

단조 금형 SCM435 고장력 볼트의 파손 해석

Failure Analysis on SCM435 High Strength Bolt of Forging Die

윤서현¹, 김민현¹, 남기우^{2*}

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

〈Abstract〉

Fracture behaviors of SCM435 high strength bolt have been studied including macroscopic and microscopic fracture observation, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Vickers hardness test and applied stress evaluation. cracks (ratchet marks) were generated by the repetitive loads acting on the bolts, initial stress of bolt and the stress concentration. The applied stress was found to be slightly higher than the fatigue limit of the material. The initial stress of bolt must be removed, and the mold temperature during the process must be maintained by room temperature. Bolts are recommended to be peened to improve fatigue limit.

Keywords : SCM435 High Strength Bolt, Forging Die, 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

볼트는 산업 구조물의 체결에서 가장 일반적으로 사용되는 것이며, 국가의 산업 확대에 의하여 수요가 빠르게 증가하고 있다. 볼트 체결에서 파손의 형태는 과부하, 잠금 장치의 풀림, 금속 피로, 부적절한 토-크, 부식 손상 및 수소 취화 등이다. 진동 환경에 노출되는 기기는 일반적으로 잠금 장치를 갖춘다. 나사형 체결장치가 사용되면, 조임 또는 볼트 토-크의 양은 매우 중요하다. 부적절한 토-크로 인하여 구조물에서 고장이 종종 발생한다. 이와 같이 볼트는 체결 상태 또는 구조물의 외부 응력에 의하여 파손이 자주 발생한다. 이와 같은 구조물의 파손 및 손상해석은 안전성에 매우 중요하므로, [1] 많은 연구자들은 체결용 볼트의 파손 해석을 실시하였다. [2-6] 또한 구조물의 파손 해석을 실시하고 있다. [7,8]

본 연구는 자동차 부품인 엑셀레이터 샤프트 단조 금형의 고정용 SCM435 고장력 볼트가 작업 도중에 파괴한 원인 분석 및 대책을 통하여 경제적 물질 손실을 방지하고자 한다. 이와 같이 고정용 볼트의 파괴는 교체 작업을 위하여 기기를 정지하게 되므로, 작업 공정의 연속성 결여 및 생산 차질을 초래하므로 경제적 손실을 초래한다.

2. 손상 재료 및 해석 방법

손상 재료는 자동차 부품의 엑셀레이터 샤프트를 단조용 금형을 고정하는 고장력 볼트 SCM435이다. Fig. 1은 단조 금형의 외관을 나타내고, 고장력 볼트는 4곳에 고정되어 있다. 샤프트의 가공은 4단계의 공정으로 이루어져 있다. Fig. 2는 파괴된 고장력 볼트의 외관을 나타낸다.

파괴원인은 거시적 관찰, 금속현미경 조직 관찰, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM, S-2400, HiTachi, Japan)을 사용한 파단면 관찰, 에너지분산형 분광분석법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDS, Kevex Ltd., Sigma)에 의한 파단면의 성분조사 및 비커스경도기(HV-114, Mitutoyo)에 의한 경도 측정을 실시하였다. 비커스 경도는 압입 하중 2 kg, 압입 시간 6초, 20회 측정하였다. 손상재의 피로한도는 등가 균열길이를 사용하여 평가하였다. [24]

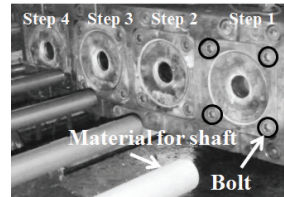


Fig. 1. Appearance of forging mold



Fig. 2 Appearance of damaged high strength bolt

3. 결과 및 고찰

3.1 파단면 관찰

Fig. 3(a),(b)는 각각 파단면의 외관과 파괴 기점을 나타낸다. (a)에서 ①은 파괴 기점이고, ②는 균열 진전부이고 화살표는 방향을 나타낸다. 피로파괴의 대표적인 파면인 비치마크(Beach mark)가 많이 관찰되었다. 비치마크는 제품을 가공할 때마다 볼트에 변동 하중이 작용하여 균열 전면에 형성되었다. ③은 최종 정적파괴 부분을 나타내고, ④는 최종 전단파괴 부분이다. 그리고 화살표는 균열 진전 방향을 나타낸다. (b)는 비치마크와 Ratchet marks(래칫 마크)가 많이 관찰되었다. 래칫 마크는 볼트의 나사골에 큰 응력

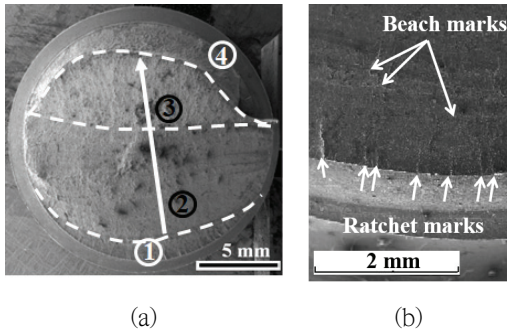


Fig. 3 (a) Fracture surface. (b) Fracture origin

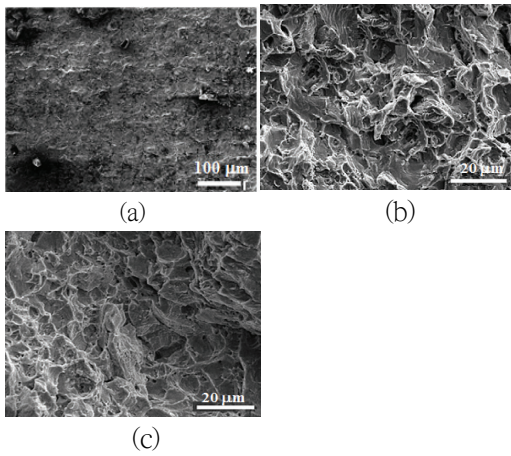


Fig. 4 Fracture surface observation by SEM.
 (a) Crack origin, (b) Crack propagation,
 (c) final fracture

집중이 작용하고, 높은 공칭응력이 작용하여 발생한 것이다. 이것은 Becker 등[9]이 설명하는 것과 같은 fatigue marks이다.

Fig. 4는 Fig. 3의 각 부분을 확대하여 나타낸 것이다. (a)는 균열 발생 기점 근방을 나타낸다. 그림에는 가로 방향으로 비치마크 모양이 있으며, 아랫부분에는 미세하지만 래킷 마크 모양이 나타나 있다. (b)는 피로 균열 진전 영역으로 파면 곳곳에 스트라이에이션이 관찰되었다. (c)는 급속하게 파괴된 영역으로 정적파괴의 대표적인 덩플이 나타나 있다.

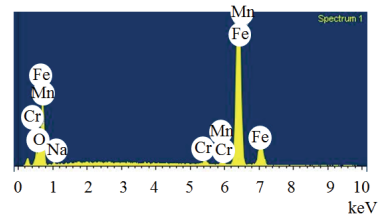
3.2 파손부의 성분 분석

Fig. 5는 (a) 피로 파괴된 부분과 (b) 약간 산화된 부분의 결과를 나타낸다. (a)와 (b)는 SCM435의 주성분인 Fe, Mn 및 Cr 등의 원소가 검출되었다. 이들 원소를 무게비 및 원소비로 나타낸 것이 Table 1이다.

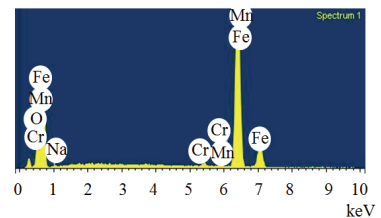
피로 파괴 부분과 약간 산화된 부분의 성분을 EDS로 분석하였다. 두 곳은 비슷한 성분이 검출되었으나, 산화된 부분은 O의 성분이 약간 많이 검출된 것을 알 수 있다. 이것은 균열 진전 후에 공정 과정에 열에 의하여 부분적으로 산화된 것으로 판단된다. 전체적으로 이것은 파단원인에 별다른 영향이 미치지 않은 것이라 생각한다.

Table 1. Elements of the fatigue fracture part and the oxidized part

Element	Fatigue fracture part		Oxidized part	
	wt.%	at.%	wt.%	at.%
O	3.40	10.79	7.98	23.0
Na	0.98	2.16	0.95	1.91
Cr	0.96	0.94	0.90	0.80
Mn	0.86	0.79	0.84	0.70
Fe	93.8	85.3	89.3	73.6



(a)



(b)

Fig. 5 Results of EDS analysis. (a) Fatigue fracture part. (b) Oxidized part

파단면에서 20번 측정하여 평균한 비커스 경도는 HV380±9.7이었다. 이것은 SCM435의 비커스 경도 HV380~435의 최저값에 해당하였다. 따라서 평균 비커스 경도로 보아 재료 불량은 아니라고 판단된다.

3.3 단조 공정

엑셀레이터 샤프트의 단조공정은 Fig. 6과 같다. 열간 단조된 샤프트용 재료는 (a)에서 (b)로 삽입된다. (b)에서 (c) 및 (d) 공정으로 진행되면서, 초기 단면적은 제품에 적합한 단면적으로 줄어든다. 가공이 완성되면, (e)와 같이 삽입된 곳으로 샤프트를 제거한다. (f)는 4단계의 공정과정에서 만들어지는 샤프트를 나타낸다. 이와 같이 샤프트 재료는 금형으로 삽입 및 제거되는 과정을 반복하면서, 단면적이 감소된다. 이 때 감소 비율은 매

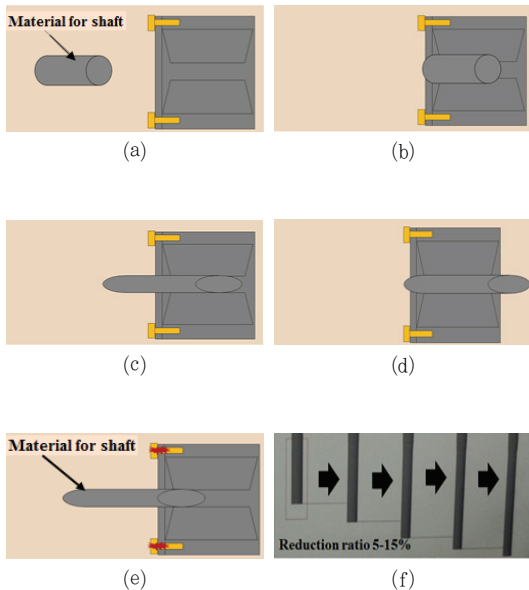


Fig. 6 Shaft forging process. (a) Initial step, (b) Step 1, (c) Step 2, (d) Step 3, (e) Step 4, (f) Process flow

공정마다 5~15%이다. 단조 금형 고정용 볼트는 반복 단조 공정에 작용하는 응력과 볼트 나사골에 작용하는 응력 집중의 중첩에 의하여 큰 응력이 작용하여 파괴하였다고 판단된다. 즉, 볼트의 삽입 단계에서는 편진 압축, 압출 단계에서는 편진 인장이 작용하여, 볼트 내측에서 균열이 발생하여 파괴하였다고 판단된다.

볼트 1개가 받은 응력은 다음과 같다. 샤프트 재료의 삽입 및 제거에 필요한 압출 하중은 1280 kN이고, 볼트의 직경은 17 mm이다. 1개의 금형에 볼트 4개가 사용되므로, 볼트 1개가 받은 응력은 323 MPa이다. Takaki[22] 및 Suh[23] 등이 연구한 SCM435강의 피로한도는 미질화재 440 MPa, 질화재 540~580 MPa, 열처리재 500 MPa 이었다. 따라서 본 연구에 사용한 금형 볼트의 응력은 미질화재의 73%, 질화재의 60~56%, 열처리재의 65% 정도로 피로한도보다 낮은 반복 응력이 작용하였다. 그러나 금형은 삽입 및 제거 공정 중에 열이 발생하였다. 첫 공정은 88.4℃, 두 번째 공정은 105.4℃, 세 번째 공정은 127℃, 네 번째 공정은 129.4℃로 측정되었다. 그리고 가공 후의 샤프트의 온도는 131.2℃이었다. 따라서 볼트는 체결 상황에 따라서 초기 응력이 걸리고, 130 ℃ 정도에서 장시간의 공정에 의한 반복 응력을 받으면 볼트에 균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

3.4 표면 균열의 피로 한도 해석

상기와 같이 볼트가 1개가 받은 응력 323 MPa에서 파괴할 가능성에 대하여 고찰한다. 유한판에 존재하는 반타원 표면균열의 피로한도와 하한계응력확대계수 평가 방법은 문헌[10]에 상세하게 설명되어 있다.

유한판의 반타원 표면균열재의 피로한도(σ_w^R)는 다음 식(1)로 평가할 수 있다.

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

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

SCM435강의 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, [11,12] SCM435 모재의 항복 응력 902 MPa에서 얻어진 $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 $5.6 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 였다.[13] 이들 값을 식(1)에 대입하여 구한 피로한도를 Fig. 7에 나타낸다. (a)는 표면 균열에 대한 피로한도를 깊이 균열에 대하여 나타낸 것이고, (b)는 깊이 균열에 대한 피로한도를 나타낸 것이다. 피로한도는 균열 형상비(Asspect ratio, As) 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1에 대하여 나타내었다. 그림에는 볼트에 작용하는 응력 323 MPa를 점선으로 나타내었다. 피로한도는 균열 치수가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 표면 균열과 깊이 균열에 따라서 다르게 나타났다. 표면 균열은 균열종횡비 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1 순으로 감소하였으나, 균열 깊이는 0.1, 0.3, 0.6 및 1.0 순으로 감소하였다. 볼트 작용응력 323 MPa 점선과 피로한도가 만나는 점의 균열 치수를 균열종횡비에 대하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 SCM435 볼트는 표면 및 깊이 균열의 치수가 작은 것에서 파괴가 발생한다. 표에는 파괴가 발생하는 균열 치수를 굵은 글씨로 나

타내었다. As=1.0은 표면, As=0.6, 0.3, 0.1은 깊이에서 파괴가 발생하였다. 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 볼트의 정확한 체결, 열처리 정확성 및 나사골 부분에 피닝 등 압축잔류응력의 부여가 필요하다고 판단된다.

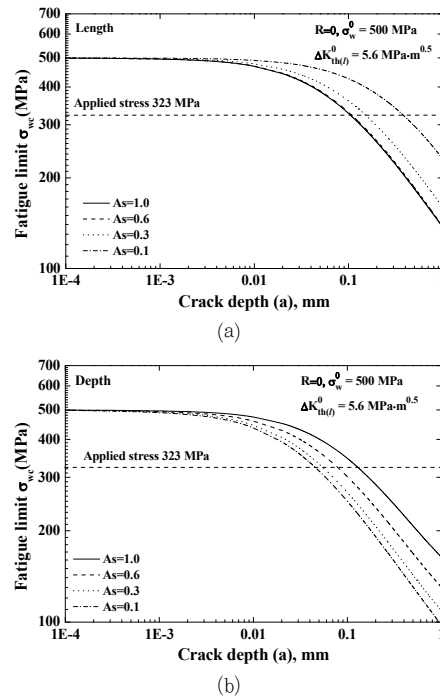


Fig. 7 Relationship of fatigue limit and crack size. (a) Surface crack, (b) Depth crack

Table 2. Crack size of fatigue limit for applied stress of 323 MPa at each aspect ratio

As \ Crack	1.0	0.6	0.3	0.1
Surface	0.105	0.110	0.150	0.380
Depth	0.130	0.080	0.055	0.046

4. 결 론

본 연구는 자동차 부품인 엑셀레이터 샤프트를 생산하는 단조 금형 고정용 SCM435 고장력 볼트의 파손을 해석하고, 방지법을 제시하였다.

- (1) 거시적 관찰의 파단면은 비치마크, 래칭 마크가 관찰되었으며, 미시적관찰의 파단면은 스트라이에이션이 관찰되어, 피로에 의하여 파괴하였다.
- (2) EDS에 의한 파단면의 성분은 Fe, Mn 및 Cr 등의 원소가 검출되어, 소재는 적절한 것이다.
- (3) 비커스경도는 소재의 적정 값으로 불량은 아니었으나, 장시간의 반복 단조 공정과 볼트 나사골에 작용하는 응력의 증첩으로 큰 응력이 작용하여 파괴하였다.
- (4) 작용 응력에 대한 한계 균열 크기 해석에서, 볼트는 작용 하중에 대한 한계 표면 및 깊이 균열의 크기보다 큰 균열이 존재하였다.
- (5) 이와 같은 파손을 방지하기 위해서는 볼트의 정확한 체결, 열처리의 정확성 및 볼트 나사골 부분에 피닝 등 압축잔류응력의 부여가 필요하다.

- M. F. V. Montezuma, V. Tita, "Failure analysis of a SAE 4340 steel locking bolt," *Engineering Failure Analysis*, vol. 11, pp. 915-924, (2004).
- [4] C. C. Li, "Performance of D-bolts Under Static Loading," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 45, pp. 183-192, (2012).
- [5] E. M. Lim, N. S. Hur, H. J. Shim and H. S. Kim, "Structural Integrity Assessment of High-Strength Anchor Bolt in Nuclear Power Plant based on Fracture Mechanics Concept," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 37, pp. 875-881, (2013).
- [6] E. L. Grimsmo, A. Aalberg, M. Langseth and A. H. Clausen, "Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 126, pp. 15-25, (2016).
- [7] M. Han, J. C., "The Analysis of Fatigue Damage in Structure under Variable Load," *Transactions of KSAE*, vol. 12, pp. 85-93, (2004).
- [8] K. W. Nam, C. S. Kim and S. H. Ahn, "A study on wear damage of SKD11 steel material for a cutting mold jig," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 5-13, (2016).
- [9] W. T. Becker and R. J. Shipley, "Failure Analysis and Prevention - Fatigue Failures," *ASM International*, vol. 11, pp. 700-727, (2002).

참고문헌

- [1] R. E. Melchers, A. T. Beck, "Structural Reliability Analysis and Prediction," John Wiley & Sons, 2017.
- [2] R. G. Baggerly, "Hydrogen-assisted stress cracking of high-strength wheel bolts," *Engineering Failure Analysis*, vol. 3, pp. 231-240 (1996).
- [3] M. T. Milan, D. Spinelli, W. W. Bose Filho,

- [10] 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).
- [11] S. Takagi, N. Nakamura, A. Sano and Y. Tonozuka, "Fatigue Strength Property of Nitrided JIS-SCM435 Steel," *Research Report of Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology*, no.19, pp 6-9, (2013).
- [12] 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).
- [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).

(접수: 2019.10.21. 수정: 2019.11.25. 게재확정: 2019.12.05.)