



공학박사 학위 논문

SCM 435 볼트의 파손 해석 및 미소 균열의 피로한도 평가



마린융합디자인공학과

윤 서 현

공학박사 학위 논문

SCM 435 볼트의 파손 해석 및 미소 균열의 피로한도 평가

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2021년 8월

부경대학교 대학원

마린융합디자인공학과

윤서현

윤서현의 공학박사 학위 논문을 인준함.

2021년 8월 27일

m	SN	ATION	AL	UN	2	
주	심	공학박사	도	재	윤	(인)
위	원	공학박사	안	병	건	(인)
위	원	공학박사	왕	재	필	(인)
위	원	공학박사	김	철	수	(인)
위	원	공학박사	남	7]	ዯ	(인)

Abstract

제1장	서로	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	1
~"L1'0			

1.1	연구의 배경 및 목적	2
1.2	피로균열의 발생과 진전	3
1.3	논문의 구성 및 개요	5
	참고문헌	6

제2장 단조 금형 고정용 SCM 435 고장력 볼트 ………… 10

2.1 서언1	1
2.2 파손 재료 및 분석 방법	2
2.2.1 파손 재료	2
2.2.2 분석 방법	5
2.2.3 표면균열의 피로한도 평가 방법	6
2.3 결과 및 고찰	0
2.3.1 파단면 관찰	0
2.3.2 파손부의 성분 분석 및 비커스경도	8
2.3.3 단조 공정	1
2.3.4 표면균열의 피로한도	4
2.4 결언	8

참고문헌 39

제3장 3단 사출 금형 체결용 SCM 435 고장력 볼트 43

3.1 서언	44
3.2 파손 재료 및 분석 방법	45
3.2.1 파손 재료	45
3.2.2 분석 방법	47
3.2.3 표면균열의 피로한도 평가 방법	48
3.3 결과 및 고찰	49
3.3.1 금속현미경에 의한 조직 관찰	49
3.3.2 전자현미경에 의한 파단면 관찰	51
3.3.3 와이블 분포에 의한 비커스경도 특성	56
3.3.4 표면균열의 피로한도	62
3.4 결언	66
참고문헌	67

제4장 대형 트럭 에어브레이크 스프링 고정용 SCM 435 볼트

•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	7(C)
---	----	---	---

4.	1 メ	허언	••••	•••••	•••••	•••••	•••••	 1
4.	2 ፲	파손	재	료	및	분석	방법	 2
4	1.2.2	1 피	손	재	료	•••••	•••••	 2
Z	1.2.2	2 분	.석	방	법	•••••	•••••	 4

4.2.3 표면균열의 피로한도 평가 방법 75
4.3 결과 및 고찰
4.3.1 파단면 관찰
4.3.2 EDS 분석 ······ 80
4.3.3 조직 관찰
4.3.4 비커스경도 특성
4.3.5 파단 응력
4.3.6 표면균열의 피로한도
4.4 결언
참고문헌
제5장 결론 100
발표 논문
감사의 글 104

Failure Analysis of SCM435 Bolt and Evaluation of Fatigue Limit of Micro crack

Seo-Hyun Yun

Department of Marine Convergence Design Engineering, Graduate School, Pukyong National University

Abstract :

First study : Failure analysis 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 mold maximum temperature is about 130 $^{\circ}$ C, and it was fracture by the cyclic stress because the strength is lower than room temperature. 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.

Second study: Since the injection mold is repeatedly used for mass production, fatigue phenomenon due to cyclic stress may occur. The structure is damaged the surface or interior due to cyclic stress or strain. This study analyzed the failure of SCM435 high-tension bolts connecting the upper and lower parts of a three-stage injection molding machine. The bolts undergo an accurate heat treatment to prevent the formation of chromium carbide, and must prevent the action of dynamic stresses. Bolts need accurate tightening and accuracy of heat treatment, and screws are required compression residual stress due to peening.

Third 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.



제1장

서론



1.1 연구의 배경 및 목적

고도 산업 성장기에 건설된 플랜트, 기기와 차량 등은 장시간의 사용 으로, 열화가 발생하고 더구나 반복응력이 작용함으로써 누적 파손으로 파손한다.[1-3] 이와 같은 파손은 1950년대 이후 급진적으로 발전한 파 괴역학으로 해석하여, 구조물의 잔여 수명 및 최종 파괴조건을 정확하 게 평가할 수 있었다.[4] 구조물이 파손되는 경우는 무부하의 상태에서 파손되는 것은 드물고, 대부분은 부재의 항복강도 이상의 응력이 정적 또는 동적으로 작용하여 파손한다.[5-12] 파손 현상의 약 90% 이상은 반복 하중에 의한 피로 파괴이고, 나머지 10%는 다른 이유에 의한 파괴 이다.

한편, 고강도 재료는 경량화, 고성능 및 환경 등을 고려하여, 운송용 기기, 발전 플랜트와 교량에 적용이 증가하는 추세이다.[13-20] 균열 감 수성이 큰 고강도 재료는 비파괴검사로 미세 균열을 검출하여, 구조물 관리에 큰 대책이 필요하다. 고강도 재료로 제작한 볼트는 구조물의 경 량화를 위한 체결에 필요한 것이며, 안정성을 위해서도 필요하다. 그러 나 위에서도 언급한 것과 같이 고강도 볼트는 반복 하중 및 장시간의 사용에 따른 열화에 의하여 균열이 발생하고 파손하여, 경제적 손실이 발생한다.[21,22] 이러한 문제를 해결하기 위하여 파손한 볼트를 분석하 여, 고강도 볼트의 신뢰성, 안정성 및 경제성 향상 합리화를 목적으로 한다.

1.2 피로균열의 발생과 진전

피로 파괴에서 균열 발생은 원자 레벨(전위)이고, 크든 작든 구조물에 반복응력이 작용하면, 최대전단응력을 받은 가장 바깥면이 손상을 받아 (표면경화 처리재의 경우는 경화층의 두께, 부하 응력의 크기, 잔류 응 력분포 등에 의해 내부에서 균열이 발생한다), 정적하중보다 낮은 응력 에서 균열이 발생한다. 이것이 피로 파괴 현상이다. Fig. 1.1은 거시적인 균열 발생을 나타낸 것이다. 반복응력이 작용하면 표면에 작은 균열이 발생함과 동시에 내부에도 결함이 발생한다.[23] Fig. 1.2는 피로 균열진 전 형태를 나타낸 것이다. 최대하중이 작용한 표면에 돌출과 함몰에 의 한 미끄럼 영역이 발생하고, 그 균열이 반복 시간의 경과와 함께 내부 로 진전하여 최종적으로 파괴한다. 따라서 인장과 충격 파면과는 다르 게 반드시 균열 발생기점을 관찰할 수 있고, 피로균열 진전영역과 최종 파단 영역이 존재한다. 이들의 면적 비율은 재료의 강도, 부하 응력의 크기 및 균열진전 속도 등에 영향을 받으며, 여러 가지 파손 모양으로 관찰된다.



Fig. 1.1 Surface crack shape by intrusions and extrusions



Fig. 1.2 Fatigue crack initiation and propagation behavior

1.3 논문의 구성 및 개요

구조물은 장시간의 사용에 의한 열화 및 설계하중보다 낮은 반복응력 의 작용으로 파손하는 경우가 많다. 특히 구조물을 체결하는 고강도 볼 트의 파손은 막대한 경제적 손실을 초래하기 때문에, 파손 해석으로 원 인을 규명하고, 대책을 강구 할 필요가 있다.

제1장은 연구의 배경, 목적 및 피로 파괴 과정을 설명하였다.

- 제2장은 자동차 부품인 엑셀레이터 샤프트를 제조하는 단조 금형 고정 용 SCM 435 고장력 볼트의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하였 다. 또한, SCM 435 고장력 볼트에 미세 균열이 존재하는 경우의 피로 수명을 예측하였다.
- 제3장은 3단 사출기 금형의 상하부를 연결하는 SCM 435 고장력 볼트의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하였다. 또한, SCM 435 고장력 볼 트에 미세 균열이 존재하는 경우의 피로 수명을 예측하였다.
- 제4장은 대형 트럭 에어 브레이크의 스프링을 고정하는 SCM 435 고장 럭 볼트의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하였다. 또한, SCM 435 고장력 볼트에 미세 균열이 존재하는 경우의 피로 수명을 예측하였 다.

제5장은 본 논문에서 얻어진 결론을 요약하였다.

참고문헌

- M. A. Miner, 1945, "Cumulative damage in fatigue", J Appl Mech, Vol. 67, A159-A164.
- (2) D. Kujawski, F. Ellyin, 1984, "A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation", Int J Fatigue, Vol. 6, pp. 83–88.
- (3) A. Risitano, G. Risitano, 2013, "Cumulative damage evaluation in multiple cycle fatigue tests taking into account energy parameters", International Journal of Fatigue, Vol. 48, pp. 214–222.
- (4) J. T. P. Yao, F. Kozin, Y.-K. Wen, J.-N. Yang, G. I. Schuëller, O. Ditlevsen, 1986, "Stochastic fatigue, fracture and damage analysis", Structural Safety, Vol. 3, pp. 231–267.
- (5) T. Yokobori, 1951, "Fatigue Fracture of Steel", Journal of Physical Society of Japan. Vol. 6, pp. 81–86.
- (6) D. Benoit, R. Namdar-Irani, R. Tixier, 1980, 'Oxidation of fatigue fracture surfaces at low crack growth rates ", Materials Science and Engineering, Vol. 45, pp. 1–7.
- (7) K. Ando, S. Fujibayashi, K. W. Nam, M. Takahashi, N. Ogura, 1987,
 "The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface-Cracked Plate: For the Case of Tensile Load", JSME international journal, Vol. 30, No. 270, pp. 1898–1905.
- (8) K. W. Nam, S. Fujibayashi, K. Ando, N. Ogura, 1988, "The Fatigue Life and Fatigue Crack Through-Thickness Behavior of a Surface-Cracked Plate:(Effect of Stress Concentration)", JSME

international journal. Vol. 31, No. 2, pp. 272-279.

- (9) K. W. Nam, K. Ando, N. Ogura, K. Matui, 1994, "Fatigue life and penetration behaviour of a surface-cracked plate under combined tension and bending", Fatigue & fracture of engineering materials & structures, Vol. 17, No. 8, pp. 873–882.
- (10) K. W. Nam, K. Iwase, K. Ando, 1995, "Fatigue life and surface crack penetration behaviour of an aluminium alloy", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 18, No. 2, pp. 179–187.
- (11) K. W. Nam, K. Ando, N. Ogura, 1995, "Surface fatigue crack life and penetration behavior of stress concentration specimen", Engineering fracture mechanics, Vol. 51, No. 1, pp. 161–166.
- (12) K. Shiozawa, T. Hasegawa, Y. Kashiwagi, L. Lu, 2009, "Very high cycle fatigue properties of bearing steel under axial loading condition", International Journal of Fatigue, Vol. 31, pp. 880–888.
- (13) T. Kawasaki, S. Nakanishi, Y. Sawaki, K. Hatanaka, T. Yokobori, 1975, "Fracture toughness and fatigue crack propagation in high strength steel from room temperature to -180° C", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 465-470.
- (14) Y. Murakami, H. Usuki, 1989, "Quantitative evaluation of effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels. II: Fatigue limit evaluation based on statistics for extreme values of inclusion size", International Journal of Fatigue, Vol. 11, pp. 299–307.

- (15) L. Tan, K. Sridharan, T. R. Allen, 2006, "The effect of grain boundary engineering on the oxidation behavior of INCOLOY alloy 800H in supercritical water", Journal of Nuclear Materials, Vol. 348, pp. 263–271.
- (16) M. Fulger, D. Ohai, M. Mihalache, M. Pantiru, V. Malinovschi, 2009, "Oxidation behavior of Incoloy 800 under simulated supercritical water conditions", Journal of Nuclear Materials, Vol. 385, pp. 288–293.
- (17) M. Fulger, M. Mihalache, D. Ohai, S. Fulger, S. C. Valeca, 2011, "Analyses of oxide films grown on AISI 304L stainless steel and Incoloy 800HT exposed to supercritical water environment", Journal of Nuclear Materials, Vol. 415, pp. 147–157.
- (18) E. Schubert, M. Klassen, I. Zemer, C. Walz, G. Sepold, 2001, "Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry", J Mater Process Technol, Vol. 115, pp. 2–8.
- (19) Y. Li, Z. Lin, A. Jiang, G. Chen, 2003, "Use of high strength steel sheet for lightweight and crash worthy car body", Materials & Design, Vol. 24, pp. 177-182.
- (20) R. V Balendran, F. P Zhou, A Nadeem, A. Y. T Leung, 2002, "Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete", Building and Environment, Vol. 37, pp. 1361–1367.
- (21) L. Li and R. Wang, 2014, "Failure Analysis on Fracture of Worm

Gear Connecting Bolts", Engineering Failure Analysis, Vol. 36, pp. 439-446.

- (22) J. Zhang, A Li, C. Zhang, C. Yang, 2016, "Failure and Fracture Analysis of Bolt Assembled on the Fan Used in the Internal Combustion Engine", Journal of Failure Analysis and Prevention Vol. 16, pp. 302–309.
- (23) P. J. E. Forsyth, 1963, "Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys." Acta Metallurgical, Vol. 11, Issue 7, pp. 703–715.



제2장

단조 금형 고정용 SCM 435 고장력 볼트



2.1 서언

볼트는 산업 구조물의 체결에서 가장 일반적으로 사용되는 것이며, 국가의 산업 확대로 인하여 수요가 빠르게 증가하고 있다. 볼트(Bolt)는 한쪽 끝이 머리로 되어있고, 다른 쪽 끝은 나사산이 있는 금속 막대이 다. 나사는 부품을 조립하거나 결합하여, 완전한 장치로 만드는 체결로 가장 많이 사용된다. 체결에서 파손의 형태는 과부하, 잠금장치의 풀림, 금속 피로, 부적절한 토-크, 부식 파손 및 수소 취화 등이다. 잠금장치 는 사용에 따라서 볼트가 풀리는 것을 방지하기 위하여 다양한 것이 사 용된다. 진동 환경에 노출되는 기기는 일반적으로 체결한다. 가동 중인 기기는 체결하지 않으면, 치명적인 결과가 발생한다. 나사형 체결장치가 사용되면, 조임 또는 볼트 토-크의 양은 매우 중요하다. 부적절한 토-크 로 인하여 구조물에서 고장이 종종 발생한다. 이처럼 볼트는 체결 상태 또는 구조물의 외부 응력에 의하여 파손이 자주 발생한다. 이와 같은 구조물의 파손 해석은 안전성에 매우 중요하므로,[1-3] 많은 연구자는 체결용 볼트의 파손 해석을 하였다.[4-16] 또한 구조물의 파손 해석을

본 연구는 자동차 부품인 엑셀레이터 샤프트를 제조하는 단조 금형 고정용 SCM 435 고장력 볼트의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하 였다. 또한, SCM 435 고장력 볼트에 미세 균열이 존재하는 경우의 피로 수명을 예측하였다.

2.2 파손 재료 및 분석 방법

2.2.1 파손 재료

본 연구에 사용한 파손 재료는 자동차 부품의 엑셀레이터 샤프트를 단조하는 금형을 고정하는 고장력 볼트 SCM 435이다. Fig. 2.1은 단조 금형의 외관을 나타내고, 고장력 볼트는 4곳에 고정되어 있다. 샤프트의 가공은 4단계의 공정으로 이루어져 있다. Fig. 2.2는 파손된 고장력 볼 트의 외관을 나타낸다. Table 2.1은 SCM 435의 화학적 성분을 나타낸 다. Table 2.2는 SCM 435의 기계적 성질을 나타낸다.





Fig. 2.1 Appearance of forging mold



С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Мо
0.38	0.21	0.7	0.015	0.018	0.11	0.09	0.93	0.16

Table 2.1 Chemical composition of SCM435

Table 2.2 Mechanical Properties of SCM435

	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)
	951	795	18
	171	ONA	
/	JAI		11.
10			N.
12			12
101			
>			2
Y			0
121			
0			/ 7/
	6		1
	~ 2	TH O	1 Mar
		41 2	

2.2.2 분석 방법

파손 원인은 거시적 관찰, 금속현미경에 의한 조직 관찰, 주사전자현 미경(Scanning Electron Microscope : SEM, S-2400, HiTachi, Japan)을 사 용한 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 하였다. 모재와 파 손재의 조직은 경면 연마 후, Nital 3% 용액으로 에칭하였다. 비커스경 도는 압입 하중 2kg, 압입 시간 6초, 20회 측정하였다.



2.2.3 표면균열의 피로한도 평가 방법

무한판에 존재하는 균열 길이2c의 관통균열이 굽힘 응력 σ_B 를 받을 때, K는 식(2.1)로 주어진다.

$$K = \sigma_B \sqrt{\pi c} \quad --- \quad (2.1)$$

유한판에 존재하는 반타원형 표면균열의 응력확대계수(K)는 Newman-Raju식[22]으로 평가할 수 있다. Fig. 2.3과 같은 유한판에 표면 균열 길이2c, 표면균열 깊이a의 반타원형 표면균열이 균일한 굽힘 응력 σ_B 를 받을 때, K는 식(2.2)로 계산할 수 있다.[21]





Fig. 2.3 Schematic diagram of a finite plate with a semi-elliptical crack

T

21

$$K = \frac{H\!\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right) F\!\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)}{\sqrt{Q\!\left(\frac{a}{c}\right)}} \sigma_B \sqrt{\pi a} = \beta \sigma_B \sqrt{\pi a} \quad --- \quad (2.2)$$

여기서, F 및 Q는 형상 보정함수, H는 굽힘 응력에 관한 보정함수, t 는 유한판의 두께, b는 유한판 폭의 절반, φ는 반타원형 표면균열의 선 단의 도이다. β는 보정함수(F, Q, H)를 총괄하여 나타낸 형상 보정계수 이다. 같은 응력에서 같은K를 나타내는 무한판의 관통균열 길이를 등 가 균열 길이c_e로 하면, 식(2.1)과 식(2.2)는 식(2.3)과 같이 된다.

$$K = \sigma_B \sqrt{\pi c_e} = \beta \sigma_B \sqrt{\pi a} \quad --- \quad (2.3)$$

식(2.3)을 정리하면, c_e와 a의 관계는 식(2.4)로 나타낸다.

$$\sqrt{c_e} = \beta \sqrt{a} \quad --- \quad (2.4)$$

따라서 유한판의 반타원형 표면균열에 대한 ΔK_{th}^R 의 균열 치수 의존 성은 식(2.1)의 c에 식(2.4)의 c_e 를 대입함으로써, 식(2.5)로 평가할 수 있다.

$$\Delta K_{th}^{R} = 2\beta \Delta \sigma_{w}^{R} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cos^{-1} \left\{ \frac{\pi}{8\beta^{2}a} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^{R}}{\Delta \sigma_{w}^{R}} \right)^{2} + 1 \right\}^{-1} \quad --- \quad (2.5)$$

여기서 β는 φ의 함수이고, K를 평가하는 균열 선단의 각도에 의해 서, K의 평가 값이 변화한다. σ_w^R 은 평활재 피로한도, $\Delta K_{th(l)}^R$ 는 무한판 에 매우 긴 관통균열2c₀가 존재하는 경우의 하한계응력확대계수이다. 균열재의 피로한도(σ_{wc}^R)는 등가 균열 길이 식(2.4)를 식(2.5)에 대입하여, 정리한 식(2.6)에서 구한다.[21]



2.3 결과 및 고찰

2.3.1 파단면 관찰

Fig. 2.4는 파단면의 외관 관찰을 나타낸다. ①은 파손 기점이고, ②는 피로 파괴의 대표적인 파면인 비치 마크(Beach mark)가 많이 관찰되었 다. 비치 마크는 제품 1개 가공할 때마다 변동 하중에 의하여 균열 전 면이 산화하여 형성된 것이다. ③부분은 약간 산화되어 있었다. ③은 최 종 정적파괴 부분을 나타내고, ④는 최종 전단파괴 부분이다. 그리고 화 살표는 균열진전 방향을 나타낸다.





Fig. 2.4 Fracture surface by macro observation



Fig. 2.5는 Fig. 2.4의 ①부분의 확대 SEM 사진을 나타낸다. 이 그림에는 비치 마크와 Ratchet marks(래칫 마크)가 많이 관찰되었다. 이와 같은 래칫 마크는 볼트의 나사골에 큰 응력 집중이 작용하고, 높은 공칭응력 이 작용하여 발생한 것이다. 이것은 Becker 등[23]이 설명하는 것과 같 은 fatigue marks이다.





Fig. 2.5 Ratchet marks near the origin of fracture by SEM



Fig. 2.6은 Fig. 2.4의 각 부분을 확대하여 나타낸 것이다. (a)는 균열 발생기점 근방을 나타낸다. 이 그림에는 가로 방향으로 비치 마크 모양 이 나타나 있으며, 아랫부분에는 미세하지만, 래칫 마크 모양이 나타나 있다. (b)는 피로 균열진전 영역으로 파면 곳곳에 스트라이에이션이 관 찰되었다. (c)는 급속하게 파손된 영역으로 정적파괴의 대표적인 딤플이 관찰되었다.







(b)



Fig. 2.6 Fracture surface observation by SEM. (a) Crack origin, (b) Crack propagation, (c) Final fracture

Fig. 2.7은 금속현미경 조직을 나타낸다. (a)는 모재이고, (b)는 파손재 를 나타낸다. (a)와 (b)는 거의 비슷한 조직을 나타내었다. 이것은 높은 강도와 인성을 얻기 위하여, 담금질 열처리한 베이나이트 조직이다.





Fig. 2.7 Metallurgical structure, (a) As-received specimen, (b) Damaged specimen


2.3.2 파손부의 성분 분석 및 비커스경도

Z

Fig. 2.8은 (a) 피로 파손된 부분과 (b) 약간 산화된 Fig. 2.4 @부분의 결과를 나타낸다. (a)와 (b)는 SCM 435의 주성분인 Fe, Mn 및 Cr 등의 원소가 검출되었다. 이들 원소를 무게비 및 원소비로 나타낸 것이 Table 2.3이다.

피로 파괴 부분과 산화된 부분 ⓐ의 성분을 EDS로 분석하였다. 두 곳 은 비슷한 성분이 검출되었으나, 산화된 부분은 O의 성분이 약간 많이 검출된 것을 알 수 있다. 이것은 균열진전 후에 부분적으로 산화된 것 으로 판단된다. 전체적으로 이것은 파단 원인에 별다른 영향이 미치지 않은 것으로 생각한다.

파단면에서 20번 측정하여 평균한 비커스경도는 HV380±9.7이었다. 이것은 SCM 435의 비커스경도 HV380~435의 최저값에 해당하였다. 따라 서 평균 비커스경도로 보아 재료 불량은 아니라 판단된다.

S CH OL W



Fig. 2.8 Results of EDS analysis. (a) Fatigue fracture part. (b) Oxidized part (a)

	Fatigue fracture part		Oxidized part of (a)		
Element	wt.%	at.%	wt.%	at.%	
0	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	

Table 2.3 Elements of the fatigue fracture part and the oxidized part



2.3.3 단조 공정

액셀레이터 샤프트의 단조 공정은 Fig. 2.9와 같다. 열간 단조 된 샤프 트용 재료는 (a)에서 (b)로 삽입된다. (b)에서 (c) 및 (d) 공정으로 진행되 면서, 초기 단면적은 제품에 적합한 단면적으로 줄어든다. 가공이 완성 되면, (e)와 같이 샤프트를 제거한다. (f)는 4단계의 공정에서 만들어지는 샤프트를 나타낸다. 이처럼 샤프트 재료는 금형으로 삽입 및 제거되는 과정을 반복하면서, 단면적이 감소한다. 이때 감소 비율은 공정마다 5~ 15%이다. 단조 금형 고정용 볼트는 반복 단조 공정에 작용하는 응력과 볼트 나사골에 작용하는 응력 집중의 중첩으로 큰 응력이 작용하여 파 손하였다고 판단된다. 즉, 볼트에는 삽입 단계에서는 편진 압축, 압출 단계에서는 편진 인장이 작용하여, 볼트 내측에서 균열이 발생하여 파 손하였다고 판단된다.

4



Fig. 2.9 Shaft forging process. (a) Initial step, (b) Step 1, (c) Step 2, (d) Step 3, (e) Step 4, (f) Process flow

볼트 1개가 받은 응력은 다음과 같다. 샤프트 재료의 삽입 및 제거에 필요한 압출 하중은 1280 kN이고, 볼트의 직경은 17 mm이다. 1개의 금 형에 볼트 4개가 사용되므로, 볼트 1개가 받는 응력은 323 MPa이다. Takaki[24] 및 Suh[25] 등이 연구한 SCM 435의 피로한도는 미질화재 440 MPa, 질화재 540~580 MPa, 열처리재 500 MPa이었다. 따라서 본 연구에 사용한 금형 볼트의 응력은 미질화재의 73%, 질화재의 60~56%, 열처리재의 65% 정도로 피로한도보다 낮은 반복응력이 작용하였다. 그 러나 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. 그러고 가공 후의 샤프트의 온도는 131.2℃였다. 따라서 볼트는 체결 상황에 따라서 초기 응력이 걸리고, 130℃ 정도에 서 장시간의 공정에 의한 반복응력을 받으면 볼트에 균열이 발생할 가 능성이 큰 것으로 판단된다.

4

2.3.4 표면균열의 피로한도

상기와 같이 볼트가 1개가 받는 응력 323MPa에서 파손할 가능성에 대하여 생각한다. SCM 435의 열처리 조건은 다음과 같다; 담금질 (85 5℃에서 1.8 ks + 유냉) 및 어닐링 (600℃에서 3.6 ks + 수냉).[25] 이와 같은 열처리에서 얻어진 시험편의 피로한도는 500MPa이고,[24,25] SCM 435 모재의 항복 응력 902MPa에서 얻어진 $\Delta K_{th(t)}^{R}$ 은 5.6 $MPa\sqrt{m}$ 이 다.[26] 이들 값을 식(6)에 대입하여 구한 피로한도를 Fig. 2.10에 나타낸 다. (a)는 표면에 대한 피로한도를 나타낸 것이고, (b)는 깊이에 대한 피 로한도를 나타낸 것이다. 피로한도는 균열형상비(Aspect ratio, As) 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1에 대하여 나타내었다. 그림에는 볼트에 작용하는 응력 323MPa을 점선으로 나타내었다. 피로한도는 균열 치수가 증가함에 따 라서 급격하게 감소하였다. 이러한 경향은 표면과 깊이에 따라서 다르 게 나타났다. 표면의 피로한도는 균열형상비 0.1, 0.3, 0.6 및 1.0 순으로 감소하였으나, 깊이의 피로한도는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1 순으로 감소하였 다. 볼트 작용 응력 323MPa 점선과 피로한도가 만나는 점의 균열 치수 를 균열형상비에 대하여 Table 2.4에 나타내었다.



Fig. 2.10 Relationship of fatigue limit and crack size. (a) Surface, (b) Depth

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

Table 2.4 Crack size of fatigue limit for applied stress of 323MPa at each aspect ratio



Table 2.4에서 SCM 435 볼트는 표면 및 깊이의 균열 치수가 작은 것 에서 파손이 발생한다. 표에는 파손이 발생하는 균열 치수를 굵은 글씨 로 나타내었다. As=1.0은 표면, As=0.6, 0.3, 0.1은 깊이에서 파손이 발생 하였다. 따라서 본 연구에서 파손이 발생한 볼트는 반복 하중에 의하여 표에 나타낸 표면 및 깊이의 균열 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판 단된다. 이와 같은 균열의 발생을 제어하기 위해서는 볼트의 정확한 체 결, 열처리 정확성 및 나사골 부분에 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하다고 판단된다.



2.4 결언

본 연구는 자동차 부품인 엑셀레이터 샤프트를 생산하는 단조 금형 고정용 SCM 435 고장력 볼트의 파손을 해석하고, 방지법을 제시하였다.

- (1) 파손 볼트는 변동 하중에 의하여 비치 마크와 Ratchet marks(래칫 마크)가 많이 관찰되었다. 미시적으로는 스트라이에이션도 관찰되었다. 다.
- (2) 비커스경도 측정에서 재료의 불량은 아니었으나, 볼트는 반복 단조
 공정의 응력과 볼트 나사골에 작용하는 응력 집중의 중첩 때문에
 큰 응력이 작용하여 파손하였다고 판단된다.
- (3) 표면균열에 의한 피로한도 예측에서 As=1.0은 표면, As=0.6, 0.3, 0.1
 은 깊이에서 파손이 발생하였다. 파손이 발생한 SCM 435 볼트는 반
 복 하중에 의하여 표면 및 깊이 균열의 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다.
- (4) SCM 435 볼트의 파손을 방지하기 위해서는 정확한 조성의 재료 사용, 열처리 정확성, 외부 충격에 파손 방지, 부식 방지 및 나사골 부분에 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하다.

참고문헌

- L. S. Benjamin, 1979, "Structural Analysis of Differentiation Failure", Psychiatry: Interpersonal and Biological Processes, Vol. 42, pp. 1–23.
- (2) M. Shinozuka, 1983, "Basic Analysis of Structural Safety ", Journal of Structural Engineering, Vol. 109, pp. 721–740.
- (3) R. E. Melchers and A. T. Beck, 2017, "Structural Reliability Analysis and Prediction", John Wiley & Sons
- (4) U. W. Boenisch, P. G. de Boer and S. F. Journeaux, 1996,
 "Unreamed Intramedullary Tibial Nailing—Fatigue of Locking Bolts", Injury, Vol. 27, pp. 265–270.
- (5) R. G. Baggerly, 1996, "Hydrogen-Assisted Stress Cracking of High-Strength Wheel Bolts", Engineering Failure Analysis, Vol. 3, pp. 231–240.
- (6) J. A. Swanson and R. T. Leon, 2000, "Bolted Steel Connections: Tests on T-Stub Components", Journal of Structural Engineering, Vol. 126, pp. 50–56.
- (7) M. T. Milan, D. Spinelli, W. W. Bose Filho, M. F. V. Montezuma and V. Tita, 2004, "Failure Analysis of a SAE 4340 Steel Locking Bolt", Engineering Failure Analysis, Vol. 11, pp. 915–924.
- (8) H. S. Chen, P. T. Tseng and S. F Hwang, 2006, "Failure Analysis of Bolts on an End Flange of a Steam Pipe", Engineering Failure Analysis, Vol. 13, pp. 656–668.

- (9) H. C Lee, J. M. Choi, B. Lee and T. G. Kim, 2007, "Failure Analysis of Stress Corrosion Cracking in Aircraft Bolts", Engineering Failure Analysis, Vol. 14, pp. 209–217.
- (10) S. Griza, F. Bertoni, G. Zanon, A. Reguly and T. R. Strohaecker,
 2009, "Fatigue in Engine Connecting Rod Bolt due to Forming Laps", Engineering Failure Analysis, Vol. 16, pp. 1542–1548.
- (11) C. Li. Charlie, 2012, "Performance of D-Bolts under Static Loading", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 45, pp. 183 –192.
- (12) L. Li and R. Wang, 2014, "Failure Analysis on Fracture of Worm Gear Connecting Bolts", Engineering Failure Analysis, Vol. 36, pp. 439-446.
- (13) Sh. Molaei, R. Alizadeh, M. Attarian and Y. Jaferian, 2015, "A Failure Analysis Study on the Fractured Connecting Bolts of a Filter Press", Case Studies in Engineering Failure Analysis, Vol. 4, pp. 26–38.
- (14) E. M. Lim, N. S. Hur, H. J. Shim and H. S. Kim, 2013, "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.
- (15) E. L. Grimsmo, A. Aalberg, M. Langseth and A. H. Clausen, 2016, "Failure Modes of Bolt and Nut Assemblies under Tensile Loading", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 126, pp. 15–25.

- (16) A. Manwatkar, A. A. Kher and S. Chavan, 2016, "Failure Analysis of High Tensile Industrial Fasteners", International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 6, Issue 3, pp. 132–137.
- (17) Y. Liu and S. Mahadevan, 2007, "Stochastic Fatigue Damage Modeling under Variable Amplitude Loading ", International Journal of Fatigue, Vol. 29, pp. 1149–1161.
- (18) K. W. Nam, C. S. Kim and S. H. Ahn, 2016, "The Effect of Wear on the Damage of Slitting Knife" Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 4, pp 5–11.
- (19) K. W. Nam, C. S. Kim and S. H. Ahn, 2016, "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.
- (20) C. S. Kim, K. W. Nam and S. H. Ahn, 2017, "Failure Analysis and Weibull Statistical Analysis according to Impact Test of the Angular Pin for Injection Molding Machines", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 37-44.
- (21) K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui and K. Takahashi, 2019,
 "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.
- (22) J. C. Newman Jr, and I. S. Raju, 1981, "An Empirical

Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185-192.

- (23) W. T. Becker and R. J. Shipley, 2002, "Failure Analysis and Prevention – Fatigue Failures", ASM International, Vol. 11, pp. 700–727.
- (24) S. Takagi, N. Nakamura, A. Sano and Y. Tonozuka, 2013, "Fatigue Strength Property of Nitrided JIS-SCM435 Steel", Research Report of Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology, No. 19, pp 6-9.
- (25) M. S. Suh, C. M. Suh and Y. S. Pyun, 2013, "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.
- (26) Y. Kitsunai, 1980, "Effect of Microstructure on Fatigue Crack Growth Behavior of Carbon Steels", The Society of Materials Science of Japan, Vol. 29, pp. 1018–1023.

제3장

3단 사출 금형 체결용 SCM 435 고장력 볼트



3.1 서언

사출 금형은 전연성, 유동성이 있는 재료를 녹여 형틀에 부어 굳혀서 제품을 제작하는 방법이다.[1] 이것은 제품의 대량 생산에 필수적이다. 이와 같은 대량 생산을 위해서는 금형이 반복적으로 사용되므로, 반복 응력에 의한 피로 현상이 발생할 수 있다.[2] 일반적으로 피로는 반복응 력 혹은 변형률에 의하여 사용 부재의 표면 혹은 내부가 파손을 받는 현상이다. 이때 파손은 원자간 레벨의 문제이며, 결정격자의 결함이나 전위 등이 피로 현상에 관여하고 있다. 즉, 작은 응력이 반복하여 작용 하면, 재료 내부가 단계적으로 약해져 파손되는 것이다. 파손 해석은 구 조물의 안전성과 장수명화를 위하여 많은 연구자가 실시하고 있다.[3-9] 본 연구에서는 현장에서 사용하는 3단 사출기 금형의 상하부를 연결 하는 SCM 435 고장력 볼트의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하였 다. 또한, SCM 435 고장력 볼트에 미세 균열이 존재하는 경우의 피로 수명을 예측하였다. टा वा ग

2

3.2 파손 재료 및 분석 방법

3.2.1 파손 재료

본 연구에 사용한 파손 재료는 3단 사출 금형의 상부 금형과 하부 금 형을 연결하는 고장력 볼트 SCM 435이다. Fig. 3.1은 3단 사출 금형의 외관을 나타낸다. 볼트는 그림과 같이 좌우의 인장 링크를 고정하는 것 이다. 인장 링크는 3단 금형의 거리를 조절하는 장치로서 금형의 이탈 방지가 목적이며, 금형 이동 축에 있는 제품을 빼내기 위하여 존재한다. 이때 볼트는 축하중 및 비틀림 하중을 받으리라 판단된다. 3단 사출 금 형은 상부 금형과 하부 금형이 이어져 있지 않지만, 현장에서 편의성을 위하여 인장 링크를 설치하여 하부 금형이 상부 금형에 고정될 수 있게 만들었다. 금형의 총 무게는 211kg이며, 하부의 무게는 90kg으로서 하 부는 볼트 4개로 고정되어 있었다. SCM 435는 저합금강재로서 크롬, 몰 리브덴을 첨가하여, 담금질성, 고온 가공성, 용접성 및 크리프 저항이 우수한 강으로서 강력 볼트, 크랭크 샤프트 및 고온 고압용 파이프재 등에 널리 사용되는 강재이다.



11 10

Fig. 3.1 Appearance of three-stage injection mold.

4

3.2.2 분석 방법

파손 원인은 거시적 관찰, 금속현미경에 의한 조직 관찰, 주사전자현 미경(Scanning Electron Microscope : SEM, S-2400, HiTachi, Japan)을 사 용한 파단면 관찰, 에너지분산형 분광 분석법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDS, Kevex Ltd., Sigma)에 의한 파단면의 성분조사 및 비커스경도기(HV-114, Mitutoyo)에 의한 경도 측정을 하였다. 모재와 파 손재의 조직은 경면 연마 후, Nital 3% 용액으로 에칭하였다. 비커스경 도는 압입 하중 2kg, 압입 시간 6초, 20회 측정하였다. 비커스경도는 와 이블 해석으로 재료 특성을 분석하였다.



3.2.3 표면균열의 피로한도 평가 방법[10]

본 장에서도 2.2.3절에서 나타낸 식을 사용하여 평가하였다. 유한판의 반타원형 표면균열에 대한 ΔK_{th}^{R} 의 균열 치수 의존성은 식(3.1)로 평가 하였다.

$$\Delta K_{th}^{R} = 2\beta \Delta \sigma_{w}^{R} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cos^{-1} \left\{ \frac{\pi}{8\beta^{2}a} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^{R}}{\Delta \sigma_{w}^{R}} \right)^{2} + 1 \right\}^{-1} \dots (3.1)$$

균열재의 피로한도(σ_{uc}^{R})는 등가 균열 길이 식(2.4)를 식(2.5)에 대입하 여, 정리한 식(3.2)에서 평가하였다.

$$c_e \left\{ \sec\left(\frac{\pi \Delta \sigma_{wc}^R}{2\Delta \sigma_w^R}\right) - 1 \right\} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\Delta \sigma_w^R}\right)^2 - (3.2)$$

. . . .

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 금속현미경에 의한 조직 관찰

Fig. 3.2는 모재와 파손재의 금속조직을 나타낸다. (a)는 모재이고, (b) 는 파손재이다. (a)는 높은 강도와 인성을 얻기 위하여, 담금질 열처리 한 베이나이트 조직을 나타내고 있다. 마찬가지로 (b)도 (a)와 비슷한 침상 조직을 나타내고 있다. 두 종류의 시험편 조직은 비슷하였다.





Fig. 3.2 Metallurgical structure. (a) As-received specimen, (b) Damaged specimen

3.3.2 전자현미경에 의한 파단면 관찰

Fig. 3.3은 파단면의 SEM에 의한 외관 관찰을 나타낸다. (a)는 파단면 전체를 나타낸다. ①은 파손 기점이고, ②는 피로 파괴의 대표적인 파면 인 비치 마크(Beach mark)가 많이 관찰되었다. 비치 마크는 변동 하중 에 의하여 균열 전면이 산화하여 파면에 나타난 줄무늬를 의미한다. ③ 은 최종 정적파손 부분을 나타낸다. 그리고 화살표는 균열진전 방향을 나타낸다. (b)는 균열 발생기점 근처를 확대하여 나타낸 것이다. 피로 파단면은 많은 래칫 마크가 관찰되었다.[11] 이것은 파단면 외주부에서 작은 계단과 같은 형상을 나타내며, 내부로 진전하다가 없어진다. 그리 고 변동 하중에 의한 많은 비치 마크가 관찰되었다. 이것으로 볼트는 피로에 의하여 파손된 것으로 알 수 있다. (c)는 균열 발생기점을 확인 하기 위하여, 확대한 사진이다. 파단면 외주부는 많은 균열 발생기점이 존재하고, 래킷 마크 사이는 피로에 의하여 균열이 진전한 것(그림의 점선 표시)을 확인할 수 있다. 또한, 래킷 마크 사이에는 균열진전에 의 한 비치 마크를 확인할 수 있다.



(c)

Fig. 3.3 Appearance of fractured surface by SEM. (a) Fracture surface,(b) Fracture origin, (c) Enlargement of (b)

Fig. 3.4는 모재와 파손재의 EDS 분석 결과를 나타낸다. 모재는 SCM435의 주성분인 Si, Cr, Mn이 검출되었으나, 파손재는 Cr, Mn 이외 에 Ca이 검출되었다. Table 3.1은 이들 성분을 무게비 및 원자비로 나타낸 것이다. 파손재는 모재에 없는 Ca가 검출되었으며, Cr 및 O의 양이 많아졌다. Ca는 CaSiO₃의 화합물로 추정되며, 섬유상 또는 가느다란 주상 결정의 집합체를 이룬다. 이것은 철이나 망간이 칼슘을 치환하여 고용체로 함유되어 있으며, 철 및 망간의 함유량에 물리적 성질은 달라 진다. Cr이 많아진 것은 장시간 사용함에 따라서 Cr이 결정립계에 석출 하여 크롬탄화물(주로 Cr₂₃C₆)을 형성한다. 이러한 크롬탄화물이 입계에 형성되는 과정에서 주변의 크롬 원소가 탄화물의 형성으로 입계로 모여 들게 되면, 그만큼 입계 주변의 크롬농도가 국부적으로 낮아진다. 이것 을 예민화라 하며, 크롬탄화물은 취화되어 외력에 의하여 쉽게 파손되는 성질을 가진다.[12,13] 또한 Cr이 크롬탄화물 주위로 이동함에 따라 서 강도가 약하게 된다.

म रु म

\$



As-received	Element	ΟK	Si K	Cr K	Mn K	Fe K	Totals
	wt.%	1.40	0.20	1.13	0.87	96.39	100
	at.%	4.72	0.39	1.17	0.85	92.87	
Damaged	Element	ΟK	Ca K	Cr K	Mn K	Fe K	Totals
	wt.%	2.97	0.33	4.54	1.09	91.07	100
	at.%	9.61	0.43	4.52	1.02	84.41	

Table 3.1 Elements of as-received specimen and damaged specimen



3.3.3 와이블 분포에 의한 비커스경도 특성

Fig. 3.5는 모재와 파손재의 비커스경도를 비교한 것이다. 모재의 경도 는 HV467.5~517.5, 파손재의 경도는 370.5~407.5의 분산을 나타내었다. 이처럼 재료의 경도는 일정한 값을 가지는 것이 아니라 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 경도 분포의 특성은 와이블 분포로 설명할 수 있 다.[14-17]





비커스경도에서 P의 확률을 제공하는 누적 분포 함수는 다음 식 (3.3) 으로 나타낼 수 있다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \tag{3.3}$$

여기서 P는 비커스경도의 확률이고, α 및 β는 각각 형상 파라미터 및 척도 파라미터다. *x*는 비커스경도를 나타낸다. 척도 파라미터 β는 63.2%에서 비커스경도를 나타내고, α는 경도 분산의 나타내는 형상 파 라미터다. α가 클수록 특성의 변화가 작고, 재료가 균질하다는 것을 의 미한다.

Fig. 3.6은 와이블 확률에 따르는 모재와 파손재의 비커스경도를 나타 낸다. Fig. 3.6은 비커스경도에 대한 확률을 플로팅하여 직선을 얻을 수 있음을 보여준다. Table 3.2는 모재와 파손재의 비커스경도로부터 추정 한 와이블 분포 함수의 형상 파라미터와 척도 파라미터를 보여준다. 또 한, 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 함께 나 타내었다.

모재와 파손재의 형상 파라미터는 비슷하게 나타났다. 파손재는 전체 적으로 균일하게 열화가 진행되었다는 것을 의미한다. 그러나 63.2%에 서 특성 수명인 파손재의 척도 파라미터(398)는 모재(501.3)보다 약 30% 작게 나타났다. 이것은 열화에 의하여 특성 수명이 작아진 것을 의미한 다.



Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/Std/COV
As-received	37.2	501.3	494.2/16.2/0.033
Damaged	36.4	398.0	392.3/12.9/0.033

Table 3.2 The estimated Weibull parameters from Vickers hardness



사출 금형 장치는 Fig. 3.1과 같이 4개의 볼트가 지지하고 있으나, 하 부 금형의 영향을 받는 볼트는 상부 2개이다. 하부 금형의 중량은 약 882N이고, 볼트 1개는 약 441N의 하중을 받는다. 볼트의 길이 5cm이므 로 굽힘모멘트는 2,205 N·cm이다. 원형 단면계수는 $\frac{\pi d^3}{32}$ 이고, 직경 d = 1.3 cm이므로, 굽힘 응력은 184MPa이다. Takaki[18] 및 Suh[19] 등이 연 구한 SCM 435의 피로한도는 미질화재 440MPa, 질화재 540~580MPa, 열처리재 500MPa이었다. 따라서 본 연구에 사용한 금형 볼트의 응력은 미질화재의 42%, 질화재의 34~32%, 열처리재의 37% 정도로 피로한도 보다 낮은 반복응력이 작용하였다. 그러나 볼트는 나사골에 응력 집중 이 발생하고, 장시간 사용 때문에 취성적인 Cr 탄화물이 형성됨으로써 예상할 수 없는 동적 하중이 작용하여 Fig. 3.3과 같이 볼트 외주부에서 균열(ratchet mark)이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 볼트는 Cr 탄화 물이 쉽게 형성되지 않도록 열처리하고, 동적 응력의 작용을 경감시키 도록 한다. W ST CH OL IN

3.3.4 표면균열의 피로한도

상기와 같이 볼트가 1개가 받는 응력 184MPa에서 파손할 가능성에 대하여 생각한다. SCM 435의 열처리 조건은 다음과 같다; 담금질 (85 5℃에서 1.8 ks + 유냉) 및 어닐링 (600℃에서 3.6 ks + 수냉). [19] 이와 같은 열처리에서 얻어진 시험편의 피로하도는 500MPa이고, [18.19] SCM 435 모재의 항복 응력 902MPa에서 얻어진 긴 균열의 하한계응력확대계 수 $\Delta K^R_{th(l)}$ 은 5.6 $MPa\sqrt{m}$ 이다.[20] 이들 값을 식(3.2)에 대입하여 구한 피로한도를 Fig. 3.7에 나타낸다. (a)는 표면에 대한 피로한도를 나타낸 것이고, (b)는 깊이에 대한 피로한도를 나타낸 것이다. 피로한도는 균열 형상비(Aspect ratio, As) 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1에 대하여 나타내었다. 그림 에는 볼트에 작용하는 응력 184MPa을 점선으로 나타내었다. 피로한도 는 균열 치수가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 표면과 깊이에 따라서 다르게 나타났다. 표면의 피로한 도는 균열형상비 0.1, 0.3, 0.6 및 1.0 순으로 감소하였으나, 깊이의 피로 한도는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1 순으로 감소하였다. 볼트 작용 응력 184MPa 과 피로한도가 만나는 점의 균열 치수를 균열형상비에 대하여 Table 3.3에 나타내었다.



Fig. 3.7 Relationship of fatigue limit and crack size. (a) Surface, (b) Depth
Table 3.3에서 SCM 435 볼트는 표면 및 깊이의 균열 크기가 작은 것 에서 파손이 발생한다. 표에는 파손이 발생하는 균열 크기를 굵은 글씨 로 나타내었다. 본 연구에서 파손한 SCM 435 볼트는 모든 균열형상비 의 깊이에서 파손이 발생하였다. 따라서 본 연구에서 파손이 발생한 볼 트는 반복 하중에 의하여 표에 나타낸 표면 및 깊이의 균열 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다. 이와 같은 균열의 발생을 제어하기 위해서는 볼트의 정확한 체결, 열처리 정확성 및 나사골 부분에 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하다고 판단된다.



As Crack	1.0	0.6	0.3	0.1
Surface	0.523	0.538	0.753	< 1
Depth	0.292	0.357	0.536	1.009

Table 3.3 Crack size of fatigue limit for applied stress of 184MPa at each aspect ratio



3.4. 결언

본 연구는 3단 사출 금형의 상부와 하부를 연결하는 파손된 SCM 435 볼트의 파손 해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 볼트는 래칫 마크 및 비치 마크 등의 관찰에서 편측 반복 굽힘 응 력에 의하여 파손하였다.
- (2) 볼트는 침상의 조직을 나타내고 있지만, 게재물이 관찰되었다. 그리고 균열 발생기점 근방은 크롬탄화물이 관찰되었다.
- (3) 비커스경도의 형상 파라미터는 비슷하였지만, 척도 파라미터는 모재 보다 약 30% 작아 열화가 많이 발생하였다.
- (4) 표면균열에 의한 피로한도 예측에서 모든 균열형상비의 깊이에서 파손 기점이 나타났다. 파손한 SCM 435 볼트는 반복 하중에 의하여 예측한 표면 및 깊이의 균열 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판 단된다.
- (5) 정확한 열처리를 하여, 크롬탄화물의 생성을 방지하고, 동적 응력의 작용을 방지하도록 한다.
- (6) SCM 435 볼트의 파손을 방지하기 위해서는 정확한 조성의 재료 사용, 열처리 정확성, 외부 충격에 파손 방지, 부식 방지 및 나사골 부분에 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하다.

참고문헌

- J. S. Kim and T. W. Park, 2015, "NCS-Based Injection Mold", Bogdoo. co. Ltd.
- L. O. A. Affonso, 2006, "Fatigue Fractures", Machinery Failure Analysis Handbook, pp 43–53.
- (3) Q. Hu, K. Song and X. Jiang, 2012, "Research of Fatigue Stress Cracking for Injection Mold Cavity Based on Ansys Workbench", Applied Mechanics and Materials, Vols. 217–219, pp. 1757–1761.
- (4) J. K. Kim and C. S. Lee, 2013, "Fatigue life estimation of injection mold core using simulation-based approach", International Journal of Automotive Technology, Vol. 14, Issue 5, pp. 723–729.
- (5) K. W. Nam, C. S. Kim and S. H. Ahn, 2016, "Damage Analysis of Degraded Slitting Knife", International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, Vol. 5, No. 9, pp. 153–159.
- (6) K. W. Nam, C. S. Kim and S. H. Ahn, 2016, "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.
- (7) L. Lu, J. Zhou, R. Iyer, J. Webb, D. Woods and T. Pietila, 2017, "Fatigue Life Prediction of Injection Molding Tool", SAE Technical Paper 2017-01-0340.
- (8) A. T. Miller, D. L. Safranski, K. E. Smith, D. G. Sycks, R. E. Guldberg and K. Gal, 2017, "Fatigue of Injection Molded and 3D

Printed Polycarbonate Urethane in Solution", Polymer, Vol. 108, pp. 121–134.

- (9) C. S. Kim, K. W. Nam and S. H. Ahn, 2017, "Failure Analysis and Weibull Statistical Analysis according to Impact Test of the Angular Pin for Injection Molding Machines", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 37-44.
- (10) K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui and K. Takahashi, 2019,
 "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.
- (11) Sh. Zangeneh, M. Ketabchi and A. Kalaki, 2014, "Fracture Failure Analysis of AISI 304L Stainless Steel Shaft", Engineering Failure Analysis, Vol. 36, pp. 155–165.
- (12) J. W. Kim, S. H. Kim, J. H. Jeong, Y. S. Kim and K. W. Nam, 2014, "Cause and Solution of Damage on STS310S Tube for Heat Exchange Devices", Transactions of the KSME(A), Vol. 39, No. 2, pp. 187-193.
- (13) P. Atanda, A. Fatudimu and O. Oluwole, 2010, "Sensitisation Study of Normalized 316L Stainless Steel", Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 9, No.1, pp. 13–23.
- (14) W. Weibull, 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", J. Appl. Mech.-Trans. ASME, Vol. 18, No. 3, pp. 293–297.
 (15) S. H. Ahn, S. C. Jeong and K. W. Nam, 2016, "Weibull Statistical

Analysis on Mechanical Properties of Immersed Silicon Carbide in Acidic and Alkaline Solution", Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 17, No. 9, pp. 994–998.

- (16) S. H. Ahn, C. Y. Kang and K. W. Nam, 2017, "Weibull Distribution for Vickers Hardness of Peened ZrO2 Ceramics According to Shot Sizes", Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 18, No. 6, pp. 425–430.
- (17) I. D. Park, K. W. Nam and C. Y. Kang, 2018, "Shear Strength of Ball Studs According to the Resistance Welding Conditions & Reliability Testing Based on the Weibull Distribution Function", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, No. 12, pp. 5647-5652.
- (18) S. Takagi, N. Nakamura, A. Sano and Y. Tonozuka, 2013, "Fatigue Strength Property of Nitrided JIS-SCM435 Steel", Research Report of Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology, No. 19, pp. 6–9.
- (19) M. S. Suh, C. M. Suh and Y. S. Pyun, 2013, "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.
- (20) Y. Kitsunai, 1980, "Effect of microstructure on fatigue crack growth behavior of carbon steels", The Society of Materials Science of Japan, Vol. 29, pp. 1018–1023.

제4장

대형 트럭 에어브레이크 스프링 고정용 SCM 435



4.1 서언

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 아 니라 높은 피로 강도가 요구된다. 대부분의 연구는 새로 개발된 볼트 너트 연결의 풀림 방지 성능에 중점을 두었다.[1-4]. Yakushev[5]는 나 사의 피로 강도에 대한 제조 기술의 영향을 연구하였다. 그는 깎은 나 사와 연마한 나사에 비하여 롤링 나사의 피로 강도가 크게 향상한다고 하였다. Suzuki et al 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 볼 트 저항을 많이 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 금속 취성, 퀜칭 균열 및 수소 유기 균열과 같은 것을 분석하였다. SCM 435 는 고강도 및 고경도 특성을 가진 Cr, Mo 강으로 기계 부품, 샤프트, 기어 및 고강도 나사 제품에 널리 사용된다.[16-18] 그러나, 이 재료는 종종 고온 템퍼링 및 퀜칭에서 취성이 발생하는 등 신뢰성이 낮다.

본 연구는 대형 트럭 에어 브레이크의 스프링을 고정하는 SCM 435 고장력 볼트의 파손 원인을 분석하고, 대책을 제시하였다. 또한, SCM 435 고장력 볼트에 미세 균열이 존재하는 경우의 피로 수명을 예측하였 다.

4.2 파손 재료 및 분석 방법

4.2.1 파손 재료

본 연구에 사용한 파손 재료는 대형 트럭의 에어 브레이크의 스프링 을 고정하는 SCM 435 볼트(M10)이다. Table 4.1은 SCM 435의 화학조성 범위를 나타낸다. 볼트는 스프링의 진동 때문에 반복 하중을 받는 구조 로 되어있다. Fig. 4.1은 에어 브레이크와 스프링를 연결하는 고정 볼트 (원 부분)를 나타낸다. Fig. 4.2는 파손된 볼트 외관을 나타낸다.



Table 4.1 Chemical composition of SCM 435 (wt.%)

С	Si	Mn	Cr	Мо	Р	S	Cu	Ni
0.33 ~ 0.38	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.85	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.30	0.03↓	0.03↓	0.30↓	0.25↓



Fig. 4.1 Bolt connecting the air brake and spring



Fig. 4.2 Appearance of damaged bolt

4.2.2 분석 방법

SCM 435 볼트의 파단면은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM, S-2400, HiTachi, Japan)을 사용하여 확인하였으며, 파손 기점의 제2상 및 환경의 영향을 확인하기 위해 에너지분산형 분광 분석법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDS, Kevex Ltd. Sigma) 로 분석하였다. 모재와 파손재의 조직은 경면 연마하고, 초음파세척을 한 후, 나이탈 3% 용액으로 에칭하고, 금속현미경으로 관찰하였다.

비커스경도는 비커스경도 시험기(HV-114, Mitutoyo)로 측정하였다. 비 커스경도는 압입 하중 2kg, 압입 시간은 6초로 20회 측정하였다. 비커 스경도는 웨이블 해석으로 모재와 파손재의 특성을 분석하였다.

4.2.3 표면균열의 피로한도 평가 방법[19]

본 장에서도 2.2.3절에서 나타낸 식을 사용하여 평가하였다. 유한판의 반타원형 표면균열에 대한 ΔK_{th}^{R} 의 균열 치수 의존성은 식(4.1)로 평가 하였다.

$$\Delta K_{th}^{R} = 2\beta \Delta \sigma_{w}^{R} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cos^{-1} \left\{ \frac{\pi}{8\beta^{2}a} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^{R}}{\Delta \sigma_{w}^{R}} \right)^{2} + 1 \right\}^{-1} \dots (4.1)$$

균열재의 피로한도(σ_{uc}^{R})는 등가 균열 길이 식(2.4)를 식(2.5)에 대입하 여, 정리한 식(4.2)에서 평가하였다.

$$c_e \left\{ \sec\left(\frac{\pi \Delta \sigma_{we}^R}{2\Delta \sigma_w^R}\right) - 1 \right\} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\Delta \sigma_w^R}\right)^2 - - (4.2)$$

4.3 결과 및 고찰

4.3.1. 파단면 관찰

Fig. 4.3은 SEM에 의한 파단면의 외관 관찰한 것이다. 파면의 외주부 는 균열 발생기점으로 추측되는 부분에 많은 래칫 마크가 관찰되었다. 래칫 마크는 파단면 외주부에서 작은 계단과 같은 형상을 나타내며, 균 열이 내부로 진전하면서 없어진다. 피로 파괴의 특성을 나타내는 비치 마크는 관찰할 수 없었고, 그림의 흰 화살표는 균열진전 방향을 나타낸 다.





Fig. 4.4는 파단면 외주의 부식 부분을 확대한 것이다. 외주는 부식 때 문에 결함이 발생하고, 작용 응력에 의하여 균열이 진전한 것으로 판단 된다. 래칫 마크는 부식 부분부터 형성되어 있다. 부식 부분은 입계 부 식 때문에 (a) 결정 입자가 선명하게 나타나 있으며, (b) 움푹 팬 곳도 관찰되었다. 또한, 부식 부분에서는 검은 점들이 관찰되었다. 입계 부식 은 입계의 불순물, 입계 영역에서 합금 원소 중 어느 하나가 과하게 많 거나 현저하게 감소한 경우에 발생한다. 18-8 스테인리스강은 500~800 ℃에 장시간 노출되면 Cr₂₃C₆가 생성되어 입계부식이 발생한다. 두랄루 민은 CuAl₂의 석출 때문에 입계 부식이 발생한다. 본 연구에 사용된 SCM435 볼트는 Cr를 함유하고 있으므로, 주행 중 빗물 등 Cl⁻을 함유한 수분과 접촉하여 입계 부식이 발생한 것으로 판단된다. 이것을 방지하 기 위하여 고온 고용화 처리와 급냉, 탄소보다 더 강력한 화합물을 형 성하는 안정제(Ti, Cb, Nb, Ta 등) 첨가, 탄소량을 0.03% 이내로 할 필 요가 있다.

H ot in

AT NO



Fig. 4.4 Enlargement of the corrosion part of the outer circumference



4.3.2 EDS 분석

Fig. 4.5(a), (b)는 각각 Fig. 4.4①, ②에서 검게 보이는 부분을 EDS 분 석한 것이다. (a)는 입계부식에 의하여 결정 입자가 선명한 부분이고, (b)는 움푹 팬 부분이다. 이들 원소를 무게비 및 원소비로 나타낸 것이 Table 4.2, 4.3이다. (a)는 Cr이 SCM 435 성분보다 많이 검출되었으며, Zn이 나타났다. (b)는 화학성분에 없는 많은 원소가 발견되었다. 특히 Zn이 Fe와 비슷하게 검출되었다. 본 연구에 사용된 파손 볼트는 대형 트럭 바퀴의 에어 브레이크 스프링을 고정하는 것이므로 외부에 많이 노출되었다. 따라서 수분에 의한 침식이나, 주변 금속들과의 마찰 등에 의해서 환경적인 영향을 받았을 수 있다. 또한, 볼트 제작 시에 함유된 불순물 또는 개재물일 가능성도 있으며, 미량의 것은 파손 후의 방치에 의한 것일 수도 있다.

4



Fig. 4.5 Results of EDS analysis. (a) Part of Fig. 4.4①. (b) Part of Fig. 4.4②

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 4.2 Elements of the part of Fig. 4.4⁽¹⁾.

Table 4.3 Elements of the part of Fig. 4.42.

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	
-	3417	

4.3.3 조직 관찰

Fig. 4.6은 SCM 435 볼트의 (a) 모재 및 (b) 파손재의 금속현미경 조직 사진을 각각 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 거의 비슷한 조직을 나타내었 다. 이것은 높은 강도와 인성을 얻기 위하여, 담금질 열처리한 베이나이 트 조직이다.





(b)

Fig. 4.6 Metallurgical structure, (a) As-received specimen, (b) Damaged specimen

4.3.4 비커스경도 특성

Fig. 4.7은 모재와 파손재의 비커스경도를 나타낸다. 파손재의 경도는 모재보다 경도가 작은 것을 알 수 있다. 그리고 비커스경도는 재료에 따라서 일정한 값이 아니라, 변동하는 것을 알 수 있다. 이처럼 변동하 는 비커스경도는 최약 링크 가설을 고려하여, 2-파라미터 와이블 분포 를 적용하여 통계 해석하였다.





Fig. 4.7 Relationship between Vickers hardness and specimens.



경도 및 파손 인성에서 확률P를 나타내는 누적 분포 함수는 다음 식 (4.3)로 표현된다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \tag{4.3}$$

여기서 P는 비커스경도 및 파손 인성의 확률, α와 β는 각각 형상계 수와 척도계수이다. x는 비커스경도 및 파손 인성이다. 척도계수β는 63.2%의 시험편에서 비커스경도 및 파손 인성을 나타내며, α는 경도 및 파손 인성의 분산을 나타내 계수이다. α가 클수록 경도의 특성변화 가 작고 재료가 균일함을 나타낸다.

Fig. 4.8은 모재와 파손재에 대한 비커스경도를 와이블 확률지에 나타 낸 것이다. 비커스경도는 와이블 확률지에 직선 관계를 나타내었다. 비 커스경도에 대한 해석 결과를 Table 4.4에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다. 모재의 척도 파라미터는 492.6로 나타났으나, 파손재는 피로에 의한 열화로 약 4.4% 작은 471.1로 나타났다. 형상 파라미터는 모재 38.9, 파손재 33.6을 나타내었다. 그러나 변동계수는 형상 파라미터와 반대의 경향을 나타내 어 분산이 많음을 알 수 있다. 즉, 모재는 0.0303이고, 파손재는 0.0357 로 나타났다.



Fig. 4.8 Weibull probability of Vickers hardness



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

Table 4.4 The estimated Weibull parameters from Vickers hardness



4.3.5 파단 응력

본 연구 사용한 대형 트럭 에어 브레이크의 스프링을 고정한 SCM 435 볼트는 집중하중을 받는 외팔보로 가정하였다. 따라서 볼트는 굽힘 응력을 받는다. 외팔보의 굽힘 응력은 다음 식(4.2)로 구한다.

$\sigma = \frac{M}{Z} \tag{4.2}$

여기서 M은 굽힘 모멘트, Z는 단면계수이다. 볼트는 원형으로 판단하 였다. 스프링을 고정한 SCM 435 볼트는 작용 하중 P=83 kN, 길이 L=30 mm, 직경 d=10 mm이다. 따라서 굽힘 응력은 σ=2,598 MPa가 된다. 굽힘 응력은 에어 브레이크 스프링을 고정한 볼트 8개, 바퀴 및 하부프레임 8개에 작용한다. 따라서 볼트 한 개가 받는 응력은 σ=398 MPa이 된다. Takaki[20] 및 Suh[21] 등이 연구한 SCM435강의 피로한도는 미질화재 440MPa, 질화재 540~580MPa, 열처리재 500MPa 이었다.

4.3.6 표면균열의 피로한도

볼트 한 개가 받는 응력σ=398 MPa이 작용하는 경우, 볼트의 미소 균열형상비에 따르는 피로한도는 식(4.2)를 사용하여 평가하였다.

SCM 435 볼트의 열처리 조건은 다음과 같다; 담금질 (855℃에서 1.8 ks + 유냉) 및 어닐링 (600℃에서 3.6 ks + 수냉).[21] 이와 같은 열처리 에서 얻어진 시험편의 피로한도는 500MPa이고,[20,21] SCM 435 모재의 항복 응력 902MPa에서 얻어진 $\Delta K_{th(t)}^R$ 은 5.6 MPa \sqrt{m} 였다.[22] 이들 값 을 식(3)에 대입하여 구한 피로한도를 Fig. 4.9에 나타낸다. (a)는 표면에 대한 피로한도를 나타낸 것이고, (b)는 깊이에 대한 피로한도를 나타낸 것이다. 피로한도는 균열형상비(Aspect ratio, As) 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1에 대하여 나타내었다. 그림에는 볼트에 작용하는 응력 398MPa을 점선으 로 나타내었다. 피로한도는 균열 치수가 증가함에 따라서 급격하게 감 소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 표면과 깊이에 따라서 다르게 나타났다. 표면의 피로한도는 균열형상비 0.1, 0.3, 0.6 및 1.0 순으로 피 로한도가 감소하였으나, 깊이의 피로한도는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1 순으로 피로한도가 감소하였다. 볼트 작용 응력 398MPa과 피로한도가 만나는 점의 균열 치수를 균열형상비에 대하여 Table 4.5에 나타내었다.



Fig. 4.9 Relationship of fatigue limit and crack size. (a) Surface, (b) Depth

Table 4.5에서 SCM 435 볼트는 표면 및 깊이의 균열 치수가 작은 것 에서 파손이 발생한다. 표에는 각 As에서 파손이 발생하는 균열 치수를 굵은 글씨로 나타내었다. As=1.0은 표면, As=0.6, 0.3, 0.1은 깊이에서 파 손이 먼저 발생한다. 따라서 본 연구에서 파손이 발생한 볼트는 반복 하중에 의하여 표에 나타낸 표면 및 깊이의 균열 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다. 이와 같은 균열의 발생을 제어하기 위해서는 외부 충격에 의한 파손의 방지, 부식 방지, 정확한 조성의 재료 사용, 열처리 정확성 및 나사골 부분에 쇼트 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하다고 판단된다.



As Crack	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 4.5 Crack size of fatigue limit for applied stress of 398MPa at each aspect ratio (As)



4.4 결언

본 연구는 대형 트럭의 에어 브레이크의 스프링을 고정하는 SCM 435 고장력 볼트의 파손을 해석하고, 방지법을 제시하였다.

- 파면은 균열 발생기점인 외주부에서 래칫 마크가 시작되었으며, 기 점에는 결정 입자가 선명한 입계 부식이 확인되었다.
- (2) 부식 부분은 SCM 435 성분보다 Cr이 많이 검출되었으며, Zn이 Fe 와 비슷하게 검출되는 등 화학성분에 없는 많은 원소가 관찰되었다.
- (3) 모재와 파손재의 조직은 거의 비슷하였으며, 경도는 모재보다 약5% 작게 나타났다.
- (4) SCM 435 볼트 한 개는 398 MPa이 작용하여, 피로한도의 약 80%의 응력을 받았다. 이처럼 큰 작용 응력에 의하여 부식 기점에서 균열 이 발생하여 파손하였다.
- (5) 표면균열에 의한 피로한도 예측에서 균열형상비에 따라서 파손 기 점이 다르게 나타났다. 즉, 균열형상비 1.0은 표면에서, 균열형상비 0.6, 0.3, 0.1은 깊이에서 파손이 먼저 발생한다.
- (6) 파손이 발생한 SCM 435 볼트는 반복 하중에 의하여 표면 및 깊이의 균열 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다.
- (7) SCM 435 볼트의 파손을 방지하기 위해서는 정확한 조성의 재료 사용, 열처리 정확성, 외부 충격에 파손 방지, 부식 방지 및 나사골 부분에 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하다.

참고문헌

- Hard Lock Kogyo KK., 2002, "Hard Lock Nut", Japanese Patent: 2002–195236. (In Japanese)
- (2) S. Izumi, T. Yokoyama and T. Teraoka, 2005, "Verification of Anti-Loosening Performance of Super Slit Nut by Finite Element Method", The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 71, pp. 380–386. (In Japanese)
- (3) N. A. Noda, Y. Xiao, M. Kuhara, K. Saito, M. Nagawa, A. Yumoto and A. Ogasawara, 2008, "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.
- (4) Y. Xiao, M. Kuhara, N. A. Noda, K. Saito, M. Nagawa and A. Yumoto, 2008, "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. (In Japanese)
- (5) A. I. Yakushev, 1964, "Effect of Manufacturing Technology and Basic Thread Parameters on the Strength of Thread Connections", Pergamon press, Oxford, UK.
- (6) T. Kawano, Y. Kobayashi, S. Harada and Y. Kuroshima, 2001, "Fatigue Characteristics of Bolted Joints Tightened in Elastic and Plastic Region", The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 1, pp. 233–234. (In Japanese)
- (7) H. Suzuki and T. Kunio, 1982, "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. (In Japanese)

- (8) W. K. Boyd and W. S. Hyler, 1973, "Factors Affecting Environmental Performance of High-Strength Bolts", J. Struct. Div., Vol. 99, pp. 1571–1588.
- (9) H. E. Townsend, 1975, "Effects of Zinc Coatings on the Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Low-Alloy Steel", Metall. Trans. A, Vol. 6, pp. 877–883.
- (10) P. F. Timmins, 1997, "Solutions to Hydrogen Attack in Steels", ASM International: Materials Park, OH, USA.
- (11) E. Levy, 1992, "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.
- (12) G. E. Kerns, 1992, "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.
- (13) R. G. Baggerly, 1992, "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.
- (14) E. Levy, 1992, "Hydrogen Embrittlement Delayed Failure of a4340 Steel Draw-in Bolt. In Handbook of Case Histories in Failure

Analysis", ASM International: Materials Park, OH, USA, Vol. 2, pp. 401–404.

- (15) J. Carpio, J. A. Casado, J. A. Álvarez, D. Méndez, and F. Gutiérrez-Solana, 2010, "Stress Corrosion Cracking of Structural Steels Immersed in Hot-Dip Galvanizing Baths", Eng. Fail. Anal., Vol. 17, pp. 19–27.
- (16) R. Murakami, D. Yonekura and T. Murayama, 2003, "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.
- (17) H. Itoh, M. Ochi, I. Fujiwara and T. Momoo, 2004, "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.
- (18) A. Abdollah-Zadeh, A. Salemi and H. Assadi, 2008, ""Mechanical behavior of CrMo steel with tempered martensite and ferrite-bainite-martensite microstructure", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 483-484, pp. 325- 328.
- (19) K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui and K. Takahashi, 2019,
 "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.
- (20) S. Takagi, N. Nakamura, A. Sano and Y. Tonozuka, 2013, "UKA "Fatigue Strength Property of Nitrided JIS-SCM435 Steel", Research Report of Kanagawa Institute of Industrial Science and

Technology, No.19, pp 6-9.

- M. S. Suh, C. M. Suh and Y. S. Pyun, YUN, 2013, "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.
- (22) Y. Kitsunai, 1980, "Effect of microstructure on fatigue crack growth behavior of carbon steels", The Society of Materials Science of Japan, Vol. 29, pp. 1018~1023.


제5장

결론



구조물 파손은 부하 응력 형태, 부하 응력의 크기, 환경, 재료 및 열 처리 등에 크게 영향을 받는다. 특히, 열처리는 방법에 따라 금속조직이 달라지고, 인장강도나 피로 강도 등이 크게 달라진다. 파손은 일반적으 로 사용 중인 부품이 다양한 응력에 의하여 손상 또는 파괴하여 정상 기능을 하지 못하게 된 상태라고 말할 수 있다. 따라서 구조물의 파손 원인 조사는 재발 방지 대책 및 장수명화 등에 중요한 요소이다.

본 연구에서 파손 해석한 SCM 435 고장력 볼트는 산업 기기에 많이 사용되는 것으로, 생산성 향상 및 경제성을 위하여 파손을 방지해야 한 다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 볼트는 비치 마크와 Ratchet marks(래칫 마크)가 관찰되어, 변동 하 중에 의하여 파손하였다.
- (2) 단조 금형 고정용 볼트는 공정 중의 응력과 나사골에 작용하는 응력 집중의 중첩으로 피로 파손하였다.
- (3) 3단 사출 금형 상하부 연결 볼트는 열화에 의한 크롬탄화물에서 균 열 발생하여 피로 파손하였다.
- (4) 대형 트럭의 에어 브레이크 스프링 고정용 볼트는 표면 부식 기점 에서 균열이 발생하여 피로 파손하였다.
- (5) 3종류 볼트에 작용하는 응력으로 표면균열 형상비에 따르는 피로한 도를 예측하였다. 파손 볼트는 반복 하중에 의하여 예측한 표면 및 깊이 균열의 크기보다 큰 균열이 존재하였다고 판단된다.
- (6) 따라서 고장력 볼트는 미세한 균열에도 쉽게 파손되는 특성을 가지 므로, 정확한 재료 조성과 열처리, 외부 충격 방지, 부식 방지, 가동 응력, 청결 유지 및 피닝 등에 의한 압축 잔류응력의 부여가 필요하 다.

발표 논문

<Refereed Journal Publication>

 윤서현, 김민헌, 남기우 (2019.12), "단조 금형 SCM435 고장력 볼트 의 파손 해석" 한국산업융합학회 논문집, 제22권, 제6호, pp. 649-655.
 Seo-Hyun Yun, Min-Heon Kim, Ki-Woo Nam (2019.12), "Failure

Analysis on SCM435 High Strength Bolt of Forging Die" Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 22, No. 6, pp. 649–655.

- 2. 윤서현, 구세훈, 남기우 (2019.12), "뜨임한 구조용강 SCM435의 경도 및 충격 흡수에너지에 대한 신뢰성 평가" 한국산업융합학회 논문 집, 제22권, 제6호, pp. 681-688.
 Seo-Hyun Yun, Se-Hun Gu, Ki-Woo Nam (2019.12), "Reliability Evaluation of Hardness and Impact Absorption Energy of Tempered Structure Steel SCM435" Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 22, No. 6, pp. 681-688.
- 3. 윤서현, 김민헌, 남기우 (2020.02), "자동차 에어 브레이크 스프링 고 정용 SCM435 볼트의 파손 해석", 한국산업융합학회 논문집 제23권 제1호, pp. 73-81.
 Seo-Hyun Yun, Min-Heon Kim, Ki-Woo Nam (2020.02), "Failure Analysis of SCM435 Bolt for Fixing Automotive Air Brake Spring", Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 23, No. 1, pp. 73-81.
- 4. Seo-Hyun Yun, Min-Heon Kim and Ki-Woo Nam (2020.11) "Failure Analysis and Countermeasures of SCM435 High-Tension Bolt of

Three-Step Injection Mold", 한국산업융합학회 논문집 제23권 제4 호, pp. 531-539.

Seo-Hyun Yun, Min-Heon Kim and Ki-Woo Nam (2020.11) "Failure Analysis and Countermeasures of SCM435 High-Tension Bolt of Three-Step Injection Mold", Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 23, No. 1, 제23권 제4호, pp. 531-539.

<Proceeding>

- 윤서현, 김민헌, 김병수, 팽재은, 남기우, "SCM435 볼트의 파손 해 석", 대한기계학회 2019년 학술대회 논문집, pp. 1798-1801.
 Seo-Hyun Yoon, Min-Heon Kim, Byeong-Su Kim, Jae-Eun Paeng, Ki-Woo Nam, "Failure analysis of SCM435 bolts", Proceeding of The KSME 2019 Annual Meeting, pp. 1798-1801.
- 윤서현, 김민현, 팽재은, 남기우, "자동차 에어브레이크 스프링 고정 용 SCM435 볼트의 파손 해석", 2019년도 한국산업융합학회 추계학 술대회 논문집, pp. 204-205.
 Seo-Hyun Yun, Min-Heon Kim, Jae-Eun Paeng, Ki-Woo Nam, "Failure Analysis of SCM435 Bolt for Fixing Automotive Air Brake Spring", Proceeding of The Korean Society of Industry Convergence 2019 Fall Annual Meeting, pp. 204-205.

감사의 글

제 인생에 새로운 도전이었고, 새로운 꿈을 꾸게 만들어 준 대학원 생활의 시간은 정말 선물과도 같았습니다. 가까이에 많이 사용하고 있 는 SCM435 볼트를 알아가는 것이 너무 즐거웠고, 그 과정에서 만난 인 연에 감사드립니다.

수많은 질문에 방향을 잡아주시고 아낌없는 지도 편달로 답을 찾아내 고 논문이 완성될 수 있게 도와주신 남기우 지도교수님께 진심으로 감 사드립니다.

부족한 부분까지 확인하여 논문의 완성도를 높여주시고 성심성의껏 심사해주신 도재윤 학장님, 안병건 교수님, 왕재필 교수님, 김철수 박사 님께 진심으로 감사드립니다.

직장생활과 병행한 학업과 연구에 자칫 놓칠 수 있었던 부분들을 챙 겨주고 도움 준 연구실 김민원, 팽재은, 구경희 학우와 모든 연구실 학 우들에게 고마움을 전합니다.

쉽지 않은 도전을 시작하며 집안의 대소사에 소홀해질 수 있음에도 응원해주시고 진심으로 자랑스러워해 주신 양가 어머님과 마음의 버팀 목이 되어주고 묵묵히 도움 준 사랑하는 배우자이자 인생의 파트너 하 재수 씨께 정말 감사한 마음을 전합니다. 더불어 엄마가 공부하는 동안 건강하게 잘 자라주고, 힘이 되어준 딸 정화, 아들 지훈에게도 고마운 마음을 전합니다.

끝으로 한국폴리텍대학의 여러 교수님의 지지에 더욱이 감사의 마음 을 전하며, 미처 언급하지 못한 모든 분에게도 감사드립니다. 끝이 아닌 시작임을 되새기며 항상 정진하고 보답하겠습니다.

2021.6,