

이중 쇼트 피닝에 의한 SCM822H 강의 무해화 균열 크기 평가

Evaluation of Harmless Crack Size of SCM822H Steel by Double Shot Peening

최진우¹, 윤서현², 권영국³, 이금화⁴, 남기우^{5*}

Jin-Woo Choi¹, Seo-Hyun Yun², Yung-Kug Kwon³, Gum-Hwa Lee⁴, Ki-Woo Nam^{5*}

〈Abstract〉

In this study, the harmless crack size (a_{hml}) by double shot peening (DSP) using shot balls with different diameters was evaluated on carburized, quenched-tempered SCM822H steel. The minimum crack size (a_{NDI}) detectable by non-destructive inspection was also evaluated. The relationship between the crack size ($a_{25,50}$) that reduces the fatigue limit by 25% and 50% and a_{hml} was evaluated. The residual stress of DSP was greater in $SP_{(0.6+0.08)}$ than $SP_{(0.8+0.08)}$ and appeared deeper in the depth direction. In addition, the hardness below the surface appeared larger. The fatigue limit of DSP increased 2.07 times and 1.95 times compared to non-SP. All a_{hml} of the DSP specimen was determined at the depth (a). The compressive residual stress distribution affects a_{hml} and the a_{hml} of $SP_{(0.6+0.08)}$, which has a large compressive residual stress and a high fatigue limit, appeared large. a_{hml} of $SP_{(0.6+0.08)}$ introduced deeper than the residual stress of $SP_{(0.8+0.08)}$ is larger in the range of $As=1.0-0.3$. Since the residual stress in the thickness direction has a greater effect on a_{hml} than the residual stress at the surface, it is necessary to introduce it more deeply. The relation

1 부경대학교 재료공학과, 대학원생

2 한국폴리텍대학 창원캠퍼스, 금형시스템과 교수

3 POSCO 포항공장, 열연부 열연공정색션, 부장

4 부경대학교 마린융합디자인공학과, 대학원생

5* 부경대학교 재료공 & 마린융합디자인공학과, 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 General Technical Manager, Hot Rolling Department Process Control Section, POSCO Pohang Works

4 Graduate Student, Dept. of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

5* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering & Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

of a_{hmb} , $a_{25,50}$, and a_{NDI} were evaluated in the point for safety and reliability.

Keywords : Compressive Residual Stress, Double Shot Peening, SCM822H Steel, Shot Ball Size

1. 서론

최근 환경문제의 관점에서 구조물의 경량화는 매우 중요한 문제로, 필요성에 대응하기 위하여 구조 부재의 피로 강도를 증가시키는 것이 필요하다. 피로 강도의 증가 방법은 (1) 표면 경도 향상, (2) 큰 압축 잔류응력 도입이다. (1)에 관해서는 다양한 표면 개질 방법이 개발되어 시도되고 있다. 그러나 경도는 700HV 정도까지 가능하지만, 경제적인 방법으로 이 이상 HV를 증가시키는 것은 곤란하다. 또, HV를 증가시켰다 하여도 한계 경도를 넘어가면, 피로 강도가 그 이상 증가하지 않는다는 보고도 있다[1]. 그 원인은 개재물에 대한 감수성의 증가 및 잔류오스테나이트의 영향이라 판단된다.

이것에 대하여 큰 압축 잔류응력을 도입하는 방법은 응력비에 따라 다르지만, 매우 유용한 방법이다. 압축 잔류응력을 도입하는 방법은 많지만, 그 중에서 쇼트피닝이 가장 많이 사용되고 있다. 쇼트피닝을 적용하여, 구조물의 피로 강도를 더욱 증가시키기 위해서는 (1) 잔류 응력분포의 최적화, (2) 더욱 큰 압축 잔류응력 도입 방법을 검토할 필요가 있다. (1)에 관해서는 2번째에 $\phi 100\mu\text{m}$ 이하의 쇼트를 이용하는 이중 쇼트피닝(double shot peening : DSP)이 유용하다고 알려져 있다[2-5]. 그 이유는 피로 강도에 중요한[5] 표면 직하의 잔류응력 분포를 현저하게 개선할 수 있다는 점이다. (2)에 관해서는 경도 700HV 이상의 재료에 매우 큰 압축 잔류응력을 도입하는 것이 매우 곤란하다고 한다. 그러나 사전에 인장응력을 가한 상태에서 쇼트피닝을 하는 응력쇼트피닝(stress

shot peening : SSP)으로, 이 문제를 극복하였다는 보고도 있다[2,6]. 저자들은 초음파 표면 개질하여 나노 결정화된 SCM435[7] 및 SKD61[8], 유도경화한 SCM440[9]의 잔류응력으로 무해화 균열 크기를 평가하였다.

본 연구에서는 직경이 다른 쇼트 볼로 칩탄, 담금질-뜨임한 SCM822H강에 이중 쇼트 피닝(double shot peening; DSP)하였다. 금속의 피로 강도는 DSP에 의한 표면 잔류응력 및 경도에 영향을 받으므로, 굽힘 피로 실험하였다. 피로 강도에 미치는 영향과 DSP에 의한 무해화 균열 크기(a_{hml})를 파괴 역학적으로 평가하였다.

2. 평가 재료 및 방법

재료는 기계 구조용 합금강 SCM822H를 사용하였다. 화학적 성분은 Table 1에 나타낸다. 재료는 1,203K에서 4시간 칩탄 후, 유냉하고, 433K에서 2시간 동안 템퍼링하여, 모재시험편으로 사용하였다. 쇼트 피닝 시험편(SP)은 모재시험편(non-SP)에 쇼트 직경 $\phi = 0.6, 0.8\text{mm}$ 를 피닝한 후, $\phi = 0.08\text{mm}$ 를 피닝하였다. 즉, 시험편은 non-SP, SP_(0.6+0.08) 및 SP_(0.8+0.08)의 3종류를 사용하였다.

3종류의 시험편은 Fig. 1과 같이 판폭 $2W=100$

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

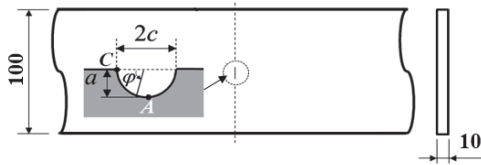


Fig. 1 Schematic diagram of a finite plate with electric discharge machining crack

mm, 두께 $t=10$ mm로 응력비 $R = 0$ 의 굽힘응력을 받는다. 시험편은 균열 깊이(a), 균열 길이($2c$)의 반타원 표면균열을 가지고, 균열형상비($As=a/c$)는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1로 4가지이다. 균열 깊이는 A , 균열 표면은 C 로 나타낸다.

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

3. 평가 결과 및 고찰

3.1 잔류 응력분포

Fig. 2는 DSP에 의한 압축 잔류응력 분포를 나타낸다. 여기서 고강도강의 Stage I의 피로 균열 깊이와 Stage I에서 Stage II로 천이단계를 고려하여, 결정립 3개 정도 (약 $60 \mu\text{m}$)의 깊이까지 최대 값을 최대 압축 잔류응력(σ_{max})이라 정의하였다.

non-SP는 표면의 압축 잔류응력(σ_{rs})= σ_{max} 이고, -192 MPa 이다. DSP($\text{SP}_{(0.6+0.08)}$, $\text{SP}_{(0.8+0.08)}$)는 각각

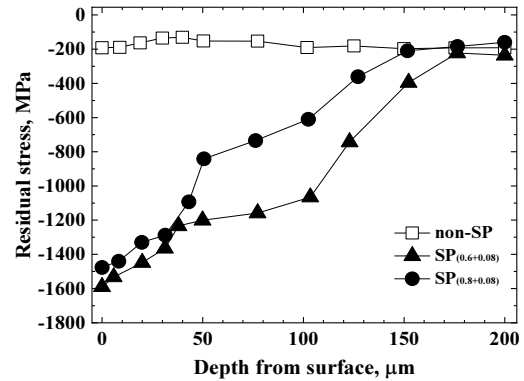


Fig. 2 Residual stress of each specimen

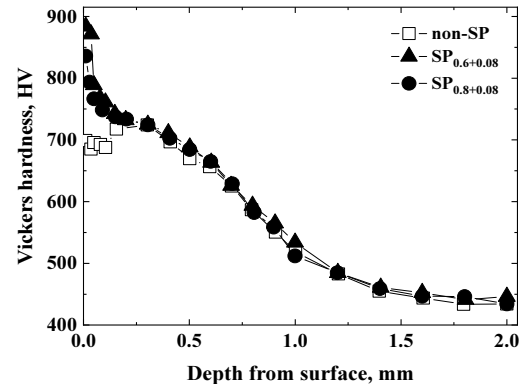


Fig. 3 Distribution of Vickers hardness

표면에서 σ_{max} 를 나타내어, -1589 및 -1476 MPa 을 나타내었다. 이것은 전보에서 $\text{SP}_{0.6}$ 과 $\text{SP}_{0.8}$ 의 잔류응력은 각각 깊이 0.05 및 0.042 mm 에서 -1157 및 -808 MPa 이었으며, 이중 쇼트 피닝으로 표면 최대 잔류응력이 얻어졌다. 그리고 DSP의 잔류응력은 각각 432 및 668 MPa 더 크게 얻어졌다. $\text{SP}_{(0.8+0.08)}$ 의 잔류응력이 더 많이 증가한 것은 첫 번째 쇼트 0.8mm 로 더 거칠어진 표면을 쇼트 0.08mm 가 매끄럽게 마무리하였기 때문이다. 또한 DSP 잔류응력은 첫단의 작은 쇼트 볼이 더 큰 잔류응력이 얻어졌다. 이와 같이 큰 압축잔류응력 분포는 무해화균열크기에 영향을 미치게 된다.

Fig. 3은 DSP에 의한 비커스경도 분포를 나타낸

다. non-SP 및 DSP(SP_(0.6+0.08), SP_(0.8+0.08)) 시험편의 표면 직하(깊이 약 0.01 mm)의 경도는 각각 699HV, 884HV 및 836HV이다. non-SP의 경도에 대하여, DSP(SP_(0.6+0.08), SP_(0.8+0.08))의 표면 직하 경도는 각각 185HV 및 137HV 높았다.

3.2 피로한도

Fig. 4는 각 시험편의 S-N 곡선을 나타낸다. non-SP의 피로한도(σ_w)는 827 MPa이지만, DSP(SP_(0.6+0.08) 및 SP_(0.8+0.08))의 σ_w 는 각각 1716 및 1615 MPa로 매우 높다.

non-SP에 대한 DSP(SP_(0.6+0.08), SP_(0.8+0.08))의 σ_w 는 각각 2.07배 및 1.95배 증가하였다. 이와 같이 표면 직하의 경도와 압축 잔류응력을 크게 하는 것이 가능한 DSP는 피로한도 향상에 유효한 방법이다.

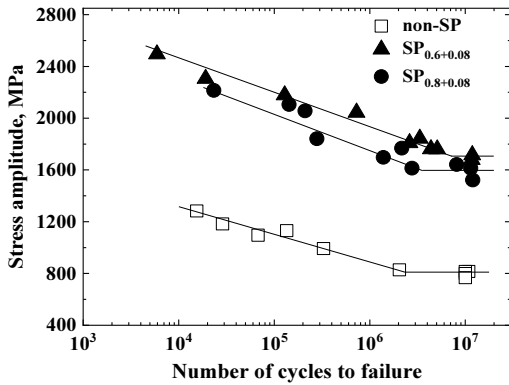


Fig. 4 S-N curves of each specimen

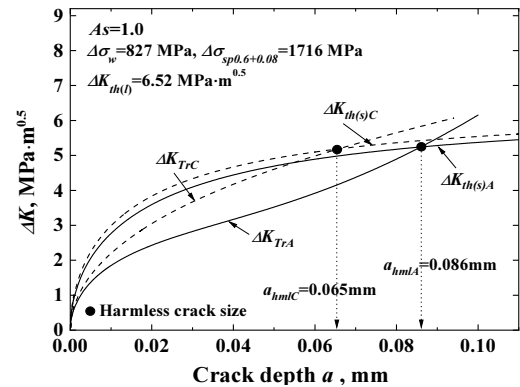
3.3 무해화 균열크기(a_{hmi})

Fig. 5(a),(b)는 SP_(0.6+0.08) 및 SP_(0.8+0.08)의 $As=1.0$ 에 대한 균열 깊이에 따르는 ΔK_{Tr} 과 ΔK_{th} 의 관계를 대표적으로 나타낸다. 균열깊이에 따르는

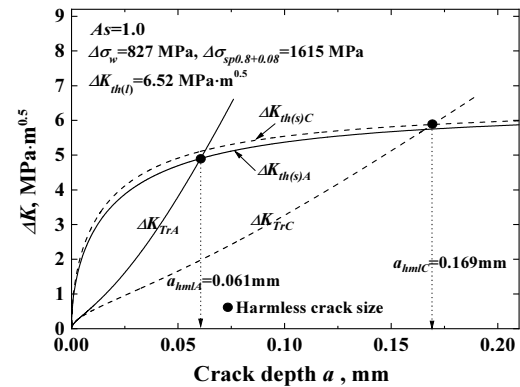
ΔK_{th} 는 유한판의 반타원 표면균열이 응력비 R 의 굽힘응력을 받을 때, non-SP의 피로한도($\Delta\sigma_w$)를 식(1)에 대입하여 평가하였다[11].

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

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



(a)



(b)

Fig. 5 Evaluation of harmless crack size.

(a) SP_(0.6+0.08), (b) SP_(0.8+0.08)

상보정계수이다.

ΔK_{Tr} 은 Newman-Raju 식에 의한 ΔK_{ap} 와 압축 잔류응력 식(2)에 의한 K_r 의 합이다. 여기서 ΔK_{ap} 에 사용한 작용응력은 각 DSP의 피로한도를 사용하였다. 즉, 1716 MPa 및 1615 MPa을 사용하였다. 또한, K_r 의 평가[13]는 Fig. 5에 나타난 $SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$ 의 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 균열의 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.

DSP에 의한 무해화 가능 최대 균열 크기(a_{hml})는 식(3)으로 결정한다. 즉, 균열 깊이와 표면에서 작은 균열 크기를 사용한다. Fig. 5에서 a_{hml} 는 모두 $\Delta K_{th(t)}$ 에 대하여, $\Delta K_{th(s)}$ 와 ΔK_{Tr} 의 교차점을 ●로 나타내었다[14].

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

Table 2는 균열 깊이(A)와 표면(C)의 a_{hml} 이다.

Table 2. Harmless crack size (a_{hml}) of DSP

As	SP _(0.6+0.08)	SP _(0.8+0.08)
1.0	0.065	0.061
0.6	0.059	0.059
0.3	0.054	0.052
0.1	0.050	0.062

DSP($SP_{(0.6+0.08)}$, $SP_{(0.8+0.08)}$)는 $\Delta K_{th(s)}$ 와 ΔK_{Tr} 에서 모두 교점이 있다. 균열 깊이와 표면의 교점에서 균열 크기를 비교하면, 균열 깊이의 균열 크기가 표면보다 작다. 따라서 $SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$ 를 사용한 DSP의 a_{hml} 는 모두 균열 깊이에서 결정되었다. 이것은 DSP 시험편의 a_{hml} 는 표면균열의 크기에 상관없이 오직 균열 깊이에서 결정된다.

한편, $SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$ 의 피로한도 (1716 및 1615 MPa)에 따르는 a_{hml} 를 비교하였다. a_{hml} 는 $SP_{(0.6+0.08)}$ 이 $SP_{(0.8+0.08)}$ 보다 약간 크게 나타났다. 이것은 $SP_{(0.6+0.08)}$ 의 잔류응력이 $SP_{(0.8+0.08)}$ 의 것보다 더 깊게 도입되었기 때문이다. 즉 표면의 잔류응력 크기보다, 깊이 방향의 잔류응력이 a_{hml} 에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 큰 a_{hml} 를 얻기 위해서는 표면의 잔류응력 크기보다 깊이 방향을 더욱 깊게 도입할 필요가 있다.

Fig. 6은 DSP($SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$)에 의한 a_{hml} 의 As 의존성을 나타내었다. $SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$ 의 a_{hml} 는 거의 비슷한 크기가 나타났다. a_{hml} 는 As가 작아짐에 따라서 작아지는 경향이지만, As = 0.1에서 약간 증가하였다. API-RP579는 As = 0.16까지 유효하지만, 본 연구에서는 극단적인 균열형상인 As=0.1까지 거동을 평가하였다.

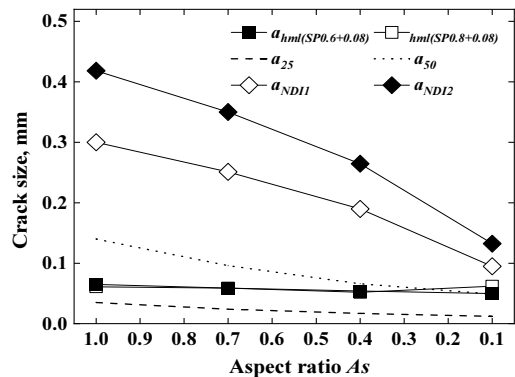


Fig. 6 As dependence on a_{hml} , a_{25} , a_{50} and a_{NDI}

3.4 표면균열 무해화 기술에 의한 DSP한 SCM822H 안전성

Fig. 6은 non-SP의 피로한도가 25% 또는 50% 감소하는 균열 깊이(a_{25} , a_{50}), a_{hml} 및 초음파검사에서 검출 가능한 균열 깊이(a_{NDI1} , a_{NDI2})[17]를 나타내었다. As 가 작아짐에 따라서 a_{25} 및 a_{50} 은 감소하였다. 피로한도 25% 및 50% 감소하는 피로 균열 a_{25} 는 무해화 가능 균열 크기 a_{hml} 보다 아래쪽에 있으므로 DSP로 무해화 가능하다. 그러나 a_{50} 은 $As = 1.0-0.2$ 범위에서 a_{hml} 보다 위쪽에 있어 DSP로 무해화 불가능하지만, $As = 0.1$ 에서 a_{hml} 보다 아래쪽에 있어 DSP로 무해화 가능하다. 초음파검사의 균열 검출 능력(a_{NDI1} , a_{NDI2})은 피로한도 25% 및 50% 감소하는 피로 균열 (a_{25} , a_{50})보다 위쪽에 있으므로 초음파검사로 a_{25} 및 a_{50} 의 균열을 검출할 수 없다. 따라서 검출 불가능한 균열은 고 해상도인 초음파검사 장비를 적용할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 침탄, 담금질-뜨임한 SCM822H강의 피로한도($\Delta\sigma_w$), 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(l)}$) 및 2종류의 DSP($SP_{(0.6+0.08)}$, $SP_{(0.8+0.08)}$)에 의한 잔류응력 분포를 사용하여, a_{hml} 의 As 의존성을 평가하였다. 또한, a_{hml} , non-SP의 피로한도를 25% 또는 50% 감소시키는 균열 깊이 (a_{25} , a_{50}) 및 초음파검사로 피로한도를 감소시키는 균열(a_{NDI1} , a_{NDI2})의 관계에서 신뢰성을 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) non-SP의 표면 압축 잔류응력은 -192 MPa이지만, DSP($SP_{(0.6+0.08)}$, $SP_{(0.8+0.08)}$)는 각각

표면에서 -1589 및 -1476 MPa이었다. 이것은 $SP_{0.6}$ 과 $SP_{0.8}$ 의 최대 잔류응력-1157 및 -808 MPa보다 각각 432 및 668 MPa 더 크게 얻어졌다. DSP의 잔류응력이 더 많이 증가한 것은 첫 번째 쇼트(0.6, 0.8mm)로 더 거칠어진 표면을 두 번째 쇼트 (0.08 mm)가 매끄럽게 마무리하였기 때문이다.

- (2) 잔류응력은 ($SP_{(0.6+0.08)}$)이 더 크고, 깊이 방향으로 깊게 얻어졌다. non-SP 및 DSP($SP_{(0.6+0.08)}$, $SP_{(0.8+0.08)}$)의 표면 직하(깊이 약 0.01 mm)의 경도는 각각 699HV, 884HV 및 836HV이다. non-SP의 경도에 대하여, DSP($SP_{(0.6+0.08)}$, $SP_{(0.8+0.08)}$)의 표면 직하 경도는 각각 185 HV 및 137HV 높았다.
- (3) non-SP의 피로한도는 827 MPa이지만, DSP($SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$)는 각각 1716 및 1615 MPa로 매우 높게 나타났다. 즉, 각각 2.07배 및 1.95배 증가하였다.
- (4) $SP_{(0.6+0.08)}$ 및 $SP_{(0.8+0.08)}$ 를 사용한 DSP의 a_{hml} 는 모두 균열 깊이에서 결정되었다. 이것은 DSP 시험편의 a_{hml} 는 표면균열의 크기에 상관없이 오직 균열 깊이에서 결정된다.
- (5) $SP_{(0.6+0.08)}$ 의 a_{hml} 은 $SP_{(0.8+0.08)}$ 보다 약간 크게 나타났다. 이것은 $SP_{(0.6+0.08)}$ 의 잔류응력이 $SP_{(0.8+0.08)}$ 의 것보다 더 깊게 도입되었기 때문이다. 즉 표면의 잔류응력 크기보다, 깊이 방향의 잔류응력이 a_{hml} 에 더 큰 영향을 미친다. 따라서 큰 a_{hml} 를 얻기 위해서는 표면의 잔류응력 크기보다 깊이 방향을 더욱 깊게 도입할 필요가 있다.
- (6) SCM822H 강 of 피로강도 향상과 표면결함 무해화에 기여하는 주요 요인은 DSP로 인한 압축잔류응력의 크기이다. 따라서 DSP는 SCM822H 강 of 안전성 및 신뢰성을 향상시키는 데 매우 효과적이다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2023)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] Y. Murakami, "Metal fatigue Effects of Micro Defects and Inclusions," Yokendo, pp. 7-9., (1993).
- [2] H. Ishigami, K. Matsui, Y. Jin, K. Ando, "A study on stress, reflection and double shot peening to increase compressive residual stress," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 23, pp. 959-963, (2008).
- [3] G. Ongtrakulkij, A. Khantachawana, J. Kajomchaiyakul, K. Kondoh, "Effects of the secondary shot in the double shot peening process on the residual compressive stress distribution of Ti-6Al-4V," *Heliyon*, vol. 8, Article No. e08758, (2002).
- [4] P. Quang Trung, N. Win Khun, D. L. Butler, "Effects of shot peening pressure, media type and double shot peening on the microstructure, mechanical and tribological properties of low-alloy steel," *Surface Topography: Metrology and Properties*, vol. 4, Article No. 045001, (2016).
- [5] S. Devanand, A. Senthil Kumar, R. Selvabharathi, "Influence of Severe Double-Shot Peening and Plasma Spray Arc TiAlCr /AlCrSi Coating on Tribological Behaviour of Pure Aluminium Alloy," *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 32, pp. 4729-4742, (2022).
- [6] H. Okada, A. Tange, K. Tango, K. Ando, "Effect of pre-stress on stress shot peening," *JSME A*, vol. 70, pp. 647-653, (2004).
- [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. 239-245, (2022).
- [8] G. H. 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).
- [9] J. K. Park, K. H. Shin, B. C. Choi, I. D. Park, K. W. Nam, "Evaluation of Harmless Crack Size according to Residual Stress Depth of Induction Hardened SCM440 Steel," *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 26, pp. 571-576, (2023).
- [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] 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).
- [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).
- [14] 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, No. 2, pp. 241-247, (2022).
- [15] 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).