Transactions of KSAE, Vol. 21, No. 1, pp.17-22 (2013)

Copyright © 2013 KSAE / 121-03
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.1.017

8 × 4 차량의 제동성 안정을 위한 제동력 최적 배분에 관한 연구

김 관 주[*1)] · 이 주 형[2)]

홍익대학교 기계 시스템 디자인공학과[1)] · 홍익대학교 기계공학과[2)]

A Study of Optimal Braking Force Proportioning Magnitude for the Braking Stability of a 8 × 4 Vehicle

Kwanju Kim[*1)] • Juhyoung Lee[2)]

[1)]Department of Mechanical System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
[2)]Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 17 June 2011 / Revised 21 May 2012 / Accepted 16 October 2012)

Abstract : Design of braking system is one of the most critical subjects in vehicle stability. In this paper, optimal scheme for brake force proportioning of all-wheel-drive vehicle is proposed to guarantee the vehicle dynamic stability under plausible drive circumstances. A brake force distribution of generic 8 × 4 vehicle is calculated according to proposed scheme and braking stability of this vehicle is verified by using a commercial vehicle software, Trucksim.

Key words : 8 × 4 Vehicle(8 × 4 차량), Braking force(제동력), Braking stability(제동 안정성), Braking proportioning (제동력 배분), Lock up(잠김), Maximum braking force(최대 제동력)

1. 서 론

제동 시스템의 설계는 차량의 주행안전 관점에서 최우선적으로 고려해야 할 분야이다. 다축 차량에 대한 여러 주행 환경에서 제동 안정성을 보장하기 위한 최적의 제동력 배분 인자 결정이 본 논문의 주제이다. 다축 차량의 제동 안전성에 관한 기존 논문을 살펴보면, 서명원 등은 트랙터-세미트레일러 연결 차량을 대상으로 제동 설계인자에 의한 제동성능에 관한 연구를 진행하였다.[1)] 정일호 등은 2축 차량의 제동 성능평가 프로그램을 개발하고, 브레이크 액압 분포, 페달 답력 등 제동 제원의 조합에 따른 제동 성능을 검토하였다.[2)] Dunn 등은 실제 다축 트레일러 차량을 대상으로 특정 축이 제동력을 상실했을 때의 차량 거동특성을 파악하였다.[3)] 본 연구에서는 8×4 다축 차량을 대상으로 여러 주행조건에서 최적의 주행안정성을 보장할 수 있는 제동력 배분 기법을 제안하고자 한다. 기존의 연구들이 주어진 운행 조건에 대한 제동 성능 평가와 특정 축의 제동력 상실 시 제동 안정성에 대한 연구를 진행한 반면, 본 연구는 다양한 제동조건을 고려하여 제동력 배분을 제안한다. 본 논문의 구성은 우선 차량의 제동 안정성을 차량의 조종 안전성 관점에서 설명하였고, 대상 4축 차량에 대한 제동 성능을 해석하였다. 다음으로 제동 시 주행 환경을 고려해서 이상적인 제동력 배분 비율을 제안한다. 마지막으로 제안한 제동력 배분 비율에 의한 차량의 제동특성을 전체차량 동역학 전산해석 프로그램인 TruckSim을 이용해서 검증하였다. 또한 4축 차량의 잠김 현상의 특성에 대해서도 서술하였다.

*Corresponding author, E-mail: kwanju@hongik.ac.kr

2. 본 론

2.1 제동에 의한 차량 안정성 개요

제동 시 차륜의 잠김이 차량의 무게중심 앞축에서 발생하면, 차량은 부족조향(Under Steer)의 경향을 보이며 조향 불능이 쉽게 발생한다. 반면 차량의 무게 중심 뒤 축의 차륜이 먼저 잠기면 과도조향(Over Steer) 경향이 발생하며, 차량은 요(Yaw)방향으로 불안정하게 된다. 부족조향이나 과도조향 중 어느 방향으로 차량을 설계할 것인지에 대해서는 논란의 여지가 있으나, 차량의 모든 차축에 동시 잠김이 발생토록 하도록 하는 것이 이상적인 제동 조건으로 사료된다. 실지 주행 환경에서 모든 차륜이 동시에 잠기도록 제동력 배분하는 것은 구현이 어려우므로, 설계자는 대상차량의 대표적인 주행 환경을 선정하여, 그 환경에 적절한 제동력 배분을 결정하게 된다.

2.2 4축 차량의 최대 제동력 계산

감가속도(D_x)로 제동 시 차축 (i) 에 작용하는 순간축중(W_i)은 정적축중(W_{is})과 이동축중 (W_{id})으로 구성되며 식 (1)에 나타내었다. (Fig. 1 대상 차량의 자유물체도 참조)

$$W_i = W_{is} + W_{id} = W_{is} + \alpha_i D_x \tag{1}$$

식 (1)에서 i 는 특정 차축을, α_i 은 대상 차량의 피치방향의 모멘트 식으로부터 구할 수있으며, 차량의 길이, 질량 등의 함수로 표현된다.[4] 2축 차량과 달리, 4축 차량인 경우 식 (1)은 부정정계에 해당되며, 수치해석에서 제공하는 최소제곱해 알고리듬을 이용하여 축중을 계산하였다.[5]

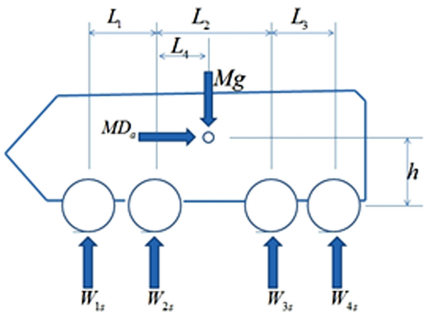

Fig. 1 Free body diagram of dynamic axle forces in the vertical direction acting on the 4 axle vehicle

특정 차축 (i)의 최대 제동력(F_{xmi})은 순간축중 (W_i)와 도로-타이어사이의 최대 마찰 계수(μ_p)의 곱으로 표현할 수 있다. 차축 (i)에 대한 최대 제동력은 식 (2)와 같이 주어진다. 이상적인 제동력은 감가속도의 함수로서 비선형 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.[6]

$$F_{xmi} = \mu_p W_i = \mu_p (W_{is} + \alpha D_x) \tag{2}$$

특정 차축 ($i, i = 1,4$)의 최대 제동력(F_{xmi})이 발생하는 경우, 차량의 감가속도와 제동력간의 관계를 아래 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$D_x = 1/M (F_{xmi} + \sum_{j=1, i \neq 1}^{4} F_{xj}) \tag{3}$$

각각의 최대 제동력 (F_{xmi})를 basis로 하는 4차원의 함수식을 표현하면 다음 식 (4)의 일반적이 형태로 나타낼 수 있으며, 요구하는 제동력은 식 (4)가 구분하는 공간들의 교집합 영역 안에 존재하게 된다.

$$F_{xmi} = \frac{\mu_p [W_{is} + \alpha_i M^* \sum_{j=1, j \neq i}^{4} F_{xj}]}{1 - \mu_p \alpha_i / M} \tag{4}$$

본 논문에서는 위 식 (4) ($i = 1,4$)가 모두 교차하는 특정점에 국한해서 계산을 진행하였다. 즉 다음 식 (5)에 나타내며, 모든 차축에 최대 제동력이 발생하는 경우에 해당된다.

$$D_x = \frac{(F_{xm1} + F_{xm2} + F_{xm3} + F_{Xm4})}{M} \tag{5}$$

2.3 4축 차량의 제동 성능 평가

수송기계의 일반적인 특성인 다양한 운행조건에서 최적화된 제동력 배분을 계산하기 위해서 본 논문에서는 Table 1과 같이 대상차량이 가질 수 있는 대표적인 4가지의 운행 조건을 선정하였다.

식 (4)를 적용하여 운행 조건 별 모든 구동 축이 동시에 잠기는 제동력을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 모든 경우 1축에서 최대 제동력을 감당할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 차량 중량이 증가할수록, 차량과 도로사이의 마찰력이 증가할수록 최대 제동력이 증가함을 확인할 수 있었다.

Table 1 Selected generic driving conditions

	운행조건	운행중량	도로마찰계수
경우 1	설계 중량, 악조건 주행	20 ton	0.3
경우 2	최대 중량, 악조건 주행	30 ton	0.3
경우 3	설계 중량, 일반로 주행	20 ton	0.8
경우 4	최대 중량, 일반로 주행	30 ton	0.8

Table 2 Maximum braking force (단위: N)

최대 제동력	1축	2축	3축	4축
경우 1	19,187	16,411	13,020	10,243
경우 2	28,785	24,619	19,526	15,360
경우 3	71,737	51,562	26,918	6,743
경우 4	107,609	77,351	40,369	10,111

2.4 4축 차량의 제동력 배분력 설계

2.3절에서 서술한 4가지 경우의 운행 조건을 대상으로 각 축의 제동력 배분 값을 구현하도록 선형식을 찾는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 가혹한 운행 조건을 선정하여 제동력 배분을 제안하였다. 고려한 운행조건은 첫 번째로 "최대 중량" 조건 즉 Table 1의 경우 2와 경우 4, 두 번째로 "악조건 도로" 조건 즉 Table 1의 경우 1과 경우 2, 마지막으로 "4가지 모든 운행조건을 최대한 만족"하는 세 가지 경우를 선정했다. 해당되는 각 축에서의 제동력 값이 가중치를 갖도록 제동력 배분 값을 최소자승법을 이용하여 결정하였다.

첫 번째 경우인 "최대 중량" 경우 계산한 각 축의 제동력 비율 값을 Fig. 2에 나타내었다. 계산한 각 축의 제동력선이 최대 중량시 필요한 최대제동력 값, 즉, Table 1의 경우2, 경우4에 계산된 값을 근접해서 지나감을 알 수 있다.

Table 3 Proposed braking pressure proportioning values for 3 plausible cases

		압력배분 밸브작동(N)	P1:P2:P3:P4의 배분 계산 값
1	최대 중량	24,400	1:0.71:0.35:0.06
2	도로 악조건	5.2	1:0.86:0.68:0.53
3	모든 주행	28,400	1:0.70:0.34:0.04

선정한 3가지 운행조건에 대해서 계산한 제동력 배분값을 Table 3에 정리하여 나타내었다. "최대 중량"과 "모든 주행"의 제동력 배분 비율이 비슷한 경향을 나타낸다. 4축의 제동력 배분 값이 특히 적은 것을 볼 수 있다. 이는 "도로 악조건"에 비해서 상대적으로 제동 시 큰 감가속도를 가지므로 차량의 무게 이동으로 앞 차축에 큰 제동력이 걸리기 때문이라 판단된다.

2.5 TruckSim을 이용한 차량안정성 해석

2.5.1 TruckSim 모델 및 운행 조건

2.4절에서 제안한 제동력 배분 값에 의한 대상차량의 주행안정성을 확인하기 위해서 TruckSim을 이용했다. TruckSim에서 만든 대상차량 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 차량동력학 해석시 필요한 스프링 상질량, 현가장치, 구동장치의 자료는 대부분 차량 제작회사에서 제공받았으며, 타이어, 공기역학계수 등은 TruckSim에서 제공하는 기본자료를 이용했다.

선정한 제동조건은 AWD차량이 반경 152m인 정

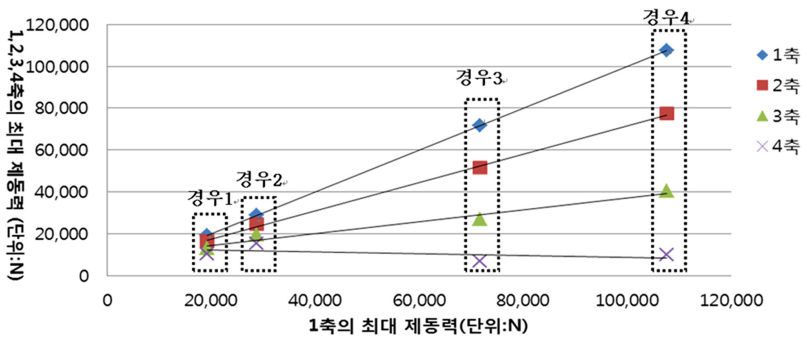

Fig. 2 Distribution of braking force of each axle for maximum weight case

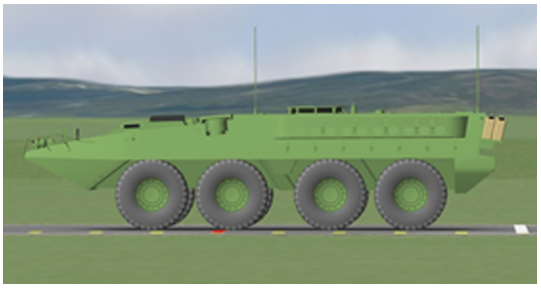

Fig. 3 The AWD Vehicle model in TruckSim

원주행에서 48km/h의 초기속도로부터 마스터실린더의 압력을 변경하면서 차량의 선회안정성을 검토하였다. 마스터실린더의 제동 압력은 1Mpa와 5Mpa부터는 5MPa의 간격으로 35Mpa까지 순차적으로 증가시켰다.

전산해석의 결과 값으로는 차량의 감가속도, 제동거리, 제동 시간, 차량 각 축의 제동력 수렴 값, 차량 각 축의 진행 방향에 대한 미끄럼 짐율을 얻었다. 해석 결과 값 중 차량 각 축의 제동력 수렴 값을 Fig. 4에 나타내었다. 그림의 X자 표시는 손계산으로, +표시는 TruckSim으로 구한 값이다. TruckSim으로 구한 감가속도, 제동거리, 제동시간, 각 축의 제동력 수렴 값 및 잠김 발생 현상에 대한 내용을 Table 4에 정리하여 나타내었다. 8가지의 경우 모두 제동력 그래프의 결과와 일치하는 것을 보였다.

2.5.2 차축 별 제동 민감도 계산

4축 차량의 각 차축의 제동력 변화가 제동 안정성에 미치는 민감도를 계산하였다. 일례로 1축의 제동력 민감도를 살펴 보기 위하여 Table 5에 주어진 제동력 비율 변화에 따른 차량의 거동을 TruckSim으로 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 모든 경우 특정 차축에 제동력 값이 적은 경우가 원하는 경로에 근접함을 알 수 있었다. 무게 중심보다 전방의 차축인 1축, 2축보다 후방의 차축인 3축, 4축의 제동력을 변화시키는 경우가 제동 시 거동에 더 큰 차이를 보였

Table 4 Dynamic behavior of the AWD Vehicle model according to brake force variation in TruckSim

마스터실린더 제동 압력(MPa)	감가속도 (g)	제동거리 (m)	제동시간 (s)	3축, 4축 제동력 (kN)	1축, 2축 제동력 (kN)	잠김 발생	제동력 그래프 비교
1	0.0615	66	15	7.4	7.94	0.54%이내	일치
5	0.286	14.6	3.2	28.8	42.1	2.5%이내	일치
10	0.568	7.6	1.6	44	98.4	6% 이내	일치
15	0.85	5.3	1.1	44	172	잠김 순서 1축 →4축 →3축 →2축	일치
20	0.84	6.4	1.4	64	135		일치
25	0.866	6.4	1.4	72	172		일치
30	0.85	6.4	1.4	84	168		일치
35	0.88	7.35	1.4	88	152		일치

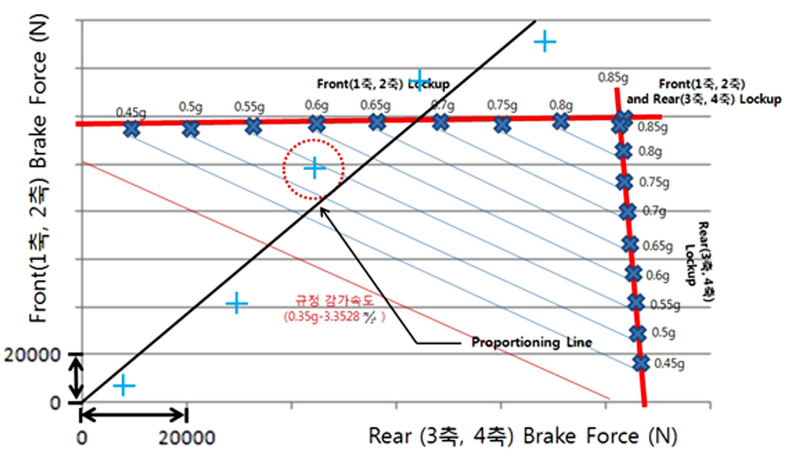

Fig. 4 Comparison of the brake force results by TruckSim with those by hand calculation for The AWD Vehicle model

Table 5 Braking force ratio of each axle for identifying the braking sensitivity

	경우	1축	2축	3축	4축
제동력 비율	1	0.3	1	1	1
	2	0.5	1	1	1
	3	1	1	1	1
	4	1.3	1	1	1
	5	1.5	1	1	1
차량 조건	중량조건 30 ton, 도로마찰계수 (0.8)				

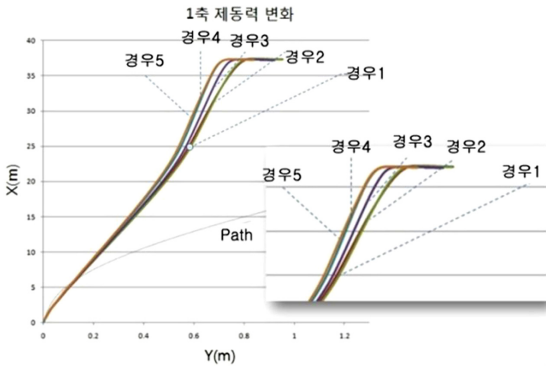

Fig. 5 Trajectory variation of 8 × 4 vehicle by changing brake force of first axle only

다. 이는 차량의 뒤차축의 차량 거동에 대한 민감도가 더 큰 변화를 발생하는 요소라 생각할 수 있다.

2.5.3 제동 안정성 검증

AWD차량의 손 계산으로 구한 제동력 배분에 의한 차량 주행안정성 향상 결과를 Truck Sim을 이용하여 검증하였다. 차량주행환경은 2.5절과 동일한 환경을 선택하였으며, 차량모델의 제동압력 배분은 4축에 동일 압력을 작동하는 경우 1과 2.4절의 Table 3에 명시된 압력분배 조건 3가지 경우 총 4개로 구성하였다. 제동력 배분 비율의 차이는 제동조건에 따라서 제동시 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 Table 6과 같이 운행조건에 대해서 해석을 수행하였다.

Table 6 Driving Condition of AWD vehicle for verification of proposed brake pressure

	운행조건 1	운행조건 2	운행조건 3	검증운행 4
중량조건	20 ton	30 ton	20 ton	30 ton
도로조건	0.3	0.3	0.8	0.8

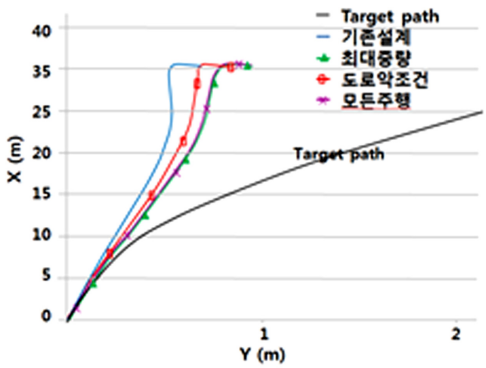

Fig. 6 Trajectory of center of mass for the AWD vehicle for driving condition case 1

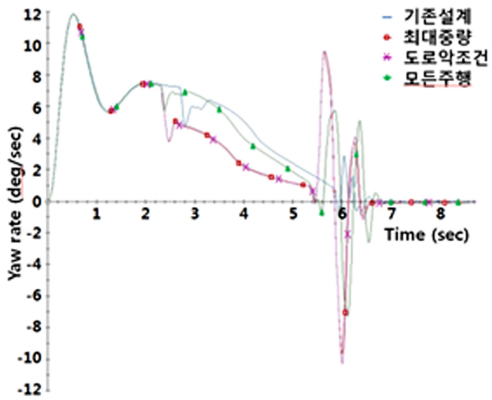

Fig. 7 Yaw rate of the AWD vehicle for driving condition case 1

위의 그림은 운행조건1에 대해서 차량이 선회제동 시 차량의 거동과 시간에 따른 요레이트를 나타내었다. 제동 시 가장 이상적인 거동은 정원 주행에 해당하는 그림의 점선 “Path”을 따라서 제동하는 것이 바람직하다. 차량제동시의 운동을 자세히 보기 위해서 중요 결과 부분을 오른쪽에 확대해서 나타냈다. 운행조건 1의 경우 “최대 중량”과 “모든 주행” 경우가 가장 “Path”에 가깝고, “도로 악조건”, “기존설계” 순서이다. 모든 운행조건에서 손 계산으로 구한 제동력 배분 비율이 기존설계보다는 “Path”에 가까워서 보다 향상된 제동 안정성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

가장 이상적인 제동력 배분은 모든 차축이 동시

에 잠김이 발생토록 하는 경우이다. 차량의 중량조건, 도로조건과 감가속도 조건에 따라서 최대 제동력의 크기가 달라지므로 모든 차량의 운행 조건을 만족하는 특정한 제동력 배분 값을 구하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 차량의 제동조건을 차량의 중량조건과 도로조건으로 나누어서 제동성능 평가를 수행하고 각 운행 조건의 상대적인 가중치를 부여하여 제동력 배분의 범위를 구했다. 차량의 운행 중량이 증가할수록 제동력의 상대적 배분이 앞 차축에 큰 비율로 적용된다. 도로의 조건이 좋지 않아서 상대적으로 낮은 도로-타이어 마찰 계수를 가진다면 제동력의 상대적인 배분을 비슷하게 적용한다. 제동력의 상대적인 배분에 있어서 중요한 변수는 제동 시 차량의 무게이동이다. 같은 감가속도의 조건일 경우 차량의 운행 중량이 클수록 제동력의 상대적 배분이 앞 차축에 크게 배분되는 것이 이상적이다. 또 다른 경우로 도로의 조건이 좋지 않아서 제동 시 적은 감가속도를 가지는 경우에는 무게이동이 적기 때문에 각 차축에 제동력 배분을 고르게 하는 것이 이상적이다. “Truck Sim”을 이용한 검증에서 기존설계 보다 제동 조건에 따라서 제동력 배분을 변화 시킨 모델이 보다 제동 안정성이 향상한 것을 볼 수 있었다. 2 절에서 수행한 해석내용의 결과를 아래에 정리하였다.

1) 제동력의 상대적인 배분에 있어서 중요한 변수는 제동 시 차량의 무게이동이다. 차량의 운행 중량이 증가할수록 제동력의 상대적 배분이 앞 차축에 큰 비율로 적용된다. 감가속도의 조건일 경우 차량의 운행 중량이 클수록 제동력의 상대적 배분이 앞 차축에 크게 배분되는 것이 이상적이다.
2) 상대적으로 낮은 도로-타이어 마찰 계수를 가진다면 제동력의 상대적인 배분을 비슷하게 한다. 도로의 조건이 좋지 않아서 제동 시 적은 감가속도를 가지는 경우에는 무게이동이 적기 때문에 각 차축에 제동력 배분을 고르게 하는 것이 이상적이다.
3) 상대적으로 낮은 도로-타이어 마찰 계수를 가진다면 제동력의 상대적인 배분을 비슷하게 한다. 도로의 조건이 좋지 않아서 제동 시 적은 감가속도를 가지는 경우에는 무게이동이 적기 때문에 각 차축에 제동력 배분을 고르게 하는 것이 이상적이다.
4) 4축 차량의 경우 제동 시 모든 경우에서 “부족조향(Under Steer)”을 보였다. 이는 차축이 4개이기 때문에 스핀이 발생하기 어려운 점을 감안 했을 때, 손 계산의 결과와 전산해석의 검증 결과와 일치한다.

후 기

논문은 2010년도 지식경제부 부품소재 기술개발사업 “대형 AWD용 더블 카단 구동축 및 휠 허브모듈 개발”의 연구비 지원과 2009년도 “홍익대학교 학술연구 진흥비” 지원에 의하여 진행 되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

References

1) M. Y. Suh, Y. K. Park and S. J. Kwon, “A Simulation Program for the Braking Characteristics of 8×4 Vehicles,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.119-128, 2001.
2) I. H. Jung, S. H. Lee, J. H. Seo and T. W. Park, “Development of Automotive Braking Performance Analysis Program Considering Dynamic Characteristic,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.2, pp.175-181, 2004.
3) A. Dunn, C. Tanner, D. Morr, F. Bayan, S. Noll, E. Sauer, A. Cornetto, A. Pearlman, B. Boffess, J. Wiechel and D. Guenther, “The Influence of Disablement of Various Brake on the Dry Stopping Performance and Stability of a Tractor-Semitrailer,” SAE 2009-01-0099, 2009.
4) T. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, pp.45-75, 1992.
5) http://iamaman.tistory.com/246
6) J. Happian-Smith, An Introduction to Modern Vehicle Design, Butterworth-Heinemann, pp.445-500, 2001.