매개변수 연구를 통한 하이브리드형 부유식 구조물의 인장응력 발생 분석

A Parametric Study on Tensile Stress of a Hybrid Floating Structure System

지광습* · 이승정** · 곽연민*** · 정연주****

Zi, Goangseup · Lee, Seung-Jung · Kwak, Yeon-Min · Jeong Youn Ju

Abstract

A hybrid floating structure system combined with pontoon and semi-submersible type modules is proposed. This new system can reduce tensile forces of bottom slabs which could cause fatal damage of concrete floating structures. We performed a parametric study on the dimensions of this new system and investigate the sensitivity of the parameters to the behavior. In order to investigate various cases efficiently, we developed a simple two-step static analysis method for the fluid-structure interaction. An optimum system is derived from the investigation of the analysis results, weights and drafts of the hybrid structure. This study shows that introducing this new system to concrete floating structures is an effective way to reduce the tensile force of the bottom slab of such a floating structure. Also, it was found that when the length of the semi-submersible module is about 15%, the behavior would be optimal in the considered case.

Keywords: *very large floating structures(VLFS), container terminals, equivalent static analysis, preflexion*

요 지

본 논문에서는 폰툰형 콘크리트 부유구조체의 하부슬래브에 발생하는 인장력을 억제하여 구조적 안전성을 향상시킬 수 있는 방안으로 부유구조체 외측 모듈을 반잠수식 모듈로 구성하는 구조시스템을 제시하였다. 본 시스템의 적용성을 확인하기 위해 반잠수식 모듈 제원과 전체 시스템에 대한 반잠수식 모듈의 구성비를 변화시켜 외력에 대한 구조응답과 부유구조체 중량, 흘수를 종합적으로 검토하였다. 구조성능 검토 시 효율적인 매개변수 연구를 위해 이단계 등가 정적 해석법을 도입하였으며, 본 해석법을 바탕으로 시스템 제원 변화에 따른 각 구조부 작용 외력의 변화와 구조 거동을 분석하였다. 분석 결과, 본 시스템 도입 시 콘크리트 부유구조체의 하부슬래브 발생 인장력을 충분히 억제할 수 있는 것으로 나타났으며, 적절한 반잠수식 모듈의 구성비는 부유구조체 길이대비 약 15% 이하인 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 초대형 부유식 해상구조물, 컨테이너 터미널, 등가정적해석, 프리플렉션

1. 서 론

세계 경제규모가 확대되고 사회·문화적 국제 교류가 증가함에 따라 국내 항만의 컨테이너 물동량이 급증하는 추세에 있다. 전국 무역항 항만 기본계획에 의하면 2020년까지 추가되는 물동량에 대응하기 위해서는 국내 56 km 길이의 해안을 추가로 준설 매립해야할 실정이나, 국내 항만 건설을 위한 매립 가능 연안은 현재 포화상태에 이르렀으며, 최근 환경의식 고조에 따라 그나마의 적지 확보에도 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 우리나라를 비롯한 물류량 대비 가용 항만이 한정적인 선진 물류국가에서는 이에 대한 대책 마련이 시급한 문제로 떠오르고 있다.

이에 수심과 해저지형에 관계없이 해역 이용이 가능하고 해상 이동이 가능해 보다 효율적인 차세대 접안시설로 기대되고 있는 부유식 컨테이너 터미널에 대한 연구가 국내·외에서 활발히 연구되고 있다(ISSC, 2006; Pham과 Wnag, 2010; Wang 등, 2007; Watanabe 등, 2004; Zijian, 2007; 박성환 등, 2005; 지광습 등, 2008). 특히 부유식 컨테이너 항만 적용 시, 물류의 개선뿐만 아니라 동급의 컨테이너 항만 건설 시 소요되는 공사비용을 획기적으로 감축시킬 수 있을 것으로 예상되고 있어 해운 항만 물류의 중심 국가들에서는 실제 항만 건설계획 시 부유식 컨테이너 터미널 적용 여부에 대한 실질적 논의가 이루어지고 있다(KAIST, 2009).

*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : g-zi@korea.ac.kr)

**정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (E-mail : fincher7vn@korea.ac.kr)

***고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (E-mail : kwakym@korea.ac.kr)

****정회원 · 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원 · 공학박사 (E-mail : yjjeong@kict.re.kr)

다만 부유식 컨테이너 터미널은 부력에 의해 지지되는 구조 특성 상 상재하중에 의해 필연적으로 발생하는 구조체 중앙부의 처짐과 중앙부 하면에 발생하는 과대한 인장응력에 대한 고려가 반드시 필요하며, 이를 효과적으로 제어하기 위한 방안이 상용화를 위한 주요 기술적 현안으로 떠오르고 있다. 이에 따라 앞서 언급한 문헌에서 다양한 평면 형태에 대한 연구가 제시되었으며, 최근에는 일부 모듈에 수직방향의 해수유통이 가능하도록 속칭 ‘새격실’¹⁾(隔壁, gill cells) 모듈을 도입한 시스템(Pham과 Wnag, 2010; Wang 등, 2006; Wang 등, 2007)과 같이 일부 모듈의 부력을 제거시켜 부력에 의해 야기되는 구조적 문제들을 해결하고자 하는 아이디어가 꾸준히 제시되고 있다.

또한 콘크리트의 재료적 성능이 비약적으로 발전함에 따라 부유식 컨테이너 터미널의 구성 재료로써 강재 대신 콘크리트를 적용하고자 하는 시도가 점차 증가하고 있다(Keppel 등, 2007; 지광습 등, 2008; Kwak 등, 2011). 콘크리트를 부유식 컨테이너 터미널의 주재료로 사용했을 경우, 강재로 제작할 경우보다 제작비용이 저렴하며, 운용 시 낮은 유지관리 비용이 기대된다(LaNier 등, 2005; 삼성중공업, 2008).

하지만 압축강도에 비해 인장응력이 매우 낮은 콘크리트의 재료적 특성 상 인장응력 발생을 제어하기 위해 프리스트레스 콘크리트 구조의 채택은 거의 필수적이다. 특히 안정적인 부력 확보를 위해 부유체의 수밀성 유지는 매우 중요하며 이와 관련해서 하부 슬래브의 인장응력 제어는 매우 중요하다. 인장응력에 의해 발생하는 균열은 해수와 직접 접하는 부유체 하부의 내구성을 저하시키며, 해수의 침투를 야기하게 된다. 효율적인 긴장재 배치를 위해 먼저 탄성거동시 발생하는 인장응력을 저감하는 구조체 형식을 개발하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 폰툰형 부유구조체 하부의 발생 인장응력을 저감할 수 있도록 변형을 가하고 이의 응력발생 특성을 분석하였다.

2. 초대형 폰툰형 부유구조체의 발생 인장응력 (Kwak 등, 2011)

바지형이라고 일컬어지는 사각평판형 폰툰형 콘크리트 모듈만으로 구성된 부유식 컨테이너 터미널의 구조응답을 설계파고 5.4 m, 설계파장 100 m를 대상으로 480 m 크기의 정방형 폰툰형 부유구조체의 높이, 모듈의 크기를 변화시키며 상부슬래브와 하부슬래브, 외벽의 구조응답을 산출한 결과는 그림 1, 2와 같다(Kwak 등, 2011). 상세한 하중조건은 3장에서 자세히 논의하도록 한다.

폰툰형 콘크리트 모듈만으로 구성된 부유식 컨테이너 터미널은 하부슬래브에 가장 큰 인장응력이 발생하였다. 그러므로 인장응력으로 인해 발생하는 균열을 제어하기 위해 프리스트레싱과 더불어 슬래브 단면의 크기 증가가 불가피하다. 슬래브 단면의 증가는 부유구조체 중량을 증가시키며, 중량의 증가는 부유구조체의 흘수를 증가시키고, 흘수의 증가는 다시 부유구조체의 전체적인 높이증가를 야기하기 때문에 경제성 확보를 위해서는 슬래브 단면의 크기변화를 최소화시키고, 하부슬래브의 인장력을 효과적으로 억제할 수 있는 새로운 대안이 필요하다.

3. 인장응력 저감을 위한 하이브리드 구조시스템 개요

본 연구에서 고려하는 하이브리드 구조시스템은 기존의 폰툰형과 반잠수식 구조형식이 조합된 형태대로이며, 그림 3에 도시된 바와 같다. b_2 의 중공 길이를 갖는 반잠수식 모듈을 L_2 의 범위만큼 폰툰형 부유구조체의 외면에 결합하여 구성한다. 그림 3에 도시된 바와 같이 반잠수식 모듈의 내부로 해수의 유통이 가능하며, 일반 모듈과 비교할 때 부력 차이가 존재한다.

부력의 차이 때문에 그림 4의 절차를 통해 단일 구조물로

그림 1. 부유구조체 높이 변화에 따른 각 구조부 최대 인장응력

그림 2. 모듈 크기 변화에 따른 각 구조부 최대 인장응력

¹⁾ 인용한 논문에도 해수유통이 가능한 격실이라는 의미로 ‘gill cell’이라는 용어를 조어했으며, 본 논문에서는 저자가 원문의 의미와 상통하도록 아가미 격실이라는 의미의 한자어인 새격실(鰓隔壁)로 조어하였다.

[반 잠수식 하이브리드 형 모듈]

그림 3. 시스템 개요

그림 4. 하이브리드 모듈 접합을 이용한 하부슬래브 압축응력 도입 시스템

결합시 하부슬래브에 사전 압축력을 도입시킬 수 있는 구조적인 특징을 가진다. 기본적으로 그 형태적 특성 상, 반 잠수식 모듈은 폰툰형 모듈에 비해 큰 흘수를 갖기 때문에(그림 4(a)) 두 모듈 군을 하나의 부유구조체로 구성하기 위해 밸러스트를 이용하여 폰툰형 모듈의 중량을 증적하고 흘수를 일치시킨 뒤(그림 4(b)), 각 모듈을 접합시킨다. 이 후, 밸러스트를 제거하면 중량 복구에 따라 부유구조체의 흘수가 일부 회복되는데, 이때의 흘수는 반 잠수식 모듈의 고유 흘수보다 작고 폰툰형 모듈의 고유 흘수보다 큰 값을 가진다. 여기서

그림 5. 대상 부유구조체 평면 제원

표 1. 각 모듈의 기본 제원

	폰툰형 모듈	구 분
모듈의 평면 크기	10 m×10 m	10 m×10 m
상부슬래브 두께	0.65 m	0.65 m
하부슬래브 두께	0.65 m	0.65 m
외벽 두께		0.65 m
격벽 두께	0.30 m	

*위 제원은 본 분석을 위한 기본 제원이며 매개변수 분석을 위해서 본 제원에서 일정 수준의 변동폭이 고려되었다.

각 모듈 군은 각각의 흘수를 회복하기 위해 부유구조체 외면에서 침강 성향을, 중앙부에서는 부상 성향을 갖게 되며, 이때 발생하는 전체 구조계 부모멘트를 이용하여 하부 슬래브에 압축력을 도입시킨다(그림 4(c)).

그림 5에 도시된 바와 같이 컨테이너 야드에 65.6 kN/m², 에이프런에 19.6 kN/m²의 상재하중이 재하되는 480 m×480 m×14 m 규모를 갖는 부유식 컨테이너 터미널에 본 시스템을 도입하였으며, 각 모듈 군을 구성하는 모듈 제원은 표 1과 같다. 대상 컨테이너 터미널은 연안에 설치되는 것으로 가정하였으며, 한 방향으로 입사하는 설계파고 5.4 m, 설계파장 100 m의 파랑을 고려하였다.

4. 유체-구조체 상호작용을 고려한 등가 정적 해석기법

본 시스템을 구성하는 각 모듈의 평면 크기는 10 m×10 m로써, 모듈 내 발생하는 단면력을 유한요소 해석기법을 통해 산출하기 위해서는 이보다 작은 크기의 요소로 구성된 유탄성해석(hydroelastic analysis)이 필요하다. 2 m 단위 요소 분할 시, 대상 부유구조체의 유탄성 해석에 소요되는 시간은 CPU 3.0 GHz, 4.0GB RAM 사양을 사용할 때, 약 17시간이 소요된다(삼성중공업, 2008; 지광습 등, 2010). 그러므로 다양한 시스템 제원에 대한 매개변수 연구를 수행해야 하는 본 연구 특성상, 유탄성 해석은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

최근 연구(삼성중공업, 2008; 지광습 등, 2010)에 따르면 구조체 크기가 설계 대상 파장보다 매우 큰 경우에는 유탄성해석에 의한 결과와 파고의 높이를 등가의 하중으로 치환한 결과 간에 큰 차이가 없는 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서는 그림 6과 같이 두 단계로 단순화된 해석기법을 채택하였다: (1) 파고의 높이를 등가의 하중으로 치환한 탄성지지 판 해석을 통해 상재하중 및 해양 환경하중에 의해 유발되는 응력을 산정하고, (2) 각 모듈의 상부 또는 하부 슬래브의 응력은 국부적인 슬래브 해석으로 산정하였다. 부유구조체의 거동을 전체 구조계와 국부 모듈단위의 거동

그림 6. 등가 정적 해석 개념

그림 7. 전체 구조계 작용 하중

그림 8. 국부 모듈단위 거동

으로 나누어 해석한 뒤, 각 산출된 응력을 중첩시켜 해당 구조부의 최종 응력을 산정하였다.

4.1 전체 구조계 해석

전체 구조계 거동 분석을 위해 실제 부유구조체와 동일한 강성을 부여한 등가 판 모델에 부력을 등가 스프링으로 치환하였다. 이 때 부유구조체를 구성하는 각 모듈은 완전 접합된 것으로 가정하였다. 그림 7은 하이브리드 부유구조체의 전체 구조계 거동에 관여하는 하중 요소를 도시한 것이다.

파는 시간에 따라 진전하기 때문에 구조체의 중앙부에 정의 모멘트를 발생시키는 파의 위치와 그 반대의 경우를 각각 새깅(sagging) 파랑하중 및 호깅(hogging) 파랑하중으로 재하하였다. 또한 파고의 차이를 고려한 양압력도 고려하였다. 자중, 컨테이너 상재하중, 유입해수의 무게도 고려하였다. 유입해수의 무게는 반 잠수식 모듈 부분의 상대적인 부력 상실량으로 볼 수 있으며 다음과 같이 계산할 수 있다.

그림 4(c)에 도시된 바와 같이 하이브리드 부유구조체는 반 잠수식 모듈이 도입되는 부분(L_2)에서 모듈의 중공부분(b_2)이 해수에 잠긴 만큼의 부력을 가지며, 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{b,L_2} = \rho g d A_{L_2} - \rho g d A_2 \quad (1)$$

여기서, F_{b,L_2} 는 반잠수식 모듈 군의 부력, ρ 는 해수밀도, g 는 중력가속도, d 는 부유구조체의 흘수, A_{L_2} 는 반잠수식 모듈 군의 평면크기, A_2 는 반잠수식 모듈 군에서 중공부를 제외한 평면의 크기를 각각 의미한다. 즉, 반잠수식 모듈 도입에 따라 상실되는 부력의 크기는 부유구조체의 흘수(d)만큼 반잠수식 모듈군에 유입되는 해수의 중량($\rho g d A_2$)으로 표현될 수 있으며, 이를 등가판 모델에 등분포 하중으로 재하하였다.

이와 같이 전체 구조계 거동에 관여하는 하중요소를 모두

고려하여 새깅 파랑상태에서 최대 정모멘트를, 호깅 파랑상태에서 최대 부모멘트를 산출하고 이를 바탕으로 상·하부 슬래브에 도입되는 인장응력을 산정하였다. 이 때 고려하는 최대 정·부모멘트는 그 발생 위치에 관계없이 등가판 내 최대값으로 산정하였으며, 외벽은 부유구조체의 전체 구조계 거동에 영향을 받지 않는 것으로 가정하고 국부해석 값만을 사용하였다.

4.2 국부 해석

국부 모듈단위 거동은 그림 8과 같이 외부하중에 대한 슬래브 단위 거동으로써, 반잠수식 모듈과 폰툰형 모듈의 상·하부슬래브, 중공부 외벽에 대한 국부 구조모델을 각각 구축하고 작용하중을 재하하여 본 거동에 대한 각 구조부의 최대 인장응력을 도출하였다.

지점조건으로 반 잠수식 모듈의 상·하부슬래브 모델의 단부는 수직방향에 대한 변위 이동은 가능하나 회전은 없도록 하며, 슬래브 중앙의 중공부 지지 부분은 고정단으로 구속하였다. 폰툰형 모듈의 상·하부슬래브 및 외벽 모델의 단부는 모두 고정단으로 구속하였다.

구조해석을 통해 도출된 상·하부슬래브의 국부 모듈단위 거동 해석결과는 전체 구조계 거동 해석결과와 중첩시켜 해당 구조부의 최종 거동으로 판단하였으며, 외벽의 경우 국부 모델 해석 결과를 외벽의 실제 거동으로 판단하였다.

5. 매개변수 분석을 통한 인장응력 발생 분석

본 시스템에 도입되는 반잠수식 모듈의 적용 범위(L_2)와 중공부 크기(b_2)를 변화시키며 그림 9와 같은 외부 하중에 대한 각 구조부의 발생응력을 등가 정적 해석을 통해 분석하고 해당 결과를 동일 규모 폰툰형 부유구조체 거동과 비교분석하였다. 그림 9, 표 2에 명시된 경우에 대하여 매개변

그림 9. 하이브리드 부유구조체에 작용하는 하중

표 2. 각 구조부 최대 인장응력

구 분		최대 인장응력	비 고
상부슬래브	반 잠수식 모듈	(G1)+(L.1)	5.1절
	폰툰형 모듈	(G1)+(L.2)	
하부슬래브	반 잠수식 모듈	(G2)+(L.3)	5.2절
	폰툰형 모듈	(G2)+(L.4)	
외 벽		(L.5)	5.3절

수 연구를 수행하였다. 더불어 중량과 흘수를 고려한 대상 부유구조체의 적정 제원을 도출하였다.

해석대상 모델은 반잠수식 모듈 적용 범위(L_2) 10~100 m에서 1~9 m의 중공부 폭 길이(b_2)를 가지는 90가지 해석모델이며, 이 중 흘수가 부유구조체 높이 14 m를 초과하는 29가지의 경우는 비교 대상에서 제외하였다. 응력 뿐 만 아니라 변위 및 속도도 매우 중요한 설계변수이나 본 논문의 대상구조와 기준하중 조건에서 요동은 미미한 수준으로 파악되었으므로 이에 대한 매개변수 연구는 큰 의미가 없으며 본 논문의 범위에는 포함하지 않았다.

5.1 상부 슬래브 발생응력 분석

반잠수식 모듈의 적용 범위(L_2)와 중공부 폭 길이(b_2)의 변화에 대한 상부 슬래브의 최대응력 값을 그림 10에 도시하였다. 여기서 비교대상 기준치(reference level)는 동일한 제원을 폰툰형 만으로 구성했을 때의 응력을 의미한다. 일정 속도로 전파되는 파에 의해 유발되는 파랑하중은 응력을 최대로 증가시키는 파랑하중 구성을 고려하였다. 그림 10(a)는 반잠수식 모듈 상부에 발생하는 최대응력이며, 그림 10(b)는 폰툰형 모듈 상부에 발생하는 최대응력이다. 전체적으로 반잠수식 모듈의 적용 범위가(L_2) 증가할수록, 중공부 폭 길이(b_2)가 감소할수록 최대 인장응력이 증가하였다. 모든 경우에서 기준치보다 인장응력이 증가하였다.

반잠수식 모듈의 적용 범위(L_2) 증가에 따른 응력 증가는 두 모듈 간의 자중과 부력의 차에 의해 발생하는 부모멘트

증가에 기인한다. 중공부 폭 길이(b_2) 감소에 따른 응력 증가는 국부 모듈단위 거동에서 슬래브를 지지하는 중공부 지간의 감소와 전체 구조계 거동에서 부유구조체 외면에 결합되는 반잠수식 모듈 군의 부력 상실량 증가에 기인한다.

5.2 하부 슬래브 발생응력 분석

그림 11는 새김 상태의 파랑하중과 외부 하중에 의해 하부슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력을 도시하였다. 그림 11(a)와 (b)는 각각 반잠수식 모듈과 폰툰형 모듈의 하부 슬래브에 발생하는 최대 인장응력이다. 상부 슬래브의 경우와는 달리 반 잠수식 모듈의 적용 범위(L_2)에 대한 최대 인장응력의 변동폭은 크지 않았다. 반잠수식 모듈의 경우 중공부 폭 길이(b_2)의 영향은 상부 슬래브의 경우와 유사하게 b_2 의 감소와 더불어 발생 최대 인장응력은 대체로 증가하였다.

L_2 에 대한 응력 민감도가 크지 않은 것은 두 가지 이유로 설명될 수 있다. 모듈 간 부력 차이로 인해 도입되는 프리플렉스 효과의 영향으로 거의 전체 하부슬래브에 초기 압축응력이 도입되므로, 하부 슬래브의 인장응력은 그 외 하중에 기인한다. 반잠수식 모듈의 적용 범위(L_2)가 10 m인 경우, 이 프리플렉스 효과를 통해 도입되는 압축응력이 발생 인장력을 모두 상쇄시키지 못하였으며, 그에 따라 전체 구조계 거동에서 약 3 MPa의 최대 인장응력이 발생하였다. 중공부 폭 길이(b_2) 감소에 따른 응력 증가는 국부 모듈단위 거동에서 중공부 지점 크기 감소에 주로 기인하며, 이는 동일한 지점 상태를 갖는 상부슬래브의 거동과 동일하다. 폰툰형 모듈도 L_2 의 변화에 따른 최대 인장응력의 증가는 거의 미미하였으며, b_2 의 효과도 매우 낮은 것으로 확인되었다. 기준치 응력 값과 비교할 때 최대 인장응력 값을 약 5 MPa 이상 저감 가능한 것으로 파악되었다.

5.3 외벽 발생응력 분석

그림 12는 반잠수식 모듈군 최 외단의 중공부 외벽의 최대 인장응력이다. 그림 3과 같이 b_2 가 감소할수록 해수에 직접 노출되는 판의 면적과 지간이 감소하여 최대 인장응력

그림 10. 상부슬래브 최대 인장응력: (a) 반잠수식 모듈, (b) 폰툰형 모듈

그림 11. 하부슬래브 최대 인장응력: (a) 반잠수식 모듈, (b) 폰툰형 모듈

그림 12. 외벽의 최대 인장응력

이 기준치보다 감소하였다. 하지만, 반잠수식 모듈의 설치 범위 L_2 가 증가할수록 외벽의 응력은 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 상대적으로 낮은 부력을 가지는 반잠수식 모듈이 조합됨에 따라 흘수가 증가하고 이에 따라 작용 수압이 증가하는 것에 기인한다.

5.4 최대 인장응력 관점의 하이브리드 부유구조체 성능

상부 슬래브, 하부 슬래브 및 외벽의 발생 인장응력을 전반적으로 평가하기 위해 각 최대 인장응력 값을 제공하여 합한 후 제곱근을 취하여 대표값을 도출하였다. 부위별 응력의 중요성을 감안해서 서로 다른 가중치를 부여할 수도 있겠으나 현단계의 가중치 선택은 다분히 자의적이므로 동일한 가중치를 적용하였다. 즉,

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{top}}^2 + \sigma_{\text{bot}}^2 + \sigma_{\text{wall}}^2} \quad (2)$$

$\bar{\sigma}$ 는 최대인장응력의 대표값, σ_{top} 는 상부 슬래브에 발생하는 최대 인장응력, σ_{bot} 는 하부 슬래브에 발생하는 최대 인장응력, σ_{wall} 은 외벽에 발생하는 최대 인장응력이다. 상대적으로 중요성이 낮은 외벽의 응력을 제외하는 것도 가능하다. 앞서 언급했듯이 식 (2)의 제곱평균은 편의적으로 선택된 대표값이며 기타 다른 형태의 표현도 가능하다.

반 잠수식 모듈군과 폰툰형 모듈군으로 구성된 본 하이브리드 구조체의 최대 발생응력을 각 모듈군 별로 정리하면 그림 13과 같다. 반 잠수식 모듈부분과 폰툰 모듈 군에서 모두 기본 폰툰형 부유구조체보다 최대 인장응력이 작은 제원의 조합은 흘수 초과 모델을 제외한 61개 모델 중 13개 인 것으로 확인되었다. 전반적으로 반 잠수식 모듈의 적용범위(L_2)가 증가할수록, 반 잠수식 모듈의 중공부 폭 길이(b_2)가 감소할수록 상부슬래브에 발생하는 인장력이 증가하여 그 조합 결과가 불리한 것으로 확인되었다. 본 논문에서 고려하는 480 m 길이의 초대형 부유구조체는 양 끝단에서 40 m 이하 전체 길이 대비 약 15% 정도의 반잠수식 모듈을 설치하면 하부 슬래브의 응력상태를 개선할 수 있는 것으로

그림 13. 최대 인장응력 조합에 의한 하이브리드 부유 구조체의 거동

판단된다.

6. 부유구조체의 중량 및 흘수를 고려한 제원 선택

하이브리드 부유구조체의 중량은 반잠수식 모듈 적용구간의 중량 및 크기에 좌우된다. 중공 크기(b_2)가 작은 경우는 반 잠수식 모듈 도입의 적용 범위(L_2)의 증가에 따라 부유구조체의 중량은 감소하며, 중공 크기(b_2)가 큰 모듈 도입 시에는 격벽의 파괴 때문에 적용 범위(L_2) 증가에 따라 부유구조체의 중량이 증가한다. 본 연구대상 부유구조체의 제원변화에 따른 중량과 흘수의 산출 결과는 그림 14, 15와 같다. 표 1과 같은 구성 모듈 제원 상, 본 시스템 도입 시 매개변수 연구를 수행한 대부분의 시스템 제원에서 폰툰형 부유구조체보다 큰 중량을 갖는 것으로 나타났다.

하이브리드 부유구조체의 흘수는 구조체 중량과 반 잠수식 모듈 도입에 따른 부력 상실량에 비례하여 증가하며, 모든 경우에서 폰툰형 부유구조체보다 큰 흘수를 갖는 것으로 나타났다. 여기서 반 잠수식 모듈의 중공부 폭 길이(b_2)가 짧을수록, 또한 그 적용 범위(L_2)가 클수록 부유구조체 내 유입되는 해수와 부력 상실량이 증가하여 큰 흘수를 갖게 되지만 그만큼 반 잠수식 모듈 군의 자중이 감소하여 흘수의

그림 14. 중량 산출 결과

그림 15. 흘수 산출 결과

그림 16. 새김 시 인장응력

그림 17. 호킹 시 인장응력

증가 폭은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

구조성능 부문에서와 마찬가지로 중량과 흡수 면에서 반잠수식 모듈의 적용 범위(L_2)가 늘어나는 것은 그다지 바람직하지 않은 것으로 파악되었다. 중량 및 흡수를 고려한 결과 중공부 폭 길이(b_2)가 6 m인 반잠수식 모듈군을 10 m 적용할 때 우수한 성능조합을 보이는 것으로 판단된다.

적정 제원으로 선택된 경우($L_2=10$ m, $b_2=6$ m)의 하부슬래브에서 전체 구조계 거동에 의해 발생하는 응력을 확인하였다. 새김 및 호킹의 파랑상태에서 각 외부하중에 의해 부유구조체 길이방향에 대하여 발생하는 응력은 그림 16, 17과 같다.

응력 조합선도 상, 새김 상태에서 부유구조체의 중앙부에 전체 구조계 거동에 의해 약 2.5 MPa의 인장응력이 발생하나 호킹상태에서는 인장응력이 발생하지 않았으며, 프리스트레스 긴장재 배치를 통해 충분히 제어 가능한 응력으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 하부슬래브에 발생하는 인장력을 억제시킬 수 있는 방안으로 폰툰형 부유구조체 일부분에 해수를 유통시킨 하이브리드 부유구조시스템을 제시하였다. 본 시스템 도입에 따른 하부슬래브 인장력 억제 효과와 시스템 제원 변화에 따른 각 구조부의 구조 응답을 매개변수 연구를 통해 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

하이브리드 부유구조체 시스템 도입 시, 매개변수를 수행한 모든 시스템 제원의 하부슬래브에서 폰툰형 부유구조체보다 작은 크기의 최대 인장응력이 발생하였다. 외부 하중에 노출되는 외벽 면의 면적 감소로 매개변수 연구를 수행한 대부분의 시스템 제원의 외벽에서 폰툰형 부유구조체보다 작은 크기의 최대 인장응력이 발생했다. 본 시스템 도입 시, 하부슬래브와 외벽에 발생 가능한 최대 인장응력을 저감시킴으로써 해수에 직접 노출되는 구조부에서 발생 가능한 인장력을 효과적으로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 본

논문에서 고려된 초대형 부유체의 경우 중공부 폭이 6 m인 반잠수식 모듈군을 10 m 정도 도입했을 때 적정수준의 거동을 얻을 수 있는 것으로 파악되었으며, 도출된 제원은 새김상태에서도 안정적인 수준의 전체 구조계 거동을 유지하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 한국건설기술연구원의 주요사업인 “하이브리드 부유구조체 구조 시스템 기술 개발” 사업의 지원과 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원(2012004227)을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- 박성환, 이탁기, 홍사영(2005) 폰툰식 VLFS의 초기구조설계에 관한 연구, *대한조선학회 논문집*, 대한조선학회, 제42권 제6호, pp. 644-653.
- 삼성중공업(2008) 초대형 부유구조체의 유탄성 해석기술 개발, 연구보고서.
- 지광습, 김진균, 이승오, 이필승(2010) 초대형 부유식 해상구조물의 초기 설계를 위한 설계차트 개발, *대한토목학회 논문집*, 제30권 제3B호, pp. 315-324.
- 지광습, 이승오, 김진균, 이필승, 이승정(2008) 초대형 부유식 해상구조물의 유탄성 거동 분석, *대한토목학회 정기 학술대회논문집*, 대한토목학회, 대전, pp. 1123-1127.
- 한국건설기술연구원(2010) 콘크리트 부유구조체의 특성을 고려한 실용화 기술 개발, 연구보고서.
- ISSC (2006) Report of special committee VI.2, Very large floating structures, *Proceedings of the 16th International Ship and Off-shore Structure Congress*, Vol. 2, pp. 391-442.
- KAIST (2009) *Mobile Floating Harbor for Jump Increased Container Handling Capacity*, Report.
- Keppel O&M (2009) Offshore structures in the arctic keppel meets the challenge with new materials and designs, *Oil & Gas Eurasia 2009*, No. 5.
- Kwak, Y.M., Lee, S.J., Jeong, Y.J., and Zi, G. (2011) A parametric study on a concrete floating structure, *Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in structural Engineering and Mechanics*, Seoul, Korea.
- LaNier, M.W., Wernli, M., Easley, R., and Springston, P.S. (2005) New technologies proven in precast concrete modular floating pier for U.S. navy. *PCI Journal*, 76-99.
- Pham, D.C. and Wang, C.M. (2010) Optimal layout of gill cells for very large floating structures, *Journal of structural engineering*, Vol. 136, No. 7, pp. 907-916.
- Wang, C.M., Wu, T.Y., Choo, Y.S., Ang, K.K., Toh, A.C., Mao, W.Y., and Hee, A.M. (2006) Minimizing differential deflection in a pontoon-type, very large floating structure via gill cells, *Marine structures*, Vol. 19, No. 1, pp. 70-82.
- Wang, C.M., Pham, D.C., and Ang, K.K. (2007) Effectiveness and optimal design of gill cells in minimizing differential deflection in circular VLFS, *Engineering structures*, Vol. 29, No. 8, pp. 1845-1853.
- Watanabe, E., Utsunomiya, T., and Wang, C.M. (2004) Hydroelastic analysis of pontoon-type VLFS: a literature survey, *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 2, pp. 245-256.
- Zijian, Y. (2007) Very large floating container terminal and optimal layout of gill cells, *National University of Singapore*, Thesis.

(접수일: 2012.5.17/심사일: 2012.7.4/심사완료일: 2012.8.16)

부 록: 해석에 사용된 입력자료

본 연구의 해석에 사용된 입력데이터와 물성치를 정리하면 다음과 같다.

표 3. 부유구조체 제원 및 입력하중

구 분		제원 및 설계조건	비 고
규 모		480 m×480 m	
상재 하중	Apron	19.6 kN/m ²
	Yard	65.6 kN/m ²	
파랑 하중	수 심(<i>h</i>)	35 m	
	유의파고($H_{1/3}$)	3.0 m	
	설계파고(H_D)	5.4 m	$HD=1.8H_{1/3}$
	파랑주기(<i>T</i>)	5.37초	
	설계파장(L_D)	45.0 m	$L_D=gT^2/(2\pi)\tanh(2\pi h/L_D)$