

초음파 나노 결정 표면개질된 SCM435의 특이한 피로 파괴 특성

Peculiar Fatigue Fracture Behavior of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modified SCM435

김재훈¹, 윤서현², 남기우^{3*}

Jae-Hoon Kim¹, Seo-Hyun Yun², Ki-Woo Nam^{3*}

〈Abstract〉

Using the fatigue limit ($\Delta\sigma_{unsm}$) and residual stress (σ_r) of the UNSM smooth specimen, the harmless maximum crack depth (a_{hlm}) according to the crack aspect ratio (As) was evaluated. In addition, the relationship between the minimum crack depth (a_{NDI1} , a_{NDI2}) detectable by non-destructive inspection(NDI), the crack depth (a_{25} , a_{50}) that reduces the fatigue limit by 25% and 50%, and a_{hlm} were evaluated. The harmless crack condition was determined by the deepest crack point (point A). Since a_{hlm} is larger than a_{25} and a_{50} , a_{25} and a_{50} can secure the safety and reliability of steel via UNSM. Because a_{NDI1} and a_{NDI2} are larger than a_{25} and a_{50} , cracks in a_{25} and a_{50} cannot be detected by non-destructive testing. Therefore it is necessary to apply more precise NDI.

Keywords : Crack Depth Detectable by NDI, Harmless Crack Depth, Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, Peculiar Fatigue Fracture

1 부경대학교, 대학원생

2 한국폴리텍대학 창원캠퍼스, 교수

3* 부경대학교, 교수

E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

2 Dept. of Die Mold System, Changwon Campus of Korea Polytechnics

3* Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

1. 서론

구조물의 불연속부 또는 용접부 등은 외부 응력의 작용에 취약하며, 피로 하중을 받으면 쉽게 파괴한다. 많은 연구자는 이와 같은 피로 특성 문제를 해결하기 위하여 노력하였다. 피로한도는 피닝 등 표면개질로 증가시킬 수 있다는 많은 연구가 수행되었다[1,2]. 그 중에서 초음파 나노 결정 표면개질 (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification; UNSM) 기술은 초음파 진동 에너지를 사용하여, 표면층에 소성 변형을 일으키고 나노 결정 구조를 유도하여 피로한도가 증가하였다[3,4].

한편 구조물에 존재하는 균열은 구조물의 수명이 단축되거나 안전성에 문제가 되므로, 파괴역학의 응력확대계수(K)로 정량적인 해석을 할 수 있었다. Paris는 응력확대계수범위(ΔK)와 균열 진전 속도(da/dN)의 상관성을 확인하였다[5]. Newman-Raju는 유한판에 반타원 표면균열의 응력확대계수(K) 평가식을 제안하였다[6]. 이 식들로 표면균열의 진전 속도 및 잔여 수명을 예측할 수 있어서 [7,8], 구조물의 안전성 확보에 기여하였다.

Haddad 등[9]은 미소 균열 문제를 정량적으로 취급할 수 있는 평가식을 유도하였으며, Tange 등[10]은 이 식을 수정하여 더욱 편리한 평가식을 제안하였다. 한편, Ando 등은 피로균열의 소성 거동을 고려한 미소 균열의 평가식을 제안하여 정량적으로 평가할 수 있었다[11]. 이 식은 표면균열을 피닝하여, 무해화 가능 균열 크기 및 미소 균열의 피로 한도를 정량적으로 평가할 수 있었다 [12-14].

본 연구는 UNSM한 기계 구조용 합금강 SCM435의 특이한 피로 파괴 거동을 규명하였다. 평활재의 피로한도($\Delta\sigma_w$), 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(l)}$), UNSM 평활재의 피로한도($\Delta\sigma_{unsm}$) 및 잔류응력(σ_r)을 사용하여 균열 형상비(A_s)에 따르는 무해화 최대 균

열 깊이(a_{hlm})를 평가하였다. 또한, 비파괴검사로 검출 가능한 최소 균열 깊이(a_{NDF1} , a_{NDF2}), 피로 한도를 25%와 50% 감소시키는 균열 깊이(a_{25} , a_{50})와 a_{hlm} 사이의 관계를 검토하였다.

2. 평가 재료 및 시험편

2.1 평가 시험편

재료는 Cr-Mo 강으로 부르는 기계 구조용 합금강 SCM435이다. 화학적 성분과 기계적 특성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타난다. 재료는 1,128K에서 30분간 유지 후, 유냉하고, 873K에서 1시간 동안 어닐링하였다[10]. 평가 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 판폭 $2W = 100\text{mm}$, 두께 $t = 10\text{mm}$ 로 응력비 $R = 0$ 로 굽힘응력을 받는

Table 1. Chemical compositions (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Cu	Ni
0.36	0.19	0.66	1.01	0.20	0.012	0.007	0.01	0.02

Table 2. Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
991	902	17

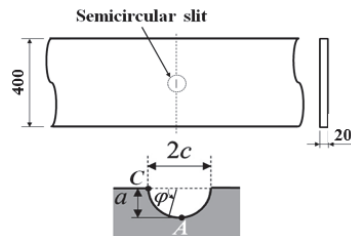


Fig. 1 Schematic of a finite plate containing a semicircular crack

것으로 가정하였다.

시험편의 균열은 길이(a), 길이($2c$)의 반타원으로 가정하였다. 균열형상비($As = a/c$)는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1로 4가지로 설정하였다.

2.2 잔류 응력 분포

Fig. 2는 UNSM에 의한 압축잔류응력 분포를 나타낸다[3]. UNSM 하중은 40N, 70N 및 100N의 3종류로서, 각 하중에 의한 시험편은 각각 40N UNSM, 70N UNSM 및 100N UNSM이라 부른다. 최대 압축잔류응력($\sigma_{rs,max}$)은 모두 표면이고, $\sigma_{rs,max}$ 는 각각 -610.9MPa, -649.8MPa 및 -685.7MPa이다. 잔류응력의 깊이는 모두 약 0.72mm이고, 약 -10MPa이었다. 평활시험편의 피로한도($\Delta\sigma_w$)는 500MPa이고, 3종류 UNSM 평활시험편의 피로한도($\Delta\sigma_{unsm}$)는 각각 550MPa, 600MPa 및 650MPa이었다. 긴 균열의 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th(l)}$ 는 $5.37MPa\sqrt{m}$ 이다[15].

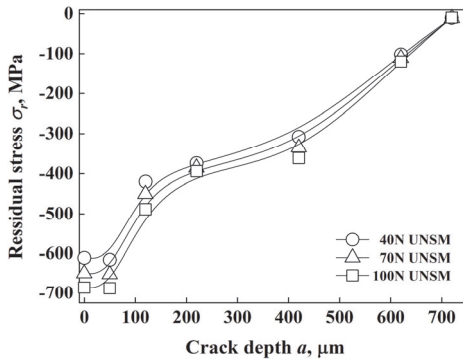


Fig. 2 Distribution of compressive residual stress by changing of UNSM load

2.3 a_{hlm} 의 평가 방법

유한판의 반타원 표면균열이 응력비 R 의 굽힘

응력을 받을 때, ΔK_{th} 의 균열 길이 의존성은 식(1)로 평가할 수 있다[11].

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

또, 유한판 균열재의 피로한도($\Delta\sigma_{wc}$)는 식(2)로 평가한다[11].

$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{wc}\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

여기서 $\Delta\sigma_w$ 는 평활시험편의 피로한도, $\Delta K_{th(l)}$ 은 긴 균열의 하한계응력확대계수, a 는 반타원 균열 길이, β 는 유한판의 시험편이 굽힘응력을 받는 경우의 균열최심부(4점) 및 최표면부(C점)에서 Newman-Raju 식[6]에서 주어지는 형상보정계수이다.

평활재의 피로한도 감소율은 25% 및 50%에 상당하는 균열 깊이에 대하여 평가하고, 각각의 균열 깊이를 a_{25} 및 a_{50} 이라 하였다.

a_{25} 와 a_{50} 의 평가는 식(3)으로 한다.

$$\Delta K_{ap} = \Delta K_{th(s)} \quad (3)$$

여기서, ΔK_{ap} 는 작용응력에 의한 응력확대계수이고, Newman-Raju 식[6]으로 평가하였다. 또한, a_{25} 와 a_{50} 의 평가는 각각 평활재의 피로한도보다 25% 또는 50% 낮은 작용 응력의 응력확대계수이다.

UNSM 시험편의 응력확대계수 범위(ΔK_{Tr})는 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta K_{Tr} = \Delta K_{ap} + K_r \quad (4)$$

여기서 K_r 은 API-RP579[16]에서 4차 다항식으로 얻어지는 잔류응력분포를 사용한다.

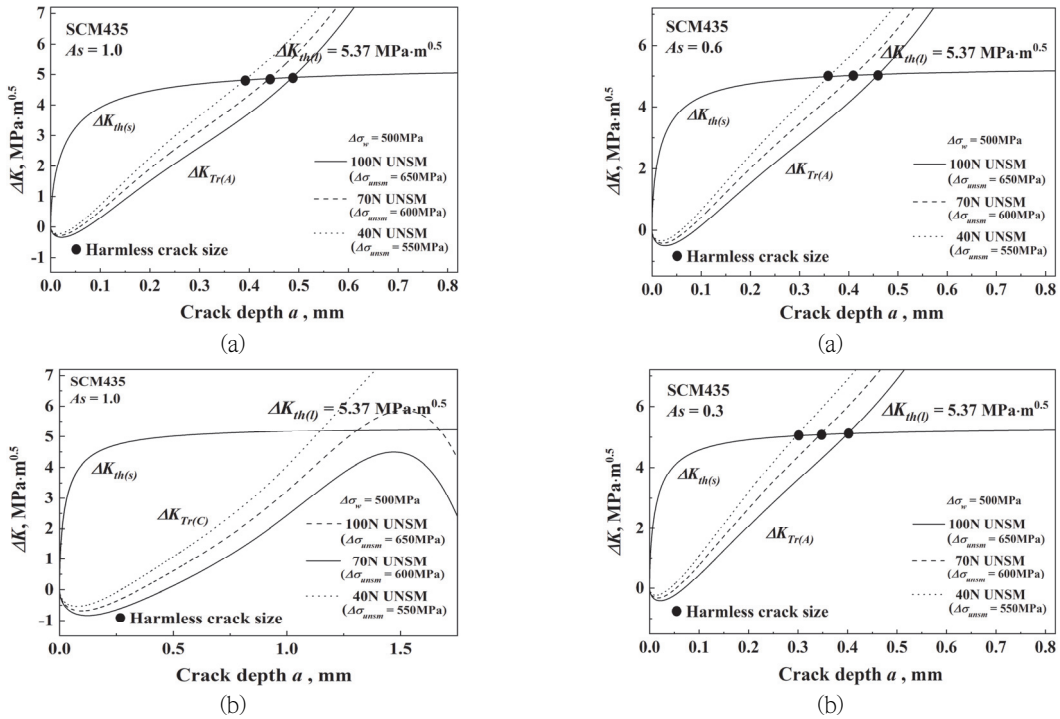


Fig. 3 Evaluation of a_{hlm} by UNSM for $As = 1.0$.

(a) Point A, (b) Point C

UNSM 시험편의 a_{hlm} 조건은 식(5)이다.

$$\Delta K_{Tr} = \Delta K_{th(s)} \quad (5)$$

a_{hlm} 는 역시 A점과 C점에서 평가하여, 작은 균열 깊이(a)를 사용한다. 그 점을 Fig. 3과 4에 나타내었다.

2.4 결함 검출확률

고성능인 초음파탐상법은 $2c = 0.6\text{mm}$, $a = 0.3\text{mm}$ 의 반원 균열을 충분히 검출할 수 있다. 이때의 균열면적을 S_{NDI1} 이라 하고, 균열 깊이를 a_{NDI1} 이라 하였다. 한편, Rummel 등[17]은 60% 검출확률의 피로균열 치수를 $2c = 1.4\text{mm}$, $a = 0.25\text{mm}$ 였다[18]. 이때의 균열면적을 S_{NDI2} 이라 하

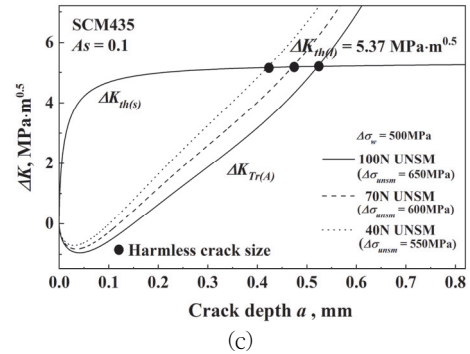


Fig. 4 Evaluation of a_{hlm} by UNSM. (a) $As = 0.6$, (b) $As = 0.3$, (c) $As = 0.1$

고, 균열 깊이를 a_{NDI2} 이라 하였다. 초음파탐상법의 에코 강도는 균열면적에 의존한다고 할 수 있다. 반타원균열의 면적(S)는 식(6)로 나타낸다.

$$S = \pi ac/2 \quad (6)$$

즉, 균열형상비(As)가 달라도, 반타원 균열 면적

S 가 동일하면, 균열 검출확률은 동일하다고 할 수 있다. 그래서 비파괴검사로 검출 가능한 최대 균열 깊이(a_{NDI})와 A_s 의 관계는 식(7)로 나타낸다.

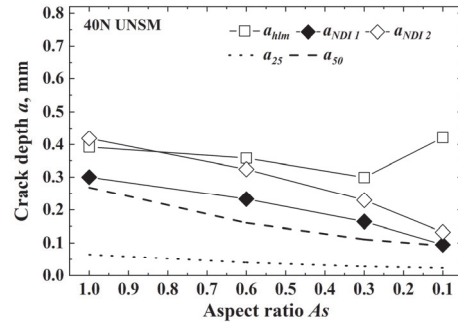
$$S_{NDI} = \pi a_{NDI}^2 / 2A_s \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

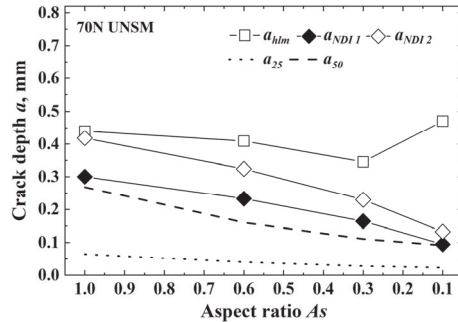
3.1 a_{hlm} 의 평가

Fig. 3은 $A_s = 1.0$ 에서 균열 깊이에 따르는 ΔK_{Tr} 과 ΔK_{th} 의 관계를 나타낸다. (a)는 균열 깊이 방향이고, (b)는 균열 길이 방향의 결과이다. 여기서 ΔK_{th} 는 $\Delta\sigma_w$ 를 식(1)에 대입하여 얻었다. ΔK_{Tr} 은 $\Delta\sigma_{unsm}$ 를 Newman-Raju 식에 대입한 ΔK_{ap} 와 압축잔류응력을 대입한 K_r 의 합이다. UNSM에 의한 a_{hlm} 은 식(6)으로 결정한다. 즉, $\Delta K_{ap} + K_r$ 의 합과 $\Delta K_{th(s)}$ 가 동일한 점의 균열 크기를 사용하고, 그 점을 ●로 표시한다. a_{hlm} 은 $\Delta K_{th(s)}$ 와 ΔK_{Tr} 이 교차하여, A 점에서 결정되었다. Fig. 3에서 평가한 a_{hlm} 은 A 점과 C 점에서 다르지만, A 점이 작은 값을 나타내었다. 예를 들면, $\sigma_{unsm} = 550\text{MPa}$ 의 경우, A 점은 a_{hlm} 이 약 0.39 mm이지만, C 점은 약 1.15 mm이다. 작은 a_{hlm} 을 무해화 균열 크기로 결정하였지만, a_{hlm} 은 모든 A_s 의 A 점에서 결정되었다.

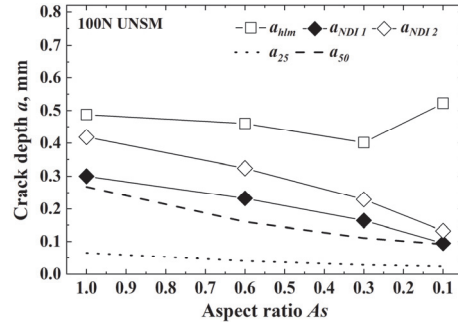
Fig. 4는 $A_s = 0.6, 0.3$ 및 0.1의 A 점 결과만 나타내었다. 이같이 모든 A_s 의 A 점에서 a_{hlm} 가 결정된 것은 Fig. 2의 잔류응력분포가 C 점에서는 항상 σ_0 의 압축잔류응력이 작용하기 때문이다. 이것은 UNSM 시험편의 a_{hlm} 은 표면균열의 크기에 상관없이 오직 균열 깊이에서 결정된다는 것을 의미한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 A_s dependence on a_{hlm} , a_{25} , a_{50} and a_{NDI} . (a) 40N UNSM, (b) 70N UNSM, (c) 100N UNSM

Fig. 5는 UNSM에 의한 a_{hlm} 의 A_s 의존성을 나타내었다. (a)(b)(c)는 각각 40N UNSM, 70N UNSM 및 100N UNSM의 결과이다. $\Delta\sigma_{unsm}$ 를 사용한 a_{hlm} 은 모두 깊이(a)점에서 결정되었다. a_{hlm} 은 A_s 가 작아짐에 따라서 작아지는 경향을 나타내었으나, $A_s = 0.3$ 이후는 증가하였다. 이같이 a_{hlm} 은 $A_s = 0.3$ 일 때 최소이다. 그러므로 유지 보수 후

에 UNSM하는 경우는 $As = 0.3$ 일 경우이다. 비파괴검사로 검출가능한 균열 깊이(a_{ND})는 As 가 감소함에 따라서 작아지고, $As = 0.1$ 의 경우에 최소이다. 직각방향의 잔류응력은 최표면에서 최대이고, 판 두께 중앙부는 인장 구속이 강하지 않은 경우에 압축 잔류응력이다. 그 때문에 균열은 대부분의 경우에 길고 As 가 작은 경우이다. 따라서 비파괴검사와 보수후에 피닝하지 않는 경우에는 비파괴검사로 검출해야 하는 균열 크기는 $As = 0.1$ 의 얇은 균열이라 할 수 있다.

3.2 표면균열 무해화 기술의 SCM435 안전성

Fig. 5는 평활시험편의 피로한도가 25% 또는 50% 감소하는 균열 깊이(a_{25}, a_{50}), a_{hlm} 및 비파괴검사에서 검출 가능한 균열 깊이(a_{ND1}, a_{ND2})를 나타내었다. (a)(b)(c)는 각각 40N UNSM, 70N UNSM 및 100N UNSM의 결과이다. As 가 작아짐에 따라서 a_{25} 및 a_{50} 은 감소하였다. 피로한도 25% 및 50% 감소하는 피로균열 a_{25} 및 a_{50} 은 무해화 가능 균열 깊이 a_{hlm} 보다 아래쪽에 있으므로 UNSM로 무해화 가능하다. 비파괴검사의 균열 검출 능력(a_{ND1}, a_{ND2})은 피로한도 25% 및 50% 감소하는 피로균열 a_{25} 및 a_{50} 보다 위쪽에 있으므로 비파괴검사로 a_{25} 및 a_{50} 의 균열을 검출할 수 없다. 따라서 더욱 고정도인 비파괴검사 기술을 적용할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 SCM435강의 평활시험편의 피로한도($\Delta\sigma_w$) 및 UNSM 평활시험편의 피로한도($\Delta\sigma_{unsm}$),

하한계응력확대계수($\Delta K_{th(l)}$) 및 3종류의 UNSM 하중에 의한 잔류응력 분포를 사용하여, a_{hlm} 의 As 의존성 및 평활시험편의 피로한도를 25% 또는 50% 감소시키는 균열 깊이 (a_{25}, a_{50})의 As 의존성을 평가하였다. 또한, 비파괴검사로 피로한도를 감소시키는 균열(a_{ND1}, a_{ND2})의 검출 가능성을 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) UNSM 시험편의 a_{hlm} 은 모두 깊이(a)에서 결정되었다.
- (2) $a_{hlm} > (a_{25}, a_{50})$ 이므로, 본 연구의 UNSM으로 (a_{25}, a_{50})은 강의 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있다.
- (3) (a_{ND1}, a_{ND2}) $>$ (a_{25}, a_{50})이므로 비파괴검사로 (a_{25}, a_{50})의 균열을 검출할 수 없다. 따라서 더욱 정밀한 비파괴검사 기술을 적용할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] S. Tekeli, "Enhancement of fatigue strength of SAE 9245 steel by shot peening," *Materials Letters*, vol. 57, pp. 604-608, (2002).
- [2] S. G. Irizalp, N. Saklakoglu, F. Baris, and S. Kayral, "Effect of shot peening on residual stress distribution and microstructure evolution of artificially defected 50CrV4 steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, pp. 7607-7616, (2020).
- [3] M. S. Suh, C. M. Suh, and Y. S. Pyun, "Very high cycle fatigue characteristics of a chrome-molybdenum steel treated by ultrasonic nanocrystal surface modification technique," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 36, pp. 769-778, (2013).
- [4] C. M. Suh, M. H. Lee, and Y. S. Pyun, "Fatigue characteristics of SKD-61 by ultrasonic nanocrystal surface modification technology

- under static load variation,” *International Journal of Modern Physics B*, vol. 24, pp. 2645–2650, (2010).
- [5] P. Paris, and F. Erdogan, “A critical analysis of crack propagation laws,” *ASME Journal of Basic Engineering*, vol. 85, pp. 528-533, (1963).
- [6] J. C. Newman Jr., and I. S. Raju, “An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 15, pp. 185-192, (1981).
- [7] K. W. Nam, “Life prediction of fatigue crack propagation and nondestructive evaluation in 5083 aluminum alloy,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 15, pp. 94-98, (2001).
- [8] A. Alshoabi, M. Ghazwani, and M. Hakami, “Fatigue life and reliability assessment of metal structures,” *Engineering Solid Mechanics*, vol. 9, pp. 13-22, (2021).
- [9] M. H. El Haddad, T. H. Topper, and K. N. Smith, “Prediction of non-propagating cracks,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 11, pp. 573-584, (1979).
- [10] A. Tange, T. Akutu, and N. Takamura, “Relation between shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel,” *Transactions of JSSE*, vol. 1991, pp. 47-53, (1991).
- [11] K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui, and K. Takahashi, “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, (2019).
- [12] M. H. Kim, J. Y. Hyun, and K. W. Nam, “Evaluation of harmless crack size using Ando’s equation,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, pp. 1971-1977, (2020).
- [13] C. Y. Park, K. H. Gu, and K. W. Nam, “Reliability improvement for fatigue characteristics of STS316L steel using surface crack non-damaging technology,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 45, pp. 741-749, (2021).
- [14] S. H. Yun, K. W. Nam, “Failure Analysis and Counter measures of SCM435 High-Tension Bolt of Three-Step Injection Mold”, *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, Vol. 23, No. 4, pp. 531-539, (2020).
- [15] Y. Kondo, C. Sakae, M. Kubota, and T. Kudou, “The effect of material hardness and mean stress on the fatigue limit of steels containing small defects,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 26, pp. 675-682, (2003).
- [16] American Petroleum Institute, “API recommended practice 579 fitness for service”, American Petroleum Institute, pp. C3-C10, (2000).
- [17] W. D. Rummel, P. H. Todd Jr, S. A. Freeska, and R. A. Rathke, “The Detection of Fatigue Cracks by Nondestructive Testing Methods,” *NASA Technical Report, NASA-CR-2369*, (1974).
- [18] Y. Mizutani, “Nondestructive inspection of metal fatigue,” *Industrial Materials (Japan)*, vol. 56, pp. 86-89, (2008).