

# 지게차용 PSD-Axle의 수학적 모델링 및 해석

## The Mathematical Modeling and Analysis of the PSD(Power Shift Drive)-Axle for a Forklift

\*박성민<sup>1</sup>, \*박태원<sup>2</sup>, 이수호<sup>1</sup>, 한승우<sup>3</sup>, 장경일<sup>3</sup>

\*S. M. Park<sup>1</sup>, #T. W. Park(park@ajou.ac.kr)<sup>2</sup>, S. H. Lee<sup>1</sup>, Simon. Han<sup>3</sup>, K. Y. Jang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 아주대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup> 아주대학교 기계공학부, <sup>3</sup> 우영유압 중앙연구소

Key words : PSD(Power Shift Drive)-Axle, Forklift, Lever Analogy

### 1. 서론

최근 지게차와 같은 산업차량의 개발에 있어 원유가 상승과 친환경 규제 강화에 대응하기 위한 신기술의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 시대적 요구에 부합하는 PSD-Axle은 Figure 1에서 보는 바와 같이 변속기와 구동 액슬을 하나의 장치로 묶어주는 새로운 개념의 자동 변속 시스템이다. PSD-Axle은 기존의 지게차용 자동변속장치 대비 약 30% 경량화 되었다. 이로 인해 연료절감과 연비 상승효과를 가져 올 수 있다.

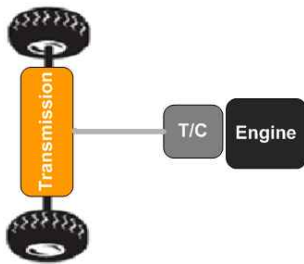


Fig.1 PSD(Power Shift Drive)-Axle Schematic

PSD-Axle은 기존 지게차용 동력전달장치와 달리 변속장치가 베벨기어와 차동장치 사이에 혼합, 설치되어 있다. 따라서 이 시스템에서는 자동변속기와 구동 액슬이 가지는 구성품들을 하나의 장치로 통합하였기 때문에 동력 전달 시스템에 대한 이해와 분석이 필요하다. 승용차 자동변속기의 변속기 과도 응답이나 상용차를 이용한 동적 시스템 모델링의 시뮬레이션에 관한 연구는 많은 진척이 되어왔다. [1,2,3] 지게차, 휠로더와 같은 건설 중장비 자동변속기에 관한 연구는 LEE[4,5] 등에 의해 일부 진척이 되었다. LEE는 지게차 자동변속기의 동역학 모델링과 해석을 수행하였다. 일반적인 지게차에 적용되는 자동 변속기 역시 승용차의 자동변속장치와 크게 다르지 않다.

본 논문에서는 신개념 동력 전달 시스템인 PSD-Axle의 모델링과 시뮬레이션을 통한 동적 거동 해석을 수행하였다. PSD-Axle의 동역학 모델은 단품의 특성을 포함하여 구성하였다. 구해진 각 단품의 모델을 통합하여 전진 1단 전체 동력 전달계의 수학적 모델을 유도하였다. 이를 바탕으로 Simulink를 이용하여 시스템 동역학 모델을 구현하였다. 시뮬레이션을 통해 PSD-Axle 시스템에 대한 동적 거동을 예측 할 수 있었다.

### 2. 단품별 동역학 모델링

일반적인 액슬의 경우 베벨기어와 차동장치가 일체로 형성되어 있다. 하지만 PSD-Axle의 경우 베벨기어와 차동기어 사이에 전/후진 변속클러치가 위치하여 변속을 진행한 후 출력이 차동장치 케이스로 입력이 된다. 이러한 구동력은 유압 작용에 의해 클러치 등 마찰요소를 작동시키고 유성 치차에 의해서 최적의 구동력을 얻어낸다.

#### 2.1 Engine Modeling

본 연구에서 엔진의 동역학 모델은 정상상태에서의 WOT(Wide Open Throttle)곡선 모델을 이용하여 엔진의 성능값을 나타내었다. 엔진의 아이들 토크는 49Nm이고 최대 토크는 1700rpm에서 186Nm이다. 엔진의 동역학 모델은 식1과 같이 표현된다.

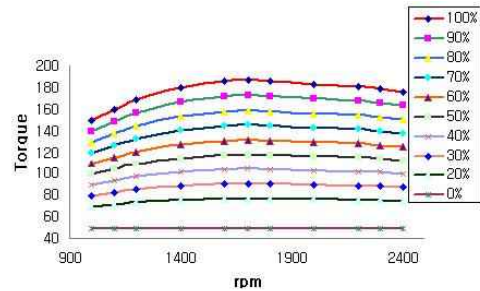


Fig.2 Engine Torque Map

$$T_E = f(\theta, \omega_E) \tag{1}$$

$\theta$ 는 쓰로틀 개도량(%)을 나타내고,  $\omega_E$ 는 엔진회전수(rpm)를 나타낸다. Figure 2는 쓰로틀 개도량에 대한 엔진의 토크 곡선이다.

#### 2.2 Torque Converter Modeling

토크 컨버터는 성능곡선을 이용하여 모델링 하였다. 토크 컨버터의 성능곡선은 정상상태 실험데이터를 사용하였다. Figure 3의 (a)는 토크컨버터의 용량계수를 나타내고 (b)는 토크컨버터의 토크비를 나타낸다.

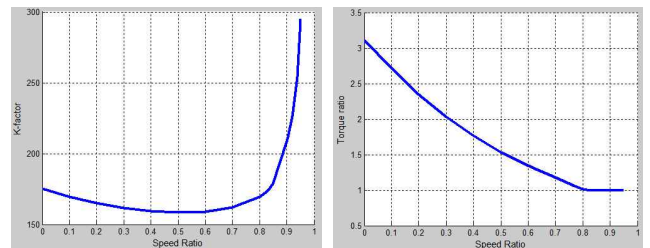


Fig.3 (a) Capacity factor

(b) Torque ratio

토크컨버터의 용량계수( $K_f$ ), 속도비(SR), 토크비(TR)는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{aligned} K_f &= \frac{\omega_P}{\sqrt{T_P}} \\ T_t &= TR \times T_p \\ SR &= \frac{\omega_t}{\omega_p}, TR = \frac{T_t}{T_p} \end{aligned} \tag{2}$$

$K_f$ 는 토크컨버터 용량인자,  $T_t, T_p$ 는 터빈토크, 펌프토크,  $\omega_t, \omega_p$ 는 각각 터빈속도, 펌프속도를 나타낸다.

#### 2.3 Hub Reduction (2-Simple Planetary Gears)

복합 유성 치차 해석은 레버(lever) 해석을 이용하였다. 레버 해석법(Lever Analogy)은 입력, 반력, 출력요소의 변화에 따른 변속비 및 토크 등을 기하학적으로 구할 수 있는 방법이다. [6,7]

본 PSD-Axle의 지게차량은 2개의 단순유성기어가 연결된 2-Simple Planetary Gears 방식의 Hub Reduction(감속기)을 장착하고 있다.

2.3.1 속도 레버 분석 (D-1단/S1:입력/R:고정/PC2:출력)

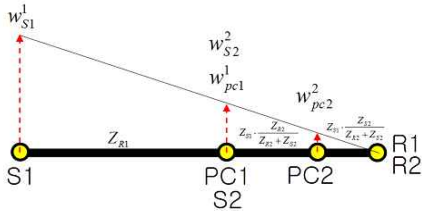


Fig.4 Velocity Lever for 1st Speed

Figure 4와 식3은 2-Simple Planetary Gears를 통해서 속도가 정방향으로 12.9076 감속되는 것을 보여준다.

$$w_{s1}^1 : (Z_{R1} + Z_{s1}) = w_{pc2}^2 : \frac{Z_{s1} \cdot Z_{s2}}{Z_{R1} + Z_{s2}} \approx 12.9076 \quad (3)$$

3. 시스템 동역학 모델링

3.1 전/후진 1단에 대한 PSD-Axle 운동방정식

단품들의 운동학적 관계와 회전속도를 이용해 토크 관계식과 Figure 5의 자유물체도를 작성하였다. [2, 8]

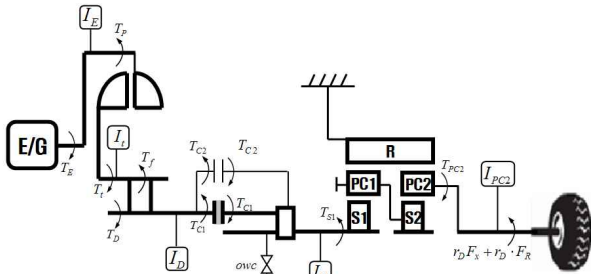


Fig.5 Power Flow at the 1st Forward Power Shift

$$I_E \dot{\omega}_E = T_E - T_P \quad (4)$$

$$I_{eq} \dot{\omega}_{PC2} = \frac{R_f}{R_a} T_t - r_D F_X - r_D F_{RF} \quad (5)$$

여기서

$$I_{eq} = \left(\frac{R_f}{R_a}\right)^2 I_t + \left(\frac{1}{R_a}\right)^2 (I_D + I_{S1}) + I_{PC2} \quad (6)$$

차량의 구동력은 다음과 같다.

$$F_X = \left(\frac{R_f}{r_D R_a}\right) T_t - I_{eq} \frac{\dot{V}}{r_D^2} - F_{RF} \quad (7)$$

3.2 전/후진 1단 PSD-Axle System 해석

엔진의 구동력(식4)과 구동축의 회전속도(식5)에 관련된 수식과 차량의 구동력(식7), 차량의 등가관성(식6)에 관한 수학적 모델을 바탕으로 Figure 6의 Simulink Model을 구성하였다.

4. 결과 및 고찰

구성된 동력 전달 시스템의 동적 거동을 확인하기 위해 전진1단에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

Figure 8은 시뮬레이션이 진행되는 동안의 터빈속도와 차량의 속도변화를 나타낸다. 또한 Figure 7을 통해 토크의 변화를 확인할 수가 있다. 기존에 입력한 Pedal position(쓰로틀 개도량)을 잘 따라가면서 터빈의 출력토크보다 타이어에 연결되어 있는 구동축의 토크가 PSD-Axle을 지나면서 최종 기어비(16.005)만큼 증가되는 것을 알 수가 있다.

본 결과를 통해 Simulink로 구성된 PSD-Axle 모델의 적절성을 확인할 수 있다.

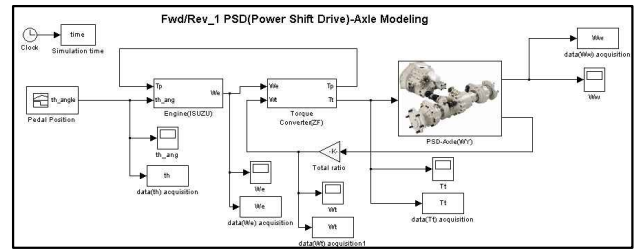


Fig.6 Fwd/Rev\_1 PSD-Axle Full Model

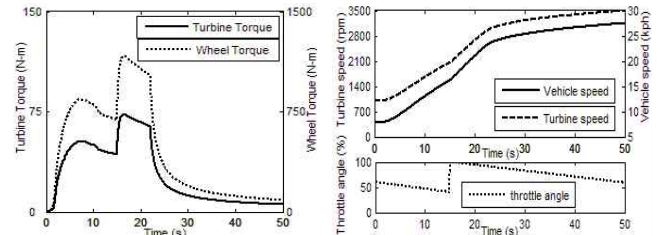


Fig.7 Turbine & Wheel Torque Fig.8 Turbine & Vehicle Velocity

5. 결론

본 논문에서는 전/후진 1단의 주요 동력전달 요소에 따른 수학적 모델을 구축하였다. 수학적 모델을 바탕으로 Engine, Torque Converter, PSD-Axle System에 대하여 Simulink 모델을 구성하였다. 모델을 구성하여 수치해석 결과, 시스템 입력(pedal position)에 대한 출력(Wheel Torque, Vehicle Velocity)을 확인할 수가 있었다.

앞으로 전/후진 1단 PSD-Axle 동역학 모델 system에 PSD-Axle 다이내모 데이터와의 비교 분석을 통해서 모델의 신뢰성을 검증할 계획이다. 이상의 연구결과는 다단 PSD-Axle 개발 시 기초 자료로 활용될 수 있다. 이를 바탕으로 향후 개발될 2단 PSD-Axle에 대한 동역학 모델구성을 수행할 계획이다.

후기

본 연구는 지식경제부 산하 한국부품소재산업진흥원 부품소재개발사업 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. Kim, D. Cho, " Dynamically-Correct Automatic Transmission Modeling," KSAE, 5, 73-85, 1997.
2. I. C. Kim, S. J. Yi, "The Development of the Software for the Powertrain Design Using Graphic User Interface," KSAE, 11, 205-215, 1996.
3. H. J. Kim, J. S. Song, "Modeling and Analysis of Transient-Torque Characteristics of Powertrain an Automatic Transmission," KSME, 1, 347-352, 1997.
4. K. H. Lee, G. H. Lee, "Simulation and Analysis using Dynamic System Modeling for Forklift Truck Automatic Transmission," KSAE, 6, 897-902, 2006.
5. J. Y. Park, "The Modeling and Analysis of the Powertrain in a Automatic Transmission for the Construction Vehicle," KSAE, 11, 748-754, 1999.
6. D. H. Park, "Calculation of Torque and Energy Capacity of Friction Elements of Automatic Transmission," KSAE, 6, 350-364, 1994.
7. D. G. Lim, D. H. Park, "Analysis of Automatic Transmission Shift Characteristics Using Lever Analogy," KSAE, 6, 436-450, 1995.
8. A. Haj-Fraj, F. Pfeiffer, "Optimization of Gear Shift Operations in Automatic Transmissions," AMC, 469-473, 2000.