

Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용한 확률적 차량동역학 해석

Stochastic Analysis for Vehicle Dynamics using the Monte-Carlo Simulation

탁 태 오* 주 재 훈**
Tak, Tae-oh Joo, Jae-hoon

Abstract

Monte-Carlo simulation technique has advantages over deterministic simulation in various engineering analysis since Monte-Carlo simulation can take into consideration of scattering of various design variables, which is inherent characteristics of physical world. In this work, Monte-Carlo simulation of steady-state cornering behavior of a truck with design variables like hard points and busing stiffness. The purpose of the simulation is to improve understeer gradient of the truck, which exhibits a small amount of instability when the lateral acceleration is about 0.4g. Through correlation analysis, design variables that have high impacts on the cornering behavior were selected, and significant performance improvement has been achieved by appropriately changing the high impact design variables.

키워드 : 확률적 모의 실험, 결정적 모의 실험, 정상원선회, 언더스티어 그래디언트
Keywords : Monte-Carlo simulation, Stochastic Simulation, Steady-State Cornering,
Understeer Gradient

1. 서론

1.1 개요

공학 전문분야에서 CAE(Computer Aided Engineering)의 비중은 점점 커져가고 있다. 수많은 해석 및 개발을 위한 알고리즘과 CAE 도구가 개발되었고, 비약적으로 빨라지는 컴퓨터의 처리속도를 이용하여 보다 복잡한 모델에 대한 시뮬레이션이 가능하게 되었다. 시뮬레이션은 물리세계를 모방하여 실행되는데, 이미 알려져 있거나 측정된 시스템의 물성치를 이용하여 해석을 위한 모델링이 이루어지고 시뮬레이션의 목적에 맞는 해석을

수행한다. 흔히 시뮬레이션에서는 실험조건, 경계조건, 설계변수 등의 입력값을 고정된 하나의 값으로 사용하여 진행이 되는데 이러한 실험 방법을 결정적 모의실험 (Deterministic Simulation)이라고 한다.

그러나 물리세계는 그 고유한 특성으로 불확실성 (uncertainty)을 갖고 있다. 실제 상황에서 실험 조건이나 경계조건, 설계변수의 값은 측정오차, 입력오차, 제작오차 등으로 인하여 하나의 값을 가지지 않고 어떤 값을 기준으로 분포를 이루게 된다. 이것은 시뮬레이션 과정이나 결과 분석에 확률통계적 접근을 요구한다. 이와 같은 사실은 가상의 공간에서 실행되는 결정적 모의실험이 실제의 물리세계의 불확실성을 반영하지 못하고 있고 시뮬레이션 결과에 대해 의심의 여지를 남기게 한다.

* 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 부교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 기계공학과 석사과정

결정적 모의 실험과 달리 확률적 모의실험(Stochastic Simulation or Monte Carlo Simulation)은 실험과정에 있을 수 있는 불확실한 요소를 반영하여 진행되는데[1,2], 임의로 생성된 여러 개의 입력값을 사용하여 시스템의 반응을 구하고 구해진 반응에 대한 통계적 분석을 통하여 모델의 설계 향상 및 검증을 가능하도록 한다.

1.2 연구 동향

가상공간에서 공학적 현상을 정밀하게 예측할 수 있는 다양한 CAE 도구가 개발되어 널리 사용되고 있다. 자동차 설계에 있어서도 가상공학이 널리 적용되어 Virtual Prototyping과 같은 가상설계와 Virtual Proving Ground와 같은 가상실험 등에 대한 연구가 활발하다. 그런데 가상실험의 결과의 신뢰도에 대한 의문이 제기되고 있다. 예를 들어 단 한번의 시물레이션을 통해 얻은 결과가 실제 실험데이터와 차이를 보인다면 시물레이션 모델의 신뢰성에 문제가 제기될 것이며, 반대로 실험데이터와 시물레이터의 결과가 우연히 근접한 결과를 보인다고 하더라도 시물레이션 모델이 실제 모델의 모든 거동을 설명해 주리라고 장담할 수 없다. 이것은 단 한번의 실험으로 이루어지는 결정적 모의실험이 모델의 거동이나 성능을 나타낼 충분한 양의 정보를 포함하고 있지 못하기 때문이다. 그래서 실제 실험의 불확실한 요소를 시물레이션에 반영하여 반복실험을 실시하고 확률 통계적인 분석이 가능한 확률적 모의실험의 필요성이 제시되어 왔다.

실험의 반복 수행은 상대적으로 많은 시간이 소요되나 현재 컴퓨터의 계산 능력의 발전으로 계산 시간에 대한 제약조건이 완화되어 확률적 모의실험의 적용범위가 급속히 확산되고 있는 추세이며, 확률적 모의실험에 대한 이론적 배경에 대한 통계학적인 연구가 많이 진행되고 있다. 이러한 시물레이션을 수행하기 위한 도구로서 미국의 EASi 사에서는 Meta-Computing 도구인 ST-ORM을 개발하여, 기존의 CAE 도구를 사용하여 확률적 모의실험을 실행하여 신뢰도 예측, 민감도해석, 모델검증(Model Validation), 강건설계(Robust Design), 반응표면 생성과 최적화 등을 수행할 수 있도록 하였다. 세계 유수의 자동차 회사들이 ST-ORM 프로그램을 현장에서 사용하고 있다. 그 외 자동차 충돌실험[6]과 FEM 해석에 확률적 모의실험을 적용한 사례뿐 아니라 실험방법 및 해석의 원리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[4,5,6]

1.3 연구 목적

차량의 조종안정성을 평가하기 위해서 조타 입력이나 외란에 대한 차량의 응답특성을 조사하는

주행시험을 실시한다. 이러한 주행시험중 대표적인 것이 정상 원선회 시험인데, 이 시험은 차량이 반지름이 일정한 원을 선회할 때 구심 가속도의 증가에 수반하는 핸들 조타각, 조타토크, 롤각 등을 측정한다. 특히 차량의 횡가속도 증가에 대한 핸들각 변화의 특성을 통해 언더스티어 그라디언트(Understeer Gradient)가 구해지는데 이것은 차량의 고유조향특성을 결정하는 대단히 중요한 인자이다. 차량의 언더스티어 특성은 차량 서스펜션의 기구정역학적 특성, 차량의 롤특성 그리고 타이어와 지면과의 미끄러짐 특성 등에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 차량의 조종안정성을 평가하기 위해서 통계적 해석방법을 사용하여 설계변수와 언더스티어 특성과의 관계를 밝히고자 한다.

본 연구에 사용된 차량은 후륜에 공기스프링을 장착한 상용트럭인데 이 차량의 수학적 모델은 다물체동역학 해석소프트웨어인 ADAMS를 이용하여 모델링 하였다. 확률적 모의실험을 위해서는 설계변수들에 대한 난수를 생성하고 반복 실험을 실시한 후 그 결과에 대해 통계학적인 분석을 수행해야 한다. 난수 생성 및 시물레이션의 제어는 Matlab을 이용하였으며 결과에 대한 통계 해석은 STATISTICA를 사용하였다.

2. 무작위 변수 설정 및 반복 실험 환경

2.1 변수 설정

차량의 언더스티어 특성은 차량 선회시 롤링에 의한 토와 캠버 변화, 컴플라이언스에 의한 토와 캠버 변화 그리고 타이어와 지면간의 그림력에 의해 결정된다. 그림 1은 차량이 진행방향에 대해 우회전시 언더스티어를 발생시키기 위한 각 바퀴의 토와 캠버 그리고 롤특성을 설명하고 있다. 토와 캠버각은 전륜과 후륜이 선회시 선회하고자 하는 방향의 반대로 조향이 발생되도록 하는 것이 언더스티어에 유리함을 보여주고 있고, 롤센터 높이는 전륜은 낮고 후륜은 높아야 하며, 롤링 강성은 전륜은 크고 후륜은 작은 것이 유리함을 보여주고 있다[3].

그림 2와 표1, 표 2는 차량의 설계변수를 보여주고 있다. 차륜의 토와 캠버 변화는 서스펜션의 기구정역학적 특성에 의해 영향을 받는데, 서스펜션의 기구학적 형상과 컴플라이언스 요소의 변형에 따라 다른 특성을 갖게 된다. 부싱에 대한 변수로서는 로우어 컨트롤 암의 뒤쪽 부싱이 큰 변형이 생기므로 설계변수로 설정하기로 한다. 후륜은 일체차축을 사용하고 있고 차축은 트레일링 암과 팬하드바로 차체에 연결된다. 트레일링암과 차체를 연결해주는 조인트에 부싱이 사용되는데 그 부싱의 강성은 후륜의 토 변화와 롤링 변화에 영향을

줄 것이므로 설계변수로 설정한다. 그리고 차체와 팬하드바 그리고 팬하드바와 차축을 연결해주는 부싱을 설계변수로 사용하기로 한다. 부싱은 병진 방향과 회전 방향에 대해 스프링과 댐핑의 역할을 하므로 6방향(x,y,z,tx,ty,tz)의 스프링 계수와 6개의 댐핑계수를 그 특성값을 가지게 되는데 6방향에 대한 스프링 계수를 변수로 설정하기로 한다. 그리고 차량의 롤링 특성을 설명해주는 변수로서 전륜의 좌우 토셔널 스프링, 스테빌라이저 바, 후륜의 공기스프링의 강성을 결정지을 좌우 스프링 내부 압력을 설계변수로 설정하기로 한다. 그리고 팬하드바가 차축과 연결된 위치점의 전후위치에 따라 후륜의 토변화 특성이 변할 것으로 추측되어 팬하드바와 차축과의 연결점의 x 방향 위치 또한 변수로 사용하기로 한다. 출력 변수로서 선회 시험을 통해 측정되는 언더스티어 그레디언트와 전후좌우륜의 토각, 차체 전후의 롤센서의 중심을 선택하였다.

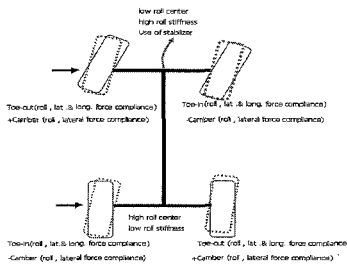


그림 1. 언더스티어에 영향을 주는 인자

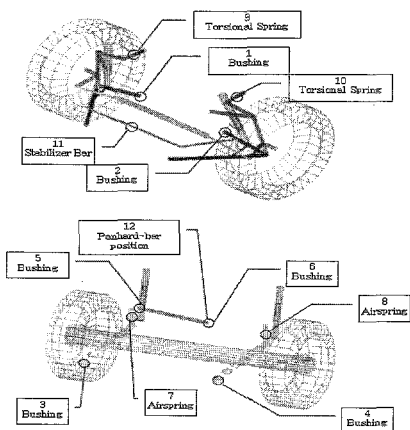


그림 2. 각 부분별 설계변수

표 1 입력 변수

종류	번호	변수 성분	개수	변수 지수
Bushing	1	병진방향 스프링 계수(kx, ky, kz) 회전방향 스프링 계수(Tkx, Tky, Tkz)	6	1~6
	2	병진방향 스프링 계수(kx, ky, kz) 회전방향 스프링 계수(Tkx, Tky, Tkz)	6	7~12
	3	병진방향 스프링 계수(kx, ky, kz) 회전방향 스프링 계수(Tkx, Tky, Tkz)	6	13~18
	4	병진방향 스프링 계수(kx, ky, kz) 회전방향 스프링 계수(Tkx, Tky, Tkz)	6	19~24
	5	병진방향 스프링 계수(kx, ky, kz) 회전방향 스프링 계수(Tkx, Tky, Tkz)	6	25~30
	6	병진방향 스프링 계수(kx, ky, kz) 회전방향 스프링 계수(Tkx, Tky, Tkz)	6	31~36
공기스프링	7	공기스프링 초기 내압	1	37
	8	공기스프링 초기 내압	1	38
전륜 토셔널 스프링	9	회전방향 스프링 상수	1	39
	10	회전방향 스프링 상수	1	40
전륜 스테빌라이저바	11	회전방향 스프링 상수	1	41
팬하드바 위치	12	팬하드바 x성분	1	42

표 2 출력변수

평가속도	출력대상	개수	변수지수
0.41 g	언더스티어 그레디언트	1	43
	Roll Center	2 (전후)	44~45
	Wheel Steering Angle	3 (전후좌우륜)	46~48

2.2. 난수 생성 및 반복실험 수행

난수는 실제 실험에 있을 수 있는 변수들의 불확실성을 반영한다. 난수를 생성하기 위해서는 입력 데이터에 대한 정보가 필요하다. 일반적으로 실제로 부품을 제작할 때 있을 수 있는 공차를 사용하는 것이 가장 적절하다고 하겠다. 그러나 이런 정보를 갖고 있지 않을 때 그 제품의 불특성이 정규 분포를 따른다는 가정하에 분산영역 내에서 5~10%의 값들이 채택한다. 본 연구에서는 그림 3처럼 입력 변수의 값을 평균값으로 하여 평균값의 10%의 값의 범위가 95.4%의 빈도를 가지도록 난수를 생성하였다. 식 (2.1)은 이 때 (표준편차)의 값을 나타내며 은 평균값을 의미한다.

$$\sigma = \frac{m}{20} \tag{2.1}$$

그리고 난수는 실험하고자 하는 수만큼 만들어야

하는데 100회 정도의 실험함으로써도 충분한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.[2] 본 실험은 표 1에서 정의된 입력변수에 대해 MATLAB의 난수 생성 함수를 사용하여 200개의 난수를 실행시켜 200번의 시뮬레이션이 반복 실험이 실행되었다.

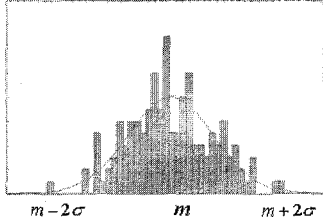


그림 3 각 변수의 분포형태(정규분포도)

2.3 반복수행 및 결과 수집

반복수행은 위에서 생성된 변수들의 세트틀 단위로 이루어진다. 반복 시뮬레이션의 기능은 MATLAB을 이용하여 구현하였다. 실제 반복 수행은 MATLAB으로 코딩된 프로그램이 ADAMS Solver 데이터 파일을 읽어 들여 위에서 각 실험 단위에 해당하는 변수 세트틀 그 파일에 적용시켜 변환 시킨다. 그러면 수행할 시뮬레이션 수는 n (계획한 실험회수)개의 ADAMS solver 컴맨드 파일(.acf)이 만들어지는데, 컴맨드 파일은 ADAMS Solver 데이터 파일(.adm)의 입력변수에 대해 각 실험에 해당하는 입력변수를 갱신을 하게 되고 시뮬레이션을 실행한다. 또한 MATLAB으로 코딩된 프로그램(simulate.mat)은 각각의 커맨드 파일을 하나씩 읽어 들여 반복 실행 시킬 자동 실행파일(배치파일)을 만들고, 만들어진 자동실행 파일을 순차적으로 자동 실행시킨 후 각 실험에 대한 결과를 데이터파일로 저장하게 된다.

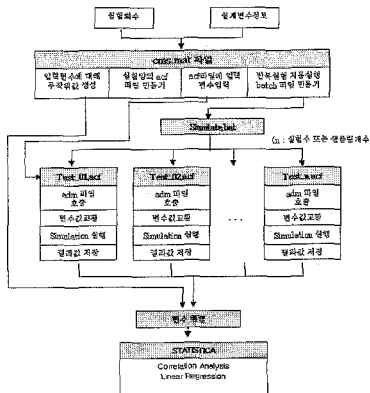


그림 4 반복실험 환경

3. 시뮬레이션 및 해석

3.1 정상원선회시뮬레이션

정상 원선회 시뮬레이션은 선회 반지름이 일정한 조건하에서 원선회를 하고, 구심가속도의 증가에 수반하는 핸들조타각, 조타토크, 롤각 등의 특성값 변화를 측정하는 가장 기본적인 정상 특성 시험이다. JASO에서는 정상 원반지름을 30m로 규정하고 있다. 시뮬레이션은 극저속 주행부터 한계속도까지 일정 속도로 정상 원선회를 하고, 구심 가속도의 단계적인 증가에 수반한 핸들 조타각, 조타토크, 롤각 등 각 특성값의 변화를 기록한다.[10]

본 연구에서의 시뮬레이션 조건으로서, 선회 반지름을 30m로 하였으며 차량의 횡가속도가 0.45g의 값을 얻을 수 있는 속도까지 점차적으로 속도를 증가하면서 차량의 롤각과 조향각도 등의 차량 특성치를 측정하였다. 차량이 원형궤도를 주행하도록 조향입력을 가해야 하는데 이를 위해서 원하는 경로와 실제경로의 오차에 대한 PID제어를 구현하였다. 식 (3.1)과 표3은 PID 컨트롤에 사용된 제어 변수와 계수값을 나타내고 있다. 여기서 e(t)는 정상원에서 차량이 벗어나는 오차값이다.

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} + k_i \int e(t) dt \quad (3.1)$$

표 3 PID 계수

Kp	Kd	ki
1	0.33	0.375

3.2 시뮬레이션 조건 및 실행

시뮬레이션은 총 200회를 계획하였다. 이를 위해서 각 변수에 대해 200개의 난수를 생성하였다. 표 5는 200개의 임의로 생성된 변수값들의 평균값과 표준편차를 보여 주고 있고, 모델링된 변수값(평균값)과 차이를 비교할 수 있도록 하였는데 거의 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 한 예로서 임의의 한 변수에 대한 정규분포의 양상을 보여주고 있다.

시뮬레이션 환경으로 Intel Pentium 4 1.8GHz의 CPU를 장착한 Windows 2000 환경 하에서 두대의 개인용 컴퓨터를 사용하여 분산 계산하였다. 그래서 각 컴퓨터에서 100회씩 나누어 시뮬레이션 하였는데 각 컴퓨터당 대략 6시간의 시간이 소요되었다. 시뮬레이션 결과 200회 중 53번의 연산에러가 났고 147번의 분석에 충분한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 표 5는 설계값과 200번의 생성된 변수값들의 통계적 차이값들을 보여주고 있고, 표 6은 임의로 생성된 총 200개의 변수와 시뮬

Monte-Carlo Simulation을 이용한 확률적 차량 동역학 해석

레이션에 성공한 147개의 변수 각각에 대해 평균 값이 어느 정도 변했는지를 보여주고 있다. 그림 7 시뮬레이션의 결과 설정했던 출력변수를 차체의 횡방향 가속도에 대해 연속적으로 보여주고 있다. 모든 그래프가 비교적 양호하나 전륜의 롤센터와 후륜의 롤센터는 상당히 값들이 급변하는 것을 알 수 있다.

표 4. 출력변수의 평균값과 표준편차

변수번호	출력	평균값	표준편차
v(43)	언더스티어 그래디언트	-12.33	1.92
v(44)	차체 롤각	1.28	0.04
v(45)	앞차체 롤센터	1553.10	815.28
v(46)	뒤차체 롤센터	-577.09	302.60
v(47)	좌측전륜도각	-5.34	0.01
v(48)	우측전륜도각	5.35	0.01
v(49)	우측후륜도각	0.12	0.01

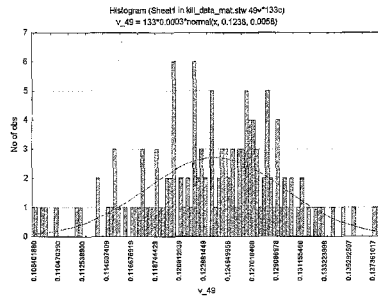


그림 5 임의로 생성된 변수의 분포 예

3.3 모델 항상 목표 설정

0.33g~0.44g까지를 확대해 놓은 그림이다. 전체적으로 언더스티어 경향을 보이고 있지만 대략 살필 수 있다. 그런데 지금의 시뮬레이션 조건은 공차의 상태이므로 0.4g 정도에서도 언더스티어를 유지하는 것이 바람직하다. 모델 차량이 소형 트럭인데 화물을 적재하면 무게 중심이 공차보다 뒤쪽의 높은 곳에 위치하게 되고, 공기스프링의 비선형성 때문에 스프링이 늘리면서 차량의 공기 스프링의

표 5. 설계값과 200회의 생성된 시뮬레이션 변수의 비교

변수번호	설계값		표준편차(200회)		편차
	E(V)	평균값	표준편차	편차	
v(1)	7000	6990	343.21	10	
v(2)	7000	7013	385.49	-19	
v(3)	1100	1099	56.09	1	
v(4)	1.60E+06	1602770	78390.61	-2770	
v(5)	1.60E+06	1614854	72668.19	-14054	
v(6)	2.29E+05	229699	11188.86	-699	
v(7)	7.00E+03	6977	405.91	28	
v(8)	7.00E+03	6973	340.18	27	
v(9)	1.10E+03	1099	67.50	1	
v(10)	1.60E+06	1603536	62717.69	-3539	
v(11)	1.60E+06	1613077	71622.52	-19077	
v(12)	2.29E+05	230821	11226.86	-1821	
v(13)	3.00E+03	2998	144.24	2	
v(14)	3.00E+03	3014	162.75	-14	
v(15)	8.50E+03	8470	436.81	30	
v(16)	4.58E+04	45888	2168.12	-98	
v(17)	4.58E+04	46079	2973.43	-279	
v(18)	4.58E+04	45927	2474.72	-27	
v(19)	3.00E+03	2996	151.06	4	
v(20)	3.00E+03	3010	152.66	-10	
v(21)	8.50E+03	8474	494.07	26	

표 6. 성공한 시뮬레이션의 변수(147회)와 200회의 시뮬레이션 변수와 비교

변수번호	200 회		147 회		편차
	E(V)	평균값	표준편차	편차	
v(1)	6980	7006.67	384.95	-47	
v(2)	7013	7015.13	383.69	-2	
v(3)	1099	1103.05	57.25	-4	
v(4)	1602770	1602636.73	78553.98	134	
v(5)	1614854	1606947.34	70825.49	7706	
v(6)	229699	230067.26	11293.86	-396	
v(7)	6977	6932.04	408.75	45	
v(8)	6973	6930.56	391.05	-7	
v(9)	1099	1096.92	59.88	2	
v(10)	1603536	1605593.91	69493.5	-3048	
v(11)	1613077	1607733.90	71625.15	-1692	
v(12)	230821	230697.25	10740.74	124	
v(13)	2998	2992.78	145.35	6	
v(14)	3014	3009.39	167.34	4	
v(15)	8470	8438.46	433.51	11	
v(16)	45888	45836.12	2169.98	53	
v(17)	46079	46036.26	2336.96	41	
v(18)	45927	45781.21	2621.25	46	
v(19)	2996	3004.41	150.2	-9	
v(20)	3010	3017.93	140.29	-8	
v(21)	8474	8481.76	490.69	-8	

강성이 높아지게 된다. 그러면 차량의 롤링 강성이 강해지고 후륜에서 지면에 대해 미끄러움이 공차보다 상당히 많이 발생하게 된다. 그러면 공차 상태에서 뉴트럴(Neutral)의 조향 특성을 보이게 되면 적차시에는 오버스티어가 발생할 가능성이 아주 높다. 그러므로 0.4g에서 언더스티어를 유지하는 것이 바람직하다. 이런 관점에서 0.4g의 횡가속에서도 언더스티어를 유지하는 것을 모델 수정의 목표로 선택하기로 한다.

그림 6에서 속도를 증가시키면서 정상 원을 선회하는 차량이 횡가속도의 증가로 차량에 흔들림 또는 미끄러짐이 발생하여 핸들 조향 제어하는 과정에서 다소 흔들리는 것을 관찰할 수 있다. 곡선 진행의 추세를 볼 때 0.41g의 위치에서 모든 곡선에 대해 조향의 흔들림에 상관없이 오버스티어의 경향을 가지는 것으로 볼 수 있으며, 0.41g의 횡가속도에서 모델이 0.41g 이전의 추세를 유지하여 기울기가 대략 10deg/g 이상을 유지할 수 있도록 모델을 수정하기로 하겠다.

0.41g에서의 기울기를 알아내기 위해 곡선이 변곡되는 점을 알아내어 두 점간의 기울기를 측정하여 사용하기로 하겠다. 대부분의 곡선이 0.39g와 0.41g 사이의 0.395g에서 변곡점을 가지고 0.41g와 0.43g사이의 0.422g에서 변곡점을 가지는 것을 측정하였다. 표 4는 이렇게 구한 0.41g에서의 기울기의 평균값과 다른 출력 결과치의 평균값과 표준편차를 보여주고 있다.

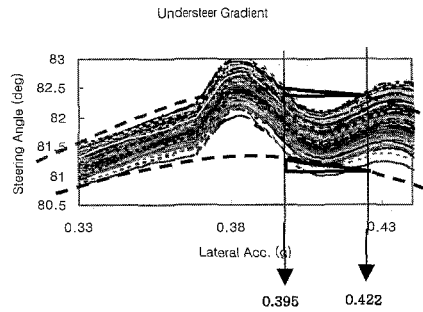
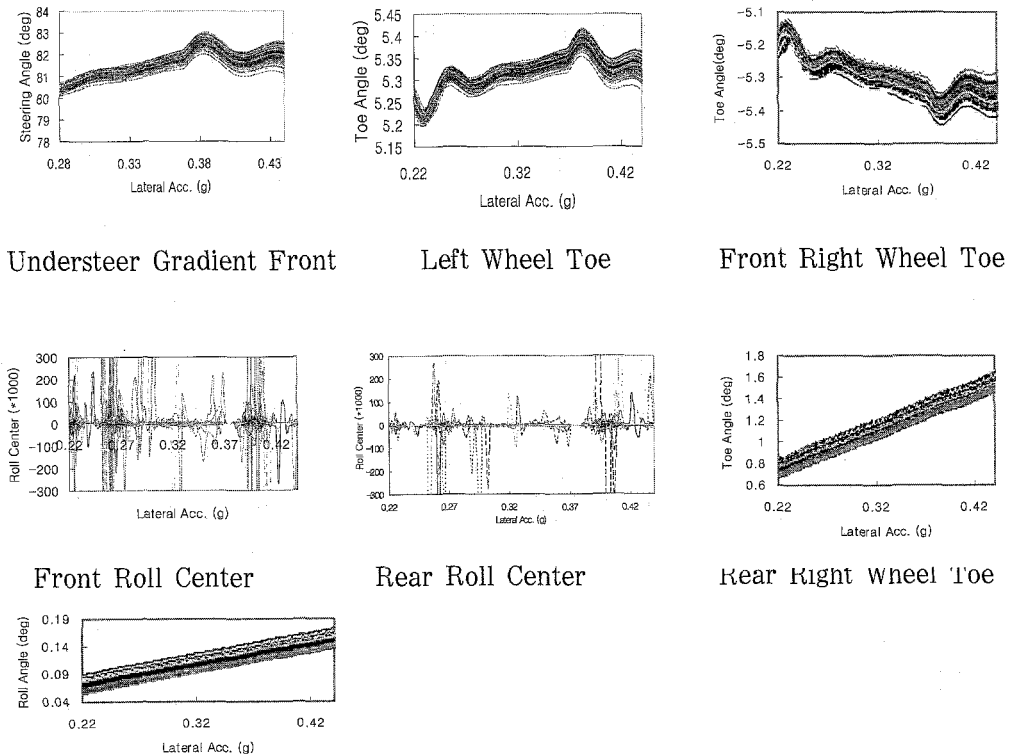


그림 6. 수정 모델 선정6



Roll Angle

그림 7. 147번의 임의로 실행된 시뮬레이션 결과 (x 축 : 횡가속도(m/s²))

3.4 변수간의 상관 해석

모델 변수들간의 관계를 알아내고 모델 수정을 위해 변수간의 상관해석이 유용하다. 위에서 생성된 입력변수들과 각각의 출력변수들을 하나의 데이터 행렬로 생성하여 상관행렬(Correlation Matrix)를 생성함으로써 변수들간의 선형적 관계를 규명할 수 있다. 상관행렬을 통해 원하는 신뢰도에 적합한 정도의 변수들간의 상관관계가 구해진다. 표 7는 95%의 신뢰도로 구해진 상관행렬에서 출력변수와 모든 변수간의 상관계수를 보여주고 있다. 상관계수가 0.17 이상일 때 선형적 관계가 유의하다고 할 수 있다.

상관 행렬에서 보면 변수 자신과의 상관계수는 1의 값을 나타내고 있고 이것은 완전한 선형관계를 의미한다. 반대로 0의 값은 어떠한 관계를 규정지을 수 없던가 아니면 비선형의 관계를 가짐을 의미하게 된다. 이런 관계는 그림 8에 잘 나타나 있다. 차체 전변부(v(45))와 후변부의 롤센터 중심(v(46))은 차량의 언더스티어 특성(v(43))과 낮은 상관계수의 값으로 나오는데 그림 8에서 보면 별다른 관계를 보이지 않는다. 회귀분석을 통한 선형관계식의 기울기가 거의 0과 가까운 값을 가지므로 상관성이 거의 없다고 보는 것이 타당하다. 차체의 롤링은 비교적 높은 수치를 나타내고 있으며 이런 관계는 그림 8의 언더스티어 그래디언트 기

표 7. 출력변수와 변수간의 상관관계

	v(43)	v(44)	v(45)	v(46)	v(47)	v(48)	v(49)		v(43)	v(44)	v(45)	v(46)	v(47)	v(48)	v(49)
v(1)	-0.04	-0.11	0.00	0.00	-0.02	-0.12	-0.09	v(26)	0.00	-0.04	0.07	-0.07	0.02	-0.10	-0.09
v(2)	-0.05	-0.09	-0.01	0.01	0.05	-0.06	-0.09	v(27)	0.08	0.06	0.05	-0.06	-0.06	0.04	-0.01
v(3)	-0.07	-0.12	0.07	-0.06	0.02	-0.18	-0.08	v(28)	0.06	0.05	-0.13	0.13	-0.01	0.05	0.01
v(4)	0.08	-0.02	0.02	-0.02	0.06	0.06	-0.05	v(29)	-0.06	0.03	0.17	-0.16	-0.08	-0.04	0.09
v(5)	0.11	0.19	-0.01	0.00	-0.15	0.09	0.12	v(30)	0.02	-0.05	-0.01	0.01	-0.01	-0.06	-0.06
v(6)	0.16	-0.03	0.17	-0.17	-0.10	0.09	0.02	v(31)	-0.25	-0.12	0.11	-0.11	0.02	-0.12	0.06
v(7)	0.18	-0.01	0.00	0.00	-0.48	-0.36	0.07	v(32)	0.04	0.13	-0.27	0.27	0.00	0.10	0.12
v(8)	-0.04	-0.13	0.12	-0.13	0.18	0.02	-0.14	v(33)	0.03	0.07	-0.18	0.18	-0.03	0.09	0.03
v(9)	-0.18	-0.04	0.02	-0.02	0.05	-0.12	-0.04	v(34)	0.00	0.11	0.05	-0.06	-0.03	0.12	0.06
v(10)	-0.02	0.03	0.04	-0.04	0.00	0.00	0.02	v(35)	-0.17	0.00	-0.02	0.01	0.01	-0.15	-0.02
v(11)	0.02	0.15	-0.17	0.17	-0.08	0.06	0.06	v(36)	-0.01	0.10	-0.03	0.03	-0.09	0.09	0.13
v(12)	0.15	0.00	-0.02	0.02	-0.01	0.07	0.03	v(37)	-0.54	-0.69	0.56	-0.58	0.56	-0.59	-0.36
v(13)	-0.24	-0.06	0.17	-0.17	0.10	-0.21	-0.19	v(38)	0.63	0.43	0.36	-0.34	-0.59	0.54	0.81
v(14)	-0.05	0.05	0.03	-0.03	0.01	0.00	0.09	v(39)	0.03	-0.11	-0.19	0.19	-0.13	-0.18	-0.08
v(15)	-0.14	-0.05	-0.01	0.01	0.11	-0.09	-0.38	v(40)	0.26	-0.15	0.18	-0.18	-0.01	0.26	-0.09
v(16)	-0.01	-0.08	0.15	-0.14	-0.01	-0.05	-0.03	v(41)	0.37	-0.16	0.11	-0.11	-0.10	0.13	-0.15
v(17)	-0.06	0.11	-0.13	0.13	-0.02	0.03	0.04	v(42)	0.03	-0.05	-0.04	0.04	-0.09	0.03	0.16
v(18)	0.07	0.01	-0.05	0.05	-0.07	0.04	-0.02	v(43)	1.00	0.46	-0.12	0.13	-0.64	0.66	0.52
v(19)	0.02	0.00	0.03	-0.03	0.01	-0.02	0.00	v(44)	0.49	1.00	-0.31	0.32	-0.75	0.67	0.81
v(20)	0.20	0.12	0.07	-0.07	-0.19	0.16	0.10	v(45)	-0.12	-0.31	1.00	-1.00	0.05	-0.13	0.02
v(21)	-0.04	0.15	-0.13	0.13	-0.03	0.08	0.16	v(46)	0.13	0.32	-1.00	1.00	-0.06	0.14	-0.01
v(22)	0.00	0.02	-0.14	0.15	0.04	-0.01	-0.02	v(47)	-0.64	-0.75	0.05	-0.05	1.00	0.45	-0.77
v(23)	0.10	-0.09	0.07	-0.07	0.00	0.00	-0.10	v(48)	0.65	0.67	-0.13	0.14	-0.45	1.00	0.68
v(24)	0.03	0.07	0.02	-0.02	-0.03	0.06	-0.03	v(49)	0.52	0.81	0.02	-0.01	0.77	0.68	1.00
v(25)	-0.15	-0.22	0.04	-0.04	0.11	-0.11	-0.05								

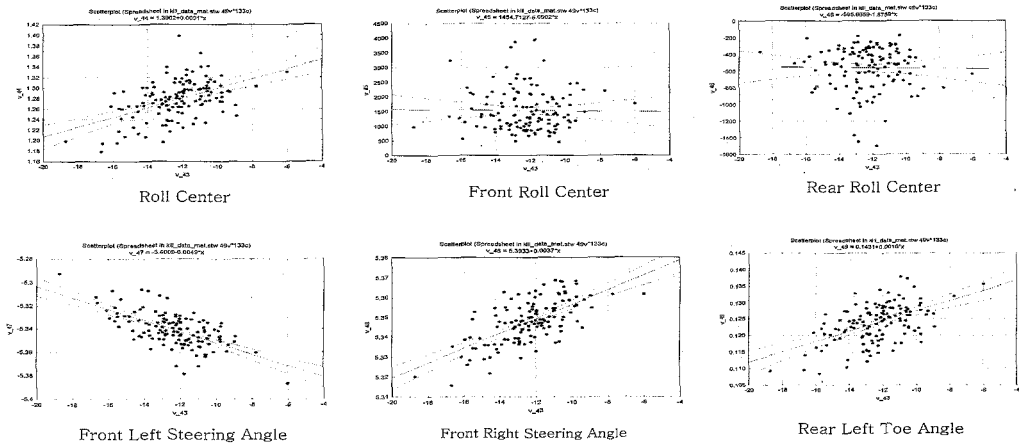


그림 8. 언더스티어 곡선의 기울기에 대한 각 출력변수의 산포도 (X축 : 언더스티어 그래디언트)

울기와 톨링의 산포도에서 어느 정도 선형적 관계를 보여주고 있다. 특히 전륜의 조향각은 비교적 높은 수치의 상관계수 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 8의 언더스티어 그라디언트와의 관계를 통해 큰 선형관계를 가지는 것을 알 수 있다. 특히 유의한 변수는 전륜 우측륜의 조향의 변화라 할 수 있다. 왜냐 하면 실험은 차량이 좌선회하므로 전륜의 우측륜이 아주 크게 조향에 기여하게 된다. 경향을 보면 전륜 우측륜이 조향각이 커질수록 언더스티어 경향으로 옮겨가려는 것을 볼 수 있다. 이것은 차량이 미끄러지거나 조향이 더 많이 된 상태에서 정상원을 유지하기 위해 더 조향을 해야 한다는 것을 의미한다. 차량의 언더스티어 경향 강해질수록 때문에 우측륜이 더 조향되어야 하는 사실과 부합된다.

전륜의 스테빌라이저는 톨링 강성을 강하게 해주는데 스테빌라이저의 강성이 커지면 커질수록 오버스티어의 경향이 작아지는 것을 알 수 있다. 후륜공기스프링의 경우 오른쪽 공기스프링의 강성이 강하면 강할수록 오버스티어가 발생하는 경향을 보여주고 있다.

롤 각은 후륜토각과의 상관계수가 0.81라는 큰 값을 가지고 있고, 롤 각이 커질수록 후륜의 토각을 언더스티어에 유리하도록 토인(+)경향을 강하게 하는 것으로 관찰된다.

그 외 입력 변수와 언더스티어 그라디언트 특성과의 관계로서 후륜 오른쪽 공기스프링의 압력이 -0.54, 스테빌라이저 바의 강성이 0.37의 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 전륜의 톨강성이 강해질수록 차량의 언더스티어 특성이 강해지고 후륜의 톨강성이 강할수록 오버스티어 경향이 강해지는 것을 의미한다.

차량의 언더스티어 경향에 전륜 오른쪽 로우어 컨트롤 암 아래 부싱의 강성, 전륜 왼쪽 로우어 컨트롤 암 부싱의 강성, 후륜 오른쪽 트레일링암 부싱의 강성, 팬하드바 아래쪽 부싱의 강성 그리고 전륜 왼쪽 토셔널 스프링의 강성이 어느 정도 상관하고 있음을 알 수 있다. 그러나 팬하드바의 위치는 상관이 적은 것으로 나타났다.

3.5 회귀분석 및 설계변경

상관성 해석은 입력과 출력과의 관계를 설명해준다. 모델향상은 주로 높은 상관성을 가진 입력변수를 이용하여 이루어진다. 이에 대해 선형회귀 해석은 선택된 입력과 출력변수와의 best-fit 과정을 통해 선형적 관계를 이끌어낸다. 출력변수를 원하는 값으로 만들어주기 위해 그 목표치를 정의하고, 그 정의된 시스템에서 기대하는 입력변수에 대한 추정값을 얻을 수 있다.

표 8은 선형회귀의 결과를 나타낸다. R2는 0.7336

표 8. 회귀분석 결과 테이블 및 설계값 변경

변수번호	요소	B	p-value	표본평균값	변경값	변경값/표본평균값
	intercept	-19.0013967	0.038311			
1	전륜오른쪽부싱kx	-0.000126904	0.679311	7039	14077.57	2
2	전륜오른쪽부싱ky	-0.000163478	0.533889	7004	14009.09	2
7	전륜왼쪽부싱kx	0.000544695	0.029102	6920	13840	2
8	전륜왼쪽부싱ky	6.31041E-05	0.843507	6990	13960.68	2
13	후륜오른쪽 트레일링암부싱 kx	-0.001805778	0.007907	2393	1495.5	0.5
14	후륜오른쪽 트레일링암부싱 ky	-2.90088E-05	0.961858	3008	1504.15	0.5
16	후륜오른쪽 트레일링Txx	-2.3457E-05	0.597453	45856	22928.09	0.5
17	후륜오른쪽 트레일링Txy	-8.82884E-05	0.039228	46059	23025.5	0.5
19	후륜왼쪽 트레일링암부싱 kx	0.000431517	0.518801	3009	1504.285	0.5
20	후륜왼쪽 트레일링암부싱 ky	0.000638295	0.371574	3019	1509.612	0.5
22	후륜왼쪽 트레일링Txx	3.87629E-05	0.372252	45701	22850.67	0.5
23	후륜왼쪽 트레일링Txy	-2.61251E-05	0.571706	45825	22912.29	0.5
31	팬하드아래부싱 kx	-0.002101741	0.003182	3023	1511.737	0.5
32	팬하드아래부싱 ky	0.000448295	0.498700	3023	1511.737	0.5
37	오른쪽공기스프링	-0.629084353	0.000000	30.0512	30.05115	1
38	왼쪽공기스프링	0.62757513	0.000000	29.8352	29.83522	1
39	전륜오른쪽 토셔널	5.75791E-05	0.448236	27007	54014.26	2
40	전륜왼쪽 토셔널	0.000266951	0.000090	27002	54003.4	2
41	스테빌라이저	0.000218256	0.000090	35983	71966.36	2
43	언더스티어 특성(기준가)			-12.310797	12.3081	

R²=0.73361

정도의 비교적 높은 수치를 보였다. 회귀분석에 포함시킬 변수는 이미 해석된 상관해석의 결과를 바탕으로 하였다. 그러나 차량은 좌우대칭의 구조를 갖고 있고 각 부분의 요소의 물성치 또한 좌우 대칭이다. 따라서 한 쪽 요소의 물성치가 바뀌면 또 다른 한 쪽의 물성치 또한 바뀌어야 하므로 비록 상관성이나 회귀분석의 결과 유의하지 않은 결과 값을 갖는다고 하더라도 차량의 대칭성을 고려하여 회귀분석 및 변수 변경을 실시하였다. 상관성이 낮거나 회귀분석의 결과 계수가 낮은 값을 가지면 견실(robustness)하므로 결과적으로 원하는 결과치에 큰 영향을 미치지 않는다. 표 8에서 음의 값을 갖는 변수에 대해서는 그 값이 작아지도록 하였고 양의 값을 갖는 경우는 더 큰 값을 가지게 하였다. 그런데 공기 스프링의 내압은 공기스프링의 강성과 관련이 있고 공기스프링의 스프링력의 변화는 차량의 높이 변화에 심각하게 영향을 줄 수 있으므로 동일한 값을 사용하기로 한다. 적당한 값으로 각 변수들의 값들을 바꾸어준 결과 -12.3(deg/g)에서 12.3(deg/g)의 값으로 바뀌었다. 언더스티어 기울기의 분산값을 고려하여 판단하여 12.3(deg/g)의 값은 충분한 신뢰도로 오버스티어가 발생하지 않을 것으로 추정하고 다시 수정 모델에 대해 시뮬레이션을 실시하였다.

3.6 변경된 모델에 대한 시뮬레이션 및 결과

이전 장에서 수정된 변수값을 이용하여 변수의 난수값을 발생시키고 그 값을 이용하여 반복실험을 하였다. 총 200회의 실험을 실시하였고 그 중 158회의 성공된 실험결과를 얻을 수 있었다.

그림 9는 실험의 결과 중 언더스티어 그래디언트를 나타내고 있다. 곡선이 약간 파형을 보이긴 하지만 곧 제어되는 추세이고 스티어링 특성이 이전 모델보다 더 좋아졌으며 언더스티어의 경향을 보이고 있는 것이 확인된다. 0.4g 부근의 곡선의 기울기를 측정하기 위해 일정한 경사를 그리면 0.37g 위치와 0.42g 위치 간의 기울기를 이용하여 0.41g에서의 근사한 기울기를 얻었다. 기울기를 구해본 결과 평균 12.57(deg/g)의 값을 얻을 수 있었고 모델향상의 목표치인 12.30과 근사하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 이전 모델과 수정된 모델간의 빈도수를 비교를 보여 준다. 이전 모델에 비해 확실히 언더스티어의 영역에 포함되어 있고 오버스티어가 나지 않음 확률이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 또한 표준 편차가 이전 모델이 1.9247인데 비해 더 낮은 1.4386의 값을 갖고 있다. 이것은 이전 모델보다 불확실성에 대해 변화가 더 적은 것을 의미하며 결과적으로 조향성능이 더 향상되었음을 의미한다.

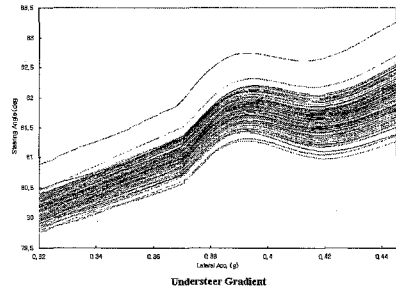


그림 9. 157회 반복된 수정된 모델의 언더스티어그래디언트

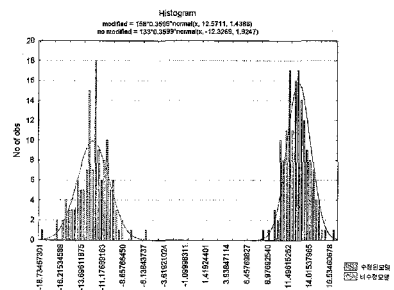


그림 10. 수정된 모델과 이전 모델과의 빈도수 및 분포 비교

4. 결론

Monte-Carlo Simulation을 이용하여 ADAMS에서 모델링된 상용 차량의 정상원 선회 시뮬레이션을 실시하였고 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ADAMS를 이용하여 정상원 시험 규격에 따라 Monte-Carlo Simulation을 실시하였다.
- MATLAB을 이용하여 Monte-Carlo 시뮬레이션의 반복 시뮬레이션을 실시할 수 있는 환경을 구현하였다.
- 시뮬레이션의 결과에 대해 통계학적 해석을 실시하여 차량의 언더스티어 특성과 설계변수들 간의 관계를 밝혔다.
- 회귀분석을 이용하여 설계목표에 대해 모델 향상을 시도하고 제 시뮬레이션을 실시하였다.

- 수정된 모델에 대한 분석을 통해 조향 특성에 대해 목표한 성능의 향상 및 충분한 신뢰성을 확인하였다.
- Monte-Carlo 시뮬레이션의 공학 해석에 광범위한 적용 가능성을 확인하였다.

[11] 김기영, 전명식, *다변량 통계자료분석*
자유아카데미, 2000

[12] Robert V.Hogg and Allen T.Crag, *수리통계학 개론*, 경문사, 이재창, 이용구 옮김, 1995

참 고 문 헌

- [1] Ioannis Doltsinis, *Stochastic Analysis of Multivariate Systems in Computational Mechanics and Engineering*, A publication of International Center for Numerical Methods in Engineering(CIMINE), Barcelona, Spain, 1999
- [2] J.Marczyk, *Priciples of Simulatio-based Computer-Aided Engineering*, Artes GRaficas Torres, 1999
- [3] J. Reimpell and H. Stoll, *The Automotive Chassis : Engineering Priciples*, Society of Automotive Engineer, Inc., 1996
- [4] J. Marczyk, *Stochastic Multidiciplinary Improvement:Beyond Optimization*
- [5] Ralf Reuter, Raniner Hoffman, EASi Engineering GmbH, Alzenau, *Application of Stochastic Simulation in the Automotive Industry*
- [6] J.Marczyk, *Automotive Crash Simulation : A Personal Perscriptive*, 2000
- [7] *ADAMS User's Manual/Solver*, version 9, Mechanical Dynamics, Inc.
- [9] *MATLAB Statistics Toolbox User's Guide*, Mathwoks, Inc.
- [10] *자동차기술핸드북*, 한국자동차공학회 1996.
p.117~032