

유한요소해석을 이용한 해양 로딩암의 구조안전성 평가

송창용* · 최하영** · 심승환***

*목포대학교 해양시스템공학과

**한국철도기술연구원

***제일기술산업(주)

Structural Safety Evaluation of Marine Loading Arm Using Finite Element Analysis

Chang Yong Song*, Ha Young Choi** and Seung Hwan Shim***

*Department of Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Korea

**Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Gyeonggi, Korea

***Jeil-Tech Industry Co., Ltd., Jeonnam, Korea

KEY WORDS: Marine loading arm 해양 로딩암, Fluid transfer 유체 이송, Design load conditions 설계 하중조건, Operation modes 작동 모드, Finite element analysis 유한요소해석

ABSTRACT: This paper presents a structural design review of a marine loading arm used for the fluid transfer of a liquid cargo from a ship or offshore plant. The marine loading arm is installed on a ship, offshore plant, or jetty in order to load or unload liquid cargo such as crude oil, liquefied natural gas (LNG), chemical products, etc. The structural design of this marine loading arm is obliged to comply with the design and construction specifications regulated by the oil companies and international marine forum (OCIMF). In this paper, the structural safety of the initial design for the marine loading arm is evaluated for the design load conditions required by various operational modes. The evaluated results based on a finite element analysis (FEA) are reviewed in relation to the OCIMF specifications.

1. 서 론

원유와 천연가스를 중심으로 한 해양 에너지 자원 개발의 가속화에 따라 해상 환경 상에서 액화 화물의 이송이 지속적으로 증가하고 있다. 원유나 천연가스 등과 같은 액화상태의 화물은 화재나 폭발 등의 사고 위험성을 내재하고 있기 때문에 사용 목적지로의 안전한 이송은 매우 중요하다고 할 수 있다. 해양 로딩암(Marine loading arm)은 액화 화물의 선적이나 하역을 위해 사용되는 기자재로서 원유 운반선, 화학제품 운반선, LNG 운반선 등과 같은 선박과 해양 유전개발에 투입되는 해양플랜트 시설뿐만 아니라 부두에 설치되어 운용된다.

해양 로딩암과 같은 선박 및 해양플랜트 기자재 개발연구는 전체 시스템 성능 연구와 더불어 관련 산업 경쟁력 확보를 위해 중요하다 할 수 있다. 선박 및 해양플랜트 기자재 개발과 관련되어, 최근에 국내에서도 연구가 활발히 진행되고 있다. 선박과 해양플랜트의 배관설비의 핵심부품 중에 하나인 밸브와 관련하여

단방향 삼중편심 버티플라이 밸브를 토대로 실링메커니즘(Sealing mechanism) 개발과 스템(Stem) 설계변경을 통하여 양방향에서 사용이 가능한 삼중편심 버티플라이 밸브에 대한 개발연구가 수행되었다(Kim et al., 2009). 해양플랜트용 해수펌프의 국산화 개발의 일환으로 사용빈도와 개발 가능성이 높은 것으로 알려진 심정용 사류펌프에 대하여 임펠러의 일부 형상을 변경시키면서 펌프 내부의 유동 해석을 수행하고, 해석결과로부터 양정, 동력 및 수력효율 등을 계산하여 펌프의 정량적인 특성이 파악되었다(Kim et al., 2011). 드릴쉽(Drill ship)이나 FPSO(Floating production storage offloading unit)와 같은 시추장치에 설치되는 라이저(Riser)의 파손방지를 위해 인장력을 응용한 엔엘 텐서너(Non-line tensioner, NL tensioner)의 기술개발이 보고되었다(Lee et al., 2011). LNG FPSO의 액화공정을 위한 장비의 최적 다중 배치 수행과 관련하여 액화공정을 위해 배치되는 장비에 대한 기술적 소개와 다중 배치 최적화 계산이 수행되었다(Ku et al., 2012). 해저 시스템(Subsea system)에 대한 조사와 설계 및 설

Received 11 October 2012, revised 21 January 2013, accepted 14 February 2013

Corresponding author Chang Yong Song: +82-61-450-2732, cysong@mokpo.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

치 경험을 바탕으로 한 해저 생산 및 제어 시스템의 특징 및 주요 구성 장비 소개와 설계 요소 정의와 일부 기술에 대한 최적설계가 수행되었다(Choi et al., 2012).

본 논문에서는 선박 및 해양플랜트 운용과 관련되어 원유나 천연가스 등과 같은 액체화물 이송에 사용되는 해양 로딩암의 국산화 개발을 위한 구조설계를 검토한다. 본 연구에서 검토한 해양 로딩암의 초기 구조설계는 국내에 개발된 사례가 전무하기 때문에 해외의 해양기자재 주요 기업들의 설계 사례를 벤치마킹한 데이터를 사용하여 설계가 수행되었다. 해양 로딩암은 액체화물의 선적과 하역 작업 시에 발생하는 다양한 하중상태를 고려해야할 뿐 아니라 설치 및 운용되는 위치에 따른 환경하중 조건을 고려하여 설계되어야 한다. 해양 로딩암의 구조설계는 해양 로딩암의 설계, 제작, 설치 및 운용에 대한 규정인 OCIMF(Oil Company and international marine forum)에서 규정된 설계규정을 만족해야 하며, OCIMF 규정상에는 해양 로딩암의 설계하중 조건들이 정의되어져 있다(OCIMF, 1999). 본 논문에서는 100,000 DWT(Deadweight tonnage) 급 원유운반선의 원유 선적과 하역 작업에 사용되는 해양 로딩암 설계와 관련하여 OCIMF에서 규정된 보관(Stored), 운전(Maneuvering), 연결(Connected), 비상분리(Emergency release), 유지보수(Maintenance), 정수압 시험(Hydrostatic test) 모드별 설계하중조건을 분석하고 구조해석을 위한 하중조건으로 정의한다. 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)을 기반으로 각 모드별로 규정된 설계하중조건에 대해서 유한요소모델들을 생성하고 구조해석을 수행하여 구조설계 안전성을 평가한다.

2. 해양 로딩암의 구조와 기능

해양 로딩암의 작동조건 중에 가장 중요한 상태는 계류된 선박과 연결되어 액체화물의 이송을 안전하게 수행하는 것이며, Fig. 1에는 계류된 선박에 연결되어 작동 중인 해양 로딩암의 운용상태가 나타나 있다.



Fig. 1 Marine loading arm connected to ship

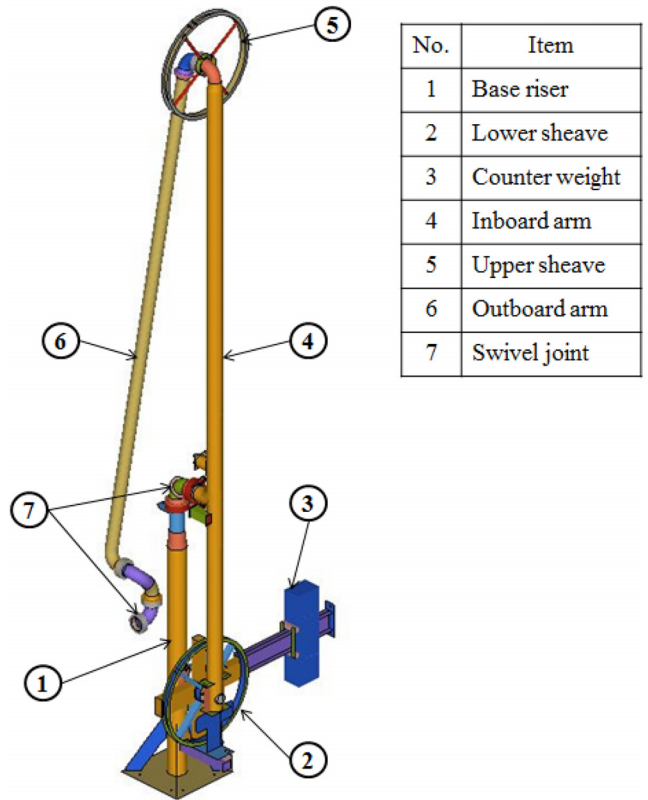


Fig. 2 Marine loading arm for 100,000 DWT class crude oil carrier

해양 로딩암은 원유나 천연가스와 같은 액체 화물의 선적과 하역 시에 발생하는 높은 하중과 압력상태에 대해서 안전한 작동조건을 제공할 수 있도록 고안된 부품들로 조합되어 있다(International chamber of shipping, 1996; OCIMF, 1999; FMC technologies, 2005). 일반적으로 유압으로 작동되는 해양 로딩암은 계류된 선박에 연결된 상태에서 선박의 운동으로 인한 연결부에서의 파손이 발생되지 않아야 하며, 선회 조인트(Swivel joint)는 선박 운동으로 인한 해양 로딩암의 파손을 방지하기 위한 부품이다. 비상분리 시스템(Emergency release system, ERS)은 2개의 상호잠금 블록 밸브(Block valve) 사이의 비상분리 커플러(Coupler)로 구성되어 있으며 액체 화물의 최소 누출상태를 유지하여 선박으로부터 해양 로딩암을 신속하고 안전하게 분리하는 부품이다. 급속 연결/분리 커플러(Quick connect/disconnect coupler, QC/DC)는 볼트와 같은 연결방법을 사용하지 않고 기계식 혹은 유압식 작동방식으로 해양 로딩암의 플랜지(Flange)와 선박의 매니폴드(Mmanifold)를 고정해 주는 부품이다. 인보드 암(Inboard arm)과 아웃보드 암(Outboard arm)은 액체 화물 이송을 위한 부재로서 균형추(Counterweight)와 선회 조인트에 연결되어 일정한 설계범위 내에서 움직인다. 해양 로딩암에는 2개의 평형추가 장착되는데, 주 평형추(Primary counterweight)는 인보드 암에 연결되고 보조 평형추(Secondary counterweight)는 아웃보드 암에 연결되어 해양 로딩암의 작동 시 균형을 맞추는데 사용된다. 팬토그래프 케이블(Pantograph cable)은 아웃보드 암으로부터 보조 평형추로 균형 하중을 전달해 주는 역할을 하는 부품이며 원형 활차(Sheave)에 연결된다. 기조 라이

저(Base riser)는 수직으로 고정되어 세워진 부재로서 액체 화물 이송 역할을 함과 동시에 전체 해양 로딩암 시스템을 지지하는 부품이다. 본 논문에서 고려한 100,000DWT급 원유운반선에 적용될 수 있는 해양 로딩암의 전체 구조형상과 각 구성부품에 대한 개략적인 형태는 Fig. 2에 나타나 있으며, 원유운반선의 주요치수는 전장 240m, 수선간 길이 230m, 형폭 40m, 형깊이 20m, 형홀수 13.5m인 일반적인 100,000DWT급 원유운반선이다.

해양 로딩암은 기능적으로 다양한 범위의 점도와 온도특성을 갖는 원유, 화학제품, 천연가스 등과 같은 액체화물을 설치 해역의 환경조건을 고려하여 안전하게 이송할 수 있어야 한다(International chamber of shipping, 1996; OCIMEF, 1999). 설치해역의 환경조건으로 고려되어야 할 사항들은 조류와 파고의 상태, 풍속, 대기온도, 지진의 허용범위 등이며, 이러한 환경조건은 작업범위 설정과 설계하중으로 적용된다. 조류와 파고 상태는 계류된 선박의 상하동요, 좌우동요, 전후동요, 중동요, 횡동요, 선수동요와 같은 6자유도 운동과 연관되어 해양 로딩암의 작동범위산정에 이용된다. 풍속, 대기온도 및 지진의 허용범위는 해양 로딩암의 작동모드인 보관, 운전, 연결, 비상분리, 유지보수, 정수압 시험 모드별 설계하중조건으로 적용되어 구조부재의 치수와 재질 선정에 고려된다. 해양 로딩암 구조부재의 용접은 ASME (American society of mechanical engineers) 규정에 따라 압력 용기 용접절차를 준수해야 하며, 적용된 탄소강의 탄소함유량은 0.23% 이하가 되도록 규정되어 진다(ASME, 2004).

3. 해양 로딩암의 구조설계 규정

해양 로딩암의 구조설계와 관련된 설계규정은 다양한 작동 모드 별로 하중조건을 조합하여 사용 재료의 허용응력을 만족하는지 여부에 대해서 검토하는 것으로 정의되어지며, 규정된

설계 하중조건에 대해서 다음의 Table 1과 같이 정리하여 나타낼 수 있다(OCIMEF, 1999).

Table 1에 나타난 바와 같이 작동 모드 별 하중상태를 조합하여 검토되어야 할 하중조건은 총 10개의 경우이며, 하중상태 조합에서 표기된 DL은 사하중(Dead load), EL은 지진하중(Earthquake load), FL은 액체화물 하중(Fluid load), PL은 설계압력 하중(Design pressure load), PL_T는 시험압력 하중(Test pressure load), TL은 열하중(Thermal load), WL_s는 보관모드 상태에서의 풍하중(Wind load in stored mode), WL_o는 운전모드 상태에서의 풍하중(Wind load in operation mode), WL_M은 유지보수모드 상태에서의 풍하중(Wind load in maintenance mode)

Table 1 Design load cases

Case no.	Mode	Loading combination	Allowable stress (σ_a) $K \times \sigma_d$
1	Stored	DL + WL _s	1.2 σ_d
2	Stored	DL + EL	1.2 σ_d
3	Maneuvering	DL + WL _o	0.9 σ_d
4	Connected	DL + WL _o	0.8 σ_d
5	Connected	DL + FL + PL + WL _o	0.8 σ_d
6	Connected	DL + FL + PL + WL _o + TL	1.5 σ_d
7	Emergency Release	DL + WL _o	1.1 σ_d
8	Emergency Release	DL + FL + PL + WL _o	1.1 σ_d
9	Maintenance	DL + WL _M	0.9 σ_d
10	Hydrostatic Test	DL + FL + PL _T + WL _o	1.3 σ_d

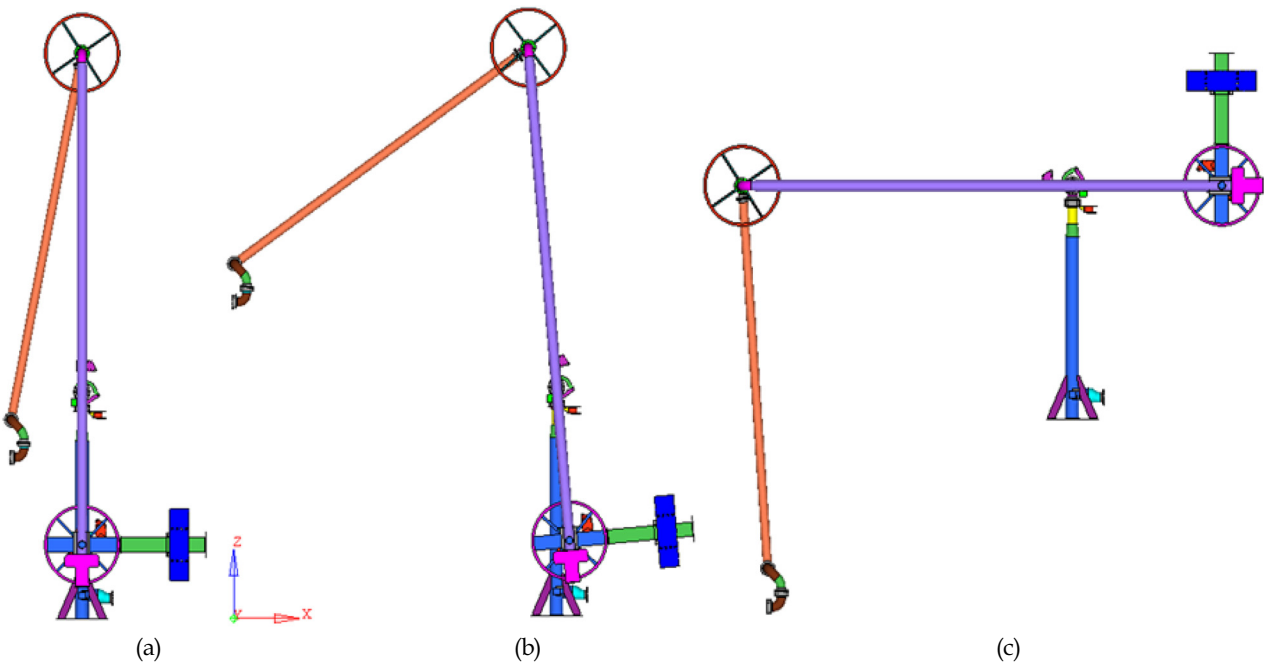


Fig. 3 Mode types for design load cases

을 각각 의미한다. 또한 α 는 설계응력을 나타내고, K 는 허용응력계수이며 해양 로딩암이 설치되는 해역에 따라 AISC (American institute of steel construction) 혹은 국가 별 강구조 코드에서 규정한 값을 적용할 수 있다. Table 1의 해양 로딩암의 작동 모드에 대한 형상은 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 3의 (a) 형상은 보관과 유지보수 모드를 나타내며, (b) 형상은 운전모드를 나타내고, (c) 형상은 연결, 비상분리 및 정수압 시험 모드 상태에 적용된다. 사하중 적용 시에 해양 로딩암 자체의 중량과 함께 비중 0.8의 결빙 증가(Ice build-up) 중량을 추가로 고려해야 하는데, 북극지역과 같은 냉기후 지역에 대해서는 6mm, LPG 액체 화물에 대해서는 10mm, LNG 및 에틸렌 액체화물에 대해서는 25mm의 결빙 두께를 적용해야 한다. 지진하중은 항구지역과 같이 육상 지반에 해양로딩암이 설치될 경우 고려되어야 하며, 보관 모드에 대해서 설치 지면 상에 수평과 수직 상에 작용하는 하중을 조합하여 다음과 같은 공식을 적용한다(UBC, 1997).

$$E = \rho E_h + E_v \quad [N] \quad (1)$$

여기서 E 는 지진하중, E_h 는 지반전단으로 인한 지진하중, E_v 는 수직 지진 지반운동의 하중 영향도, ρ 는 신뢰성/잉여 지수이다. 액체화물 하중과 관련하여, 원유 및 원유제품은 해수의 비중을 적용한 중량을 적용하고, 액화가스 및 화학제품은 해당 액체화물의 비중을 고려한 중량을 적용하여 하중으로 산정한다. 설계 압력 하중은 선박의 매니폴드와 연결되는 해양 로딩암의 플랜지의 사용압력을 적용해야 하고, 시험압력 하중은 ASME 규정의 ANSI B31.3 절에서 정의된 압력용기 시험절차 상의 압력을 적용해야 한다(ASME, 2004). 열하중은 해양 로딩암이 설치되는 해역에 극한상태의 저온 혹은 태양 방사열에 의한 고온을 고려해야 하며, LNG와 같은 저온 액체화물의 운용에 대해서는 별도의 극저온 온도 구배를 적용해야 한다. 풍하중은 풍속압력 공식과 풍하중 공식을 기반으로 산출되며, 최소 수면 위의 높이 z 에 대한 풍속압력(q_z) 산출공식은 다음과 같다(OCIMF, 1999).

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} V^2 I \quad [N/m^2] \quad (2)$$

여기서 0.613은 경험상수이며, K_{zt} 는 지형계수(Topographic factor)이며 일반 지형에 대해서는 1.0의 값을 사용하도록 규정되어 있고, V 는 설치해역의 3초간 돌풍속도(m/s)이고, I 는 중요도 계수(Importance factor)이며 설치 상의 중요도에 따라 기준 1.0의 값에서 높여서 사용할 수 있다. K_z 는 설치높이에 관한 계수로서 다음의 공식을 적용한다(OCIMF, 1999).

$$\begin{aligned} K_z &= 2.01(Z/Z_y)^{2/a} \quad \text{for } 4.6m \leq Z \\ K_z &= 2.01(4.6/Z_y)^{2/a} \quad \text{for } Z < 4.6m \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 2.01은 경험상수이고, Z 는 썰물 시의 높이이며, Z_y 는 경사높이이고, a 는 승수 계수이다. Z_y 와 a 는 높이 10m 이하의 산재된 차단구조물이 설치되어 있는 지형에 대해서는 274와 9.5의 값을 각각 적용할 수 있으며, 그 외에 설치 지형에 대해서는 213과 11.5의 값을 적용할 수 있다. 풍하중 F 는 식 (2)의 풍속압력을 포함하여 다음과 같이 정의된다.

$$F = q_z G C_f A_f \quad [N] \quad (4)$$

Table 2 Force coefficient, C_f

Cross section	Type of surface	C_f
Round, ($D \sqrt{q_z} > 5.3$)	Moderately smooth rough	0.7 ~ 1.0
Round, ($D \sqrt{q_z} \leq 5.3$)	all	1.2
Flat or angular	all	1.7

여기서 G 는 돌풍영향 계수(Gust effect factor)로서 약 0.85의 값을 사용하도록 권고되며, C_f 는 하중계수이고, A_f 는 바람방향에 수직한 투영면적이다. 하중계수 C_f 는 해양 로딩암의 단면 형상 혹은 항력으로 인한 바람효과를 고려하는 계수로서 다음과 같은 ASCE 규정을 적용하는 것이 권고된다(ASCE, 2005).

Table 2의 원형 단면에 대한 판정식에서 $D[m]$ 는 단면의 직경이다.

4. 구조해석 및 평가

해양 로딩암의 구조성능을 평가하기 위해서 3장에서 기술된 해양 로딩암의 작동모드 형상과 설계하중 조건을 기반으로 유한요소해석을 수행하고 주요 구조부재에서의 사용 재료와 작동모드 별 허용응력을 평가 한다. 본 논문에서는 100,000 WT급 원유운반선용 해양 로딩암의 초기 구조설계 형상에 대해서 Fig. 4에 나타난 것과 같은 구조해석 프로세스를 적용하여 구조성능 평가를 수행하였다.

본 논문에서 검토한 해양 로딩암의 재질은 선회 조인트 부재들에 대해서는 SF490A 강재가 적용되었으며, 그 외에 구조 부재에는 SS400 강재가 적용되었고, 재료 특성치에 대한 사항은 Table 3에 나타나 있다.

해양 로딩암 구조해석을 위한 유한요소 모델 형상은 Fig. 5에서와 같이 연결, 비상분리 및 정수압 시험 모드 상태에 대한 구조해석모델을 대표적으로 나타내었다. 해석에 사용된 요소형태는 형상을 정의하기 위하여 셸(Shell)과 솔리드(Solid) 요소를 사용하였고, 각 부재와 단품들을 조합하기 위해서 강체연결요소(Rigid link)를 사용하였으며 작동형태를 고려하여 강체연결요

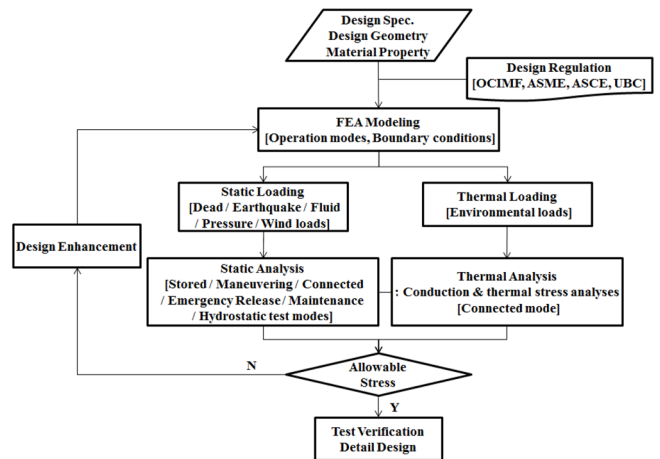


Fig. 4 Structure analysis process for marine loading arm

Table 3 Material properties of structural members

Type	Elastic modulus [N/mm ²]	Density [kg/mm ³]	Poisson ratio	Shear modulus [N/mm ²]	Thermal transfer coefficient [W/mm ² - °C]	Thermal expansion coefficient [mm/mm/°C]	Yield strength [MPa]	Ultimate strength [MPa]
SS400	2.1E+5	7.85E-6	0.3	8E+4	0.204	1.17E-5	205	450
SF490A	2.1E+5	7.85E-6	0.3	8E+4	0.204	1.17E-5	250	485

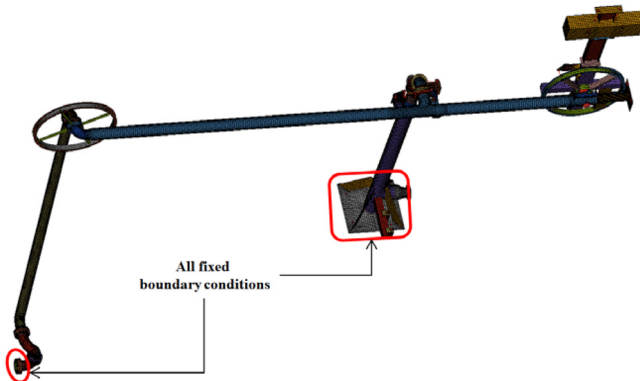


Fig. 5 FEA model for connected, emergency release and hydrostatic test modes

소의 운동방향 구속조건을 정의하였다. Fig. 5의 유한요소모델에 사용된 요소의 수는 79,293이고, 절점의 수는 69,678이며, 기초 라이저, 상부 및 하부 원형활차, 평형추의 박판부재, 인보드 및 아웃보드 암과 같은 얇은 판 형태의 부재들에 대해서는 4절점 사각요소와 셀 형태 유한요소를 위주로 구성하였으며, 일부 사각요소로 정의되기 어려운 형상에 대해서 3절점 삼각요소로 표현하였다. 선회조인트와 같이 형상 대비 부재의 두께가 큰 부재들에 대해서는 8절점 육면체 요소를 적용하여 해석의 정확도를 높일 수 있도록 하였다. 해석모델에 사용된 4절점 사각요소의 수는 61,042이고, 8절점 육면체 요소의 수는 15,894이며, 강제연결요소의 수는 1,915이고, 마지막으로 3절점 요소의 수는 422이다. 전체 해석모델에서 4절점 사각요소, 8절점 육면체 요

소, 강제연결요소, 3절점 요소의 구성비율은 각각 77%, 20%, 2.5%, 0.5% 이다.

구조해석에 적용된 경계조건과 관련하여, Fig. 5에 나타난 바와 같이 모든 작동 모드에 대해서 기초 라이저(Base riser)의 하부 고정부재에 완전 고정 경계조건을 공통적으로 적용하고, 연결 및 정수압 시험모드인 경우에는 아웃보드 암의 가장 끝단 선회 조인트에 완전 고정 경계조건을 적용하였다. 하중조건은 3장의 설계규정에서 정의된 하중 값을 산출하여 정적하중과 열하중 조건을 조합하여 작동 모드 별로 Table 1과 같은 설계하중 조건들을 작성하였다. 연결모드 중에서 열하중이 적용되는 설계하중 조건과 관련하여 영하 40도의 혹한 환경조건을 고려하여 열전달 해석을 수행하고, 범용 FEA 프로그램인 NASTRAN을 이용하여 Fig. 6에 나타난 열전달 해석으로부터 산출된 온도 분포 결과를 열하중 조건으로 구조해석 모델에 맵핑(Mapping)하여 열응력 해석을 수행하였다(MSC software, 2010). 열전달 해석과 관련하여 냉각시험상태를 수치 해석적으로 고려하기 위하여 열대류(Heat convection) 이론을 기반으로 20°C 상온상태의 해양로딩암 구조에 영하 40도의 기체를 인보드 암과 아웃보드 암의 내부에 일정속도로 주입하는 형태의 해석조건을 적용하였다. Fig. 6의 열전달해석 결과에 나타난 바와 같이, 주요 유체 이송 구조의 온도가 영하 40도까지 냉각 분포된 것을 알 수 있다.

구조해석은 열해석과 마찬가지로 NASTRAN 프로그램을 이용하여 수행하였다. 본 연구에서는 해양 로딩암과 같이 기존의 구조해석과 관련된 연구사례가 미비하고 시험적 구조성능 검증이 용이하지 않은 대형 구조물의 구조해석을 위하여 해양 로딩암의 설계규정을 명시적으로 평가할 수 있는 해석적 방법의 구

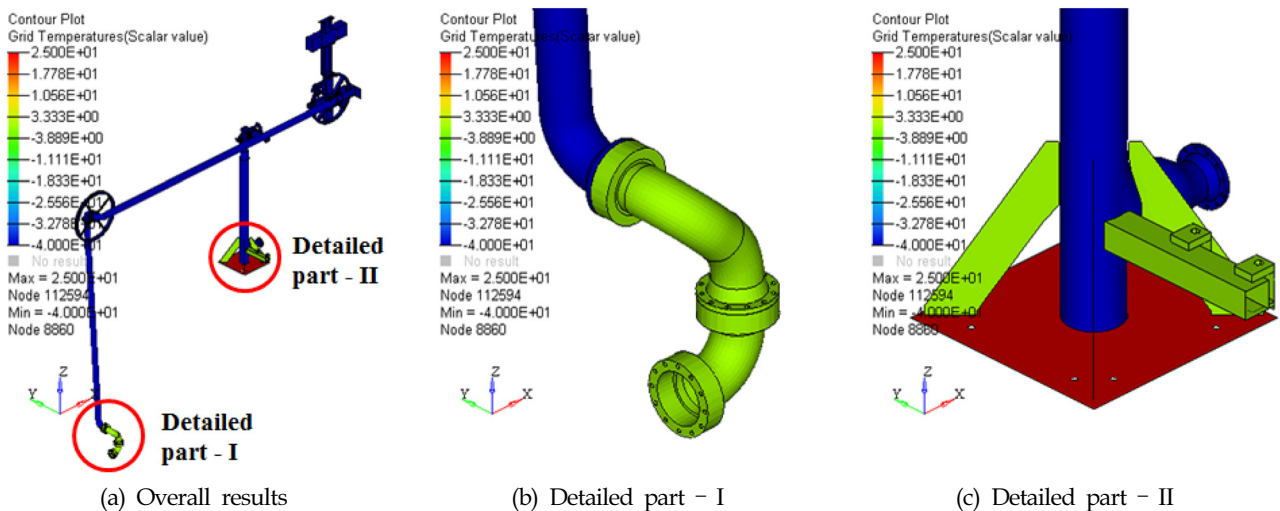


Fig. 6 Heat transfer results for connected mode

현을 검토하였다. 우선 Table 1과 Fig. 3에 정의된 설계 하중조건 별로 구조해석모델을 구성하였으며, 부품 별 볼팅 조립 부에 대해서는 6자유도를 구속한 강제 연결요소를 사용하여 연결 상태를 정의하였고, 회전거동이 발생하는 상부 및 하부 원형활차 중심부와 기초 라이저와 인보드 암의 연결부에는 병진자유도만 구속한 강제요소를 정의하여 실제 해양 로딩암의 거동이 유사하게 나타나도록 하였다. 구조해석으로부터 산출된 응력 값의 신뢰성을 높이기 위하여 구조해석 모델에 사용된 쉘과 솔리드 요소는 4절점 사각형과 8절점 육면체 요소를 중심으로 사용하였고 3절점 삼각형 요소는 전체 유한요소모델에서 0.1%이하가 되도록 구성하였다. Table 1에서 정의된 설계 하중조건에서 사하중은 구조해석 상에서 해양 로딩암의 실제 설계중량을 밀도로 고려하고 중력하중(Gravity load) 파라미터를 사용하여 실제 상태와 유사하게 구현하였다. 보관모드에 대한 구조해석을 위해서 보관모드 상의 풍하중을 압력형태로 풍하중 작용방향에 수직한 면으로 적용하였고, 지진하중은 지면과 접촉되는 기초 라이저의 하부 부재면 상에 압력형태로 적용하였다. 운전 및 유지보수 모드에 대한 구조해석을 위해서 운전 및 유지보수 모드 상의 풍하중을 압력형태로 풍하중 작용방향에 수직한 면으로 적용하였다. 연결, 비상분리 및 정수압시험 모드의 구조해석을 위해서 액체 화물 하중은 해양 로딩암의 이송 관을 통과하는 원유 유체의 밀도를 고려하고 중력하중 파라미터를 사용하여 적용하였으며, 설계 및 시험 압력하중은 선박의 매니폴드와 연결되는 해양 로딩암의 플랜지의 사용압력과 ASME 규정의 압력용기 시험압력을 해양 로딩암 이송 관 내부 표면에 압력하중으로 각각 적용하였다. 연결 모드 중에 영하 40도의 혹한 환경조건을 고려 시에 포함되는 온도하중은 Fig. 6에 나타난 열대류 현상을 구현한 열전달 해석으로부터의 온도분포 결과를 강제연결요소를 제외한 모든 유한요소의 절점에 대한 온도하중으로 변환하여 적용하였다. 이러한 온도하중 조건은 재료 물성치에서 고려된 열팽창계수와 결합하여 구조변형 및 응력으로 산출되며, 기존의 중력하중 및 압력하중에 복합적으로 작용하여 일반적인 기계적 구조하중보다 가혹한 변형 및 응력상태를 나타낸다.

구조해석을 통해서 산출된 설계 응력치는 Table 1에 나타난 해양 로딩암 구조설계를 위한 허용응력 산출공식을 이용하여 각 작동 모드 별로 허용응력이 계산된다. 이러한 허용응력을 기준으로 사용 재질 별 항복응력과 극한응력에 대해서 다음의 판정식을 적용하여 구조설계 안전성을 평가한다(OCIMF, 1999).

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_y}{1.5} \tag{5}$$

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_u}{2.35} \tag{6}$$

여기서 σ_y 는 사용 재료의 항복강도(Yield strength)이고, σ_u 는 극한강도(Ultimate strength)이다. 식 (5)는 압력하중을 받는 구조부재에 대해서 적용하는 판정식이고, 압력하중을 받지 않는 부재에 대해서는 식 (6)을 적용한다. 본 논문에서 고려한 해양 로딩암의 항복강도와 극한강도는 Table 3에 나타나 있으며, Fig. 4에 나타난 구조해석 프로세스와 식 (5)와 (6)을 이용하여 초기 구조설계 상태의 평가 및 개선을 통하여 100,000DWT급 원유

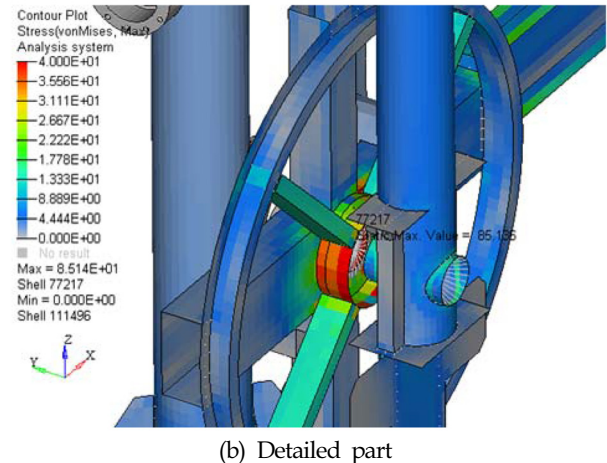
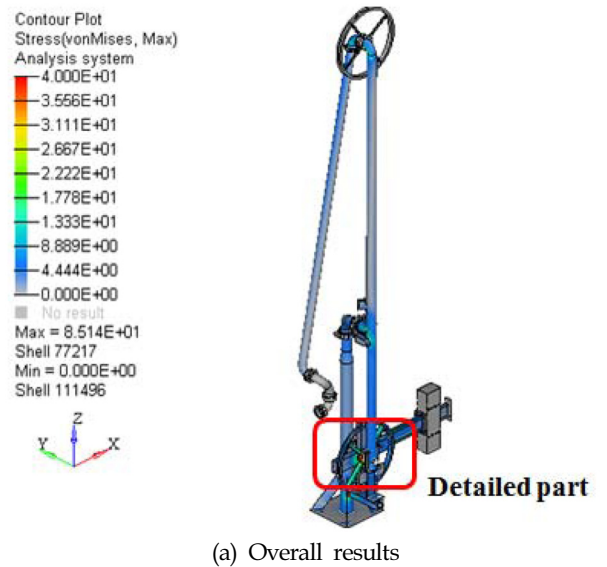
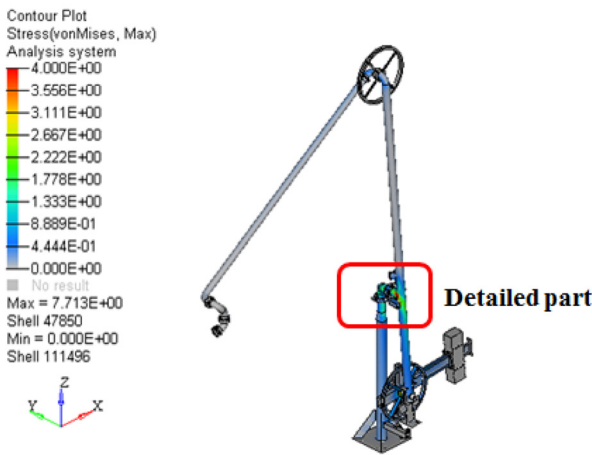


Fig. 7 Stress contour results for stored mode

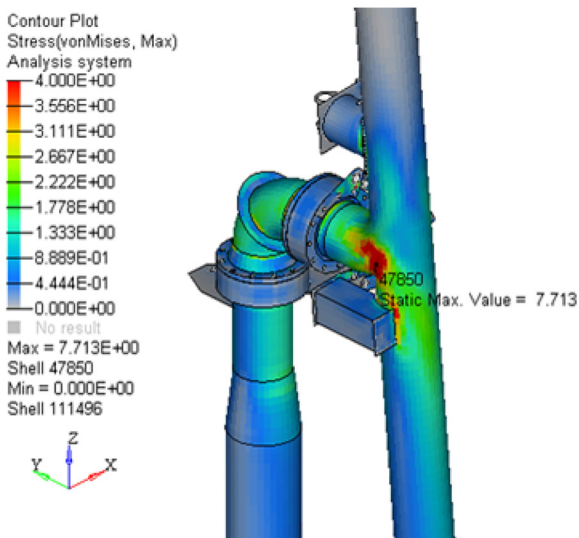
운반선용 해양 로딩암의 기본 구조설계 사양을 결정하였다. 최종적으로 산출된 해양 로딩암 구조설계 상태에 대한 응력해석 결과는 Fig. 7과 8에 대표적으로 설계하중조건 1번과 3번의 보관모드와 운전모드에 대해서 나타내었다.

Fig. 7과 8에 나타난 바와 같이 응력결과는 연성재료 강도평가에 적합한 Von-mises 응력을 기준으로 산출하였고, 설계하중조건 1번과 3번의 보관모드와 운전모드에서의 응력집중 부위는 하부 시이브(Lower sheave)와 아웃보드 암 연결부에서 발생하였다. 전체 설계하중 조건에 대한 설계응력 평가 결과는 Table 4에 나타나 있으며, 설계 안전도 평가는 식 (5)와 (6)에서 부등호 기준 좌우측 허용응력과 항복응력 혹은 극한응력 변형식과의 비가 1보다 작은 경우에 설계 안전도를 만족하는 것으로 판정하였다.

Table 4에 나와 있는 것처럼 전체 설계하중 조건들에 대해서 설계안전도가 만족되는 것으로 평가되며, 보관 모드와 극한환경 상태에서의 연결 모드에서 상대적으로 높은 응력이 발생하였음을 알 수 있다. 설계 하중조건 케이스 3번, 4번, 5번, 7번, 8번의 경우에 설계 규정에서 요구되는 안전도 보다 상대적으로 높은 안전도로 나타났으며, 본 연구에서 검토한 해양 로딩암의



(a) Overall results



(b) Detailed part

Fig. 8 Stress contour results for maneuvering mode

Table 4 Evaluation on design safety

Case no.	Mode	Steel grade at max. stress	PLC ¹⁾	$1.5\sigma_a / \sigma_y$	$2.35\sigma_a / \sigma_u$
1	Stored	SS400	No	-	0.534
2	Stored	SS400	No	-	0.287
3	Maneuvering	SS400	Yes	0.051	-
4	Connected	SS400	Yes	0.035	-
5	Connected	SS400	Yes	0.035	-
6	Connected (-40°C)	SS400	No	-	0.986
7	Emergency Release	SS400	Yes	0.062	-
8	Emergency Release	SS400	Yes	0.062	-
9	Maintenance	SS400	No	-	0.038
10	Hydrostatic Test	SS400	Yes	0.056	-

1) PLC: Pressure loading component

구조설계가 벤치마킹을 기반으로 수행되었기 때문에 추후 규정된 구조성능들을 다중 제한조건으로 고려하고 목적함수로 부재 중량을 최소화할 수 있는 최적화된 구조 설계가 필요한 것으로 나타났다. 보관 모드의 설계응력이 높게 나타난 이유는 풍속이 강한 경우에는 해양 로딩암의 작업이 제한되는 반면 보관 모드인 경우에는 가혹한 풍속 상태에서도 구조적인 안전성을 유지해야 하기 때문에 상대적으로 큰 풍하중이 적용되었기 때문이다. 영하 40도의 극한 환경상태가 고려된 연결 모드에서도 저온 열하중의 추가 고려로 인하여 높은 설계응력이 나타났다. 이와 같이 해양 로딩암과 같은 해양 기자재의 구조설계에서 해양 로딩암의 운용 시 작동상태에서 발생하는 다양한 하중과 더불어 극한 환경상태에 대한 환경하중의 정밀한 고려를 통한 구조설계의 개선과 평가가 중요함을 알 수 있다. 해양 로딩암의 구조설계의 개선은 육상에 설치되는 경우에 국부적인 응력 집중 부재에 대한 설계치수 증가나 보강재를 적용할 수 있으며, 해양구조물이나 선박에 설치되는 경우 중량 증가가 최소화 되도록 고강도 재질로 변경하는 개선안을 검토하는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 선박 및 해양플랜트 운용과 관련하여 원유나 천연가스 등과 같은 액체화물 이송에 사용되는 해양 로딩암의 국산화 개발을 위하여 전산해석 기반 100,000DWT급 원유운반선용 해양 로딩암의 초기 구조설계를 검토하였다. 해양 로딩암의 구조 안전성 평가를 위해서는 OCIMF에서 규정된 보관, 운전, 연결, 비상분리, 유지보수 및 정수압 시험에 관련된 설계하중조건과 각 조건 별 허용응력 산정 및 평가방법에 대한 적절한 분석이 이루어져야함을 알 수 있다. 본 연구를 통해서 규정된 설계하중조건에 대한 FEA 기반 구조 안전성 평가와 설계개선 프로세스를 통해서, 전체 설계하중 조건들에 대해서 설계안전도가 만족되는 초기 구조설계안이 도출되었고, 전체 설계하중 조건 중에서 보관 모드와 극한환경 상태에서의 연결 모드에서 상대적으로 높은 응력이 발생하였으며, 풍속 및 혹한과 같은 환경하중의 추가적인 조합이 영향을 준 것으로 나타났다. 이와 같이 선박 및 해양 플랜트 운용과 관련된 다양한 기자재들은 기존의 선급 규정 외에 특별한 설계 및 시험평가 기준들을 만족해야 하기 때문에 기자재의 국산화 개발과 설계 자립도 향상을 위한 지속적인 연구가 필요하다. 저자들은 향후 해양 로딩암과 관련되어 구조 성능을 향상시킬 수 있는 최적화 연구와 더불어 LNG 수요 증가에 대비한 LNG 운송용 극저온 해양 로딩암에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 제일기술산업(주)의 지원으로 수행된 연구과제결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A1002897).

참 고 문 헌

- ASCE - American Society of Civil Engineers, 2005. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures - ASCE7. ASCE, Virginia.
- ASME - American Society of Mechanical Engineers, 2004. Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping Code Requirements. ASME, New York.
- Choi, H.S., Do, C.H., Lee, S.K., 2012. Study on Parameters for Optimum Design of Integrated Subsea System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), 340-349.
- FMC Technologies, 2005. Chiksan Marine Loading Arms. [Online] Available at: <<http://www.fmctechnologies.com/>> [Accessed 1 Oct. 2012].
- International Chamber of Shipping, 1996. International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT). Hyperion Books, New York.
- Lee, K.Y., Choi, H.S., Lee, E.J., Yoon, T.S., 2011. Future Vision through NL Tensioner Technology Development and Domestic Equipment Fabrication. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), 127-133.
- MSC software, 2010. MSC.NASTRAN User's Manual. MSC software, California.
- Kim, S.Y., Lee, D.M., Bae, J.H., Shin, S.C., Sul, C.H., 2009. Development of Bi-directional Triple-eccentric Type Butterfly Valve. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(5), 545-551.
- Kim, Y.J., Kim, Y.H., Woo, N.S., Kwon, J.K., 2011. Numerical Study for Development of Submerged Seawater Lift Pump. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(5), 21-26.
- Ku, N.K., Lee, J.C., Roh, M.I., Hwang, J.H., Lee, K.Y., 2012. Multi-floor Layout for the Liquefaction Process Systems of LNG FPSO Using the Optimization Technique. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1), 68-78.
- Oil Company and International Marine Forum (OCIMF), 1999. Design and Construction Specification for Marine Loading Arms. 3rd ed., Witherby & Co. Ltd., London.
- Uniform Building Code(UBC), 1997. Vol. 2 Structural Design Requirements. International Council of Building Officials, Colorado.