

FPSO Topsides Pipe Rack 견적 중량 추산 방법 연구

이수호¹·안현식¹·김한성¹·허윤¹·배재류¹·김기수²·함승호²·이성민²·노명일^{3,†}
대우조선해양 기술전략부¹
서울대학교 조선해양공학과²
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소³

A Study on Weight Estimation and Calculation of the Pipe Rack Structures for FPSO EPC Projects

Soo-Ho Lee¹·Hyun-Sik Ahn¹·Han-sung Kim¹·Yoon Heo¹·Jae-Ryu Bae¹·Ki-Su Kim²·Seung-Ho Ham²·Sung-Min Lee²·Myung-Il Roh^{3,†}
Technology Strategy Department, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University^{3,†}

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The weight estimation and calculation of FPSO topsides is first performed at the bidding stage of projects. At this time, it is difficult to estimate and calculate accurately the weight because most of items of FPSO are not apparently defined. Especially, in the case of the pipe rack module, its portion of the total weight and the range of weight variation are large due to special features of piping and electric equipment in the module. Thus, it is very important to estimate and calculate accurately its weight in the task of the weight estimation and calculation of FPSO topsides. In this study, the past data for the weight of the pipe rack module were collected and analyzed, the WBS (Work Breakdown Structure) for the pipe rack module was constructed, and primary variables and secondary variables for developing a weight estimation and calculation model were selected. That is, after analyzing the past data, the volume was selected as the primary variable and the regression analysis was performed based on the variable. Then, several secondary variables were selected and incorporated into a weight estimation and calculation model. At this time, the weight per discipline was assumed from ratios of the total weight. Finally, the weight of the pipe rack module was estimated and calculated by using the developed model. As a result, the deviation from the model was better than that (-20% ~ 60%) of other studies about the weight estimation and calculation of FPSO topsides. Thus, the validity and applicability of the weight estimation and calculation of the pipe rack could be checked.

Keywords : Pipe rack(파이프 랙), Weight estimation and calculation(중량 추산), Work breakdown structure(작업 분류 체계), Regression analysis(회귀 분석)

1. 서론

FPSO(Floating, Production, Storage, and Offloading unit)는 해양원유 개발을 위한 부유식 원유 생산, 저장, 하역 설비로서, 해상의 일정 지역에 머물면서 해저의 원유를 뽑아내고 이를

1차적인 처리와 함께 생산된 원유를 원유운반선(oil tanker)으로 이송시키는 설비이다. FPSO는 크게 선체(hull)와 상부 구조물(topsides)로 나뉘며, 상부 구조물은 기능 혹은 특정 위치에 따라 모듈(module)로 구분된다. Fig. 1은 FPSO의 전체적인 모습과 상부 구조물의 모듈 구성을 보여준다.

FPSO는 상부의 제한된 공간에 원유의 생산, 처리, 저장 그리

고 이송 작업을 위한 설비와 장비들을 모두 갖추어야 하기 때문에, 육상 플랜트에 비해 복잡하고 집약적인 특성을 가진다. 또한 각 FPSO는 광구의 위치에 따라 처리하는 원유의 양과 성분이 모두 다르기 때문에 일반 선박과는 달리 상부 구조물의 장비와 구조물의 선정 및 설계 과정을 일반화 하여 정의하기 어렵다. 특히, 각각의 FPSO는 프로젝트 별 혹은 선주사에 따라 각기 다른 개념과 철학을 가지게 되어 서로 상이한 특성을 가진다. 그 특성들 중에서도 중량은 FPSO의 기본 제원의 결정과 설계 전반, 생산 비용 등에 영향을 주는 중요한 요소이다. 따라서 설계 초기에서부터 중량 추정(estimation)과 추산(estimation and calculation)이 이루어지게 되며 설계의 진행과 동시에 이를 관리하는 중량 제어(weight control)를 수행하게 된다. 중량 추정은 실적 데이터를 기반으로 통계적인 방법 등을 이용하여 해당 공사의 전체 중량을 도출하는 것이며, 중량 추산은 전체 중량 도출뿐만 아니라 이를 보정하는 기능을 동시에 갖춘 것을 말한다. FPSO 상부 구조물의 중량 추정은 프로젝트의 입찰 단계에서 최초로 수행되는데, 이 과정에서 FPSO의 모든 요소가 명확히 정의되어 있지 않기 때문에 정확한 중량 예측이 어려운 상황이다. Rui and Walker (2015)의 연구에 따르면 이러한 이유로 인해 FPSO는 다양한 해양플랜트 설비 중 건적 대비 가장 큰 중량 편차를 가진다고 한다. 특히, 조선소의 EPC 프로젝트 시작 단계인 FEED 설계 이후에도 FPSO 상부 구조물의 경우 건적 대비 -20%~60%의 중량 편차를 보인다. 또한 아직 국내 조선소의 FPSO 건조 실적이 적고 중량 관련 실적은 사내 비밀로 취급되어지기 때문에 통계적 의미를 가지는 실적 데이터의 수집이 힘들어 중량 추정에 어려움이 있다. FPSO 상부 구조물의 중량과 관련하여 Fig. 2는 FPSO 상부 구조물의 각 공종(discipline)별 중량 비율을 보여주고, Fig 3은 FPSO 상부 구조물의 공종별 건적 대비 실제 건조 중량과의 편차를 보여준다. Fig. 2에서 보듯이 FPSO의 상부 구조물에서 공종별 중량 구성은 일반적으로 배관의 구성이 구조에 이어 2번째로 큰 비중을 차지하고 있으며, 또한 건적 대비 중량 편차가 가장 크다. 따라서 배관은 매우 큰 중량 비중을 차지함에도 불구하고 초기 중량 추정 값과 건조 중량의 차이가 커, 전체 프로젝트의 중량 정확도에 큰 영향을 미친다.

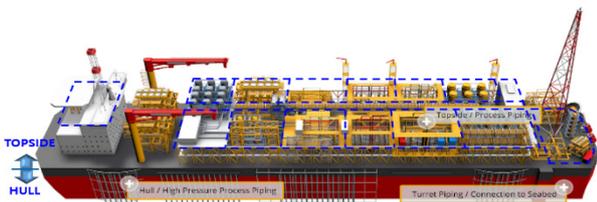


Fig. 1 Example of FPSO topsides and its layout

Fig. 2와 Fig. 3을 살펴보면, FPSO 상부 구조물의 중량 추정 정확도는 배관 중량 추정의 정확도에 기인한다고 볼 수 있다. 프로세스 모듈에도 일부 배관과 전기 설비를 갖추고 있지만, pipe rack에 대부분의 배관과 전기 설비를 갖추고 있기 때문에, pipe rack 모듈의 중량을 추산하는 것은 일반적인 모듈 하나의 중량 추산하는 것 이상의 의미를 지닌다.

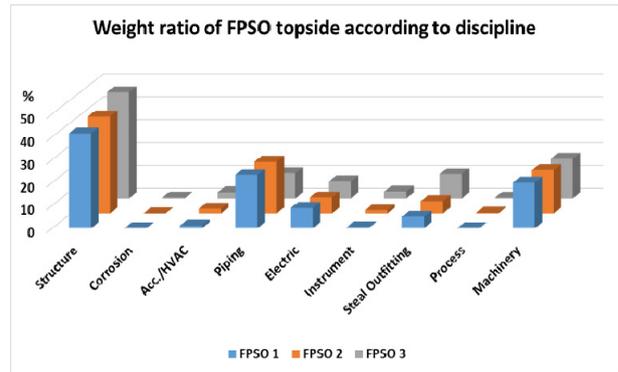


Fig. 2 Weight ratio of FPSO topsides according to discipline

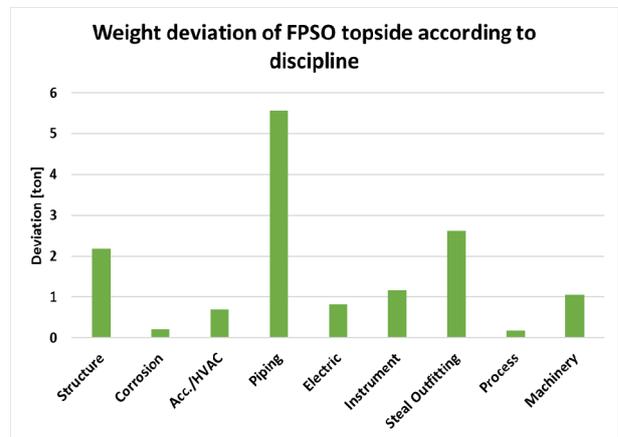


Fig. 3 Weight deviation of FPSO topsides according to discipline

한편, FPSO는 원유를 처리하고 저장하기 위해 상부에 많은 배관이 설치되어 있으며, 이 설비들은 pipe rack을 중심으로 각각의 모듈에 연결되어 있다. pipe rack은 상부 구조물의 프로세스 모듈(process module)과는 구분되는 독립적인 모듈 구조를 가지고 있으며, 전체적인 원유 처리와 저장에 필요한 배관과 전기 설비들을 포함하고 있다. Fig. 4는 FPSO의 전체 pipe rack과 하나의 pipe rack 모듈의 예를 보여준다.



Fig. 4 Example of the pipe rack and the pipe rack module of FPSO

2. 기존 중량 추정 방법과의 비교

선박의 중량 추정에 관한 연구는 많이 이루어져 왔지만, 해양 플랫폼의 중량 추정 또는 FPSO 상부 구조물 내 모듈의 중량 추정과 관련 된 연구는 아직 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 선박과 해양플랜트의 중량 추정 방법에 관련된 연구와 해양플랜트의 중량을 분석한 연구를 조사하고, 비교해 보았다.

Runar and Bjorhovde (2010)는 선박의 중량 추정에 통계적 방법을 이용하였다. 통계 분석을 위해서 추론적 방법을 이용하여 중량 추정식을 상수와 몇 가지 변수의 곱으로 표현하였으며, 이를 통해 선박의 중량 추정 모델을 개발하였다. Cho (2011)는 컨테이너선을 대상으로 통계적 방법을 이용하여 중량을 추정하였다. 변수 선정을 위한 상관 분석과 통계 분석을 위한 다중 회귀 분석을 통해 추정식을 도출하고 선박의 중량 추정 모델을 개발하였으며, 이를 초기 설계 단계에서 활용하고자 하였다. Rui and Walker (2015)는 153건의 해양 프로젝트를 대상으로 회귀 분석을 통해 건적 대비 실제 건조 중량의 관계를 분석하였다. 건적 시점과 선종 등에 따라 건적 대비 실제 건조 중량의 편차를 밝히고, 이와 같은 중량 편차는 촉박한 일정과 설계 부서의 건적 실력 등으로 인해 발생하는 것으로 분석했다. Bolding (2001)은 60 개의 해양 프로젝트에 대해 체적 밀도(volumetric density) 방법을 적용하여 중량 추정을 진행하였다. 또한 체적 이외의 다른 요소를 반영하기 위하여, 모듈 중량 중 기계 중량의 비율에 수정 계수(adjusted coefficient)를 도입하여 중량 추정 시 기계 중량의 영향을 고려할 수 있도록 하였다. Seo, et al. (2013, 2014)의 연구에서는 FPSO를 대상으로 통계적인 방법을 이용한 중량 추정을 수행하였다. 변수 선정을 위한 상관분석과 통계 분석을 위한 비선형 다중 회귀 분석을 통해, 추정식을 도출하고 해양플랜트의 중량 추정 모델을 개발하였다. Um, et al. (2014, 2015)의 연구에서는 FPSO를 대상으로 하여 실제 데이터로부터 최적화 방법을 통해 최적의 중량 추정식을 추산하고자 하였다. 즉, GP(Genetic Programming)를 이용해 추정식을 도출하여 해양플랜트의 중량 추산 모델을 개발하였다. Table 1은 관련 연구를 요약 정리한 것이다.

이상의 연구들은 선박이나 해양플랜트의 전체 혹은 모듈 단위의 중량을 추정하는 것으로 한정되었다. 하지만 그 이하의 단위 즉, 모듈 내의 공종별 중량에 대한 분석 및 이의 영향을 적용한 연구는 이루어진 바가 없다. 따라서 본 연구의 목적은 pipe rack의 중량 추산에 대한 근거를 제공하고 추산 방법을 도출하고, 이를 통해 FPSO 상부 구조물 전체의 중량 추산을 하고자 한다. 따라서 FPSO 상부 구조물의 pipe rack 모듈들을 대상으로, 각 세부 공종별로 구성 된 하위 단위로 분류하여 각각의 중량을 분석하고 다양한 방법을 활용하여 중량을 추산하는 연구를 진행하였다. 또한, 중량 추산의 적용 단계를 FEED 설계 이후로 설정함으로써, 국내 조선소의 EPC 프로젝트를 수주하였을 때의 상황에서 적용할 수 있게 하였다.

Table 1 Comparison of this study with related works

Study	Objective	Number of data	Estimation method	
Runar and Bjorhovde (2010)	Ship	17	Statistical method	Ratiocination method
Cho (2011)	Ship	21	Statistical method	Regression method
Rui and Walker (2015)	Offshore project	153	Statistical method	Regression method
Bolding (2001)	Offshore project	60	Heuristic method	Volumetric density method
Seo et al. (2013; 2014)	Offshore project	10	Statistical method	Regression method
Um et al. (2014; 2015)	Offshore project	10	Heuristic method	Optimization method
This study	Offshore project (pipe rack module)	3	Statistical method	Regression & volumetric density method

3. Pipe rack 모듈의 중량 분석

본 연구에서는 실적 데이터를 활용하여 FPSO 상부 구조물의 pipe rack 모듈 중량을 하위 공종 단위 별로 분석하고, 이를 근거로 pipe rack 모듈의 총 중량을 추산하는 방법을 연구하였다.

3.1 WBS (Work Breakdown Structure)

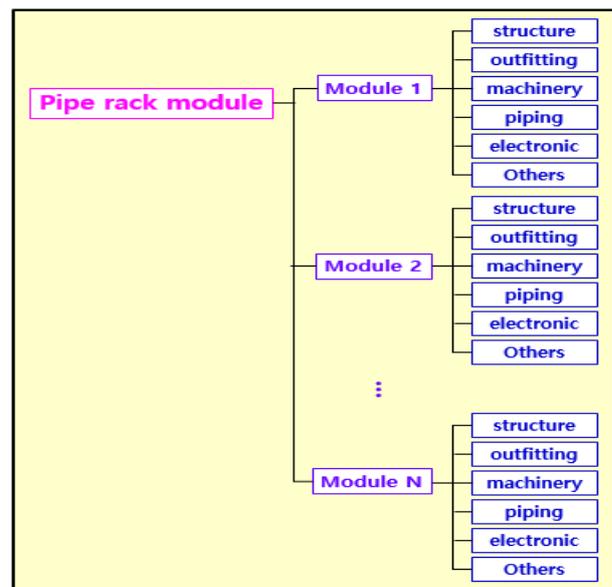


Fig. 5 WBS of the pipe rack module of FPSO for the weight estimation and calculation

중량 추산에 우선하여 앞서 설명한 중량 분석의 시행 및 체계적인 중량 추정을 위해 pipe rack 모듈의 중량을 하위 단위로 분개하여 WBS를 구성하였다. 본 연구에서는 설정한 WBS는 Fig. 5와 같다. WBS는 FPSO의 pipe rack을 대상으로 작성하였으며 pipe rack의 하위 단위로는 각각의 단위 모듈을, 최종 하위 단위는 공종별로 나누어 구성하였다. 공종은 구조(structure), 의장(outfitting), 기계(machinery), 배관(piping), 전기(electronic), 기타(others)로 구분되며, 이는 국내 대형 조선소에서 흔히 활용되는 단위 공종을 반영한 것이다.

3.2 Pipe rack 모듈의 중량 실적 데이터

본 연구를 위해 기 진행된 FPSO 프로젝트 3개의 실적 데이터를 확보하였다. 이 데이터는 pipe rack 전체의 중량과 각 세부 모듈의 중량, 그리고 각 세부 모듈 별, 공종별로 구성된 WBS의 구조에 대응되는 중량 데이터를 나타낸다. Fig. 6은 본 연구에서 사용한 데이터를 나타낸 것이다. 이들 중 중량 분석을 위해서 2기의 FPSO의 실적 데이터 H0001과 H0002를 활용하였고, H0003의 실적 데이터는 이후 중량 추산 방법의 검증에 사용하였다. 실적 데이터를 WBS 별로 세분화 하여 각 실적 데이터를 5~9개의 모듈로 세분화할 수 있으며, 그 하위 단위인 공종까지 세분화 한다면, 결과적으로 활용할 수 있는 실적 데이터의 수는 증

가하게 된다. 따라서 pipe rack 전체의 중량 데이터 3개, 각 모듈의 중량 데이터 21개, 그리고 각 공종별 중량 데이터는 21개를 확보하여 활용하였다.

3.3 중량 추산을 위한 변수 설정

Pipe rack의 중량을 추산하기 위해서 두 가지 종류의 변수를 설정하였다. 먼저 중량 추산식(weight estimation and calculation model)의 변수가 되는 주요 변수와 중량 추산식에 factor로서 들어가는 보조 변수를 설정하였다. 주요 변수로서 체적(volume)을 단일 변수로 설정하였다. Pipe rack 모듈의 중량은 구조 공종의 중량이 주를 이루고, 기타 배관 및 전기 공종의 중량으로 구성된다. Bolding (2001)을 포함하여 많은 연구에서 체적을 중량 추산의 주요 변수로 설정하고 있기에 본 연구에서도 이를 단일 변수로 지정하였다. 한편, 보조 변수는 선주의 요구 사항이나 FPSO의 설치 해역 관련 규정(codes & standards)에 따라 중량에 크게 영향을 미치는 변수들로 설정하였다. 본 연구에서는 Nicola and Sarah (2012)의 연구를 참고하여 배치 설계와 관련된 cable tray의 설치 여부, LER(Local Equipment Room) 설치 여부, material handling, PFP(Passive Fire Protection), 기타(others)와 설계 조건과 관련된 pipe materials와 설계 수명(design life)을 보조 변수들로서 설정하였다.

H0001	10R	11R	12R	13R	14R	15R	16R	17R	18R
Volume (m ³)	4,810.0	5,382.2	4,608.9	3,835.6	4,608.9	3,835.6	3,835.6	5,134.7	1.1
Weight (ton)	423.2	480.8	425.1	421.5	502.2	416.0	371.9	383.7	52.6
ST	232.2	260.6	228.0	191.5	235.0	190.6	191.8	228.3	-
SO	5.2	5.3	5.6	6.3	7.0	3.2	3.9	5.1	-
ME	1.6	1.2	0.7	0.9	1.8	0.3	0.8	0.3	-
PI	87.7	141.4	135.7	169.2	197.3	167.4	111.0	80.8	52.6
EL	95.8	71.9	54.8	53.6	61.1	54.4	64.4	69.2	-
IN+Others	0.6	0.3	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	-

H0002	M141	M142	M143	M144	M145	M146	M147
Volume (m ³)	6,063.6	5,481.2	5,990.5	11,528.2	13,281.1	8,513.6	1.1
Weight (ton)	472.8	396.9	518.1	817.4	790.4	782.8	83.6
ST	258.0	213.4	239.3	350.2	389.9	370.0	76.6
SO	26.7	12.9	23.3	15.0	29.8	46.5	-
ME	65.9	-	-	-	-	-	-
PI	65.0	158.1	235.8	435.6	347.3	343.7	7.0
EL	15.0	6.0	6.1	7.7	16.1	14.4	-
IN+Others	42.4	6.4	13.6	8.9	7.3	8.2	-

H0003	X01	X02	X03	X04	X05
Volume (m ³)	3,167.8	10,449.1	9,472.2	9,255.1	9,916.6
Weight (ton)	440.0	1,190.7	1,056.8	1,325.7	1,280.3
ST	195.3	704.2	625.0	755.3	711.2
SO	26.0	116.6	86.0	120.4	112.1
ME	-	1.8	0.6	2.3	3.4
PI	79.4	169.7	156.9	207.2	192.6
EL	96.7	148.5	144.1	138.5	134.5
IN+Others	42.6	49.9	44.2	102.1	116.1

ST	structure
SO	outfitting
ME	machinery
PI	piping
EL	electric
IN	instrument

Fig. 6 Detail weight data of 3 FPSOs used for developing the weight estimation and calculation model

각각의 보조 변수가 영향을 주는 공종은 다음과 같다.

- Cable tray 설치여부: Electric
- LER 설치 여부: Instrument, HVAC, L/Q
- Material handling: Outfitting
- PPF: process, L/Q
- Others: Machinery
- Pipe materials: Piping, Structure, Outfitting
- Design life: Structure, Outfitting, Piping

3.4 Pipe rack 모듈의 중량 추산 방법

본 연구에서는 pipe rack 모듈의 중량 추정을 위해 한 가지 방법이 아닌 앞서 소개한 관련 연구들에서 사용된 여러 가지 중량 추정 방법을 혼용 할 수 있다고 생각하였다. 먼저 기본적으로 통계적 방법인 최소 자승법을 통한 회귀 분석을 활용하여 각 모듈의 중량 데이터를 체적의 함수식으로 나타내었다. Fig. 7은 각 pipe rack 모듈 별, 중량 분포를 나타낸 그래프이다. 중량 분포를 살펴보았을 때 크게 3 가지의 군을 형성하였고, 이에 각각 번호를 붙여 표시하였다. 표시된 수식은 각각 최소 자승법을 활용하여 1차 다항식, 2차 다항식으로 구성하였을 때의 추산식이며, 이는 식 (1), (2)와 같다.

$$w(v) = 0.058v + 141.2 \tag{1}$$

$$w(v) = -3 \times 10^{-6}v^2 + 0.0913v + 64.074 \tag{2}$$

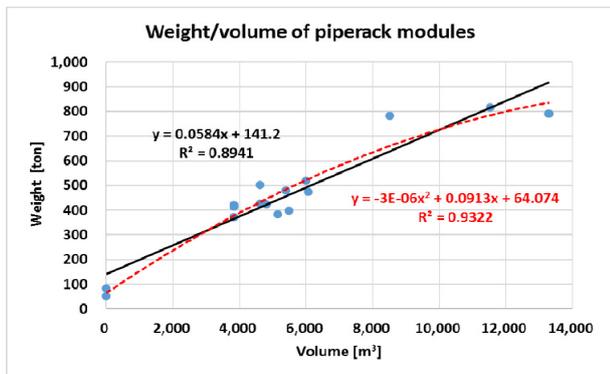


Fig. 7 Weight distribution of pipe rack modules according to their volume

체적에 대해 회귀 분석을 실시한 결과, ①과 ②에서는 어느 정도의 경향성을 확인할 수 있었으나, ③에서는 이 경향성에서 벗어난 결과를 볼 수 있었다. ①은 H0001의 18R, H0002의 M147 모듈의 데이터 값이다. 이 모듈은 체적에 비해 실적 중량 값이 큰 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 모듈 외부를 통과하는 pipe unit들의 중량은 적용이 되었지만 체적은 적용되지 않았기 때문이다. ②의 아래에 치우친 값들은 체적에 비해 중량 값이 약간 작은 데이터들로서, H0002의 데이터이다. H0002호선은 cable tray를 배치하지 않은 호선으로서, cable tray의 중량이 빠짐에

따라 이와 같은 값을 나타내게 되었다. ③은 H0002 호선의 대형 모듈 (M144, M145, M147)로서, 상대적인 밀도 값의 감소로 인한 현상으로 해석될 수 있다.

이와 같이 회귀 분석 결과가 의미를 가지기 위해서는 실적 데이터를 바로 활용하기 보다는 다른 변수들이 고려된 보정 작업이 필요하다. 이러한 보정 작업을 수행함으로써 실적 데이터가 가지고 있는 특이점들을 반영할 수 있고 결과적으로 보다 의미 있는 통계 분석 결과가 도출된다. 따라서 실적 데이터를 보정하기 위해서 ①에서는 모듈 외부를 통과하는 pipe unit들에 대한 체적을 적용하여 반영하는 것이 필요하고, ②에서는 cable tray를 고려하여 전기 공종 의 값을 수정하는 보정작업이 필요하다. ③은 대형 모듈의 경우로서, 구조 중량에 크게 영향을 미치는 설계 수명에 의한 보정 작업이 필요하다. 체적에 대한 회귀 분석으로 어느 정도의 경향성을 확인할 수 있었으나 더 정확한 결과를 도출하기 위해 다른 변수를 고려할 필요가 있다. 따라서 모듈 중량에 결정적인 역할을 하지는 않지만, 영향을 준다고 판단되는 보조 변수를 중량 추정에 활용하였으며, 이를 위해서 회귀 분석을 통해 나온 추산식에 계수 방법(factoring method)과 백분율 방법(percent complete method)을 적용하였다. 즉, 보조 변수를 factor로 적용하였고, 모듈에서 각 공종의 중량 추정은 공종별 모듈과의 중량 비율을 통해 구하였다. 앞서 소개한 보조 변수는 정성적인 데이터를 가지기 때문에 이를 factorizing 하기 위해서 정량화 할 필요가 있다. Fig. 8은 기준을 정하여 보조 변수를 수치화한 값을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 보조 변수의 값은 해당 공종 전문가의 정성적인 판단에 의해 결정된 값으로, 추후 다양한 실적 호선에의 적용 및 비교 분석을 통해 해당 값을 보정해 나갈 필요가 있다.

Parameter	Criteria	Value
Design Life	20 years	1
	40 years	2
Material Handling	Small	1
	Midium	2.5
	Large	4
Special Case	None	1
Materials	duplex steel	0.8
	stainless steel	1
	carbon steel	1.25
Cable Tray	None	0.1
	Adapted	1
Others	No LER	1
	LER	50

Fig. 8 Quantification analysis of factorized parameters

또한 각 공종별 중량과 모듈 전체 중량과의 비율인, 중량 비율을 구하기 위해 실적 데이터를 분석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 실적 데이터의 중량 비율을 살펴보았을 때 일정한 경향을 보였으며, 정확한 평균 값보다는 실적 데이터의 편차 내의 대표 값

		Disciplines							Weight distribution according to group	
		ST	SO	ME	PI	EL	IN+Oth.	Total	Structural Group	Electrical Group
H0001	As-Built	0.506	0.012	0.002	0.329	0.151	0.000	1.000	0.846	0.154
	Adjusted	0.507	0.015	0.020	0.304	0.152	0.001	1.000	0.847	0.153
H0002	As-Built	0.491	0.040	0.017	0.412	0.017	0.023	1.000	0.944	0.056
	Adjusted	0.434	0.035	0.015	0.364	0.132	0.020	1.000	0.848	0.152
H0003	As-Built	0.565	0.087	0.002	0.152	0.125	0.069	1.000	0.804	0.196
	Adjusted	0.635	0.076	0.013	0.152	0.095	0.032	1.000	0.861	0.127
Average		0.500	0.015	0.015	0.320	0.150	0.000	1.000	0.850	0.150

Fig. 9 Average weight ratio of modules by discipline

을 가상 평균이라 하고, 이 값을 특정한 값으로 가정하였다. 가상 평균은 cable tray 포함, 계기(instrument) 최소 포함, 설계 수명 20년, carbon piping 위주라고 상정했을 때의 공종별 대표 값이다.

최종적으로 pipe rack의 중량 추산을 위해 통계적 방법, 계수 방법, 백분율 방법을 적용하여 추산 방법을 만들었으며, 절차는 다음과 같다. 먼저 각 모듈 별 실적 데이터가 주어질 때, 이를 보정하고 최소 자승법을 적용하여 체적을 변수로 하는 추산식을 만들어낸다. 또한 실적 데이터의 공종별 가상 평균을 통해 각 공종별 모듈과의 중량 비율을 산출한다. 이후 새로운 pipe rack에 대한 모듈별 체적 값과 보조 변수 값들을 추산식에 대입하면 최종적인 중량 추산이 가능하다.

3기의 FPSO의 pipe rack 자료 중에서 2기의 FPSO (H0001과 H0002)에 중량 추산 방법을 적용하여 추산식을 만들고, 이를 나머지 1기의 FPSO (H0003)의 pipe rack의 중량을 추산하는데 적용한 후, 그 결과를 실적 값과 비교하여 유효성을 검증하였다.

먼저 H0001과 H0002의 중량 데이터에 대해, 모듈 외부를 통과하는 piping unit에 대한 체적 보정과 cable tray 배치 여부에 대한 보정을 수행한다. 이 결과, 보정이 이뤄진 각 모듈 별 중량은 Fig. 10과 같다. 음영으로 표시된 부분이 실적 중량에서 보정된 데이터를 나타낸다.

이 보정된 데이터에 최소 자승법을 활용하여 경향성을 도출하면 Fig. 11과 같으며, 추산식을 1, 2차 다항식으로 각각 표현하면 식 (3), (4)와 같다.

4. Pipe rack 중량 추산 방법의 적용

3장에서 설명한 pipe rack의 중량 추산 방법을 적용해 보았다.

$$w(v) = 0.071v + 98.46 \tag{3}$$

$$w(v) = -3 \times 10^{-6}v^2 + 0.015v - 15.98 \tag{4}$$

	Module	Volume (m³)	Weight(ton)
H0001	10R	4,809.970	423.171
	11R	5,382.190	480.832
	12R	4,608.890	425.073
	13R	3,835.590	421.473
	14R	4,608.890	502.192
	15R	3,835.590	415.990
	16R	3,835.590	371.928
	17R	5,134.690	383.686
	18R	1.100	52.617
H0002	M141	6,063.640	472.801
	M142	5,481.190	396.886
	M143	5,990.490	518.118
	M144	11,528.220	817.395
	M145	13,281.070	790.382
	M146	8,513.560	782.770
	M147	1.100	83.625
H0001	10R	4809.970	423.171
	11R	5382.190	480.832
	12R	4608.890	425.073
	13R	3835.590	421.473
	14R	4608.890	502.192
	15R	3835.590	415.990
	16R	3835.590	371.928
	17R	5134.690	383.686
	18R	550.000	52.617
H0002	M141	6063.640	528.750
	M142	5481.190	450.442
	M143	5990.490	589.721
	M144	11528.220	932.340
	M145	13281.070	892.882
	M146	8513.560	885.807
	M147	880.000	96.169

Fig. 10 Adjusted weight of the pipe rack model of the past records

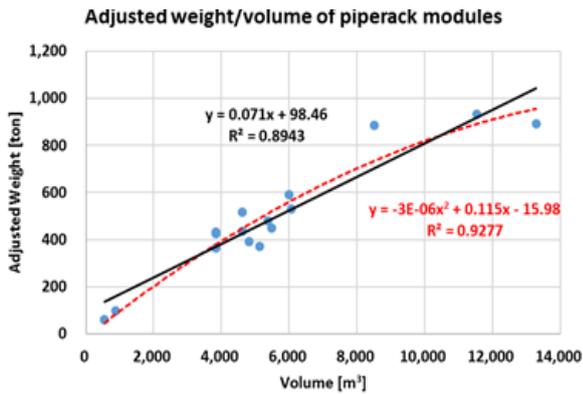


Fig. 11 The distribution of volume and adjusted weight of the pipe rack module

여기서, w 는 pipe rack 모듈의 중량, v 는 각 모듈의 체적을 나타낸다. 최종 추산식에는 주요 변수인 체적뿐만 아니라 보조 변수와 공종별 중량 비율을 고려해야 하므로 이 값을 넣어주면 최종적인 모듈의 공종별 중량을 추산할 수 있는 추산식을 완성할 수 있으며 식 (5) ~ (10)과 같다.

$$w_{ST} = DL \times STR \times w(v) \tag{5}$$

$$w_{SO} = MH \times SOR \times DL \times STR \times w(v) \tag{6}$$

$$w_{ME} = SC \times MER \times w(v) \tag{7}$$

$$w_{PI} = M \times PIR \times w(v) \tag{8}$$

$$w_{EL} = CT \times ELR \times w(v) \tag{9}$$

$$w_{Oth} = OTH \times OTHR \times w(v) \tag{10}$$

여기서, w_{ST} 는 모듈의 구조 공종 중량, DL 은 설계 수명, STR 은 모듈의 구조 공종 중량 비율, w_{SO} 는 모듈의 의장 공종 중량, MH 는 material handling, SOR 은 모듈의 의장 공종 중량 비율, w_{ME} 는 모듈의 기계 공종 중량, SC 은 special case, MER 은 모듈의 기계 공종 중량 비율, w_{PI} 는 모듈의 배관 공종 중량, M 은 재질, PIR 은 모듈의 배관 공종 중량 비율, w_{EL} 는 모듈의 전기 공종 중량, CT 는 cable tray, ELR 은 모듈의 전기 공종 중량 비율, w_{Oth} 는 모듈의 계기와 기타 공종 중량, OTH 는 기타, $OTHR$ 은 모듈의 계기와 기타 공종 중량 비율을 나타낸다. 식 (11)은 식 (5) ~ (10)을 모두 더한 것으로 이는 pipe rack 모듈의 중량 식을 나타낸다. 식 (11)로부터 각 pipe rack 모듈의 중량을 합하면 식 (12)와 같이 FPSO 상부의 전체 pipe rack 중량을 구할 수 있다.

$$w_{module} = w_{ST} + w_{SO} + w_{ME} + w_{PI} + w_{EL} + w_{OTH} \tag{11}$$

$$w_{pipe\ rack} = \sum w_{module} \tag{12}$$

As-Built Data	X01	X02	X03	X04	X05	Total	Estimated Accuracy		
Volume(m³)	3167.78	10449.12	9472.21	9255.07	9916.61	42260.79	1.0715		
Weight (ton)	440.0264	1190.713	1056.765	1325.716	1280.34	5293.559			
ST	195.2786	704.1969	625.0134	755.2985	711.1852	2990.973			
SO	25.9622	116.5703	85.9892	120.3609	112.0922	460.9748			
ME	0	1.8348	0.627	2.2748	3.41	8.1466			
PI	79.3881	169.6838	156.8578	207.1696	192.632	805.7313			
EL	96.7494	148.5033	144.0978	138.512	134.475	662.3375			
IN+Others	42.6481	49.9235	44.1782	102.0998	116.1083	354.9579			
Estimated Data	X01	X02	X03	X04	X05	Total		Variable Parameters	
Volume(m³)	3167.78	10449.12	9472.21	9255.07	9916.61	42260.79			
Estimated Weight(ton)	501.1811	1351.533	1266.545	1246.43	1306.325	5672.015			
ST	318.2102	858.1165	804.1559	791.3841	829.4127	3601.279	Design Life		2
SO	38.18523	102.974	96.4987	94.96609	99.52952	432.1535	Material Handling		4
ME	4.773153	12.87175	12.06234	11.87076	12.44119	54.01919	Special Case		1
PI	76.37045	205.948	192.9974	189.9322	199.059	864.307	Materials		0.8
EL	47.73153	128.7175	120.6234	118.7076	124.4119	540.1919	Cable Tray		1
IN+Others	15.91051	42.90582	40.20779	39.5692	41.47063	180.064	Others		50

Fig. 12 Verification of the weight estimation and calculation model with the past record (H0003)

여기서, w_{module} 은 pipe rack 모듈의 중량, $w_{pipe\ rack}$ 은 pipe rack 전체의 중량을 나타낸다. 이 추산식을 활용하여 H0003의 중량을 구해보면 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 결과를 확인하면, 각 pipe rack 모듈의 추정 중량은 실제 중량과 다소 차이가 나지만 전체 pipe rack의 중량은 약 7%의 차이가 남을 알 수 있다.

또한, 각 추산식의 일관성을 확인하기 위해, 전체 호선 데이터에 적용하여 중량을 산출한 뒤, 공중별 중량 비율의 편차를 확인한 결과, 전체적으로 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 하지만 배관 공중과 전기 공중의 중량 비율에 다소 차이가 있었는데, 이는 선종별로 달리 적용된 규정의 영향에 기인한 것으로 보인다. Fig. 13은 공중별 중량 비율의 추정값을 보여주고, Fig. 14는 공중간별 중량 편차의 추정값을 보여준다.

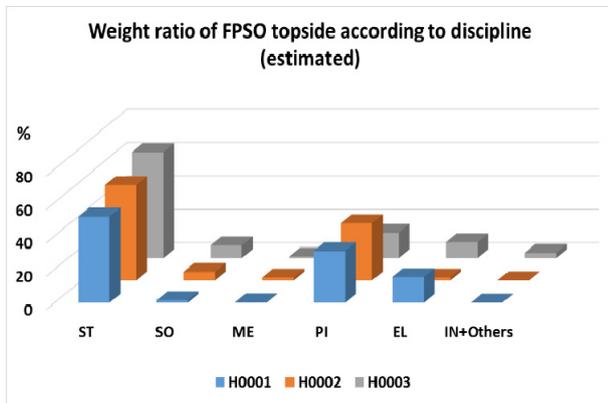


Fig. 13 Weight ratio of FPSO topsides according to discipline (estimated)

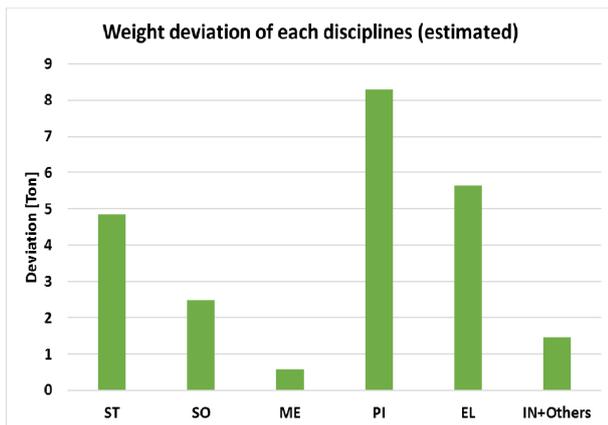


Fig. 14 Weight deviation of FPSO topsides according to discipline (estimated)

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 FPSO의 pipe rack 모듈에 대하여 중량 분석을 실시하였으며, 이로부터 중량 추산 방법을 제안하고 이를 검증하였다. 중량 분석 결과 실적 중량 데이터의 보정 작업이 필요하며,

각 discipline 별 중량과 모듈 전체 중량과의 비율을 설정하여 적용하는 것이 필요하다는 것을 파악할 수 있었다. 이를 통해 주요 변수와 보조 변수를 도입하고 최소 자승법을 활용한 회귀 분석, 계수 방법과 백분율 방법을 이용하여 pipe rack의 중량을 추산할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 실제 호선에 적용하여 실제 중량 값과의 비교를 통해 7% 정도의 오차를 확인하였다. 이는 타 연구 (Rui & Walker, 2015)에서의 FPSO 상부의 중량 추정 편차인 -20 % ~ 60 % 보다 좋은 결과이며, 현업 전문가들로부터도 우수한 정확도를 나타낸 것이라 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 pipe rack 중량 추산 방법의 유효성과 가능성을 볼 수 있었다. 본 연구에서는 3기의 FPSO 실적 데이터를 활용하였지만, 향후 더 많은 실적 데이터가 축적되어 활용될 수 있다면 보다 정도 높은 추산식을 도출할 수 있으리라 예상된다.

향후 연구로서, FPSO 상부의 pipe rack 모듈뿐만 아니라 FPSO 상부 전체 중량을 추정하고자 하며, 또한 WBS를 세분화하고 다양한 변수들을 적용하여 중량 추정 방법을 발전시킬 예정이다. 그리고 이를 다양한 실적 프로젝트에 적용하여 보정함으로써, 보다 현실적인 중량 추정 방법을 고안할 예정이다.

후기

본 연구는 (a) 대우조선해양(주), (b) 산업통상자원부의 해양플랜트특성화대학지원사업 (ITAH680113011004), (c) 서울대학교 해양시스템공학연구소의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

- Bolding, A., 2001. Bulk Factor Method Estimates FPSO: Topsides Weight. *The Oil and Gas Journal*, 99, pp.49-53.
- Cho, Y.J., 2011. A Development of the Ship Weight Estimating Method by a Statistical Approach. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(5), pp.426-434.
- Nicolas, A.H. & Sarah, D.P.E., 2012, Cost Estimation Challenges and Uncertainties Confronting Oil and Gas Companies. *Association for the Advancement of Cost Engineering*, 54(3), pp.14-30.
- Rui, R. & Walker, J., 2015. Upstream Offshore-Facility Weight-Growth Study. *Oil and Gas Facilities*, 4(2), pp.107-112.
- Runar, A. & Bjorhovde, S., 2010, Early Stage Weight and Cog Estimation Using Parametric Formulas and Regression on Historical Data. *Society of Allied Weight Engineers*, 1, pp.287-321.
- Seo, S.H. Roh, M.I. Ku, N.K. & Shin, H.K., 2013. A

Study on the Simplified Model for the Weight Estimation of Floating Offshore Plant Using the Statistical Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.373-382.

Seo, S.H. Roh, M.I. & Shin, H.K., 2014. A Study on the Weight Estimation Model of Floating Offshore Structures Using the Non-linear Regression Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), pp.530-538.

Um, T.S. Roh, M.I., Shin, H.K. & Ha, S., 2014. Simplified Model for the Weight Estimation of Floating Offshore Structure Using the Genetic Programming Method. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 19(1), pp.1-11.

Um, T.S. Roh, M.I. & Shin, H.K., 2015. A Study on Weight Estimation Model of Floating Offshore Structures Using Enhanced Genetic Programming Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(1), pp.1-7.

