

LNG배관에 존재하는 균열에 대한 응력확대계수 해석

An Analysis of Stress Intensity Factor for Presented Crack in L. N. G. Piping

조 천 연* · 한 지 원* · 우 흥 식**

Chun-Yeun Cho · Ji-Won Han · Heung-Sik Woo

(1996년 1월 20일 접수, 1996년 12월 14일 채택)

ABSTRACT

This paper describes an analysis of the stress intensity factor (SIF) of the presented cracks in LNG piping. The stress analysis used the Finite Element Method. The stress intensity factor calculated Raju & Newmann equation and ASME Section XI method.

The cracks in the flanges are found to be influenced by temperature, but the cracks of the piping are found not to be influenced by temperature. If the cracks shape in the flanges and the cracks shape of the piping are same each other, the cracks in the flange will be dangerous more than the cracks of the piping.

1. 서 론

천연가스(NG)는 현재 사용하는 LPG가스보다 우수한 안전성과 공해 물질이 거의 발생하지 않는 청정 연료이며 배관으로 공급되어 별도 수송수단이나 저장시설이 필요없으며 타화석연료에 비해 열효율이 높아 경제적이므로 가정 및 산업용 연료로서 수요가 급증하고 있는 상황이다.

이러한 NG는 액화 상태로 LNG수송선으로 운반되어 평택 인수 기지의 저장 설비에 언로딩 아암

(Unloading Arm)과 배관을 통하여 저장 탱크에 수송되나 이 과정에서 극저온 상태(-162℃)인 LNG로써 수송되기 때문에 배관에 취성화 등의 큰 영향을 미치게 된다. 특히 용접 부위에서는 부식과 용접시 발생하는 용입불량, 불순물 혼입, 기포 등과 같은 용접결함, 용접열로 인한 금속 조직의 변화, 잔류응력 등의 영향이 복합되어 사용 중에 균열이 발생할 수 있으며, 균열이 성장하여 취성파괴를 일으켜 큰 재해가 발생할 수 있다^{1,2)}. 또한 -162℃의 극저온 상태이기 때문에 배관은 취성을

* 호서대학교 산업안전공학과

** 동국대학교 산업안전공학과

가지게 되어 작은 충격에도 취성과괴되어 큰 재해가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 플랜지와 배관의 용접부와 배관과 배관의 용접부의 표면결함 및 표면직하결함의 응력확대계수를 유한요소 해석을 통하여 그 특성을 비교·검토해 보고자 한다.

2. 표면 균열의 응력확대계수 계산

2.1 유한 요소법을 이용한 응력해석

2.1.1 유한요소 해석모델

유한요소 해석모델은 배관의 재질인 SUS 304로 기계적 성질은 Table 1과 같으며, 배관의 구체적인 규격은 다음과 같다.

내반경(R_1)=325mm 두께(t)=10.4mm
 외반경(R_2)=335.4mm 압력(P)=16kg/cm²

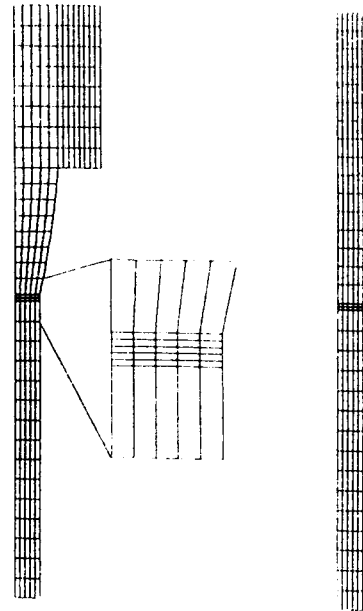
Table 1 Mechanical Property of SUS 304

Temperature(°C)	20°C	-162°C
탄성계수(E)(kg/mm ²)	19,700	32,000
Poisson's Ratio	0.29	0.475

2.1.2 2차원 유한요소 해석

유한요소 해석에는 자동 Mesh되는 범용유한요소해석용 Program인 ANSYS를 이용하였다. 이때 사용한 요소는 8절점 등매개 요소(8-Node Isoparametric Element)이며, 총 요소수는 Fig. 1(a)경우 244개의 요소와 831개의 절점을 사용하였으며, Fig. 1(b)의 경우는 180개의 요소와 623개의 절점을 사용하였다.

응력해석 결과는 Fig. 2와 같으며 그림에서와 같이 외측으로 갈수록 응력이 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 내압이 두께방향으로 갈수록 작게 작용하는 것을 나타내며 온도가 -162°C일때의 응력분포를 보면 배관의 경우는 영향을 받지 않으나 플랜지부분의 경우는 취성이 되어 응력분포가 20°C의 경우보다 다소 낮게 나타남을 알 수 있다. 전반적으로 응력의 분포는 온도에 영향을 다소 받지만 어느 경우이든 배관의 두께가 얇아 내측과 외측사이의 응력분포차이가 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 내압이 두께방향으로 갈수록 작게 작용함을 알 수 있으며 또한 플랜지 용접부의 경우 플랜지형상으로 인해 배관의 용접부의 응력분포 보다 응력분포가 적게 나타남을 알 수 있다.



(a) Welding a part of flange (b) Welding a part of pipe

Fig. 1 Two-Dimension Mesh Design for F. E. M.

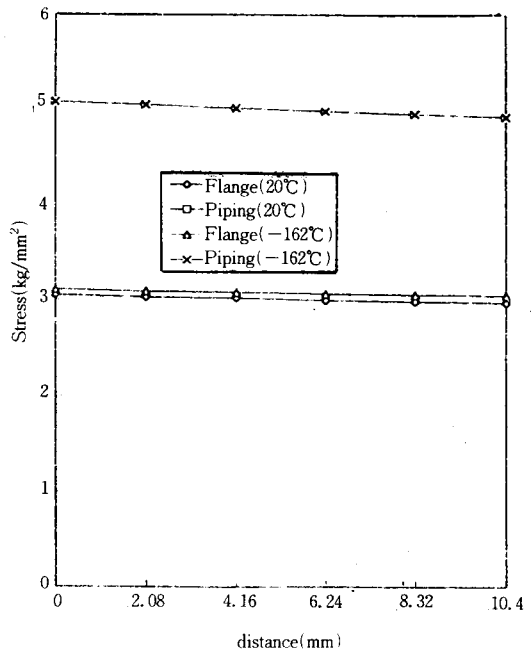


Fig. 2 Stress Distribution

2.2 응력확대계수의 계산³⁾

2.2.1 Raju & Newman에 의한 방법

Raju & Newman은 벽 두께를 통해 나타나는 응력분포를 3차원 다항식으로 근사하여 압력용기 구조물에 대해 다음과 같이 응력확대계수를 계산할 수 있도록 하였다.

$$K = \sigma \sqrt{(\pi \cdot a/Q)} F(a/t, a/c, t/R, \phi) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 σ 는 배관에서 원주방향응력(PR/t)이다.

배관에서의 균열의 형상은 Fig. 3과 같다. 표면 균열의 형상은 반타원형으로 다음식을 만족시킨다.

$$\frac{X^2}{c^2} + \frac{Y^2}{a^2} = 1 \dots \dots \dots (2)$$

여기서 a는 표면균열의 깊이이고 c는 표면균열길이로 나타낸다.

배관에 작용하는 하중은 내압으로서 본해석에서는 압력관의 내벽과 균열면에 압력을 가하고 내압으로 인해 발생하는 축력을 압력관에 작용시켜 축방향으로 인장력을 가하였다. 축방향에 대하여 균열형상비 $a/2c=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 와 균열 깊이비 $a/t=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 을 조합하여 16가지의 경우에 대해 해석하였다.

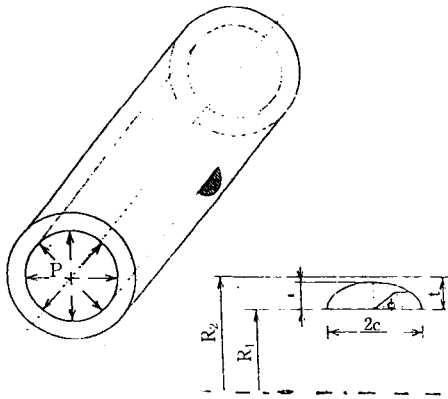


Fig. 3 Geometry of L. N. G. Piping

F는 K의 무차원 수정 계수로서 3차원 해석으로부터 얻은 결과를 균열형상비 a/c , 균열깊이비 a/t , 균열 선단의 위치에 따라 분류하여 Table 2에 나타냈다.

일반적으로 Raju & Newman방법이 ASME Section XI 방법보다 더 정확한 것으로 알려져 있

Table 2 Influence Coefficients (F)

a/t	2φ/π	a/2c			
		0.1	0.2	0.3	0.4
0.2	0.0	0.541	0.766	0.940	1.080
	0.2	0.729	0.848	0.978	1.100
	0.4	0.946	0.993	1.059	1.135
	0.6	1.095	1.113	1.139	1.174
	0.8	1.182	1.187	1.194	1.203
0.4	0.0	0.542	0.767	0.943	1.085
	0.2	1.730	0.880	0.981	1.104
	0.4	0.947	0.994	1.062	1.140
	0.6	1.096	1.114	1.143	1.179
	0.8	1.183	1.189	1.198	1.208
0.6	0.0	0.542	0.769	0.946	1.088
	0.2	0.730	0.852	0.983	1.108
	0.4	0.947	0.997	1.065	1.144
	0.6	1.097	1.117	1.146	1.183
	0.8	1.184	1.191	1.200	1.212
0.8	0.0	0.543	0.770	0.948	1.093
	0.2	0.731	0.853	0.986	1.113
	0.4	0.948	0.998	1.067	1.148
	0.6	1.097	1.119	1.148	1.187
	0.8	1.185	1.193	1.203	1.217
	1.0	1.214	1.219	1.223	1.228

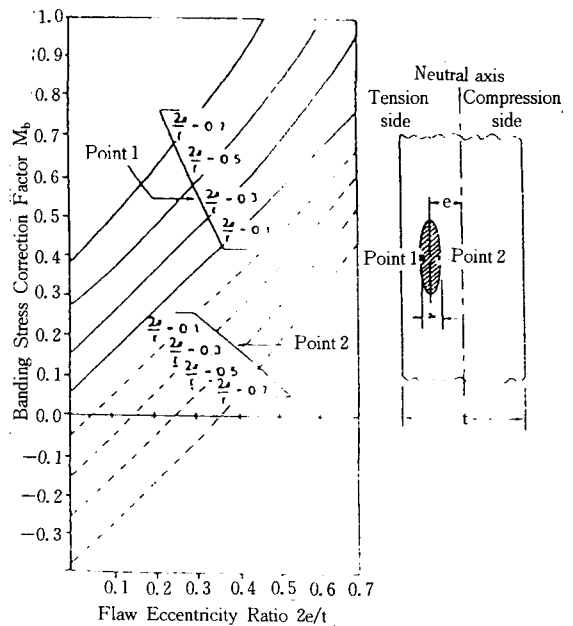


Fig. 4 Bending Stress Correction Factor

어 반타원 표면결합의 응력확대계수의 계산은 이 방법을 사용하여 계산하였다⁴⁾.

2.2.2 ASME Section XI에 의한 계산^{5,6)}

ASME Section XI에서는 결함 위치에서의 응력 성분을 막응력성분(Membrane Stress Component : σ_m)과 굽힘응력성분(Bending Stress Component : σ_b)의 조합으로 응력확대계수 K를 구할 수 있도록 하였다. K식은 다음과 같다.

$$K = (K_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \sqrt{(\pi \cdot a / Q)} \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서 a = 결함 깊이의 반
- Q = 형상 계수
- M_m = 막응력에 대한 자유 표면 수정 계수
- M_b = 굽힘응력에 대한 자유 표면 수정 계수

Q와 M_m 및 M_b 는 Fig. 4, 5, 6을 이용하여 구하였으며, 곡선을 따라 표시되지 않은 경우에는 곡선과 곡선 사이를 선형적으로 내삽(interpolation)하여 구하였다.

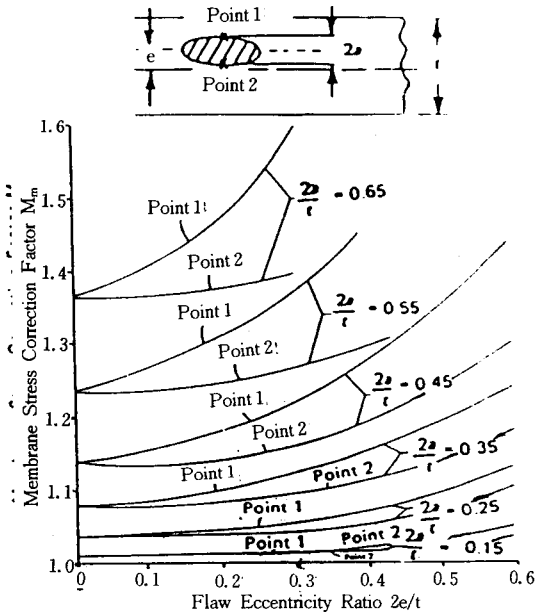


Fig. 5 Membrane Stress Correlation Factor

3. 해석결과 및 고찰

3.1 플랜지와 배관의 용접부와 배관용

접부의 응력확대계수 비교

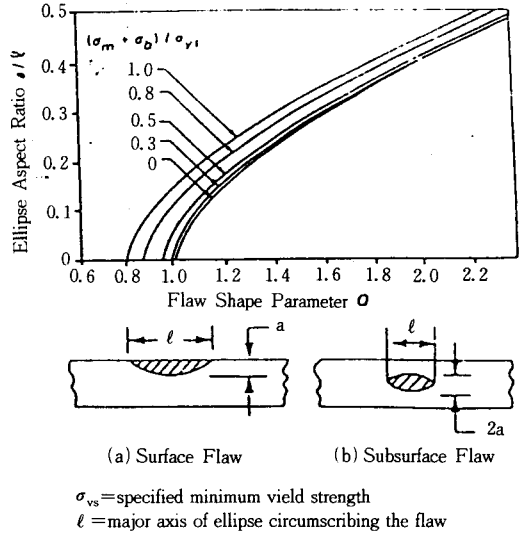


Fig. 6 Crack Shape Parameter

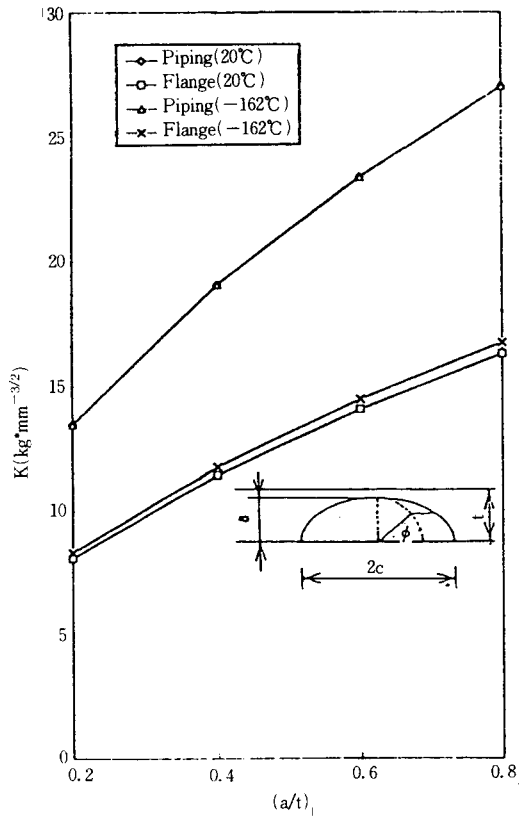


Fig. 7 Max. K of Semielliptical surface Crack

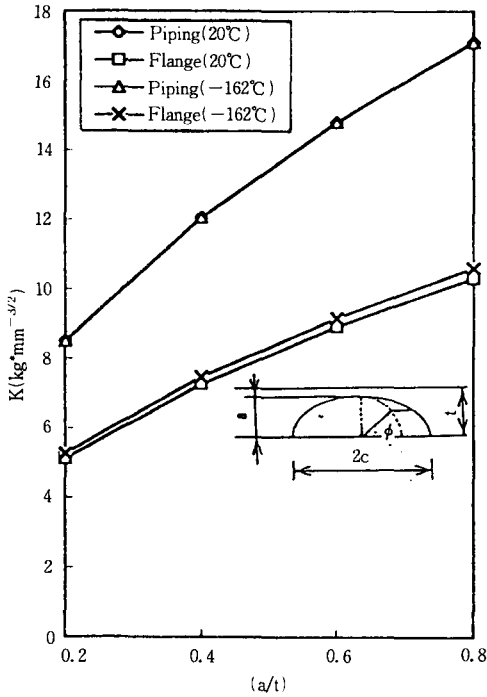


Fig. 8 Min. K of Semielliptical Surface Crack

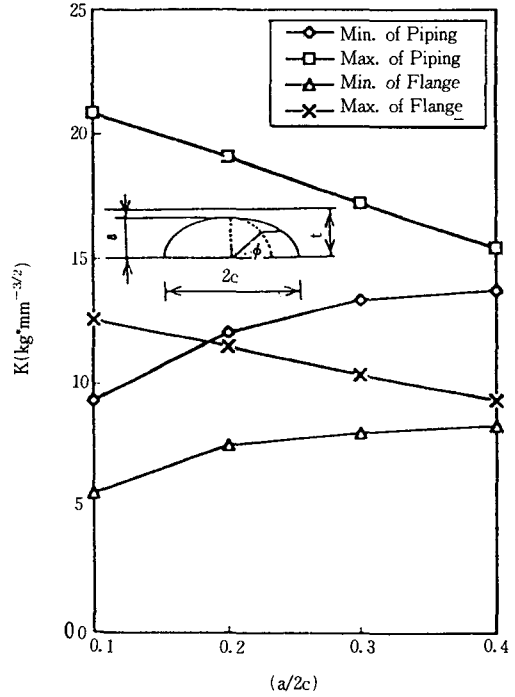


Fig. 9 Max. and Min. to Crack Shape Ratio

3.1.1 반타원형 표면 결함의 결과

Fig. 7, 8에서의 같이 반타원형 표면 결함의 K 최대치와 최소치는 균열 길이가 증가할수록 증가함을 알 수 있으며, Fig. 9에서는 $a/2c$ 에 대한 결과로써 $a/2c$ 의 비가 증가할수록 K값이 최소치인 경우 증가하고, 최대치인 경우 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 균열형상이 반원형에 가까워질수록 K의 최대값과 최소값의 차이가 적어지며 원형의 경우는 K의 최대 최소값이 거의 같아지는 것을 알 수 있다. 또한 a/t 가 일정하고, a/c 가 일정할 때 $2\phi/\pi$ 에 따른 결과는 Fig. 10 $\phi=0$ 일때 최소치 $\phi=\pi/2$ 일때 최대치를 나타냄을 알 수 있다. 즉 결함의 형상에서 최대깊이점을 나타내는 $\phi=\pi/2$ 인 경우에 응력확대계수 K값이 최대임을 알 수 있다.

플랜지 용접부와 배관 용접부를 비교하였을 때는 배관 용접부에서의 K값이 더 큰 것을 알 수 있다. 이 결과는 플랜지 용접부에 응력보다 배관 용접부에서의 응력이 크기 때문에 나타나면, 그러므로 같은 형상의 균열이 존재시 배관용접부의 균열이 배관의 파괴에 더욱 크게 작용함을 알 수 있다.

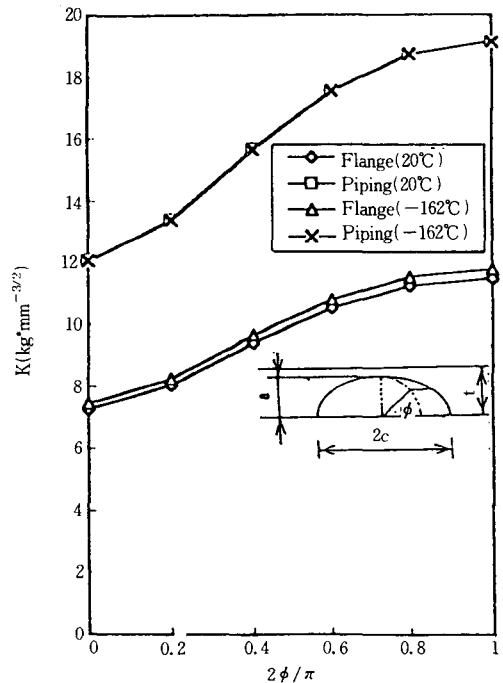


Fig. 10 K vs. ϕ/π (Surface Crack Front Position)

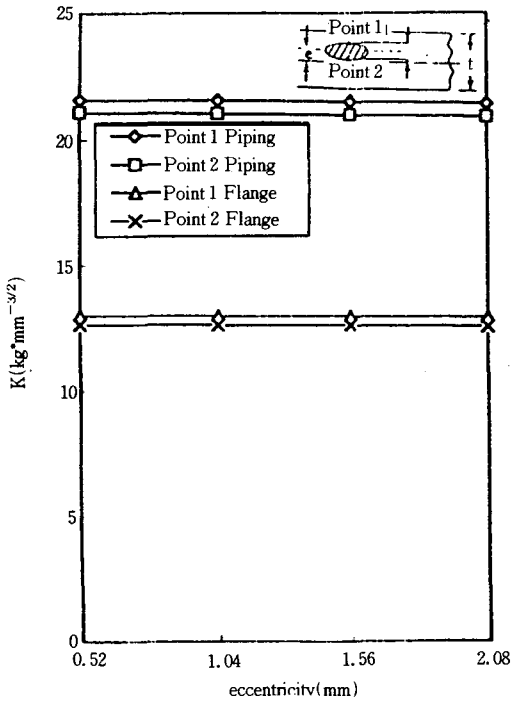


Fig. 11 K vs. Eccentricity Length(20°C)

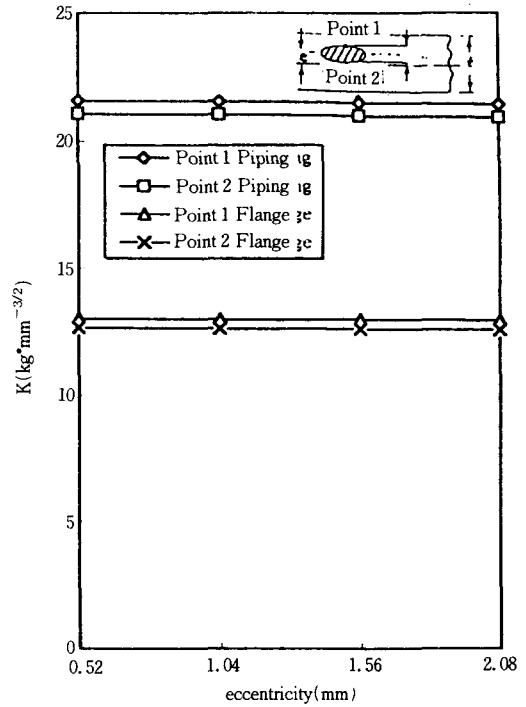


Fig. 12 K vs. Eccentricity Length(-162°C)

3.1.2 타원형 표면직하결합의 결과

타원형 표면직하결합의 해석은 ASME Section XI의 계산식을 사용하여 해석하였다. 그 결과 결함의 편심길이가 증가할수록 결함이 배관의외측에 존재하게 되고 응력확대계수는 미소나마 감소하는 경향을 보인다(Fig. 12). 하지만 거의 구별되지 않으므로 결함이 어느 위치에 존재하느냐와는 관계가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 결함이 어느 위치에 존재하든지 위험성을 가진다는 것을 뜻한다. 하지만 균열깊이 a 가 증가할수록 K 값은 증가함을 알 수 있었다(Fig. 13~14). 온도에 따라 20°C의 경우와 -162°C의 경우를 비교하였을 때 -162°C의 경우 플랜지의 K 값이 증가하고 이것은 플랜지부의 결함은 온도에 지배를 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 형상계수 Q 와의 관계를 보면 같은 균열 깊이에서 Q 값이 증가할수록 응력확대계수는 감소함을 알 수 있다(Fig. 15). 또한 Point 1의 값이 Point 2의 값보다 크므로 결함의 외측 부분의 응력확대계수가 크므로 외측으로의 균열성장이 빠르게 진행함을 알 수 있다.

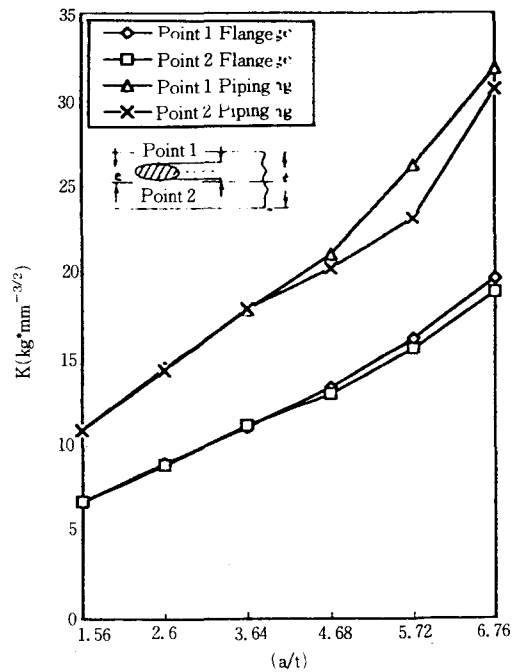


Fig. 13 K vs. Crack Length(20°C)

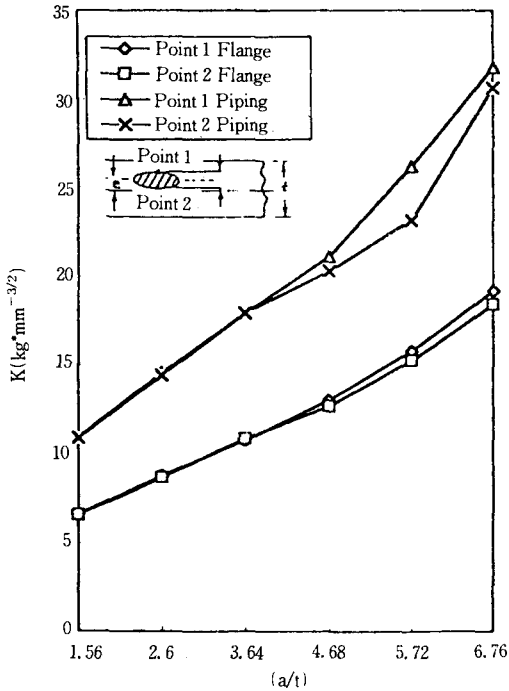


Fig. 14 K vs. Eccentricity Length(-162°C)

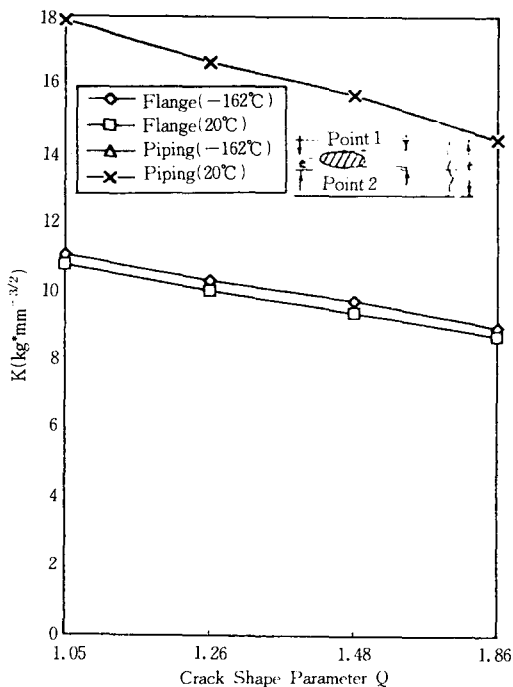


Fig. 15 K vs. Crack Shape Parameter(Q) Influence

4. 결 론

LNG배관에서의 플랜지 용접부와 배관 용접부에서의 표면결합의 응력확대계수(K)의 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반타원형 표면 결합의 K값은 균열길이(a)가 증가할수록 증가하며 타원형상의 단축과 장축의 비(a/2c)가 감소할수록 증가하고 같은 형상에서는 결합의 표면쪽보다 깊이 방향의 K값이 더욱 크고 K값의 최대값은 최대깊이점에서 나타남을 관찰할 수 있다.
- 2) 타원형 표면직하결합의 경우 K값은 편심길이의 증가와 균열길이의 증가 및 같은 균열길이에서 Q(형상계수)의 값이 감소할수록 K값이 증가함을 알 수 있다.
- 3) 플랜지 용접부의 결합보다 배관용접부의 결합의 K값이 크고 배관 용접부의 결합이 더욱 자세히 관찰해야 하겠다.
- 4) K값은 온도에 무관하므로 어느 온도조건에서 사용하더라도 항상 위험성이 존재하며 플랜지부의 결합의 K값은 -162°C의 경우에 취성으로 증가됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) K. Masubuchi, "Analysis of Structures", International Series on Materials Science and Technology, Vol. 33, pp. 518~576, 1980.
- 2) H. Liebowitz, "Fracture-An Advanced Treatise", Vol. 4, pp. 371~438, 1969.
- 3) I. S. Raju and J. C. Newman, "Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 104, pp. 293~297, 1982.
- 4) 은영수, "영광2호기 가압기안전성 검토", 한국원자력 안전기술원 보고서 KINS/AR-013, 10, 1990.
- 5) ASME Section XI, "Rules for inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components", 1978.
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1989.