

가스저장탱크의 腐蝕疲勞龜裂 特性에 관한 研究

林 祐 助·辛 鐘 大*

부경대학교, *(주)서강엔지니어링

(1997년 10월 27일 접수)

Study on the Characteristics of Corrosion Fatigue Crack for Gas Storage Tanks

Uh-Joh LIM and Jong-Dae SHIN*

Pukyong National University, *Seokang Engineering Co. Ltd.

(Received October 27, 1997)

Abstract

Recently, with rapid increase of gas demand, there occurs much interest their security of safety in the gas storage tanks and pressure vessels etc.

In order to solve the problems, the occurrence of corrosion fatigue crack and the propagation behavior must be investigated.

Especially the occurrence of corrosion fatigue crack and the propagation behavior in the part which has concentrated stress or defects, must be studied more carefully.

In this paper, the high - tensile steel of SPV 50 which is much used for building the LPG storage tanks was tested by the use of a plane bending corrosion fatigue tester under the various marine environments and in the air.

These experiments were done to investigate the corrosion fatigue crack propagation behavior, the variation of aspect ratio for part through crack and electro - chemical characteristics of the metal.

The main results obtained are as follows ;

1. Comparing the same surface crack length with the crack depth, the crack depth toward the thickness of specimen in air propagated faster than that in corrosion environment.
2. The aspect variation of the half elliptical crack can be estimated as following equation;

$$\frac{b}{a} = i - j \frac{b}{t}$$

where

a : surface crack length

b : crack depth

t : specimen thickness

i, j : experimental constants

but the slope j is decreased as specific resistance decreases.

3. As the specific resistance of corrosion environment decrease or the corrosion fatigue crack propagates, the corrosion potential become less noble.

서 론

最近 産業의 발전으로 인해서 인류의 생활수준이 향상됨에 따라 열량이 높고 타 연료에 비해 사용이 편리한 동시에 공해가 적은 가스연료의 사용이 증가하는 연료혁명이 세계적으로 일어나고 있는 추세이다.

이와 같은 가스연료는 가정용 연료뿐만 아니라 산업용 및 자동차용 등의 연료로서 액화천연가스(L.N.G)와 액화석유가스(L.P.G)가 편리하게 사용되어지고 있다¹⁾.

그러나 이들 각종 가스연료 저장탱크들 中에는 가스연료 운송선박의 하물탱크, 해안에 설치되어 있는 가스연료 저장탱크, 해안도시 및 어촌의 가정용 가스연료저장탱크 그리고 어선에 취사용으로 선적되는 가스연료저장탱크들은 도장되어 있는데도 불구하고, 가스연료저장탱크의 외부는 해양분위기중의 해염인자(Cl⁻)에 의해 부식현상인 공식이 심하게 발생되고 있다²⁾.

그리고 가스연료를 사용한 후에는 새로운 가스를 충전하여 사용을 반복함으로서 가스연료저장용 탱크는 반복적인 부하를 받게되는 압력용기와 같다. 이러한 각종 압력용기들에 대하여 균열발생원인을 조사,분석한 영국의 통계에 의하면 피로균열과 부식균피로열로 인해서 균열이 발생된 것은 무려 60.3 %를 차지하고 있다^{3,4)}.

해양환경 중에서 가스연료저장용 탱크가 부식과 반복적인 응력을 받게 됨으로서 저장탱크재료의 부식에 의한 공식이나 여러가지 미소결함을 기점으로 하여 저사이클 부식피로균열이 성장되어 탱크의 파괴를 야기시킬 수 있으며, 특히 탱크가 파괴되기도 前에 연료가스의 누설로 인해서 화재 또는 대형 폭발사고가 일어날 수 있으므로 이러한 피해를 미연에 방지하기 위해서는 이에 대한 많은 연구가 필요하다⁵⁾.

이러한 필요성에 의하여, 피로균열의 발생 및 진전에 관한 연구는 오래전부터 활발히 행하여져 왔으나,⁵⁻¹⁰⁾ 이들의 연구는 주로 통상의 인장, 압축 하중에 의한 대기 중에서의 관통피로균열(through fatigue crack)의 발생 및 진전에 국한한 것으로 압력용기나 가스저장탱크 등의 부식피로

파괴에 있어서 더욱 중요하다고 생각되는 평면굽힘하중에 의한 표면균열(surface crack or part through crack)의 발생과 전파에 관한 연구는 몇편의 연구에도 불구하고 그 거동이 충분히 밝혀져 있지 않다.¹¹⁻¹⁵⁾

따라서 본 연구에서는 LPG 저장탱크 및 압력용기 등의 재료로 많이 사용되어지는 고장력강인 SPV 50강으로 해양환경 중에서 양단고정평면굽힘 부식피로시험을 실시하여, 해양환경조건에 따른 SPV 50강의 부식피로균열 성장거동, 부분관통균열인 반타원형 균열의 형상변화에 미치는 부식의 영향 및 전기화학적 특성을 究明함으로서 해양분위기 중에 설치되는 가스저장탱크의 설계, 검사 및 보수에 대한 기초 자료로서 기여하고자 한다.

시험편 및 실험방법

1. 시험편

본 실험에 사용된 시험재료는 압력용기용 압연강재(SPV 50)로 그 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 같다.

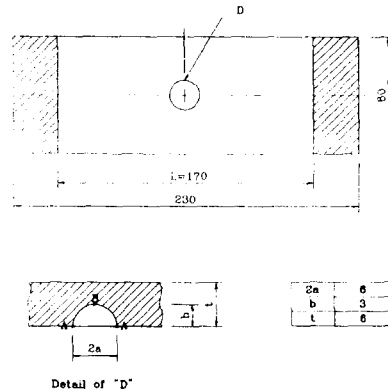


Fig.1 Specimen dimensions and notch position for corrosion fatigue test(unit: mm).

Fig.1은 본 실험에 사용한 시험편 형상을 나타낸 것이다. 두께 9mm인 압연강판을 재료로 채취하여 밀링머시인을 이용하여 두께 6mm가 되도록 평면가공하였으며 평면가공시 열영향이 극소화되도록 평면부는 앤드밀과 정면커터, 노치부는 방전가공을 하여 주의를 기울여 가공하였다.

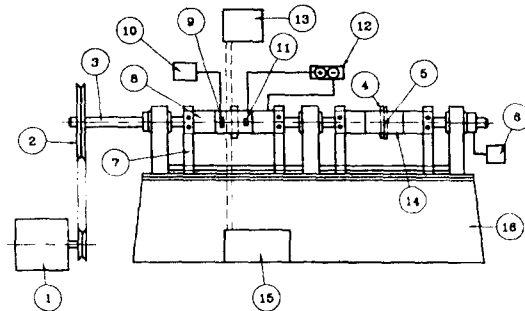
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material(SPV 50)

Chemical compositions (wt %)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
	0.13	0.3	1.27	0.016	0.004	0.12	0.01	0.05
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm ²)		Yield strength (kgf/mm ²)		Elongation (%)			
	66.9		58.4		35			

한편 시험편 표면은 사포 2000번까지 연마한 후 아세톤으로 탈지하고, 시험편 표면의 전기 화학적인 영향을 제거하기 위하여 노치선단을 제외한 전표면을 투명한 에폭시 수지로 피복하여 절연시켰다.

2. 실험장치

한편 본 실험에 사용한 양단고정 평면 부식피로 시험기의 전체 계통도는 Fig.2와 같다. 이 평면굽힘피로시험기는 자작한 것으로 시험편의 양단은 고정치구(support fixture)에 의해 고정되고 중심은 편심륜의 회전에 의해 굽힘 반복하중을 받게 하였으며, 시험편은 동시에 2개까지 장치할 수 있도록 하였다.



- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. Motor | 9. Electrode |
| 2. Pully | 10. Conductivity meter |
| 3. Shaft | 11. Reference electrode |
| 4. Eccentric cam | 12. Potentiometer |
| 5. Load bar | 13. Water tank |
| 6. Counter meter | 14. Corrosion cell |
| 7. Specimen fixture | 15. Drain water tank |
| 8. Specimen | 16. Bed |

Fig.2 Schematic diagram of test apparatus.

그리고 Fig.1에 나타난 시험편의 길이와 Fig.2의 시험기에 보인 하중점에서 편심륜의 편심량을 변화시킴으로서 반복응력을 미세하게 조절할 수 있도록 하였고, 굽힘 반복응력은 Motor에 의해 구동되는 편심륜에 의해 받도록 하였다.

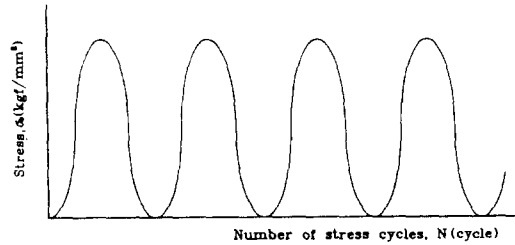


Fig.3 Stress wave form(stress ratio, R=0) .

본 실험에 사용한 반복응력의 파형은 Fig.3에 표시한 바와 같이 응력비 R=0이며, 파형은 Sine파이다. 반복하중은 소규모 항복조건을 만족하기 위해서는 피로응력이 항복응력보다 적어야하며, 보통 항복응력의 0.8배 이하로 제한하고 있다.¹⁶⁾ 그러므로 본 실험에서도 반복응력은 항복응력의 59%인 34.2 Kgf/mm²로 적게 하였고 응력주파수는 150 rpm(2.5 Hz)으로 하였다. 이때 반복하중의 회전수 측정은 pulley축에 연결되어 있는 Counter meter로써 측정하였다.

3. 실험 방법

부식 환경조는 아크릴로 제작하였으며 부식 환경은 천연해수에 증류수를 소량씩 혼합하여 그 비저항 값이 25, 200, 1000 및 6000 Ω · cm되게 하여 각각 고정하였으며, 실험중의 부식용액은 실내 온도로 유지하였다.

또한 부식 환경조내의 부식 용액은 Cl⁻ 이온의 농도 및 전도도의 변화를 방지하기 위하여 시간당 4l의 양으로 계속하여 순환시켰으며, 부식생물에 의한 전기 화학적인 영향을 제거하기 위하여 절연성 필터를 사용하여 부식피로 시험을 행하였다.

표면균열성장길이는 일정한 반복하중을 가한 후 20배 확대경으로 부식피로 초기균열 (a=0.5mm)로 부터 파단까지 연속적으로 측정하

였으며, 깊이 방향의 성장 길이는 일정 반복횟수에서 주파수를 150 rpm에서 300 rpm으로 상승시켜 6000회 반복하중을 가해 인위적으로 비치마크를 나타나게 하여 시험편이 파단된 후 10배 확대경으로 파단면의 비치마크에서 측정을 하였다. 그리고 부식전위는 포화카로멜전극을 기준전극으로 사용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 부식환경의 변화에 따른 부식피로균열진전 특성

Fig.4는 공기 중과 부식환경 중인 비저항값의 변화에 따른 부식피로균열진전거동을 고찰하기 위하여 표면균열길이 a와 응력반복회수 N의 관계를 보인 것이다.

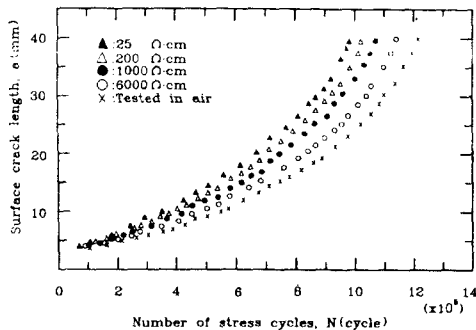


Fig.4 Surface crack length vs. number of stress cycles in air and various specific resistance.

이 결과에 의하면 어떤 환경중에서나 표면균열길이 a는 응력반복회수 N의 증가와 더불어 균열진전초기에는 서서히 성장되다가 점차 표면균열이 진전되면서 급격하게 빨라지는 경향을 나타내고 있다. 그리고 천연해수($\rho=25 \Omega \cdot \text{cm}$)중에서 부식피로에 의한 표면균열길이의 성장이 가장 빠르며 부식환경중의 비저항값이 증가할수록 표면균열진전이 지연되고, 공기 중에서 피로에 의한 표면균열길이의 진전이 부식환경 중에서도 더 지연되었다.

Fig.5는 공기중과 비저항값의 변화에 따른 부식

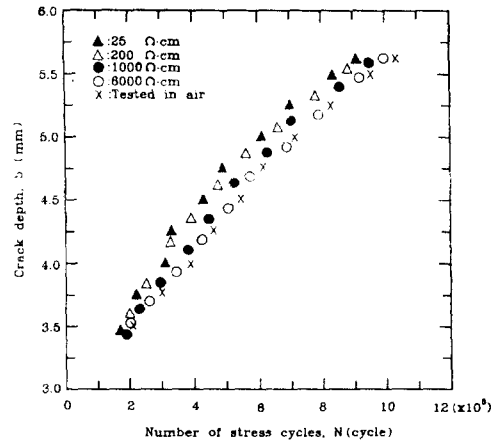


Fig.5 Crack depth vs. number of stress cycles in air and various specific resistance.

환경 중에서 부식피로균열진전거동을 고찰하기 위하여 균열깊이 b와 응력반복회수 N의 관계를 나타낸 것이다.

이에 의하면 어떤 환경 중에서도 균열깊이 b는 응력반복회수 N의 증가와 더불어 균열초기에는 성장이 빨라지다가 점차 균열깊이의 성장이 둔화됨으로써 Fig.4의 표면균열진전거동과는 다소 다른 경향을 보이고 있다. 그리고 부식환경의 비저항값이 감소할수록 균열깊이가 빠르게 성장된 것과 공기 중에서 피로에 의한 균열깊이의 진전이 부식환경 중에서도 더 지연되는 양상은 표면균열진전거동과 거의 일치함을 알 수 있다.

또한 Fig.4와 5에서 표면균열길이 a와 균열깊이 b의 성장이 부식환경의 비저항값이 감소할수록 빨라지는 이유는 비저항값이 감소할수록 Cl^- 이온의 농도와 전도도가 높게 됨으로써 부식피로균열 선단이 양극활성화 부식이 촉진되기 때문이다. 그러므로 부식피로균열 선단의 부동태 피막이 쉽게 파괴됨과 동시에 부동태 피막의 재형성이 어렵게 됨으로써 표면균열길이와 균열깊이의 성장이 비저항값이 감소할수록 빨라지는 것으로 사료된다.

2. 비저항의 변화에 따른 부분 관통균열의 형상변화

Photo.1은 공기 중과 비저항 $6000 \Omega \cdot \text{cm}$ 및 25

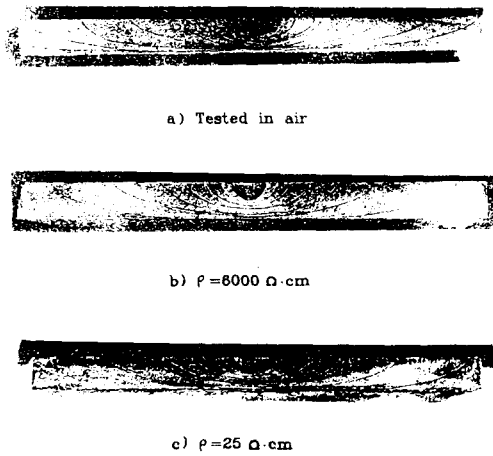


Photo. 1 Beach marks of fracture surface.

$\Omega \cdot cm$ 인 용액 중에서 실험한 시험편에 대하여 인위적으로 삽입한 파단면의 비치마크를 나타낸 것이다.

이에 의하면 파단면의 형상은 반타원형의 부분관통균열이며, 균열초기에는 파단면에 나타난 비치마크가 일정한 표면균열길이에 대한 두께방향의 균열깊이가 비저항값이 $25 \Omega \cdot cm$ 및 $6000 \Omega \cdot cm$ 인 부식환경 중에서보다 공기 중에서 더 크게 나타나고, 균열이 성장함에 따라 파단면에 나타난 표면균열길이가 균열깊이에 비해 현저하게 크게 진전되고 있음을 알 수 있다.

Fig.6은 공기 중과 비저항 $6000 \Omega \cdot cm$ 및 $25 \Omega \cdot cm$ 인 용액 중에 있어서 비치마크의 거시적인 양상

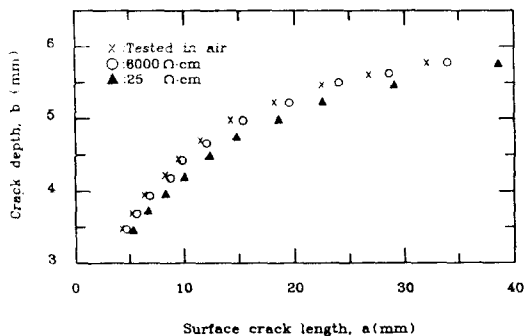


Fig.6 Crack depth vs. surface crack length in air and various specific resistance.

(Photo.1)을 보다 구체적으로 나타내기 위해 표면균열길이 a와 균열깊이 b의 관계를 나타낸 것이다.

이 결과에 의하면 균열이 성장함에 따라 균열깊이 b에 비해 표면균열길이 a가 현저하게 빨리 진전되고, 일정한 균열깊이 b에 대한 표면균열길이 a는 다른 환경중에서 보다 비저항값이 $25 \Omega \cdot cm$ 인 용액(천연해수) 중에서 더 빨리 진전되고 있다. 즉 일정한 표면길이 a에 대한 균열깊이 b는 부식환경중에서 보다 공기중에서 보다 더 빨리 성장되었음을 보여준다.

Fig.7은 반타원형의 부분관통균열에 있어서 형상변화를 구체적으로 고찰하기 위해, 공기 중과 부식환경 중인 비저항값의 변화에 따른 균열깊이 b와 표면균열길이 a와의 비인 b/a 값에 대한 균열깊이 b와 시험편두께 t와의 비인 b/t 값의 관계를 정리하여 나타낸 것이다.

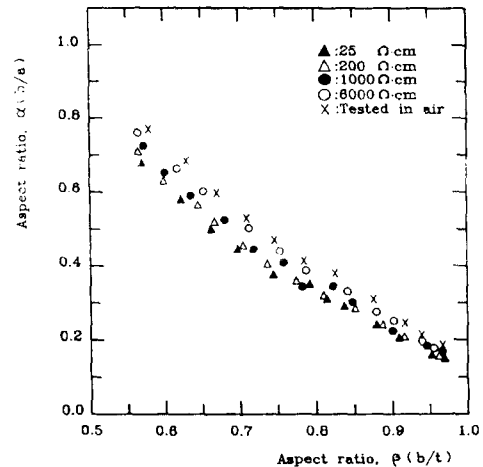


Fig.7 Shape changes of fatigue crack in air and various specific resistance.

이 결과에 의하면 형상비 b/t 가 작은 영역하에 있어서는 부식환경중인 비저항값의 변화에 따라 형상비 b/a 의 차이가 크지만, 형상비 b/t 가 큰 영역하에서는 형상비 b/a 의 차이가 작아지는 것을 보여주고 있다. 그리고 여러가지 환경중에 있어서 형상비 b/a 에 대한 b/t 의 관계는 식(1)과 같이 공기중에서 평면굽힘피로파괴에 의한 반타원형 부분관통균열의 형상비에 대한 관계와 거의 일치 되지

$$b/a = 1 - b/t \quad (1)$$

만, 각각의 부식환경에 따라 그 기울기가 변화됨으로써 다음 식(5)와 같이 됨을 알 수 있다.

$$b/a = i - j \cdot b/t \quad (2)$$

Table 2는 공기 중과 부식환경 중인 비저항값의 변화에 따른 Fig.7의 실험치들을 식(2)에 의해 계산한 실험상수의 절편 i 와 기울기 j 를 나타낸 것이다.

이에 의하면 공기 중에서보다 부식환경중에서 실험상수의 절편 i 와 기울기 j 는 작아지고 또한 비저항값이 감소할수록 절편 i 및 기울기 j 의 값이 점차 작아지는 경향을 보여주고 있다.

이와 같이 공기 중에서보다 부식환경 중에서 절편 i 및 기울기 j 의 값이 작아지는 이유는 일정한 균열길이 b 에 대해 표면균열길이 a 가 공기 중에서보다 부식환경 중에서 더 빨리 성장되기 때문인 것으로 생각된다.

Table 2 The experimental constants i and j of relative formulas of aspect ratio under the various marine environment (SPV50)

Experimental constants / Environment	i	j
25 $\Omega \cdot \text{cm}$	1.318	1.250
200 $\Omega \cdot \text{cm}$	1.436	1.362
1000 $\Omega \cdot \text{cm}$	1.492	1.402
6000 $\Omega \cdot \text{cm}$	1.524	1.438
Tested in air	1.647	1.563

Relative formulas : $b/a = i - j \cdot b/t$

3. 부식피로성장거동에 미치는 전기화학적 특성

Fig.8은 부식환경 중의 비저항값이 변화함에 따른 부식전위 $E(\text{mV/SCE})$ 에 대한 표면균열길이 a 와의 관계를 보인 것이다.

이 결과에 의하면 비저항값이 감소할수록 부식전위는 비전위화되고, 또한 표면길이 a 가 진전될수록 전 환경에 걸쳐 부식전위는 비전위화되는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 비저항값이 감소

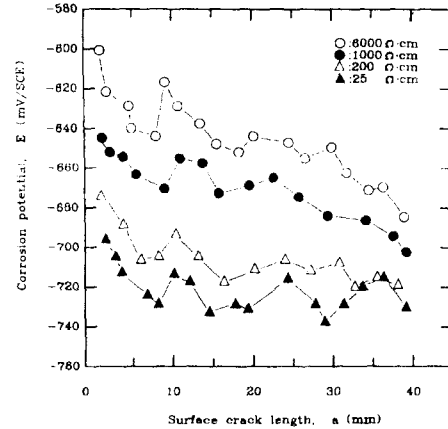


Fig.8 Relation of corrosion potential vs. crack length in various specific resistance.

할수록 부식전위가 비전위화됨으로써 부식피로균열 선단의 양극활성화 부식을 촉진할 것으로 추찰된다. 따라서 부식환경 중의 비저항값이 감소할수록 부식피로균열진전속도가 빨라지는 것으로 사료된다.

결론

양단고정 평면굽힘 부식피로시험기를 사용하여 해양환경인자중 비저항값의 변화에 따라 압력용기용 SPV 50 강재에 대한 부식피로균열 진전특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일정한 표면균열길이에 대한 두께 방향의 균열깊이는 부식환경 중에서 보다 공기중에서 더 빨리 성장되었다.
- 2) 반타원형 균열의 형상변화는 표면균열길이 a , 균열깊이 b 및 시험편 두께 t 의 상관관계가 $b/a = i - j \cdot b/t$ 로 성립되지만, 기울기 j 는 부식환경의 비저항값이 감소할수록 더 작아진다. (i, j 는 실험상수)
- 3) 부식환경의 비저항이 감소할수록 부식피로균열이 진전됨에 따라 부식전위는 비전위화된다.

參考文獻

- 1) 趙炳國(1990) : 우리나라 가스산업 현황과 향후 추

- 진방향, 한국가스안전공사, 28-36
- 2) 한국가스안전공사(1990) : 외면부식대책, 가스정보, 1-2
 - 3) 高橋 克, 態谷義一(1981) : 高壓容器破壞事故例解析への破壊力學の適用, 壓力技術, 第19卷, 第1號, 16
 - 4) 日本高壓가스協會(1974) : 球形タンクき裂阻止實驗講習會資料. Vol.150, No.3, 46-50
 - 5) David Broek(1978) : Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands, 80-86
 - 6) J.C. NEWMAN, Jr(1973) : FRACTURE ANALYSIS OF SURFACE AND THROUGH-CRACKED SHEETS PLATES, Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, 667-689
 - 7) J. Rice and M. Levy(1972) : The Part-Through Surface Crack in an Elastic Plate, Trans, ASME, J.Appl, Mech, 185
 - 8) 川原正言, 栗原正好(1975) : 表面き裂の疲勞による傳播成長過程に関する豫備的考察, 日本造船學會論文集, Vol.137, 297-306.
 - 9) 小寺澤良一, 南坂(1977) : 返し曲げによる非貫通疲勞き裂の進展, 日本科學會誌, Vol.26, No.289, 955-961
 - 10) 한국가스안전공사 : 저장탱크의 결함평가와 수명예측, 가스기술정보(봄), 21-26
 - 11) J.C. Newman, Jr., and I. S. Raju(1981) : An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics, Vol.15, pp.185-192.
 - 12) 南起祐(1988) : 繰り返しの低及び高應力下における表面き裂材のき裂貫通舉動に関する研究, 横浜國立大學博士學位論文, 72-98
 - 13) A. S. Kobayashi(1976) : Proceeding of 2nd international conference Mechanics Behavior of Materials, Boston.
 - 14) 임우조, 이진열(1988) : 부식피로에 의한 선박용 알루미늄합금재 용접부의 모서리균열전파거동에 관한 연구, 한국어업기술학회지, 24, 4, 164-171
 - 15) 鈴木 陽組(1983) : 海水中における軟鋼の疲勞き裂傳播, 防食技術, 32, 318-323
 - 16) G. T. Hahn(1989) : Local Yielding Attending Fatigue Crack Growth, Metall, Trans, 1189-1202.