

통계적 방법을 이용한 부유식 해양 플랜트의 중량 추정용 간이 모델 연구

서성호¹·노명일^{2,†}·구남국³·신현경⁴
울산대학교 대학원 조선및해양공학과¹
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소²
서울대학교 공학연구소³
울산대학교 조선해양공학부⁴

A Study on the Simplified Model for the Weight Estimation of Floating Offshore Plant using the Statistical Method

Seong-Ho Seo¹·Myung-Il Roh^{2,†}·Nam-Kug Ku³·Hyun-Kyung Shin⁴
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, University of Ulsan¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering/Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University²
Engineering Research Institute, Seoul National University³
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan⁴

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 of floating offshore plant, such as an FPSO(Floating, Production, Storage, and Off-loading unit) and an offshore wind turbine, is important for estimating the amount of production material and for determining the production method. Furthermore, the weight is a factor which affects in the building cost and production time of the floating offshore plant. Although the importance of the weight has long been recognized, the weight has been roughly estimated by using the existing design and production data, and designer's experience. To solve this problem, a simplified model for the weight estimation of the floating offshore plant using the statistical method was proposed in this study. To do this, various data for estimating the weight of the floating offshore plant were collected through the literature survey, and then the correlation analysis and the multiple regression analysis were performed to generate the simplified model for the weight estimation. Finally, to examine the applicability of the developed model, it was applied to examples of the weight estimation of an FPSO topsides and an offshore wind turbine. As a result, it was shown that the developed model can be applied the weight estimation process of the floating offshore plant at the early design stage.

Keywords : Weight estimating model(중량 추정 모델), Offshore plant(해양 플랜트), Correlation analysis(상관 분석), Multiple regression analysis(다중 회귀 분석), Statistical method(통계적 방법)

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

세계 에너지 수요가 상승하고 고유가가 지속됨에 따라 해양 플랜트 사업은 블루 오션으로 각광받고 있다. 이는 해양 플랜트 사업이 조선 사업과는 달리 제품이 표준화되어 있지 않으며, 환경·안전 등에 대한 요구 수준이 높고 자원개발과 연계되어 수행되기 때문에 부가가치가 높다는 이유에서다. 이러한 추세에 맞추어 현재 부유식 오일가스 생산 설비는 점점 늘어나고 있으며, 기존의

고정식 플랜트와 더불어 심해 채굴이 가능한 부유식 해양 플랜트 또한 널리 사용되고 있다 (Kang, et al., 2012).

Fig. 1의 2013년 IMA(International Maritime Association) (2013)의 자료에 의하면, 향후 5년간 세계 경제와 오일의 수요 그리고 에너지 가격에 따라 매년 124대에서 190대의 부유식 해양 플랜트의 주문이 있을 것이라고 예상하고 있다.

한편, 해양 플랜트의 설계에 있어서 중량 정보는 생산을 위한 물량 추정과 생산 공법 결정 등에 필수적인 정보이며, 나아가 해당 플랜트의 생산 비용 및 생산 기간에 영향을 미치는 요소이다. 따라서 정확한 중량의 추정이 가능하다면, 보다 효과적으로 중량을 통제할 수 있고, 또한 안정적으로 생산 비용을 산출할 수 있다 (Fig. 2 참조).

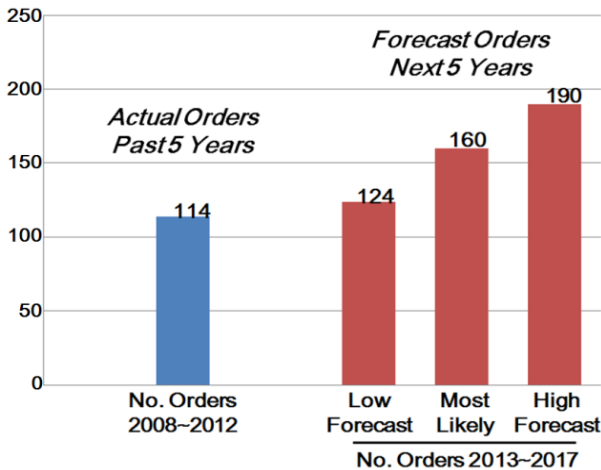


Fig. 1 Orders for production floaters to grow over the next five years

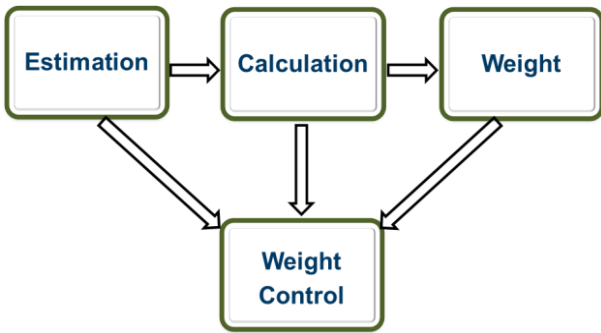


Fig. 2 Weight engineering process

현재 운영되고 있는 부유식 해양 플랜트의 63%를 차지하는 FPSO(Floating, Production, Storage, and Off-loading unit)의 경우, FEED 단계에서 정확한 중량 추정이 이루어지지 못해 추정된 중량과 후속 설계 단계나 생산 단계에서의 상부(topsides) 중량이 과도한 차이를 보이게 변하면, 선체의 전반적인 설계에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제가 발생한 경우, 선체의 설계를 변경하고 검증하여 FEED와 비교해야 하며, 그로 인해 비용 증가와 일정 지연이 뒤따르게 된다 (Hwang, et al., 2009).

한편, 중량의 추정과 관리 기술은 매우 중요하게 취급되고 있고 조선소의 경쟁력을 결정짓는 중요한 기술이기 때문에 기업 비밀로 분류되고 있어 중량 관리에 대한 연구 자료는 거의 공개되지 않은 실정이다.

1.2 관련 연구 현황

선박 및 해양 플랜트의 중량 추정 관련 연구를 간략히 소개하면 다음과 같다.

Bolding (2001)은 지금까지 건조된 많은 FPSO의 중량 보고서를 분석하여, FPSO 상부의 평균 부피 계수(Bulk Factor, [kg/m³])를 도출하였다. 부피 계수는 Table 1에서 보는 바와 같이 FPSO 상부를 구성하는 모듈들을 물 주입(water injection), 전력 생성

(power generation), 분리(separation), 가스 압축(gas compression) 등과 같이 기능별로 분류한 뒤, 각 모듈을 다시 구조물, 전기 장치, 냉난방 공조 장치, 계측 장치 등으로 보다 세분화하여 구분하였다. Cho (2011)는 컨테이너선을 대상으로 통계적 방법을 이용하여 선박의 중량 추정 모델을 개발하였으며 이를 초기 설계 단계에서 활용하고자 하였다.

Table 1 Bulk factor for topsides modules

	Arch	Elec	HVAC	Inst	Loss	Mech	Pipe	Struc	Total
Water injection	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	h1	i1
Power generation	a2	b2	c2	d2	e2	f2	g2	h2	i2
Separation	a3	b3	c3	d3	e3	f3	g3	h3	i3
Gas compression	a4	b4	c4	d4	e4	f4	g4	h4	i4
Flare knockout	a5	b5	c5	d5	e5	f5	g5	h5	i5
Pipe rack	a6	b6	c6	d6	e6	f6	g6	h6	i6
Chemical injection	a7	b7	c7	d7	e7	f7	g7	h7	i7
Utilities	a8	b8	c8	d8	e8	f8	g8	h8	i8
Gas treatment	a9	b9	c9	d9	e9	f9	g9	h9	i9
Glycol regeneration	a10	b10	c10	d10	e10	f10	g10	h10	i10
Local equipment	a11	b11	c11	d11	e11	f11	g11	h11	i11
Process	a12	b12	c12	d12	e12	f12	g12	h12	i12

한편, 통계적 방법을 이용한 추정식 개발과 관련된 연구를 간략히 소개하면 다음과 같다.

Sung, et al. (2010)은 기차용 콘크리트 궤도에서 레일 두부 표면의 요철량, 운행 속도, 레일 휨 응력의 상관 관계를 분석하였고, 다중 회귀 분석을 통해 표면 요철, 운행 속도에 따른 레일의 휨 응력 예측식을 도출하였다. Lee, et al. (2009)은 전단 강도에 영향을 주는 몇 가지의 토질 물성치를 이용하여 토층의 정수를 쉽게 산정할 수 있도록 전단 강도 산정 모델을 개발하였다. 상용 통계 처리 프로그램인 SPSS의 상관 분석을 통해 토질 시험 결과 중, 강도 정수에 유효한 토질 인자(간극비 및 건조 단위 중량, 소성지수)를 선별한 후 선별된 인자들과의 관계를 선형 회귀 분석으로 공식화하였다.

이상과 같은 관련 연구 현황 조사로부터 통계적 방법을 기반으로 해양 플랜트의 중량 추정과 관련된 연구는 아직 수행된 바 없어 본 연구에서는 이를 연구하여 FEED 단계에서 활용하고자 하였으며, 이를 해상 풍력 발전기의 초기 설계 단계에서도 활용해보고자 시도하였다.

이를 위해, 중량에 영향을 미치는 독립 변수를 조사하고 상관 분석을 수행하여 상관도가 높은 변수를 1차적으로 선정하였다. 그리고 선정된 변수에 대한 다중 회귀 분석을 통하여 중량 추정 모델, 즉 중량 추정식을 개발하였다. 또한, 개발된 중량 추정 모델의 신뢰성을 검토하기 위하여 실적선 중량과 추정 중량을 비교하여, 오차를 분석하였다.

2. 중량 추정 방법의 분류

현재까지 공학 분야에서 활용되고 있는 중량 추정 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다 (Cimino, et al., 2007).

선박 및 해양 플랜트의 파라미터(예, 길이, 폭, 깊이 등의 주요 치수)는 초기 설계 단계에서 매우 중요하다. 파라미터 방법(parametrics)은 다수의 자료로부터 선박 및 해양 플랜트의 파라미터와 중량간의 관계를 도출해 내는 방법이다. 이 방법은 다음에 설명할 추론적 방법에서도 부분적으로 활용된다.

추론적 방법(ratiocination method)은 중량 추정의 가장 대표적인 방법이다. 이 방법은 동일한 조선 공학적인 원리에 의해 선박 및 해양 플랜트가 설계 및 건조되기 때문에 유사 실적선으로부터 새로운 선박 및 해양 플랜트의 중량이 추정 가능하다는 가정을 기반으로 한다. 이 방법에 따르면, 실적선의 중량에 적절한 축척 비율을 곱해주면 새로운 선박 및 해양 플랜트의 중량 추정을 할 수 있게 된다. 여기서 축척 비율은 선박 및 해양 플랜트의 길이, 폭, 엔진 마력 등과 같은 각종 파라미터로부터 만들어진 것이다. 이러한 파라미터를 만드는 과정에 앞서 소개한 파라미터 방법이 활용된다.

통계적 방법(statistical method)은 다수의 유사선으로부터 통계적 회귀 분석을 통해 중량 추정 모델을 개발하는 방법이다. 다수의 유사선을 사용하기 때문에 앞서 추론적인 방법에 의해 명확한 중량 추정 모델을 구할 수 없을 경우 사용할 수 있다.

체적 밀도법(volumetric density method)은 중량을 추정하기 위해 먼저 밀도 계수를 구하고, 적용 대상의 부피에 앞서 구한 밀도 계수를 곱함으로써 중량을 계산하는 방법이다.

기준선 방법(baseline method)은 기준에 건조된 유사선 또는 시리즈선의 경우 앞서 건조한 선박 및 해양 플랜트의 결과를 기준선으로 하여 새로운 선박 및 해양 플랜트의 중량을 추정하는 방법이다.

중양부 외삽법(midship extrapolation method)은 선수부, 중앙부, 선미부를 나타내는 횡단면도로부터 횡단면적을 구하고, 각 부분의 길이를 추정된 뒤 위 두 값으로부터 각 부분의 중량을 추정(면적 길이)하여 전체의 중량을 구하는 방법이다.

갑판 면적 분수법(deck area fraction method)은 선박 및 해양 플랜트를 구성하는 각 부분의 요소 중량은 이들이 차지하는 갑판 면적에 비례한다는 원리를 이용하여 중량을 추정하는 방법이다. 즉, 각 부분이 차지하는 갑판 면적에 적절한 중량 계수를 곱하여 요소 중량을 합하여 전체 중량을 구하는 방법이다.

종합 프로그램(synthesis program)을 이용한 방법은 요구 조건을 기초로 하고 선박 및 해양 플랜트의 특성 등을 반영, 비교적 정확한 중량을 추정할 수 있는 프로그램을 활용하여 중량을 추정하는 방법이다. 선박 및 해양 플랜트의 중량을 비교적 정확하게 추정할 수 있다는 장점이 있지만, 모든 요구 조건과 특성을 반영하기에는 어렵다는 단점이 있다.

최적화 방법(optimization method)은 유전적 프로그래밍(genetic programming) 방법 등과 같은 최적화 방법을 기반으로, 주어진 중량 자료로부터 근사화된 추정식을 생성한 후, 이를 이용하여 선박 및 해양 플랜트의 중량을 추정하는 방법이다.

3. 통계적 방법을 이용한 중량 추정 모델 개발

3.1 개요

본 연구에서의 통계적 방법을 이용한 중량 추정 모델의 개발 과정은 Fig. 3과 같다.

먼저, 자료 수집을 통해 중량 추정 모델에 포함될 가능성이 높은 독립 변수를 선정한다. 이후, 추정 대상인 종속 변수(예, FPSO 상부 중량)에 각 독립 변수가 미치는 영향을 파악하는 상관 분석을 수행하고, 그 결과를 활용하여 중량 추정 모델에 포함될 독립 변수를 1차적으로 선정한다. 그리고 나서 다중 회귀 분석과 회귀식 검정을 통해 중량 추정 모델에 최종적으로 포함될 독립 변수를 결정한다. 마지막으로, 그 변수들을 활용한 중량 추정식, 즉 중량 추정 모델을 생성한다.



Fig. 3 Development process of the weight estimation model using the statistical method

3.2 상관 분석

상관 분석은 두 변수 간에 얼마나 밀접한 선형 관계를 가지고 있는가를 분석하는 통계 기법이다. 이 방법에서 상관 계수는 두 변수간의 연관된 강도를 나타낸다. 즉, 상관 계수가 클수록 두 변수는 밀접한 관계에 있다고 볼 수 있다.

상관 계수는 변수가 어떤 특정한 분포(정규 분포, t-분포 등)를 따르는가 아닌가에 따라 모수적 상관 계수인 Pearson 방법과 비모수적 상관 계수인 Spearman 방법으로 구할 수 있다.

본 연구에서는 변수가 어떤 특정 분포를 따를 것이라는 가정 하에서 Pearson 방법을 이용하여 상관 계수를 계산하였다. 식 (1)은 Pearson 방법을 이용하여 상관 계수를 구하는 수식을 나타낸다 (Bluman, 2004).

Pearson Correlation Coefficient(r) (1)

$$= \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}}$$

여기서, r 은 Pearson 방법에 따라 계산한 상관 계수, X 는 독립 변수, Y 는 종속 변수, n 은 표본의 개수이다.

상관 계수를 이용하여 두 변수의 연관 정도를 해석할 때, 연관 강도는 절대값으로 표현되는 수치를 보면 되고, 연관 방향(비례 또는 반비례)은 수치의 부호(+, -)를 보면 된다. 비례 또는 정적

의 관계(+)는 한 변수가 증가함에 따라서 다른 변수도 함께 증가함을 뜻하고, 반비례 또는 부적의 관계(-)는 이와는 반대로 한 변수가 증가함에 따라서 다른 변수는 감소하는 경향을 보인다는 것이다. 상관 계수에 의한 두 변수의 연관 강도는 Table 2에 따라 해석할 수 있다 (Kang, 2011).

Table 2 The relationship between variables according to Pearson correlation coefficient

Absolute value of Pearson correlation coefficient	Relationship
1.0~0.7	Strong
0.69~0.4	Moderate
0.39~0.2	Weak
0.19~0.0	No

한편, 상관 계수가 통계적으로 얼마나 의미가 있는지를 나타내는 수치를 유의 확률(p-value)이라고 한다. 유의 확률은 0~1 사이의 값을 가지며 작을수록 의미가 있다는 것이며, 본 연구에서는 식 (2)에 따라 계산하였다.

$$p\text{-value} = \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \left| \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right) \right| \frac{\sqrt{n-3}}{\sqrt{2}}\right) \quad (2)$$

여기서, erfc는 보상 오차 함수(complementary error function)를 나타낸다.

본 연구에서는 상관 분석을 통해 상관 계수 0.5 이상, 유의 수준은 적용 예에 따라 그 기준값을 달리하였다. 이렇게 선정된 독립 변수들을 중량 추정 모델에 포함될 수 있는 후보들로 1차 선정하였다.

3.3 다중 회귀 분석

회귀 분석은 하나의 변수(독립 변수)를 이용하여 다른 변수(종속 변수)의 값을 설명하거나 예측할 수 있는 모델을 가지고 데이터를 분석하는 것을 말한다. 여기서, 다중 회귀 분석이란 독립 변수의 수가 여러 개인 회귀 분석을 말한다. 즉, 다중 회귀 분석은 k개의 독립 변수가 있을 때, 식 (3)과 같은 다중 회귀 모델의 유의성(유효성)을 확인하는 것이다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (3)$$

여기서, X1, X2, ...는 독립 변수, Y는 종속 변수, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 회귀 계수로서 미지의 상수이며, ϵ 는 오차항으로서 본 연구에서는 $N(0, \sigma^2)$ 분포에서 추출한 독립 변수로 가정하였다 (Walpole, et al., 2008).

이제 회귀 분석의 전체 과정은 회귀 계수의 추정 단계와 이를

통해 만들어진 회귀식(식 (3)의 다중 회귀 모델)의 검정 단계로 구성된다.

먼저, 본 연구에서는 최소자승법(least square method)을 이용하여 회귀 계수를 추정하였다. 다중 회귀 모델의 행렬식을 정리하면 식 (4)~(8) 과 같다.

$$Y_1 = \beta_0 \cdot 1 + \beta_1 \cdot X_{11} + \beta_2 \cdot X_{21} + \dots + \beta_k \cdot X_{k1} + \epsilon_1 \quad (4)$$

$$Y_2 = \beta_0 \cdot 1 + \beta_1 \cdot X_{12} + \beta_2 \cdot X_{22} + \dots + \beta_k \cdot X_{k2} + \epsilon_2$$

$$Y_n = \beta_0 \cdot 1 + \beta_1 \cdot X_{1n} + \beta_2 \cdot X_{2n} + \dots + \beta_k \cdot X_{kn} + \epsilon_n$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\epsilon} \cong MVN(0, \sigma^2 I) \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (7)$$

$$\operatorname{Var}[\boldsymbol{\epsilon}] = \begin{bmatrix} \sigma^2 & & 0 \\ & \sigma^2 & \\ 0 & & \ddots \\ & & & \sigma^2 \end{bmatrix} = \sigma^2 I \quad (8)$$

오차항의 제곱합 Q는 식 (9)와 같이 표현 할 수 있다. 이때 최소자승법에 의한 회귀 계수 추정은 식 (10)~(11)와 같이 제곱합 Q를 각 β 에 대해 편미분하고 이를 0으로 하는 연립 방정식을 풀어 각각의 β 를 구하는 것이다.

$$Q = \sum [Y_i - (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki})]^2 \quad (9)$$

$$= \sum \epsilon_i^2$$

$$= (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})$$

$$= \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$$

$$\frac{\delta Q}{\delta \boldsymbol{\beta}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} = 0 \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (11)$$

회계 계수가 결정되었으므로 식 (3)과 같은 다중 회귀 모델, 즉 회귀식을 구성할 수 있으며, 이제 이 모델에 대한 검정이 필요

하다. 본 연구에서는 회귀식의 적합도 검정, 회귀식의 유의성 검정, 회귀 계수의 유의성 검정, 독립 변수간의 독립성(다중 공선성: multicollinearity) 검정, 그리고 오차항간의 독립성(자기 상관) 검정, 이렇게 다섯 가지의 검정을 수행하였다.

회귀식의 적합도 검정은 회귀식이 얼마나 정확하게 종속 변수의 값을 예측하는가에 대한 값으로서, 결정 계수가 그 기준이 된다. 그 값은 1에 가까울수록 회귀식의 적합도가 높음을 의미한다. 그러나 결정 계수는 독립 변수가 추가되면 그의 영향력에 상관없이 항상 증가한다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 독립 변수가 추가되었을 때 발생하는 자유도의 변화를 반영한 조정된 결정 계수를 활용하였다. 식 (12)는 결정 계수를 구하는 식이고, 식 (13)은 조정된 결정 계수를 구하는 식을 나타낸다.

$$R^2 = \frac{(\sum Y_i - \bar{Y})^2}{(\sum Y'_i - \bar{Y})^2} \tag{12}$$

$$Adjusted R^2 = R^2 - \frac{k(1 - R^2)}{(n - k - 1)} \tag{13}$$

회귀식의 유의성(F-검정)과 회귀 계수의 유의성 검정(t-검정)은 회귀 분석 결과의 신뢰성을 나타낸다. 즉, 도출된 회귀식이 우연으로 나온 결과가 아니라는 것을 증명해주는 검정이다. 본 연구에서는 그 유의 수준을 0.1 이하로 정했다.

독립 변수들 사이에 상관 관계를 가지고 있는 현상을 다중 공선성이라고 한다. 변수 간에 상당히 높은 선형 관계가 존재하면 식 (11)에서의 역행렬 $(X^T X)^{-1}$ 을 산출하는데 있어서 매우 큰 오차가 유발된다. 또한 회귀 계수의 분산이 매우 커져 검정에 어려움이 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 독립 변수간의 독립성 검정을 수행하였고, 그 척도로서 분산 팽창 계수(VIF: Variance Inflation Factor)를 활용하였다. 일반적으로 가장 큰 값의 분산 팽창 계수가 10보다 작아야 한다. 아래 식 (14)는 분산 팽창 계수를 구하는 식이다.

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad j = 1, 2, \dots, k \tag{14}$$

여기서, R_j^2 은 X_j 를 종속 변수로 하고 나머지 변수를 독립 변수로 하는 회귀 모형에서의 결정 계수이다.

자기 상관이란 오차항간의 관계가 독립적이지 않은 경우를 의미한다. 이 경우 회귀 계수의 추정된 표준 오차가 작아져서 회귀 계수에 대한 검정을 신뢰할 수 없게 된다. 즉, 실제 유의하지 않은 회귀 계수가 유의하다고 판정될 수 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 오차항간의 독립성 검정을 수행하였고, 그 척도로서 Durbin-Watson 통계량을 활용하였다. 일반적으로 이 값의 범위는 dL 보다 크고 $4-dL$ 보다 작아야 한다. 여기서, dL 은 독립 변수의 개수(k)와 표본의 개수(n), 유의 수준에 따라 달라진다. 아래 식 (15)는 Durbin-Watson 통계량을 구하는 식이다.

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\epsilon_i - \epsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \tag{15}$$

3.4 중량 추정 모델 생성 프로그램

본 연구에서는 상관 분석과 다중 회귀 분석을 통해 중량 추정 모델을 생성하는 프로그램을 자체적으로 개발하였다. Fig. 4는 개발한 프로그램의 전체 구성도를 나타낸다. Fig. 4에 나타나 있듯이, 본 프로그램은 입력 모듈(중량 추정 모델 생성을 위한 데이터 입력), 상관 분석 모듈(Pearson 방법에 의한 상관 분석 수행), 다중 회귀 분석 모듈(다중 회귀 분석 수행), 출력 모듈(중량 추정 모델 생성)로 이루어져 있다.

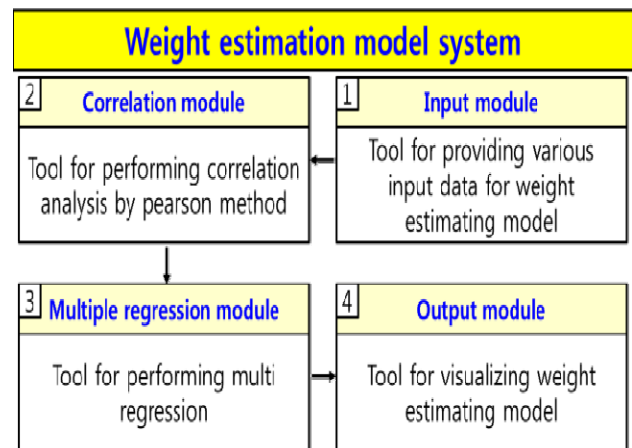


Fig. 4 Configuration for generation the weight estimation model

입력 모듈(Fig. 4의 ①)은 실적 자료로부터 중량 추정 모델의 생성을 위한 각종 자료, 즉 중량(종속 변수)과 여러 독립 변수를 입력한다. 여기서 자료의 입력은 조사된 자료를 숫자로 배열한 것에 불과하다. 그러나 이렇게 배열된 숫자가 의미하는 바가 무엇이고, 각 변수들이 갖는 의미를 상관 분석, 다중 회귀 분석 과정을 통해 제대로 파악하는 것이 중요하다.

상관 분석 모듈(Fig. 4의 ②)은 종속 변수와 독립 변수들간의 상관 계수와 유의 확률을 계산하여, 중량 추정 모델에 포함될 독립 변수를 선정 기준에 따라 1차적으로 선정하는 기능을 수행한다.

다중 회귀 분석 모듈(Fig. 4의 ③)은 1차적으로 선정된 독립 변수들과 종속 변수간에 다중 회귀 분석을 수행하여 중량 추정 모델(회귀식)을 도출한다. 이렇게 도출된 회귀식은 앞서 말한 다섯 가지의 검정 절차를 거치게 된다.

마지막으로, 출력 모듈(Fig. 4의 ④)은 회귀식의 다섯 가지 검정을 모두 만족하여 최종적으로 선정된 중량 추정 모델을 출력하고 가시화하는 기능을 수행한다.

4. FPSO 상부의 중량 추정 모델 개발 예

4.1 자료 수집 및 변수 선정

아무리 많은 실적선 자료를 수집했다해도, 중량의 분류 기준이 동일하지 않으면 활용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실적선 자료 수집 전 Fig. 5와 같은 분류 방법을 기준으로 삼았다.

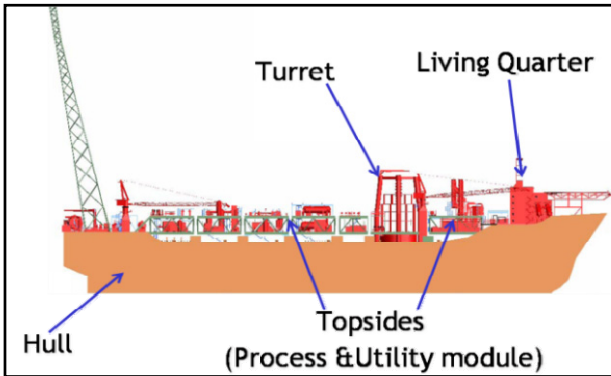


Fig. 5 Breakdown structure of weight groups of FPSO

이후 중량 추정 모델을 개발하기 위해 실적 데이터를 수집하였다. 조선소로부터 정확한 데이터를 얻는 것이 보다 정도 높은 모델 개발에 필요하나 보안 등의 이유로 어려웠기 때문에 본 연구에서는 인터넷 또는 각종 문헌 조사를 통해 Table 3와 같이 총 11척의 FPSO 실적 자료를 확보하였다. 이들 중 10척의 자료(A~J)는 중량 추정 모델을 만들기 위한 학습 데이터로서 활용하였고, 1척의 자료(K)는 개발된 중량 추정 모델의 검증에 활용하였다.

Table 4는 FPSO 상부 중량“T_LWT”라는 이름의 종속 변수로

가정에 영향을 미치는 선체(hull)와 상부(topsides)의 독립 변수를 조사한 결과이다.

Table 4 Independent variables for estimating the topsides weight of FPSO

	Independent variables
Principal dimensions	L, B, D, T, H_LWT, DWT
Capacity	S_C, O_P, G_P, W_P
Crew numbers	Crew

여기서, L, B, D, T는 각각 해양 플랜트 선체의 길이, 폭, 깊이, 흘수를 나타내고, H_LWT는 선체 중량, DWT는 재화 중량을 나타낸다. 그리고 S_C, O_P, G_P, W_P는 각각 해양 플랜트의 저장 용량, 오일 생산량, 가스 생산량, 물 주입량을 나타낸다. 끝으로 Crew는 해양 플랜트의 작업 인원을 나타낸다.

4.2 상관 분석

본 연구에서는 Pearson 방법으로 상관도를 검토하였으며, 3장에서 소개한 자체 개발 프로그램을 이용하여 FPSO 상부 중량에 영향을 미치는 독립 변수들의 상관 분석을 수행하였다.

1차 독립 변수의 선정 기준은 상관 계수 0.5 이상, 유의 확률 0.15 이하로 가정하였다. 일반적으로 유의 수준은 0.1 또는 0.05 이하로 정한다. 그러나 그렇게 되면, FPSO 상부 중량 추정식에서 그와 관련된 독립 변수를 고려할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 유의 수준을 0.15로 높여서 정하였다. Table 5는 상관 분석 결과의 일부를 나타낸 것이다. Table 5에서 Pearson Correlation, p-value, N은 각각 상관 계수, 유의 확률, 데이터의 수를 나타낸다.

Table 3 Principal particulars of 11 FPSO data used for developing the weight estimation model in this study

FPSO	L[m]	B[m]	D[m]	T[m]	H_LWT [ton]	DWT [ton]	S_C [MMbbl]	O_P [MMbopd]	G_P [MMscf/d]	W_P [MMbwpd]	Crew	T_LWT [ton]
A	310	61	31	23	70500	303669	2.0	0.19	530	0.42	220	37000
B	310	61	32	24	75750	353200	2.0	0.16	500	0.42	180	27700
C	285	63	32	24	56300	340660	2.2	0.25	400	0.42	100	24400
D	285	63	32	25	56300	340660	2.2	0.25	400	0.42	100	24400
E	310	58	32	23	56000	360000	1.8	0.22	380	0.40	120	24000
F	325	61	32	25	82000	346089	1.9	0.20	150	0.38	240	37000
G	305	61	32	24	63490	350000	1.8	0.16	650	0.38	240	36300
H	320	58	32	24	68410	337859	2.2	0.25	450	0.45	130	34000
I	300	60	32	23	52500	416000	2.0	0.24	440	0.41	160	30000
J	269	51	29	19	40600	129193	0.9	0.09	670	0.02	100	16100
K	300	60	31	23	48000	350000	1.8	0.20	440	0.39	135	25000

Table 5 Correlation analysis between independent variables and topsides weight (7 variables were partially represented)

		L	H_LWT	DWT	S_C	T_LWT
L	Pearson Correlation	1.00	0.85	0.59	0.46	0.81
	p-value (2-tailed)	-	0.00	0.08	0.18	0.00
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
T	Pearson Correlation	0.68	0.75	0.83	0.87	0.67
	p-value (2-tailed)	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
H_LWT	Pearson Correlation	0.85	1.00	0.44	0.52	0.78
	p-value (2-tailed)	0.00		0.20	0.13	0.01
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
DWT	Pearson Correlation	0.59	0.44	1.00	0.83	0.53
	p-value (2-tailed)	0.08	0.20		0.00	0.12
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
S_C	Pearson Correlation	0.46	0.52	0.83	1.00	0.51
	p-value (2-tailed)	0.18	0.13	0.00		0.14
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
W_P	Pearson Correlation	0.64	0.58	0.90	0.95	0.60
	p-value (2-tailed)	0.05	0.08	0.00	0.00	0.07
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
CREW	Pearson Correlation	0.65	0.71	0.28	0.11	0.84
	p-value (2-tailed)	0.04	0.02	0.43	0.76	0.00
	n	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

4.3 다중 회귀 분석

본 연구에서는 상관 분석 결과를 활용하여, 상관 계수 0.5 이상 유의 확률 0.15 이하인 7개의 변수(LBP, T, H_LWT, DWT, S_C, W_P, CREW)를 1차적으로 선정하고, 자체 개발한 프로그램을 활용하여 다중 회귀 분석을 수행하였다.

FPSO 상부 중량(T_LWT)을 추정하기 위한 회귀 분석 결과인 Table 6를 보면서 회귀식의 검정 과정에 대해서 설명하겠다.

1차 회귀분석을 통하여 도출된 “Model 1”에 대하여 회귀식의 유의성(Sig. of F≤0.1)과 오차항간의 독립성 (0.56<D-W<3.44)을 살펴보면, 모두 만족함을 알 수 있다. 그리고 회귀식의 적합도는 조정된 결정 계수의 값이 1에 가까우므로, 매우 높음을 알 수 있다.

다음은 회귀 계수의 유의성 검정 과정(Sig.≤0.1, 후진 제거 방법)이다. “Model 1”에서 높은 유의 확률을 가진 회귀 계수의 독립 변수는 흘수 T이다. 흘수 T를 제거하고 나머지 독립 변수를

가지고 2차 회귀 분석을 통하여 “Model 2”를 도출하였다 (Seo, et al., 2009). “Model 2”가 회귀 계수의 유의성 검정을 만족하고, 또한 회귀식의 유의성과 오차항간의 독립성 검정도 만족함을 알 수 있다.

다음은 독립 변수 간의 독립성 검정 과정(VIF≤10)이다. “Model 2”에서 분산 팽창 지수(VIF)가 제일 높은 독립 변수는 물 주입량(W_P)이다. 따라서 W_P를 제거하고 나머지 독립 변수를 가지고 3차 회귀 분석을 통하여 “Model 3”을 도출하였다. “Model 3”이 다섯 가지의 모든 검정을 만족함을 알 수 있다.

그러나 “Model 3”의 독립 변수들을 살펴보면, FPSO 상부와 관련된 독립 변수들이 저장 용량(S_C) 밖에 없는 것을 알 수 있다. 따라서 FPSO 상부 중량을 추정할 때 그와 관련된 독립 변수들을 고려하기 위해서 본 연구에서는 “Model 3”이 아닌 “Model 2”를 최종적으로 채택하였다.

Table 6에서 β, Std. Error, t, Sig., VIF, Adjusted R², Sig. of F, D-W는 각각 회귀 계수, 표준 오차, t 통계량, 회귀 계수의 유의 확률, 분산 팽창 계수, 조정된 결정 계수, 회귀식의 유의 확률, Durbin-Watson 통계량을 나타낸다.

본 연구에서는 최종적으로 “Model 2”(해양 플랫폼 상부 중량 T_LWT를 LBP, H_LWT, DWT, S_C, W_P, CREW로 표현한 모델)를 중량 추정 모델로 확정하였다.

Table 6 Multiple regression analysis for estimating topsides weight of FPSO

	Model	β	Std. Error	t	Sig.	VIF	Adjusted R ²	Sig. of F	D-W
1	(Const.)	-117,898.4	13,669.3	-8.63	0.01		0.991	0.007	1.79
	L	425.9	39.6	10.76	0.01	10.2			
	T	860.6	476.5	1.81	0.21	12.9			
	H_LWT	-0.6	0.1	-8.54	0.01	14.6			
	DWT	-60.6	9.4	-6.46	0.02	10.8			
	S_C	26,427.1	2,846.6	9.28	0.01	36.4			
	W_P	-39,236.7	9,772.8	-4.02	0.06	45.9			
	CREW	118.7	6.8	17.4	0.00	3.4			
	(Const.)	-101,879.1	13,775.7	-7.40	0.01		0.985	0.002	1.55
	L	409.4	51	8.03	0.00	9.7			
2	H_LWT	-0.5	0.1	-6.90	0.01	10.0			
	DWT	-51.9	10.7	-4.87	0.02	7.8			
	S_C	27,575.1	3,674.9	7.50	0.01	34.5			
	W_P	-39,666.0	12,939.4	-3.07	0.06	45.7			
	CREW	117.7	9	13.07	0.00	3.4			
3	(Const.)	-70654.9	16328.0	-4.33	0.01		0.953	0.002	1.39
	L	316.3	72.0	4.38	0.01	6.1			
	H_LWT	-0.4	0.0	-3.57	0.02	9.1			
	DWT	-63.5	18.0	-3.62	0.02	6.8			
	S_C	18131.5	3527.0	5.14	0.01	3.3			
	CREW	116.5	16.0	7.36	0.00	7.3			

4.4 중량 추정 모델 개발

앞서, 초기 변수 선정과 상관 분석을 통해 1차적으로 7개의 독립 변수를 선정하였고, 이후 다중 회귀 분석을 통해 FPSO 상부 중량을 추정하기 위한 추정식을 개발하였다.

Table 6의 회귀 분석 결과와 식 (3)을 활용하여 FPSO 상부의 중량 추정 모델을 표현하면 식 (16)과 같다.

$$T_LWT = \beta_0 + (L)\beta_1 + (H_LWT)\beta_2 + (DWT)\beta_3 + (S_C)\beta_4 + (W_P)\beta_5 + (CREW)\beta_6 + \epsilon \quad (16)$$

where, $\beta_0 = -101879.1, \beta_1 = 409.4, \beta_2 = -0.5, \beta_3 = -51.9, \beta_4 = 27575.1, \beta_5 = -39666.0, \beta_6 = 117.7$

4.5 중량 추정 모델의 검증

Table 7 Error analysis for examining the validity of the weight estimation model using 10 FPSO data

FPSO Data	Actual weight(A)	Estimated weight (B)	Ratio (A/B)
A	37,000	37,808	0.98
B	27,700	27,833	1.00
C	24,400	24,272	1.01
D	24,400	24,272	1.01
E	24,000	24,119	1.00
F	37,000	36,968	1.00
G	36,300	35,315	1.03
H	34,000	33,555	1.01
I	30,000	30,545	0.98
J	16,100	16,117	1.00
Avg.	29,090	29080	1.0003

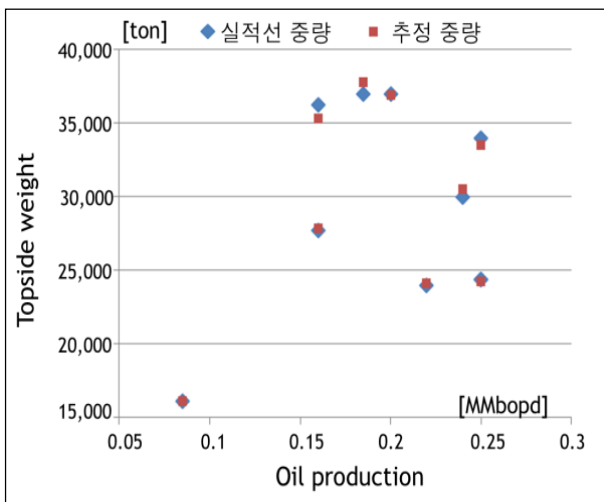


Fig. 6 Differences between the actual and estimated weights of FPSO topsides

본 연구에서는 앞서 개발된 중량 추정 모델의 유효성을 검증하기 위해 추정 모델을 이용한 추정 중량과 실적선 중량의 차이에 대한 오차 분석을 수행하였다.

Table 7에 나타나 있듯이, 오차의 평균은 1.0003, COV(Coefficient Of Variation)는 0.0143이다. 즉, 실적선 중량과 추정 중량 사이의 오차가 1.4%라는 것을 나타낸다. Fig. 6은 실적선 중량과 추정 중량의 차이를 도표로 나타낸 것이다.

그리고 중량 추정 모델을 개발하기 위하여 활용한 FPSO 자료 외에 별도의 실적선 자료를 앞서 개발된 추정식의 유효성 검증에 활용하였다. 그 결과는 Table 8과 같다.

Table 8 Error analysis for examining the validity of the weight estimation model using additional FPSO data

FPSO	Actual Weight (A) [ton]	Estimated weight (B) [ton]	Ratio (A/B)
K	25,000	28,831	0.86

본 연구에서는 FPSO의 실적선 자료를 수집하기 위해 인터넷과 각종 문헌을 참조하였다. 하지만 이러한 자료는 일반적으로 조선소의 비밀 자료이기 때문에 자료 확보에는 한계가 존재하였다. 하지만 향후 조선소의 협조를 통해 다수의 실적선 자료를 확보하여 보다 신뢰성 높은 중량 추정 모델을 개발할 수 있으리라 생각된다.

5. 해상 풍력 발전기의 중량 추정 모델 개발 예

본 연구에서는 앞서 FPSO의 상부 중량 추정 외에 해상 풍력 발전기의 중량 추정 과정에 본 연구에서 개발한 중량 추정 모델을 적용해 보고자 하였다. 그 내용을 간략히 소개하면 다음과 같다.

5.1 자료 수집 및 변수 선정

해상 풍력 발전기의 중량 추정 모델을 개발하기 위해서는 다수의 해상 풍력 발전기에 대한 상세 자료가 필요하다. 하지만 이러한 자료를 인터넷 또는 각종 문헌을 통해 확보하기에 한계가 존재하여 본 연구에서는 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 공개된 5MW급 참조 모델(reference model) (Jonkman, et al., 2009)을 기본으로 하여 변환을 거쳐 43개의 유사 모델을 생성한 후, 중량 추정 모델 개발에 활용하였다. Table 9은 해상 풍력 발전기의 중량("OWT_T"라는 이름의 종속 변수로 가정)에 영향을 미치는 독립 변수를 조사한 결과이다. 여기서 43개의 해상 풍력 발전기 데이터는 지면 관계상 생략하였다.

Table 9 Independent variables for estimating total weight of offshore wind turbine

Independent variables
T_H, H_D, R_D, N_W

여기서, T_H(tower height)는 타워 높이, H_D(hub diameter)는 허브 직경, R_D(rotor diameter)는 로터 직경, N_W(nacelle weight)는 너셀 중량을 나타낸다.

5.2 상관 분석

본 연구에서는 해상 풍력 발전기의 중량 추정 모델 개발을 위해 1차적으로 선정된 4개의 변수들에 대해 상관 분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 10과 같다. 이 적용 예에서는 43개의 표본 수를 활용하였기 때문에 그 신뢰성이 매우 높다고 판단하여, 독립 변수의 1차 선정 기준을 상관 계수 0.5 이상, 유의 수준 0.1 이하로 가정하였다. 상관 분석 결과를 살펴보면 모든 독립 변수가 이 선정 기준을 만족함을 알 수 있다.

Table 10 Correlation analysis between independent variables and total weight of offshore wind turbine

		T_H	H_D	R_D	N_M	OWT_T
T_H	Pearson Correlation	1.00	0.50	0.50	0.45	0.87
	p-value (2-tailed)	-	0.15	0.15	0.20	0.00
	n	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00
H_D	Pearson Correlation	0.50	1.00	0.50	0.45	0.63
	p-value (2-tailed)	0.15	-	0.15	0.20	0.05
	n	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00
R_D	Pearson Correlation	0.50	0.50	1.00	0.91	0.82
	p-value (2-tailed)	0.15	0.15	-	0.00	0.00
	n	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00
N_W	Pearson Correlation	0.45	0.45	0.91	1.00	0.82
	p-value (2-tailed)	0.20	0.20	0.00	-	0.00
	n	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00

5.3 다중 회귀 분석

본 연구에서는 해상 풍력 발전기의 중량 추정 모델 개발을 위

해 상관 분석 결과로부터 얻어진 4개의 변수들에 대해 다중 회귀 분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 11과 같다. 1번 회귀식이 다섯 가지 검정을 모두 만족함을 알 수 있다(Sig. ≤ 0.1, VIF ≤ 10, Adjusted R² ≈ 1, Sig. of F ≤ 0.1, 1.29 < D-W < 2.71).

Table 11 Multiple regression analysis for estimating total weight of offshore wind turbine

Model	β	Std. Error	t	Sig.	VIF	Adjusted R ²	Sig. of F	D-W
(Const.)	-779,578.2	10,005.3	-79.9	0.00		0.9996	0.00	2.32
1 T_H	13,436.5	84.8	158.5	0.00	1.5			
1 H_D	18,978.8	730.0	26.0	0.00	1.5			
1 R_D	1,246.1	105.4	11.8	0.00	5.9			
1 N_W	1.0	0.0	62.1	0.00	5.4			

5.4 중량 추정 모델 개발

다중 회귀 분석 결과로부터 해상 풍력 발전기의 중량 추정을 위한 모델은 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_M = \beta_0 + (T_H)\beta_1 + (H_D)\beta_2 + (R_D)\beta_3 + (N_M)\beta_4 + \epsilon \quad (17)$$

where, $\beta_0 = -799578.2$, $\beta_1 = 13436.5$, $\beta_2 = 18978.8$, $\beta_3 = 1246.1$, $\beta_4 = 1.0$

5.5 중량 추정 모델의 검증

본 연구에서는 개발된 중량 추정 모델에 의한 추정 중량과 실제 중량의 차이에 대한 오차 분석을 통해 추정식의 타당성을 검증하였다. 그 결과, 실제 중량과 추정중량의 비의 평균은 1.000, COV는 0.0009이다. 즉, 실제 중량과 추정 중량 사이의 오차가 0.09%라는 것을 나타낸다.

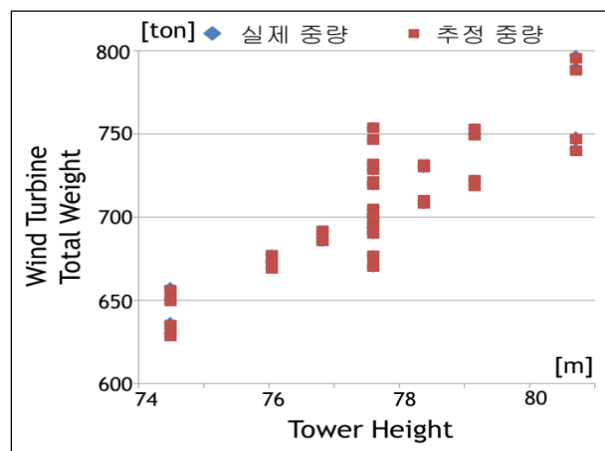


Fig. 7 Differences between the actual and estimated weights of offshore wind turbine

본 연구에서는 해상 풍력 발전기 의 실적선 자료를 수집하기

위해 인터넷과 각종 문헌을 참조하였다. 하지만 이러한 자료는 일반적으로 제조사의 비밀 자료이기 때문에 자료 확보에는 한계가 존재하였다. 하지만 향후 제조사의 협조를 통해 다수의 실적선 자료를 확보하여 보다 신뢰성 높은 중량 추정 모델을 개발할 수 있으리라 생각된다.

6. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 설계 초기 단계에서 활용할 수 있는 부유식 해양 플랜트의 중량 추정 모델에 대해 연구하였다. 먼저 중량 추정 방법에 대한 조사를 통해 그 활용도가 비교적 높고 적용 가능성이 높은 통계적 방법을 본 연구에서는 적용하였다. 이를 위해, 먼저 실적선 자료 확보를 통해 중량에 영향을 미치는 독립 변수를 조사하였고, 이들에 대해 상관 분석을 수행하여 중량 추정 모델에 포함될 변수들을 1차적으로 선정하였다. 이후, 다중 회귀 분석을 통해 중량 추정 모델을 개발하였다. 끝으로 개발된 중량 추정 모델의 유효성을 검증하기 위해 추정 모델을 이용한 추정 중량과 실적선 중량의 차이에 대한 오차 분석을 수행하였다.

이상과 같은 부유식 해양 플랜트의 중량 추정 모델 개발 연구와 관련하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 해양 플랜트의 주요 특성을 반영하고, 우리가 추정하고자 하는 중량(중속 변수)에 영향을 미치는 독립 변수의 도출이 중요하다.
- (2) 보다 정교한 중량 추정 모델을 개발하기 위해서는 이의 기반이 되는 실적선 자료의 확보가 중요하고 중량 관리 표준에 대한 논의가 필요하다.

향후에는 해양 플랜트에 대한 보다 많은 실적선 확보를 통해 보다 정교한 중량 추정 모델을 개발하고, 그 유효성을 검증할 예정이다. 또한 최적화 기법을 기반으로 한 중량 추정 모델을 개발하고 그 결과를 본 연구에 의한 결과와 비교하여 그 성능을 비교할 예정이다.

후 기

본 연구는 (a) 산업통상자원부/한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업(No. 20124030200110) (b) 산업통상자원부/지식경제R&D전략기획단의 미래산업선도기술 개발사업(No. 10042556-2012-11) (c) 산업통상자원부의 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양 플랜트 생산기술 개발) (d) 산업통상자원부의 해양플랜트특성화대학지원사업(ITAH 680113011004)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

Bluman, A.G., 2004. *Elementary Statistics (A Step by Step Approach)*, McGraw-Hill: New York.

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 Architecture of Korea*, 48(5), pp.426-434.

Cimino, D. & Tellet, D., 2007. *Marine Vehicle Weight Engineering*, Society of Allied Weight Engineers: Long Beach

Hwang, J.K. Bang, G.J. Roh, M.I. & Lee, K.Y., 2009. Detailed Design and Construction of the Hull of an FPSO. *Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, 21-26 June 2009, pp.151-158.

IMA(International Maritime Association), 2013. *Floating production systems* [online] (2013.3.1) Available at: <http://www.imastudies.com/id361.htm> [2013.4.1]

Jonkman, J. Butterfield, S. Musial, W. & Scott, G., 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. *Technical Report, NREL/TP-500-38060*.

Kang, J.H., 2011. *SPSS - Get the Best Out of Your Data*. Crownbook: Seoul.

Kang, J.S. Kang, H.K. Park, J.H. & Ha, T.B., 2012. Developing an Execution Strategy for FPSO. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 49(3), pp.48-56.

Lee, M.S., Ryu, J.C. & Kim, K.S., 2009, Development of the Linear Regression Analysis Model to Estimate the Shear Strength of Soils. *The Journal of Engineering Geology*, 19(2), pp.177-189.

Seo, H.S. Yang, G.S. Kim, N.Y. Kim, H.Y. & Kim, M.G., 2009. *SPSS(PASW) Regression Analysis*. 3rd Ed. Hannarae Publishing: Seoul.

Sung, D.Y. Lim, H.J. Lee, D.W. Kim, B.J. and Park, Y.G., 2010. The prediction equation for bending stress of rail in concrete track by the linear multiple regression analysis. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Korean Society for Railway*, Changwon, Korea, 10-12 June 2010, pp.315- 323.

Walpole, R.E. & Myers, R.H., 1985. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Macmillan Publishing: New York.

