

전자식 주차브레이크용 동력전달나사의 신뢰성 분석 및 특성수명에 관한 연구*

박민흥*, 여인욱, 이상협
(주)진합 기술연구소
e-mail: mhpark@jinhap.com

A Study on the Reliability Analysis and Characteristic Life of Power Transmission Screw for Electronic Parking Brake

Min-Heung Park*, In-Uk Yeo, Sang-Hyup Lee
Technology Research Institute, JINHAP Co.,Ltd.

요약

본 논문에서는 승용차에 적용되는 전자식 주차브레이크에서 주차를 위한 제동력을 전달하는 동력전달용 나사에 대한 압축시험평가를 수행하여 기계적 성능을 확인하였고, 제품 보증을 위해 실제품 제작 및 평가를 실시하여 Weibull분포를 활용한 신뢰성 분석을 통해 제품의 형상모수와 특성수명을 파악하였다. 이를 바탕으로 동력전달나사의 수명을 보증하기 위한 무고장시험시간을 확인 하였다.

2. 본론

1. 서론

전자식 주차브레이크 (EPB, Electronic Parking Brake)는 운전자가 직접 손, 페달 또는 레버를 사용하여 작동하는 기계식 주차브레이크(Mechanical Parking Brake)와 달리 전자기계식 (Electro mechanical Type)으로 제어 되는 주차 브레이크 시스템으로 기존 기계장치에 모터와 전자 제어장치 ECU (Electronic Control Unit) 등이 더해져 기능적으로 안정성이 강화되고 사용이 간편해진 주차브레이크 시스템이다.

전자식 주차브레이크에서 주차를 위한 제동력은 모터(엑츄에이터)에서 발생하는 회전력을 전진운동으로 바꾸어주는 동력전달부품에 의해 발생되며, 동력전달부품은 제동력 전달 시간, 전달 효율, 내구성 등이 중요함으로 다양한 형태의 부품들이 사용되고 있고, 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 동력전달부품개발의 일환으로, 가장 많이 사용되고 있는 동력전달나사에 대한 압축시험평가를 수행하고, 신뢰성 보증시험(Reliability Qualification Test)에 근거를 둔 무고장 시험(No Failure Test) 시간 동안의 실물 평가를 통해 특성수명의 계산과 보증수명을 검토하고 동력전달나사에 대한 내구성을 평가 하고자 한다.

2.1 전자식 주차브레이크 시스템

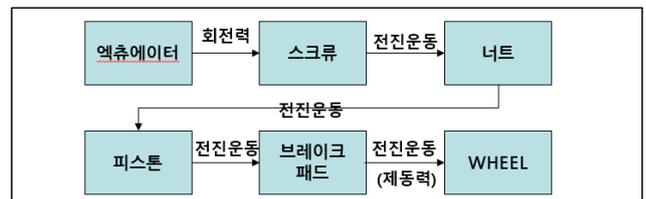
2.1.1 전자식 브레이크의 종류

전자식 주차브레이크는 작동방식에 따라 캘리퍼 일체형과 케이블 풀러형 두 가지로 구분된다.

캘리퍼 일체형 주차브레이크는 차량의 바퀴(Wheel)에 직접 부착되어 작동되며, 케이블 풀러형의 경우에는 별도의 공간에 장착되어 케이블 방식으로 주차 제동력을 전달한다.

2.1.2 캘리퍼 일체형 주차 브레이크

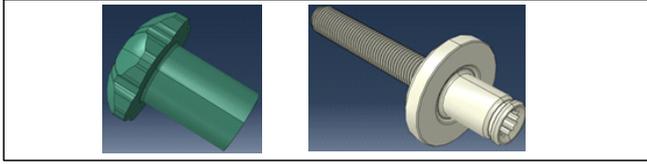
캘리퍼 일체형 브레이크의 주요 구성품 및 제동력 전달 순서는 그림[1]과 같다.



[그림 1] 캘리퍼 일체형 주차브레이크 작동 순서

주차제동력은 엑츄에이터에서 발생하는 회전력을 너트와 스

크류의 체결을 통해 진진운동으로 바꾸어줌으로써 형성된다. 이 두 부품의 체결 및 동작으로 제동력이 전달되며, 체결 나사를 동력전달나사로 칭한다.



[그림2] 너트 & 스크류

2.2 동력 전달 나사

2.2.1 개요

나사는 나사산의 형상, 크기, 줄수, 피치 등 특징에 따라 다양하게 구분되며, 엔지니어는 나사의 특징을 고려하여 사용 목적에 맞는 적합한 나사를 선택하여야 한다.

첫째, 나사의 형상 선택

전자식 주차브레이크 시스템에서 중요한 성능인 제동력은 차량의 바퀴(wheel)를 압착하는 방향(한쪽)으로 하중이 발생한다. 형상 선택에 있어 가장 큰 축 하중을 전달하는 형상인 사각 나사가 제일 유리하나, 제조성의 한계로 톱니 형상의 나사를 사용한다.

둘째, 나사의 크기 선택

주차를 위한 제동력 발생에 따른 제품이 받는 압축, 인장, 굽힘 등의 기계적 스트레스를 고려하여 안전율을 더한 적합한 크기의 나사를 선택하여야 한다.

셋째, 나사의 줄수 및 피치 선택

나사의 줄수와 피치의 곱에 의하여 한 바퀴당 너트가 전진하는 양인 리드가 결정된다. 이는 나사의 효율과도 연관이 있어 나사를 선택함에 매우 중요한 요소이다.

넷째, 나사의 효율

전자식 주차 브레이크에서의 제동력은 발생 추력으로 볼 수 있으며 나사를 사용함으로써 나사축에 Torque를 걸어서 발생하는 나사 효율과 추력은 다음 식(1)에 의해 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{1 - \mu \tan \theta}{1 + \mu / \tan \theta} \quad \begin{matrix} \theta : \text{리드각} (^{\circ}) \\ \mu : \text{마찰계수} \\ \eta : \text{나사효율} \end{matrix} \quad (1)$$

나사효율식은 리드각 및 마찰계수에 의해 결정 된다.

- ① 리드각(θ) : 피치 (P) / 나사 유효지름 (R) (tanθ=P/πr)
- ② 마찰력 : 마찰 계수 (표면 상태, 윤활 여부), 마찰 면적

$$F = \frac{2\pi\eta T}{l \times 10^{-3}} \quad \begin{matrix} \eta : \text{나사 효율} \\ F : \text{발생 추력} (kgf) \\ T : \text{토크} (kgf \cdot m) \\ l : \text{리드} (mm) \end{matrix} \quad (2)$$

식(2)는 나사의 추력을 구하는 식이다.

나사의 효율 계산에 있어 마찰계수는 정지마찰계수와 운동 마찰계수로 구분되고, 이는 제품의 표면상태, 윤활여부에 따른 고유 값으로 측정하기 매우 어렵다.

따라서, 토크 대비 발생 추력 평가를 통해 추력계산식을 변형하여 효율을 역으로 계산하는 방법으로 효율을 측정한다. 전자식 주차브레이크에서 동력 전달나사의 효율은 제동력이 차량의 바퀴(Wheel) 디스크를 압착하는 방향으로 인가된 후 자립상태(Self-Sustenance)를 유지해야 한다, 따라서 동력 전달 나사의 효율은 50% 보다 작아야 한다.

2.3 기계적 성능

2.3.1 압축시험

전자식 주차브레이크의 제동력 요구기준은 국토교통부령 제684호 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 [별표 4의2] 내용을 기준으로 공차상태의 자동차에 운전자 1인이 승차한 상태를 기준으로 하며, 그때의 제동능력은 차량 중량의 20%이상일 것으로 명기되어 있다.[1]

캘리퍼 형 전자식 주차 브레이크는 보통 차량의 뒷바퀴에 장착되며, 바퀴당 1EA 씩 총 2EA가 장착된다. 따라서 제품의 기계적 성능은 1,020kgf 이상의 압축력을 견뎌야 한다. 그림 [3]은 재료만능시험기 모습이며, [표2]에 기계적 성능 만족 조건을 표현하였다.

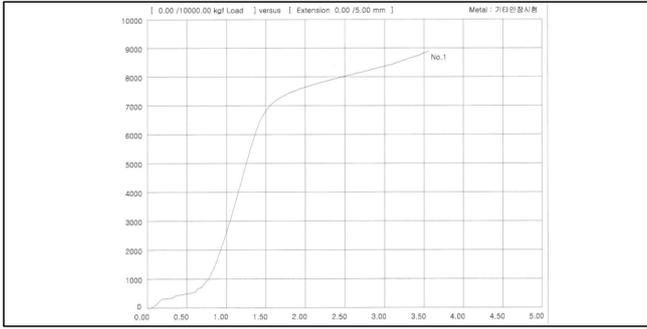
실 제품으로 재료만능시험기(UTM)를 사용하여 제품의 변형이 생길 때 까지 평가를 실시하였고 그림[4]와 같은 하중-변위 곡선을 확인 하였다. X축은 변위, Y축은 하중이며, 결과를 분석하였을 때, 제품의 탄성구간은 약 6,500kgf로, 압축력 요구사항인 1,020kgf를 충분히 넘어섬으로 기계적 성능을 만족함을 확인하였다.

[표1] 기계적 성능 만족 조건

항목	조건
차량 중량	1,570kg, 승용차 공차중량 (1,500kg) + 성인남성평균체중(70kg)
제동력	(차량중량 × 130%) / 2 = 1,020 kgf



[그림3] 재료 만능 시험기



[그림4] 압축 시험 하중-변위 곡선

2.4 신뢰성 보증시험

동력 전달용 나사의 신뢰성보증시험을 위해 한국기계연구원 신뢰성평가기법[2]을 참조하여 수행하였다.

2.4.1 보증수명(B_p) 결정

동력전달나사의 보증수명은 다음과 같이 선정하였다.

· 일 평균 주차브레이크 작동 횟수 : 160 cycle (3)

· 차량의 정기검사주기 : 2 years (4)

$$B_p = 160 \text{ cycle/day} \times 730 \text{ day} = 116,800 \text{ cycles}$$

일평균 주차 브레이크 작동횟수는 160회로 이전 연구 [3]을 참조하였고, 주차 브레이크는 차량의 안전도 검사임으로 자동차 관리법 시행규칙 제74조 제1항에 근거하여 비사업용 승용자동차의 차량 점검주기인 2년으로 설정하였다.

2.4.2 신뢰성 척도의 결정

차량용 부품에 통상적으로 적용되는 수명으로 결정하였다. 수명 B_{10} 은 X cycle의 수명 B_{10} 을 가진 부품이 해당 수명까지 사용될 때 까지 고장 나는 부품의 비율이 10%이하임을 보증한다는 의미이다.

2.4.3 주요 고장모드 분석

시험 항목 도출을 위해 주요 고장모드 분석을 실시하였고, 제품의 고장모드에 큰 영향을 미치는 스크류 회전불가에 대한 결과를 [그림5]에 나타냈다.

주요 구성품	기능	고장 모드	고장 매커니즘	고장 원인	고장 영향	지연도 평가			RPN
						고장 빈도	심각도	치명도	
NUT ASSY	SCREW가 NUT를 회전시켜 안전 시킨다. SCREW가 NUT를 회전시키지 못한다	SCREW가 회전하지 못한다	엔지니어링 과부하	과부하	제품 성능 저하	5	7	7	245
			부품 DIM'S 불일치	공정 불량	제품 성능 저하	5	5	5	125
			내구 불만족	제품 재료 및 용접부족	제품 불가	7	7	7	343
			부식 발생	외부 환경	제품 성능 저하	1	7	5	35

[그림5] 주요 고장 모드 분석 (FMEA)

주요 고장 모드 분석을 통해 반복작동에 의한 내구성능 불만족의 RPN값이 가장 높았고, 이에 내구성능시험을 평가 대상으로 선정 하였다.

2.4.4 평가 방법

제품의 평가는 전용 내구 평가 설비를 사용하였으며, 설비의 제원과 평가조건은 [표2], [표3] 과 같다.

[표2] 설비 사양

사양	항목	비고
TORQUE	MAX 100 Nm	± 0.05 (F.S)
LOAD	MAX 10,000 kgf	± 0.05 (F.S)

[표3] 평가 조건

항목	평가 조건
회전 토크	12.5Nm (하중 인가방향) ↔ 0Nm (풀립방향) 반복
제동 능력	1,020 kgf ↔ 0 kgf 반복
C/T	15 RPM



[그림6] 내구 평가 설비

제품의 건마찰 방지 및 실차조건을 모사 위해 너트와 스크류를 조립하여 브레이크액(D.O.T4)에 충분히 침적시켰고, 상온에서 평가하였다.

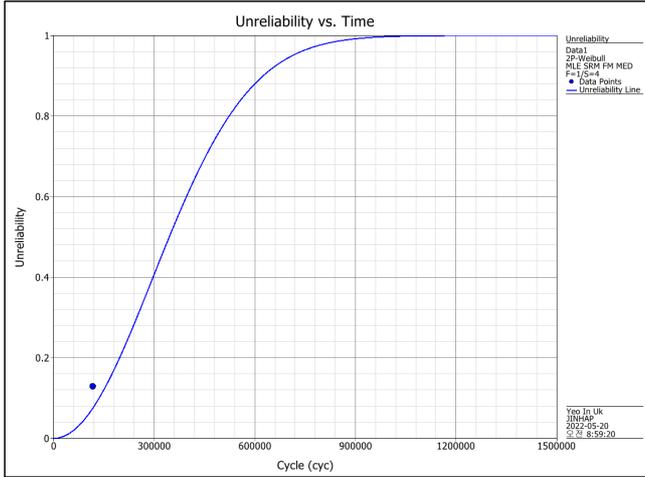
2.4.5 형상 모수 결정

제품의 형상 모수 결정을 위해 보증수명까지 내구시험을 실시하였다. 통상적인 제품 수명과 시험 시간 및 비용 등을 고려하여 20만회에서 관측중단 한 5개 샘플의 평가결과를 다음과 같다.

[표4] 내구 평가 결과

시편	내구 횟수	결과
#1	200,000	파손 없음 (관측중단)
#2	200,000	파손 없음 (관측중단)
#3	200,000	파손 없음 (관측중단)
#4	200,000	파손 없음 (관측중단)
#5	116,934	고착 (파손)

시험 결과를 바탕으로 ReliaSoft사의 Weibull++를 사용하여 2모수 Weibull 분포를 적용한 신뢰성 분석을 수행한 결과, 형상모수는 2.0, 특성수명은 413,430회가 산출되었다. 내구 횟수에 따른 고장률 그래프는 형상모수가 1보다 크므로 그림[7]과 같이 내구 횟수가 증가함에 따라 고장률이 증가하는 결과를 확인하였다.



[그림7] 내구 횟수에 따른 고장률

2.4.6 무고장 합격 판정기준

무고장 시험시간 동안 시험하여, n개의 샘플이 모두 고장이 없으면 합격으로 판정하는 방법이며, 아래 식에 따른다.

$$t_{nftt} = B_p \cdot \left[\frac{\ln(1 - C_L)}{n \cdot \ln(1 - p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

시험시간의 한계를 고려하여 샘플수는 4개, 신뢰수준은 90%로 선정하였다. 식 (5)를 통해 계산한 결과 무고장 시험시간은 273,013회 이다.

[표5] 무고장시험시간의 계산

기호	항목	내용
B_p	보증수명	116,800 회
C_L	신뢰 수준	90% (0.90)
n	샘플 수	4
p	Precentile 지표	90% (0.1)
β	형상 모수	2.0
η	특성 수명	423,430 회
t_{nftt}	무고장 시험시간	273,013 회

3. 결론

본 연구에서는 캘리퍼 일체형 전자식 주차브레이크에 적용

되는 동력전달나사에 대한 기계적 성능 만족 유무를 확인하기 위해 압축시험평가를 실시하였고, 실 제품 제작 및 평가로 제품의 보증확인을 위한 보증수명과 무고장 시험시간을 계산하였다. 이로부터 얻은 결론과 차후 진행할 연구 계획은 다음과 같다.

1. 국토교통부령 제684호 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 [별표 4의2] 내용을 기준으로 압축시험평가로 진행 한 결과 본 동력전달나사의 기계적 강도는 충분히 만족할 것으로 판단된다.

2. 2모수-Weibull 분포를 적용한 신뢰성 분석 결과, 본 동력전달나사의 형상모수는(β)는 2.0, 특성수명(η)은 413,430회 임을 확인하였다. 제품의 B_{10} 수명을 보증하는 무고장 시험횟수는 신뢰성 분석 결과를 활용하여 신뢰도 90%수준에서 273,013회 임을 확인하였다.

3. 향후 연구 계획으로 본 연구에서 확인한 무고장시험시간을 검증하기 위해 유한요소해석 및 내구해석을 진행하고, 한계 내구 포함 실 제품 내구평가를 진행하여 비교 및 검증을 통한 해석모델을 개발할 계획이다. 또한 온도 변화 등의 환경조건과 외부 요인을 고려한 가속수명시험을 통해 동력전달나사의 특성에 대한 연구를 완성할 계획이다.

참고문헌

- [1] 국토교통부령 제 684호 자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙[별표 4의 2]
- [2] 김형의, 성백주 “한국적 신뢰성 평가의 개념”, 유공압시스템학회지 제7권 제1호 pp.3~8, 2010년 3월
- [3] 허형범, 정도현, 정준환, 이강용 “신뢰성 기법에 의한 주차 브레이크 레버의 목표수명 설계”, 한국자동차공학회 2006년도 춘계학술대회논문집 pp. 989~996
- [4] 박민홍, 광희만, 김민호 “승강장 안전발판 시스템의 내구성 평가”, 신뢰성응용연구 제16권, 제2호. pp.125~133, 2016년
- [5] 손영섭, 정한별, 김광일 “Caliper 일체형 EPB에 관한 연구” KASE 2009 Annual Conference