

트랙터용 기계-유압식 무단변속기(DMT) 연구현황

정동수, 박종원 | 한국기계연구원
정용욱 | 하이드로텍(주)

[요약문]

기계-유압식 무단변속기인 DMT는 농촌의 고령화의 추세에 맞물려 중·대형 트랙터의 핵심기술로 부각되고 있다. DMT는 기계동력과 유압동력인 두 개의 전달 구조를 조합하고 서로의 단점을 보완함으로써 기동력이 우수하고, 변속충격이 거의 없고, 전달효율이 향상되고 있다. 트랙터용 DMT는 유압동력을 전달하는 HST, 기계동력을 분배 또는 합성하는 유성기어 장치, 전진과 후진을 선택하는 전·후진 클러치, 출력축을 정지하는 브레이크 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 DMT의 핵심기술인 HST와 유성기어장치에 대한 내부구조 및 동력전달을 해석하고 시제품의 실험결과를 제시하여 국내에서 진행되고 있는 DMT의 연구현황을 소개하고자 한다.

1. 서론

고유가 및 농촌 인구의 고령화 추세에 맞물려 농기계 시장은 편리성, 고효율, 고성능을 갖춘 중·대형 트랙터로 바뀌고 있다. 그러나 국내 농기계 업체는 이에 대한 충분한 기술대응이 불가하여 대부분 선진국의 수입구조에 의존하고 있다. 트랙터는 여러 가지 작업조건과 경지조건에서 다양한 작업을 장착하여 작업하기 때문에 조작이 용이하고 승차감이 우수한 무단변속기가 요구되고 있다. 무단변속기는 동력을 전달하는 구조에 따라 정압식, 벨트식, 체인식 등이 있다. 정압식(HST : Hydro-Static Transmission)은 벨트식과 체인식에 비하여 동력전달과정에서 직접적인 기계접촉이 없으므로 내구성이 우수하다^[1]. 더군다나, 출력밀도가 매우 높고 배치공간이 적어도 되는 중요한 장점들을 제공한다. 그리고 저속에서 기동력이 우수하고 변속 시에 충격이 거의 없고 전·후진의 조작이 용이하다. 그러나 효율이 낮다는 치명적인 단점으로 인하여 부하가 적은 작업에 많이 사용되고 있으나 부하가 높은 작업으로는 적합하지 않다. 기계-유압식 무단변속기인 DMT(Dual Mode Transmission)는 HST의 여러 가지 장점들을 활용하면서 효율이 낮은 단점을 보완하기 위하여 기계식 변속기를 조합한 기술로써 현재 국내에서도 선행연구가 활발하게 진행되고 있다^[2]. 그림 1은 시장의 요구현황에 대응하는 트랙터용 변속기의 기술개발 추세를 보여주고 있다.

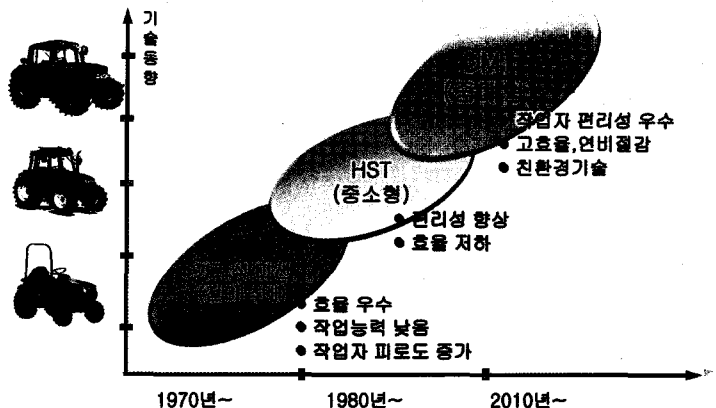


그림 1. 변속기 기술개발 추세



2. 연구개발 동향

2.1 국내 연구동향

한국기계연구원에서는 장갑차의 변속기에 내장된 조향변속을 담당하는 HST를 성공적으로 개발하여 국산화한 사례가 있으며 국방과학연구소에서는 독일 ZF(주)에서 개발한 전차용 변속기인 HMPT(Hydro-Mechanical Power Transmission)가 국내 주행조건에 적용이 가능한지에 대한 분석연구를 수행한 바가 있다. 전투 차량에 탑재되는 대부분의 변속기는 주행변속과 조향변속을 동시에 수행하기 때문에 주행변속만 요구되는 농기계용 DMT와는 설계기술 측면에서 크게 차별화된다. 국내 자동차 업체들은 V 벨트식 무단변속기를 기술 도입하여 소형차량에 적용하고 있지만 구조적으로 토크전달의 한계 때문에 큰 동력이 요구되는 농기계에는 응용이 어렵다. 농기계 분야에서 동양물산(주)는 순수 HST를 개발하여 소형 트랙터에 적용하고 있으며 하이드로텍(주)는 중·대형 트랙터에 적용할 수 있는 DMT를 개발하고 있다. 그림 2는 트랙터에 적용되는 전체 변속장치를 보여주고 있다. 전체 변속장치는 주행 중에 무단변속을 수행하는 주 변속장치인 DMT와 정지 중에 각단이 조작되며 출력토크를 증폭하는 부 변속장치로 구별된다.

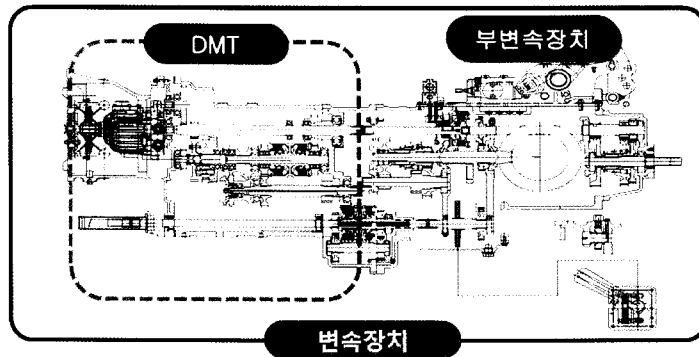


그림 2. 트랙터 전체 변속장치

2.2 국외 연구동향

해외 선진국에서 HST와 DMT는 연구개발 및 신뢰성이 입증되어 상용화가 되고 있으며 응용분야도 급속하게 확대되고 있는 추세다. DMT 동향만을 소개하면 다음과 같다. 미국의 John Deere(주)는 변속기의 대표적 선두 주자로 약 10년 전부터 DMT를 양산중이며 대형 트랙터 시장의 약 80% 이상의 점유율을 확보하여 농기계 분야의 변속기 기술을 주도하고 있다. 독일의 FENDT(주)는 회사 규모는 작으나 HST의 고압화 및 고속화를 실현하여 콤팩트한 DMT 설계기술을 보유하고 있다. 일본의 YANMAR(주)는 소형 트랙터에 HST를 탑재하여 전 세계적으로 시장우위를 유지하는 동안 DMT의 필요성을 느끼지 못하고 있다가 점차 대형화 추세 및 고유가의 영향으로 개발을 서둘러 약 2년 전에 처음으로 중형 트랙터에 DMT를 장착하고 있다.

3. 기계-유압식 무단변속기(DMT) 기술

3.1 DMT 구조 및 작동원리

DMT의 기본 구성은 유압동력을 전달하는 HST, 동력을 분배 또는 합성하는 유성기어 장치, 전진과 후진을 선택하는 전·후진 클러치, 중립시에 출력축을 정지시키는 브레이크, HST와 클러치/브레이크를 제어하는 TCU로 이루어

어져 있다. 그림 3은 엔진으로부터 공급된 동력이 HST에 의하여 분배되고 유성기어장치에 의하여 합성되는 DMT의 동력전달 흐름을 보여주고 있다.

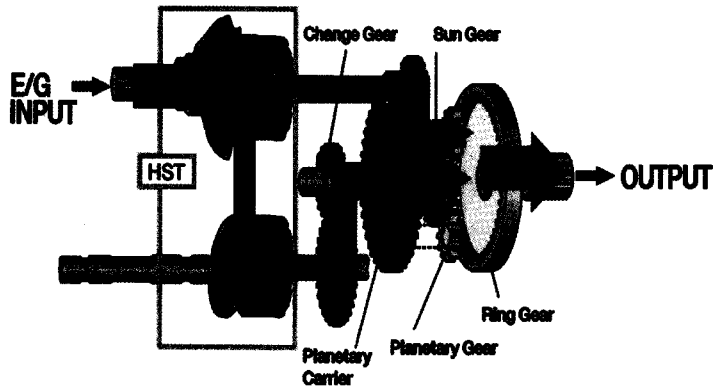


그림 3. DMT의 동력전달 흐름도

입력동력은 부하조건에 따른 변속제어에 의하여 기계동력과 유압동력으로 배분된다. 기계동력은 캐리어를 거쳐 유성기어로 전달되고 유압동력은 HST를 거쳐 선기어로 전달된 후 각각의 동력들은 링기어에서 합성되어 출력된다. HST는 기계동력을 유압동력으로 전환하는 유압펌프, 유압동력을 기계동력으로 전환하는 유압모터, 그리고 유압펌프의 배제용적을 변환하여 유압모터의 속도를 제어하는 레귤레이터로 구성된다. DMT는 입·출력 로드맵으로 제어되는 HST에 의하여 무단으로 변속된다.

그림 4는 트랙터용 DMT에 적용된 유성기어장치의 개념도를 보여주고 있다. 이때, 링기어, 선기어, 캐리어의 속도 관계는 식 (1)로 표현된다.

$$\omega_R = (1+r)\omega_C - r\omega_S \quad (1)$$

여기서 ω_R : 링기어의 속도

ω_C : 캐리어의 속도

ω_S : 선기어의 속도

r : 기어비 ($=Z_S/Z_R$)

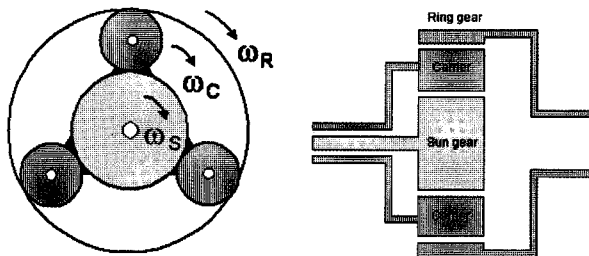


그림 4. 유성기어장치의 개념도

그림 5는 DMT로 입력되는 엔진의 속도가 일정하다고 가정하면 기계동력을 전달하는 캐리어의 속도는 일정하며 선기어로 동력을 전달하는 HST에 의하여 출력속도가 변속되는 것을 보여주고 있다. 식 (1)에 의하면 DMT의 출력



속도가 저속이 되기 위해서는 선기어의 속도가 “+” 이어야 하며 DMT의 출력속도가 고속이 되기 위해서는 선기어의 속도가 “-” 이어야 한다. 다시 정리하면, DMT의 출력속도가 정지에서 고속으로 변속되기 위해서는 선기어의 속도가 최대 “+”에서 최대 “-”로 변환된다.

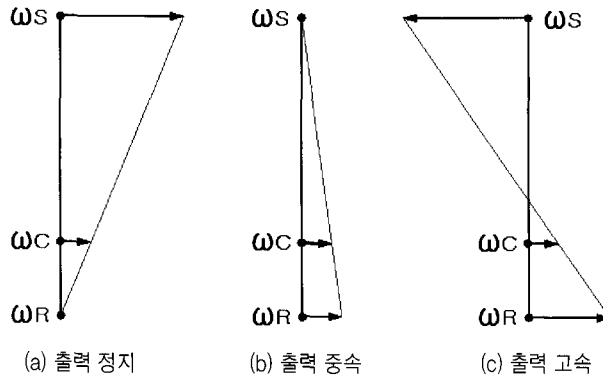


그림 5. 유성기어장치의 입·출력 속도관계

3.2 HST의 구조 및 제어

그림 6은 무단변속을 제어하는 HST 시스템의 유압회로를 보여주고 있다. HST는 유압모터에 유압동력을 공급하는 가변용량 유압펌프^[3], 유압동력을 기계동력으로 전환하는 고정용량 유압모터, 시스템의 안전을 위하여 최대압력을 제어하는 안전밸브, 유압펌프의 용량을 제어하는 레귤레이터로 구성된다. 레귤레이터는 유압펌프의 사판을 움직이는 서보피스톤, 서보피스톤의 변위를 제어하는 서보밸브, 전기적 입력신호에 의하여 서보밸브를 제어하는 전자비례압력밸브(EPPV : Electronic Proportional Pressure Valve)로 이루어져있다. HST는 폐회로 시스템으로 구성되어 냉각과 오염에 취약한 구조이므로 이를 해결하기 위하여 개회로 시스템에 비하여 내부유량을 외부로 많이 방출되도록 설계된다. 방출된 유량만큼 다시 보충하기 위해서는 저압용 보충펌프가 요구된다.

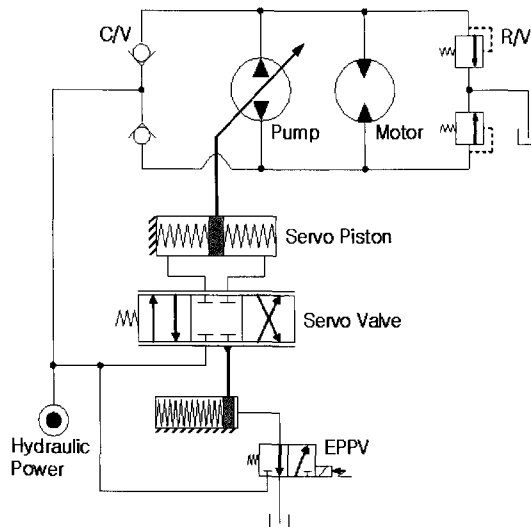


그림 6. HST 시스템의 유압회로도

HST의 제어방법은 다음과 같다. 첫째, 전자비례밸브에서 전기입력신호에 비례하여 제어압력이 형성되며 제어압력 만큼 서보밸브의 변위가 형성된다. 둘째, 서보밸브가 개방되면 서보피스톤으로 유량이 공급되면서 서보피스톤이 움직인다. 셋째, 서보피스톤의 변위가 서보밸브로 피드백 되기 때문에 서보피스톤이 움직이면 서보밸브는 다시 서서히 닫히게 된다. 서보밸브가 닫히면 더 이상 서보피스톤은 움직이지 않고 현 위치를 유지하게 된다.

3.3 DMT의 동력전달 해석

3.3.1 속도 해석

그림 7은 현재 하이드로텍(주)에서 개발 중인 80PS 급 트랙터에 탑재되는 DMT 내부의 기어트레인을 보여주고 있다. 해석의 편의를 위하여 DMT의 입력속도는 1,000rpm으로 일정하다고 가정한다. 속도에 대한 해석은 토크를 분석하는데 유용하게 활용된다. 먼저, 유성기어 비는 선기어와 링기어의 잇 수가 각각 17개와 64개이며 이들로부터 $0.2656(r=Z_s/Z_R)$ 로 산출된다.

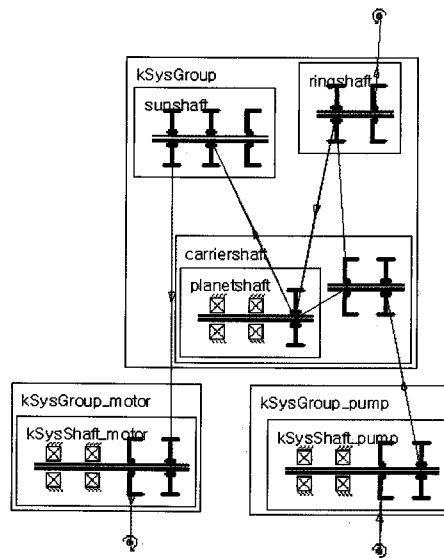


그림 7. DMT의 기어트레인 구조도

그림 8은 DMT의 속도를 합성하는 유성 기어장치의 2개의 입력(선기어, 캐리어) 및 1개의 출력(링기어) 속도를 보여주고 있다. 출력을 변속하기 위하여 유압펌프의 용량을 $\pm 72\%$ 로 가변하여 유압모터의 속도를 $-720\text{rpm} \sim +720\text{rpm}$ 로 변속한다. 그리고 선기어와 캐리어의 합성된 링기어의 출력속도는 63rpm에서 791rpm으로 가변된다. 개발중인 DMT는 유압모터에서 선기어까지의 기어비가 $1.90323(=59/31)$ 이고 유압 펌프에서 캐리어까지의 기어비가 $0.33803(=24/71)$ 이다.

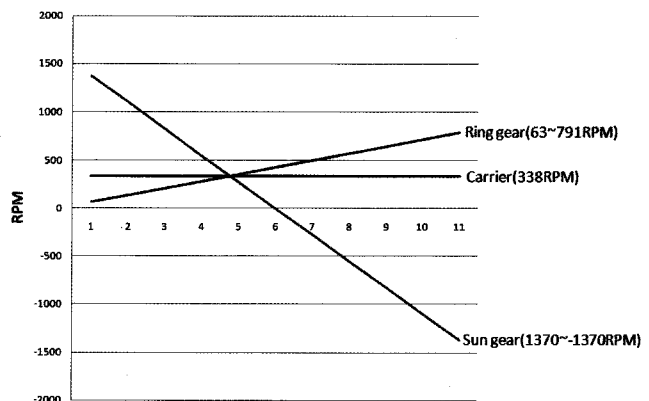


그림 8. 유성기어장치의 입·출력 속도선도



3.3.2 토크 및 동력 해석

그림 9는 입력속도가 1,000rpm으로 일정한 조건에서 출력속도에 따라 출력토크가 가변되는 DMT의 토크 및 동력을 보여주고 있다. 이때, 링기어, 선기어, 캐리어의 토크관계는 식(2)와 식(3)으로 표현된다.

$$\frac{T_R}{T_S} = \frac{1}{r} \tag{2}$$

$$\frac{T_C}{T_S} = \frac{(1+r)}{r} \tag{3}$$

여기서 T_R : 링기어의 토크

T_C : 캐리어의 토크

T_S : 선기어의 토크

DMT의 최대 입력 및 출력 토크는 HST의 최대 토크와 유성기어장치의 토크 평형에 의하여 각각 27.9kgf-m와 65.2kgf-m으로 제한된다. 즉, 식(2)와 식(3)에 따르면 HST의 출력인 선기어의 토크에 의하여 링기어와 캐리어의 토크가 결정된다. 만약, DMT의 입·출력사양을 증가시키려면 우선적으로 HST의 용량을 크게 설계하여야 한다.

동력선도에서 보면 유압동력은 저속과 고속에서 대부분 사용하고 중속에서는 거의 사용하지 않는다. 저속구간에서는 유압모터가 유압펌프를 구동하는 즉, 유압동력이 역류하는 동력회생이 발생되고 있고 고속구간에서는 정상적으로 유압동력이 전달됨을 보여주고 있다^[4]. 이로 인하여, 저속구간에서는 적은 엔진동력으로도 기동력이 크게 발휘된다. DMT의 최대 입력동력은 입력속도를 1,000rpm기준으로 하였을 때 약 39PS이고 2,200rpm이면 약 86PS이 된다. DMT의 동력전달효율은 기계동력만으로 전달될 때가 가장 높게 형성되며 입력속도가 1,000rpm 일 때 출력속도가 428rpm인 지점이다. 저속에서는 유압동력이 역류하는 동력회생이 발생하며 이로 인하여 엔진의 구동동력은 반대로 감소한다.

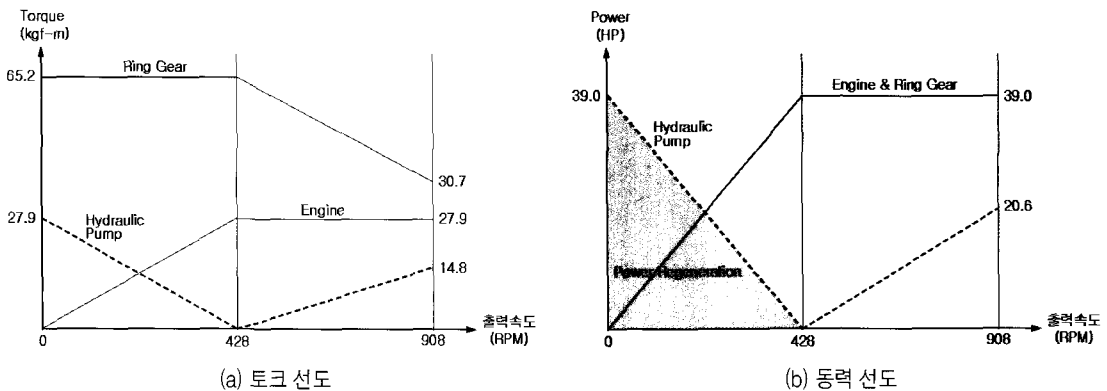


그림 9. DMT의 입·출력 토크 및 동력

4. 시험평가

4.1 시험장치 구성

그림 10은 DMT 시험장치의 사진을 보여주고 있다. DMT의 시험장치는 입력속도를 제어하는 AC 전기모터, 출력

부하를 인가하는 유압모터, 유압모터를 제어하는 메인 유압장치, DMT에 유압동력을 공급하는 보조 유압장치, 입·출력 토크센서, 입·출력속도센서, 각종 압력 및 온도 센서 등으로 구성된다. 입력부는 DMT의 토크 충격에서도 입력속도의 변동을 줄이고자 회전관성이 충분히 클 수 있는 전기모터를 선정하였다. 부하부는 회전관성이 적어 동특성이 우수하고 구조적으로 정·역회전이 간결한 유압모터를 선정하였다. 시험장비의 주요 설계사양은 다음과 같다.

- 입력 회전수 : 4,000rpm ○ 입력 토크 : 50kgf-m
- 출력 회전수 : ±4,000rpm ○ 출력 토크 : 150kgf-m

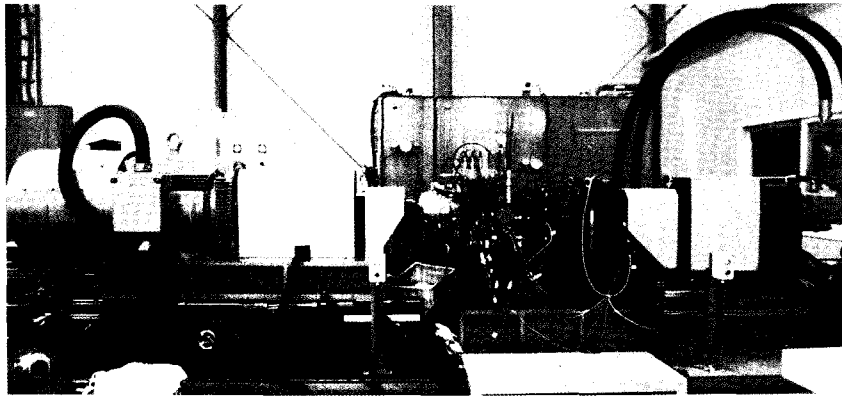


그림 10. DMT 시험장치 사진

4.2 시험결과 및 분석

그림 11은 HST의 입력전류를 각각 15초간 서서히 증가 및 감소시켰을 때 무단으로 변속되는 DMT의 출력속도에 대한 히스테리시스를 확인한 시험결과이다. 입력속도 1,000rpm에서 히스테리시스는 약 ±2.3%로 양호하게 나타나고 있다. 이러한 히스테리시스는 TCU를 사용하여 DMT를 제어하면 거의 제거될 수 있다. 히스테리시스가 지나치게 크면 폐회로 제어가 어려워질 수도 있다.

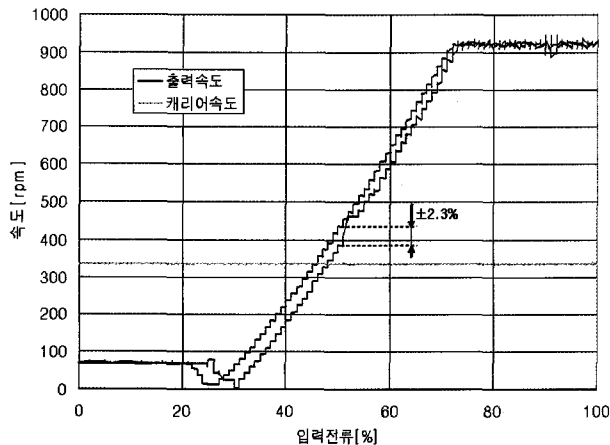


그림 11. 히스테리시스 시험결과 (입력속도 : 1,000rpm)

그림 12는 HST의 입력전류를 STEP으로 인가하거나 제거하였을 때 DMT 출력속도의 응답성을 확인한 시험결



과이다. 입력속도 1,000rpm에서 응답시간은 약 240ms로 매우 빠르게 나타나고 있다. 이러한 변속시간이 현장에서 작동된다면 엄청난 토크충격으로 작용할 수도 있다. 여기서는 단지 DMT의 가속능력을 판단하기 위한 시험이며 실차에서는 TCU에 의하여 최대변속 충격이 완만하도록 제어되어야 한다^[5].

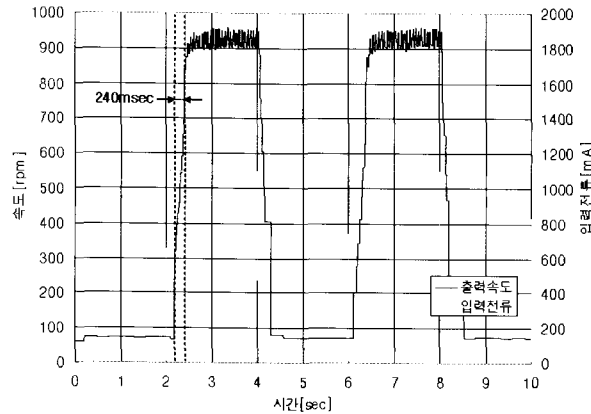


그림 12. 응답특성 시험결과 (입력속도 : 1,000rpm)

그림 13은 DMT의 동력전달효율을 측정한 시험결과이다. 입력속도는 1,000rpm으로 일정하게 유지하고 출력속도는 최대속도를 10등분하여 각각의 상태에서 시험을 수행하였다. 최대출력속도의 약 50%에서는 대부분 기계동력으로만 동력이 전달되므로 동력전달효율이 91%로 가장 높게 나타난다. 유압동력이 최대로 전달되는 최대출력속도의 100%에서는 동력전달효율이 79% 상당히 낮게 나타난다. 이들 결과로부터, HST는 상대적으로 동력전달손실이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

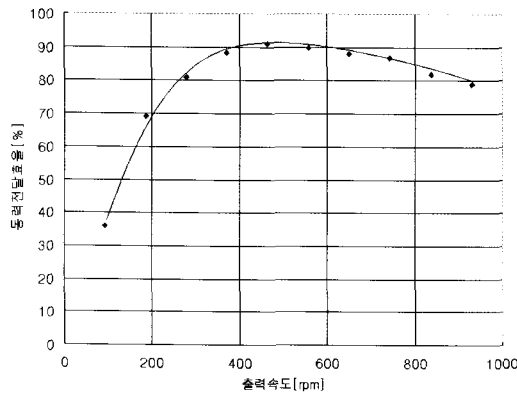


그림 13. 동력전달효율 시험결과 (입력속도 : 1,000rpm)

5. 결 론

중·대형 트랙터에 탑재되는 기계-유압식 변속기인 DMT가 최근에 국내에서 처음으로 상용화를 위한 연구가 시작되었다. DMT는 출력밀도가 높은 콤팩트한 구조이며 저속에서 기동력이 우수하고 변속 시에 충격이 거의 없다. 유

압동력을 전달하는 HST에 의하여 무단 변속기능을 실현하고 정속구간에서는 대부분 기계동력을 채택함으로써 동력전달효율을 향상시키고자 한다.

동력전달효율이 가장 높은 구간은 기계동력만으로 전달되는 중속영역이며 약 90%를 상회하고 있다. 그리고 제어 성능에 기반이 되는 히스테리시스와 응답특성을 확인하였으며 각각 $\pm 2.3\%$, 240ms로 양호한 결과가 나타났다. 시험들은 입력속도가 1,000rpm에서 진행되었는데 엔진의 정격속도에서는 효율이 더 높게 형성된다. 그리고 개발 중인 TCU로 제어되면 히스테리시스는 거의 제거될 수 있다.

앞으로, 이러한 DMT는 기동력, 고성능, 그리고 승차감을 갖춘 무단변속기로서 중·대형 트랙터의 시장경쟁력을 확보하는 핵심기술로 부각되리라고 기대한다.

✽ 참고 문헌

- [1] MUTO, T., KATO, H., SAKAMOTO, K. and YAMADA, H., "Digital Control of Hydrostatic Transmission System Driven by Differential Pulse Width Modulation", Bulletin of the JSME, Vol. 61, No. 590, pp. 179~186, 1995.
- [2] Lee, G. H., Kim, D. S. and Jung, D. S., "Concept Design for HCVT (hydro-mechanical-type Continuous Variable Transmission) for City Bus Application", SAE Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, pp. 31~39, 2004.
- [3] Manring, N. D., "The Torque on the Input Shaft of an Axial Piston Swash-Plate Type Hydrostatic Pump", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, pp. 57~62, 1998.
- [4] KAYUKAWA, H., YAMADA, H. and MUTO, T., "Fundamental Study of Power Match Control of Hydraulic Power Systems", Bulletin of the JSME, Vol. 61, No. 586, pp. 206~212, 1995.
- [5] Gad, O., Rabie, M. G. and El-Taher, R. M., "Prediction and Improvement of Steady-State Performance of a Power Controlled Axial Piston Pump", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 124, pp. 443~451, 2002.



정 동 수

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원
· 관심분야 : 건설기계/농기계, 신뢰성평가
· E-mail : jds667@kimm.re.kr



박 중 원

· 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 선임연구원
· 관심분야 : 건설기계/방산장비, 신뢰성평가
· E-mail : jwpark@kimm.re.kr



정 용 욱

· 하이드로텍(주) 대표이사
· 관심분야 : 농기계, 유압시스템
· E-mail : ceo@hydrotech.kr