

DFSS를 이용한 상용차용 변속 배력장치의 BALL-STOP부 강건설계에 관한 연구

정원지*, 정동원⁺, 윤찬현⁺⁺

(논문접수일 2005. 10. 7, 심사완료일 2006. 4. 10)

A Study on Robust Design of Ball-Stop Part for Power Shift of Heavy Vehicle Using DFSS

W. J. Chung*, D. W. Jung⁺, C. H. Yoon⁺⁺

Abstract

The important function of Ball-Stop part is to operate power shift using suitable pneumatic force for vehicle with more than 5 ton when a driver changes gear. In this paper, we have applied the concept of the DFSS(Design for Six Sigma) to robust design of Ball-Stop part. First, we have found the control factors which could mainly influence the performance of the Ball-Stop part. The simulations of contact between head and detent pin was performed to evaluate effect of control factors according to DOE(Design of experiment) by using ADAMS[®]. Finally, we have obtained optimal levels of each factors using MINITAB[®]. Through the comparison of the result of optimized design with one of ininitial design, we have verified the usefulness of DFSS method which can be applied to robust design of mechanical systems.

Key Words : Ball-Stop part(볼스탑 부), DFSS(Design for six sigma), 설계변수(Design variable), S/N비(Signal to noise ratio), Orthogonal array(직교배열표), QFD(Quality functional deployment), Control factor(제어인자), Robust design(강건설계)

1. 서론

현재 5톤 이상 상용차용 변속기에 있어 기존 사용되고 있

는 저단 변속기에서 벗어나 변속비를 늘려 출력을 증대 시키는 다단 변속기의 연구가 진행 중이다. 변속기가 다단 변속기 형태로 바뀌면서 기어 변속 시 요구되어지는 힘이 커지

* 창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

+ 창원대 기계설계공학과 대학원

++ (주) 영동테크

게 되었고 이에 따라 운전자가 느낄 수 있는 최소의 피로도, 최대의 안전성 및 최적의 승차감을 주기 위해 최소한의 조작력만으로 기어 변속을 용이하게 하는 변속 배력장치가 필요하게 되었다. 이 장치는 Fig. 1에서와 보는 바와 같이 여러 부분이 서로 복합적으로 연계되어 있으며 엔지니어는 이러한 복합적인 문제를 해결하기 위해 여러 가지 방법으로 강건 설계에 대한 연구를 계속 해 왔다⁽¹⁾. 본 연구에서 다루어지고 있는 변속 배력장치는 운전자가 가장 최소한의 조작력으로 변속을 하기 위해 변속 배력장치의 Ball-stop부를 구성하는 디텐트 핀(Detent pin)과 헤드(Head) 사이에 적절한 접촉 힘(Contact force)을 가지고 있어야 한다. Ball-Stop부가 가지는 초기조건이 복합적으로 연계된 여러 부분과 제어할 수 없는 부분 즉, 노이즈 인자(Noise Factor)들 때문에 충분히 변속 배력장치의 성능을 만족시키지 못하고 있는 문제를 가지고 있어 설계변수(Design variable)의 변경이 필요하게 되었으며 이를 위해 컨셉 설계 후 해석을 수행하게 된다⁽²⁾. 초기조건은 Table 1에 나타나 있으며 해석 결과에 따라 설계변수를 변경한 후 재해석이 수행되며 목표치를 만족할 때까지 이 과정이 반복된다. 설계변수들에 대한 초기조건의 파라미터들과 그 값은 컨셉 설계 시 설계자의 경험과 대략적인 관련 계산량에 근거하여 주어지며 따라서 설계변수의 변경은 전적으로 엔지니어의 경험과 시행착오에 의존하기 때문에 소요시간의 변동이 크며, 최적의 설계변수를 찾기가 힘들다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하

기 위해 DFSS(Design for six sigma)⁽³⁾를 이용하여 변속배력장치의 BALL-STOP부에 영향을 미치는 설계변수들로부터 초기 설계 단계에서 고려해야 할 제어인자(Control factor)를 QFD(Quality functional deployment)⁽⁴⁾ 단계를 거쳐 도출 하였다. 도출된 인자를 통하여 직교배열표(Orthogonal array)를 구성하였으며 이를 바탕으로 ADAMS[®]를 통한 해석을 수행하였으며, 해석 값을 이용하여 S/N비 및 평균 계산과 분산분석을 이용한 교호작용을 통해 최적 사양을 결정하였다. 결정된 최적 조건사양은 해석 및 실제 수행을 통해 기존의 초기조건 사양과의 성능을 비교하여 검증하였다.

2. DFSS에 의한 강건 설계

2.1 강건 설계

강건설계⁽¹⁾(Robust design)란 어떤 제품을 설계할 때 그 제품의 사용 환경을 고려하여 어떠한 조건의 사용환경 하에서도 제품이 목적하는 성능을 일정하게 발휘할 수 있도록 설계하는 개념이라고 말할 수 있다. 이 개념은 초창기에 겐니치 다구찌 박사로부터 고안되어 사용되었고 현재로 여러 제조업뿐만 아니라 연구개발 분야에서도 폭 넓게 활용되고 있다.

강건 설계의 핵심 내용은 노이즈(Noise)라고 하는 성능편차 유발요인을 초기 설계단계부터 고려함으로써 제어인자의 수준이나 인자간의 배열을 노이즈에 둔감한 반응을 나타내도록 유도하여 완성품이 되어서도 일정한 성능을 발휘할 수 있도록 하는 것이다. 이에 따른 과정을 살펴보면 먼저 설계변수를 찾아내고 그 중 제어인자와 노이즈 인자를 구분하여 이를 바탕으로 직교배열표를 구성하고 이를 통해 실험을 수행한 후 얻은 데이터들로부터 S/N비를 산출하여 각 제어인자가 노이즈에 대해 강건해 질 수 있는 수준을 결정하는 것이다.

2.2 제어인자 선정 및 직교배열표

DFSS란 제품의 연구 개발 단계에서부터 공정능력을 감안하여 식스 시그마 품질 수준을 달성할 수 있도록 하는 강건 설계를 의미한다. DFSS는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 전개 되며 이에 따라 도출된 BALL-STOP부의 도안은 Fig. 3과 같이 디텐트 핀과 헤드, 그리고 디텐트 핀을 지지하는 스프링으로 구성되어 있다.

QFD1, 2단계를 거쳐 BALL-STOP부의 설계변수들을 선정하였으며, QFD 2단계에서 8개의 설계변수를 선정하였다.

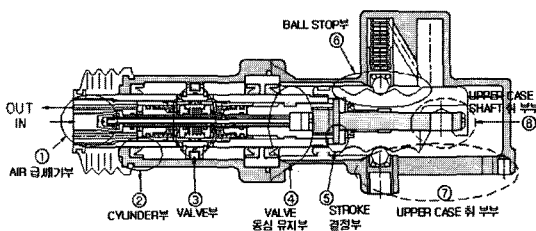


Fig. 1 Power Shift for vehicle

Table 1 Initial value of design variable

Design variable	Value
Spring constant(N/m)	7500
Angle of hole in HEAD(°)	40
Structure of ball-bearing	No existence
material of HEAD	Al
material of BALL	Al

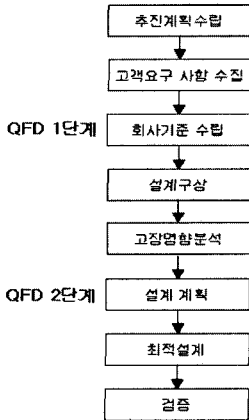


Fig. 2 DFSS(Design for six sigma) process

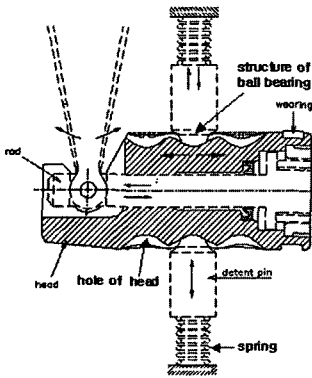


Fig. 3 BALL-STOP part concept view

이 중 최종적으로 운전자가 가장 최소한의 조작력으로 변속을 할 수 있는 조건을 고려하여 헤드와 디텐트 핀 사이의 접촉힘에 직접 영향을 줄 수 있는 Spring constant, Material of HEAD, Material of BALL, Angle of hole in HEAD, Structure of ball-bearing의 5개의 제어인자를 결정하였다. 여기서 Ball-bearing의 구조의 No existence와 Existence는 구조 존재의 유·무를 나타내며 초기모델에서 존재하지 않는다는 것은 디텐트 핀 끝에 있는 Ball이 헤드의 홈을 타고 넘어갈 때 구르지 않고 넘어가는 것이다. 따라서 디텐트 핀과 헤드사이의 접촉힘을 줄이는 방법으로 디텐트 핀 끝단의 Ball이 잘 구를 수 있도록 하기위해 스프링과 디텐트 핀 끝단의 Ball 사이에 작은 Ball을 추가할 수 있게 하여 Ball-bearing 형태의 구조를 가지게 하는 것이다. 여기에 따르는 제어인자는 4수준이 1개, 2수준이 4개이며, 그에 관한 내용은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Level of control factor

sign	control factor	level 1	level 2	level 3	level 4
A	spring constant (N/m)	7500	8500	9500	10500
B	Angle of hole in HEAD(°)	30	40	-	-
C	Structure of ball-bearing	Exist	No exist	-	-
D	material of HEAD	Al	steel	-	-
E	material of BALL	Al	steel	-	-

운전자가 기어변속을 위해 최소한의 조작하는 힘을 고려하여 헤드에 가해지는 힘을 150N으로 설정 하였으며, 이에 대한 출력으로는 헤드가 움직이는 방향으로 작용하는 디텐트 핀과 헤드사이의 접촉 힘으로 하였다. 또한 여기서 다루고 있는 5톤 이상 상용차에 적용되는 변속 배력장치는 공기 압축기로부터 나온 압축공기를 Valve 형태로 된 곳에 저장시켰다가 운전자 조작력이 작용하게 되면 Valve를 개폐시켜 배력을 만들어 냈으므로 운전자는 최소한의 힘으로 기어를 변속할 수 있게 된다. 압축된 공기를 사용하여 배력을 구조를 가지다 보니 헤드의 앞쪽으로 씰링(sealing)을 위해 O-ring을 사용하게 되었고 이것은 장치가 작동할 때 습동저항을 가지게 된다. 이러한 습동저항은 장치가 작동할 때 마다 일정한 값을 가지지 않고 제어 할 수 있는 부분도 아니다. 따라서 O-ring에 따른 습동저항을 노이즈 인자로 선정하였으며, O-ring의 개수 및 직경, 두께를 고려하여 60N~80N사이의 값을 가진다고 가정 하였다. 이에 습동저항은 변속배력장치가 작동을 할 때 60~80N 중의 하나의 값을 가지게 되며 이를 노이즈로 사용하기 위해 각 실험조건에 따른 해석을 실시 할 때 60N부터 2N씩 증가시켜 80N까지 설정하여 11개의 노이즈를 사용하였다.

또한 직교 배열표는 제어인자 수에 따라 $L_8(2^4 \times 4^1)$ 을 이용하였다. 각 제어인자 및 노이즈 인자와 대응하는 직교 배열표를 만들어 보면 Table 3과 같다⁽⁵⁾.

2.3 해석 및 최적인자 도출

해석을 위해 사용한 툴은 ADAMS[®](MSC. Software Cooperation. 2000)⁽⁶⁾이며, Table 3과 같이 만들어진 직교 배열표에 따라 총 88번의 해석을 수행하였다.

BALL-STOP부는 크게 디텐트 핀과 헤드의 두 부분으로

Table 3 Orthogonal array

No.	A	B	C	D	E	Noise factor				
						N1	N2	...	N10	N11
1	1	1	1	1	1			...		
2	1	2	2	2	2			...		
3	2	1	1	2	2			...		
4	2	2	2	1	1			...		
5	3	1	2	1	2			...		
6	3	2	1	2	1			...		
7	4	1	2	2	1			...		
8	4	2	1	1	2			...		

나누어지며 각각의 해석 결과에서 시간에 따른 헤드부가 작동하는 방향의 접촉 힘을 결과로 하였다. Fig. 4에서 접촉 힘은 헤드부가 운전자 조작력으로 작동 될 때 디텐트 핀이 헤드를 잡아주는 역할을 하는 것을 나타내며 이 힘에 따라 기어변속 시 운전자가 조작력을 크게 주거나 작게 주어야 하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 BALL-STOP부의 설계가 아주 중요하다.

설계변수를 현실적으로 제어 가능한 제어인자와 제어가 어려운 노이즈인자로 구분하여 최적 제어 인자의 조합을 찾는 것을 제안하였는데, 이는 복잡한 통계 이론을 통하여 노이즈 인자의 영향을 차단하고자 하는 것으로 이해하기 쉽고 현실적인 방안으로 받아들여지고 있으며 강건 설계의 기본적인 수단을 이루고 있다. 강건 설계는 제어 할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대화하여 노이즈의 영향력을 최소화 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 S/N비(Signal to noise ratio)를 사용한다. S/N비 신호 대 노이즈의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력과 노이즈의 비율로서 나타낸다. 즉, 각각의 제어인자의 S/N비를 크게 만드는 값을 그 인자값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 노이즈에 대하여 강건해진다.

S/N비는 목적함수, 즉 특성치(Characteristic-value)에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(Normal is best), 망소(Lower is better), 망대(Higher is better) 특성으로 나누어진다. 여기서 다루고 있는 변속 배력장치가 목표 성능을 만족하기 위해서는 공압의 작동 없이 오직 O-ring의 습동저항만이 작용하고 있을 때 조작력 150N이 작용하여 디텐트 핀과 헤드 사이에 적절한 접촉 힘(60N)을 가지고

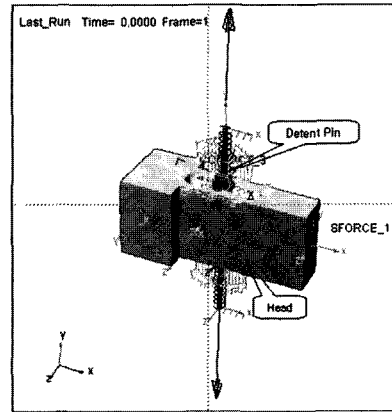


Fig. 4 The simplified BALL-STOP part model

있어야 한다. 따라서 특성치를 디텐트 핀과 헤드사이의 접촉 힘으로 선정하여 망목특성을 선택하였다. 망목특성인 경우 S/N비의 비율을 실험데이터로부터 추정 할 때 다루는 식 (1)과 같이 나타내었다⁽⁷⁾.

$$S/N비 = \frac{\text{모평균}\mu\text{의 제곱}(\mu^2)\text{의 추정값}}{\text{분산}\sigma^2\text{의 추정값}} \quad (1)$$

만약 n개의 데이터 y_1, y_2, \dots, y_n 이 얻어지면, σ^2 의 추정값은,

$$\hat{\sigma}^2 = V = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1) \text{ 이고} \quad (2)$$

μ^2 의 추정치는,

$$S_m = (y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2 / n \text{ 인 경우,}$$

$$E(S_m) = \hat{\sigma}^2 + n\mu^2 \text{ 이 성립}$$

$$\hat{\mu}^2 = \frac{1}{n}(S_m - V) \quad (3)$$

따라서 식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면,

$$S/N비 = \frac{\frac{1}{n}(S_m - V)}{V} \quad (4)$$

실제로 사용되는 S/N비의 값은 식 (4)에 사용대수를 취하고 10을 곱하여 데시벨 단위로 나타낸다. 즉,

$$S/N비 = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{n}(S_m - V)}{V} \right] \quad (5)$$

Table 4 Response table of S/N Ratio

Level	1	2	3	4	Rank
A	34.19	38.41	37.87	35.75	2
B	37.08	35.87	-	-	3
C	38.45	34.72	-	-	1
D	36.05	36.94	-	-	4
E	36.87	36.28	-	-	5

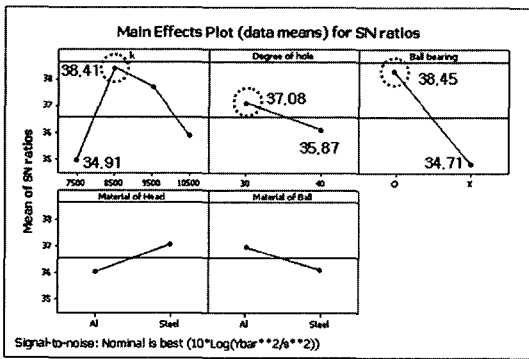


Fig. 5 S/N ratio value response for design variables

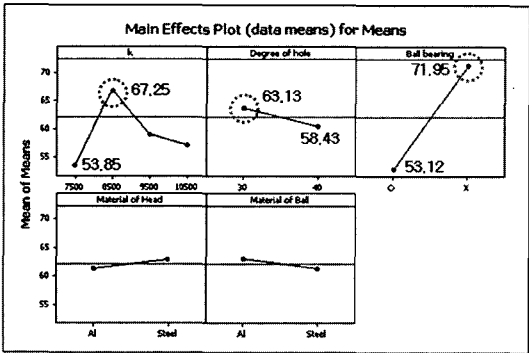


Fig. 6 Mean value response for design variables

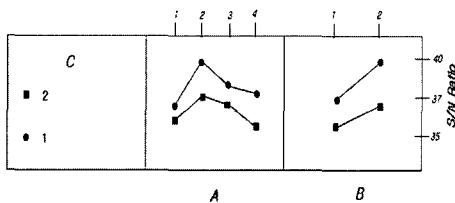


Fig. 7 Plot of interaction of S/N ratio

이 S/N비 값을 크게 하는 것이 최적조건이 된다.

여기서 n 은 Orthogonal array에 따른 해석 결과 값의 개수, y_i 는 해석에 의한 결과 값, σ^2 은 해석결과 데이터의 분산, μ 는 데이터의 모평균을 나타낸다.

접촉 힘의 결과 값으로부터 통계프로그램인 MINITAB[®](8)을 이용하여 S/N비를 계산하였고 평균값을 동시에 고려하였으며 분산 분석을 실시 한 후 최적 수준을 결정하였다.

Table 3에서 얻어진 데이터를 바탕으로 하여 S/N비를 계산하였으며, Table 4는 각 수준에 대한 S/N비를 나타내고 있으며 Fig. 5에 그래프로 표시하였다. 또한 각 수준별 평균 값도 Fig. 6에 나타내었다.

Table 4와 Fig. 5, 6에서 알 수 있듯이 접촉 힘에 기여하는 인자는 볼 베어링 구조의 유·무 - 디텐트 핀의 스프링 상수 - 헤드 홈의 각도 - 헤드의 재질 - 볼의 재질 순으로 나타났으며 접촉 힘의 영향에 D,E인자의 효율이 미치는 영향이 다른 요인에 비해 매우 작으며 C인자인 볼 베어링 구조의 유·무가 다른 인자에 비해 접촉 힘의 값을 좌우 할 수 있는 주요 인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 헤드에 조작력이 작용하여 볼 이 헤드의 홈을 타고 넘어갈 때 볼 베어링 구조가 볼을 회전 시켜 줌으로써 변속 배력장치의 요구 성능을 만족하도록 마찰력을 줄여주기 때문이라 판단된다. 또한 Fig. 7에서와 보는 바와 같이 분산분석을 통한 각 변수 간의 교호작용(Interaction)은 없으므로 S/N비를 이용하여 최적 조건을 찾아내는 것은 타당성이 있다고 할 수 있다.

2.4 최적인자 타당성 분석

앞의 결과에서 도출한 최적인자를 적용하여 최적사양에 대한 접촉 힘이 목표치에 만족하는가를 알아보기 위하여 경제조건은 초기조건과 동일 시 하고 최적인자에 대한 해석을 수행하였다. 여기서 최적 인자에 대한 조건은 Table 5와 같이 주어진다. 또한 강건 설계의 효과를 알아보기 위해 이전에 적용하였던 초기조건사양을 해석한 결과를 이용하여

Table 5 Optimal value of control factor

Control factor	Value
Spring constant(N/m)	8500
Angle of hole in HEAD(°)	30
Structure of ball-bearing	Existence
material of HEAD	Al or steel
material of BALL	Al or steel

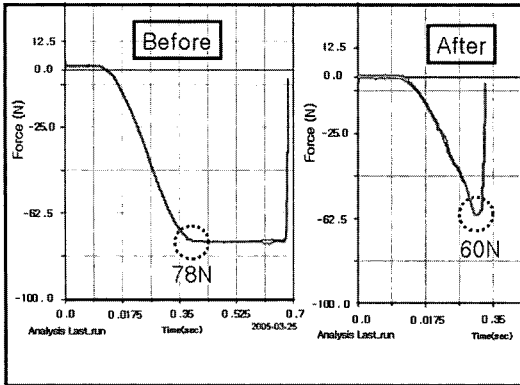


Fig. 8 Contact force between Head and Detent Pin

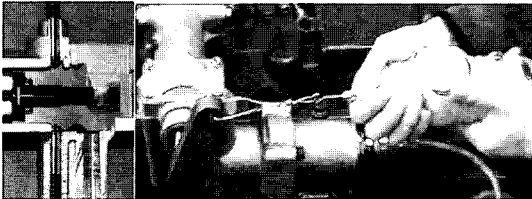


Fig. 9 Ball-Stop part force test

비교하였다.

Fig. 8은 시간에 따른 헤드와 디텐트 핀 사이의 접촉 힘을 나타내는 것이다. 기존사양에서의 접촉 힘은 78N, 최적사양은 60N으로 목표치에 도달하였다. 이는 초기 조건이 가지는 접촉 힘의 과다발생에 인하여 운전자 조작력이 150N이상으로 주어져야만 작동이 가능하던 것에 비해 최적사양 조건으로 설계함으로써 접촉 힘이 감소하였으며 약 30%의 개선 효과를 보여 줌으로써 150N의 조작력으로 작동이 가능하게 되었다. 작동 시간 또한 단축된다는 것을 알 수 있다. 이러한 개선의 결과는 BALL-STOP부가 가져야 하는 목표 값에 일치한다.

해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 최적 사양을 샘플로 제작하여 Fig. 9의 접촉 힘에 대한 필요 조작력의 시험을 실시하였다. 샘플 제작 시 헤드와 디텐트 핀 끝단의 볼의 재질은 알루미늄으로 선택하였다. 실제 시험에서의 접촉 힘에 따르는 운전자 조작력은 150N으로 해석결과와 거의 동일한 결과 값을 보여준다는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 DFSS를 이용하여 BALL-STOP부에 대한 최적 사양을 유도하였고 해석 및 시험을 통해 그 효과를 검증 하였다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) BALL-STOP 부 설계 단계에서 고려해야 할 5가지 제어인자를 제시 하였다. 가장 중요한 세 가지 제어인자는 볼 베어링의 유·무, 디텐트 핀의 스프링 상수 값, 헤드부 흡의 각도이며, 원하는 접촉 힘을 얻기 위해서는 무엇보다도 헤드부 흡의 가공 각도를 달리하며 디텐트 핀의 끝 부분은 베어링구조를 가져야 한다.
- (2) 최적 조건사양의 접촉 힘 해석결과, 기존의 초기사양에 비해 접촉 힘이 30%정도 감소되어 요구 성능의 목표 값에 도달하였으며 이를 실제 샘플을 제작하여 실제 시험을 함으로써 신뢰성도 확보 하였다. 이는 현 사양 대비 최적사양의 S/N비가 16dB 만큼 개선 된 것이다. 또한 시간상의 절감효과도 있어 DFSS적용 시 성능개선에 상당한 효과가 있음을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술 연구센터, 산업자원부 지방기술혁신 사업(RT104-01-03)지원으로 수행되었습니다. 본 과제는 산업자원부의 출연금등으로 수행한 지역전력 산업 석·박사 연구인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, H. S., Kim, C. B. and Yim, H. J., 2003, "Quality Improvement for Break Judder using design for Six Sigma with Response Surface Method and Sigma Based Robust Design," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 193~201.
- (2) Lee, S. B. and Yim, H. C., 2004, "Reliability-Based Optimal Design of Pillar Sections Considering Fundamental Vibration Modes of Vehicle Body Structure," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 107~113.
- (3) Park, S. H., Lee, M. J. and Lee, K. G., 2001, *DFSS*

- for design of six sigma*, KSA.
- (4) Lawrence P. Sullivan, 1998, *Quality Function Deployment*, American Supplier Institute. INC.
- (5) Genichi Taguchi, yuin wu., 2001, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, Wiley.
- (6) MSC. Working Knowledge, 2000, *MSC. ADAMS / Control Tutorial Guide*, MSC Korea.
- (7) Park, S. H., 2001, *Design of experiments*, Minyoungsa, pp. 631~646.
- (8) Lee, S. B., 2002, *Minitab User Handbook*, Iretech, pp. 168~192.