

실험계획법을 이용한 대형트럭 조종성 향상을 위한 설계인자 최적조합에 관한 연구

문일동[†] · 이동환^{**} · 오재윤^{**}

(2003년 11월 13일 접수, 2004년 4월 6일 심사완료)

A Study on Optimal Combination of Design Parameters for Improving Handling Performance of a Large Truck Using Design of Experiments

Il-Dong Moon, Dong-Hwan Lee and Chae-Youn Oh

Key Words : Analysis of Variance(분산 분석), Design of Experiments(실험계획법), Computer Model(컴퓨터 모델), Double Lane Change(이중 차선 변경), Factor Effect Analysis(요인 효과 분석), Finite Element Model(유한요소 모델), Optimal Combination(최적조합), Table of Orthogonal Arrays(직교배열표)

Abstract

This paper presents a scheme for finding an optimal combination of design parameters affecting on the handling performance of a large truck using design of experiments. The average of the sum of peak-to-peak roll angles at the first and second part of the double lane is used as an objective function for design of experiments. Six design parameters are selected from all possible parameters affecting on the handling performance. The table of orthogonal arrays is made by 27 times simulations. A computational model of a large truck is developed by MSC/NASTRAN and MSC/ADAMS, and verified the reliability of it with the results of vehicle tests performed in a double lane change course. It is used for the simulations. Analyses of variance and factor effect of the table of orthogonal arrays are performed. This paper proposes an optimal combination of those six design parameters for improving the handling performance of the large truck.

1. 서 론

최근에 급속하게 고속화 도로망이 구축됨에 따라서 보다 많은 제품을 좀 더 안전하고 빠르게 배달하기 위해 대형트럭의 고성능화가 요구되고 있다. 이에 따라 우수한 조종성(handling)과 더불어 주행 성능의 기본인 승차감(ride comfort)과 관련한 대형트럭의 동특성을 향상시키기 위한 연구들이

활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁾ 특히 차량 개발 초기 단계에서는 개념설계(concept design)안이 만족스러운 동특성을 갖추기 어렵기 때문에 반복적인 실차 시험 및 단품시험과 설계인자(design parameter)의 조절을 수행하는 튜닝 과정이 반드시 필요하게 된다. 이러한 과정에서 컴퓨터 모델을 이용하면 차량 개발 시간을 단축할 수 있고 설계인자의 물성치를 여러 가지로 바꾸어서 모의시험을 수행할 수 있으며, 또한 시험운전자의 위험이 상존한 시험조건에 대해서도 다양하게 모의시험을 수행할 수 있다. 따라서 컴퓨터 모델을 이용하여 모의시험을 수행하고, 조종성에 영향을 미치는 설계인자에 대한 최적조합을 구할 수 있다면 대형트럭 개발 단계에서 매우 유용할 것이다.

고속 차선 변경시 차체 슬립각 발생을 최소화시키기 위한 설계점 위치변경 검토에 관한 연구가

[†] 책임저자, 회원, 대우상용차부
E-mail : moonid68@daum.net
TEL : (063)469-3383 FAX : (063)469-3600
^{*} 전북대학교 기계항공시스템공학부
E-mail : hsb9020@unitel.co.kr
^{**} 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부
E-mail : ohcy@chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2377 FAX : (063)270-2388

다꾸찌법(Taguchi method)을 이용하여 이루어졌다.⁽²⁾ 또한 탄성효과를 고려한 다물체 동역학 이론을 이용하여 소형버스 모델을 구성하고 실차시험과의 비교를 통해 타당성을 검증하기 위한 연구도 이루어졌다⁽³⁾. 강체와 유연 다물체 동역학 기법을 이용하여 스포츠 유틸리티 차량의 주행중 범프 통과시 프레임에 대한 동응력 해석을 수행하여 시험과 비교 평가하였다⁽⁴⁾. 그러나 컴퓨터 모델을 이용하여 대형트럭의 조종성 향상을 위한 설계인자의 최적조합을 도출에 관한 연구 결과는 아직까지 보고되지 않았다.

본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 인자들의 최적조합을 도출하기 위한 방안을 제시한다. 실험계획법을 위한 특성함수로는 이중차선의 전반부와 후반부를 각 변화량 합의 평균값을 이용한다. 직교배열표 작성을 위해 MSC/NASTRAN과 MSC/ADAMS를 이용하여 개발하여 실차시험을 통해 신뢰성을 검증한 대형트럭의 컴퓨터 모델을 이용하여 모의시험을 수행한다. 직교배열표의 분산분석과 요인분석을 통해 대형트럭의 조종성 향상을 위한 설계인자의 최적조합을 도출한다.

2. 유연 다물체 컴퓨터 모델 개발

본 논문에서 이용한 대형트럭 프레임은 좌,우 사이드 멤버(side member), 4개의 크로스 멤버(cross member), 2개의 내부 보강재(inner stiffener), 위,아래 2개의 거셋(gusset) 등으로 구성된다. 프레임은 테크를 지지함과 동시에 사시 구성 부품인 엔진 및 구동 장치, 캡, 조향장치, 연료탱크, 배터리 등의 스프링 상중량(sprung mass) 부품을 결합하고 지지하며, 스프링 상중량 부품을 현가장치를 매개로 하여 스프링 하중량(unsprung mass)에 전달하는 역할을 하는 대형트럭의 가장 중요한 구조물이다. 프레임의 형상은 사다리형이며 사이드 멤버는 크로스 멤버에 플랜지 면을 체결하는 구조로 연결하였다.

대형트럭 프레임의 유한요소 모델링에는 MSC/PATRAN⁽⁶⁾을 이용하였고, 유연 다물체 동역학 해석에 필요한 유한요소 데이터를 얻기 위한 진동모드(normal mode) 해석에는 MSC/NASTRAN⁽⁷⁾을 이용하였다. 유한요소 프레임은 쉘 요소(shell element)와 집중 질량 요소(lumped mass) 및 강체

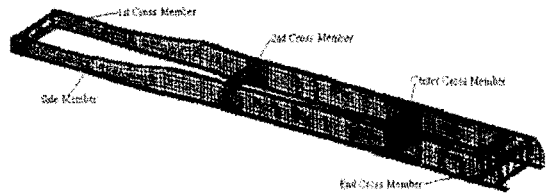
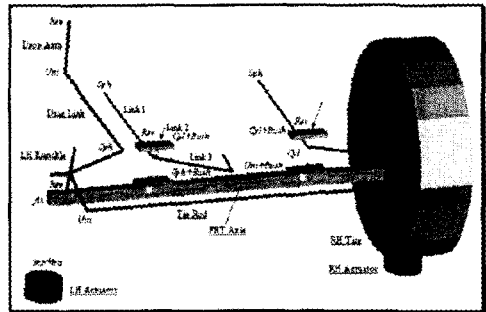
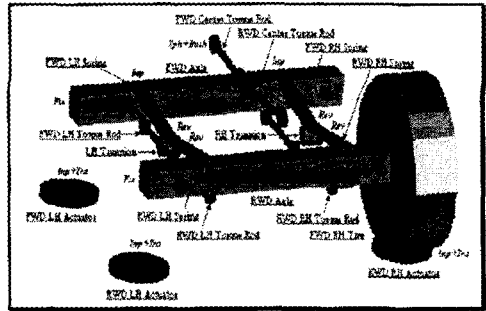


Fig. 1 The finite element model of the heavy truck frame

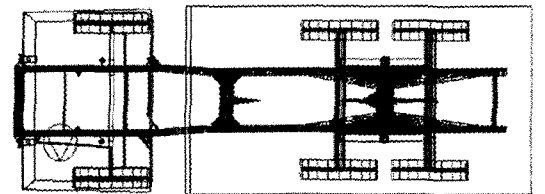


(a) Front suspension & steering system

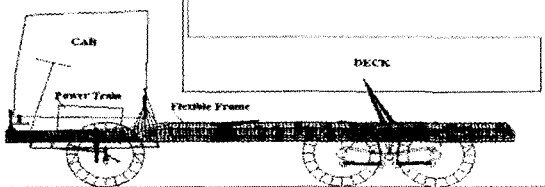


(b) Rear chassis suspension system

Fig. 2 Schematic diagram for ADAMS modeling of the each sub-system



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 3 The ADAMS computer model of the heavy truck

요소(RBE 2) 등을 사용하여 모델링하였다. 프레임의 유한요소 모델링에 사용된 총 셀 요소의 개수는 16,398개이다. 기타 프레임에 장착되는 연료탱크, 배터리 등은 프레임 설계시 주요 관심 부위가 아니므로 형상은 고려하지 않고 집중 질량 요소로 간단하게 모델링하였다. 메시(mesh) 크기는 사이드 멤버는 30~50mm로 모델링을 수행하였고, 크로스 멤버는 20~30mm로 모델링을 수행하였다. 사이드 멤버와 크로스 멤버는 실제 차량에서는 볼트와 리벳으로 연결되어 있다. 유한요소 모델에서는 집중 질량 요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 1은 대형트럭 프레임의 유한요소 모델을 보여주고 있다.

Fig. 2(a)는 앞차축, 다관 스프링, 새클, 속 업소버, 드롭 암(drop arm), 드래그 링크(drag link), 너클(knuckle), 타이 로드(tie rod), 타이 로드 암(tie rod arm) 등으로 구성된 조향장치를 포함한 전방 현가 장치의 MSC/ADAMS 모델이다⁽¹⁾. 프레임과 드롭 암은 회전 조인트(revolute joint)로, 드롭 암과 드래그 링크는 유니버설 조인트(universal joint)로, 드래그 링크와 너클은 구 조인트(spherical joint)로, 타이 로드와 타이 로드 암은 유니버설 조인트와 구 조인트를 이용하여 연결한다. 그리고 다관 스프링의 링크 1은 프레임과 구 조인트로 연결하고 링크 2와는 회전 조인트와 회전 스프링으로 연결하고 링크 3은 링크 2와 회전 조인트와 회전 스프링으로 연결하며 새클과는 회전 조인트로 연결한다. 새클과 프레임은 유니버설 조인트로 연결하고 링크 2와 앞차축과는 부싱을 이용하여 연결한다⁽¹⁾.

Fig. 2(b)는 후륜 전차축, 후륜 후차축, 다관 스프링, 트러니언 브라켓(trunnion bracket), 로워/어퍼 토크 로드(lower & upper torque rod)로 구성된 후방 현가장치 모델을 보여준다. 다관 스프링은 2등분한 후 가상(dummy) 링크를 추가하여 트러니언 브라켓을 중심으로 회전할 수 있도록 회전 조인트와 회전 스프링을 이용하여 모델링하였다. 다관 스프링과 차축은 인플레인 조인트(in-plane joint)를 이용하여 연결하였고 차축과 토크 로드 연결은 부싱(bushing)으로 모델링하였다⁽¹⁾.

캡 시스템은 캡, 좌,우 로어 암(lower arm), 래터럴 바(lateral bar), 코일 스프링, 속 업소버, 스테빌라이저 바(stabilizer bar) 등으로 구성된다. 코일 스프링은 선형 스프링으로 모델링하였으며, 범프 스톱퍼(bump stopper)는 코일 스프링과 연동하여 작동되는 요소로서 초기 구간에서는 선형 스프링 형

태로 작동하고 범프 스톱퍼에 접촉되는 위치에서부터는 강성이 급격히 증가하도록 모델링하였다. 속 업소버(shock absorber)는 단품시험을 통해 구한 속도와 감쇠력 사이의 비선형 관계를 스플라인 함수를 이용하여 모델링하였다. 스테빌라이저 바는 비틀림과 굽힘 효과를 고려하기 위하여 빔(beam) 요소를 이용하여 모델링하였다.

본 논문에서는 MSC/ADAMS를 이용하여 개발한 대형트럭 컴퓨터 모델과 MSC/NASTRAN을 이용하여 개발한 유한요소 프레임 모델을 링크하여 대형트럭의 유연 다물체 컴퓨터 모델을 구성하였다. 구성된 프레임의 유한요소 모델을 이용하여 생성된 MSC/NASTRAN 실행 파일을 구성하였다. 이 실행 파일을 DMAP(Direct Matrix Abstraction Program) 모듈을 이용하여 진동 모드 해석(SOL 103)을 수행하였다. 해석을 수행하면 절점(node) 번호, 고유진동수(natural frequency)와 모드형상(mode shape) 등에 관한 정보가 OUTPUT(*.out) 파일에 저장된다. 이 해석 결과 파일을 MSC/ADAMS 컴퓨터 모델에서 링크할 수 있는 데이터 형태로 변환시켜 주어야 한다. 이 작업을 위해 MSC/ADAMS FLEX 모듈을 이용하여 MNF(Modal Neutral File) 파일을 생성하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 MNF 파일에 절점 번호, 고유진동수와 모드형상에 대한 정보를 저장하였다.

Fig. 3은 MSC/ADAMS와 MSC/NASTRAN을 이용하여 개발한 유연 다물체 컴퓨터 모델을 상면에서 본 모습과 측면에서 본 모습을 보여주고 있다.

3. 개발된 컴퓨터 모델의 신뢰성 검증

개발된 대형트럭의 유연 다물체 컴퓨터 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 실차시험을 수행하였다. 실차시험은 ISO/TR 3888⁽⁸⁾ 규정에 따른 이중 차선 변경 시험로에서 수행하였다. 계측장비로는 차량의 횡 가속도와 요 각속도를 측정할 수 있는 자이로미터와 가속도계를 설치하였으며 조향 휠 각을 측정할 수 있는 실차시험용 조향 핸들을 부착하였다. 그리고 측정된 데이터를 수집하여 처리하기 위한 휴대용 노트북을 설치하였다. 실차 주행 시험은 공차 상태에서 차량의 주행속도가 50km/h, 60km/h의 등속 상태에서 수행하였다. 측정 항목은 조종성을 평가하는 주요 항목으로 고려되는 캡의 질량 중심점에서 롤 각, 횡 가속도, 요 각속도를 선정하였다.

Fig. 4는 주행속도 50km/h에서 프레임을 유한요

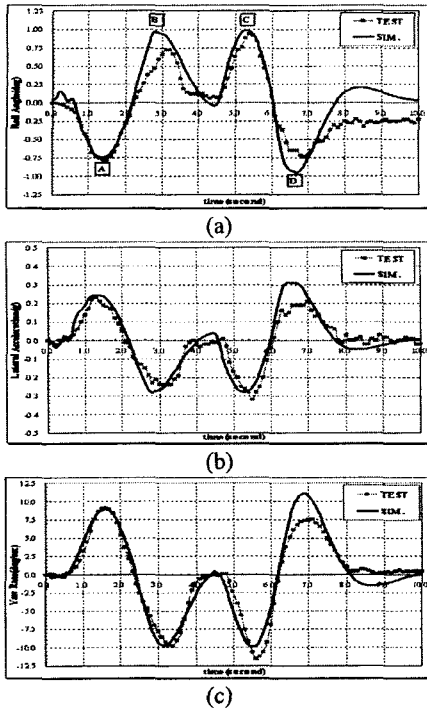


Fig. 4 Results comparison of double lane change test and simulation, V=50km/h (a)roll angle (b)lateral acceleration) (c)yaw rate

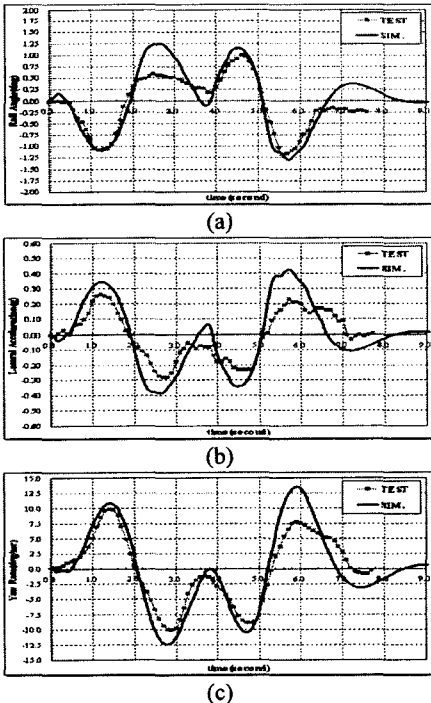


Fig. 5 Results comparison of double lane change test and simulation, V=60km/h (a)roll angle (b)lateral acceleration) (c)yaw rate

소 해석을 통하여 유연체로 고려하여 개발된 유연 다물체 컴퓨터 모델을 이용하여 수행한 이중 차선 변경 모의시험 결과와 실차 대형트럭을 이용하여 이중 차선 변경 시험을 수행한 결과를 비교한 것이다. Fig. 5는 주행속도 60km/h에서 프레임을 유한 요소 해석을 통하여 유연체로 고려하여 개발된 유연 다물체 컴퓨터 모델을 이용하여 수행한 이중 차선 변경 모의시험 결과와 실차 대형트럭을 이용하여 이중 차선 변경 시험을 수행한 결과를 비교한 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 프레임을 유연체로 모델링한 대형트럭 컴퓨터 모델은 이중 차선 변경 과정에서 프레임의 비틀림 모우드를 적절하게 모사할 수 있으므로 해서 모든 주행시험 조건에서 롤 각, 횡 가속도와 요 각속도의 실차시험 결과를 피크 값 뿐 만 아니라 경향까지도 매우 근사하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 프레임을 유연체로 고려한 대형트럭 모델은 상당한 신뢰성을 가지고 실차시험 결과를 예측할 수 있을 것이다.

4. 설계인자의 최적조합 도출

본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 설계인자의 최적조합을 도출하였다. 실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 수행하고 데이터를 어떻게 취하며 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수로 최대의 결과를 얻을 수 있는가를 계획하는 기법이다⁹⁾. 이중 차선 변경 시험로에서 실차시험을 통하여 신뢰성이 검증된 유연 다물체 컴퓨터 모델을 이용하여 모의시험을 수행하여 조종성에 영향을 미치는 설계인자의 최적조합을 도출하였다.

4.1 특성함수 및 인자 선정

실험계획법을 수행하기 위해서는 실험에 적절한 특성함수가 정의되어야 하고 실험에 적합한 설계인자를 선정해야 하며 선정된 설계인자에 대한 수준수를 선택하여야 한다. 대형트럭의 상질량이 동일한 차량에 대해서 동일한 이중 차선 변경로를 일정한 주행속도로 주행했을 때 롤 각은 상질량이 같다고 하더라도 해석조건에 대해서 스프링 및 속업소버와 같은 설계인자의 조합에 민감하게 반응한다. 그러나 횡가속도와 요 속도 등은 설계변수 조합의 변화에 그다지 민감하지 못하다. 그래서 대형트럭의 조종성 평가를 위해 운전자 위치에서

를 각 변화량만으로 특성함수를 구성하였다. 즉, 대형트럭의 조종성이 우수하다는 평가 기준은 동일한 조건으로 이중 차선 변경 모의시험을 수행하였을 때 운전자 위치에서의 전반 차선 변경할 때와 후반 차선 변경할 때의 **peak to peak** 를 각 변화량 합 의 평균을 최소화하는 것으로 하였다. 그래서 조종성에 영향을 미치는 설계인자의 최적조합을 도출하기 위하여 본 논문에서는 식 (1)과 같이 특성함수를 정의하였다.

$$\text{Minimize } \Psi(\phi) = \left(\frac{R_1(\phi) + R_2(\phi)}{2} \right) \quad (1)$$

여기서, $R_1(\phi)$ 은 이중 차선 변경 모의시험을 수행할 때 전반 차선 변경에 의해서 발생하는 캡 질량 중심점에서의 **peak to peak**(Fig. 4(a)의 점 A에서 점 B까지) 를 각을 의미하며, $R_2(\phi)$ 는 이중 차선 변경 모의시험을 할 때 후반 차선 변경에 의해서 발생하는 캡 질량 중심점에서의 **peak to peak**(Fig. 4(a)의 점 C에서 점 D까지) 를 각을 의미한다.

대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 설계인자의 최적조합을 도출하는 데 있어서 인자와 인자의 수준을 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 인자란 특성함수에 영향을 미친다고 생각되는 무수히 많이 존재하는 요인들 중에서 실험에 직접 이용하는 요인을 의미하며, 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준이라고 부르고, 이 인자의 수준으로 취한 값의 수를 수준수라고 한다.⁽⁹⁾ 본 논문에서의 인자의 선정 기준은 대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 모든 요인을 대상으로 하였으며, 인자 선정의 우선 순위는 대형트럭의 조종성에 영향을 가장 많이 미치는 인자를 대상으로 설계 및 형상 변경이 용이한 인자를 우선적으로 선정하였다. 대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 주도적인 인자는 전방 현가장치의 다판 스프링 강성 및 판간 마찰에 의해서 발생하는 구조감쇠와 초기 설계시 가장 중요하게 고려되는 기구학적 설계점 그리고 전륜 휠의 토우, 캠버, 캐스터, 킹핀과 같은 휠얼라인먼트, 후방 현가장치의 다판 스프링 강성 및 판간 마찰에 의한 구조감쇠와 초기 설계시 가장 중요하게 고려되는 기구학적 설계점 및 전,후방 현가장치의 다판 스프링 트레드와 휠 베이스, 샤시 속 업소버의 감쇠계수 및 장착위치, 캡 현가장치의 전,후 코일스프링의 강성, 전,후 속 업소버의 감쇠계수 등이 있다. 또한 프레임의 굽힘 및 비틀

Table 1 The design parameters and levels for the design of experiments

No.	factor \ level	level 0	level 1	level 2
A	chassis front leaf spring stiffness	current × 0.8	current	current × 1.2
B	chassis rear leaf spring stiffness	current × 0.8	current	current × 1.2
C	chassis shock absorber front damping coefficient	current × 0.6	current	current × 1.4
D	cab front & rear coil spring stiffness	current × 0.8	current	current × 1.2
F	cab shock absorber front damping coefficient	current × 0.6	current	current × 1.4
G	cab shock absorber rear damping coefficient	current × 0.6	current	current × 1.4

림 강성과 토크 로드 부시의 강성, 비선형 특성을 갖고 있는 타이어의 수직 강성, 횡 강성, 전후 강성 및 타이어의 트레드 그리고 스프링 상,하 질량 및 엔진 마운트 강성들도 주요인자이다.

실험계획법에서 실험의 목적을 달성하기 위하여 이와 관련된 인자는 모두 고려하는 것이 바람직하다. 그러나 과다한 인자의 수는 도리어 실험의 정도를 떨어뜨리고 실험비용이 너무 크기 때문에 실험의 목적을 달성할 수 있다고 생각되는 범위 내에서 최소의 인자를 택하는 것이 필요하다. 따라서 상기와 같이 기술한 인자들 중에서 대형트럭의 조종성에 주도적인 영향을 미치면서 설계변경이 용이한 인자를 기준으로 하여 조종성 평가를 위한 최적화 해석을 수행하는데 필요한 인자를 Table 1과 같이 선정하였다. 이와 같은 인자를 이용하여 실험계획법을 수행하기 위한 인자의 수준수는 모든 인자에 대해서 3수준으로 정하였으며 수준범위는 가능한 인자가 변경될 수 있는 최소치와 최대치로 선정하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 다판 스프링과 코일 스프링은 현실적으로 설계변경이 가능한 정도인 ±20%로 정하였으며 속 업소버는 ±40%로 정하였다.

적당한 설계인자들을 선정한 후에는 교호작용이 있는 인자의 교호수와 수준수로 직교배열표를 작성하였다. 직교배열표를 사용하는 경우 설계인자의 조합에 대해 일부실시법을 사용하므로 최소한의 모의시험 횟수로 전조합 실시법과 유사한 실험 결과를 얻을 수 있다.⁽⁹⁾ 본 논문에서는 식 (2)와 같은 3수준계의 직교배열표를 작성하였다.

$$L_{3^m}(3^{m-1} \ 2) \quad (2)$$

여기서, m은 2 이상의 정수(integer)이고, 3^m은 실험의 크기이며 3은 수준수를 나타낸다. (3^m-1)/2= (실험횟수-1)/2은 직교배열표의 열의 수를 나타낸다. 따라서 본 논문에서 수준이 3수준(m=3)일 때 직교배열표는 L₂₇(3¹³)가 선정되며, 실험의 총 횟수는 27회이고 열의 수는 13임을 알 수 있다.

Table 2는 설계인자의 최적조합을 구하기 위하여 본 논문에서 이용한 3수준(m=3) 직교배열표를 보여주고 있다. Table 2에서 보는 바와 같이 모의 시험의 총 횟수는 27회, 열의 수는 13이고, 숫자 0, 1, 2는 각각 인자의 수준 즉, 0은 1수준, 1은 2수준, 2는 3수준을 의미한다. 직교배열표에서 주인자는 A, B, C, D, F, G의 6인자와 A×F, A×G 교호작용을 고려하였다. 여기서 선정된 교호작용은 차량설계 경험과 지식 등을 토대로 하여 정하였다. 개발되어 검증된 대형트럭 유연 다물체 컴퓨터 모델을 이용하여 Table 2에서 제시하는 각 경우에 대해 이중 차선 변경 모의 시험을 수행하여 구한 특성함수 값을 Table 2의 맨 오른쪽에 정리하였다. 모의 시험은 공차상태에서 50km/h의 속도로 등속 주행하였다. 주행속도를 50km/h로 선택한 이유는 이 속도보다 높은 속도에서는 이중 차선 변경 시험로 전 구간에서 안정적으로 정상 상태 주행을 수행하기가 어렵기 때문이다. Table 2에서 T는 식 (1)의 특성함수 값의 총합을 의미하며 CT는 수정항으로써 식 (3)과 같은 관계를 나타낸다.

$$CT = T^2/N \quad (3)$$

여기서 N은 실험의 총 횟수이다.

4.2 최적조합 도출

본 절에서는 Table 2의 직교배열표를 이용하여 조종성 향상을 위한 설계인자의 최적조합을 도출하기 위한 방법을 제시한다.

Table 3(a)~(c)는 유연 다물체 컴퓨터 모델을 이용하여 총 27회의 이중 차선 변경 모의시험을 수행하여 구한 특성함수에 대한 분산 분석(Analysis of Variance; ANOVA)과 요인 효과 분석(factor effect analysis)을 Microsoft Excel 2000⁽¹⁰⁾을 이용하여 분석하였고, 요인 효과 분석 결과를 시각적으로 보기 쉽게 그래프로 나타내었다.

분산 분석이란 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을

Table 2 The orthogonal arrays in double lane change maneuver

No.	Row													simulated combination	objective function value
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A ₀ G ₀ F ₀ B ₀ C ₀ D ₀	2.01517
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	A ₀ G ₀ F ₁ B ₁ C ₁ D ₁	2.00360
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	A ₀ G ₀ F ₂ B ₂ C ₂ D ₂	2.00362
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	A ₀ G ₁ F ₀ B ₀ C ₁ D ₂	1.99295
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	A ₀ G ₁ F ₁ B ₂ C ₂ D ₀	2.01030
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	A ₀ G ₁ F ₂ B ₀ C ₀ D ₁	2.00319
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	A ₀ G ₂ F ₀ B ₀ C ₂ D ₁	2.00158
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	A ₀ G ₂ F ₁ B ₀ C ₀ D ₂	1.99266
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	A ₀ G ₂ F ₂ B ₀ C ₁ D ₀	2.01036
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	A ₁ G ₀ F ₀ B ₁ C ₂ D ₁	1.81643
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	A ₁ G ₀ F ₁ B ₂ C ₀ D ₂	1.80722
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	A ₁ G ₀ F ₂ B ₀ C ₁ D ₀	1.83807
13	1	1	2	0	0	1	2	0	1	2	0	1	2	A ₁ G ₁ F ₀ B ₁ C ₂ D ₁	1.81734
14	1	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	A ₁ G ₁ F ₁ B ₂ C ₀ D ₂	1.80795
15	1	1	2	0	2	0	1	2	0	1	2	0	1	A ₁ G ₁ F ₂ B ₀ C ₁ D ₀	1.83482
16	1	2	0	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	A ₁ G ₂ F ₀ B ₁ C ₂ D ₁	1.81799
17	1	2	0	1	1	2	0	1	2	0	1	2	0	A ₁ G ₂ F ₁ B ₂ C ₀ D ₂	1.81610
18	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	A ₁ G ₂ F ₂ B ₀ C ₁ D ₀	1.83186
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	A ₂ G ₀ F ₀ B ₂ C ₁ D ₂	1.71750
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	A ₂ G ₀ F ₁ B ₀ C ₂ D ₀	1.73694
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	A ₂ G ₀ F ₂ B ₀ C ₀ D ₁	1.72820
22	2	1	0	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	A ₂ G ₁ F ₀ B ₂ C ₁ D ₂	1.71784
23	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	A ₂ G ₁ F ₁ B ₀ C ₂ D ₀	1.73766
24	2	1	0	2	2	1	0	2	1	0	2	1	0	A ₂ G ₁ F ₂ B ₁ C ₀ D ₁	1.72862
25	2	2	1	0	0	2	1	0	2	1	0	2	1	A ₂ G ₂ F ₀ B ₂ C ₁ D ₂	1.72133
26	2	2	1	0	1	0	2	1	0	2	1	0	2	A ₂ G ₂ F ₁ B ₀ C ₂ D ₀	1.73874
27	2	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	A ₂ G ₂ F ₂ B ₁ C ₀ D ₁	1.72971
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	T =	49.97765
	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	CT =	92.50983

주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석 방법이다.⁽⁹⁾ 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도, 즉 본 논문에서 각 요인의 자유도는 각 인자의 수준수에서 1을 제외하면 구할 수 있으며, 본 논문에서는 자유도 2로 나누면 그 요인의 제곱 평균이 되며 오차 분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하고 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이다. 따라서 분산 분석은 편차제곱의 합을 비교하는 것이 아니라 제곱합의 평균을 비교하는 것이다.

Table 3(a)의 분산 분석 결과 즉, ANOVA 표를 보면 이중 차선 변경 모의시험을 통하여 특성함수에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 전방 현가장치(D)의 다관 스프링 강성(factor A)이라는 것을 확인할 수 있다. 분산분석표 F-검정 결과에서 A의 인자가 유의한 것으로 나타났고, D 인자는 F-value 값이 3이상이므로 약간의 유의성이 있다고 판단되며 그 외의 나머지 B, C, F, G, A×F, A×G 인자들은

Table 3 The ANOVA and factor effect analysis in double lane change maneuver(V=50km/h)

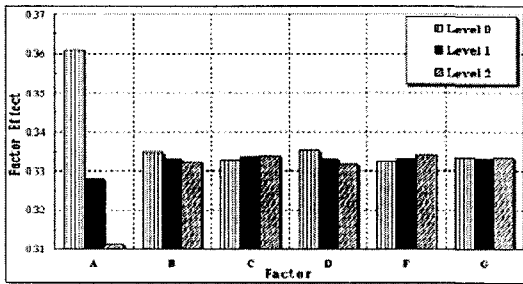
(a) ANOVA table

factor	sum of square(S)	freedom of degree(Φ)	mean square(V)	F ₀
A	0.35349	2	0.17674	654.59
B	0.00128	2	0.00064	2.37
C	0.00053	2	0.00027	1.0
D	0.00213	2	0.00107	3.96
F	0.00083	2	0.00042	1.56
G	0.00038	2	0.00019	0.70
A×F	0.00087	2	0.00044	1.63
A×G	0.00004	2	0.00002	0.07

(b) Factor effect analysis

factor	level 0	level 1	level 2
A	0.36083	0.32790	0.31127
B	0.33473	0.33305	0.33222
C	0.33272	0.33352	0.33376
D	0.33523	0.33308	0.33169
F	0.33251	0.33317	0.33432
G	0.33349	0.33316	0.33335

(c) Graph analysis



모두 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이 결과를 보면 대형트럭의 조종성 향상을 위해서는 전방 현가장치의 다판 스프링의 강성의 조율이 가장 중요하다 하는 것을 알 수 있다. 다음으로 캡 전,후 코일 스프링의 강성(factor D)이 대형트럭 조종성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 후방 현가장치의 다판 스프링 강성(factor B), 캡 전방 속 업소버 감쇠계수(factor F), 전방 현가장치의 속 업소버 감쇠계수(factor C) 순으로 대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

요인 효과 분석은 각 설계인자의 최적조합을 구하는데 이용되는 분석 방법이다. 본 논문에서 총 27회의 모의시험을 통하여 구한 결과를 각 인자에 대한 수준별 특성함수의 합을 전체 합으로 나누어 값으로 정리한 결과이다. 요인 효과 분석을 수행한 결과를 Table 3(b)에 나타내었다. Table 3(b)

에서 보는 바와 같이 전방 현가장치의 다판 스프링 강성(factor A)은 2수준일 때 특성함수 값이 가장 작은 결과를 보여주고 있다. 이것은 대형트럭의 조종성을 향상시키기 위해서는 전방 현가장치의 다판 스프링 강성을 높이는 방향으로 검토가 이루어져야 한다는 것을 의미한다. 또한 후방 현가장치의 다판 스프링 강성(factor B)은 2수준, 전방 현가장치의 속 업소버 감쇠계수(factor C)는 0수준, 캡 전,후 코일 스프링의 강성(factor D)은 2수준, 캡 전방 속 업소버의 감쇠계수(factor F)는 0수준, 캡 후방 속 업소버의 감쇠계수(factor G)는 1수준일 때 특성함수 값이 감소하였다.

Table 3(c)는 Table 3(b)를 그래프로 나타낸 것으로 전방 현가장치의 다판 스프링 강성(factor A)이 대형트럭의 롤 성능 변화에 가장 민감한 영향을 미치고 있음을 보여 준다. 조종성 향상은 차량이 선회 주행할 때 운전자 위치에서의 롤 각 변화가 작게 되는 것을 의미하기 때문에 이 그래프의 가장 아래쪽에 표시된 수준들의 조합이 본 논문에서 구하고자 하는 조종성을 개선할 수 있는 설계인자의 최적조합이다. 그러므로 이상과 같은 해석을 수행하여 구한 대형트럭의 조종성을 향상시키기 위한 최적조합(수율:당소특성)은 A₂B₂C₀D₂F₀G₁ 이다. 즉, 본 논문에서 대상 차량으로 선정된 대형트럭의 조종성을 향상시키기 위해서는 전방 현가장치와 후방 현가장치의 다판 스프링 강성(factor A, factor B)을 현 사양보다 크게 설계하고, 전방 현가장치의 속 업소버 감쇠계수(factor C)는 현 사양보다 작게 설계하고, 캡 전,후 코일 스프링의 강성(factor D)은 크게 설계하고, 캡 전방 속 업소버의 감쇠계수(factor F)는 작게 설계하고, 캡 후방 속 업소버의 감쇠계수(factor G)는 현 사양으로 재 설계가 이루어지면 조종성을 향상시킬 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 대형트럭의 조종성에 영향을 미치는 설계인자의 최적조합을 도출하기 위한 방법을 제시하였다. 실험계획법을 위한 특성함수는 캡 질량 중심점에서의 전반 차선 변경할 때와 후반 차선 변경할 때의 peak to peak 롤 각 변화량 합의 평균을 최소화하는 것으로 정의하였다. 설계인자는 조종성에 영향을 미치는 모든 요소를 대상으로 하여 조종성에 커다란 영향을 미치면서 설계 및 형상 변경이 용이한 인자 6개를 선정하여 해석에 이용하였다. 교호작용이 있는 인자들의 교호수와 수준수로 직교배열표를 작성하였다. 본 논문에서는 3

수준계의 직교배열표를 작성하기 위하여 총 27회의 모의시험을 수행하였다. 직교배열표 작성을 위한 모의시험에는 MSC/NASTRAN과 MSC/ADAMS를 이용하여 개발되고 실차시험을 통해 신뢰성이 검증된 유연 다물체 컴퓨터 모델을 이용하였다. 작성된 직교배열표의 분산 분석과 요인 분석을 통해 본 논문에서 사용된 대형트럭의 조종성 향상을 위해서는 전방 현가장치와 후방 현가장치의 다관 스프링 강성(factor A, factor B)을 현 사양보다 크게 하고 전방 현가장치의 속 업소버 감쇠계수(factor C)는 현 사양보다 작게 하며, 캡 전,후 코일 스프링의 강성(factor D)은 크게 하고, 캡 전방 속 업소버의 감쇠계수(factor F)는 작게 하고, 캡 후방 속 업소버의 감쇠계수(factor G)는 현 사양으로 하는 것이 최적조합이 됨을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Moon, I.D., Kwon, H.J. and Oh, C.Y., 2000, "Development of a Computer Model for the Turning Maneuver Analysis of a Heavy Truck," *KSAE*, Vol. 3, pp.121 ~ 129.
- (2) Kye, K.G., Choi, S.R., Jin, G and Choi, G.R., 1997, "Optimal Design of Vehicle Suspension System Using Taguchi Method," *DAEWOO Motor Com. TECHNICAL REVIEW '97*, pp.163~170.
- (3) Park, T.W., Yim, H.J., Lee, G.H., Jeong, I.H. and Park, C.J., 1999, "Development of Mini-Bus Ride Analysis Method," *KSAE*, Vol. 7, pp.149 ~ 154.
- (4) Seo, K.H., Ahn, K.W., Hwang, W.G., 1998, "Dynamic Stress Analysis of Flexible Multi-body Using DADS," *KSAE*, Vol. 6, pp.107 ~ 112.
- (5) MSC/ADAMS, 2001, "ADAMS User's Manual," Mac Neal-Schwendler Corporation., USA.
- (6) MSC/PATRAN User's Manual, 1994, MacNeal-Schwendler Corporation, USA.
- (7) MSC/NASTRAN User's Manual, 1994, MacNeal-Schwendler Corporation, USA.
- (8) SAE, 1975, "Test Procedure for a Severe Lane Change Manoeuvre," ISO Technical Report 3888.
- (9) Park, S.H., 1992, "Modern Experimental Design," Minyoungsa.
- (10) Mark. Dodge, Craig Stinson, 2002, "Microsoft Excel Version 2002 Inside Out," Microsoft © Press, USA.