

과도 토크를 이용한 파워시프트 변속기의 변속 품질 평가

Analysis of Shifting Quality for Powershift Transmission Using Transient Torque

정병학*	이호상*	김경욱*
정회원	정회원	정회원
B. H. Chong	H. S. Lee	K. U. Kim

1. 서론

트랙터는 작업시 부하의 변동이 크고, 부하 변동에 따른 적합한 단수로 운전 작업이 요구되기 때문에 잦은 변속이 요구된다. 특히 유단 변속의 경우 변속시 큰 부하의 변동과 부적절한 변속 단수 설정할 때 변속 충격이 발생할 수 있다. 이러한 변속 충격은 작업 효율을 저하시킬 뿐 아니라 운전자의 승차감을 저하시킨다.

따라서 변속기와 관련된 연구를 수행하기 위해서는 변속 품질을 평가하여 적절한 변속 품질을 보장할 수 있는지를 판단해야만 한다. 변속 품질을 평가하는 방법은 연구의 목적에 따라 조금씩 다르긴 하지만 다음의 3가지 방법이 대표적이다. 즉, 출력축의 과도 토크 분석, 가가속도 분석, 진동에 대한 인간의 반응을 양적으로 측정해주는 지표인 VDV(Vibration Dose Value) 등을 이용하여 변속 품질을 평가한다. 그 중에서도 특히 출력축의 과도 토크 분석에 의한 방법이 가장 널리 이용되고 있다.

본 연구는 파워시프트 변속기의 개발 및 평가 가이드 라인 제시와 관련한 연구의 기초 연구로서 변속시 출력축의 과도토크를 이용하여 파워시프트용 유압 변속기를 장착한 트랙터의 변속 품질을 평가하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

시험 트랙터 - 변속 품질을 평가하기 위하여 파워시프트 전후진 4단 파워시프트 변속기가 장착된 JD사의 62.5kW 트랙터를 사용하였으며 제원은 표 1과 같다.

변속기는 전후진 4단 구조의 유성 기어식 파워시프트 변속기이며 하나의 링기어에 세 개의 선기어와 세 개의 유성 기어가 설치되어 있는 구조이다. 1, 2, 3, 4단에서의 변속기 입력축과 출력축 사이의 최종 변속비는 각각 0.556:1, 0.682:1, 0.816:1, 1:1이다. 또한 각 작업 단수는 B1, B2, B3, C4의 브레이크 및 클러치의 접속을 조절하여 설정한다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

Table 1 Specifications of test tractor

Items	Specifications
Manufacturer	John Deere
Model	6110
Total weight	37474.2 N (3820 kg_f)
Engine power	62.5 kW (84 HP) at 2300 rpm
Transmission	PowrQuad*, CR&LHR** FWD 16 - REV 16
Maximum speed	30 km/h

*: Four shift range powershift transmission

** : Creeper and Left-hand reverser (electrical reverser)

엔진 속도 측정 - 변속기 입력축 회전 속도는 트랙터 자체 점검을 위해 마련된 마그네틱 픽업 센서의 신호를 입력받아 주파수 카운팅을 수행하여 측정할 수 있도록 구성하였다.

구동축의 회전 속도 측정 - 구동축의 회전 속도를 측정하기 위하여 회전 속도를 펄스로 출력하는 로터리 엔코더를 이용하였다. 이 로터리 엔코더는 구동축이 1회전할 때 600개의 펄스를 출력하며 그 제원은 표 2와 같다.

구동축 토크 측정 - 구동축에 작용하는 토크를 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 이용하여 휘트스톤 브리지 회로를 구성하도록 직접 설계 제작한 휠토크미터 사용하였다. 사용한 스트레인 게이지의 제원은 표 3과 같다.

Table 2 Specifications of rotary encoder

Items	Specifications
Manufacturer	Metronix
Model	S40-6-600ZO
Resolution	600 pulses/rev
Power	5~24VDC

Table 3 Specifications of strain gauge

Items	Specifications
Manufacturer	HBM
Model	1-XG21-6/120
Resistance	120 Ω
Gauge factor	2.02

제어 압력 측정 - 파워시프트 변속기는 변속시 클러치 및 브레이크에 작용하는 압력을 제어하여 변속을 수행하므로 변속 시점을 정확히 알아내기 위하여 이 지점(B1, B2, B3, C4)에서의 압력을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

시험 트랙터를 2300rpm으로 설정하고 평지 주행, 오르막 주행, 내리막 주行的 3가지 주행을 수행하여 변속 실험을 수행하였다. 변속시 부변속은 B단으로 고정하였으며, 주변속은 1, 2, 3, 4단 중 특정한 단에서 다른 단으로 변속을 수행하여 상단변속(upshift)과 하단변속(downshift) 각각 6수준으로 총 12가지 변속조건에서 실험을 수행하였다.

상단 변속시 측정된 엔진 회전속도, 클러치 및 브레이크 압력, 구동축 회전 속도, 구동축 토크의 전형적인 모습은 그림 1, 2와 같다.

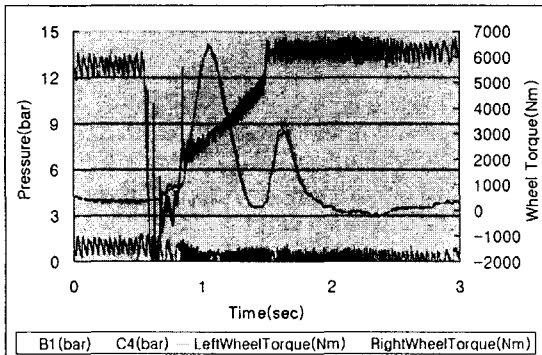


Fig. 1 Pressures & wheel torques.

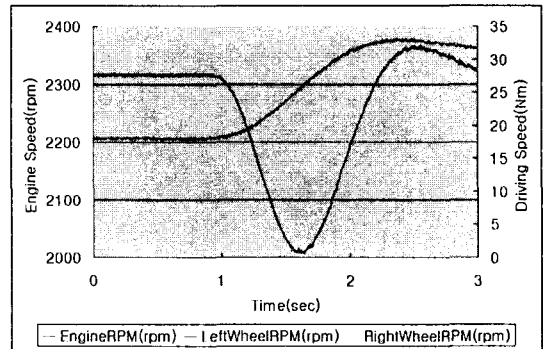


Fig. 2 Engine speed & driving speed.

클러치 및 브레이크 압력은 변속 조건과 관계없이 변속 초기 압력이 1bar, 최종 압력이 13.7bar 정도의 수준을 유지하였으며, 모듈레이션은 시작 압력, 종료 압력이 각각 6.3bar, 11.3bar이었다. 총 변속 시간 0.9초 중 모듈레이션 시간은 0.7초를 차지하였다.

상단변속시 엔진의 회전 속도는 구동축에 가해지는 부하가 증가하게 되므로 엔진 부하에 작용하는 부하가 증가하여 일정 수준까지 엔진의 회전속도가 감소한 후 다시 설정속도 수준으로 회복되며, 이와는 반대로 구동축 토크는 일정 수준까지 증가한 후 관성에 의해 반대 방향의 피크 토크까지 증가한 후 정상상태를 유지하였다. 구동축 회전 속도는 변속 전의 변속비에 대한 회전속도에서 변속 후의 변속비에 대한 회전속도까지 증가하였다. 하단변속시 각 측정 변수의 특징은 상단 변속시에서와 반대의 특징으로 나타났다.

변속 품질 평가 방법 - 변속 품질의 평가는 주행 시험을 수행하면서 운전자의 느낌을 기록한 정성적 평가와 구동 토크를 이용한 정량적 평가를 비교하여 수행하였다. 정성적 평가는 변속시 발생하는 충격을 운전자가 느끼는 수준으로 0, 1, 2, 3, 4의 5단계로 구분하였다. 이때 충격0은 변속 전후의 충격이 전혀 없음을 의미하며 충격5는 변속 전후의 충격이 상당하여 운전하기 힘든 상태를 의미한다.

변속 품질을 평가하기 위하여 각 측정 변수의 특징을 분석해본 결과 구동 토크의 최대 편차 및 평균 토크에 대한 최대 편차비가 변속 충격과 가장 큰 연관성이 있는 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned} \text{최대토크편차} &= \text{최대토크} - \text{평균토크} \\ \text{최소토크편차} &= \text{평균토크} - \text{최소토크} \\ \text{최대토크변동} &= \text{최대토크} - \text{최소토크} \end{aligned}$$

$$\text{최대토크편차비} = \frac{\text{최대토크편차}}{\text{평균토크}}$$

$$\text{최소토크편차비} = \frac{\text{최소토크편차}}{\text{평균토크}}$$

$$\text{최대토크변동비} = \frac{\text{최대토크변동}}{\text{평균토크}}$$

(1) 평지 주행

평지 주행을 할 때 상단변속에서는 변속 충격이 충격1, 2 수준으로 변속 충격을 운전자가 거의 느끼지 못하는 수준이었으나 하단변속에서는 변속 충격이 충격3, 4 수준으로 변속으로 인해 운전자에게 심한 충격이 가해지는 수준도 발생하였다. 그리고 변속 충격은 변속 단수의 차가 큰 경우에 심하게 나타났다. 이는 평지 주행에서 뿐만 아니라 오르막 주행과 내리막 주행에서도 같은 결과로 나타났다.

평지 주행에서의 평균 토크는 약 500Nm로 오르막 주행과 내리막 주행의 중간 수준이었으며 변속충격이 크게 느껴지는 충격3에서의 최대 토크 변동 크기는 약 10000Nm이었다.

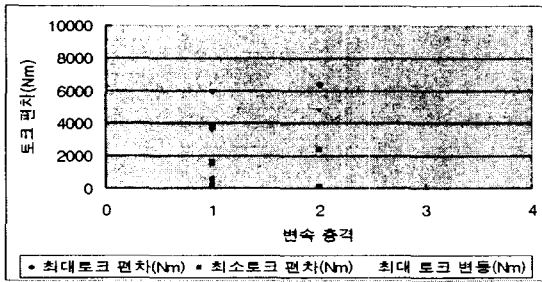


Fig. 3 Torque deviations of level travel while upshifting.

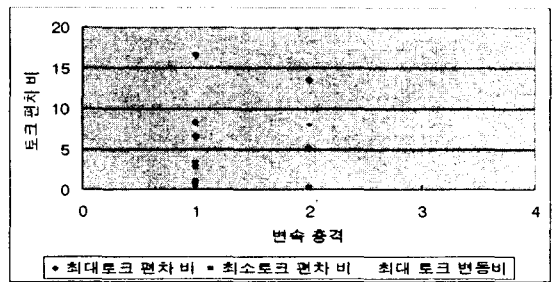


Fig. 4 Torque deviation ratios of level travel while upshifting.

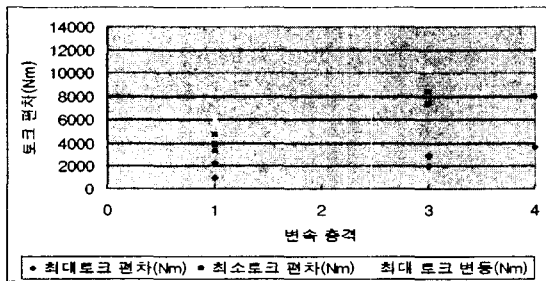


Fig. 5 Torque deviations of level travel while downshifting.

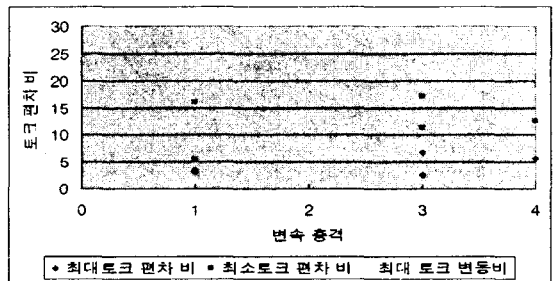


Fig. 6 Torque deviation ratios of level travel while downshifting.

위의 그림에서 나타난 것과 같이 변속 충격이 작은 충격1과 충격2에서는 토크 편차나 토크 편차비에 의해 변속 품질을 직접적으로 평가하기는 힘들었으나 변속 충격이 큰 경우에

는 토크 편차에 의해 변속 품질을 평가하는 것이 가능하였다. 즉, 하단 변속할 때의 최대 토크 변동의 크기가 6000Nm 이하일 경우에는 변속 충격이 충격1로 나타났으며, 10000Nm 이상일 경우에는 변속 충격이 충격3과 충격4로 나타났다.

(2) 오르막 주행

오르막 주行的 경우에는 평균 토크가 약 1800Nm로 평지 주행보다 구동축에 작용하는 토크가 크게 나타났다. 또한 변속 품질은 평지 주행에서와 마찬가지로 하단 변속시 변속 충격이 더 크게 나타났으며 충격3, 4와 그 이하의 구분이 되는 최대 토크 변동의 크기는 약 7500Nm 수준이었다. 또한 토크 변동비는 평지주행에서보다 작게 나타났는데 이는 오르막 주행에서는 평균 토크가 평주주행에서보다 크기 때문에 평균 토크에 대한 토크 변동의 비가 작게 나타나기 때문이다.

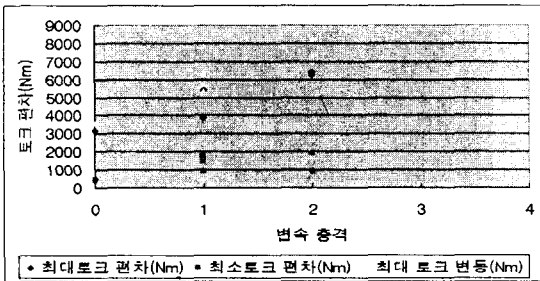


Fig. 7 Torque deviations of upward travel while upshifting.

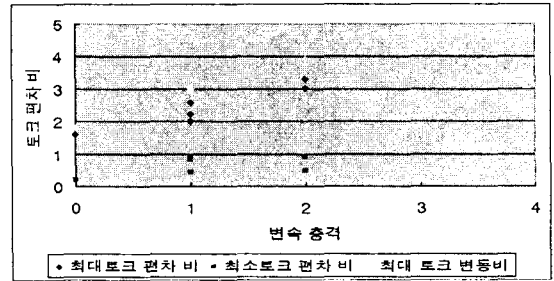


Fig. 8 Torque deviation ratios of upward travel while upshifting.

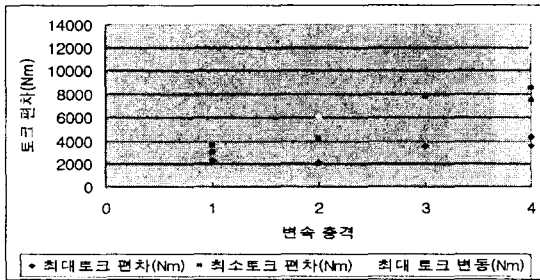


Fig. 9 Torque deviations of upward travel while downshifting.

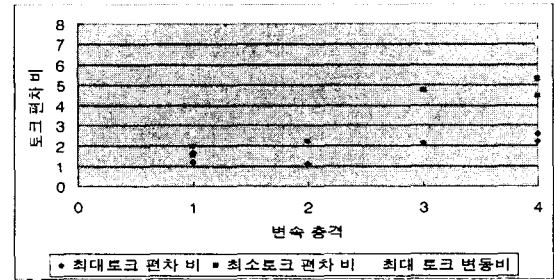


Fig. 10 Torque deviation ratios of upward travel while downshifting.

(3) 내리막 주행

내리막 주행에서의 평균 토크의 크기는 약 -500Nm이었다. 이는 경사로에서 엔진 브레이크가 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 변속 품질은 하단 변속을 수행할 경우가 하단 변속을 수행할 경우보다 좋지 않은 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않았다.

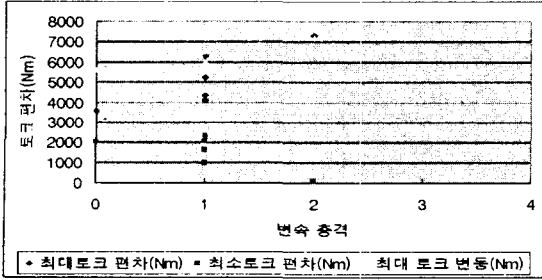


Fig. 11 Torque deviations of downward travel while upshifting.

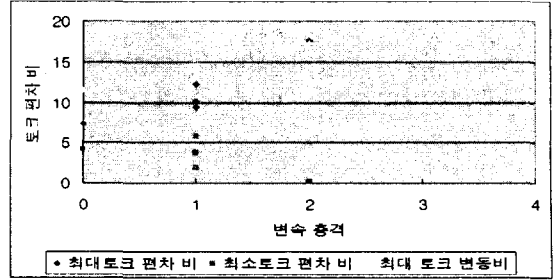


Fig. 12 Torque deviation ratios of downward travel while upshifting.

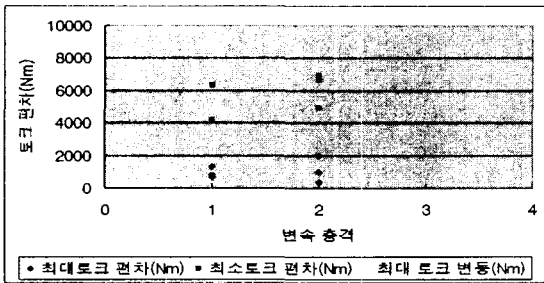


Fig. 13 Torque deviations of downward travel while downshifting.

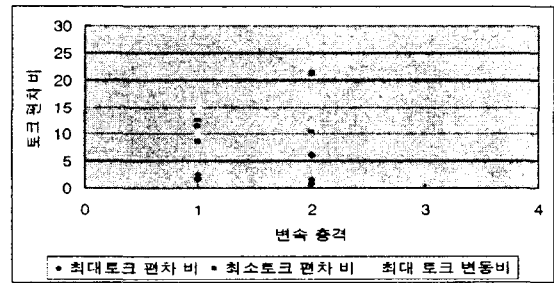


Fig. 14 Torque deviation ratios of downward travel while downshifting.

4. 요약 및 결론

작업 중 변속시 트랙터의 변속 품질을 평가하는 여러 방법들 중 구동축에 작용하는 과도 토크를 이용하여 변속 품질을 평가하는 방법을 적용하여 트랙터의 변속 품질을 평가하였다. 또한 각 작업 조건에서 측정된 정성적 변속 품질과 구동축 토크로부터 유도되는 정량적 변속 품질을 비교 평가하여 유사한 관계가 있음을 확인하였다.

각 작업 조건에서의 평균 토크가 크게 달랐으므로 과도 토크 변동비를 이용하여 변속 품질을 평가할 수는 없을 것으로 판단된다. 따라서 변속 충격에 따른 최대 과도 토크 변동의 크기를 이용하면 서로 다른 작업 조건에 대한 변속 품질도 비교 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 한상서. 1997. 클러치 직접 구동 방식을 이용한 자동변속기 변속과도 토크 제어. 석사학위 논문. 서울대학교 대학원.
2. 공진형. 2000 차량계 모델링과 실차 실험을 통한 변속 특성 및 승차감 분석. 석사학위 논문. 서울대학교 대학원.