

멤브레인 LNG 운반선용 스카폴딩 시스템의 자동 설계 프로그램 개발

이희태^{†*}, 신상범^{*}, 박윤기^{**}

현대중공업 산업기술연구소^{*}
현대중공업 선박해양연구소^{**}

Development of the Automatic Design Program for Scaffolding System of the Membrane LNG Carrier

Hee-Tae Lee^{†*}, Sang-Beom Shin^{*} and Yun-Ki Park^{**}

Hyundai Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.^{*}
Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.^{**}

Abstract

Scaffolding system in the membrane LNG carrier is a steel structure composed of various pipe-shaped members connected by specific coupling devices. In this study, the automatic design program for scaffolding system in membrane LNG carrier has been developed. It enables user to arrange members easily considering design constraints and input variables such as size of tank, position of legs, level height and so on. In addition to that, it creates finite element analysis model with loading and boundary conditions automatically and carries out structural analysis. With post processor based a state-of-the-art computer graphics, users can easily check the results of structural analysis and make a report for structural safety of scaffolding system.

※Keywords: Membrane LNG carrier(LNG 선), Scaffolding system(스카폴딩 시스템), Structural safety(구조 안전성), Structural analysis(구조 해석), Automatic design system(자동 설계 시스템)

1. 서론

멤브레인형 LNG 운반선의 화물창 작업대인 스카폴딩 시스템(scaffolding system)은 다양한 형상의 부재들이 특수한 형태의 연결재를 통해 조립된 일종의 철 구조물로 화물창(cargo tank)의 치수와

접수일: 2009년 12월 4일, 승인일: 2010년 3월 5일

†교신저자: hiteace@hhi.co.kr, 052-202-6165

작업자의 안전 및 화물창의 보호를 고려하여 구조 안전성 평가 후 제작 및 설치된다. 스카폴딩 시스템의 구조 안전성 평가는 유한요소해석을 통한 구조 해석을 기반으로 이루어지는데, 스카폴딩 시스템의 경량화 및 부재 재 활용을 향상을 통한 제작 비용 절감과 작업 편의성 향상을 위해서는 설계시 반복적인 구조 안전성 평가를 통한 최적의 부재 배치 작업이 이루어져야 한다. 그러나 스카폴딩 시스템은 다양한 종류의 부재들이 복잡하게 연결되어 있어 구조 해석을 위한 모델링 및 해석 결과를 이용한 구조 안전성 평가에 많은 시간과 노력이 소요된다. 특히 최근 선형의 대형화 및 다양화 추세와 건조 물량의 증가로 인해 스카폴딩 시스템에 대한 설계 비용이 증가하고 있을 뿐 아니라, 반복적인 해석 작업을 통하여 스카폴딩 시스템의 제작, 설치, 운용 등의 제반 업무에서 발생하는 문제점에 신속하게 대응하기에는 많은 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 멤브레인형 LNG 운반선의 대형화 및 다양화에 보다 효율적으로 대처하기 위한 방안으로 화물창 단열시스템의 제작을 위한 스카폴딩 시스템의 부재 자동 배치와 구조 안전성 평가가 가능한 설계프로그램을 개발하고자 하였다.

2. 부재 강도 평가

멤브레인 LNG 운반선의 단열창 시공을 위한 스카폴딩 시스템은 단열창 시공이 종료된 후 화물창 내에서 해체된다. 이런 이유로 스카폴딩 시스템은 조립 및 해체의 편의성을 위해 소부재인 파이프들의 용접을 통해 제작된 단위 부재들의 끝단에 설치된 특수한 형태의 연결재들을 통해 조립된다. 단위 부재의 연결을 통해 구성된 스카폴딩 시스템은 Fig. 1 과 같이 매우 복잡한 형태의 구조물로 구조 안전성 평가를 위한 구조 해석을 소부재인 파이프를 기준으로 수행할 경우 많은 시간과 노력이 요구된다. 이에 본 연구에서는 구조 안전성 평가를 위한 구조 해석시 설계자의 편의를 위해 단위 부재들을 등가 보로 치환하였다. 이를 위해 본 논문에서는 스카폴딩 시스템에 적용되는 단위 부재들을 대상으로 좌굴

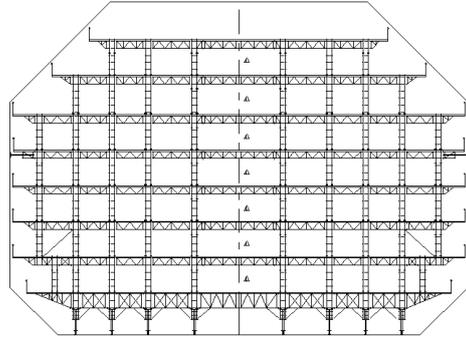


Fig. 1 Scaffolding system for membrane LNG carrier

강도와 굽힘 강도 시험을 수행하고 임계 좌굴 하중 및 굽힘 모멘트를 정의하였다.

Fig. 2 는 스카폴딩 시스템의 단위 부재들에 대한 좌굴 강도 시험 개념도를 나타내고 있다. 좌굴 강도 시험시 단위 부재를 반력상(strong floor)에 수직으로 고정된 상태에서 하중 프레임(loading frame)에 부착된 100 톤 용량의 하중기로 수직 하중을 가하였으며, 굽힘 강도 시험은 단위 부재를 반력상에 수평으로 고정된 다음 단위 부재의 중심에 하중이 작용하도록 하였다. 좌굴 및 굽힘 강도 시험시 대변형 측정용 변위계를 관심 부위에 부착

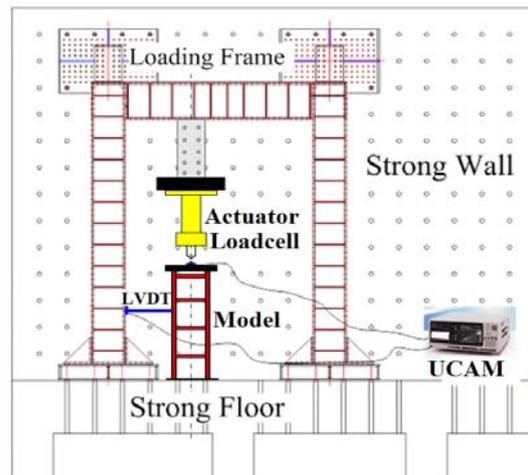
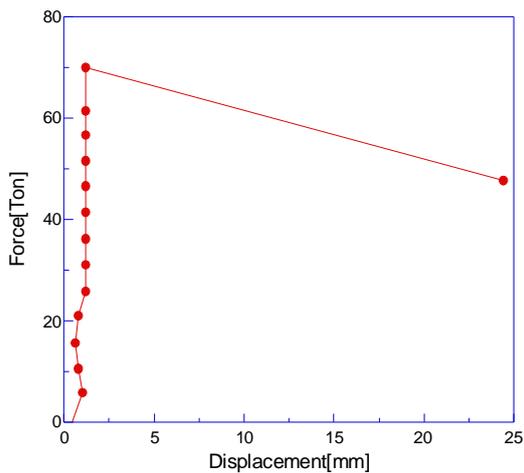
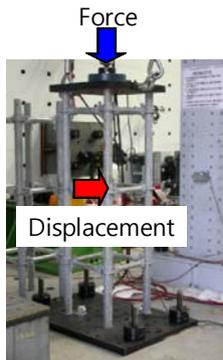


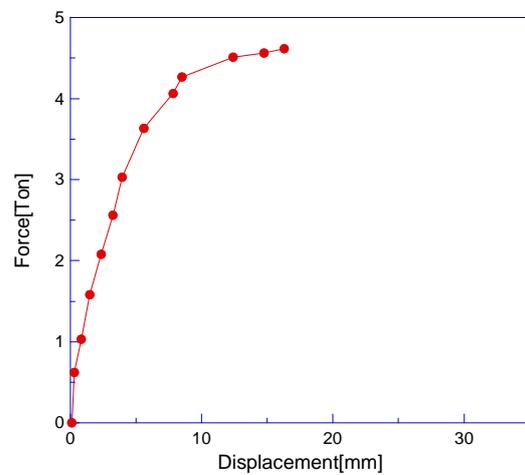
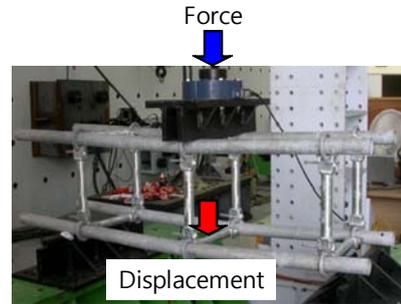
Fig. 2 Schematic drawing of the buckling test for unit member

하여 부재에서 발생하는 변형량을 계측하였다. Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 좌굴 및 굽힘 강도 시험으로부터 구한 단위 부재의 하중 크기에 따른 계측 지점에서의 변형량 변화를 나타내고 있다.

좌굴 강도 시험 결과인 Fig. 3 (a)에서 부재에 발생한 변형량들은 하중이 증가함에 따라 선형적으로 증가하다 일정한 하중 이상에서 변형량이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 굽힘 강도 시험 결과인 Fig. 3 (b)의 경우, 처짐량이 하중의 증가에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이상과 동일한 방법으로 각 주요 구조 부재들에 대한 시험 결과를 토대로 본 연구에서는 단위 부재를 하나의 보 요소로 치환 가능하도록 면내 및 면외 강성을 정의하였다.



(a) Buckling test



(b) Bending test

Fig. 3 Change of displacements according to load at measuring point

3. 스카폴딩 시스템 설계

3.1 허용 응력 및 설계 기준

스카폴딩 시스템의 허용 응력 즉, 설계 기준 응력은 JIS(2004)를 토대로 식 (1) ~ (3)과 같이 정의하고, 스카폴딩 시스템의 각 부재별 설계 응력이 설계 기준 응력을 초과하지 않도록 규정하였다. 이때, 각 부재에서 설계 응력 수준은 3 차원 프레임 해석 결과를 토대로 평가된 각 응력들에 의한 조합 응력으로 평가하였다(AISC 1989).

1) 기준 응력

$$F=YP \text{ or } 3/4 \times TS \quad (1)$$

여기서,

YP, TS : 모재의 항복 및 인장 강도[kgf/mm²]

2) 허용 굽힘(fb) 응력 및 허용 전단(fs) 응력

$$fb=1/1.5 \times F, fs=0.38 \times F \quad (2)$$

3) 허용 인장 응력(ft) 및 허용 압축 응력(fc)

$$ft=0.75 \times F, fc= \min(0.75 \times F, BS) \quad (3)$$

여기서,

BS : 부재 좌굴 강도[kgf]

3.2 설계 절차

스카폴딩 시스템의 설계 절차는 Fig. 4 와 같이 설계 제한 조건을 고려한 부재 배치를 통해 스카폴딩 시스템을 구성하고, 이를 유한요소해석 모델로 생성시킨 후 구조 해석 및 구조 안전성 평가를 수행하도록 구성되어 있다. 그리고 구조 안전성 평가 결과와 화물창 단열판에 작용하는 하중인 스카폴딩 시스템의 레그(leg)에서의 반력이 허용 기준을 만족하면 결과를 리포트로 작성한 후 상세 설계 및 제작에 착수하지만, 기준에 만족하지 못할 경우 구조 안전성이 확보될 때까지 부재 배치 및 구조 안전성 평가를 반복적으로 수행하도록 알고리즘을 구성하였다.

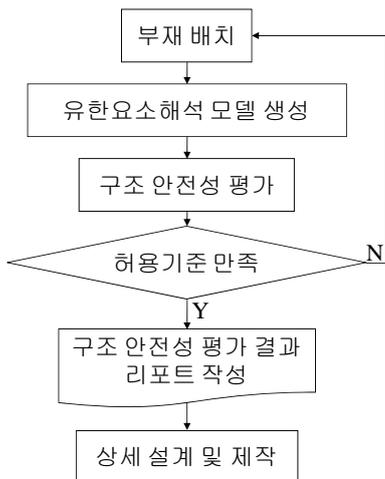


Fig. 4 Design procedure of scaffolding system

Fig. 4 에서 설계 제한 조건을 고려한 스카폴딩 시스템의 부재 배치는 Fig. 5 의 순서로 수행되도록 알고리즘을 구축하였다. Fig. 5 에서 스카폴딩 시스템의 가장 기본이 되는 설계 제한 조건인 레그 위치는 멤브레인 LNG 운반선의 화물창의 1 차 방벽에서 열 응력 제어를 위한 주름(corrugation)의 배치 방안을 토대로 결정된다, 그리고, 일단 레그의 위치가 선정되면, 각 기둥 부재들이 배치된다. 스카폴딩 시스템의 층간 높이인 컬럼 높이는 선박의 의장 작업을 위한 사이드 오프닝(side opening)의 위치, 탱크 천정과 스카폴딩 시스템 최상단 사이의 간격, 그리고 부재의 재활용 및 작업 공간 등을 고려하여 결정할 수 있도록 개발되었다.

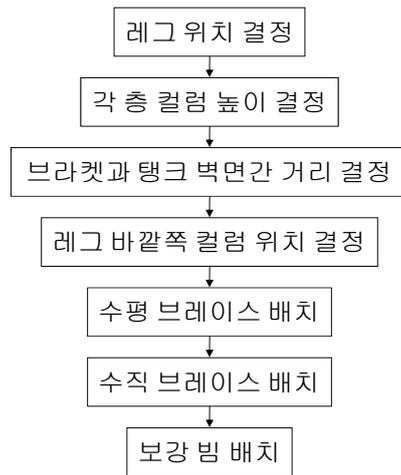


Fig. 5 Member arrangement procedure of scaffolding system with design constraint condition

Fig. 6 은 브라켓, 컬럼 그리고 레그의 위치를 나타내고 있다. 스카폴딩 시스템의 선폭 방향 양끝단 부재인 브라켓과 탱크 벽면 사이의 간격은 선폭 방향의 화물창 제작시 작업성에 매우 큰 영향을 미치는 설계 인자이므로 브라켓 끝단과 탱크 벽면간 거리가 적절하게 결정되어야 한다. 여기서 브라켓의 길이를 선폭 방향으로 존재하는 마지막 레그의 위치를 기준으로 설정할 경우

외팔보인 브라켓에 큰 굽힘 응력이 발생하여 구조 안전성을 만족시킬 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 부재의 강성과 하중 조건 그리고 부재의 재활용과 작업 공간 확보등을 고려하여 컬럼을 추가하도록 알고리즘을 구성하였다. 그리고 주요 부재에 대한 배치 작업 수행 후 스카폴딩 시스템에서 강도 또는 강성이 부족한 곳에 수평 및 수직 브레이스와 보강 빔 배치를 자동적으로 수행하도록 개발되었다.

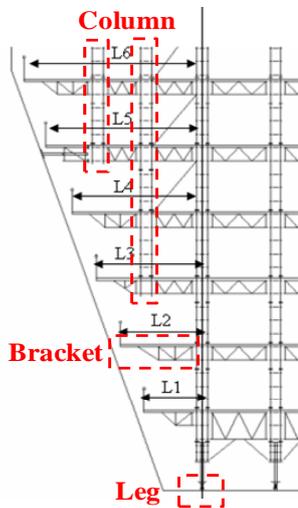


Fig. 6 Location of brackets, columns, and legs

4. 스카폴딩 시스템 자동 설계 프로그램

스카폴딩 시스템 자동 설계 프로그램은 Fig. 4의 부재 배치에서부터 구조 안전성 평가 결과 리포트 작성까지의 일련의 과정을 자동화한 설계 프로그램이다. 개발된 프로그램은 사용자의 편의성을 도모하고 설계 시간을 최소화하기 위해 탱크 형상, 레그의 위치, 층간 높이 등과 같은 기본적인 설계 데이터, 설계 제한 조건, 그리고 앞 절에서 소개된 부재 배치 절차를 참조하여 부재를 자동으로 배치하고 상용 유한요소해석 프로그램(HKS 2003)과 연계해 구조 안전성 평가를 자동적으로 수행하도록 개발되었다. Fig. 7은 본 연구에서 개발한 스카폴딩 자동 설계 프로그램

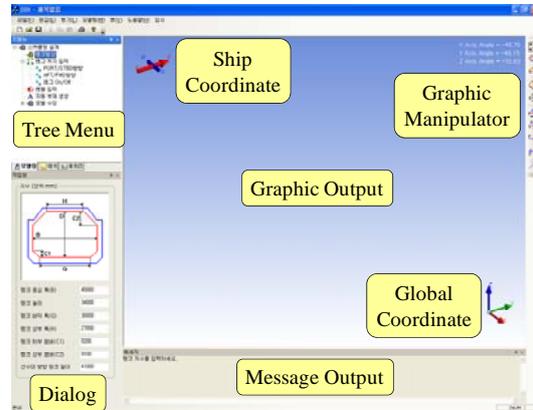


Fig. 7 Automatic design program of scaffolding system

의 주 화면을 나타내고 있다. Fig. 7과 같이 본 연구에서 개발된 프로그램은 크게 Tree 메뉴창, 설계 정보 입력을 위한 입력창, 설계 진행 단계를 실시간으로 출력하는 그래픽 출력창과 메시지 출력창으로 구성되어 있다. 본 프로그램을 이용하여 스캐폴딩 시스템의 자동 부재 배치를 위해서는 각 부재에 대한 설계 제한 조건의 입력이 요구된다. 이를 위하여 본 프로그램에서는 각 부재의 구조 강성과 하중 조건과 보 이론(Warren and Richard 2002)을 이용하여 평가된 각 부재들의 임계 길이를 설계 제한 조건으로 사용하도록 개발하였으며, 사용자가 이에 대한 설계 변경 및 보완이 가능하도록 각 부재의 설계 제한 조건을 평가할 수 있는 프로그램을 Fig. 8과 같이 별도의 모듈을 탑재함으로써 설계 편의성의 향상을 도모하였다

스카폴딩 시스템 자동 설계 프로그램의 부재 배치 수행 절차는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 사용자는 탱크의 치수, 레그 위치, 그리고 각 층 컬럼 높이를 입력하면, 각 부재들에 대한 설계 제한 조건을 이용하여 부재 배치가 자동적으로 수행된다. 입력된 설계 변수들의 확인을 위해 Fig. 7의 “그래픽 출력창”에 탱크 형상, 레그 위치, 각 층 컬럼 높이들이 입력될 때 각 설계 변수에 적합한 3차원 그래픽 요소들이 단계적으로 출력된다.

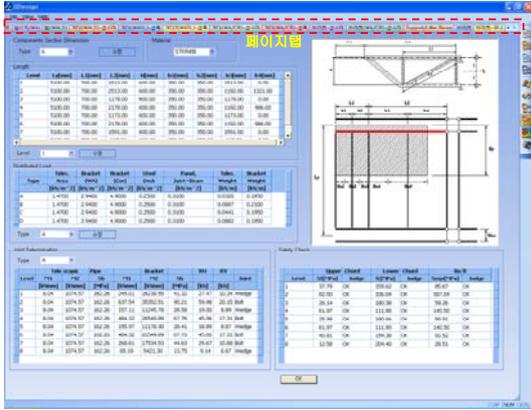


Fig. 8 Basic design module of scaffolding system

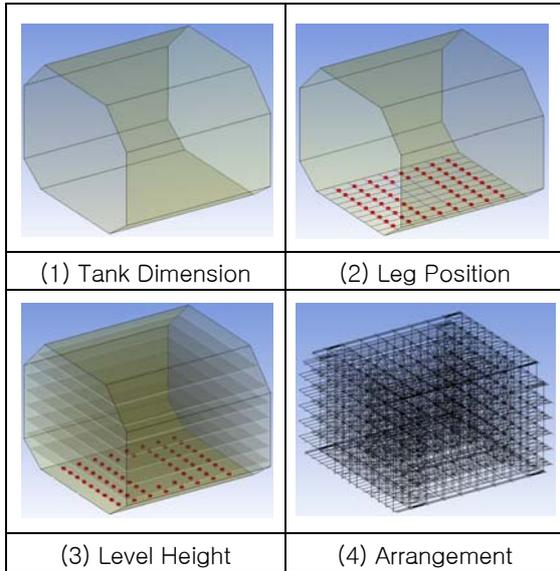


Fig. 9 Procedure of automatic member arrangement of scaffolding system

스카폴딩 시스템 설계시 자동 부재 배치 후 경우에 따라 부재를 추가적으로 생성하거나 배치된 부재를 수정해야 할 경우가 발생한다. 이 경우 구조 안전성 평가를 위한 구조 해석시 하중 및 경계 조건이 변하게 된다. 이에 스키폴딩 시스템 자동 설계 프로그램에서는 유한요소해석에 적용되는 절점(node), 요소(element), 그리고 하중 및 경계 조건의

생성 및 수정할 수 있는 기능을 Table 1 과 같이 추가하였다.

Table 1 Functions for modification of analysis model

Graphic Entity	Function	Remark
Node	Generation	Generation, delete, move, and copy of nodes
	Delete	
	Move	
	Copy	
Element	Generation	Generation, delete, and modify of elements
	Delete	
	Modify	
Force	Distributed Load	Generation, modify, and delete
	Concentrated Load	
Boundary Condition		

스카폴딩 시스템의 구조 해석은 보와 트러스 요소를 이용해 수행되기 때문에 구조 안전성 평가의 경우 굽힘 모멘트, 전단력, 그리고 압축 부재의 경우 좌굴 강도를 고려하여 평가해야 한다. 이때, 좌굴 강도의 경우 부재의 비지지 길이를 통해 평가가 가능하다. 부재의 비지지 길이를 평가하는 가장 쉬운 방법은 부재의 양단을 두 개의 절점으로 하는 한 개의 보 요소로 모델링한 후 두 절점간 거리를 비지지 길이로 계산하는 방법이다. 하지만 부재 중간에 보강재가 추가되고, 또 보다 정확한 해석을 위해 부재를 몇 개의 요소로 나눌 경우 부재의 비지지 길이를 평가하기가 어렵다. 이에 본 연구에서 제안한 스키폴딩 자동 설계 시스템에서는 Fig. 10 과 같이 각 절점에 아이디(ID)를 할당하여 부재의 비지지 길이를 평가한 후 이를 이용하여 허용 좌굴 강도를 자동으로 계산할 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

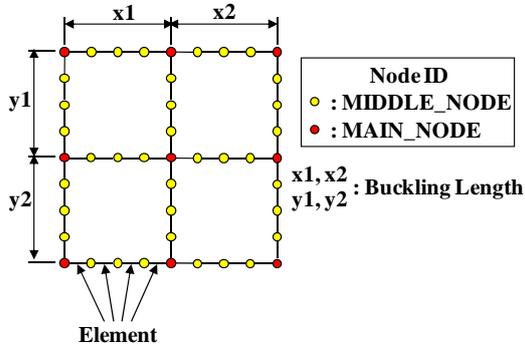


Fig. 10 Evaluation of member buckling length using node ID

5. 프로그램 검증

개발된 프로그램을 검증하기 위해 216K 멤브레인 LNG 운반선의 No. 1 탱크에 적용된 스카폴딩 시스템에 대해 자동 설계 프로그램을 통한 구조 해석 결과와 실제 제작을 위해 설계된 스카폴딩 시스템의 구조 해석 결과를 상호 비교하였다. 해석 모델은 스카폴딩 시스템 자동 설계 프로그램을 통해 구해진 자동 부재 배치 결과에 실제 제작된 스카폴딩 시스템과 유사하게 부재를 추가하여 해석한 후 결과를 비교하였다. 하중 조건의 경우 레벨 6 과 7 에서 CCS(cargo containment system)의 설치 작업이 수행되는 것으로 가정하여 하중을 부여하였으며, 수직 및 수평 하중이 동시에 작용하는 조건에 대해 해석 결과를 비교하였다. Fig. 11 은 검증 모델과 하중 및 경계 조건을 나타내고 있다.

Fig. 12 는 중력 방향 처짐을 비교한 결과로 자동 설계 프로그램 모델의 경우 중력 방향이 Z 축이고 실제 모델의 경우 Y 축이다. Fig. 12 에서 자동 설계 프로그램에서의 최대 처짐량은 31.2mm 이고, 실제 모델의 최대 처짐량은 35.6mm 로 약간의 오차는 있으나 거의 유사한 수준이다.

화물창 단열판 위에 놓인 스카폴딩 시스템의 레그에서의 반력이 글 경우 단열판이 손상된다. 따라서 레그에서의 반력은 중요한 설계 제한 조건

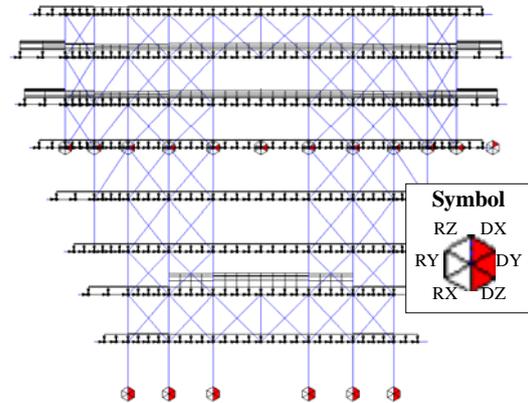
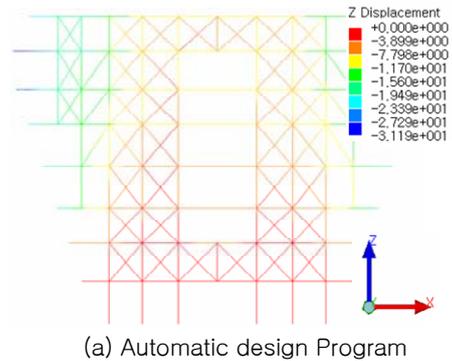
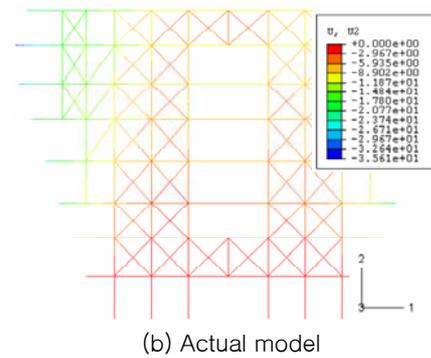


Fig. 11 Analysis model for program verification



(a) Automatic design Program



(b) Actual model

Fig. 12 Comparison results of deformation in gravitational direction

중 하나이다. 개발된 프로그램의 경우 구조 안전성 평가 결과에서 반력의 크기를 쉽게 확인할 수 있다. Table 2 는 경계 조건이 있는 절점에서의

X, Y 그리고 Z 축 방향의 반력의 합을 나타내고 있는데 실제 모델의 반력 결과는 자동 설계 프로그램과 동일한 좌표계로 변환시킨 결과이다. Table 3 에서 X, Y 그리고 Z 축 방향의 반력은 자동 설계 프로그램의 경우 각각 41 톤, 41 톤, 그리고 773 톤이고, 기존의 해석 모델의 경우 각각 40 톤, 40 톤, 그리고 779 톤으로 변형량과 같이 약간의 오차는 있으나 거의 유사한 수준임을 알 수 있다. 자동 설계 프로그램의 해석 모델과 실제 모델간에 구조적인 약간의 차이점을 고려할 때 두 해석 결과 간의 변형량과 반력에 대한 차이는 무시할 수 있는 수준임을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of reaction forces

Analysis Model	X Dir. Reaction Force [kgf]	Y Dir. Reaction Force [kgf]	Z Dir. Reaction Force [kgf]
Automatic Design Program	40,957	40,957	773,795
Actual	39712	39712	778,774
Difference	1,245	1,245	-4,979

Fig. 13 은 검증 모델에 대한 구조 안전성 평가 결과를 나타내고 있다. Fig. 13 에서 결과가 100 이하일 경우 구조적으로 안전한 부재인 반면, 100 이상일 경우 부재에 작용하는 하중이 허용치를 초과하여 구조적으로 문제가 발생할 수 있는 부재임을 나타낸다. Fig. 13 에서 구조 안전성 평가 결과가 비교적 큰 붉은색 사각형의 레벨 2 와 3 에 있는 기동 부재에 대한 실제 모델의 구조 안전성 평가와의 비교를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 에서 자동 설계 프로그램이 실제 모델보다 약 5%정도 높게 예측하고 있지만 비교적 작은 오차값을 보임을 알 수 있다. 이상의 검증 결과 실제 모델의 해석 결과와 근소한 오차는 있지만 해석 모델간의 구조적 차이를

고려할 때 그 차이가 매우 미미하므로 본 연구에서 개발한 자동 설계 프로그램이 스카폴딩 시스템의 설계에 적용 가능함을 알 수 있다.

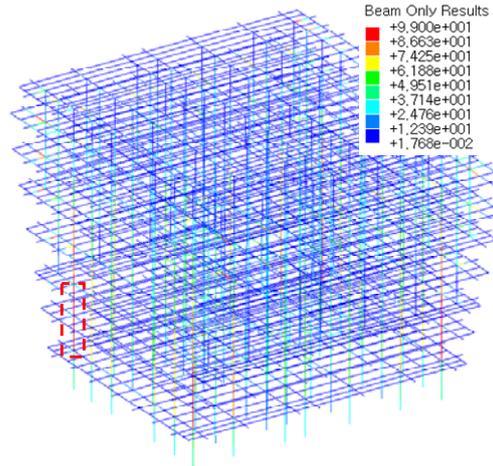


Fig. 13 Contour plot of structural safety evaluation results for scaffolding system using the program

Table 3 Results of structural safety evaluation

Level	Automatic Design Program	Actual Model
2	93.5	88.6
3	89.8	83.6

6. 결론

다양한 크기의 멤브레인 LNG 운반선의 화물창의 단열시스템의 시공을 위한 스카폴딩 시스템의 자동 설계 프로그램을 개발하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 멤브레인형 LNG 운반선 화물창의 크기 및 작업 조건을 고려할 수 있는 스카폴딩 자동 배치 설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 스카폴딩 시스템 자동 설계 프로그램은 설계 제한 조건

들을 고려한 자동 부재 배치, 응력 해석, 부재의 추가 및 삭제를 통한 부재 재배치, 그리고 설계 결과의 보고서 작성 등의 기능들을 가지고 있다.

- 2) 개발된 설계 프로그램의 적용시 각 구조 부재 즉, 거더, 브라켓 그리고 칼럼등과 같은 구조 부재에 대한 설계 제한 조건의 결정 및 구조 변경을 위한 기본 설계 모듈을 개발하였다.
- 3) 개발된 설계 프로그램의 타당성은 기존의 216K 멤브레인 LNG 운반선용 스키폴딩 시스템과의 변형량, 반력, 그리고 코드 체크 결과의 비교를 통하여 검증되었다.

참 고 문 헌

- AISC. 1989, Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design, Ninth Edition, AISC, Chicago.

- HKS Inc. 2003, ABAQUS User's Manual, Version 6.4-1, USA
- JIS G 3101, 2004, Rolled Steels for General Structure.
- Warren, C.Y. and Richard, G.B., 2002, Roark's Formulas for Stress and Strain. Seventh Edition, McGraw-Hill, New York.



< 이 희 태 > < 신 상 범 > < 박 윤 기 >