

## ADAMS/Insight를 이용한 1톤 상용트럭의 동역학 해석 및 최적화

### Dynamic Analysis and Optimization of 1ton Commercial Truck Using ADAMS/Insight

전 형 호<sup>\*</sup>      탁 태 오<sup>\*\*</sup>  
Chun, Hyung-Ho      Tak, Tae-Oh

#### Abstract

Stochastic simulation technique has advantages over deterministic simulation in various engineering analysis, since stochastic simulation can take into consideration of scattering of various design variables, which is inherent characteristics of physical world. In this work, Monte-Carlo simulation method in ADAMS/Insight for steady-state cornering and J-turn behavior of a truck with design variables like hard points and bushing stiffnesses have performed to achieve better dynamic performance. The main purpose is to improve understeer gradient at steady-state cornering and minimize peak lateral acceleration and peak yaw rate at J-turn. 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 해석, 차량동역학, 정상원선회, J-턴

Keywords : stochastic simulation, vehicle dynamics, steady-state cornering, J-turn

#### 1. 서론

다물체 동역학 시스템의 해석에 있어 ADAMS와 DADS와 같은 범용 다물체 동역학 해석프로그램의 도움으로 대규모의 해석이 가능하게 되었다. 그러나 이러한 프로그램은 단순히 정해진 설계값에 대한 해석만 할 수 있을 뿐 설계기능의 부족으로 반복각 설계에 의존해야하므로 성능향상에 많은 노력과 시간이 요구된다. 그러므로 체계적 과정으로 원하는 성능 향상을 얻을 수 있는 방법이 요구된다. 설계값들이 시스템의 성능향상에 미치는

영향들을 정량적으로 알 수 있다면 노력과 시간을 줄이 수가 있으며 더 나아가 최적화된 설계값들도 알 수 있게 된다.

다물체 시스템인 현가장치는 기구학적 조인트와 힘요소들로 결합되어 차량의 주행 및 조향 성능에 관련된 동특성을 결정한다. 동특성에 미치는 영향은 토(toe), 캠버(camber), 캐스터(caster), 횡강성(lateral force compliance) 등과 같은 경적설계인자(satic design factors)들에 의해 정량화되며 현가장치 설계를 목적으로 하는 정적설계인자가 구현되도록 기구역학적으로 현가장치의 설계점(Hard Points)과 힘요소의 물성치와 같은 설계변수를 결정한다. 이러한 정역학적 설계과정을 통해서 목표로 하는 경적설계인자를 구현하였다 하더라도 타이어와 차체와 관련된 여러 설계변수의 영향으로 정상원선회나 J-턴과 같은 동역학해석에서는 원하

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과, 박사과정

\*\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 부교수, 공학박사

는 성능을 얻을 수 없는 경우가 있다. 따라서 설계 변수와 동역학 해석에서 얻어지는 결과의 관계를 정량적으로 알 수 있다면 원하는 동역학적 성능을 가지는 차량을 설계하는데 더욱 효과적일 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 몬테카를로 방법 [1,2]을 이용하여 각 설계변수들이 동역학 해석의 결과에 미치는 영향을 회귀모형을 통해 정량화하고, 최적화를 통해 차량의 성능을 향상시키고자 한다.

몬테카를로 방법과 같은 확률 통계적인 방법은 해석의 반복수행이 필요하다. 현재 컴퓨터의 계산 능력의 발전으로 계산시간에 대한 제약조건이 완화되어 확률적 해석의 적용범위가 급속히 확산되고 있는 추세이며, 확률적 해석에 대한 이론적 배경에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 확률적 해석을 수행하기 위한 도구로서 ADAMS에서는 Insight[3]라는 모듈을 통하여 몬테카를로 방법뿐만 아니라 반응표면법과 같은 다양한 실험계획법을 제공한다. 미국의 EASi 사에서는 Meta-Computing 도구인 ST-ORM을 개발하여 기존의 CAE 도구에 확률적 모의실험을 실행하여 신뢰도 예측, 민감도해석, 모델검증(model validation), 강건설계(robust design), 반응표면 생성과 최적화 등을 수행할 수 있도록 하였다. 이러한 기법을 적용한 차량의 동역학해석[4], 차량 충돌실험[5] 그리고 FEM 해석에 확률적 해석사례가 있으며, 실험방법 및 해석의 원리에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[6][7].

## 2. 차량모델과 주행시험조건

본 연구에 사용된 차량 모델은 1톤 상용트럭이다. 그림 1은 차량의 전륜현가장치와 후륜현가장치를 보여준다. 전륜현가장치는 더블위시본 타입으로 코일스프링이 아닌 비틀림(torsional)스프링을 사용하였다. 후륜현가장치는 에어스프링을 적용한 타입으로 트레일링암은 판스프링을 적용하였다.

주행시험조건은 정상원선회(ISO 4138)와 J-턴(ISO 7401)을 수행하였다. 정상원선회에서는 선회반경을 60m로 하여 속도를 증가시켜 횡가속도와 핸들 조타각의 비율인 언더스티어 그래디언트(Understeer Gradient)를 성능지수로 선정하였으며, J-턴에서는 차량이 시속 80Km/h에서 핸들조타각에 90의 계단과 입력할 때 발생하는 횡가속도와 요레이트(Yaw Rate)의 최대값을 성능지수로 선정하였다.

## 3. 설계변수 설정 및 난수 생성

차량의 조정안정성은 차량 선회시 현가장치의 기구학적 운동과 부시(bush)와 같은 힘요소의 변

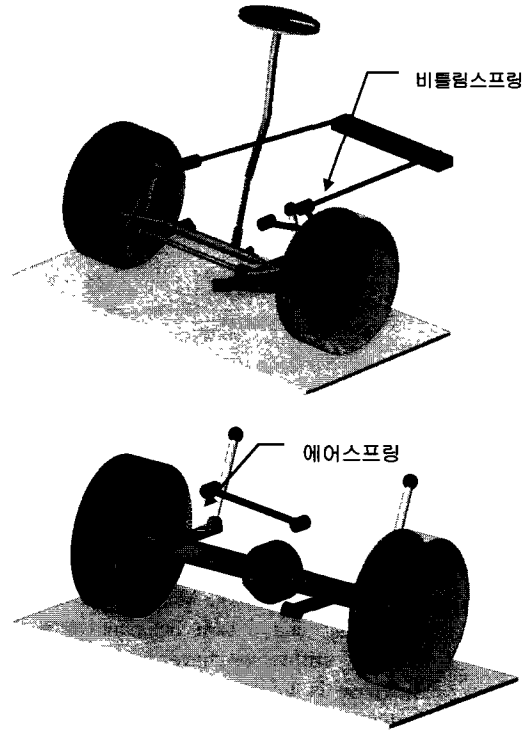


그림 1 전후륜 현가장치

형에 의해 토와 캠버 그리고 타이어와 지면간의 선회력(cornering force)등에 의해 결정된다. 이러한 정적설계인자들에 영향을 미치는 설계변수는 조정안정성에도 기여를 하기 때문에 이러한 변수들을 설계변수로 선정한다

힘요소에서는 선회시 전륜의 로워암의 뒤쪽 부시에 큰 변형이 있을 것으로 추정되므로 부시의 반경반향의 스프링 상수를 설계변수로 설정한다. 전륜의 롤강성은 타이어의 선회력에 영향이 있으므로 스테빌라이저바의 직경을 설계변수로 설정하였다. 후륜에서는 트레일링암부시의 강성에 따라 후륜의 토변화가 발생하므로 트레일링암부시의 반경반향과 축방향의 스프링상수를 설계변수로 설정하였다. 설계점은 전륜의 경우 토와 캠버 변화에 영향을 미치는 어퍼암과 로워암 볼조인트 3방향(x,y,z)의 설계점과 타이로드 내측과 외측 3방향의 설계점을 설계변수로 설정하였으며, 후륜은 팬하드바 3방향의 차체부착점을 설계변수로 설정하였다. 선정된 전후륜 현가장치의 설계변수는 그림 2와 같으며 변수설명 뒤의 숫자는 설계변수에 부여한 번호를 나타낸다.

설계변수가 정해지면 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위해 설계변수의 분포범위를 정하고 난

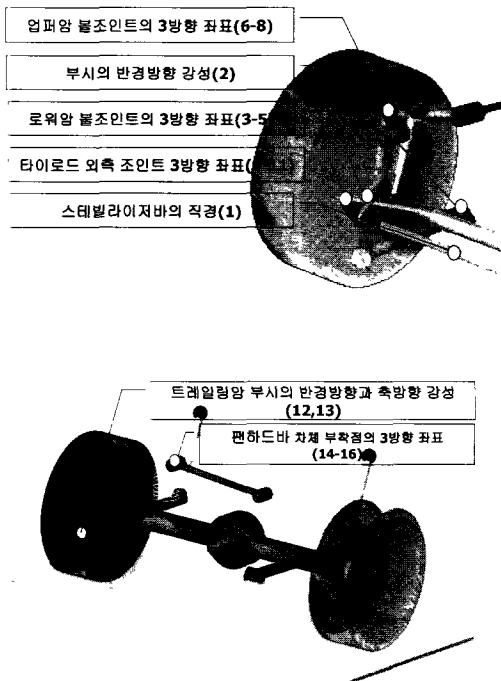


그림 2 전후륜 현가장치의 선정된 설계변수

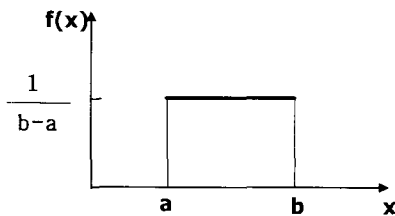


그림 3 균일 확률밀도 함수

수를 생성해야한다. 설정된 범위에서 균일하게 난수를 생성하기위해 균일분포(uniform distribution)를 가정하였으며 ADAMS/Insight 모듈을 이용하여 각 설계변수별로 100개의 난수를 생성하였다. 그림 3은 균일분포의 확률밀도 함수를 보여주며 균일분포의 확률f(x), 평균E(X) 그리고 분산V(X)은 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)}, \quad x \in [a,b] \quad (1)$$

$$E(X) = \frac{a+b}{2}, \quad V(X) = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (2)$$

표 1 설계변수와 성능지수의 상관관계 행렬원소

	언더스티어 그래디언트	최대 요레이트	최대 횡가속도
1	0.06	-0.21	-0.19
2	0.31	0.17	0.22
3	0.02	-0.22	-0.26
4	0.03	0.14	0.11
5	0.51	0.34	-0.42
6	-0.32	0.02	0.06
7	-0.04	0.15	0.14
8	0.06	0.04	0.04
9	-0.01	-0.02	0.00
10	-0.50	0.73	0.74
11	0.27	-0.28	-0.25
12	0.15	0.13	0.12
13	0.24	-0.24	-0.28
14	-0.07	0.00	0.02
15	0.05	-0.02	-0.02
16	0.14	-0.15	-0.17

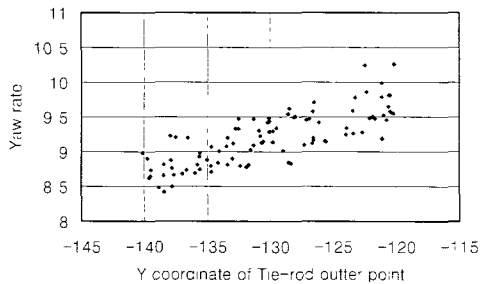


그림 4 타이로드 외측 설계점 Y좌표에 따른 최대 요레이트의 분포

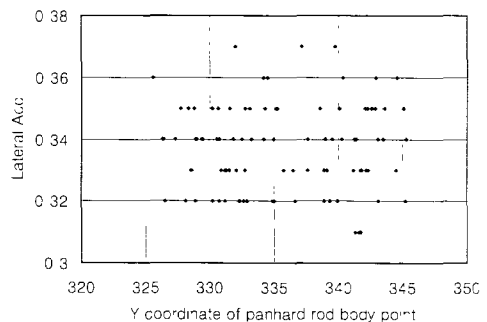


그림 5 팬하드 로드 차체부착 설계점 Y좌표에 따른 최대 요레이트의 분포

생성된 설계변수의 난수조합과 구해진 성능지수를 이용하여 상관관계를 해석하였다. 설계변수 X와 성능지수 Y의 상관관계 행렬은 식(3)과 같으며 상관관계 행렬의 각각의 원소는 식(4)와 같이 X와 Y의 공분산(covariance)  $\sigma_{xy}$ 를 X의 표준편차  $\sigma_x$ 와 Y의 표준편차  $\sigma_y$ 의 곱으로 나누어 구할 수 있으며 상관관계 행렬원소는 -1에서 1사이의 값으로 구해진다. 구해진 설계변수와 성능지수의 상관관계 행렬원소는 표 1과 같으며 각각의 성능지수에 대하여 상관관계가 큰 설계변수를 선정하여 음영처리하였다. 그림 4는 타이로드 외측 설계점 Y좌표에 따른 최대 요레이트값의 분포를 보여주며 상관관계 행렬원소는 0.78이다. 그림 5는 팬하드 로드의 차체부착 설계점 Y좌표에 따른 최대 요레이트값의 분포를 보여주며 상관관계 행렬원소는 -0.02이다. 그림 4와 그림 5에서 알 수 있듯이 상관관계 행렬원소가 0에 가까우면 설계변수와 성능지수의 상관관계는 적으며, 1에 가까우면 비례 관계로 -1에 가까우면 반비례 관계를 가진다.

$$C = \begin{pmatrix} \text{Cor}(X_1, Y_1) & \dots & \text{Cor}(X_1, Y_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cor}(X_n, Y_1) & \dots & \text{Cor}(X_n, Y_n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Cor}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{V(X)V(Y)}} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

표 2 최종적으로 선정된 설계변수

종류	번호	변수성분
설계점	1	어퍼암 볼조인트 x좌표
	2	어퍼암 볼조인트 y좌표
	3	어퍼암 볼조인트 z좌표
	4	로워암 볼조인트 x좌표
	5	로워암 볼조인트 y좌표
	6	타이로드 외측점 y좌표
부시	7	로워암 리어부시 반경방향 스프링상수
	8	트레일링암 부시 반경방향 스프링상수
스테빌라이저바	9	스테빌라이저바 직경

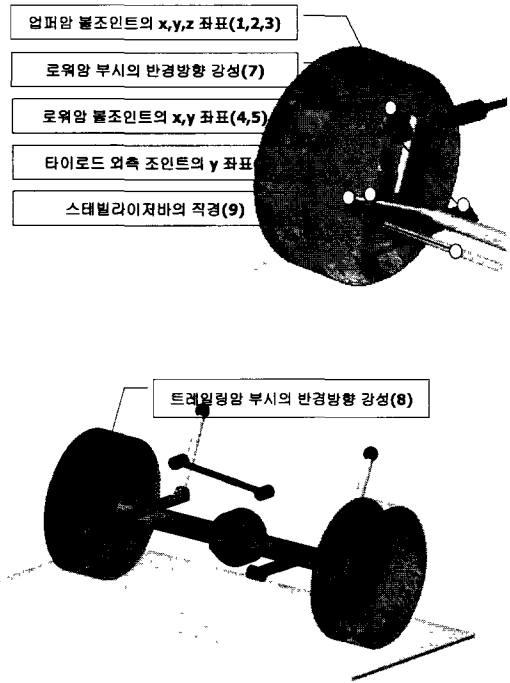


그림 6 최종적으로 선정된 설계변수

표 1에서 음영처리되지 않은 기여하는 영향이 적은 변수들은 설계변수에서 제외하고 그림 6과 표 2와 같이 최종적으로 설계변수를 선정하였다.

최종적으로 선정된 설계변수를 몬테카를로 방법을 이용하여 균일 분포를 갖는 200개의 난수조합을 생성하여 해석을 수행한다.

#### 4. 회귀분석을 통한 최적화

각 설계변수로 생성된 200개의 난수조합을 이용하여 J-턴 200회와 정상원선회 200회를 각각 반복수행한다. 반복수행된 해석결과중 해석의 오류로 생기는 거짓값(outlier)를 제거한 후 회귀분석을 수행한다.

설계변수에 종속인 성능지수의 변화를 설명하기 위해 k개의 설계변수가 사용되어 각 설계변수의 주어진 범위내에서 성능지수와의 관계를 표현하는 것을 중회귀모형(Multiple Regression Model)이라고 한다. 이 모형은 n개의 데이터에 대하여 아래와 같이 표현된다. 여기서 y는 종속변수로 구해진 성능지수이며 x는 독립변수로 입력된 설계변수 그리고  $\epsilon$ 는 오차를 나타낸다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (7)$$

최소제곱추정법(least square estimator)를 이용하여 오차의 제곱  $\varepsilon^T \varepsilon$ 가 최소가 되는  $\beta$ 에 대한 추정값을  $b$ 를 구하면 식 (8)과 같으며,  $y$ 에 대한 추정값  $\hat{y}$ 를  $b$ 에 대하여 식 (9)와 같이 쓸 수 있다

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (8)$$

$$\hat{y} = Xb \quad (9)$$

표 3 회귀모형의 계수

설계변수 번호	y	$\bar{y}$	$\bar{y}$
1	-2.145e-2	-7.472e-4	2.714e-2
2	4.765e-3	3.742e-4	-3.649e-3
3	2.633e-3	1.628e-4	3.192e-3
4	-2.621e-2	-8.591e-4	9.352e-3
5	1.595e-3	3.766e-5	-7.879e-3
6	-9.990e-4	-6.974e-5	6.623e-3
7	1.368e-3	5.936e-5	-3.035e-3
8	-2.264e-6	2.537e-6	1.051e-4
9	7.599e-3	2.227e-5	-2.696e-2

- y. 최대요레이트의 회귀모델함수
- $\bar{y}$  최대회가속도의 회귀모델함수
- $\bar{y}$  언더스티어그래디언트의 회귀모델함수

표 4 ANOVA Table

(a) 요레이트의 최대값

	DOF	SS	MS	F	P
Model	9	5.24	0.582	2.07e4	1.48e-276
Err	188	5.28e-3	2.81e-5		
Total	197	5.24			

(b) 횡가속도의 최대값

	DOF	SS	MS	F	P
Model	9	6.61e-3	7.34e-4	78.4	7.84e-59
Err	188	1.76e-3	9.37e-6		
Total	197	8.37e-3			

(c) 언더스티어 그래디언트

	DOF	SS	MS	F	P
Model	9	7.67	0.852	145	1.04e-17
Err	188	11	0.0587		
Total	197	18.7			

J-턴 해석에서 얻어진 횡가속도와 요레이트의 최대값 그리고 정상원선회에서 얻어진 언더스티어 그래디언트의 결과와 각 설계변수와의 관계를 회귀분석을 통해 구하면 표 3과 같은 각 설계변수의 계수를 얻을 수 있다.

구해진 회귀모형이 설계변수와 성능지수와의 관계를 어느정도 잘 표현하였는가를 확인하는 과정이 필요하다. 판단을 위하여 ANOVA (ANALYSIS OF VARIATION) Table을 이용하여 회귀모형의 신뢰성 및 정확성을 검토한다. 표 4는 각 성능지수의 ANOVA Table을 보여준다. DOF(Degree Of Freedom)은 회귀모델과 오차의 자유도를 나타낸다. SS(Sum of Squares)는 모델(Model) 항목에서는 회귀제곱합(Regression Sum of Squares), 오차(Err) 항목에서는 잔차제곱합(Residual Sum of Squares)을 나타내며 회귀제곱합은 식(10)에 잔차제곱합은 식(11)과 같다. 여기서  $\hat{y}$ 는 회귀모델에서 얻어진  $y$ 의 추정값이며,  $\bar{y}$ 는 ADAMS 해석과정에서 얻어진 성능지수  $y$ 의 평균값이다.

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

MS(Mean Square)는 각각의 SS를 자유도로 나눈 값이며, F는 F-검정에 사용되는 값으로 식(12)와 같다.

$$F = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (12)$$

P는 P-검정에 사용되는 값으로 0.05보다 작으면 95%신뢰구간에서 추정된 회귀모형이 유의하다고 볼 수 있다. 3가지 성능지수 모두에서 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

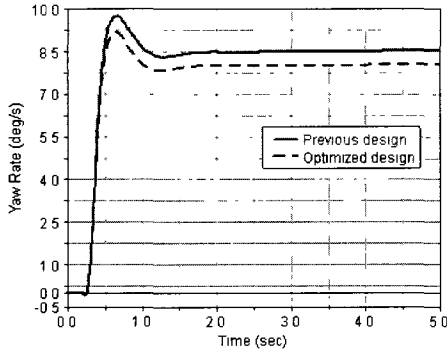
구해진 회귀모형을 이용하여 횡가속도와 요레이트(J-턴)의 최대값 그리고 언더스티어그래디언트(정상원선회)를 모두 최소화하는 설계변수를 구한

다 표 3의 계수값을 적용하여 정의한 각각의 성능지수의 회귀모델함수를 이용하여 원하는 성능지수를 최소화하는 설계변수를 구한다.

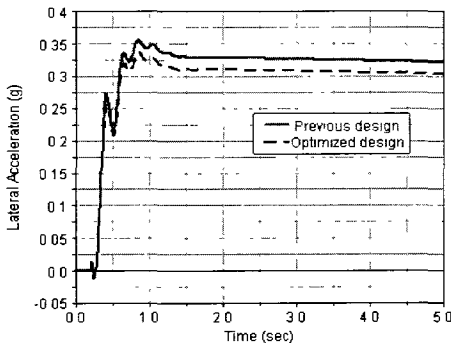
ADAMS모델에 변경된 설계변수를 적용하여 동역학 해석을 수행한다. 그림 7은 최적화를 수행하기 전과 후의 결과를 나타낸 그래프이며 표 5는 각각의 성능지수의 값을 비교하였다. 모두 최소화되었음을 알 수 있다.

표 5 성능지수의 변화량

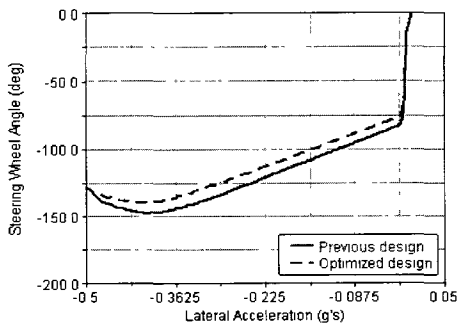
	요레이트 최대값	횡가속도 최대값	언더스티어 그레디언트
기존값	9.74	0.36	180.83
최적값	9.18	0.34	170.23
변화량	0.56(5.7%)	0.02(5.5%)	10.6(5.8%)



(a) 요레이트



(b) 횡가속도



(c) 언더스티어그레디언트

그림 7 최적화된 성능지수

## 5. 결론

몬테카를로 방법을 이용하여 ADAMS에서 모델링된 상용차량의 정상원선회와 J-턴 동역학 해석을 실시하였고 회귀분석을 통하여 여러가지 성능지수와 설계변수와의 관계를 밝혔다. 이를 이용하여 설계변수의 최적화를 통해 성능지수를 향상시켰다. 몬테카를로 방법의 공학해석에 광범위한 적용 가능성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Dubi, Monte Carlo Applications in Systems Engineering, John Wilery & Sons, Ltd, 2000.
- [2] J. E. Gentle, Random Number Generation and Monte Carlo Methods, Springer, 1998.
- [3] ADAMS/Insight Manual, Mechanical Dynamics, Inc., 2002.
- [4] G. Scarlet, I. Haque, G. Fadel, J. Schuller, "A Modified Monte-Carlo Approach to Simulation-Based Vehicle Parameter Design with Multiple Performance Objectives and Multiple Scenarios", SAE Technical Paper, 2002-01-1186, 2002.
- [5] J. Marczyk, Automotive Crash Simulation : A Personal Descriptive, 2000.
- [6] I. Doltsinis, Stochastic Analysis of Multivariate Systems in Computational Mechanics and Engineering. CIMNE, 1999.
- [7] J. Marczyk, Principles of Simulation-Based Computer-Aided Engineering, CIMNE, 1999.
- [8] D. C. Montgomery, G. C. Runger, Applied Statistics and Probability for Engineers, John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [9] 박성현, 공업통계학, 민영사, 2000.