creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

공학박사 학위 논문

표면균열 무해화 기술에 의한 STS316L의 신뢰성 향상

2022년 8월

부경대학교 대학원

재료공학과

박 치 영

공학박사 학위 논문

표면균열 무해화 기술에 의한 STS316L의 신뢰성 향상

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2022년 8월

부경대학교 대학원

재료공학과

박 치 영

박치영의 공학박사 학위 논문을 인준함.

2022년 8월 26일

주 심 공학박사 강 창 룡 (인)

위 원 공학박사 도 재 윤 (인)

위 원 공학박사 정 상 철 (인)

위 원 공학박사 윤 서 현 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

제1장 서론 ····· 1

1.1 연구의 배경 ····· 2
1.2 균열의 자기 치유와 무해화 ····· 6
1.3 논문의 구성 및 개요 ····· 11
참고문헌 ····· 12

제2장 초음파 피닝에 의한 표면균열의 무해화 ····· 23

2.1 서언 ····· 24
2.2 재료 및 실험 방법 ····· 26
2.2.1 재료 ····· 26
2.2.2 초음파 피닝 조건 ····· 29
2.2.3 잔류응력 분포 ····· 31
2.2.4 피로시험 ····· 33
2.3 결과 및 고찰 ····· 34
2.3.1 UP에 의한 피로강도 향상과 표면균열의 무해화 ····· 34
2.3.2 무해화 가능 균열 크기의 파괴역학적 검토 ····· 37
2.3.3 무해화 가능 균열 크기 선도 ····· 41
2.4 결언 ····· 43

참고문헌 ····· 44

제3장 표면균열 무해화 기술의 피로특성에 대한 신뢰성 향상 ····· 50

3.1 서언 ····· 51
3.2 재료 및 실험방법 ····· 53
3.2.1 재료 및 시험편 ····· 53
3.2.2 잔류응력분포 ····· 55
3.2.3 평가 방법 ····· 57
3.3 결과 및 고찰 ····· 60
3.3.1 a_{hml}의 결정 ····· 60
3.3.2 As에 따르는 a_{hml} 평가 ····· 67
3.3.3 a_{hml}, a_{NDI}, a_{crN}와 As 관계 ····· 71
3.4 결언 ····· 74
참고문헌 ····· 76

제4장 결론 ····· 83

발표 논문 ····· 102

감사의 글 ····· 104

Improving Reliability of STS316L using Surface Crack Nondamaging Technology

Chi-Young Park
Department of Materials Science and Engineering
Graduate School, Pukyong National University

Abstract :

First study : The Effect of ultrasonic peening (UP) on tension fatigue limit of Ni 12% STS316L with a surface crack was investigated. UP was conducted on the specimens with a surface crack of aspect ratio, a/c=1.0 and 0.4, where a denotes the crack depth (a=0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 mm), and c denotes the half-length of surface crack. Tension fatigue tests were conducted under stress ratio, R=0.1. The result showed that the fatigue limit of the UP specimens having the crack below 0.3 mm in depth was almost same as that of the UP smooth specimens. Thus, the maximum depth of crack with various aspect ratios that can be rendered harmless was less than threshold stress intensity factor of the material. The estimated values were in good agreement with experimental values. According to the estimation method, a harmless crack assessment diagram was proposed.

Second study: Cracks degrade the performance and reliability of steel structures; hence, researchers are extensively investigating solutions to the crack problem to ensure safety and easy maintenance of structures. A new technique has been developed in this work to render surface cracks harmless, which also reduces the fatigue limit by the influences of compressive residual stress caused by peening; this technique is referred to as surface crack non-damaging technology. This study aims to contribute toward reliability improvement of the of Ni 12% STS316 steel via the surface crack

non-damaging technology. The crack depth (a_{hml}) that could be rendered harmless by ultrasonic peening(UP) was largely dependent on the compressive residual stress. Further, increased as the crack aspect ratio (*As*) and threshold stress intensity factor ($\Delta K_{th(l)}$) increase. At large residual stress, the crack did not propagate and were rendered harmless. The relationship between a_{hml}, a_{NDI} (the crack depth that can detected by nondestructive inspection), and a_{crN} (the maximum crack depth in the assumed safety factor) were compared.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

제1장

서론

1.1 연구의 배경

선형파괴역학의 발전으로 대부분의 균열 문제는 응력확대계수(K)를 사용하여 정량적으로 취급할 수 있게 되었다. 즉, 취성 균열 발생 조건,[1,2] 피로균열,[3] 수소 취성 균열[4] 및 응력부식균열[5] 등의 균열성장 속도는 규명되었다. 또, 이러한 현상을 활용하여, 결함을 평가하는 규격이 제정되어, 적용되고 있다.[5-9]

그러나 선형파괴역학은 등방·등질·탄성체를 대상으로 적용하기 때문에, 균열 선단부에 형성되는 비선형영역의 크기가 균열 길이에 비하여 아주 작지 않은 경우에는 긴 균열의 하한계응력확대계수(K_{th})에 비해 그보다 훨씬 작은 응력확대계수 (피로의 경우는 ΔK)에서 균열이 성장한다.[1,10] 비선형 영역의 예로, 금속은 소성 영역과 조대 결정립이, 세라믹은 아주 미세한 균열의 분산 영역과 결정립의 영향이 거론되고 있다.[11-13]. 이 문제는 미소 균열의 하한계 문제라고 하고, 금속 피로한도의 경우에는 특성이 거의 해명되었다.[10,14-17] 금속의 취성 파괴는 피로한도에 비해 다소 늦었지만, 미소 균열의 하한계 문제에 대하여 비선형 영역의 영향을 고려한 선구적인 연구가 이루어지고 있다.[1]

구조물의 균열에 관한 연구는 용접구조물의 제작과 취성파괴를 계기로 시작되었다. 구체적으로는 제2차대전 중(1943년)에 미국 포틀랜드 조선소에서 건설 중인 Liberty ship Schenectady의 취성파괴 (Fig. 1.1), 압력용기 (Fig. 1.2, Fig. 1.3) 및 교량의 취성파괴 (Fig. 1.4)를 계기로 시작되었다.

Fig. 1.1 Liberty ship Schenectady in the Portland shipyard split in two while still under construction in 1943.

Fig. 1.2 On 12 February 1952 a large all-welded oil-storage tank collapsed during hydrotest at the Esso Petroleum plant at Fawley in Hampshire

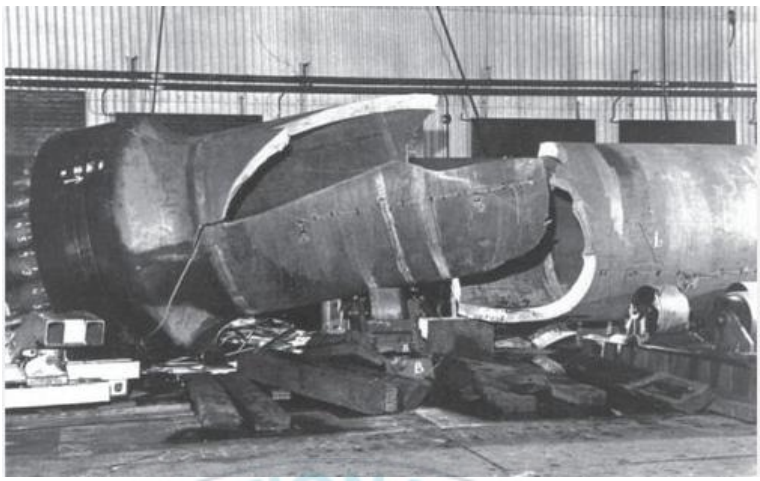


Fig. 1.3 Brittle fracture of pressure vessel destined for use in ammonia conversion in 1965.

Fig. 1.4 Hasselt Bridge after brittle fracture in 1938.

제1기는 1940년대 미국의 Irwin[18]은 K를 제안하여, 균열의 공학적 연구가 시작되었다. 1963년 영국의 Wells[19]와 Bilby[20] 등이 독립적으로 비선형파괴역학 기준인 Crack Opening Displacement (COD)를 제안하였다. 1963년 미국의 Paris[3]가 ΔK에 의한 피로균열 전파법칙 $da/dN = C(\Delta K)^m$을 제안하였다. 1968년 미국의 Rice[21]가 J적분을 제안하였다. 이것으로 비선형인 취성파괴, 피로균열 전파속도를 정량적으로 평가할 수 있게 되었다. 이같이 미국과 영국에서 제안된 파괴 기준은 타당성 음미와 평가 규격 제정의 기초가 되었다.

제2기는 1966년 영국의 Burdekinn이 COD를 토대로 허용결함 평가 기준을 제안하였고,[22] 1971년 미국은 ASME 규격에 허용결함평가규격을 도입하였다.[23] 1976년 영국의 Milne 등은 파괴평가 선도를 제안하여, K와 항복응력 σ_y의 상관성을 설명하였고,[24] 1980년 영국은 결함평가규격 BSI, PD6493을 제정하였다.[25] 이후 많은 국가에서 결함평가규격이 만들어졌다.[26] 따라서 1966년부터 1980년까지는 균열의 잔여 수명평가와 결함의 허용에 관한 규격이 성립되는 시기였다. 오늘날 많은 연구자는 이에 관하여 연구하고 있다.

1.2 균열의 자기 치유와 무해화

최근 세계 각국에서 새롭고 가능성 있는 연구가 시작되고 있다. 즉, 균열의 자기 치유와 균열의 무해화에 관한 연구이다.

균열의 자기 치유는 지금까지의 균열에 관한 연구와는 아주 다른 발상으로, 모든 생명체뿐만 아니라 재료 자신이 균열을 자기 치유하는 기술이다. 생명체는 자기 치유기능이 완성되었지만, 공업재료는 아직 초기 기술 개발단계이다. ① 미소한 손상; 생명체는 세포분열과 증식이 활발하여, 손상부로 세포가 이동하여 손상을 치유한다. 공업재료는 용질 원자 등의 자기확산을 이용한다. 금속이나 세라믹스 중의 미소한 손상인 기공은 여분으로 표면 에너지를 갖기 때문에, 수축하는 방향으로 된다. 고온에서 자기확산이 활발하다면 용질 원자가 기공으로 흘러들어 기공을 메워 치유한다. 이같이 주위의 세포 또는 용질 원자를 모아 치유하는 점에서 비슷하다. ② 표면부 손상; 생명체는 표면에 딱지가 형성된다. 딱지는 혈소판이 콜라겐과 결합하여, 섬유화하고 건조해서 생긴다. 공업재료는 표면의 화학반응을 이용하고 있다. 즉, 스테인리스강은 표면의 부동태 피막형성이다. 스테인리스강 표면은 얇은 산화물 피막이 형성되어, 자기 치유하기 때문에 스테인리스강의 내식성은 극히 우수하다. 세라믹은 분산시킨 SiC의 산화에 의해 생성한 SiO_2를 표면 크랙의 치유에 이용하고 있다.[27-42] Fig. 1.5는 자기 치유 기구를 나타내고, Fig. 1.6은 Si_3N_4/SiC 복합세라믹의 균열 치유를 보여준다. ③ 결손이 큰 손상; 생명체의 골절부는 섬유아세포가 증식하고, 콜라겐 등을 생산하여, 골절부가 연결된다. Fig. 1.7은 골절부의 치유 모습을 보여준다. 공업재료는 접착제를 미리 캡슐 등으로 봉입하여, 재료 중에 분산해 둔다. 균

열로 캡슐이 파괴되면 접착제는 모세혈관 현상에 의해 균열을 덮는다. 이 과정에서 분산해 있던 경화제와 접촉하면 경화하기 위해 이전보다도 단단해진다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

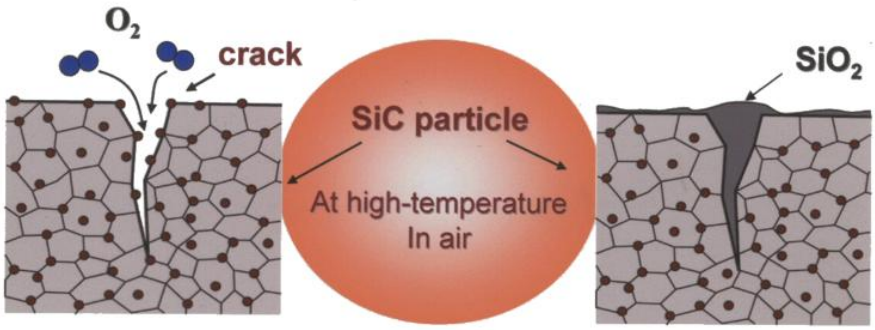
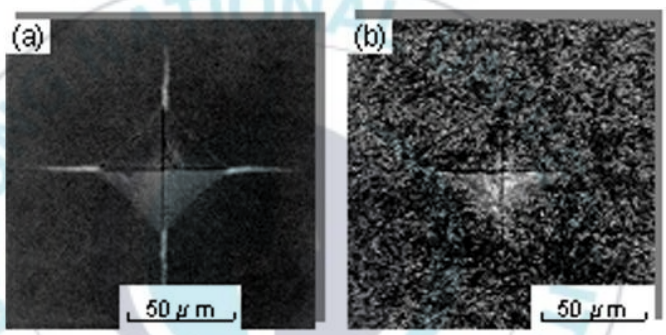


Fig. 1.5 Self-healing mechanism of ceramics



(a) Before crack-healing, (b) After crack-healing

Fig. 1.6 Appearance of before-and-after crack-healing at Si_3N_4/SiC composite ceramics.

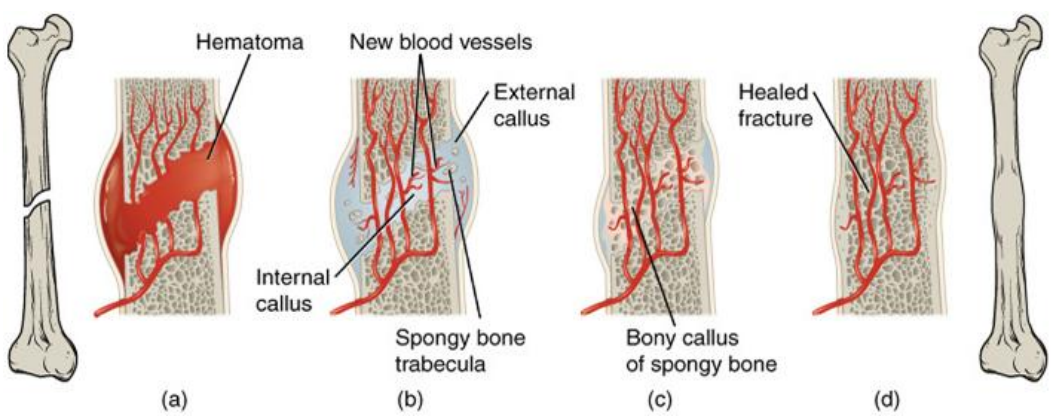


Fig. 1.7 Appearance of self-healing of bone fracture.

균열 무해화는 제1기의 파괴 기준을 이용하는 것으로, 제2기와는 역발상이다. 균열의 성장을 저지하고, 수명을 무한대로 하는 기술이다. 많은 연구자는 이 기술은 경제적으로 범용성이 높고, 기기나 강구조물의 신뢰성이나 안전성 향상, 보전비의 절감에 크게 공헌할 것으로 판단된다.

많은 연구자는 피닝에 의한 피로강도 향상에 관하여 연구를 하였다.[43-50] 그러나 제강 및 가공 등의 과정에서 형성되는 균열에 피닝하여, 피로강도 증가 및 균열 무해화를 연구하고 있다.[51-57] 균열 무해화는 피닝 등으로 압축 잔류응력을 도입하여, 작용 응력과의 관계에서 얻을 수 있다. 균열 무해화의 모식도는 Fig. 1.7과 같이 나타낼 수 있다.

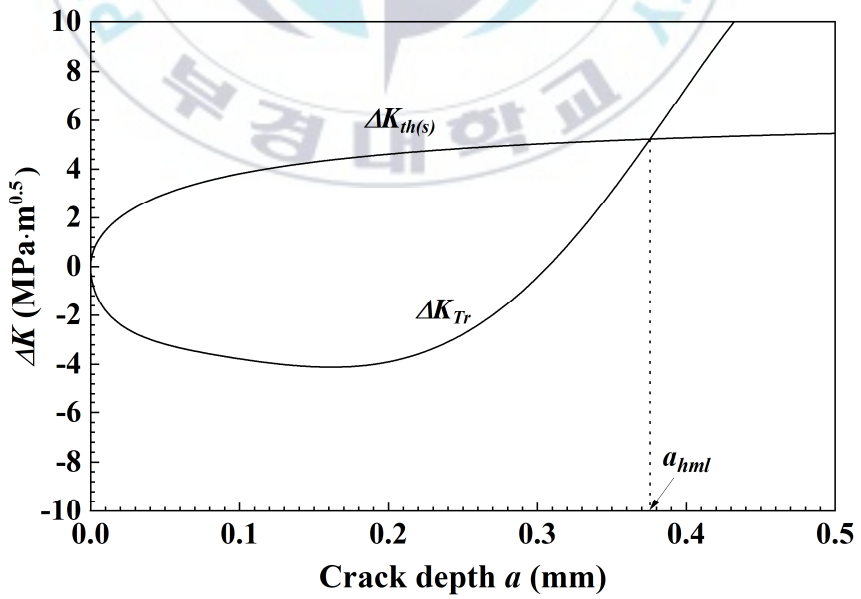


Fig. 1.7 Schematic diagram that can rendered harmless crack

피닝 시험편에서 균열무해화 조건은 식(1.1)로 나타낼 수 있다.

$$\triangle K_{Tr} = K_{ap} + K_r \leq \triangle K_{th} \qquad (1.1)$$

여기서 K_{ap}는 최대 반복응력의 응력확대계수, K_r은 압축잔류응력에 의한 응력확대계수, $\triangle K_{th}$는 하한계응력확대계수 범위이다.

K_{ap}는 Newman-Raju 식[58]으로 평가하며, 평가 응력은 평활시험편의 피로한도σ_w를 사용한다. 응력확대계수K_r은 피닝에 의한 압축잔류응력을 API-RP579[59]의 4차다항식으로 평가한다.

$\Delta K_{th(s)}$는 미소 균열의 ΔK_{th}를 나타낸다. ΔK_{th} 균열 길이 의존성은 식(1.2)를 사용한다.[60]

$$\Delta K_{th} = 2\alpha\Delta\sigma_w\sqrt{\frac{a}{\pi}}\cos^{-1}\left[\left\{\frac{\pi}{8\alpha^2 a}\left(\frac{\Delta K_{th(l)}}{\Delta\sigma_w}\right)^2+1\right\}^{-1}\right] \qquad (1.2)$$

여기서 $\Delta\sigma_w$는 평활시험편의 피로한도, α는 Newman-Raju 식에서 얻어지는 형상계수이다. $\Delta K_{th(l)}$은 긴 균열의 하한계응력확대계수 범위이다.

무해화 가능 최대 균열 크기a_{hml}는 Fig. 1.7에 나타낸 ΔK_{Tr}과 ΔK_{th}의 교점을 말한다.

상기와 같은 방법으로 많은 연구자는 피닝에 의한 무해화 가능 균열 크기를 평가하였다.[60-68]

1.3 논문의 구성 및 개요

강은 제조 또는 사용 중에 결함이 발생할 수 있다. 이와 같은 강 구조물에 존재하는 결함은 반복응력에 의하여 균열이 진전하여 치명적인 인적, 물적 손상을 초래한다. 만약 균열 부분에 다양한 피닝을 실시하면, 균열은 닫히고, 압축잔류응력이 발생할 수 있다. 이러한 상태는 피로강도가 증가하고, 균열 무해화가 되는 것이다. 본 연구에서는 수소저장탱크 입출력 배관에 사용되는 Ni 12% STS316L에 초음파 피닝하여, 피로강도 및 균열 무해화 가능 크기를 평가하였다.

제1장은 연구의 배경, 균열의 자기 치유와 무해화를 설명하였다.

제2장은 균열형상비(Aspect ratio; $As=a/c$) As=1.0과 0.4의 균열을 방전가공(Electric Discharge Machining; EDM)한 STS316L에 초음파 피닝한 후, 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 초음파 피닝(Ultrasonic Peening; UP)에 의한 STS316L의 피로강도 향상 및 표면균열무해화에 관한 균열형상의 영향을 평가하였다.

제3장은 초음파 피닝(UP)에 의한 무해화 가능 균열 깊이a_{hml}에 대하여 압축 잔류응력 분포, 긴 균열의 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(l)}$ 및 균열형상비(As)의 의존성을 평가하였다. 또한 가정한 안전율(N)에서 최대균열 깊이(a_{crN})와 a_{hml} 및 비파괴검사로 확실하게 검출 가능한 균열 깊이(a_{NDI})와 a_{hml}의 As 의존성을 평가하였다.

제4장은 본 논문에서 얻어진 결론을 요약하였다.

참고문헌

(1) Milne, I., Ainsworth, R.A., Dowling, A.R. and Stewart, A.T., 1986, "Assessment of the integrity of structures containing defects," CEGB Report R/H/R6-Revision 3.

(2) Akita, Y., Ikeda, K. and Iwai, N., 1964, "On brittle fracture initiation (First report) - Deep notch test -," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1964, No. 116, pp. 136-146.

(3) Paris, P.C. and Erdogan, F.A., 1963, "Critical analysis of crack propagation laws," Journal of Basic Engineering, Vol. 85, No. 4, pp. 528-533.

(4) Dunegan, H.L. and Tetelman, A.S., 1971, "Non-destructive characterization of hydrogen-embrittlement cracking by acoustic emission techniques," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, No. 4, 387-390.

(5) ASME B&PV Code Section XI, 2013, "Rules for in-service inspection of nuclear power plant components," American Society of Mechanical Engineers.

(6) API 579-1/ASME FFS-1, 2007, "Recommended practice for fitness-for-service," 2nd Edition, American Petroleum Institute.

(7) The Japan Welding Engineering Society Standard WES2805-1997, "Method of assessment for fusion welded joints with respect to brittle fracture and fatigue crack growth," The Japan Welding

Engineering Society.

(8) HPISZ 102TR, "Assessment procedure for crack-like flaws in pressure equipment, " High Pressure Institute of Japan .

(9) JSME, 2009, "Codes for nuclear power generation facilities : Rules on materials for nuclear facilities," JSME S NA1-2008.

(10) Kitagawa, H. and Takahashi, S., 1976, "Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage," Proceedings of the second international conference on mechanical Behavior of materials. (Metals Park, OH: ASM), pp. 627-631.

(11) de los Rios, E.R., Ando, K. and Biddulph, R.H., 1990, "Fracture and effect assessment of ceramic composites," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 13, No. 4, pp. 431-442.

(12) Iwasa, M., Ando, K., Ogura, N., 1990, "Process zone size fracture criterion for ceramica," ransactions of JSME(A), Vol. 56, No. 531, pp. 149-154.

(13) Ando, K., Kim, B.A., Iwasa, M., Ogura, N., 1992, "Process zone size failure criterion and probabilistic fracture assessment curves for ceramics," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 15, No. 2, pp. 139-149.

(14) El Haddad, M.H., Topper, T.H. and Smith, K.N., 1979, "Prediction of non-propagating cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573-584.

(15) Frost, N.E. and 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, No. 3, pp. 182-192.

(16) Tanaka, K., Nakai, Y. and Yamasita, M., 1981, "Fatigue growth threshold of small cracks," International Journal of Fracture, Vol. 17, No. 5, pp. 519-533.

(17) 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.

(18) Irwin, G.R., 1948, "Fracture dynamics. In fracturing of metals," 1947 ASM Symposium, Trans, ASM 40A, pp. 147~166.

(19) Wells, A.A., 1963, "Application of fracture mechanics at and beyond general yielding, " British Welding Journal, Vol. 10, pp, 563-570.

(20) Bilby, B.A., Cottrell, A.H. and Swinden, K.H., 1963, "The spread of plastic yield from a notch," Proceedings of the Royal Society A, Vol. 272, No. 1350, pp. 304-314.

(21) Rice, J.R., 1968, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks," Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, No. 2, pp. 379-386.

(22) Burdekin, F.M. and Stone, D.E.W., 1966, "The crack opening

displacement approach to fracture mechanics in yielding materials," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 1, No. 2, pp. 145-153.

(23) ASME, 1977, "ASME boiler and pressure vessel code, Rules for inservice inspection of nuclear power plant components - Section XI," American Society of Mechanical Engineers, New York.

(24) Milne, I., 1976, "Failure assessment in development in fracture mechanics-1," (editor G.G. Chell), Applied Science, London, 259.

(25) PD6493, 1980, "Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints," British Standards Institution.

(26) WES 2805-1980, 1980, " Method of assessment for defects in fusion-welded joints with respect to brittle fracture, " Japan Welding Engineering Society Standard.

(27) Ando, K., Ikeda, T., Sato, S., Yao, F. and Kobayasi, Y., 1998, "A Preliminary study on crack healing Behavior of Si3N4/SiC composite ceramics," Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 21, pp. 119-122.

(28) Ando, K., Tsuji, K., Ariga, M., and Sato, S., 1999, "Fatigue strength properties of crack healed Mullite/SiC composite ceramics," J. Soc. Mater. Sci. Jap., Vol. 48, No. 10, pp. 1173-1178.

(29) Ando, K., Ikeda, T., Sato, S., Yao, F. and Kobayasi, Y., 1998, "A preliminary study on crack healing behaviour of Si3N4/SiC

composite ceramics," Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 21, pp. 119-122.

(30) Nakao, W., Chiba Y., Iwata, K., Nishi, Y. and Ando, K., "Strengthening of ceramics surface by crack healing and electron beam irradiation," Int. J. Appl. Ceram. Tech., Vol. 8, No. 2, pp. 239-489.

(31) Ando, K., Houjou, K., Chu, M.C. Chu, Takeshita, S., Takahashi, K., Sakamoto, S. and Sato, S., 2002, "Crack-healing behaviour of Si3N4/SiC ceramics under stress and fatigue strength at the temperature of healing (1000℃)," Journal of the European Ceramic Society, Vol. 22, No. 8, pp. 1339-1346.

(32) Lee, S.K., Ishida, W., Lee, S.Y., Nam, K.W., Ando, K.. 2005, "Crack-healing behavior and resultant strength properties of silicon carbide ceramic", J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 25, pp. 569-576.

(33) Kim, H.S.,, Kim, M.K., Kang, S.B., Ahn, S.H. and Nam, K.W., 2008, "Bending strength and crack-healing behavior of Al2O3/SiC composites ceramics," Materials Science and Engineering A, Vol. 483-484, pp. 672-675.

(34) Nam, K.W., Park, S.W., Do, J.Y. and Ahn, S.H., 2008, "Cracked-healing and bending strength of Si3N4 ceramics," Transactions of the KSME(A), Vol. 32, No. 11, pp. 957-962.

(35) Nam, K.W., Kim, J.S. and Lee, H.B., 2009, "Room temperature strength and crack healing morphology of Si3N4 composite

ceramics with SiO2 colloidal," Transactions of the KSME(A), Vol. 33, No. 7, pp. 652-657.

(36) Nam, K.W., Park, S.H. and Kim, J.S., 2009, "Cracked-healing and the bending strength of Si3N4 composite ceramics with SiO2 additions," Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 10, No. 4, pp. 497-501.

(37) Nam, K.W. and Kim, J.S., 2010, "Effect of a colloidal SiO2 coating to crack healing and the bending strength of Si3N4 ceramics," Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 11, No. 1, pp. 20-24.

(38) Nam, K.W. and Kim, J.S., 2010, "Critical crack size of healing possibility of SiC ceramics," Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 3236-3239.

(39) Nam, K.W., Kim, J.S. and Park, S.W., 2010, "The high temperature strength of SiC ceramics based on SiO2 nano-colloidal employed," Materials Science and Engineering A, Vol. 527, Nos. 21-22, pp. 5400-5404.

(40) Nam, K.W., Kim, J.S. and Park, S.W., 2010, "Crack-healing behavior and bending strength properties of SiC ceramics based on the type of additive SiO2 employed," International Journal of Modern Physics B, Vol. 24, Nos. 15-16, pp. 2869-2874.

(41). Nam, K.W. and Kim, E.S., 2012, "Healing properties of SiC ceramics according to surface roughness," Materials Science and Engineering A, Vol. 547, pp. 125-127.

(42) Hwang, J.R., Kim, D.W. and Nam, K.W., 2013, "Crack-healing behavior and corrosion characteristics of SiC ceramics," J. Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 5, pp. 10-15.

(43) Lee, K.H., Nam, K.W. and Ahn, S.H., 2017, "Crack healing of alumina according to the added amount of silicon carbide, " Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 18, No. 11, pp. 831-842.

(44) Takahashi, K., Amano, T., Miyamoto, T., Ando, K., Takahashi, F., Tange, A., Okada, H. and Ono, Y., 2007, "Improvement of fatigue strength by shot peening for spring steel specimens containing an artificial surface defect," Japan Society of Spring Engineers, Vol. 52, pp. 9-13.

(45) Koshimune, M., Matsui, K., Takahashi, K., Nakao, W. and Ando, K., 2009, "Influence of hardness and residual stress on fatigue limit for high strength steel," Japan Society of Spring Engineers, Vol. 54, pp. 19-26.

(46) Odhiambo, D. and Soyama, H., 2003, "Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength of carbonized steel, " International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 1217-1222.

(47) Suh, C.M., Song, G.H. and Pyun, Y.S., 2007, "A quality control method by ultrasonic vibration energy and diagnosis system at trimming process," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, pp. 397-402.

(48) Takahashi, K., Amano, T., Ando, K. and Takahashi, F., 2011,

"Improvement of fatigue limit by shot peening for high-strength steel containing a crack-like surface defect," International Journal of Structural Integrity, Vols. 2-3, pp. 281-292.

(49) Suh, M.S., Suh, C.M. and Pyun, Y.S., 2013, "Very high cycle fatigue characteristics of a chrome-molybdenum steel treated by ultrasonic nanocrystal surface modification technique, " Fatigue Fract Engng Mater Struct, Vol. 36, pp. 769–778

(50) Houjou, K., Takahashi, K. and Ando, K., 2013, "Improvement of fatigue limit by shot peening for high-tensile strength steel containing a crack in the stress concentration zone," International Journal of Structural Integrity, Vols. 4-2, pp. 258-266.

(51) Yasuda, J., Takahashi, K. and Okada, H., 2014, "Improvement of fatigue limit by shot peening for high-strength steel containing a crack like surface defect -Influence of stress ratio-," International Journal of Structural Integrity, Vols. 5-1, pp. 45-59.

(52) Fueki, R., Takahashi, K. and Houjou, K., 2015, "Effect of peening on the fatigue limit of welded structural steel with surface crack, and rendering the crack harmless," Materials Sciences and Applications, Vols. 6-6, pp. 500-510.

(53) Takahashi, K., Nakagawa, M., Koike, H. and Okada, H., 2017, " Improvement of torsional fatigue limit and rendering surface defect harmless by shot peening for spring steel," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 842, pp. 12066.

(54) Fueki, R., Takahashi, K. and Handa, M., 2019, “Fatigue limit improvement and rendering defects harmless by needle peening for high tensile steel welded joint,” Metals, Vol. 9, No. 2, pp.143.

(55) Takahashi, K., Kogishi, Y., Shibuya, N. and Kumeno, F., 2020, “Effects of laser peening on the fatigue strength and defect tolerance of aluminum alloy,” Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures, Vol. 43, No. 4, pp. 845-846.

(56) Ando, K., Nam, K.W., Kim, M.H. and 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.

(57) Ando, K., Kim, M.H. and Nam, K.W., 2021, “Analysis on peculiar fatigue fracture behaviour of shot peened metal using new threshold stress intensity factor range equation,” Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 44, Issue 2, pp. 306-316.

(58) Newman, Jr,J.C. and Raju, I.S., 1981, “An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.

59. API Recommended Practice 579, 2000, “Fitness for service,” American Petroleum Institute, first edition.

(60) Ando, K., Fueki, R., Nam, K.W., Matsui, K. and 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.

(61) Nam, K.W., Ando, K., Kim, M.H. and Takahashi, K., 2021, “Improving reliability of high strength material designed against fatigue limit using surface crack nondamaging technology,” Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 44, No. 6, pp. 1602-1610.

(62) Nam, K.W., Lee, W.G., Ahn and S.H., 2019, “ The evaluation of the threshold stress intensity factor and the fatigue limit of surface-cracked specimen considering the surface condition,” International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 12, No. 6, pp. 802-808.

(63) Hyun, J.Y., Kim, M.H. and 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.

(64) Hyun, J.Y., Kim, M.H. and Nam, K.W., 2019, “Study of threshold stress intensity factor and fatigue limit for short crack growth of HV470 steel,” Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 5-12.

(65) Kim, M.H., Hyun, J.Y. and Nam, K.W., 2020, “Evaluation of harmless crack size using Ando’s equation,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, No. 5, pp. 1971-1977.

(66) Ando, K., Nam, K.W., Kim, M.H., Ishii, T. and 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.

(67) Kim, M.H., Park, H.S. and Nam, K.W., 2020, “A study on the threshold stress intensity factor and fatigue limit of short crack growth,” Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 44, No. 11, pp. 781-786.

(68) Park, H.S., Kim, M.H. and Nam, K.W., 2021, ” 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.

제2장

초음파 피닝에 의한 표면균열의 무해화

2.1 서언

철강 구조물의 안전성은 강 중에 존재하는 미소 균열을 제어하는 것이다. 많은 구조물은 피로 응력을 받고 있으며, 파괴된 강 구조물의 90%는 피로가 원인이다.[1] 이같이 강에 존재하는 미소 균열을 제어하여 피로강도를 증가시키는 방법은 피닝이 효과적이다.[2,3] 피닝은 고강도강에 효과적이며, 압축잔류응력을 생성시킨다.[4-9] 많은 연구자는 자동차의 경량화를 위하여 스프링강[7-12] 및 기어[13—15] 등에 쇼트피닝을 실시하여 피로강도 향상 및 표면균열의 무해화[16]를 연구하였다. 균열무해화는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력 및 피로응력에 의한 응력확대계수와 하한계응력확대계수와의 관계에서 결정하였다. 압축잔류응력 및 피로응력에 의한 응력확대계수는 각각 API-RP579[17] 및 Newman-Raju식[18]으로 평가하였다. 또한, 미소 균열의 하한계응력확대계수는 El Haddad 등[19] 및 Tange 등[20]이 제안한 식으로 평가하였다. 이와 같은 하한계응력확대계수는 균열 크기에 의존하고, 미소 균열은 균열 크기가 증가함에 따라서 증가하지만, 어떤 크기 이상에서는 균열 크기에 의존하지 않고 일정한 값이 된다. 한편 Ando 등[21-23]은 피로 특유의 소성 거동과 응력비를 고려하여, 균열 크기에 의존하는 하한계응력확대계수 평가식을 제안하였다. 이 식에 의하여 미소 균열을 가지는 고강도강의 피로한도 및 하한계응력확대계수를 평가할 수 있었다.[24,25]

이와 같이 피닝한 고강도강은 미소 균열에 대한 피로한도 및 하한계응력확대계수를 정량적으로 평가하고, 균열무해화 가능 크기를 예측할 수 있었다.[26] 그러나 피닝한 저강도강의 피로한도는 연구되고 있지

만,[27-31] 압축잔류응력이 존재하는 재료의 미소 균열 크기에 따르는 응력확대계수 및 하한계응력확대계수의 평가는 많은 연구가 필요한 실정이다. 특히, 고 연성 재료인 Ni 12% STS316L은 수소저장용 탱크의 입출력 배관에 적용되므로, 미소 균열의 존재라도 위험한 상태에 직면할 수 있다. 그러므로 이와 같은 재료의 미소 균열에 대한 균열무해화 연구는 구조물의 안전을 위하여 필요하다.

따라서 본 장에서는 균열형상비(Aspect ratio; $As=a/c$) As=1.0과 0.4의 균열을 방전가공(Electric Discharge Machining; EDM)한 STS316L에 초음파 피닝한 후, 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 초음파 피닝(Ultrasonic Peening; UP)에 의한 STS316L의 피로강도 향상 및 표면균열 무해화에 관한 균열형상의 영향을 평가하였다.

2.2 재료 및 실험방법

2.2.1 재료

실험에 사용한 재료는 수소 저장탱크 입출력 배관재로 사용되는 Ni 12% STS316L이다. 재료의 화학성분을 Table 2.1에 나타낸다. 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2.1에, 가공공정을 Fig. 2.2에 각각 나타낸다. 시험편은 폭 10mm, 길이 124mm, 두께 4mm로 인장-인장 응력을 부하하였다. 시험편 표면은 길이 방향으로 연마하였다. 균열 형상은 반원형 및 반타원형 표면균열을 도입할 목적으로 Fig. 2.3과 같은 형상을 방전가공으로 시험편의 중앙에 부여하였다. 여기서 c와 a는 각각 균열 길이 및 균열 깊이를 나타낸다. 반원형 균열형상비는 As=1.0이고, 균열 깊이a는 0.2, 0.3, 0.4, 0.5mm이다. 반타원형 균열형상비는 As=0.4이고, 균열 깊이 a는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4mm이다. 균열형상비 As=1.0과 0.4의 균열 폭은 0.05mm이다. 시험편은 기계가공 및 방전가공으로 균열 가공 후, 아르곤 분위기의 1,050℃에서 20분간 용체화 처리하였다.

Table 2.1 Chemical composition of test materials. (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

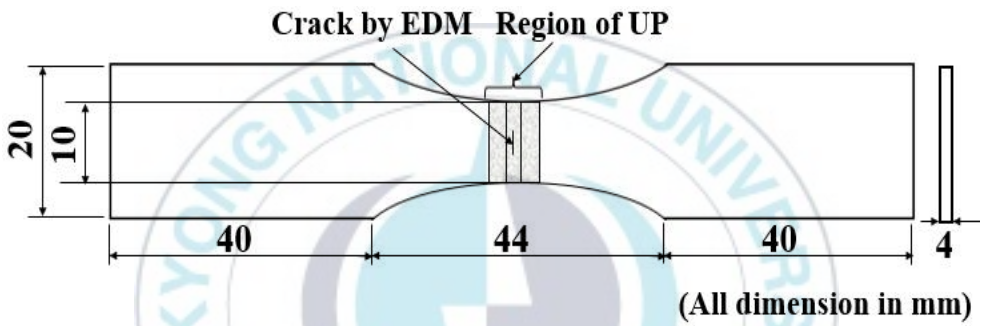


Fig. 2.1 Shape and dimension of specimen.

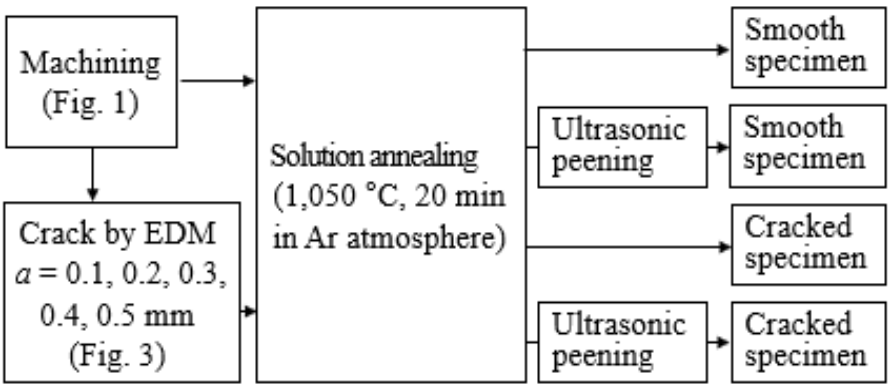
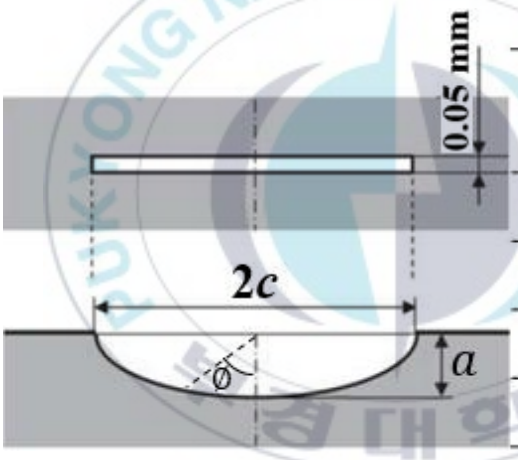


Fig. 2.2 Flowchart of specimen machining process.



As(a/c) 1.0	As(a/c) 0.4
0.2/0.2	0.1/0.25
0.3/0.3	0.2/0.5
0.4/0.4	0.3/0.75
0.5/0.5	0.4/1.0

Fig. 2.3 Shape and dimension of surface crack by EDM.

2.2.2 초음파 피닝 조건

초음파 피닝 조건은 Table 2.2에 나타내었다. 초음파 피닝 장비는 UP-600(SINTEC, Canada)로서, 초음파 발진기 피닝장치를 사용하였다. 초음파 피닝 작업부(working head)는 직경 4mm 한 개의 핀을 사용하였다. 초음파 진동의 주파수는 22kHz이고, 초음파 에너지 수준은 3단계를 사용하였다. 초음파 피닝은 Fig. 2.1과 같이 균열부에 1 pass하고, 좌우에 각각 1 pass하여 피닝 폭은 8mm가 되도록 하였다. 초음파 피닝에 의한 균열부의 변형은 최표면부에 국한되므로, 균열의 변형이 피로강도에 미치는 영향은 고려하지 않아도 좋을 것으로 생각된다. 이하 초음파 피닝한 것은 UP 시험편, 피닝하지 않은 것은 Non-UP시험편이라 한다.

Table 2.2 Condition of ultrasonic peening.

Peening machine	Ultrasonic peening (UP-600)
Pin head	One single-pin
Diameter of pin	∅4mm
Frequency of ultrasonic oscillations	22kHz
Level of ultrasonic energy	Range 3 (50N)

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

2.2.3 잔류응력 분포

초음파 피닝에서 얻어진 잔류응력분포를 Fig. 2.4에 나타낸다. 잔류응력의 측정은 X선회절 응력측정장치(Rigaku AutoMATE Ⅱ, Japan)를 사용하였다. 평활재 시험편 중앙부의 표면을 전해연마하여, 깊이 방향의 잔류응력 분포를 측정하였다. 측정조건은 $Cr-K_{\beta}$선, 각도계 직경 ϕ=2mm, $2\theta-\sin^2\psi$법이다. Non-UP 시험편의 잔류응력은 거의 0이었다. UP 시험편은 최표면의 최대 압축잔류응력 $\sigma_{r,s}$=-678MPa이고, 표면에서 깊이 0.3mm에서 거의 0이었다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

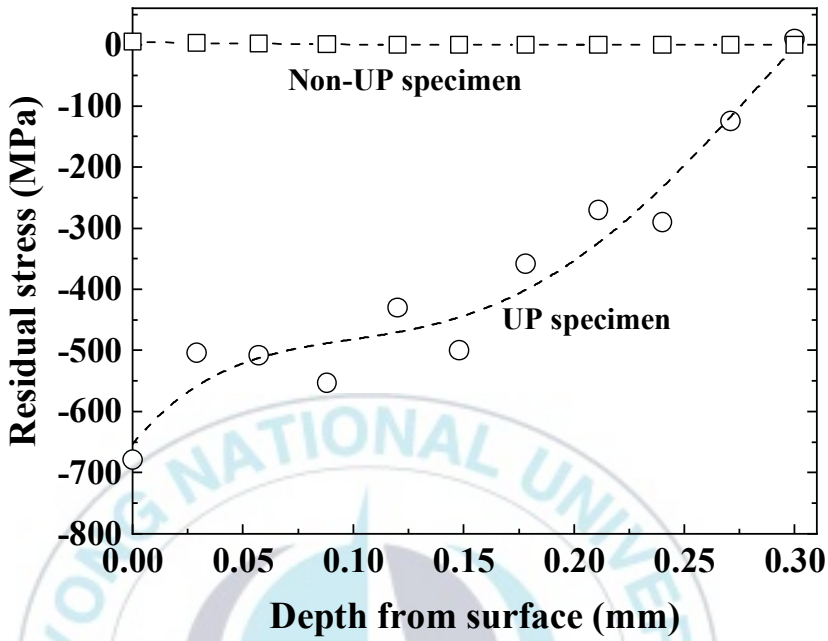


Fig. 2.4 Residual stress distribution by UP.

2.2.4 피로시험

UP 및 Non-UP 시험편을 사용하여, 실온 대기 중에서 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 피로시험기는 허용 하중 ±100kN (MTS 370.10)을 사용하였다. 피로응력은 응력비 R=0.1, 반복주파수 f=20Hz, 응력파형은 정현파이다. 여기서 응력은 시험편 최소 단면부의 공칭응력이다. 피로한도는 10^7회 반복응력을 견딘 시험편의 응력으로 정의하였다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

2.3 결과 및 고찰

2.3.1 UP에 의한 피로강도 향상과 표면균열의 무해화

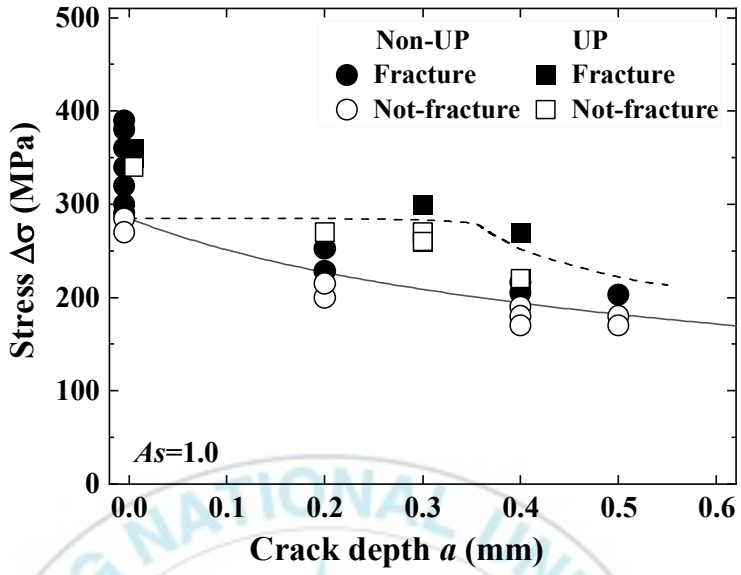
Fig. 2.5 (a) 및 (b)는 인장-인장 피로시험의 응력과 균열 깊이의 관계를 나타낸다. (a) 및 (b)는 각각 균열형상비 *As*=1.0과 0.4의 결과이다. ● 및 ○는 Non-UP 시험편, ■ 및 □는 UP 시험편을 나타낸다. 그리고 ● 및 ■는 파단시험편을 나타내고, ○ 및 □는 10^7회 반복응력에서 미파단시험편을 나타낸다. 미파단시험편의 최대응력은 피로한도에 해당한다. 그리고 그림에서 점선은 UP 시험편의 파단-미파단의 경계를 나타내고, 실선은 Non-UP 시험편의 파단-미파단의 경계를 나타낸다.

Non-UP 및 UP 평활시험편의 피로한도는 각각 285MPa 및 340MPa을 나타내었다. 그러나 균열시험편은 *As*에 관계없이 깊이가 증가함에 따라 피로한도가 감소하였다. *As*=0.4 균열시험편의 피로한도는 *As*=1.0 균열시험편의 피로한도보다 작게 나타났다. 미소균열을 갖는 균열시험편의 피로한도는 균열의 $\sqrt{area}$ 크기에 의존하는 것으로 알려져 있다.[32] 균열깊이가 동일한 경우, *As*=0.4 균열시험편의 $\sqrt{area}$는 *As*=1.0의 $\sqrt{area}$보다 크다. 따라서 *As*=0.4 균열시험편의 피로한도가 *As*=1.0 균열시험편의 피로한도보다 작게 나타난다고 생각된다. 한편 UP 균열시험편의 피로한도는 균열 깊이 *a*=0.3 mm까지 일정하게 나타났다. 이때의 피로한도는 Non-UP 평활시험편 피로한도의 약 95%에 상당하는 응력을 나타내었다. 본 장에서 사용한 재료와 같이 연성이 풍부한 재료의 표면균열 무해화 조건은 UP 균열시험편의 피로한도가 평활시험편의 피로한도와

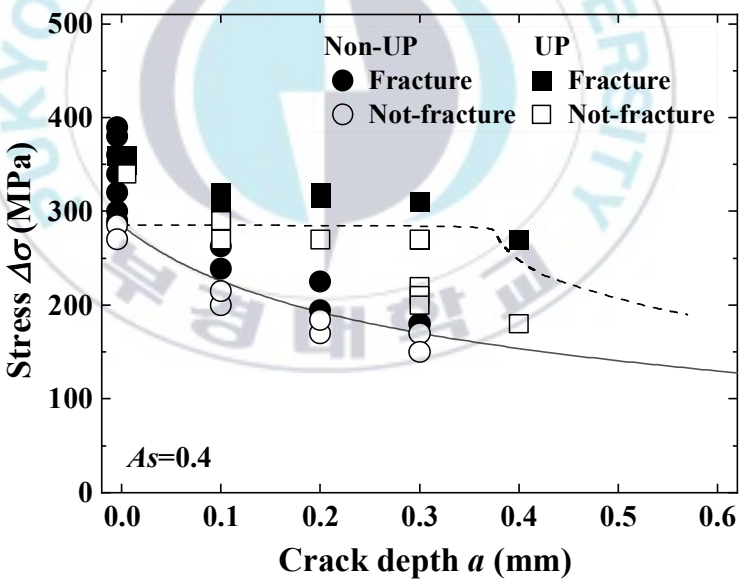
비슷(5% 이내)하게 증가한 경우를 정의하였다.

균열 깊이 a=0.3mm 이하의 균열은 무해화 가능하고, As=1.0 및 0.4에서 무해화 가능한 균열 크기는 동일하다는 것을 알 수 있다. 즉, UP시험편은 피로한도에 미치는 As의 영향이 작았다. 이 이유는 UP에 의하여 균열시험편의 균열 닫힘과 압축잔류응력으로 피로한도가 증가하였기 때문이다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교



(a)



(b)

Fig. 2.5 Stress range of Fracture and Not-fracture for crack depth on Non-UP and UP specimens. (a) *As*=1.0, (b) *As*=0.4

2.3.2 무해화 가능 균열 크기의 파괴역학적 검토

UP로 무해화 가능한 균열의 크기는 파괴역학으로 평가할 수 있다. 반복응력과 UP에 의한 압축잔류응력으로 균열 선단에 작용하는 응력확대계수의 변동폭(ΔK_{Tr})은 양의 값만이 피로균열 전파에 유효할 것이라고 판단된다. 따라서 UP 시험편에서 균열무해화 조건은 식(2.1)로 나타낼 수 있다.

$$\triangle K_{Tr} = K_{ap} + K_r \leq \triangle K_{th} \qquad (2.1)$$

여기서 K_{ap}는 최대 반복응력의 응력확대계수, K_r은 압축잔류응력에 의한 응력확대계수, $\triangle K_{th}$는 하한계응력확대계수 범위이다.

K_{ap}는 Newman-Raju 식[18]을 사용하여 평가하였으며, 평가에 사용한 응력은 Non-UP 평활시험편의 피로한도인 최대 반복응력σ_w을 사용하였다. 본 장에서는 σ_w=285MPa을 사용하였다.[24] 압축잔류응력에 의한 응력확대계수K_r은 API-RP579[17]에 4차다항식으로 나타내는 표면균열의 응력확대계수 평가식을 사용하였다. 평판 중에 존재하는 표면균열의 응력확대계수는 식(2.2)로 평가할 수 있다.

$$K_r = \left[G_0\sigma_0 + G_1\sigma_1\left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\sigma_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}\, f_w \qquad (2.2)$$

$$Q = 1.0 + 1.464\left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}$$

$$f_w = \left\{ \sec\left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right\}^{0.5}$$

여기서 $G_0 \sim G_4$는 API-RP579에 의한 응력확대계수의 보정계수이다. a 및 c는 Fig. 2.3에 나타낸 것과 같이 각각 균열 깊이와 균열 길이의 절반을 나타낸다. W 및 t는 각각 판 폭 및 판 두께이다. $\sigma_0 \sim \sigma_4$는 식(2.3)을 사용하여, 압축잔류응력 분포를 4차다항식으로 나타내었을 때, 얻어지는 계수이다.

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1\left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3\left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4\left(\frac{x}{t}\right)^4 \qquad (2.3)$$

여기서 x는 표면에서 깊이 방향의 거리를 나타낸다. Fig. 2.4에 나타낸 UP에 의한 압축잔류응력 분포를 4차다항식으로 나타내어, 식(2.2)에 의하여 K_r을 평가하였다.

Fig. 2.6 (a) 및 (b)는 각각 As=1.0 및 0.4의 과 균열 깊이의 관계를 나타낸다. ΔK_{TrA}및 ΔK_{TrC}는 각각 균열의 가장 깊은 부분 및 표면 부분의 ΔK_{Tr}을 나타낸다. 본 장에서 적용한 균열은 미소 균열이므로 하한계응력확대계수 범위(ΔK_{th})는 균열 크기 의존성을 나타낸다. $\Delta K_{th(s)A}$및 $\Delta K_{th(s)C}$는 각각 미소 균열의 가장 깊은 부분 및 표면 부분의 ΔK_{th}를 나타낸다. ΔK_{th} 균열 길이 의존성을 나타내는 식은 연구자들에 의하여 제안되어 있지만,[19,20] 본 장에서는 Ando 등[21]이 제안한 식(2.4)를 사용하였다.

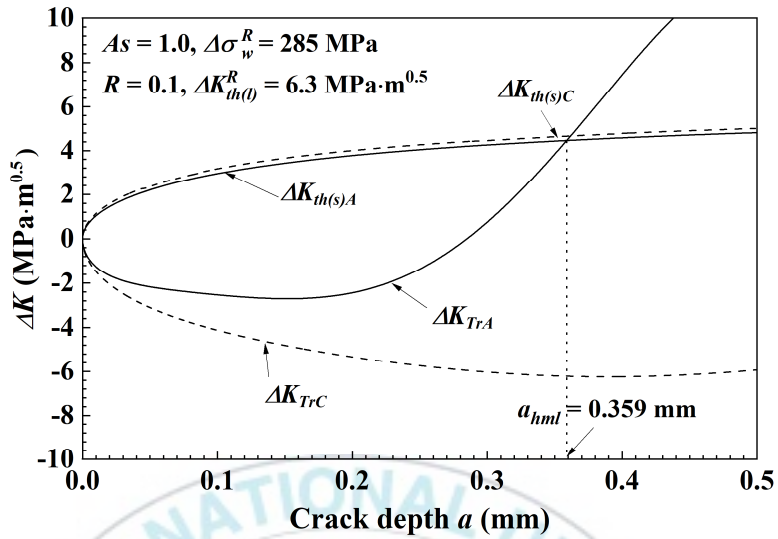
$$\Delta K_{th} = 2\alpha\Delta\sigma_w\sqrt{\frac{a}{\pi}}\cos^{-1}\left[\left\{\frac{\pi}{8\alpha^2 a}\left(\frac{\Delta K_{th(l)}}{\Delta\sigma_w}\right)^2+1\right\}^{-1}\right] \qquad (2.4)$$

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

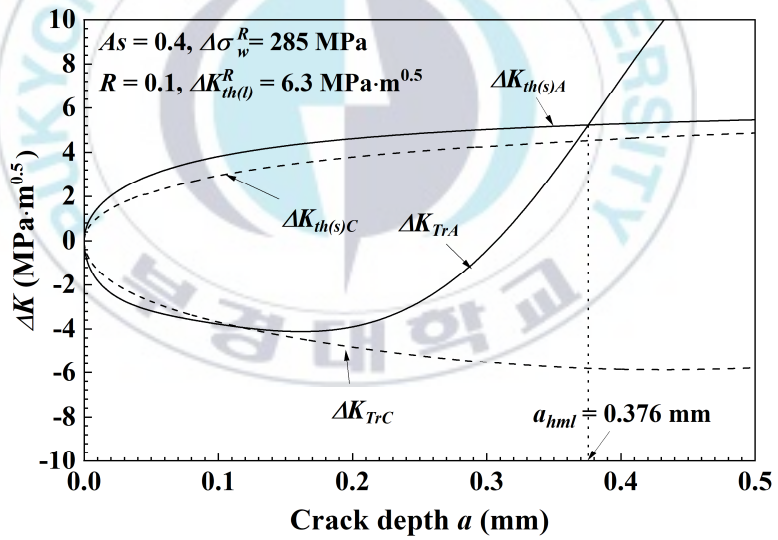
여기서 $\Delta\sigma_w$는 Non-UP 평활시험편의 피로한도, α는 Newman-Raju 식에서 얻어지는 형상계수이다. ϕ는 Fig. 2.3에 나타낸 각이고, F와 Q는 형상보정함수이다. $\Delta K_{th(l)}$은 긴 균열의 하한계응력확대계수 범위이며. 본 장에서는 6.3 $MPa\sqrt{m}$[24]를 사용하여, $\Delta K_{th(s)}$를 계산하였다.

표면균열은 ΔK_{Tr}과 ΔK_{th}와의 대소 관계에서 표면균열이 반복응력을 받는 구조물에 유해한가 아닌가를 평가할 수 있다. 만약 ΔK_{Tr}이 ΔK_{th}보다 작으면 균열은 무해하다고 평가할 수 있다. 따라서 ΔK_{Tr}과 ΔK_{th}의 교점에서 무해화 가능 균열 크기 a_{hml}을 결정할 수 있다.

Fig. 2.6 (a) 및 (b)에서 *As*=1.0 및 0.4의 무해화 가능 균열 크기는 각각 ΔK_{TrA}과 $\Delta K_{th(s)A}$의 교점인 *a*=0.359mm 및 0.376mm이다. 이 결과는 *a*=0.3mm의 표면균열은 무해화 가능하고, *a*=0.4mm의 표면균열은 무해화 되지 않은 *As*=1.0 및 0.4의 실험 결과와 일치한다. 이 그림에서 ΔK_{TrC}와 $\Delta K_{th(s)C}$의 교점은 없으므로, 균열 깊이 *a*=0.3mm인 경우는 표면균열 길이에 관계없이 무해화 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 본 장의 무해화 예측 기법은 *As*에 관계없이 무해화 가능 균열 깊이를 예측할 수 있다고 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 2.6 Evaluation of crack size that can be rendered harmless on UP specimen. (a) *As*=1.0, (b) *As*=0.4

2.3.3 무해화 가능 균열 크기 선도

식(2.4)를 사용하여 각 *As*에 대한 무해화 가능 균열 크기를 평가하고, 무해화 가능 균열 크기 선도를 작성하였다. Fig. 2.7에 균열 깊이 *a*와 균열 길이의 절반 *c*의 관계를 나타내었다. API-RP579 식의 적용 범위는 *As*=1.0～0.16이므로, *As*=1.0, 0.4 및 0.18의 무해화 가능 균열 크기를 예측하여 나타내었다. 여기서 균열형상비가 가장 작은 *As*=0.16은 ΔK_{TrA}와 $\Delta K_{th(s)A}$의 교점이 없으므로, 본 장에 적용한 압축잔류응력에 의해서 균열이 진전하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 ΔK_{TrA}와 $\Delta K_{th(s)A}$의 교점이 나타나는 *As*=1.0～0.18의 범위에서 무해화 가능 균열 크기 예측선을 나타내었다. 여기서 ☆는 각 *As*에서 무해화 가능 최대 균열 크기를 나타낸다. 이것보다 작은 균열 깊이는 무해화 가능하다고 예측할 수 있다. *As*=1.0 및 0.4의 실험에서 무해화 가능한 크기를 ■, 무해화 불가능한 크기를 □로 나타내었다. 실험과 예측 결과를 비교하면, 일치하는 것을 확인할 수 있다. 무해화 가능 균열 크기의 예측선은 균열 길이에 대하여 균열 깊이의 변동이 작은 것을 알 수 있다. 이것으로 무해화 가능 균열 크기는 주로 균열 깊이에 의하여 결정되고, *As*의 영향은 작은 것을 알 수 있었다.

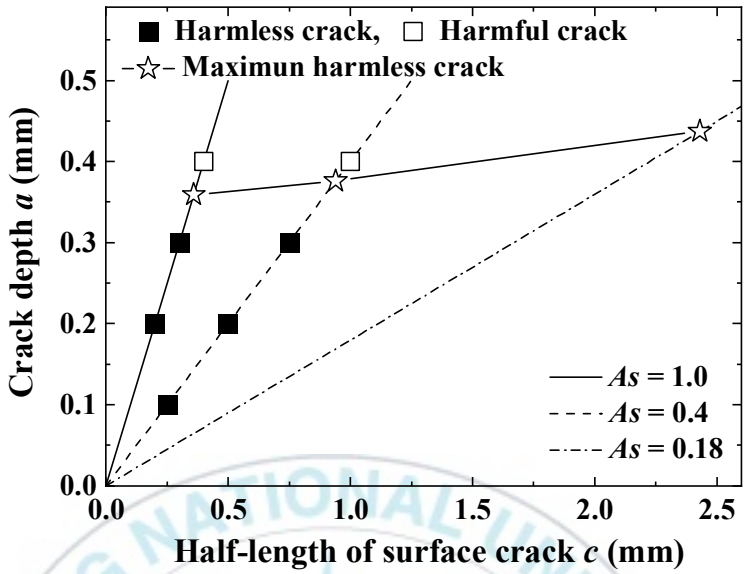


Fig. 2.7 The harmless crack assessment diagram for STS316L

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

2.4 결언

본 장에서는 수소저장용 탱크 입출력 배관에 사용되는 Ni 12%의 STS316L을 사용하여, As=1.0 및 0.4에서 균열 깊이 0.1～0.5mm의 균열을 방전가공하였다. 방전가공 후 UP 처리하고, 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) UP 처리한 평활재 및 균열 깊이 a=0.1～0.5mm의 방전가공 균열은 압축잔류응력에 의하여 피로한도가 증가하였다.
(2) 균열 깊이 a=0.3mm의 UP 시험편의 피로한도는 평활재의 피로한도와 비슷하게 얻어졌다. 이것은 UP에 의하여 균열 깊이 a=0.3mm까지의 균열은 무해화 가능하다.
(3) 방전가공 균열 깊이가 같은 Non-UP 시험편은 As=1.0의 피로한도는 As=0.4의 피로한도보다 높게 나타났다. 그러나 UP 시험편은 피로한도에 미치는 As의 영향이 적었다.
(4) UP 처리한 균열시험편의 응력확대계수 ΔK_{Tr}과 하한계응력확대계수 ΔK_{th}의 관계에서 무해화 가능 균열 크기를 평가하였다. 무해화 가능 균열 크기는 As에 관계없이 평가할 수 있었다.
(5) 무해화 가능 균열 크기는 주로 균열 깊이로 결정되고, As의 영향이 작은 것을 무해화 가능 균열 크기 선도에서 확인할 수 있었다.

참고문헌

(1) ASM International, 2008, “Elements of Metallurgy and Engineering Alloys - Chapter 14 Fatigue”, American Technical Publishers Ltd.

(2) Wagner, L., 2002, “Shot Peening”, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA.

(3) Gujba, A. K. and Medraj, M., 2014, “Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening”, Materials (Basel), Vol. 7, No. 12, pp. 7925-7974.

(4) Farrahi, G. H., Lebrijn, J. L. and Couratin, D., 1995, “Effect of Shot Peening on Residual Stress and Fatigue Life of a Spring Steel”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 18, Issue 2. pp. 211-220.

(5) Torres, M. A. S. and Voorwald, H. J. C., 2002, “An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel”, International Journal of Fatigue, Vol. 24, No. 8, pp. 877-886.

(6) Takahashi, K., Amano, T., Ando, K. and Takahashi, F., 2011, “Improvement of Fatigue Limit by Shot Peening for High-Strength Steel Containing a Crack-Like Surface Defect”, International Journal of Structural Integrity, Vol. 2, No. 3, pp. 281-292.

(7) Houjou, K., Takahashi, K. and Ando, K., 2013, “Improvement of

Fatigue Limit by Shot Peening for High-Tensile Strength Steel Containing a Crack in the Stress Concentration Zone", International Journal of Structural Integrity, Vol. 4, No. 2, pp. 258-266.

(8) Harada, Y., Fukaura, K. and Haga, S., 2007, "Influence of Microshot Peening on Surface Layer Characteristics of Structural Steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, Issues 1-3, pp. 297-301.

(9) Lee, J. G. and Kim, J. K., 1997, "Influence of Residual stress due to shot Peening on Fatigue Strength and Life", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 21, No. 9, pp. 1498-1506.

(10) Takahashi, K., Okada, H. and Ando, K., 2012, "Effects of shot peening on the torsional fatigue limit of high-strength steel containing an artificial surface defect", International Journal of Structural Integrity, Vol. 3 No. 3, pp. 274-284.

(11) Nishimura, Y., Yanase, K., Ikeda, Y., Tanaka, Y., Miyamoto, N., Miyakawa, S. and Endo, M., 2018, "Fatigue strength of spring steel with small scratches", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 41, Issue 7, pp. 1514-1528.

(12) Chung, S. C. and Back, S. D., 1998, "Effect of Shot Peening on Fatigue Properties in Spring Steel", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 22, No. 6, pp. 1009-1015.

(13) Benedetti, M., Fontanari, V., Höhn, B. R., Oster, P. and Tobie, T., 2002, "Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit

of case hardened gears", International Journal of Fatigue, Vol. 24, Issue 11, pp. 1127-1136.

(14) Lv, Y., Lei, L. and Sun, L., 2015, "Effect of shot peening on the fatigue resistance of laser surface melted 20CrMnTi steel gear", Materials Science and Engineering A, Vol. 629, pp. 8-15.

(15) Ryu, S. K. and Jeong, I. S., 1994, "Effects of Shot Peening on Crack Growth Resistance in Carburized Gears", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 18, No. 12, pp. 3227-3235.

(16) Nakagawa, M., Takahashi, K., Osada, T., Okada, H. and Koike, H., 2014, "Improvement in Fatigue Limit by Shot Peening for High-Strength Steel Containing Crack-like Surface Defect (Influence of Surface Crack Aspect Ratio)", Japan Society of Spring Engineers, Vol. 59, pp. 13-18.

(17) American Petroleum Institute, 2000, "Recommended Practice 579, Fitness for Service", American Petroleum Institute, pp. C3-C10.

(18) Newman Jr., J. C. and Raju, I. S., 1981, "An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.

(19) El Haddad, M. H., Topper, T. H. and Smith, K. N., 1979, "Prediction of non-propagating cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573-584.

(20) Tange, A., Akutu, T. and 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. (in Japanese)

(21) Ando, K., Fueki, R., Nam, K.W., Matsui, K. and 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. (in Japanese)

(22) Ando, K., Nam, K. W., Kim, M. H., Ishii, T. and Takahashi, K., 2020, “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. (in Japanese)

(23) Ando, K., Kim, M. H. and Nam, K. W., 2021, “Analysis on Peculiar Fatigue Fracture Behavior of Shot Peened Metal using New Threshold Stress Intensity Range Equation”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 44, No. 2, pp. 306-316. https://doi.org/10.1111/ffe.13356

(24) Park, H. S., Kim, M. H. and Nam, K. W., 2020, “A Study on the Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue limit of Short Crack Growth”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 44, No. 11, pp. 781-786.

(25) Park, H. S., Kim, M. H. and Nam, K. W., 2021, “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.

(26) Kim, M. H., Hyun, J. Y. and Nam, K. W., 2020, "Evaluation of Harmless Crack Size using Ando's Equation", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, pp. 1971-1977.

(27) Sathyajith, S., Kalainathan, S. and Swaroop, S., 2012, "Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, Issue 3, pp. 345-348.

(28) Sathyajith, S., Kalainathan, S. and Swaroop, S., 2013, "Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd:YAG laser", Optics & Laser Technology, Vol. 45, pp. 389-394.

(29) Liu, G., Lu, J. and Lu, K., 2000, "Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening", Materials Science and Engineering: A, Vol. 286, Issue 1, pp. 91-95.

(30) Soyama, H., 2019, "Comparison between the improvements made to the fatigue strength of stainless steel by cavitation peening, water jet peening, shot peening and laser peening", Technology, Vol. 269, pp. 65-78.

(31) Kim, J. C. and Cheong, S. K., 2012, "Microscopic Analysis of Effect of Shot Peening on Corrosion Fatigue Behavior of Aluminum Alloy", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 36, No. 11, pp. 1381-1389.

(32) Murakami, Y., 1989, "Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on the Fatigue Strength of Metals", JSME International

Journal Series I, Vol. 32, No. 2, pp. 1678-180.

제3장

표면균열 무해화 기술의 피로특성에 대한 신뢰성 향상

3.1 서언

1940년대 Irwin[1]이 응력확대계수를 제안하여 균열의 공학적 연구가 시작된 후, Wells[2]와 Bilby[3]는 비선형파괴역학인 COD, Paris[4]에 의한 피로균열전파 법칙, Rice[5]는 J 적분을 제안하였다. 이와 같은 균열의 역학을 제안함으로써 취성파괴 및 피로균열전파속도는 정량적으로 평가할 수 있었다. 그 후 Burdekinn[6]이 COD에 기초하여 허용 결함 평가 기준을 제안하였고, Millne[7] 등은 K와 σ_y의 상관성을 설명할 수 있는 파괴평가선도를 제안하였다. 또한 영국은 결함평가규격 BSI-PD6493[8]을 발행하였고, 미국은 ASME[9] 규격에 허용결함 평가 규격을 도입하였다. 현재 많은 연구자는 이와 같은 평가 규격에 의하여 균열의 잔여 수명 평가와 결함의 허용에 관하여 연구하고 있다.[10-17]

균열은 강 구조물의 성능 및 신뢰성을 저하시키기 때문에, 피닝에 의한 피로강도 및 피로한도 향상에 관한 연구가 활발하다.[18-24] 특히, 피닝에 의하여 미소 균열의 균열 무해화는 강 구조물의 신뢰성 및 안전성 향상뿐만 아니라,[25-37 유지 관리비의 절감에 크게 기여할 것으로 판단된다. 미소 균열 문제는 Haddad 등[38]이 균열 길이에 미소 균열길이를 더하여, 균열 길이 의존하는 하한계응력확대계수 평가식을 제안하였다. Tange 등[39]은 Haddad 등의 제안식에서 미소 균열 길이를 제거하여, 더욱 편리한 하한계응력확대계수(ΔK_{th}) 평가식을 제안하였다.

Ando 등은 피로 특유의 소성 거동과 응력비를 고려하여, 균열 치수에 의존하는 피로균열 진전의 평가식을 제안하였다.[31-33] 이 식으로 미소 균열을 가지는 강의 피로한도를 정량적으로 평가할 수 있었다. 또한, 피닝 기술의 적용으로 무해화 가능 균열 깊이(a_{hml})를 평가할 수 있었

다.[36] 그러나 a_{hml}이 잔류응력 분포나 긴 균열재의 $\Delta K_{th(l)}$ 및 균열 형상비(As)에 어떻게 의존하는지에 관해서는 분명하지 않다.

따라서 본 장에서는 초음파 피닝(UP)에 의한 무해화 가능 균열 깊이 a_{hml}에 대하여 압축 잔류응력 분포, $\Delta K_{th(l)}$ 및 균열형상비(As)의 의존성을 평가하였다. 또한 가정한 안전율(N)에서 최대 균열 깊이(a_{crN})와 a_{hml} 및 비파괴검사로 확실하게 검출 가능한 균열 깊이(a_{NDI})와 a_{hml}의 As 의존성을 평가하였다.

3.2 재료 및 실험방법

3.2.1 재료 및 시험편

평가에 사용한 재료는 수소 저장탱크 입출력 배관용 Ni 12% STS316L 이다. 평가 모델 시험편은 Fig. 3.1과 같이 문헌[40]에서 사용한 판폭 $2W$=10mm, 두께 t=4mm이고, 응력비 R=0.1의 인장-인장 피로 응력을 받는 경우이다. 시험편의 중앙에는 표면 균열 길이($2c$), 깊이(a)인 반타원형 균열이 존재한다. 균열형상비는 $As = a/c$로 정의하고, As=1.0, 0.6, 0.3 및 0.1로 4종류로 가정하였다.

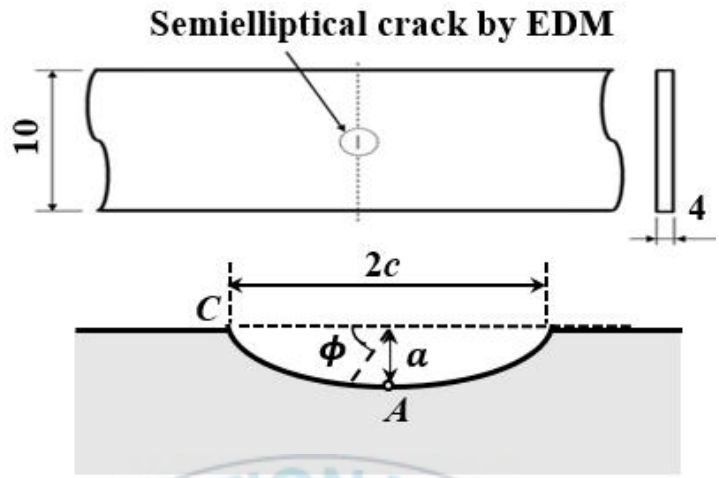


Fig. 3.1 Schematic of a finite plate containing a semielliptical crack.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

3.2.2 잔류응력분포

a_{hlm}에 미치는 영향을 평가하기 위해서 Fig. 3.2와 같이 UP에 의한 3종류의 압축 잔류응력①②③을 가정하였다. Table 3.1은 연구조건을 나타낸다. 잔류응력②는 실험에서 얻어진 것이고,[40] 잔류응력①은 잔류응력②-10%, 잔류응력③은 잔류응력②+10%이다. UP 방법은 제2장에 설명하였다.[40] 비 UP(Non-UP) 평활시험편의 피로한도는 285MPa이고, UP 평활시험편의 피로한도는 340MPa이다.[40] 본 장에 사용한 Non-UP 평활시험편의 $\Delta K_{th(l)}$는 6.3MPa $\sqrt{m}$였지만, $\Delta K_{th(l)}$의 크기에 따른 영향을 평가하기 위하여, 3, 5 및 7MPa $\sqrt{m}$의 3종류를 가정하였다. 일반적으로 $\Delta K_{th(l)}$는 재료 경도와 상관이 있고, 경도가 증가할수록 $\Delta K_{th(l)}$는 감소한다. 본 장에서는 열처리에 따라서 STS316L의 경도가 달라지는 것을 고려하여, $\Delta K_{th(l)}$를 3종류로 선정하였다. $\Delta\sigma_{up}$는 잔류응력분포와 $\Delta K_{th(l)}$에 의존하지만, a_{hml}에 대한 잔류응력분포와 $\Delta K_{th(l)}$의 의존성을 평가하기 위하여, UP 평활시험편의 $\Delta\sigma_{up}$가 동일하다고 가정하였다.

Table 3.1 Research parameters

Residual stress of 3 types	$\triangle\sigma_w$ (MPa)	$\triangle\sigma_{up}$ (MPa)	$\triangle K_{th(l)}$ $(MPa\sqrt{m})$
①, ②, ③	285	340	3, 5, 7

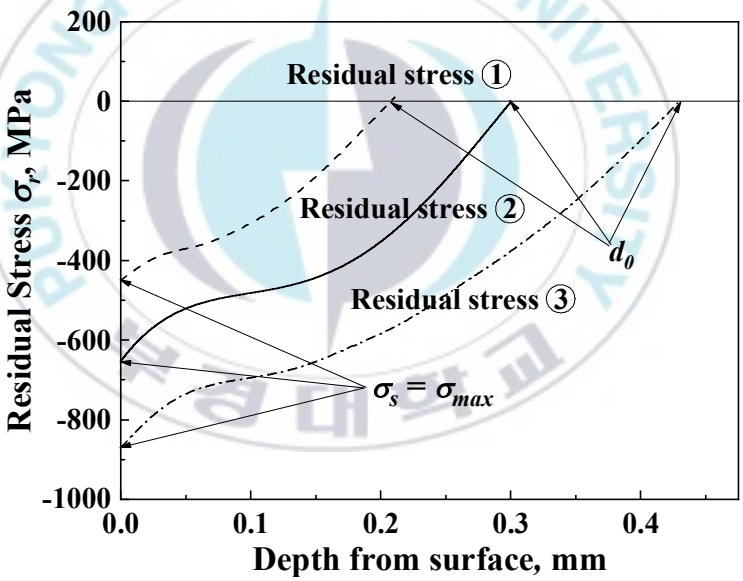


Fig. 3.2 Three types of residual stress.

3.2.3 평가 방법

본 장에서는 Ando 등[31]이 제안한 식(3.1)을 사용하였다. 이 식은 무한판에 존재하는 균열이 피로 응력으로 진전할 때, 하한계응력확대계수(ΔK_{th})의 균열길이 의존성을 나타내는 식(3.1)이다.

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

여기서 a는 균열 깊이, $\Delta K_{th(l)}$은 긴 균열의 하한계응력확대계수 범위, $\Delta\sigma_w$는 Non-UP 평활시험편의 피로한도, α는 Newman-Raju 식[41]에서 얻어지는 형상계수이다. 균열시험편의 피로한도는 식(3.2)로 평가할 수 있다.

$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad (3.2)$$

상기 식(3.1)과 (3.2)는 인장응력을 받는 균열시험편의 균열최심부(A점)의 ΔK_{th} 및 $\Delta\sigma_c$를 구하는 경우이며, 균열표면부(C점)의 ΔK_{th} 및 $\Delta\sigma_c$를 구하는 경우는 식(3.1)과 (3.2)의 a를 c로 대입하여 평가하면 얻어진다.

평활시험편의 피로한도가 25% 및 50% 감소하는 균열 길이를 평가하였다. 이때 각각의 균열깊이를 a_{25} 및 a_{50}이라 한다. 본 평가에서는 피로한도에 대한 안전율(Safety factor : N)은 ASME 규격에서 N=2.0으로 하였다. 피로한도 25% 감소시키는 균열은 안전율이 1.5까지 감소하므로,

비파괴검사에서 반드시 검출되는 균열이다. 또, N=2.0의 경우는 일정 기간 사용 후 존재할 가능성이 있는 최대 균열은 피로한도 50% 감소시키는 균열(a_{50})이다. 따라서 내부결함이 없다면, 표면균열 무해화 기술로 a_{50}의 균열은 피닝에 의하여 안전성을 보장할 수 있을 것이다.

a_{25}와 a_{50}은 식(3.3)으로 평가하였다

$$\Delta K_{ap} = \Delta K_{th(s)} \tag{3.3}$$

여기서 ΔK_{ap}는 인장피로응력에 의한 응력확대계수로서, Newman-Raju 식[41]으로 구하였다. 즉, ΔK_{ap}는 Non-UP 시험편의 피로한도보다 25% 및 50% 낮은 응력으로 구한 응력확대계수이다. 이 경우 ΔK_{ap}는 Fig. 3.1의 A점 및 C점에서 평가하고, 작은 균열 깊이(a)를 사용하였다. $\Delta K_{th(s)}$는 임의 균열의 하한계응력확대계수이다.

한편, UP 시험편의 응력확대계수는 식(3.4)로 평가하였다.

$$\Delta K_{Tr} = \Delta K_{ap} + K_r \tag{3.4}$$

여기서 K_r은 API-RP579[42]를 사용하여, Fig. 3.2에 나타낸 잔류응력분포로 얻어진 응력확대계수이다. UP 시험편의 표면균열 무해화 가능 최대 균열 깊이(a_{hml})의 결정 조건은 식(3.5)와 같다.

$$\Delta K_{Tr} = \Delta K_{th(s)} \tag{3.5}$$

식(3.5)는 Fig. 3.1의 A점 및 C점에서 검토하고, 작은 무해화 균열 치수를 a_{hml}으로 결정하였다.

한편, 반타원 피로 균열의 검출 확률은 1974년 Rummel 등[43]이 연구하였다. 그들은 피로균열 검출 확률이 가장 우수한 것은 초음파탐상법이라 하였다. 이 방법에 의하여 실험실의 최적 조건에서 100% 검출 확률 균열은 $2c$=12mm, a=4mm였다.[44] 그리고 50% 검출 확률 균열은 $2c$=1.2mm, a=0.26mm였다.[44] 또, 실험실의 최적 조건에서 검출된 최소 균열 치수는 $c=a$=0.17mm였다.[44] 최근에 다른 연구자[45]는 깊이(a) 0.4mm의 응력부식 균열을 검출하였지만, 길이를 언급하지 않았으므로 반원 균열로 가정하였다. 본 연구에서는 이상을 고려하여 $2c$=0.34mm, a=0.17mm과 $2c$=0.8mm, a=0.4mm 사이의 $2c$=0.6mm, a=0.3mm의 반원 균열을 초음파탐상법으로 충분하게 검출 가능할 것이라 가정하였다. 초음파검사법 중에서 에코 반사법의 에코 강도는 균열 면적에 의존한다고 할 수 있다. 반타원 균열의 면적(S)은 식(3.6)으로 나타낼 수 있다.

$$S=\pi ac/2 \qquad (3.6)$$

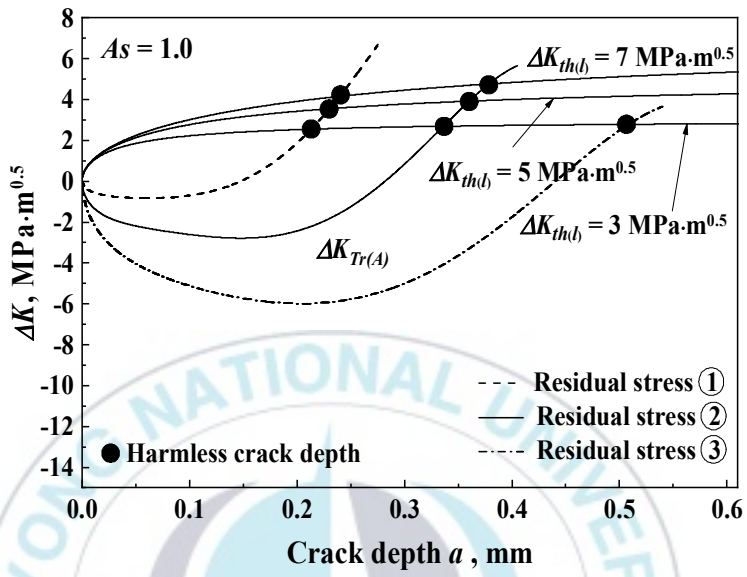
즉, 균열형상비(As)가 변하여도 반타원형 균열의 면적(S)이 동일하다면, 균열 검출 확률은 동일하다고 할 수 있다. 따라서 $2c$=0.6mm, a=0.3mm의 반원 균열 면적을 S_{NDI}라 하면, 에서 검출 가능한 최대 균열 깊이 a_{NDI}와 As와의 관계는 식(3.7)로 나타낼 수 있다.

$$S_{NDI}=\pi a_{NDI}^2/2As \qquad (3.7)$$

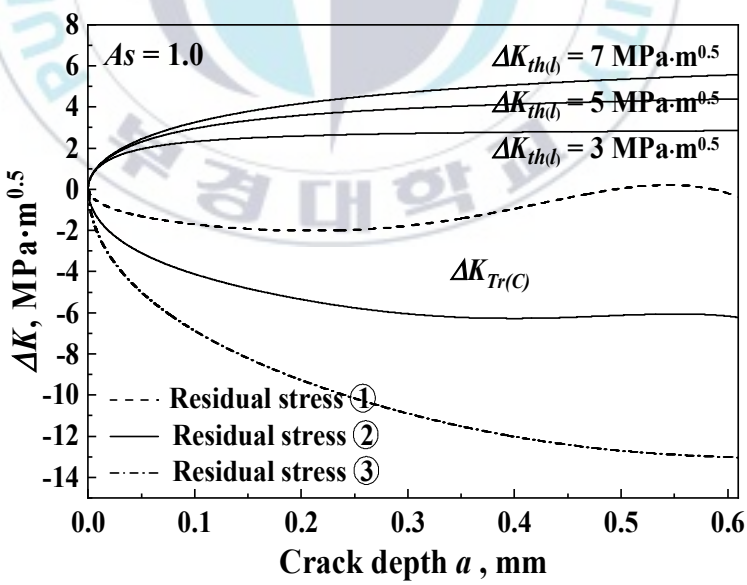
3.3 결과 및 고찰

3.3.1 a_{hml}의 결정

Fig. 3.3은 As=1.0의 경우에 ΔK_{th}와 ΔK_{Tr}의 균열 깊이(a) 의존성을 잔류응력①②③에 대하여 나타내었다. Fig. 3.3(a)는 A점의 결과이고, Fig. 3.3(b)는 C점의 결과이다. 식(3.5)는 UP에 의한 무해화 가능 최대 균열 치수 a_{hml}를 결정하는 조건이고, A점과 C점의 작은 균열 치수를 선택하였다. 이 때의 균열 치수를 ●로 표시하였다. As=1.0은 잔류응력①②가 모든 $\Delta K_{th(l)}$에 대하여 A점에서 a_{hml}가 결정되었다. 그러나 잔류응력③은 $\Delta K_{th(l)}$가 3 $MPa\sqrt{m}$의 경우, A점에서 a_{hml}가 결정되었다. 한편 C점에서는 모든 $\Delta K_{th(l)}$에 대하여 교점이 나타나지 않았다.



(a)

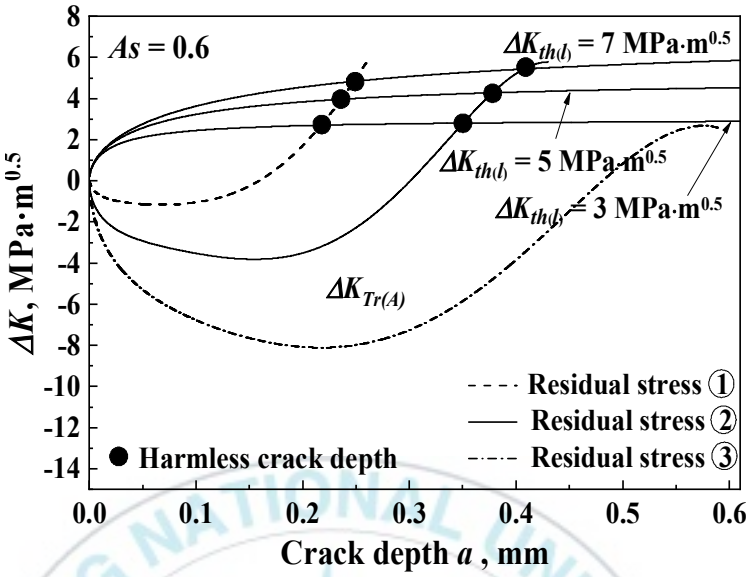


(b)

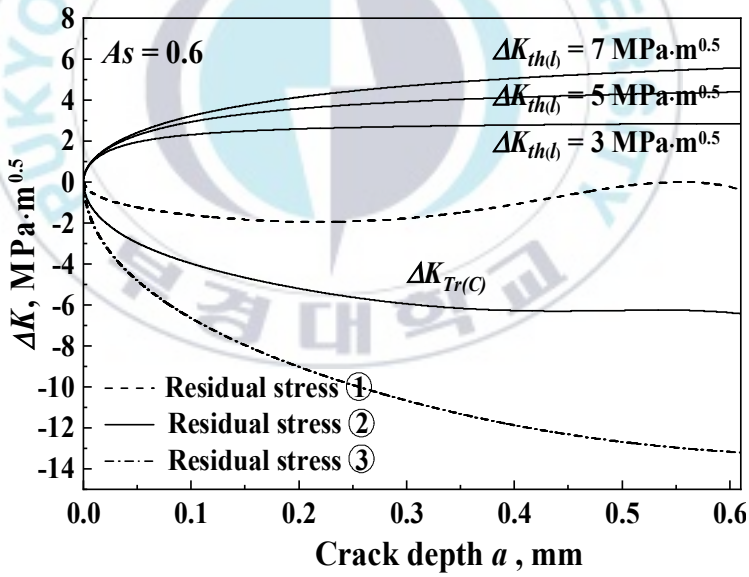
Fig. 3.3 Crack depth dependence of and in the case of *As* = 1.0. (a) *A* point, (b) *C* point

Fig. 3.4와 3.5는 *As*=0.6과 0.3의 경우에 ΔK_{th}와 ΔK_{Tr}의 균열 깊이(a) 의존성을 잔류응력①②③에 대하여 나타내었다. Fig. 3.4와 3.5의 (a)는 *A*점의 결과이고, Fig. 3.4와 3.5의 (b)는 *C*점의 결과이다. 이 경우에도 무해화 가능 최대 균열 치수a_{hml}를 결정하는 균열 치수를 ●로 표시하였다. *As*=0.6 및 0.3은 잔류응력①②가 모든 $\Delta K_{th(l)}$에 대하여 *A*점에서 a_{hml}가 결정되었다. 그러나 잔류응력③은 ΔK_{th}와 ΔK_{Tr}의 *A*점에서 교점이 나타나지 않았다. 한편 *C*점에서는 모든 $\Delta K_{th(l)}$에 대하여 교점이 나타나지 않았다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

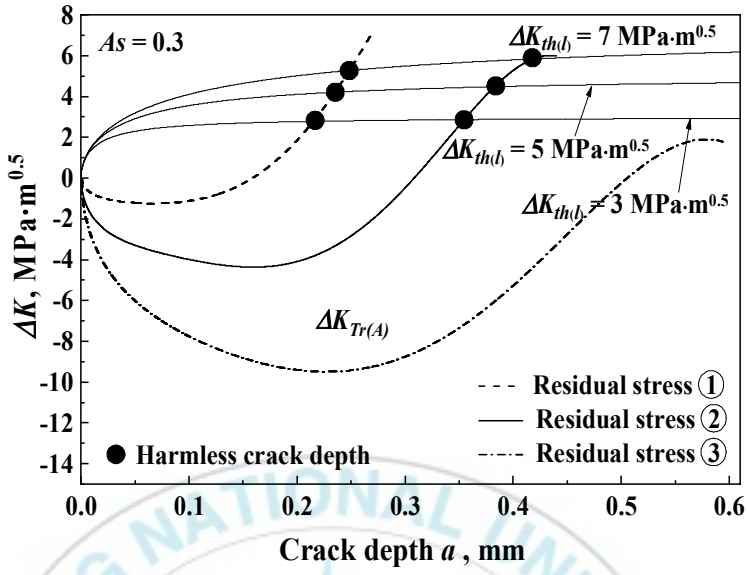


(a)

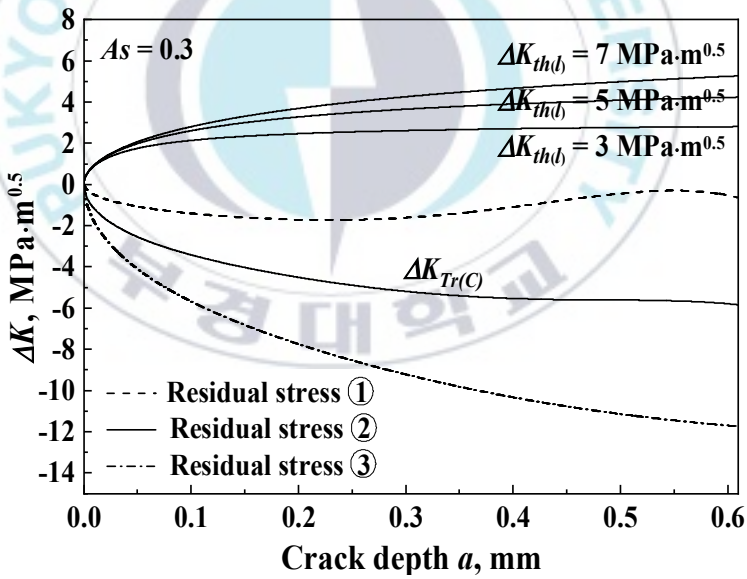


(b)

Fig. 3.4 Crack depth dependence of and in the case of *As* = 0.6. (a) *A* point, (b) *C* point



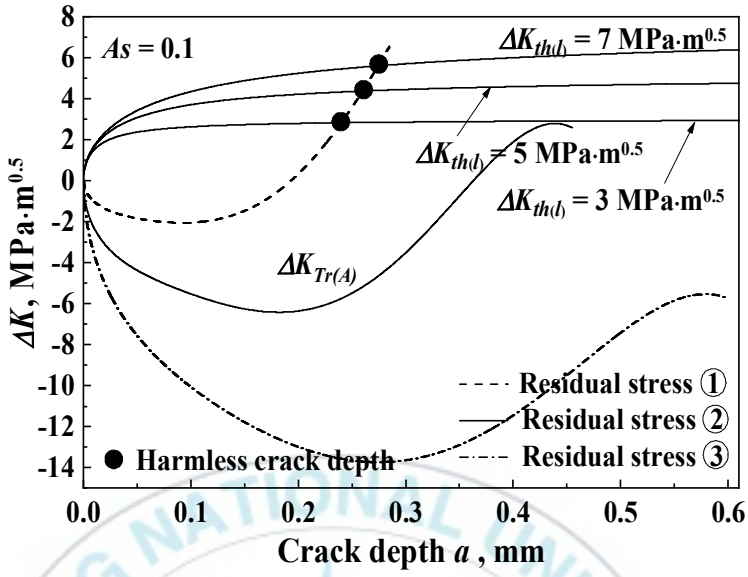
(a)



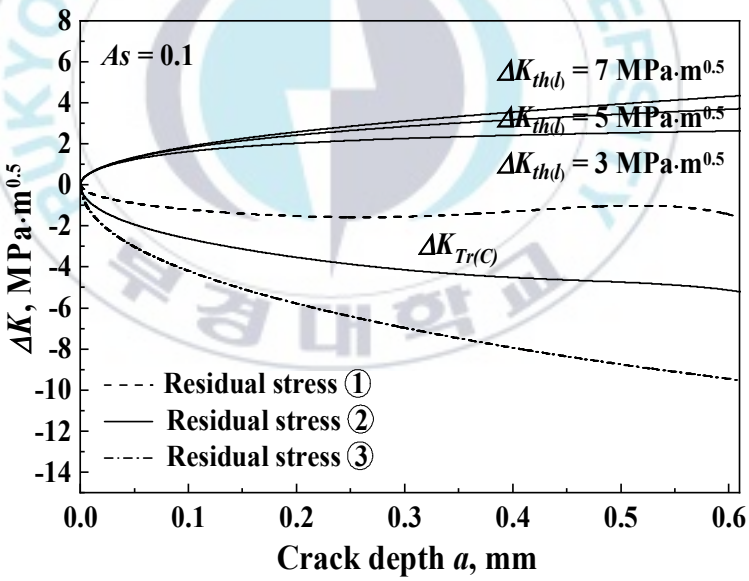
(b)

Fig. 3.5 Crack depth dependence of and in the case of *As* = 0.3. (a) *A* point, (b) *C* point

Fig. 3.6은 As=0.1의 경우에 ΔK_{th}와 ΔK_{Tr}의 균열 깊이(a) 의존성을 잔류응력①②③에 대하여 나타내었다. Fig. 3.6(a)는 A점의 결과이고, Fig. 3.6(b)는 C점의 결과이다. 이 경우에도 무해화 가능 최대 균열 치수a_{hml}를 결정하는 균열 치수를 ●로 표시하였다. As=0.1은 잔류응력①이 모든 $\Delta K_{th(l)}$에 대하여 A점에서 a_{hml}가 결정되었다. 그러나 잔류응력②③은 ΔK_{th}와 ΔK_{Tr}의 A점에서 교점이 나타나지 않았다. 한편 C점에서는 모든 $\Delta K_{th(l)}$에 대하여 교점이 나타나지 않았다. 이와 같이 Fig. 3.3～3.6에서 교점이 나타나지 않는 것은 잔류응력으로 균열의 진전이 없다는 것을 의미한다.



(a)



(b)

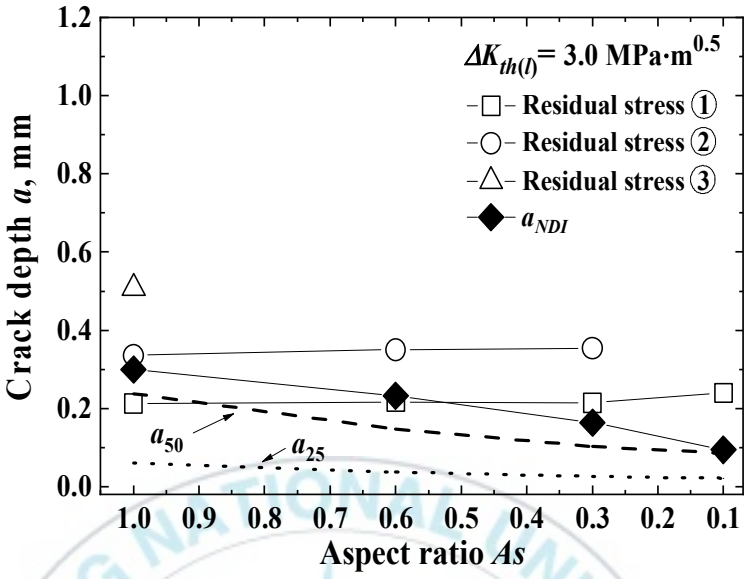
Fig. 3.6 Crack depth dependence of and in the case of *As* = 0.1. (a) *A* point, (b) *C* point

3.3.2 As에 따르는 a_{hml} 평가

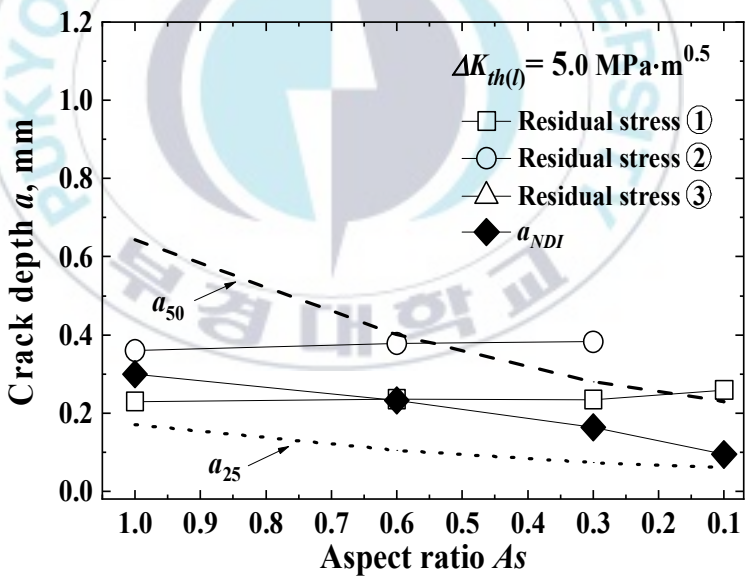
UP에 의한 표면 균열 무해화 기술은 재료를 안전하게 사용하기 위한 것이다. Fig. 3.7은 UP에 의한 무해화 가능 최대 균열 깊이(a_{hml})의 균열 형상비(As) 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)(b)(c)는 각각 $\Delta K_{th(l)}$= $3, 5, 7 MPa\sqrt{m}$ 이다. a_{hml}은 잔류응력 분포가 크고 깊을수록 크게 나타나, 잔류응력 분포가 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또, As와 $\Delta K_{th(l)}$이 커짐에 따라서 a_{hml}이 크게 되는 경향을 나타내었다. 또한, Fig. 3.7에는 Non-UP 시험편의 피로한도를 25% 및 50% 감소시키는 균열 깊이(a_{25}, a_{50})를 나타내었다. 균열 깊이는 As가 작아짐에 따라서 작아지는 경향을 나타내었다. 또, 그림에는 식(3.7)로 평가한 비파괴검사에서 검출 가능한 균열 깊이(a_{NDI})와 균열 형상비(As)의 관계도 나타내었다.

Fig. 3.7(a)에서 잔류응력①의 무해화 가능 균열 최대 깊이a_{hml}는 피로한도 25% 감소시키는 균열 a_{25}보다 위에 있으므로 무해화 가능하고, 피로한도 50% 감소시키는 균열 a_{50}은 As=1.0을 제외하고 무해화 가능하다. 그리고 잔류응력②③은 피로한도 50% 감소시키는 균열 a_{50}보다 위에 있으므로 무해화 된다. 특히 Fig. 3.7(a)의 잔류응력②③에서 a_{hml}이 없는 것은 Fig. 3.3-3.6에서 알 수 있듯이 균열이 진전하지 않고 모두 무해화 된 것이다. 이것으로부터 잔류응력①의 As=1.0을 제외하고 표면 균열 무해화 기술에 의하여 이 재료를 사용한 구조물의 안전을 보증할 수 있다. 한편 위에서 가정한 비파괴검사에 의한 균열 검출 능력(◆)은 피로한도 50% 감소시키는 피로균열 a_{50}보다 균열 검출 능력a_{NDI}이 위쪽에 있다. 따라서 비파괴검사로서 a_{50}의 균열을 검출하는 것은 어려우므

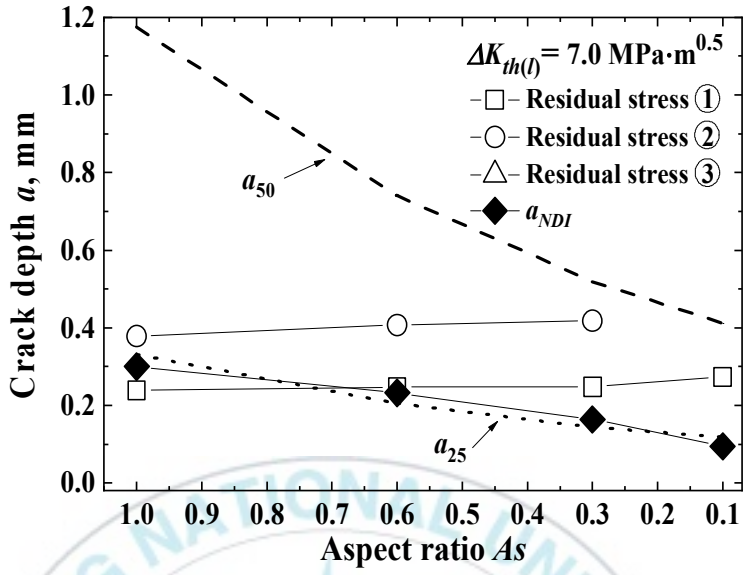
로, 더욱 고감도인 비파괴검사기술을 적용할 필요가 있다. Fig. 3.7(b)에서 잔류응력①의 무해화 가능 균열 최대 깊이(a_{hml})는 피로한도 25% 감소시키는 균열 a_{25}보다 위에 있으므로 무해화 가능하고, 피로한도 50% 감소시키는 균열 a_{50}은 As=0.1을 제외하고 무해화 불가능하다. 그리고 잔류응력②는 균열형상비 As=0.6까지는 피로한도 50% 감소시키는 균열 a_{50}보다 아래에 있으므로 무해화 불가능하지만, As=0.6보다 작은 것은 위에 있으므로 무해화 가능하다. Fig. 3.7(c)에서 잔류응력①의 무해화 가능 균열 최대 깊이(a_{hml})는 As=1.0을 제외하고 피로한도 25% 감소시키는 균열 a_{25}보다 위에 있으므로 무해화 가능하고, 피로한도 50% 감소시키는 균열 a_{50}은 무해화 불가능하다. 그리고 잔류응력②는 피로한도 50% 감소시키는 균열 a_{50}보다 아래에 있으므로 무해화 불가능하다. Fig. 3.7(b)(c)에서 잔류응력② 및 잔류응력③에서 a_{hml}이 없는 것은 Fig. 3.3-3.6에서 알 수 있듯이 균열이 진전하지 않고 모두 무해화 된 것이다. 이것으로부터 잔류응력①②는 표면 균열 무해화 기술에 의하여 이 재료를 사용한 구조물의 안전을 보증할 수 없지만, 잔류응력③은 보증할 수 있다. 한편 잔류응력②③에서 가정한 비파괴검사에 의한 균열 검출 능력(◆)은 피로한도 50% 감소시키는 피로균열 a_{50}보다 균열 검출 능력a_{NDI}이 아래쪽에 있으므로, 비파괴검사로서 a_{50}의 균열을 검출할 수 있다.


ΔK_th(l)= 3.0 MPa·m^0.5
Residual stress ①
Residual stress ②
Residual stress ③
a_NDI
a_50
a_25
Crack depth a, mm
Aspect ratio As
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
1.0 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1

(a)


ΔK_th(l)= 5.0 MPa·m^0.5
Residual stress ①
Residual stress ②
Residual stress ③
a_NDI
a_50
a_25
Crack depth a, mm
Aspect ratio As
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
1.0 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1

(b)



(c)

Fig. 3.7 Effect of As on the rendered harmless crack depth (a_{hml}), a_{25} and a_{50}. (a) $\Delta K_{th(l)} = 3\ MPa\sqrt{m}$, (b) $\Delta K_{th(l)} = 5\ MPa\sqrt{m}$, (c) $\Delta K_{th(l)} = 7\ MPa\sqrt{m}$

3.3.3 a_{hml}, a_{NDI}, a_{crN}와 *As* 관계

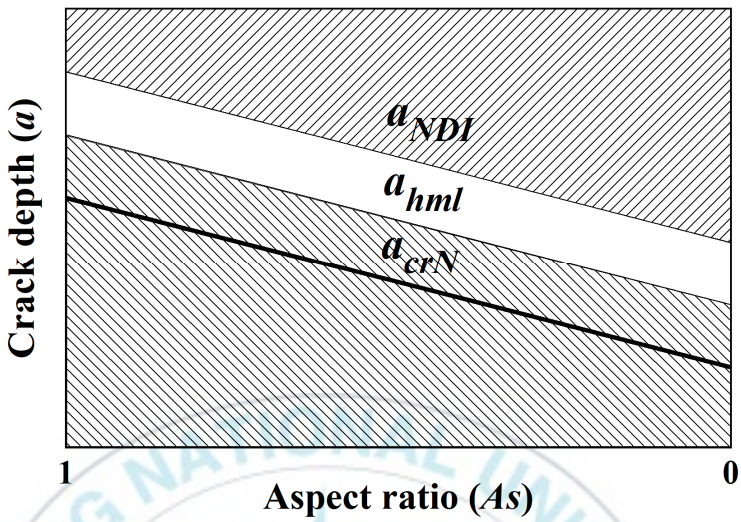
여기서는 비파괴검사 및 표면 균열 무해화 기술에 의한 피로파괴의 유지 관리 및 신뢰성에 관하여 고찰하고자 한다.[46] Fig. 3.8(a)-(d)는 UP에 의한 무해화 가능 최대 균열 깊이(a_{hml}), 비파괴검사에서 검출 가능한 균열 깊이(a_{NDI}) 및 피로한도의 안전률을 N이라 했을 때, 피로한도를 1/N까지 감소시키는 균열 깊이(a_{crN})와 균열형상비(As)와의 관계를 모식화하였다.

Fig. 3.8(a)는 $a_{crN} < a_{hml} < a_{NDI}$의 조건이다. 이 조건은 표면 균열 무해화 기술로 적절한 유지보수가 가능하지만, 비파괴검사 기술에 의해서는 적절한 유지보수가 불가능하다.

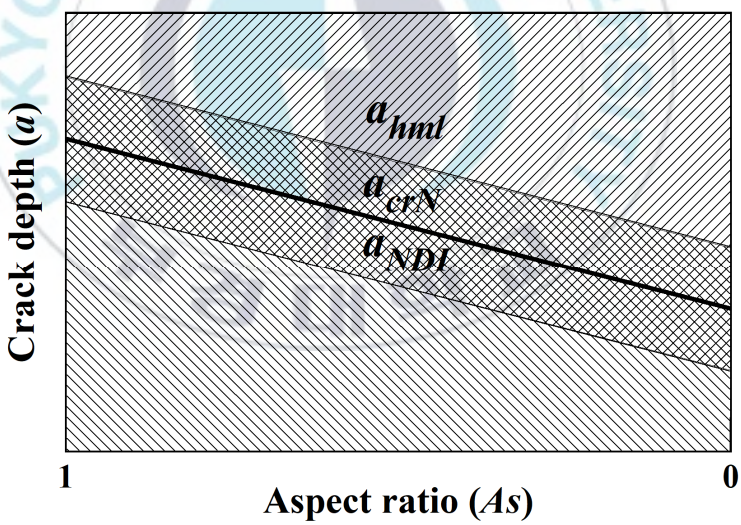
Fig. 3.8(b)는 $a_{NDI} < a_{crN} < a_{hml}$의 조건이다. 이 조건은 비파괴검사 및 표면 균열 무해화 기술로 적절한 유지보수가 가능하다. 만약 완전한 안전성을 보장하기 위하여 비파괴검사 후에 UP를 실시하는 경우는 비파괴검사 시 a_{hml}보다 깊은 균열만 검출하면 되기 때문에, 정기검사 기간의 단축에 크게 기여할 수 있다.

Fig. 3.8(c)는 $a_{hml} < a_{NDI} < a_{crN}$의 조건이다. 이 조건은 비파괴검사 만으로 적절한 유지보수가 가능하고, 표면 균열 무해화 기술은 적절한 유지보수가 불가능하다.

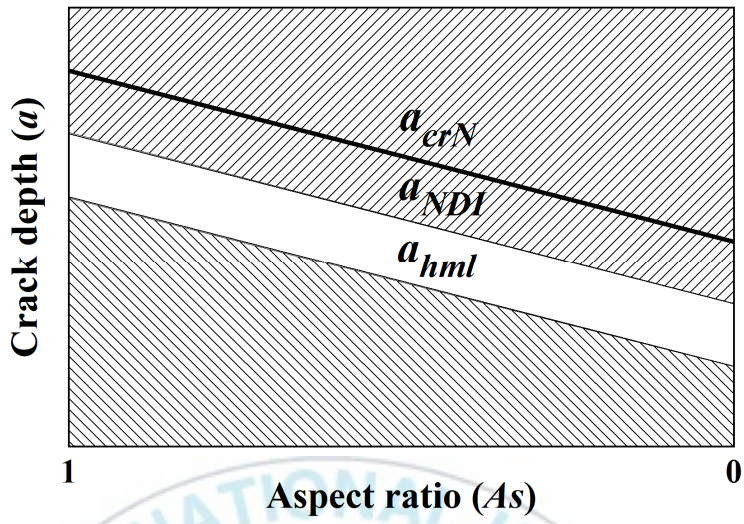
Fig. 3.8(d)는 $a_{hml} < a_{crN} < a_{NDI}$의 조건이다. 이 조건은 a_{crN}이 매우 작기 때문에 비파괴검사 및 표면 균열 무해화 기술로 적절한 유지보수가 불가능하다.


a_{NDI}
a_{hml}
a_{crN}
Crack depth (a)
1
0
Aspect ratio (As)

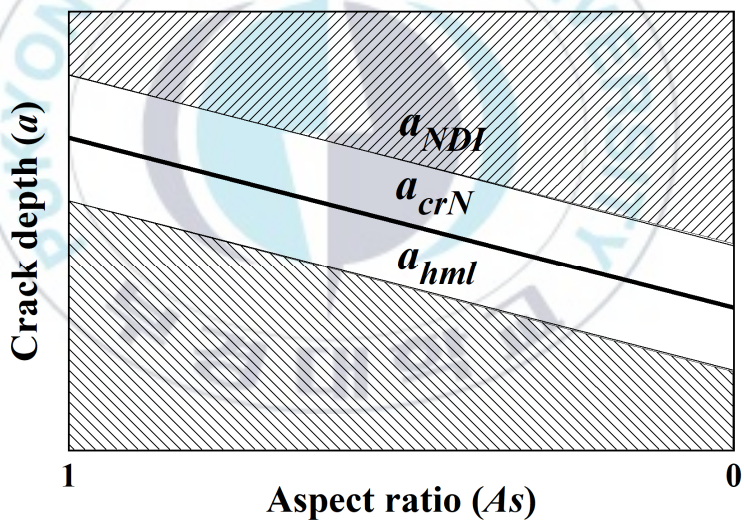
(a)


a_{hml}
a_{crN}
a_{NDI}
Crack depth (a)
1
0
Aspect ratio (As)

(b)



(c)



(d)

Fig. 3.8 Schematic showing the applicability of surface crack non-damaging techniques and NDI. (a) $a_{crN} < a_{hml} < a_{NDI}$, (b) $a_{NDI} < a_{crN} < a_{hml}$, (c) $a_{hml} < a_{NDI} < a_{crN}$, (d) $a_{hml} < a_{crN} < a_{NDI}$

3.4 결언

Ni 12% STS316L의 $\Delta K_{th(l)}$와 잔류응력을 각각 3종류로 변화시킨 경우, a_{hml}의 As 의존성 및 Non-UP 평활시험편의 피로한도를 25% 또는 50% 감소시키는 균열 깊이(a_{25}, a_{50})의 As 의존성을 평가하였다. 또한 As에 관계없이 피로 균열 면적이 동일한 경우, 고성능 비파괴검사에 의한 a_{NDI}의 As 의존성을 평가하였다. 이와 같은 결과는 Ni 12% STS316L의 유지보수에 대한 신뢰성 및 장수명화에 표면균열 무해화 기술이 어떻게 기여할 것인지 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) a_{hml}은 잔류응력 분포가 크고 깊을수록 크게 나타났으며, 잔류응력 분포에 큰 영향을 받았다. 또한 As와 $\Delta K_{th(l)}$이 커짐에 따라서 a_{hml}이 크게 되는 경향을 나타내었다.

(2) 잔류응력②③은 a_{hml}이 a_{50}보다 위에 있고, 잔류응력①의 경우도, As=1.0을 제외하고 a_{hml}이 a_{50}보다 위에 있다. 따라서 N=2.0의 경우, 장시간 사용한 STS316L은 UP로 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있다. 특히 잔류응력②③에서 a_{hml}이 없는 것은 균열이 전혀 진전하지 않고 무해화 된 것이다.

(3) 잔류응력①에서 Non-UP 피로한도를 50% 감소시키는 피로균열 a_{50}을 검출할 수 없었지만, 잔류응력②③에서는 검출할 수 있었다.

(4) a_{hml}, a_{NDI} 및 a_{crN}과 As와의 관계에서 비파괴검사 및 균열무해화 기술의 유용성을 검토하였다. $a_{crN} < a_{hml} < a_{NDI}$ 조건은 표면 균열 무

해화 기술로 유지보수가 가능하지만, $a_{NDI} < a_{crN} < a_{hml}$ 조건은 비파괴검사 및 표면 균열 무해화 기술로 유지보수가 가능하다. $a_{hml} < a_{NDI} < a_{crN}$ 조건은 비파괴검사 만으로 적절한 유지보수가 가능하고, $a_{hml} < a_{crN} < a_{NDI}$ 조건은 a_{crN}이 매우 작기 때문에 비파괴검사 및 표면 균열 무해화 기술로 적절한 유지보수가 불가능하다.

참고문헌

(1) Irwin, G. R., 1948, “Fracture dynamics. In Fracturing of Metals”, 1947 ASM Symposium, Trans, ASM 40A, pp. 147-166.

(2) Wells, A. A., 1963, “Application of Fracture Mechanics at and Beyond General Yielding”, British Welding Journal, Vol. 10, pp. 563-570.

(3) Bilby, B. A., Cottrell, A. H., Swinden, K. H., 1963, “The Spread of Plastic Yield from a Notch”, Proceedings of the Royal Society A, Vol. 272, pp. 304-314. https://doi.org/10.1098/rspa.1963.0055

(4) Paris, P. C., Erdogan, F. A., 1963, “Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, No. 4, pp. 528-533.

(5) Rice, J. R., 1968, “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks”, Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379-386.

(6) Burdekin, F. M., Stone, D. E. W., 1966, “The Crack Opening Displacement Approach to Fracture Mechanics in Yielding Materials”, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 1, No. 2, pp. 145-153.

(7) Milne, I., 1976, “Failure Assessment in Development in Fracture Mechanics-1,(editor G.G. Chell), Applied Science, London, 259.

(8) British Standards Institution, 1980, “BSI PD6493 Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for

Defects in Fusion Welded Joints - Section 3, British Standards Institution, London.

(9) ASME, 1977, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components - Section XI", American Society of Mechanical Engineers, New York.

(10) Nam, K. W., Ando, K., Yuzuru, S., Ogura, N., 1994, "Fatigue Life and Penetration Behaviour of a Surface Cracked Plate under Combined Tension and Bending", Fatigue Fract. Engng Mater. Structs, Vol. 17, pp. 873-882.

(11) Lin, X. B., Smith, R. A., 1998, "Fatigue Growth Simulation for Cracks in Notched and Unnotched Round Bars", Int. J. Mech. Sci., Vol. 40, No. 5, pp. 405-419.

(12) Newman Jr. J.C., Phillips, E. P., Swain, M. H., 1999, "Fatigue-life Prediction Methodology using Small-Crack Theory", International Journal of Fatigue, Vol. 21, No. 2, pp. 109-119.

(13) Lee, H., Han, T. S., Jeong, J. H., 2000, "Flaw Analysis Based Life Assessment of Welded Tubular Joint", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 24, No. 5, pp. 1331-1342.

(14) Kim, H. S., Nam, K.W., Kang, C. Y., 2001, "The Characteristics of Mechanical Properties and Fatigue Crack Propagation of Fire Resistance Steel for Frame Structure", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 25, No. 1, pp. 54-60.

(15) Jeon, Y. C., Kim, Y. I., Kang, J. K., Han, J. M., 2001, "A Study on Fatigue Life Prediction of Welded Joints Through Fatigue Test

and Crack Propagation Analysis", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 3, pp. 93-106.

(16) Baik, B., Yamada, K., Ishikawa, T., 2011, "Fatigue Crack Propagation Analysis for Welded Joint Subjected to Bending", International Journal of Fatigue, Vol. 33, No. 5, pp. 746-758.

(17) Shiraiwa, T., Briffod, F., Enoki, M., 2018, "Development of Integrated Framework for Fatigue Life Prediction in Welded Structures", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 198, pp. 158-170.

(18) Lee, J. G., Kim, J. K., 1997, "Influence of Residual Stress Due to Shot Peening on Fatigue Strength and Life", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 21, No. 9, pp. 1498-1506.

(19) Wang, S., Li, Y., Yao, M., Wang, R., 1998, "Fatigue Limit of Shot-peened Metals", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 73, No. 1-3, pp. 57-63.

(20) Takahashi, F., Tange, A., Ando, A., 2008, "Effect of Shot Peening on Fatigue Limit of Surface Flawed Samples", Fatigue Fract Engng Mater Struct., Vol. 31, pp. 242-250.

(21) Han, J. W., Han, S. H., 2009, "Research for Fatigue Life Extension Techniques in Weldments via Pneumatic Hammer Peening", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 23, No. 8, pp. 842-848.

(22) Abdullah, A., Malaki, M., Eskandari, A., 2012, "Strength Enhancement of the Welded Structures by Ultrasonic Peening",

Materials and Design, Vol. 38, pp. 7-18.

(23) Nahm, S. H., Baek, U. B., Suh, C. M., Pyun, Y. S., 2017, "Study on VHCF Fatigue Behaviors and UNSM Effects of Hydrogen Attacked STS 316L", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 41, No. 11, pp. 1011-1020.

(24) Fueki, R., Takahashi, K., 2018, "Prediction of Fatigue Limit Improvement in Needle Peened Welded Joints Containing Crack-like Defects", International Journal of Structural Integrity, Vol. 9, No. 1, pp. 50-64.

(25) Takahashi, K., Amano, T., Hanaori, K., Ando, K., Takahashi, F., 2009, "Improvement of Fatigue Limit by Shot Peening for High Strength Steel Specimens Containing a Crack-like Surface Defect", Journal of the Society of Materials Science of Japan, Vol. 58, No. 12, pp. 1030-1036.

(26) Takahashi, K., Hayashi, T., Ando, K., Takahashi, F., 2010, "Evaluation of Acceptable Defect Size by Shot Peening Based on Fracture Mechanics", Journal of the Spring Society of Japan, Vol. 55, pp. 25-30.

(27) Houjou, K., Takahashi, K., Ando, K., Otsuka, K., 2012, "Improvement of Fatigue Limit and Rendering Crack Harmless by Over-Moment Loading for Spring Steel Containing a Crack in the Stress Concentration Zone", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers A, Vol. 78, No. 793, pp. 1266-1274.

(28) Nakagawa, M., Takahashi, K., Osada, T., Okada, H., Koike, H.,

2014, “Improvement of Fatigue Limit by Shot Peening for High-strength Steel Containing Crack-like Surface Defect (Influence of Surface Crack Aspect Ratio)” , Journal of the Spring Society of Japan, Vol. 59, pp. 13-18.

(29) Takahashi, K., Yasuda, J., Koike, H., Okada, H., 2015, “Improvement of Fatigue Limit by Shot Peening for High-strength Steel Containing Crack-like Surface Defect - Influence of Stress Ratio- ”, Journal of the Spring Society of Japan, Vol. 60, pp. 7-13.

(30) Takahashi, K., Osedo, H., Suzuki, T., Fukuda, S., 2018,” Fatigue Strength Improvement of an Aluminum Alloy with a Crack-like Surface Defect using Shot Peening and Cavitation Peening”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 193, pp. 151-161.

(31) 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.

(32) 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.

(33) Ando, K., Nam, K. Wo., 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.

(34) 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.

(35) Kim, M. H., Park, H. S., Nam, K. W., 2020, “A Study on the Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue limit of Short Crack Growth”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 44, No. 11, pp. 781-786.

(36) Ando, K., Kim, M. H., Nam, K. W., 2021, “Analysis on peculiar fatigue fracture behaviour of shot peened metal using new threshold stress intensity factor range equation”, Fatigue Fract. Engng Mater. Structs, Vol. 44, No. 2, pp. 306-316.

(37) Park, H. S., Kim, M. H., Nam, K. W., 2021, “Study of Threshold Stress Intensity Factor and Fatigue Limit for Through Crack in Infinite Plate and Semi-Elliptical Surface Crack in Plate,” Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 45, No. 2, pp. 133-139.

(38) El Haddad, M. H., Topper, T. H. and Smith, K. N., 1979, “Prediction of Non-Propagating Cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573-584.

(39) Tange, A., Akutu, T. and 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.

(40) Nam, K. W., Kim, M. H., Gu, K. H., Park, C. Y., 2021, “Rendered Harmless of Surface Crack with Different Aspect Ratio for STS316L Steel by Ultrasonic Peening”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, (under printing)

(41) Newman Jr, J. C. and Raju, I. S., 1981, “An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.

(42) API Recommended Practice 579, Fitness for service, American Petroleum Institute, first edition, Jan. 2000.

(43) Rummel, W. D., Todd, P. H. Jr., Frecska, S. A., Rathkem, R. A., 1974, “The Detection of Fatigue Cracks by Nondestructive Testing Methods”, NASA Technical Report, NASA-CR-2369.

(44) Mizutani Y., 2008, “Nondestructive inspection of metal fatigue,” Industrial Materials (Japan). Vol. 56, No. 7, pp. 86-89.

(45) Ochiai, M., Miura, T., Yamamoto, S., 2006, “Laser-Ultrasonic Nondestructive Testing and Its Application to Nuclear Industry”, Toshiba Review, Vol. 61, No. 1, pp. 44-47.

(46) Nam, K. W., Ando, K., Kim, M. H., Takahashi, K., “Improving Reliability of High Strength Material Designed Against Fatigue Limit using Surface Crack Nondamaging Technology”, Fatigue Fract. Engng Mater. Structs, Vol. 44, pp. 1602-1610.

제4장

결론

본 연구에서는 Ni 12%의 STS316L을 사용하여 0.1~0.5 mm 균열을 방전가공하였다. 방전가공 후 초음파 피닝(UP) 처리하고, 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 시험 결과로 무해화 가능 균열 크기를 평가하였다.

초음파 피닝에 의하여 균열 깊이 0.3 mm까지의 균열은 무해화 가능함을 알 수 있었으며, 무해화 가능 균열 크기는 주로 균열 깊이로 결정되고 균열형상비의 영향이 작은 것을 확인할 수 있었다.

Ni 12% STS316L의 a_{hml}, a_{NDI} 및 a_{crN}과 균열형상비와의 관계에서 비파괴검사 및 균열 무해화 기술의 유용성을 검토하였고, 비파괴검사 및 표면 균열 무해화 기술로 유지보수 가능 여부를 알 수 있었다. 비파괴검사에 의한 a_{NDI}의 균열형상비 의존성 평가결과는 Ni 12% STS316L 유지보수에 대한 신뢰성 및 수명예측에 활용할 수 있을 것이다.

발표 논문

<Refereed Journal Publications>

1. 남기우, 김민헌, 구경희, 박치영 (2021.08), “초음파 피닝한 STS316L 강에서 균열형상비가 다른 표면균열의 무해화” 대한기계학회 논문집, 제45권 제8호, pp. 629-635.
   Ki-Woo Nam, Min-Heon Kim, Kyoung-Hee Gu and Chi-Young Park (2021.08), “Rendered Harmless of Surface Crack with Different Crack Aspect Ratio in Ultrasonic Peened STS316L Steel” The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 45, No. 8, pp. 629-635.

2. 박치영, 구경희, 남기우 (2021.09), “표면균열무해화기술을 이용한 STS316L 강의 피로특성에 대한 신뢰성향상” 대한기계학회 논문집, 제45권, 제9호, pp. 741-749.
   Chi-Young Park, Kyoung-Hee Gu and Ki-Woo Nam (2021.09), “Reliability Improvement for Fatigue Characteristics of STS316L Steel using Surface Crack Non-damaging Technology” The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 45, No. 9, pp. 741-749.

<Proceedings>

1. 구경희, 박치영, 김철수, 남기우, 2021, “균열형상비가 다른 STS316L의 균열 무해화”, 2021년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 (한국해양공학회) 논문집, pp. 1155-1157.
   Kyoung-Hee Gu, Chi-Young Park, Cheol-Su Kim and Ki-Woo Nam, 2021, “Harmless Crack in STS316L with Different Crack Aspect Ratio”, Proceeding of The KAOSTS (KSOE) 2021 Spring Annual Meeting, pp. 1155-1157.

2. 김민헌, 박치영, 남기우, 2021, “초음파피닝된 균열형상비가 다른 STS316L의 표면균열무해화”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2021년 춘계학술대회 논문집, pp. 177-178.
   Min-Heon Kim, Chi-Young Park and Ki-Woo Nam, 2021, ” Surface Crack Harmless of STS316L with Ultrasonic Peened Different Crack Aspect Ratio “, Proceeding of The KSME 2021 Annual Meeting, pp. 177-178 .

3. 구경희, 박치영, 남기우, 2021, “잔류응력 크기에 따른 STS316L의 무해화 균열 크기 평가”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2021년 춘계학술대회 논문집, pp. 179-180.
   Kyoung-Hee Gu, Chi-Young Park and Ki-Woo Nam, 2021, “Evaluation of Harmless Crack Size of STS316L according to Different Residual Stress”, Proceeding of The KSME 2021 Annual Meeting, pp. 179-180.

감사의 글

이 논문을 완성하기까지 격려와 조언을 해주신 분들에게 이 글을 통해 감사의 인사를 드리고자 합니다. 먼저, 저에게 많은 가르침과 모범되는 모습으로 저를 이끌어주신 남기우 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 와중에도 저의 부족한 논문을 심사해주시고 조언해주신 강창룡 교수님, 도재윤 학장님, 정상철 선임연구원님, 윤서현 교수님께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 그리고 이 논문의 실험과 연구활동에 많은 도움을 주신 재료강도 및 비파괴연구실 학생들에게 감사드립니다.

제가 일과 학업을 병행하고자 하는 노력을 응원해주신 한국산업인력공단 기술자격출제실장님 감사드립니다. 그리고 항상 제 학사일정을 배려해주시고 격려해주신 부장님과 항상 옆에서 많은 조언과 격려를 해주신 문희권 책임연구원, 이재준 책임연구원, 박준규 선임연구원, 최진영 선임연구원, 최성우 선임연구원, 정광무 선임연구원, 이상걸 연구원님께도 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

저를 항상 응원해주는 친구이자 힘이 되어주는 김태연, 안형수, 김기성, 박승구님께도 고마움을 전합니다.

언제나 아낌없는 사랑을 주시고 격려해주신 어머니, 아버지에게 감사드립니다. 부족한 사위를 항상 지지해주시는 장모님, 장인어른께 감사드립니다. 동생과 처제, 처남들에게도 감사의 마음을 전합니다.

미처 언급하지 못했지만, 저를 아끼고 격려해주셨던 모든 분들께도 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 그동안 직장생활과 더불어 학업까지 하느라, 가정생활에 많이 전념하지 못함에도 항상 이해해주고 격려해준 아내 은혜와 딸 서이에게 감사와 사랑하는 마음을 전합니다.

바른 모습으로 더욱 정진하며 부족함을 채워나가는 사람이 되도록 노력하겠습니다.

2022년 6월 박치영 올림