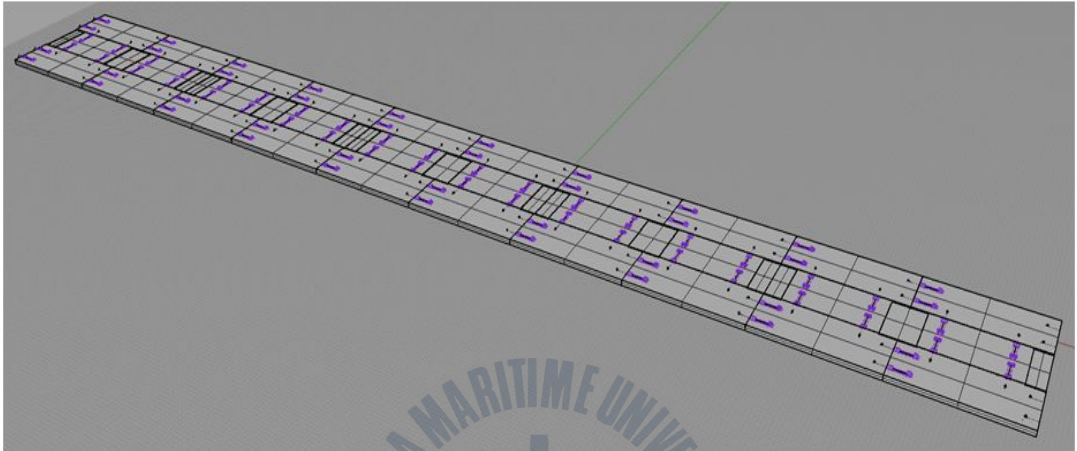


Fig. 3-2 Modular floating structure concept

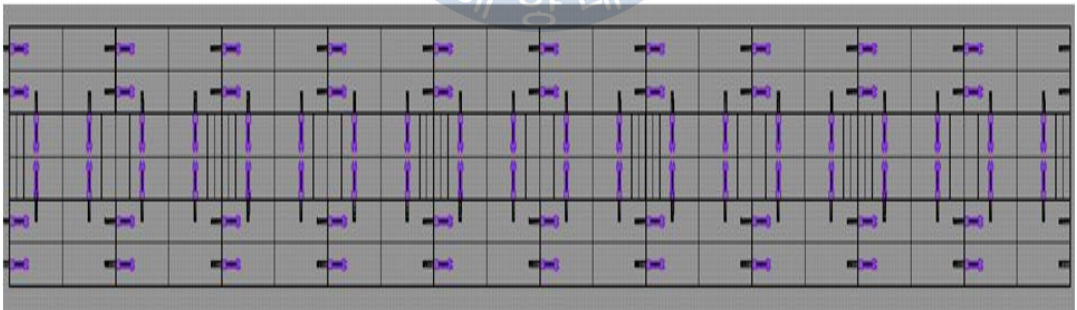


Fig. 3-3 Modular floating structure concept(front view)

### 3.3 주 모듈의 연결

Fig. 3-4는 주 모듈의 개념도로 이중구조로 되어있다. 하나의 유닛으로 제작하기 보다는 아래, 위 요철이 있어 맞물리는 형태의 이중구조로 제작함으로써 보다 견고한 결합이 가능하다. 주 모듈은 해상공항에서 활주로 역할을 하므로 보다 안정적인 결합이 필요하고 파도나 바람 등의 외력에 의한 동요가 적어야 한다. 주 모듈의 설치는 조선소에서 사용하는 해상크레인을 사용하여 유닛을 결합하고, 위, 아래 유닛 사이에 고무 패킹을 하여 유닛이 맞물릴 때 결합이 견고하고, 파도나 바람에 의해 유닛이 움직일 경우 고무패킹으로 인해 유닛간에 부딪히면서 나는 소음을 방지할 수 있다. 요철 형태의 결합은 설치 시 홈이 크지 않으면 연결 시 정교한 작업이 요구된다. 아래 유닛을 먼저 계류시켜 바지(barge)등을 이용해 고정시킨 다음 위의 유닛을 해상크레인으로 들어 올렸다 내리면서 결합하고, 위치 센서 등을 이용한다면 보다 정교한 결합이 이루어질 수 있다.

또한, 아래의 Fig. 3-4, Fig. 3-5와 같이 사각형 bar모양으로 홈을 내는 것 보다는 좀 더 복잡한 형태의 홈을 만들어 결합하는 것이 유닛의 제작 시간은 많이 들지만, 안정적인 결합을 가능하게 한다. 주 모듈뿐만 아니라 각 유닛에 추진을 위한 thruster를 장착한다면 전체 구조물의 이동이 가능하고, DPS(Dynamic Positioning System)로 위치를 유지시켜 해상에서의 유닛의 결합, 비행기의 이, 착륙 시 활주로의 안정적인 위치 유지 기능을 갖게 할 수 있다.

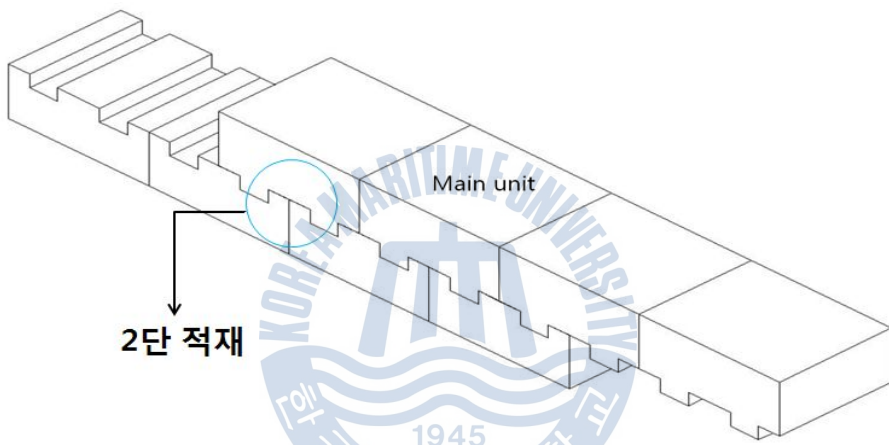
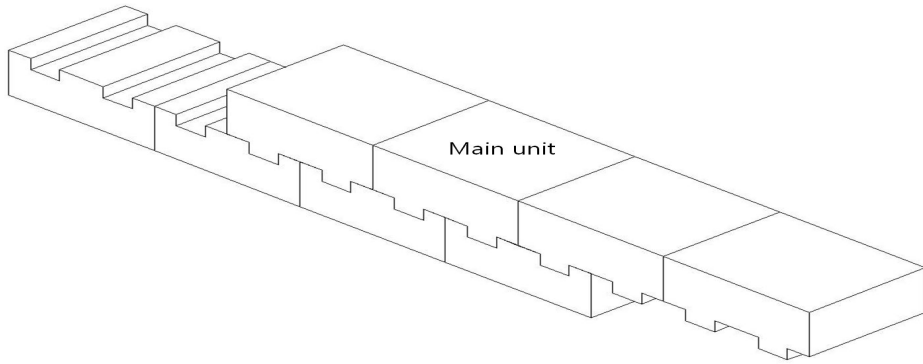


Fig.3-4 Main unit

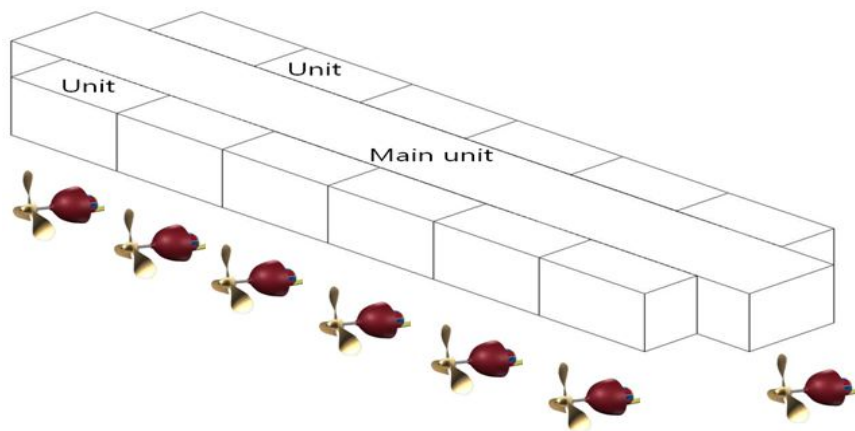


Fig. 3-5 Unit with thrusters

### 3.4 유닛과 유닛 연결 개념

Fig. 3-7은 각각의 소규모 유닛 간 연결로 연결구를 사용하여 연결하는 방법이다. 모듈이나 유닛의 크기에 따라 연결하는 방법은 다양하다. 유닛의 크기가 비교적 작다면 용접을 사용해서 결합하는 방법도 가능하지만, 유닛의 크기가 커진다면 용접을 하는 방법은 시간이 많이 걸리고 작업조건도 나빠진다. 따라서 독특한 형태의 연결구를 제시해 보았다. 커넥터는 우리나라 전통 대문의 잠금 기능을 하는 빗장의 형태로 유닛의 연결고리가 될 수 있는 홈을 만들고 유닛과 직각이 되는 유압실린더 바를 홈에 끼워 결합하는 방법이다.

유닛 내부에 유압실린더 바가 들어가서 결합할 수 있는 내부 공간을 만든 다음, 유압실린더 바를 넣었을 때 바와 공간사이에 공기를 공기개폐기를 통해 방출시킨다. 유압장치를 이용해 실린더 바를 넣었던 방향과 반대방향으로 잡아당겨 진공공간을 확보 하여 진공 공간만큼의 진공력으로 유닛사이를 결합한다. 유닛이 결합되면 유압실린더 바에서 고리가 나와 유압실린더바와 내부공간 사이를 고정한다. 유닛간의 결합을 풀고 싶을 땐 공기개폐기에 공기를 주입해 진공을 풀고, 유압장치를 해제하여 유닛을 분리한다.

유닛들을 연결하는데 있어 가장 중요한 사항은 결합력이다. 구조물 위에 건설될 상부구조의 용도가 활주로에서부터 호텔 등 사람이 주거하는 도시기능까지 확장될 수 있기에 구조적인 안전을 위해서 결합력이 가장 중요하다. 빗장 형태의 유압실린더는 전체 구조물의 운동을 좀 더 유연하게 허용함으로써 하중의 집중에 따른 구조손상을 예방할 수 있다.



Fig. 3-6 Concept of hydraulic cylinder

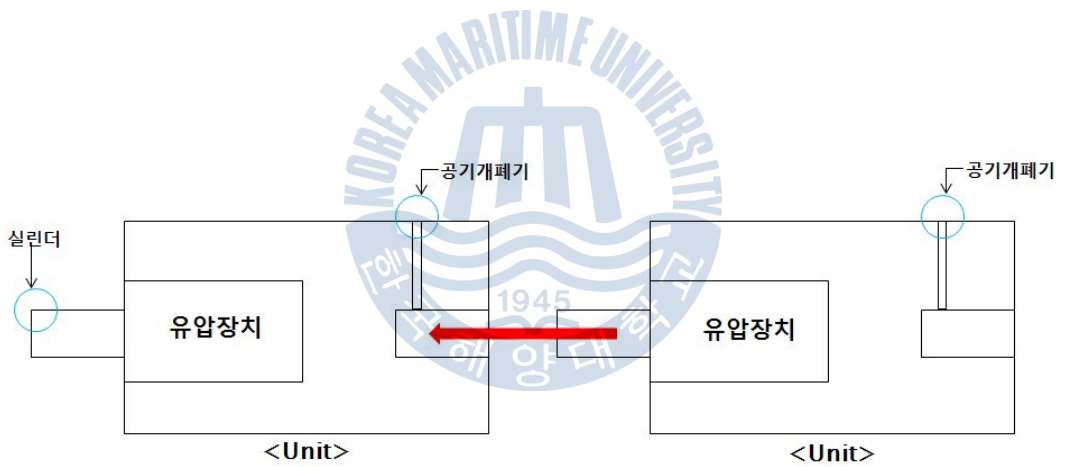


Fig. 3-7 Joining of unit to unit with a hydraulic connector

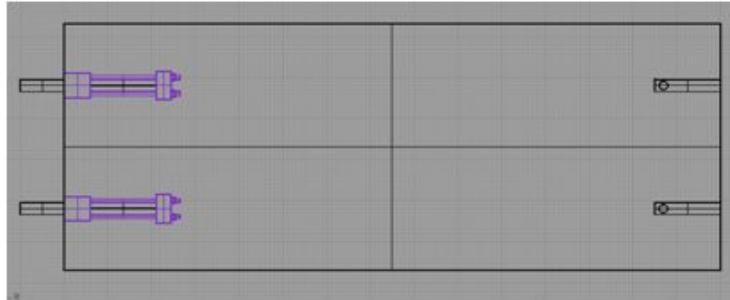


Fig. 3-8 Unit connector

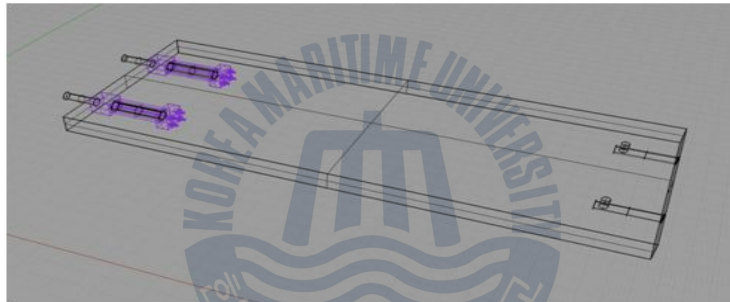


Fig. 3-9 Unit connector(perspective view)

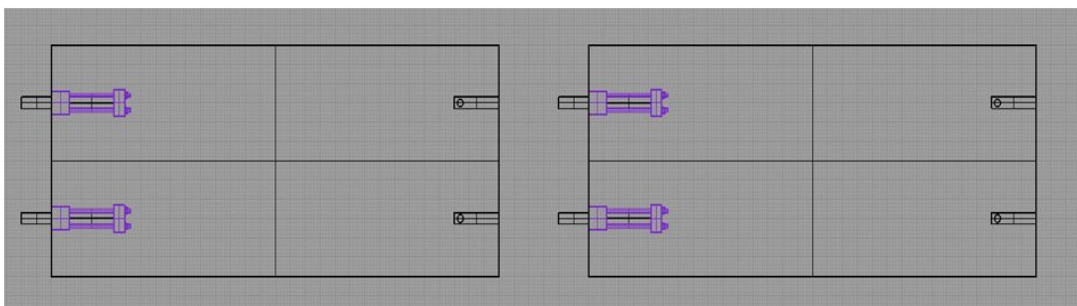


Fig. 3-10 Connection of two units(front view)

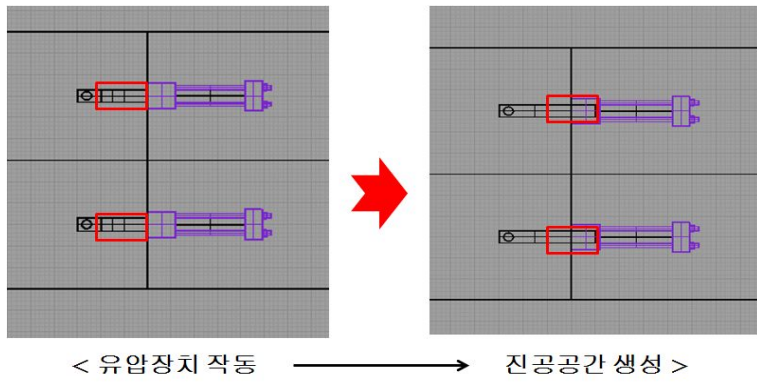


Fig. 3-11 Details of unit connection

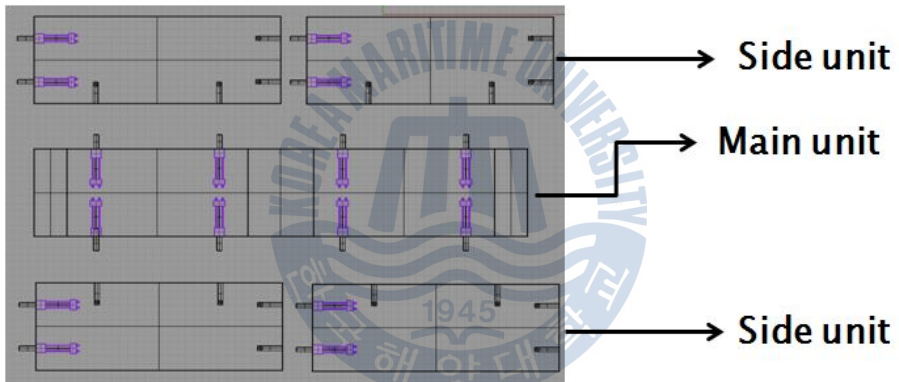


Fig. 3-12 Unit connection along side structures

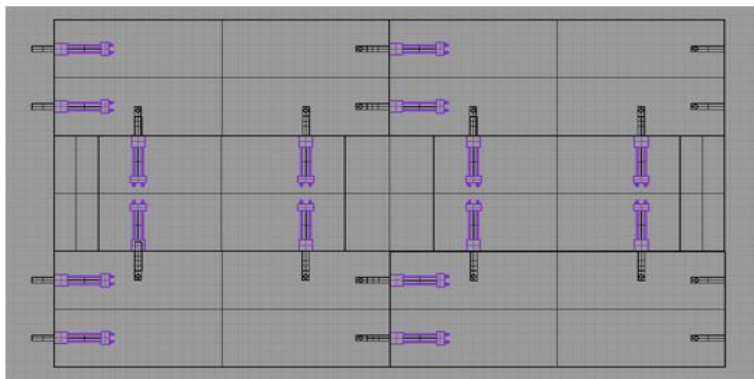


Fig. 3-13 Assembled units after connect



### 3.5 주 모듈과 Side 유닛의 연결 개념도

주 유닛의 측면에 수평방향의 긴 홈을 파고, side 유닛의 측면에 그 홈에 밀고 들어갈 수 있는 적합한 크기의 bar를 부착하여 side 유닛과 side 유닛이 접합할 때, 함께 주 모듈과 side 유닛을 접합하게 설계한다. Bar의 형태는 다양할 수 있다. 예를 들면, 롤러를 부착해서 밀고 들어가서 롤러를 직각으로 돌려 고정 시키거나, T형 바나 원기둥 형태의 bar를 사용할 수 있다. 롤러형의 bar는 유닛사이의 마찰이 적고 적은 힘으로 유닛을 결합시킬 수 있는 반면에 정확한 위치에서의 고정이 어렵다. T형 bar나 원기둥 형태의 bar의 경우에는 유닛 사이의 결합이 견고하나, 유닛을 밀고 들어갈 때 마모현상이 심하게 발생할 수 있다. 세 가지 방법 모두 bar에 작용하는 응력집중현상을 고려해야 한다.

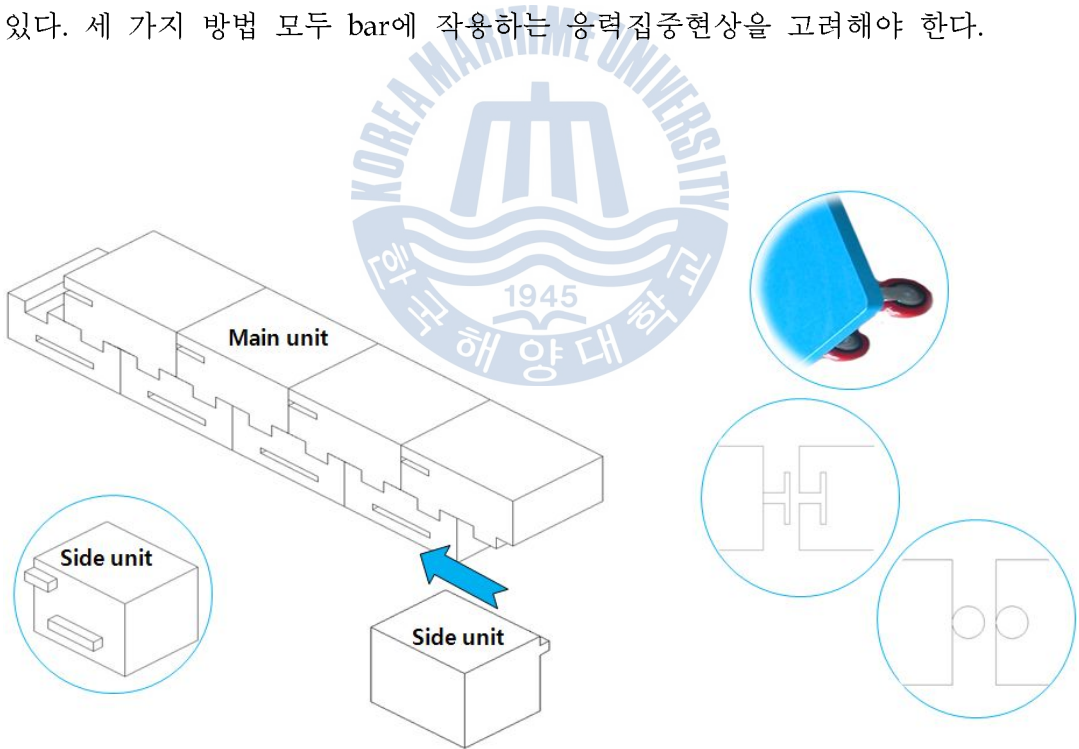


Fig. 3-14 Join main unit to side unit



### 3.6 해상공항을 위한 유닛의 제원 결정

기존에 수행된 해상공항 연구에서는 해상공항의 주요 제원을 주로 일본에서 실증시험을 수행한 모형인 Mega-Float의 제원을 사용하였다. 본 논문에서는 기존의 해상공항 및 초대형 해양구조물에 관한 제원들을 참고하여 유닛의 제원을 결정하였다.(Table 3-2)

전체 구조물의 면적은 인천국제공항의 활주로의 길이와 폭으로 결정하였다. 개별 유닛의 사이즈는 참고문헌을 통해 우리나라 조선소 도크 크기를 감안하여 결정하였다.

공항시설에는 활주로 1본(3,800m x 60m), 터미널 및 관제시설 등이 있다. 총 부유식 구조물의 면적이 3,800m x 180m 인 것은 활주로 역할을 하는 주 모듈에 양 옆의 side 유닛이 연결되어진 면적이다. 개별 유닛의 크기는 참고문헌을 통해 유닛 한 개당 150m x 60m로 정하고, 높이는 3~6m 사이로 결정하였다. 부유식 구조물의 면적을 유닛 한 개당 크기로 나누었을 때 주 모듈은 25개, side 유닛은 23개씩 총 71개의 유닛으로 구성된다.

Table 3-1 Unit specifications

공항면적	인천국제공항 여객터미널 면적
활주로 크기	3,800m x 60m (인천국제공항 활주로 면적)
부유구조물 면적	3,800m x 180m
unit 개수	main unit 개수 : 25개 side unit 개수 : 23개 총 unit 개수 : 71개
unit size	main unit size : 150m x 60m side unit size : 150m x 60m

Table 3-2 VLFS case study data (continued)

$L \times B \times D$	$300m \times 60m \times 2m$	규칙파중 항공기 이·착륙시 초대형 부유식 해양구조물의 천이 응답 해석 (신현경 외, 2001)
Draft	0.5m	
Water depth	8m	
EI(Bending stiffness)	$4.78 \times 10^8 KN-m^2$	
구조물 유한요소해석을 위한 판요소 분할 개수	36x8	
구조 모델의 총 자유도수	864개(3x36x8)	
항공기 질량	3000kg	
$L \times B \times draft$	$1000m \times 200m \times 1.5m$	방파제를 고려한 초대형 부유식 해양구조물의 응답 (이호영 외, 2001)
h	60m	
EI (=EI/B)	$7.5 \times 10^9 \text{ kgf/m}$	
LB (length of breakwater)	1400m	
C (the distance between structure and breakwater)	50m, 100m, 200m	
$L \times B \times D$	$4500m \times 1500m \times 6m$	부유식 해상공항의 구조 설계에 관한 연구 (박성환 외, 2001)
d	1.5m	
unit size	$150m \times 50m \times 6m$ (총 900개) (현재 국내 조선소 크기를 감안하여 결정)	
$L \times B \times D$	$300m \times 60m \times 2m$	불규칙파 중 초대형 부유식 해양구조물에 대한 운동 (신현경 외, 2000)
draft	0.5m	
수심	58.5m	

Table 3-2 VLFS case study data

$L \times B \times draft$	$1000m \times 200m \times 1.5m$	속도포텐셜집속법과 특이점분포법에 의한 방파제에 근접한 부유식 해상공항에 대한 유탄성 응답 해석 (이호영 외, 2002)
h	60m	
T	14sec	
$\beta$	45.90 degree	
EI (=EI/B)	$7.5 \times 10^9 \text{ kgf/m}$	
LB (length of breakwater)	1400m	
C (the distance between structure and breakwater)	50m, 100m, 200m	압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석 (이호영 외, 2000)
$L \times B \times D \times draft$	$300m \times 60m \times 2m \times 0.5m$	
h	8m, 107m	
E	$1.2175 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$	
$\lambda$	wave length of infinite depth	
$L \times B \times D \times draft$	$1200m \times 240m \times 4.5m \times 1m$	
h	20m	
E	$1.09 \times 10^{12} \text{ kg/m}^2$	
$\lambda_s$	wave length of infinite depth	

## 4. 연결구조의 설계

본 장에서는 앞서 제안한 연결구조의 안전성을 검토하기 위하여 VLFS를 구성하는 외판의 두께와 실린더의 직경에 대하여 간단한 이론 해석을 수행하여 연결부 유압실린더에 작용하는 응력과 변형률의 크기를 측정하고자 한다.

이와 더불어 좀 더 자세한 모델링을 통해 유한요소 해석을 수행하여 계산 결과를 검증하고자 한다.



## 4.1 유닛의 설계

길이가 수 km에 이르는 초대형 부유식 해양구조물은 일체형 구조로 제작하는 것이 어려우며 전체 구조물의 시공기간의 단축과 해상에서의 유닛을 모듈화하여 연결하기 위해 유닛의 분할 제작 및 결합이 필요하다.

하나의 기본 유닛의 형상과 치수가 결정되면 유닛을 이루는 주요 부재(외판, 선저판, 격벽판, 보강판)의 간격, 배치 등을 최적의 설계가 되도록 결정하여야 한다. 이들 유닛을 이루는 주요 부재의 형상은 선박 혹은 보통의 해양구조물을 이루는 구조부재와 유사하므로 이에 관한 설계지침서를 활용할 수 있다. 유닛을 이루는 주요 부재의 간격과 배치가 결정되면 부재의 치수를 결정할 수 있다. 보강된 평판, 혹은 보강된 shell 구조, 기둥 등의 치수는 초대형 부유식 해양구조물 Provisional Guidance(한국선급, 2006)을 활용 할 수 있다.

(홍사영, 2007)

적절한 적용 규칙이 없는 경우 대부분 탄성 설계법에 근거하여 구성부재를 간단히 보, 기둥, 혹은 평판, 곡판 요소로 모델링함으로써 직접 계산에 근거한 구조치수를 결정할 수 있다. 선박 및 해양구조물의 탄성설계 허용응력은 통상 아래 표와 같다.

Table 4-1 Allowance stress standard (홍사영, 2007)

응력형태	정상시 하중	이상시 하중
인장응력	$0.6\sigma_y$	$0.8\sigma_y$
굽힘응력	$0.6\sigma_y$ 혹은 $0.6\sigma_{cr}$ 보다 작은 값	$0.8\sigma_y$
전단응력	$0.4\sigma_y$ 혹은 $0.6\tau_{cr}$ 보다 작은 값	$0.53\sigma_y$
압축응력	$0.6\sigma_y$ 혹은 $0.6\sigma_{cr}$ 보다 작은 값	$0.77\sigma_{cr}$
조합응력	$0.7\sigma_y$	$0.9\sigma_y$
$\sigma_y$ = 항복응력, $\sigma_{cr}$ = 압축 좌굴응력, $\tau_{cr}$ = 전단 좌굴응력		

## 4.2 탄성보 이론을 이용한 계산

본 절에서는 초대형 부유식 해양구조물의 모듈에 탄성보 이론을 적용한 간단한 계산을 수행한다. VLFS 단일 유닛 2개의 연결체를 단일보로 가정하여 탄성보 이론을 적용한 후 처짐 계산을 통해 연결부 유압실린더에 작용하는 응력과 변형률을 계산할 수 있다. 유닛 외관의 두께와 유압실린더의 직경을 다양한 케이스별로 계산하여 적절한 범위를 측정할 수 있다.

### 4.2.1 유압실린더에 작용하는 하중

해상공항의 경우 길이와 폭이 수km 규모로 매우 크기 때문에 비행기의 이착륙시의 동적 및 충격하중과 여타 설비의 기계적 하중은 플랫폼 상부의 국부적인 변형을 발생시킬 수는 있지만 실제 연결부에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되며 따라서 연결부에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 VLFS의 자중과 부력의 차에 의한 굽힘변형으로 생각할 수 있다.

유닛의 자중은 분포하중으로 간주하되 실제 유닛의 내부에는 각종 보강재 및 기자재가 설치되어 있으나 이에 대한 세부적인 검토는 단순 계산의 취지에 적합하지 않으므로 고려하지 않았다. 본 논문에서 해석을 수행한 유닛의 모델은 직육면체의 보이다.

Table 4-2 Properties of dimension of the unit

Material	steel
$l \times B \times h$	$150 \times 60 \times 6 \text{ (m}^3\text{)}$
유닛의 외판 두께 t	0.01 ~ 0.1 (m)
실린더의 직경 d	0.1 ~ 1.0 (m)
$\rho_{steel}$	$7800\text{kg/m}^3$
유압실린더 개수	연결면당 10개

모델 전체에 작용하는 분포하중은 다음과 같이 구할 수 있다.



분포하중  $w = A \times \rho_{steel} \times g$

(4-1)

A : 직육면체 보의 면적

#### 4.2.2 탄성보 이론을 이용한 계산

앞 절에서 산정한 분포하중을 모델에 적용시키면 아래와 같은 탄성보의 문제로 이해할 수 있다. VLFS는 폭과 높이에 비해 매우 긴 형상을 가진 세장형 구조물이고 무게와 부력도 매우 크므로 전 길이 구간에 걸쳐 자연스러운 굽힘 현상이 발생하기 때문에 각 유닛의 연결부에서는 미소한 굽힘각이 발생한다. 또한 거대한 질량으로 인해 연결부의 상하동요는 거의 발생하지 않는다고 가정할 수 있다. 이러한 특성을 토대로 본 절에서 해석하는 모델의 경계를 양단단순지지로 가정할 수 있다.



Fig. 4-1 Free body diagram

먼저, 실린더에 작용하는 하중을 구하기 위해서는 실린더가 위치한 모델 중앙점에서의 굽힘모멘트를 구해야 한다. 유닛에 작용하는 집중하중에 의해 발생하는 처짐을 구한 후 탄성선의 미분방정식을 통해 굽힘 모멘트를 구한다.



분포하중에 의한 전체 처짐을 구한다.

- 양단자유지지보 + 분포하중에 의한 처짐 계산

$$y = \frac{wx}{24EI} \{(2l)^3 - 2(2l)x^2 + x^3\} \quad (4-2)$$

위와 같이 탄성보의 임의의 위치에서의 처짐을 구하였으므로 아래와 같은 탄성선의 미분방정식을 통해 굽힘 모멘트를 구할 수 있다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (4-3)$$

따라서 굽힘 모멘트 M은 아래와 같다.

$$M = \frac{wl}{6} - \frac{w}{4}x \quad (4-4)$$

실린더의 위치는 두 유닛의 중앙이므로  $x = \frac{l}{2}$ 에서의 굽힘 모멘트가 실린더에 작용함을 알 수 있다. 따라서 실린더에 작용하는 굽힘 모멘트는 아래와 같다.

$$M = \frac{wl}{6} + \frac{wl}{8} \quad (4-5)$$

연결부 유압실린더의 강도와 안전성을 검토하기 위하여 실린더가 위치해 있는 지점에서의 응력값과 변형률을 유닛의 굽힘을 통해 해석한다.

$$\sigma_y = \frac{My}{I} \tag{4-6}$$

실린더의 단면 2차 모멘트  $I = \frac{bh^3}{12}$

$y$  : 유닛 단면의 중립축으로부터 유압실린더가 위치해 있을 것이라 가정되는 위치까지의 거리

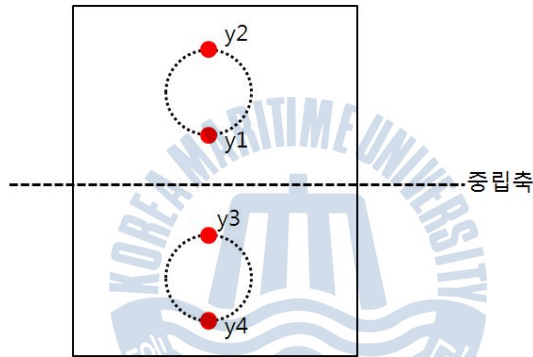


Fig. 4-2 Location of hydraulic cylinder

Hooke의 법칙에 따라 실린더에 작용하는 변형률은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ 또는 } \sigma = E\varepsilon \tag{4-7}$$

연결부 유압실린더의 원형 단면에 작용하는 힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = \sigma \times A_2 \tag{4-8}$$

$A_2$  : 원형 단면 실린더의 면적

Table 4-3 Maximum deflection of the unit (m)

unit thickness	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
max deflection	0.050168	0.100299	0.150394	0.200453	0.250475	0.30046	0.35041	0.400322	0.450199	0.500039

Table 4-4 Calculated stresses of the cylinder ( $\times 10MPa$ )  
 [row-unit thickness(m), column-hydraulic cylinder diameter(m)]

		0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.1	y1	0.211	0.421	0.630	0.839	1.048	1.256	1.464	1.671	1.877	2.084
	y2	0.225	0.450	0.674	0.897	1.120	1.343	1.565	1.786	2.007	2.227
0.2	y1	0.203	0.406	0.608	0.810	1.012	1.213	1.413	1.613	1.813	2.012
	y2	0.232	0.464	0.695	0.926	1.156	1.386	1.615	1.844	2.072	2.299
0.3	y1	0.196	0.392	0.587	0.781	0.976	1.169	1.363	1.556	1.748	1.940
	y2	0.240	0.479	0.717	0.955	1.192	1.429	1.666	1.901	2.136	2.371
0.4	y1	0.189	0.377	0.565	0.752	0.940	1.126	1.312	1.498	1.683	1.868
	y2	0.247	0.493	0.739	0.984	1.229	1.473	1.716	1.959	2.201	2.443
0.5	y1	0.182	0.363	0.543	0.724	0.903	1.083	1.262	1.440	1.618	1.796
	y2	0.254	0.508	0.761	1.013	1.265	1.516	1.766	2.016	2.266	2.515
0.6	y1	0.174	0.348	0.522	0.695	0.867	1.039	1.211	1.383	1.554	1.724
	y2	0.261	0.522	0.782	1.042	1.301	1.559	1.817	2.074	2.331	2.587
0.7	y1	0.167	0.334	0.500	0.666	0.831	0.996	1.161	1.325	1.489	1.652
	y2	0.269	0.537	0.804	1.071	1.337	1.603	1.867	2.132	2.395	2.658
0.8	y1	0.160	0.319	0.478	0.637	0.795	0.953	1.110	1.267	1.424	1.581
	y2	0.276	0.551	0.826	1.100	1.373	1.646	1.918	2.189	2.460	2.730
0.9	y1	0.152	0.305	0.456	0.608	0.759	0.910	1.060	1.210	1.360	1.509
	y2	0.283	0.566	0.848	1.129	1.409	1.689	1.968	2.247	2.525	2.802
1	y1	0.145	0.290	0.435	0.579	0.723	0.866	1.009	1.152	1.295	1.437
	y2	0.290	0.580	0.869	1.158	1.445	1.732	2.019	2.305	2.590	2.874

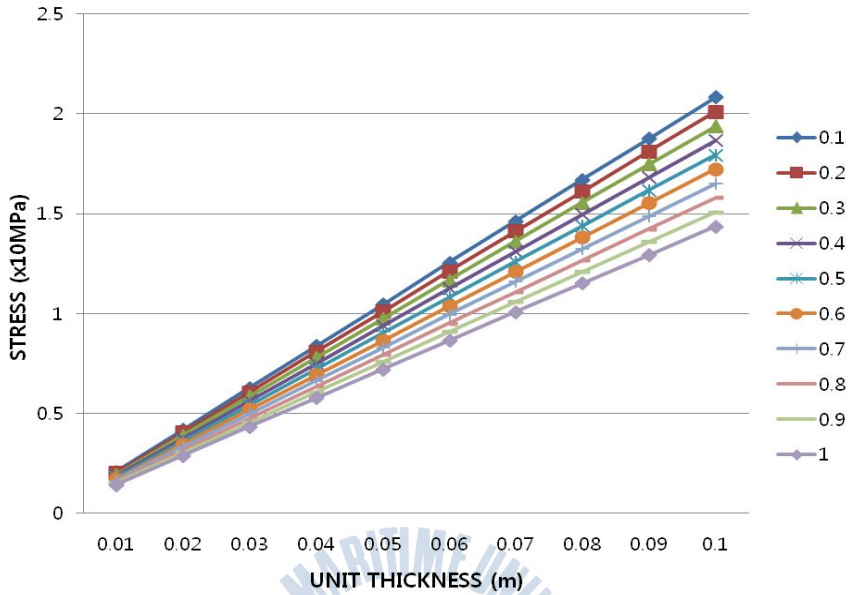


Fig. 4-3 Stress of hydraulic cylinder y1

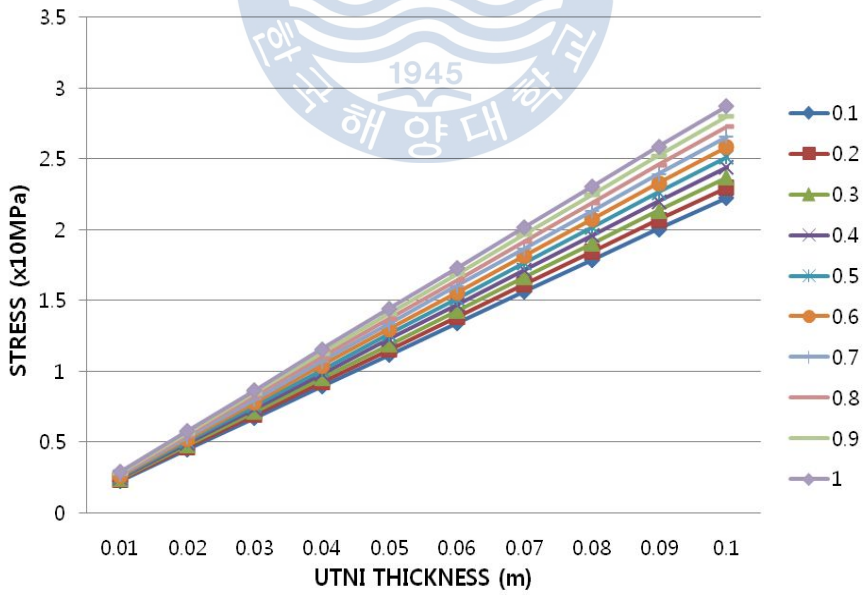


Fig. 4-4 Stress of hydraulic cylinder y2

Table 4-5 Calculated strain of the cylinder  
 [row-unit thickness(m), column-hydraulic cylinder diameter(m)]

		0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.1	y1	1.05E-05	2.10E-05	3.15E-05	4.20E-05	5.24E-05	6.28E-05	7.32E-05	8.35E-05	9.39E-05	1.04E-04
	y2	1.13E-05	2.25E-05	3.37E-05	4.49E-05	5.60E-05	6.71E-05	7.82E-05	8.93E-05	1.00E-04	1.11E-04
0.2	y1	1.02E-05	2.03E-05	3.04E-05	4.05E-05	5.06E-05	6.06E-05	7.07E-05	8.07E-05	9.06E-05	1.01E-04
	y2	1.16E-05	2.32E-05	3.48E-05	4.63E-05	5.78E-05	6.93E-05	8.08E-05	9.22E-05	1.04E-04	1.15E-04
0.3	y1	9.80E-06	1.96E-05	2.93E-05	3.91E-05	4.88E-05	5.85E-05	6.81E-05	7.78E-05	8.74E-05	9.70E-05
	y2	1.20E-05	2.39E-05	3.59E-05	4.78E-05	5.96E-05	7.15E-05	8.33E-05	9.51E-05	1.07E-04	1.19E-04
0.4	y1	9.44E-06	1.89E-05	2.83E-05	3.76E-05	4.70E-05	5.63E-05	6.56E-05	7.49E-05	8.42E-05	9.34E-05
	y2	1.23E-05	2.47E-05	3.69E-05	4.92E-05	6.14E-05	7.36E-05	8.58E-05	9.79E-05	1.10E-04	1.22E-04
0.5	y1	9.08E-06	1.81E-05	2.72E-05	3.62E-05	4.52E-05	5.41E-05	6.31E-05	7.20E-05	8.09E-05	8.98E-05
	y2	1.27E-05	2.54E-05	3.80E-05	5.06E-05	6.32E-05	7.58E-05	8.83E-05	1.01E-04	1.13E-04	1.26E-04
0.6	y1	8.71E-06	1.74E-05	2.61E-05	3.47E-05	4.34E-05	5.20E-05	6.06E-05	6.91E-05	7.77E-05	8.62E-05
	y2	1.31E-05	2.61E-05	3.91E-05	5.21E-05	6.50E-05	7.80E-05	9.08E-05	1.04E-04	1.17E-04	1.29E-04
0.7	y1	8.35E-06	1.67E-05	2.50E-05	3.33E-05	4.16E-05	4.98E-05	5.80E-05	6.63E-05	7.44E-05	8.26E-05
	y2	1.34E-05	2.68E-05	4.02E-05	5.35E-05	6.68E-05	8.01E-05	9.34E-05	1.07E-04	1.20E-04	1.33E-04
0.8	y1	7.99E-06	1.60E-05	2.39E-05	3.18E-05	3.97E-05	4.76E-05	5.55E-05	6.34E-05	7.12E-05	7.90E-05
	y2	1.38E-05	2.76E-05	4.13E-05	5.50E-05	6.87E-05	8.23E-05	9.59E-05	1.09E-04	1.23E-04	1.37E-04
0.9	y1	7.62E-06	1.52E-05	2.28E-05	3.04E-05	3.79E-05	4.55E-05	5.30E-05	6.05E-05	6.80E-05	7.54E-05
	y2	1.42E-05	2.83E-05	4.24E-05	5.64E-05	7.05E-05	8.45E-05	9.84E-05	1.12E-04	1.26E-04	1.40E-04
1	y1	7.26E-06	1.45E-05	2.17E-05	2.89E-05	3.61E-05	4.33E-05	5.05E-05	5.76E-05	6.47E-05	7.18E-05
	y2	1.45E-05	2.90E-05	4.35E-05	5.79E-05	7.23E-05	8.66E-05	1.01E-04	1.15E-04	1.29E-04	1.44E-04

Table 4-6 Force of the cylinder (kN)  
 [row-unit thickness(m), column-cylinder diameter(m)]

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.1	1.14E+01	2.28E+01	3.41E+01	4.55E+01	5.68E+01	6.80E+01	7.93E+01	9.05E+01	1.02E+02	1.13E+02
0.2	4.56E+01	9.11E+01	1.37E+02	1.82E+02	2.27E+02	2.72E+02	3.17E+02	3.62E+02	4.07E+02	4.51E+02
0.3	1.03E+02	2.05E+02	3.07E+02	4.09E+02	5.11E+02	6.12E+02	7.14E+02	8.14E+02	9.15E+02	1.02E+03
0.4	1.82E+02	3.65E+02	5.46E+02	7.27E+02	9.08E+02	1.09E+03	1.27E+03	1.45E+03	1.63E+03	1.81E+03
0.5	2.85E+02	5.70E+02	8.53E+02	1.14E+03	1.42E+03	1.70E+03	1.98E+03	2.26E+03	2.54E+03	2.82E+03
0.6	4.11E+02	8.20E+02	1.23E+03	1.64E+03	2.04E+03	2.45E+03	2.85E+03	3.26E+03	3.66E+03	4.06E+03
0.7	5.59E+02	1.12E+03	1.67E+03	2.23E+03	2.78E+03	3.33E+03	3.88E+03	4.43E+03	4.98E+03	5.53E+03
0.8	7.30E+02	1.46E+03	2.18E+03	2.91E+03	3.63E+03	4.35E+03	5.07E+03	5.79E+03	6.51E+03	7.22E+03
0.9	9.24E+02	1.85E+03	2.77E+03	3.68E+03	4.60E+03	5.51E+03	6.42E+03	7.33E+03	8.24E+03	9.14E+03
1	1.14E+03	2.28E+03	3.41E+03	4.55E+03	5.68E+03	6.80E+03	7.93E+03	9.05E+03	1.02E+04	1.13E+04

실린더의 직경(0.1~1m)과 유닛의 외벽의 두께(0.01~0.1m)를 케이스별로 각각 계산해보면 Table 4-5, Tabel 4-6, Table 4-7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 유압 실린더의 위치는 중립축에서 대칭이므로 y1위치에서의 응력은 y3위치에서의 응력과 부호는 반대이며 같은 값을 가지며, y2위치에서의 응력은 y4위치에서의 응력과 부호는 반대이며 같은 값을 가지므로 y1, y2 위치에서의 응력만을 표시 하였다.

유닛과 유압실린더의 재질은 steel이며 steel의 항복강도는  $2.5 \times 10^8 N/m^2$ 으로 앞서 제시된 Table 4-1 에 따라 항복강도의 0.6배에 해당하는 허용응력과 결과를 비교해 볼 때 steel의 허용응력 범위 내에 있는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 사용한 모델은 전체 VLFS의 형상 중 유닛 2개만을 대상으로 계산한 것이며, VLFS는 전체적으로 연결구조에 의해 유기적으로 연결되어 있어 전체 VLFS 내에서의 연결부 응력은 이보다 적은 값을 가질 것이라 예상할 수 있다. 본 모델은 유닛 내부에 보강재가 설계되어 있지 않은 점을 고려하여 추후 유닛 내부에 보강재를 포함하여 해석한다면 보다 적은 응력이 걸릴 것으로 예상할 수 있다.

보의 응력이 허용응력의 범위 안에 있는 경우에도 보의 처짐을 검토하여야 한다. 보의 처짐은 일반적인 건물의 경우 적재하중에 대하여 스패의 1/360, 또는 고정하중과 적재하중의 합에 대하여 스패의 1/300 이하로 하고 있다. 본 모델의 분포하중이 가장 크게 작용할 경우는 유닛의 두께가 10cm인 경우이다. 이때의 최대 처짐은 0.500039로 위의 보의 한계 처짐의 경우에도 만족함을 알 수 있다.

### 4.3 유한요소 프로그램을 이용한 해석

본 절에서는 앞서 간단한 계산을 통해 얻은 구조해석 결과를 검증하기 위하여 동일한 모델에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석을 위해 앞서 결정한 제원의 VLFS 유닛 2개가 유압실린더 10개로 연결되도록 모델링하였다. 모델의 역학적 거동은 자중과 부력에 의한 길이 방향의 굽힘현상이 주를 이루므로 이에 관한 실린더의 강도와 안전성을 검토하기 위해 유압실린더를 보의 형태로 가정하였다. 모델의 역학적 거동을 결정짓는 주요 하중요소인 자중을 분포하중으로 처리하였고 앞서 적용했던 양단지지 조건을 똑같이 적용하였다.

각각의 유닛은 동일한 크기의 균질한 직육면체이므로 이에 적합한 요소인 8node 육면체 요소를 적용하였는데 유닛 당 3000개의 요소로 분할하였다. 또한 유압실린더는 원형 단면의 보 요소로 가정하였다. 그리고 앞서 이용한 유닛 외벽의 두께와 실린더 직경을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 모델링은 UGS사의 NX 7.0을 이용하고 solver로 NX Nastran 6.1을 이용하였다.



유한요소 해석을 하기 위한 유닛과 유압실린더 모델링은 아래 그림과 같다. 유압실린더의 위치는 5개씩 2줄로 배치하며, 유닛의 두께와 실린더의 직경에 따른 유압실린더의 위치별 응력과 변형률을 구한다.

유닛의 두께는 0.01m ~ 0.1m 까지 0.01m 간격으로 가정하며, 유압실린더의 직경은 0.1m ~ 1.0m 까지 0.1m 간격으로 가정하여 해석을 수행하였다.

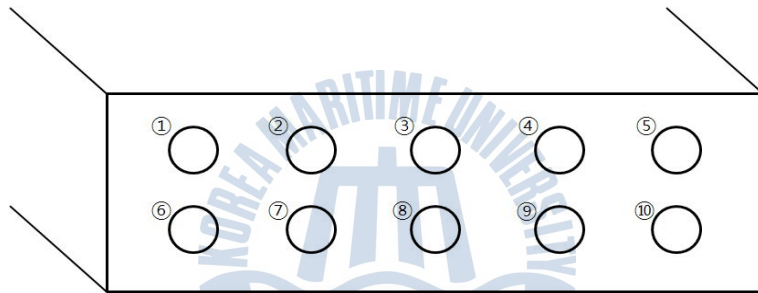


Fig. 4-5 Location of hydraulic cylinders

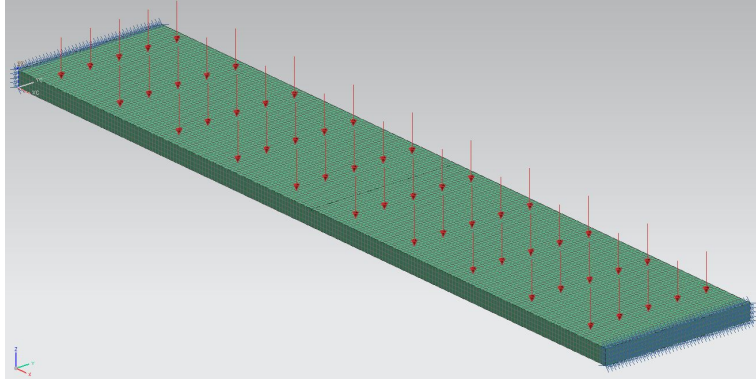


Fig. 4-6 Modeling of VLFS units

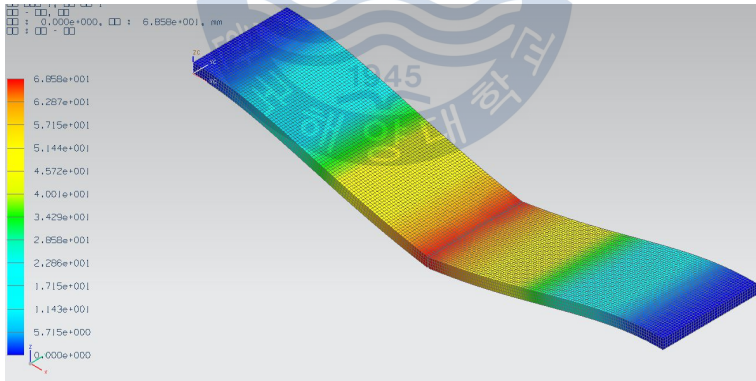


Fig. 4-7 Deformed after bending

Table 4-7 Calculated stresses(MPa) (continued)  
 [row-unit thickness(m), column-cylinder diameter(m)]

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.1	4.62E+02	9.24E+02	1.38E+03	1.85E+03	2.31E+03	2.77E+03	3.23E+03	3.68E+03	4.14E+03	4.60E+03
	4.33E+02	8.66E+02	1.30E+03	1.73E+03	2.16E+03	2.59E+03	3.02E+03	3.45E+03	3.88E+03	4.31E+03
	3.98E+02	7.97E+02	1.19E+03	1.59E+03	1.99E+03	2.39E+03	2.78E+03	3.18E+03	3.57E+03	3.97E+03
	3.53E+02	7.05E+02	1.06E+03	1.41E+03	1.76E+03	2.11E+03	2.46E+03	2.81E+03	3.16E+03	3.51E+03
	4.62E+02	9.24E+02	1.38E+03	1.85E+03	2.31E+03	2.77E+03	3.23E+03	3.68E+03	4.14E+03	4.60E+03
	4.27E+02	8.53E+02	1.28E+03	1.71E+03	2.13E+03	2.56E+03	2.98E+03	3.40E+03	3.83E+03	4.25E+03
	4.49E+02	8.98E+02	1.35E+03	1.79E+03	2.24E+03	2.69E+03	3.14E+03	3.58E+03	4.03E+03	4.47E+03
	4.78E+02	9.55E+02	1.43E+03	1.91E+03	2.38E+03	2.86E+03	3.34E+03	3.81E+03	4.28E+03	4.76E+03
	5.13E+02	1.03E+03	1.54E+03	2.05E+03	2.56E+03	3.07E+03	3.58E+03	4.09E+03	4.60E+03	5.11E+03
	5.67E+02	1.13E+03	1.70E+03	2.27E+03	2.83E+03	3.40E+03	3.96E+03	4.52E+03	5.09E+03	5.65E+03
0.2	2.19E+02	4.38E+02	6.57E+02	8.76E+02	1.09E+03	1.31E+03	1.53E+03	1.75E+03	1.97E+03	2.18E+03
	2.17E+02	4.33E+02	6.50E+02	8.66E+02	1.08E+03	1.30E+03	1.51E+03	1.73E+03	1.94E+03	2.16E+03
	2.16E+02	4.33E+02	6.49E+02	8.64E+02	1.08E+03	1.30E+03	1.51E+03	1.73E+03	1.94E+03	2.16E+03
	2.17E+02	4.33E+02	6.50E+02	8.66E+02	1.08E+03	1.30E+03	1.51E+03	1.73E+03	1.94E+03	2.16E+03
	2.19E+02	4.38E+02	6.57E+02	8.76E+02	1.09E+03	1.31E+03	1.53E+03	1.75E+03	1.97E+03	2.18E+03
	2.19E+02	4.38E+02	6.57E+02	8.75E+02	1.09E+03	1.31E+03	1.53E+03	1.75E+03	1.96E+03	2.18E+03
	2.17E+02	4.33E+02	6.49E+02	8.65E+02	1.08E+03	1.30E+03	1.51E+03	1.73E+03	1.94E+03	2.16E+03
	2.16E+02	4.32E+02	6.48E+02	8.64E+02	1.08E+03	1.29E+03	1.51E+03	1.72E+03	1.94E+03	2.15E+03
	2.17E+02	4.33E+02	6.49E+02	8.65E+02	1.08E+03	1.30E+03	1.51E+03	1.73E+03	1.94E+03	2.16E+03
	2.19E+02	4.38E+02	6.57E+02	8.75E+02	1.09E+03	1.31E+03	1.53E+03	1.75E+03	1.96E+03	2.18E+03
0.3	1.15E+02	2.31E+02	3.46E+02	4.61E+02	5.76E+02	6.90E+02	8.05E+02	9.20E+02	1.03E+03	1.15E+03
	1.13E+02	2.27E+02	3.40E+02	4.53E+02	5.66E+02	6.79E+02	7.92E+02	9.05E+02	1.02E+03	1.13E+03
	1.13E+02	2.26E+02	3.39E+02	4.52E+02	5.65E+02	6.78E+02	7.90E+02	9.03E+02	1.02E+03	1.13E+03
	1.13E+02	2.27E+02	3.40E+02	4.53E+02	5.66E+02	6.79E+02	7.92E+02	9.05E+02	1.02E+03	1.13E+03
	1.15E+02	2.31E+02	3.46E+02	4.61E+02	5.76E+02	6.90E+02	8.05E+02	9.20E+02	1.03E+03	1.15E+03
	1.15E+02	2.30E+02	3.45E+02	4.60E+02	5.75E+02	6.90E+02	8.04E+02	9.19E+02	1.03E+03	1.15E+03
	1.13E+02	2.27E+02	3.40E+02	4.53E+02	5.66E+02	6.79E+02	7.91E+02	9.04E+02	1.02E+03	1.13E+03
	1.13E+02	2.26E+02	3.39E+02	4.52E+02	5.65E+02	6.77E+02	7.90E+02	9.02E+02	1.01E+03	1.13E+03
	1.13E+02	2.27E+02	3.40E+02	4.53E+02	5.66E+02	6.79E+02	7.91E+02	9.04E+02	1.02E+03	1.13E+03
	1.15E+02	2.30E+02	3.45E+02	4.60E+02	5.75E+02	6.90E+02	8.04E+02	9.19E+02	1.03E+03	1.15E+03

Table 4-7 Calculated stresses(MPa) (continued)  
 [row-unit thickness(m), column-cylinder diameter(m)]

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.4	6.93E+01	1.39E+02	2.08E+02	2.77E+02	3.46E+02	4.15E+02	4.84E+02	5.53E+02	6.22E+02	6.91E+02
	6.80E+01	1.36E+02	2.04E+02	2.72E+02	3.40E+02	4.07E+02	4.75E+02	5.43E+02	6.10E+02	6.78E+02
	6.78E+01	1.36E+02	2.03E+02	2.71E+02	3.39E+02	4.06E+02	4.74E+02	5.41E+02	6.09E+02	6.76E+02
	6.80E+01	1.36E+02	2.04E+02	2.72E+02	3.40E+02	4.07E+02	4.75E+02	5.43E+02	6.10E+02	6.78E+02
	6.93E+01	1.39E+02	2.08E+02	2.77E+02	3.46E+02	4.15E+02	4.84E+02	5.53E+02	6.22E+02	6.91E+02
	6.93E+01	1.39E+02	2.08E+02	2.77E+02	3.46E+02	4.15E+02	4.84E+02	5.53E+02	6.21E+02	6.90E+02
	6.80E+01	1.36E+02	2.04E+02	2.72E+02	3.39E+02	4.07E+02	4.75E+02	5.42E+02	6.10E+02	6.77E+02
	6.78E+01	1.36E+02	2.03E+02	2.71E+02	3.38E+02	4.06E+02	4.73E+02	5.41E+02	6.08E+02	6.75E+02
	6.80E+01	1.36E+02	2.04E+02	2.72E+02	3.39E+02	4.07E+02	4.75E+02	5.42E+02	6.10E+02	6.77E+02
	6.93E+01	1.39E+02	2.08E+02	2.77E+02	3.46E+02	4.15E+02	4.84E+02	5.53E+02	6.21E+02	6.90E+02
0.5	4.59E+01	9.17E+01	1.37E+02	1.83E+02	2.29E+02	2.75E+02	3.20E+02	3.66E+02	4.11E+02	4.57E+02
	4.49E+01	8.98E+01	1.35E+02	1.79E+02	2.24E+02	2.69E+02	3.13E+02	3.58E+02	4.03E+02	4.47E+02
	4.48E+01	8.95E+01	1.34E+02	1.79E+02	2.23E+02	2.68E+02	3.13E+02	3.57E+02	4.02E+02	4.46E+02
	4.49E+01	8.98E+01	1.35E+02	1.79E+02	2.24E+02	2.69E+02	3.13E+02	3.58E+02	4.03E+02	4.47E+02
	4.59E+01	9.17E+01	1.37E+02	1.83E+02	2.29E+02	2.75E+02	3.20E+02	3.66E+02	4.11E+02	4.57E+02
	4.58E+01	9.16E+01	1.37E+02	1.83E+02	2.29E+02	2.74E+02	3.20E+02	3.65E+02	4.11E+02	4.56E+02
	4.49E+01	8.97E+01	1.34E+02	1.79E+02	2.24E+02	2.69E+02	3.13E+02	3.58E+02	4.02E+02	4.47E+02
	4.47E+01	8.94E+01	1.34E+02	1.79E+02	2.23E+02	2.68E+02	3.12E+02	3.57E+02	4.01E+02	4.46E+02
	4.49E+01	8.97E+01	1.34E+02	1.79E+02	2.24E+02	2.69E+02	3.13E+02	3.58E+02	4.02E+02	4.47E+02
	4.58E+01	9.16E+01	1.37E+02	1.83E+02	2.29E+02	2.74E+02	3.20E+02	3.65E+02	4.11E+02	4.56E+02
0.6	3.24E+01	6.48E+01	9.72E+01	1.30E+02	1.62E+02	1.94E+02	2.26E+02	2.59E+02	2.90E+02	3.23E+02
	3.17E+01	6.34E+01	9.51E+01	1.27E+02	1.58E+02	1.90E+02	2.21E+02	2.53E+02	2.83E+02	3.16E+02
	3.16E+01	6.32E+01	9.48E+01	1.26E+02	1.58E+02	1.89E+02	2.21E+02	2.52E+02	2.81E+02	3.15E+02
	3.17E+01	6.34E+01	9.51E+01	1.27E+02	1.58E+02	1.90E+02	2.21E+02	2.53E+02	2.80E+02	3.16E+02
	3.24E+01	6.48E+01	9.72E+01	1.30E+02	1.62E+02	1.94E+02	2.26E+02	2.59E+02	1.11E+02	3.23E+02
	3.24E+01	6.48E+01	9.71E+01	1.29E+02	1.62E+02	1.94E+02	2.26E+02	2.58E+02	2.89E+02	3.23E+02
	3.17E+01	6.34E+01	9.50E+01	1.27E+02	1.58E+02	1.90E+02	2.21E+02	2.53E+02	2.83E+02	3.16E+02
	3.16E+01	6.32E+01	9.47E+01	1.26E+02	1.58E+02	1.89E+02	2.21E+02	2.52E+02	2.83E+02	3.15E+02
	3.17E+01	6.34E+01	9.50E+01	1.27E+02	1.58E+02	1.90E+02	2.21E+02	2.53E+02	2.85E+02	3.16E+02
	3.24E+01	6.48E+01	9.71E+01	1.29E+02	1.62E+02	1.94E+02	2.26E+02	2.58E+02	2.94E+02	3.23E+02
0.7	2.41E+01	4.82E+01	7.22E+01	9.62E+01	1.20E+02	1.44E+02	1.68E+02	1.88E+02	2.16E+02	2.40E+02
	2.35E+01	4.71E+01	7.06E+01	9.41E+01	1.18E+02	1.41E+02	1.64E+02	1.84E+02	2.11E+02	2.35E+02
	2.35E+01	4.69E+01	7.04E+01	9.38E+01	1.17E+02	1.41E+02	1.64E+02	1.83E+02	2.11E+02	2.34E+02
	2.35E+01	4.71E+01	7.06E+01	9.41E+01	1.18E+02	1.41E+02	1.64E+02	1.84E+02	2.11E+02	2.35E+02
	2.41E+01	4.82E+01	7.22E+01	9.62E+01	1.20E+02	1.44E+02	1.68E+02	1.88E+02	2.16E+02	2.40E+02
	2.41E+01	4.81E+01	7.22E+01	9.62E+01	1.20E+02	1.44E+02	1.68E+02	1.88E+02	2.16E+02	2.40E+02
	2.35E+01	4.70E+01	7.05E+01	9.40E+01	1.17E+02	1.41E+02	1.64E+02	1.84E+02	2.11E+02	2.34E+02
	2.35E+01	4.69E+01	7.03E+01	9.37E+01	1.17E+02	1.40E+02	1.64E+02	1.83E+02	2.10E+02	2.34E+02
	2.35E+01	4.70E+01	7.05E+01	9.40E+01	1.17E+02	1.41E+02	1.64E+02	1.84E+02	2.11E+02	2.34E+02
	2.41E+01	4.81E+01	7.22E+01	9.62E+01	1.20E+02	1.44E+02	1.68E+02	1.88E+02	2.16E+02	2.40E+02

Table 4-7 Calculated stresses(MPa)  
 [row-unit thickness(m), column-cylinder diameter(m)]

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.8	1.86E+01	3.71E+01	5.57E+01	7.42E+01	9.28E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.48E+02	1.67E+02	1.85E+02
	1.82E+01	3.63E+01	5.44E+01	7.25E+01	9.06E+01	1.09E+02	1.27E+02	1.45E+02	1.63E+02	1.81E+02
	1.81E+01	3.62E+01	5.42E+01	7.23E+01	9.03E+01	1.08E+02	1.26E+02	1.44E+02	1.62E+02	1.80E+02
	1.82E+01	3.63E+01	5.44E+01	7.25E+01	9.06E+01	1.09E+02	1.27E+02	1.45E+02	1.63E+02	1.81E+02
	1.86E+01	3.71E+01	5.57E+01	7.42E+01	9.28E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.48E+02	1.67E+02	1.85E+02
	1.86E+01	3.71E+01	5.57E+01	7.42E+01	9.27E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.48E+02	1.67E+02	1.85E+02
	1.81E+01	3.63E+01	5.44E+01	7.25E+01	9.05E+01	1.09E+02	1.27E+02	1.45E+02	1.63E+02	1.81E+02
	1.81E+01	3.62E+01	5.42E+01	7.22E+01	9.03E+01	1.08E+02	1.26E+02	1.44E+02	1.62E+02	1.80E+02
	1.81E+01	3.63E+01	5.44E+01	7.25E+01	9.05E+01	1.09E+02	1.27E+02	1.45E+02	1.63E+02	1.81E+02
	1.86E+01	3.71E+01	5.57E+01	7.42E+01	9.27E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.48E+02	1.67E+02	1.85E+02
0.9	1.48E+01	2.95E+01	4.42E+01	5.90E+01	7.37E+01	8.84E+01	1.03E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.47E+02
	1.44E+01	2.88E+01	4.32E+01	5.76E+01	7.19E+01	8.63E+01	1.01E+02	1.15E+02	1.29E+02	1.44E+02
	1.44E+01	2.87E+01	4.31E+01	5.74E+01	7.17E+01	8.60E+01	1.00E+02	1.15E+02	1.29E+02	1.43E+02
	1.44E+01	2.88E+01	4.32E+01	5.76E+01	7.19E+01	8.63E+01	1.01E+02	1.15E+02	1.29E+02	1.44E+02
	1.48E+01	2.95E+01	4.42E+01	5.90E+01	7.37E+01	8.84E+01	1.03E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.47E+02
	1.47E+01	2.95E+01	4.42E+01	5.89E+01	7.36E+01	8.83E+01	1.03E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.47E+02
	1.44E+01	2.88E+01	4.32E+01	5.75E+01	7.19E+01	8.62E+01	1.01E+02	1.15E+02	1.29E+02	1.43E+02
	1.44E+01	2.87E+01	4.30E+01	5.74E+01	7.17E+01	8.60E+01	1.00E+02	1.15E+02	1.29E+02	1.43E+02
	1.44E+01	2.88E+01	4.32E+01	5.75E+01	7.19E+01	8.62E+01	1.01E+02	1.15E+02	1.29E+02	1.43E+02
	1.47E+01	2.95E+01	4.42E+01	5.89E+01	7.36E+01	8.83E+01	1.03E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.47E+02
1	1.20E+01	2.40E+01	3.60E+01	4.79E+01	5.99E+01	7.17E+01	8.38E+01	9.57E+01	1.08E+02	1.20E+02
	1.17E+01	2.34E+01	3.51E+01	4.68E+01	5.85E+01	7.00E+01	8.18E+01	9.34E+01	1.05E+02	1.17E+02
	1.17E+01	2.33E+01	3.50E+01	4.66E+01	5.83E+01	6.98E+01	8.15E+01	9.31E+01	1.05E+02	1.16E+02
	1.17E+01	2.34E+01	3.51E+01	4.68E+01	5.85E+01	7.00E+01	8.18E+01	9.34E+01	1.05E+02	1.17E+02
	1.20E+01	2.40E+01	3.60E+01	4.79E+01	5.99E+01	7.17E+01	8.38E+01	9.57E+01	1.08E+02	1.20E+02
	1.20E+01	2.40E+01	3.59E+01	4.79E+01	5.98E+01	7.16E+01	8.37E+01	9.56E+01	1.08E+02	1.19E+02
	1.17E+01	2.34E+01	3.51E+01	4.68E+01	5.84E+01	6.99E+01	8.17E+01	9.34E+01	1.05E+02	1.17E+02
	1.17E+01	2.33E+01	3.50E+01	4.66E+01	5.82E+01	6.97E+01	8.15E+01	9.31E+01	1.05E+02	1.16E+02
	1.17E+01	2.34E+01	3.51E+01	4.68E+01	5.84E+01	6.99E+01	8.17E+01	9.34E+01	1.05E+02	1.17E+02
	1.20E+01	2.40E+01	3.59E+01	4.79E+01	5.98E+01	7.16E+01	8.37E+01	9.56E+01	1.08E+02	1.19E+02

유한요소 프로그램의 해석 결과는 4.2절과 마찬가지로 외판의 응력 값을 비교하였다. Table 4-8은 유한요소 프로그램으로 구한 응력값으로 음영부분은 steel의 항복응력 내에 존재하는 값들이다. 표에서 보듯 유닛의 두께가 두꺼울수록 직경이 작은 실린더는 파괴됨을 알 수 있고, 이로부터 실린더가 파단되지 않고 견딜 수 있는 유닛의 두께 범위를 측정할 수 있다.

Fig. 4-10은 유닛의 두께가 0.01m, 실린더의 직경이 0.5m일때의 응력값으로 가운데 실린더(실린더③, ⑧)를 기준으로 양옆으로 대칭적인 값을 가지며, 위, 아래 실린더에 작용하는 응력값 또한 대칭적인 값을 가진다. 다른 계산결과도 응력값이 실린더의 위치별로 Fig. 4-10과 같은 경향을 보인다.

유닛의 양끝쪽 실린더(실린더①, ⑤, ⑥, ⑩)에 가장 큰 응력이 작용함을 알 수 있다. 따라서 가장 큰 응력이 작용하는 위치에 있는 실린더를 선택하여 유닛의 두께와 실린더의 직경별로 표시하였다. (Table 4-9, 4-10, Fig. 4-11, 4-12)

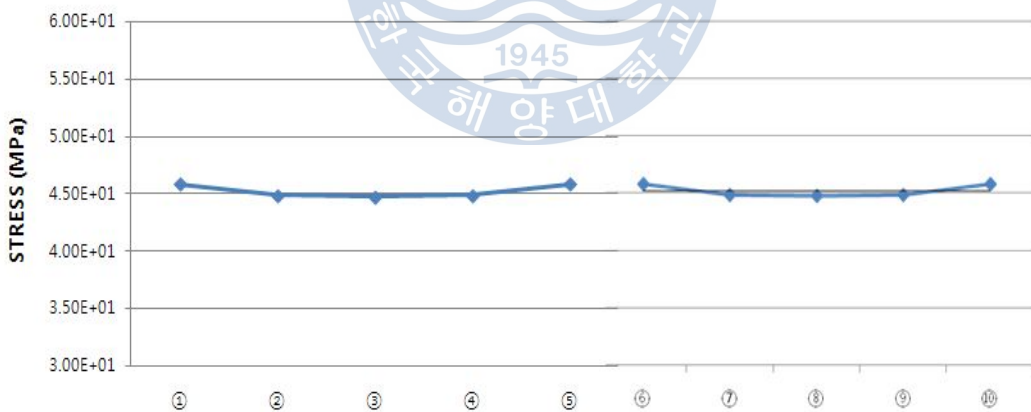


Fig. 4-8 Calculated stresses at the position of cylinders (cylinder diameter-0.5m, unit thickness-0.01m)

Table 4-8 Maximum stress of cylinder ①, ②, ③, ④, ⑤ (MPa)  
[row-unit thickness(m), column-cylinder diameter(m)]

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.1	4.62E+02	9.24E+02	1.38E+03	1.85E+03	2.31E+03	2.77E+03	3.23E+03	3.68E+03	4.14E+03	4.60E+03
0.2	2.19E+02	4.38E+02	6.57E+02	8.76E+02	1.09E+03	1.31E+03	1.53E+03	1.75E+03	1.97E+03	2.18E+03
0.3	1.15E+02	2.31E+02	3.46E+02	4.61E+02	5.76E+02	6.90E+02	8.05E+02	9.20E+02	1.03E+03	1.15E+03
0.4	6.93E+01	1.39E+02	2.08E+02	2.77E+02	3.46E+02	4.15E+02	4.84E+02	5.53E+02	6.22E+02	6.91E+02
0.5	4.59E+01	9.17E+01	1.37E+02	1.83E+02	2.29E+02	2.75E+02	3.20E+02	3.66E+02	4.11E+02	4.57E+02
0.6	3.24E+01	6.48E+01	9.72E+01	1.30E+02	1.62E+02	1.94E+02	2.26E+02	2.59E+02	2.90E+02	3.23E+02
0.7	2.41E+01	4.82E+01	7.22E+01	9.62E+01	1.20E+02	1.44E+02	1.68E+02	1.88E+02	2.16E+02	2.40E+02
0.8	1.86E+01	3.71E+01	5.57E+01	7.42E+01	9.28E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.48E+02	1.67E+02	1.85E+02
0.9	1.48E+01	2.95E+01	4.42E+01	5.90E+01	7.37E+01	8.84E+01	1.03E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.47E+02
1	1.20E+01	2.40E+01	3.60E+01	4.79E+01	5.99E+01	7.17E+01	8.38E+01	9.57E+01	1.08E+02	1.20E+02

Table 4-9 Maximum stress of cylinder ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩ (MPa)  
[row-unit thickness(m), column-cylinder diameter(m)]

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.1	5.67E+02	1.13E+03	1.70E+03	2.27E+03	2.83E+03	3.40E+03	3.96E+03	4.52E+03	5.09E+03	5.65E+03
0.2	2.19E+02	4.38E+02	6.57E+02	8.75E+02	1.09E+03	1.31E+03	1.53E+03	1.75E+03	1.96E+03	2.18E+03
0.3	1.15E+02	2.30E+02	3.45E+02	4.60E+02	5.75E+02	6.90E+02	8.04E+02	9.19E+02	1.03E+03	1.15E+03
0.4	6.93E+01	1.39E+02	2.08E+02	2.77E+02	3.46E+02	4.15E+02	4.84E+02	5.53E+02	6.21E+02	6.90E+02
0.5	4.58E+01	9.16E+01	1.37E+02	1.83E+02	2.29E+02	2.74E+02	3.20E+02	3.65E+02	4.11E+02	4.56E+02
0.6	3.24E+01	6.48E+01	9.71E+01	1.29E+02	1.62E+02	1.94E+02	2.26E+02	2.58E+02	2.89E+02	3.23E+02
0.7	2.41E+01	4.81E+01	7.22E+01	9.62E+01	1.20E+02	1.44E+02	1.68E+02	1.88E+02	2.16E+02	2.40E+02
0.8	1.86E+01	3.71E+01	5.57E+01	7.42E+01	9.27E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.48E+02	1.67E+02	1.85E+02
0.9	1.47E+01	2.95E+01	4.42E+01	5.89E+01	7.36E+01	8.83E+01	1.03E+02	1.18E+02	1.32E+02	1.47E+02
1	1.20E+01	2.40E+01	3.59E+01	4.79E+01	5.98E+01	7.16E+01	8.37E+01	9.56E+01	1.08E+02	1.19E+02

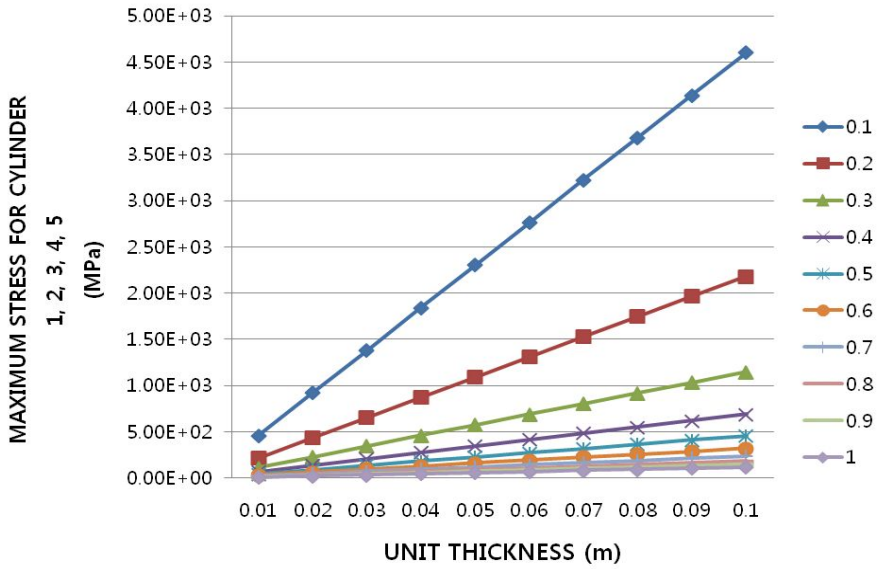


Fig. 4-9 Maximum stress of unit thickness of cylinder

①, ②, ③, ④, ⑤

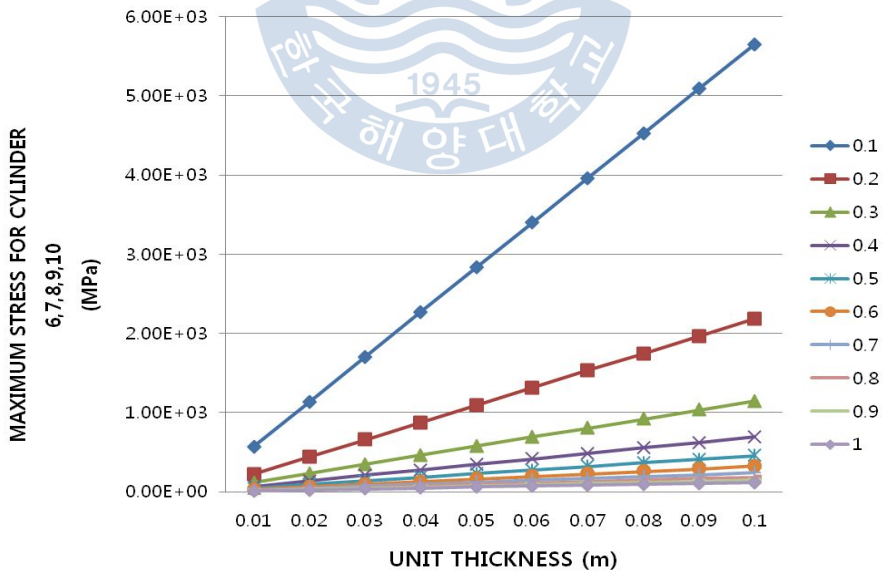


Fig. 4-10 Maximum stress of unit thickness of cylinder

⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩



## 5. 결 론

육상의 주거 공간 및 일상생활에 필요한 공간이 부족해짐에 따라 이러한 생활 공간의 수요를 충족시키기 위해 해양공간을 이용하는 방안이 제안되고 있는 현실이다. 본 논문에서는 초대형 부유식 구조물의 사례로 모듈화된 개별 부유식 구조물에 다양한 도시/교통 기능을 탑재하여 일체화시키는 것을 가정하고 있다. 초대형 부유식 해양구조물은 일체형으로 제작 및 시공에 어려움이 있어 하부구조를 비교적 소규모의 유닛(혹은 모듈)로 만들어 해상에서 결합하는 방법을 제안하였다. 기존 문헌에 제안된 여러 가지 연결구조에 관한 조사를 통해 장단점을 파악하였다. 기존의 연결방법은 연결구를 사용한 방식, 요철 형태의 연결, post tension 공법을 이용한 연결, MOB에서 제안된 연결구를 이용한 4가지 방법이 있는데 본 논문에서는 이러한 연결구조들의 단점을 보완할 수 있는 새로운 연결방식을 제안하였다.

본 논문에서는 모듈화된 초대형 부유식 해양구조물에 적용할 연결방식으로 레고 블록 형태의 요철을 가진 연결기구와 전통 대문의 빗장 모양 유압실린더로 구성되는 연결구조를 제시하였다. 레고 블록 형태의 연결구조는 모듈화된 구조물을 현장에서 연결하는데 용이할 뿐만 아니라 빗장 모양의 유압실린더는 전체 구조물의 운동을 유연하게 허용함으로써 하중의 집중에 따른 손상을 방지할 수 있다. 또한 기존의 연결구를 사용한 방식에서 연결구가 집중하중을 받거나 연결구의 결합력이 떨어지는 문제점을 보완하기 위하여 작은 직경의 유압실린더를 유닛과 유닛 사이에 이중구조로 다수로 배치함으로써 유압실린더에 걸리는 집중하중을 피하고 결합력을 높였다. 요철형태의 연결은 유닛의 홈이 정확하게 맞물리지 않으면 결합도가 떨어져 유닛 위에 설치된 상부구조의 붕괴 위험이 있으나, 본 논문에서 제안한 유닛의 옆면 홈을 이용하여 연결하면 결합도를 높일 수 있을 것이다. 레고 블록 형태의 연결구조를 이용하여 유닛을 연결함으로

써 새로운 기능의 모듈을 추가하거나 수명이 다한 모듈을 분리, 해체할 때에도 제안된 연결기구의 장점을 이용할 수 있다.

본 논문에서 제안한 연결구조의 안전성을 확인하기 위하여 전체 모듈 중 2개 유닛의 연결부분에서 유압실린더가 받는 응력, 변형률, 하중을 간단한 계산을 통해 살펴보았다. 또한 계산 결과의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석 상용프로그램(NX 7.0, Nastran)을 이용하여 동일한 모델에 대하여 구조해석을 수행하였다. 해석 결과로 연결부의 응력은 유닛의 재료인 steel의 허용응력 범위 내에 있음을 알 수 있었으며, 설계 시 요구되는 유닛의 두께와 실린더의 직경을 찾아낼 수 있었다.



## 참 고 문 헌

- [1] 김병완, 홍사영, 경조현 (2006). "모듈형 부유구조물의 적용성 연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 237-240.
- [2] 박성환, 이탁기, 홍사영 (2005). "폰툰식 VLFS의 초기구조설계에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제42권, 제6호, pp 644-653.
- [3] 신현경, 임춘규, 정재희 (2001). "초대형 부유식 해상공항의 시설계 (일반배치와 깊이 결정)", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 45-49.
- [4] 홍사영 (2008). 초대형 부유식 해양구조물 기술개발 최종 연구보고서, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소.
- [5] Gerwick B. C. and Firth C. R (1991). "Materials and Fabrication of Very Large Floating Structures : Criteria for Structural Performance", Proceeding of the First International Workshop On Very Large Floating Structures, pp 367-377.
- [6] KAIST (2009). 컨테이너 처리량을 획기적으로 증대하는 떠다니는 항구 연구 보고서, pp 85-92.
- [7] 지광습, 김진균, 이승오, 이필승 (2010). "초대형 부유식 해상구조물의 초기설계를 위한 설계차트 개발", 대한토목학회논문집, 제30권, 제3B호, pp 315-324.

- [8] 박성환, 정태영 (2001). “부유식 해상공항의 구조설계에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제38호, 제2권, pp 19-25.
- [9] 고팡오, 정광희, 이종세, 윤성범 (2010). “초대형 부유식 구조물을 활용한 에너지 아일랜드”, 물과 미래, 제43호, 제1권, pp 49-54.
- [10] 박주신, 고재용, 이경우 (2009). “초대형 해상구조물의 붕괴거동 및 최종강도 특성”, 한국항해항만학회지, 제33권, 제5호, pp 315-321.
- [11] 정태영, 정정훈 (1999). “해양공간 이용을 위한 부유식 해양구조물”, 토목학회지, 제47권, 제2호, pp 6-12.
- [12] 박영희 (2008). 초대형 콘크리트 부유식 구조물의 설계 및 해석에 관한 연구, 세종대학교 대학원 토목환경공학과 석사학위논문.
- [13] 양창호, 최상희, 김우선, 이주호, 장석 (2003). 부유구조물을 이용한 미래형 컨테이너터미널 개발방향 연구, 한국해양수산개발원 연구보고서.
- [14] 신현경 (1996). 부유식 해양구조물에 관한 연구보고서, 울산대학교.
- [15] KR (2006). 초대형 부유식 해상구조물 Provisional Guidance, 한국선급.
- [16] 홍사영 (2007). 초대형 부유식 해상구조물 설계메뉴얼, 한국해양연구원.
- [17] 정현, 오탈원, 남궁성, 김상배, 조철희 (2004). “해상 부유식 마린나의 초기 설계”, 한국해양공학회 추계 학술대회 논문집, pp 108-113.

- [18] 임채환 (1998). 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발 연구보고서, 한국기계연구원.
- [19] 강태윤 (2009). Mega-Float City, 경기대학교 건축학석사 학위논문.
- [20] Rognaaas, G., Xu, J., Lindseth, S. and Rosendahl, F. (2001).  
"Mobile offshore base concepts. Concrete hull and steel topsides", Marine Structures Vol.14, pp 5-23.
- [21] 신현경, 이호영, 임춘규, 강점문, 윤명철 (2001). "규칙과중 항공기 이·착륙시 초대형 부유식 해양구조물의 천이 응답 해석", 한국해양공학회지, 제15권, 제1호, pp 26-30.
- [22] 이호영, 신현경, 임춘규, 김외현, 강점문, 윤명철 (2001). "방파제를 고려한 초대형 부유식 해양구조물의 응답", 대한조선학회논문집, 제38권, 제2호, pp 26-30.
- [23] 신현경, 이호영, 임춘규, 신현수, 박인규 (2000). "불규칙과 중 초대형 부유식 해양구조물에 대한 운동", 대한조선학회논문집, 제37권, 제4호, pp 75-81.
- [24] 이호영, 광영기, 박종환 (2002). "속도포텐셜접속법과 특이점분포법에 의한 방파제에 근접한 부유식 해상공항에 대한 유탄성 응답 해석", 대한조선학회논문집, 제39권, 제2호, pp 11-18.
- [25] 이호영, 신현경, 신현수, 박인규 (2000). "압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석", 대한조선학회논문집, 제37권, 제4호, pp 66-74.

[26] 정태영 (1998). 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발 시스템 종합기술 개발 보고서, 한국기계연구원.

[27] 홍사영 (2001). 초대형 부유식 해상구조물 기술개발 보고서, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소.

[28] 양창호, 최상희, 김우선, 이주호, 장석 (2003). 부유구조물을 이용한 미래형 컨테이너터미널 개발방향 연구보고서, 한국해양수산개발원.

[29] 김상식, 윤성기 (2009). 강구조 설계, 문운당.

[30] 김정선, 최경식 (2011). “모듈형 부유식 해양구조물의 연결구조에 관한 연구”, 한국해양공학회 추계학술대회 발표논문집, pp 362-365.

