

• 특집 • 고정밀 기어의 설계 및 제조기술

## 트랙터용 차동 잠금 장치의 설계 변수 영향에 관한 연구

# Influence of Design Parameters of Differential Locking Device for Tractors

오주영<sup>1,#</sup>, 김건우<sup>1</sup>, 조정우<sup>1</sup>, 이기훈<sup>2</sup>, 정영식<sup>2</sup>  
Joo Young Oh<sup>1,#</sup>, Kun Woo Kim<sup>1</sup>, Jung Woo Cho<sup>1</sup>, Ki Hun Lee<sup>2</sup>, and Yeong Sik Jeong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 건설기계부품그룹 (Construction Equipment R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

<sup>2</sup> 세일공업(주) 기술연구소 (Technical Laboratory, Seil Industrial Co., Ltd.)

# Corresponding Author / E-mail: jyoh@kitech.re.kr, TEL: +82-53-580-0383, FAX: +82-53-580-0310

KEYWORDS: Differential locking device (차동 잠금 장치), Tractor (트랙터), Design parameter (설계 변수), Front axle (전차축), Dog clutch (도그 클러치)

*A differential is a mechanical device that supports smooth driving, by allowing each of the two wheels, to rotate at differential speeds during a turn. This is particularly crucial for tractors, as they mainly work on the ground, often becoming stuck off-highway, or falling into pits. When the tractor wheel is stuck off-highway, it is difficult to get the wheel out, as the differential of the tractor reduces friction between the wheel and the ground surface. In order to prevent this wheel slip situation, the differential locking device, which restricts the two wheels on the axle to the same rotational speed, has been used in the axle of the tractor. In this study, analysis models of the hydraulic system and the dog clutch were developed to predict the performance of the differential locking device. Using the LMS imagine. AMEsim software, the analysis models were verified by comparing the simulation results with the experimental data. Using the models developed, the influence of the release time of the differential locking device on selected design parameters was analyzed, to determine the effect on the release time of the differential locking device. As a result, design values that will improve the performance of the differential locking device were derived.*

Manuscript received: February 23, 2017 / Revised: March 21, 2017 / Accepted: March 25, 2017

### NOMENCLATURE

$\rho$  = Density of oil

$\mu_o$  = Coulomb friction coefficient

$A_p$  = Area of the hydraulic piston

$a_p$  = Orifice size

$C_o$  = Function of the cross sectional O-Ring diameter

$C_q$  = Flow coefficient

$f_0$  = Friction force

$K_o$  = Function of the O-Ring shore A hardness

$k_p$  = Return spring coefficient

$m_e$  = Equivalent mass of the fork and hydraulic piston

$m_f$  = Mass of the fork with a shift dog clutch

$m_p$  = Mass of the hydraulic piston

$P_m$  = Inlet pressure of orifice

$P_p$  = Pressure in the hydraulic piston

$Q_p$  = Flow rate into the hydraulic piston

$S$  = O-Ring compression

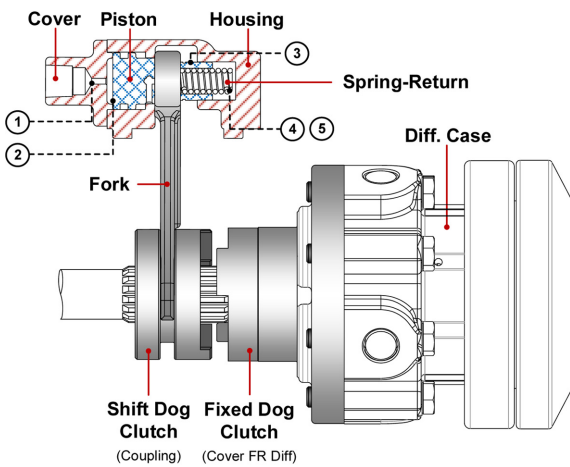
$T_r$  = Release time of the hydraulic piston

$x_0$  = Initial position of the hydraulic piston

$x_p$  = Stroke of the hydraulic piston



(a) Photo of a differential locking device



(b) Designation of a differential locking device

Fig. 1 Configuration of a differential locking device

1. 서론

차동 장치(Differential Device)는 선회 시에 노면의 저항으로 좌우 휠에 회전 속도 차를 발생시켜 차량이 원활하게 선회 할 수 있도록 하는 구동 장치의 일종이다. 그러나 노지 작업이 많은 트랙터와 같은 농기계는 험로나 구덩이에 빠지는 경우가 빈번히 발생되는데, 이러한 차동 기능으로 인해 해당 바퀴가 지면과의 마찰력이 현저히 저하되어 헛돌게 되어 험로의 탈출을 어렵게 만드는 원인이 된다.<sup>1</sup>

이러한 문제점을 보완하기 위해서 일반적으로 트랙터의 액슬 내부에는 험로나 구덩이의 탈출이 용이하도록 차축을 동일한 회전속도로 구동하여 차동 기능을 억제하는 차동 잠금 장치(Differential Locking Device)가 장착되어 있다.<sup>2,3</sup> 차동 잠금 장치는 주로 후차 축에 적용되어 있으나 차동 잠금 기능의 향상과 트랙터의 고급화를 위해서 전차 축에도 적용되고 있는 추세이다.

이러한 차동 잠금 장치는 운전자의 요구에 따라 차동 잠금 기능의 동작과 해제가 짧은 시간 안에 수행되어야 하므로 각 설계 변수에 대한 영향이 차동 잠금 장치의 해제 시간에 종속되어 설계 시에 반영되어야 한다.

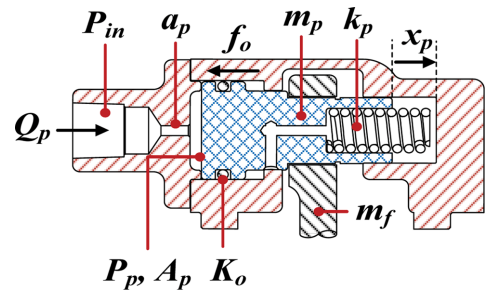


Fig. 2 Cross section of a hydraulic piston

본 연구에서는 트랙터용 차동 잠금 장치의 유압 시스템에 대한 해석 모델을 개발하고 차동 잠금 장치의 시험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

또한 트랙터용 차동 잠금 장치의 잠금 기능을 향상시키기 위해서 설계 변수를 결정하고 검증된 해석 모델을 이용하여 설계 변수에 대한 차동 잠금 장치의 해제 시간으로 정량화 하여 차동 잠금 장치의 성능을 분석하였다.

2. 차동 잠금 장치의 구조

차동 잠금 장치는 Fig. 1(a)와 같은 구조로 트랙터 차축 내부에 장착되어 차동 장치와 연결되며 Fig. 1(b)와 같이 도그 클러치(Dog Clutches), 포크(Fork), 유압 피스톤(Hydraulic Piston) 및 리턴 스프링(Return-Spring)으로 구성된다.

차동 기능을 구속하기 위한 차동 잠금 장치의 작동은 운전자에 의해 작동 스위치가 구동되면, 솔레노이드 밸브(Solenoid Valve)가 동작하여 릴리프 밸브의 설정압(20 bar) 까지 유압 피스톤 내부의 압력을 상승시켜 도그 클러치를 이동 시킨다.

이 때, 유압 피스톤 내부에 압력이 형성되면 스프링의 예압(Pre-Load)을 극복하여 피스톤과 연결된 포크가 이동하게 되며, 포크에 연결된 시프트 도그 클러치(Shifting Dog Clutch)가 고정 도그 클러치(Fixed Dog Clutch)에 체결되어 차동 기능이 억제된다.

이와는 반대로 유압 피스톤의 압력을 해제하게 되면 리턴 스프링의 복원력에 의해 유압 피스톤이 원위치로 복귀하여 도그 클러치가 해제됨으로써 차동 기능이 회복 된다.

3. 차동 잠금 장치의 유압 시스템 모델 개발

3.1 수치 모델

차동 잠금 장치를 구동하기 위한 유압 피스톤의 운동방식과 유량방정식을 다음과 같이 정리할 수 있으며, 모델의 단순화를 위해서 유압 피스톤( $m_p$ )과 시프트 도그 클러치가 연결된 포크( $m_f$ )는 일체로 등가 질량으로 고려하였다.

$$m_c \ddot{x}_p + k_p (x_p + x_o) = P_p \cdot A_p + f_o \tag{1}$$

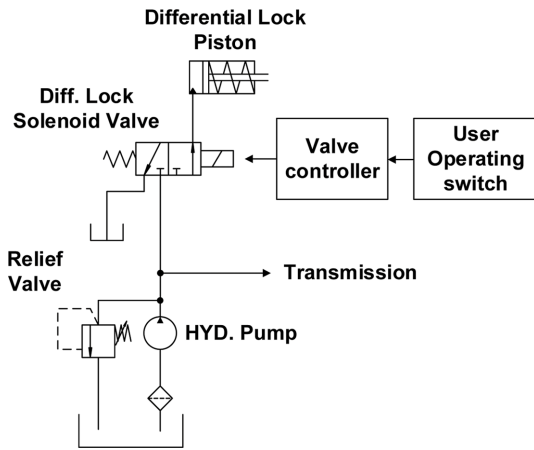


Fig. 3 Hydraulic circuit of a locking differential device

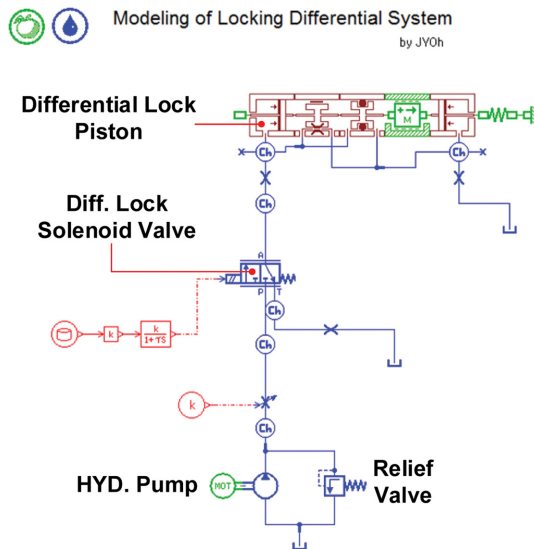


Fig. 4 Analytical model of a differential locking device using LMS. AMESim

$$Q_p = C_q a_p \cdot \sqrt{\frac{2|P_p - P_{in}|}{\rho}} \quad (2)$$

또한, O-Ring에 의한 마찰 특성이 고려되도록 식(3)과 같이 Martini's Friction Model의 동마찰 특성을 적용하여 해석을 수행하였다.

$$f_o = \mu_o \cdot K_o \cdot e^{C_o S} \quad (3)$$

이와 같은 유량방정식과 마찰 모델 수식을 이용하여 유압 피스톤에 작용하는 식(1)의 운동방정식을 정리하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_e \ddot{x}_p + k_p (x_p + x_o) = \left[ \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_p}{C_q \cdot a_p} \right)^2 + P_{in} \right] \cdot A_p + \mu_o \cdot K_o \cdot e^{C_o S} \quad (4)$$

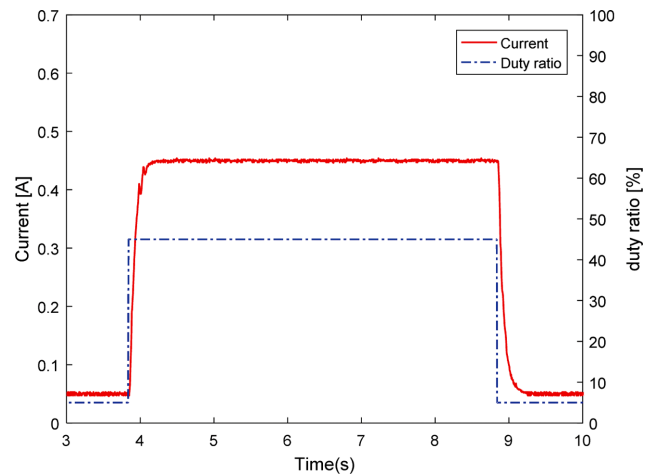


Fig. 5 Current and pulse width modulation to control the proportional control valve

Table 1 Design parameters of a differential locking device

Parameters	-20%	Baseline	20%
Orifice size (mm)	1	3	5
Piston dia. (mm)	20	30	40
Piston stroke (mm)	3	5	7
Spring pre-load (N)	210	290	370
Spring coefficient (N/mm)	27.29	47.29	67.29

### 3.2 해석 모델

차동 잠금 장치를 구동하기 위한 Fig. 3의 유압 회로와 해석 이론을 토대로 Fig. 4와 같이 LMS. AMESim을 이용하여 수치 해석 모델을 구성하였다. 솔레노이드 밸브는 유압 피스톤 내부의 압력 특성을 분석하기 위해서 차량에 일반적으로 적용되는 On/Off 솔레노이드 밸브 대신에 Hydraforce사의 비례 압력 제어 밸브 (TS98-T34)의 사양을 적용하였다.

해석 조건은 유압 펌프가 1,000 rpm의 일정한 회전 속도에서 일정한 토출 유량으로 공급되도록 구성하였으며, 솔레노이드 밸브의 동작 신호를 45%(450 mA) 인가하여 공급된 오일이 유압 피스톤으로 유입되어 피스톤이 동작하도록 구성하였다.

솔레노이드 밸브의 동작 신호를 45%로 선정한 것은 유압 피스톤의 동작 압력이 20 bar이나 유압 펌프에서 공급되는 최대 압력은 30 bar 이므로 공급 압력을 제어하기 위해 선정하였다.

Fig. 5는 솔레노이드 밸브의 제어 전류 시험 결과를 나타낸 것으로 해석 모델의 입력 신호로 적용하여 해석을 수행하였다.

### 4. 차동 잠금 장치의 설계 변수 선정

차동 잠금 장치의 접속과 해제 기능에 영향을 미치는 주요한 설계 변수는 유압 시스템에서 결정되며, 이러한 유압 시스템의 설계 변수는 Fig. 1에 표시한 것과 같이 ①유압 피스톤의 오리피스

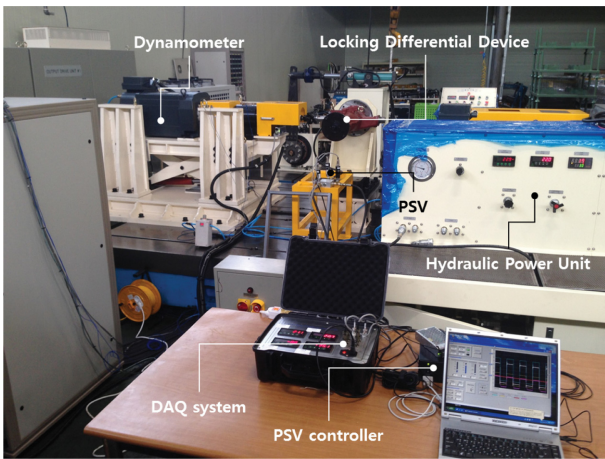


Fig. 6 Test equipment of a differential locking device

크기, ②유압 피스톤의 지름, ③유압 피스톤의 행정거리, ④리턴 스프링의 예압력과 ⑤스프링 상수로 선정하였다.<sup>5,6</sup>

각 변수의 선정은 식(1)과 식(2)의 운동방정식과 유량방정식을 통해서 결정하였으며, 설계 변수에 대한 영향을 분석하기 위해서 Table 1과 같이 상, 하위 20% 값을 기준으로 선정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 해석 모델의 타당성 검증

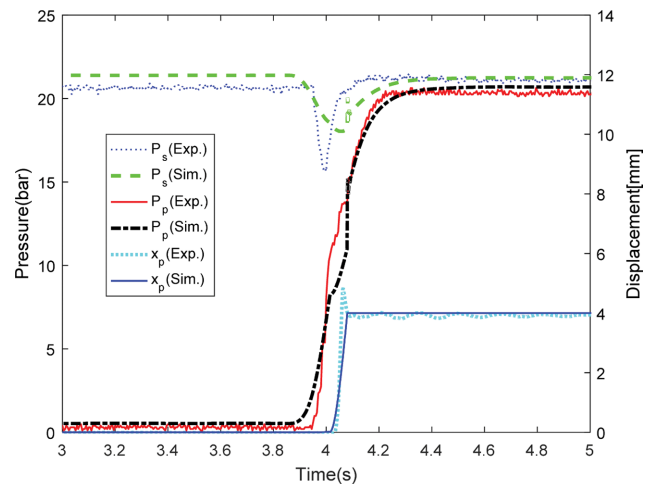
개발된 해석 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 6과 같이 시험 장치를 구성하였다. 솔레노이드 밸브를 중심으로 펌프에서 공급되는 압력( $P_s$ )과 유압 피스톤의 압력( $P_p$ )을 시험결과와 해석 결과를 Fig. 7과 같이 비교하였으며, 해석 결과가 시험 결과에 추종하는 것을 알 수 있다. 다만, 공급 압력이 피스톤이 이동하면서 크게 감소하는데 이는 피스톤의 체적이 순간적으로 커지면서 유량이 충분히 공급되지 못하여 발생하는 현상으로 판단 할 수 있다.

또한, 유압 피스톤의 변위( $x_p$ )를 간접적으로 측정하기 위해서 포크에 연결된 도그 클러치의 변위를 고속 카메라로 측정하여 해석 모델과 비교하였으며, 해석 모델의 유압 피스톤의 변위가 시험 결과에 추종하는 것을 알 수 있다. 그러나 시험 결과의 초기 변위에서 오버 슈트가 발생하는데, 이는 도그 클러치의 결합으로 인한 충격으로 발생하는 현상으로 볼 수 있다.

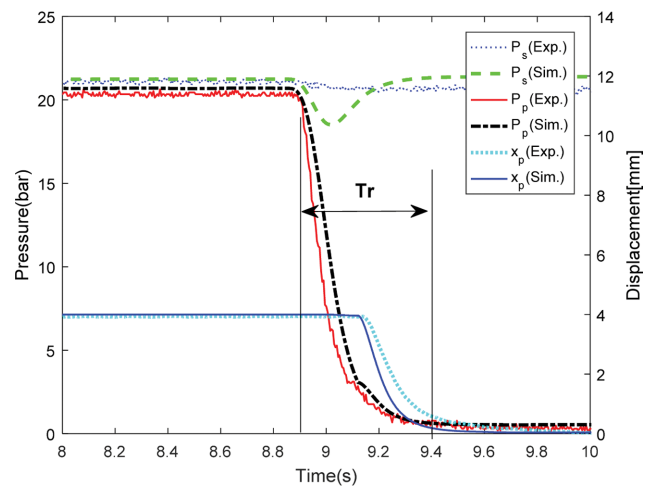
5.2 설계 변수의 영향성 분석

Fig. 8은 기존 차동 잠금 장치의 설계 변수를 기준으로 선정된 설계 변수에 대한 영향성을 차동 잠금 장치의 해제 시간( $T_r$ )을 정형화하여 나타낸 것이다.

해제 시간은 포크에 연결된 도그 클러치의 해제 반응 시간을 의미하며 차동 잠금 장치를 신속히 해제하여 작업자가 원활한 운전을 수행 할 수 있도록 해제 시간을 줄이기 위해 설계 변수의 영향성을 분석하였다.



(a) Engaging the hydraulic piston



(b) Release the hydraulic piston

Fig. 7 Comparison between experimental results and simulated results of supply pressure ( $P_s$ ), hydraulic piston's pressure ( $P_p$ ), displacement ( $x_p$ )

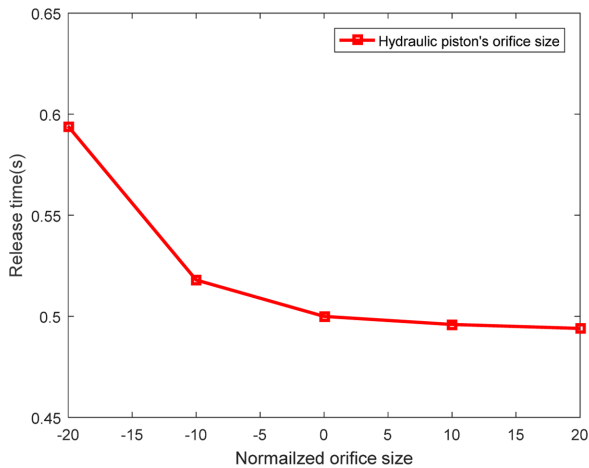
설계된 유압 피스톤의 해제 시간은 0.5 sec으로 시험 결과로부터 도출되어 이를 기준으로 설계 변수에 대한 영향을 분석하였다.

유압 피스톤 입구의 오리피스 크기는 피스톤 내부의 압력에 영향을 미치며, 크기가 2 mm 이하이면 압력 형성 시간이 지연됨에 따라 차동 잠금 장치의 해제 시간이 길어지기 때문에 2 - 3 mm로 선정하는 것이 타당하다.

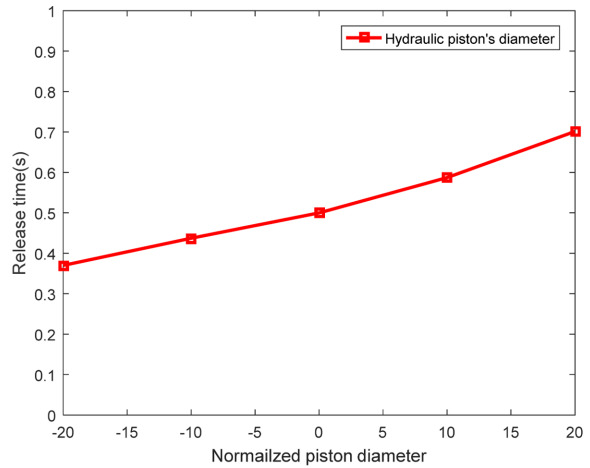
유압 피스톤의 지름은 크기에 선형적으로 변하여 크기가 작을수록 해제 시간이 짧아지는 장점이 있으나, 유압 피스톤의 작용력이 작아지므로 25 - 30 mm로 선정하는 것이 적합하다.

유압 피스톤의 행정 거리는 4 mm 이하로 선정하는 것이 차동 잠금 장치의 해제 시간을 줄일 수 있지만 도그 클러치의 특성 상 5 mm로 선정하여도 해제시간에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

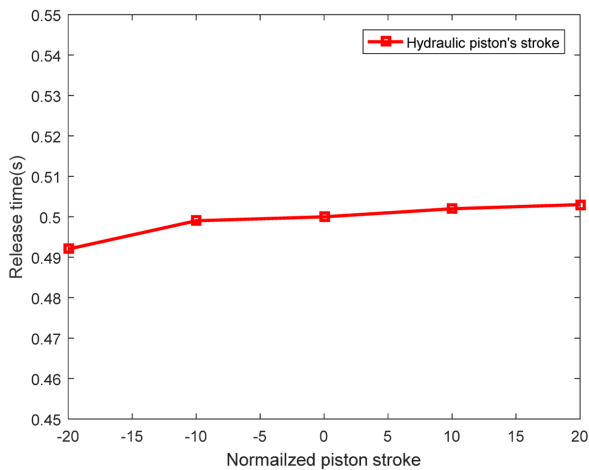
리턴 스프링의 예압과 상수에 대한 영향은 예압과 상수가 클수록 해제 시간이 단축되는 장점이 있으며, 예압의 크기가 스프링 상수보다 해제시간을 더 크게 하는 장점이 있다.



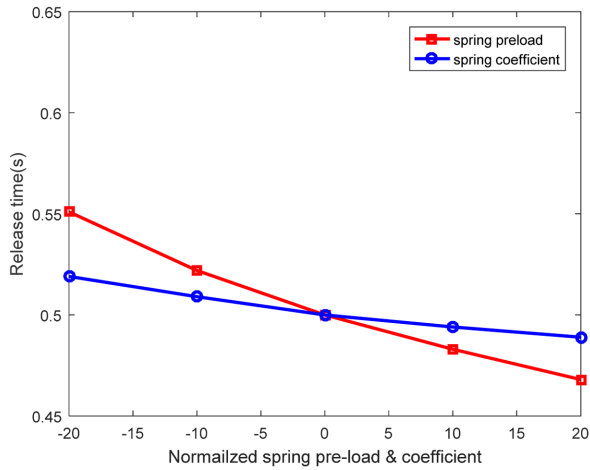
(a) Influence of the orifice size of hydraulic piston



(b) Influence of the hydraulic piston's diameter



(c) Influence of the hydraulic piston's stroke



(d) Influence of the spring pre-load and coefficient

Fig. 8 Variations of a differential locking device's design parameters

6. 결론

본 연구에서는 차동 잠금 장치의 동작 원리와 차동 기능을 억제하도록 구동하는 유압 시스템의 해석 모델을 LMS. AMESim을 통해 개발하고 그 결과를 시험 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 검증하였다.

또한, 차동 잠금 장치의 설계 변수에 대한 영향을 오리피스 크기, 유압 피스톤의 지름, 피스톤의 행정 거리, 리턴 스프링의 예압과 상수로 선정하여 차동 잠금 장치의 해제 시간에 대한 영향을 분석하였다.

차동 잠금 장치의 해제 시간을 줄이기 위해서는 오리피스 크기를 2 mm 이상으로 선정하고, 유압 피스톤의 지름을 30 mm 이하로 설계하여야 한다. 또한, 리턴 스프링의 예압과 상수를 크게 하면 해제 시간을 줄일 수 있으나 유압 피스톤의 행정 거리는 크게 영향이 없는 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “2017년 중소, 중견기업 타킷형 육성 생산기술 개발 사업(1/3) (KITECH JG-17-0010)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

- Oh, J. Y., Kim, K. W., Cho, J. W., Lee, K. H., Jeong, Y. S., et al., “Development of Analytical Model of Locking Differential Device's Hydraulic System for Tractors,” Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference, pp. 155-156, 2016.
- Lee, D. H., Kwon, I. H., Moon, C. W., Park, J. H., and Lee, S. Y., “Safety Steering System of Power Tiller Applying Differential

- Lock,” Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, p. 167, 2015.
3. Pyoun, Y. S., Park, J. H., Kim, H. T., Lee, Y. C., Kim, H., et al., “A LSD Design Utilizing CAE Tools,” Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp. 168-174, 2005.
  4. Cho, J. U. and Han, M. S., “Structural Analysis on the System of Differential Gear,” Journal of the Korean Society Machine Tool Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 279-284, 2009.
  5. Oh, J. Y., Kim, K. W., Park, J. Y., Cho, J. W., Kim, K. H., et al., “Influence of Design Parameters of Locking Differential Device for Tractors,” Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 573-574, 2016.
  6. Duquesne, F., Kermis, L., and Verschoore, R., “Influence of Differential Locking on Tractor Work Rate: Part 1, Simulation of a Single Axle Vehicle,” Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 60, No. 3, pp. 201-209, 1995.