

누적손상이론에 근거한 트랙터 변속기의 가속수명 시험시간 계산 방법

Calculation method of accelerated life test time for tractor transmission based on cumulative damage theory

김대철*	윤장원*	강영선*	남상일*
정회원		정회원	정회원
D. C. Kim	J. W. Youn	Y. S. Kang	S. I. Nam

1. 서 론

다양한 형태의 작업을 수행하는 트랙터의 변속기에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 장기간의 수명 시험이 요구된다. 이러한 수명 시험시간을 단축하기 위해서는 트랙터가 포장에서 이용되는 형태를 토대로한 수명예측과 가속패턴을 작성하고 가속계수 결정하는 가속 시험법이 정립되어야 한다.

변동 하중을 받는 부품의 피로 수명을 예측하기 위해서는 변동 하중의 특성과 부품 재료의 피로강도가 요구된다. 또한, 부품의 작동 조건 등 재료의 강도를 약화시킬 수 있는 제반 요인을 고려하여야 한다. 그러나 수명을 정확히 예측하는 일은 대단히 어려운 것으로 인식되고 있으며 피로 파괴의 모형에 따라서도 수명에 차이가 있을 수 있다.

동적인 스트레스를 받는 기계 부품의 내구성 예측에 대한 기존의 방법들은 정적이거나 일정한 부하 또는 요동(oscillating)하는 부하 등을 기초로 하여 여기에 최고 부하(peak load)나 운전 부하 팩터(operational load factor)를 도입하고 실제 부하와의 차이는 안전계수의 계산으로 보완하려고 했다. 그러나 이러한 방법들은 동시에 모든 기계 요소를 최적화하지 못하고 하나의 요소에 대해서만 적용될 수 있다는 단점이 있다.

누적손상이론에 기초한 임의 부하 피로 해석(random load fatigue analysis)은 실제 포장에서 계측한 부하를 기초로 하기 때문에 이러한 단점이 없으며 설계뿐 아니라 실내 시험(lab test)을 위한 자료를 제시한다. 분석 방법은 시간에 따라 변하는 부하를 부하 특성의 빈도 배분으로 통계적 분석한 로드 스펙트럼과 각 부품에 대한 S-N 곡선을 비교 검토한다.

본 연구에서는 누적손상이론을 소개하고 농업용 트랙터 변속기에 대한 피로수명 예측과 가속시험법 개발에 대하여 연구하였다.

* 동양물산기업(주) 중앙기술연구소

2. 재료 및 방법

누적 손상 가설(cumulative damage hypotheses)을 적용한 피로 파괴 해석은 1920년 스웨덴 Palmgren의 볼베어링 변동 하중 연구와 1945년 미국 Miner의 항공기 피로 파괴 해석 문제 연구에 적용되었는데 이러한 선형 누적 손상법 (linear cumulative damage rule)을 Palmgren-Miner rule 또는 Miner rule이라고 한다.

선형 누적 손상법(linear cumulative damage rule)은 크기가 다른 다수의 반복 하중이 각각 일정한 반복수로써 작용할 때 피로 수명을 예측하는 방법이다. 이 방법은 어떤 응력 수준에서 부품의 총수명 시간에 대한 사용 시간의 비는 같은 응력 수준에서 부품이 파괴될 때까지 기대되는 총반복수에 대한 작용 반복수의 비와 같다는 이론에 근거한 것이며, 차량의 기어 설계에서 가장 널리 이용되고 있는 방법이다.

어떤 부품에 반복 하중이 작용할 때 이 부품의 수명을 N_1 사이클이라고 하면 이 반복 하중의 한 사이클은 $1/N_1$ 의 수명을 사용한 것과 같다. 만약 n_1 사이클이 작용하였다면 사용 수명은 n_1/N_1 이 된다. 크기가 다른 반복 하중이 작용할 경우에도 같은 원리가 적용될 수 있다. 즉, 피로 수명이 N_i 사이클인 응력 수준에서 실제 작용한 반복 하중의 사이클을 n_i 라고 하면 이 변동 하중에 의하여 소모된 수명은 n_i/N_i 가 된다. 이러한 원리를 적용하면 부품의 피로 파괴는 재료의 수명이 100% 소모되었을 때 일어난다. 이를 수학적으로 표현하면 피로 파괴는 다음과 같은 조건에서 일어난다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} \geq 1 \quad (1)$$

여기서 n_k 와 N_k 는 각각 특정 반복 응력 상태에서 작용 반복수와 총반복수 즉, 피로 수명을 나타낸다.

부품에 작용하는 하중의 총 작용 시간을 Y 라고 하면, 이 부품의 피로 수명은 다음과 같이 계산된다.

$$Life = \frac{Y}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

가. 수명시험시간 계산

부품의 수명시험시간 계산을 위해서는 각 부품의 수명 분포 형태를 알아야한다. 대부분의 기계류 부품의 수명은 Weibull 분포를 따르는 것으로 조사되었으며, Weibull 분포의 형태를 결정하는 형태모수 값은 실험에 의하여 결정된다. 일반적인 기어의 형태모수 값은 0.5~6.0의 분포를 가진다.

예를 들어, $\beta=1.6$ 인 와이불분포에서 신뢰수준 90%(CL=0.9)로 합격기준을 평균수명(MTBF)

3,000시간을 보증하려고 한다면, 시료수가 1개(n=1)일 때 시험시간은 다음과 같이 계산된다.

$$MTBF = \theta \Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) = \theta \Gamma\left(\frac{2.6}{1.6}\right) \quad (3)$$

여기서 $\Gamma\left(\frac{2.6}{1.6}\right) = 0.89657$ 이므로 식(3)에 대입하면 척도모수 θ 는

$$\theta = \frac{MTBF}{\Gamma\left(\frac{2.6}{1.6}\right)} = \frac{3000}{0.89657} = 3,346 \text{ 이고}$$

시험 시간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t &= \theta \left(\frac{-\ln(1-CL)}{n}\right)^{\frac{1}{\beta}} \\ &= 3,346 \left(\frac{-\ln(1-0.9)}{1}\right)^{\frac{1}{1.6}} \quad (4) \\ &= 5,634 \text{ hr} \end{aligned}$$

결론적으로 각 시료 1set를 신뢰수준 90 %에서 3,000 시간 평균수명(MTBF)을 보장하기 위하여 5,634 시간을 수명시험을 실시하여야 한다. 그러나 5,634 시간의 시험은 현실적으로 어렵기 때문에 시간을 단축하기 위한 가속수명시험이 필요하다.

나. 부하 스펙트럼 분석

실제 사용조건에서 측정된 부하는 모두 시간 함수로서 표현된다. 이러한 데이터를 설계 및 내구성 시험에 이용하기 위해서는 부하 스펙트럼으로 변환시켜야 한다. 부하 스펙트럼은 전형적인 작업 조건에서 작업을 수행할 때 측정된 시간 함수의 부하를 통계적으로 처리하여 나타낸 것으로서, Renius(1976)의 연구에 의하면 농업용 트랙터 변속기에 걸리는 부하 스펙트럼은 그림 1에서와 같다.

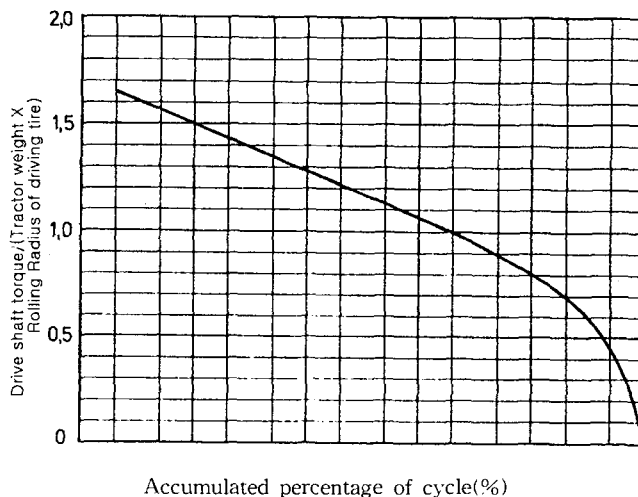


Fig. 1. Load spectrum of tractor.

다. 가속 시험시간 산출

가속 시험시간을 산출하기 위해서는 가속모형을 결정하고 가속하고자 하는 가속 요소를 찾아내는 것이 중요하다. 일반적으로 변속기의 내구성 평가는 주로 기어로 구성된 동력전달부품의 피로수명을 평가대상으로 하고 있으며, 기어류 부품의 수명과 인가하중 사이에는 일반적으로 다음의 식과 같은 가속모형이 성립하는 것으로 알려져 있다.

$$N \cdot T^X = Constant \quad (5)$$

여기서 N과 T는 각각 수명과 토크를 나타내며, X는 수명지수로서 그 값은 실험적인 수치로서 2~8 정도이다.

식(5)의 가속모형과 실차 데이터로부터 등가평균토크 및 등가평균회전속도 사이에는 식(6)과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \omega_{eq} \sum \Delta t_i = & \omega_1 \Delta t_1 \left(\frac{T_1}{T_{eq}} \right)^X \\ & + \omega_2 \Delta t_2 \left(\frac{T_2}{T_{eq}} \right)^X \\ & + \dots + \omega_n \Delta t_n \left(\frac{T_n}{T_{eq}} \right)^X \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 ω_{eq} 는 등가평균회전속도를, T_{eq} 는 등가평균토크를 나타낸다. 등가평균토크 및 등가평균회전속도란 실차 데이터와 같이 실시간 변동하는 토크 및 회전속도조건에서 부품에 인가되는 피로손상과 동일한 크기의 피로손상을 유발하는 평균적인 토크 및 회전속도를 말한다.

그런데, $\omega_{eq} = \frac{\sum \Delta t_i \omega_i}{\sum \Delta t_i}$ 이므로, T_{eq} 는 다음의 식(7)과 같이 계산된다.

$$T_{eq} = \left[\frac{\sum \omega_i \Delta t_i T_i^X}{\sum \omega_i \Delta t_i} \right]^{1/X} \quad (7)$$

그림 1의 부하 스펙트럼은 회전속도를 포함하고 있지 않고, 농업용 트랙터의 경우 주로 쟁기 부하 작업에서 고부하 작업을 하는데, 이 때의 엔진 회전수와 작업 속도 범위는 한정되어 있기 때문에 등가평균회전속도를 일정하게 가정한다. 즉, 식 (7)에서 속도 항목을 빼면 다음과 같이 변형된다.

$$T_{eq} = \left[\frac{\sum \Delta t_i T_i^X}{\sum \Delta t_i} \right]^{1/X} \quad (8)$$

예를 들어, 수명지수 X를 7로 하고 그림 1을 상기 식에 적용하여 계산하면 등가 토크 값은 0.76이 된다.

시험토크를 정격토크의 1.1배로 시험한다면 가속계수는 다음과 같이 계산되고

$$AF = \left[\frac{T_{test}}{T_{field}} \right]^x = \left[\frac{T_{test}}{T_{eq}} \right]^x = \left[\frac{1.1}{0.76} \right]^7 = 13.3 \quad (9)$$

가속 시험 시간은 다음과 같다.

$$t_{test} = \frac{t}{AF} = \frac{5,634}{13.3} = 423 \text{ hr} \quad (10)$$

여기서 t 는 식 (8)에 의해 계산된 등가평균토크 $T = T_{eq}$ 에서 계산된 수명시험시간 5,634 시간이다.

4. 결론

본 연구는 트랙터 변속기의 내구시험을 위한 가속 시험법을 개발하기 위해 수행되었다. 기초 이론은 변동 하중을 받는 기계류 부품의 피로파괴모형을 근사화 할 수 있는 누적손상 이론을 이용하였다. 본 연구에서는 누적손상이론에 대해 소개하였으며, 수명 예측 및 가속 시험 시간 계산 방법을 언급하였다. 농업용 트랙터 변속기의 수명 분포는 Weibull 분포를 따르는 것으로 가정하였으며, 합격 기준을 시료 1개의 사용시간으로부터 추정된 평균수명 (MTBF)의 90% 신뢰하한이 3,000시간이 되기 위한 수명 시험 시간의 계산 예를 보였다. 이러한 가속시험법이 제대로 적용되기 위해서는 트랙터의 사용조건에 근거한 부하 스펙트럼이 있어야 하며, 트랙터 변속기 고장에 대한 정확한 정보가 필요하다.

5. 참고문헌

1. 김대철. 1998. 트랙터 구동장치의 부하 스펙트럼 분석. 석사학위논문. 서울대학교 대학원.
2. 산업자원부 기술표준원. 2003. 신뢰성용어 해설서.
3. Lechner, G and H. Naunheimer. 1999. Automotive transmissions. Springer :184-194.
4. Renius, K. Th. 1977. Application of cumulative damage theory to agricultural tractor design elements. KONSTRUKTION 29(3):85-93.