

# 혼합하중을 받는 선회대 고정볼트의 피로분석에 관한 연구

최동훈\* · 이도남\*\* · 김재훈\*\*\*†

## A Study of Fatigue Analysis for the Turntable Fixing Bolts Subjected to Mixed Load

Dong-Hoon Choi\* · Do-Nam Lee\*\* · Jae-Hoon Kim\*\*\*†

### †Corresponding Author

Jae-Hoon Kim

Tel : +82-42-821-6645

E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr

Received : April 20, 2022

Revised : June 26, 2022

Accepted : October 6, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : In this study, to confirm the effects of the mixed load of normal and shear forces acting on a fixing bolt, fatigue design criteria were developed by varying the loading angle and conducting tensile and fatigue tests. After evaluating and comparing the test results under different loading angles, the evaluation criteria were selected. These evaluation criteria were then applied to develop the design criteria. An Arcan fixture was designed and manufactured to simultaneously apply a mixed load of normal and shear forces to the fixing bolt of a turntable, and a fatigue test was conducted. S-N diagrams for various loading angles were obtained, and a 1% P-S-N diagram of failure probability was determined using statistical processing techniques. Our results show that failures of the fixing bolt can be prevented using these diagrams as a basis for developing fatigue design criteria.

**Key Words** : ARCAN fixture, fatigue test, mobile elevating work platform, reliability assessment, S-N diagram, P-S-N diagram, mixed load

## 1. 서론

일반적으로 선회대란 회전하는 기계장치의 축을 일정한 위치에 고정하고 지지하면서 축을 회전시키는 기능을 하는 기계요소로 건설기계, 중장비, 크레인, 고소작업대 등 다양한 차량과 장비에 널리 사용되고 있으며 선회대 상부에 설치된 어태치먼트(Attachment)의 하중이 차량 구조물에 가해지게 되는데 이를 지지하며 어태치먼트가 원활하게 회전하게 하는 기계요소가 선회대이다. 이같이 선회대는 차체와 어태치먼트를 고정하는 고정볼트에 어태치먼트의 하중과 작업에 따른 충격하중을 복합적으로 지지해야 하기 때문에 혼합하중에 대해 구조적으로 충분한 안정성이 확보되어야 한다<sup>1)</sup>. 혼합하중을 받는 선회대 고정볼트가 장시간 사용에 따라 파손되어 어태치먼트의 넘어짐 등으로 인한 사망사고가 많이 발생하고 있으며 특히, 최근 10년간 고소작업대를 구성하고 있는 각종 부품과 구조물 등의 기계

적 손상에 의한 사고발생건수 42건 중 선회대 고정볼트 결함에 의한 사고건수는 9건으로 21%를 차지하고 있다<sup>2)</sup>. 최근까지 혼합하중에서의 피로균열에 대한 연구내용을 살펴보면 김택영 등은 철도 차륜재에 대한 모드 I 및 혼합모드 하중조건에서 피로파괴시험을 실시하였고<sup>3)</sup>, 광진구 등은 알루미늄 합금을 이용한 십자형 형상의 SPR 접합부 시험편에 대하여 하중각 0, 45, 90도에서의 피로강도를 평가하였으나<sup>4)</sup> 혼합하중을 받는 선회대 고정볼트에 대한 안전성과 피로 파손에 대한 연구는 드문 실정이다. 따라서 안전한 고소작업대를 설계하기 위해서는 선회대 고정볼트의 피로특성을 정량화할 필요가 있다. 본 연구에서는 선회대 고정볼트를 축방향을 기준으로 0°, 22.5°, 45°, 60° 및 90°로 각도를 변화시키면서 인장 및 피로 시험을 하였다. 피로 시험 결과에 대하여 S-N 선도를 도출하였으며 고정볼트에 작용하는 하중방향의 각도별 피로수명 및 특성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

\*한국산업안전보건공단 차장 (Korea Occupational Safety and Health Agency)

\*\*충남대학교 기계공학부 학사과정 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

\*\*\*충남대학교 기계공학부 교수 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

## 2. 재료 및 시험방법

### 2.1 시험재료

본 연구의 인장 및 피로 시험에 사용된 재료는 SCM435의 고장력 볼트로서 고소작업대의 차체와 선회대를 강건하게 고정해주는 역할을 한다. 시험편은 볼트의 호칭지름이 M10인 고장력 볼트를 사용하였고 자세한 형상과 치수는 Fig. 1과 같고, 고장력 볼트의 기계적 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. 고장력 볼트는 그대로 사용하였으며 별다른 가공을 하지 않았다.

### 2.2 시험장치 및 구성

인장 및 피로 시험은 Fig. 2와 같이 10톤 용량의 MTS-10 유압식 만능재료시험기를 사용하여 수행하였다. 고전적인 ARCAN 시험은 복합재료의 혼합 모드 파손을 특성화하는데 주로 사용하였으나<sup>5,6)</sup>, 본 연구에서는 고소작업대의 차체와 선회대를 고정하는 고장력 볼트에 선회대의 크기에 따라 달라지는 하중방향의 각도를 0°에서 90°로 변화시켜 하중을 부가할 수 있도록 ARCAN 고정장치를 제작하였다<sup>7-9)</sup>. 인장하중만을 부가할 경우는 0°, 전단하중만은 90°에 해당되며 Fig. 3은 하중 방향의 각도를 22.5°로 설정하여 로드 프레임에 설치한 ARCAN 고정장치를 보여준다.

또한, 고소작업대의 차체와 선회대를 고정하는 볼트를

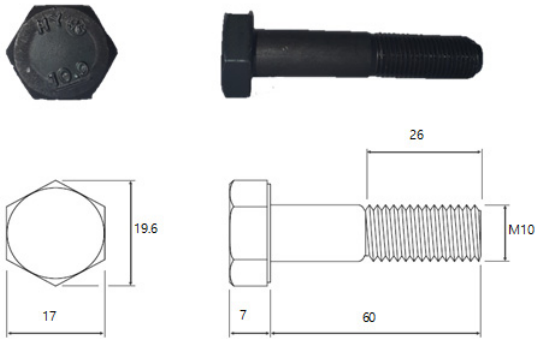


Fig. 1. Shape and dimensions of M10 bolt (unit; mm).

Table 1. Mechanical and physical properties of bolt

Properties	Bolt
Class	10.9
Normal bolt diameter	M10
Thread pitch	1.25
Stress area ( $mm^2$ )	58
Tensile strength (MPa)	1,040
Lower yield strength (MPa)	940
Material	SCM435

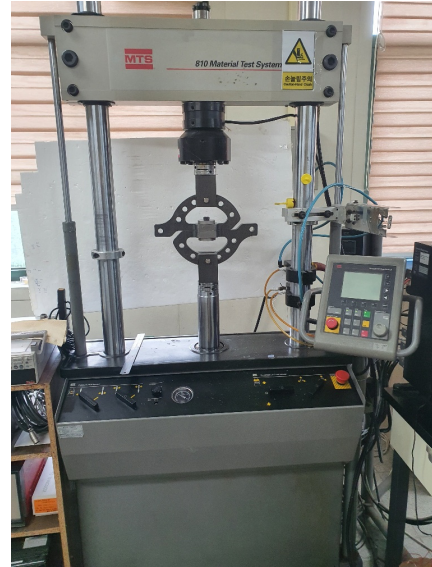


Fig. 2. Material testing machine MTS-810.

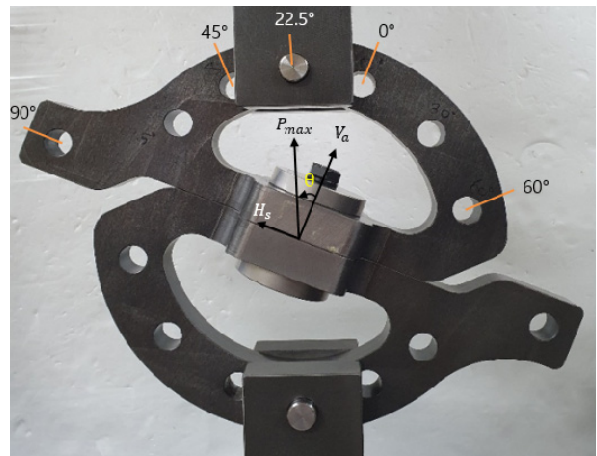


Fig. 3. ARCAN fixture installed in test machine grips.

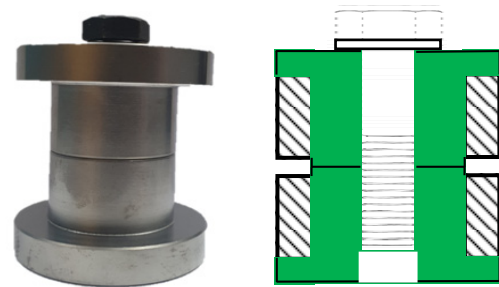


Fig. 4. Bolt and insert configuration.

구현하기 위해 볼트를 체결하는 부재로 인터페이싱 펙 (Interfacing pucks)을 사용하여 고정장치에 설치하였다. 펙은 하중을 고정장치에서 볼트로 전달하며 인서트를 사용하여 동일한 크기의 직경과 길이의 볼트를 설치할 수 있도록 크기를 조정하였다. 모든 펙은 STD-11(냉간

합금공구강)로 제작하였으며 진공열처리를 실시하였다. Fig. 4는 볼트와 인서트 구성의 단면 스케치와 볼트와 인서트를 체결한 실제 찍을 보여준다.

### 2.3 시험방법

인터페이스 찍에 고장력 볼트를 체결할 때 손으로 볼트가 감기지 않을 정도의 볼트 조임(Preload)을 인가하였으며 인장 시험은 고장력 볼트를 인터페이싱 찍에 체결한 후 ARCAN 고정장치를 로드 프레임에 설치하고 하중방향의 각도를 볼트의 축방향을 기준으로 0°, 22.5°, 45°, 60° 및 90°로 기울이면서 각도별 2회씩 실시하였고 시험 속도는 변위 제어를 통하여 1 mm/min의 속도로 실시하였다.

피로 시험은 KS B ISO 3800<sup>10)</sup>에 따라 시험을 진행하였고 인장 시험과 동일하게 6개의 하중방향의 각도로 구분하여 수행하였다. 피로 시험의 조건은 실온에서 일정 진폭의 사인파를 적용하였으며 하중 반복 주파수는 15Hz, 응력비 R=0.1로 가장 취약한 인장파괴에서 발생할 수 있도록 인장-인장 하중 제어 방식으로 수행하였다. S-N 선도의 경사부를 결정하기 위해서 최대 응력값과 극한강도의 비율을 조절하면서 각 하중 각도별 7단계로 시험을 수행하였다. 또한, JSME-S002<sup>11)</sup>에서 제시한 통계적 기법에 따라 파괴확률 50%의 P-S-N 선도와 파괴확률 1%, 10%, 90% 99%의 P-S-N 선도를 작성하였다.

### 2.4 P-S-N 선도의 결정

JSME-S002에서 제시한 통계적 기법을 따라 50% 파괴 확률은 식 (1)로 표현된다.

$$\overline{\log N} = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \overline{\log S} \quad (1)$$

여기서  $\hat{\alpha}_2$ ,  $\hat{\beta}_2$ ,  $\overline{\log N}$ ,  $\overline{\log S}$ 는 식 (2)~(5)로 부터 구할 수 있다.

$$\hat{\alpha}_2 = \overline{\log N} - \hat{\beta}_2 \overline{\log S} \quad (2)$$

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\log S_i - \overline{\log S})(\log N_i - \overline{\log N})}{\sum_{i=1}^n (\log S_i - \overline{\log S})^2} \quad (3)$$

$$\overline{\log N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \quad (4)$$

$$\overline{\log S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log S_i \quad (5)$$

P-S-N 선도는 식 (6)과 같고,

$$\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S \pm K \hat{\sigma}(\log N) \quad (6)$$

$\hat{\sigma}(\log N)$ 는 식 (7)로 표현된다.

$$\hat{\sigma}(\log N) = \left[ \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \{ \log N_i - (\hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S_i) \}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

여기서,

$\hat{\alpha}_2$  : 양 대수 좌표에서 S-N 선도의 절편을 나타내는 계수

$\hat{\beta}_2$  : 양 대수 좌표에서 S-N 선도의 기울기를 나타내는 계수

$\overline{\log N}$  : 실험 결과로서 파단 수명의 평균값

$\overline{\log S}$  : 적용 응력의 평균값

$\hat{\sigma}(\log N)$  : 파단 수명의 표준편차값

$K$  : 파괴확률에 따라 결정되는 상수

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 인장 시험 결과

인장 시험은 고장력 볼트를 인터페이싱 찍에 체결하고 0°, 22.5°, 45°, 60° 및 90°로 인장하중 각도를 변화시키면서 각도별 2회씩 총 10회 진행되었으며 Fig. 5는 시험 결과로서 볼트의 응력-변위 선도를 나타낸다.

고장력 볼트를 하중 각도 0°로 시험한 경우에 인장강도가 가장 높은 1,254 MPa, 90°인 경우에는 681 MPa로 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 하중 각도가 0°에서

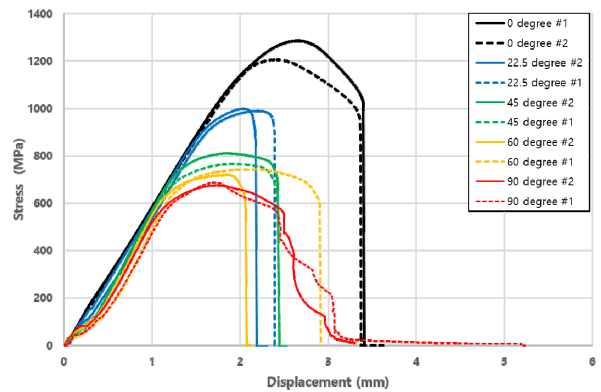


Fig. 5. Total stress–displacement diagrams of bolts.

90°로 커질수록 인장 강도가 낮아지는 경향을 보였다. 하중에 따른 변위는 하중 각도가 0°으로 인장 하중만이 작용하는 경우와 볼트에 전단 하중만이 작용하는 하중 각도가 90°인 경우에 변위값이 크게 나타남을 확인하였다.

### 3.2 피로 시험 결과

고장력 볼트에 대한 S-N 선도를 작성함에 있어서 본 연구에서는 가해진 인장하중에 대한 볼트의 골지름으로 나눈 최대응력을 기준으로 피로 시험 결과를 정리하였다. 피로시험은 하중 반복 주파수는 15 Hz, 응력비 R=0.1로 하였다. Figs. 6은 볼트에 하중방향의 각도인 0°, 22.5°, 45°, 60° 및 90°에 대한 피로 시험 결과를 응력과 파단 수명의 관계를 나타낸 것이다. 추세선을 그릴 때 볼트가 파단되지 않고 1,000,000 cycles를 초과하여 무한 수명으로 판정한 결과 값은 제외하였다. 추세선의 신뢰도 값인  $R^2$ 을 살펴보면 하중 각도가 0°일 때 0.9464, 22.5°는 0.9858, 45°는 0.9201, 60°는 0.9907 그리고 90°는 0.8888으로 상당히 높은 신뢰도를 가지는 S-N 선도를 작성하였음을 확인하였다. 각 하중 각도별 추세선과  $R^2$ 의 값을 정리하여 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 실제 극한강도에 대한 피로강도의 비율은 인장강도보다 전단강도 값이 더 크다고 알려져 있으며<sup>12)</sup>, 본 연구를 통하여 볼트의 하중방향의 각도에 대한 응력과 파단 수명의 관계인 S-N 선도에서도 하중방향의 각도가 커질수록 피로강도가 증가하여 피로 수명이 향상되고 있다. 하중 각도가 0°인 경우는 볼트에 인장 하중만 작용하고, 90°인 경우에 전단하중만이 작용한다. 그리고 하중방향의 각도가 22.5°, 45°, 60°로 증가할수록 인장하중보다 전단하중의 비율이 높아지며 볼트에 축방향으로 인장하중만이 작용하는 경우에 대한

Table 2. Trend lines from fatigue tests for each loading angles

Loading angles	Trend line (MPa)	$R^2$
0°	$\sigma = 4,499.2 \times N_f^{-0.192}$	0.9464
22.5°	$\sigma = 5,142.2 \times N_f^{-0.19}$	0.9858
45°	$\sigma = 1,013.9 \times N_f^{-0.055}$	0.9201
60°	$\sigma = 1,065.2 \times N_f^{-0.062}$	0.9907
90°	$\sigma = 928.89 \times N_f^{-0.038}$	0.8888

볼트의 나사산에 균열이 발생하면 하중 모드가 Mode I (Opening)에서 하중방향의 각도가 증가할수록 Mode II (In-plane shear)의 비율이 증가하기 때문에 피로수명이 증가하고 있다.

### 3.3 피로 시험 결과의 통계적 처리

피로 시험 결과의 통계적 처리는 식 (6)을 이용하여 파괴확률에 따른 P-S-N 선도를 결정할 수 있다. 식에서  $K$ 는 확률지의 시험시료 및 파괴확률에 따른 계수로서 파괴확률 1%, 99%는  $\pm 2.33$ 이고, 파괴확률 10%, 90%는  $\pm 1.28$ 로서 나타낼 수 있다<sup>13,14)</sup>. 하중 각도에 따른 피로 수명에 대한 결과는 Figs. 7에서 나타내고 있다. 가는 점선은 파괴확률 1%의 선이고, 실선은 10%의 선, 점선은 50%의 선, 일점 쇄선은 90%의 선이며 이점 쇄선은 파괴확률 99%의 P-S-N 선도를 나타낸다. 피로 시험 결과 파괴확률에 대한 S-N 선도의 기울기를 Basquin 식으로 표현한 후 무한수명을  $N_f=10^6$  cycles로 가정할 경우 파괴확률에 따른 피로강도를 구하고 정리하여 Table 3에 나타내었다. 파괴확률이 50% 이하인 경우는 하중방향의 각도가 증가할수록 피로강도가 증가하였다. 또한, 피로 시험 결과로부터 낮은 파괴확률을 갖는 P-S-N 선도를 도출하여 선회대 고정볼트에 대한 설계 피로선도에 적용하면 고정볼트 파괴에 따른 사고를

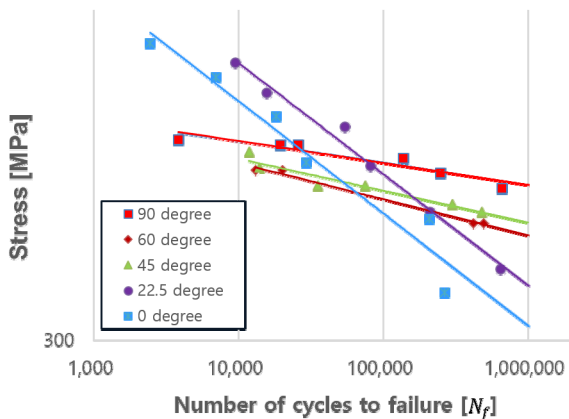


Fig. 6. Total stress–number of cycles to failure diagrams according to loading angles.

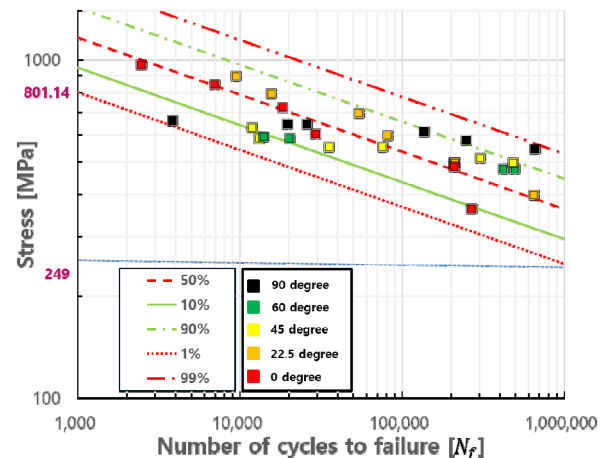


Fig. 7. Total P–S–N curves according to loading angles.

Table 3. The fatigue limit according to failure probability

Failure probability	Fatigue limit (MPa)				
	Loading angle				
	0°	22.5°	45°	60°	90°
1%	16	156	422	397	494
10%	93	197	438	414	519
50%	197	253	459	434	539
90%	301	309	481	454	561
99%	378	350	496	471	584

예방할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구결과로부터 얻은 하중방향의 각도에 따른 파괴확률 1% P-S-N 선도는 고정볼트의 피로강도기준으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.4 피로 시험 결과에 의한 설계기준 도출

Fig. 6의 S-N 선도를 살펴보면, 저주기 부분에서는 전단하중에 의한 피로 한도의 영향이 크고 고주기로 가면 갈수록 수직하중에 의한 피로 한도의 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 전단하중의 영향을 받는 60°에 해당하는 선도와 수직하중의 영향을 받는 0°에 해당하는 선도가 교차하는 지점인 66,680 cycles을 기준으로 전단과 수직하중의 영향이 나누어지고 있다. 따라서 수직과 전단의 혼합 하중에 대한 영향을 고려한 S-N 선도를 그리면 Fig. 8과 같은 선도를 얻었다. Fig. 8을 살펴보면, 반복 횟수가 1,000 cycles인 경우 응력값은 694 MPa, 반복 횟수가 1,000,000 cycles인 경우 응력값은 317 MPa이며 두 선도의 교차점인 66,680 cycles을 기준으로 전단과 수직하중의 영향이 나누어지고 있다.

또한, JSME S002에서 제시한 통계적 기법에 따라 전체 하중 각도에 대한 파괴확률 50%의 S-N 선도와 파괴확률 1%, 10%, 90% 및 99%의 S-N 선도를 Fig. 7과 같이 작성하였다. Fig. 7을 살펴보면, 하중 각도에 따른 피로 시험 결과가 파괴확률 1%와 99% 선내에 밀집함을 확인하였다. 이 중 가장 낮은 파괴확률 1%에 해당하는 S-N 선도는 반복 횟수 1,000 cycles인 경우 응력값이 801.14 MPa이고 반복 횟수가 1,000,000 cycles인 경우 응력값이 249 MPa임을 확인하였다. 즉, 파괴확률 1%에 해당하는 S-N 선도를 혼합 하중이 작용하는 선회대 고정볼트에 대한 피로 설계 기준으로 적용하면 볼트의 파손을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 8과 같은 피로 시험 결과를 바탕으로 도출한

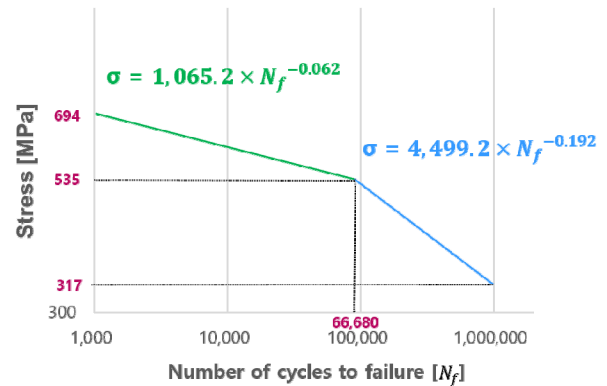


Fig. 8. S-N curves considering the effect of mixed load.

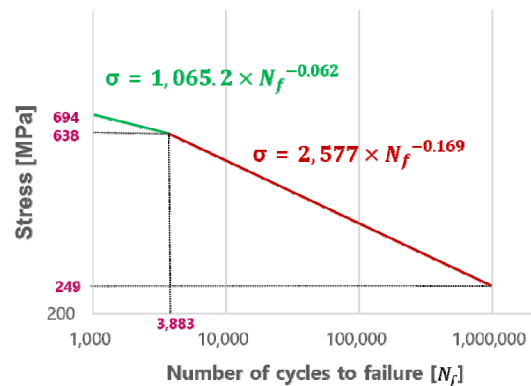


Fig. 9. Fixing bolt design standard S-N curve based on fatigue test results.

설계 기준과 Fig. 6과 같이 통계적 처리 기법을 바탕으로 도출한 설계 기준을 모두 만족하는 Fig. 9와 같은 선도를 구하였다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 반복 횟수가 1,000~3,883 cycles 구간은 전단하중의 영향을 받고 있음을 알 수 있고, 3,883 cycles 이후는 통계적 기법에 의해 구해진 S-N 선도의 영향을 받고 있음을 확인하였다.

즉, 도출된 결과를 종합하면 혼합 하중이 작용하는 선회대 고정볼트 설계기준을 Fig. 9의 S-N 선도로 적용하면 피로 파손을 예방할 수 있으며 설계기준으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 고찰

선회대 고정볼트의 하중방향의 각도에 따른 피로 수명의 영향을 살펴보기 위하여 M10인 고장력 볼트에 대하여 ARCAN 고정장치를 사용하여 인장 및 피로 시험을 수행하였으며 무한수명 10<sup>6</sup>회 기준으로 파괴확률 1%, 10%, 50%, 90% 및 99%에 따른 피로강도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고장력 볼트의 하중방향의 각도가 0°에서 90°로 커질수록 인장 강도가 낮아지고 있다. 하중에 따른 변위는 하중방향의 각도가 0°으로 인장 하중만이 작용하는 경우와 전단 하중만이 작용하는 하중 각도가 90°인 경우에 변위값이 크게 나타나고 있다.

(2) 볼트의 하중방향의 각도별 응력과 파단 수명의 관계인 S-N 선도에서도 하중방향의 각도가 커질수록 피로강도가 증가하여 피로 수명이 향상된다. 이는 하중방향의 각도가 0°에서 90°로 증가할수록 인장하중보다 전단하중의 비율이 높아지며 나사산에 작용하는 하중 모드가 Mode I (Opening)에서 하중 각도가 증가할수록 Mode II (In-plane shear)의 비율이 증가하기 때문이라고 판단된다.

(3) 설계 · 제작한 ARCAN 고정장치를 이용한 피로 시험에서 하중방향의 각도가 증가할수록 피로강도가 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 파괴확률 1%에 해당하는 S-N 선도를 혼합 하중이 작용하는 선회대 고정볼트에 대한 피로 설계 기준으로 적용하면 볼트의 파손을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 도출된 결과를 종합하면 혼합 하중이 작용하는 선회대 고정볼트 설계기준을 Fig. 9의 S-N 선도로 적용하면 고정볼트 파괴에 따른 안전사고를 효과적으로 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- 1) H. S. Seo, H. J. Lee and T. S. An, "Structural Stability Evaluation for Special Vehicle Slewing Bearing using Finite Element Analysis", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22, No. 1, pp. 511-519, 2021.
- 2) D. H. Choi and J. H. Kim, "A Fatigue Failure Analysis of Fractured Fixing Bolts of Mobile Elevated Work Platforms using Finite Element Methods", J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 5, pp. 1-8, 2020.
- 3) T. Y. Kim, M. S. Lee, I. D. You and H. K. Kim, "Fatigue Crack Growth Rates of a Railway Wheel Steel under Mixed Mode Loading Conditions", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 4, pp. 8-13, 2013.
- 4) J. G. Kwak, S. H. Kang and H. K. Kim, "Fatigue Strength Evaluation of Self-Piercing Riveted Al 5052-H32 Joints under Mixed Mode Loading Conditions", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 3, pp. 1-7, 2016.
- 5) M. Arcan, Z. Hashin and A. Voloshin, "A Method to Produce Uniform Plane Stress States with Applications to Fibre- Reinforced Materials", Experimental Mechanics, Vol. 18 No. 14, pp. 141-146, 1978.
- 6) S. C. Yen, J. N. Craddock and K. T. The, "Evaluation of a Modified Arcan Fixture for the In-plane Shear Test of Materials", Experimental Techniques, Vol. 12, No. 12, pp. 22-25, 1988.
- 7) D. J. dos Santos and G. F. Batalha, "Failure Criterion for Adhesively Bonded Joints Using Arcan's Experimental Method", Plomeros, Vol. 24, No. 4, pp. 441-445, 2014.
- 8) G. M. Peace, C. Tao and H. E. Yong, "A modified Arcan Test for Mixed-mode Loading of Bolted Joints in Composite Structures", 21st International Conference on Composite Materials, 2017.
- 9) B. E. Steeve and R. J. Wingate, "Aerospace Threaded Fastener Strength in Combined Shear and Tension Loading", NASA/TM-2012-217454, 2012.
- 10) KS B ISO 3800, "Threaded Fasteners-axial Load Fatigue Testing-test Methods and Evaluation of Results", 2009.
- 11) JSME S002, "Standard Method of Statistical Fatigue Testing", 1994.
- 12) J. Wang, B. Uy, D. Li and Y. Song, "Fatigue Behaviour of Stainless Steel Bolts in Tension and Shear under Constant-amplitude Loading", International Journal of Fatigue, Vol. 133, pp. 105-110, 2020.
- 13) K. S. Kim, S. H. Boo, C. Y. Park, Y. G. Cho and J. S. Lee, "An Experimental Study on the Tensile and Fatigue Strengths of SUS304L Lap Joint Weld at the Cryogenic Temperature", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 96-102, 2008.
- 14) J. H. Choi, J. M. Koo, C. S. Seok and W. K. Song, "Evaluation of Fatigue Life Characteristic of a Real Water Pipe using the Probability Density Function", Trans. Korean Society Mechanical Engineers A, Vol. 39, No. 9, pp. 707-712, 2008.