

배관 지지 조건에 따른 U-bolt 구조의 응력 해석

김상일^{†*}, 강종규^{*}

대우조선해양(주) 선박해양구조연구팀^{*}

Stress Analysis for U-bolt Astructure by Pipe Supporting Condition

Sang-Il Kim^{*} and Joong-Kyoo Kang^{*}

Ship & Marine Structure R&D Team, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.^{*}

Abstract

With the trend of large-sized ship in Korea, recently several hundreds of thousands of U-bolts for a year have been used as a pipe fastener. In this paper, we have evaluated the strength for present U-bolt structure by pipe supporting conditions(deck, ceiling and wall mounting type). For this purpose, the equivalent and bending stresses have been calculated by linear elastic analysis using the finite element program ABAQUS. At the same time, a variety of load conditions such as design pressure, weight effect and acceleration are also considered.

※Keywords: 응력해석(Stress analysis), U-bolt 구조(U-bolt structure), 배관 지지 조건(Pipe supporting condition), 등가응력(Equivalent stress), 굽힘응력(Bending stress)

1. 서론

현재 당사의 배관 설계 기준을 살펴 보면, pipe support의 형상(deck, ceiling and wall mounting type)에 관계없이 적용 가능한 파이프 직경의 범위를 350mm 이하로 하고 있는데(Photo. 1 참조), 최근에 선주/선급 측에서 pipe support의 부착 위치와 무관하게 350A를 적용하는 경우에 U-bolt 체결 부위의 구조 안전성에 문제가 발생할 수 있

다는 우려를 표명하였다.

따라서 본 연구에서는 향후 대 선주/선급의 신뢰도 향상을 위해 350A와 400A pipe를 해석 모델로 선정하여, 배관 지지 조건에 따른 U-bolt 구조의 강도를 평가하였고, 이를 통해서 당사의 배관 설계기준에 대한 타당성을 확인하고자 하였다.

2. 구조해석

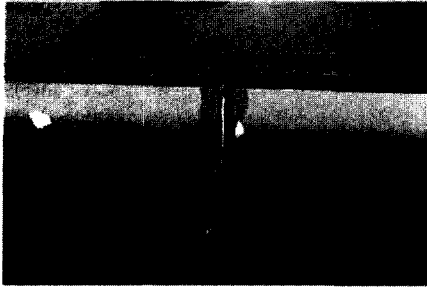
2.1 유한요소 모델링

본 해석에서 이용된 material property의 입력 값은 Table 1에 보여진 바와 같다(탄성계수 21000 kgf/mm², 포아송의 비 0.3).

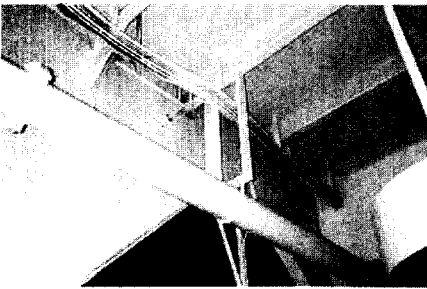
접수일: 2003년 2월 19일, 승인일: 2003년 3월 27일

† 주저자, E-mail : sikim703088@yahoo.co.kr

Tel: 011-594-2756



(a) deck mounting type



(b) ceiling mounting type



(c) wall mounting type

Photo. 1 Shape of pipe supports

Table 1 Mechanical properties of material

Mechanical Properties		Yield Strength (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)
Material Quality			
Pipe	STPY400 (#40 & #80)	23	41
	STPG370 (#160)	22	38
Support	SS400	25	41
U-bolt	SS400	25	41

Table 2 Load conditions

Design Pressure	0.15 kgf/mm ²
Weight Effect	Pipe, Support, U-bolt, Fluid
Acceleration	① ship : VLCC(L×B×T=320×58×20.8m, V=16.2 knots)
	② (a _x) _{max} =3690 mm/sec ² (DNV Rule) : CL → Port
	③ (a _y) _{max} =6095 mm/sec ² (ABS Rule 기준) : BL → Deck
	④ (a _z) _{max} =1490 mm/sec ² (DNV Rule 기준) : AP → FP

하중조건으로는 Table 2에 열거된 바와 같이 내부 유체의 압력, 각 부분의 무게와 운항 중 발생하는 각 방향으로의 가속도를 모두 고려하였다 (ANSI/ASME 1998). 여기서 가속도는 각 선급의 rule(DnV 1998, ABS 1996)을 바탕으로 10⁻⁶의 확률 수준(운항 중 20년 동안 1번 일어날 확률)에서 계산된 값이며, 각 방향으로 발생하는 가속도의 최대값은 각각 독립적으로 일어날 때의 상황으로 세 방향의 최대값이 동시에 발생하지는 않으며, 이에 따라 각 방향의 가속도를 모두 고려하여 해석할 때는 과도한 하중이 기대된다.

경계조건으로는 pipe 시/종단부와 support 하부에 있는 모든 절점들에 구속경계조건을 부여하였고, pipe는 U-bolt/support와 상하로 접촉되어 접촉력에 의해 하중이 전달되므로 이들 사이에는 접촉조건을 부과하였다.

Table 3은 해석 모델의 차원 및 배관 지지 조건을 보여 주고 있으며, Fig. 1는 대상 모델 중에서 350A pipe를 갖는 모델의 유한요소모델을 보여 주고 있다.

2.2 해석 결과

본 절에서는 Table 3에 있는 Model-D2와 Model-W2의 강도 해석 결과를 응력 집중부에서 발생하는 등가응력 및 굽힘응력 분포의 전형적인 예로 제시하고자 하였다.

Table 3 Dimension of analysis models and pipe supporting conditions

Model	Pipe			Support				U-bolt	Supporting Condition
	Normal Diameter (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Height (mm)	Breadth (mm)	Angle Size (mm)	Space (mm)	Diameter (mm)	
D1	350	20000	9.5(#40)	500	550	100×100×10	5000	21.9 (M24)	Deck Mounting Type
D2			12.7(#80)						
D3			35.7(#160)						
D4	400	22000	12.7(#80)	500	550	100×100×10	5500	21.9 (M24)	
C1	350	20000	9.5	500	550	100×100×10	5000	21.9	Ceiling Mounting Type
C2			12.7						
C3			35.7						
C4	400	22000	12.7	500	550	100×100×10	5500	21.9	
W1	350	20000	9.5	500	550	100×100×10	5000	21.9	Wall Mounting Type
W2			12.7						
W3			35.7						
W4	400	22000	12.7	500	550	100×100×10	5500	21.9	

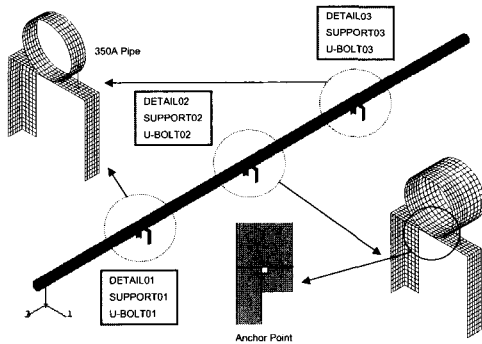


Fig. 1 Finite element model

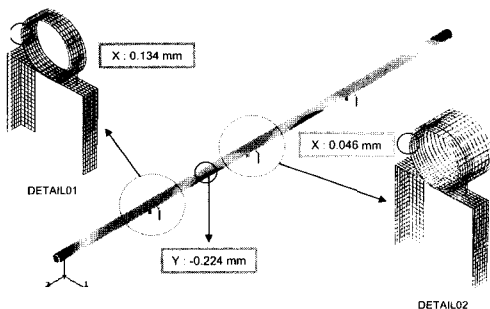
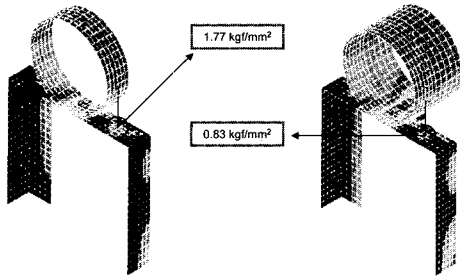


Fig. 2 Deformed shape for Model-D2

Fig. 2는 내부 유체의 압력, 각 부분의 무게와 운항 중 발생하는 각 방향으로의 가속도가 동시에 작용하는 조건 하에서의 Model-D2의 3차원 변형 형상을 보여 주고 있는데, y-방향으로의 최대 변위는 -0.224mm로 나타났으며, DETAIL부에서 발생하는 x-방향으로의 최대 변위는 각각 0.134mm, 0.046mm이다.

Fig. 3, 4와 5는 Model-D2의 DETAIL부에서의 등가응력 분포와 U-BOLT부에서의 굽힘응력 분포를 보여 주고 있으며, Table 4는 Model-D series의 응력 집중부에서 발생하는 최대 등가응력 및 굽힘응력의 크기를 보여 주고 있는데, deck mounting type의 배관 지지 조건에서는 pipe와 support의 접촉 지점에서 비교적 큰 응력이 발생되며, Model-D4(#80 400A pipe)의 U-bolt에서는 2.83kgf/mm²의 굽힘응력이 유발되지만, 그 응력 수준은 재료의 항복응력의 1/8 정도에도 못미치는 수준이므로 U-bolt 체결 부위의 구조 안전성에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Model-W2의 3차원 변형 형상을 보여 주고 있는데, x-방향으로의 최대 변위는 1.090mm로 나타났으며, DETAIL부에서 발생하는 x-방향으로의 최대 변위는 각각 0.979mm,



(a) DETAIL01 (b) DETAIL02
 Fig. 3 Distribution of equivalent stress for Model-D2

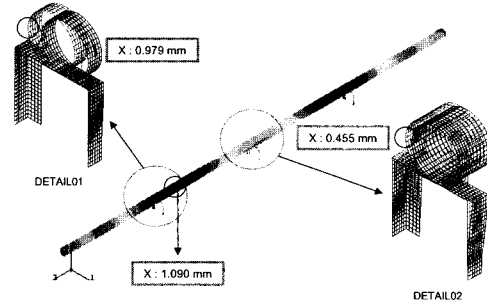
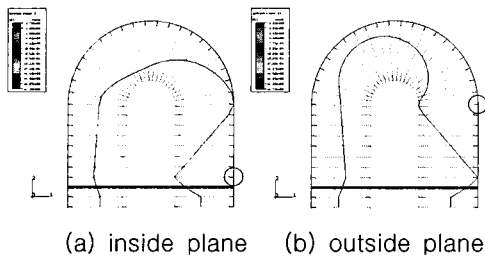
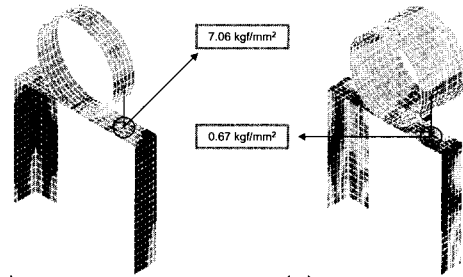


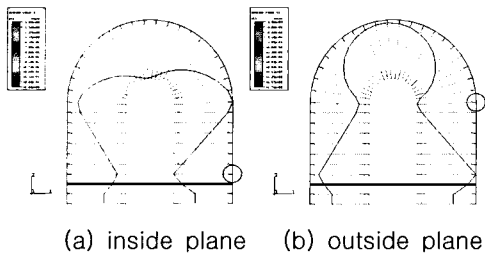
Fig. 6 Deformed shape for Model-W2



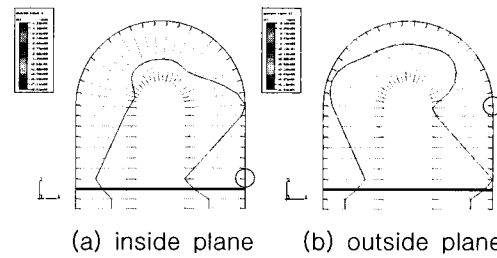
(a) inside plane (b) outside plane
 Fig. 4 Distribution of bending stress for Model-D2 : U-BOLT01



(a) DETAIL01 (b) DETAIL02
 Fig. 7 Distribution of equivalent stress for Model-W2



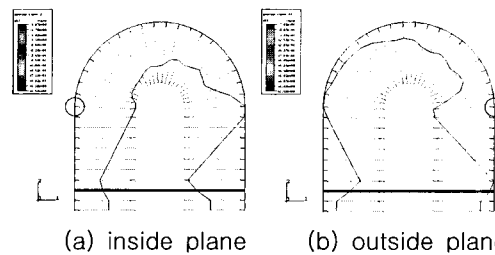
(a) inside plane (b) outside plane
 Fig. 5 Distribution of bending stress for Model-D2 : U-BOLT02



(a) inside plane (b) outside plane
 Fig. 8 Distribution of bending stress for Model-W2 : U-BOLT01

Table 4 Maximum equivalent and bending stresses for Model-D series

Model	Maximum von-Mises Stress (kgf/mm ²)		Maximum Bending Stress (kgf/mm ²)			
	SUPPORT01	SUPPORT02	U-BOLT01		U-BOLT02	
			Inner Plane	Outer Plane	Inner Plane	Outer Plane
D1	1.83	0.98	2.29	3.07	1.19	2.30
D2	1.77	0.83	2.26	2.73	1.06	1.79
D3	2.02	0.73	2.71	2.29	1.17	0.97
D4	2.19	1.43	2.44	2.83	1.23	2.02



(a) inside plane (b) outside plane
 Fig. 9 Distribution of bending stress for Model-W2 : U-BOLT02

0.455mm이다.

Fig. 7, 8과 9는 Model-W2의 DETAIL부에서의 등가응력 분포와 U-BOLT부에서의 굽힘응력 분포를 보여 주고 있으며, Table 5는 Model-W series의 응력 집중부에서 발생하는 최대 등가응력 및 굽힘응력의 크기를 보여 주고 있는데, wall mounting type의 배관 지지 조건에서는 support와 U-bolt의 체결 부위에서 비교적 큰 응력이 발생되지만, 구조 보강을 한 anchor point에서는 상대적으로 작은 응력이 유발된다는 사실을 알 수 있다. 또한 Model-W4(#80 400A pipe)의 U-bolt에서는 14.91kgf/mm²의 상당히 큰 굽힘응력이 유발되지만, 재료의 항복강도가 최소 25 kgf/mm² 이상이므로 항복까지는 아직 여유가 있다고 볼 수 있다.

2.3 해석 모델의 안전 계수

Table 6은 해석 모델의 U-bolt부에서 발생하는 최대 굽힘응력을 재료의 허용응력으로 가정하여 계산한 안전계수(safety factor)의 값을 보여 주고 있는데, wall mounting type의 배관 지지 조건에서는 OCIMF에서의 안전계수(의장품 기준)보다 작은 값이 나타난다는 사실을 알 수 있다. 하지만, #160번이 거의 사용되지 않는 pipe라는 사실을 감안할 때, pipe support의 형상에 관계없이 적용 가능한 파이프 직경의 범위를 350mm 이하로 하더라도 U-bolt 자체의 구조 안전성에는 아무런 문제가 없을 것으로 사료된다.

Table 5 Maximum equivalent and bending stresses for Model-W series

Model	Maximum von-Mises Stress(kgf/mm ²)		Maximum Bending Stress(kgf/mm ²)			
	SUPPORT01	SUPPORT02	U-BOLT01		U-BOLT02	
			Inner Plane	Outer Plane	Inner Plane	Outer Plane
W1	6.33	0.83	8.03	12.32	0.90	2.44
W2	7.06	0.67	8.92	14.17	1.53	2.59
W3	10.58	0.46	13.29	21.83	2.58	3.49
W4	10.60	3.54	9.69	14.91	1.46	2.54

Table 6 Safety factors of analysis models

Model	Safety Factor of U-bolt			Safety Factor of Fitting
	Yield Stress (kgf/mm ²)	Calculated Equivalent Stress (kgf/mm ²)	Calculated Safety Factor	OCIMF : Mooring Equipment Guide Line
D1	25	3.07	8.1	1.5
D2	25	2.73	9.2	
D3	25	2.71	9.2	
D4	25	2.83	8.8	
C1	25	3.98	6.3	
C2	25	4.57	5.5	
C3	25	7.95	3.1	
C4	25	5.06	4.9	
W1	25	12.32	2.0	
W2	25	14.17	1.8	
W3	25	21.83	1.1	
W4	25	14.91	1.7	

3. 결 론

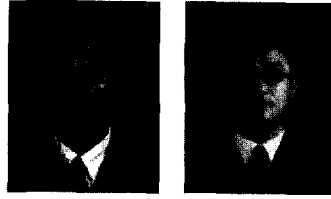
배관 지지 조건에 따른 U-bolt 구조의 강도를 평가한 결과, 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

1. Deck와 ceiling mounting type의 배관지지 조건에서는 U-bolt 체결 부위의 구조 안전성에 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.
2. Wall mounting type의 배관 지지 조건에서는 support와 U-bolt의 체결 부위에서 비교적 큰 응력이 발생되지만, 구조 보강을 한 anchor point에서는 상대적으로 작은 응력이 유발된다는 사실을 알 수 있다. 또한 Model-W4(#80 400A pipe)의 U-bolt에서는 14.91kgf/mm²의 상당히 큰 굽힘응력이 발생되지만, 재료의 항복강도가 최소 25 kgf/mm² 이상이므로 항복까지는 아직 여유가 있다고 볼 수 있다.
3. 결론적으로 말하면, pipe support의 형상에 관계없이 적용 가능한 파이프 직경의 범위를 350mm 이하로 하더라도 U-bolt 체결 부위의 구조 안전성에는 아무런 문제가 없음을

알 수 있다. 이는 당사의 배관 설계 기준이 매우 타당하다는 사실을 보여 주는 증거이며, 향후 대 선주/선급의 신뢰도를 더욱 더 향상시킬 수 있는 계기가 될 것이다.

참 고 문 헌

- ANSI/ASME, 1998, B31.3 Code
- Det Norske Veritas, 1998, Rule Book
- American Bureau of Shipping, 1996, Rule Book



< 김 상 일 >

< 강 중 규 >