

자동차 현가장치용 Rubber Bushing 부품의 신뢰성 향상

정원* · 권영호** · 윤신일** · 조현중**

*대구대학교 산업시스템공학과 · **에나인더스트리

Abstract

차량의 충격과 진동을 완화하고 링크의 조정역할을 하는 Rubber Bushing제품의 내구성 약하게 되면 Control arm에서의 이탈사고나 차량의 떨림, 소음으로 인한 고객 불만이 발생하게 된다. 따라서, 국내의 시장에서의 경쟁력 향상을 위해 Rubber Bushing에 대한 내구성, 정특성, 동특성의 개선을 위한 기술의 개발이 요구되고 있다.

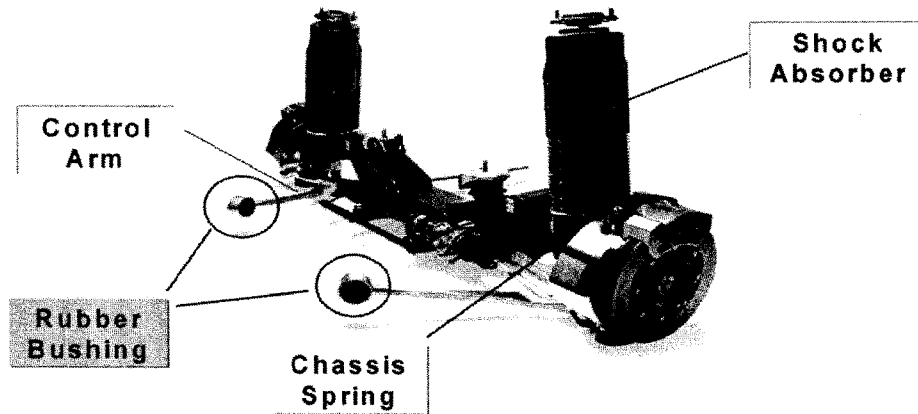
본 연구의 목적은 Rubber Bushing을 개발하는데 있어서 종전의 재료설계, 형상설계 및 공정설계에 대한 분석을 행하고, 실험계획법(DOE)을 활용하여 가장 적은 샘플의 시험으로 최적의 설계요소를 찾아내는 방법을 연구하는데 있다. Bushing의 품질특성이 재료, 형상 및 공정에서 어떠한 조건을 가질 때 특성치가 가장 높은 바람직한 반응을 얻을 수 있는가를 연구하여 최적반응 조건을 결정하고자 한다.

1. 서론

현가장치는 주행 중 노면에서 받는 충격이나 진동을 완화시키는 부분으로서 스프링, 속임소버, Rubber bushing과 컨트롤암 등과 같은 요소로 구성되어 있으며, 여러 형식에 따른 차체 고정장치나 횡방향 또는 길이방향의 힘을 지지하는 링크 등으로 이루어져 있다. 이 중 Rubber Bushing의 내구성이 약하면 Control arm에서의 이탈사고나 차량의 떨림, 소음으로 인한 고객 불만이 발생하게 되므로 Bushing에 대한 내구성의 개선이 요구되고 있다.

자동차 신모델을 개발하는 경우 Rubber Bushing의 시제품은 실차에 적용하여 평가하고 있으며, 시험은 진동에 대한 반응, 수직 충격 흡수, 과속 방지턱에 대한 진동흡수 등에 대하여 종합적으로 평가하게 된다. Rubber bushing 제품의 경쟁력향상을 위해서는 고무 배합(Compounding)기술, 접착기술과 같은 재료설계, 형상설계 및 공정설계에 대한 설계 기술의 향상과 실험계획 기술, 수명예측 시험 및 시뮬레이션 평가에 따른 수명한계의 정의를 명확히 하는 등 장기내구신뢰성에 대한 보증대책 등이 필요하다.

본 연구의 목적은 자동차 Rubber Bushing 제품을 개발하는데 있어서 종전의 재료설계, 형상설계 및 공정설계에 대한 분석을 행하고, 실험계획법(Design of Experiment)을 활용하여 가장 적은 샘플의 시험으로 최적의 설계요소를 찾아내는 방법을 개발하는데 있다. 설계단계에서의 실험계획법 활용기술은 중소기업에서 제품개발기간에 시험데이터 분석에 대한 표준화를 이루는데 도움이 되며, 결과적으로 부품의 품질특성을 개선하고, 개발기간은 단축할 수 있게 될 것이다.



<그림 1>현가장치와 Control Arm

2. 신뢰성에 영향을 주는 설계요소

2.1 재료설계

고무배합(Compounding)은 황화제, 촉진제, 가공제, 유기산, 금속산화제, 노화방지제, 보강제, 충전제 등으로 기초배합을 설정한 후 인장강도와 신장율, 경도, 반발탄성, 인열강도, 인장응력, 노화 후 물리적 현상 등을 고려하여 배합 설계를 하게 된다. 특히, 고무 제품의 경도를 높이기 위한 보강성과 경도가 높으므로 잘 마모되지 않는 내마모성과 관련하여 카본블랙(Carbon Black)을 사용하며 고무제품의 특성을 결정하는 중요한 부분이다. 이것은 또한 석유 타르(Tar)를 탄소물질로 불완전 연소하여 열로 분해시켜 만든 제품이며 성분자체는 탄소이다.

카본블랙(Carbon Black)은 입자경이 작고, 고무와의 결합하는 표면적이 클수록, 고무의 경도(Hardness)와 내마모성(abrasion resistant)등의 물성을 보장하는 능력이 크다. 그러나 경도(Hardness)와 탄성(elasticity)은 반비례적으로 탄성은 감소하게 된다. 또한, 작은 입자경은 탄성체(Elastomer)의 항복점(Micro-Brownian motion)을 연장하는데 탁월하다. 탄성체는 항복점 이후에 탄성의 성질을 잃어버리고 소성을 띠게 되는데 카본블랙(Carbon Black)은 이러한 고무의 물성을 조정하는 중요한 인자이다[2].

2.2 형상설계

Bushing의 외형형상은 자동차 모델에 따라 수요기업에서 설계를 제공하지만 철과의 접촉 부분 등 세부설계는 제조업체에서 실시하여야 한다. 따라서 각 부분의 세부적 모양이나 각도에 따라 고무량에 영향을 미치게 되며 주요 요소로는 내철(Inner pipe) 구배각도, 외철(Outer pipe), 접촉부분 등이다. 이밖에 외경크기의 산포에 따라 내구성에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 품질관리 활동에 의해 Sizing공정에서 최종규격을 맞추게 된다.



<그림 2> Rubber bushing의 형상 예

2.3 공정설계

재료설계와 함께 부품의 내구성, 정특성, 동특성을 결정하는 주요공정은 철과 고무를 접착시키는 접착제 도포 공정과 가류(가황)공정이다.

(1) 접착제 도포 공정

접착력은 접착제와 피접착제 사이의 계면 결합력으로 이론적인 의미이고 실제의 접착력은 접착강도로 나타낸다. 이는 시험방법, 접착방법, 시험시의 조건, 시편의 기하학에 따라 다르게 나타난다. 이 공정은 프라이머 (Primer) 도포와 접착제 (Top Coat) 도포로 구분되며 도포방법으로는 침지법(Dipping), 붓칠법(Brushing), 롤 코팅법(Roll Coating), 스프레이법(Air Spray), 그리고 텀블링법(Tumbling)이 있다. 프라이머는 피착재 표면과의 친화성이나 접착제와의 상용성이 뛰어나지 않으면 안되고 동시에 접착 저해물과의 상용성도 높아야 한다. 또 프라이머 중의 유효성분 쪽이 피착재 표면에 흡착되어 있는 저해성분보다 피착재에 의하여 안정하게 흡착(Adsorption)되어 있는 중요하다. 따라서 프라이머는 충분한 교반, 균일하고 얇은 도포 그리고 완전한 건조가 이루어 져야 한다.

고무를 강력하게 접착시키기 위해서는 접착제가 적당히 고무 중으로 확산 된 후에 고무와의 사이에서 상호 확산과 가교반응을 일으킬 필요가 있다. 따라서 고무와 상용성이 있는 적절한 접착제 선정이 필수이며 충분한 교반, 점도 조절에 의한 균일한 도포, 적당한 두께, 완전한 건조(온도와 시간)가 이루어져야 한다.

(2) 가류공정

가황 또는 가류라고 하지만 좁은 의미로는 생고무에 유황 같은 가황제를 가하여 고무분자 간의 결합을 강하게 하고 탄성, 인장강도 등을 증가시키는 공정이라고 할 수 있다. 그러나 넓게는 이런 작업 외에 고무분자의 공유결합을 유도하여 기계적 강도를 늘리는 일련의 작업이라 할 수 있다. 가황고무의 가장 큰 특징은 탄성이 커지는 것이며, 노화(老化)가 더디고, 변형시에도 체적변화가 크지 않다는 것이다. 중요한 관리 항목으로는 가류온도(금형, 챔버, 스크류), 가류시간, 가류압력이 특성에 영향을 미친다.

3. 실험의 설계 및 데이터 분석

3.1 공정설계 및 형상설계

(1) 실험조건

지금까지 신모델의 개발에 적용되는 경도(Hardness)는 수요기업에서 제시하는 사양(Specification)에 따라 적정수준의 경도를 적용하였으며, 일반적으로 산포는 ± 2 정도이다. 각 부분의 모양이나 각도에 따라 고무 량에 영향을 미치게 되는 형상설계에 관해서는 내부파이프 (Inner pipe) 구배각도를 1.5~2.5로 하고 외부파이프(Outer pipe)의 접촉부분을 13mm~15mm로 하였으며, 외경의 크기는 $\Phi 27 \sim \Phi 27.8$ 로 유지하였다.

공정설계는 가류시간(고무가 포함하고 있는 황의 90%가 Polymerder로 변환되는 시점; TC90)을 240~600sec 로 하였다. 가류 온도는 150~180C 로 하고 주변 온도에 영향을 받으므로 금형표면온도는 항상 확인하였다. 접착제 도포가 내구성에 영향을 주므로 접착제 두께는 15~40micron으로 하고, 접착제 배합조건은 12cc~12.8cc 로 하였다. <표 2>는 실험조건이고, <표 3>은 평가항목 및 시험기준을 나타낸다.

<표 1> 실험조건

인자	수준수	수 준
A: 경도	4	A0=45, A1=48, A2=50, A3=55
B: 가류시간	4	B0=4분, B1=6분, B2=8분, B3=10분
C: Inner pipe 구배각도	2	C0=2.0°, C1=2.5°
D: Outer pipe 접촉부분	2	D0=13mm, D1=15mm
D: Outer pipe 접촉부분	2	F0=27.0mm, F1=27.8mm

<표 2> 평가항목 및 시험기준

평가항목	단위	비중	고객요구사항	시험기준
1. 내구성 Durability	Cycles	40%	20,000 : Max load150,000: Nominal load	Delphi : 22204309
2. 비틀림 토크 Torsion Torque	N.m	10%	5@ 5 degree	CARBON SPEC. 45017
3. 정적 반경방향 강성 Static Radial Stiffness	N/mm	10%	1100@ 0 ~ 1 mm	CARBON SPEC. 45017
4. 동강성 Dynamics Stiffness	N/mm	20%	15Hz:1100, 150 Hz:1200	CARBON SPEC. 45017
5. 축방향 강성 Axial Stiffness	N/mm	10%	150@ -0.5 ~ +0.5 mm	CARBON SPEC. 45017
6. 원통방향 토크 Conical Torque	N.m	10%	5@ 5 degree	CARBON SPEC. 45017

(2) Taguchi 설계

다구찌의 강건설계(Robust design)는 인자가 품질 특성의 평균에 대해 가지는 효과뿐만 아니라 분산에 미치는 효과에 대해서도 초점을 맞추고 있다. 분산을 줄일 수 있는 통제 가능한 인자에 대한 조건을 설정하여 품질특성이 통제 불가능한 인자의 변화에 대해서는 둔감하도록 할 수 있다. 강건설계의 주 목적은 품질특성의 목표값을 유지하면서, 분산을 줄이는 인자에 대해 설치값(Setting)을 발견하는데 있다[3].

설계의 내용은 다음과 같다.

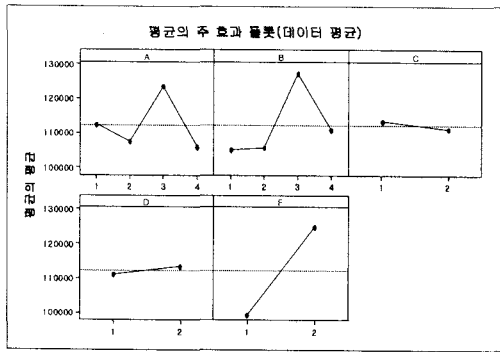
- 시험Data 분석을 위한 각 요인 변동의 계산은 L16(2^{15})형 직교배열표(Orthogonal Design)에 대한 계산표를 사용하였다.
- A, B는 4수준 C, D는 2수준의 혼합수준(mixed level)을 내측배열에 생성하였고, 외측배열은 공정 라인별 잡음인자에 대한 시험결과를 입력하였으며 작업자나 기타의 잡음인자는 고려하지 않았다.
- 품질특성은 내구성에 대한 망대특성이며 부품의 정특성 및 동특성에 대한 분석은 적절한 상호관계를 고려하여야 하므로 별도의 실험을 행하였다.
- 결과를 정리하여 ANOVA Table을 만들고, 유의수준은 인자의 수에 비하여 실험횟수가 많지 않으므로 $\alpha = 0.10$ 으로 정하였다. MINITAB을 활용하여 내구성이 가장 높은 최적의 설계 및 공정조건을 구하였다.

실험결과와 해석은 다음과 같다.

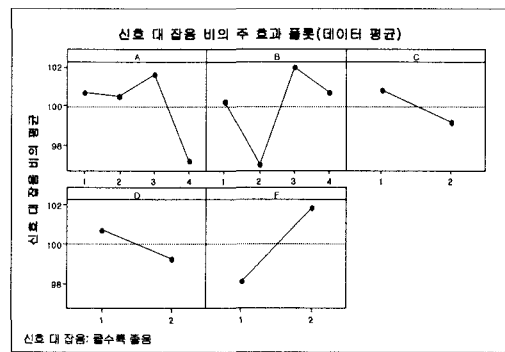
MINITAB을 통해 <표 3>과 같은 실험조건을 얻었으며 내구성에 대한 실험결과치를 입력한 후 강건설계를 수행한 결과 인자별 수준효과와 신호 대 잡음비의 결과는<그림2><그림3>과 같다. <그림3>의 신호 대 잡음비 주효과 플롯을 보면 C, D인자들은 A, B, F 인자들에 비해 반응변수에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 평균 주효과 플롯에서도 A, B, F 인자들은 반응변수의 평균에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. <표4>에 있는 각 인자수준의 신호 대 잡음비와 평균값을 보면 순위가 1인 B인자가 영향을 많이 주는 인자임을 알 수 있고, D인자는 순위가 5로 영향을 덜 미치는 인자임을 알 수 있다.

<표 3> MINITAB에 의한 실험조건 (Modified data)

A	B	C	D	F	Process-1	Process-2
1	1	1	1	1	70000 cycle	90000
1	2	1	1	1	90000	120000
1	3	2	2	2	142000	136000
1	4	2	2	2	120000	130000
2	1	1	2	2	100000	112000
2	2	1	2	2	140000	110000
2	3	2	1	1	98000	110600
2	4	2	1	1	90000	98000
3	1	2	1	2	120000	112000
3	2	2	1	2	140000	136000
3	3	1	2	1	160000	140000
3	4	1	2	1	80000	99000
4	1	2	2	1	124000	112000
4	2	2	2	1	98000	10600
4	3	1	1	2	112000	120000
4	4	1	1	2	130000	140000



<그림 2>인자수준별 주효과



<그림 3>신호 대 잡음의 비

<표 4>신호 대 잡음 비에 대한 반응 표

Taguchi 분석: Process1, Process2 대 A, B, C, D, F

수준	A	B	C	D	F
1	100.70	100.25	100.81	100.71	98.12
2	100.49	97.04	99.18	99.28	101.86
3	101.61	101.98			
4	97.18	100.71			
델타	4.42	4.94	1.62	1.44	3.74
순위	2	1	4	5	3

3.2 재료설계 - 혼합물에 관한 실험계획

재료설계에 적용되는 실험계획은 혼합물(Mixture)에 관한 실험계획으로서 몇 개 성분의 혼합물에 중 어떠한 성분이 품질의 특성에 유의한 영향을 미치는지를 분석하여, 반응을 최대로 만드는 최적혼합비율을 찾고자 하는 실험계획이다. 원료를 배합할 때에 들어가는 성분이 k 개의 종류가 있고, 이들을 어떤 비율로 배합하는 것이 가장 좋은가를 찾는다. 성분의 혼합에 있어서 x_i 를 i 번째 성분의 혼합비율이라고 하면 다음과 같은 관계식을 만족시켜야 한다.

$$x_1 + x_2 + \dots + x_k = 1, x_i \geq 0, i=0, 1, 2, \dots, k$$

Rubber bushing의 재료설계 시 혼합물은 고무, 카본과 배합원료로 황화제, 촉진제, 가공제, 유기산, 금속산화제, 노화방지제, 보강제, 충전제 등을 사용한다. 혼합물실험에 적용되는 실험계획으로는 심플렉스 격자형배열법, 심플렉스 중심배열법, 심플렉스 선별계획법 등을 주로 적용한다[4]. 본 실험에서는 심플렉스의 전 영역이 아니라 제한된 영역에서 실험을 하고자 하므로 심플렉스 선별계획법(Extreme vertice design)을 적용하였다.

실험을 위하여 <표 5>와 같은 혼합물성분의 한계를 입력한 결과 여섯가지 성분에 대하여 총 32회의 실험점이 생성되었다. 실행1의 경우 A,B,C,D,E,F 성분을 각각 0.013 0.0967 0.0967 0.4516 0.1290 0.2130의 비율로 섞어서 실험하라는 의미이다. <표 7>의 회귀계수는 숫자가 큰 것이 결과치에 영향을 많이 미친다는 의미이며, 성분 혼합물의 계수가 양수이면 두 성분이 서로 상승작용을 하거나 보완한다는 것을 의미한다. 반대로, 계수가 음수이면 두 성분이 서로 상극임을 의미한다. <표 8>은 각 실험설계점에서의 95% 신뢰수준을 나타낸다.

<표 5> 혼합물 성분의 한계

성분	하한	상한
A Surfur	0.006500	0.013000
B Carbon SRF	0.064500	0.096700
C Carbon MT	0.064500	0.096700
D Rubber NR	0.451600	0.516100
E Rubber BR	0.129000	0.193500
F ETC	0.084000	0.283900

<표 6> 실험계획의 결과

실행 유형	A	B	C	D	E	F	Hardness
1	1	0.013000	0.096700	0.096700	0.451600	0.129000	0.213000 50
2	1	0.006500	0.064500	0.064500	0.516100	0.129000	0.219400 54
3	1	0.013000	0.096700	0.096700	0.451600	0.193500	0.148500 52
4	1	0.013000	0.064500	0.064500	0.451600	0.193500	0.212900 48
30	1	0.006500	0.096700	0.064500	0.516100	0.129000	0.187200 49
31	1	0.006500	0.096700	0.064500	0.451600	0.129000	0.251700 50
32	1	0.013000	0.096700	0.064500	0.516100	0.129000	0.180700 52

<표 7> Hardness에 의해 추정된 회귀계수

항	계수	SE 계수	T	P	VIF
Surfur	1981	4708	*	*	9099.7
Carbon SRF	503	494	*	*	6419.1
Carbon MT	95	657	*	*	11337.9
Rubber NR	235	88	*	*	7074.7
Rubber BR	200	304	*	*	9739.4
ETC	-56	84	*	*	1000.2
Surfur*Rubber NR	1789	4839	0.37	0.717	2260.9
Carbon SRF*Rubber NR	-1685	977	-1.73	0.105	5892.5

<표 8> Hardness에 대한 모형을 사용한 새 설계 점에서의 예측 반응

점	적합치	SE 적합치	95% CI
1	51.0000	2.0914	(46.5423, 55.4577)
2	55.5000	2.0914	(51.0423, 59.9577)
31	50.2500	2.0914	(45.7923, 54.7077)
32	51.0000	2.0914	(46.5423, 55.4577)

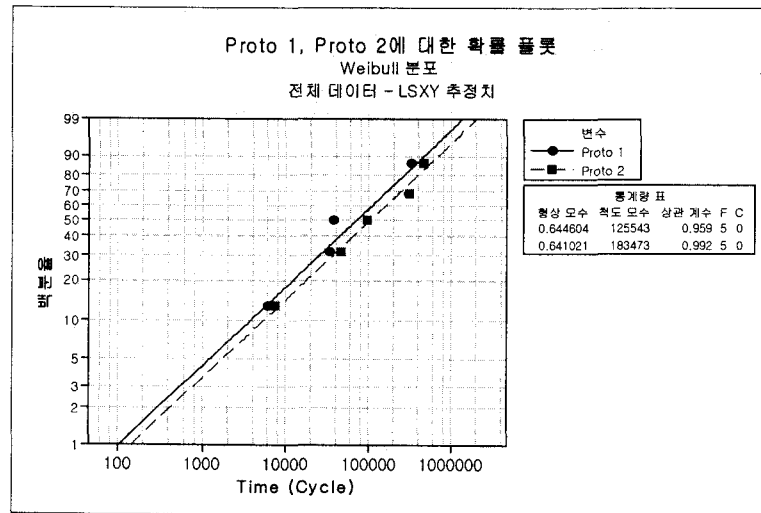
4. 부품의 신뢰성 성장 관리 : Weibull B_{10} 수명 비교

<그림 4>는 <표 9>의 고장시간 데이터를 입력하여 얻은 Weibull 성장곡선이다. 프로토타입1과 프로토타입2의 B_{10} 수명은 대략 3,000cycle과 4,000cycle 정도이며, 척도모수는 125,500cycle과 183,473cycle로 나타나 50%정도의 향상을 이룬 것을 알 수 있다. 부품의 개발과정에서 작은 표본에 대한 고장시간 자료가 주어졌을 때, 와이블 분석을 사용하여 신뢰성 성장관리를 행하면 다음의 정보를 얻을 수 있다[1].

- 신뢰성 개선은 목표 B_{10} 수명이 달성될 때까지 하나의 프로토타입에서 다음 프로토타입까지 추적할 수 있다.
- 신뢰성 개선은 시험한 프로토타입에 대해 와이블 타점으로 표현되고, 빠르게 방향을 파악하여 신뢰성 진전과정에 대한 양적 측면의 관리능력 향상을 그래프로 확인할 수 있다.
- 컴포넌트를 고장날 때까지 시험하는 것은 고장모드에 대한 아주 귀중한 정보를 제공하고, 따라서 시정조치 활동이 필요하다.
- 많은 표본이 더 좋은 신뢰도를 얻을 수 있지만 와이블 분석은 많은 표본을 필요로 하지 않는다.
- 고객 duty 사이클과 시험 모수의 관계가 알려져 있다면 더 빠르고 더 적은 비용으로 가속시험을 할 수도 있다.

<표 9> 프로토타입의 고장 시간

Prototype 1	Prototype 2
6,000	7,500
33,000	46,800
36,800	94,800
296,000	301,950
321,000	449,700



<그림 4> Weibull 성장곡선

5. 결론

Rubber Bushing 개발과정에서 종전에는 요인(Facter)별 수준(Level)을 무작위로 추출하여 실험하였으나, 본 실험계획의 과정을 따르면 요인들이 계획적으로 반영되어 품질특성에 각각 어느 정도의 영향을 미치는지 분석이 가능하게 된다. 또한, 다구찌에 의한 강건설계의 생성으로 산포를 줄일 수 있다.

본 연구는 아직 데이터에 대한 검증과 분석이 진행 중에 있으며, 특히 Bushing 부품의 특성상 내구성만의 개선이 최선이 아니고, 정특성과 동특성을 일정수준으로 동시에 유지하도록 고려하여야 함으로 이 부분에 대한 실험의 설계가 추가적으로 요구된다. 본 실험이 완성되어 개발에

대한 표준화를 이루게 되면, 실험결과 분석이 요인, 수준, 샘플수에 따라 통계적으로 근거있는 해석이 되며, 부품의 품질특성인 내구성, 정특성, 동특성을 개선하고, 개발기간은 단축할 수 있게 될 것이다.

참고문헌

- [1] 고정, 이상규, 권수호, 노태성, 정원, 박창규, 김명수, 신뢰성성장프로그램, 수원대 신뢰성혁신센터, 2005.
- [2] 김명용, 고무공업화학, 선진문화사, 2006.
- [3] 미니탭사업팀, 새 Minitab 실무완성, 이레테크, 2004.
- [4] 박성현, 실험계획법, 민영사, 2003.