

케이지 휠과 토양의 상호작용에 관한 연구

Study on Soil-Cage wheel Interaction

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

1. 서론

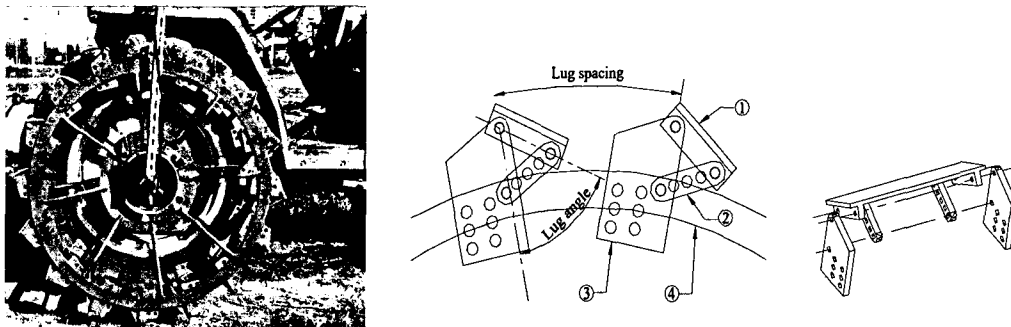
구동륜 타이어의 외측에 케이지 휠을 부착하여 보조 차륜으로 사용하는 조건에서 토양 추진력에 미치는 케이지 휠의 영향이 구명된다면 케이지 휠을 보다 정확하게 설계할 수 있을 뿐만 아니라 보다 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 케이지 휠의 토양 추진력은 러그와 토양의 상호 작용으로 발생된다. 러그에 의한 토양 추진력의 크기와 변화 특성이 구명된다면 케이지 휠의 토양 추진력을 구명할 수 있으며, 해석적인 방법으로 이를 예측할 수 있을 것이다.

본 연구는 트랙터의 구동축 토크를 계측, 분석하여 러그에 의한 토양 추진력의 변화 특성과 케이지 휠에 의하여 발생하는 토양 추진력을 구명하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 시험 장치

그림 1과 같이 시험용 케이지 휠을 설계 제작하여 시험용 트랙터 후륜 타이어 외측에 부착하여 습지에서 보조 작용을 하도록 하였다(오영근 등, 2000).



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.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

좌측 구동축 토크 변환기는 그림 2에서와 같이 구성하여 구동 타이어나 케이지 휠로 전달되는 구동 토크를 측정하고, 우측 구동축 토크 변환기는 그림 3에서와 같이 구성하여 케이지 휠만으로 전달되는 구동 토크를 측정하였다. 데이터 로거에는 일정한 시간 간격으로 토크 신호와 구동축의 회전 속도가 기록되고 있기 때문에 구동축의 각변위에 따른 케이지 휠의 토크 변화를 측정할 수 있다.

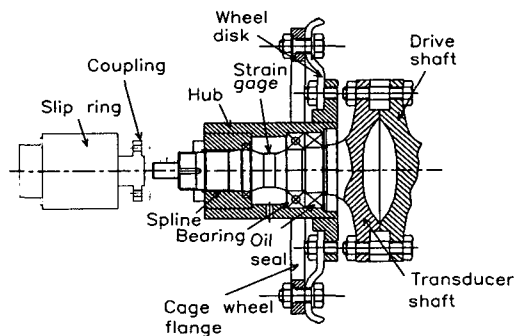


Fig. 2 Torque meter for measuring driving torque transmitted to both tire and cage wheel.

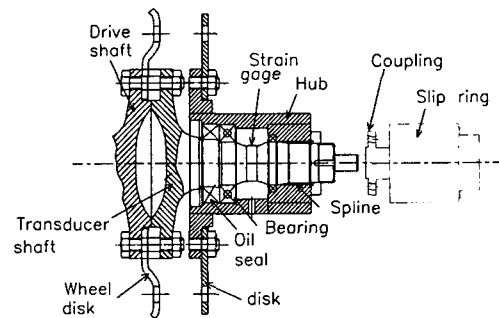


Fig. 3 Torque meter for measuring driving torque transmitted to cage wheel.

나. 실험 방법

1) 견인 작업에서 케이지 휠의 구동 토크

기관 속도를 2,000 rpm으로 유지하며 견인 성능 실험을 실시하여 시험 트랙터의 견인력, 견인 속도, 좌측 구동축 토크, 우측 케이지 휠의 구동 토크, 구동축 속도를 각각 측정하였다. 시험 트랙터는 2륜 구동으로 하였으며, 주행 단수는 각각 M1단(2.9 km/h)과 M2단(4.1 km/h)으로 하였다. 타이어의 공기압은 75 kPa, 125 kPa, 160 kPa 3수준으로 하였으며, 케이지 휠의 지름은 1182 mm, 1222 mm 2수준으로 하였다. 러그 각은 45°, 러그 피치는 232 mm, 차륜의 폭은 300 mm로 고정하였다.

2) 러그에 의한 구동 토크

'견인 작업에서 케이지 휠의 구동 토크'를 측정한 때와 같은 방법으로 견인 성능 시험을 실시하였다. 주행 단수는 M1단(2.93 km/h)으로 하였다. 케이지 휠의 지름은 1182 mm, 1222 mm, 1262 mm 3수준으로 하였고, 러그 각은 45°, 차륜의 폭은 300 mm로 고정하였다.

다. 토양 조건

실험을 수행한 포장의 토양 특성은 표 1과 그림 4에서와 같다. 토성은 미 농무성법을 이용하여 결정하였고, 원추지수는 정각과 밀면적이 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
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

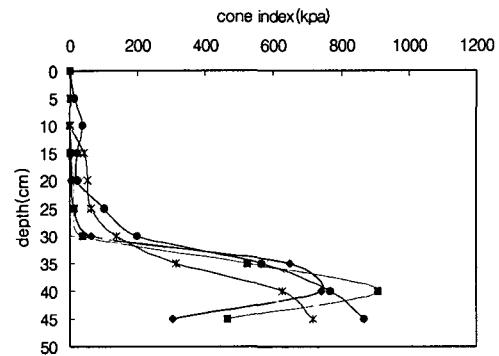


Fig. 4 Cone index measured at test field with deep hardpan.

3. 결과 및 고찰

가. 케이지 휠에 의한 효과

구동 타이어와 케이지 휠로 전달된 좌측 구동축 토크에 대한 케이지 휠로만 전달된 우측 구동축 토크의 비를 케이지 휠에 의한 효과로 정의하였다. 케이지 휠에 의한 효과는 구동 타이어에 케이지 휠을 부착하였을 때 견인력 증가에 미치는 케이지 휠의 효과를 나타낸다.

케이지 휠의 효과는 그림 5와 그림 6에서와 같다. 케이지 휠의 지름이 1182 mm와 1222 mm에서 케이지 휠의 효과는 각각 평균 40%, 평균 50%인 것으로 나타났다. 케이지 휠의 효과를 비교하면 케이지 휠의 효과에 대한 공기압과 작업 단수의 영향은 없는 것으로 나타났다.

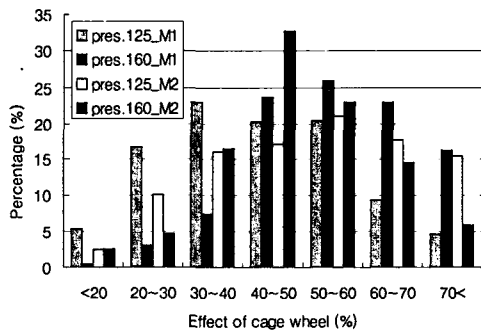


Fig. 5 Distribution of effect with different inflation pressures and gears at 1222 mm wheel diameter.

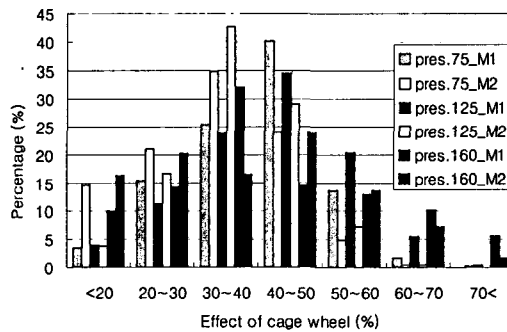


Fig. 6 Distribution of effect with different inflation pressures and gears at 1182 mm wheel diameter.

나. 러그에 의한 구동토크

180°의 간격으로 2개의 러그를 케이지 휠에 장착하고 수행한 견인 실험에서 측정된 러그

에 의한 구동 토크는 그림 7에서와 같다. 시험 토양의 경도가 토양의 깊이에 따라 증가되었기 때문에 러그의 입토 깊이가 깊을수록 구동 토크는 증가되었으며, 러그의 침하가 최대일 때 최대치를 가지는 것으로 나타났다. 케이지 휠의 지름이 1262 mm와 1222 mm일 때는 지름이 1182 mm인 때에 비하여 구동 토크의 최대치는 각각 17%와 5% 증가되는 것으로 나타났다.

러그 사이의 간격을 각각 22.5°, 157.5°, 180°로 하여 3개의 러그를 장착하였을 때 케이지 휠의 각변위에 따른 구동 토크의 변화는 그림 8에서와 같다. 피크 2는 러그 2개에 의한 구동 토크이고, 피크 1은 러그 1개에 의한 구동 토크이다. 피크 2는 피크 1에 비하여 평균 토크는 23%~60% 증가되었고, 피크 토크는 13%~40% 증가되어 토양과 상호 작용하는 러그 수가 2개일 때는 러그 수가 1개일 때에 비하여 러그의 효과와 과부하를 극복하는 능력이 모두 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 두 번째 러그가 첫 번째 러그의 간섭을 받아 첫 번째 러그에 의한 구동 토크와 같은 크기의 구동 토크를 토양으로 전달할 수 없기 때문에 러그 1개에 의한 토크의 2배 효과는 나타나지 않았다

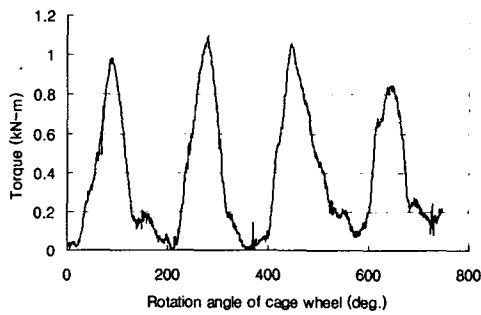


Fig. 7 Torque due to a single lug of cage wheel.

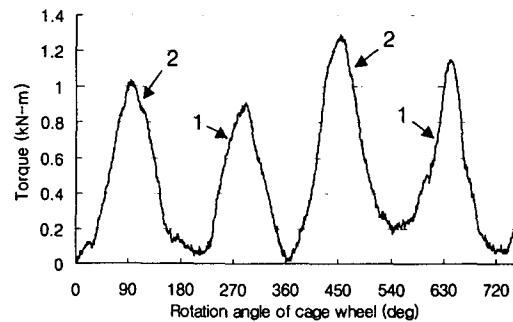


Fig. 8 Torque due to two adjacent lugs and single lug of cage wheel.

다. 러그에 의한 토양 추진력

토양 추진력은 러그에 작용하는 토양 반력의 수평 성분이 된다. 그림 9에서 θ 는 러그각, ϕ 는 케이지 휠의 회전각이고 δ 는 러그와 러그 사이의 피치각이다. 러그에 작용하는 토양 반력은 러그 평면 법선 방향의 토양 반력 F_n 과 접선 방향의 토양 반력 F_t 로 분해될 수 있으며, 러그에 의한 토양 추진력 F 는 식 (1)에서와 같이 표현된다.

$$F = F_n \sin(\phi - \theta) - F_t \cos(\phi - \theta) \quad (1)$$

러그는 두께가 8 mm인 평판이었으며, 러그각은 45°이고, 타이어가 대부분의 트랙터 하중을 지지하기 때문에 러그의 측면에 작용하는 토양 반력은 무시될 수 있다. 따라서, 접선 방향으로 작용하는 토양 반력은 러그와 토양 사이의 마찰력으로 가정하였다.

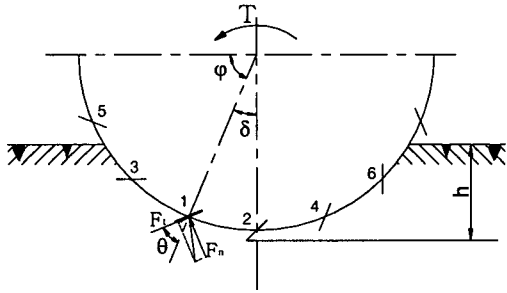


Fig. 9 Soil reactions acting on lug of cage wheel and lug positions.

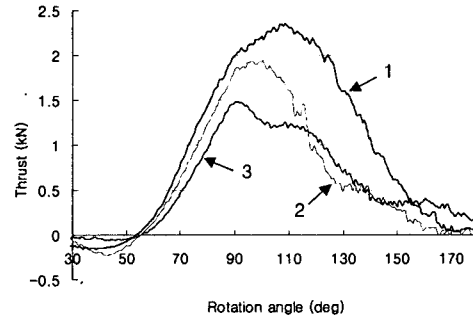


Fig. 10 Soil thrust by a single lug of cage wheel.

즉,
$$F_t = \mu F_n \quad (2)$$

또한, 법선 방향과 접선 방향의 토양 반력을 각각 원주 방향과 반경방향으로 분해하여 구동 토크 T 을 구하면 식 (3)에서와 같다.

$$F_n = \frac{T}{r(\cos \theta - \mu \sin \theta)} \quad (3)$$

식 (3)에서 러그의 작용반경 r 는 케이지 휠의 반경보다 18 mm가 작은 값을 가지게 되며, 러그와 토양 사이의 마찰계수 μ 는 토양과 금속 사이의 마찰계수이다.

식 (1)를 이용하여 러그에 의한 토양 추진력을 케이지 휠의 회전각에 따라 나타내면 그림 10에서와 같다. 곡선 1, 2, 3은 케이지 휠의 지름이 각각 1262 mm, 1222 mm, 1182 mm일 때 측정된 토양 추진력을 나타낸 것이며, 이 때 슬립은 평균 30%이었고, 견인 부하는 평균 1.7 kN이었다. 케이지 휠의 회전각이 55°를 초과하면 토양 추진력은 급격히 증가하여 회전각이 90°~110°일 때 최대치가 나타났으며, 케이지 휠의 지름이 증가될수록 최대치가 나타나는 회전각이 증가되고, 토양 추진력도 증가되는 것으로 나타났다. 케이지 휠의 지름이 1262 mm, 1222 mm 일 때 토양 추진력의 최대치는 지름이 1182 mm인 경우에 비하여 각각 59%, 31% 증가되는 것으로 나타났다.

라. 케이지 휠의 추진력

그림 10에서와 같이 러그가 연직 방향으로 구동축 바로 아래 위치하였을 때 케이지 휠의 회전각을 90°로 정의하고 회전각 90°를 기준으로 좌측은 홀수로, 우측은 짝수로 표기하여 구분하였다. 러그와 러그 사이의 피치각이 δ 이기 때문에 케이지 휠이 회전할 때 발생하는 추진력은 각 러그가 지정된 위치에서 δ 각을 회전할 때 토양과 상호 작용으로 발생하는 토양 추진력이며 식 (4)에서와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)에서 j 는 러그 번호, k 는 계수(j 가

홀수이면 $k = \frac{j+1}{2}$, j 가 짝수이면 $k = -\frac{j}{2} + 1$, α 는 케이지 휠의 각변위($0 \leq \alpha \leq \delta$)이다.

$$F_j = \frac{T_j}{r(\cos \theta - \mu \sin \theta)} [\sin(90^\circ - \theta - k\delta + \alpha) - \mu \cos(90^\circ - \theta - k\delta + \alpha)] \quad (4)$$

식 (4)에서 러그의 위치가 결정되면 $90^\circ - \theta - k\delta$ 는 상수가 된다. 상수항을 식 (5), 식 (6)에서와 같이, 러그에 의한 구동 토크를 식(7)과 정의하면 러그에 의한 토양 추진력은 식 (8)에서와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_j = \sin(90^\circ - \theta - k\delta) - \mu \cos(90^\circ - \theta - k\delta) \quad (5)$$

$$C_j = \cos(90^\circ - \theta - k\delta) + \mu \sin(90^\circ - \theta - k\delta) \quad (6)$$

$$T_j = \eta_j T \quad (7)$$

$$F = \sum_{j=1}^n \frac{\eta_j T}{r(\cos \theta - \mu \sin \theta)} [B_j \cos \alpha + C_j \sin \alpha] \quad (8)$$

식(8)에서 n 는 토양과 작용하는 러그 수이고, η_j 는 j 번째 러그에 의한 구동 토크의 분담율로서 러그가 토양속에서 작용하는 각변위 범위를 러그 피치각의 크기로 나누었을 때 각 구간에서 구한 구동 토크의 평균값이 전체 평균 토크에서 차지하는 비와 같다.

케이지 휠의 러그 피치각이 22.5° 일 때 α 는 $0 \sim 22.5^\circ$ 의 중간 값인 11.25° 로 하였으며, 케이지 휠의 러그 피치각이 30° 일 때는 $0 \sim 30^\circ$ 의 중간 값인 15° 로 하여 식 (8)를 사용하면 견인 부하 없이 주행하는 상태에서 케이지 휠의 추진력은 $0.6 \sim 3$ kN이었다. 견인 성능 실험에서 측정한 구동 토크와 식 (8)를 이용하여 케이지 휠의 추진력을 계산하고 케이지 휠의 분담 견인력을 빼면 모두 동일한 견인 부하가 없을 때의 추진력을 구할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 식 (8)을 이용하여 케이지 휠의 추진력을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4 요약 및 결론

케이지 휠과 구동 타이어로 전달되는 구동축 토크를 계측하여 구동축 토크에 미치는 케이지 휠의 효과를 구명하였으며, 러그에 의한 토양 추진력의 특성을 구명하였다. 또한 구동 토크를 이용하여 케이지 휠의 추진력을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 케이지 휠의 지름이 증가하면 구동 토크에 미치는 케이지 휠의 효과도 증가된다. 지름이 1222 mm인 케이지 휠에서는 평균 50%의 효과가 나타났으며, 지름이 1182 mm인 케이지

휠에서는 평균 40%의 효과가 나타났다. 케이지 휠의 효과는 공기압과 작업 단수에 따라서는 차이가 나타나지 않았다.

2. 케이지 휠의 지름이 1262 mm, 1222 mm이면 1182 mm일 때에 비하여 러그에 의한 구동 토크의 최대치가 각각 17%와 5% 증가되는 것으로 나타났다. 러그 수가 2개이면 러그 수가 1개인 경우에 비하여 평균 토크는 23%~60% 증가되었으며, 피크 토크는 13%~40% 증가되었다. 러그 수가 증가되면 총 구동 토크도 증가되지만 러그의 상호 간섭으로 각각의 러그에 의한 구동 토크는 감소되는 것으로 나타났다.

3. 러그에 의한 토양 추진력은 케이지 휠의 회전각이 수평선을 기준으로 55° 이내일 때에는 음수로서 견인 저항으로 나타났다. 토양 추진력은 회전각이 90°~110° 일 때 최대가 되었으며, 지름이 1262 mm, 1222 mm일 때의 최대 값은 지름이 1182 mm일 때에 비하여 각각 59%, 31% 증가되는 것으로 나타났다.

4. 구동 토크를 이용하여 케이지 휠의 추진력을 예측할 수 있는 방법을 제시하였으며, 그 타당성을 입증하였다.

5. 참고 문헌

1. Gee-Clough, D. and Chancellor, W. J. 1976. Pull and lift characteristics of single lugs on rigid wheels in wet rice soil, Transactions of the ASAE 19(3): 433-441,447
2. Nakashima, H. and T. Tanaka. 1988. Interactions in Soil-lug System(Part 2). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 50(6): 3-10(In Japanese).
3. Salokhe, V. M., D. Gee-Clough and Harjono. 1990. The measurement of forces under multiple cage wheel lugs. Proc. 10th Int. Conf. ISTVS, Kobe. 217-228.
4. Tanaka, T. and H. Nakashima. 1986. Interactions in Soil-lug System(Part 1). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 48(2): 225-232(In Japanese).
5. Wang, X. L., T. Tanaka and M. Yamazaki. 1989. Study on Soil-Lugged Wheel Interaction(Part 2). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 51(5): 11-18(In Japanese).
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).