



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위 논문

Ni 12% 함유 STS316L의 미소 균열
크기에 따르는 하한계응력확대계수와
피로한도

The logo of Pukyong National University is a circular emblem. It features a central stylized design with a blue and grey color scheme, possibly representing a compass or a similar navigational instrument. The text 'PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY' is written in a circular path around the top half of the emblem, and '부경대학교' is written in Korean along the bottom half.

2021년 08월

부경대학교 대학원

기계공학학연융합학과

박 환 성

공학박사 학위 논문

Ni 12% 함유 STS316L의 미소 균열
크기에 따르는 하한계응력확대계수와
피로한도

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학박사 학위 논문으로 제출함.

2021년 08월

부경대학교 대학원

기계공학학연융합학과

박 환 성

박환성의 공학박사 학위 논문을 인준함.

2021년 8월 27일



주 심 공학박사 강 창 룡 (인)
위 원 공학박사 김 태 일 (인)
위 원 공학박사 안 우 상 (인)
위 원 공학박사 김 철 수 (인)
위 원 공학박사 남 기 우 (인)

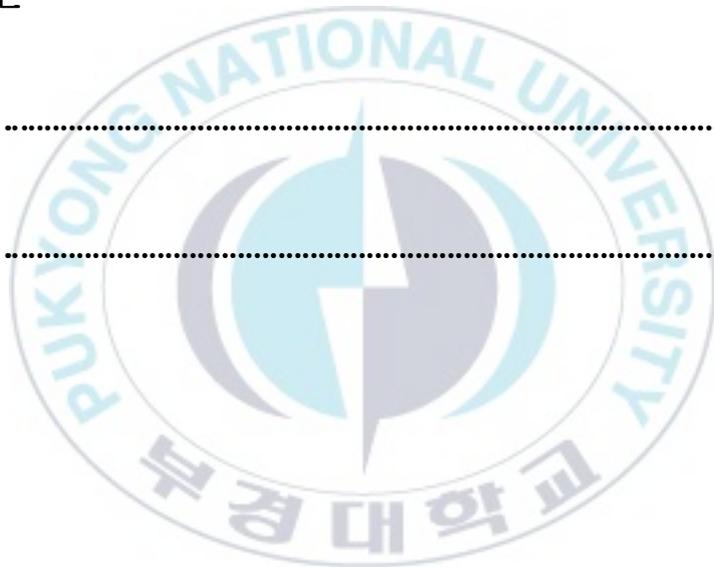
목 차

Abstract

제1장 서론	1
1.1 연구의 배경	2
1.2 연구의 목적	5
1.3 논문의 구성 및 개요	6
참고문헌	8
제2장 Ando와 Tange 식으로 미소 균열의 평가	13
2.1 서언	14
2.2 평가방법	16
2.3 평가에 사용한 재료 특성	20
2.4 평가 결과 및 고찰	22
2.4.1 하한계응력확대계수의 균열 크기 의존성	22
2.4.2 피로한도의 균열 크기 의존성	26
2.5 결론	31
참고문헌	32

제3장 미소 관통 균열과 표면 미소 균열의 평가	34
3.1 서언	35
3.2 재료 및 평가방법	37
3.3 평가 결과 및 고찰	42
3.3.1 미소 균열에 대한 하한계응력확대계수	42
3.3.2 미소 균열에 대한 피로한도	49
3.4 결론	56
참고문헌	57
제4장 수소 저장탱크용 STS316L의 피로한도 평가	60
4.1 서언	61
4.2 재료 및 실험방법	63
4.2.1 실험 재료	63
4.2.2 피로 실험방법	66
4.2.3 균열시험편의 피로한도와 임의 균열의 하한계응력확대계수의 평가방법	67
4.3 결과 및 고찰	69
4.3.1 하한계응력확대계수 결정	69
4.3.2 피로한도 결정	71

4.3.3 균열 크기에 따르는 피로한도	73
4.3.4 피로한도 감소율	76
4.3.5 균열 형상비에 따르는 응력확대계수	79
4.4 결론	81
참고문헌	83
제5장 결론	86
발표 논문	88
감사의 글	92



Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue Limit according to the size of the micro crack of STS316L Containing 12% Ni

Hwan-Sung Park

Department of UR Mechanical Convergence Engineering
Graduate School, Pukyong National University

First : When a crack exceeds a certain size, the maximum stress intensity factor (K_{\max}) is used to explain the occurrence condition of brittle crack, and the limit condition of hydrogen assisted and stress corrosion crack propagation. The fatigue crack can be explained through the stress intensity factor range (ΔK). However, as the stress intensity factor deals with only linear elastic bodies, it is necessary for the nonlinear range of crack tips to be small enough. It is known that this condition is not satisfied in the case of the micro-crack problem, which became smaller than the threshold value of the long crack. This study evaluates the threshold stress intensity factor and fatigue limit of the input/output piping material STS316L for hydrogen storage tanks using the formula proposed by the Ando et al. to analyze the micro-crack problem uniformly and using the formula proposed by Tange et al.

Second : Linear fracture mechanics can quantitatively deal with the crack problem of metals and ceramics. In particular, the fracture toughness (K_{Ic}) and the threshold stress intensity factor (ΔK_{th}) of fatigue crack propagation depend on the crack size. Linear fracture

mechanics assumes that the plastic zone or nonlinear zone occurring at the crack tip is very small compared to the crack size. However, micro cracks do not satisfy this condition. This study evaluated the threshold stress intensity factor (ΔK_{th}) and the fatigue limit ($\Delta\sigma_w$) of short surface crack size due to fatigue load using the equation that considers the stress ratio and the plastic behavior of peculiar fatigue proposed by Ando et al. In addition, the through crack of the infinite plate was also evaluated for comparison.

Third : The threshold stress intensity factor and fatigue limit of hydrogen storage tank piping material (STS316L) were determined, and the fatigue limit and threshold stress intensity factor of micro crack were evaluated. In addition, the crack size evaluated at the maximum operating pressure (87.5 MPa) of the hydrogen storage tank, and the safety of the STS316L piping was confirmed.

제1장 서론



1.1 연구의 배경

산업의 발달로 인하여 지구 환경은 나날이 오염되어 가고 있다. 가장 주요한 원인은 석탄과 석유, 공장의 가연성 물질 같은 화석 연료의 연소와 자동차, 기차, 비행기에서 배출되는 오염 등이 있다. 이와 같은 오염을 줄이기 위하여 자동차 경량화를 전 세계 자동차 제작사는 추진 중이다. 자동차의 차체는 알루미늄으로 대체하기 위한 연구,[1-3] 연료는 대기오염 없는 수소저장을 위한 탱크[4-7] 및 리튬 배터리로 대체하기 위한 연구[8-10]가 진행 중이고, 실 모델에 적용되어 양산되고 있다. 그러나 수소저장용 탱크의 입/출입 배관인 STS316L 및 배터리 케이스인 알루미늄 등의 미소 균열에 대한 피로파괴 문제는 해결되지 않고 있다.

한편 파괴역학은 균열이 존재하는 재료 내부의 역학적 상태를 해석하고, 그 결과를 바탕으로 재료의 파괴조건을 정량화하여, 균열이 존재하거나 발생이 예상되는 재료를 강도 측면에서 안전하게 사용할 수 있도록 한다. 파괴역학은 균열문제를 취급하므로, 균열의 역학(mechanics of cracks)이라 할 수 있으며, 주요한 특징은 균열 선단에서 발생하는 새로운 파면의 형성이라는 파괴 현상을, 균열 선단의 역학적 상태 즉 응력 또는 변형률 상태를 해석 또는 실험으로 결정할 수 있다는 것이다. 균열 선단의 역학적인 문제는 많은 연구자가 해석 및 실험으로 특징을 파악하였다. 그러나 미소 균열의 역학적인 문제는 미해결된 것이 많다.

Kitagawa와 Takahashi[11]는 표면균열의 비 전파가 0.5mm보다 큰 표면균열 길이에 대해 일정한 하한계응력확대계수와 관련된다는 것을 알았다. 이 크기보다 미소 균열에서는 하한계응력확대계수가 아닌 피로한계와 같은 응력이 매우 작은 결함의 진전을 위한 한계 조건이 되는 천이가 나타났다. Frost[12]는 S가 미소 균열 데이터를 분석하는 데 유용한 작용 응력 진폭인 파라미터(S^3I)를 찾았습니다. 그는 이 파라미터가 균열이 형성되더라도 전파되지 않는 한계값을 갖는다고 결론지었다. 그는 또한 피로한도 이상의 응력에 대해 균열 길이를 임의로 선택할 수는 없지만, 입자 크기 순서의 제한된 최소 크기를 가져야 한다고 제안했다. 타원형 노치에 대한 Neuber의 응력 집중 계수를 기반으로, 참고 문헌 [13]에 제공된 토론에서 Levy는 최소 전파 응력을 결정하는 식을 도출했다. 그는 평면 피로 한계에 도달하면 균열이 진전할 것이라고 가정했습니다. Pearson[14]은 미소 균열에 대한 성장률은 약 (0.13mm)보다 큰 균열 길이에 대한 긴 균열을 기반으로 한 성장 법칙에서 예측한 경향이 있지만, 매우 미소 균열의 평균 균열 성장률은 이 법칙으로 예측하는 것보다 훨씬 빠르다는 것을 알았다. Dowling[15]은 역시 미소 균열 (길이 0.18mm 미만)은 긴 균열에 대한 데이터에서 예측한 것보다 훨씬 큰 피로 균열 성장률을 관찰했다. Schijve[16]와 Jacobs[17]는 노치 시험편과 평활 시험편에서 미소 균열에 대한 균열 진전이 긴 균열과 다른 균열 성장률을 한다는 것을 알았다. 이같이 미소 균열은 긴 균열의 진전과는 다른 특성을 나타내므로, 미소 균열에 대한 평가가 필요하게 되

었다. Haddad 등[18]은 균열 길이 l 에 미소 균열 길이 l_0 를 더하여 $l+l_0$ 를 사용하여, 하한계응력확대계수의 균열 길이 의존성을 평가하는 식을 제안하였다. Tange 등[19]은 Haddad 등의 식에서 l_0 를 제거하여 편리한 식을 유도하였다. 한편 Ando 등[20-23]은 피로 특유의 소성 거동과 응력비를 고려한 하한계응력확대계수의 균열 길이 의존성을 평가할 수 있는 식을 제안하였다. 이 식에 의하여 미소 균열에 따르는 및 피로한도를 정량적으로 평가할 수 있었다.



1.2 연구의 목적

균열에 의한 파괴는 파괴역학의 발전으로 정량적으로 취급할 수 있게 되었다. 파괴역학에 의한 하한계응력확대계수는 긴 균열로 결정하고, 이것으로 균열이 진전하여 파괴할 것인지? 균열이 진전하지 않고 정지할 것인지를 판정한다. 금속재료는 거시적으로 결함이 없다고 하지만, 미시적으로 보면 결정 결함 등 수많은 결함을 가지고 있다. 이러한 결함은 응력 집중을 받게 되고, 반복 응력으로 돌출과 함몰 현상으로 작은 (micro) 균열로 발전한다. 미소 균열은 계속되는 반복 응력으로 큰 균열이 되고, 궁극적으로 구조물은 파괴에 이른다.

많은 연구자는 피로 파괴 연구를 수행하였으며, 긴 균열에 대한 하한계응력확대계수 문제를 평가하였다. 또한, 일부 연구자는 피로 균열 발생 초기의 문제를 해결하기 위하여 전자현미경으로 프랙토그래피적으로 해석하였다. 미소 균열에 대한 파괴 역학적인 문제는 Tange 등이 Haddad 등의 식을 수정하여, 하한계응력확대계수와 피로한도를 평가하였다. 한편, Ando 등은 균열 선단의 소성역 크기를 고려하여, 미소 균열에 대한 평가식을 제안하였다.

본 연구의 목적은 수소저장 탱크용 배관재료인 Ni 12% STS316L을 사용하여, 긴 균열의 하한계응력확대계수와 피로한도를 결정하였다. 이 값들과 Ando 식을 사용하여 미소 균열의 하한계응력확대계수와 피로한도를 평가하였다.

1.3 논문의 구성 및 개요

제1장 : 본 연구의 배경과 목적을 설명하였다.

제2장 : 본 연구는 미소 균열문제를 통합적으로 취급할 수 있는 Ando 등 및 Tange 등이 제안한 하한계응력확대계수 및 피로한도 평가식을 사용하여, 수소저장 탱크용 입출구 배관재료 STS316L의 균열 크기에 따르는 하한계응력확대계수 및 피로한도를 평가하였다. 또한, 스프링강 SUP9A의 굽힘 피로 실험에서 얻어진 결과와도 비교 평가하였다.

제3장 : 본 연구는 저장도·고인성인 STS316L에 미소 균열로 존재하는 관통균열과 표면균열의 피로한도와 하한계응력확대계수를 비교 검토하였다. STS316L은 무한판의 관통균열과 유한판의 반타원형 균열이 존재하고, 무한판 및 유한판에 피로 하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

제4장 : 본 연구는 수소저장용 탱크 입출력 배관 재료(STS316L)의 사용 응력에 대한 안전성을 평가하기 위하여 실시하였다. 먼저 STS316L의 하한계응력확대계수 및 피로한도를 구하고, 이것을 사용하여 균열 크기에 따르는 피로한도 및 하한계응력확대계수를 평가하였다.

또한, 피로한도 감소 비율 및 수소저장 탱크의 최대사용압력 (87.5MPa)에서 균열 크기를 평가하고, STS316L의 안전성을 확인하였다.

제5장 : 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하였다.



참고문헌

- (1) Miller W.S, Zhuang L, Bottema J, Wittebrood A.J, De Smet P, Haszler A, Vieregge A, 2000, “Recent development in aluminium alloys for the automotive industry “, Materials Science and Engineering A, Vol. 280, pp. 37-49.
- (2) Hirsch J, 2014, “Recent development in aluminium for automotive applications “, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 24, pp. 1995-2002.
- (3) Tisza M, Czinege I, 2018, “Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts “, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Vol. 1, pp. 229-238.
- [4] Wang L, Wang B, Wei S, Hong Y, Zheng C, 2016, “Prediction of long-term fatigue life of CFRP composite hydrogen storage vessel based on micromechanics of failure” , Compos Part B: Engineering, Vol. 97, pp. 274-281.
- [5] Behera S, Sahoo S.K, Srivastava L, Srinivasa Gopal A.S, 2019, “Structural integrity assessment of filament wound composite pressure vessel using through transmission technique” , Procedia Structural Integrity, Vol. 14, pp. 112-118.

- [6] Sapre S, Pareek K, Vyas M, 2020, “Investigation of structural stability of type IV compressed hydrogen storage tank during refueling of fuel cell vehicle “, Energy Storage, 2020;2:e150, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 1-11. <https://doi.org/10.1002/est2.150>
- [7] Zhang Q, Xu H, Jia X, Zu L, Cheng S, Wang H, 2020, “ Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction” , Composite Structures, Vol. 236, pp. 111915. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111915>
- [8] Maruyama A, Kono R, Sato Y, Ishizu T, Koseki M, Muranaka Y, 2009, “Automotive Lithium-ion Batteries “, Hitachi Review, Vol. 58, pp. 330-334.
- [9] Ding Y, Cano Z.P, Yu A, Lu J, Chen Z, 2019, “Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives “, Electrochemical Energy Reviews, Vol. 2, pp. 1-28.
- [10] Chen K, Zhao F, Hao H, Liu, Z, 2019, “Selection of Lithium-ion Battery Technologies for Electric Vehicles under China’ s New Energy Vehicle Credit Regulation” , Energy Procedia, Vol. 158, pp. 3038-3044.
- (11) Kitagawa H, and Takahashi S, 1976, “Application of Fracture Mechanics to Very Small Cracks or the Cracks in the Early Stage,“

- 2nd International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, Boston, Mass., Aug. 1976, pp. 627-630.
- (12) Frost N.E, 1959, "A Relation Between the Critical Alternating Propagating Stress and Crack Length for Mild Steel," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 173, No. 35, London, pp. 811-835.
- (13) Neuber H, 1946, "Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Stress Calculation" , J. S. Edwards, Ann Arbor, Michigan.
- (14) Pearson S, 1975, "Initiation of Fatigue Cracks in Commercial Aluminium Alloys and the Subsequent Propagation of Very micro cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 235-247.
- (15) Dowling N.E, 1976, "Crack Growth During Low Cyclic Fatigue of Smooth Axial Specimens," Scientific Paper 76-1E7-PALFA-P2, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, Pennsylvania, 15235, June, 1976, also see ASTM-STP 637, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1978.
- (16) Schijve J, 1966, "Significance of Fatigue Crack in Micro-Range and Macro-Range," Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 415-459.
- (17) Schijve J, Jacobs F.A, 1964, "Fatigue Crack Propagation in

- Unnotched and Notched Aluminum Alloy Specimens," National Aerospace Laboratory, Amsterdam, May, 1964, NLRTR M2128.
- (18) El Haddad M.H, Smith K.N, Topper T.H, 1979, "Fatigue Crack Propagation of micro cracks" , Transactions of the ASME, Vol. 101, pp. 42-46.
- (19). Tange A, Akutu T, Takamura N, 1991, "Relation between shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel ", Japan Society of Spring Engineers, Vol. 36, pp. 47-53.
- (20) Ando K, Fueki R, Nam K.W, Matsui K, Takahashi K, 2019, "A Study on the Unification of the Threshold Stress Intensity Factor for Micro Crack Growth ", Japan Society of Spring Engineers, Vol. 64, pp. 39-44.
- (21) Ando K, Nam K.W, Kim M.H, Ishii T, Takahashi K, 2020, "Analysis of Peculiar Fatigue Fracture Behavior of Shot Peened Steels Focusing on Threshold Stress Intensity Factor Range" , Japan Society of Spring Engineers, Vol. 65, pp. 35-41.
- (22) Ando K, Nam K.W, Kim M.H, Takahashi K, 2020, "Improvement of Reliability of Fatigue Properties of High Strength Steel Applying Surface Crack Non-damaging Technology" , High Pressure Institute of Japan, Vol. 58, No. 5, pp. 263-271.

(23) Ando K, Kim M.H, Nam K.W, 2020, “Analysis on peculiar fatigue fracture behaviour of shot peened metal using new threshold stress intensity factor range equation” , Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. (in printing)



제2장

Ando와 Tange 식으로 미소 균열의 평가



2.1 서언

선형파괴역학의 응력확대계수(K)는 균열문제를 정량적으로 취급할 수 있으며, 취성균열 발생조건, 피로 균열, 수소취성 균열 및 응력부식 균열 등 균열 성장 속도를 설명할 수 있다. 이같이 결함평가 규격은 응력확대계수를 이용하여 제정되고, 구조물의 안전성 평가 등에 적용되고 있다.

그러나 선형파괴역학은 등방, 등질 및 탄성체를 가정하고 있다. 그러나 균열 선단에 형성되는 비선형 영역의 크기가 균열 길이에 비하여 무시할 수 없을 때, 긴 균열의 하한계응력확대계수(ΔK_{th})보다 작은 K 에서 균열이 성장한다.[1,2] 비선형 영역은 금속에서는 소성 영역 및 조대결정립, 세라믹에서는 매우 미세한 균열 분산영역 및 결정립의 영향을 들 수 있다.[3,4] 이 문제는 미소 균열의 ΔK_{th} 문제라 부른다. 금속의 피로한도는 일찍부터 특성이 거의 해명되고, 유익한 제안이 있다.[2,5-8] 금속의 취성파괴는 피로한도보다 약간 늦었지만, 미소 균열의 ΔK_{th} 는 비선형 영역의 영향을 고려한 연구가 있다.[1] 이처럼 피로한도나 취성파괴의 미소 균열 ΔK_{th} 문제는 연구가 많이 실시되었지만[2-8], 취성파괴, 피로파괴, 수소취성 및 응력부식균열 등의 미소 균열문제를 통합하여 설명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 미소 균열 문제를 통합적으로 취급할 수 있는

Ando 등[9]이 제안한 식(ΔK_{th})과 Tange 등[8]이 제안한 식(ΔK_{th})을 사용하여, 수소저장 탱크용 입출구 배관재료 STS316L의 미소 균열 크기에 따르는 하한계응력확대계수(ΔK_{th}^R) 및 피로한도 $\Delta\sigma_{wc}^R$ 를 평가하였다. 또한, 스프링강 SUP9A의 굽힘 피로 실험에서 얻어진 결과[10]는 비교를 위하여 평가하였다.



2.2 평가방법

Ando 등은 피로 균열 진전의 ΔK_{th} 의 균열 길이 의존성을 평가하는 식(2.1)을 제안하여, 피로의 소성 거동과 응력비에 따른 타당성을 검정하였다. 식(2.1)은 무한판의 관통균열의 평가식이다.[9]

$$\Delta K_{th}^R = 2\Delta\sigma_w^R \sqrt{\frac{l}{\pi}} \cos^{-1} \left[\left\{ \frac{\pi}{8l} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\Delta\sigma_w^R} \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right] \quad (2.1)$$

여기서 ΔK_{th}^R 및 $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 각각 응력비R에서 임의 균열 및 긴 균열의 하한계응력확대계수, $\Delta\sigma_w^R$ 는 응력비 R일 때의 평활시험편의 피로한도, l 은 무한판 중의 관통균열 길이 절반이다. 또 응력비R에서 균열시험편의 피로한도 $\Delta\sigma_{wc}^R$ 는 무한판의 경우, 다음 식(2.2)로 나타낸다.

$$\Delta K_{th}^R = \Delta\sigma_{wc}^R \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

식(2.1)과 (2.2)는 유한판의 반타원형 균열에 적용하는 경우, 식(2.3) 및 (2.4)의 등가 균열 길이(l_e)를 식(2.1) 및 (2.2)의 l 에 대입한다.

$$\sqrt{\pi l_e} = \alpha_A \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

$$\sqrt{\pi l_e} = \beta_A \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

여기서 a 는 반타원형 균열 깊이, α_A 및 β_A 는 각각 유한판의 시험편이 인장 응력 또는 굽힘 응력을 받는 경우, 균열 최심부에서 Newman-Raju 식[11]으로 주어지는 형상보정계수이다. 최표면부에 상당하는 l_e 를 평가하는 경우에는 α_A 및 β_A 를 α_C 및 β_C 로 바꾸면 된다.

유한판 중의 반타원형 표면균열의 응력확대계수 K 는 Newman-Raju 식 [11]으로 평가할 수 있다. Fig. 2.1과 같이 유한판 중에 길이 $2c$, 깊이 a 의 반타원형 표면균열이 인장 응력(σ_t) 또는 굽힘 응력(σ_b)을 받는 경우의 응력확대계수 K 는 식(2.5)와 식(2.6)으로 구할 수 있다.

$$K = \frac{F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)}{\sqrt{Q\left(\frac{a}{c}\right)}} \sigma_t \sqrt{\pi a} = \alpha \sigma_t \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

$$K = \frac{H\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right) F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)}{\sqrt{Q\left(\frac{a}{c}\right)}} \sigma_b \sqrt{\pi a} = \beta \sigma_b \sqrt{\pi a} \quad (2.6)$$

여기서 α 및 β 는 각각 인장 응력 및 굽힘 응력을 받는 경우의 함수를 정리한 것이다. 즉, F 및 Q 는 형상보정함수, H 는 굽힘 응력을 받는 형상보정함수, t 는 판 두께, b 는 폭의 절반, c 는 표면균열 길이의 절반, ϕ 는 K 를 평가하는 반원형 표면균열의 각이다.

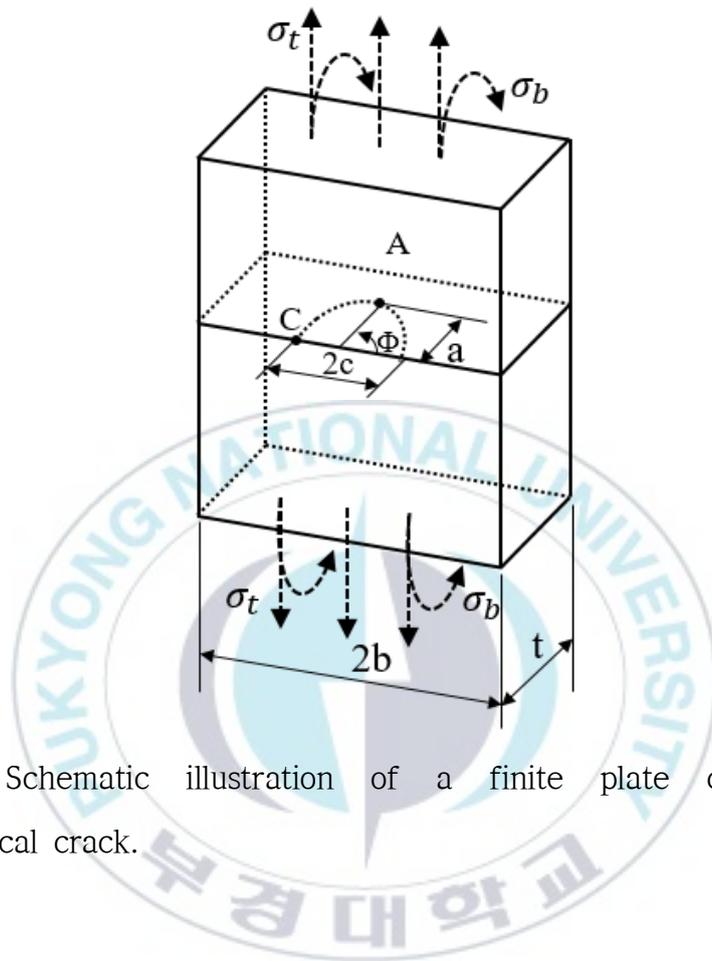


Fig. 2.1 Schematic illustration of a finite plate containing a semi-elliptical crack.

Tange 등[8]은 Haddad 등[5]의 식을 수정하여, ΔK_{th} 와 $\Delta\sigma_w^R$ 의 관계식을 유도하였다. Haddad 등은 균열 길이 l 에 미소 균열 길이 l_o 를 더한 $l+l_o$ 에서, ΔK_{th} 의 균열 길이 의존성에 관한 식(2.7)을 제안하였다.[8]

$$\Delta\sigma_{wl}^R = \frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\gamma\sqrt{\pi(l+l_o)}} \quad (2.7)$$

$$\Delta K = \gamma\Delta\sigma\sqrt{\pi l} \quad (2.8)$$

$$l_o = (1/\pi)(\Delta K_{th(l)}^R/\gamma\Delta\sigma_w^R)^2 \quad (2.9)$$

여기서 γ 는 형상보정함수, $\Delta\sigma_{wl}^R$ 은 균열 길이 l 일 때의 피로한도이다. Tange 등은 식[9]를 식(2.7)에 대입하여, 식(2.10)을 얻었다.[8]

$$\Delta K_{th}^R = \gamma\Delta\sigma_{wc}^R\sqrt{\pi l} = \frac{\Delta K_{th(l)}^R\sqrt{l}}{\left[l + \frac{1}{\pi}\left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\gamma\Delta\sigma_w^R}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (2.10)$$

깊이 a 의 반타원형 표면균열이 존재하는 유한판의 ΔK_{th}^R 의 평가는 l 대신에 a 를 대입하고, γ 는 각각 인장응력 및 굽힘 응력의 경우, 식(2.5) 및 식(2.6)을 대입한다.

2.3 평가에 사용한 재료 특성

Table 2.1은 수소저장 탱크의 입출구 배관재료 STS316L의 평활재의 인장 피로실험에서 얻은 결과다. Tabel 2.1에서 SUP9A는 굽힘 피로실험에서 얻어진 Takahashi의 결과[10]를 비교하기 위하여 나타내었다. 균열 길이에 대한 하한계응력확대계수 ΔK_{th}^R 및 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 Ando 등이 제안한 식(2.1)과 Tange 등이 제안한 식(2.10)을 사용하여, 평가하였다. 여기서 $\Delta\sigma_w^R$ 은 평활재의 피로한도이고, $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 긴 균열의 하한계응력 확대계수이다. STS316L은 응력비R = 0.1의 결과이고, SUP9A는 응력비R = 0의 결과이다.

Table 2.1 Experimental data of STS316L and SUP9A for evaluation.

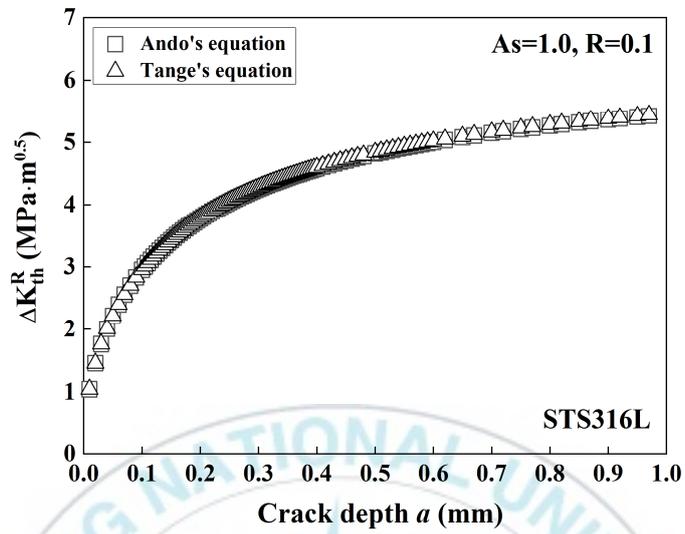
	b (mm)	t (mm)	As (a/c)	R	$\Delta\sigma_w^R$ (MPa)	$\Delta K_{th(l)}^R$ (MPa · m ^{1/2})
STS316L	10	4	1, 0.4	0.1	285	6.3
SUP9A	10	3	1	0	880	7.5



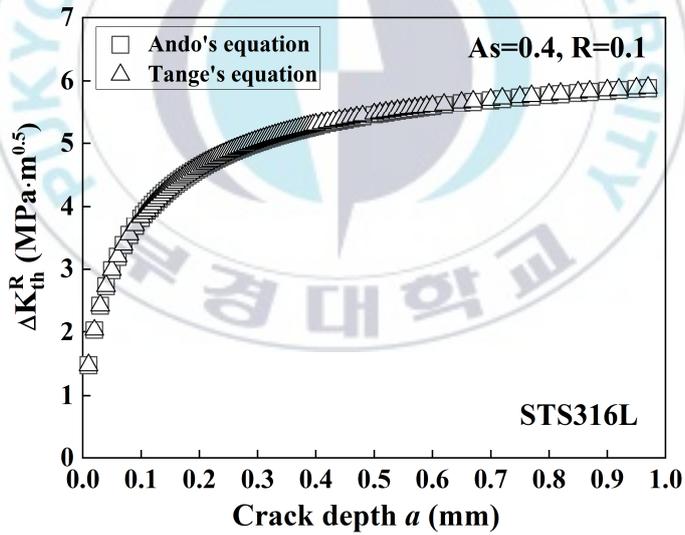
2.4 평가 결과 및 고찰

2.4.1 하한계응력확대계수의 균열 크기 의존성

Fig. 2.2는 STS316L에서 얻어진 ΔK_{th}^R 의 균열 크기 의존성을 나타낸다. (a)는 $A_s = 1.0$ 의 경우이고, (b)는 $A_s=0.4$ 의 경우이다. (a), (b)에서 ΔK_{th}^R 은 균열 크기에 의존하고, 균열이 증가함에 따라서 증가하였다. 수렴값은 $\Delta K_{th(l)}^R$ 이다. $\Delta K_{th(l)}^R$ 에 도달하는 균열 크기는 균열 형상에 크게 의존한다. 재료의 $\Delta K_{th(l)}^R$ 가 클수록, $\Delta\sigma_w^R$ 가 작을수록 ΔK_{th}^R 가 $\Delta K_{th(l)}^R$ 에 수렴하는 균열 크기는 길어진다. STS316L은 $\Delta K_{th(l)}^R = 6.3 MPa\sqrt{m}$ 이고, $\Delta\sigma_w^R = 285MPa$ 로 작으므로 $\Delta K_{th(l)}^R$ 에 수렴하는 균열 크기가 증가하였다. 즉, 균열 깊이 0.2mm에서 $A_s = 1.0$ 은 $\Delta K_{th}^R = 3.8MPa\sqrt{m}$, $A_s = 0.4$ 는 $\Delta K_{th}^R = 4.6MPa\sqrt{m}$ 이며, 0.9mm에서 $A_s=1.0$ 은 $\Delta K_{th}^R = 5.4MPa\sqrt{m}$, $A_s=0.4$ 는 $\Delta K_{th}^R = 5.8MPa\sqrt{m}$ 이었다. 미소 균열 형상비는 피로에 의한 균열이 깊이 방향으로 먼저 진전하기 때문에, $A_s = 0.4$ 의 ΔK_{th}^R 이 크게 나타났다. 또한, STS316L의 $\Delta K_{th(l)}^R$ 과 $\Delta\sigma_w^R$ 특성으로 인하여 ΔK_{th}^R 은 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. $\Delta K_{th(l)}^R = 6.3 MPa\sqrt{m}$ 에 수렴하는 균열 크기는 $A_s = 1.0$ 에서 약 5mm, $A_s = 0.4$ 에서 약 3mm로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 2.2 Evaluation results of ΔK_{th}^R for STS316L.

Fig. 2.3은 스프링강 SUP9A에서 얻어진 ΔK_{th}^R 의 균열 크기 의존성을 나타낸다. 스프링강 SUP9A는 STS316L과 비슷한 경향을 나타내지만, $\Delta K_{th(l)}^R = 7.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이고, $\Delta\sigma_w^R = 880\text{MPa}$ 로 매우 큰 값이므로 0.4mm에서 ΔK_{th}^R 이 수렴하였고, $\Delta K_{th(l)}^R$ 에 수렴하는 균열 크기는 약 5mm로 나타났다.



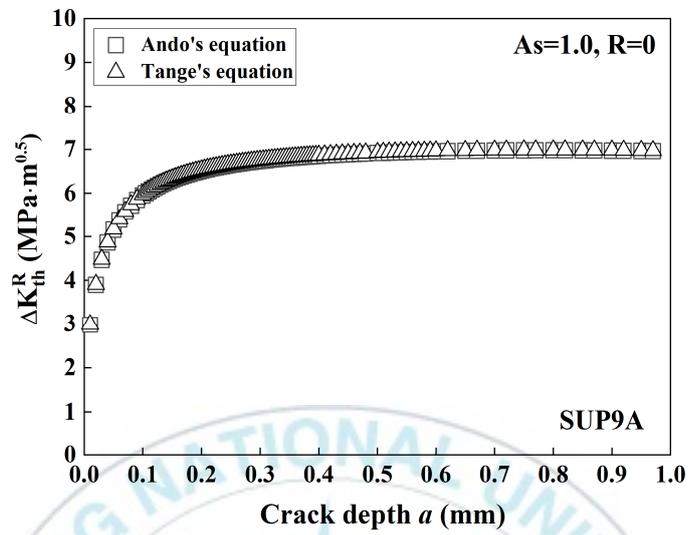
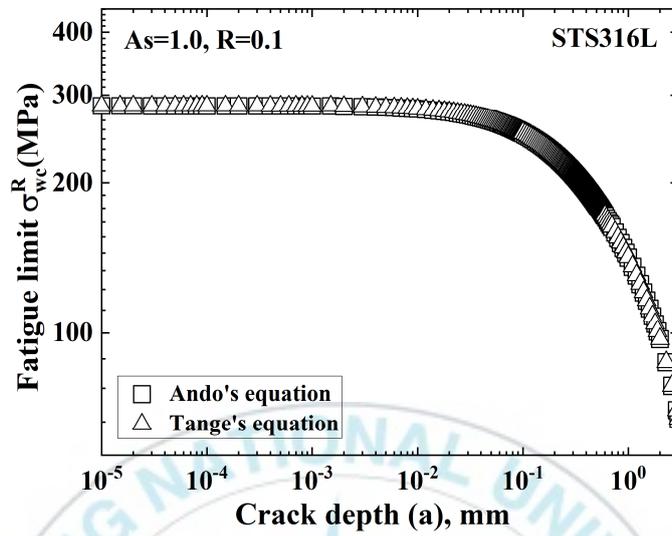


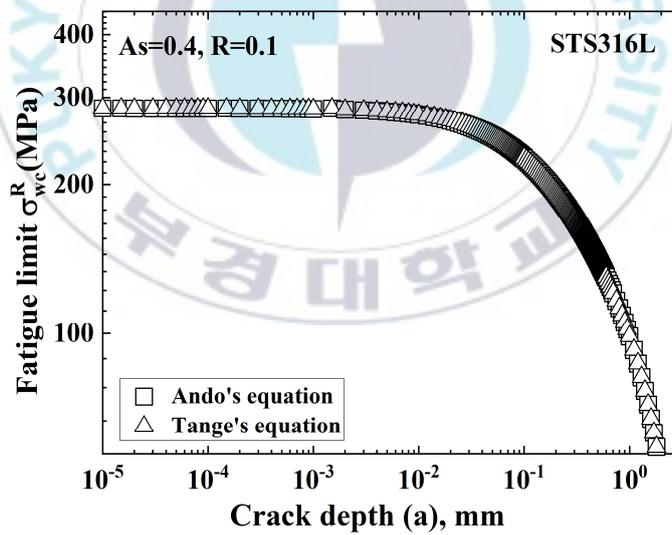
Fig. 2.3 Evaluation results of ΔK_{th}^R for SUP9A.

2.4.2 피로한도의 균열 크기 의존성

Fig. 2.4는 STS316L에서 얻어진 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 의 균열 크기 의존성을 나타낸다. (a)는 $A_s = 1.0$ 의 경우이고, (b)는 $A_s = 0.4$ 의 경우이다. (a), (b)에서 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 균열 크기에 의존하고, 균열이 길어짐에 따라서 감소한다. 균열 재의 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 균열 크기가 0.01mm까지 거의 일정하지만, 그 후에는 $A_s = 0.4$ 가 더 급격하게 감소하였다. $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 재료 특성인 $\Delta K_{th(l)}^R$ 및 $\Delta\sigma_w^R$ 에 매우 의존한다. 즉 $\Delta K_{th(l)}^R$ 및 $\Delta\sigma_w^R$ 가 작은 것이 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 가 $\Delta\sigma_w^R$ 에 근사하는 균열 크기가 길다. STS316L은 $\Delta K_{th(l)}^R = 6.3 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이고, $\Delta\sigma_w^R = 285\text{MPa}$ 로 작으므로 $\Delta\sigma_w^R$ 에 근사하는 균열 크기가 SUP9A보다 크게 나타났다. 즉, 균열 깊이 0.04mm에서 $A_s = 1.0$ 은 $\Delta\sigma_{uc}^R = 270\text{MPa}$, $A_s = 0.4$ 는 $\Delta\sigma_{uc}^R = 256\text{MPa}$ 이며, 0.01mm에서 $A_s = 1.0$ 은 $\Delta\sigma_{uc}^R = 281\text{MPa}$, $A_s = 0.4$ 는 $\Delta\sigma_{uc}^R = 277\text{MPa}$ 이었다.



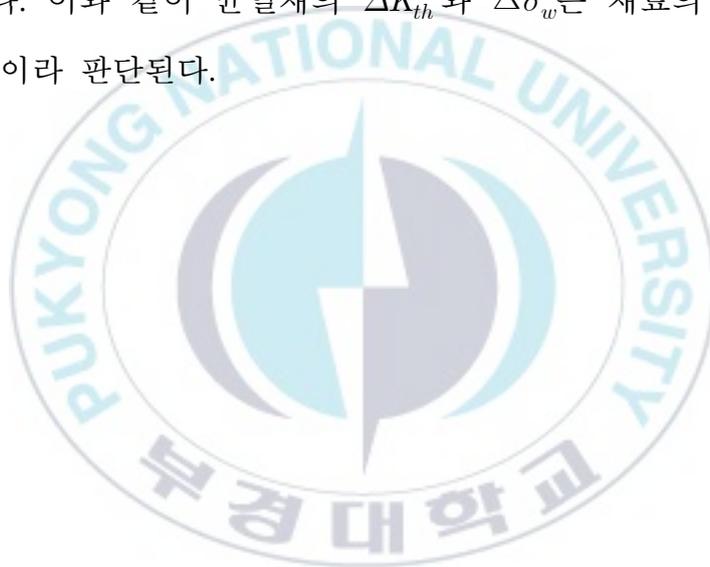
(a)



(b)

Fig. 2.4 Evaluation results of $\Delta\sigma_{wc}^R$ for STS316L.

Fig. 2.5는 스프링강 SUP9A에서 얻어진 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 의 균열 크기 의존성을 나타낸다. 스프링강 SUP9A는 STS316L과 비슷한 경향을 나타내지만, 균열재의 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 균열 길이 0.001mm까지 거의 일정하였다. 이것은 STS316L보다 10배 짧은 것이다. 이것은 $\Delta K_{th(l)}^R = 7.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이고, $\Delta\sigma_w^R = 880\text{MPa}$ 로 상당히 큰 값이므로 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 에 근사하는 균열 길이가 짧게 나타난다. 이와 같이 균열재의 ΔK_{th}^R 와 $\Delta\sigma_w^R$ 는 재료의 강도 의존성이 강한 것이라 판단된다.



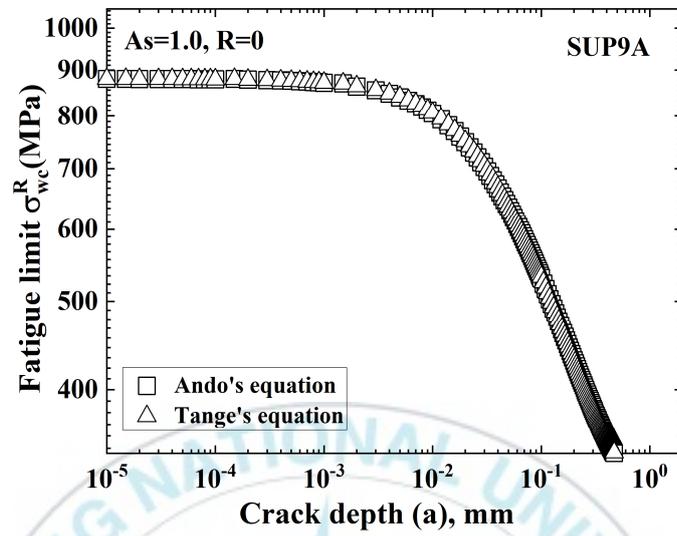
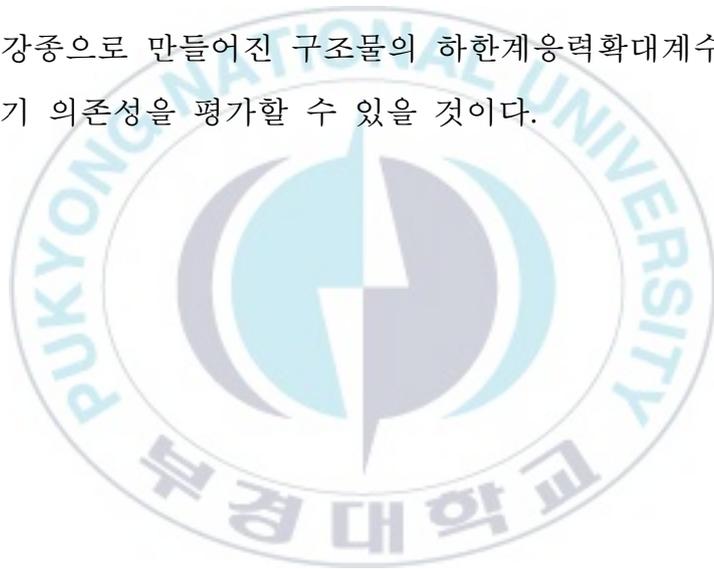


Fig. 2.5 Evaluation results of $\Delta\sigma_{wc}^R$ for SUP9A.

식(2.1)과 식(2.10)에서 얻어진 ΔK_{th}^R 와 $\Delta \sigma_w^R$ 의 균열 크기 의존성은 매우 잘 일치하였다. 균열 형상비(As) 및 강종에 관계없이 두 식은 매우 잘 일치하였다. 이 결과에서 Haddad 논문의 피로한도는 Ando 등의 식(2.1)로 평가할 수 있을 것이다. Haddad 등은 초기 균열 길이와 반복 응력에 의하여 성장한 미소 균열 길이를 합하여, 균열 길이에 의존하는 ΔK_{th}^R 의 평가식을 유도하였다. 반면, Ando 등은 균열 크기에 의존하지 않는 반복 응력에 의한 Dugdale 모델 소성역의 크기로 ΔK_{th}^R 의 평가식을 유도하였다. 이와 같이 기본적인 개념과 식의 형태가 다른 것임에도 불구하고 식(2.1)과 식(2.10)에 의한 ΔK_{th}^R 가 거의 비슷하였다. 이것은 반복 응력에 의한 미소 균열의 크기나 Dugdale 모델의 소성역 크기가 소규모 항복 범위를 만족하기 때문에 유사한 결과를 나타내었다고 판단된다.

2.5 결론

피로균열 선단의 소성역을 고려하여 제안한 Ando 등의 식과 Haddad 등의 식을 수정한 Tange 등의 식으로 STS316L 및 SUP9A의 균열 크기에 따르는 ΔK_{th}^R 및 $\Delta\sigma_w^R$ 를 평가하였다. 식의 유도 개념과 형태가 다름에도 불구하고 ΔK_{th}^R 및 $\Delta\sigma_w^R$ 는 완전하게 일치하였다. 이들 식을 사용하여 모든 강종으로 만들어진 구조물의 하한계응력확대계수와 피로한도의 균열 크기 의존성을 평가할 수 있을 것이다.



참고문헌

- (1) Milne I, Ainsworth R.A, Dowling A.R, Stewart A.T, 1986, “Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects” , CEGB Report R/H/R6-Rev. 3.
- (2) Kitagawa H, Takahashi S, 1976, “Applicability of Very Small Cracks or Cracks in Early Stage,” Proceedings of the second international conference on mechanical Behavior of materials. ASM International, Metals Park, OH, pp. 627~631.
- (3) De Los Rios E.R, Ando K, Biddulph R.H, 1990, “Fracture and Defect assessment of Ceramics Composites,” Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures” , Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. Vol. 13, No. 4, pp. 431~442.
- (4) Iwase M, Ando K, Ogura N, 1990, “Process Zone Size Fracture Criterion for Ceramics,” Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (A), Vol. 56, No. 531, 2353~2358.
- (5) El Haddad M.H, Topper T.H, Smith K.N, 1979, “Prediction of Non-Propagating Cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573~584.
- (6) Frost N.E, Dugdale D.S, 1957, “Fatigue tests on notched mild steel plates with measurements of fatigue cracks” , Journal of the

- Mechanics and Physics of Solids, Vol. 5, pp. 182~192.
- (7) Tanaka K, Nakai Y, Yamasita M, 1981, "Fatigue growth threshold of small cracks" , International Journal of Fracture, Vol. 17, pp. 519~533.
- (8) Tange A, Akutu T, Takamura N, 1991, "Relation between Shot-Peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel," Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 1991, No. 36, pp. 47~53.
- (9) Ando K, Fueki R, Nam K.W, Matsui K, Takahashi K, 2019, "A Study on the Unification of the Threshold Stress Intensity Factor for Micro Crack Growth," Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 64, pp. 39~44.
- (10) Takahashi K, Amano T, Hanaori K, Ando K, Takahashi F, 2009, "Improvement in Fatigue Limit by Shot Peening of High-strength Steel Specimens Containing Crack-like Surface defect," Journal of the Society of Materials Science of Japan, Vol. 58, No. 12, pp. 1030~1036.
- (11) Newman Jr J.C, Raju I.S, 1981, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185~192.

제3장

미소 관통 균열과 표면 미소 균열의 평가



3.1 서언

선형파괴역학에서 미소 균열에 대한 금속[1] 및 세라믹[2,3]의 파괴인성(K_c)과 피로균열진전의 하한계응력확대계수(ΔK_{th})는 균열 크기[4]에 의존한다. 미소 균열의 한계값은 균열 크기가 증가함에 따라서 증가하지만, 어느 크기 이상에서는 균열 크기에 의존하지 않고 일정하게 된다.[5-8] 선형파괴역학은 균열선단부에 발생하는 소성영역이나 비선형영역이 균열 크기에 비하여 매우 작은 것을 전제로 하고 있다. 그러나 미소 균열은 이 조건을 만족하지 않기 때문에 일정하게 되지 않는다.

Tange 등[9]은 Haddad 등[10]이 제안한 식을 수정하여 미소 균열 크기에 따르는 하한계응력확대계수와 피로한도($\Delta\sigma_w$)의 관계식을 유도하였다. Ando 등[11-14]은 피로 특유의 소성거동과 응력비를 고려하여 피로 균열 진전에 따르는 균열 크기 의존성의 하한계응력확대계수 및 피로한도의 평가식을 제안하였다. 하한계응력확대계수는 균열 크기에 의존하지 않는 긴 균열의 $\Delta K_{th(l)}$ 와 균열 크기에 의존하는 미소 균열의 $\Delta K_{th(s)}$ 로 나눈다. Ando 등[11-14]의 식은 하한계응력확대계수와 균열 크기 관계를 구할 수 있다. 이 식으로 질화재[15] 및 스프링강[16]의 미소 균열에 대한 피로한도는 정량적으로 평가할 수 있었다. 이같이 고강도 재료의 특성은 평가되었지만, STS와 같은 저장도·고인성 재료의 미소 균열 의존성에 관한 연구가 부족하다. 특히 수소저장용 탱크의 입출력 배관 재료로 사용되는 Ni 12% STS316L의 미소 균열에 대한 피로한

도 및 하한계응력확대계수의 평가는 압력용기 구조물의 안전성 평가를 위하여 매우 중요한 문제이다.

본 연구에서는 저장도·고인성인 STS316L에 미소 균열이 존재하는 관통 균열과 표면 균열의 피로한도와 하한계응력확대계수를 비교 검토하였다. STS316L은 무한판의 관통균열과 유한판의 반타원형 균열이 존재하고, 무한판 및 유한판에 피로하중이 작용하는 것으로 가정하였다.



3.2 재료 및 평가방법

본 연구에 사용한 재료는 수소저장용 탱크의 입출력 배관 재료인 STS316L이다. 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 3.1과 3.2에 나타난다. 평가를 위한 재료 특성은 Table 3.3에 나타난다. 반타원형 균열을 갖는 평가 대상의 구조모델은 Fig. 3.1에 나타내었다. 판폭 $b = 10\text{mm}$, 두께 $t = 4\text{mm}$ 이고, 응력비 $R = 0.1$ 의 인장응력을 받는 경우이다. 반타원형 균열은 균열 깊이 a , 균열 길이 $2c$ 로 정의하고, 형상비(aspect ratio)는 $As=a/c$ 라 한다. 평활재의 피로한도 및 긴 균열의 하한계응력확대계수는 각각 실험에서 얻어진 285MPa 및 $6.3\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 을 사용하였다. 피로한도는 평판 시험편을 사용하여, $R = 0.1$, 반복주파수 $f = 20\text{Hz}$ 의 정현파로 실온에서 실시하였으며, 10^7 회에서 정지하였다. 하한계응력확대계수는 두께 $t = 12.5\text{mm}$ 의 CT 시험편을 사용하여, K 감소시험에서 얻었다.

Table 3.1 Chemical compositions of STS316L.(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
0.01	0.67	1.19	0.035	0.001	12.14	17.41	2.05	0.21

Table 3.2 Mechanical properties of STS316L.

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
313	560	49

Table 3.3 Material characteristics for evaluation.

b (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>As</i> (<i>a/c</i>)	<i>R</i>	$\Delta\sigma_w$ (MPa)	$\Delta K_{th(l)}$ (MPa · m ^{1/2})
10	4	1.0, 0.6, 0.4, 0.2	0.1	285	6.3

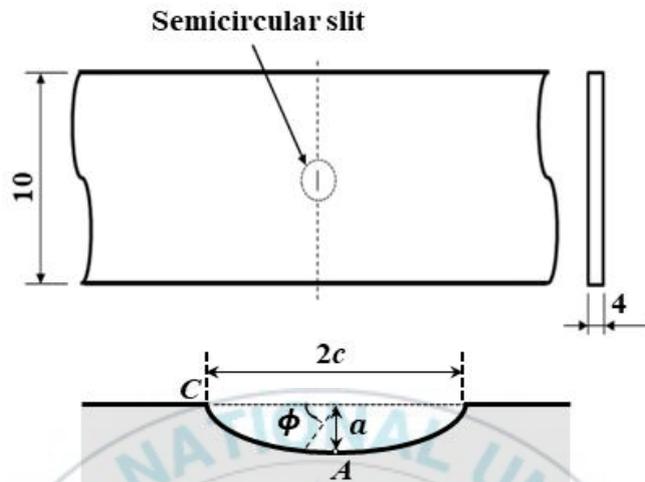


Fig. 3.1 Schematic of a finite plate containing a semicircular crack.

Ando 등[11-14]은 피로균열 진전의 하한계응력확대계수의 균열 길이 의존성을 나타내는 식(3.1)을 제안하였다. 이 식은 피로 특유의 소성거동과 응력비를 조합한 것이다. 식(3.1)은 작은 표면 균열에 대해서는 실험과 좋은 일치율을 나타내었으나, 관통 균열과 비교한 연구는 없다. 또한, 식(3.1)은 Tange 등[9]의 식과 기본적인 개념과 식의 형태가 다름에도 불구하고, 평가 결과는 비슷한 값을 나타내었다.

$$\Delta K_{th} = 2\Delta\sigma_w \sqrt{\frac{l}{\pi}} \cos^{-1} \left[\left\{ \frac{\pi}{8l} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}}{\Delta\sigma_w} \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right] \quad (3.1)$$

여기서 ΔK_{th} 및 $\Delta K_{th(l)}$ 은 각각 임의의 균열 길이 및 긴 균열의 피로 균열전파의 하한계응력확대계수, l 은 무한판의 관통균열 길이 절반이다. 이 식으로 미소 균열을 가지는 질화재[15] 및 스프링강[16]의 피로한도 균열길이 의존성은 응력비에 관계없이 정확하게 평가할 수 있었다. 식(3.1)은 판 폭에 대한 영향은 없으나[17], 사용하는 두께까지만 나타낼 수 있다.

식(3.1)은 무한판에서 피로균열 진전의 하한계응력확대계수의 관통균열 길이 의존성을 나타내는 식이다. 무한판의 관통균열 길이에 대한 피로한도는 식(3.2)로 구할 수 있다.

$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{uc} \sqrt{\pi l} \quad (3.2)$$

여기서 $\Delta\sigma_{uc}$ 는 균열재의 피로한도이다.

식(3.1) 및 (3.2)를 유한판의 반타원형 표면균열에 적용하는 경우, 식(3.3)에 나타내는 등가균열 길이 l_e 를 식(3.1) 및 (3.2)의 l 대신에 대입한다.

$$\sqrt{\pi l_e} = \alpha \sqrt{\pi a} \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)}{\sqrt{Q\left(\frac{a}{c}\right)}}$$

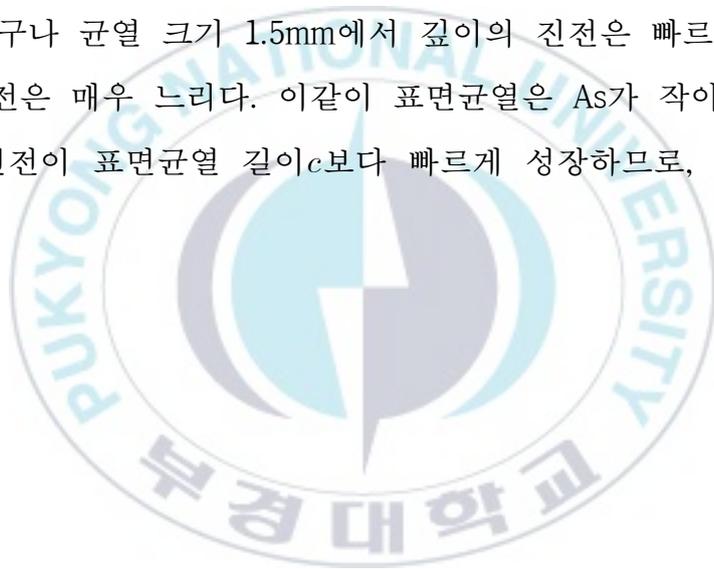
여기서 a 는 반타원형 균열 깊이, α 는 Newman-Raju 식[18]에서 인장 응력을 받는 유한판의 형상보정계수이다. 표면 균열 길이의 l_e 를 평가하는 경우는 a 를 c 로 바꾸면 된다. F 및 Q 는 형상보정함수, c 는 표면균열 길이의 절반, ϕ 는 K 를 평가하는 반원형 표면균열의 각이다.

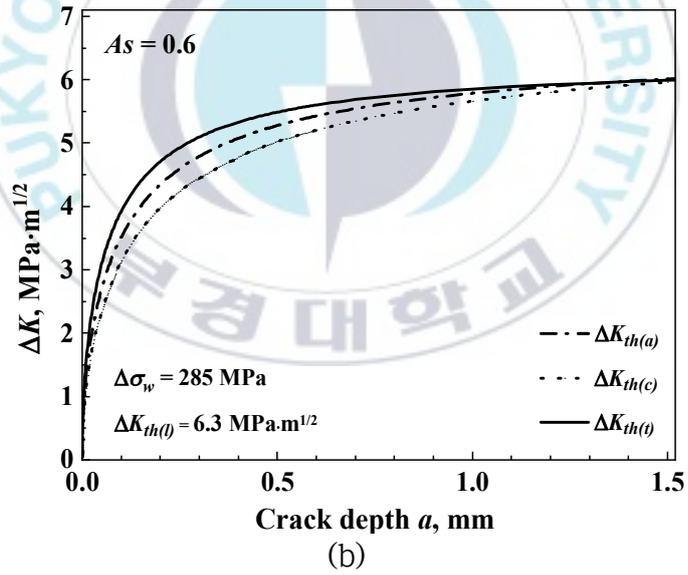
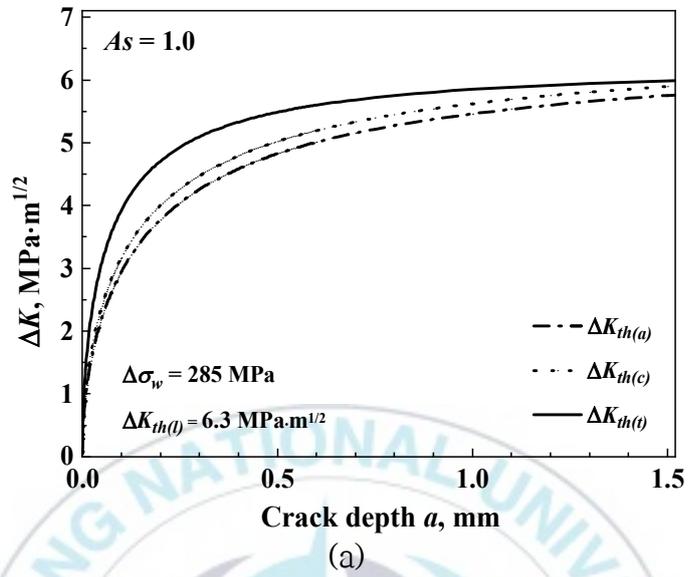
3.3 평가 결과 및 고찰

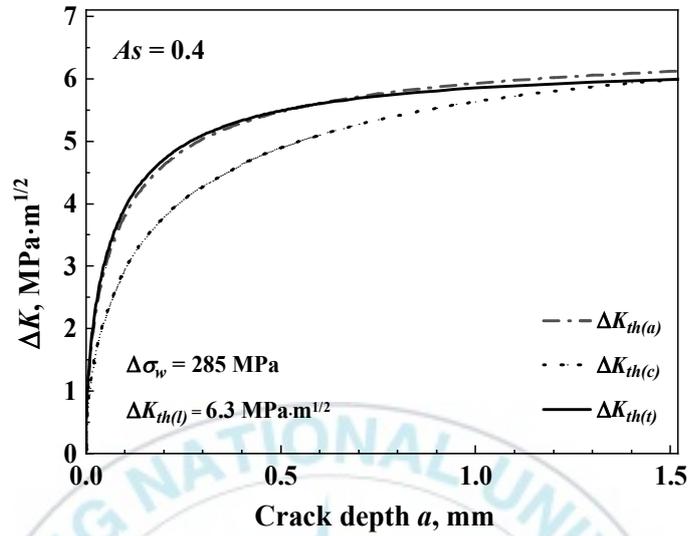
3.3.1 미소 균열에 대한 하한계응력확대계수

Fig. 3.2(a)-(d)는 각각 $A_s = 1.0, 0.6, 0.4$ 및 0.2 인 경우, 균열 깊이 a 와 하한계응력확대계수의 관계를 나타낸 것이다. $\Delta K_{th(t)}$ 는 관통균열의 하한계응력확대계수, $\Delta K_{th(a)}$ 는 반타원형 균열 깊이의 하한계응력확대계수 및 $\Delta K_{th(c)}$ 는 반타원형 균열 길이의 하한계응력확대계수이다. $\Delta K_{th(t)}$ 는 관통균열에 대한 하한계응력확대계수이므로 A_s 에 관계없이 모두 동일하다. 그러나 $\Delta K_{th(a)}$ 및 $\Delta K_{th(c)}$ 는 A_s 에 따라서 균열형상이 변하므로 하한계응력확대계수가 다르다. (a)는 $A_s = 1.0$ 의 경우이다. $\Delta K_{th(t)}$ 는 균열 크기 1.5mm까지 $\Delta K_{th(a)}$ 및 $\Delta K_{th(c)}$ 보다 크다. 한편 $\Delta K_{th(c)}$ 는 $\Delta K_{th(a)}$ 보다 크다. $A_s = 1.0$ 의 표면균열은 반원형 균열이므로 피로 하중에 의하여 표면균열이 깊이보다 빠르게 진전하여 $\Delta K_{th(c)}$ 가 크다. (b)는 $A_s = 0.6$ 의 경우이다. $\Delta K_{th(t)}$ 는 균열 크기 약 1.5mm에서 $\Delta K_{th(a)}$ 및 $\Delta K_{th(c)}$ 와 비슷한 값을 나타내었으나, 그 이전은 $\Delta K_{th(a)}$ 가 $\Delta K_{th(c)}$ 보다 크다. 반타원형 균열은 피로 하중에 의하여 깊이의 균열 진전이 표면보다 빠르게 진전하기 때문이다. 또, 약 1.5mm에서 비슷한 것은 균열 길이 및 깊이가 비슷하게 진전했다는 것을 의미한다. (c)는 $A_s = 0.4$ 의 경우이다. $\Delta K_{th(c)}$ 는 $\Delta K_{th(t)}$ 보다 작지만, $\Delta K_{th(a)}$ 는 균열 크기 약 0.57mm에서

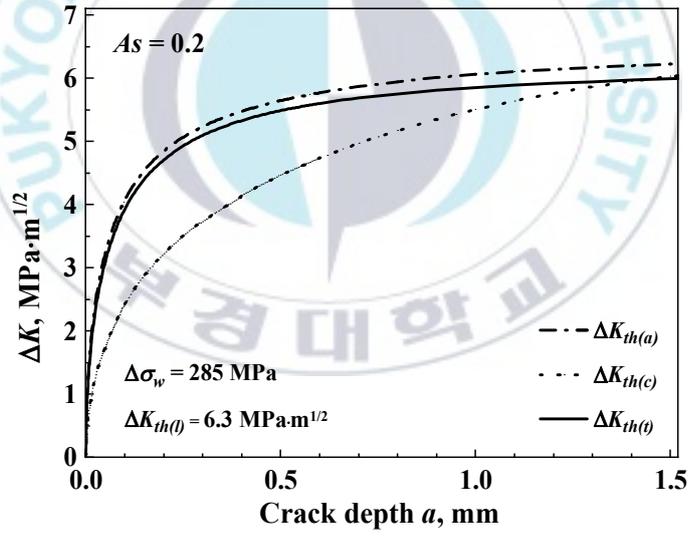
$\Delta K_{th(t)}$ 보다 크다. 이같이 반타원형 균열 형상의 표면균열 길이는 깊이보다 1.25배이므로, 깊이의 균열 진전이 더욱 빠르게 나타난 것이다. 한편 표면균열 길이는 진전이 느리므로 미소 균열에서 $\Delta K_{th(c)}$ 가 $As = 1.0$ 및 0.6보다 작았다. (d)는 0.2의 경우이다. $\Delta K_{th(a)}$ 는 균열 진전 초기부터 $\Delta K_{th(t)}$ 보다 크지만, $\Delta K_{th(c)}$ 는 작다. 이 경우, 반타원형 균열의 표면균열 길이는 깊이보다 2.25배이므로, 깊이의 균열 진전이 매우 빠르게 나타난 것이다. 더구나 균열 크기 1.5mm에서 깊이의 진전은 빠르나, 표면균열 길이의 진전은 매우 느리다. 이같이 표면균열은 As 가 작아짐에 따라서 깊이 a 의 진전이 표면균열 길이 c 보다 빠르게 성장하므로, $\Delta K_{th(a)}$ 의 증가가 크다.







(c)



(d)

Fig. 3.2 Relationship between threshold stress intensity factor and crack depth according to aspect ratio. (a) $As = 1.0$, (b) $As = 0.6$, (c) $As = 0.4$, (d) $As = 0.2$

Table 3.4는 $\Delta K_{th(t)}$ 와 비교하기 위하여 반타원형 균열 깊이 $a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ mm일 때, As에 따르는 $\Delta K_{th(a)}$ 및 $\Delta K_{th(c)}$ 를 나타낸 것이다.

Table 3.4 Comparison of threshold stress intensity factor according to As at crack depth ($a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ mm)

		a(mm)	As			
			0.1	0.3	0.5	0.7
TC		$\Delta K_{th(t)}$	3.927	5.096	5.488	5.687
	SC	1.0	$\Delta K_{th(a)}$	2.949	4.258	4.825
$\Delta K_{th(c)}$			3.171	4.476	5.023	5.335
0.6		$\Delta K_{th(a)}$	3.518	4.791	5.277	5.546
		$\Delta K_{th(c)}$	3.138	4.44	5.021	5.351
0.4		$\Delta K_{th(a)}$	3.811	5.032	5.473	5.713
		$\Delta K_{th(c)}$	2.950	4.266	4.894	5.268
0.2		$\Delta K_{th(a)}$	4.070	5.236	5.645	5.867
		$\Delta K_{th(c)}$	2.430	3.728	4.467	4.968

TC : Through crack, SC : Surface crack

Fig. 3.3은 Table 3.4의 결과를 나타낸 것이다. 각 균열 깊이에서 As 가 작아질수록 $\Delta K_{th(a)}$ 는 증가하였으나, $\Delta K_{th(c)}$ 는 감소하였다. 그러나 균열 깊이가 증가할수록, $\Delta K_{th(a)}$ 및 $\Delta K_{th(c)}$ 는 증가하였다. 상세하게 살펴보면, 반원형 균열인 $As = 1.0$ 은 $a = 0.7\text{mm}$ 까지 $\Delta K_{th(c)}$ (□)가 $\Delta K_{th(a)}$ (■)보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 위에서도 설명하였듯이 반원형 균열은 피로 하중에 의하여 표면균열 길이가 깊이보다 빨리 진전하기 때문이다. 반타원형 균열인 $As = 0.6, 0.4$ 및 0.2 는 $\Delta K_{th(a)}$ (●, ▲, ▼)가 $\Delta K_{th(c)}$ (○, △, ▽)보다 큰 것을 알 수 있다. 반타원형 균열은 피로 하중에 의하여 깊이가 표면 길이에 접근하려고 빠르게 진전하기 때문에 크게 나타난다. $\Delta K_{th(t)}$ 는 $As = 0.4$ ($a = 0.7\text{mm}$)의 $\Delta K_{th(a)}$ 및 $As=0.2$ 의 $\Delta K_{th(a)}$ 보다 작지만, 그 외는 모두 크게 나타났다.

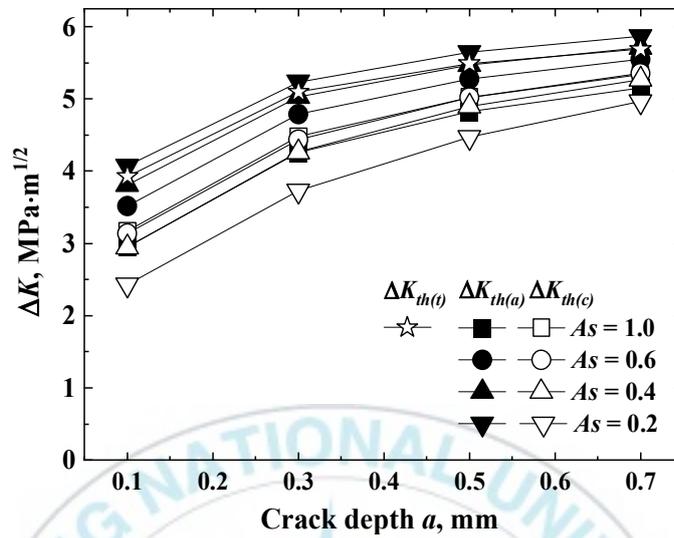


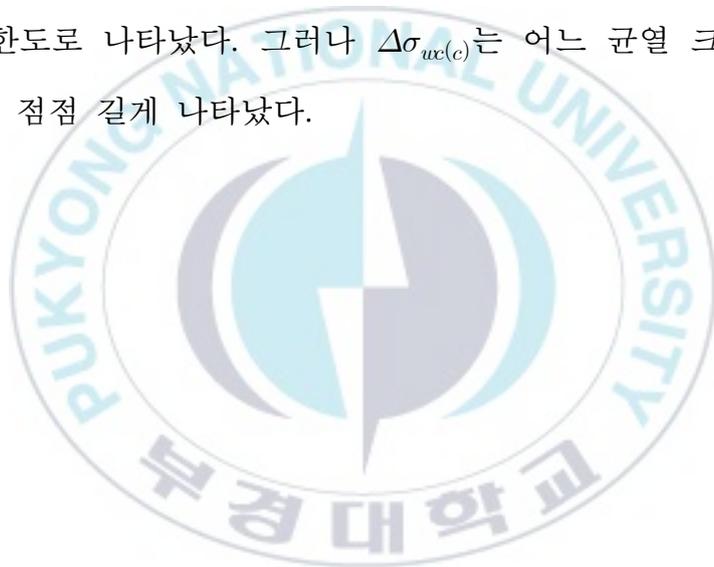
Fig. 3.3 Relationship between threshold stress intensity factor and crack depth ($a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ mm) according to As .

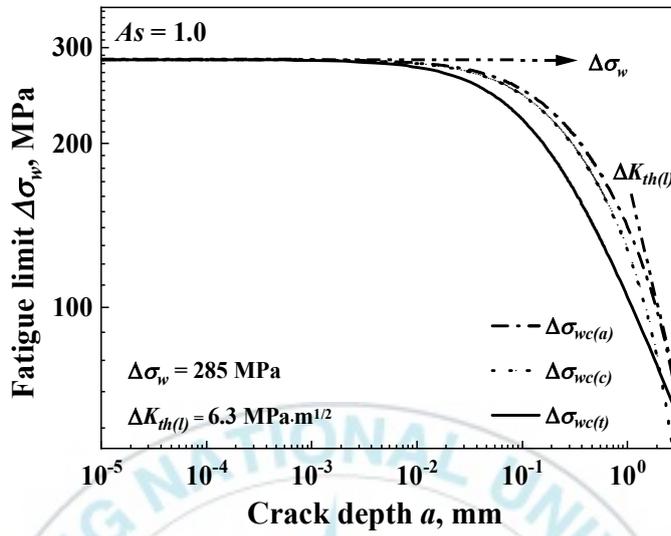
3.3.2 미소 균열에 대한 피로한도

Fig. 3.4(a)-(d)는 각각 $As = 1.0, 0.6, 0.4$ 및 0.2 인 경우, 균열 깊이 a 와 피로한도의 관계를 나타낸 것이다. $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 는 관통균열의 피로한도, $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 는 반타원형 균열 깊이의 피로한도 및 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 는 반타원형 균열 길이의 피로한도이다. $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 는 관통균열에 대한 피로한도이므로 As 에 관계없이 모두 동일하다. 그러나 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 및 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 는 As 에 따라서 균열 형상이 다르므로 피로한도가 변한다. (a)는 $As = 1.0$ 의 경우이다. $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 는 균열 크기 0.003mm 까지는 서서히 감소하였다. 그러나 0.2mm 정도까지는 포물선을 그리며 급속하게 감소하고, 그 이후는 직선으로 감소하였다. 직선으로 감소하는 부분은 As 에 관계없이 큰 균열의 하한계응력 확대계수이다. 한편 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 는 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 보다 약간 짧은 피로한도를 나타내었다. $As = 1.0$ 의 표면균열은 반원형 균열형상이므로 피로 하중에 의하여 표면이 깊이보다 빠르게 진전하기 때문이다. (b)는 $As = 0.6$ 의 경우이다. $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 는 균열 크기 약 1.4mm 에서 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 와 비슷하였다. 그러나 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 는 약간 높게 나타났고, 그 이후는 $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 가 높은 피로한도를 나타내었다. 반타원형 균열은 피로 하중에 의하여 깊이의 균열이 균열 표면보다 빠르게 진전하므로 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 의 감소가 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 보다 빠르다. (c)는 $As = 0.4$ 의 경우이다. $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 는 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 보다 작은 피로한도를 나타내었다. $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 는 균열 크기 약 0.58mm 근처까지는 $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 와 비슷한 피로

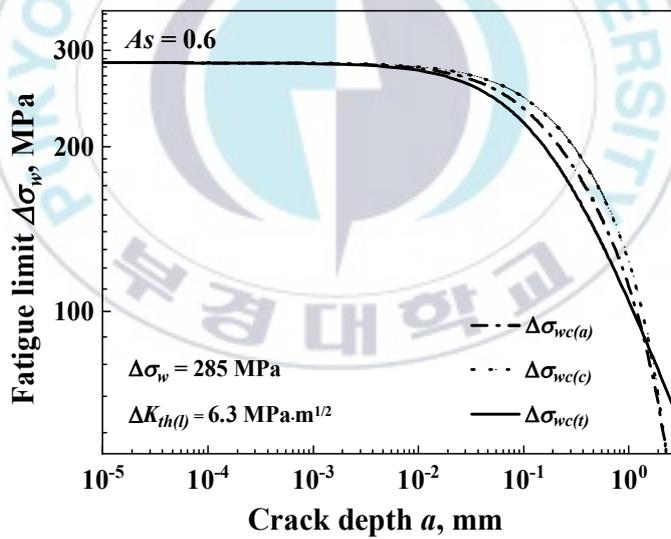
한도를 나타내었으나, 그 이후는 $\Delta\sigma_{uc(a)}$ 가 작게 나타났다. 한편 $\Delta\sigma_{uc(c)}$ 는 $\Delta\sigma_{uc(t)}$ 및 $\Delta\sigma_{uc(a)}$ 보다 피로한도가 길게 나타났으며, 약 1.5mm에서 $\Delta\sigma_{uc(t)}$ 보다 작아졌다. (d)는 $As = 0.2$ 의 경우이다. $\Delta\sigma_{uc(a)}$ 는 균열 진전 초기부터 $\Delta\sigma_{uc(t)}$ 보다 피로한도가 작았으나, $\Delta\sigma_{uc(c)}$ 는 긴 피로한도를 나타내었다.

이같이 $\Delta\sigma_{uc(a)}$ 는 As 가 작아짐에 따라서 $\Delta\sigma_{uc(t)}$ 보다 긴 피로한도에서 작은 피로한도로 나타났다. 그러나 $\Delta\sigma_{uc(c)}$ 는 어느 균열 크기 구간에서 피로한도가 점점 길게 나타났다.

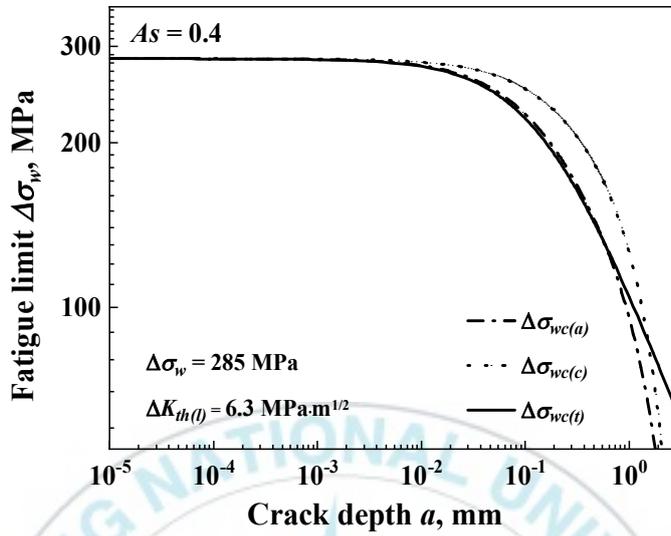




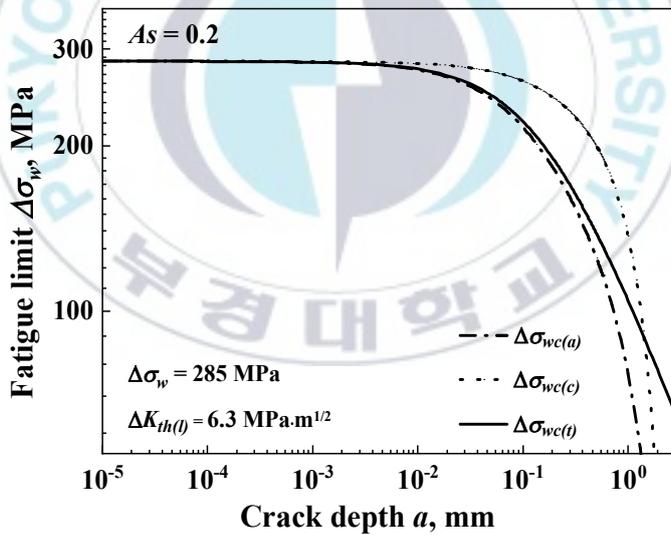
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.4 Relationship between fatigue limit and crack depth according to aspect ratio. (a) $As = 1.0$, (b) $As = 0.6$, (c) $As = 0.4$, (d) $As = 0.2$

Table 3.4는 $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 와 비교하기 위하여 반타원형 균열 깊이 $a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7\text{mm}$ 일 때, A_s 에 따르는 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 및 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 를 나타낸 것이다.

Table 3.4 Comparison of fatigue limit according to A_s at crack depth ($a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7\text{mm}$)

		$a(\text{mm})$	0.1	0.5	1.0	1.5
			A_s			
TC		$\Delta\sigma_{wc(t)}$	221.5	138.4	104.3	87.2
SC	1.0	$\Delta\sigma_{wc(a)}$	251.0	181.6	140.5	114.6
		$\Delta\sigma_{wc(c)}$	245.3	170.4	127.1	98.9
	0.6	$\Delta\sigma_{wc(a)}$	235.2	154.1	111.2	84.3
		$\Delta\sigma_{wc(c)}$	246.1	170.5	123.4	90.9
	0.4	$\Delta\sigma_{wc(a)}$	225.6	139.6	95.5	67.4
		$\Delta\sigma_{wc(c)}$	250.9	177.8	126.1	87.9
	0.2	$\Delta\sigma_{wc(a)}$	216.2	125.1	76.8	44.7
		$\Delta\sigma_{wc(c)}$	262.3	199.4	136.9	81.6

TC : Through crack, SC : Surface crack

Fig. 3.5는 각 균열 깊이 $a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7\text{mm}$ 에서 피로한도의 비교를 나타낸 것이다. As 가 작아질수록 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 는 감소하였으나, $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 는 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 전체적으로 피로한도는 균열 깊이가 증가할수록, As 에 관계없이 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 및 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ 는 감소하였다. 반원형 균열인 $As = 1.0$ 은 피로 하중에 의하여 표면균열 길이가 깊이보다 빨리 진전하기 때문에, $\Delta\sigma_{wc(a)}$ (■)가 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ (□)보다 크다. 반타원형 균열인 $As = 0.6, 0.4$ 및 0.2 는 피로 하중에 의하여 깊이의 균열이 표면균열 길이에 접근하려고 빠르게 진전하기 때문에, $\Delta\sigma_{wc(a)}$ (●, ▲, ▼)가 $\Delta\sigma_{wc(c)}$ (○, △, ▽)보다 감소가 크다. $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 는 $As = 0.4$ ($a = 1.0$ 및 1.5mm)의 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 및 $As=0.2$ 의 $\Delta\sigma_{wc(a)}$ 보다 크지만, 그 외는 $\Delta\sigma_{wc(t)}$ 보다 모두 크다.

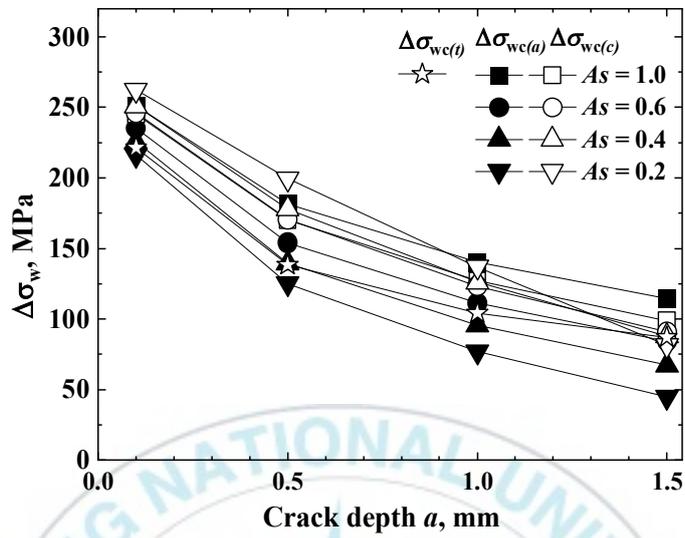


Fig. 3.5 Relationship between threshold stress intensity factor and crack depth ($a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7\text{mm}$) according to aspect ratio.

3.4 결론

본 연구는 STS316L의 무한판에 관통균열과 유한판에 반타원형 균열이 존재하는 경우, 피로 하중에 의한 미소 균열의 피로한도와 하한계응력 확대계수를 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반타원형 균열 깊이의 하한계응력확대계수는 $A_s = 1.0$ 과 0.6 에서 관통균열의 하한계응력확대계수보다 작지만, $A_s = 0.4$ 에서는 거의 비슷하게 평가되었다. 그러나 $A_s = 0.2$ 에서는 크게 평가되었다. 한편, 반타원형 균열 길이의 하한계응력확대계수는 모두 작게 평가되었다.
- (2) 반타원형 균열 깊이의 피로한도는 $A_s = 1.0$ 과 0.6 에서 관통균열의 피로한도보다 크게 평가되었지만, $A_s = 0.4$ 에서는 거의 비슷하였다. 그러나 $A_s = 0.2$ 에서는 작게 평가되었다. 한편, 반타원형 균열 길이의 피로한도는 모두 크게 평가되었다.
- (3) 피로하중을 받는 구조물은 미소 균열의 진전에 의하여 파괴하므로, 작은 관통 균열과 표면 균열의 하한계응력확대계수와 피로한도를 평가하므로써, 구조물의 보수 및 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Milne I, Ainsworth R.A, Dowling, A.R, Stewart A.T, 1988, “Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects,” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32, Issues 1-4, pp. 3~104.
- (2) Shih T.T, Opoku J, 1979, “Application of Fracture Mechanics to Ceramic Materials—A State-of-the-Art Review,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 12, Issue 4, pp. 479~498.
- (3) Hoshide T, Furuya H, Nagase Y, Yamada T, 1984, “Fracture Mechanics Approach to Evaluation of Strength in Sintered Silicon Nitride,” International Journal of Fracture, Vol. 26, pp. 229~239.
- (4) Tabernig B, Pippan R, 2002, “Determination of the Length Dependence of the Threshold for Fatigue Crack Propagation,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 69, pp. 809~907.
- (5) Tanaka K, Akinawa Y, 1988, “Resistance-Curve Method for Predicting Propagation Threshold of Short Fatigue Cracks at Notches,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 30, pp. 863~876.
- (6) Pippan R, Berger M, Stuwe H.P, 1987, “The Influence of Crack Length on Fatigue Crack Growth in Deep Sharp Notches,” Metallurgical Transactions A, Vol. 18, pp. 429~435.

- (7) Pineau A, 1986, "Short Fatigue Crack Behavior in Relation to Three Dimensional Aspects and Crack Closure Effect," Lankford J and Ritchie RO editors, Small cracks, AIME, pp. 191~212.
- (8) Romaniv O, Siminkovich V.N, Tkach A.N, 1981, "Near Threshold Short Fatigue Crack Growth," Backlund J, Blom AF, Beevers CJ editors, Fatigue thresholds, EMAS, pp. 799~808.
- (9) Tange A, Akutu T, Takamura N, 1991, "Relation between Shot-Peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel," Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 1991, No. 36, pp. 47~53.
- (10) El Haddad M.H, Topper T.H, Smith K.N, 1979, "Prediction of Non-Propagating Cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573~584.
- (11) Ando K, Fueki R, Nam K.W, Matsui K, Takahashi K, 2019, "A Study on the Unification of the Threshold Stress Intensity Factor for Micro Crack Growth," Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 64, pp. 39~44.
- (12) Ando K, Kim M.H, Nam K.W, 2020, "Analysis on Peculiar Fatigue Fracture Behavior of Shot Peened Metal using New Threshold Stress Intensity Factor Range Equation," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. (Online Version, First

published: 20 October 2020)

<https://doi.org/10.1111/ffe.13356>

- (13) Kim M.H, Hyun J.Y, Nam K.W, 2020, “Evaluation of Harmless Crack Size by Ando’ s Equation,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, No. 5, pp. 1971~1977.
- (14) Park H.S, Kim M.H, Nam K.W, 2020, “A Study on the Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue Limit of micro crack Growth,” Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 44, No. 11, pp. 781~786.
- (15) Konya J, Yamada Y, Takahashi K, 2019, “Quantitative Evaluation of Influence of Surface Defects on Fatigue Limit of Nitrided Steel,” Transactions of JSSE, Vol. 64, pp. 45~51.
- (16) Ishii T, Takahashi K, Okada H, 2020, “Effects of Small Surface Defect on Fatigue Limit of Spring Steel,” Transactions of JSSE, Vol. 65, pp. 23~27.
- (17) Hyun J.Y, Kim M.H, Nam K.W, 2019, “Crack Length Dependence of Threshold Stress Intensity Factor of Finite Plates with Semi-Elliptical Crack” , Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 14-21.
- (18) Newman Jr J.C, Raju I.S, 1981, “An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185~192.

제4장

수소 저장탱크용 STS316L의 피로한도 평가



4.1 서언

지난 수십 년간, 지구 온난화에 대한 해결 방안으로 신재생에너지 기반에 대한 연구개발이 활발하게 진행되었다[1-5]. 2003년 테슬라가 등장한 이후, 자동차 시장은 전통적인 내연기관에서 친환경차로 옮겨가고 있다. 수소연료전지차는 기존 전기차와 차별화된 시장을 구축하고 있다 [6,7]. 이론적으로 차량의 수소 충전용량을 늘린 만큼 주행 가능 거리를 길게 만들 수 있다. 수소 저장 탱크는 고강도 플라스틱 복합소재에 탄소섬유를 감아(와인딩) 만든다. Khan 등은 CFRP 탱크에 수소 충전 동안 탱크 벽의 온도 상승을 시뮬레이션 하였으며, 그 결과는 JARI (Japan Automobile Research Institute) 실험 데이터와 비교하였다[8]. 수소 저장 탱크는 기존 철제 연료 탱크에 비해 60%가량 가볍고 강도는 10배 이상 강하다. 그러나 수소 저장 탱크는 사용 압력 70MPa, 최대 사용 압력 (MNWP) 87.5MPa, 사용 온도 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 이다[9]. 수소 저장 탱크의 레귤레이터, 매니폴드, 솔레노이드 밸브는 부식, 수소 취성 등의 영향을 최소화하기 위하여 Ni 12%의 STS316L을 사용하고 있다. 이들 부품은 온도 변화, 입출력에 따르는 압력 변화가 많으므로, 결함이 존재하는 경우에는 치명적인 인적 및 경제적 손실이 따른다.

이와 같은 미소 균열 문제는 소규모 비선형 영역의 가정이 성립하지 않는 문제이지만, 실제로는 비선형 문제이다. 그러나 Haddad 등은 균열 길이에 미소 균열 길이를 합하여 하한계응력확대계수의 균열 길이 의존

성의 평가식을 제안하였다[10]. 그 후 Tange 등은 Haddad 등의 식을 변형하여 보다 편리한 식을 유도하였다[11]. 한편 Ando 등은 균열 선단부의 소성역(process zone)을 고려한 피로균열의 하한계응력확대계수 및 피로한도 평가식을 제안하여, 취성파괴, 피로파괴, 수소취성 및 응력부식균열 등의 균열을 획일적으로 취급할 수 있었다. 또한 균열재의 피로한도를 정확하게 평가할 수 있었다[12,13].

본 연구는 수소저장용 탱크 입출력 배관 재료(STS316L)의 사용 응력에 대한 안전성을 평가하기 위하여 실시하였다. 먼저 STS316L의 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(l)}^R$ 및 피로한도 $\Delta \sigma_w^R$ 를 구하고, 이것을 사용하여 균열 크기에 따르는 피로한도 $\Delta \sigma_{uc}^R$ 및 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(s)}^R$ 를 평가하였다. 또한 피로한도 감소 비율 및 수소저장탱크의 최대사용압력(87.5MPa)에서 균열 크기를 평가하고, STS316L의 안전성을 확인하였다.

4.2 재료 및 실험방법

4.2.1 실험 재료

본 연구에 사용한 재료는 수소저장용탱크의 배관에 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강 STS316L이다. $\Delta K_{th(t)}^R$ 를 구하기 위한 CT 시험편과 $\Delta\sigma_w^R$ 를 구하기 위한 시험편의 형상을 Fig. 4.1에 나타낸다. Table 4.1에 재료의 화학성분을 나타내고, Table 4.2에 기계적 성질을 나타낸다.

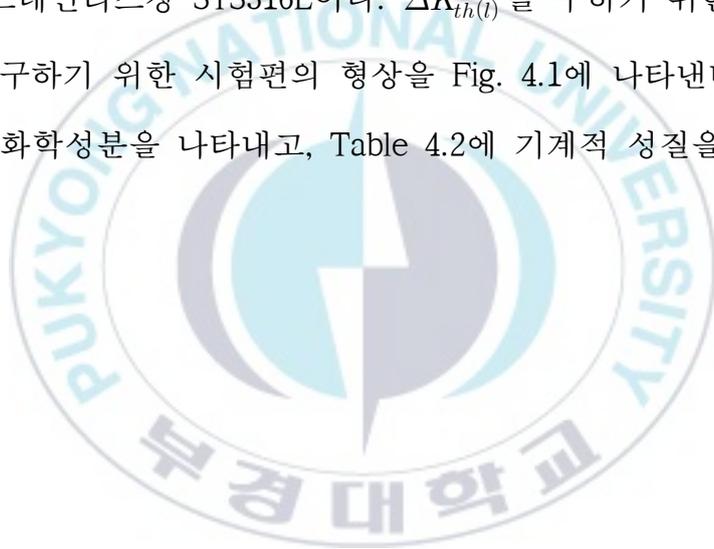


Table 4.1 Chemical composition of test material. (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	C	Mo	Co
0.01	0.67	1.19	0.035	0.001	12.14	17.41	2.05	0.21

Table 4.2 Mechanical properties of test material.

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRBW)
313	560	49	81

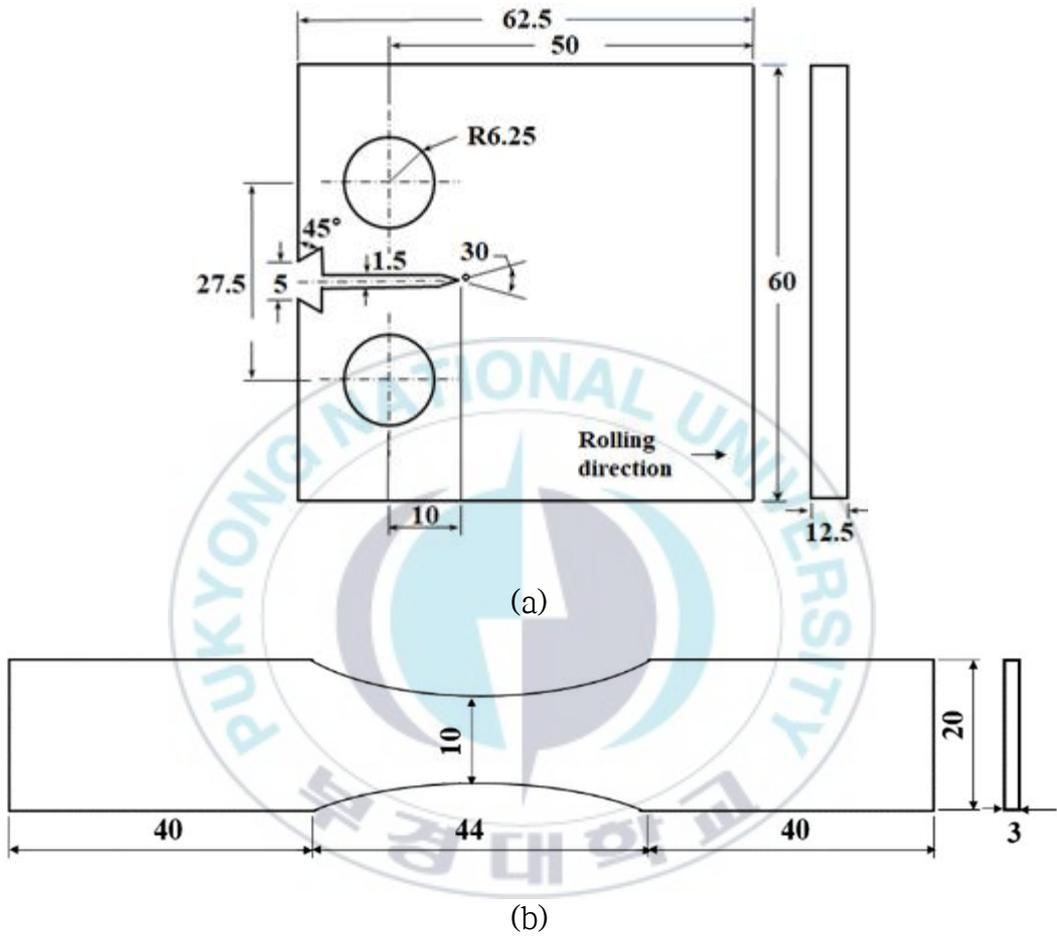


Fig. 4.1 (a) CT specimen, and (b) tension-tension fatigue specimen.
(unit : mm)

4.2.2 피로실험 방법

긴 균열의 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(l)}^R$ 와 미균열시험편의 피로한도 $\Delta\sigma_w^R$ 를 조사하였다. 피로실험은 피로시험기(허용 하중 ± 100 kN, MTS 370.10)를 사용하여, 실온 대기 중에서 실시하였다. $\Delta K_{th(l)}^R$ 및 $\Delta\sigma_w^R$ 는 KS B ISO 12108 규격 따라서 실험을 수행하였다. 실험은 응력비 $R = 0.1$, 반복주파수 $f = 20\text{Hz}$ 의 정현 응력 파형으로 실시하였다. $\Delta K_{th(l)}^R$ 는 K-감소시험으로 하였고, $\Delta\sigma_w^R$ 는 하중 일정 제어로 실시하였다. 피로한도 실험은 반복수 $N_f = 3 \times 10^6$ cycle에서 정지하고, 피로한도라 정의하였다.

4.2.3 균열시험편의 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 와 임의 균열의 하한계응력확대 계수 ΔK_{th}^R 의 평가 방법

Ando 등은 피로균열진전의 하한계응력확대계수 ΔK_{th}^R 의 균열길이 의존성을 평가하는 식을 제안하였다. 그 식을 식(4.1)에 나타낸다, Ando 등은 식(4.1)을 사용하여 식의 타당성을 규명하였다.[12,13]

$$\Delta K_{th}^R = 2\Delta\sigma_w^R \sqrt{\frac{l}{\pi}} \cos^{-1} \left[\left\{ \frac{\pi}{8l} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\Delta\sigma_w^R} \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right] \quad (4.1)$$

여기서 ΔK_{th}^R 및 $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 각각 응력비 R 에서 임의 균열 및 긴 균열의 하한계응력확대계수, $\Delta\sigma_w^R$ 는 응력비 R 일 때의 미균열시험편의 피로한도, l 은 무한판 중의 관통 균열 길이 절반이다. 또 응력비 R 에서 균열시험편의 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 무한판의 경우 다음 식(4.2)로 나타낸다.

$$\Delta K_{th}^R = \Delta\sigma_{uc}^R \sqrt{\pi l} \quad (4.2)$$

식(4.1), (4.2)를 유한판의 반타원형 균열에 적용하는 경우는 식(4.3) 또는 식(4.4)에 나타내는 등가 균열 길이(l_e)를 식(4.1) 및 (4.2)의 l 에 대입

하면 된다.

$$\sqrt{\pi l_e} = \alpha_A \sqrt{\pi a} \quad (4.3)$$

$$\sqrt{\pi l_e} = \beta_A \sqrt{\pi a} \quad (4.4)$$

여기서 a 는 반타원형 균열 깊이, α_A 및 β_A 는 각각 유한판의 시험편이 인장응력 또는 굽힘 응력을 받는 경우에 균열 최심부에서 Newman-Raju 식[14]으로 주어지는 형상보정계수이다. 최표면부에 상당하는 l_e 를 평가하는 경우에는 α_A 및 β_A 를 각각 α_C 및 β_C 로 바꾸면 된다. 작용응력에 의한 응력확대계수 K_{ap} 는 Newman-Raju식[14]로 평가하였다.

4.3 결과 및 고찰

4.3.1 하한계응력확대계수 결정

Fig. 4.2는 피로균열 전파속도(da/dN)와 응력확대계수 ΔK 의 관계를 나타낸다. 이것은 $\Delta K_{th(l)}^R$ 를 구하기 위한 것으로, 위에서 설명한 것과 같이 KS 규격에 따라서 K -감소 실험에서 얻은 것이다. 데이터는 CT 시험편 3개를 사용하여, 얻어진 결과이다. 여기서 $\Delta K_{th(l)}^R$ 는 da/dN 가 0으로 접근하는 ΔK 이다. 대부분의 재료에 대한 $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 10^{-8} mm/cycle에 상응하는 ΔK 로 정의한다. 그러나 본 연구에서는 4.1×10^{-7} mm/cycle에서 da/dN 가 0에 수렴하였다. 이때의 ΔK 를 하한계응력확대계수로 결정하였다. 즉,

$$\Delta K_{th(l)}^R = 6.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

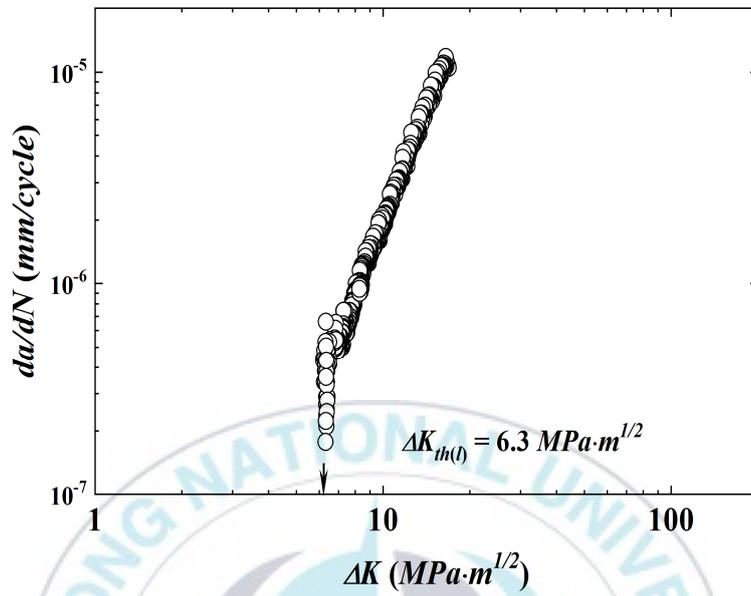


Fig. 4.2 Relationship of fatigue crack growth rate and stress intensity factor.

4.3.2 피로한도 결정

Fig. 4.3은 피로한도를 결정하기 위한 $S-N$ 곡선이다. 이것은 평활재시험편을 사용하여, 얻어진 것이다. 그림에서 \rightarrow 는 10^7 cycle에서 파단하지 않은 시험편을 나타낸다. 이 그림에서 STS316L의 피로한도는 285MPa로 결정하였다.



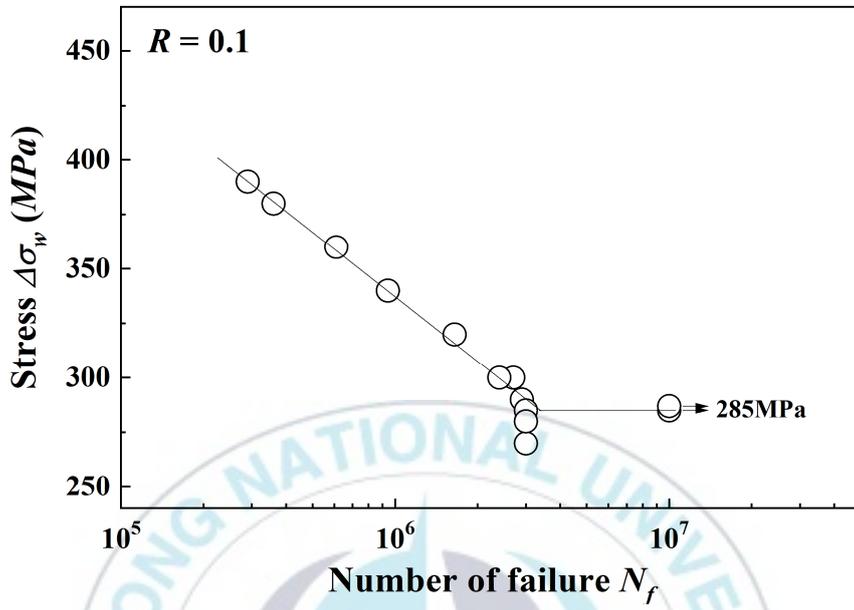
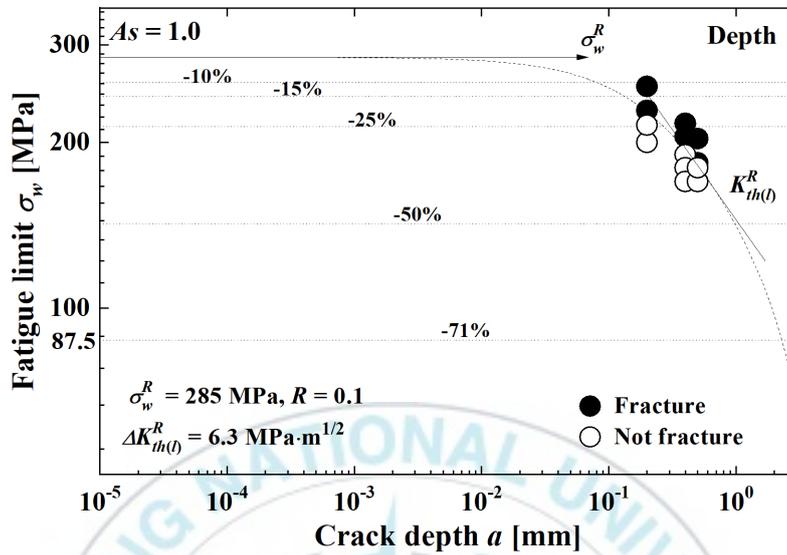


Fig. 4.3 *S-N* curve for determining the fatigue limit.

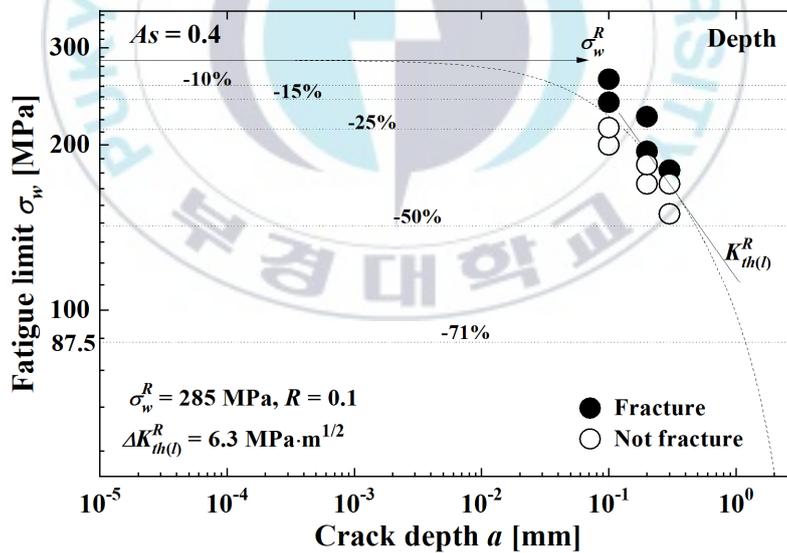
4.3.3 균열 크기에 따르는 피로한도

Fig. 4.4는 균열 크기에 따르는 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 를 나타낸다. (a)는 $As = 1.0$, (b)는 $As = 0.4$ 의 경우이다. 그림에서 ●는 파괴시험편, ○는 비파괴시험편을 나타낸다. 그림에서 균열 깊이에 따르는 피로 수명은 식 (4.1)-(4.4)에서 구한 것이다. 식(4.1)에 $\Delta\sigma_w^R = 285\text{MPa}$, $\Delta K_{th(l)}^R = 6.3\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 을 대입하고, l 에 균열 깊이 a 를 대입하여 구한 것이다. 그림에서 직선 부분은 피로한도인 285MPa을 나타내지만, 균열 깊이가 증가함에 따라서 피로한도가 점점 저하하는 것을 알 수 있다. 여기서 균열이 증가함에 따라서 피로한도가 감소하는 기울기는 $\Delta K_{th(l)}^R$ 을 나타낸다. 피로한도의 저하는 $As = 0.4$ 가 $As = 1.0$ 보다 크다. As 가 작은 것은 표면균열 길이가 크기 때문에 피로 균열은 깊이 방향으로 성장하다가 어느 정도 증가하면 표면균열이 성장하기 시작하기 때문이다. 표면 균열 크기 c 는 a/As 이므로, As 와 a 를 사용하여 구하고, a 와 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 의 관계를 얻을 수 있다. 그림에서 실험의 결과는 계산 결과와 잘 일치한다.

그림에 점선은 피로한도 감소율 10, 15, 25 및 50%에 해당하는 균열 깊이이다. 또한, 수소저장 탱크의 최대 사용 압력 87.5MPa(피로한도 감소율 71%)에 해당하는 균열 깊이도 점선으로 나타내었다. Table 4.3은 피로한도 감소율에 해당하는 균열 크기를 나타낸다. 여기서 $As = 0.8$ 과 0.6은 Fig. 4.4와 같은 계산에서 구한 것이다.



(a)



(b)

Fig. 4.4 Fatigue limit according to aspect ratio. (a) $As = 1.0$, (b) $As = 0.4$

Table 4.3 Crack depth according to fatigue limit reduction ratio. (unit : mm)

Fatigue limit reduction rate (%)	Aspect ratio (A_s)			
	1	0.8	0.6	0.4
10	0.082	0.075	0.050	0.039
15	0.132	0.104	0.082	0.064
25	0.274	0.213	0.167	0.130
50	0.983	0.783	0.616	0.485
71	2.298	1.875	1.504	1.188

4.3.4 피로한도 감소율

Fig. 4.5는 피로한도 감소 비율에 따르는 균열 깊이를 각 A_s 에 대하여 나타내었다. 균열 깊이는 피로한도 감소 비율 및 A_s 에 따라서 다르다. 각 피로한도 감소율에서 균열 깊이는 A_s 가 작을수록 작다. 즉, $A_s = 0.4$ 의 균열 깊이는 같은 피로한도 감소 비율에서 $A_s = 1.0$ 에 비하여 약 2배 이상 작다. 각 A_s 에서 균열 깊이는 피로한도 감소 비율이 높을수록 더 크다. 각 A_s 의 균열 깊이는 피로한도 감소 비율 25%까지는 작지만, 50%에서는 10%의 약 12배, 15%의 약 7.4배, 25%의 약 3.6배 크기로 나타났다. 즉, 피로한도 감소 비율 50%에서 균열 길이($c = a/A_s$)는 0.983mm($A_s = 1.0$), 0.783mm($A_s = 0.8$), 0.6166mm($A_s = 0.6$) 및 0.485mm($A_s = 0.4$)이다. 한편 피로한도 감소 비율 71%(수소저장 탱크의 최대 사용 압력 87.5MPa)의 균열 깊이는 2.298mm($A_s = 1.0$), 1.875mm($A_s = 0.8$), 1.504mm($A_s = 0.6$) 및 1.188mm($A_s = 0.4$)로서 매우 크게 나타나고 있다. 이것은 본 연구에서 사용한 두께(3mm)의 76.6%($A_s = 1.0$), 62.5%($A_s = 0.8$), 50.1%($A_s = 0.6$) 및 39.6%($A_s = 0.4$)까지 균열이 진전한 것을 나타내며, 이때의 균열 길이($c = a/A_s$)는 각각 2.298mm($A_s = 1.0$), 2.344mm($A_s = 0.8$), 2.507mm($A_s = 0.6$) 및 2.970mm($A_s = 0.4$)이다.

W.D.Rummel 등은 반타원형 피로균열의 검출률에 대하여 연구하였다 [15]. 그들은 최적인 실내 조건에서 초음파탐상법으로 결함을 검출하였다. 100% 검출 확률의 균열은 $2c = 12\text{mm}$, $a = 4\text{mm}$ 이었다. 그리고 50% 검출확률은 $2c = 1.2\text{mm}$, $a = 0.26\text{mm}$ 이었다. 또 최소 균열 크기는 깊이

및 길이가 각각 0.17mm이었다. 최근 비파괴 기술의 발전에 따라서 Ochiai 등은 레이저초음파탐상법으로 깊이 0.4mm의 응력부식균열을 측정하였다[16]. 따라서 레이저초음파탐상법에 의하여 피로한도 감소 비율 50% 및 71%(수소저장 탱크의 최대 사용 압력 87.5MPa)의 균열은 100% 검출 가능하여, 안전성이 확보된다.



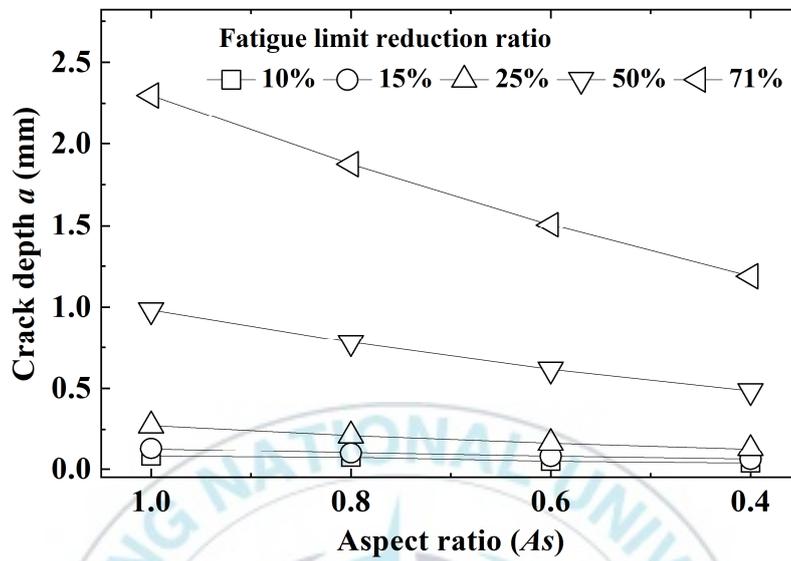
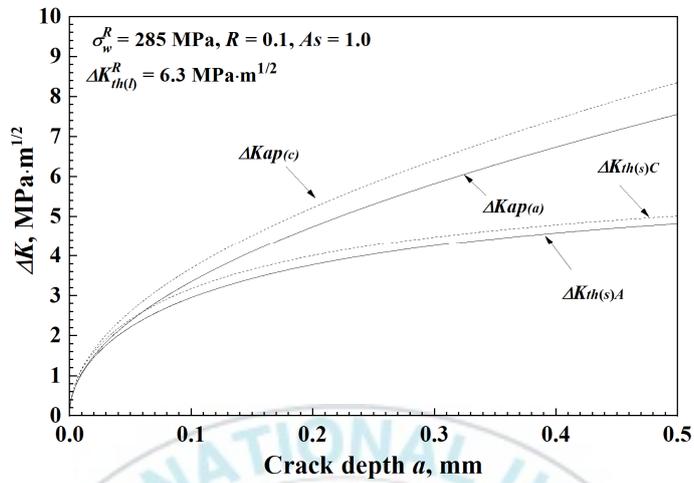


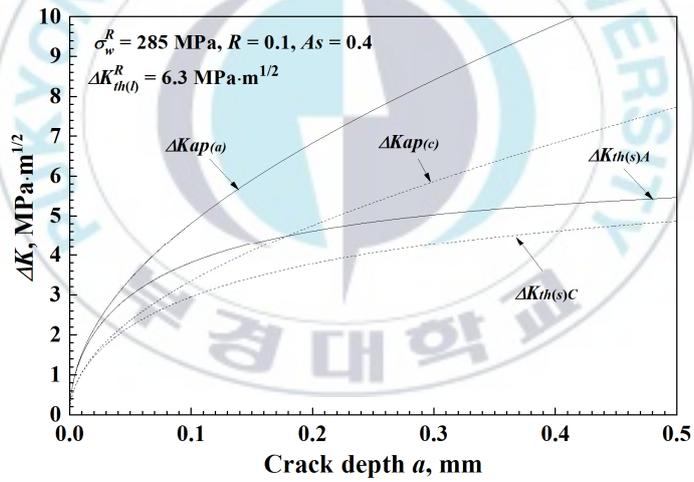
Fig. 4.5 Crack size according to fatigue limit reduction ratio at each aspect ratio.

4.3.5 균열 형상비에 따르는 응력확대계수

Fig. 4.6은 As 에 따르는 응력확대계수 ΔK_{ap} 와 미소 균열의 하한계응력 확대계수 $\Delta K_{th(s)}$ 의 변화를 나타낸다. (a)는 $As = 0.1$, (b)는 $As = 0.4$ 의 결과이다. 여기서 $\Delta K_{th(s)}$ 는 식(1)에서 구한 것으로, 첨자 A 및 C 는 각각 균열 길이 및 균열 깊이의 값이다. 마찬가지로 Newman-Raju 식에서 얻어진 $\Delta K_{ap(a)}$ 및 $\Delta K_{ap(c)}$ 는 각각 균열 길이 및 균열 깊이의 값이다. (a) $As = 0.1$ 은 $a = c$ 이므로 각각의 ΔK_{ap} 및 $\Delta K_{th(s)}$ 는 큰 차이가 없다. 그러나 c 의 값이 약간 크게 나타난 것은 ΔK_{ap} 및 $\Delta K_{th(s)}$ 를 구하는 식에 표면은 0° , 깊이는 90° 를 대입한 것에 따르는 차이이다. ΔK_{ap} 및 $\Delta K_{th(s)}$ 는 균열이 성장함에 따라서 증가하지만, 교차하지는 않는다. 이것은 피로 균열이 진전하는 것을 의미한다. 그리고 $\Delta K_{th(s)}$ 는 피로 균열이 진전함에 따라서 $\Delta K_{th(l)}$ 에 수렴해 간다. (b) $As = 0.4$ 는 균열 깊이 a 의 값이 균열 길이 c 보다 크게 나타났다. 이것은 식(1)의 l 에 a 또는 c 를 대입하였을 때, 표면은 0° , 깊이는 90° 를 대입한 것에 따르는 차이보다, 균열 크기에 따르는 차이가 더 크게 작용하기 때문이다. Fig. 6(b)에 $\Delta K_{ap(a)}$ 가 더 크게 나타나는 것은 As 가 작을수록 피로 균열은 깊이 방향으로 빨리 진전하는 현상과 일치하고 있다. 즉, 깊이 균열이 진전하여 균열 길이에 접근하면, 비로소 균열 길이가 진전하기 시작한다. $\Delta K_{ap(a)}$ 는 As 가 작을수록 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4.6 Changes in stress intensity factor according to aspect ratio. (a) $As = 1.0$, (b) $As = 0.4$

4.4 결론

본 연구는 수소저장용 탱크 입출력 배관 재료(STS316L)의 하한계응력 확대계수 $\Delta K_{th(l)}^R$ 및 피로한도 $\Delta\sigma_w^R$ 를 구하고, 임의 균열 크기의 피로한도 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 및 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(s)}^R$ 를 평가하였다. 또한, 수소저장탱크의 최대사용압력(87.5MPa)에서 균열 크기를 평가하고, STS316L 배관의 안전성을 확인하였다.

- (1) K 감소 실험에서 긴 균열의 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(l)}^R$ 는 $6.3 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 나타났다. 그리고 평활재 시험편의 피로한도 $\Delta\sigma_w^R$ 는 285MPa이 얻어졌다.
- (2) 상기의 $\Delta K_{th(l)}^R$ 와 $\Delta\sigma_w^R$ 를 사용하여 임의 균열에 대한 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 를 얻었다. $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 균열 깊이가 증가함에 따라서 점점 작아졌으며, 작은 A_s 가 더 작게 나타났다. 실험의 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 는 계산의 $\Delta\sigma_{uc}^R$ 과 잘 일치하였다.
- (3) 피로한도 감소 비율에 따르는 균열 깊이는 $A_s = 0.4$ 가 1.0보다 약 2배 정도 작게 평가되었다. 또한, 균열 깊이는 피로한도 감소 비율 25%까지는 작게 평가되었으나, 50%는 25%의 약 3.6배 정도 크게 평가되었다. 또한, 같은 피로한도 감소 비율에서 작은 A_s 의 균열 크기가 작게 평가되어 안전하였으며, 피로한도 감소 비율이 높을수록 균열 크기가 크게 평가되어 안전성이 우수하였다.

- (4) Ochiai 등의 레이저초음파탐상 결과에서 피로한도 감소 비율 50% 및 71%(수소저장 탱크의 최대 사용 압력 87.5MPa)의 균열은 100% 검출 가능하여, 배관의 안전성이 확보된다.



참고문헌

- [1] Jang G.J, Choi Y.M, Ahn B.K, Lim T.W, 2008, “The evaluation of reliability for the high pressure hydrogen storage system of fuel cell vehicle” , The Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 4, pp. 266-275.
- [2] Lim, J.S, Lee H.W, Hong Y.S, Lee K.B, Yong G.J, Kwon H.B, 2010, “Development on fuel economy test method for hydrogen fuel cell vehicles” , Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No. 3, pp. 207~213.
- [3] Kim S.H, Choi Y.M, Hang K.H, Shin J.H, Hang I.C, Lim T.W, 2011, “The evaluation of fire reliability for the high pressure hydrogen storage system of fuel cell vehicle (1)” , The Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 4, pp. 520-526.
- [4] Hyun T.H, Arvind V, 2014, “Hydrogen storage for fuel cell vehicles “, Current Opinion in Chemical Engineering, Vol. 5, pp. 42-48.
- [5] Davids M.W, Lototskyy M, Malinowski M, van Schalkwyk D, Parsons A, Pasupathi S, Swanepoel D, van Niekerk T, 2019, “Metal hydride hydrogen storage tank for light fuel cell vehicle” , International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 55, pp. 29263-29272.

- [6] Frenette G, Forthoffer D, 2009, “Economic & commercial viability of hydrogen fuel cell vehicles from an automotive manufacturer perspective” , International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 9, pp. 3578–3588.
- [7] Granovskii M, Dincer I, Rosen M.A, 2006, “Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles “, Journal of Power Sources, Vol. 159, No. 2, pp. 1186–1193.
- [8] Khan Md T.I, Monde M, 2013, “Characteristics of CFRP hydrogen storage vessel on rising temperature in the filling process” , Procedia Engineering, Vol. 56, pp. 719–724.
- [9] Implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European parliament and of the council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles, Commission Regulation (EU) No 406/2010, Official Journal of the European Union.
- [10] El Haddad M.H, Topper T.H, Smith K.N, 1979, “Prediction of non propagating cracks” , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573–584.
- [11] Tange A, Akutu T, Takamura N, 1991, “Relation between shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel” , Transactions of Japan Society for

- Spring Engineers, Vol. 36, pp. 47-53.
- [12] Ando K, Fueki R, Nam K.W, Matsui K, Takahashi K, 2019, “A study on the unification of the threshold stress intensity factor for micro crack growth” , Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 64, pp. 39-44.
- [13] Ando K, Nam K.W, Kim M.H, Ishii T, Takahashi K, Analysis of peculiar fatigue fracture behavior of shot peened steels focusing on threshold stress intensity factor range, Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 65, pp. 35-41.
- [14] Newman Jr J.C, Raju I.S, 1981, “An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack” , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.
- [15] Rummel W.D, Todd Jr P.H, Frecska S.A, Rathke R.A, 1974, “The detection of fatigue cracks by nondestructive testing methods” , NASA Contractor Report, NASA-CR-2369.
- [16] Ochiai M, Miura T, Yamamoto S, 2006, “Laser-ultrasonic nondestructive testing and its application to nuclear industry” , Toshiba Review, Vol. 61, pp. 44-47.

제5장

결론



균열 문제는 선형파괴역학의 발전으로 응력확대계수로 정량적으로 설명할 수 있게 되었다. 즉, 응력확대계수를 사용하여 취성파괴 발생 조건, 피로균열, 수소취성균열 및 응력부식균열 등의 균열성장속도는 해석되었다. 선형파괴역학은 등방, 등질 및 탄성체를 가정한다. 그러므로 균열 끝부분에 형성되는 비선형영역의 크기가 균열 크기와 비교하여, 아주 작지 않을 때는 긴 균열의 하한계응력확대계수와 비교하고, 이것보다 상당히 작은 응력확대계수에서 균열이 성장한다. 이와 같이 미소 균열 문제는 큰 균열로 성장하기 전에 특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 피로균열 선단의 소성역을 고려한 식과 미소 균열을 고려한 식으로 수소저장용 탱크 입출력 배관 재료 STS316L 및 스프링강 SUP9A의 미소 균열 크기에 따르는 하한계응력확대계수와 피로한도를 평가하였다. 또한 STS316L의 무한판에 관통균열과 유한판에 반타원형 균열이 존재하는 경우, 피로 하중에 의한 미소 균열의 피로한도와 하한계응력확대계수를 평가하였다. 더구나 수소저장탱크의 최대사용압력(87.5MPa)에서 균열 크기를 평가하였고, STS316L 배관의 안전성을 확인하였다.

이들 식을 사용하여 모든 강종으로 만들어진 구조물의 하한계응력확대계수와 피로한도는 미소 균열 크기 의존성을 평가할 수 있고, 구조물의 보수 및 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

발표 논문

<Refereed Journal Publications>

1. 김민헌, 박환성, 남기우 (2020.11), “미소 균열 성장의 하한계응력확대계수 및 피로한도에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 A, 제44권, 제11호, pp. 781-786.

Min-Heon Kim, Hwan-Sung Park and Ki-Woo Nam* (2020.11), “A Study on the Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue limit of micro crack Growth”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 44, No. 11, pp. 781-786.

2. 박환성, 김민헌, 남기우, (2021,02) “무한판의 관통균열과 유한판의 반타원형 표면균열의 하한계응력확대계수 및 피로한도 연구”, 대한기계학회논문집 A, 제45권, 제2호, pp. 133-139.

Hwan-Sung Park, Min-Heon Kim and Ki-Woo Nam, 2021, “A Study of Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue Limit for Through Crack in Infinite Plate and Semi-Elliptical Surface Crack in Finite Plate”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 45, No. 2, pp. 133-139.

3. Min-Heon Kim, Hwan-Sung Park and Ki-Woo Nam, 20**, “Fatigue Limit Evaluation for Small Crack of STS316L by New Threshold Stress Intensity Factor Equation” , International Journal of Structural Integrity, Vol. 00, No. 0, pp. **-**. (Submitting)

<Proceedings>

1. 김민헌, 박환성, 김동규, 남기우, “압축잔류응력 분포에 따르는 무해한 균열 크기 평가” , 대한기계학회 2019년 학술대회 논문집, pp. 1805-1808.

Min-Heon Kim, Hwan-Sung Park, Dong-Kyu Kim and Ki-Woo Nam, “Evaluation of harmless crack size due to compressive residual stress distribution “, Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp. 1805-1808.

2. 김민헌, 박환성, 김동규, 남기우, “유한판 중의 반타원형표면균열의 피로한도 예측” , 대한기계학회 2019년 학술대회 논문집, pp. 1809-1812.

Min-Heon Kim, Hwan-Sung Park, Dong-Kyu Kim, Ki-Woo Nam, “Fatigue limit prediction of semi-elliptical surface cracks in finite plate” , Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp.

1809-1812.

3. 남기우, 김민현, 박환성, 安藤 柱, 2020, “미소 균열 성장의 하한계 응력확대계수에 관한 연구”, 한국동력기계공학회 2020년도 춘계학술대회논문집, pp. 161-162.

Ki-Woo Nam, Min-Heon Kim, Hwan-Sung Park and kotoji Ando, 2020, “A Study on the Threshold Stress Intensity Factor and The Fatigue Limit of Micro Crack Growth”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2019 Spring Annual Meeting, pp. 161-162.

4. 남기우, 김민현, 박환성, 박인덕, 2020, “무한판의 관통균열과 유한판의 반타원형표면균열의 파괴역학적 관계 연구“, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2020년 춘계학술대회 논문집, pp. 104.

Ki-Woo Nam, Min-Heon Kim, Hwan-Sung Park, In-Duck Park, 2020, “A Study on the Fracture Mechanics Relationship between the Infinite Plate Through Crack and the Finite Plate Semi-Elliptical Surface Crack”, Proceeding of The KSME 2020 Annual Meeting, pp. 104.

5. 박환성, 김민현, 박인덕, 남기우, 2020, “하한계응력확대계수 식에

의한 수소 저장탱크용 STS316L의 피로파괴거동”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2020년 춘계학술대회 논문집, pp. 105.

Hwan-Sung Park, Min-Heon Kim, In-Duck Park and Ki-Woo Nam, 2020, “Fatigue Fracture Behavior of STS316L for Hydrogen Storage Tank by Equation of Threshold Stress Intensity Factor”, Proceeding of The KSME 2020 Annual Meeting, pp. 105.



감사의 글

취업 이후 학사부터 석박사까지 어느덧 7년이 되었습니다. 석사 면접을 보고, 석사 논문 주제를 결정할 때가 엇그제 같은데 벌써 박사학위를 취득하게 되어 감회가 새롭습니다. 7년 전 (주)동희산업의 사장님과 일본에 출장을 함께 갔을 때, “왜 공부하지 않느냐? 나도 항상 공부한다. 너를 위해 공부해라”라는 말씀에 부끄럽다는 생각이 들었습니다. 그래서 학사부터 편입하여 박사까지 마무리할 수 있게 정신적인 도움을 주신 이태희 사장님께 감사드립니다. 그리고 힘든 회사 일정에서도 언제나 응원해주신 김완태 본부장님, 권영섭 이사님, 김지열, 조형주, 손수빈, 김상우, 정기철님께도 감사드립니다.

회사 일로, 가족 핑계로 포기하려는 저에게 언제나 격려와 가르침으로 지금까지 이끌어주신 남기우 지도교수님께 사랑의 마음과 함께 진심으로 깊이 감사드립니다. (주)성우하이텍부터 지금까지 가르쳐주시고 사랑해 주신 김태일 교수님, 이해하기 어려운 재료공학을 알기 쉽게 지도해주신 강창룡 교수님 감사드립니다. 논문 심사해주신 안우상 박사, 김철수 박사님께도 감사드립니다.

가장으로 많은 시간을 함께 보내야 했지만, 항상 응원해주고 이해해준 아내 안현숙님과 아들 박진우, 박연우에게 미안함과 감사의 말씀을 전합니다. 항상 아들을 자랑스럽게 생각하시는 어머니, 아버지, 동생들에게도 감사드립니다.

박사학위 논문 실험을 도와준 김민현님, 수업과 과제를 잊지 않도록 항상 챙겨준 팽재은님, 구경희님, 정세은님에게 감사드리며, 즐거운 학교생활의 추억을 만들 수 있게 함께 한 친구 김호건, 손대진님 그리고 할 수 있다는 열정을 보여주신 김공영 박사님, 현재용 박사님께 감사드립니다.

즐겁고 행복했던 대학원 시절은 앞으로도 잊지 않고, 포기하지 않고 남은 꿈을 향해 나아가겠습니다.

지면으로 일일이 언급하지 못했지만, 저를 아껴주시고 사랑해 주시는 모든 분에게 감사드리며 살면서 그 은혜에 보답하겠습니다.

2021.06 박환성