

케이지 휠을 이용한 습답 로터리 작업의 부하 특성

Load Characteristics of Rotary Operation Using a Cage Wheel in Wet Paddy Fields

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

SUMMARY

The torque loads acting on the input shaft of the transmission and final driving shaft of the tractor having a cage wheel attached to the driving tires as a traction aid were measured during the rotavating operations in a poorly drained paddy field. Using the measured load data load spectra were constructed. Effects of the design parameters of the cage wheel on the load characteristics were also analyzed. The torque load exerted on the input shaft decreased as the diameter of the cage wheel increased and increased as the rotavator speed increased. The torque load exerted on the final driving shaft increased as the working speed of the tractor increased and decreased as the rotavator speed increased. The torque load on the final driving shaft with the cage wheel were greater than those without the cage wheel.

Keywords : Load spectrum, Rotary operation, Tractor, Wet paddy field.

1. 서 론

농작업의 부하 특성은 농업 기계의 부품 설계뿐만 아니라 내구성 시험, 수명 예측 등 다양한 목적으로 사용된다. 부하 특성은 또한 토양 조건, 작업 방식, 작업기의 종류 등에 따라서도 변화된다.

농작업 부하 특성에 대한 연구로서는 외국에서도 관련 논문이 많지 않으나, 최근 국내에는 김대철 등(1998), 김중현 등(1998), 한 등(1999)이 수행한 연구가 있다. 김대철 등의 연구는 쟁기 작업의 부하 특성을 구명한 것으로서, 논밭에서 쟁기 작

업을 수행할 때 트랙터 변속기의 입력축과 구동축에 작용하는 부하 토크의 스펙트럼을 작성한 것이다. 김중현 등도 쟁기, 로터리, 농로 운반, 도로 운반 작업을 수행할 때 트랙터 변속기의 입력축에 작용하는 부하의 특성과 작업 속도에 따른 부하의 상대적 가속도를 구명하였다. 한 등은 습답에서 로터리 작업을 수행할 때 변속기의 입력축에 작용하는 부하 토크의 스펙트럼을 작성하고, 일반 농경지에서의 작업 부하와 비교하여 습답 작업의 가속도를 구명하였다.

습답은 주로 배수 불량답으로서 일반 논에 비하

This study was supported by Technology Development Program for Agriculture and Forestry, Ministry of Agriculture and Forestry, Republic of Korea. The paper was submitted for publication in January 2001; reviewed and approved by the editorial board of KSAM in April 2001. The authors are Y. G. Wu, Graduate Student, K. U. Kim, Professor and J. S. Piao, Research Associate, Seoul National University. The corresponding author is K. U. Kim, Professor, Agricultural Machinery Engineering Major Seoul National University, 441-744, Suwon Korea. E-mail: <kukim@plaza.snu.ac.kr>

여 경반이 깊고 토양이 연약한 편이다. 따라서 트랙터가 작업할 때는 슬립과 침하가 커서 큰 구름 저항 즉, 큰 부하가 작용하게 된다. 그러나, 습답에서 케이지 휠을 구동륜의 보조 차륜으로 사용하면 차륜의 폭이 증가되는 효과가 발생하여, 침하가 감소되고 낮은 접지압에서도 작업이 가능하다(오 등, 2000). 또한, 트랙터에 작용하는 부하 특성에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

로터리 작업은 트랙터 작업 중에서도 부하 가혹도가 가장 큰 작업으로 알려져 있다(김 등, 1998). 본 연구의 목적은 습답에서 트랙터 구동륜의 보조 차륜으로서 케이지 휠을 사용하여 로터리 작업을 수행할 때 트랙터 변속기의 입력축과 최종 구동축에 작용하는 부하 토크의 특성을 구명하고, 케이지 휠이 부하 특성에 미치는 영향을 구명하기 위한 것이다.

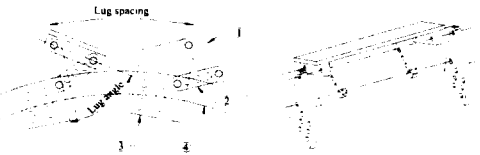
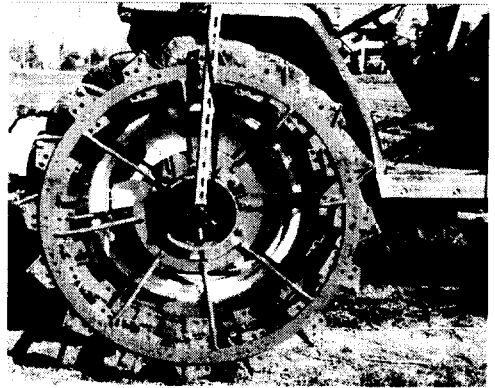
2. 재료 및 방법

가. 시험 장치

러그각, 러그 피치, 휠의 지름, 휠의 폭을 조정할 수 있는 시험용 케이지 휠(오 등, 2000)을 제작하여 그림 1에서와 같이 계측용 트랙터(김 등, 1998)의 구동륜 외측에 부착하여 케이지 휠이 보조 차륜의 역할을 수행할 수 있도록 하였다. 계측용 트랙터의 주요 제원은 표 1에서와 같으며, 계측용 트랙터를 이용하여 변속기 입력축 토크, 최종 구동축 토크, 주행 속도, 구동륜의 회전 속도를 계측할 수 있도록 하였다. 또한, 케이지 휠을 부착하지 않는 경우에 대해서도 동일한 조건에서 부하 토크를 측정하였다. 구체적인 계측 장치와 방법은 참고 문헌(김 등, 1998)에서와 같다. 표 2는 부하 측정에 사용된 로터리의 제원을 나타낸 것이다.

나. 포장 조건

로터리 작업을 실시한 습답은 경지 정리를 하지 않은 논이었으며, 벼 수확 후 배수가 잘 되지 않아 지면에는 약 5 cm 깊이의 물이 고인 상태이었다. 정각과 밀면적이 각각 30°, 323 mm²인 원추를 사용하여 측정된 원추지수는 그림 2에서와 같



- ① Lug plate ② Lug angle adjusting linkage
③ Lug frame ④ Wheel rim

Fig. 1 A view of cage wheel attached to driving tire of test tractor.

Table 1 Specifications of used tractor

Item	Specifications
Model	TA4140
Rated power/speed	41 ps/2600 rpm
Wheel base	1920 mm
Weight	17.1 kN
Tire[F/R]	8-18 4PR/13.6-28 6PR
Gears[F/R]	16/16
PTO gears	4

Table 2 Specifications of used rotavator

Item	Specifications
Model	DW165GS
Type	Side drive
Operating width	1,650 mm
Operating depth	150 mm
No. of blade	36
Weight	3.7 kN

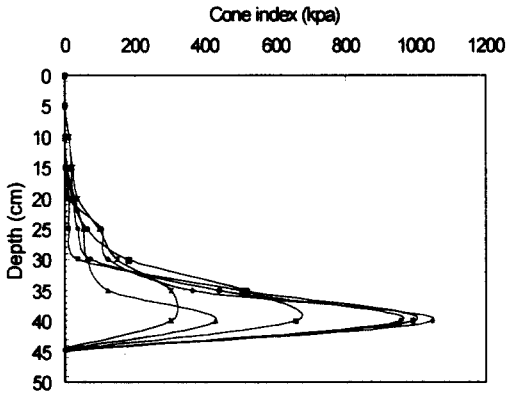


Fig. 2 Cone index measured at test field.

Table 3 Soil properties of test field

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

며, 표 3은 실험 토양의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 토성은 미농무성 토양 분류법에 따라 분류하였으며, 토질 시험은 한국산업규격에 따라 함수비(KSF 2306), 입자 비중(KSF2308), 소성 한계(KSF 2304), 액성 한계(KSF2303)를 결정하였다

다. 시험 방법

표 4에서와 같이 휠의 직경, 폭, 러그 피치, 러그 각을 조합한 3종류의 케이지 휠을 구동륜의 보조 차륜으로 부착한 후 로터리 작업을 수행하며 변속기 입력축과 구동축에서 부하 토크를 측정하

Table 4 Dimensions of three cage wheels used for load measurement

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

였다. 또한 케이지 휠을 부착하지 않은 경우에 대해서도 부하 토크를 측정하였다. 작업 속도는 주행 속도를 M1단(2.93 km/h)과 M2단(4.12 km/h) 2수준, PTO 속도를 P1단(588rpm)과 P2단(704 rpm) 2수준으로 하여 모두 4가지 속도 조건을 설정하였다. 각각의 케이지 휠 및 속도 조건에서는 모두 3회씩 반복하여 토크 부하를 측정하였으며 각 조건별 측정 순서는 무작위로 하였다. 기관 속도는 정격 속도인 2,600 rpm을 유지하였으며, 경심은 15 cm로 하였다. 자료 수집 장치의 샘플링 속도는 기관 속도의 영향을 고려하여 333.33 Hz로 하였다.

라. 부하 분석

변속기 입력축과 구동축에서 측정된 시간 함수의 토크 신호를 레인 폴로우 카운팅 방법을 적용하여 일련의 부하 토크 사이클의 크기와 이 사이클의 평균 부하 토크로 분해하였으며, 평균 부하 토크의 영향을 고려하기 위하여 각 부하 토크 사이클의 크기는 식 (1)에서와 같이 스미스 왓슨 테퍼(Smith Watson Tapper)식을 적용 조정하였다.

$$T_e = \sqrt{T_o(T_o + T_m)} \tag{1}$$

여기서, T_e = 평균을 고려한 부하 토크 사이클의 크기

T_o = 부하 토크 사이클의 크기

T_m = 부하 토크 사이클의 평균

부하 토크의 크기별 빈도수는 각 조건에서 측정된 부하 토크 사이클의 최대값과 최소값 사이를 64등분하여 각 크기별 등급에 속하는 토크 사이클의 수를 세어서 결정하였다. 각 조건에서 3반복으

로 측정된 각 부하 토크에 대해서는 동일한 방법으로 부하 토크 사이클의 크기별 빈도수를 구하고, 이를 모두 더하여 각 조건에 대한 부하 토크 사이클의 크기별 빈도수를 결정하였다. 구동축에 대한 부하 토크 사이클의 크기별 빈도수는 좌 우 구동축에 대한 빈도수를 합하여 결정하였다. 실제 측정된 부하 토크는 제한된 시간에 측정된 것이기 때문에 빈도 수도 실제 측정된 시간 내에서만 카운팅된 것이다. 따라서 작업 시간은 트랙터의 연평균 로터리 작업시간을 고려하여 300시간으로 동일하게 가정하였다. 변속기 입력축과 구동축의 부하 토크 사이클의 평균 크기와 이들의 평균을 이용한 분산분석을 실시하여 케이지 휠과 작업 속도의 영향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 변속기 입력축의 부하 특성

로터리 작업 속도에 따른 변속기 입력축의 부하 스펙트럼은 그림 3~6에서와 같다. 부하 스펙트럼의 세로축은 엔진의 정격 토크 110.8 N·m에 대한 변속기 입력축의 부하 토크비(Ratio)로써 나타내었으며, 가로축은 대수 스케일의 누적 빈도수로써 나타내었다.

작업 속도에 따른 부하 토크의 크기는 3가지 형태의 케이지 휠에서 모두 M1P1, M2P1, M1P2, M2P2의 순으로 증가하여 트랙터의 주행 속도와 로터리 회전 속도가 증가함에 따라 부하 토크도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 주행 속도에서는 PTO 속도가 빠를수록 부하의 크기가 컸다. 따라서, 부하 토크는 트랙터의 주행 속도보다는 로터리의 회전 속도에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 케이지 휠을 부착하지 않은 경우에도 동일하였다. 4수준의 작업 속도에서 구한 부하 토크의 스펙트럼을 비교하면, 지름이 1,222 mm이고, 러그 간격이 240 mm인 케이지 휠을 사용하였을 때의 부하 토크가 다른 케이지 휠을 사용하였을 때보다 작았다. 즉, 케이지 휠의 지름이 증가되면 변속기 입력축에 작용하는 부하 토크의 크기는 감소되는 것으로 나타났다. 지름이 1,222 mm인 케이지 휠의 경우에는 케이지

휠을 부착하지 않은 경우보다도 4수준의 작업 속도에서 모두 부하 토크가 작았다.

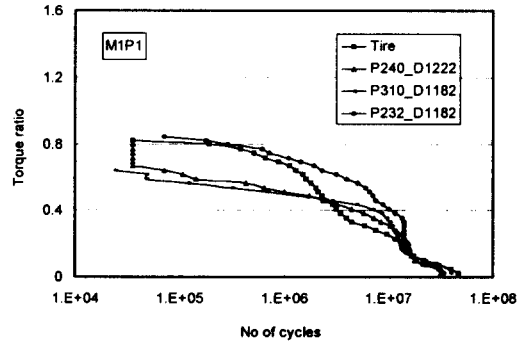


Fig. 3 Load spectra of input shaft with gear M1P1.

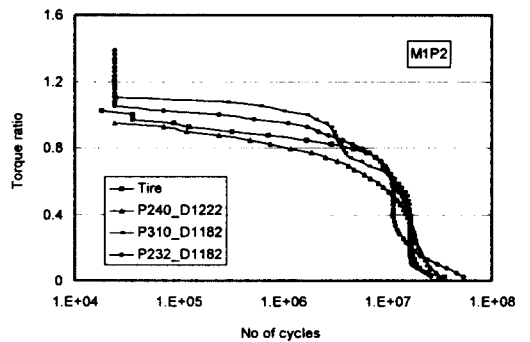


Fig. 4 Load spectra of input shaft with gear M1P2.

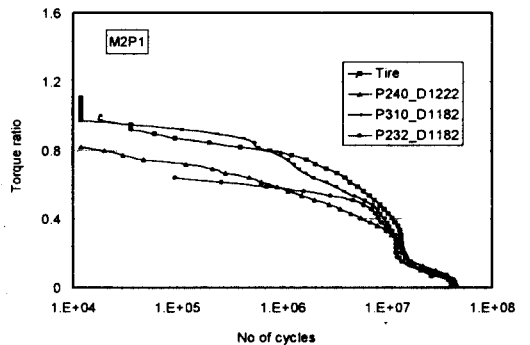


Fig. 5 Load spectra of input shaft with gear M2P1.

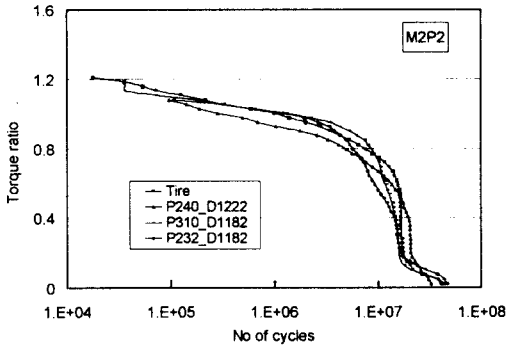


Fig. 6 Load spectra of input shaft with gear M2P2.

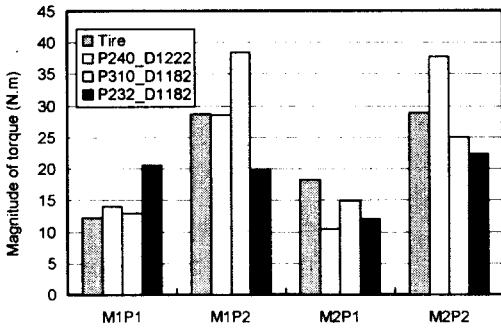


Fig. 7 Average of magnitudes of torque load cycles acting on input shaft.

케이지 휠의 다른 설계 변수가 부하 토크의 크기에 미치는 영향은 일정하게 나타나지 않았다. 즉, 리그각, 리그 피치는 변속기 입력축의 부하 스펙트럼에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 시간 함수의 부하 토크-시간 선도를 레인 플로우 카운팅하였을 때 변속기 입력축에 작용하는 부하 토크 사이클의 평균 크기는 그림 7에서와 같이 주행 속도에 관계 없이 로터리 속도에 따라 큰 차이가 나타났다. 로터리 속도가 같은 M1P1과 M2P1 사이 및 M1P2와 M2P2 사이에는 부하 토크 사이클의 크기에서 큰 차이가 없는 반면, 로터리 속도가 다른 M1P1과 M1P2 사이 및 M2P1과 M2P2 사이에서는 크게 차이가 나타났다. 즉, 스펙트럼 분석에서와 같이 변속기 입력축에 작용하는 토크 부하는 트랙터의 주행속도보다는 로터리의 회전 속도에 의하여 더 큰 영향을 받는 것으로

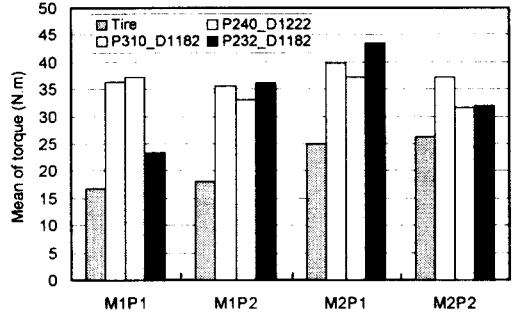


Fig. 8 Average of means of torque load cycles acting on input shaft.

나타났다. 그림 8은 변속기 입력축에 작용하는 부하 토크 사이클의 평균 부하 토크에 대한 평균을 나타낸 것이다. 즉, 변동 부하 토크의 정적인 성분을 나타낸 것이다. 케이지 휠을 부착한 경우는 타이어만을 부착한 경우보다 평균 부하 토크가 크게 나타났다. 즉, 변속기 입력축에 작용하는 평균 부하 토크는 케이지 휠을 부착함으로써 증가되었으며, 이는 케이지 휠에 의하여 차륜의 폭이 증가되는 결과를 초래하여 구름 저항이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

나. 구동축의 부하 특성

각 로터리 작업 속도에서 구동축에 작용하는 부하 토크의 스펙트럼은 그림 9~12에서와 같다. 부하 스펙트럼의 세로축은 구동축의 최대 전달 토크 4.1 kNm에 대한 작용 토크의 비로써 나타내었으며, 가로축은 누적 빈도수의 대수값으로써 나타내었다. 구동축의 부하 토크는 M1P2보다 M1P1일 때, M2P2보다 M2P1일 때 크게 나타났다. 변속기 입력축의 경우와는 반대로 로터리의 회전 속도가 빠를수록 구동축의 부하 토크는 감소되었다. 로터리의 경운날에 의한 추진력이 경운날의 속도에 따라 증가되며, 추진력이 증가될수록 구동축의 구동 토크는 오히려 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 주행 속도가 빠를 때 즉, M2단일 때는 M1단일 때에 비하여 부하 토크가 증가되는 것으로 나타났다. 이는 주행 속도가 증가됨에 따라 견인 부하도 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 구동축에서도 케이지 휠을 부착하면 부착하지 않은 경우에 비하

여 토크 부하가 증가되는 것으로 나타났다. 이는 케이지 휠을 부착하면 차륜의 폭이 증가되는 결과를 초래하여 구름 저항이 증가되는 동시에 구동륜

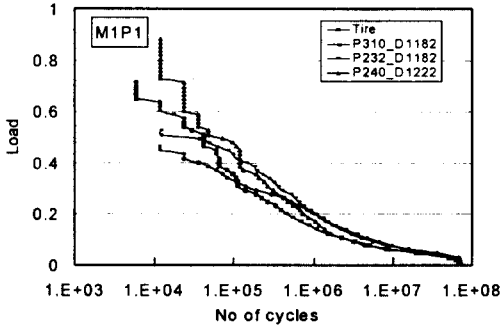


Fig. 9 Load spectra of final driving shaft with gear M1p1.

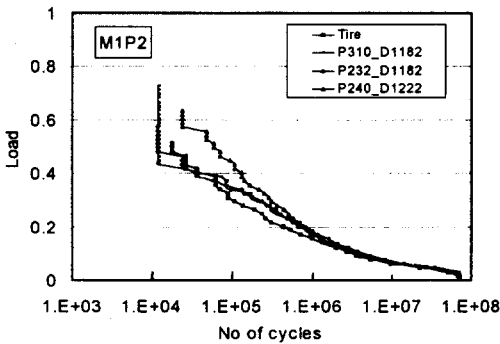


Fig. 10 Load spectra of final driving shaft with gear M1p2.

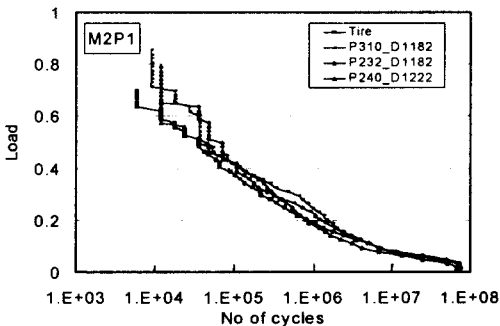


Fig. 11 Load spectra of final driving shaft with gear M2p1.

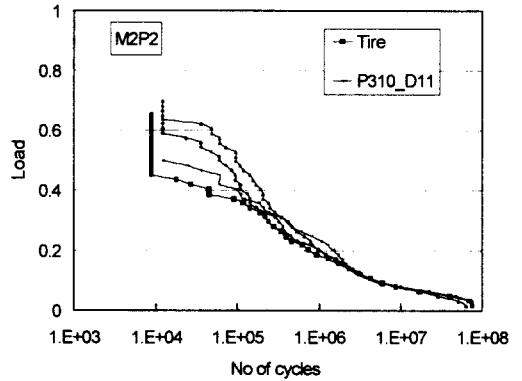


Fig. 12 Load spectra of final driving shafts with gear M2p2.

의 추진력이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 4 수준의 작업 속도에서 타이어만을 부착한 경우에는 평균 40%의 슬립이 발생하였으나, 케이지 휠을 부착하였을 때는 평균 20%의 슬립이 나타났다 (오, 2000).

습지 로터리 작업에서 케이지 휠을 부착하면 접지압이 감소되어 트랙터의 침하가 감소되었다. 따라서, 로터리의 경심 조정이 보다 용이하였으며, 과부하를 방지할 수 있었다. 케이지 휠을 부착하면, 구동축의 부하 토크는 증가하여도 변속기 입력축의 부하 토크는 증가되지 않는 것으로 판단된다.

변속기 입력축과 최종 구동축의 부하 스펙트럼을 비교하면, $10^4 \sim 10^6$ 사이의 고빈도 부하 토크의 영향은 변속기 입력축에서보다는 최종 구동축에서 작았다. 즉, 고빈도의 부하 토크에 의한 재료의 파괴는 최종 구동축에서보다 변속기 입력축에서 훨씬 높을 것으로 판단된다.

김 대철 등(1998)이 작업 시간을 3,000시간으로 가정하고 동일한 계측 트랙터를 사용하여 보통 논에서 쟁기 작업을 수행하였을 때 구동축에 작용하는 부하 토크 사이클의 최대값은 3.8~5.1 kN이었다. 이를 습지에서 수행한 로터리 작업의 경우와 비교하면, 비록 습지 로터리 작업의 부하가 보통 논에 대한 로터리 작업의 부하보다 크나, 쟁기 작업의 부하보다는 작았다. 즉, 습지 로터리 작업에서 최종 구동축에 작용하는 최대 부하 토크는 보통 논에 대한 쟁기 작업에서 구동축에 작용하는

최대 부하 토크의 약 44~62%에 지나지 않았다. 또한, 습지 로터리 작업에서 부하 토크 사이클의 크기는 같은 빈도수에서 모두 논에 대한 쟁기 작업에서보다 작은 것으로 나타났다.

구동축에 작용하는 부하 토크 사이클의 평균 크기를 비교하면 그림 13에서와 같다. 케이지 휠의 지름과 러그 피치가 증가되면 구동축에 작용하는 토크 부하의 크기도 증가되었으며, 주행 속도에 따라서도 증가되는 것으로 나타났다. 이는 케이지 휠의 지름과 러그 피치가 증가되면 케이지 휠과 토양의 상호작용이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.

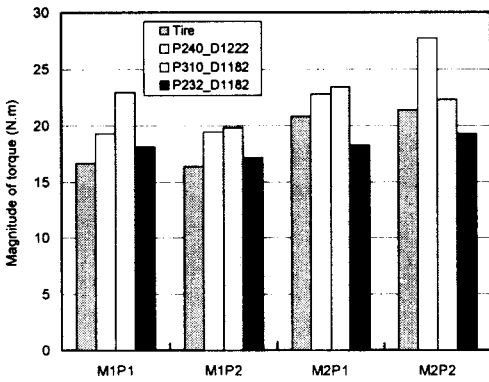


Fig. 13 Average of magnitudes of torque load cycles acting on final driving shaft.

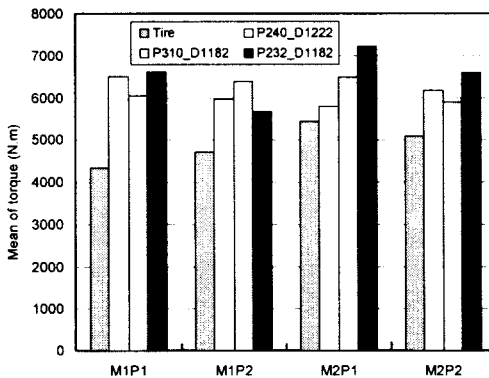


Fig. 14 Average of means of torque load cycles acting on final driving shafts.

케이지 휠을 부착하면 차륜의 폭이 증가되기 때문에 구름 저항이 증가되며, 또한, 추진력도 증가된다. 따라서 케이지 휠을 부착하면 그림 14에서와 같이 케이지 휠이 없을 때보다 부하 토크 사이클에 대한 평균 부하 토크도 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 변속기 입력축에 작용하는 부하 토크의 경우에도 같다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 트랙터 구동륜의 보조 차륜으로 케이지 휠을 사용하여 습지에서 로터리 작업을 수행할 때 트랙터 변속기의 입력축과 구동축에 작용하는 부하 토크의 스펙트럼을 작성하고 그 특성을 구명하기 위하여 수행되었다. 다음은 연구 결과를 요약한 것이다.

- 1) 케이지 휠의 지름이 크면 변속기 입력축에 작용하는 부하 토크는 감소되었다.
- 2) 변속기 입력축에 작용하는 부하 토크의 크기는 로터리의 회전 속도에 따라 증가되며, 주행 속도보다는 로터리의 회전 속도에 더 큰 영향을 받는다.
- 3) 케이지 휠을 부착하면 변속기 입력축에 작용하는 평균 부하 토크는 케이지 휠이 없을 때보다 증가된다. 이는 케이지 휠을 부착하면 차륜의 폭이 증가되어 구름 저항이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 구동축에 작용하는 부하 토크는 PTO 속도가 빠를수록 그 크기가 감소되었다. 이는 로터리의 경운날에 의한 추진력이 증가되기 때문인 것으로 판단된다.
- 5) 구동축에 케이지 휠을 부착하면, 차륜 폭의 증가로 구름 저항이 증가하고, 추진력이 증가하기 때문에 구동축에 작용하는 토크 부하도 증가된다.
- 6) 케이지 휠의 지름과 러그 간격이 증가되면 구동축에 작용하는 부하 토크의 크기도 증가된다.
- 7) $10^4 \sim 10^6$ 사이의 고빈도 부하 토크는 변속기 입력축에서보다는 최종 구동축에서 그 영향이 작았다. 즉, 고빈도의 부하 토크에 의한 재료의 피로 파괴는 최종 구동축에서보다는 변속기 입력축에서 훨씬 높을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Bannantine, J. A., J. J. Comer and J. L. Handrock. 1990. Fundamentals of metal fatigue analysis. Prentice Hall. USA.
2. 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).
3. Kim, J. H., K. U. Kim, C. W. Choi and Y. G. Wu. 1998. Severeness of transmission loads of agricultural tractors. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 23(5): 417-426 (In Korean).
4. Kim, D. C., K. U. Kim and J. W. Lee. 1998. Development of a load spectrum of tractor transmission. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 23(6):539-548 (In Korean).
5. 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).
6. Wu, Y. G. 2000. Design of tractor tire-attachable cage wheel for wet paddy fields. Unpublished PhD thesis. Seoul National University(in Korean).