

기계부품의 내구시험 설계

고 정* · 양치훈* · 이원식** · 송영식*** · 차상원⁺ · 이 찬⁺ · 김명수⁺

*두산인프라코어 · **한국생산기술연구원 · ***자동차부품연구원 · ⁺수원대학교

Design of Durability Test for Mechanical Components

J. Koh* · C.H. Yang* · W.S. Lee** · Y.S. Song*** · S.W. Cha⁺, C. Lee⁺, M.S. Kim⁺

^{*}Doosan Infracore, ^{**}Korea Institute of Industrial Technology
^{***}Korea Automotive Technology Institute, ⁺University of Suwon

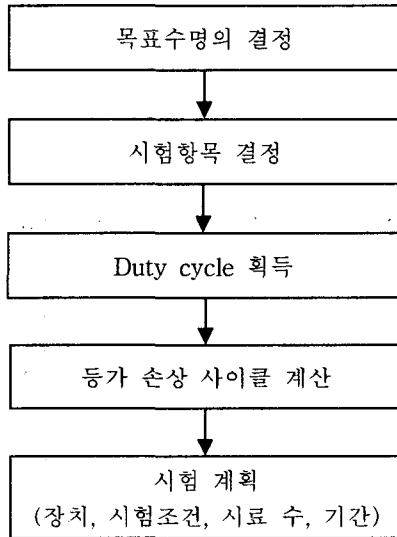
1. 서 론

기계부품의 적용 범위는 확대되고, 사용환경 및 조건은 가혹해지는데 비하여, 보증수명 연장 또는 Maintenance free에 대한 수요자의 요구는 증대되고 있다. 따라서 기계부품의 내구성이 시장에서 경쟁력을 결정하는 중요한 요소로 인식되고 있으며, 기업에서는 내구성 또는 신뢰성 목표를 달성하기 위해 새로운 설계, 해석 및 평가 기술을 적용하려는 시도를 추진하고 있다.

내구시험(Durability Test)은 사용조건 또는 설계자가 의도한 부하조건에서 스트레스와 시간이 지남에 따라 기계부품의 성능이 어떻게 영향을 받는가를 조사하는 시험으로, 목표 기간 또는 작동회수 이상 내구수명을 보증하기 위해 실시한다. 기계부품의 내구성을 보다

정확하게 평가하기 위해서는 필드에서의 사용환경과 부하조건을 정확하게 측정하고, 이를 바탕으로 내구시험을 설계하고 시험을 실시하여 수명을 예측하여야 한다.

본 기고에서는 힘, 토크 등 기계적 부하에 의해 파괴, 마모, 열화, 부식 등의 고장이 발생하는 기계부품의 내구시험 설계를 위한 일반적 절차를 소개한다. 내구시험은 대상 부품의 기능과 용도, 재질, 수리가능 여부, 고장발생에 따른 위험, 시험의 목적에 따라 달라질 수 있다. 따라서 모든 부품에 공통적으로 적용될 수 있는 내구시험 설계 지침을 제시하는 것은 현실적으로 불가능하며, 부품의 특성에 따라 본 기고의 시험절차를 적용하는 것이 적합하지 않을 수도 있다. <그림 1>은 일반적인 내구시험 설계 절차를 나타낸 것이다.



<그림 1> 기계부품의 내구시험 설계 절차

2. 목표수명의 결정

내구시험 설계를 위한 첫 번째 단계는 시험을 통하여 보증하고자 하는 목표수명을 결정하는 것이다. 목표수명은 제조자의 설계수명 또는 소비자가 통상적으로 기대하는 요구수명으로, 다음과 같은 요소로 표현된다.

- ① 사용조건: 기계부품의 수명은 사용조건에 따라 달라진다. 따라서 목표수명을 결정할 때, 수명에 영향을 미치는 사용조건을 명시하여야 한다.
- ② 신뢰수준: 시료의 시험결과로부터 추정된 내구수명은 불확실성을 내포한다. 따라서 목표수명을 결정할 때, 추정오차를 나타내는 신뢰수준(Confidence level)을 표시해야

한다. 신뢰수준은 95% 또는 90%와 같이 높게 설정하는 것이 바람직하지만, 부품의 특성과 현실적으로 가용한 시료의 수, 시험시간 및 비용을 고려하여 60% 정도로 설정해야 할 경우도 있다.

- ③ 신뢰성 척도 및 시간 : B_{10} (또는 B_5 , B_1)수명, MTBF, MTTF 등이 기계부품의 수명을 표현하기 위한 척도로 사용된다. 여기서, 시간의 단위는 부품의 특성에 따라 실제 가동시간, 사용회수, 주행거리, on-off 사이클 등이 될 수 있다.

다음은 기계부품의 목표수명의 예이다.

- Proving Ground 주행조건에서 신뢰수준 90%로 MTTF가 5,000시간 이상
- 정격 회전속도 및 부하조건에서 신뢰수준 95%로 B_{10} 수명이 800시간 이상
- 필드 사용조건에서 신뢰수준 70%로 MTBF가 2,000시간 이상
- 최대 속도 및 최대 압력 조건에서 신뢰수준 70%로 MTTF가 2,500회 이상

3. 시험항목 결정

다음으로 대상 부품의 주요 고장 모드/메커니즘을 검증 또는 재현할 수 있는 시험항목을 결정한다. 시험항목을 결정하는 방법은 일반적으로 다음과 같다.

- ① 유사 제품의 필드 데이터를 분석한다. 필드에서 수집된 데이터를 고장모드와 메커니즘 별로 분류하고, 신뢰도 분석을 통하여 문제가 되는 주요 고장모드/메커니즘을 파악하며, 이를 검증하기 위한 시험항목을 결정한다.
- ② FMEA를 통해 RPN(Risk Priority Number)이 높은 고장모드와 메커니즘을 추출하고, 이를 검증할 수 있는 시험항목을 결정한다.

4. Duty Cycle 획득

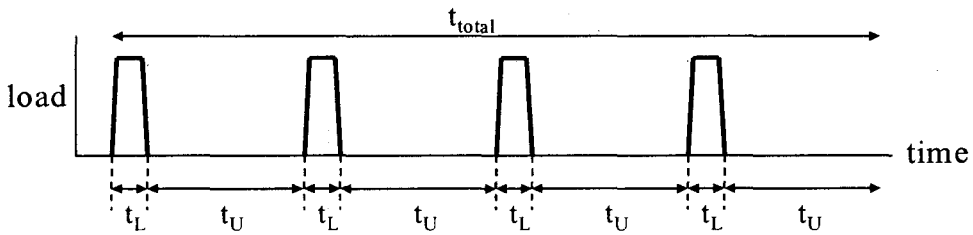
하중, 온도 등 다양한 부하를 받는 기계부품의 내구수명을 정확하게 평가하기 위해서는 실제 사용 시의 부하 이력(Load history)과 유사하게 부하를 시험에서 인가할 필요가 있다. 가장 바람직한 방법은 실제 부품이 사용 중 겪는 것과 동일한 부하를 가하는 것이나, 이는 많은 시간과 비용이 소요되어 매우 비효율적이며 특히 목표수명이 장기간인 경우에는 사실상 적용이 불가능하다. 시간 및 비용을 감안할 때 보다 일반적이고 현실적인 방법은 각 부품에 대한 Duty cycle을 감안하여 시험하는 것이다.

4.1 Duty Cycle의 정의

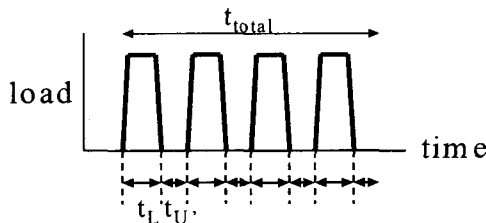
Duty cycle은 부품, 장비 또는 시스템의 전체 사용시간 중 가동시간에 대한 비율로 정의된다. 어떤 장비를 100초 동안 1초만 가동하고 99초 동안은 가동하지 않는다면 이때의 Duty cycle은 1/100 또는 1%로 표시된다. 만일 Duty cycle이 1%인 사용 조건에서 장비의 수명이 10,000 시간이라면, Duty cycle이 2%인 조건에서는 5,000 시간의 수명을 가질 것으로 기대할 수 있다. <그림 2a>는 t_L 시간동안 작동하고(부하), t_U 시간동안 작동하지 않는(무부하) 부품의 부하 이력을 예시한 것이다. <그림 2a>에서 무부하 구간 t_U 가 부품의 수명에 영향을 미치지 않는다면 <그림 2a>를 <그림 2b>와 같이 변환하여 전체 시험시간을 줄일 수 있다.

4.2 Duty Cycle의 결정

Duty cycle을 결정할 때 주요 고려사항은 제품 사용환경에 따른 부하 이력의 산포이다. 기계부품의 실제 사용조건에서 동일한 종류와 모드의 부하가 작용한다 할지라도 사용자에게 따라 부하의 크기와 빈도 등이 다를 수 있다. 이와 같이 Duty cycle 결정에는 해당제품의 특성, 사용환경 및 조건의 다양성에 대한 고려가 필수적이다. Duty cycle을 결정하는 방법으로는 관련 규격과 표준을 이용하는 방법과 필드 부하 이력(Field load history)을 직접 계측하는 방법이 있다.



(a) 동작시간이 일정한 단순 on-off 동작의 부하 이력



(b) (a)의 부하 이력의 시간 축약

<그림 2> 부하 이력과 시간 축약

4.2.1 관련 규격과 표준의 이용

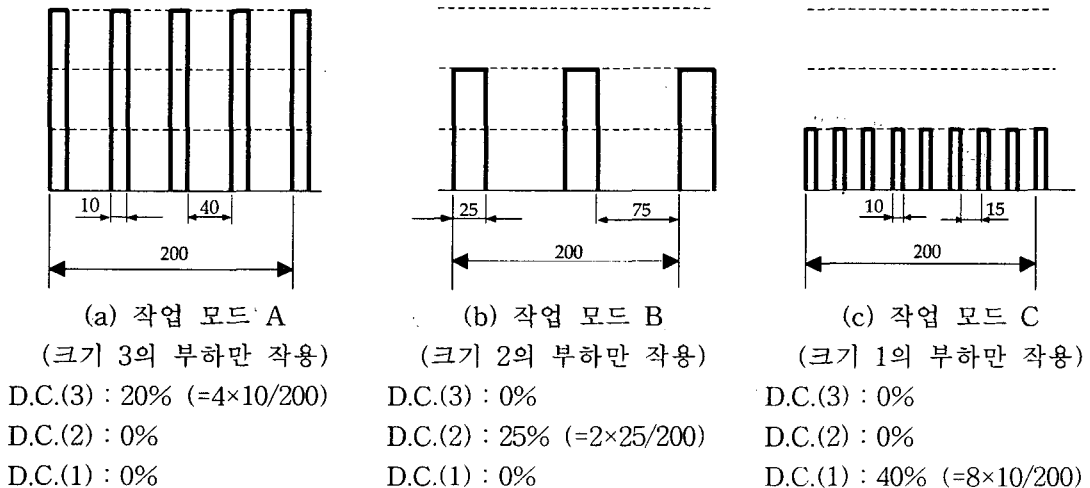
대상 기계부품에 대하여 공신력이 있는 기관에서 제정한 규격 또는 표준 등이 존재할 경우에는 실제 부하 계측을 통한 방법에 비해 비용과 시간을 획기적으로 절감하면서 활용 결과에 대한 높은 신인도를 확보할 수 있다.

통상 범용으로 사용되는 기계부품의 경우에는 비교적 부하 모드와 범위가 일정하여 고장 모드와 메커니즘이 동일한 경우가 많으며, 특히 이러한 부품의 경우에는 설계기준이나 지침이 제시된 경우도 많이 있다. 따라서 해당 기준에 따라 시스템을 설계한 경우에는 관련 규격에서 제시되어 있는 내구시험 조건을 참조하여 Duty cycle을 설정하는 것이 효과적이다.

4.2.2 필드 부하 이력의 계측

필드 부하 이력을 계측하기 위해서는 부품 손상을 초래하는 주요 부하의 종류를 파악하고, 이들을 측정할 수 있는 적절한 센서와 계측장비를 장착한 후 시험을 실시하여 데이터를 획득한다. 측정된 데이터는 적절한 처리를 통해 부하 정도의 판정 및 해석 또는 내구시험 조건설정 등의 활용에 필요한 형태로 가공되어야 한다.

필드 부하 이력 계측을 통하여 다양한 사용 모드에 따른 환경별 부하의 영향을 분석하기 위해서는 사용 모드와 환경 별로 각각 측정을 실시한 후 이를 종합하여야 한다. 이때 필요한 정보는 각 사용 모드 또는 환경별 사용 비율로서, 이를 사용률이라고 한다. 사용률은 서로 다른 작업 모드 또는 환경별 사용 비율을 의미하기도 하며, 이 경우에는 시스템의 성격에 따라 용도별, 사용(작업) 환경별로 구분한다.



<그림 3> 작업 모드별로 부하의 크기, 유지시간 및 간격이 다른 부하

<표 1> 사용률을 고려한 <그림 3>의 부하 이력의 Duty Cycle

경우	작업 모드별 사용률		부하 크기별 Duty Cycle (= 작업 모드별 해당 부하의 Duty Cycle × 작업 모드별 사용률)		
	작업 모드	사용률	크기 3인 부하	크기 2인 부하	크기 1인 부하
1	A	33.3%	6.7% (20%×33.3%)	0% (0%×33.3%)	0% (0%×33.3%)
	B	33.3%	0% (0%×33.3%)	8.3% (25%×33.3%)	0% (0%×33.3%)
	C	33.3%	0%(0%×33.3%)	0%(0%×33.3%)	13.3%(40%×33.3%)
	Total	100%	6.7%	8.3%	13.3%
2	A	40%	8% (20%×40%)	0% (0%×40%)	0% (0%×40%)
	B	40%	0% (0%×40%)	10% (25%×40%)	0% (0%×40%)
	C	20%	0% (0%×20%)	0% (0%×20%)	8% (40%×20%)
	Total	100%	8%	10%	8%

작업 용도별 또는 환경별로 획득한 부하 이력과 사용률 정보를 종합하여 1개의 대표적 인 Duty cycle을 완성하거나 또는 용도별, 환경별로 독립적인 Duty cycle을 완성하게 된다. 이때 최종 Duty cycle의 완성을 위해서는 손상의 정도에 대한 정량적 고려가 필수적이다.

실제 사용 중의 Duty cycle은 작업 모드별 Duty cycle에 사용률을 고려하여 결정할 수 있으며, 이로부터 작업 모드별 부하 크기와 빈도가 다르면, 사용률(작업 모드 수행 비율)에 따라 총 사용시간 중의 부하 작용 이력도 다르게 나타난다. 실제 사용 시 작업 모드의 순서가 일정하지 않지만 부하의 순서가 손상 정도에 영향을 미치지 않는 경우에는 작업 모드별 파형을 순차적으로 배치하고, 이 파형을 반복시켜 내구시험을 수행할 수 있다. <그림 3>은 작업 모드별로 부하의 크기, 유지시간 및 간격이 다른 부하의 예이며, <표 1>은 사용률을 고려한 <그림 3>의 부하 이력의 Duty Cycle를 예시한 것이다.

5. 등가 손상 사이클(Equivalent Damage Cycle) 계산

기계부품의 내구수명을 정확하게 평가할 수 있는 방법은 실제 사용조건에서 부하를 직접 계측하고, 측정된 부하이력을 재현할 수 있도록 시험을 하는 것이다. 그러나 이를 위해서는 사용 중에 나타나는 다양한 형태와 크기의 부하를 재현할 수 있는 장치가 필요하고, 또한 목표수명 이상 장기간의 시간이 소요되므로 실제 사용조건외의 부하 이력을 재현하는

시험은 가능하지 않은 경우가 대부분이다. 따라서 필드의 고장모드와 메커니즘을 동일하게 재현하며, 사용조건보다 가혹한 조건에서 시험하여 시험기간을 최대한 단축하는 것이 필요하다. 이때 실제 사용조건에서와 동일한 크기의 손상을 초래하는 가혹한 조건에서의 부하 사이클을 등가 손상 사이클(Equivalent Damage Cycle)이라 한다.

등가 손상 사이클을 구하기 위해서는 복잡한 형태의 부하 이력을 정량화해야 하며, 다양한 계수법(Counting Method)들이 사용되고 있다. 일반적인 계수법으로 Peak Counting, Level Cross Counting, Rainflow Cycle Counting이 있으며, ASTM E1049에서는 이외에도 여러 가지 Counting 기법들을 제시하고 있다.

6. 시험계획

6.1 시험장치

기계부품의 내구수명을 평가하기 위해 가장 적합한 시험장치는 부품이 사용되는 실제 장치 또는 설비를 이용하는 것이다. 그러나 대형 부품 또는 완성품의 경우와 같이 현실적으로 적용이 불가능한 경우도 있고, 목표수명 이상 장기간의 시험시간이 필요할 수도 있다. 따라서 시험장치는 실제 작동환경에 최대한 가깝게 제작되어 기계부품(요소부품 또는 어셈블리)의 손상 메커니즘을 변화시키지 않고 재현할 수 있는 시뮬레이터 수준이어야 하며, 가속수명시험이 가능하여 평가시간을 최소화할 수 있어야 한다.

6.2 가속 모델의 검토

내구시험 기간을 단축시키기 위해서는 가속수명시험을 실시하는 것이 일반적이며, 따라서 적합한 가속 모델을 검토할 필요가 있다. 기계부품에 적용할 수 있는 가속모델로는 역승, 아레니우스, 혼합 모델 등이 있다.

가속모델은 수명과 인가되는 부하 사이에 관계식이 존재할 때 결정된다. 그러나 부하를 증가시킴으로써 고장 메커니즘 혹은 고장 모드가 변하게 되어 부하와 수명과의 관계를 도출할 수 없거나 수명이 가해지는 부하의 크기보다는 주기적인 사용회수에 크게 의존하는 경우 등에는 수명 - 부하의 가속모델을 구할 수 없다.

적합한 가속모델을 사용할 수 없는 경우에도, 다음과 같이 시험시간을 단축시키는 몇 가지 방법을 사용할 수 있다.

6.2.1 축시시험(Time Compressed Test)

축시시험은 자동차 시동장치, 냉장고 문과 같이 내구수명이 인가부하의 크기나 연속 동작시간 보다 주기적·반복적 작동 회수에 더 큰 영향을 받는 아이টে에 사용된다. 이때 인가되는 부하와 환경은 정상 사용조건에서 기대되는 수준으로 유지된다.

축시시험에서는 실제 사용조건보다 사용률을 높여 기간을 단축한다. 예를 들어, 가정에서 하루 2회 세탁기를 사용하고, 한번에 1시간이 소요된다고 할 때, 1년에 평균 300일 세탁을 하면 10년 동안 세탁기를 사용하는 총 시간은 6,000시간이 된다. 만약 하루에 20시간씩 시험을 하면 $6,000/20=300$ 일이 소요되며, 즉 10년을 300일로 가속한 것과 같다.

6.2.2 어느 수준 이상의 부하 피크만을 추출하여 시험

아이테의 부하이력 중에서 수명에 큰 영향을 미치지 않는 작은 피크들을 제거하고 어느 수준 이상의 피크만을 추출하여 시험하는 방법이다. 한 예로 구조물의 부하이력에서 최대 피크의 5% 이하인 작은 피크들을 제거함으로써 전체 시험기간을 단축시킬 수 있다.

6.2.3 고장 발생 징후 검출을 통한 조기 고장 판정법

기어의 피팅 피로(표면 피로)의 경우 피팅의 발생 초기에 면적비를 측정하고, 피스톤의 마모시험의 경우에는 Radioactive tracer를 이용하여 마모고장 시간을 단기간에 예측하여 수명을 추정할 수 있다. 이와 같이 시험 제품의 고장의 징후 또는 메커니즘의 진행을 초기에 발견함으로써 시험기간을 단축시킬 수 있다.

6.2.4 환경인자에 의한 노화 또는 열화 등을 부가하는 방법

오일을 장기간 사용할 때 생성되는 미세한 입자들이 기계부품의 마찰되는 부분에서 마모를 일으킨다. 이러한 경우 시험시간을 단축하기 위해 혹은 고장의 발생여부를 단기간에 판단하기 위해 시험 초기부터 오일에 먼지 혹은 미세한 입자 등을 첨가하여 가속시키는 경우가 있다.

6.3 시험부하의 크기 결정

필드에서의 고장 모드와 메커니즘을 동일하게 재현하며 시험기간을 최대한 단축할 수 있도록 시험부하의 크기를 결정하며 이때 부하의 크기는 사용조건보다 가혹하게 하는 것이 일반적이다. 한편 부하의 크기에 따라 손상의 형태에 차이가 있을 수 있으므로 이 경우에는 부하의 크기를 여러 단계로 구분하여 시험하는 것이 바람직하다.

가속모델과 Duty cycle로부터 시험부하에서의 등가 손상 사이클을 계산할 수 있고, 이

로부터 시험부하에서의 목표수명을 구할 수 있다.

일반적으로 가속시험에서는 부하의 크기를 증가시켜 시험시간을 단축하는 방법을 사용한다. 그러나 가해지는 부하의 크기가 증가함에 따라 부품에 발생하는 고장 메커니즘이 변하거나 혹은 다른 고장 모드가 발생하는 경우가 종종 있다. 즉 부하의 크기에 의해 고장 메커니즘 및 모드가 변화할 수 있으며, 만약 이러한 현상이 발생할 경우 가속시험을 통한 신뢰성 평가의 결과는 실제 수명과 매우 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 부하 증가에 따른 가속수명시험이 가능한 것은 부하를 증가시키는 것에 따른 고장 메커니즘이 변하지 않으며 평균수명(MTTF), 특성치 변화의 패턴, 고장시간 분포(확률지 상의 패턴), 메디안 수명 또는 고장률 등이 부하의 크기와 함께 규칙적으로 변화하는 경우이다. 만약 부하의 증가를 통해 실제 사용에서 발생하는 고장 메커니즘과는 다른 고장 메커니즘이 나타나게 된다면 두뇌의 좋고 나쁨을 마라톤 경주를 통해 판단하는 것과 같은 실수를 범하게 되는 것과 같다.

6.4 시료 수와 시험기간 결정

신뢰성시험에서 신뢰성 목표를 보증하기 위한 시료 수와 시험기간은 상호보완적인 관계에 있다. 즉, 시료 수가 부족하면 이를 시험기간으로 보상할 수 있고, 역으로 시험기간에 제약이 있으면 시료 수를 조절하여 보완할 수도 있다. 한편, 시료 수와 시험기간 결정에 영향을 미치는 또 하나의 요소는 신뢰수준이다. 시료 수 또는 시험기간의 결정방법은 지면 관계로 생략하며, 관련 서적 또는 『내구시험 설계 Guideline』을 참조하기 바란다.

7. 맺 음 말

본 기고는 수원대학교 신뢰성혁신센터에서 수행하고 있는 산업기술기반조성 『신뢰성향상을 위한 표준화 기반구축 및 확산』사업의 성과물로서 2004년에 발간한 『내구시험 설계 Guideline』의 내용을 요약한 것이다. 이 사업에 물심양면으로 도움을 준 워킹그룹 위원들과 산업자원부/기술표준원의 담당관에게 감사드리며, 내구시험에 관한 문의는 신뢰성혁신센터 홈페이지(<http://ric.suwon.ac.kr>)를 이용하기 바란다.

