

쇼트 볼의 크기에 따르는 SCM822H 강의 무해화 균열크기 평가

Evaluation of Harmless Crack Size of SCM822H Steel according to Shot Ball Size

최진우¹, 윤서현², 남기우^{3*}

Jin-Woo Choi¹, Seo-Hyun Yun², Ki-Woo Nam^{3*}

〈Abstract〉

In this study, the harmless crack size was evaluated using carburized, quenched-tempered SCM822H steel. The possibility of detecting cracks that reduce the fatigue limit by non-destructive inspection was evaluated. The conclusions obtained are as follows. The retained austenite of surface was reduced by SP. About 35% and 65% of the retained austenite on the surface were transformed into strain-induced martensite, increasing the hardness by 79HV and 122HV over the as-received material. The maximum compressive residual stresses introduced on the surfaces were -695 MPa and -688 MPa, respectively. The fatigue limit increased by 1.48 times and 1.67 times, respectively, compared to the as-received material. The harmless crack size of SP specimen was determined differently depending on the shot ball size.

Keywords : Compressive Residual Stress, Harmless Crack Size, SCM822H Steel, Shot Ball Size

1 부경대학교 재료공, 대학원생

2 한국폴리텍대학 창원캠퍼스, 금형시스템과 교수

3* 부경대학교 재료공, 교수
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

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

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

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

1. 서론

에너지 절약 방법은 부품의 관성 질량을 감소시키는 것, 즉 경량화로서 효과적이다. 부품의 경량화를 달성하기 위해서는 피로한도의 향상이 필요하다. 피로한도의 향상을 위해서 피로 파괴 과정의 ① Stage I의 균열 발생을 억제하기 위하여, 항복 응력을 높인다. ② Stage I의 균열 전파 거리는 짧고, 항복 응력을 높이기 위하여 결정 입경을 작게 한다. ③ Stage II의 균열 진전을 억제하기 위하여, 압축 잔류응력을 크게 한다[1].

Stage I의 균열 발생 억제 방법①은 탄소양의 증가가 효과적이고, 방법은 침탄(Carburizing; C) 및 담금질-뜨임(Quenching-tempering; QT) 열처리기가 있다. 또, CQT 고강도 강은 Stage I의 균열 발생 억제①와 Stage II의 균열 진전 억제③를 달성하는 방법은 쇼트 피닝(Shot peening; SP)이 있고, 다양한 SP를 적용하여 균열 무해화를 평가하고 있다[2-9]. 그러나 CQT 고강도 강에 SP를 실시한 연구 예는 없다.

본 연구는 SP가 피로강도에 미치는 영향과 SP에 의하여 무해화될 수 있는 표면 결함 크기를 명확히 하기 위하여, 침탄, 담금질-뜨임한 SCM822H 강을 굽힘 피로 실험하였다. 금속의 피로 강도는 주로 표면 잔류응력 및 경도에 따라 달라진다. 따라서 SP에 의하여 무해화 가능한 결함 크기를 파괴 역학적으로 평가하였다.

2. 평가 재료 및 방법

재료는 기계 구조용 합금강 SCM822H를 사용하였다. 화학적 성분은 Table 1에 나타난다. 재료는 1,203K에서 4시간 침탄(Carburizing; C) 후, 유냉(Quenching; Q)하고, 433K에서 2시간 동안

템퍼링(Tempering; T)하여, 모재시험편으로 사용하였다. 쇼트 피닝 시험편(SP)은 non-SP에 쇼트경도 700HV인 $\phi=0.6\text{mm}$ 볼을 SP한 시험편($SP_{0.6}$) 및 쇼트경도 560HV인 $\phi=0.8\text{mm}$ 볼을 SP한 시험편($SP_{0.8}$)이다. 즉, 시험편은 non-SP, $SP_{0.6}$ 및 $SP_{0.8}$ 의 3종류를 사용하였다.

3종류의 시험편은 Fig. 1과 같이 판폭 $2W=100\text{mm}$, 두께 $t=10\text{mm}$ 로 응력비 $R = -1$ 로 굽힘응력을 받는다. 시험편은 균열 깊이(a), 균열 길이(2c)의 반타원 표면균열을 가지고, 균열형상비($A_s=a/c$)는 1.0, 0.7, 0.4 및 0.1로 4가지이다. 균열 깊이는 A, 균열 표면은 C로 나타낸다.

SCM822H 침탄경화부의 탄소량은 연소-적외선 흡수법으로 측정하였다. 경도 측정은 압입하중 2.9kN으로 비커스경도기를 사용하였다. 잔류오스테나이트 양은 XRD 데이터에서 각 상 2 θ 최대값을 사용하여 구하였다. 잔류응력은 홀드릴링법으로 깊이 방향으로 측정하였다.

굽힘피로시험은 회전굽힘피로시험기를 사용하였으며, 10^7 사이클의 반복응력에 파괴하지 않은 응력을 피로한도라 하였다. 긴 균열의 하한계응력확대계수 $K_{th(l)}$ 는 많은 연구자의 결과에서 강종에 상관없이 비커스경도(HV)와 역비례하였다. 이와 같은 관

Table 1. Chemical compositions of SCM822H steel (mass%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Cu	Ni
0.22	0.27	0.74	1.09	0.36	0.014	0.010	0.17	0.06

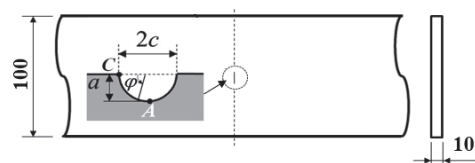


Fig. 1 Schematic diagram of a finite plate with electric discharge machining crack

계에서 본 연구에 사용한 열처리 전 소재의 경도는 440HV이므로, $6.52 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 로 결정하였다[10].

3. 평가 결과 및 고찰

3.1 침탄층의 탄소량

Fig. 2는 표면에서 깊이에 따르는 침탄층의 탄소량을 나타낸다. 깊이 약 0.015mm의 탄소량은 0.78mass%로 최고 경도가 얻어지는 SCM822H 강화화합 조성의 공식점 0.8mass%와 비슷하였다. 경도는 피닝에 의하여 형성되는 압축잔류응력의 크기에 많은 영향을 미친다. 즉, 경도가 클수록 더 큰 압축 잔류응력이 도입된다. 또, 깊이 1.48mm와 1.58mm의 탄소량은 0.22mass%로 Table 1의 화학성분과 거의 일치한다.

3.2 잔류 오스테나이트 양

Fig. 3은 non-SP와 SP 후의 각 시험편(SP0.6, SP0.8)에 대한 잔류 오스테나이트 양을 나타낸다. non-SP의 표면 잔류 오스테나이트는 17%이고, SP0.6과 SP0.8의 표면 잔류 오스테나이트는 각각 6%, 11%가 얻어졌다. 이것은 SP에 의하여 잔류 오스테나이트가 가공유기 마르텐사이트로 변태한 것으로 판단된다. 즉, SP0.6과 SP0.8의 표면 잔류 오스테나이트는 각각 약 65% 및 35%가 가공유기 마르텐사이트로 변태한 것을 의미한다. 이와 같은 잔류 오스테나이트의 감소는 표면 경도가 현저하게 상승할 것으로 판단된다. 이것은 냉간압연율이 증가할수록 오스테나이트는 감소하고, 마르텐사이트로 변태하여 증가하는 연구 결과와 일치한다[11]. 또한, 경도도 증가하였다. 이것은 그 만큼 압축잔류응력이 더 크게 도입될 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 3종류 시험편의 비커스경도 분포를 나타낸다. non-SP, SP0.6과 SP0.8의 표면 비커스경도는 699HV, 821HV 및 778HV가 얻어졌다. SP0.6

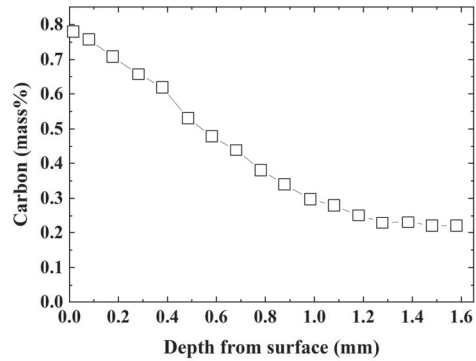


Fig. 2 Distribution of Carbon mass fraction

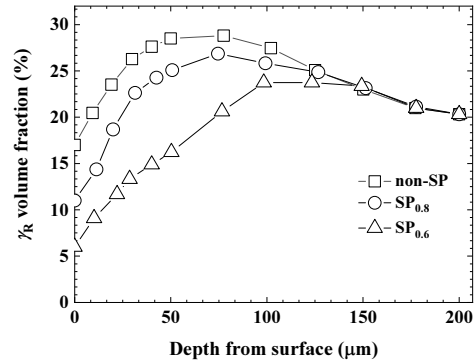


Fig. 3 Distribution of retained Austenite volume fraction

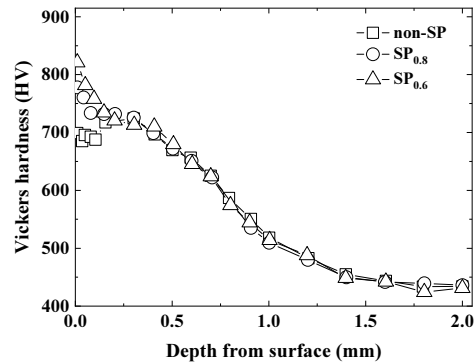


Fig. 4 Vickers hardness of each specimen

과 SP0.8의 경도는 non-SP에 비하여 122HV 및 79HV 높게 나타났다.

3.3 잔류 응력분포

Fig. 5는 3종류 시험편의 압축 잔류응력분포를 나타낸다. 표면의 압축잔류응력(σ_{rs})은 각각 non-SP -192MPa, SP0.6 -688MPa 및 P0.8 -695MPa 였다. SP에 의한 최대 압축잔류응력(σ_{rmax})은 non-SP $\sigma_{rs} = \sigma_{rmax}$ 이고, SP0.6 -1157MPa (깊이 약 $50\mu m$)S 및 P0.8 -808MPa (깊이 약 $42\mu m$)였다. Fig. 5에서 SP0.6과 SP0.8의 압축잔류응력 분포가 다르다는

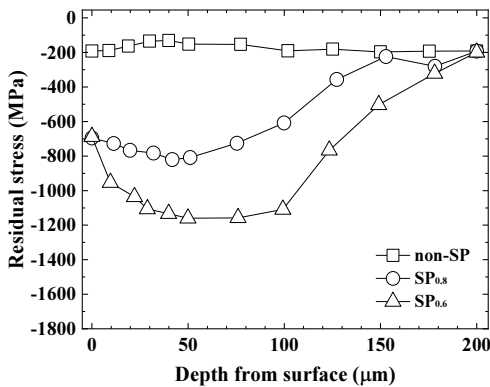


Fig. 5 Residual stress of each specimen

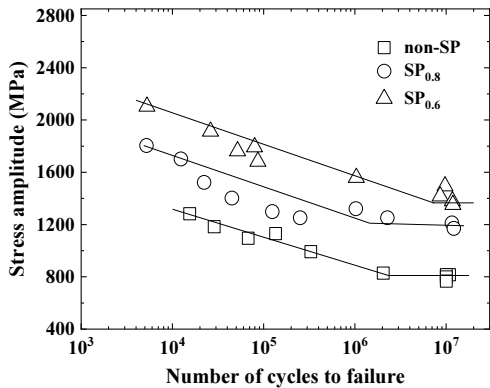


Fig. 6 S-N curves of each specimen

것을 알 수 있다. 이러한 압축잔류응력 분포는 무해화균열크기에 영향을 미치게 된다.

3.4 피로한도

Fig. 6은 non-SP와 SP 시험편의 S-N 곡선을 나타낸다. non-SP의 피로한도(σ_w)는 827 MPa이다. 이것에 대하여 SP0.6의 σ_w 는 1381 MPa, SP0.8의 σ_w 는 1225 MPa이다. non-SP에 대한 시험편 SP0.6 및 SP0.8의 σ_w 는 각각 1.67배 및 1.48배 증가하였다. 이와 같이 SP로 표면 직하의 정도 및 압축잔류응력을 크게 하므로서 피로한도 향상에 유효한 방법이라 할 수 있다.

3.5 무해화 균열크기(a_{hml})

Fig. 7(a),(b)는 SP0.6 및 SP0.8의 $A_s=1.0$ 에 대한 균열 깊이에 따르는 ΔK_{Tr} 과 ΔK_{th} 의 관계를 대표적으로 나타낸다. 균열깊이에 따르는 ΔK_{th} 는 유한판의 반타원 표면균열이 응력비 R의 굽힘응력을 받을 때, non-SP의 피로한도($\Delta\sigma_w$)를 식(1)에 대입하여 평가하였다[6].

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

여기서 $\Delta\sigma_w$ 는 non-SP의 피로한도(827 MPa), $\Delta K_{th(l)}$ 은 긴 균열의 하한계응력확대계수($6.52 \text{ MPa}\sqrt{m}$), a 는 반타원 균열 깊이, β 는 유한판의 시험편이 굽힘피로응력을 받는 균열 깊이 및 표면에서 Newman-Raju 식[12]에서 주어지는 형상보정계수이다.

ΔK_{Tr} 은 Newman-Raju 식에 의한 ΔK_{ap} 와 압

축 잔류응력 식(2)에 의한 K_r 의 합이다. 여기서 ΔK_{sp} 에 사용한 작용응력은 각 SP의 피로한도 ($\Delta\sigma_{sp}$)를 사용하였다. 즉, 1225 MPa 및 1381 MPa를 사용하였다. 또한, K_r 의 평가[13]는 Fig. 5에 나타난 SP0.6 및 SP0.8의 잔류응력을 각각 사용하였다.

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

여기서 $G_0 \sim G_4$ 는 API-RP579에 의한 응력확대계수의 형상보정계수이다. a, c 는 각각 반타원 균열

의 깊이 및 표면길이이다. W, t 는 각각 판 폭과 판 두께다. $\sigma_0 \sim \sigma_4$ 는 잔류응력 분포를 4차 다항식으로 근사시킨 결과에서 얻어지는 계수이다.

SP에 의한 무해화 가능 최대 균열 크기(a_{hml})는 식(3)으로 결정한다. 즉, 균열 깊이와 표면에서 작은 균열 크기를 사용한다. Fig. 7에서 a_{hml} 는 모두 $\Delta K_{th(l)}$ 에 대하여, $\Delta K_{th(s)}$ 와 ΔK_{Tr} 의 교차점을 ●로 나타내었다.

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

Table 2는 균열 깊이(A)와 표면(C)의 a_{hml} 이다. SP0.6과 SP0.8은 $As=1.0, 0.7$ 및 0.4 에서 $\Delta K_{th(s)}$ 와 ΔK_{TrA} 의 교점이 있으나, $As=0.1$ 에서 균열 표면의 $\Delta K_{th(s)}$ 와 ΔK_{TrC} 교점이 없다. 교점이 없는 것은 표면 균열 크기와 상관없이 무해화 가능하다는 것이다. 균열 깊이와 표면 균열의 a_{hml} 는 피닝 볼의 크기에 따라서 다르다. SP0.6의 a_{hml} 는 $As=1.0, 0.7$ 및 0.4 에서 균열 표면, $As=0.1$ 에서 균열 깊이에서 결정되었다. SP0.8의 a_{hml} 는 $As=1.0$ 과 0.7 에서 균열 표면, $As=0.4$ 와 0.1 에서 균열 깊이에서 결정되었다.

Fig. 8은 SP에 의한 a_{hml} 의 As 의존성을 나타내었다. a_{hml} 는 피닝 볼의 크기에 따라서 다르게 나타났다. SP0.6의 a_{hml} 는 $As=0.7$ 에서 약간 작았으나, 이후는 증가하였다. 그러나 SP0.8의 a_{hml} 는 As 가 작아짐에 따라서 작아지는 경향을 나타내었다.

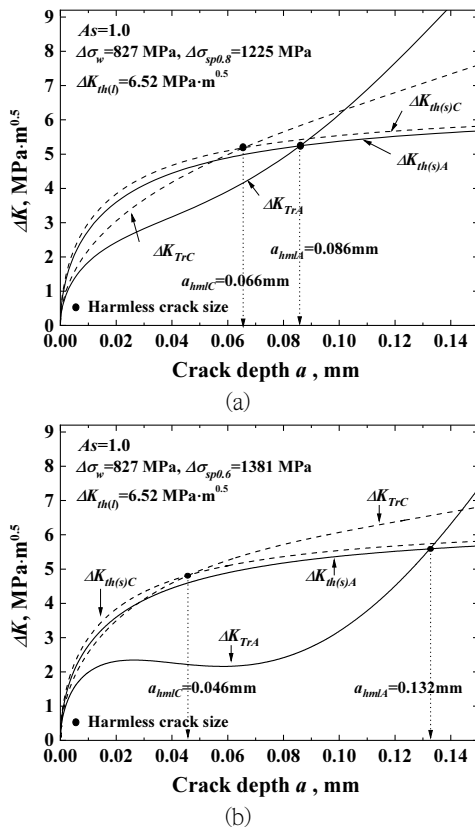


Fig. 7 Evaluation of harmless crack size.

(a) SP0.6, (b) SP0.8

Table 2. Harmless crack size (a_{hml}) of SP0.8 and SP0.6

As	SP0.6	SP0.8
1.0	0.046	0.066
0.6	0.037	0.060
0.3	0.052	0.054
0.1	0.124	0.050

3.6 표면균열 무해화 기술의 SCM822H 안전성

Fig. 8은 non-SP 피로한도가 25% 또는 50% 감소하는 균열 깊이(a_{25} , a_{50}), a_{hml} 및 비파괴검사에서 검출 가능한 균열 깊이(a_{NDI1} , a_{NDI2})를 나타내었다. As 가 작아짐에 따라서 a_{25} 및 a_{50} 은 감소하였다. 무해화 가능 균열 크기 $a_{hml(SP0.6)}$ 및 $a_{hml(SP0.8)}$ 은 피로한도 25% 감소하는 피로 균열 a_{25} 보다 위쪽에 있으므로 SP로 무해화 가능하다. 그러나 $a_{hml(SP0.6)}$ 의 $As=1.0-0.4$ 는 a_{50} 보다 아래에 있으므로 무해화 불가능하지만, $As=0.1$ 은 위쪽에 있으므로 무해화 가능하다. 한편 $a_{hml(SP0.8)}$ 는 피로한도 50% 감소하는 피로 균열 a_{50} 보다 아래에 있으므로 무해화 불가능하다.

비파괴검사의 균열 검출 능력(a_{NDI1} , a_{NDI2})은 피로한도 25% 및 50% 감소하는 피로 균열 a_{25} 및 a_{50} 보다 위쪽에 있으므로 비파괴검사로 a_{25} 및 a_{50} 의 균열을 검출할 수 없다. 단, $a_{hml(SP0.6)}$ 의 $As=0.1$ 은 a_{NDI1} 으로 a_{25} 및 a_{50} 의 균열을 검출할 수 있다. 따라서 검출 불가능한 균열은 더욱 해상도가 좋은 비파괴검사 기술을 적용할 필요가 있다.

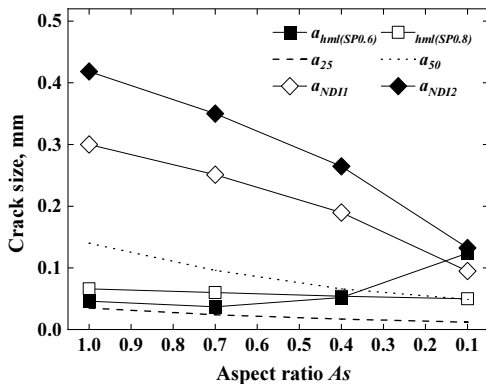


Fig. 8 As dependence on a_{hml} , a_{25} , a_{50} and a_{NDI}

4. 결론

본 연구는 침탄, 담금질-뜨임한 SCM822H강의 무해화 균열 크기(a_{hml})를 파괴역학적으로 평가하고, non-SP의 피로한도를 25% 또는 50% 감소시키는 균열 깊이 (a_{25} , a_{50}) 및 비파괴검사로 피로한도를 감소시키는 균열(a_{NDI1} , a_{NDI2})와의 관계에서 안전성을 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) SP에 의하여 표면 잔류 오스테나이트는 감소하였다. SP0.6과 SP0.8의 표면 잔류 오스테나이트의 약 65% 및 35%는 가공유기 마르텐사이트로 변태하여, 경도가 모재보다 122HV 및 79HV 증가하였다.
- (2) SP0.6과 SP0.8은 표면에 최대 압축잔류응력(σ_{rmax})이 도입되고, 각각 -688MPa 및 -695MPa였다. 피로한도는 모재보다 각각 1.67배 및 1.48배 증가하였다.
- (3) SP 시험편의 a_{hml} 는 피닝 볼의 크기에 따라서 다르게 결정되었다. SP0.6의 $As=1.0$, 0.7 및 0.4은 균열 표면, $As=0.1$ 은 균열 깊이에서 결정되었다. 한편 SP0.8의 $As=1.0$ 과 0.7은 균열 표면, $As=0.4$ 와 0.1은 균열 깊이에서 결정되었다.
- (4) a_{hml} , (a_{25} , a_{50}), (a_{NDI1} , a_{NDI2}) 및 As 관계에서, NDI와 비 손상기법의 유용성을 평가하였다.
- (5) 피로강도 향상과 표면결함 무해화에 기여하는 주요 요인은 SP에 인한 압축잔류응력이다. 따라서 SP는 SCM822H 강 안전성 및 신뢰성을 향상시키는 데 효과적이다.

참고문헌

- [1] H. Ishigami, K. Matsui, A. Tange, K. Ando, "Fatigue fracture process and methodology to increase fatigue limit," *Journal of High Pressure Institute of Japan*, vol. 38, pp. 205-215, (2000).
- [2] JIS B 2711, "Shot Peening", (2005).
- [3] H. Ishigami, K. Matsui, Y. Jin, K. Ando, "Stress Double Shot Peening to Improve Residual Stress Distribution (The Effect of Pre-tensile Stress and Peening Angle on Residual Stress Distribution)," *JSME*, vol. 66, pp. 1547-1554, (2000).
- [4] H. Wang, Y. Huang, W. Zhang, "The study of laser shock peening with side-water spraying and coaxial-water feeding technology," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 1, pp. 102-107, (2018).
- [5] H. Soyama, "Comparison between the improvements made to the fatigue strength of stainless steel by cavitation peening, water jet peening, shot peening and laser peening," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 269, pp. 65-78, (2019).
- [6] K. Ando, K. W. Nam, M. H. Kim, T. Ishii, K. Takahashi, "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, (2020).
- [7] J. H. Kim, S. H. Yun, K. W. Nam, "Peculiar Fatigue Fracture Behavior of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modified SCM435," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 25, pp. 241-247, (2022).
- [8] K. Ando, M. H. Kim, K. W. Nam, "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, pp. 306-316, (2021).
- [9] G. W. Lee, K. H. Gu, J. H. Kim, S. H. Yun, Y. K. Kwon, K. W. Nam, "Improving Reliability of SKD61 Using Nondamaging Technology," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 25, pp. 791-797, (2022).
- [10] M. Nakagawa, K. Takahashi, T. Osada, H. Okada, H. Koike, "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, (2014).
- [11] J. Y. Do, Y. J. Tak, K. H. Shin, K. W. Nam, "Mechanical and Elastic Wave Properties of STS316L with Different Reverse Transformation Temperature and Time," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 25, pp. 1055-1062, (2022).
- [12] J. C. Newman Jr., I. S. Raju, "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 15, pp. 185-192, (1981).
- [13] American Petroleum Institute, "API recommended practice 579 fitness for service", *American Petroleum Institute*, pp. C3-C10, (2000).