

비용 최소화를 위한 플래어 시스템의 배관 서포트 타입 최적설계

박정민¹·박창현¹·김태수²·최동훈^{1,†}
한양대학교 기계공학과¹
제이씨이엔씨(주)²

Optimal Determination of Pipe Support Types in Flare System for Minimizing Support Cost

Jung-Min Park¹·Chang-Hyun Park¹·Tea-Soo Kim²·Dong-Hoon Choi^{1,†}
Department of Mechanical Engineering, Hanyang University¹
JCENC Co., Ltd.²

Abstract

Floating, production, storage and offloading (FPSO) is a production facility that refines and saves the drilled crude oil from a drilling facility in the ocean. The flare system in the FPSO is a major part of the pressure relieving system for hydrocarbon processing plants. The flare system consists of a number of pipes and complicated connection systems. Decision of pipe support types is important since the load on the support and the stress in the pipe are influenced by the pipe support type. In this study, we optimally determined the pipe support types that minimized the support cost while satisfying the design constraints on maximum support load, maximum nozzle load and maximum pipe stress ratio. Performance indices included in the design constraints for a specified design were evaluated by pipe structural analysis using CAESAR II. Since pipe support types were all discrete design variables, an evolutionary algorithm (EA) was used as an optimizer. We successfully obtained the optimal solution that reduced the support cost by 27.2% compared to the initial support cost while all the design requirements were satisfied.

Keywords : Support(서포트), Piping(배관), Evolutionary Algorithm(진화 알고리즘), Optimization(최적화), Process Integration and Design Optimization(PIDO)

1. 서론

FPSO(Floating, Production, Storage and Offloading)는 해양의 시추설비에 의해 시추된 원유를 정제하는 고정형 생산 플랫폼(fixed type production platform)을 갑판(cargo deck) 상에 설치하고, 선박의 선체(hull)를 원유 저장 탱크(crude oil storage tank)로 이용한다는 개념이 적용된 선박형 생산설비이다. FPSO는 부유식으로서 기존의 고정형 생산 플랫폼에 비해 심해 석유 개발에 적합하며, 한 유전에서 생산을 끝낸 후 다른 유전으로의 이동이 용이하여 한계영역(marginal field) 개발에 유리하다. 따라서 매우 경제적으로 석유를 생산할 수 있는 FPSO에 대한 발주가 최근 증가하고 있는 추세이다.

FPSO에는 석유 처리(oil processing) 장비와 가스 처리(gas processing) 장비, 생산수 처리(produced water treatment) 장비, 플래어 시스템(flare system) 등의 설비가 있다. 특별히 플래어

시스템은 FPSO에서 발생하는 폐가스를 모아 소각 처리하는 주요 설비로서 배관(piping)과 서포트(support), 노즐(nozzle), 드럼(drum) 등으로 구성되어 있다. 특히 배관의 수가 많고, 직경이 다른 배관 간의 연결구조가 복잡하며, 배관을 지지하는 서포트의 타입에 따라 서포트가 받는 하중과 배관에 발생하는 응력 등이 서로 연성되어 있기 때문에 적합한 서포트 타입의 결정이 중요하다.

기존에 진행되어 온 파이프 및 배관 설계에 관한 연구를 살펴보면, 파이프와 서포트 사이에 육안으로 측정할 수 없는 부위의 크랙을 비파괴적으로 측정하기 위한 방법으로 크랙의 크기에 따라 얼마나 정확하게 측정되는가를 비교 및 검증하는 연구(Satyarnarayan, et al., 2008)가 수행되었으며, 안전성이 중요한 국제 열 핵융합 실험로(ITER) 구조에서 파이프 및 서포트 등이 지진이 발생할 때 안전하게 잘 견디는지를 평가하는 연구(Hashimoto, et al., 1998)가 수행되었다.

또한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 장애물과의 충돌 없이 최단거리의 파이프 라우팅(Pipe routing) 결과를 구하는 연구(Ito, 1999)와 선체 구조와의 연관성을 고려한 배관 모델링 방법(Roh & Lee, 2006; Roh, et al., 2006)에 대한 연구가 수행되었으며, 유전 알고리즘을 이용하여 파이프 네트워크에서 비용을 최소화하기 위한 최적의 파이프 크기를 결정하는 연구(El-Mahdy et al., 2010)와 서포트에 표준하중을 적용하고 강도를 분석 및 비교함으로써 하중 조건에 따라 유리한 서포트를 찾는 연구(Kim, 2006)가 수행되었다.

하지만 기존 연구에서는 주로 파이프에 대한 평가 및 설계, 배관 모델링에 대한 연구들이 수행되었고, 배관 서포트 설계에 관한 연구는 활발하지 못한 실정이다. 또한 배관설계를 담당하는 업체의 경우 배관공사 진행 중 문제 발생 시 경험에 의존하여 단순히 서포트의 추가 보강만이 이루어지고 있다. 이로 인해 자원의 효율적인 배분이 이루어지지 않고 배관 설치비용이 과도하게 발생한다.

따라서 본 연구에서는 배관 설계기준(Standard ASME B31.3, COMPANY general specification GS EP PVV 107 Rev 03, DNV-RP-C203, DNV CN 30.5)을 만족하면서 서포트 타입에 따른 서포트 비용을 최소화하기 위해 상용 배관 해석 프로그램인 CAESAR II를 이용하여 해석절차를 정립하고, 상용 PIDO (Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO (Process Integration, Automation and Optimization)를 이용하여 설계 자동화를 구현하였으며, 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm)을 이용한 최적설계를 수행하였다.

2. 설계 대상

2.1 해석 모델

본 논문에서는 FPSO 플레어 시스템의 배관을 설계 대상으로 하였다. 플레어 시스템의 배관 구조물은 Fig. 1에서와 같이 8in와 12in, 24in 직경의 배관과 수평 및 수직 방향으로 배열된 배관을 지지하는 서포트, 드럼의 유입구에 해당하는 노즐로 구성되어 있다.

플레어 시스템의 서포트는 배관의 배열 방향과 서포트의 지지 방향에 따라 Fig. 2에서와 같이 세 가지 타입으로 구분된다. Fig. 2(a)의 Z방향 서포트는 수평 방향으로 배열된 배관을 상하(Z) 방향으로 지지하고, Fig. 2(b)의 가이드 서포트는 수평 및 수직 방향으로 배열된 배관을 측면 방향으로 지지하며, Fig. 2(c)의 Z+가이드 서포트는 수평 방향으로 배열된 배관의 상하 및 측면 방향 모두를 지지한다. 플레어 시스템 배관에 가해지는 하중 조건은 PIPING STRESS DESIGN BASIS (Document Number : NG-USN-HT-935-434002)에서 제시하는 IN PLACE CONDITIONS, TOWING ANALYSIS, BLAST ANALYSIS가 있으며, 본 연구에서는 설계문제를 간략화하기 위해 IN PLACE CONDITIONS만 고려하였다.

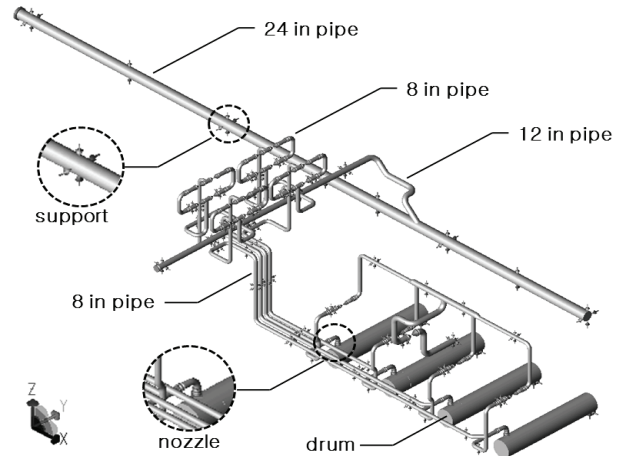
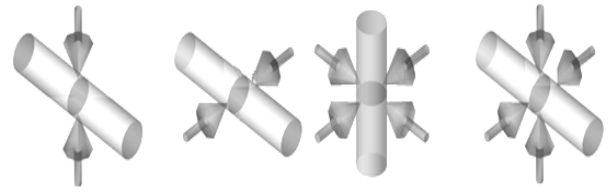


Fig. 1 Piping of a flare system in FPSO



(a) Z type (b) Guide type (c) Z+Guide type

Fig. 2 Support types

Table 1 Individual loads

Abbreviation	Load
WW	Water Filled Weight
HP	Hydrostatic Pressure
H	Spring Hanger forces
W	Weight with contents
P1	Design Pressure1
P2	Design Pressure2
T1	Operation Temperature1
T2	Operation Temperature2
T3	Operation Temperature3
T4	Operation Temperature4
T5	Operation Temperature5
U1	Acceleration in extreme condition in X direction
U2	Acceleration in extreme condition in Y direction
U3	Acceleration in extreme condition in Z direction
WIN1	Wind in extreme condition in X direction
WIN2	Wind in extreme condition in Y direction
D1	Module Deflection due to hull acceleration in X direction
D2	Module Deflection due to hull acceleration in Y direction
D3	Rack Deflection due to hull acceleration in X direction
D4	Rack Deflection due to hull acceleration in Y direction
D5	Displacements due to hull upward deflection
D6	Displacements due to hull downward deflection
F1	Discharge of PSV

플래어 시스템 배관에는 Table 1에 나열한 개별하중들이 단독으로 가해지거나 조합된 형태로 작용되며, 하중조건은 Table 2에 나열한 바와 같이 L1부터 L40까지이다. Table 2에서 OPE (operating)는 배관 시스템이 작동되고 있을 때의 기계적 하중 형태를, SUS(sustained)는 배관 시스템이 작동되지 않고 있을 때의 압력과 자중, 기타 지속되는 기계적 하중형태를, OCC (occasional)는 압력과 무게, 기타 지속하중 및 지진을 포함하는 일시적인 하중조건을, EXP(expansion)는 순수 열로 인한 배관의 팽창 및 수축으로 인한 하중형태를 의미한다.

Table 2 Loading conditions

No.	Loading condition	Type
L1	WW + HP + H	HYD
L2	W + T1 + P1 + H	OPE
L3	W + T2 + P1 + H	OPE
L4	W + T3 + P2 + H	OPE
L5	W + T4 + P1 + H	OPE
L6	W + T5 + P1 + H	OPE
L7	W + P1 + H	SUS
L8	W + P2 + H	SUS
L9	U1	SUS
L10	U2	SUS
L11	U3	SUS
L12	WIN1	SUS
L13	WIN2	SUS
L14	F1	OCC
L15	D1	EXP
L16	D2	EXP
L17	D3	EXP
L18	D4	EXP
L19	D5	EXP
L20	D6	EXP
L21	L9 + L10 + L11	SUS
L22	L2 - L7	EXP
L23	L3 - L7	EXP
L24	L4 - L8	EXP
L25	L15 + L16	EXP
L26	L17 + L18	EXP
L27	L25, L26	EXP
L28	L19 + L20 + L22 + L23 + 2L27	EXP
L29	L12, L13, L14	OCC
L30	L7 + L21 + L29	OCC
L31	L2, L3, L4, L5, L6	OPE
L32	L20 + L21 + L27 + L31	OPE
L33	L20 + L21 - L27 + L31	OPE
L34	L20 - L21 + L27 + L31	OPE
L35	L20 - L21 - L27 + L31	OPE
L36	L32, L33, L34, L35	OPE
L37	L26 + L29	OPE
L38	0,73L19 + L20 + 2L21 + L24 + 2L27	FAT
L39	0,47L19 + 0,81L20 + 0,15L21 + L24 + 0,15L27	FAT
L40	0,73L19 + L20 + 2L21 + L24 + 2L27	FAT

2.2 초기 설계의 해석 결과

플래어 시스템 배관 초기모델이 설계기준을 만족하는지를 판단하기 위해 배관 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서는 효율적인 결과 판단을 위해 L1부터 L40까지의 하중조건 중 서포트 하중과 노즐 하중 그리고 배관 응력비에 가장 많은 영향을 미치는 7가지 하중조건을 적용한 해석 결과를 사용하였다. 마찬가지로 이후 수행할 최적설계에서도 효율적인 설계 결과 도출을 위해 이들 7가지의 하중조건들을 적용한다. 그리고 도출된 최적 해에 나머지 하중조건들을 적용하여 구속조건 만족 여부를 확인한다. 7가지 하중조건은 Table 3에 나열한 바와 같이 서포트 하중의 경우에는 L37, 노즐 하중의 경우에는 L36, 그리고 배관 응력비의 경우에는 L1, L10, L21, L28, L30을 적용하였다. 그 결과, 하중조건 L28의 배관 응력비에서 초기 모델에 대한 해석결과가 최대 허용값보다 큰 것을 알 수 있다. 실제로 본 초기 모델은 배관 설계 엔지니어의 경험에 의해 설계된 결과로, 하중조건 L28에서의 기준 위배를 해결하기 위하여 특정부위에 특수 제작한 서포트를 추가 보강함으로써 문제를 해결하였다. 하지만 이러한 방식으로는 개선된 결과의 강건성과 설계과정의 효율성을 보장할 수 없으며, 또한 서포트 비용의 증가를 초래한다.

3. 최적설계 정식화

3.1 설계요구사항

본 설계문제의 설계요구사항은 다음과 같다.

- 1) 배관 지지에 사용되는 서포트 비용을 최소화하여야 한다.
- 2) 하중조건 L37에 의한 서포트 하중은 허용값 보다 작아야 한다.
- 3) 하중조건 L36에 의한 노즐 하중은 허용값 보다 작아야 한다.
- 4) 하중조건 L1과 L10, L21, L28, L30에 의한 배관 응력비는 허용값 보다 작아야 한다.

Table 3 Analysis results of an initial design

Loadcase	Response	Initial			
		Initial	Maximum allowable		
L37	Support load	8 in	6878	8800	
		12 in	7173	15400	
		24 in	9152	19800	
L36	Nozzle load	Fx	320	8800	
		Fy	861	11900	
		Fz	1033	11900	
		Mx	1455	6237	
		My	3286	4795	
		Mz	1548	7198	
L1	Pipe stress ratio	-	41	100	
L10		-	77	100	
L21		-	77	100	
L28		$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{allow}} \times 100\right)$	-	124	100
L30		-	75	100	

3.2 설계변수

플래어 시스템의 배관을 지지하는 서포트의 개수는 모두 76개이다. 하지만 배관의 상승을 방지하기 위해 반드시 가이드 타입이어야 하는 8개의 서포트와 드럼 및 노즐의 안정성을 위해 필요한 12개의 서포트, 배관의 끝 부분에 해당하는 3개의 서포트, 12in 배관과 24in 배관의 연결부에 해당하는 1개의 서포트를 제외한 52개의 서포트만을 설계변수 고려 대상으로 선정하였다.

하지만 52개의 개별 서포트를 설계변수로 모두 선정할 경우 반복과정이 필요한 최적설계에 효율성 문제가 발생할 수 있으므로 52개의 서포트를 해당 위치와 특성에 따라 35개로 그룹화하였다. 즉, 첫 번째 그룹부터 다섯 번째 그룹까지는 4개씩의 서포트가 그룹화 되었고, 여섯 번째 그룹은 3개의 서포트가 포함되며, 나머지 그룹들은 한 개씩의 서포트만을 가진다. 따라서 본 논문에서는 모두 35개의 설계변수를 선정하였으며, 각 설계변수의 수준수는 2수준으로서 Z방향 타입과 Z+가이드 타입이다.

3.3 서포트 비용 정량화

본 논문에서는 배관의 직경과 서포트 타입을 고려하여 서포트 비용을 Table 4와 같이 정량화 하였으며, 정량화된 서포트 비용은 설계변수 변경에 따른 목적함수 계산에 사용된다.

Table 4 Determination of support cost according to the pipe sizes and support types

Pipe size	Z type	Z+Guide type
8in	2	4
12in	3	6
24in	6	12

3.4 설계문제 정식화

설계변수는 52개의 서포트를 35개로 그룹화한 것이며, 목적함수는 52개의 서포트 비용을 합한 것이다. 특히 구속조건인 경우 Table 3에서 선정한 7개의 하중조건이 해당 서포트와 노즐, 배관에 각각 부여될 때 발생하는 모든 하중과 응력비를 계산하여야 하므로 많은 수의 구속조건을 고려하여야 한다. 하지만 하중과 응력비를 정규화하여 그 중 위배량이 최대인 것만을 고려하면 설계문제를 간략화 할 수 있다. 정식화된 설계문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && x_n, n = 1, 2, 3, \dots, 35 \\
 & \text{to minimize} && \sum_{i=1}^{52} C_i \\
 & \text{subject to} && \max[\max[S], \max[L], \max[R]] \leq 0
 \end{aligned}$$

여기서, n 은 설계변수 개수, C_i 는 i 번째 서포트의 비용, S 는 정규화 된 서포트 하중, L 은 정규화 된 노즐 하중, R 은 정규화 된 응력비를 나타낸다.

4. 최적설계 및 결과

4.1 최적화 기법

CAESAR II의 응력 해석 절차 및 설계 자동화를 기반으로, 이산 형태의 설계변수를 다루기 위해 PAnO에서 제공하는 진화 알고리즘(Thomas, 1996)을 사용하였다. 진화 알고리즘은 염색체의 진화과정을 모방한 방법으로 국부해가 많은 모델에서 전역해를 찾을 수 있는 특징을 가지고 있다.

4.2 최적설계 결과

진화 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행한 결과, Fig. 3과 같이 초기 모델에서는 주어진 구속조건을 만족하면서 목적함수인 서포트 비용이 136에서 99로 27.2% 감소하는 최적설계 결과를 얻었다. 이에 따른 설계변수의 변화를 설계변수 수준으로 Table 5에 나타내었다. 여기서 -1과 1은 각각 Z방향 타입과 Z+가이드 타입의 서포트를 의미한다.

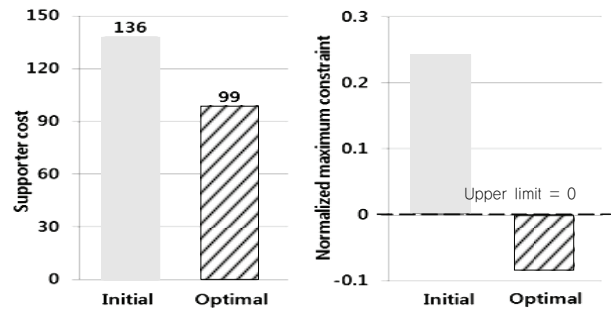


Fig. 3 Optimization results

Table 5 Comparison of initial and optimal design variable values

No.	Initial	Optimal	No.	Initial	Optimal
X1	1	-1	X19	1	-1
X2	-1	-1	X20	-1	-1
X3	-1	-1	X21	-1	-1
X4	1	-1	X22	1	-1
X5	1	-1	X23	-1	1
X6	-1	-1	X24	-1	-1
X7	1	-1	X25	-1	-1
X8	-1	-1	X26	1	-1
X9	-1	-1	X27	-1	-1
X10	1	-1	X28	1	-1
X11	-1	-1	X29	-1	-1
X12	-1	-1	X30	-1	-1
X13	1	-1	X31	1	-1
X14	1	-1	X32	-1	1
X15	-1	-1	X33	1	-1
X16	-1	-1	X34	1	-1
X17	1	-1	X35	1	-1
X18	-1	-1	.	.	.

5. 결론

서포트 비용 최소화를 위한 최적설계의 결론은 다음과 같다.

- (1) 서포트 비용 최소화를 위한 설계문제를 정식화 하였다.
- (2) 배관 응력해석 프로그램인 CAESAR II의 해석절차를 정립하였으며, 상용 PIDO 툴인 PIAo를 이용하여 설계 자동화를 구현하였다.
- (3) 진화 알고리즘을 이용한 최적설계 결과, 주어진 구속조건을 만족하면서 서포트의 비용을 27.2% 감소시키는 최적의 서포트 타입을 도출하여 본 논문에서 제안한 설계방법의 유효성을 보였다.

후 기

본 연구는 2011년도 2단계 두뇌한국21사업 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0016701)에 의해 지원되었으며, 이 연구를 위하여 상용 PIDO 툴인 PIAo 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Kim, M.H., 2006. *Optimum Design of Piping Support Members in FPSO Topside Modules*, a thesis for a master's degree, University of Ulsan.

Roh, M.I. & Lee, K.Y., 2006. Generation of the Production Material Information of a Building Block and the Simulation of the Block Erection Based on the Initial Hull Structural Model, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.103-118.

Roh, M.I. Choi, W.Y. & Lee, K. Y., 2006. Rapid Pipe Modeling Method Considering the Relationship with a Hull Structure, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(2), pp.258-267.

American Society of Mechanical Engineers, Process piping, *ASME Code for Pressure Piping*, B31.3.

COMPANY general specification, *GS EP PVV 107 Rev 03*.

Environmental Conditions and Environmental Loads, *DNV-RP-C203*.

El-Mahdy, O.F.M. Ahmed, M.E.H. Metwalli, S., 2010. Computer aides optimization of natural gas pipe networks using genetic algorithm, *Applied Soft Computing*, 10, pp.1141-1150.

Fatigue Design of Offshore Steel Structure, *DNV CN 30.5*.

Ito, T., 1999. A Genetic Algorithm Approach Piping Route Path Planning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(1), pp.103-114.

Hashimoto, M., et al., 1998. Pipe support cross isolated and seismic structure in ITER, *Fusion Engineering and Design*, 41, pp.407-414.

PIAo(Process Integration, Automation and Optimization), *User's manual*, Version 3.2, Framax Inc., 2010.

PIPING STRESS DESIGN BASIS, Document Number: *NG-USN-HT-935-434002*, 2008.

Satyarnarayan, L. Chandrasekaran, J. Maxfield, B. Balasubramaniam, K., 2008. Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions, *NDT & E International*, 41, pp.32-43.

Thomas, B., 1996. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice, *Oxford University Press*.

