

변속제어 알고리즘을 적용한 휠로더 자동변속기 특성 해석

오주영*, 윤웅권⁺, 박영준⁺⁺, 이근호⁺⁺, 송창섭⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 05. 30, 수정일 2011. 06. 30, 심사완료일 2011. 07. 07)

Characteristics Analysis of Automatic Transmission for the Wheel-Loader with Shift Control Algorithm

Joo-young Oh*, Ung-Kwon Yun⁺, Young-Jun Park⁺⁺, Geun-Ho Lee⁺⁺, Chang-Seop Song⁺⁺⁺

Abstract

Wheel-loader is a construction vehicle for uploading soil or sand into truck and transportation of materials, which requires large driving power and high rotational speed. To improve the working efficiency, the operator has to shift gears and control levers for bucket & boom simultaneously. Therefore, the automatic transmission has been introduced to enhance operator's convenience and enable effective operation. To develop the automatic transmission for the wheel-loader, technologies such as gears and a clutch-pack design and shift algorithm are required for improvement of shift quality. In this paper, the shift algorithm for the wheel-loader was developed and its shift pattern was analyzed. As the shift control is affected by the pressure profile for the clutch control, the shift quality depending on the pressure profile has been evaluated using experiment and simulation model analysis.

Key Words : Wheel-loader(휠로더), Automatic transmission(자동변속기), Clutch control pressure profile(클러치 제어 압력 프로파일), Shift pattern(변속 패턴), Shift control algorithm(변속 제어 알고리즘)

1. 서론

휠로더는 토사 상차 및 운반 작업을 주목적으로 하는 건설 기계로서 토사 처리 작업 시에는 큰 구동력을 요구하며, 운반 작업 시에는 구동축의 높은 회전 속도를 요구한다.

이를 위해 작업자는 장비의 구동성을 최대한 유용하게 이용하기 위하여 빈번한 변속 조작을 하게 되며, 또한 토사 처리 작업 시 버킷과 붐을 조작 레버로 제어하면서 동시에 변속 레버를 적절히 조작하여야 하므로 작업자의 숙련도에 의해 작업량

이 크게 좌우된다.

따라서 효율적인 작업을 수행하기 위해 자동변속기가 일반적으로 장착되고 있다⁽¹⁾. 국내에서는 휠로더용 자동변속기의 설계 기술과 개발 경험 부족으로 인하여 선진 제품의 자동변속기를 전량 수입에 의존하고 있다. 그러나 최근에 휠로더의 시장규모가 확대되고 부가가치가 높은 부품에 국산화 필요성이 대두됨에 따라 자동변속기에 대한 연구 개발이 시도 되고 있다⁽²⁾.

휠로더용 자동변속기를 개발하기 위해서는 기어와 클러치팩의 설계기술뿐만 아니라 효과적인 변속 제어 알고리즘을 적용

* 한양대학교 대학원 기계설계-메카트로닉스공학과 (ojy831@hanyang.ac.kr)

주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

+ 로보티즈(주)

++ 한국기계연구원 시스템엔지니어링 연구본부

+++ 한양대학교 기계공학부

하여 변속 품질을 향상시키는 기술 개발이 요구 된다⁽³⁾. 그러나 변속 중 발생하는 충격을 저감시키기 위해 클러치 내부의 압력을 조절하여 변속 품질을 향상시키는 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 26톤급 휠로더 동력 전달계와 변속 제어 알고리즘을 개발하고 클러치 제어 압력 프로파일을 이용하여 변속 품질을 해석하는 것에 주안점을 두었다. 특히, 휠로더 자동변속기의 변속 제어는 클러치 압력 제어 프로파일에 크게 좌우되므로 시험 장비를 구성하여 그 결과를 시뮬레이션 모델에 적용함으로써 변속 특성을 해석하였다.

2. 휠로더 동력전달계 모델

동력전달계(Powertrain) 중에서 자동변속기를 제외한 엔진, 토크컨버터 및 차량 부하에 대한 모델은 1차 시스템으로 모델을 구성하여 복잡성을 낮추었다. 반면에 본 연구의 대상인 자동변속기는 각 단의 기어와 클러치팩에 대해서 상세한 모델을 수립하였다⁽³⁾.

2.1 엔진

엔진 모델은 차량 성능을 결정짓는 중요한 인자이므로 상세한 모델링이 요구되지만, 엔진의 스로틀(throttle) 개도에 따른 연료 분사 특성 등 많은 변수가 존재하므로 모델을 구성하는 것이 쉽지 않다. 따라서 Fig. 1과 같이 엔진의 스로틀 개도와 엔진 속도의 정특성 시험 결과를 이용하여 모델을 구성하였으며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$J_e \cdot \frac{d\omega_e}{dt} = T_e - T_{fric,e} - T_{TCin} \quad (1)$$

여기서, J_e 는 엔진의 관성모멘트, ω_e 는 엔진 회전수, T_e 는 엔진 출력 토크, $T_{fric,e}$ 는 엔진의 마찰력, T_{TCin} 는 토크컨버터의 부하이다.

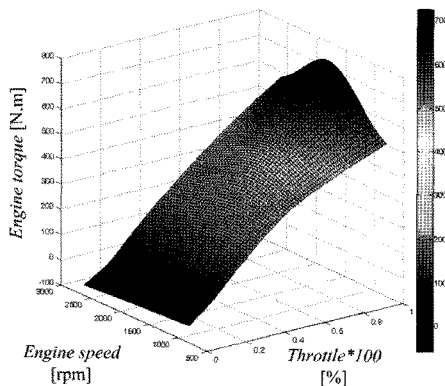


Fig. 1 Torque map of the engine

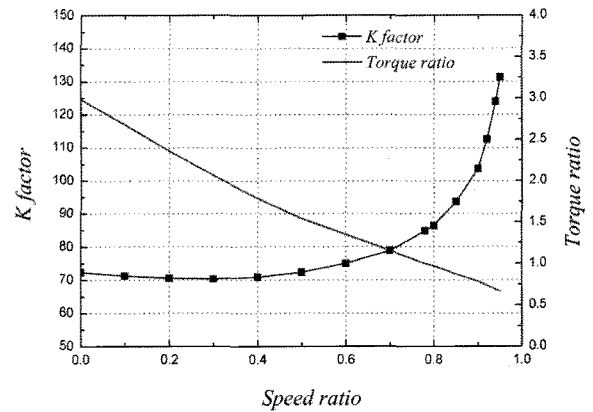


Fig. 2 K factor & torque ratio in accordance with speed ratio of the torque converter

2.2 토크컨버터

토크컨버터는 엔진의 동력을 변속기로 전달하는 동역학적 요소로서 유체 커플링 역할을 수행한다. 저속에서는 엔진 토크를 증대시켜 차량 발진시에 부드러운 동작을 수행하며 또한, 엔진 토크의 맥동을 흡수하여 승차감을 향상시키는 역할을 담당한다⁽⁴⁾.

토크컨버터의 특성을 예측하기 위하여 정적 상태와 동적 상태의 모델을 고려할 수 있다. 이 중에서 정적 상태의 모델은 동적 상태의 모델보다 간단하며 토크컨버터의 특성을 쉽게 예측할 수 있기 때문에, 정적 상태의 특성을 고려하여 모델을 구성하였다.

자동변속기용 토크컨버터의 기본 성능은 속도비(SR), 토크비(TR) 및 용량 계수(K)로 나타낼 수 있으며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$SR = \frac{\omega_t}{\omega_i}, \quad TR = \frac{T_t}{T_i}, \quad k = \frac{\omega_i}{\sqrt{T_i}} \quad (2)$$

여기서 용량 계수는 토크컨버터의 토크 전달 능력(토크 흡수 능력)을 나타내며, 토크컨버터의 정특성 모델을 구현하기 위하여 속도비에 따른 토크비와 용량계수는 Fig. 2와 같은 시험 결과를 적용하여 모델을 구성하였다.

2.3 자동변속기

휠로더용 자동변속기는 평형축 기어트레인(Gear train)과 클러치팩으로 구성된 변속기가 장착된다. 변속은 클러치팩의 압력을 적절히 제어하여, 클러치 내 클러치 접속으로 변속을 수행한다. 건설기계는 큰 동력을 전달해야 하므로 강도와 효율이 높은 헬리컬 기어(Helical gear)가 사용되며 클러치팩은 습식 다판 클러치(Wet multi disk clutch)가 적용된다⁽⁵⁾.

Table 1 Boundary condition from 1st to 2nd stage

	Common	1 st gear	Torque phase	2 nd gear
Torque	$T_{KRC} = T_{K3C}$ $= T_{K4C}$	$T_{K2C} = 0$	$T_{CSC_K2_IP}$ $T_{CSC_K1_IP}$	$T_{K1C} = 0$
Angular acceleration	α_{KVS} $= \alpha_{KYC}$	α_{K1S} $= \alpha_{K1C}$	α_{K1S} $= \alpha_{K1C}$	α_{K2S} $= \alpha_{K2C}$

$$\left(J_{IN-eg} + J_{K2-eg} \cdot \frac{u_{1-IV}^2}{u_{2-2VF}^2} + J_{OUT-eg} \cdot \frac{u_{1-IV}^2}{u_{4-32}^2 \cdot u_{2-2VF}^2} \right) \cdot \frac{d\omega_{IN}}{dt}$$

$$= T_{IN} + \left(\frac{u_{4-31} \cdot u_{1-IV}}{u_{4-32} \cdot u_{2-2VF}} - u_{3-VS1} \cdot u_{1-IV} \right) \cdot T_{CSC_K1_IP}$$

$$- \frac{u_{1-IV}}{u_{2-2VF} \cdot u_{4-03} \cdot u_{4-32}} \cdot T_{Load} \quad (10)$$

여기서, J_{IN-eg} 는 입력그룹의 등가 관성모멘트, J_{K2-eg} 는 연결그룹의 등가 관성모멘트, J_{OUT-eg} 은 출력그룹의 등가 관성모멘트이다.

2.4 주행 부하

주행부하⁽⁷⁾는 식 (11)과 같이 공기저항(F_a), 타이어의 마찰에 의한 힘(F_f) 및 등판각에 의한 자중의 힘(F_g)을 타이어의 반경(r_t)으로 나타낼 수 있다. 각 계수들은 실측 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$T_{Load} = r_t \cdot (F_a + F_f + F_g)$$

$$= r_t \cdot (c_a v^2 + \mu_f \cdot m_v g \cdot \cos \theta + m_v g \cdot \sin \theta) \quad (11)$$

2.5 통합 차량 모델

이와 같이 구성된 모델은 상용 프로그램인 MSC. EASY5⁽⁸⁾를 이용하여 Fig. 4와 같은 통합 모델을 구성하였으며, 변속 제어 알고리즘과 압력 프로파일을 적용하여 변속 특성을 분석하였다. Table 2는 연구 대상인 휠로더의 사양을 나타낸 것이다.

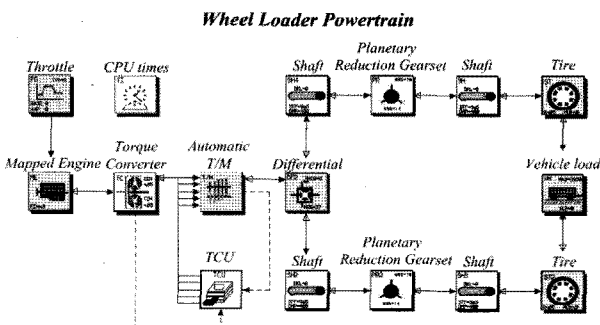


Fig. 4 Model of the powertrain for wheel-loader

Table 2 Specifications of the wheel-loader

Parameters	Value
Engine max. speed	2600rpm
Engine idle speed	910rpm
Engine inertia	0.3kgf·m ²
Mass of vehicle	29,300kgf
Radius of tire	0.9m
Air drag coefficient	0.1
1 st gear ratio	3.78
2 nd gear ratio	2.22
3 rd gear ratio	1.03
4 th gear ratio	0.625
No. of clutch plate	6

3. 변속 제어 알고리즘

휠로더 자동변속기의 변속맵(Shift map)은 변속기의 입력토크와 출력 속도에 의해 결정된다. 이 때 변속맵은 변속기 출력속도와 입력토크에 의한 함수로 표현되지만, 실제 차량에서는 변속기 입력 토크를 계측하기 쉽지 않기 때문에 엔진 속도와 변속기 출력 속도를 측정하여 토크로 연산하여 변속맵의 제어 변수로 활용한다⁽⁹⁾.

Fig. 5는 입력되는 변수를 변속맵에 활용하는 방법을 도시적으로 나타낸 것으로 변속기의 출력 속도와 엔진 속도를 측정하여 토크컨버터의 속도비를 계산하며, 엔진 속도와 엔진맵으로부터 토크컨버터의 토크비를 계산한다. 그 결과로부터 변속기의 입력 토크를 산출하여 변속단의 변속 제어 변수로 활용하게 되며, Fig. 6과 같은 변속맵을 적용하여 변속을 수행하게 된다.

클러치 압력 프로파일은 비례 제어 밸브의 입력 전류 프로파일의 궤적에 따라 변속 시 클러치의 접촉 특성이 변하게 되며 변속 시 차량의 가가속도(Jerk)에 큰 영향을 미치게 되므로 전

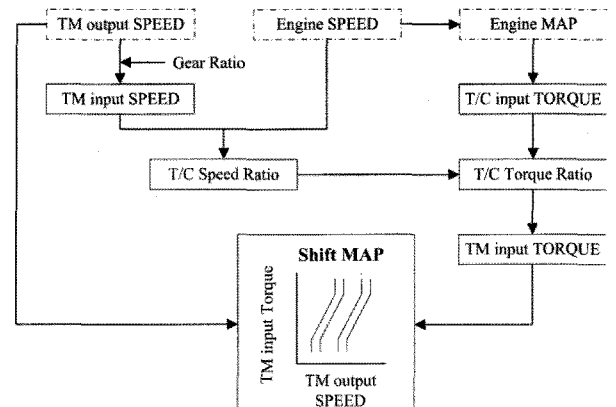


Fig. 5 Diagram to apply variables in shift map

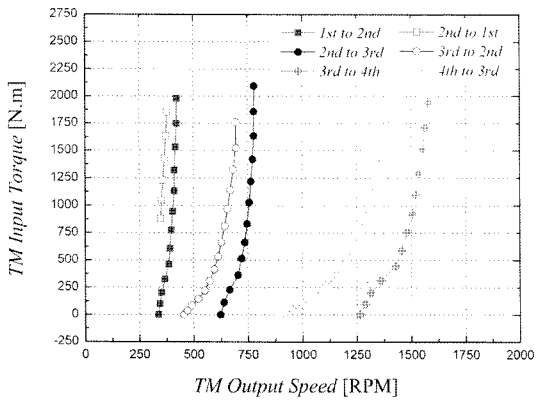


Fig. 6 Shift map

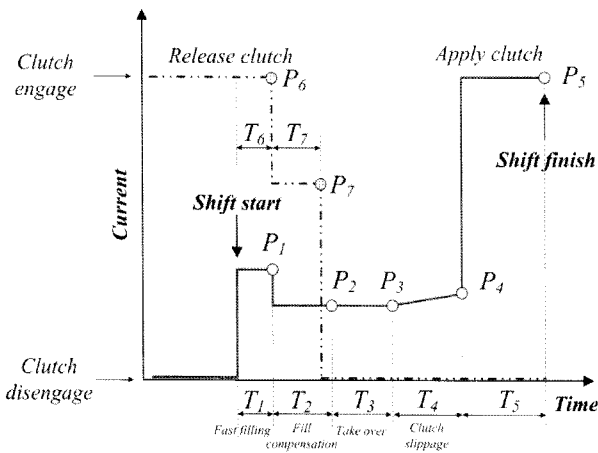


Fig. 7 Standardization of the input current profile about the apply clutch and release clutch

류 궤적의 최적화를 통해 차량의 변속감을 향상시켜야한다. 특히, 이러한 프로파일은 이론적으로 규명하기 쉽지 않고, 특성을 예측하기 어렵기 때문에 수많은 튜닝과정을 통해 실차에 적용하고 있다⁽⁴⁾.

본 연구에서도 최적의 전류 프로파일을 얻기 위해 시행착오법(The method of trial & error)을 사용하였으며, 그 궤적에 따른 특성을 분석하기 위해 Fig. 7과 같이 입력 전류 프로파일을 정형화하여 시험을 수행하였다. 입력 전류 프로파일은 접속되는 클러치에서 5개의 포인트와 해제되는 클러치에서 2개의 포인트를 선택하여 궤적을 구성하였으며, 각 포인트는 시간 간격(Time Interval)과 전류(Current)에 의해 표현된다.

4. 시험 장비 구성 및 방법

4.1 시험 장비 구성

휠더 자동변속기는 클러치팩의 접속 및 해제 여부에 의해서 변속단을 구성하며, 클러치팩의 압력 제어 특성에 따라 변속

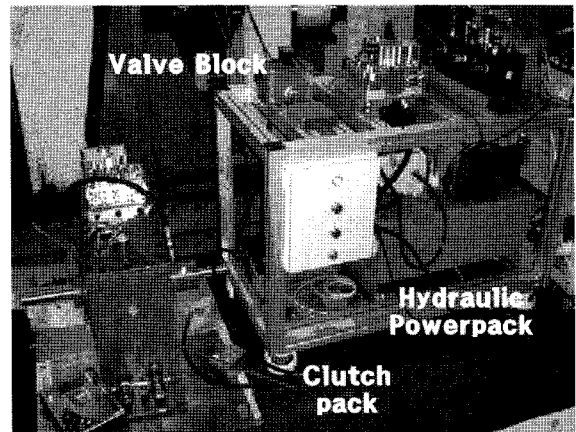


Fig. 8 Test equipment to acquisition the clutch pressure profile

특성이 달라진다. 특히, 클러치팩의 압력 프로파일(Pressure profile)에 의해서 변속 품질이 크게 좌우된다. 이러한 압력 제어 프로파일은 수학적으로 모델 구성이 쉽지 않고, 수학적으로 구성된 모델은 실제 시스템의 특성을 규명하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 클러치팩과 유압 제어 시스템에 대한 시험 장비를 구성한 후, 클러치 압력 프로파일을 시뮬레이션 모델에 적용하여 변속 특성을 분석하였다.

Fig. 8는 구성된 시험 장비를 나타내며 펌프, 탱크, 릴리프 밸브 등이 포함된 파워팩과 클러치를 제어하기 위한 비례 제어 밸브 모듈인 밸브 블록 및 클러치팩으로 구성되어 있다.

4.2 시험 방법

클러치 압력 프로파일을 얻기 위해서 Fig. 9와 같은 프로그램을 활용하였으며, 비례 제어 밸브에 전류를 인가하여 밸브를 구동시킨 후, 클러치팩에서 생성되는 압력 프로파일을 계측하여 저장하도록 구성되어 있다⁽¹⁾.

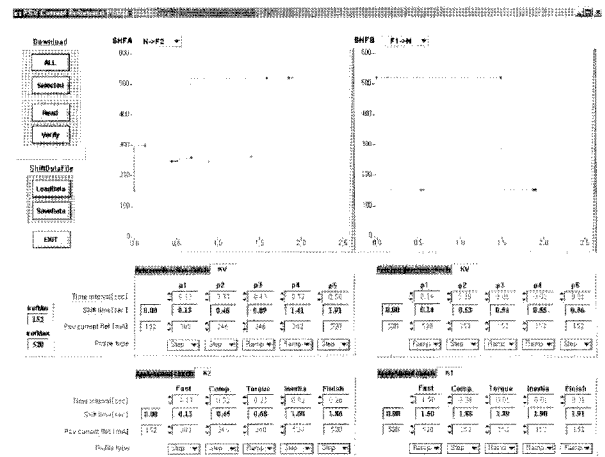


Fig. 9 Current control & data acquisition program of the clutch pack

Table 3 Input current profiles about three cases

Case	Point	Apply					Release	
		1	2	3	4	5	6	7
1	P[mA]	300	250	250	270	520	520	150
	T[sec]	0.13	0.45	0.86	1.25	1.8	0.14	0.53
2	P[mA]	250	200	200	230	520	520	150
	T[sec]	0.13	0.45	0.86	1.45	1.8	0.14	0.53
3	P[mA]	300	200	240	260	520	520	150
	T[sec]	0.13	0.45	0.86	1.45	1.8	0.14	0.53

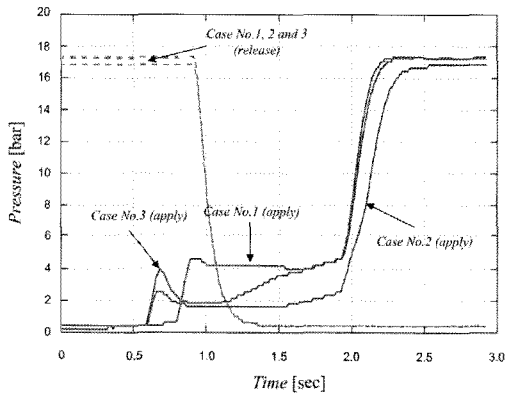


Fig. 10 Experimental results of clutch pressure profiles

5. 결과 및 고찰

5.1 시험 결과

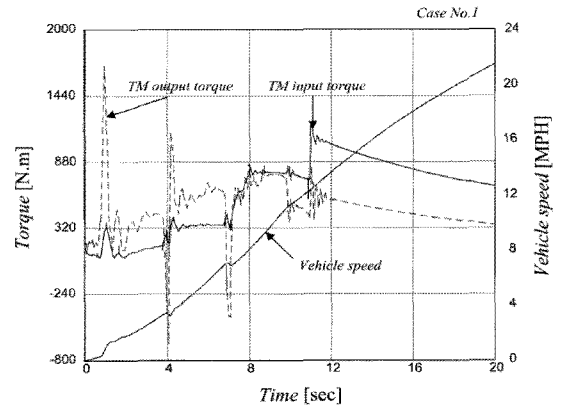
입력 전류 프로파일의 각 포인트를 변경시켜 시험을 수행한 후, 시험 결과를 시뮬레이션에 적용하여 변속 특성을 분석하였다.

Table 3은 세 경우에 대한 입력 전류 프로파일의 입력 데이터를 나타낸 것이며, Fig. 10은 Table 3의 경우에 대하여 출력되는 클러치 압력 프로파일을 나타낸 것이다. 각 시험 결과를 시뮬레이션 모델에 적용하여 자동변속기의 변속 특성을 분석하였다.

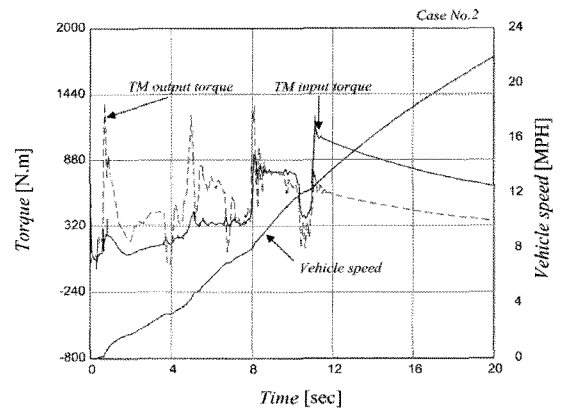
5.2 시뮬레이션 결과

세 경우의 클러치 압력 프로파일을 모델에 적용하여 자동변속기의 입, 출력 토크와 휠로더의 차속 및 차량의 가속도를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

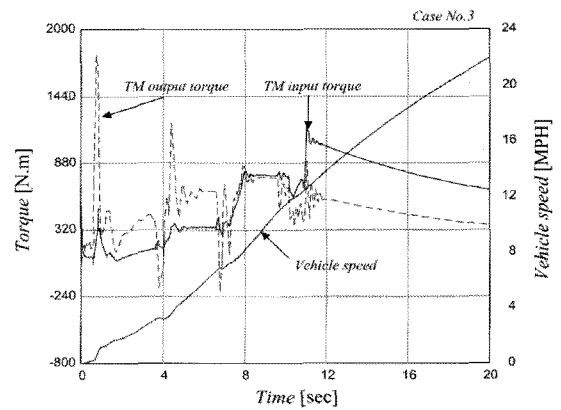
Case 1의 경우, 변속 시점에서 변속기의 입력 및 출력 토크의 변화가 상대적으로 큰 것을 확인 할 수 있으며, 차량이 2단 변속 시에 가속도가 최대 18.21m/s^3 까지 상승되는 것을 알 수 있다. 이것은 Fast filling과 Fill compensation의 압력이 과도하게 큰 것으로 판단할 수 있다. Case 2의 경우, 변속 시 차량의 최대 가속도는 13.98m/s^3 로 Case 1에 비해 감소하였으나,



(a) Case No. 1



(b) Case No. 2



(c) Case No.3

Fig. 11 Simulated results of the vehicle speed and the transmission input/output torque applied the clutch pressure profile

차속이 매끄럽지 못한 것을 확인 할 수 있는데, 이것은 Case 1에 비해 클러치 압력을 낮게 설정하여 Fast filling과 Clutch slippage 과정 동안에 충분한 동력 전달이 이뤄지지 않은 결과로 판단된다. Case 3의 경우, 최대 가속도는 14.54m/s^3 로 Case 2에 비해 크지만 2, 3, 4단의 변속 시에는 약 7m/s^3 로 가장 작은 값을 나타내었으며, 차속 역시 Case 1과 Case 2에 비해 상대적으로 완만한 것을 확인 할 수 있다. 이상의 결과를 통해서 클러치 제어 프로파일의 Fast filling과 Fill compensation

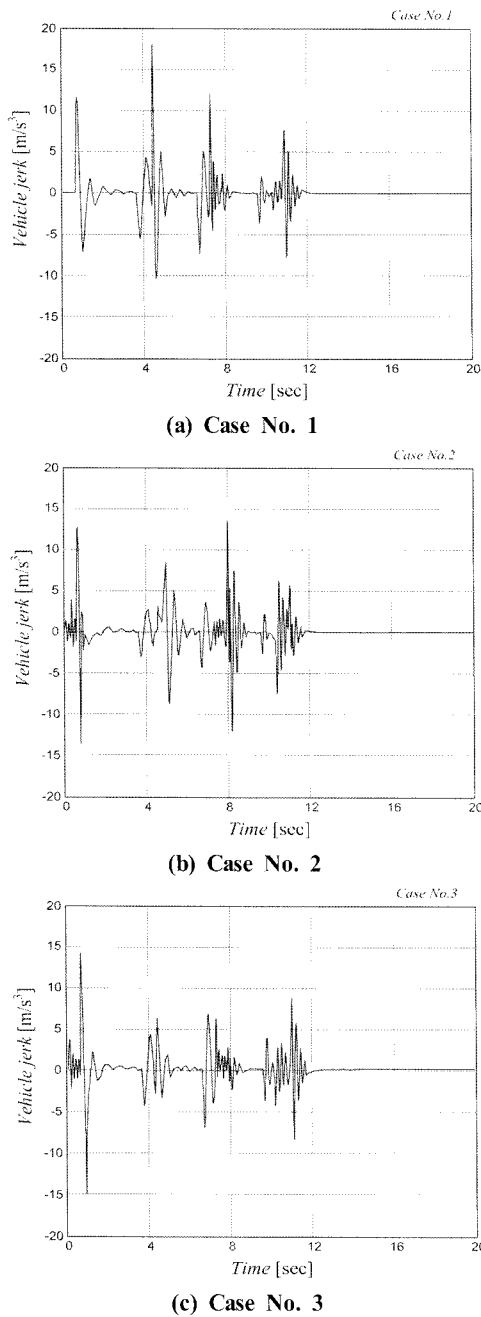


Fig. 12 Simulated results of the jerk

의 압력이 변속 충격에 민감한 파라미터임을 알 수 있으며, 변속 과정 동안에 충분한 동력 전달을 위하여 Clutch slippage의 프로파일 크기를 조절하여야 함을 결과를 통해 알 수 있다.

6. 결론

휠로더의 동력전달계와 변속 제어 알고리즘을 개발하고, 클러치 압력 프로파일을 차량 해석에 적용함으로써 실차 특성을 적용한 동적 모델을 제시하였으며, 본 연구를 통한 결론을 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- (1) 휠로더의 차량 모델과 자동변속기, 변속 제어 알고리즘 해석을 위한 동적 모델을 제시하였다.
- (2) 클러치에 작용하는 압력 프로파일을 변경시킴으로써 차량의 변속 성능이 변화하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.
- (3) 클러치압력 프로파일을 실차에 적용하기 이전에 시뮬레이션 모델을 통하여 변속 성능을 예측할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Jung, G. H., Shin, S. H., Lee, S. I., and Kim, H. J., 2006, "A Development of TCU Analyzer for Wheel Loader Automatic Transmission," *Proc. of KSAE Autumn Conference*, pp. 1405 ~ 1410.
- (2) Yun, U. K., 2008, *Analysis of the Wheel Loader Powertrain System Applied by Shift Control Algorithm*, A Thesis for a Degree of Master, Hanyang University, Republic of Korea.
- (3) Oh, J. Y., and Song, C. S., 2009, "Development of Automatic Transmission Model of Wheel-loader for Hardware in the Loop Simulation," *Journal of The Research Institute of Industrial Sciences*, Vol. 58, No. 1, pp. 59 ~ 65.
- (4) Hyundai-motor, 1995, *Design Theory of Automatic Transmission*, Hyundai-motor Press.
- (5) Oh, J. Y., Lee, G. H., and Song, C. S., 2009, "The Hydraulic System Modeling and Analysis of the Clutch Direct Control of an Automatic Transmission for a Forklift Truck," *KSPE*, Vol. 26, No. 1, pp. 112 ~ 119.
- (6) Kwon, S. K., Choi, S. Y., Kwon, G. R., and Han, S. W., 2009, "Shifting Control Method for Automatic Transmission of PSD-Axle Forklift", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 6, pp. 565 ~ 575.
- (7) Kim, D. G., Park, H., and Kang, S. I., 2004, "A Study on the Shifting Shock of the Automatic Transmission in Tracked Vehicles," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 100 ~ 106.
- (8) MSC. Easy5, 2002, *Ricardo Powertrain Library User Guide*, MSC.software.
- (9) Yun, U. K., Lee, G. H., Lee, J. H., Jung, G. H., and Song, C. S., 2007, "The Shift Control Algorithm Modeling and Analysis of Automatic Transmission for Wheel Loader," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 131 ~ 132.