

## 유도경화한 SCM440 강의 잔류응력 깊이에 따르는 무해화 균열 크기 평가

### Evaluation of Harmless Crack Size according to Residual Stress Depth of Induction Hardened SCM440 Steel

박종규<sup>1</sup>, 신기항<sup>1</sup>, 최병철<sup>2</sup>, 박인덕<sup>3</sup>, 남기우<sup>1\*</sup>

Jong-Kyu Park<sup>1</sup>, Ki-Hang Shin<sup>1</sup>, Byoung-Chul Choi<sup>2</sup>, In-Duck Park<sup>3</sup>, Ki-Woo Nam<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this study, the harmless crack size( $a_{hml}$ ) according to the residual stress depth was evaluated using the fatigue limit of SCM440 steel by quenching-tempering(QT) and induction hardening(IH), and threshold stress intensity factor of QT steel. Because the residual stress increased rapidly as the crack depth increased,  $a_{hml}$  was determined at the depth of all the crack aspect ratio( $As$ ) regardless of Type I-III, and  $a_{hml}$  also increased according to the residual stress depth.  $a_{hml}$  was minimal at  $As=1.0$  and maximal at  $As=0.1$ , but was almost similar on each Type.  $a_{hml}$  was small the dependence on  $As$ .

*Keywords : Harmless Crack Size, Induction Hardening, Residual Stress, Shot Peening*

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

1 부경대학교 재료공, 대학원생

2 한국폴리텍대학 석유화학공정기술교육원 석유화학공정과  
교수

3 한국기계연구원, 부산기계기술연구센터, 책임연구원

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

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

2 Professor, Department of Energy and Chemical Process, Petro  
Chemical Training Center of Korea Polytechnics

3 Principal Researcher, Busan Machinery Researcher Center,  
KIMM

## 1. 서론

기계 구조물의 수명은 부하 응력의 형태 및 크기, 환경, 재료 및 열처리 등에 의하여 영향을 많이 받는다. 특히 열처리는 처리방법에 따라서 조직이 달라지고, 인장강도 및 피로강도가 달라진다. 금속재료는 표면층에 많은 결함을 가지므로 피로 하중에 의하여 균열이 진전하여 파괴한다. 유도경화재, 침탄담금질재 및 질화처리재 등의 수명은 경화층의 깊이(두께), 부하응력의 크기, 표면 및 표면 근방에 존재하고 있는 잔류응력 등의 차이에 따라 다르다. 이 방법들은 경화층의 깊이, 부하응력의 크기 등에 의해 균열 발생기점이 표면 또는 내부가 될 수 있다. 반복 부하응력이 큰 경우는 균열 발생기점이 표면이지만, 작은 경우는 균열 발생기점이 내부가 fish eye 기구로 파괴한다[1].

최근 피닝으로 표면에 생성된 압축 잔류응력은 표면균열을 무해화할 수 있다는 연구 보고가 있다 [2-8]. Takahashi 등은 SUP9A에 SP하여 0.2 mm 미만의 깊이를 갖는 반원형 표면 결함을 무해하게 할 수 있었다[2]. STS316L[3]과 DNV F690[4]에 초음파 니들 피닝하여 각각 0.3 mm 및 0.8 mm 미만의 깊이를 가진 반원형 표면 결함을 무해하게 할 수 있었다. 박 등[5]은 A6061-T6에 쇼트 피닝하여 0.2 mm 미만인 반원형 표면 결함을 무해하게 할 수 있었다. 김 등[6] 및 이 등[7]은 초음파 나노 결정 표면 개질된 SKD61 및 SCM435의 압축잔류응력을 이용하여, 균열 형상비에 따르는 균열 무해화 크기를 평가하였다. 그러나 금속재료의 피로강도에 대한 유도경화의 영향은 연구되었으나 [8-10], 유도경화에 의해 무해하게 될 수 있는 결함 크기에 관한 연구는 없다.

본 연구에서는 조질처리(Quenching-Tempering: QT) 및 유도경화(Induction Hardening: IH)한 SCM440강의 피로한도 및 QT강의 하한계 응력확

대계수를 사용하여 잔류응력 깊이에 따르는 무해화 균열 크기( $a_{hml}$ )를 평가하였다.

## 2. 재료 및 평가방법

### 2.1 재료 및 평가 시험편 형상

본 연구에 사용된 재료는 기어 및 샤프트 제조에 널리 사용되는 상용 SCM440강 (KS D3711)이다. Table 1과 Table 2는 모재의 화학적 성분 및 기계적 특성을 나타낸다.

QT는 모재를 880 °C에서 2시간 유지 후, 공냉하는 노멀라이징하고, 850 °C에서 1시간 유지 후 유냉하고, 580 °C에서 2시간 처리 후 공냉하였다. 그 후 IH시험편은 QT 강을 주파수 50 kHz, 전압 230 V, 전류 325 A, 이송속도 23 mm/sec로 순간 온도 약 900 °C에서 수냉하고, 150 °C에서 1시간 공냉하였다.

Table 1. The mechanical properties of SCM440 steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
483	657	26

Table 2. Chemical compositions of SCM440 steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.4	0.2	0.77	0.12	0.13	0.07	1.03	0.18	0.11

무해화 균열 크기( $a_{hml}$ ) 평가 시험편은 Fig. 1과 같이 시험편의 중앙에 반타원형 표면균열을 방전가공(Electric Discharge Machining; EDM)으로 도입한 것으로 가정하였다. 여기서  $c$ 와  $a$ 는 각각

표면 균열 절반 및 깊이를 나타낸다. 균열 형상비 (Aspect ratio;  $As$ )는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1이다.

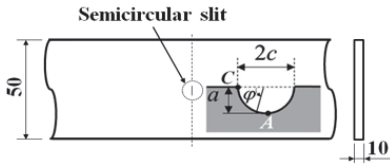


Fig. 1 Shape of surface crack by EDM

## 2.2 피로한도

피로한도는 길이 200 mm × 직경 20 mm의 시험편으로 100 kN의 피로시험기(MTS 370.10)를 사용하여, 응력비  $R=0$ , 반복수  $f=10\text{Hz}$ , 실온 대기 중에서  $2 \times 10^6$  cycle의 수명을 피로한도로 하였다. 얻어진 피로한도는 Fig. 2와 같이 각각  $\sigma_{QT} = 536$  MPa 및  $\sigma_{IH} = 727$  MPa이다. 하한계 응력확대 계수( $K_{th(l)}$ )는 QT시험편의 비커스경도가 350 HV이므로, 많은 연구자의 결과[11-14]에서  $K_{th(l)} = 7.78 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 로 결정하였다.

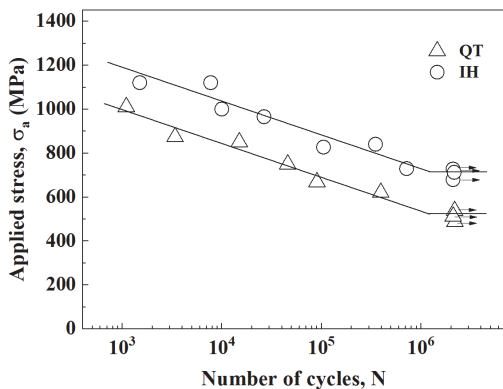


Fig. 2 Fatigue limit of QT specimen and IH specimen

## 2.3 잔류응력 분포

잔류응력은 Fig. 3과 같이 쇼트 피닝한 시험편에서 측정된 Type II와 잔류응력의 깊이가 무해화 균열 크기에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2종류(Type I, Type II)를 가정하였다. 즉, 표면 압축 잔류응력은  $\sigma_s = -882$  MPa로 같지만, 압축 잔류응력이 0가 되는 깊이는 각각 0.825 mm(Type I), 1.3 mm(Type II), 1.6 mm(Type III)로 하였다.

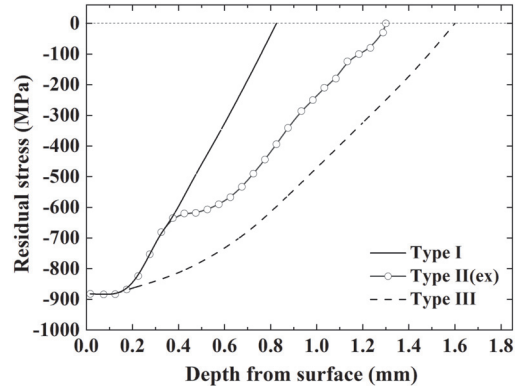


Fig. 3 Residual stress of three types

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 무해화 균열 크기( $a_{hml}$ )를 평가한 것으로, 응력확대계수와 균열 깊이( $a$ )의 관계를 나타낸다. (a), (b), (c) 및 (d)는 각각  $As=1.0, 0.6, 0.3$  및 0.1의 결과이다.

미소 균열의 하한계 응력확대계수( $K_{th}$ )는 균열 크기 의존성을 나타낸다. 균열 길이 의존성을 나타내는  $K_{th}$  식은 Ando 등이 제안한 식(1)을 사용하였다[15].

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

여기서  $a$ 는 균열 깊이, QT시험편의 피로한도는  $\sigma_{QT} = 536 \text{ MPa}$ 을 적용하였다.  $K_{th(l)}$ 은 긴 균열의 하한계 응력확대계수로  $K_{th(l)} = 7.78 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 을 사용하였다. IH시험편에서 무해화 균열 조건은 식(2)로 나타낸다.

$$K_{Tr} = K_{ap} + K_r \leq K_{th} \quad (2)$$

여기서  $K_{ap}$ 는 Newman-Raju 식을 사용하여 평가

하는 최대 반복응력( $\sigma_{IH} = 727 \text{ MPa}$ )의 응력확대계수[16],  $K_r$ 은 API-RP579[17]에 4차다항식으로 나타내는 표면균열의 응력확대계수 평가식을 사용하는 압축 잔류응력에 의한 응력확대계수,  $K_{th}$ 는 미소 균열의 하한계 응력확대계수이다.

표면균열은 식 (2)에서 피로응력을 받는 구조물의 유무해를 평가할 수 있다. 즉,  $K_{Tr}$ 이  $K_{th}$ 보다 작으면 균열은 무해하다고 평가할 수 있다. 따라서  $K_{Tr}$ 과  $K_{th}$ 의 교점에서  $a_{hml}$ 을 결정할 수 있다.

Fig. 4에서  $K_{Tr(A)}$  및  $K_{Tr(C)}$ 는 각각 균열의 가장 깊은 부분 및 표면 부분의  $K_{Tr}$ 을 나타낸다. 실선 및 점선은 각각 균열 깊이 및 표면의  $K_{th}$

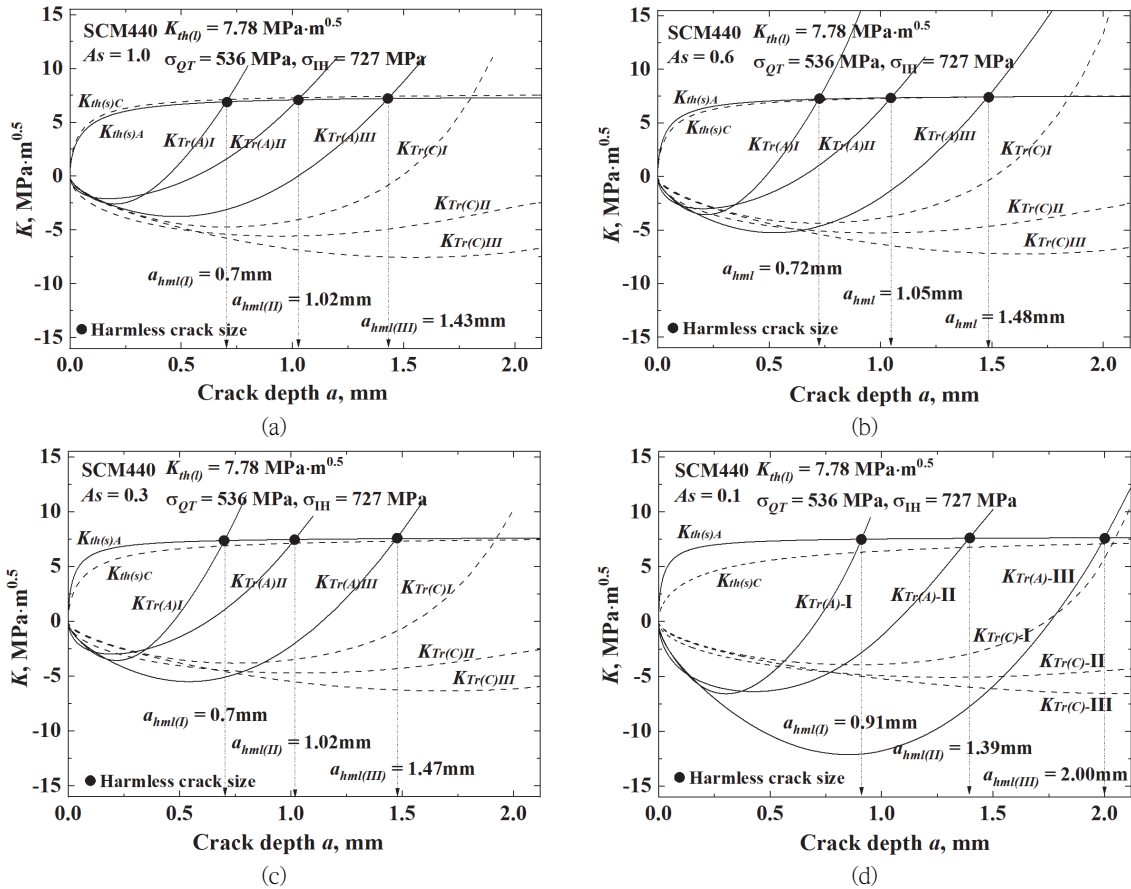


Fig. 4 Evaluation of  $a_{hml}$  by IH based on QT. (a)  $As=1.0$ , (b)  $As=0.6$ , (c)  $As=0.3$ , (d)  $As=0.1$

및  $K_{T_r}$ 을 나타낸다. (a), (b), (c) 및 (d)에서 균열 깊이는 3종류의 잔류응력에서 교점이 있으나, 균열 표면은 Type I만 교점이 있고, Type II 및 III는 교점이 없다. 각 그림에서 교점이 무해화 균열 크기( $a_{hml}$ )이다. Type I은 깊이와 표면에서 교점이 있으나,  $a_{hml}$ 는 둘 중에 작은 크기를 결정하므로, 균열 깊이가  $a_{hml}$ 이 된다. 그러나 Type II 및 III의 균열 표면은 교점이 없다. 이것은 표면의 압축 잔류응력이 커서 균열 진전이 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 이와 같이 균열 깊이에서  $a_{hml}$ 이 결정되는 것은 압축 잔류응력 분포가 표면에서는 항상 표면의 잔류응력( $\sigma_{r,s}$ )이 작용하고, 깊이는 깊어질수록 잔류응력이 급증하기 때문이다. Fig. 4에서 표면의 잔류응력은 같지만, 깊이가 깊어지면, 무해화 균열 크기가 길어지는 것을 알 수 있다. 따라서 피닝으로 잔류응력의 깊이를 크게 하는 것이 무해화할 수 있는 균열 크기가 크게 된다.

Fig. 5는 잔류응력 Type I-III에 따르는  $a_{hml}$ 을 나타낸 것이다.  $a_{hml}$ 은 잔류응력에 상관없이  $As=1.0-0.3$ 에서 거의 비슷하였다. 그러나  $As=0.1$ 은 크게 나타났다. API-RP579의 적용 범위는  $As=1.0-0.16$ 이지만,  $As=0.1$ 을 평가하였다. 한편

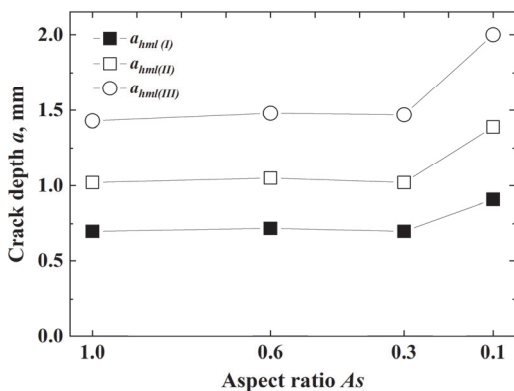


Fig. 5 Evaluation of  $a_{hml}$  according to residual stress of Type I-III

$a_{hml}$ 은 잔류응력의 깊이가 깊어질수록 커진다는 것을 알 수 있었다. 따라서 구조물의 안전성 측면에서는 피닝에 의한 표면의 잔류응력을 크게 하는 것보다 깊게 도입하는 것이 더 유용한 것으로 판단한다. 즉, 피닝으로 잔류응력의 깊이를 크게 하는 것이 무해화할 수 있는 균열 크기가 크게 된다.

#### 4. 결론

본 연구는 변동 응력에 대한 유지 보수에 합리화와 신뢰성 향상을 목적으로 IH에 의한 표면의 압축 잔류응력은 같지만, 깊이가 다른 3종류를 가정하여 SCM440강에 표면균열 무해화 기술을 적용하였다. 즉, 무해화 균열 크기( $a_{hml}$ )의 압축 잔류응력 깊이 의존성을 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 균열 깊이는 깊을수록 잔류응력이 급증하기 때문에, 균열 무해화는 Type I-III에 상관없이 모든  $As$ 에 대하여 깊이에서 결정되었고, 잔류응력 깊이에 따라서 무해화 균열 크기가 다르게 나타났다.
- (2)  $a_{hml}$ 은 0.70~0.91 mm(Type I), 1.02~1.39 mm(Type II) 및 1.43~2.00 mm(Type III)이고, 이 값은 긴 균열의  $K_{th(I)}$ 로 평가 가능하였다.
- (3)  $a_{hml}$ 은  $As=1.0$ 에서 최소이고,  $As=0.1$ 에서 최대이지만, 각 Type에서 거의 비슷하고, 일정한  $a_{hml}$ 으로 균열형상비( $As$ )의 의존성이 작다.

## 참고문헌

- [1] S. Fujiki, "How to View Fatigue Strength and Fracture/Fracture Surface of Surface-Hardened Steel - Understanding from 50 Examples (Japanese)," Nikkan Kogyo Shimbum, (2008).
- [2] K. Takahashi, T. Amano, K. Ando, F. Takahashi, F., "Improvement of Fatigue Limit by Shot Peening for High-Strength Steel Containing a Crack-Like Surface Defect," International Journal of Structural Integrity, vol. 2, pp. 281-292, (2011).
- [3] K. W. Nam, M. H. Kim, K. H. Gu, C. Y. Park, C. Y., "Rendered Harmless of Surface Crack with Different Crack Aspect Ratio in Ultrasonic Peened STS316L Steel," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, vol. 45, pp. 629-635, (2021).
- [4] M. H. Kim, W. G. Lee, C. S. Kim, K. Takahashi, M. Handa, K. W. Nam, "Evaluation of Fatigue Limit and Harmless Crack Size of Needle Peened Offshore Structure Steel F690," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 35, pp. 3855-3862, (2021).
- [5] S. H. Park, K. H. Gu, G. H. Lee, K. W. Nam, K. W., "Evaluation of Harmless Crack Size of A6061-T6 for EV Battery Pack Case," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, vol. 47, pp. 417-425, (2023).
- [6] J. H. Kim, S. H. Yun, K. W. Nam, 2022, "Peculiar Fatigue Fracture Behavior of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modified SCM435," Journal of The Korean Society of Industry Convergence, vol. 25, pp. 241-247, (2022).
- [7] 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).
- [8] L. Bertini, V. Fontanari, "Fatigue behaviour of induction hardened notched components," International Journal of Fatigue, vol. 21, pp. 611-617, (1999).
- [9] R. Fajkoš, R. Zima, B. Strnad, "Fatigue limit of induction hardened railway axles," vol. 38, pp. 1255-1264, (2015).
- [10] Y. Hu, Q. Qin, S. Wu, X. Zhao, W. Wang, "Fatigue resistance and remaining life assessment of induction-hardened S38C steel railway axles," International Journal of Fatigue, vol. 144, Article No. 106068, (2021).
- [11] 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)," Transactions of JSSE, vol. 59, pp. 13-18, (2014).
- [12] H. Koyama, R. Kitamura, A. Tange, "Fatigue Crack Propagation of Spring Steels," Japan Society of Spring Engineers, vol. 29, pp. 30-37, (1984).
- [13] Y. Kitsunai, "Effect of Microstructure on Fatigue Crack Growth Behavior of Carbon Steels," The Society of Materials Science of Japan, vol. 29, pp. 1018-1023, (1980).
- [14] Y. Kitsunai, Y., "Effect of Microstructure on Fatigue Crack Growth Mechanisms in High Strength Steel (Relationship between Crack Growth Rate and Prior Austenite Grain Size)," The Society of Materials Science of Japan, vol. 29, pp. 795-800, (1980).
- [15] K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui, K. Takahashi, "A study on the unification of the threshold stress intensity factor for micro crack growth," Transactions of JSSE, vol. 64, pp. 39-44, (2019).
- [16] J. C. Newman Jr., I. S. Raju, I. S., "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack," Engineering Fracture Mechanics, vol. 15, pp. 185-192, (1981).
- [17] API Recommended Practice 579, "Fitness for Service," American Petroleum Institute, Washington, D.C., USA, (2000).