

트랙터 PTO 구동기어의 수명 평가

Life Evaluation of Driving Gear of PTO on Tractors

남궁만준*	최창현*
정회원	정회원
M.J.NahmGung	C.H.Choi

1. 서론

트랙터의 많은 보급으로 토양 및 작업조건에 맞는 한국실정에 적합한 한국형 트랙터 개발의 필요성이 대두되고 있다. 한국형 트랙터를 설계·개발하려면, 트랙터의 부하특성을 분석할 수 있는 자료의 수집 및 분석이 필요하고, 야외포장 작업시에 발생하는 트랙터의 부하특성을 측정하여 트랙터에 미치는 부하와 수명을 평가하여 내구성을 측정하는 것이 중요하다.

국내에서는 실제 야외 작업에서 부하측정과 가속도에 관한 연구가 수행되었으나, 2륜 구동 상태에서 뒤차축의 토크만 측정하였으며, 4륜 구동상태에서 앞·뒤차축의 토크측정과 로타리 작업시의 PTO 토크를 측정하는 연구는 보고된 바가 없다. 보다 정확한 부하분석을 이루려면 트랙터 작업(쟁기, 로타리 등)시에 모든 차축 및 PTO 축에 걸리는 토크, 회전속도를 측정할 수 있는 트랙터 부하측정 시스템을 구성하여, 실제 야외 포장작업에서 측정하고 분석하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 토양 상태가 다른 지역에서 트랙터에 발생하는 부하를 정확하고 실시간으로 측정할 수 있는 부하계측 전용시스템을 구축하고 측정된 각 부분의 부하를 분석하고 수명을 평가하여 설계에 필요한 기초자료를 제공하는데 있다.

2. 재료 및 방법

부하측정 시스템은 트랙터 차축의 토오크(4ch)와 회전수(4ch), PTO 토오크(1ch), 엔진 회전수(1ch)를 측정하기 위한 센서, I/O 인터페이스와 신호조정기를 포함한 자료수집장치, 마이크로 컴퓨터로 구성되었다. 차축 및 PTO 축의 토오크를 측정하기 위하여 Four-element full-bridge 형태의 스트레인 게이지를 사용하였고, 회전 중에 신호의 안전한 전달을 위하여 슬립링(slip ring)과 앰프(amplifier)를 사용하였다. 엔진속도는 엔진의 회전축에 엔코더와 커플링으로 연결하여 측정하였고, 뒷차축의 속도는 뒷차축 동력전달부분 계통의 축을 가공하여 엔코더와 연결하여 측정하였으며, 앞차축은 차축에 직접 엔코더를 부착하여 회전수를 측정하였다. PTO 회전수는 엔진에서 연결된 축이 PTO 축까지 연결되어 있는 독립 PTO 형

* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스전공

태이므로 엔진속도와 비례하여 계산하였다. 모든 센서의 교정작업을 실시한 결과 결정계수 (R^2)는 0.999 이상이였다. 트랙터 부하측정 시스템으로 경기도 수원과 이천의 논과 밭 22개 지역에서 쟁기 및 로타리 작업의 부하를 측정하고 분석하였다. <그림 1>은 트랙터 부하측정 시스템의 구성도를 나타낸다.

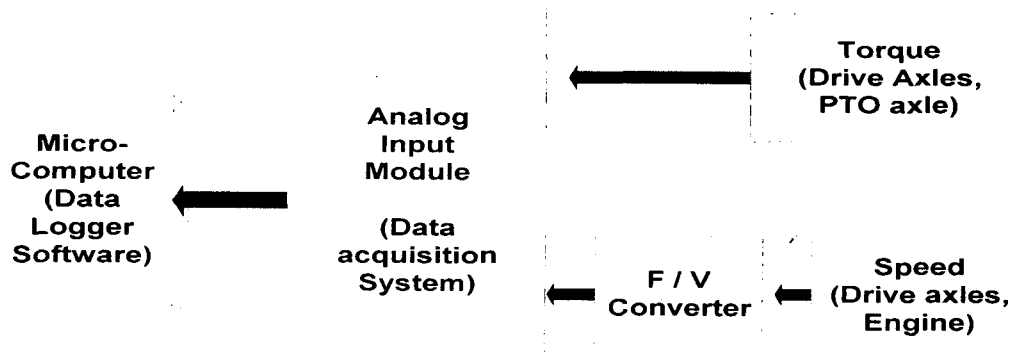


Fig. 1 Configuration of the measurement system for tractor field performance.

트랙터의 적성 내구수명을 보장하기 위해서는 어떤 방법으로 시험하고 어떤 시험조건을 선택하며, 작용부하 및 빈도가 얼마나 되는지 결정해야 한다. 그러므로 실제 농작업시의 사용자의 습관을 조사함으로써 정확한 부하를 재현할 수 있으며 트랙터의 목표수명을 구할 수 있다. 조사방법은 제주도를 제외한 전국을 대상으로 농기계 보유대수 비율에 의하여 농기계 대리점의 추천을 통해 가장 일반적인 조건의 트랙터 소유자 및 작업자에게 방문조사를 실시하였다. 조사표본은 총 41명이며, 그 중에 34명(83%)이 자가 영농자이었다. 지역별로는 경기·강원 6명, 충청 8명, 전·남북 12명, 경·남북 15명이고, 조사기간은 1998년 농번기인 9월경에 실시하였으며 조사항목은 아래와 같다. 1) 트랙터 마력 2) 작업별 연간 이용시간 3) 트랙터 작업시 주행속도 4) 쟁기 작업시 주행단수별 사용빈도 5) 로타리 작업시 PTO 단수별 사용빈도이다.

수명평가를 위하여 토오크와 기어의 치폭을 변화시키면서 기어의 굽힘피로 시험을 실시하였으며, 실험에 사용된 기어는 트랙터 변속기의 기어중에서 PTO의 최종축을 구동하는 스피어 기어(spur gear)를 사용하였다. 변속기의 여러 기어쌍 중에서 PTO 최종축의 구동기어를 선택한 이유는 스피어 기어의 형태이므로 기어 형상해석이 용이하였다. PTO 최종축의 기어는 PTO 단수에 상관없이 PTO가 작동할 때 항상 작동하는 기어이다. 또한 로타리와 트랙터의 PTO축이 PTO 중간축으로 직접 연결되어 있어서 응력계산이 편리하였다. 기어를 저 토오크로 실험하려면 부하가 아주 작아 수명이 길기 때문에 실험이 긴 시간이 필요하다. 원 기어를 가지고 실험할 경우에는 여러 기어쌍 중에서 어느것이 먼저 파단될 지 예측할 수 없다. 따라서 변속기 부분에서 한쌍의 기어쌍을 따로 분리하여, 별도의 기어박스(gear box)를

제작하여 사용하는 경우도 있는데 이런 경우에는 변속기의 재현성이 떨어지는 단점이 있다. 본 연구에서는 기어의 굽힘 피로시험을 통해 기어의 파단(breakage)현상을 실험하였다. Almen-Straub식의 변수에서도 알 수 있듯이, 치형 등은 그대로인 상태에서 토오크와 기어의 치폭변화는 굽힘응력의 크기만 변하고, 원기어에 대한 기어의 재현성을 유지할 수 있었다. PTO 최종축 기어의 재질은 SCM 420H이며, 열처리사양은 침탄 담금질이고, 로크웰 경도(Rockwell hardness)는 60.0 이었다.

기어의 피로강도에 대한 응력-수명에 대한 특성을 조사하기 위하여 트랙터(55ps) 변속기의 PTO축과 110kw의 용량의 PTO 동력계(model:GS-130, Schenk Co., Germany)를 연결하여 부하를 주었다. 기어의 치폭(10mm, 11mm, 12mm), 토오크(578Nm, 676Nm, 774Nm)를 변화 시키면서 기어가 파손될 때의 시간을 기록하였다. 파단된 시간(minute)과 회전수(rpm)을 곱한 등가 사이클을 굽힘응력으로 계산된 응력과 비교하여 수명-응력 곡선을 작성하였다. <그림 2>는 트랙터의 엔진, 변속기와 동력계를 연결한 구성도이다.

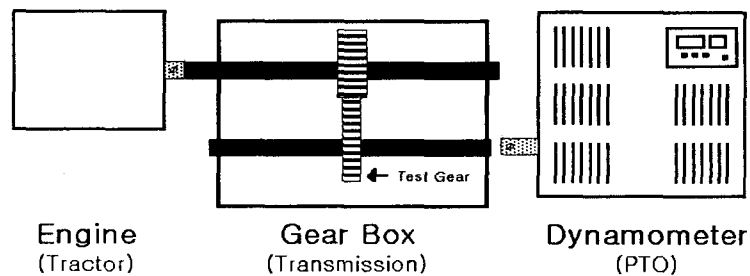


Fig. 2 Diagram of test system for bending fatigue life.

일반적으로 가혹도(severeness)는 S-N 곡선과 비교하여, S-N 곡선에서의 빈도수 N과 부하 스펙트럼의 빈도수 n의 총합을 총손상으로 나타내고, 한국의 대표적 토양이라고 판단되는 지역을 기준으로, 기준토양의 총손상에 대하여 각각의 지역들의 토양이 상대적으로 얼마의 비율을 상대 가혹도(relative severeness)로 구하고 있다. 본 연구에서는 목표수명에 해당하는 허용응력에 대해 현재의 측정의 비를 가혹도로 설정하여 각 지역의 가혹도를 구하였고, 대표적 토양이라고 판단되는 지역의 측정응력을 기준으로, 다른 지역의 측정응력의 비를 상대 가혹도로 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 사용자 조사결과

트랙터의 연간 평균 사용시간은 마력별로 138~244 시간으로 중·대형급(50~80마력 미만)의 중대형 트랙터의 사용시간이 가장 많았다. 작업별 이용비율은 마력별로 모델별로 차이가 있지만 전반적으로 로타리 작업 44.2%, 경운 작업 27.4%, 로우더 작업 21.4%, 운반 작업

4.2%, 기타 작업 2.9%의 순서이다.

30~49 마력급의 중형트랙터의 연간 사용시간이 209시간으로 조사되었는데, 농촌진흥청의 조사결과(1993)에서도 30~40 마력급 트랙터의 연간 사용시간이 209.8 시간으로 조사된 것과 비슷하였다. 본 연구에서는 트랙터의 내구수명을 15년으로 설정하였으며, 로타리 작업의 목표수명을 1,380시간으로 설정하여 계산하였다.

3-2. 기어의 굽힘피로 시험 결과

기어의 피로실험 결과를 ASTM E739-80의 해석방법에 따라, 직선적으로 분석하였다. 즉 응력(stress) 및 수명(life)을 상용대수(common logarithm)로 바꾸었다. 대수적으로 구한 응력과 수명의 관계는 선형적이었고, 결정계수(R^2)가 0.9731이었다. <그림 4>는 실험에 의해 구한 응력-수명의 관계를 로그 스케일로 표현한 그래프이다.

3-3. 야외포장 실험결과 및 수명평가

밭에서 로타리 작업할 때의 주행부하는 8~16 %의 범위이고, 나머지 소요동력은 PTO 토오크로 소비되는 것으로 나타났다. 논에서 로타리 작업할 때의 주행부하는 지역에 따라 약간 편차가 있으나 15.2~20.0 %로 밭 작업에 비하여 크게 나타났다.

<그림 5>는 로타리 작업시의 PTO 및 각 차축에 걸리는 토오크 그래프이다. 그래프에서 쟁기작업에 비하여 주행토크가 줄어든 대신 PTO 축의 토크가 상대적으로 증가하였다. 초기의 신호가 피크를 이루는 것은 쟁기가 토양에 파고들 때 나타나는 신호이다.

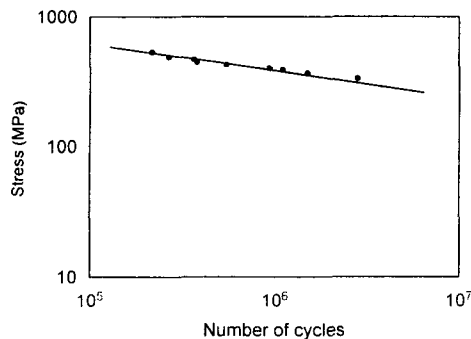


Fig. 3 Stress-Life curve in log-log scale.

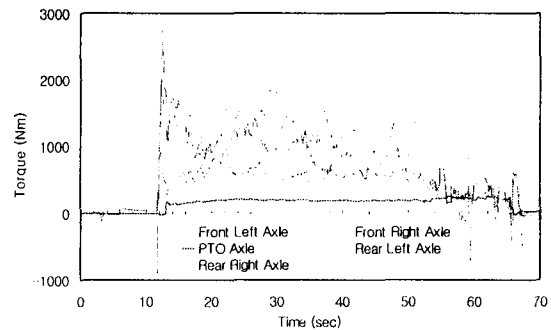


Fig. 4 Torque data for rotary operation at upland.

<그림 5>은 로타리 작업시의 엔진, PTO 및 각 차축의 회전수 그래프이다. 엔진 회전수는 2,750 rpm 정도로 일정하였고, PTO축의 회전수 초기에 신호가 약간 떨리면서 일정하게 되었고, 차축의 회전수는 앞차축이 뒤차축보다 차륜반경이 적으므로 회전수가 컸다. <그림 6>은 쟁기 작업시의 각 차축과 PTO축의 소요동력의 그래프이다. 쟁기 작업보다 주행부분의 소요동력이 줄고, 총 동력에 대한 PTO축의 소요동력이 거의 대부분 차지함을 알 수 있다.

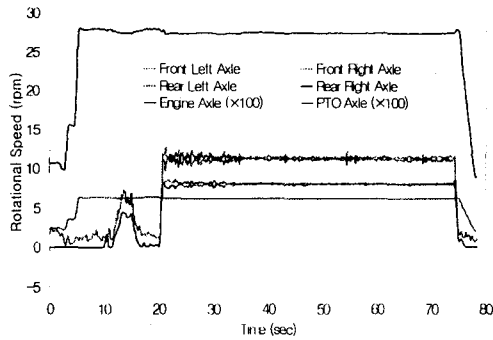


Fig. 5 Rotational speed data for rotary operation at upland.

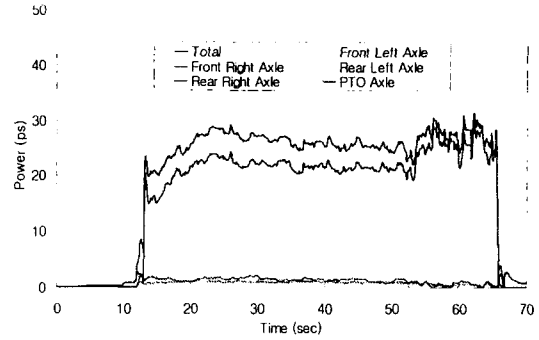


Fig. 6 Power data for rotary operation at upland.

논지역의 로타리 PTO 1단(585rpm) 작업시, 목표수명 시간인 1,380시간에 해당하는 허용응력에 대한 측정된 응력의 가속도는 0.19~0.50 이었다. 또한 대표적인 토양이라고 판단되는 지역의 응력에 대하여, 각 지역의 응력이 상대적으로 얼마의 비율인가를 나타내는 상대 가속도로 나타내었다. <그림 7>은 비교적 대표적인 토양이라 할 수 있는 논 4지역을 기준으로 할 때, PTO 1단(585rpm)으로 주행 단수 L2단(2.7km/h)으로 로타리 작업시 각 지역의 상대 가속도를 나타낸다.

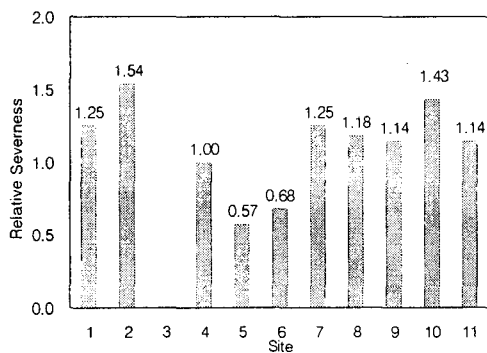


Fig 7 Relative severeness of rotary operations at paddy field.

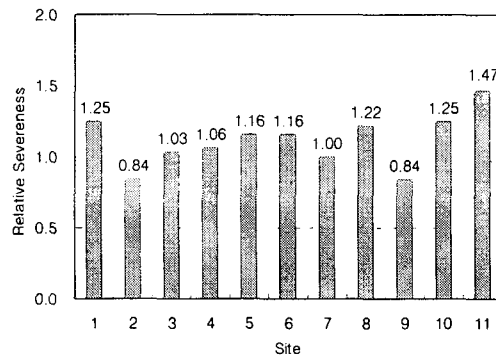


Fig. 8 Relative severeness of rotary operations at upland.

밭 지역의 로타리 PTO 1단(585rpm) 작업시 각 지역의 목표수명 시간 1,380시간에 해당하는 허용응력에 대한 응력의 가속도는 0.06~0.54 이었다. 전체적으로 허용응력과 비교할 때 측정된 응력이 상당히 낮고, 목표수명에 대하여 더 많은 수명을 가지므로 기어의 내구성에 문제가 없음을 알 수 있었다. <그림 8>은 비교적 대표적인 토양이라 할 수 있는 밭 7지역을 기준으로 할 때, PTO 1단(585rpm)으로 주행 단수 L2단(2.7km/h)으로 로타리 작업시 각 지역의 상대 가속도를 나타낸다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 트랙터의 야외포장에서의 부하특성과 수명평가를 위하여 트랙터 부하측정 시스템을 구성하였고, 경기도 수원과 이천의 논과 밭 22개 지역에서 쟁기 및 로타리 작업의 부하를 측정하고 분석하였다. 사용자 조사에서 30~49 마력급의 중형트랙터의 연간 사용 시간은 209 시간으로 조사되었다. 본 연구에서는 트랙터의 내구수명을 15년으로 설정하였으며, 로타리 작업의 목표수명을 1,380 시간으로 설정하여 계산하였다

기어의 피로실험 결과를 ASTM E739-80의 해석방법에 따라, 직선적으로 분석하였다. 즉 응력(stress) 및 수명(life)을 상용대수(common logarithm)로 바꾸었다. 대수적으로 구한 응력과 수명의 관계는 선형적이었고 결정계수(R^2)가 0.9731이었다.

각 지역의 부하분석을 실시하였으며, 밭에서 로타리 작업할 때의 주행부하는 8~16 %의 범위이고, 나머지 소요동력은 PTO 토크로 소비되는 것으로 나타났다. 논에서 로타리 작업할 때의 주행부하는 지역에 따라 약간 편차가 있으나 15.2~20.0 %로 밭 작업에 비하여 크게 나타났다.

각 지역에 대한 수명평가를 실시하였으며, 논지역의 로타리 PTO 1단(585rpm) 작업시에 목표수명 시간인 1,380시간에 해당하는 허용응력에 대한 측정된 응력의 가혹도는 0.19~0.50 이었다. 또한 대표적인 토양이라고 판단되는 지역의 응력에 대하여, 각 지역의 응력이 상대적으로 얼마의 비율인가를 나타내는 상대 가혹도로 나타내었다. 밭 지역의 로타리 PTO 1단(585rpm) 작업시 각 지역의 목표수명 시간에 해당하는 허용응력에 대한 응력의 가혹도는 0.06~0.54 이었다. 이는 허용응력과 비교할 때 응력이 상당히 낮고, 목표수명에 대하여 더 많은 수명을 가지므로 기어의 내구성에 문제가 없음을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. 김대철. 1998. 트랙터 구동장치의 부하스펙트럼 분석. 서울대학교 석사학위논문.
2. 김중현, 김경욱, 최원철, 오영근. 1998. 농용 트랙터의 변속기 부하 가혹도에 관한 연구. 한국농업기계학회지 23(5):417-426.
3. 시험연구보고서. 1993. 농촌진흥청 농업기계화 연구소.
4. 이원희, 허윤무. 1990. 자동차 Transmission용 Helical Gear의 굽힘 피로 수명 곡선(S-N Curve)에 관한 실험적 고찰. 자동차공학회지 12(6):11-17.
5. 정태현, 배인호, 김현. 1996. 치차장치 설계를 위한 설계지원 시스템 개발에 관한 연구. 대한기계학회논문집 21(9):1373-1384.
6. ASTM E 739-80 : Statistical analysis of linear or linearized Stress-Life(S-N) and Strain-Life(ϵ -N) Fatigue data.