

상용차량용 리타더의 제동 토크 제어 로직에 대한 연구

손 혁 수¹⁾ · 남 유 준¹⁾ · 임 원 식^{*2)}

서울과학기술대학교 자동차공학과¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계자동차공학과²⁾

A Study on the Braking Torque Control Logic of Hydraulic Retarder Equipped to Commercial Vehicles

Hyuksu Son¹⁾ · Yujun Nam¹⁾ · Wonsik Lim^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

²⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

(Received 11 September 2023 / Revised 14 September 2023 / Accepted 14 September 2023)

Abstract : Heavy-duty vehicles have a large mass and a large payload, and high braking power is generated when using only mechanical brakes. As a result, phenomena such as fade and vapor lock occur, leading to the risk of loss of braking power. Therefore, an auxiliary brake system is installed in addition to the main brake. In this study, a mathematical performance model and a braking control logic for a hydraulic retarder, which is an auxiliary braking device mounted on the transmission output shaft, were developed. Moreover, a simulator for the vehicle braking system was developed to analyze braking control performance on actual roads, while the reliability of the control logic was verified through a comparative analysis of the test data.

Key words : Retarder(보조 제동장치), Braking torque control logic(제동 토크 제어 로직), Heavy-duty vehicle(중부하 차량), Hydraulic brake(유체 브레이크), Braking performance(제동성능)

1. 서 론

중부하 차량은 차량 질량도 무겁고, 적재량도 크기 때문에, 기계식 브레이크만으로 제동할 때에는 높은 제동 파워로 인한 발열 때문에 Fade, Vapor lock과 같은 현상이 발생하며 제동력을 상실하는 위험을 초래한다.^{1,2)} 최근 중부하 차량의 적재량 초과와 제동 성능 불량 문제로 인한 교통사고가 빈번히 발생하여 중부하 차량의 제동 안정성 문제가 큰 관심을 받고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 차량 제조사 측은 배기 브레이크, 리타더 등의 보조 브레이크 시스템들을 추가 장착하여 제동 안정성을 확보하고자 노력하고 있다.³⁾ 이들 보조 브레이크 시스템들은 메인 브레이크 시스템과의 협조 제어를 통해 차량 제동력을 증가시키기도 하고, 독립적으로 작동하며 제동 제어를 통해 차량의 등속 주행을 가능하게 하기도 한다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 변속기 출력축에 장착되어 보조 제동 역할을 하는 유체식 리타더의 수학적 성능 모델을 개발하고 이를 이용한 제동 토크맵과 리타더 제

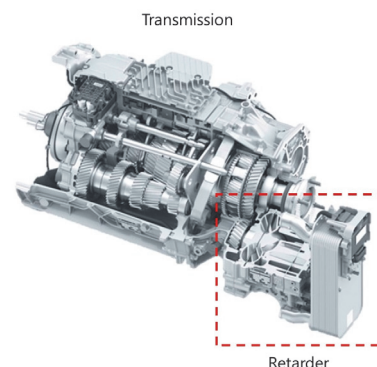


Fig. 1 A cut-a-view view of the transmission with retarder

*Corresponding author, E-mail: limws@seoultech.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

어 로직을 개발한다. 또한 MATLAB/Simulink를 이용하여 차량 제동시스템에 대한 차량 시뮬레이터를 개발하여 실도로 제동 제어 성능을 분석하고, 시험 데이터와의 비교 분석을 통하여 제어 로직의 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 리타더 성능 모델링

Fig. 1에 보인 바 있는 리타더는, Fig. 2와 같이 회전 요소인 로터와 고정 요소인 스테이터로 구성된다. 리타더 내부 유체는 로터가 회전하며 발생하는 원심력에 의해 흐름 반경이 증가하면서 반 시계 방향으로 회전 유동(Torus flow)이 발생되는데, 이로 인해 내부 유체는 로터 출구에서 스테이터로 유입된다. 이때 고정된 스테이터 내부에서 발생하는 유체 저항 토크가 변속기 출력축으로 전달되어 차량의 제동력을 발생시킨다.

Fig. 2와 같이, 리타더 내부의 토러스 외측 유동은 고정된 셸에 의해 구속되지만, 내측 유동은 기계적인 구속이 없으므로 내부 공기와 자유표면을 형성하게 된다. 본 연구에서는 이러한 자유표면을 코어로 정의하기로 한다.¹⁾

본 연구 대상 리타더의 기하학적 성능 모델링을 위해 Fig. 3의 3D 형상 데이터를 이용하여 로터와 스테이터의 깃과 셸 접합부 데이터를 추출하였고, 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

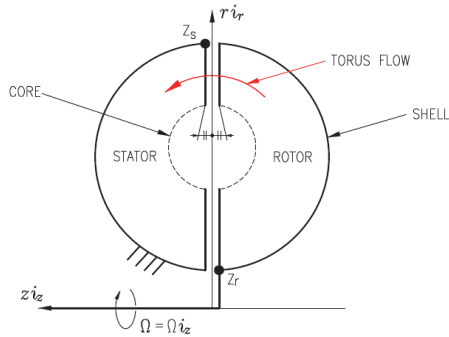


Fig. 2 Retarder system of a torus section¹⁾

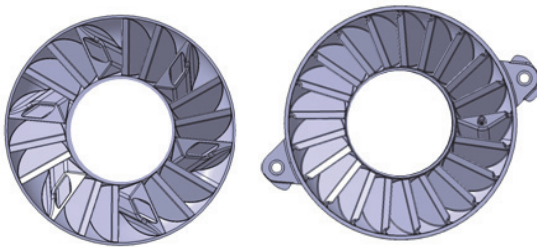


Fig. 3 Three dimensional model of the retarder

본 연구에서는 리타더 내부 유체 충전율을 7개로 나누어 고려하기로 하고, 각각의 충전율에 따른 코어 윤곽선들을 정의하고자 한다. Fig. 2에 나타난 코어 윤곽선의 내부 중심점은 리타더 내부 유체 충전율과 회전 속도 등에 의해 변화하기 때문에 식 (1)과 같이 가중치 Φ_{weight} 를 이용하여 변화 가능한 내부 유동 중심점을 정의한다. 이때, 코어 중심점의 반경값 $r_{circulation}$ 과 코어 윤곽선들의 좌표값 (z_{core}, r_{core})은 식 (2)와 식 (3)과 같이 결정된다.

$$r_{circulation} = \left(\frac{r_{max} + r_{min}}{2} \right) + \left(\frac{r_{max} - r_{min}}{2} \right) \Phi_{weight} \quad (1)$$

$$r_{core} = r_{circulation} + \frac{i_{core}(r_{shell} - r_{circulation})}{1 + n_{core}} \quad (2)$$

$$z_{core} = \frac{i_{core} z_{shell}}{1 + n_{core}} \quad (i_{core} = 1 \sim n_{core}) \quad (3)$$

식 (1)~(3)을 이용하여 결정한 코어 윤곽선들을 도시

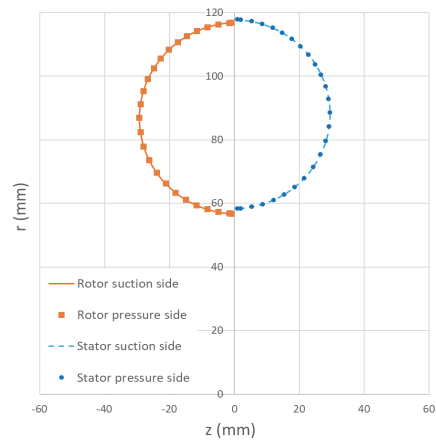


Fig. 4 Contour data of retarder blades

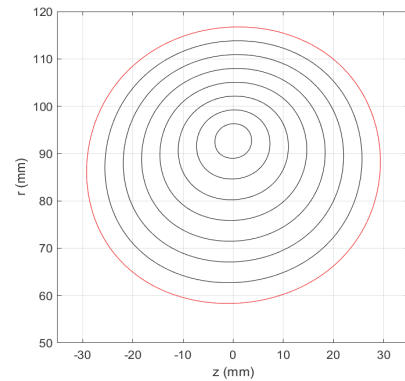


Fig. 5 Contours of the multi-core

하면 Fig. 5와 같다.

다음으로 Fig. 5에서 정의된 쉘과 코어 윤곽선을 이용하여 유동 단면적을 정의한다. 먼저, 토리스 단면상에서 쉘과 코어 윤곽선을 균일하게 등분하는 j 번째 점을 $P_{s,j}(z_{s,j}, r_{s,j})$ 와 $P_{c,j}(z_{c,j}, r_{c,j})$ 라고 할 때, 이 두 점을 잇는 선을 요소선이라고 정의한다. 이때 선정된 요소선을 수직으로 흐르는 유동의 이상적인 단면적 값은 다음과 같이 결정된다.

$$A_{F,ideal,j} = \pi (r_{s,j} + r_{c,j}) \sqrt{(r_{s,j} - r_{c,j})^2 + (z_{s,j} - z_{c,j})^2} \quad (4)$$

식 (4)로 정의되는 유동 단면적 $A_{F,ideal,j}$ 에 갓 두께에 의한 유동 단면적 감소량 $A_{blade,j}$ 를 적용하여, 유효 유동 단면적을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_{F,effective,inlet} = A_{F,ideal,1} - A_{blade,1} \quad (5)$$

$$A_{F,effective,outlet} = A_{F,ideal,n} - A_{blade,n} \quad (6)$$

Fig. 6의 형상 데이터 분석 결과를 이용하여, 리타더의 제동 토크 성능 모델을 개발하였다. 리타더 내부의 순환 유량은 식 (7)과 같이 정의할 수 있고, 로터의 구동 토크(T_{rotor})와 스테이터의 부하 토크(T_{stator})는 유동 단면을 통해 전달되는 단위 질량당 각운동량(h)과 유체 밀도(ρ_{oil}) 등에 의해 식 (8)과 같이 결정된다.

$$\begin{cases} Q_{oil} = \frac{1}{2} [Q_{oil,rotor,out} + Q_{oil,stator,out}] \geq 0 \\ Q_{oil,rotor,out} = Q_{oil,stator,in}, Q_{oil,stator,out} = Q_{oil,rotor,in} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_{rotor} = \rho_{oil} Q_{oil} (h_{rotor,out} - h_{rotor,in}) \\ -T_{stator} = \rho_{oil} Q_{oil} (h_{stator,out} - h_{stator,in}) \\ \therefore T_{rotor} = T_{stator} \end{cases} \quad (8)$$

또한, 리타더의 동력 손실(P_{loss})는 유체 마찰에 의한 동력 손실(p_{fl})과 유체 유동 충격에 의한 충격 손실(p_{sl})로 표현되며 다음과 같이 결정된다.

$$P_{loss} = Q(p_{fl} + p_{sl}) \quad (9)$$

Fig. 6에 보인 바 있는 각 코어별 입출구에서의 유효 유동 단면적 $A_{F,effective}$ 과 식 (7) ~ (9)에 의해 정의된 성능 변수들을 이용하면, Fig. 7과 같이 로터 회전속도와 리타더 내부 유체 충전율에 따라 변화하는 리타더 제동 토크 맵을 구할 수 있다.

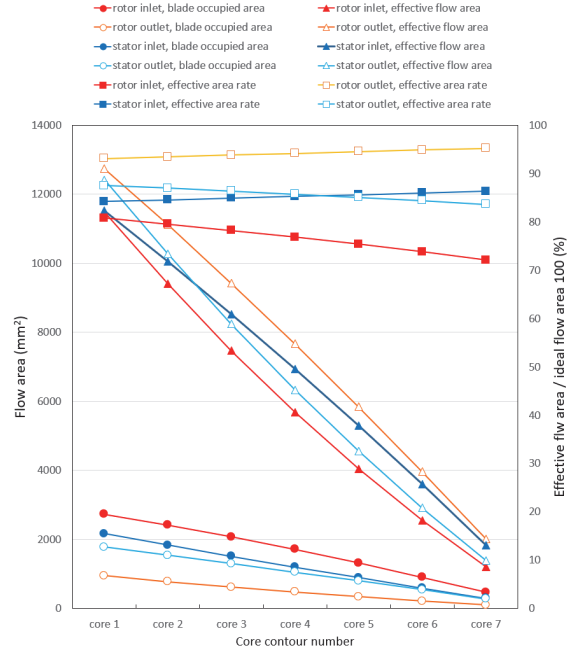


Fig. 6 Variation of $A_{F,ideal}$, $A_{F,effective}$ with various cores

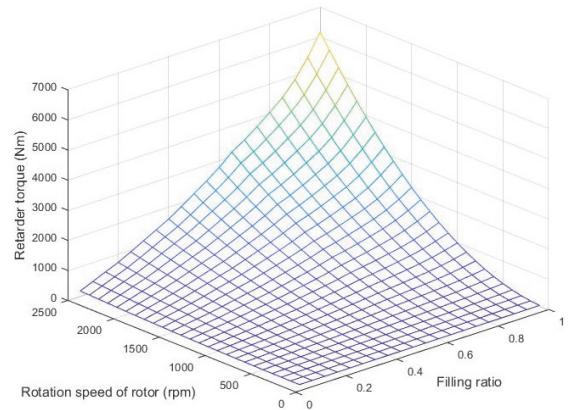


Fig. 7 Brake torque map of retarder¹⁾

3. 차량 시스템 및 성능 모델링

리타더의 제동성능 시뮬레이션을 진행하기 위해 연구 대상 차량을 선정하였고, 차량의 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Major specification of vehicle

Contents	Value	Unit
Drive type	Engine	-
Engine Max. power	554.1	HP
Engine Max. torque	278.3	kg.m
Mass	10,000	kg

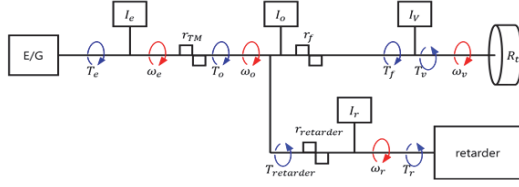


Fig. 8 Dynamic model of the powertrain

리타더가 장착된 차량을 Fig. 8과 같이 개략화 하였으며, 시스템의 운동방정식을 식 (10) ~ (15)와 같이 정의하였다. 여기서, T 는 전달 토크, ω 는 회전 속도, I 는 회전 관성, r 은 기어비를 나타낸다.⁴⁾

$$I_{eq} = I_v + I_o r_f^2 + I_e (r_{TM} r_f)^2 + I_r (r_{retarder} r_f)^2 \quad (10)$$

$$I_{eq} \dot{\omega}_v = T_f - T_v - (r_f T_{retarder}) \quad (11)$$

$$T_f = r_f T_o \quad (12)$$

$$T_o = r_{TM} T_e \quad (13)$$

$$T_v = F_{load} R_t \quad (14)$$

$$T_{retarder} = r_{retarder} T_r \quad (15)$$

상용 차량의 주행 부하계 모델링을 위해 구름 저항 ($F_{rolling}$), 공기 저항 (F_{air}), 경사 저항 (F_{slope}) 등을 다음 같이 정의하였다.^{5,6)} 본 연구에서는 차량의 제동력 분석을 위해 평지와 내리막 경사에서의 상황으로 가정한다.

$$F_{rolling} = f_r m g \cos \theta \quad (16)$$

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_f V^2 \quad (17)$$

$$F_{slope} = m g \sin \theta \quad (18)$$

$$m \dot{V} = F_{slope} - F_{air} - F_{rolling} \quad (19)$$

이상의 차량 시스템 모델링을 통하여 리타더가 장착된 상용차량의 제동 시뮬레이터를 개발하였다. 리타더 제동 토크가 결정되는 원리는, 먼저 운전자에 의해 리타더 단수가 결정되면 ECU를 통해 솔레노이드 제어 전압이 결정되고, 제어 전압에 따라 제어 밸브가 개방되어

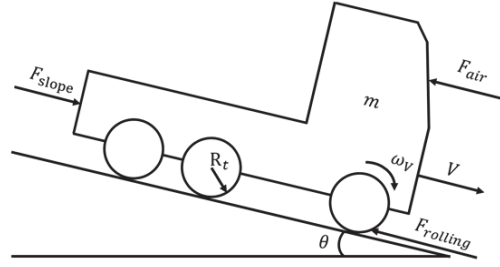


Fig. 9 Resistance forces on a vehicle driving downhill

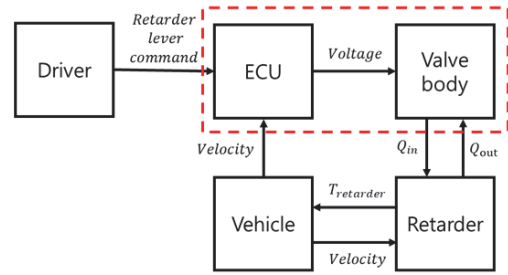


Fig. 10 Schematic of the powertrain system with retarder

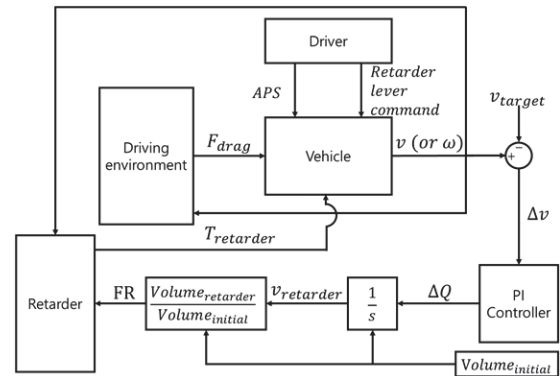


Fig. 11 Schematic of the retarder brake torque controller

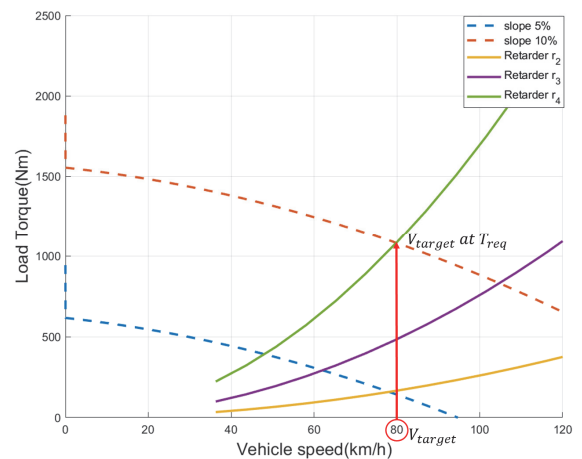


Fig. 12 Performance curve of the retarder

리타더 작동 유체가 유입된다. 최종적으로 제동 토크는 Fig. 7과 같이 유체 충전율과 차량 속도에 의해 결정된다. 이상의 리타더 제어 개념이 Fig. 10에 잘 나타나 있다.

리타더의 등속 주행 모드를 작동시키면 작동 시점의 속도가 차량 목표 속도 (V_{target})로 설정되며, 목표 속도와 현재 속도의 차이를 이용해 리타더의 유체 충전율(FR)을 제어하게 된다. Fig. 11은 이러한 제동 토크 제어 개념을 잘 나타내고 있는 시스템 개략도를 나타내고 있다.

리타더 시스템 내부의 등속 주행 모드 제어시스템은 PI 제어기를 활용하여 구성하였다. PI제어기는 차량의 목표 속도와 현재 속도의 차이를 계산하고 P-게인, I-게인 값을 적용하여 유체의 충전율을 결정한다. Fig. 12는 속도에 따른 주행 부하와 리타더의 제동 토크를 나타낸다.

4. 리타더의 제동 토크 제어 로직 분석

리타더 시스템 내부 유체 충전율은 사용자의 리타더 레버 조작을 통해 결정된다. 1단은 등속 주행모드를 나타내며 나머지 레버 단수의 유체 충전율은 다음과 같다.

리타더의 제동 토크 제어 로직 성능 분석을 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 먼저, 차량 속도 80 km/h의 조건에 10초간 리타더를 작동시켜 각 유체 충전율 별 속도 감소 정도를 측정하였다. Fig. 13을 통해 33 %의 유체 충전율일 때 약 25 km/h, 66 %의 유체 충전율일 때 약 36 km/h, 99 %의 유체 충전율일 때 약 49 km/h의 속도 감소가 확인되었다. 결과로부터 유체 충전율과 제동 토크가 비례하여 높아지는 정량적 결과를 확인하였다.

Table 2 Filling ratio according to retarder lever

Lever	Filling ratio (%)
1st	-
2nd	33
3rd	66
4th	99

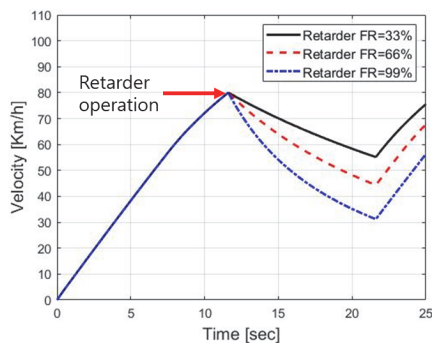


Fig. 13 Brake performance of the retarder at each FR

또한, 리타더 성능 모델링의 유효성 검증을 위해 실제 차량의 리타더 제동 토크 시험 데이터를 활용하여 검증을 진행하였다. 검증은, 실차 시험 데이터와 성능 모델링을 통해 도출한 제동 토크 데이터를 시뮬레이터에 적용하여 진행하였다. 평지에서의 단순 제동상황을 모사해 동일한 차량 속도, 리타더 작동 시간을 적용하여 리타더 레버 단수 별 감속 정도를 측정하여 검증하였다. 검증 결과는 Fig. 14와 같이 차량 속도 80 km/h일 때, 데이터별 속도 감소량은 높은 일치율을 보였다.

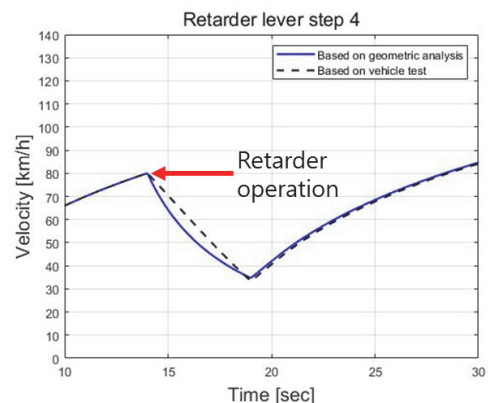
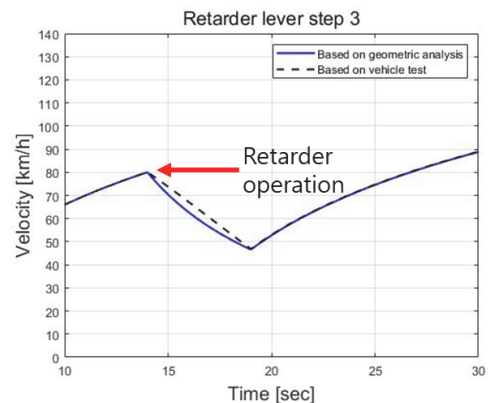
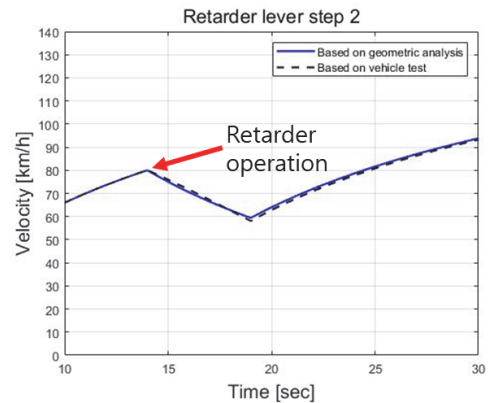


Fig. 14 Brake performance of the retarder at each FR at 80 km/h

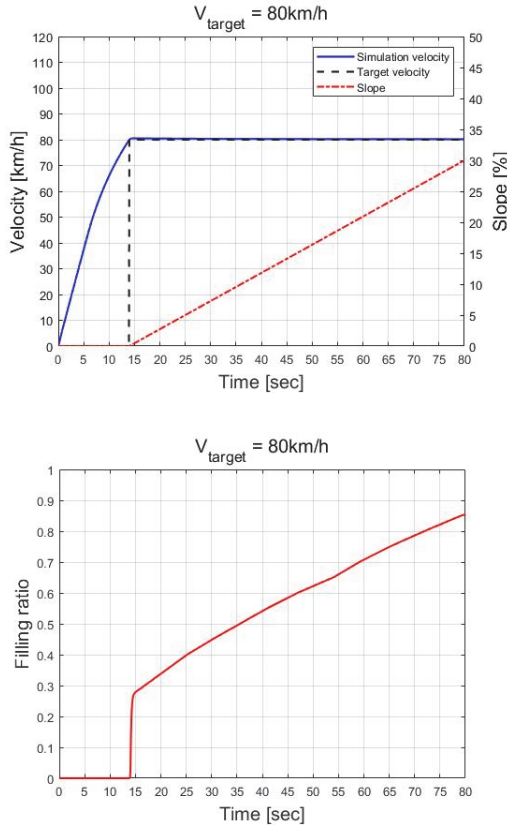


Fig. 15 Results of speed control with the increasing slope

Table 3 P-gain, I-gain data value

Velocity (km/h)	P-gain data	I-gain data
80	0.50	0.04

Table 4 Optimized control performance at 80 km/h

V_{target} (km/h)	Over shoots value (km/h)	Settling time (sec)
80	1.6	10.2

실차 시험 데이터와의 비교를 통해 리타더 성능 모델에 대한 신뢰성을 확보한 후, 내리막 경사에서의 리타더 제어기 모델 중 1단 정속 주행 모드 제어모델에 대해 검증하였다. Fig. 15는 그 결과를 나타내고 있는데, 경사가 이 증가함에 따라 요구 제동 토크가 증가하게 되고 유체 충전율이 증가하는 경향을 보이고 있다.

또한, Table 3의 P-게인, I-게인 데이터를 이용하여 등속 주행 모드 작동 시점에서 목표 속도보다 차량 속도가 순간적으로 상승하는 오버슈트 현상을 완화하였다. Table 4을 통해 오버슈트 값, 안정화 시간도 10초 이내의 안정적인 결과를 확인하였다.

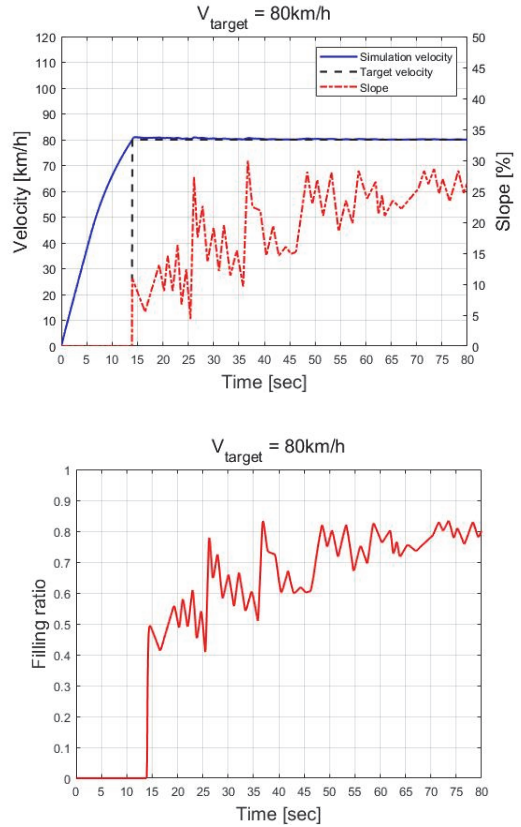


Fig. 16 Results of speed control with various slope

마지막으로 실제 도로상황과 흡사한 비주기적인 경사 조건을 모사해 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 16의 결과를 통해 유체 충전율은 주행 경사와 비례하는 거동을 확인하였으며, 오버슈트는 전 구간 2 km/h 이내의 안정적인 값을 도출하였다.

5. 결론

본 연구에서는 상용차량용 리타더의 제동토크를 제어하기 위해 리타더의 성능 모델링과 제어기 개발 방법을 제안하였다. 리타더의 성능 모델링을 위해 형상 데이터를 이용하여 제동 토크맵을 구성하였고, 이를 활용한 제어 로직을 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다. 또한, 리타더 성능 모델에 대한 신뢰성 검증을 위해 실제 차량 시험 데이터와 비교 분석하여 유효성을 판단하였다. 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 리타더의 형상 데이터를 이용하여 유체와 공기 사이의 가상 경계면을 구해 코어로 정의하였고, 코어를 등분하여 리타더 내부 유체 충전율을 정의하여 제동 토크 맵을 도출하였다.
- 2) 연구대상 차량의 수학적 모델링을 통해 운동 방정식

을 정리, 이를 이용하여 차량 시스템 모델링을 진행하여 시뮬레이터를 구성하였다.

- 3) PI 제어기를 활용한 리타더 제어 로직을 구성 하였으며, 제어기의 응답 지연으로 인해 순간적으로 목표 속도 보다 높은 속도를 나타내는 오버슈트를 완화하기 위해 PI-게인 값을 최적화하여 순간 차량 속도 차 이 2 km/h 이내의 안정적인 결과를 나타냈다.
- 4) 단순 제동, 증가하는 내리막 경사, 변화하는 내리막 경사 조건을 통해 제어기의 성능을 검증하였다. 리타더의 사용 빈도가 높은 영역인 80 km/h에서 시험 데이터와의 비교 분석 결과, 리타더 레버 2단일 때 차량 감속 정도는 1.3 km/h, 3단일 때 0.2 km/h, 4단일 때 1.2 km/h로 약 98 %정도의 높은 일치율을 나타냈다. 유체 충진을 또한 경사와 비례하는 거동을 보여 제어기의 유효성을 검증하였다.

References

- 1) B. S. Shin, H. S. Son and W. S. Lim, "Performance Modeling of the Retarder Brake Torque of Commercial Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.31, No.6, pp.467-472, 2023.
- 2) D. C. Seo, I. S. Lee, S. C. Ko and S. H. Cho, "Study on Durability Performance Evaluation of Retarder Parts in Testing Mode for Heavy-duty Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.23, No.6, pp.575-582, 2015.
- 3) J. H. Yang and Y. J. Kim, "Study on Scoring of Hypoid Gear Set in Bus with Retarder," Journal of Power System Engineering, Vol.13, No.6, pp.102-109, 2009.
- 4) C. D. Hwang, D. Y. Hong, S. C. Park and W. S. Lim, "A Study on the Durability Mode Composition of CVT Vehicle Based on Vehicle Test," Transactions of KSAE, Vol.31, No.2, pp.135-141, 2023.
- 5) W. S. Choi and W. S. Lim, "A Study on the Skip Shift Control Strategy According to Driving Resistance of Heavy-Duty Vehicle Equipped with Multi-speed Transmission," Transactions of KSAE, Vol.27, No.6, pp.473-478, 2019.
- 6) J. H. Byun, W. S. Lim, J. H. Park, S. C. Park, G. O. Song, S. Y. Hur and K. T. Kim, "Dynamic Load Analysis of the Lock-up Clutch Damper Spring of Automatic Transmission," Transactions of KSAE, Vol.28, No.10, pp.711-719, 2020.