

수직 이동형 데릭의 상부 구조물 지지부재 최적 설계

정지호(부산대학교), 배정훈(부산대학교), 신성철(부산대학교), 김수영(부산대학교)

Optimum Design of the Upper Structure Supporting Member of the Derrick

Ji-ho Jeong (Pusan National University), Jeong-hoon Bae (Pusan National University), Sung-chul Shin (Pusan National University), Soo-young Kim (Pusan National University)

요약

Derrick은 Drillship에서 시추 작업을 수행하기 위한 주요 장비인 TDM (Top Drive Module), 시추용 배관, HC (Heave compensator) 등을 지지하는 주요 구조물로서 전고가 높고 중량은 수천 톤에 달한다. 이러한 Derrick의 특징으로 인하여 Drillship의 경우 복원성 및 안정성이 나빠지는데, 이를 개선하기 위해서는 Derrick의 중량을 감소시킴으로써 선박의 무게중심을 낮추는 것이 필요하다. 본 연구에서는 일정한 안전율을 만족하면서 Derrick의 중량을 최소화할 수 있도록 하는 지지부재의 최적설계를 수행하였다. 지지부재 I beam과 Box beam의 두께를 설계변수로 설정하고, 목적함수 결정을 위한 학습 데이터를 생성하였다. 목적함수는 각 부재의 체적계산을 통한 중량 계산식과 유전자 프로그래밍으로 도출한 안전율 추정식으로 각각 정의하였다. 최적화 알고리즘은 NSGA-II를 사용하였으며, 2개의 목적함수를 가지는 다목적 최적화를 수행하여 그 결과를 분석하고 기존 설계와 비교하였다.

Keywords: Optimum design (최적설계), Genetic programming (유전자 프로그래밍), NSGA-II (비지배 정렬 유전자 알고리즘) Structure optimization (구조 최적화), Derrick (데릭), Supporting member (지지부재)

1. 서론

1.2 국내외 연구 현황

1.1 연구 배경 및 필요성

Drillship에는 시추 작업을 수행하기 위한 Drilling system 및 부가 장비가 부착되는 철골 구조물인 Derrick이 탑재된다. 일반적으로 Derrick의 전고(Total height)는 60m~70m에 달하며, Derrick의 자중과 부착되는 기자재의 총 중량은 수천 톤에 달한다.

Derrick의 자중을 비롯해 Derrick에 부착되는 Drilling system과 부가장비들의 하중이 클수록 Drillship의 무게중심은 높아지게 되어 복원성 및 운항 시의 안정성 확보가 어렵다. 따라서 Drillship의 복원성, 안정성, 경제성을 확보하기 위하여 Derrick에 사용되는 강재의 양을 최소화할 필요가 있는데 Derrick에 부착되는 부가장비의 중량을 고려한다면 충분한 강도와 안전율을 만족하는 설계가 필요하다.

세계적으로 해양구조물의 최적 설계와 관련하여 다양한 연구가 진행되고 있는데 Karadeniz Halil et al(2010)는 Monopod Offshore Tower에 대해서 신뢰성을 기반으로 Tower의 두께와 단면의 반경에 대한 최적 설계를 수행하였으며, 해상 풍력 발전기를 지지하는 철골 구조물인 Jacket의 구조를 마이크로 유전자 알고리즘을 사용하여 최적 설계를 수행한 바가 있다(Lee, et al., 2014).

구조적인 부재에 대한 최적 설계 연구로는 CSR 기반 좌굴 두께 요건을 고려한 이중선체 유조선의 구조 부재의 최적 설계에 관한 연구가 있으며(Jo, et al., 2011), 냉간성형 립C형강의 단면 형상의 최적 설계에 대해서 마이크로 유전자 알고리즘을 사용한 연구가 있다(Kim, et al., 2003).

최근에는 Derrick 상부 구조물의 수직 이동을 통해 Drillship이 항해 중일 때에는 상부 구조물이 하강하여 운항 안정성 확보에 대한 Derrick의 개발과 관련된 연구도 있다(Park, et al., 2013).

본 연구에서는 Derrick에서 지지부재의 형상 최적 설계와 관련된 연구를 중점적으로 수행하였다. 최적 설계를 통해 안전율을 일정 수준 이상을 만족하는 동시에 중량은 최소화하는 것을 목표로 하였다.

먼저, 실제 해상 환경 하중과 기지재 및 부가 장비들의 하중을 고려한 구조해석을 수행하였다. 최적화를 위해서 지지부재의 주요 치수를 설계변수로 지정하고, 각 부재의 체적을 이용하여 Derrick의 중량을 계산할 수 있는 식과 유전자 프로그래밍(GP)을 이용하여 안전율을 추정할 수 있는 식을 목적함수로 정의하였다. 최적화 알고리즘은 NSGA-II를 사용하였으며, 2개의 목적함수를 가지는 다목적 최적화를 수행하여 최적의 Derrick의 지지부재 설계변수를 도출하였다.

2. Derrick 지지부재의 최적 설계

2.1 설계변수 및 제한조건

Derrick을 구성하는 I beam과 Box beam의 단면 형상 및 주요 치수의 표현은 Fig. 1과 같다.

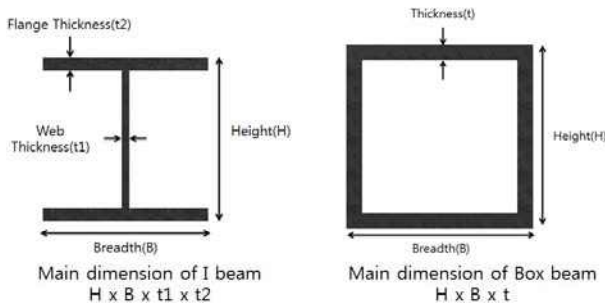


Fig. 1 Notation of main dimension for member

기존의 Derrick을 구성하는 지지부재의 단면 형상, 주요 치수는 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Beam shape, dimension & Amount

Beam shape	Main dimension (mm)	Amount (EA)
	750x750x35x60	60
	750x500x30x50	72
	950x950x100	12

설계변수는 이들의 주요 치수 중 두 가지의 I beam은 Web과 Flange의 두께, 세 가지의 Box beam은 두께로 총 7개의 설계변수를 mm 단위로 설정하였다.

Table 2는 기존 Derrick의 지지부재 두께를 나타낸다. W1와 F1은 각각 폭이 750mm인 I beam의 Web과 Flange의 두께, W2와 F2는 각각 폭이 500mm인 I beam의 Web과 Flange의 두께를 의미하며, T, M, B는 각각 Top, Middle, Bottom Box beam의 두께를 의미한다.

Table 2 Design variables – thickness of member (mm)

W1	F1	W2	F2	T	M	B
35	60	30	50	100	100	100

세 가지 형상의 Beam은 Fig. 2와 같이 위치해 있으며, 파란색은 폭이 750mm인 I beam, 자주색은 폭이 500mm인 I beam을 의미하며, 초록색은 Top Box beam, 노란색은 Middle Box beam, 빨간색은 Bottom Box beam을 의미한다.

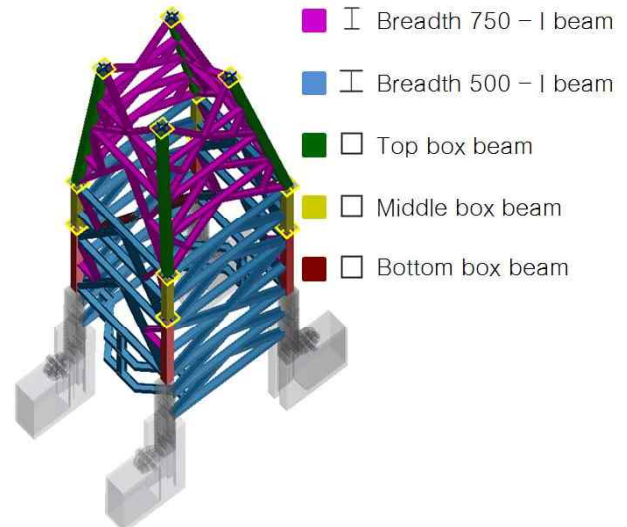


Fig. 2 Supporting member in derrick

제한조건은 Table 3과 같이, 각 지지부재의 변화가 기존 Derrick의 구조 및 형상을 크게 변형시키지 않는 범위로 설정하였으며, 그 크기는 기존 두께의 60~100% 내로 하였다.

Table 3 Constraint condition of design variables

Design variables	Min. value	Max. value	Ratio (%)
W1	25mm	35mm	70
F1	40mm	60mm	70
W2	20mm	30mm	70
F2	30mm	50mm	60
T	80mm	100mm	80
M	80mm	100mm	80
B	80mm	100mm	80

2.2 목적함수

2.2.1 구조물의 중량

최적화에 사용된 목적함수는 Derrick의 중량과 안전율로 설정하였으며, 중량의 경우 모든 Beam의 체적을 구하고 Beam의 재료인 DH36 강의 밀도를 곱해 계산하였다. 도출된 Derrick의 중량 계산식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} Weight_{Total} = & (((750 \times F1 \times 2 + (750 - 2 \times F1) \times W1) \times L1 \\ & + (500 \times F2 \times 2 + (750 - 2 \times F2) \times W2) \times L2 \\ & + (950^2 - (950 - 2 \times T)^2) \times L3 \\ & + (950^2 - (950 - 2 \times M)^2) \times L4 \\ & + (950^2 - (950 - 2 \times B)^2) \times L5)) \\ & \times 10^{-9} \times 7850 \times 10^{-3} \\ & + 69.670 \times 4 + 3.403 \times 20 \end{aligned} \quad (1)$$

L1, L2는 각각 폭이 750mm인 I beam, 폭이 500mm인 I beam의 총 길이를 의미하며 L3, L4, L5 역시 Top, Middle, Bottom Box beam의 총 길이를 의미한다.

중량 계산식의 검증을 위하여 3D Modeling tool인 Autodesk Inventor에서 자동으로 계산된 중량과 계산식으로 계산한 중량을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 오차는 0.74%로 나타났으며, 이는 부재 간 중첩되는 부분에서 발생하는 오차로 판단된다.

Table 4 Comparison between actual and estimated weight

Case	Actual weight (ton)	Estimated weight (ton)	Error (%)
Base	1,630.613	1,618.468	-0.74

2.2.2 Derrick의 안전율 추정식

2.2.2.1 하중 및 경계조건

Fig. 3은 Derrick의 3D model 및 해상 환경 하중 조건 및 경계조건을 나타내며, A는 중력가속도, B는 Heave 변환 값, C는 Roll, Pitch 변환 값을 적용하였으며, D는 풍하중, E는 지지조건으로 Derrick의 하부는 바닥에 고정되었다고 설정하였다. Table 5는 해상 환경 하중인 RAO의 주요 가속도를 구조해석에 적용하기 위하여 가속도로 변환한 표이며, Heading angle은 0도만 고려하였다.

Table 5 RAO transformation to acceleration

Heading (Deg)	Roll (rad/s)	Pitch (rad/s)	Heave (m/s ²)
0	0	0.005396	3.728241

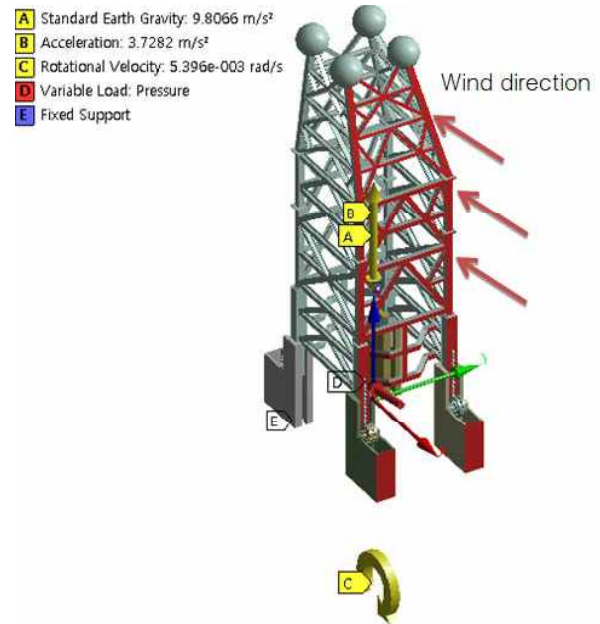


Fig. 3 Offshore environment load & boundary condition

식 (2)는 바람에 의한 높이별 풍압을 추정할 수 있는 식으로 q 는 풍압, z 는 구조물의 높이를 의미한다. Fig. 4와 같이 구조해석 시 높이에 따라 풍압이 달라짐을 알 수 있다.

$$q = 0.0073 \times \log\left(\frac{z+7500}{1000}\right) + 0.0042 \quad (2)$$

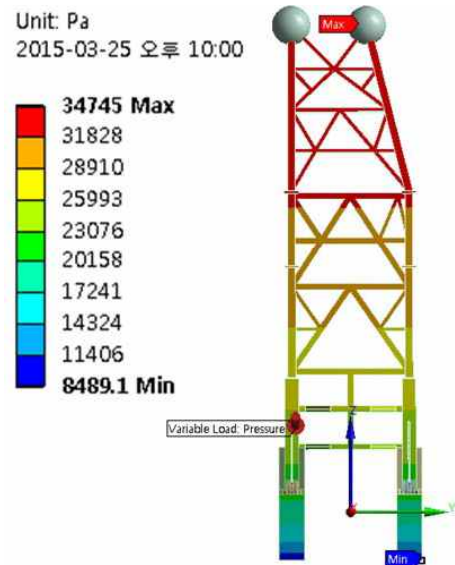


Fig. 4 Different pressures depending on structure height

Fig. 5는 Derrick에 탑재된 기지재의 하중 조건을 나타내며, 모든 하중은 각 지점에 균등하게 분포시켰으며, Table 6은 HC (Heave Compensator), TDM (Top Drive Module) 및 Drilling pipe를 포함한 기지재들이 탑재되는 지점 및 하중을 나타내었다.

- A Point Mass
- B Point Mass 2
- C Point Mass 3
- D Point Mass 4
- E Force
- F Force
- G Force

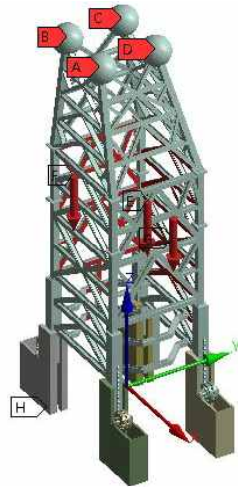


Fig. 5 Load condition of additional equipment

Table 6 Load category

	HC, TDM and etc.	Pipe and etc.	Total
Weight	1,030ton	600ton	1,630ton
Mark	A, B, C, D	E, F, G	-

2.2.2.2 학습 데이터 생성

유전자 프로그래밍을 사용하여 Derrick의 안전율 추정식 도출을 위해서는 학습 데이터가 필요한데 2수준 7요인의 직교배열표를 사용하여 Table 7과 같이 총 9개의 Case를 생성하였다.

Table 7 Orthogonal arrange table

Case	Design variable (mm)						
	W1	F1	W2	F2	T	M	B
Derrick (Base)	35	60	30	50	100	100	100
1	25	40	20	30	80	80	80
2	25	40	20	50	100	100	100
3	25	60	30	30	80	100	100
4	25	60	30	50	100	80	80
5	35	40	30	30	100	80	100
6	35	40	30	50	80	100	80
7	35	60	20	30	100	100	80
8	35	60	20	50	80	80	100

학습데이터의 생성을 위하여 9개의 Case에 대하여 구조해석을 수행하였으며, 결과는 Table 8과 같다. 안전율은 Derrick의 재료인 DH36 강의 항복강도인 350MPa를 기준으로 계산하였다.

Table 8 Result of structure analysis

Case	Maximum stress (MPa)	Safety factor
Derrick (Base)	98.97	3.53
1	155.63	2.24
2	147.67	2.37
3	107.62	3.25
4	105.84	3.31
5	151.49	2.31
6	147.9	2.37
7	108.26	3.23
8(test)	106.65	3.28

2.2.2.3 안전율 추정식 도출

유전자 프로그래밍은 생물학적 진화에 착안한 알고리즘으로, 유전자 알고리즘의 확장된 형태이고 기본적인 특성은 선택, 교배, 돌연변이, 재생산 등과 같이 기존의 유전자 알고리즘의 방식과 흡사하다. 하지만 간단한 명령어 집합을 이용하는 특성 때문에 기존 방식보다 복잡한 계산도 수행 가능한 장점을 가진다(Searson, et al., 2009).

유전자 프로그래밍을 이용하여 Derrick의 안전율 추정식을 도출하였으며, 프로그래밍에 사용된 설계변수와 연산자 선정 등의 설정은 Table 9와 같이 사용하였다.

Table 9 Setting of genetic programming

Operator	$\times, -, +, ^2, \tanh, \sin, \cos$
Design variable	W1, F1, W2, F2, T, M, B
Population size	300
Number of generation	300
Max depth	5

추정식을 도출하기 위하여 필요한 학습 데이터는 Base case를 포함해 1번~7번 Case까지 총 8개의 데이터를 사용하였으며, 추정식의 검증을 위한 시험데이터는 8번 Case를 사용하였다. Fig. 6은 충분히 학습되어 RMS가 0에 수렴하는 것을 확인 할 수 있다.

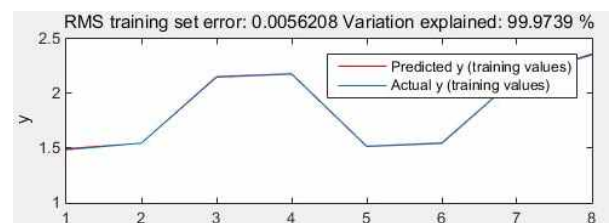


Fig. 6 RMS training set error

유전자 프로그래밍의 수행 결과 Derrick의 안전율에 대한 추정식을 식 (3)과 같이 도출하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{Safety factor} = & 0.004737W1 - 0.02619W1 \\
 & + 0.00404B - 0.02704 \tanh(\sin(T - M)) \\
 & + 0.02261 \times (1.0)^2 \times (W1 + F1 - (9.545)^2) \\
 & - 0.2554 \sin(\cos(\cos(B))) \\
 & \times \cos((T)^2 \times (F2 + 8.916)) \\
 & + 0.0003165T(F1 + 8.492) + 1.72
 \end{aligned} \quad (3)$$

Derrick의 안전율 추정식의 검증을 위하여 구조해석의 결과로 도출된 안전율과 추정식으로 도출된 안전율의 비교 및 분석의 결과를 Table 10에 나타내었으며, 시험데이터의 경우 오차가 2.15%로 나타났다.

Table 10 Comparison between result of analysis and estimated safety factor

Case	Actual safety factor	Estimated safety factor	Error (%)
8(test)	3.28	3.21	-2.15

2.3 최적화 수행

비지배 정렬 유전자 알고리즘(Non-dominated sorting genetic algorithm-II; NSGA-II)은 목적함수의 형태나 연속성 등에 제약을 받지 않고, 국부 최적해로 수렴할 가능성을 상당히 높인 기법으로 알려졌다. 기존의 유전자 알고리즘의 기본적인 구조 외에 파레토 지배(Pareto-dominance)라는 개념을 적용하여 목적함수 간의 순위(Rank)를 정해 효율성을 따져 자동적인 공유 매개변수와 엘리트 보존 선택법을 사용하는 알고리즘이다(Deb, et al., 2002).

중량 계산식과 안전율 추정식을 각각 목적함수 1과 2로 설정하였으며, 설계변수와 개체 수와 세대 수는 Table 11과 같이 설정하였다.

Table 11 Setting of NSGA-II

Design variables	W1, F1, W2, F2, T, M, B
Population size	200
Number of generation	300

최소의 중량을 가지면서 안전율은 높아야 하므로, 안전율 추정식에 역수를 취하여 두 가지 목적함수가 모두 최소화 문제가 되도록 하였으며, NSGA-II를 이용한 최적화 결과는 Fig. 7과 같다.

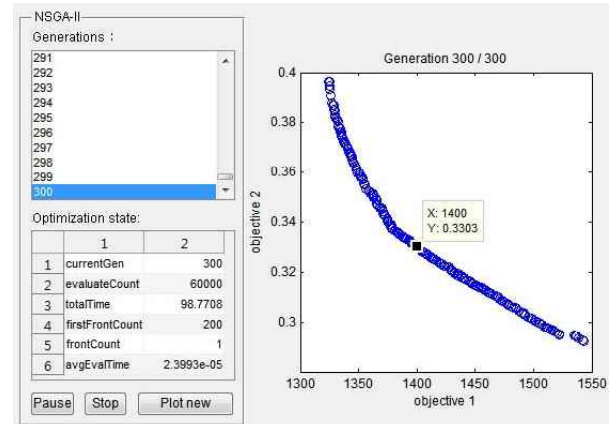


Fig. 7 Pareto-optimum set

Fig. 7에 나타난 점 중 안전율이 3.0 이상이면서 중량이 최소인 지점을 최적점으로 정의하면 Fig. 7에 표시된 부분이다. 이 지점에서의 중량은 약 1,400ton으로 계산되었으며, Table 12는 그 지점에서 도출된 최적 설계변수이다.

Table 12 Optimum design variables

Design variables	Value (mm)
W1	25
F1	54.044
W2	20
F2	30
T	91.987
M	86.635
B	80

Table 13은 최적 설계변수 대한 NSGA-II로 도출된 안전율 및 중량과 구조해석을 통해 도출된 값을 비교 분석하였다. 중량의 경우 0.91%, 안전율의 경우 7.07%의 오차를 보였다. 안전율의 오차는 구조해석과 유전자 프로그래밍을 통한 추정식과의 오차에 기인한다고 판단된다.

Table 13 Comparison between result of result of analysis and NSGA-II

Weight			Safety factor		
Actual (ton)	Estimated (ton)	Error (%)	Actual	Estimated	Error (%)
1,413.27	1,400.41	0.91	2.83	3.03	7.07

최적화 결과 도출된 Derrick의 설계 안은 기존의 Derrick보다 중량은 1,630ton에서 1,413ton으로 217ton

감소되었으며, 안전율은 2.83으로 나타나 안전하다고 판단하였다.

3. 결론

본 연구에서는 Drillship에 탑재되는 Derrick의 지지부재에 대한 최적 설계를 수행하였다. 설계변수로 지지부재의 주요 치수를 선정하였으며, 지지부재의 체적을 계산하여 Derrick의 중량 계산식과 유전자 프로그래밍 기법을 이용한 안전율 추정식을 목적함수로 하였다. 다목적 최적화 기법인 비지배 정렬 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 설계를 수행하였고, 그 결과로 Derrick의 중량을 13%가량 감소시킬 수 있었으며, 안전율 또한 2.8 이상을 확보하였다.

4. 후기

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0030671)

참 고 문 헌

- Deb, K. Pratap, A. Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE TRANSACTION ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 6(2), pp.182-197
- Karadeniz, H. Togan, V. & Vroouwenvelder, T., 2010. Optimization of Steel Monopod-Offshore-Towers Under Probabilistic Constraints. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 132(2), pp.(021605)1-7.
- Jo, Y.C. Lee, J.C. Lee, S.B. Shin, S.K. & Jang, C.D., 2011. Optimum Design for Longitudinal Strength Members of Double Hull Tankers with Central Long'l Bulkhead considering Buckling Thickness Requirement of Plate Panels based on Common Structural Rule. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*, Sep. 2011., pp.117-126.
- Kim, S.M. & Lee, J.H., 2003. Optimum Design of Cold-Formed Lipped Channel Beams under Uniformly Distributed Load using Micro Genetic Algorithm. *Journal of the architectural institute of Korea : Structure & construction*, 19(7), pp.19-26.
- Lee, J.C. Shin, S.C. & Kim, S.Y., 2014. A Study on the Development and the Verification of Engineering Structure Design Framework based on Neuro-Response Surface Method (NRSM). *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 24(1), pp.46-51.
- Lee, J.H. Kim, S.Y. Kim, M.H. Shin, S.C. & Lee, Y.S., 2014. Design Optimization and Reliability Analysis of Jacket Support Structure for 5-MW Offshore Wind Turbine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(3), pp.218-226.
- Park, J.H. Bae, J.I. & Jung, J.W., 2013. Study of Reliability Improvement for Vertical Moving Derrick System on Drill Ship. *Annals Fall Conference of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Gangwon, Republic of Korea, 18-20 December. 2013.
- Searson, D. 2009. *GPTIPS: Genetic Programming & Symbolic Regression for MATLAB*. [Online] Available at: <http://gptips.sourceforge.net> [Accessed 17 March 2015].