

자동차 에어 브레이크 스프링 고정용 SCM435 볼트의 파손 해석

Failure Analysis of SCM435 Bolt for Fixing Automotive Air Brake Spring

윤서현¹, 김민현¹, 남기우^{2*}

Seo-Hyun Yun¹, Min-Heon Kim¹, Ki-Woo Nam^{2*}

〈Abstract〉

This study analyzed the causes of failure of SCM435 bolts that fix the springs of automobile air brakes that have been fractured during use. The cause of failure was analyzed using SEM, EDS, metallogical microscope and Vickers hardness tester. In the fracture, the ratchet mark began at the outer boundary of crack origin, and the grains at crack origin were found to have clear intergranular corrosion. One SCM435 bolt was subjected to a stress of 398 MPa, it's a stress of about 80% of the fatigue limit. As a result of such a large applied stress, cracks occurred at the corrosion origin and were fractured. In order to prevent the SCM435 bolt from fracture, it is necessary to use the correct composition, the accuracy of heat treatment, preventing damage by external impact, preventing corrosion of the damage part by moisture, and introduction a compressive residual stress by peening.

Keywords : SCM435 Bolt, Automotive Air Brack, Failure Analysis, Fatigue Limit

1 정회원, 부경대학교 마린융합디자인협동, 대학원생

2* 정회원, 부경대학교 재료공학과, 교수

E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 Interdisciplinary Program of Marine Convergence Design,
Pukyong National University

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

1. 서론

볼트 너트 연결부는 가장 중요한 재료 결합 기술 중 하나이다. 항공 우주, 자동차, 기계, 토목 및 건축을 포함한 다양한 공학 분야에서 널리 사용된다. 구조물의 안전성을 보장하기 위해서, 풀림 방지 성능뿐만 아니라 높은 피로 강도가 요구된다. 대부분의 연구는 새로 개발 된 볼트 너트 연결의 풀림 방지 성능에 중점을 두었다.[1-4]. Yakushev[5]는 나사의 피로 강도에 대한 제조 기술의 영향을 연구하였다. 그는 깎은 나사와 연마한 나사에 비하여 롤링 나사가 피로 강도를 크게 향상시킨다고 하였다. Suzuki 등. 및 Kawano et al.[6,7]는 탄소성 영역에서 체결된 볼트 조인트의 피로 특성을 보고하였다.

Boyd and Hyler[8]는 아연도금이 응력 부식 균열 (Stress Corrosion Cracking; SCC) 및 수소 취성 (Hydrogen Embrittlement; HE)에 대한 볼트 저항을 크게 감소시키는 방법을 보여주었다. Townsend[9]는 AISI-4140 강철봉의 HE에 대한 경도의 영향을 분석하고, 허용 기준은 약 350HV로 결정하였다. 다른 연구자들[10-15]은 균열 발생 및 전파의 미세기구와 이러한 현상을 설명하는 과정뿐만 아니라, 기본적으로 액체 금속 취성, 퀴칭 균열 및 수소 유기 균열과 같은 것을 분석하였다.

SCM435는 고강도 및 고경도 특성을 가진 CrMo 강으로 기계 부품, 샤프트, 기어 및 강도 나사 제품에 널리 사용된다.[16-18] 그러나, 이 재료는 종종 고온 템퍼링 및 퀴칭에서 취성이 발생하는 등 신뢰성이 낮다.

본 연구는 사용 도중에 파괴한 자동차 에어브레이크의 스프링 고정용 SCM435 볼트의 파손 원인을 규명하고, 방지법을 제시하였다. 파손 원인은 SEM, EDS, 금속현미경 및 비커스경도기 등

을 이용하여 파악하고, SCM435 균열재의 피로 수명을 예측하여 파손 원인과 작용 응력 상태를 비교하였다.

2. 손상 재료 및 해석 방법

본 연구에 사용한 손상재료는 대형 트럭의 에어브레이크의 스프링을 고정하는 SCM435 볼트(M10)이다. 볼트는 스프링의 진동에 의하여 반복 하중을 받는 구조로 되어 있다. Fig. 1은 에어브레이크와 스프링을 연결하는 고정 볼트(원 부분)를 나타낸다. Fig. 2는 파손된 볼트 외관을 나타낸다.

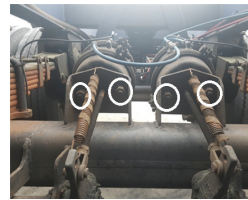


Fig. 1 Bolt connecting the air brake and spring



Fig. 2 Appearance of failure bolt

본 실험에 사용된 SCM435의 파단면은 주사전 현미경(Scanning Electron Microscope : SEM, S-2400, HiTachi, Japan)을 사용하여 확인하였으며, 파괴기점의 제2상 및 환경의 영향을 확인하기 위해 에너지분산형 분광분석법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDS, Kevex Ltd., Sigma)로 분석하였다. 모재와 파손재는 경면연마하고, 초음파세척을 실시한 후, 나이탈 5%용액으로 에칭하였다. 조직은 금속현미경으로 관찰하고, 경도는 비커스 경도시험기(HV-114, Mitutoyo)로 측정하였다. 비커스 경도는 압입 하중 2kg, 압입 시간은 6초로 20회 측정하였다. 비커스 경도는 웨이블 해

석에 의하여 모재와 손상재의 특성을 분석하였다. 손상재의 피로한도는 등가균열길이를 사용하여 평가하였다.[19]

3. 결과 및 고찰

3.1 파단면 관찰

Fig. 3은 SEM에 의한 파단면의 외관 관찰한 것이다. 파면의 외주부는 균열 발생 기점으로 추측되는 부분에 많은 래칫 마크가 관찰되었다. 래칫 마크는 파단면 외주부에서 작은 계단과 같은 형상을 나타내며, 균열이 내부로 진전하면서 없어진다. 피로 파괴의 특성을 나타내는 비치마크는 관찰할 수 없었고, 그림의 흰 화살표는 균열 진전 방향을 나타낸다.

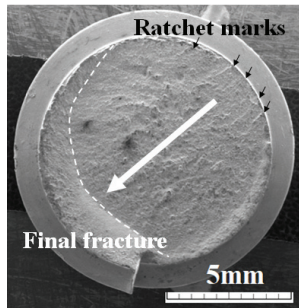


Fig. 3 Appearance of fracture surface

Fig. 4는 파단면 외주의 부식 부분을 확대한 것이다. 외주는 부식에 의하여 결함이 발생하고, 작용 응력에 의하여 균열이 진전한 것으로 판단된다. 래칫 마크는 부식 부분부터 형성되어 있다. 부식 부분은 입계 부식에 의하여 (a) 결정입자가 선명하게 나타나 있으며, (b) 움푹 패인 곳도 관찰되었다. 또한 부식 부분에서는 검은 점들이 관

찰되었다. 입계부식은 입계의 불순물, 입계 영역에서 합금 원소 중 어느 하나가 과하게 많거나 현저하게 감소한 경우에 발생한다. 18-8 스테인리스강은 500~800°C에 장시간 노출되면 $Cr_{23}C_6$ 가 생성되어 입계부식이 발생한다. 두랄루민은 $CuAl_2$ 의 석출에 의하여 입계 부식이 발생한다. 본 연구에 사용된 SCM435 볼트는 Cr을 함유하고 있으므로, 제조 시 Cr 양에 의하여 주행 중 빗물 등 Cl^- 을 함유한 수분과 접촉하여 입계 부식이 발생한 것으로 판단된다. 이것을 방지하기 위하여 고온고용화 처리와 급냉, 탄소보다 더 강력한 화합물을 형성하는 안정제(Ti, Cb, Nb, Ta 등) 첨가, 탄소량을 0.03% 이내로 할 필요가 있다.

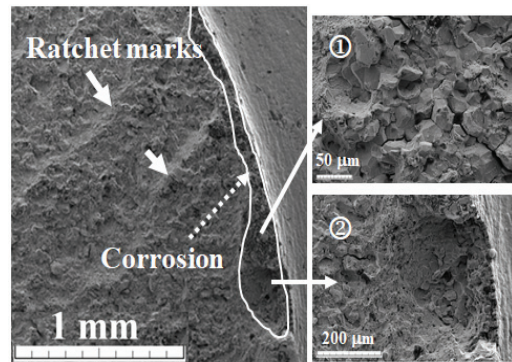


Fig. 4 Enlargement of the corrosion part of the outer circumference

3.2 파손부의 EDS 분석

Fig. 5(a), (b)는 각각 Fig. 4①, ②에서 검게 보이는 부분을 EDS 분석한 것이다. (a)는 입계부식에 의하여 결정입자가 선명한 부분이고, (b)는 움푹 패인 부분이다. 이들 원소를 무게비 및 원소비로 나타낸 것이 Table 2, 3이다. (a)는 Cr이 SCM435 성분보다 많이 검출되었으며, Zn이 나타났다. (b)는 화학성분에 없는 많은 원소가 발견되

었다. 특히 Zn이 Fe와 비슷하게 검출되었다. 본 연구에 사용된 손상 볼트는 대형 트럭 바퀴의 에어브레이크 스프링을 고정하는 것이므로 외부에 많이 노출되어 있다. 따라서 수분에 의한 침식이나, 주변 금속들과의 마찰 등에 의해서 환경적인 영향을 받았을 수 있다.[20,21] 또한, 볼트 제작 시에 함유된 불순물 또는 개재물질 가능성도 있으며, 미량의 것은 파괴 후의 방치에 의한 것일 수도 있다.

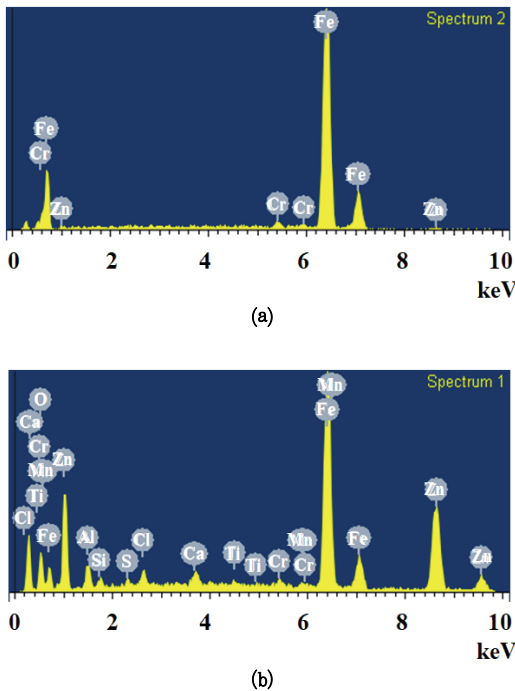


Fig. 5 Results of EDS analysis. (a) Part of Fig. 4①. (b) Part of Fig. 4②

Table 1. Elements of the part of Fig. 4①

Element	Weight%	Atomic%
Cr K	1.67	1.79
Fe K	97.09	97.14
Zn K	1.24	1.06
Total	100.00	

Table 2. Elements of the part of Fig. 4②

Element	Weight%	Atomic%
O K	7.22	21.65
Al K	2.43	4.33
Si K	0.76	1.29
S K	0.39	0.58
Cl K	1.06	1.44
Ca K	0.92	1.10
Ti K	0.34	0.34
Cr K	0.46	0.42
Mn K	0.52	0.46
Fe K	42.68	36.67
Zn K	43.22	31.73
Total	100.00	

3.3 조직 관찰

Fig. 6은 SCM435 볼트의 (a) 모재시험편 및 (b) 손상시험편의 금속현미경 조직사진을 각각 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 거의 비슷한 조직을 나타내었다. 이것은 높은 강도와 인성을 얻기 위하여, 담금질 열처리한 베이나이트 조직이다.

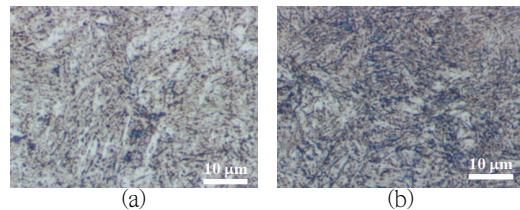


Fig. 6 Metallurgical structure, (a) As-received specimen, (b) Damaged specimen

3.4 경도 분포

Fig. 7은 모재시험편과 손상시험편의 비커스경도를 나타낸다. 손상시험편의 평균경도(HV465)는

모재시험편의 평균경도(HV486)보다 약 4.3% 작았으며, 이는 오차범위인 것으로 판단된다. 그리고 비커스경도는 재료에 따라서 일정한 값이 아니라, 변동이 많은 것을 알 수 있다. 이와 같이 변동하는 비커스경도는 최악 링크 가설을 고려하여, 2-파라미터 와이블 분포를 적용하여 통계 해석을 실시하였다.

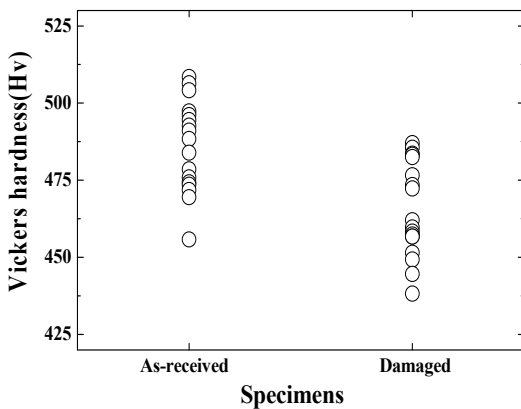


Fig. 7 Relationship between Vickers hardness and specimens.

경도 및 파괴 인성에서 확률P를 나타내는 누적 분포 함수는 다음 식(1)로 표현된다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

여기서 P는 비커스경도 및 파괴인성의 확률, α 와 β 는 각각 형상계수와 척도계수이다. x는 비커스경도 및 파괴인성이다. 척도계수 β 는 63.2%의 시험편에서 비커스경도 및 파괴인성을 나타내며, α 는 경도 및 파괴인성의 분산을 나타내 계수이다. α 가 클수록 경도의 특성변화가 작고 재료가 균일함을 나타낸다.

Fig. 8은 모재시험편과 손상시험편에 대한 비커스 경도를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 비커

스 경도는 와이블 확률지에 직선 관계를 나타내었다. 비커스 경도에 대한 해석 결과를 Table 3에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다. 모재 시험편의 척도 파라미터는 492.6로 나타났으나, 손상시험편은 피로에 의한 열화로 약 4.4% 작은 471.1로 나타났다. 형상 파라미터는 모재 시험편 38.9, 손상시험편 33.6을 나타내었다. 그러나 변동계수는 형상파라미터와 반대의 경향을 나타내어 분산이 많음을 알 수 있다. 즉, 모재시험편은 0.0303이고, 손상시험편은 0.0357로 나타났다.

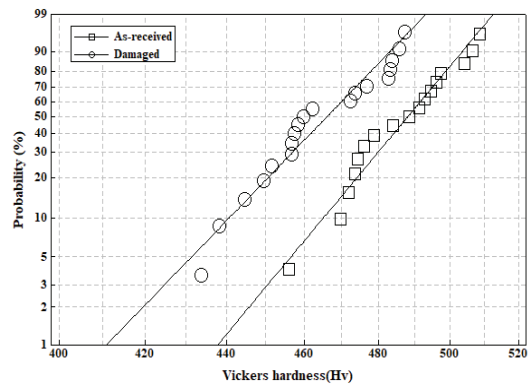


Fig. 8 Weibull probability of Vickers hardness

Table 3. Statistical analysis of Vickers hardness from as-received specimen and damaged specimen

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Std/Mean/COV
As-received	38.9	492.6	14.72/486.0/0.0303
Damaged	33.6	471.1	16.56/463.8/0.0357

3.4 파단 응력

본 연구 사용한 대형 트럭 에어브레이크의 스

프링을 고정한 SCM435 볼트는 집중하중을 받는 외팔보로 가정하였다. 따라서 볼트는 굽힘 응력을 받는다. 외팔보의 굽힘 응력은 다음 식(2)로 구한다.

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

여기서 M 은 굽힘모멘트, Z 는 단면계수이다. 볼트는 원형으로 판단하였다. 스프링을 고정한 SCM435 볼트는 작용 하중 $P=83\text{ kN}$, 길이 $L=30\text{ mm}$, 직경 $d=10\text{ mm}$ 이다. 따라서 굽힘응력은 $\sigma=2,598\text{ MPa}$ 가 된다. 굽힘 응력은 에어브레이크 스프링을 고정한 볼트 8개, 바퀴 및 하부 프레임 8개에 작용한다. 따라서 볼트 한 개가 받는 응력은 $\sigma=398\text{ MPa}$ 이 된다. Takaki[22] 및 Suh[23] 등이 연구한 SCM435강의 피로한도는 미질화재 440 MPa, 질화재 540~580 MPa, 열처리재 500 MPa이었다.

3.5 표면균열재의 피로 한도

굽힘 응력을 받는 유한판에 표면균열이 존재하는 경우, 균열재의 피로한도(σ_{wc}^R)는 등가 균열길이 사용하여 식(3)으로 구한다.[19]

$$c_e \left\{ \sec \left(\frac{\pi \Delta \sigma_{wc}^R}{2 \Delta \sigma_w^R} \right) - 1 \right\} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\Delta \sigma_w^R} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 σ_w^R 은 평활재 피로한도, $\Delta K_{th(l)}^R$ 는 무한판에 매우 긴 관통균열 $2c_0$ 가 존재하는 경우의 하한계응력확대계수이다. c_e 는 등가균열길이로 $\sqrt{c_e} = \beta \sqrt{a}$ 로 나타낸다. a 는 표면균열 깊이이다.

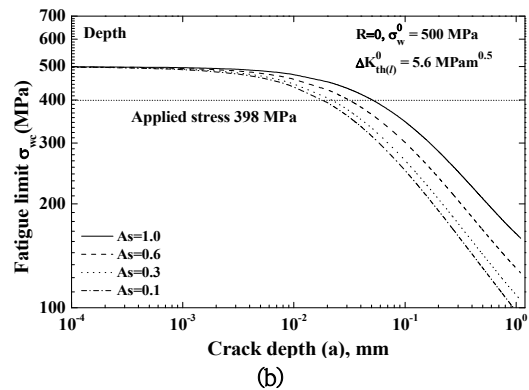
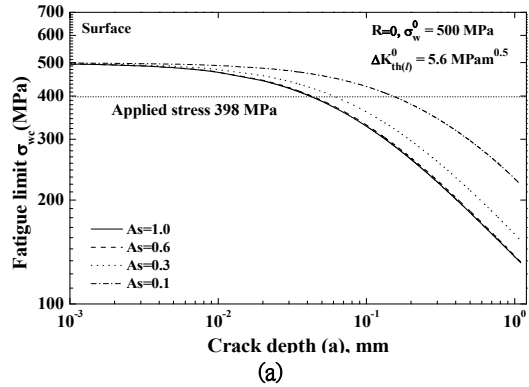


Fig. 9 Relationship of fatigue limit and crack size. (a) Surface crack, (b) Depth crack

SCM435 볼트의 열처리 조건은 다음과 같다; 담금질 (855°C에서 1.8 ks + 유냉) 및 어닐링 (600°C에서 3.6 ks + 수냉).[23] 이와 같은 열처리에서 얻어진 시험편의 피로한도는 500 MPa이고,[22,23] SCM435 모재의 항복 응력 902 MPa에서 얻어진 $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 $5.6\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 였다.[24] 이들 값을 식(3)에 대입하여 구한 피로한도를 Fig. 9에 나타낸다. (a)는 표면 균열에 대한 피로한도를 깊이 균열에 대하여 나타낸 것이고, (b)는 깊이 균열에 대한 피로한도를 나타낸 것이다. 피로한도는 균열형상비(Aspect ratio, As) 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1에 대하여 나타내었다. 그림에는 볼트에 작용하는 응력 398 MPa을 점선으로 나타내었다. 피로

한도는 균열 치수가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 표면 균열과 깊이 균열에 따라서 다르게 나타났다. 표면 균열은 균열중횡비 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1 순으로 피로한도가 감소하였으나, 균열 깊이는 0.1, 0.3, 0.6 및 1.0 순으로 피로한도가 감소하였다. 볼트 작용응력 398 MPa 점선과 피로한도가 만나는 점의 균열 치수를 균열중횡비에 대하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Crack size of fatigue limit for applied stress of 398 MPa at each aspect ratio(As)

Crack \ As	1.0	0.6	0.3	0.1
Surface	0.043	0.044	0.062	0.155
Depth	0.053	0.032	0.022	0.017

Table 4에서 SCM435 볼트는 표면 및 깊이 균열의 치수가 작은 것에서 파괴가 발생한다. 표에는 각 As에서 파괴가 발생하는 균열 치수를 굵은 글씨로 나타내었다. As=1.0은 표면, As=0.6, 0.3, 0.1은 깊이에서 파괴가 먼저 발생한다. 따라서 본 연구에서 파괴가 발생한 볼트는 반복 하중에 의하여 표에 나타낸 표면 및 깊이 균열의 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다. 이와 같은 균열의 발생을 제어하기 위해서는 외부 충격에 의한 손상의 방지, 수분에 의한 부식 방지, 정확한 조성의 재료 사용, 열처리 정확성 및 나사골 부분에 쇼트 피닝 등에 의한 압축잔류응력의 부여가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 대형 트럭의 에어브레이크의 스프링을 고정하는 SCM435 고정력 볼트의 파손을 해석

하고, 방지법을 제시하였다.

(1) 파면은 균열 발생 기점인 외주부에서 래칫 마크가 시작되었으며, 기점에는 결정입자가 선명한 입계 부식이 확인되었다.

(2) 부식 부분은 SCM435 성분보다 Cr이 많이 검출되었으며, Zn이 Fe와 비슷하게 검출되는 등 화학성분에 없는 많은 원소들이 관찰되었다.

(3) 모재시험편과 손상시험편의 조직은 거의 비슷하였으며, 경도는 모재보다 약 4.3% 작았지만, 오차 범위에 있다.

(4) SCM435 볼트 한 개는 398 MPa이 작용하여, 피로한도의 약 80%의 응력을 받았다. 이와 같이 큰 작용 응력에 의하여 부식 기점에서 균열이 발생하여 파괴하였다.

(5) 표면균열에 의한 피로한도 예측에서 균열 중횡비에 따라서 파괴 기점이 다르게 나타났다. 즉, 균열 중횡비 1.0은 표면 균열에서, 균열 중횡비 0.6, 0.3, 0.1은 깊이 균열에서 파괴가 먼저 발생한다.

(6) 파괴가 발생한 SCM435 볼트는 반복 하중에 의하여 표면 및 깊이 균열의 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다.

(7) SCM435 볼트의 파괴를 방지하기 위해서는 열처리 정확성, 외부 충격에 손상 방지, 수분에 의한 손상부 부식 방지, 및 나사골 부분에 피닝 등에 의한 압축잔류응력의 부여가 필요하다. 또한, 화학성분에 없는 많은 원소가 관찰되는 점을 고려하여 정확한 조성의 재료를 사용할 필요가 있다.

참고문헌

[1] Hard Lock Kogyo KK., "Hard Lock Nut", Japanese Patent: 2002-195236, (2002).
 [2] S. Izumi, T. Yokoyama and T. Teraoka,

- “Verification of Anti-Loosening Performance of Super Slit Nut by Finite Element Method”, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 71, pp. 380-386, (2005).
- [3] N. A. Noda, Y. Xiao, M. Kuhara, K. Saito, M. Nagawa, A. Yumoto and A. Ogasawara, “Optimum Design of Thin Walled Tube on the Mechanical Performance of Super Lock Nut”, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 2, pp. 780-791, (2008).
- [4] Y. Xiao, M. Kuhara, N. A. Noda, K. Saito, M. Nagawa and A. Yumoto, “Optimum Dimensions of Thin Walled Tube on the Mechanical Performance of Super Stud Bolt”, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 74, pp. 954-960, (2008).
- [5] A. I. Yakushev, “Effect of Manufacturing Technology and Basic Thread Parameters on the Strength of Thread Connections”, Pergamon press, Oxford, UK, (1964).
- [6] T. Kawano, Y. Kobayashi, S. Harada and Y. Kuroshima, “Fatigue Characteristics of Bolted Joints Tightened in Elastic and Plastic Region”, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 1, pp. 233-234, (2001).
- [7] H. Suzuki and T. Kunio, “Influence of Yield-controlled and Angle controlled Tightening Methods on Fatigue Strength of Bolted Joints. Journal of the Society of Material Science, Vol. 31, pp. 730-735, (1982).
- [8] W. K. Boyd and W. S. Hyler, “Factors Affecting Environmental Performance of High-Strength Bolts”, J. Struct. Div., Vol. 99, pp. 1571-1588, (1973).
- [9] H. E. Townsend, “Effects of Zinc Coatings on the Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Low-Alloy Steel”, Metall. Trans. A, Vol. 6, pp. 877-883, (1975).
- [10] P. F. Timmins, “Solutions to Hydrogen Attack in Steels”, ASM International: Materials Park, OH, USA, (1977).
- [11] E. Levy, “Cracking of an Alloy Steel Bolt. In Handbook of Case Histories in Failure Analysis”, Esakul, K.A., Ed.; ASM International: Materials Park, OH, USA, Vol. 1, pp. 303-304, (1992).
- [12] G. E. Kerns, “Fractures of Hot Dip Galvanized Steel Anchor Bolts in Chemical Plant Construction Project; In Handbook of Case Histories in Failure Analysis”, Esakul, K. A., Ed.; ASM International: Materials Park, OH, USA, Vol. 1, pp. 328-331, (1992).
- [13] R. G. Baggerly, “Hydrogen-assisted Stress cracking of carburized and zinc plated SAE Grade 8 wheel studs. In Handbook of Case Histories in Failure Analysis”, Esakul, K. A., Ed.; ASM International: Materials Park, OH, USA, Vol. 2, pp. 396-400, (1992).
- [14] E. Levy, “Hydrogen Embrittlement Delayed Failure of a 4340 Steel Draw-in Bolt. In Handbook of Case Histories in Failure Analysis”, ASM International: Materials Park, OH, USA, Vol. 2, pp. 401-404, (1992).
- [15] J. Carpio, J. A. Casado, J. A. Álvarez, D. Méndez, and F. Gutiérrez-Solana, “Stress Corrosion Cracking of Structural Steels Immersed in Hot-Dip Galvanizing Baths”, Eng. Fail. Anal., Vol. 17, pp. 19-27, (2010).
- [16] R. Murakami, D. Yonekura and T. Murayama, “A study on fatigue fracture mechanism of Cr-Mo steel SCM435 in super long life range”, Int. J. Modern Phys. B, Vol. 17, pp. 1697-1703, (2003).
- [17] H. Itoh, M. Ochi, I. Fujiwara and T. Momoo, “SCC Life Estimation Based on Cracks Initiated from the Corrosion Pits of Bolting Material SCM435 Used in Steam Turbine”, JSME Int. J. Ser. B Fluids Therm. Eng., Vol. 47, pp. 316-322, (2004).
- [18] A. Abdollah-Zadeh, A. Salemi and H. Assadi, “Mechanical behavior of CrMo steel with tempered martensite and ferrite-bainite-martensite microstructure”, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 483-484, pp. 325-328, (2008).
- [19] 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).
- [20] N. Aziz, P. Craig, J. Nemic and F. Hai, “Rock bolt corrosion – an experimental study”, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A, Vol. 123, pp. 69-77, (2014).
- [21] Y. Qing, H. Z. Li, J. H. Jing, F. Y. Zeng and R. Rui, “Corrosion of High Strength Steel Bolt Friction Type Connection Test of Performance Degradation”, Advances in Civil Engineering and Architecture Innovation, Vol. 368-373, pp. 428-431, (2011).
- [22] S. Takagi, N. Nakamura, A. Sano and Y. Tonzuka, “Fatigue Strength Property of Nitrided JIS-SCM435 Steel”, Research Report of Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology, No. 19, pp 6-9, (2013).
- [23] M. S. Suh, C. M. Suh and Y. S. Pyun, YUN, “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, No. 8, pp. 769-778, (2013).
- [24] 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).

(접수: 2019.12.29. 수정: 2020.02.07. 게재확정: 2020.02.07.)