

차량 제동 성능 해석 프로그램 개발

정 일 호^{*1)} · 이 수 호¹⁾ · 서 종 휘¹⁾ · 박 태 원²⁾

아주대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 아주대학교 기계공학부²⁾

Development of Automotive Braking Performance Analysis Program Considering Dynamic Characteristic

Ilho Jung^{*1)} · Sooho Lee¹⁾ · Jonghwi Seo¹⁾ · Taewon Park²⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

(Received 12 November 2003 / Accepted 16 February 2004)

Abstract : Analysis of brake characteristics has progressed rapidly in recent years, as computer techniques have developed. However, there are many problems in predicting braking characteristics, due to the numerous design variables of the brake system. Therefore, a synthetic braking performance analysis is required for all brake system parts such as master cylinder, booster, control valve and split system.

In this paper, a program which can analyze braking performance such as force distribution, braking efficiency, pedal force and pedal travel, is presented. The preprocessor of the program helps users prepare input files through a dialog box. An additional postprocessor makes the graph presentation of solved results. Also, a simple example problem is applied to show the usefulness of the presented program.

Key words : Braking performance(제동 성능), Pedal force(페달 답력), Pedal travel(페달 이송거리), Brake Factor(브레이크 효력계수), Load sensing proportional valve(하중 감지형 비례밸브)

Nomenclature

α	: deceleration, g	Q_l	: pedal loss force, kgf
W_{DF}, W_{DR}	: axle dynamic load transfer, kg	γ_p	: pedal ratio
l	: wheel base, mm	η_p, η_b	: pedal, braking efficiency
H	: center of gravity height, mm	F_{inp}, F_{out}	: booster input output force, kgf
B_r, B_i	: real, ideal braking force, kgf	K	: booster servo ratio
P_f, P_r	: front, rear line pressure, kgf/cm ²	R, R_{eff}	: tire and brake effective radius, mm
P_c	: cut point pressure, kgf/cm ²	N_{ps}	: number of piston, EA
$Q_{p-effort}$: pedal effort, kgf	$A_w, A_{m/cyl}$: wheel, master cylinder area, mm ²
		Bst	: booster consumption travel, mm
		Frt, Rr	: front, rear caliper consumption data, mm
		F_{hose}, R_{hose}	: front, rear hose consumption data, mm
		P_t	: pedal travel, mm

*To whom correspondence should be addressed.
ilhojung@hotmail.com

Tube : connecting tube consumption data, mm
 Valve : proportioning valve consumption data, mm

1. 서론

최근의 자동차 산업에서는 소비자의 급속한 선호도 변화에 의해 자동차의 수명 주기(Life cycle)가 매우 짧아지면서 신차 개발기간의 단축이 중요해지고 있다. 차량 개발기간의 단축 및 개발비용의 절감을 위해 초기 설계 단계에서 설계 변수 변화에 따른 즉각적인 성능 예측은 설계자의 시간적 손실을 줄여 준다. 제동 시스템의 경우 다양한 설계 인자로 인하여 실차 시험을 통한 제동 성능의 예측은 많은 비용과 시간을 필요로 하게 된다. 이를 해결하기 위한 유용한 방법은 차량 제동 성능을 모사할 수 있는 프로그램을 개발하여 사용하는 방법이다. 최근 컴퓨터 성능 향상과 더불어 제동 성능 예측에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.^{1,2)}

일반적인 제동 시스템은 브레이크 페달(Brake Pedal), 배력 장치(Booster), 유압 배분 장치(Master Cylinder), 유압 전달 장치(Brake Pipe), 유압 조절 밸브(Control Valve)와 출력 장치(Disc, Drum type)로 구성 되어 있다. 각 단품들은 여러 설계 인자를 가지고 있으며, 이러한 설계 인자로부터 전체적인 제동 성능을 예측하기 위하여 프로그램을 이용한 종합적인 해석이 필요하다.

제동 성능에 관한 전·후륜의 제동력 배분에 관한 연구는 Puleo³⁾의 제동력 배분장치에 관한 연구, Limpert,^{4,5)} Nakaura⁶⁾ 등의 실험 및 이론적 연구가 있었다. 조향의 안정성을 확보하기 위한 ABS (Anti-lock Brake System)에 관한 연구는 Gatt,⁷⁾ Bisinis,⁸⁾ 및 부품 개발 업체인 Bosch⁹⁾ 등이 차량 자세 제어 이론과 더불어 경험과 실험에 입각한 자료를 제시하고 있다.

일반적으로 실차 시험 이전의 초기 설계 단계에서 이미 알려진 이론과 수식을 바탕으로 검토되는 차량 제동 성능은 대표적으로 다음과 같다. 공·적차(Unladen, Laden)상태에서의 전·후륜 제동력 배분, 페달 답력에 따른 브레이크 라인의 유압 및 제동 감속도, 제동 효율, 페달 이송거리에 따른 제동 감속도, 그리고 배관 계통 실험에 따른 제동력 등이 검토

된다. 또한 상용차와 같이 공적차시 중량 차이가 큰 차량에 사용되는 하중 감지형 유압조절 밸브(LSPV)의 특성도 검토된다.

이에 본 연구에서는 브레이크 시스템의 설계 변수들을 종합하여 설계 단계에서 검토되어야 할 제동 성능을 예측하는 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램을 통하여 설계 인자 변경에 따른 제동 성능이 국내의 제동관련 법규(FMVSS, ECE, ADR 등)를 만족하는지에 대한 이론적 검토를 즉각적으로 할 수 있게 하였다. 이를 위해 그래프 기능을 구현하여 제동 성능의 결과를 확인할 수 있도록 하였고, 입출력 자료에 대한 엑셀(Excel)로의 양식 변경을 통해 설계자의 업무 효율을 향상시킬 수 있게 하였다. 본 프로그램은 Visual C++을 컴파일러로 사용하였으며, 그래프 부분은 Chart FX¹³⁾라이브러리를 사용하였다.

2. 제동 성능 해석 이론

2.1 이상 제동력 배분

차량은 제동시 관성력에 의해 하중의 이동을 일으킨다. 정지시의 차량 무게 중심으로부터 알 수 있는 정적 하중 배분은 감속도에 의해 Fig. 1에서와 같이 동적 하중으로 변화한다. 이상 제동력은 차량 감속도에 의해 생긴 동적 하중 배분에 비례하는 제동력을 전·후륜에 각각 발생시켰을 때의 제동력이다.⁴⁾

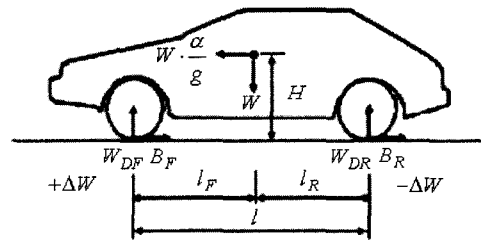


Fig. 1 Dynamic axle load distribution

전·후륜에서 발생하는 동적하중 배분은 다음과 같다.

$$W_{DF} = W \cdot \frac{l_R}{l} + \frac{H}{l} \cdot \frac{a}{g} \cdot W \tag{1}$$

$$W_{DR} = W \cdot \frac{l_F}{l} - \frac{H}{l} \cdot \frac{a}{g} \cdot W \quad (2)$$

타이어와 노면 사이의 마찰력을 통해 알 수 있는 이상제동력은 다음과 같다.

$$B_{IF} = (W \cdot \frac{l_R}{l} + \frac{H}{l} \cdot \frac{a}{g} \cdot W) \cdot \frac{a}{g} \quad (3)$$

$$B_{IR} = (W \cdot \frac{l_F}{l} - \frac{H}{l} \cdot \frac{a}{g} \cdot W) \cdot \frac{a}{g} \quad (4)$$

2.2 실 제동력 배분

차량의 제동은 운전자의 브레이크 페달 조작으로부터 이뤄진다. 실 제동력은 페달 조작에 의한 답력 발생으로부터, 배력 장치(Booster), 마스터 실린더(Master Cylinder), 액압 제어 밸브, 배관 그리고 휠 실린더(Wheel Cylinder)에 이르는 과정을 거쳐 디스크나 드럼 등의 마찰기구에서 나타나는 제동력이다.

2.2.1 페달 답력과 브레이크 유압

페달 답력에 대한 유압 특성은 답력에 의한 배력 장치로의 입력, 배력 장치 입력에 의한 출력의 과정으로 파악된다. 페달 손실력과 페달비, 페달의 기계적 효율을 고려한 배력 장치로의 입력은 다음과 같다.

$$F_{inp} = (Q_{p-effort} - Q_d) \times \gamma_p \times \eta_p \quad (5)$$

배력 장치의 입력에 대한 출력을 구하기 위한 특성 곡선은 Fig. 2와 같다.

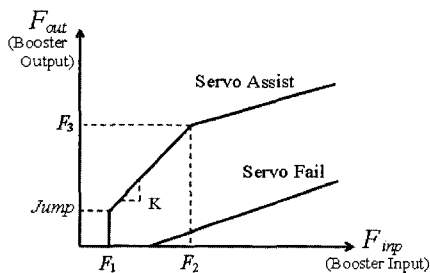


Fig. 2 Booster performance curve

페달에 의한 부스터 입력이 있더라도 작동 개시력 F_1 까지의 힘에 대한 부스터 출력은 없으며, 이후 점핑력(Jump)까지 상승하게 된다. 전부하점 F_2

까지 서보비(Servo ratio, K)로 출력이 증가하게 된다. 특히 상용차와 같이 전부하점 이전에 높은 부스터 출력이 요구되는 차량에는 서보비 K 값 이상의 값을 한번 더 적용한 이배력 부스터(Booster dual servo ratio)가 사용되기도 한다.

2.2.2 유압과 실제동력

전·후륜의 제동장치에 입력되는 브레이크액은 마스터 실린더를 통한 유압 전달과 컨트롤 밸브를 거쳐 입력된다. 이 때 컨트롤 밸브에서는 특정 감속도 이상에서 차량 중량 및 그에 따른 동하중 분포에 따라 절점(Cut point)을 대응시켜 후륜에 입력되는 브레이크 액압을 줄여주게 된다.

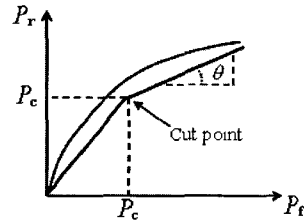


Fig. 3 Proportional valve performance curve

Fig. 3은 전·후륜 휠 실린더의 유압에 대한 컨트롤 밸브의 영향을 보여주고 있다.

전·후륜의 휠 실린더에 입력되는 액압은 다음과 같다.

$$P_f = (F_{out} - F_{loss}) / A_{m/cyl} \quad (6)$$

$$P_r = P_c + (P_f - P_c) \times \tan \theta \quad (7)$$

$$= \tan \theta \times P_f + P_c \times (1 - \tan \theta)$$

액압에 따른 실 제동력은 다음과 같다.

$$B_r = (P - P_d) \times C \quad (8)$$

여기서, $C = 2 \cdot B_{fac} \cdot N_{pis} \cdot A_w \cdot \frac{R_{off}}{R} \cdot \eta_b$ 이다.

특히, 트럭과 같이 하중의 변동이 큰 경우는 하중에 따라 절점(P_c)을 대응시킬 필요가 있다. 이러한 특성을 가진 밸브를 하중 감지형 비례 밸브(LSPV, Load Sensing Proportional Valve)라 하며, 서스펜션 스프링 사이의 치수 변화에 따라 작동된다. LSPV의 특성은 정지 상태에서 하중 변위에 따른 서스펜션

의 변위 측정, 하중 변화에 따른 서스펜션 변위의 센싱과정 그리고 밸브 제원에 의한 서스펜션 변위 1mm당 질점 변화를 통해 얻어진다.

2.3 차량 감속도와 페달 이송거리

브레이크 페달의 이송거리와 차량 감속도 사이의 관계는 운전자로 하여금 브레이크 페달에 대한 감각을 알 수 있게 하는 요소이다. 이것은 제동 시스템 전반에 걸쳐있는 브레이크 액의 압력에 따른 액량의 변화와 관련이 있다.

배력 장치의 출력으로 나온 액압을 x , 마스터 실린더로 전달되는 소요 액량의 합을 $Total(x)$ 라 하면, 페달 이송거리는 다음과 같다.

$$P_i = (Total(x)/A_{m\ cyl} + Bst(x)) \times \gamma_p \quad (9)$$

여기서,

$$Total(x) = 2 \cdot (Frt(x) + Rr(x)) + F_{hose}(x) + R_{hose} + Tube(x) + Valve(x)$$

이다.

3. 프로그램 개발

프로그램은 각종 부품의 데이터를 입력하는 전처리, 해석을 수행하는 해석기, 결과 데이터 확인, 그래프 및 엑셀 변환 기능을 제공하는 후처리로 Fig. 4와 같이 구성된다.

전처리기에서는 해석을 위한 입력 파일 구성을 위해 부품들의 데이터 입력이 이루어진다. 입력 파일은 대화상자를 이용하거나 문서편집기를 통해 구성할 수 있다. 여기에는 각 부품 및 차량 제원을 비롯하여 페달 이송거리 해석을 위한 시스템의 소요 액량 데이터 등이 포함된다. 제동 성능해석은 입력 파일의 선택을 통해 이뤄지며 기본 제동 성능, 배관 실험시의 성능 및 하중감지형 비례밸브(LSPV)의 동특성 등의 해석이 이뤄진다.

해석에 의해 형성된 결과 파일을 이용해 후처리기에서는 문서 편집기와 그래프를 통해 해석 결과를 확인할 수 있다. 또한 입, 출력 자료의 효율적 관리와 작업 능력 향상을 위해 특정 양식에 맞는 엑셀 프로그램 형식으로서의 자료 변환도 이루어진다.

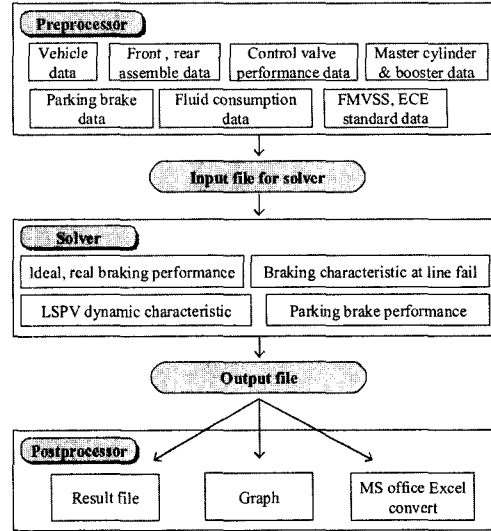


Fig. 4 Program structure for analyzing the brake performance

3.1 전처리기

전처리기는 차량, 전·후륜 브레이크, 컨트롤 밸브, 마스터 실린더, 부스터, 주차 브레이크 등의 제원을 입력할 수 있게 하였다. Fig. 5는 차량 제원 및 전륜 브레이크에 대한 입력 대화창을 보여준다.

분류된 7가지의 데이터들은 개별적인 파일로 존재하며, 해석을 위한 입력 데이터는 이들의 조합으로 이뤄진다.

페달 이송거리 해석을 위한 전·후륜의 캘리퍼(Caliper), 연결호스(Hose), 컨트롤 밸브의 소요 액량 데이터와 부스터, 마스터 실린더의 변위 데이터들은 따로 입력되어 해석 파일에 포함될 수 있게 하였

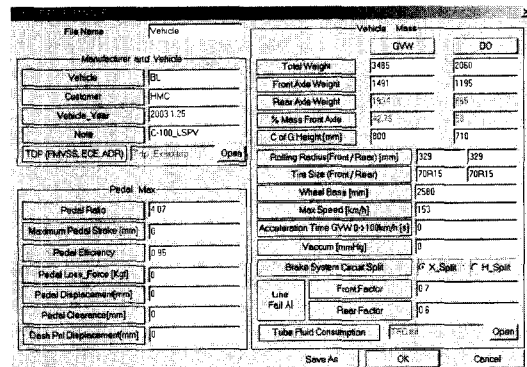


Fig. 5 Vehicle assembly data

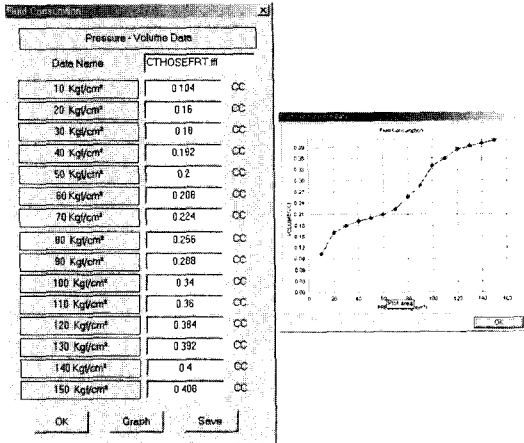


Fig. 6 Flexible hose fluid consumption data and graph

다. 소요 액량 데이터는 압력 분포에 따른 소요 액량의 값으로 입력되게 하였으며 데이터의 분포는 그래프를 통해 Fig. 6과 같이 즉각적으로 확인할 수 있게 하였다.

3.2 해석기

해석기는 전처리기에서 구성된 입력 파일을 인식하고, 읽어 들인 변수에 따라 해석을 수행한다. Disc 및 Drum Type과 P-valve, LSPV, ABS 등의 제어 밸브에 따른 제동 특성을 해석한다.

여기에는 이상 제동력, 실제동력, 페달 답력과 감속도와 관계, 제동 효율, 제동 감속도와 페달 이동거리와 제동 감속도와 관계 등이 포함된다.

또한, 브레이크 효율 계수(Brake Factor) 변화에 따른 성능 계산도 포함되었다. 브레이크 효율 계수는 디스크나 드럼에 전달되는 토크에 대한 제동 토크의 비이다. 제동 감속도가 증가함에 따라 마찰 계수는 감소하는 특성을 보이며, 마찰 계수와 브레이크 효율 계수는 일반적으로 비례 관계에 있다.¹⁰⁾ 실험적, 경험적으로 얻은 제동 감속도에 따른 효율 계수 데이터를 적용하여 제동 특성을 나타내게 하였다.

전·후륜으로 전달되는 배관 형식은 크게 Fig. 7과 같이 X, H 배관 형식으로 구분할 수 있다. 배관계통 실험시의 제동 성능 해석은 배관형식에 따라 이루어지게 된다.

LSPV의 동특성은 1차 제동 성능 해석 뒤,

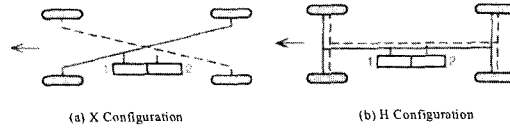


Fig. 7 Brake circuit configuration

Unsprung mass, 변위당 액압변화, 1, 2차 스프링 상수 등의 입력을 통해 해석이 이뤄진다.

3.3 후처리기

후처리기는 해석에 의해 형성된 결과를 이용하여 데이터 편집 및 확인, 그래프 보기, 엑셀 프로그램으로의 변환이 이루어진다. Fig. 8은 해석 결과 데이터를 확인할 수 있는 대화창이다. 공적차시의 제동 성능, 주차 브레이크의 성능 및 특정 감속도에서의 제동 토크, 상승 온도 등을 수치적으로 확인할 수 있게 하였다. 그래프에서는 9가지의 그래프를 보여준다. 브레이크 액압 분포, 실제동력 분포, 이상 제동력 분포, 페달 답력에 따른 배관 압력 분포 및 감속도와 관계, 제동 효율, 페달 이동거리와 감속도와 관계, 페달 답력과 페달 이동거리와의 관계 그리고 LSPV의 동특성 선도 등을 확인할 수 있다. 해석 결과는 기존 문헌에 나온 여러 수식을 토대로 시스템 단계별로 검증을 수행하였으며, 이를 통해 프로그램의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

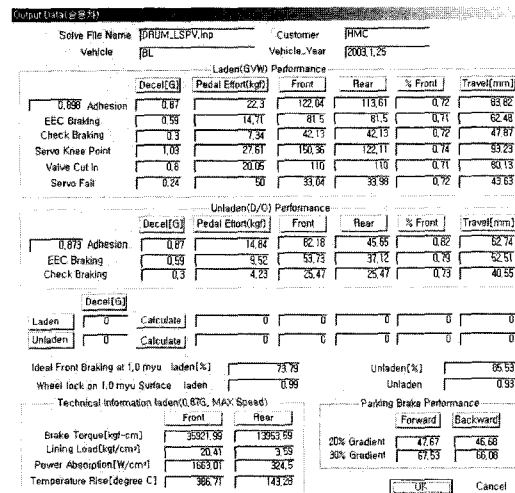


Fig. 8 Output data dialog box

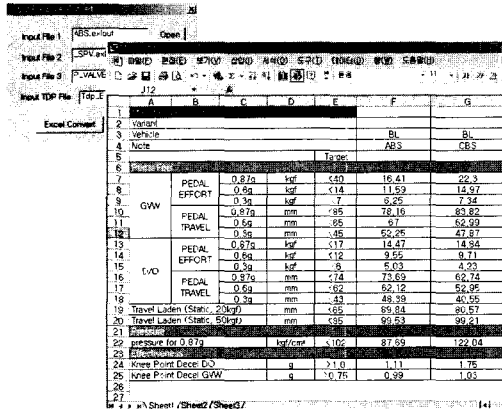


Fig. 9 Output data excel convert

Table 1 Vehicle and brake system specification

	Laden	Unladen
Total weight(kg)	3485	2060
Front axle weight(kg)	1490	1190
C.G. height(mm)	800	710
	Front	Rear
Rolling radius(mm)	330	330
Effective radius(mm)	117	134
Brake type	Disc	Drum
Cylinder diameter(mm)	46	19.05
Number of piston(EA)	2	1
Brake factor	0.8	3.6
Pressure threshold(kgf)	0.5	3.5
System circuit split	X-split	
Pedal ratio	4.07	
Pedal efficiency	0.95	
Unsprung mass(kg)	445	
Suspension spring constant	1 st 5.5 2 nd 14.2	
Pressure increase(kg/cm ²)	1.5	
Booster type	Normal	
Booster ratio	7.0	
Jump in force(kgf)	50	
Booster threshold load(kgf)	5.0	
1 st input force(kgf)	106.7	
1 st output force(kgf)	761.8	
Master cylinder diameter(mm)	25.4	
Control valve type	LSPV	
Reducer slope	0.3	
Hand brake lever ratio	4.0	
Forward parking factor	16.8	
Backward parking factor	17.2	

Fig. 9는 해석 입력 및 출력 데이터에 대한 엑셀 프로그램으로의 변환을 보여준다. 엑셀의 특정 양식은 내부적으로 프로그래밍 되어 있으며, 엑셀로의 전환 뒤 양식을 편집할 수 있게 하였다. 이 기능은 설계자가 데이터를 정리하고자 할 때, 발생할 수 있는 실수를 미연에 방지하고, 또한 특정 양식에 맞추어 필요한 자료를 수초 내에 자동으로 취합한다.

4. 차량 적용 예

프로그램의 유용성을 확인하기 위해 Table 1의 제원을 갖는 차량의 제동 시스템에 적용하였다.

Table 1의 데이터를 이용하여 기본적인 제동성능과 LSPV의 특성을 검토하였다. Fig. 10은 프로그램에서 출력된 제동 성능 그래프를 보여주고 있다. 제동 액압 배분, 제동력 배분, 제동 효율, 답력에 따른 감속도, 및 페달 이송거리 등을 그래프로 확인할 수 있으며, 그래프에서 보이는 모든 선도를 수치적으로 확인할 수 있는 기능을 더하여 보다 효율적인 결과분석을 할 수 있게 하였다. 특히, 제동력 배분 그래프의 경우 밸브의 기울기, 휠 실린더 지름, 브레이크 효력 계수 등의 변수를 설계자가 변화시킬 때 즉각적으로 그래프를 통해 제동 성능을 확인할 수 있게 하였다.

Fig. 11는 적차시일 때의 하중변화에 따른 LSPV의 특성을 보여주고 있다. 감속도에 따른 이상 제동 액압 곡선을 작도하고, 밸브의 기울기에 따른 정특

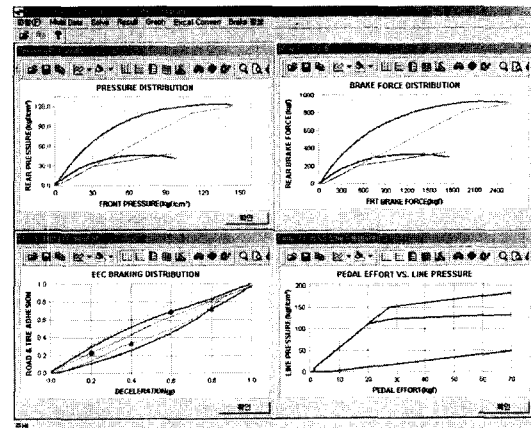


Fig. 10 Brake performance graph

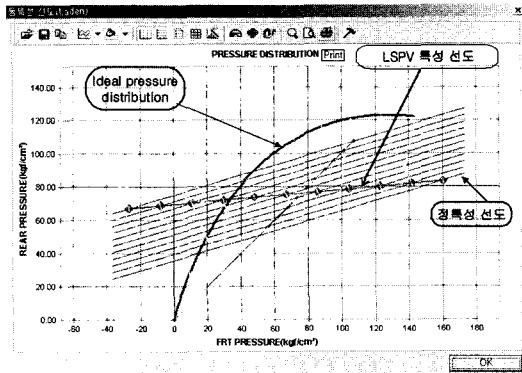


Fig. 11 LSPV characteristic graph

성 선도를 나타낸 후, 등 감속도 선도와 정 특성 직선의 만나는 점을 연결하여 LSPV 특성 곡선을 나타내게 하였다.

5. 결론

본 프로그램을 통해 제동 시스템 및 차량 제원의 데이터를 분류하여 특정 차량에 대한 여러 제동 시스템 제원을 조합할 수 있는 데이터 베이스를 구축하였다. 성능 해석은 브레이크 액압 분포, 제동력 분포, 페달 이송거리, 페달 답력, 제동 효율, 주차 브레이크 성능, 배관 실험에 따른 압력 및 답력 그리고 LSPV 특성 검토 등을 종합적으로 할 수 있게 하였다. 이는 설계자가 실차 시험 이전에 제동 성능의 이론적 검토를 즉각적으로 하는데 도움이 될 것이다. 또한, 그래프 기능 및 입출력 데이터의 엑셀 프로그램으로의 변경을 통해 업무능률을 향상 시킬 수 있게 하였다.

추가적으로 차량 동역학 모델에 제동 시스템을 조합하는 연구는 차량 제동 특성을 파악하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- 1) M. W. Suh, Y. K. Park, S. J. Kwon, "A Simulation Program for the Braking Characteristics of Tractor-Semitrailer Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.9, No.2, pp.152-167, 2001.
- 2) H. T. Kim, Y. C. Lim, "A Study on the Characteristics of Automotive Brake Pedal Force," KSAE, No.933712, pp.64-75, 1993.
- 3) G. Puleo, "Automotive Brake Proportioning Devices," SAE 700375, 1970.
- 4) R. Limpert, "Proportional Braking of Solid Frame Vehicles," SAE 710047, 1971.
- 5) R. Limpert, "An Investigation of Brake Balance for Straight and Curved Braking," SAE 741086, 1974.
- 6) H. Nakamura, "An Investigation of Braking Force Distribution," JSAE, Vol.31, No.3, 1977.
- 7) M. E. Gatt, "Brake System Design for Medium Heavy Trucks Meet FMVSS 105-75 Stopping Directional Dynamics," SAE 770097, 1977.
- 8) E. Bisimis, "Influence of Antiskid System on Vehicle Directional Dynamics," SAE 790455, 1979.
- 9) Bosch, Conventional and Electronic Braking System, pp.16-61, 2003.
- 10) P. G. Sanders, T. M. Dalka, R. H. Basch, "A Reduced Scale Brake Dynamometer for Friction Characterization," Tribology International 34, pp.609-615, 2001.
- 11) R. Limpert, Brake Design and Safety, SAE, 1995.
- 12) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, pp.44-77, 1992.
- 13) Software FX, Chart FX Programmer's Guide, 1999.