

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.11.979>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 고속열차용 트리포드 축의 비틀림 해석 및 파단에 대한 실험적 연구

이주홍\* · 김도식\* · 남태연\* · 이태영\*\* · 조해용\*\*\*†

\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터, \*\* KATEM, \*\*\* 충북대학교 기계공학부

### Experimental Investigation on Torsional Analysis and Fracture of Tripod Shaft for High-speed Train

Joo Hong Lee\*, Do Sik Kim\*, Tae Yeon Nam\*, Tae Young Lee\*\*  
and Hae Yong Cho\*\*\*†

\* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials,  
\*\* KATEM, \*\*\* Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk Nat'l Univ.

(Received June 27, 2016 ; Revised August 10, 2016 ; Accepted August 27, 2016)

**Key Words:** Tripod Shaft(트리포드 축), Fatigue Life(피로수명) Torsional Fatigue(비틀림 피로), Hysteresis Loop(히스테리시스 곡선), Torsional Fracture(비틀림 파단)

**초록:** 등속조인트의 일종인 트리포드 축은 동력전달용으로 고속열차의 KTX와 KTX-산천에 모두 적용되고 있으며, 동력대차에서 모터 감속장치(MRU)와 차축 감속장치(ARU)를 연결해 고속회전동력을 전달하는 핵심 요소이다. 축 방향의 미끄럼 운동이 가능한 트리포드 축은 열차 구동을 위한 토크를 전달하며, 동력전달 시스템에 과토크 발생 시 축의 퓨즈부가 절단되어 동력을 차단한다. 본 연구에서는 리니어 액추에이터를 이용한 대용량 비틀림 시험장치의 개발과 이를 이용한 트리포드 축의 정적 비틀림 강도와 피로수명을 확인하고자 하였다. 또한 구조해석을 통해 축의 취약부를 파악하고 비틀림 피로해석 결과와 실제 피로시험의 결과를 비교분석하여 비틀림 성능 개선을 위한 설계안을 제시하고자 하였다. 한편 트리포드 축의 피로에 따른 열화를 파악하기 위해 히스테리시스 곡선을 이용하였으며, 히스테리시스 곡선의 기울기 변화를 통해 피로고장 시점을 확인하였다.

**Abstract:** The tripod shafts of constant-velocity joint are used in both the trains KTX and KTX-sanchon. It is an important component that connects the motor reduction unit and the axle reduction unit in a power bogie. The tripod shaft not only transmits drive and brake torque in the rotational direction, but also slides in the axial direction. If the drive system is loaded with an excessive torque, the fuse part of the shaft will be fractured firstly to protect the other important components. In this study, a rig was developed for conducting torsion tests on the tripod shaft, which is a type of mechanical fuse. The tripod shafts were subjected to torsional fracture test and torsional fatigue test on the rig. The weak zone of the tripod shaft was identified, and its fatigue life was predicted using finite element analysis (FEA). After analyzing the FEA results, design solutions were proposed to improve the strength and fatigue life of the tripod shaft. Furthermore, the deterioration trend and time for failure of the tripod shaft were verified using the hysteresis loops which had been changed with the advancement of the torsional fatigue test.

#### 1. 서론

철도 시스템은 다른 육상교통수단에 비해 정시

성, 대량성, 신속성 및 고효율 등의 장점을 가지며, 300 km/h가 넘는 속도로 여객을 실어나르는 KTX와 KTX-산천은 우리의 생활패턴을 변화시키고 있다. 또한, 최고 속도 430 km/h인 차세대 고속열차 개발이 진행 중에 있으며 머지않아 상용

† Corresponding Author, [hycho@chungbuk.ac.kr](mailto:hycho@chungbuk.ac.kr)

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

화될 예정이다.

이와 같은 고속 운송시스템에서 회전동력을 전달하는 축은 충분한 강성과 특히 고속 회전 시 진동, 소음 등이 없고 안정적인 동력전달이 중요하다. Lee 등<sup>(1)</sup>은 항공기 엔진의 동력전달을 위한 PTO 샤프트의 고속회전 시험장치의 개발과 고속으로 회전하는 축의 2축 피로시험 등에 관한 연구를 했다. Kim 등<sup>(2)</sup>은 고속으로 운행되는 한국형 고속열차에서 트리포드 축에 전달되는 실부하 축정시스템에 관하여 연구하였다. 고속철도 차량의 모터감속장치는 고속의 회전동력을 발생하고 동력을 전달하는 핵심장치로, Lee 등<sup>(3)</sup>은 이 모터감속구동장치의 상태 모니터링 연구를 통해 고속주행에서의 열차 상태를 확인할 수 있는 연구를 했으며, Jung 등<sup>(4)</sup>은 고속열차 내 구조물의 가속수명시험을 위하여 S-N 선도 추정 방법 등을 연구하였다. 또한 Ji 등<sup>(5)</sup>은 고속 철도차량의 구동시스템의 진동특성분석을 통해 감속구동장치 내의 이상을 진단하는 방법 등을 연구하였다. 이처럼 고속 회전체와 고속열차에 대한 연구는 많이 있었지만, 고속열차용 트리포드 축의 개발을 위한 연구나 축의 비틀림 강도 및 피로수명에 대한 기초적인 시험 자료는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 대용량의 비틀림 시험장치를 개발하고, 이를 이용하여 소재 등이 변경(AISI 4340 → AISI 4140)된 신규 트리포드 축의 비틀림 파단 및 피로시험에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 구조해석을 통해 얻은 결과와 실제 비틀림 시험결과를 이용해 고속열차용 트리포드 축의 설계 요구사항을 만족하는 설계안을 제시하고자 하였다.

## 2. 동력전달구조 및 트리포드 축

### 2.1 고속열차의 동력전달구조

KTX와 KTX-산천의 동력대차는 열차의 맨 앞과 뒤의 동력차량에 위치하며, 열차 한 편성당 6대가 설치된다. 동력대차는 2쌍의 감속구동장치로 이루어지며, 이 감속구동장치는 Fig. 1에서와 같이 회전력을 발생하는 구동모터와 1차, 2차 감속장치, 그리고 이 두 감속장치를 연결해 주는 트리포드 축 등으로 구성된다. KTX와 KTX-산천의 감속구동장치 외형은 약간 다르지만 구조는 같으며, 이 감속구동장치의 설계수명은 60만 km/년, 30년<sup>(6)</sup>으로 알려져 있다. 하지만, KTX는 짧은

Table 1 Design requirements of tripod shaft

Motor power	1,130 kW
Motor speed at 300 km/h	3,789 rpm
Gear ratio of MRU	1.89
Tripod shaft speed at 300 km/h	2,002 rpm
Torque at fuse breaking	< 43.5 kNm
Torsional fatigue life	3×10 <sup>5</sup> cycles @ ±13.5 kNm

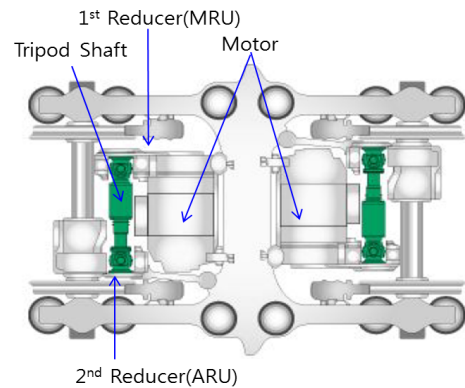


Fig. 1 Structure of power bogie for KTX

역간 거리와 급 곡선구간에서는 잦은 가감속이 이루어지며, 이것은 감속구동장치 내 구성품의 수명을 단축시키는 원인이 된다.

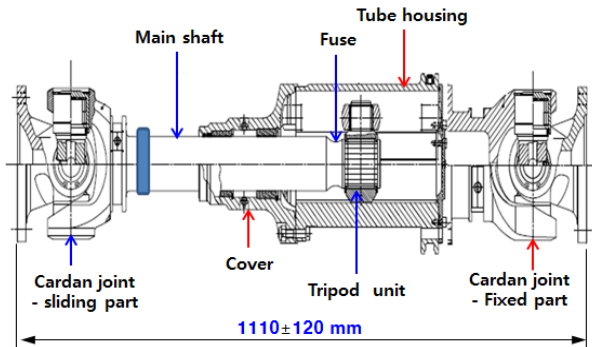
트리포드 축은 KTX에 12개가 설치되고, 동력대차의 감속구동장치에서 모터 감속장치(MRU)와 차축 감속장치(ARU) 사이에 조립되어 구동토크와 제동토크를 전달한다. 열차의 비상제동 시에는 트리포드 축에 상용제동 때보다 큰 15 kN의 제동력이 전달된다.<sup>(2)</sup> 또한, 트리포드 축에 과토크가 전달되면 모터 블록 등을 보호하기 위해 주축의 퓨즈부가 단락되어 동력이 차단되며,<sup>(6)</sup> 그 설계 요구사항을 Table 1에 나타내었다. 트리포드 축은 동력을 차단하는 방식에 따라 KTX에 사용되는 축의 퓨즈부를 이용한 기계식 차단방식과 KTX-산천의 유압식 차단방식으로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 기계식 차단방식의 트리포드 축의 비틀림 파단 및 피로에 대하여 다루고자 하였다.

### 2.2 트리포드 축 구조

트리포드 축은 대차와 수직, 수평 및 회전 상대운동을 하면서 1차 감속기의 구동토크 및 제동토크를 2차 감속기에 전달하는 역할을 한다. KTX에 사용된 트리포드 축은 전체 길이가 1,110

**Table 2** Mechanical properties of AISI 4140 & AISI 4340

Item	AISI 4140	AISI 4340
Yield Strength (MPa)	>833	>900
Ultimate Strength (MPa)	>980	1,100~1,300
Modulus of Elasticity (GPa)	>210	>208
Temperature & Time at Quenching	4.5h @ 870 °C	-
Temperature & Time at Tempering	7h @ 560 °C	-
Hardness (HB)	285~352	248~255

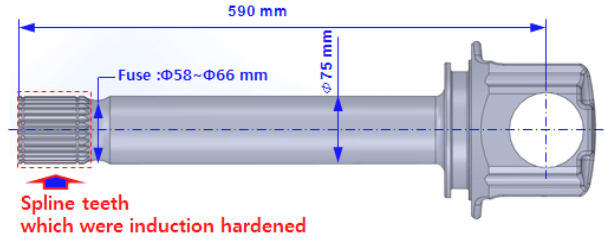


**Fig. 2** Tripod shaft components

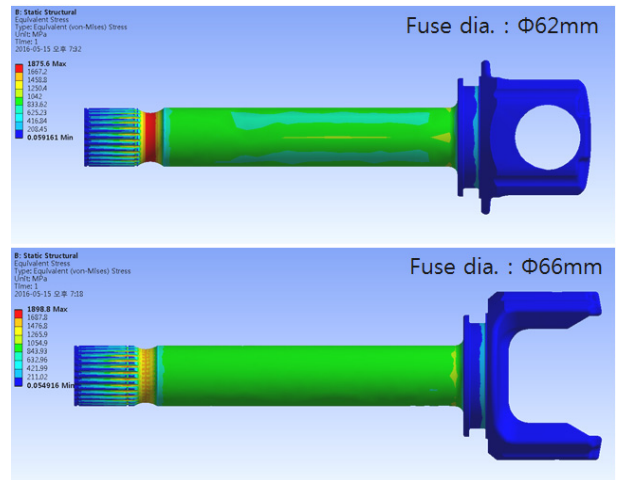
± 120 mm로 크게 2개의 부분으로 구성된다. 하나는 1차 감속장치에 결합되는 미끄럼 조인트부이고, 다른 하나는 2차 감속장치에 결합되는 고정 조인트부이다.

미끄럼 조인트 부는 카단 조인트와 퓨즈부를 포함한 주축, 그리고 트리포드 유니트로 구성된다. 한편, 고정 조인트 부는 카단 조인트, 120°의 각도로 내부가 가공된 튜브 하우징 그리고 커버로 구성된다. 이 튜브 하우징 내부를 트리포드 유니트가 미끄러지며 회전토크를 전달하므로, 열차가 곡선지역을 통과할 때 대차의 축 방향 길이 변화에 대해 모터의 회전력을 차축에 전달하게 된다. 트리포드 축의 구조를 Fig. 2에 나타내었다.

본 논문의 연구대상인 트리포드 주축 재료는 AISI 4140이고, 기존 KTX에서 사용 중인 축의 재료는 AISI 4340으로 주요 기계적 물성치를 Table 2에 나타내었다. 표에서와 같이 AISI 4140의 기계적 강도를 증가시키기 위해 축의 원재료를 단조가공 후 담금질과 뜨임처리 했으며, 스플라인 치저부의 표면경도와 피로강도를 높이기 위하여 Fig. 3에서와 같이 고주파 열처리<sup>(7)</sup>하였다.



**Fig. 3** Dimensions of tripod main shaft



**Fig. 4** Analysis results of each main shafts under static torsional fracture condition

### 3. 유한요소 해석 및 고장사례 분석

#### 3.1 유한요소 해석

트리포드 축의 3D 모델링과 유한요소해석을 위해 ANSYS Workbench를 이용하였으며, 트리포드 축의 퓨즈부가 있는 주축만을 이용하여 비틀림 해석을 하였다. 퓨즈부의 크기는 Φ62 mm와 Φ66 mm로 각각 모델링하여 정적 비틀림 해석과 피로수명 해석을 진행하였다.

정적 비틀림 해석을 위해 주축 홀의 안쪽 면을 구속하고 스플라인 면에 정적 비틀림 토크인 43.5 kNm를 인가하였다. 이때 트리포드 축에 걸리는 비틀림 응력은 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (1)$$

여기서 T는 적용토크, d는 축 직경을 나타낸다. 정적 비틀림 해석 결과를 Fig. 4에 나타냈었다. 해석결과, 퓨즈부 Φ62 mm인 축은 퓨즈부의 직경이 가장 작은 부분에서 1875.6 MPa의 응력이 발생하였고, 따라서 퓨즈부가 먼저 파단될 것으로

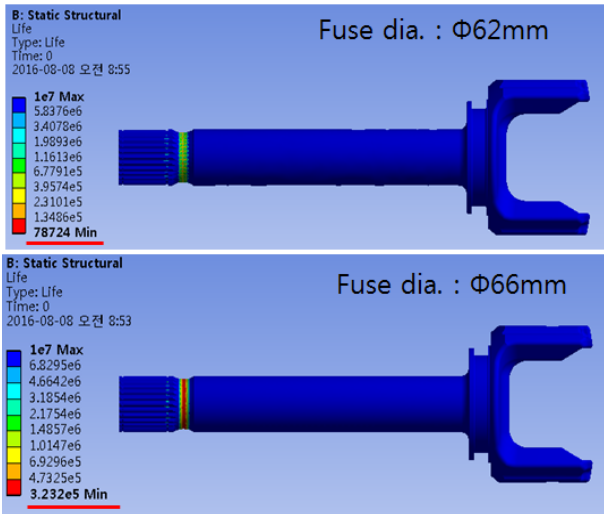


Fig. 5 Analysis results of each main shafts in the torsional fatigue

예상된다. 하지만 퓨즈부가  $\phi 66$  mm인 축은 최대 응력이 스플라인 치저부에서 1898.8 MPa 발생하였으며, 퓨즈부 응력은 파단응력 이하로 나타났다. 따라서  $\phi 66$  mm의 축은 퓨즈 역할을 못하기 때문에 부적합하다는 것을 알 수 있다.

반복적인 비틀림으로 인하여 축이 결국엔 파괴에 이르며, 이는 Palmgren-Miner's rule의 누적손상 이론에 의해 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots \geq 1 \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 일정한 응력진폭이 가해진 반복 사이클 횟수이고,  $N$ 은 응력에 따른 피로 수명을 나타낸다. 식 (2)에서 일련의 파괴 손상률의 합이 1이거나 1이상이면 파괴가 발생하게 된다.

트리포드 주축의 비틀림 피로 해석의 방법은 주축 홀의 안쪽 면을 구속하고, 반대쪽 트리포드 유니트와 조립되어 토크를 전달하는 스플라인 표면에 13.5 kNm의 토크를 인가한다. 부하는 완전 양진(fully reversed)의 반복 부하를 인가하고, 피로수명은 등가응력을 이용하여 계산한다. 한편, 평균 응력 이론식은 Goodman 식을 적용하며 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_a}{(1 - \sigma_m/\sigma_u)} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_a$ 는 응력 진폭,  $\sigma_m$ 은 평균응력이고,  $\sigma_u$ 는 재료의 최대응력이며,  $\sigma_{eq}$ 는 등가응력을 나

타낸다.

퓨즈부의 크기 별로 각각 비틀림 피로 해석을 진행하였으며, 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해석결과 퓨즈부가  $\phi 62$  mm인 축의 비틀림 피로 수명은  $7.8 \times 10^4$  사이클, 퓨즈부가  $\phi 66$  mm인 축은  $3.2 \times 10^5$  사이클로 계산되었고, 비틀림 피로 역시 퓨즈부에서 파단이 일어날 것이라는 것을 알 수 있다.

### 3.2 현장 고장사례 분석

고속열차에 사용되는 트리포드 축이 파단되던 열차에 동력이 전달되지 않게 되어 최악의 경우 열차가 정지하게 된다. 또한 구동 시스템에 과토크 발생 시, 퓨즈부가 파단되지 않으면 열차 구동계통에 심각한 문제를 초래할 수 있다.

동력대차의 모터 감속기를 통해 트리포드 축에 전달되는 평균 토크는 약 5.4 kNm, 최대 기동 토크는 약 12.2 kNm이다. 한편, 트리포드 축의 퓨즈부 파단 토크는 43.5 kNm이므로 안전율은 약 3.5이다. 하지만 KTX 개통 초기 운행 중 다수의 트리포드 축이 분해점검주기인 180만 km에 훨씬 못 미치는 시기에 퓨즈부 근처에서 파단되는 현상이 발생하였다.

파단된 트리포드 축을 조사한 결과 Fig. 3의 스플라인 기어 가공부에서 파단이 시작해 중심부로 피로가 누적되어 파단된 것으로 밝혀졌다. 이는 스플라인 치저 홈 부위에 응력집중이 1차 원인이고 재료의 강도부족과 같은 복합적인 원인에 의한 것으로 결론 났다. 이후 스플라인 잇수를 늘리는 방안 등으로 응력 집중을 해소시켰으며, 이로 인해 축의 파단사례를 줄일 수 있었다.<sup>(8,9)</sup>

## 4. 시험장치 개발

비틀림 시험장치는 트리포드 축의 파단 토크 43.5 kNm 이상의 토크와 이때의 비틀림 회전각을 만족시켜야 하며, 축의 비틀림 각( $\theta$ )은 식 (4)를 이용해 구할 수 있다.

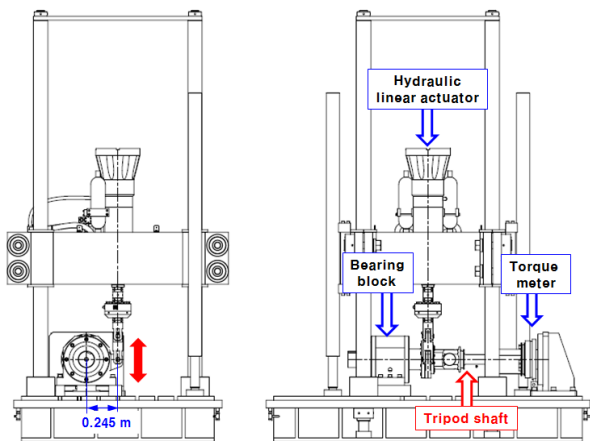
$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (4)$$

여기서,  $L$ 은 축의 길이,  $G$ 는 횡탄성계수,  $J$ 는 극관성 모멘트를 나타낸다.

비틀림 피로 시험의 사이클 주기 2 Hz의 반복 속도를 만족하기 위해 직선형 서보 액추에이터를

**Table 3** Torque-meter specifications

Item	Specification
Model name	HBM T10FM
Rated torque	45 kNm
Linearity Error	≤ 0.1 %
Repeatability	≤ ±0.02%



**Fig. 6** Torsional test rig

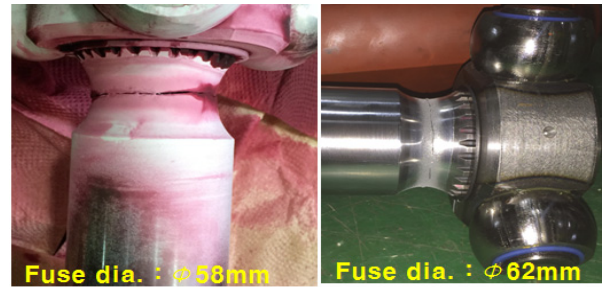
이용하였다. 서보 액추에이터는 유압식으로 최대 인장-압축력은 196 kN이며, 트리포드 축 중심에서 서보 액추에이터 중심까지의 거리는 0.245 m로 설정하였다. 따라서 비틀림 시험장치의 최대 인가가능 토크는 48.02 kNm로 트리포드 축의 파단 토크 이상을 만족하도록 설계하였다.

비틀림 시험장치는 트리포드 축을 실제 열차의 장착상태와 유사하게 Fig. 6과 같이 수평으로 설치하도록 설계하였다. 그림에서와 같이 트리포드 축의 고정 카단 조인트 부를 토크미터와 고정치구 사이에 연결하였으며, 시험에 사용된 토크미터의 사양을 Table 3에 나타내었다. 또한, 미끄럼 카단 조인트 부는 외팔보 형태의 플랜지와 회전이 자유로운 베어링 블록에 조립하였고, 외팔보의 끝을 서보 액추에이터와 핀으로 연결하여 서보 액추에이터의 인장-압축력이 트리포드 축에 비틀림 응력을 발생시키도록 하였다.

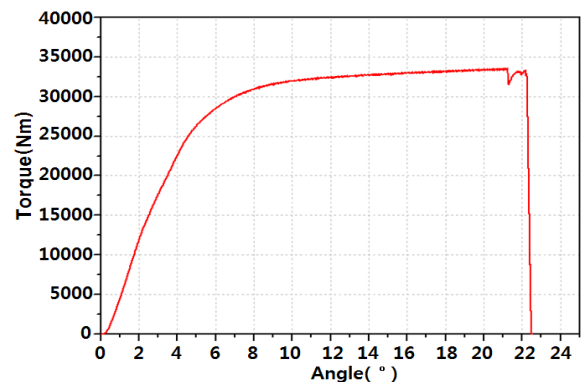
## 5. 시험 및 고찰

### 5.1 정적 비틀림 시험

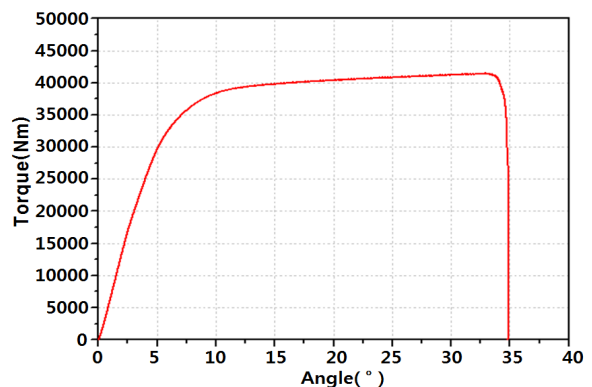
트리포드 축의 정적 비틀림 시험은 실내 환경에서 축의 비틀림 속도를 360°/min 이하로 시험하였으며, 퓨즈부의 직경이 다른 3개의 제품에



**Fig. 7** Fuse fractures after static torsional test



**Fig. 8** Torsional fracture graph(fuse  $\phi$ 58 mm)



**Fig. 9** Torsional fracture graph(fuse  $\phi$ 62 mm)

대하여 각각 진행하였다.

퓨즈부가  $\phi$ 58 mm와  $\phi$ 62 mm인 제품은 Fig. 7과 같이 퓨즈부의 직경이 가장 작은 부분에서 파단 되었다. 하지만 두 종류의 축 모두 파단 토크 요구 사양인 43.5 kNm를 만족하지 못 하였다. 퓨즈부가  $\phi$ 66 mm인 축은 비틀림 토크가 44.5 kNm까지 파단이 이루어지지 않았으며, 설치된 토크미터의 용량을 초과하여 파단시키지 못 하였다. 퓨즈부  $\phi$ 58 mm와  $\phi$ 62 mm의 정적 비틀림 시험 결과 그래프를 Fig. 8-9에 각각 나타냈으며, Table 4에 정적 비틀림 시험결과를 요약하였다.

정적 비틀림 파단 시험 결과, 퓨즈부  $\Phi 62$  mm와  $\Phi 66$  mm의 축 모두 고속열차의 파단 요구조건을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 파단 시험결과를 통해 얻은 축의 비틀림 파단 응력을 활용해 추가 구조해석을 하였다. 퓨즈부의 파단 설계요구 조건인 43.5 kNm를 만족하기 위해 3.1절과 동일한 해석조건을 적용하였으며, 퓨즈부의 직경을 바꿔가면서 해석을 하였다. 그 결과, 퓨즈부의 직경이 63.5 mm에서 안전율이 0.99로 계산되었고, 따라서 퓨즈부의 직경으로 적정함을

확인하였다. 이에 대한 추가 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

5.2 비틀림 피로 시험

비틀림 피로 시험은 퓨즈부가  $\Phi 62$  mm와  $\Phi 66$  mm인 2종류의 트리포드 축에 대해 진행하였다. 시험방법은 실내 환경에서 비틀림 토크 13.5 kNm를 양진의 정현파 형태로 인가하여 파괴 될 때까지 진행하였으며, 이때의 비틀림 반복 속도는 2 Hz로 시험하였다.

비틀림 피로 시험의 경과에 따라 변화하는 히스테리시스 곡선의 기울기 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 비틀림 피로 시험 동안 주기적으로 히스테리시스 곡선의 기울기를 계산하였으며, 이를 퓨즈부의 직경별로 Fig. 12~13에 각각 나타내었다. 비틀림 피로 시험이 진행됨에 따라 변화하는 트리포드 축의 히스테리시스 곡선 기울기는 그림에서와 같이 축의 직경과 상관없이 초기에는 기울기가 완만하게 증가 및 감소하다가 파단직전에 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 피로시험 초기에는 반복경화에 의해 히스테리시스 곡선의 기울기가 커지다가, 이후 반복연화 또는 크랙의 진전 등으로 기울기가 작아진 것으로 보이며, 또한 파단직전에는 균열성장에 의해 급격히 기울기가 떨어진 것으로 판단된다.

일반적으로 피로시험에서의 피로고장은 명확하

Table 4 Test results of static torsional test

Fuse Diameter (mm)	Fracture torque (Nm)	Angle (°)
$\Phi 58$	33,510	21.19
$\Phi 62$	41,410	33.19
$\Phi 66$ (Not Fracture)	> 44,550	9.65

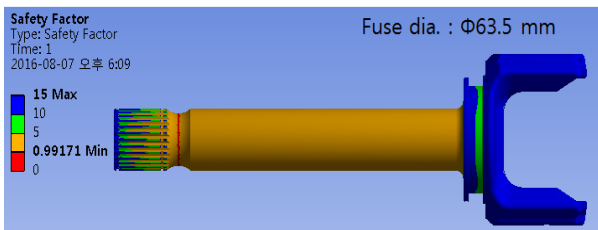


Fig. 10 Additional FEA for finding a optimum fuse diameter

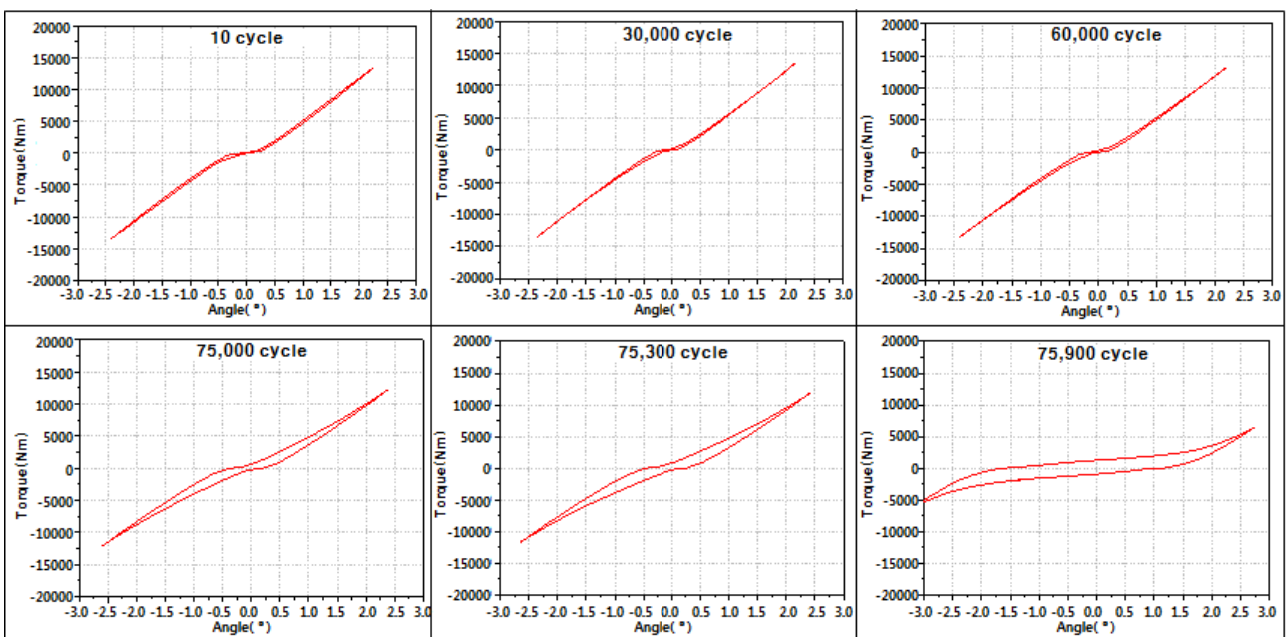


Fig. 11 Variations of hysteresis loops according to advancement of torsional fatigue test(fuse  $\Phi 62$  mm)

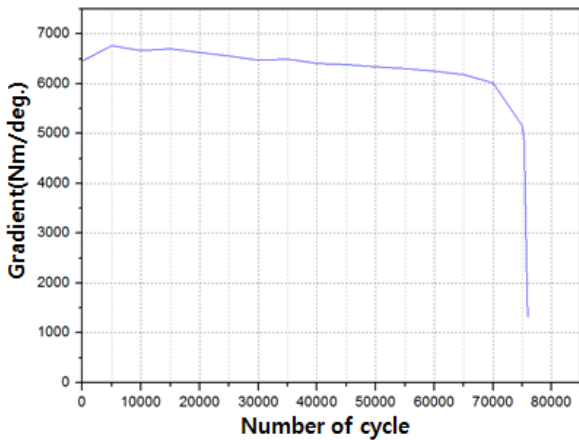


Fig. 12 Change of gradient(fuse  $\Phi$ 62 mm)

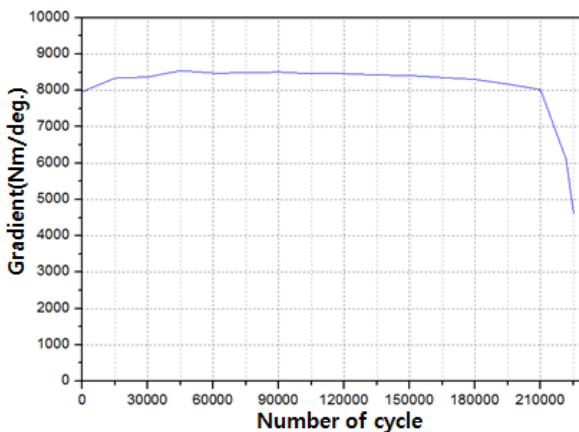


Fig. 13 Change of gradient(fuse  $\Phi$ 66 mm)



Fig. 14 Fracture surfaces after torsional fatigue test

게 정의되어 있지 않다. ASTM E606에서는 최대 응력 또는 탄성계수가 50%로 떨어지는 시점을 권장하고 있다.<sup>(10)</sup> 따라서 트리포드 축의 비틀림 피로에 의한 고장은 히스테리시스 곡선 기울기가 초기 기울기 값의 50% 이하가 되는 시점을 고장 판단 기준으로 하였다. 이를 토대로 트리포드 축의 비틀림 피로시험의 결과를 정리하면, 퓨즈부가  $\Phi$ 62 mm인 제품은 7.5만 사이클에서 고장이 발생하였고, 퓨즈부가  $\Phi$ 66 mm인 제품은 31.5만

Table 5 Comparison about FEA and fatigue test results

Fuse Diameter (mm)	Fatigue life @ FEA (cycle)	Fatigue life @ test (cycle)	Error rate (%)
$\Phi$ 62	$7.8 \times 10^4$	$7.5 \times 10^4$	3.8
$\Phi$ 66	$3.23 \times 10^5$	$3.15 \times 10^5$	2.5

사이클에서 고장이 발생하였다. 한편, 트리포드 주축의 유한요소해석을 이용한 비틀림 피로해석 결과와 시험을 통해 얻은 비틀림 피로수명 사이클을 Table 5에 정리하였다.

피로 시험 후 트리포드 축의 파단면을 육안 검사한 결과, 퓨즈면의 원주를 따라 다수의 균열이 발견되었고, 이들 균열에서 시작해 크랙이 내부로 전파된 것으로 여겨진다. 또한 피로파손의 대표적 모양인 Beach mark가 육안으로 발견되었으며 이를 Fig. 14에 나타내었다.

한편 축의 표면연마<sup>(11)</sup>와 숏 피닝<sup>(12,13)</sup>의 후처리를 통해 표면조도 개선과 압축 잔류응력을 발생시켜 트리포드 축의 비틀림 피로수명을 증가시킬 필요가 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고속열차에서 회전동력을 전달하는 트리포드 구동축의 비틀림 시험을 위한 시험장치를 개발하였고, 이를 이용하여 AISI 4140 재질의 트리포드 축을 정적 비틀림 파단 및 피로 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속열차용 트리포드 구동축의 비틀림 시험을 위해 서보 액추에이터를 이용한 비틀림 파단과 피로 시험이 가능한 시험장치를 개발하였고, 이를 이용해 비틀림 피로시험을 한 결과, 트리포드 축의 경우 토크와 변위가 크기 때문에 1 Hz 이하의 속도가 적당하다.

(2) 트리포드 축의 비틀림 해석결과와 정적 비틀림 파단 시험결과, 퓨즈부가  $\Phi$ 62 mm 이하의 축은 파단토크가 고속철도용 트리포드 축의 요구조건인 43.5 kNm를 만족하지 못하는 것을 확인하였다. 따라서 이를 만족하기 위해서는 퓨즈부가 최소  $\Phi$ 63.5 mm 이상이 되어야 할 것이다.

(3) 비틀림 피로 시험 결과, 퓨즈부가  $\Phi$ 62 mm인 제품은 7.5만 사이클에서, 퓨즈부가  $\Phi$ 66 mm 제품은 31.5만 사이클에서 고장이 발생하였다.

따라서 해당 재질의 트리포드 축은 비틀림 피로 강도를 높이기 위해 표면 연마와 샷 피닝을 통한 후처리 보완을 할 필요가 있다.

본 연구를 토대로 푸즈부의 변경 및 표면처리 공정의 보완 등을 통한 개선된 트리포드 주축의 추가적인 연구를 할 예정이며, 이를 통해 대체 가능한 KTX 트리포드 축의 개발과 나아가 KTX-산천용 유압식 축의 개발을 위한 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Lee, J. H., Kang, B. S., Rye, H. S., Lee, J. M. and Cho, H. Y., 2016, "Development Test of Flexible PTO Shaft Used by Ti Alloy for Aircraft," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 8, pp. 759~765.
- (2) Kim, S. S., Kim, Y. G., Kim, K. H. and Park, C. S., 2007, "Torque Measurement of Tripod Shaft for HSR-350x," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 6, pp. 660~664.
- (3) Lee, D. H., Kwon, S. J., Park, B. S., Cho, D. Y. and Kim, J. W., 2013, "Development of Condition Monitoring System for Reduction Unit of High-speed Rail," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 7, pp. 667~672.
- (4) Jung, D. W., Choi, N. S. and Park, S. H., 2009, "S-N Curve Deduction of a KTX High-Speed Train Structure for an Accelerated Life Testing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 4, pp. 388~395.
- (5) Ji, H. Y., Lee, K. H., Kim, J. C., Lee, D. H. and Moon, K. H., 2013, "Fault Diagnosis of a High-speed Railway Reduction Unit Using Analysis of Vibration Characteristics," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 6, pp. 26~31.
- (6) Lee, C. W. and Lee, D. H., 2012, "Fatigue Life Evaluation of Motor Block Bracket Units for KTX-Sancheon Trains," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 626~631.
- (7) Ko, J. B., Kim, W. K. and Won, J. H., 2005, "The effect on Fatigue Strength of Induction Hardened Carbon Steel," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp. 83~87.
- (8) Korea Railroad Research Institute, 2014, Development of Condition Monitoring System for Reduction Unit of High Speed Trains, pp. 45~47.
- (9) Korea Railroad Research Institute, 2013, Development of Technology for Localization and Performance Enhancing of Existing Railway Core-parts, pp. 45~50.
- (10) ASTM E606/E606M-12, 2012, "Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing," ASTM International
- (11) Novovic, D., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., Voice, W. and Bowen, P., 2004, "The Effect of Machined Topography and Integrity on Fatigue Life," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 125~134.
- (12) Cheong, S. K., Lee, S. H. and Chung, S. C., 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.
- (13) Yeom, H. H., Lee, M. G., Lee, C. M. and Jeon, Y. H., 2013, "Effect of Surface Treatment on Fatigue Strength of SCM440H," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30, No. 8, pp. 779~784.