

트럭의 화물적재량과 적재위치가 조안성 및 승차감에 미치는 영향에 관한 연구

Study on the Effect of the Payload and Weight Position on the Handling and Ride Comfort of a Truck

차현경* · 최규석** · 손정현***†

Hyun-Kyung Cha*, Gyu-Suk Choi** and Jeong-Hyun Sohn***†

(접수일 : 2013년 03월 12일, 수정일 : 2013년 06월 26일, 채택확정 : 2013년 07월 11일)

Abstract: In this paper, the payload condition is considered and computer simulation is carried out to analyze the dynamic behavior of the middle-sized truck under the condition with different weight and location. The computer model for the truck is established and ADAMS/Car is employed to simulate the truck vehicle. A single lane change and bump-pass simulation are performed to evaluate the performance according to the weight and the position of it. Effects of the location and weight of commercial vehicle are analyzed. According to the simulation results, the front deck is preferred as the load location.

Key Words : Truck, Payload, Handling Performance, Ride Comfort, Single Lane Change, Bump simulation

1. 서 론

상용차량이란 화물을 싣는 트럭과 승객을 싣는 버스, 승합차 등을 통틀어 말한다. 2011년 12월 기준, 국토해양부의 통계에 따르면 우리나라 총 자동차 등록대수 18,437,373대 중 상용차량이 차지하는 비중은 약 27 %이다.¹⁾ 경기침체로 인하여 2010년 이후로 상용차량의 판매 증가율은 잠시 주춤하고 있으나 판매 대수는 꾸준히 증가하고 있다. 상용차량이 차지하는 비중이 높아짐에 따라 상용차량의 승차감과 조안성(handling performance)에 대

한 연구가 필요하다. 여기서 조안성이란 조종안정 성능을 의미하는 것으로 운전자의 의도대로 차량이 잘 제어되는지를 뜻한다. 빠른 시간 내에 많은 양의 화물을 운송해야 하는 영업용 화물차량의 경우, 빈번한 고속운행과 허용범위 이상의 화물적재량을 흔히 볼 수 있다. 차량의 높은 하중 중심은 선회 시에 원심력과 강풍에 의한 횡력으로도 차량의 전복을 유발한다.

따라서 상용차량의 화물적재가 차량에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. Lee는 화물자동차의 길이 방향만을 고려한 적하중심 이동이 차량의

*** 손정현(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : jhsohn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6166

*차현경 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

**최규석 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과

† Jeong-Hyun Sohn(corresponding author) : Department of Mechanical and Automotive Engineering, Pukyong National University.

E-mail : jhsohn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6166

*Hyun-kyung Cha : Department of Mechanical Engineering, The Graduate School, Pukyong National University.

*Gyu-Suk Choi : Department of Mechanical Engineering, The Graduate School, Pukyong National University.

조안성에 미치는 영향을 연구하였고,²⁾ Kim 등은 차량지붕적재(roof loading)에 의한 차량의 적하중심 높이 변화에 따른 동적 특성 연구를 하였다.³⁾ 본 연구에서는 화물적재 무게에 따른 승차감과 조종성능과 갑판 중앙을 기준으로 전후좌우 방향으로의 화물적재 위치변화에 따른 승차감과 조종안정성을 연구하였다. 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS를 이용하여 중형트럭(2.5톤)을 모델링하여 범프 통과 시뮬레이션과 차선변경 시뮬레이션을 수행하여 차량의 바운싱(bouncing)을 통하여 승차감을, 횡가속도(lateral acceleration), 요각속도(yaw rate)와 롤각(roll angle)을 통하여 조종성능을 분석하였다.

2. 트럭 모델링

2.1 전륜 현가장치 모델링

전륜 현가장치는 Fig. 1에서 보듯이 총 10개의 body로 구성되어 있으며 4개의 회전(revolute)조인트, 3개의 구면(spherical)조인트, 3개의 유니버설조인트로 연결되어 있다. 작용하는 힘요소는 4개의 부시(bush)와 2개의 댐퍼(damper)가 있다. 부시는 현가링크와 프레임을 연결시켜 주는 부분에 사용되고, 댐퍼는 상하 완충작용을 한다. 현가 스프링 요소로는 일반적으로 사용되는 전형적인 겹판스프링을 사용하였다. Fig. 2에 사용된 겹판스프링 모델을 나타내었다. 겹판스프링의 모델링은 MSC사의 ADAMS LEAF/Toolkit을 사용하여 모델링하였다. 총 6개의 판으로 구성된 컨벤셔널(conventional) 겹판스프링 형태로 되어있다.

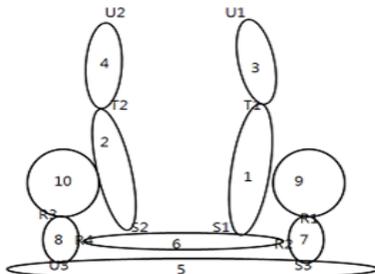


Fig. 1 Front suspension system

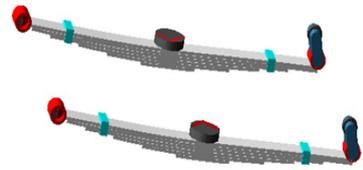


Fig. 2 Leaf spring of front suspension

2.2 후륜 현가장치 모델링

후륜 현가장치는 Fig. 3에서 보듯이 총 11개의 body로 구성되어 있으며 4개의 고정조인트, 2개의 회전조인트, 2개의 구면조인트, 2개의 유니버설조인트, 2개의 병진조인트로 구성되어 있다. 후륜 현가장치와 프레임에 연결해 주는 댐퍼의 끝단에 총 4개의 부시 요소가 사용되었다. 또한 차체 왼쪽과 오른쪽에 댐퍼가 장착되어 있다. 현가 스프링 요소로는 전형적인 겹판스프링 위에 2중 겹판스프링이 장착되어 있는 복합형 구조로 되어 있다. Fig. 4에 사용된 겹판스프링 모델을 표시하였다. 겹판스프링모델은 전륜과 같은 방법으로 ADAMS LEAF/Toolkit을 사용하여 모델링하였다.

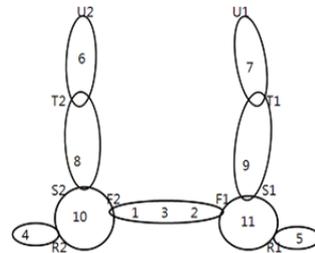


Fig. 3 Rear suspension system

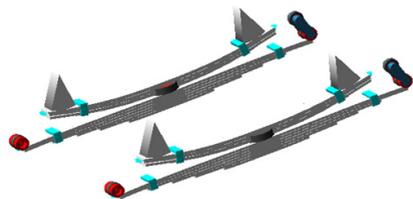


Fig. 4 Leaf spring of rear suspension

2.3 조향장치 모델링

Fig. 5는 본 연구에서 모델링한 조향장치 모델로써, 조향장치는 전체 9개의 물체로 구성되어 있

으며 조향 휠(steering wheel)의 움직임이 조향비(steering ratio)에 따라 피트만 암(Pitman arm)의 회전각이 결정되고 드래그링크(drag link)가 움직여 최종적으로 너클에 연결되어 있는 조향 타이로드를 움직여 조향을 하게 된다. 조향휠 각도에 따른 조향비는 1:22이다. 1개의 고정조인트, 4개의 회전조인트, 1개의 원통조인트, 그리고 각 조인트 사이에 함수 관계로 구축을 주는 4개의 커플(couple) 조인트로 모델링되어져 있다. 즉 조향 휠의 조향 회전각에 대해 최종적으로 피트만 암의 회전 각도가 출력되어 드래그링크를 밀고 당김으로써 조향이 될 수 있도록 구성되어져 있다.

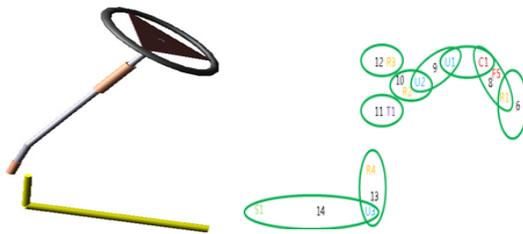


Fig. 5 steering system

2.4 전차량 모델링

본 연구에서 모델링 된 차량은 중형트럭(2.5tons)으로서, 차폭(overall width)은 1900mm이고, 차량 총길이(overall length)는 5100mm, 차량중량은 5200 kg이다. 본 차량은 상용 다물체동역학 해석 프로그램인 ADAMS/Car로 모델링하였다. 프레임을 제외한 모든 부품은 강체로 모델링 하였고 프레임은 79개의 모드좌표를 사용하는 탄성체로 모델링하였다. 전체 41개의 강체, 53개의 조인트, 4개의 커플러(coupler), 전·후륜 각각 2개의 스프링과 댐퍼와 겹판스프링으로 구성하였으며, 조향장치는 피트암과 드래그링크(drag link)로 구성하였으며, 타이어모델은 타이어의 자세 및 속도에 대해 노면과의 슬립율(slip ratio)을 계산하고 이를 이용해 타이어에 작용하는 힘을 해석적으로 계산하는 Fiala 타이어 모델을 사용하였다. 차량 모델의 전체 자유도는 2548이다. ADAMS로 모델링한 차량 모델을 Fig. 6에 도시하였다. 총 13개의 서브시스템으로 구성되어있다.

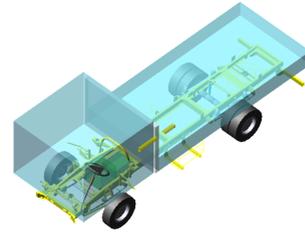


Fig. 6 Full vehicle model of Truck

3. 화물적재량에 따른 트럭 거동 해석

화물적재량에 따른 트럭의 특성을 분석하기 위해서 Table 1과 같은 조건으로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. Case A는 공차상태, case B는 최대적재상태이며 Case C는 최대적재 초과상태이다. 화물적재의 적재중량 규격은 적재중량의 11할이나 대부분의 화물트럭의 운전자들이 그 이상 초과 적재하는 경우가 많으므로 본 논문에서는 약 40할 정도의 과도한 적재를 초과 적재로 정의하였다.

Table 1 Condition of simulation according to weight

Cases	Condition
case A	unload
case B	max load (+2.5 tons)
case C	max load added (+3.5 tons)

3.1 범프 통과 시뮬레이션

화물적재량에 따른 트럭의 승차감 해석을 위해서 Fig. 7과 같이 국토해양부 기준에 의거한 큰 도로에서 흔히 볼 수 있는 과속방지턱과 동일한 제원의 범프(bump)를 정현과 함수로 노면데이터(road data)를 생성하여 초기속도는 40 kph로 범프 통과 시뮬레이션을 수행하였다.



Fig. 7 Bump road data

Fig. 8~10에 각각 수직변위, 수직속도와 수직가속도를 나타내었다. Fig. 8은 수직변위를 나타낸 것으로 적재하중에 따른 수직거동에 대한 차이를 확인 할 수 있다. Fig. 9에서는 전륜이 범프를 통과하는 1초 때에는 case 별로 차이가 없으나 전륜이 범프를 통과한 후에는 case A가 수직속도가 가장 빠르게 수렴을 하며, case B, C는 상대적으로 큰 진폭을 보인다.

본 논문에서는 Fig. 10의 수직가속도 결과를 이용하여 승차감지수로 J factor를 계산하였다. 식 (1)은 J factor로써 차체 수직가속도의 최대, 최소값의 절댓값을 산술평균한 값이다.⁵⁾

$$J = \frac{P_t + P_b}{2} \quad (1)$$

Table 2는 각 case별 J factor를 나타내었다. J factor의 수치가 최소일수록 승차감이 좋다고 볼 수 있다. Case C가 가장 높은 수치를 나타내었고 case A와 B는 큰 차이를 보이지는 않았다.⁸⁾

Table 2 J factor according to weight

Cases	J factor
case A	7.30
case B	7.29
case C	7.33

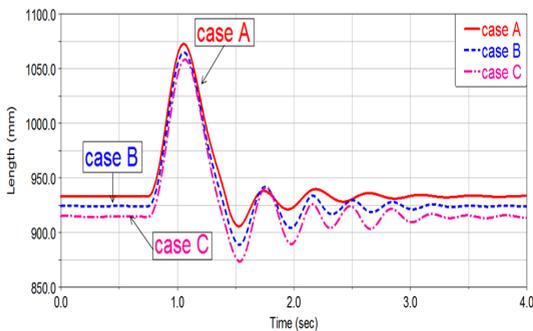


Fig. 8 Vertical displacement according to weight in Bump-pass

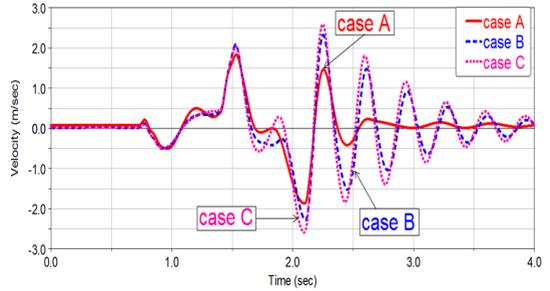


Fig. 9 Vertical velocity according to weight in Bump-pass

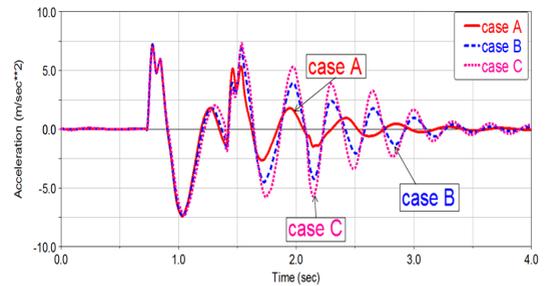


Fig. 10 Vertical acceleration according to weight in Bump-pass

3.2 단일차선변경 시뮬레이션

화물적재량에 따른 트럭의 조종성능을 분석하기 위해 Fig. 11과 같은 조향 입력값을 주어 단일차선변경 시뮬레이션을 수행하였다. 입력은 초기 속도 60 kph, 최대 조향각 180°를 3초간 사인파로 주었다. 횡방향의 응답을 알아보기 위해 Fig. 12~14에 각각 횡가속도, 요각속도 및 롤각을 나타내었다.

Fig. 12에 횡가속도에서 크기 값은 동일하나 적재하중이 증가할수록 선회시 지연효과가 있는 것으로 나왔다. Fig. 13에서 요각속도를 통하여 case A가 가장 빠른 선회응답을 보였으며, case B, C 순서로 선회응답을 보였다. 높은 적하중심을 가지며 적재화물로 인한 큰 하중을 가지는 트럭이 주로 노출되어 있는 전복사고의 위험성을 보기위해 Fig. 14에 롤각을 나타내었다. 적재화물이 많은 순서인 case C-B-A 순으로 높은 롤각이 측정되었으며 적재화물무게와 전복의 위험성 관계를 보여준다.

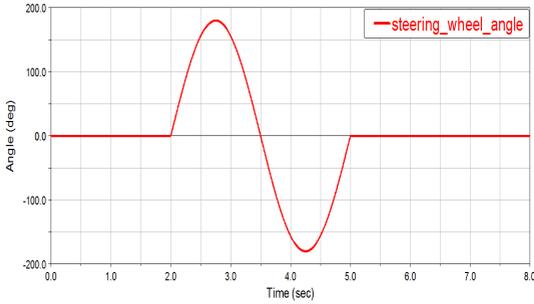


Fig. 11 Steering input data in SLC

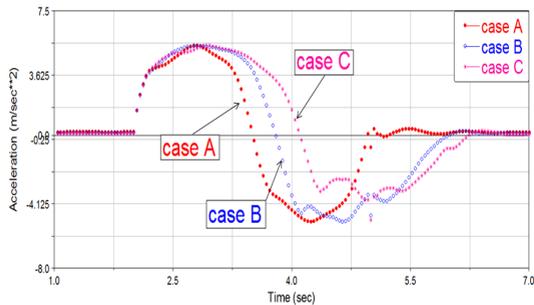


Fig. 12 Lateral acceleration according to weight in SLC

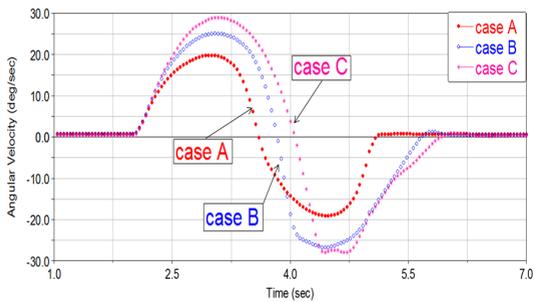


Fig. 13 Yaw rate according to weight in SLC

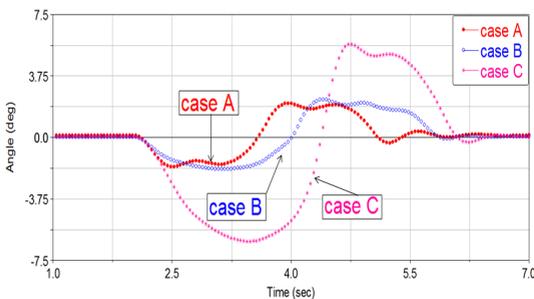


Fig. 14 Roll angle according to weight in SLC

Table 3 Roll change and Responsibility according to weight

Cases	Roll change	Responsibility
case A	3.83	3 %
case B	4.19	9 %
case C	12.03	16 %

Table 3에는 Fig. 12~13에서 나타낸 데이터를 통하여 조안성을 정량화하였다. 단일차선변경에 의한 롤각의 변화량을 Roll change로 나타내었다. 조향입력에 대한 응답성을 보기 위해서 조향입력 시간과 응답시간의 차이를 백분율 계산하여 Responsibility로 나타내었다. 수치가 클수록 응답성이 느림을 나타낸다.

4. 화물적재 위치에 따른 트럭 거동 해석

화물적재 위치에 따른 트럭의 특성을 분석하기 위해서 Table 4과 같은 조건으로 나누어 크기 1m × 1m × 0.3m, 무게 1ton 의 화물 더미를 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 트럭에 화물을 싣는 갑판부분의 중심을 전후좌우 네 방향으로 나누었으며, case 1은 1m 앞, case 2는 1m 후, case 3은 1m 좌, case 4는 1m 우측에 있도록 위치를 고정하였다.

Table 4 Cases of weight location

Cases	Condition
case 1	front
case 2	rear
case 3	left
case 4	right

4.1 범프 통과 시뮬레이션

화물적재 위치에 따른 트럭의 승차감을 분석하기 위해서 범프 통과 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 15~17에 각각 수직변위, 속도 및 가속도를 나타내었다. 갑판의 측면방향으로 화물을 적재 한 case 3, 4는 거의 동일한 결과가 나왔으며, 트럭의 진행방향으로 화물을 적재 한 case 1, 2는 상당한

차이를 나타내었다. Case 2의 경우는 가장 큰 진폭과 낮은 수렴을 보였다. Table 5에 화물적재위치에 따른 네 case의 승차감 지수 J factor를 표시하였다. Case 2의 J factor가 다른 case에 비해 월등히 높은 수치를 나타내었다. Case 1의 경우는 case 3, 4에 비해 다소 높은 수치를 나타내었는데, case 1의 위치는 갑판의 앞쪽으로서 트럭 차체의 무게중심과 유사한 위치로서 일반적으로 화물자동차 운전자들이 주로 화물을 적재하는 위치이다. 수직가속도는 트럭의 운전자석(Cab) 부분을 측정함으로써 화물의 위치가 운전자석과 가까이 위치할 시에는 승차감에는 좋지 않은 결과를 보여주었다.

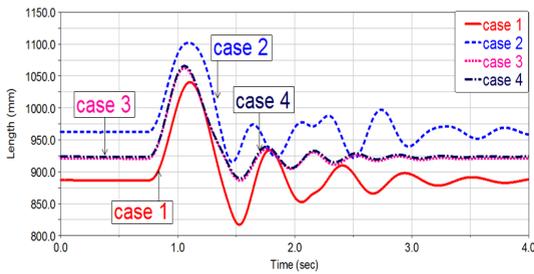


Fig. 15 Vertical displacement according to weight location in Bum-pass

Table 5 J factor (load location)

Cases	J factor
case 1	8.78
case 2	10.4
case 3	7.33
case 4	7.22

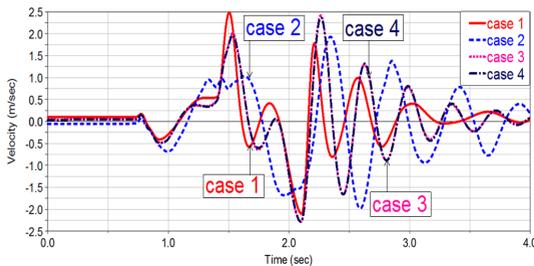


Fig. 16 Vertical velocity according to weight location in Bum-pass

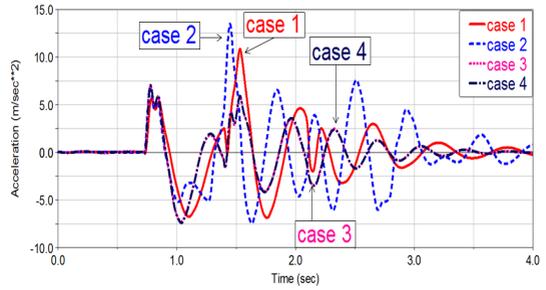


Fig. 17 Vertical acceleration according to weight location in Bum-pass

4.2 단일차선변경 시뮬레이션

화물적재 위치에 따른 트럭의 조종성능을 분석하기 위해 단일차선변경 시뮬레이션을 수행하였다. 횡방향의 응답을 알아보기 위해 Fig. 18~20에 각각 횡가속도, 요각속도, 롤각을 나타내었다. 단일차선변경 시의 선회응답은 case 1이 가장 빠른 응답을 보였으며, 그 다음으로는 case 4-3-2의 순서로 나타났다.

Case 1이 선회응답에서 가장 좋은 결과를 보인 것은 앞서 승차감 지수가 가장 높은 것과 대조적으로 조종성능과 승차감이 상반됨을 이 결과에서도 확인하였다. 화물적재 위치에 따른 전복사고의 위험성을 보기위해 Fig. 20에 단일차선변경 시 롤각을 측정하였다. Case 2가 가장 작은 롤각 변화를 보였다. 이는 공차상태의 트럭 차체 무게중심의 x좌표가 2258mm인 것으로 보아 운전자석(Cab)부분의 무게로 인해 x축 방향의 무게중심이 앞쪽으로 있음을 나타낸다. 따라서 case 2와 같이 갑판의 뒤쪽에 화물을 적재할 경우, 화물 적재상태의 트럭 차체의 무게중심이 앞쪽보다는 중앙으로 가까워져 롤각 변화의 안정적인 결과를 나타내었다. 또한 case 3, 4의 경우는 각각 갑판의 좌우에 화물을 적재한 경우로, 본 논문의 단일차선변경 시뮬레이션 입력조건에 따라 좌측 조향을 함으로써 차선을 변경할 시의 롤각을 나타낸 것이다.

Table 6에는 Fig. 19~20에 나타난 결과 데이터를 이용하여 Table 3과 같은 방법으로 조안성을 정량화하였다. 차선을 변경하기 위해 좌측으로 조향을 할 때 우측으로 작용하는 원심력으로 인하여 좌측

에 화물이 적재 된 case 3은 조향하는 순간에는 롤 각의 변화가 크지 않지만 차선변경 후에 크게 나타났으며, 우측에 화물이 적재된 case 4의 경우는 이와 반대의 결과를 보였다. 화물을 적재할 시에는 갑판의 앞쪽보다는 뒤쪽이 전복 위험도에서는 조금 유리한 결과가 나왔으나, 크게 차이 나지 않는다.

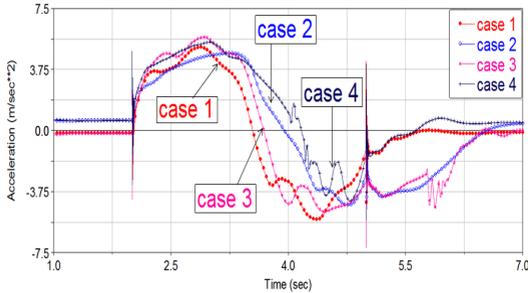


Fig. 18 Lateral acceleration according to location in SLC

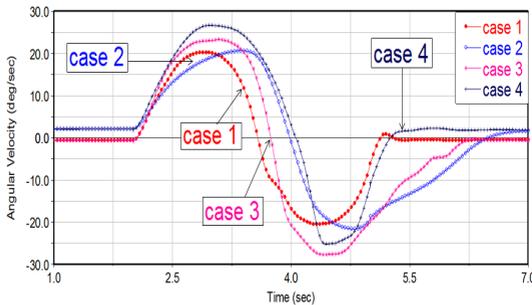


Fig. 19 Yaw rate according to location in SLC

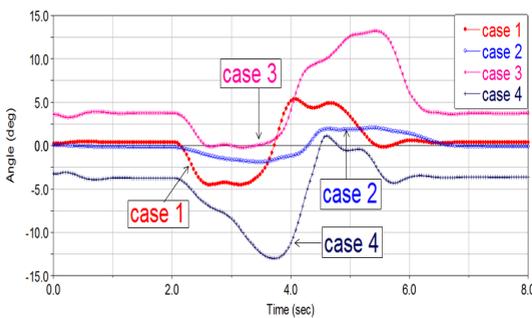


Fig. 20 Roll angle according to location in SLC

Table 6 Roll change and Responsibility according to location

Cases	Roll change	Responsibility
case 1	9.88	2 %
case 2	4.20	14 %
case 3	13.43	7 %
case 4	14.13	14 %

5. 결 론

본 논문에서는 화물적재 무게와 위치에 따른 트럭의 승차감 및 조종성능을 분석하였다.

화물 적재 무게에 대해서는 최대적재 초과상태인 case C의 J factor가 가장 높은 수치를 나타냈으며, 공차상태인 case A가 선회응답성이 빠르게 나타났다. 또한 공차상태인 case A의 롤각 변화가 가장 작았다.

화물 적재 위치에 대해서는 갑판의 앞쪽에 화물을 적재한 case 1의 J factor가 가장 높은 수치를 나타냈으며, 갑판의 앞쪽에 화물을 적재한 case 1의 선회응답성이 빠르게 나타났고, 갑판의 앞쪽, 뒤쪽에 화물을 적재한 case 1, 2의 롤각은 두 case가 큰 차이 없이 case 중 안정적인 값을 나타내었다.

따라서 트럭의 경우 화물 적재가 불가피하므로 화물을 적재하되 규정된 최대적재량을 초과하지 않아야 승차감에서 안정적인 수 있다. 화물을 적재 할 시에는 갑판의 앞쪽에 적재하는 것이 운전자의 승차감에는 불리할 수 있으나, 조종성능과 전복 위험도에서는 안정적인 위치로 예상된다.

본 연구결과는 트럭 운전자들의 화물 적재시 참고가 될 수 있으며 향후에 화물 적재량의 기준 범위를 선정할 시에 참고자료가 될 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

1. DACO, 2007, "The Trend and Prospect of Market of Korea Commercial Vehicle and Demand Industry", Jinhan M&B, pp. 3-27.
2. C. R. Lee, 1991, "Effect of the Payload Offset on the Vehicle Handling Properties", Proceedings of Chassis Division of the KSAE, pp. 2-3.
3. Y. W. Kim, 2006, "The Effect of Roof Loading on Vehicle Dynamic Characteristics", Proceedings of the KSAE Annual Fall Conference, pp. 1086-1091.
4. T. D. Gillespie, 2004, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers Inc, pp. 166-170.
5. S. J. Park, 2010, "Effect Analysis on Bump-Pass Simulation of Cruise Bus According to Input Current of MR-damper", Proceedings of the KSME Annual Spring Conference, pp. 34-38.
6. H. Y. Kang, 2001, "Evaluation on the Handling Performance of A Large Sized Truck", Proceedings of the KSAE Annual Fall Conference, pp. 872-877.
7. Y. R. Kim, C. Park and G. N. Wang, 2012, "A Fundamental Study on the Control of Ride Comfort and Attitude for In-wheel Motor Vehicles", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 91-97.
8. T. H. Kang and W. K. Back, 2002, "Ride Analysis of A Semi-Active Suspension Seat with Sky - Hook Control", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 33-39.