



플랜트 배관계에서 배관지지대 설계 기법에 관한 연구

†정철섭

건양대학교 기계공학과

(2014년 10월 13일 접수, 2014년 11월 24일 수정, 2014년 12월 23일 채택)

A Study on Piping Support Design Process in Plant Piping System

†Chulsup Chung

Dept. of Mechanical Engineering, Konyang University, Chungnam, 320-711, Korea

(Received October 13, 2014; Revised December 24, 2014; Accepted December 23, 2014)

요 약

본 연구에서 배관계의 구조 건전성을 보장할 수 있는 배관 지지대 설계 절차를 ASME 코드에 따라 수행하였다. 본 설계 절차는 단순화된 설계식 및 여러 하중에 대한 보수적인 허용 값을 제공한다. 배관 스트랩 지지대를 구성하는 바닥판, 바닥 지지판 및 앵커 볼트에 대한 응력해석을 수행하여 ASME 코드 상호작용 설계식을 사용하여 구조 건전성을 평가하였다. 여러 하중에 대한 하중 및 하중 조합에 대한 응력 수준이 허용 값 이내에 분포하므로 구조적 건전성을 유지한다고 평가할 수 있다.

Abstract - In this study, the stress analysis for the piping support design is performed as per the rules of the ASME Code, Section III, subsection NF- Component Support which provides a simplified method of design analysis for piping support. This method makes use of simple equations and conservative allowable stress limits for design and service loadings. For the base plate, code equation is satisfied within the allowable limits. Both anchor bolts and pipe strap are governed by their interaction equations. The stresses resulting from various loadings and their combinations are within the allowable limits specified in the above mentioned ASME Code. Thus, it was proved that the structural integrity of the pump assembly was satisfactory.

Key words : Piping Support, Stress Analysis, Interaction Equation, ASME Code

1. 서 론

발전 플랜트는 사용 연료에 따라 원자력 발전 플랜트, 화력 발전 플랜트 및 재생 에너지 발전 플랜트로 분류되는 대표적인 사회간접자본으로서 기술 집약형의 고부가가치 산업이다[1]. 현재 국내 발전 플랜트는 지속적인 발전을 이뤄 왔으며 플랜트의 안전성에 대한 국민적 관심도 비례적으로 증대하고 있다. 발전 플랜트에서는 모든 기기와의 연결이 배관

으로 거미줄처럼 이루어져 있어서, 만일 고압력, 고에너지 상태의 동작 유체를 포함하고 있는 압력유지 (pressure-retaining) 배관이 운전 조건하에서 높은 응력을 받아 구조 건전성을 상실하는 경우 플랜트의 안전성에 악영향을 주게 된다. 따라서 배관 지지대를 설치하여 과도한 배관의 변형을 방지하여 의도한 대로 배관의 기능을 발휘하게 하며, 사고 시에도 피해를 최소화시키는 노력을 기울이고 있다. 이와 같이 배관 지지대는 압력 유지 기기 (pressure-retaining component)를 제 위치에 고정시키므로 발전 플랜트의 안전에 필수적이다. 플랜트 운전 중 과도한 기기의 운동을 억제함으로써 이들 기기가 의도한 기

†Corresponding author: cschung@konyang.ac.kr
Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

능을 발휘할 수 있게 하고 또는 사고 중 시스템 손상을 완화시켜준다.

본 연구에서는 수직방향의 변위를 구속하는 스트랩(Strap) 배관 지지대를 설계하기 위해 여러 가지 경우의 하중에 대한 응력 해석을 수행하고, 각 하중 조건에 대한 응력을 조합하여 배관 지지대 전용 코드인 ASME Code, Section III, Subsection NF- Component Support[1]의 응력 요건을 적용하였다. 배관 해석에서 제공된 설계조건에 따라 지진하중을 고려한 하중조건을 적용하였다.

II. 배관지지대 응력해석

2.1. 배관 스트랩 해석모델

본 연구에서 응력해석을 수행할 스트랩(Strap) 배관 지지대의 배치는 Fig. 1과 같으며, 배관 지지대의 각 구성품은 Fig. 2와 같다. 일반적으로 배관 지지대는 건물 벽 또는 H-빔과 같은 구조 프레임에 설치되며, 본 해석에 사용되는 스트랩 배관 지지대는 배관이 놓이는 바닥판(plate:①)에 배관의 수직 변위를 구속하는 스트랩(Strap:④)이 용접되어있으며, 앵커볼트(③)에 의해 건물 내벽에 고정된 바닥 지지판(baseplate:②)에 바닥판(plate:①)이 용접된다. 바닥 지지판의 치수 및 앵커 볼트의 위치는 Fig. 3과 같다.

배관 지지대를 구성하는 플레이트의 재질은 SA36이며, 사용된 배관 스트랩은 그린벨사의 FIG. CL143N

PIPE STRAP이며 재질은 SA36이다. SA36의 재료상수는 Table 1과 같다.

2.2. 경계조건 및 하중조건

배관을 지지하는 바닥판이 바닥 지지판에 용접되고 바닥 지지판은 앵커 볼트로 내벽에 고정되어 있으므로 프레임 유한요소 모델에서 바닥 지지판의 위치에 완전 구속조건을 적용한다. 배관응력 해석으로부터 배관 지지 접에 정상상태(Normal Condition)의

Table 1. The Properties of SA36 Materials

Modulus of Elasticity(E) [psi]	Yield stress (S _y) [psi]	Poisson's ratio
2.9×10 ⁷	36,000	0.32

Table 2. Load Conditions

Load Conditions	F _x [lb]	F _y [lb]	F _z [lb]
1	1069	-3562	1069
2	1069	-3562	-1069
3	57	190	57
4	57	190	-57

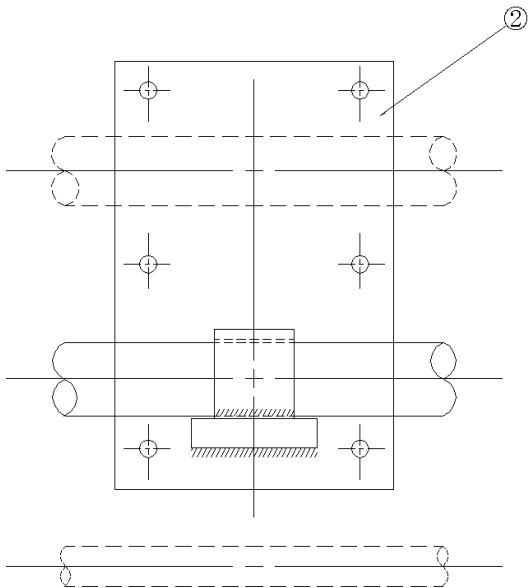


Fig. 1. The Layout for Piping Support.

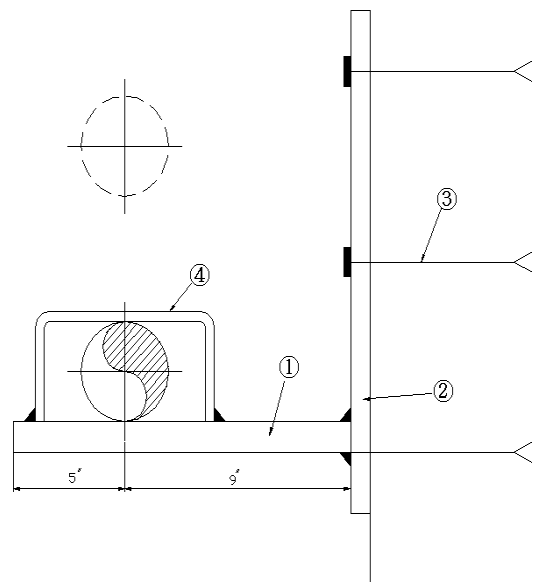


Fig. 2. Piping Support Components.

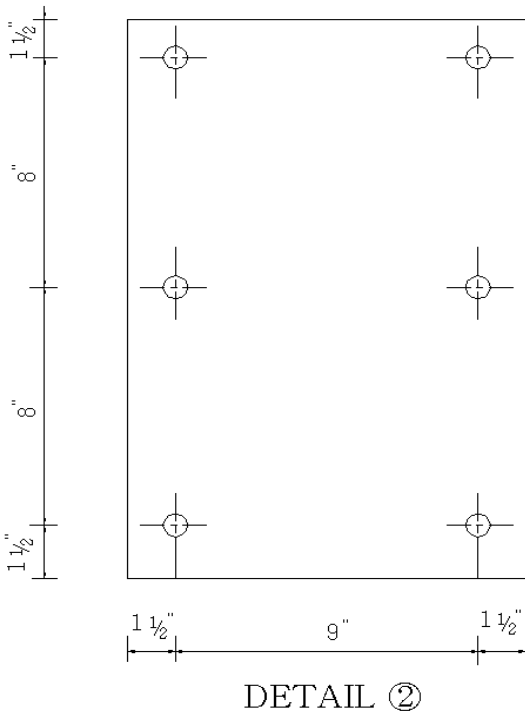


Fig. 3. Detail of Baseplate.

하중이 수직방향으로 3372 lb, 비정상 상태(Upset Condition)인 지진하중이 상하방향으로 190 lb가 제공된다. 또한 수평(길이)방향으로 마찰에 의한 마찰력이 발생한다고 가정하며 마찰계수는 0.3을 적용한다.

Table 2에서 하중조건 1,2는 정상상태 하중과 비정상상태 하중이 조합된 경우이고, 하중조건 3,4는 비정상 상태 하중만을 고려한 경우이다. Table 2에서 Y는 수직방향이며, X, Z는 수평방향이다.

2.3. 배관 지지대 응력해석

배관 지지대는 배관계와 건물 구조물 사이에 하중을 전달해주는 기능을 갖고 있는 구조물이며, 1급, 2급 및 3급 기기에 부착된 지지대에 대한 재료, 제작, 검사, 시험 및 보고서 작성에 대하여 적용되는 ASME Code, Subsection NF 규정이 배관 지지대 응력해석 평가에 사용된다. 배관 지지대를 구성하는 바닥판을 1차원 비임(Beam)으로 Fig. 4과 같이 모델링 하여 배관 지지 점에 Table 2의 하중조건들을 적용하여 경계점에서의 지점 반력(내부하중 및 모멘트)을 구한다. 바닥 지지판은 Fig. 5와 같이 2차원 구조 고체 요소로 모델링 하였다. 앵커 볼트가 체결될 위치에 완전 구속조건을 적용하였고 지지판이 용접



Fig. 4. The Finite Element Model for Plate.

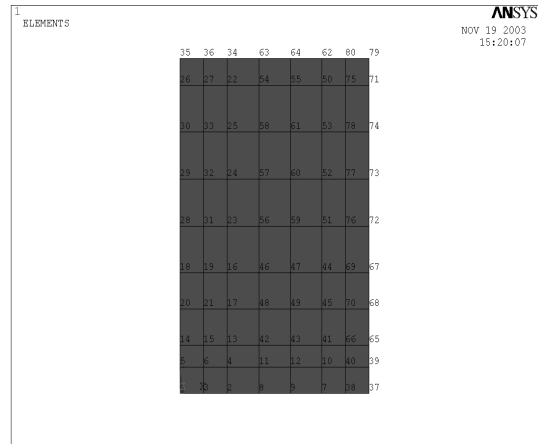


Fig. 5. The FE Model for Base Plate.

Table 3. Reaction Load for Restraint of Frame Model

Reaction Force	Load Condition 1	Load Condition 2	Load Condition 3	Load Condition 4
F _x [lb]	-1070	-1070	-57	-57
F _y [lb]	3600	3600	-150	-150
F _z [lb]	-1070	1070	-57	57
M _y [in-lb]	32300	32300	-1690	-1120
M _x [in-lb]	9630	9630	513	513
M _z [in-lb]	0	0	285	285

Table 4. Reaction Load for Anchor Bolt

Anchor Bolt No.	Load Condition	Shear Force [lb]	Tensile Force [lb]
1	1	612.7	846.0
	2	612.7	1060
	3	29.35	110
	4	29.35	91.3
2	1	536.45	1480
	2	536.4	1720
	3	28.26	3.07
	4	28.26	0
3	1	506.06	113.0
	2	506.06	129.00
	3	27.43	1.06
	4	27.43	0
4	1	775.34	1230.0
	2	775.34	1440.0
	3	26.46	158
	4	26.46	144
5	1	716.61	1740
	2	716.61	1980
	3	25.24	0
	4	25.24	0
6	1	694.15	133.0
	2	694.15	149.0
	3	24.31	0.86
	4	24.31	1.02

될 위치에 지점 반력을 하중조건으로 적용하여 앵커 볼트에 작용하는 지점 반력을 구한다. 유한요소 전산코드(ANSYS)[3,5]를 사용하여 얻은 바닥판 프레임 모델의 경계점 위치 및 바닥 지지판 모델의 앵커 볼트 위치에서의 지점 반력은 각각 Table 3, 4와 같으며, 이들 지점 반력을 적용하여 바닥판 부재 및 바닥 지지판을 체결하는 앵커 볼트와 배관 스트랩에 대한 건전성 평가를 수행한다.

III. 배관지지대 건전성 평가

본 연구의 배관 지지대는 선형 형태 지지대(Linear Type Support)에 속하므로 선형 탄성해석에 의한 설계 기준인 ASME Code Sec. III Subsection NF-3300 요건이 건전성 평가기준으로 적용된다. 평가 기준은 배관 지지대 구성 재료의 항복응력을 근거로 하여 이루어진다. 선형 형태 지지대에서 사용되는 파괴 이론은 최대응력설이며 최대 주응력이 지배 응력(controlling stress)이 된다.

3.1. 바닥판 부재의 건전성 평가

(1) 허용응력계산

(가) 축방향 압축력이 작용하는 경우[4],[6]

직접 허용 압축응력(F_a) 과 좌굴 허용 압축응력 (F_{buck})a중 작은 값을 택한다.

$F_a = 18350 \times 1.0 = 18350$ psi 이며

$KL/r = 50 < C_c$ 이므로

$$(F_{buck})a = \frac{2}{3} S_Y \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] = 22113 \text{ psi 이다. 그}$$

러므로 허용응력은 $F_{all} = 18350$ psi 이다.

$C_c = \text{탄성/소성 좌굴을 구분하는 임계 세장비}$

$$= \sqrt{2\pi^2 E / S_Y} = 126.1$$

$KL = \text{경계조건을 고려한 유효길이} = 2L$

$r = \text{최대 회전반경}$

(나) 굽힘 응력이 작용하는 경우

- 장축(Z- axis) 방향

$d/b < 10$ 이고

$Lu = 2,500,000 b / S_Y > L$ 이면

F_{bz} (허용 굽힘 응력) = $0.60 S_Y = 21600$ psi

- 단축(Y- axis) 방향

F_{by} (허용 굽힘 응력) = $0.75 S_Y = 27000$ psi

$d = \text{단면의 높이} = 6$ in

$b = \text{단면의 폭} = 1-1/4$ in

$L = \text{unbraced length} = 9$ in

$Lu = \text{임계 길이}$

(다) 압축 및 굽힘응력이 동시에 작용하는 경우 $f_a/F_{all} \leq 0.15$ 이면 식 (1)을 만족해야한다

$$\frac{f_a}{F_{all}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} + \frac{f_{bz}}{F_{bz}} \leq 1.0 \quad (1)$$

$f_a = \text{하중조건에 의해 계산된 축방향 압축응력}$

$F_{all} = \text{허용 압축응력}$

Table 5. Internal Force and Moment for Plate Member

Internal Force & Moment	Value	비고
Fx [lb]	-1070	Load Condition 1
FY [lb]	3600	Load Condition 1
FZ [lb]	-1070	Load Condition 1
MY [in-lb]	32300	Load Condition 1
MY [in-lb]	9630	Load Condition 1
MZ [in-lb]	285	Load Condition 3

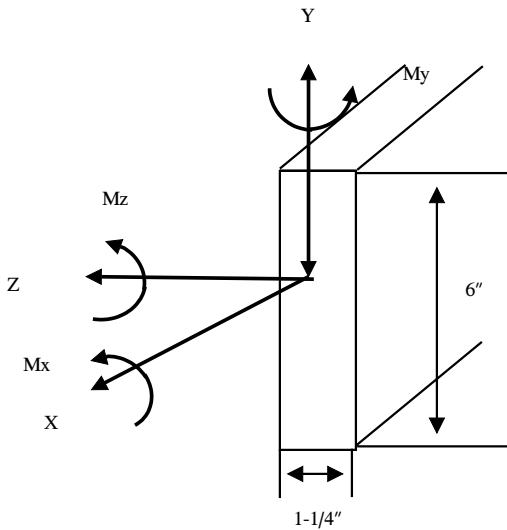


Fig. 6. Local Coordinate System for Plate Member.

fb_y= 하중조건에 의해 계산된 굽힘 응력
 Fb_y = 허용 굽힘 응력
 fb_z = 하중조건에 의해 계산된 굽힘 응력
 Fb_z = 허용 굽힘 응력

(라) 전단응력이 작용하는 경우
 F_v (허용전단응력) = 0.75 S_y = 14400 psi

(2) 사용응력계산

단면에 작용하는 Table 5의 내부 하중 및 모멘트는 보수적 설계를 위해 Table 3 에서 각 하중 성분 중 절대 값이 가장 큰 값을 취하였다. 1-1/4"x 6" 단면의 치수를 사용하여 단면적, 2차모멘트 같은 단면의 성질을 계산하였으며, 사용된 국부 좌표계(Local Coordinate System)는 Fig. 6과 같다.

Table 5를 이용하여 사용응력을 아래와 같이 계산한다.

$$f_a = F_x/A = 143 \text{ psi},$$

$$f_{b_y} = M_y/Z_y = 20672 \text{ psi}$$

$$f_{b_z} = M_z/Z_z = 1284 \text{ psi}$$

$$f_v = \frac{M_x}{\beta^2 d} + \frac{3}{2A} \sqrt{F_y^2 + F_z^2} = 855 \text{ psi}$$

$$\beta \text{ (수정계수)} = 0.288$$

(3) 바닥판 부재의 건전성 평가

(가) 전단하중

사용응력은 855 psi이므로 허용 전단응력 14400 psi 보다 훨씬 작으며 안전율은 16.8이다.

(나) 조합하중

사용응력과 허용응력을 건전성 평가식(1)에 대입하면

$$\frac{f_a}{F_{all}} + \frac{f_{b_y}}{F_{b_y}} + \frac{f_{b_z}}{F_{b_z}} = 0.84 \leq 1.0$$

이므로 허용값 이 내에 있어 주어진 하중 조건에 구조 건전성이 유지됨을 알 수 있다

3.2. 앵커볼트의 건전성 평가

앵커볼트가 지지할 수 있는 허용 인장 하중(tensile capacity) 및 허용 전단 하중(shear capacity)을 아래와 같이 구하여 유한요소해석 결과로부터 얻은 Table 4의 앵커 볼트에 전달된 인장 및 전단하중을 허용 하중과 비교하여 건전성을 평가한다. 앵커볼트로 0.75" 직경, 임베드먼트 깊이 4.75" 인 HILTI KIWI BOLT II를 사용하였다[7].

8 in 간격에 대한 감소계수 (RF) = 0.9053

9 in 간격에 대한 감소계수 (RF) = 0.9684

전체 기하학적 형상에 대한 감소계수(RF) = 0.7937

안전계수(FS)는 4 이다. 0.27 in 직경, 3000 psi 콘크리트용 앵커볼트의 극한 인장강도 및 전단강도는 각각 15500 lb, 19200 lb이다. 허용하중은 극한하중을전체 감소계수와 안전계수를 고려하여 계산한다. 인장력과 전단력이 동시에 작용하므로 상호 작용식 (2)를 만족해야한다.

Table 6. Results for Interaction Value

Anchor Bolt No.	Vrec	Nrec	Load Cond'n	Eqn (2)	Remark
1	3808	3075	1	0.436	Satisfied
			2	0.536	Satisfied
			3	0.043	Satisfied
			4	0.037	Satisfied
2	3808	3075	1	0.622	Satisfied
			2	0.700	Satisfied
			3	0.008	Satisfied
			4	0.007	Satisfied
3	3808	3075	1	0.170	Satisfied
			2	0.175	Satisfied
			3	0.008	Satisfied
			4	0.007	Satisfied
4	3808	3075	1	0.604	Satisfied
			2	0.672	Satisfied
			3	0.058	Satisfied
			4	0.054	Satisfied
5	3808	3075	1	0.754	Satisfied
			2	0.832	Satisfied
			3	0.007	Satisfied
			4	0.007	Satisfied
6	3808	3075	1	0.225	Satisfied
			2	0.231	Satisfied
			3	0.007	Satisfied
			4	0.007	Satisfied

$$\left(\frac{N_d}{N_{rec}}\right) + \left(\frac{V_d}{V_{rec}}\right) \leq 1 \quad (2)$$

N_d = 작용 인장하중

V_d = 작용 전단하중

N_{rec} (허용 인장하중) = $15500 \times 0.7937/4 = 3075$ psi

V_{rec} (허용 전단하중) = $19200 \times 0.7937/4 = 3808$ psi

유한요소해석 결과로부터 얻은 Table 4의 하중 조건에 대한 앵커 볼트 위치에서의 전단력과 인장력을

Table 7. Results for Interaction Value

Load Combination	Pn	PL	Eqn(3)	Remark
1	190	81	0.16	Satisfied
2	199	57	0.15	Satisfied

조합한 작용식 (2)를 적용한 결과는 Table 6과 같다.

3.3. 파이프 스트랩의 건전성 평가

배관 스트랩은 지진하중에 의한 수직상방 변위와 수평방향 변위를 구속하므로 수직하중과 횡하중을 모두 지지해야 하므로 상호 작용식(3)을 만족해야 한다.

$$\frac{P_n}{(P_n)_a} + \frac{P_L}{(P_L)_a} \leq 1 \quad (3)$$

사용된 배관 스트랩은 그린넬사^[8]의 FIG. CL143N PIPE STRAP이며 $(P_n)_a$ (허용 수직하중) 및 $(P_L)_a$ (허용 횡하중)은 각각 1762 lb, 1758 lb 이다. 첫 번째 하중 조합은 수평성분 하중을 SRSS(square root of the sum of the squares)법으로 합성하여 P_L (작용 횡하중)을 구하였고, 두 번째 하중조합은 수직하중과 마찰력을 SRSS법으로 합성하여 P_n (작용 수직하중)을 구했다. 2가지 하중 조합에 대한 배관 스트랩의 상호 작용식 (3)을 적용하였고 결과는 Table 7과 같다.

IV. 결론

본 연구에서는 배관 지지대 구성품인 바닥판, 앵커 볼트 및 배관 스트랩에 대한 응력해석을 수행하여 얻은 사용 응력을 코드에서 규정한 구조 건전성 평가식에 적용하여 제시된 허용 응력 값과 비교하여 건전성 여부를 판단하였다. 첫째, 구조강 부재인 바닥판 단면에는 내부 하중 및 모멘트가 동시에 작용하므로 이들 조합 하중에 대한 건전성 평가식(1)을 적용한 결과 0.84가 되므로 허용값 대비 16%의 안전 여유도를 갖는다. 또한 전단하중에 대하여 사용응력은 허용 전단응력 보다 훨씬 작으며 안전율은 16.8 이다. 둘째, 앵커볼트의 경우 5번째 위치에서 상호 작용식 (2)를 적용하여 0.83를 얻으므로 허용값 대비 17%의 안전 여유도를 갖는다. 마지막으로 배관 스트랩의 경우 상호 작용식 (3)을 적용한 결과 보수적인 경우에도 0.16을 얻었으며 허용값 대비 84%의 안전 여유도를 갖는다. 그러므로 응력수준이 모두 허용값 이내에서 만족하고 있으므로 여러 운전 조건

및 지진하중에 대하여 배관 지지대는 충분히 구조 건전성을 유지하고 있다고 평가할 수 있다.

REFERENCES

- [1] Lee, Jung-Hyun and Park, J., "A Study on Improvement of Support Design in Plant Piping System," *Koee Science & Art Forum*, 13, 1-10, (2013)
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NF, 1989 Edition, (1989)
- [3] ANSYS Dynamics User Guide, Swanson Analysis System, INC. (2003)
- [4] R. J. Roark and W. C. Young, "Formulas for Stress and Strain," 6th ed., McGraw-Hill, New York, (1989)
- [5] Cook, R.D., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 2nd ed., John Wiley and Sons, New York , (1981)
- [6] Oden, J.T., " Mechanics of Elastic Structures", McGraw-Hill, New York, (1968)
- [7] HILTI Product Technical Guide, "Kwik Bolt II Expansion Anchor, Anchoring Systems," (1999)
- [8] Grinnel Pipe Hangers Catalog, Nuclear Qualified, PH-90N, (1990)