

지게차용 추진축의 가속 수명 평가§

김도식*† · 성백주*

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

Accelerated Life Evaluation of Propeller Shaft for Forklift Truck

Do-Sik Kim*† and Baek-Ju Sung*

* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received February 21, 2014 ; Revised August 14, 2014 ; Accepted August 18, 2014)

Key Words: Propeller Shaft(추진축), Rotary Fatigue Test(회전 피로 시험), Load Spectrum(부하 스펙트럼), Accelerated Life Test(가속수명시험), Calibrated Accelerated Life Test(교정가속수명시험)

초록: 본 논문은 가속시험법을 이용하여 추진축의 피로 수명을 예측하는 것이다. 가속시험방법으로는 교정가속시험법을 적용하였으며, 이 시험법은 시험시료 수량이 적을 경우에 시험시간 단축과 신뢰성을 높이는 매우 효과적인 방법이다. 두 수준의 고부하 스트레스 수준에서 피로시험을 수행하고, 외삽법과 가용한 시험시간을 고려하여 저부하 스트레스 시험 수준을 결정하여 피로시험을 수행하였다. 본 논문에서는 가속지수와 형상모수 등의 신뢰성 파라미터를 시험을 수행하여 획득하였고, 실제 사용 환경의 로드 스펙트럼을 분석하고 시험 결과와 비교하여 추진축의 수명을 예측할 수 있었다.

Abstract: This paper proposes an approach for predicting the fatigue life of a propeller shaft of a forklift truck by an accelerated life test method. The accelerated life test method adopted in this study is the calibrated accelerated life test, which is highly effective in the prediction of the lifetime and enables significant reduction of the test time as well as a quantification of reliability in the case of small sample sizes. First, the fatigue test was performed under two high stress levels, and then, it was performed by setting low stress levels in consideration of the available test time and extrapolation. Major reliability parameters such as the lifetime, accelerated power index, and shape parameter were obtained experimentally, and the experimentally predicted lifetime of the propeller shaft was verified through comparison with results of an analysis of load spectrum data under actual operating conditions.

- 기호설명 -

- β : 와이블 분포의 형상모수
- θ : 와이블 분포의 척도모수 또는 특성수명
- AF : 가속계수
- n : 토크의 가속지수
- T_{mi} : 등가토크

1. 서 론

지게차의 추진축(propeller shaft)은 차량구동계

통(power train system)의 변속기와 액슬사이 동력을 전달하는 축으로서, 변속기와 액슬 사이에서 조립이나 운용 중 하중에 의해 발생하는 오정렬로 인한 동력전달계 하중 분산 및 진동 소음 방지를 위하여 사용된다. 엔진, 변속기, 액슬 등과 더불어 주요 핵심부품 중 하나이며 지게차 구동계에 있어서 신뢰성이 중요시 되는 구성품으로 신뢰성이 취약한 부품이기도 하다.

지게차 동력전달계 부품의 경우 수명 목표가 B_{10} 10,000 시간을 요구하고 있다. 그러나, 변속기나 액슬과 달리 추진축의 경우에는 10,000 시간 이전에 고장이 발생하여 교체하여야 하는 것이 일반적이다. 따라서, 개선된 추진축이 수명 목

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임.

† Corresponding Author, dohsik@kimm.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

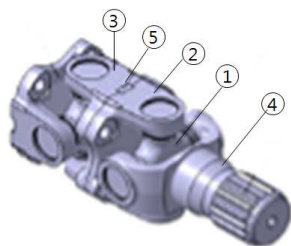
표를 만족할 수 있는지 가속 수명 시험을 통하여 수명을 확인하고자 한다.

추진축의 수명 평가를 위해서는 각종 수명데이터가 확보되어 있어야 하나 추진축에 대한 수명데이터가 존재하지 않거나 부족한 경우가 많아 실제 적용되는 추진축에 대한 수명데이터를 수명시험을 통하여 획득할 필요가 있다. 그러나, 추진축에 대한 수명선도를 정밀하게 시험하는 것은 비용, 시간, 시료 수 등에서 많은 노력이 필요하므로 이를 간단하고 경제적으로 획득할 수 있는 수명예측 방법이 필요하다.⁽¹⁾

본 연구에서는 경제성을 고려하면서 추진축의 수명데이터를 가능한 정확하게 얻기 위하여 교정가속 수명시험(calibrated accelerated life test, CALT)방법을 이용하여 수명데이터를 구하였다.⁽²⁻⁴⁾ 이 수명데이터가 실제 현장작동조건에서 적용 가능한지를 검토하기 위하여, 실차상태의 부하스펙트럼(load spectrum)을 분석하여 여러 종류의 부하조건이 혼합되어 있는 데이터를 대표하는 조건의 값을 구하여 분석을 수행하게 된다. 이를 위하여 부하에 대한 피로 손상 정도의 정량화로 누적손실효과(cumulative damage effect)를 고려한 Miner's Rule 을 도입하여 등가토크 값을 구하여 비교 분석하였다.^(5,6)

2. 고장분석 및 해석

지게차에 적용되는 추진축은 Fig. 1과 같이 구성되어 있으며, 추진축은 크로스키트 조립체, 요크플랜지부, 요크샤프트등으로 구성되어 있다. 추진축의 설계자는 크로스키트의 허용 토크 용량을 기준으로 설계하므로 부하를 받으면 크로스키트 조립체가 파손되는 경우가 대부분이고, 요크부나 축 등이 파괴되는 경우도 있다. 파손전에 크로스



- 1 Cross kit assembly
- 2,3 Yoke flange
- 4 Yoke shaft
- 5 Key

Fig. 1 Propeller shaft for forklift truck

키트 조립체에서 소음이나 진동이 발생하기도 한다. 지게차 운전 작업 환경상 운전자가 소음이나 진동을 감지하지 못하는 경우도 많으며, 이 상태에서 지속적으로 운전할 경우에는 파손으로 이어져 동력전달이 안되어 차량을 움직일 수 없게 되는 경우가 있다. 또한, 지게차 특성상 전·후진을

Table 1 Failure modes and mechanisms analysis

Primary components	Failure modes	Function	Failure mechanisms
Flange yoke	Fracture	Power transmission fail	Over stress
Flange yoke	Wear	Noise & Vibration	Fatigue, Mis-alignment
Cross kit body	Fracture	Power transmission fail	Fatigue, Unsufficient lubrication
Cross kit bearing	Spalling	Noise & Vibration	Fatigue, Unsufficient lubrication
Cross kit bearing seal	Leakage	Noise & Vibration	High & Low temperature
Tube yoke	Fracture	Power transmission Fail	Fatigue
Spline shaft	Wear	Noise & Vibration	Fatigue
Tube	Fracture	Power transmission fail	Over stress

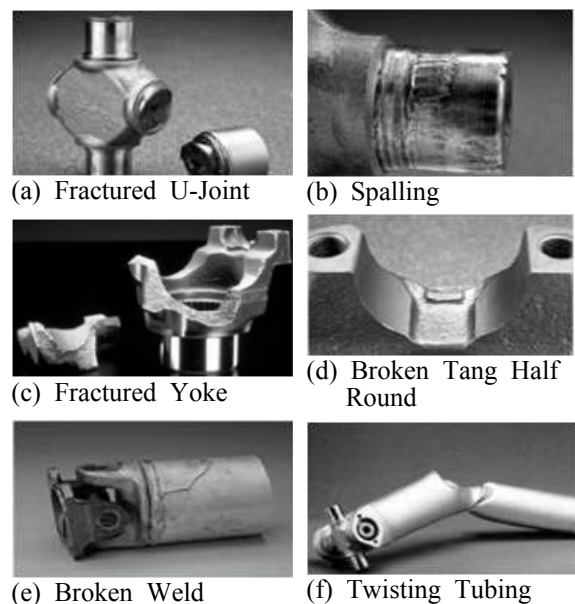


Fig. 2 Failure mode of the propeller shaft

급격하게 하는 경우가 많아 과도한 정·역 부하를 받을 수 있으며, 이로 인한 피로 파괴가 고장의 원인이 된다. Fig. 2에서는 일반적인 추진축의 고장 모드 사진을 보여주고 있고, Table 1에서는 주요 구성품과 고장모드, 기능, 고장 메커니즘으로 고장분석을 수행하였다. 추진축의 구성품들은 축에 전달되는 회전토크에 의해 피로와 과부하 스트레스를 받는 것으로 분석 되었으며, 초기 마모, 스폴링, 누유 등으로 진동 및 소음 값이 커지며, 계속 사용하면 각 부위가 파괴되는 것으로 분석하였다. 이 고장메커니즘을 재현하기 위하여 추진축에 토크를 재현하여 주는 피로시험을 수행하는 것이 제일 효과적인 것으로 판단되었다. 피로 시험을 수행하여 발생한 고장과 실제 현장에서 발생하는 고장을 비교하여 고장 분석 결과가 맞는지 확인하였다.

3. 지게차용 추진축의 수명분석 및 가속시험 설계

3.1 수명분석 및 수명모델

추진축의 수명분포는 와이불(Weibull)분포를 사용하였다. 일반적으로 기계류 부품은 와이불 분포가 가장 널리 사용되고 있어,⁽⁷⁾ 추진축에서도 와이불 분포를 사용하였으며, 시험 데이터에 대한 분포 적합도 검사를 수행하여도 와이불 분포가 적합한 것을 알 수 있다. 와이불 분포는 분포의 형태를 결정하는 형상모수(shape parameter, β)와 수명특성을 갖는 척도모수(scale parameter, θ) 또는, 특성수명으로 구성되어 있다. 확률밀도함수(probability density function)를 사용하여 특정시간에 대한 고장확률을 구할 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (1)$$

$$t > 0, \beta > 0, \theta > 0$$

아이템이 특정시간까지 고장이 발생할 누적고장 확률을 나타내는 함수를 누적분포함수(cumulative distribution function)라 하며, 다음과 같이 표현된다.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (2)$$

신뢰도함수(reliability function)는 어떠한 아이템

이 시간 t 이전까지 고장이 나지 않을 확률을 의미하며 시간에 따라 신뢰도 값은 변화한다.

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (3)$$

가속수명시험은 평가시간을 단축시킬 목적으로 사용조건보다 가혹한 조건에서 수행하는 시험으로, 가속수명시험시의 스트레스수준은 사용조건에서 관측하고자 하는 고장모드를 유발시킬 수 있는 범위 내에서 선택되어야 한다.

수명분포와 수명-스트레스 관계의 조합에 의하여 여러가지 모델이 있을 수 있으며, 추진축의 가속모델은 부하에 의한 수명-응력 모델로서 역승모델(inverse power law model)이 적용된 형태로 수식 (4)와 같이 정의할 수 있다.⁽⁹⁾

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (4)$$

여기에서, L 은 수명으로 와이불 분포의 경우 특성 수명이며, K 는 모델상수, V 는 비열 스트레스(load, torque), n 은 가속지수(power index)이며, 역승모델의 가속계수(acceleration factor)는 식 (5)와 같다.

$$AF = \left(\frac{V_{test}}{V_{field}}\right)^n \quad (5)$$

여기서, 지수 n 값은 일반적으로 기존 문헌을 참조할 수 있으나, 실제 수명시험을 수행하여 획득하는 것이 보다 정확하다.

3.2 시험대상 추진축의 제원 설정

수명시험을 위해서는 시험 대상 시료의 특성 및 제원을 확인하고 시험기준 조건을 설정하여야 한다. 시험대상 추진축은 2~3톤급 엔진식 지게차에 사용되는 추진축으로 엔진 최대토크는 200 Nm 이고, 변속기는 파워소프트형 반자동 변속기로 전·후진 각각 2단의 변속단이 있으며, 토크 변환기의 스톨비는 2.8, 변속기 1단 기어비는 2.8임을 Table 2 제원표에서 알 수 있다. 추진축에 가해지는 최대 기준 토크 즉, 1G 토크 값을 표와 같이 계산하면 1,384 Nm가 되며, 이 값을 기준으로 시험조건등을 설정하기로 한다. 일반적으로 이 토크 값의 2~3배 값을 정하중 목표 시험 값으로 정하며, 시료의 파괴 토크 값을 알 수 있다. 여기에서는 1G토크 값의 3배인 값을 목표 값으

Table 2 Specification of the propeller shaft

Item	Specification
Engine max torque	Tmax=200Nm Nmax=2,500 RPM
Transmission 1st gear ratio	2.8
Torque converter stall ratio	2.8
1G torque calculation	Efficiency × E/G Tmax × Stall Ratio × T/M Ratio = 0.9×200×2.8×2.8 =1,384 Nm
static torque	3 G = 4,152 Nm

로 결정하고, 이를 교정가속시험을 위한 사전 시험 정보로 이용하였다.

3.3 교정 가속 수명 시험법 설계

사용수준에서의 시험법은 시험시간이 매우 길어질 가능성이 있고 시료가 고가인 경우는 시험비용이 증가하는 현실적인 어려움이 존재한다. 따라서, 최소 시료와 시간으로 신뢰성을 입증할 수 있는 교정가속수명시험 방법을 사용하여 수명예측을 하고자 한다.

교정가속수명법은 시험 시료 수량이 많지 않고 시험 비용 및 시간이 제한적이고, 시험 시료의 유한요소해석 결과나 피로해석 결과 등을 획득하지 못한 상태에서 시험 수준을 결정하여 시험 설계를 하는 유용한 방법이다. 해석 결과 데이터를 활용할 수 있더라도 해석 오차가 발생하여 시험 수준을 잘못 결정할 경우에는 과도한 시험시간을 수행하거나 시험을 중단하고 시험수준을 다시 설정해야 하는 경우도 발생한다. 그러나, 교정가속시험법은 시험시간이 가장 장시간인 저수준 스트레스 수준을 외삽법에 의하여 결정하게 때문에 이러한 문제를 최대한 방지할 수 있다.

가속시험은 3단계의 스트레스 수준으로 수행하는 것이 일반적이며, 교정가속시험에서도 3수준으로 수행하고 와이블 분석을 위하여 최소 수량인 각 수준별 2개 총 6개의 시료를 사용하는 것으로 하였다. 사전시험 정보로 정적강도시험 결과를 참조하여 작동한계(operating limit or foolish limit) 값을 정한다. 이 값은 시료 재료의 탄성 한계 값 이하로 적용해야 하며 파괴 강도 값의 약 80% 이하로 설정한다. 고부하 수준 값은 이 작동

Table 3 CALT test plan for the propeller shaft

No	Stress level	Test torque (Nm)	Determination of stress level
1	to fracture	4,125	static fracture over 3× 1G
2	Highest Level	2,990	90% of operating limit level(3,321.6)
3	Medium Level	2,392	90% of highest level(2,990)
4	Lowest Level	-	extrapolation of high and medium level value

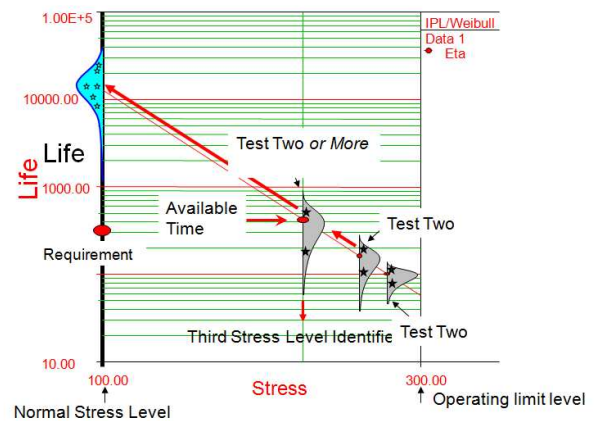


Fig. 3 Calibrated accelerated life test method

한계 값의 90% 값, 그리고, 중부하 수준 값은 고부하 수준 값의 90% 값으로 설정하여 시험을 수행한다. 이 두 수준의 결과에 대한 외삽법과 가용한 시험시간을 고려하여 3번째 저부하 수준의 값을 결정하게 된다. 저부하 시험 수준 값을 높게 하면 수준간 간격이 좁아 가속시험의 정밀도가 떨어질 수 있고, 수준 값을 낮게 하면 실제 조건과 최대한 유사한 조건으로 시험할 수 있지만 시험 시간이 필요 이상으로 소요될 수 있다.

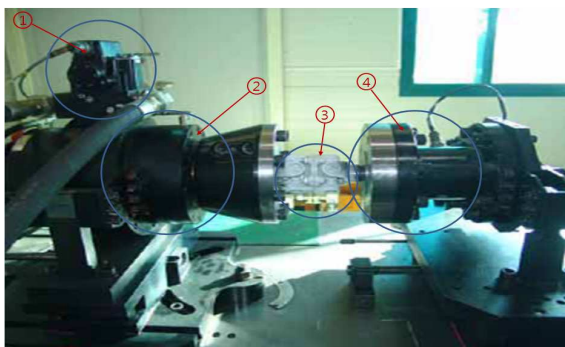
교정가속수명시험 방법과 절차는 Fig. 3과 같이 정리할 수 있다. 지게차 추진축의 가속 시험의 경우에서도 총 6개의 시료를 사용하여 피로시험을 수행하고 분석하는 계획을 Table 3과 같이 수립하였다. 정적강도시험 결과를 참조하여 작동한계 값을 설정하고, 이 작동한계 90%를 고수준 값으로 고수준의 90%를 중수준 값으로 정하였으며, 저수준 값은 2수준 총 4개 시험 결과를 분석하여 결정하는 것으로 하였다.

4. 가속수명시험 결과 및 수명분석

4.1 가속수명시험 수행 및 결과

추진축 시험을 위하여 유압식 비틀림 피로 시험기(torsional rotary actuator)를 사용하여 정적강도시험 및 피로시험을 수행하였다. 시험장비는 최대토크 용량이 ±11 kNm, 최대회전각도가 ±45 deg이고, 시료의 온도는 실제 사용온도인 85 °C 이상 올라가지 않도록 제한하였고, 시험 사이클은 2~3 Hz를 유지하였다. 시험장비는 Fig. 4와 같이 지그를 제작하여 설치하였으며, 우측부는 베이스에 고정하고 반대 좌측부는 유압식 회전 액추에이터에 부착하여 비틀림 토크를 가하는 방식이다.

피로시험을 수행하기 전에 정적강도시험을 수행하여 허용한계 값을 결정하였다, 정적강도시험은 점진적으로 부하를 상승시켜 파괴 시점의 부하를 측정하는 시험으로, 1개의 시료를 사용하여 정적강도가 4,613 Nm임을 확인하였다. 이 값은 요구 정적강도인 4,125 Nm 이상을 만족함을 알 수 있으며, 작동한계 값은 피로시험이 가능한 재료의 탄성영역에서 시험할 수 있도록 정적강도 요구 값의 80% 값으로 설정 하였다. 고수준과 중수준 값은 작동한계 값의 90%, 고수준의 90% 수준인 2,990 Nm, 2,392 Nm의 값으로 Table 3 과 같이 정하였으며, 저수준 값은 고수준과 중수준 시험 후 값을 정하는 것으로 하였다. 고수준과 중수준 스트레스 2,990 Nm, 2,392 Nm의 부하로 각각 2개의 시료를 사용하여 시험을 수행하였으며, 2 수준 부하에 따른 추진축 파괴 결과는 Table 4의 시료 2에서 5번까지의 결과이다.



1 Servo valve 3 Propeller shaft
2 Rotary actuator 4 Torque meter

Fig. 4 Experiment apparatus of the propeller shaft test

수명분석을 하기 위해서는 부족한 데이터 수량이지만 각각 2수준 총 4개의 데이터를 사용하여 Fig. 5 와 같이 그래프를 작성하였다. 분석결과 형상모수(β)는 3.84이며 가속지수(n)는 6.9가 나왔으며, 저수준 시험을 위한 부하설정은 시험 가능 사이클을 고려하여 결정하였다. 시험 사이클은 1.0×10^5 사이클과 1.0×10^6 사이클 내에서 결정하는 것이 적절하며, 1.0×10^6 사이클 이상은 많은 시간과 비용을 필요로 하므로, 본 연구에서는 2.0×10^5 사이클 이하를 목표 시간으로 하는 부하

Table 4 Test results of the propeller shaft

No	Test	Test torque (Nm)	Sample No	Test cycle
1	static	4,613	#1	1
2	rotary fatigue	2,990	#2	5,965
			#3	8,518
3	rotary fatigue	2,392	#4	41,902
			#5	17,234
4	rotary fatigue	1,794	#6	122,100
			#7	148,882

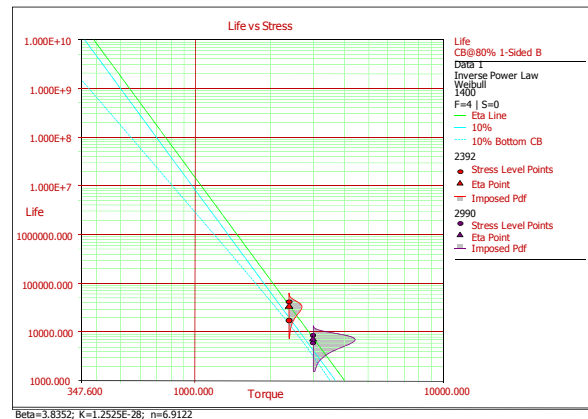


Fig. 5 Life vs. Stress(2 stress level)



Fig. 6 Failure of the propeller shaft test

를 찾아 시험기준을 정하였다. 따라서, 저수준 부하는 중수준 부하의 75% 값인 1,794 Nm를 결정하여 저수준 시험을 수행하였다.

저수준 부하에 따른 추진축 파괴 결과는 Table 4의 시료 6에서 시료 7번까지의 결과이며, 파괴 사이클은 122,100 사이클과 148,882 사이클로 시험시간은 적절하게 선택되어 졌다. 최소한의 시험수량과 2수준의 기초시험으로 3번째 수준의 부하 스트레스를 결정한 것이 시험시간 결정에 큰 도움이 되었다.

4.2 수명시험 결과 분석

Fig. 6과 같이 정적강도시험 및 스트레스 수준별 피로시험 모두 동일한 크로스키트 부위가 파손되었다. 따라서, 동일한 고장모드에 의한 결과로 가속모델의 적합성을 확인할 수 있었다. 추진축의 피로 시험결과를 Minitab과 ALTA 소프트웨어를 사용하여 분석을 수행하였다. 정적강도 시험데이터는 제외하고 3단계 스트레스 수준의 결과 6개를 분석한 결과, 수명분포는 예상한대로 와이블 분포를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 6개 데이터에 대한 분포 적합도 검정 결과이며, 일반적으로 검정 통계량인 AD(Anderson-Darling) 값이 가장 작은 분포가 시험 데이터에 대한 가장 적합한 분포로 해석할 수 있다. 이 경우 와이블 분포가 가장 적합한 분포로 볼 수 있다.

분석 결과로부터 형상모수(β)는 3.66이며 부하 스트레스 증가에 따른 가속지수(n)는 5.6인 것을 Fig. 8로부터 확인할 수 있다. Fig. 9는 스트레스에 대한 수명관계를 분석하기 위하여 작성된 그래프로, 3단계 스트레스 수준별로 실측 수명데이터를 타점하고, 특성수명선도, B_{10} 수명 선도, B_{10} 수명의 80% 신뢰하한 선도를 나타내었다. B_{10} 수명과, B_{10} 수명의 80% 신뢰수준은 수요기업의 요구 사항이므로 이 조건에서 수명 예측을 수행하기로 하였다.

4.3 실차 조건과 가속시험 결과 비교

교정가속시험방법을 사용하여 수행한 추진축 수명 결과가 실차 조건에서도 적합한지 확인을 위하여, 실차부하스펙트럼 데이터를 적용한 조건과 비교하여 검증하였다. Table 5는 실제 차량의 동력전달계에서 토크와 속도를 측정된 데이터를 입수하여, 이 데이터를 추진축에 맞도록 기어비

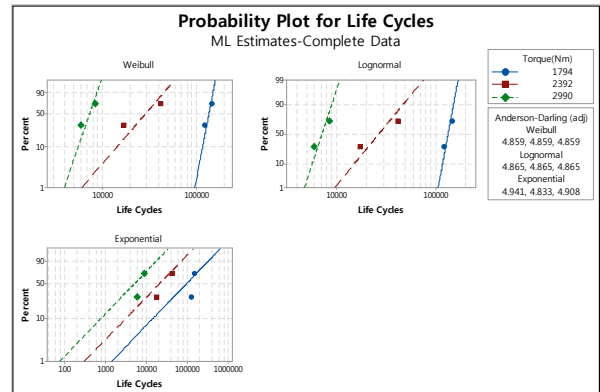


Fig. 7 Goodness of fit test results for 6 samples

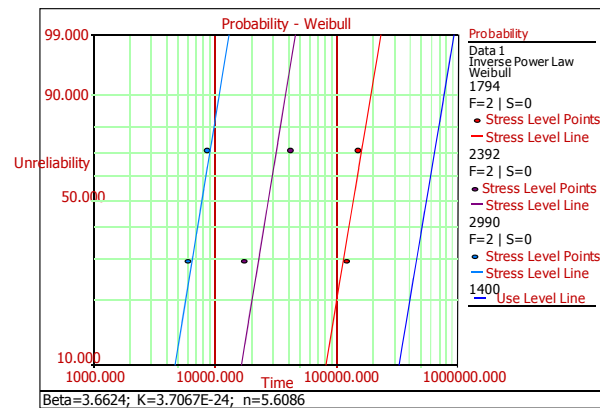


Fig. 8 Weibull probability plot of test results

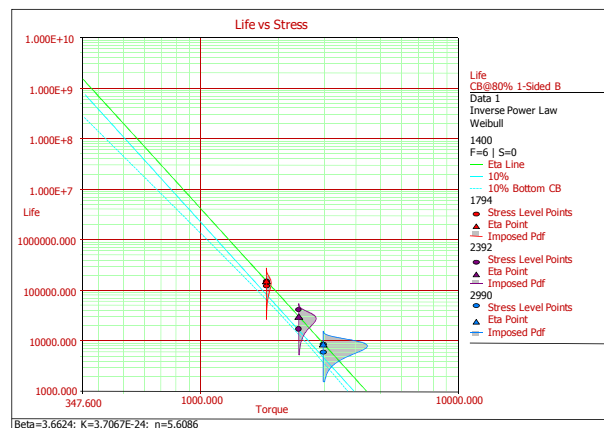


Fig. 9 Life vs. Stress(3 stress level)

등을 적용하고 수명 목표 시간을 10,000 시간에 등가하는 부하 스펙트럼으로 재구성 하였다. 실차 부하스펙트럼은 여러 종류의 부하조건이 혼합되어 있어, 이를 대표하는 조건의 값을 구하여 분석을 수행하는 것이 필요하다. 이를 위하여 부하에 대한 피로손상 정도를 정량화하는 누적손실

Table 5 Propeller shaft load spectrum and calculation of the equivalent torque

Torque(kgf-m)	x Gear Ratio	x t/cRatio	Cycles	%
-14.5	-40.3535	-88.7777	23,077	0.04%
-13.5	-37.5705	-82.6551	82,692	0.15%
-12.5	-34.7875	-76.5325	346,154	0.62%
-11.5	-32.0045	-70.4099	538,462	0.97%
-10.5	-29.2215	-64.2873	730,769	1.31%
-9.5	-26.4385	-58.1647	461,538	0.83%
-8.5	-23.6555	-52.0421	384,615	0.69%
-7.5	-20.8725	-45.9195	1,730,769	3.11%
-6.5	-18.0895	-39.7969	2,884,615	5.18%
-5.5	-15.3065	-33.6743	3,846,154	6.91%
-4.5	-12.5235	-27.5517	6,730,769	12.10%
-3.5	-9.7405	-21.4291	8,653,846	15.55%
-2.5	-6.9575	-15.3065	8,846,154	15.90%
-1.5	-4.1745	-9.1839	8,846,154	15.90%
-0.5	-1.3915	-3.0613	11,538,462	20.74%
Reverse			55,644,231	100.00%
0.5	1.231	2.7082	28,846,154	19.48%
1.5	3.693	8.1246	44,230,769	29.88%
2.5	6.155	13.541	40,384,615	19.83%
3.5	8.617	18.9574	10,000,000	6.75%
4.5	11.079	24.3738	8,076,923	5.46%
5.5	13.541	29.7902	6,538,462	4.42%
6.5	16.003	35.2066	4,615,385	3.12%
7.5	18.465	40.623	2,307,692	1.56%
8.5	20.927	46.0394	576,923	0.39%
9.5	23.389	51.4558	384,615	0.26%
10.5	25.851	56.8722	903,846	0.61%
11.5	28.313	62.2886	538,462	0.36%
12.5	30.775	67.705	423,077	0.29%
13.5	33.237	73.1214	115,385	0.08%
14.5	35.699	78.5378	44,231	0.03%
15.5	38.161	83.9542	15,385	0.01%
16.5	40.623	89.3706	0	0.00%
17.5	43.085	94.787	17,308	0.01%
18.5	45.547	100.2034	17,308	0.01%
19.5	48.009	105.6198	15,385	0.01%
20.5	50.471	111.0362	0	0.00%
Forward			148,051,923	100.00%
Sum			203,696,154	

효과(cumulative damage effect)를 고려하는 Miner's Rule을 도입하여 등가토크 값을 구하였다. 시험데이터 분석을 통하여 가속수명시험의 가속지수(power index)를 구하였기 때문에 등가토크를 구할 수 있다. 부하 스펙트럼은 실차에서 액슬에 전달되는 부하를 실측한 데이터로 추진축에 전달되는 토크로 환산한 데이터이다. 등가토크 계산은 추진축의 경우 작동거리에 따른 평균부하에 대한 등가토크 계산은 다음과 같다. 여기에서 평균 등가부하에 대한 등가토크 T_{mi} 는 다음 계산식 (6)에 따른다.

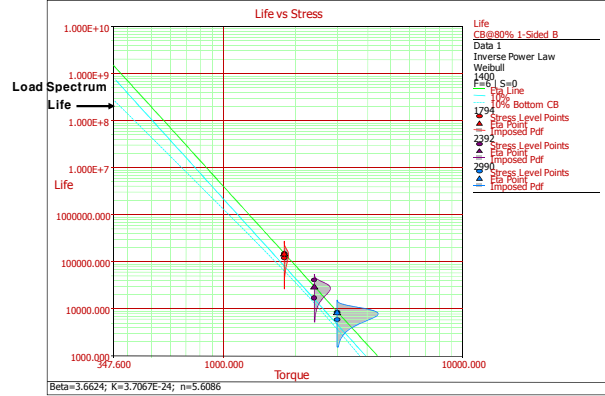


Fig. 10 Life vs. Stress(with load spectrum life)

$$T_{mi} = \left[\frac{\sum N_i t_i T_i^m}{\sum N_i t_i} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

여기서, T_i 는 추진축의 작동토크, N_i 는 추진축의 회전속도, t_i 는 추진축의 작동시간, n 은 가속지수($n=5.6$)이다. 가속수명시험을 수행하여 획득한 가속지수 5.6를 사용하여 구한 등가토크 계산 결과는 347.6 Nm이며, 부하스펙트럼은 등가토크 347.6Nm 값으로 총 2.09×10^8 누적 손상 사이클을 받게 되는 것으로 정리된다. Fig. 10에서는 부하스펙트럼 수명과 대상 추진축의 수명을 비교하였다. 시험대상 추진축의 평균수명(MTTF)은 1.51×10^9 사이클이며, B_{10} 수명으로는 8.17×10^8 사이클임을 예측할 수 있다. B_{10} 수명의 80% 신뢰하한 일 경우는 2.8×10^8 사이클로 추진축의 수명평가는 실제현장작동 조건인 등가토크 347.6 Nm, 2.09×10^8 사이클의 목표수명과 수명그래프에서 실사용 조건인 등가토크 영역에서 비교하여 보면 특성수명 선도와 B_{10} 수명 선도 그리고 B_{10} 수명의 80% 신뢰하한 선도와 비교하였을 때, 실제 추진축의 수명이 실사용 조건 수명보다 길기 때문에 수명 목표를 만족하는 것으로 볼 수 있다.

4.4 추가시험데이터 분석 비교

와이블 분석에 필요한 최소 수량만으로도 3수준 가속시험을 수행한 교정가속시험법이기 때문에, 시료수 부족으로 부정확한 시험 결과 가능성이 있다는 가정하에, 시료를 추가하여 피로시험을 수행하여 검증하여 보았다. 3수준 값은 동일하게 하고 각 수준당 시료를 2개씩 추가하여 시료8에서 시료 13까지 6개의 시료를 추가 시험하였으

Table 6 Test results of the propeller shaft

Test Level	Test torque (Nm)	Sample No	Test cycle
Highest Level	2,990	#2	5,965
		#3	8,518
		#8	6,449(new)
		#9	4,670(new)
Medium Level	2,392	#4	41,902
		#5	17,234
		#10	24,305(new)
		#11	17,463(new)
Lowest Level	1,794	#6	122,100
		#7	148,882
		#12	166,986(new)
		#13	121,488(new)

며, 그 결과는 Table 6에 정리하였다.

추가된 6개의 데이터를 포함하여 총 12개의 피로 시험결과를 분석 소프트웨어를 사용하여 와이블 분석을 수행하였다. 추가 피로시험에서도 모두 동일한 크로스키트 부위가 파손되었다. 따라서, 동일한 고장모드에 의한 결과로 가속모델의 적합성을 확인할 수 있었다. 이 경우에도 12개의 데이터에 대한 결과를 Minitab과 ALTA 소프트웨어를 사용하여 분석을 수행하였다. 3단계 스트레스 수준의 결과 12개를 분석한 결과, 수명 분포는 비교적 와이블 분포를 잘 따르고 있다고 할 수 있다. Fig. 11은 12개 데이터에 대한 분포 적합도 검정 결과이며, 전체적으로 와이블 분포가 가장 적합한 분포로 볼 수 있다.

분석 결과로부터 형상모수(β)는 3.67이며 부하 스트레스 증가에 따른 가속지수(n)는 5.9인 것을 Fig. 12과 Fig. 13로부터 확인할 수 있다. 12개의 데이터를 사용하여 획득한 가속지수 값은 5.9로 약간의 변동이 있어서 식 (6)의 등가토크 구하는 식으로 재계산하면 등가토크 값은 358.1 Nm 이 된다. Fig. 10와 같이 실차 조건과 가속수명시험 결과와 비교하기 위하여 12개 데이터를 이용하여 재작성하면 Fig. 13과 같이 작성되며, 이 경우도 특성수명, B_{10} 수명 선도 그리고, B_{10} 수명의 80% 신뢰 하한 선도와 비교하였을 때, 실제 추진축의 수명이 실사용 조건 수명보다 길기 때문에 수명 목표를 만족하는 것으로 볼 수 있다.

가속수명시험의 가정 중 하나는 가속조건에서 발생하는 고장모드는 실제 사용 조건에서도 발생한다는 것이다. 이를 확인하기 위해서 가속조건에서 발생한 고장품의 고장모드 확인이 필요하

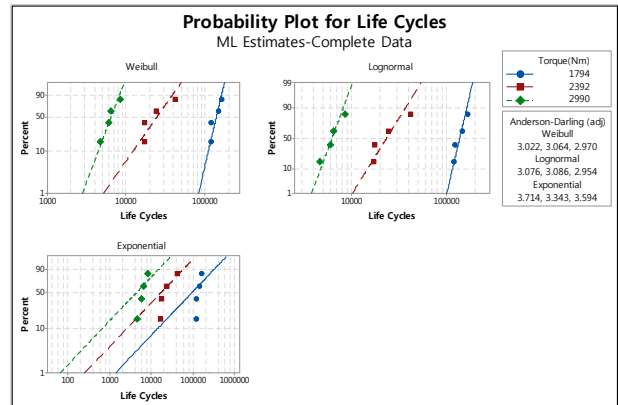


Fig. 11 Goodness of fit test results for 12 samples

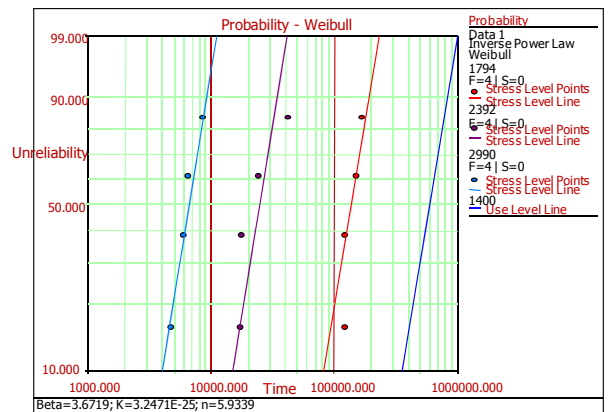


Fig. 12 Weibull probability plot of test results (12 samples)

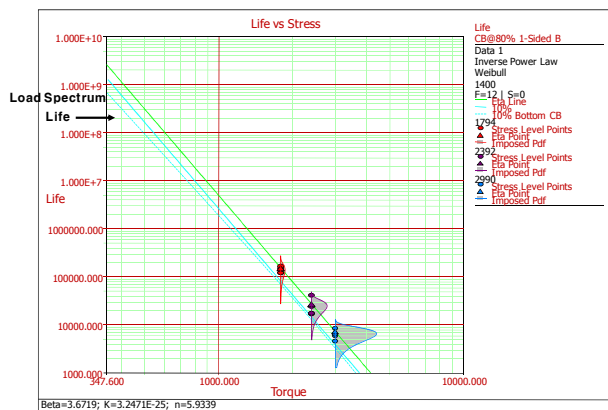


Fig. 13 Life vs. Stress(12 samples)

며, 통계적으로 스트레스 수준별 와이블 분포의 형상모수가 동일함을 확인할 수 있다. 형상모수의 동일성 검정을 위하여 ALTA 소프트웨어에서 제공하는 우도비 검정을 실시하였으며, 6개 시험 데이터의 경우 유의 수준 10%에서 $T=3.1847 < \chi^2 = 4.6052$ 이므로 통계적으로 3개의 스트레스

수준별 형상모수가 동일하다고 할 수 있다. 12개 시험 데이터에 대한 우도비 검정 결과도 유의 수준 10%에서 $T=3.9653 < \chi^2=4.6052$ 이므로 통계적으로 3개의 스트레스 수준별 형상모수가 동일하다고 할 수 있다.

시료 수 6개와 12개를 시험한 데이터를 비교하여 보면 형상모수는 3.66과 3.67로, 가속지수는 5.6과 5.9로 거의 동일하다. 따라서, 각 수준당 2개의 최소 시료량으로 교정가속시험법을 사용한 결과와 4개씩 시험한 시험결과가 별 차이가 없음을 알 수 있었다. 그리고, 실제 사용 조건의 로드 스펙트럼과 비교하여도 수명을 만족하는 것으로 판단되어 본 연구에서는 최소 수량의 시료를 사용하여 교정시험법을 사용하더라도 신뢰성 수명 예측에는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 기계류 부품에서 고가의 시료와 고 시험비용, 장시간의 시험시간을 요하는 피로시험의 경우에는 교정가속시험법을 사용한 수명 평가가 매우 유용함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 지게차용 추진축에 대한 수명예측을 위하여 교정가속수명시험 방법이 적용된 가속수명시험을 수행하고 수명예측을 수행하였다.

가능한 최소시료수를 사용하여 수명데이터를 얻고자 교정가속수명시험 방법을 이용하였으며, 기본 3가지 스트레스 수준으로 각각 2개씩 총 6개의 시료를 사용하여 수명데이터를 얻을 수 있었다. 실제 현장작동조건의 부하스펙트럼을 분석한 결과와 비교하여 수명예측을 수행한 결과 대상제품이 목표수명을 만족함을 확인하였으며, 시험수행을 통하여 시험대상물의 형상모수, 가속모델의 가속지수, 그리고, 사용 조건의 수명을 예측하였다.

각 수준별 4개의 시료를 피로 시험하여 분석한 결과도 최소 수량인 수준별 2개를 시험 분석한 결과와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있어서 최소 수량으로 수행하는 교정가속시험의 유효성을 검증할 수 있었다.

본 연구결과는 유사한 동력전달 축류의 수명예측에도 적용이 가능하고, 부하스트레스를 받는

가속수명모델이 적용되는 유사한 기능의 타 부품의 수명예측에도 적용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌 (References)

- (1) Sonsino, C. M., Kaufmann, H., Foth, J. and Jauch, F., 1997, "Fatigue Strength of Driving Shafts of Automatic Transmission Gearboxes under Operational Torques," *SAE technical paper 970706*.
- (2) General Motors Corp., 2004, "Calibrated Accelerated Life Testing(CALT)," *GM Worldwide Engineering Standards*, GMW 8758.
- (3) Kim, D.S., Kim, H.E., Yoon, S.H. and Kang, E.S., 2010, "Lifetime Estimation of an Axle Drive Shaft by Calibrated Accelerated Life Test Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No.3, pp. 273~281.
- (4) Kim, D.S., 2011, "A Study on the Accelerated Life Evaluation of Drive Shaft for Independent Suspension type AWD Vehicle," *Journal of Applied Reliability*, Vol. 11, No. 4, 343-356.
- (5) Lee, S. R., Kim, W. D., Lee, H. J., Han, S. W. and Kim, K. S., 1994, "Measurement of Service Torque by using the Telemetry System and Prediction of Fatigue Life of Driveshaft for Passenger Car," *Proceeding on KSME Autumn Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 508-516.
- (6) Lee, G. H., Kim, H. E. and Kim, D. S., 2003, "Study of the Accelerated Life Test Method for Power Train Components under Cyclic Loads using Weibull-IPL(inverse power law) Model," *ASME International Mechanical Engineering Congress*, IMECE2003-42652.
- (7) Bertsche, B., 2008, *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability*, Springer.
- (8) Wasserman, G. S., 2003, *Reliability Verification, Testing and Analysis in Engineering Design*, Marcel Dekker, New York.
- (9) Nelson, W., 1990, *Accelerated Testing; Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, WILEY, New York.