

습지 로터리 작업에서의 트랙터 부하 특성

Characteristics of Work Load in Rotary Operation on Wet Paddy Field Conditions

오영근* 김경욱* 박금숙*
정희원 정희원
Y. G. Wu K. U. Kim J. S. Piao

1. 서론

본 연구는 습지용 보조 차륜으로서 케이지 휠의 설계 변수가 트랙터의 부하 특성에 미치는 영향을 구명하기 위하여 수행되었다. 습지는 일반 농경지에 비하여 경반이 깊고 토양이 연약하기 때문에 트랙터가 주행할 때 침하와 구름저항이 크고 슬립이 높아 부하가 크다. 습지에서 케이지 휠을 부착하여 보조 차륜으로 사용하면 차륜의 폭이 증가하고, 침하가 감소되어 낮은 접지압에서도 작업이 가능하며, 트랙터의 부하 특성에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

트랙터 작업 중에서 로터리 작업의 부하 가속도가 가장 큰 것으로 보고된 바 있다(김중현, 1998). 따라서 본 연구에서는 습지 로터리 작업시 트랙터 변속기의 입력축과 최종 구동축에 작용하는 토크 부하를 측정하여, 습지 작업의 부하 특성을 구명하고, 케이지 휠의 설계 변수가 트랙터의 부하 특성에 미치는 영향을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시험 장치

시험용 케이지 휠을 설계 제작하여 시험용 트랙터 후륜 타이어 외측에 부착하여 습지에서 보조 작용을 하도록 하였으며, 변속기 입력축 토크, 구동축 토크, 주행 속도, 구동륜의 회전 속도를 측정하였다(오영근 등, 2000). 시험용 트랙터의 모델명은 TA 4140이고, 엔진의 정격 출력은 41 ps이었으며, 실험에서 사용한 로터리의 경폭은 1650 mm이었다.

변속기 입력축에 작용하는 토크 부하를 측정하기 위하여 변속기 입력축에 축 방향과 45° 경사로 4개의 스트레인 게이지를 부착하여 휘스톤 브리지 회로를 구성하고, 출력 신호가 굽힘 하중에는 영향을 받지 않고 비틀림 하중에만 영향을 받도록 하였다. 스트레인 게이지의 출력 신호는 비접촉식 무선 시스템을 이용하여 수신하였다. 그림 1은 변속기 입력축에 스트레인 게이지와 무선 시스템이 부착된 모습을 나타낸 것이다. 무선 시스템은 송신기, 수신기, 증폭기로 구성되었다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

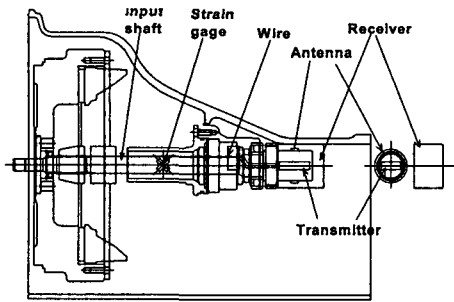


Fig. 1 Input torque meter designed for measuring input shaft torque to transmission.

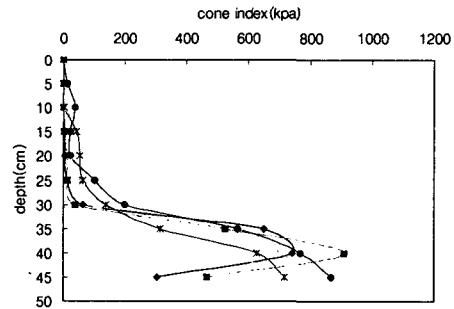


Fig. 2 Cone index measured at test field with deep hardpan.

나. 토양 조건

실험을 수행한 포장의 토양 특성은 그림 2와 표 1에서와 같다. 토성은 미 농무성법을 이용하여 결정하였고, 원추지수는 정각과 밑면적이 각각 30°, 323mm²인 원추를 사용하여 측정하였다. 토양의 점성, 내부 마찰각, 부착력, 외부 마찰각은 SR-2 토양 시험기를 이용하여 측정하였으며, 토질 시험은 한국 산업 규격(KSF)에 따라 실시하였다.

Table 1 Soil properties of test field with deep hardpan

Soil type	Sandy clay loam	Moisture content (% d.b.)	40.7
Cohesion (kpa)	11.9	Liquid limit (%)	56.6
Internal friction angle, (deg)	17.5	Plastic limit (%)	40.7
Adhesion (kpa)	4.8	Specific weight	2.6
Soil metal friction angle, (deg)	10.4		

다. 실험 방법

계측용 트랙터로 로터리 작업을 수행하며 변속기 입력축 토크, 구동축 토크, 기관 속도, 구동륜의 회전 속도, 주행 속도를 측정하였다. 부하 실험에서 케이지 휠의 설계 변수는 표 2에서와 같이 변화시켰으며, 케이지 휠을 부착한 경우와 부착하지 않은 경우를 비교하였다. 작업 속도는 주행속도 M1단(2.93km/h), M2단(4.12km/h) 2수준과 PTO 속도 P1단(565 rpm),

Table 2 Variations of design parameters of cage wheel for load measurement in rotary operation

Diameter (mm)	Width (mm)	Lug pitch (mm)	Lug angle (°)
1182	300	232	45
1182	300	310	45
1222	300	240	45

P2단(677 rpm) 2수준을 조합하여 4가지 조건으로 하였다. 기관 속도는 정격 속도 2600 rpm 을 유지하였으며, 경심은 20 cm로 하였다. 기관 속도의 영향을 고려할 수 있도록 자료 수집 장치의 샘플링 속도는 333.33 Hz로 하였으며 매번 기록 시간은 15초로 하였다.

라. 변속기 입력축 부하 분석

변속기 입력축에 작용하는 토크 부하는 레인플로우법을 이용하여 시간 함수의 부하 신호를 부하의 크기와 빈도수로 구분하여 부하 스펙트럼을 작성하고, 선형 누적 손상법을 적용하여 작업 조건별 가속도를 구하였으며, 부하의 크기와 평균부하의 분석을 하였다.

부하가 완전 반복 응력이 아닌 경우에는 응력의 진폭뿐만 아니라 평균을 함께 고려하여야 한다. 본 연구에서는 평균 응력의 영향을 고려하기 위하여 식 (1)의 스미스-왓슨-토퍼식을 이용하여 부하의 크기를 결정하였다(Bannantine 등, 1990).

$$S_e = \sqrt{\sigma_a(\sigma_a + \sigma_m)} \quad (1)$$

여기서, S_e = 평균 응력의 영향을 고려한 등가 응력

σ_a = 응력의 크기

σ_m = 평균 응력

재료의 정확한 S-N 곡선을 구하기 위해서는 일반적으로 회전축 시험을 수행하여 회전축이 파괴될 때 완전 반복 응력의 크기와 반복수를 측정한다. 본 연구에서는 설계 도면에 제시된 변속기 입력축의 경도 지수를 이용하여 극한 강도를 결정하였다.

작업의 가속도는 손상 합계의 비(ratio)로써 나타낼 수 있다. 피로 강도 이하의 응력이 피로 손상에 미치는 영향을 고려하여 수정 마이너 법칙을 이용하여 손상 합계를 구하였다. 그림 3에서와 같이 부하 스펙트럼을 부하의 크기 수준별로 나누고, 각 크기 수준의 빈도수를 구하였다. 본 연구에서는 케이지 휠을 장착한 상태와 장착하지 않은 상태에서 각 작업 조건

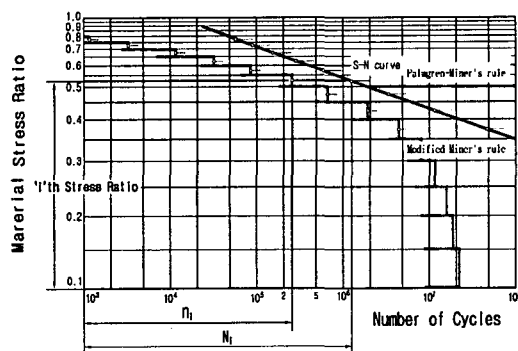


Fig. 3 Application of modified Miner's rule to a load spectrum (Kim, 1998).

별로 3회 반복하여 변속기 입력축의 부하 토크를 측정하였으며, 각 작업 조건에서 측정한 부하의 최대값과 최소값을 결정하고 그 사이를 64등분하여 각 부하 수준별 빈도수를 구하였다. 각 작업 조건에 대한 부하 수준별 빈도수는 3회의 측정 결과에서 구한 빈도수를 합하여 결정하였으며, 또한 가속도를 계산할 때는 작업 시간의 영향을 균등하게 하기 위하여 작업 시간을 300시간으로 동일하게 가정하였다.

마. 구동축 부하분석

구동축에 작용하는 토크 부하는 변속기 입력축에 작용하는 부하와 같은 순서와 방법으로 분석하였으며, 구동축에 작용하는 토크의 평균부하가 부하의 크기에 비하여 매우 크기 때문에 부하 가혹도 분석은 생략하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 변속기 입력축의 부하 특성

트랙터의 작업 속도를 변화시키면서 로터리 작업을 수행하였을 때 변속기 입력축의 부하 스펙트럼은 그림 4~그림 7에서와 같다.

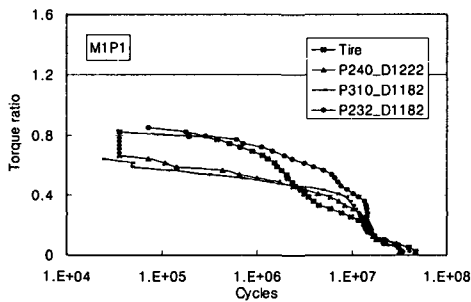


Fig. 4 Load spectra of input shaft with M1P1 gear.

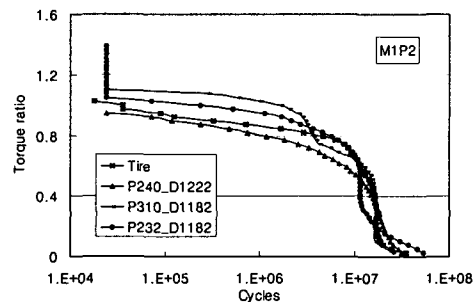


Fig. 5 Load spectra of input shaft with M1P2 gear.

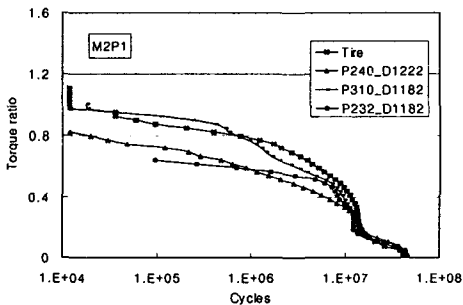


Fig. 6 Load spectra of input shaft with M2P1 gear.

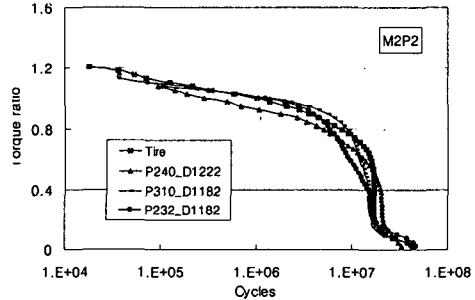


Fig. 7 Load spectra of input shaft with M2P2 gear.

부하 스펙트럼의 세로축은 정격 토크에 대한 변속기 입력축의 부하 토크비(Ratio)로써 나타내었고, 가로축은 대수 스케일의 누적 빈도수로써 나타내었다. 부하 스펙트럼에서는 부하 수준을 동일한 간격으로 나누고, 각 부하 수준에 대한 빈도수를 점으로 연결하여 나타내었다. 부하 수준이 높고 빈도수가 많은 부하일수록 스펙트럼은 블록한 형태를 나타낸다.

4수준의 작업 속도에서 부하 스펙트럼을 비교하면, 지름이 1222 mm, 러그 간격이 240

mm인 케이지 휠의 부하가 다른 차륜에 비하여 상대적으로 낮았으나, 다른 차륜 간에는 부하의 차이가 크게 나타나지 않았다. 즉 차륜의 설계 변수가 부하 스펙트럼에 영향을 미친다고 판단하기는 어려웠다. 작업 속도에 따른 부하는 4종류의 차륜에서 모두 M1P1, M2P1, M1P2, M2P2의 순으로 증가하였다.

부하 스펙트럼을 이용하여 차륜의 설계 변수에 따른 입력축 부하의 차이를 구명하기 위하여 부하 가혹도를 구하였다. 실험 조건에 따른 부하 가혹도를 동일한 척도로써 비교하기 위하여 손상 합계가 가장 적은 경우를 기준으로 손상 합계의 비로써 부하 가혹도를 나타내었으며 결과는 그림 8에서와 같다. 각 작업 단수에서 케이지 휠의 설계 변수에 따른 가혹도의 차이는 있었으나 분산 분석을 이용한 통계적 검증에서는 유의성이 검증되지 않았으며, 차륜의 차이에 의한 가혹도는 큰 차이가 없는 것으로 판단되었다. 작업 속도에 의한 가혹도는 모든 차륜에서 M1P1, M2P1, M1P2, M2P2의 속도 순으로 높게 나타났다.

변속기 입력축에 작용하는 토크 부하의 크기는 작업 속도 M1P1, M2P1과 M1P2, M2P2 사이에 5% 유의 수준에서 부하의 차이가 있는 것으로 나타났다. 변속기 입력축에 작용하는 토크 부하의 크기는 로터리 회전 속도의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

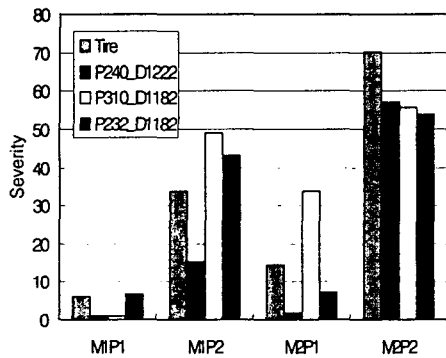


Fig. 8 Comparison of Severity of torque load acting on input shaft of tractors equipped with four different wheels at four gears.

변속기 입력축에 작용하는 토크 부하의 평균 크기를 비교하면 3종류의 케이지 휠을 부착한 경우에는 타이어만을 부착한 경우보다 부하의 크기가 높게 나타났다. 변속기 입력축에 작용하는 평균 부하는 케이지 휠을 부착함으로써 증가되며, 이는 차륜의 폭이 증가됨으로서 구름 저항이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

나. 구동축의 부하 특성

구동축의 부하 스펙트럼은 그림 9~그림 12에서와 같다. 부하 스펙트럼의 세로축은 로터리 작업에서 측정된 최고 구동축 토크에 대한 작용 토크의 비로써 나타내었으며, 가로축은 누적 빈도수의 대수 값으로써 나타내었다. 구동축의 부하는 M1P1보다 M1P2일 때, M2P1보다 M2P2일 때 낮게 나타났다. 이는 구동축 토크가 PTO 속도에 따라 변화되고 있음을 나타낸 것이다. 로터리의 경운날에 의하여 발생하는 추진력은 경운날의 속도에 따라 증가되며, 추진력이 증가할수록 구동축의 구동 토크는 감소된다.

구동축의 부하는 M1단보다 주행 속도가 높은 M2단에서 높게 나타났다. 이는 주행 속도의 증가에 따라 구름 저항이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

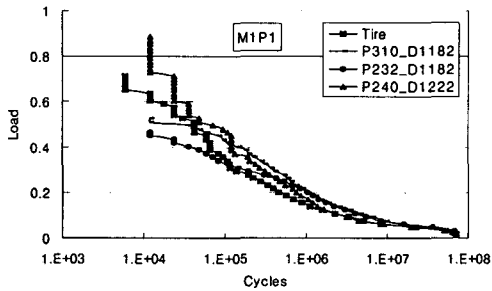


Fig. 9 Load spectra of drive shafts with four different types of wheels at M1p1 gear.

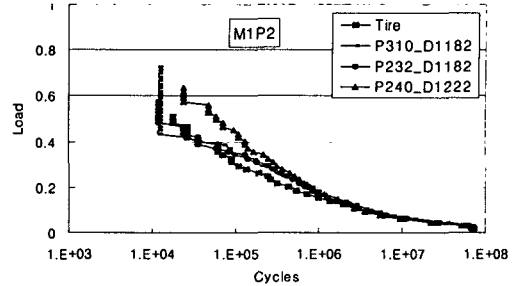


Fig. 10 Load spectra of drive shafts with four different types of wheels at M1p2 gear.

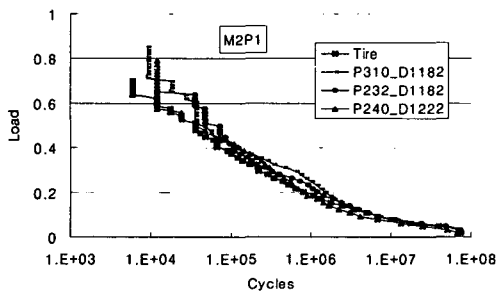


Fig. 11 Load spectra of drive shafts with four different types of wheels at M2p1 gear.

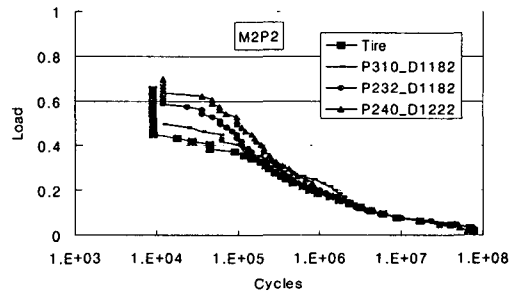


Fig. 12 Load spectra of drive shafts with four different types of wheels at M2p2 gear.

케이지 휠을 부착한 경우에는 부착하지 않은 경우에 비하여 구동축 토크가 크게 나타났다. 특히, 주행 속도가 M2단이고, PTO 속도가 P2단일 때 이러한 경향은 더욱 뚜렷하였다. 이는 케이지 휠을 부착하면 차륜의 폭이 증가하여 구름 저항이 증가되고, 구름 저항은 또한 주행 속도에 비례하여 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

구동축에 작용하는 토크 부하의 크기는 케이지 휠의 지름과 러그 피치가 증가되면 증가되는 것으로 나타났다. 부하의 크기는 또 주행 속도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 케이지 휠을 부착한 경우에는 평균 부하가 높게 나타났다. 케이지 휠을 부착하면 차륜의 폭이 증가하여 구름 저항이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

4 요약 및 결론

본 연구는 케이지 휠을 보조 차륜으로 사용하는 조건에서 습지 로터리 작업에서의 트랙터 부하 특성을 구명하기 위하여 수행되었다. 다음은 그 결과를 요약한 것이다.

1. 4수준의 작업 속도에서 변속기 입력축의 부하 스펙트럼을 비교하면 지름이 1222 mm, 러그 피치가 240 mm인 케이지 휠을 부착하였을 때 부하가 가장 낮게 나타났으며, 부하 가속도 분석에서도 같은 결과가 나타났다. 즉 케이지 휠의 지름이 크면 변속기 입력축의 부하는

감소될 것으로 판단된다.

2. 작업 속도에 따른 가혹도의 크기는 M1P1, M2P1, M1P2, M2P2의 순으로 나타났다. 즉 부하 가혹도는 주행 속도와 PTO 속도에 따라 증가되며, PTO 속도의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.
3. 변속기 입력축에 작용하는 부하의 크기는 4종류의 차륜에서 모두 로터리의 회전 속도에 따라 증가되었다.
4. 변속기 입력축에 작용하는 평균 부하는 케이지 휠을 부착하였을 때가 부착하지 않았을 때보다 모두 높게 나타났다. 평균 부하의 증가는 케이지 휠을 부착하면 차륜의 폭이 증가하여 구름 저항이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.
5. 구동축의 부하 스펙트럼에서는 PTO 속도가 높을수록 부하 수준이 낮았다. 이는 로터리 작업에서 경운날에 의하여 추진력이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.
6. 케이지 휠을 부착하면 구동축의 토크 부하는 증가되었다. 차륜 폭의 증가에 따른 구름 저항의 증가 때문인 것으로 판단된다.
7. 케이지 휠의 지름과 리그 간격이 증가됨에 따라 구동축 토크 부하의 크기도 상대적으로 증가되었으며, 같은 케이지 휠의 경우에는 주행 속도가 증가됨에 따라 구동축 토크 부하의 크기도 증가되었다.
8. 케이지 휠을 부착하면, 구동축의 평균 부하는 증가되었으나 PTO 속도가 증가됨에 따라 평균 부하는 감소되었다.

5. 참고 문헌

1. 송지호. 1990. 변동 하중하의 피로파괴. 대한기계학회지. 30(2): 115-130.
2. Bannantine, J. A., J. J. Comer and J. L. Handrock. 1990. Fundamentals of metal fatigue analysis. Prentice Hall.
3. Han, K. H., K. U. Kim and Y. G. Wu. 1999. Severeness of Transmission Loads of Agricultural Tractor for Rotary Operations in Poorly Drained Paddy Field. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery. 24(5): 293-300(In Korean).
4. Kim, J. H., K. U. Kim, C. W. Choi and Y. G. Wu. 1998. Severeness of Transmission Loads of Agricultural Tractors. 23(5): 417-426(In Korean).
5. Kim, D. C., K. U. Kim and J. W. Lee. 1998. Development of a Load Spectrum of Tractor Transmission. 23(6): 539-548(In Korean).
6. Wu, Y. G., I. H. Ryu and K. U. Kim. 2000. Design of A Tire-Attachable Cage Wheel for Wetland Use(1). Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery. 25(2): 79-88(In Korean).