

산업용차량 고무마운트 부품에 대한 내구성 및 신뢰성개선

정 원[†]

대구대학교 산업시스템공학과

Durability and Reliability Improvement for the Rubber Mount of Industrial Trucks

Won Jung[†]

Industrial & Systems Engineering, Daegu University

Predicting fatigue life of rubber components is an important issue in design procedure for industrial trucks to assure the durability and reliability. Main considerations in designing rubber components against fatigue failure are the compounding technology, shape design, and manufacturing process. Among them the rubber compounding technology is one of the most critical factor to determine more than 50% of component's quality.

This paper presents how to improve the durability and reliability of industrial rubber mount during its design, development and prototype testing. The data presented illustrates explicitly the prediction of reliability growth in the product development cycle. The application of these techniques is a part of the product assurance function that plays an important role in rubber components reliability improvement.

Keywords : Fatigue Life, Rubber Mount, Durability, Reliability Growth

1. 서 론

다양한 원인으로 인해 발생하는 진동현상은 구조물의 안정성에 심각한 영향을 미치며 제품의 수명 단축에 결정적인 원인으로 작용하게 된다. 본 연구의 대상 품목은 지게차 등 중장비에 적용되어 진동제어 및 안정성 확보의 역할을 수행하는 고무마운트이다. 고무마운트의 경우 고무가 가지는 특유의 비선형성으로 인하여 그 특성 파악에 많은 노력이 필요하다. 기존 고무마운트의 신뢰성 문제는 축 방향으로 작용하는 큰 하중에 대하여 적절한 안정성을 확보하지 못함으로 인하여 마모문제가 심각하게 나타나는 것이다.

<그림 1>은 중장비인 지게차에 적용되는 마운트의 조

립 형태를 보여주고 있다.

지게차의 진동제어 및 안정성을 추구하는 마운트의 경우 현재 2,000시간 정도의 수명을 나타내고 있다. 주로, 큰 하중 하에서의 부품간의 마찰에 의한 마모가 심하게 발생하게 되며 그 중에서도 특히 수직하중을 집중으로 받는 부분에서 내구성 문제가 발생하게 된다. 지게차 용 마운트는 2,000시간 정도의 작업 시간 이후에는 과도한 축 하중으로 인하여 중간 부분에 배불림 현상이 생겨 <그림 2>와 같이 파손되게 된다. 이러한 내마모성 문제를 해결하기 위해서는 구조적 개선과 병행하여 고무 재료 개발이 필수적으로 수반되어야 신뢰성과 안정성을 가질 수 있다.

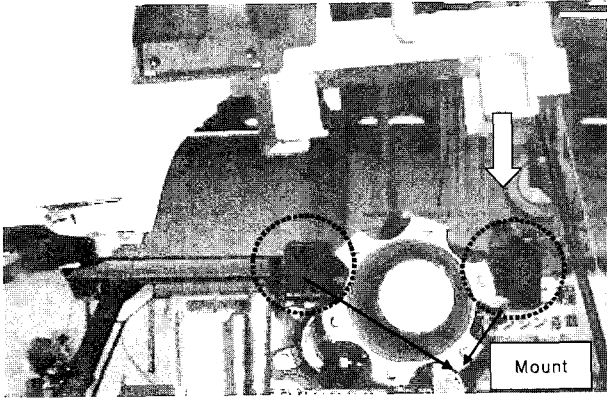
본 연구의 목적은 중장비의 안정성과 고 내구성을 실

[†] 교신저자 wjung@daegu.ac.kr

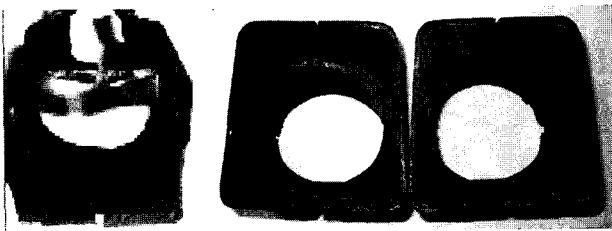
※ 본 연구는 2006학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 결과임.

현할 수 있는 설계기술을 연구하여 큰 하중에서도 신뢰성이 높은 마운트를 개발하는데 있다.

설계기술은 재료배합설계, 형상설계, 공정설계에 대한 연구이며, 제품개발단계에서의 신뢰성시험데이터 분석 기술을 연구하여 신뢰성 성장과정을 추적할 수 있도록 한다.



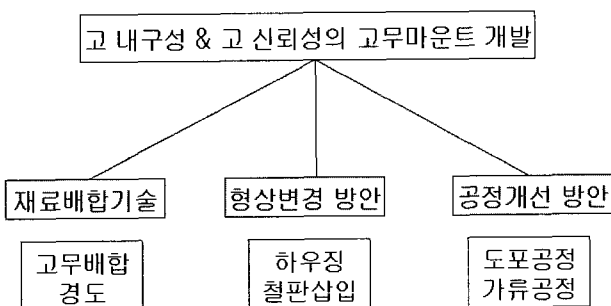
<그림 1> 고무마운트의 조립형태



<그림 2> 고무 마운트의 파손 형상

2. 신뢰성향상을 위한 고려요소

고무마운트에 대한 고객의 요구조건 만족과 성능향상을 위한 방안으로는 <그림 3>과 같이 재료배합개선, 형상개선, 그리고 가류공정을 포함한 공정개선에 의한 방법이다.



<그림 3> 성능향상을 위한 개선방안

2.1 재료배합개선

고무마운트의 성능향상을 위해서는 재료 개발이 필수적이라 할 수 있다. 고무배합은 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 내마모성 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 요오드가(Iodine number)와 광흡수도(Tint)가 높을수록 입자경은 작고 DBP(Di-butyl phthalate)흡수율(Oil absorption)이 클수록 구조가 발달되었다. 카본블랙(Carbon Black)은 입자경이 작고, 고무와의 결합하는 표면적이 클수록, 고무의 경도(Hardness)와 내마모성(abrasion resistant)등의 물성을 보강하는 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.

방진 고무부품을 만들려면 다음의 3가지 공정을 거친다.

- 배합공정 : 사용목적에 따라 원료고무를 선택하고 배합약품의 종류와 양을 결정하는 공정
- 가공공정 : 정해진 배합에 따라서 고무와 배합약품을 섞고(혼련) 일정한 두께의 고무 시트를 제조하고 만들고자 하는 모양으로 절단하는 공정
- 가황공정 : 만들고자하는 모양으로 절단한 미가황 고무에 고무 탄성을 갖게 하고 물성을 개선하는 공정

이들 중 배합은 가공공정, 가황공정 및 만들어진 제품 성능에 절대적인 영향을 미치므로 배합설계자는 배합설계(Compounding design)를 할 때 다음의 3가지 점(3P)에 균형을 잘 조화 시켜야 한다.

- 최종 제품의 요구물성을 충족시킬 것(Property)
- 가공이 쉬울 것(Processing)
- 부피 당 배합단가가 적정할 것(Price)

또한, 이와 같은 조건을 충족시키는 배합설계를 하기 위해서 배합설계자는 배합의 목적, 배합에 사용되는 원

료고무와 각종 배합제의 성질, 배합의 기초, 배합단가, 제품이 만들어 질 때까지의 작업 및 설비 등을 주지해 야 한다.

일반적인 고무제품의 배합은 많이 알려져 있지만, 특성 향상을 위한 방안이나 그 배합에 대한 신뢰성에는 많은 의문점이 제기 되는게 현실이다. 본 연구에서는 실험계획법을 적용하여 이론적으로 최적의 배합설계를 이룰 수 있는 방법을 연구하였다. 요구특성을 만족시키기 위하여 선정된 축진제의 배합조건의 최적화를 실현하기 위하여 꼭지점 계획법을 이용하여 그 효율성을 검증하고자 하였다. 배합의 경우 어느 독립적인 인자의 선정으로는 그 효과를 극대화 시킬 수 없는 특성이 있는데, 본 연구에서는 선정된 축진제 및 폴리머의 조건 하에서 최적의 배합 조건을 찾아보고자 하였다.

재료설계에 적용되는 혼합물(Mixture)배합에 관한 실험계획으로서 몇 개 성분의 혼합물 중 어떠한 성분이 품질의 특성에 유의한 영향을 미치는지를 분석하여, 반응을 최대로 만드는 최적혼합비율을 찾고자 하는 실험 계획이다.

적용되는 실험계획으로는 심플렉스 격자형배열법, 심플렉스 중심배열법, 꼭지점 계획법 등을 주로 적용한다[2]. 본 실험에서는 심플렉스의 전 영역이 아니라 제한된 영역에서 실험을 하고자 하므로 꼭지점계획법(Extreme vertice design)을 적용하였다.

고무부싱의 재료배합에서는 k개의 성분재료가 있고, 이들을 어떤 비율로 배합하는 것이 품질특성치를 가장 좋게 하는가를 찾는다. 성분의 혼합에 있어서 x_i 를 i번째 성분의 혼합비율이라고 하면 다음과 같은 관계식을 만족시켜야 한다.

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

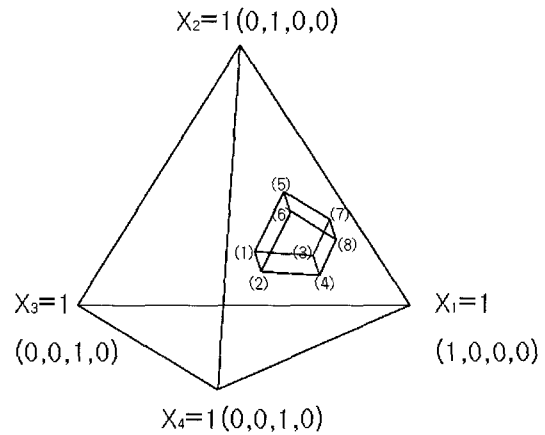
이러한 경우는 일반적 실험계획법처럼 심플렉스의 모든 영역에 실험이 배치되는 것이 아니고, 제한된 영역에서만 실험을 하는 경우이다. 즉, 각 인자(Factor)가 $0 \leq x_i \leq 1$ 의 모든 값을 취할 수 있는 것이 아니라 제한된 구간

$$0 \leq a_i \leq x_i \leq b_i \leq 1$$

안에서만 값을 취한다. 이와 같은 경우는 경제적인 이유나, 또는 실험 전에 인자들의 성질에 대하여 상당한 정보가 있는 경우이다. 위의 식과 같은 인자의 구간이 설정되면 실험가능영역은 심플렉스 상의 좁은 영역이 된다.

Mclean and Anderson[7]은 제한된 실험영역에 대한 실험계획법으로 꼭지점계획법(extreme vertices design)을 제

안하였다. 이 계획법은 제한된 영역이 가지는 모든 꼭지점과 이 꼭지점들의 선형조합으로 이루어지는 몇 개의 점을 적절히 선택하는 실험계획법이다. 만약 4개의 혼합성분이 사용되는 경우 실험영역을 그림으로 그리면 <그림 4>와 같이 사면체 속에 위치하는 6면체가 된다. Mclean 과 Anderson은 이 6면체의 꼭지점과 중심점을 실험점으로 선택하는 방법에 대한 예제를 제시하고 있다.



<그림 4> 4개의 혼합성분에 대한 꼭지점 계획법

고무부싱의 재료설계 시 혼합물은 고무, 카본 및 배합 원료로서 황화제, 축진제, 가공제, 유기산, 금속산화제, 노화방지제, 보강제, 충진제 등을 사용한다.

<표 1>은 고무재료의 구성성분과 혼합물성분의 구성비이다. MINITAB에 성분의 한계를 입력한 결과 네 가지 성분에 대하여 <표 2>와 같은 총 17회의 실험점이 생성되었다. 실험 1의 경우 네 가지 성분을 0.9807, 0.0068, 0.0011, 0.0114의 비율로 섞어서 실험하라는 의미이다.

<표 1> 고무재료 혼합물의 구성성분

성분	배합하한	배합상한
폴리머 등 기타	0.9774	0.9807
축진제 1	0.0068	0.0085
축진제 2	0.0011	0.0022
유 황	0.0114	0.0119

데이터분석 결과는 <표 3>과 같다. 17개 실험 점에서의 적합추정치와 95%신뢰구간은 예측반응에 잘 나타나 있다.

<표 1>에 있는 각 성분의 혼합 제한조건을 만족시키면서 내구성을 최대로 하는 처리조건은 Polymer의 기타, Acc1, Acc2, Sulfur의 각 성분에 대하여 배합비율이 0.9774, 0.0085, 0.0022, 0.0119이고, 이 처리조건에서 예상되는 내

구성은 2,449hr에 도달할 것으로 추정되었다.

시험에 따라 적정배합비율이 다르게 나오는 경우가 있는데 이는 오차범위(경도의 경우 ± 2 도)가 비교적 넓은 고무의 특성에서 비롯되거나 측정오차에 따른 결과로 추정된다.

<표 2> 실험점의 생성과 내구수명 시험결과

NO	폴리머 외	촉진제 1	촉진제 2	유황	내구수명
1	0.980700	0.006800	0.001100	0.011400	2,171
2	0.980200	0.006800	0.001100	0.011900	2,172
3	0.979600	0.006800	0.002200	0.011400	2,322
4	0.979100	0.006800	0.002200	0.011900	2,388
5	0.979000	0.008500	0.001100	0.011400	2,362
6	0.978500	0.008500	0.001100	0.011900	2,428
7	0.977900	0.008500	0.002200	0.011400	2,444
8	0.977400	0.008500	0.002200	0.011900	2,426
9	0.979050	0.007650	0.001650	0.011650	2,350
10	0.979875	0.007225	0.001375	0.011525	2,228
11	0.979625	0.007225	0.001375	0.011775	2,261
12	0.979325	0.007225	0.001925	0.011525	2,277
13	0.979075	0.007225	0.001925	0.011775	2,348
14	0.979025	0.008075	0.001375	0.011525	2,356
15	0.978775	0.008075	0.001375	0.011775	2,389
16	0.978475	0.008075	0.001925	0.011525	2,438
17	0.978225	0.008075	0.001925	0.011775	2,388

<표 3> 새 설계점에서의 예측반응

점	적합치	95% 신뢰구간
1	2139	(2076, 2202)
2	2189	(2126, 2253)
3	2328	(2264, 2391)
4	2364	(2301, 2427)
5	2388	(2325, 2451)
6	2415	(2352, 2478)
7	2436	(2376, 2499)
8	2449	(2386, 2512)
9	2337	(2306, 2369)
10	2249	(2217, 2281)
11	2270	(2238, 2302)
12	2323	(2292, 2356)
13	2341	(2309, 2373)
14	2353	(2321, 2385)
15	2368	(2336, 2400)
16	2393	(2361, 2425)
17	2404	(2372, 2436)

반응 최적화 모수 - Durability

목적	하한	목표값	상한	가중치
최대값	2167	2833	2833	1

글로벌 솔루션

Polymer etc.	=	0.9774
Acc1	=	0.0085
Acc2	=	0.0022
Sulfur	=	0.0119

예측 반응

Durability	=	2449
------------	---	------

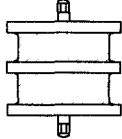
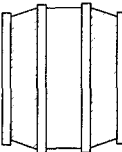
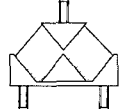
2.2 형상변경에 의한 개선

일반적인 마운트의 역할은 구조물을 원활히 지지하면서 동시에 진동제어를 목적으로 한다. 본 기술개발에서와 같이 큰 하중이 작용하는 구조물 및 장치에서의 진동제어는 충분한 강성을 유지하면서도 원활하게 진동제어를 수행해야 하는 양면성을 가지고 있다. 이러한 조건을 동시에 만족시킬 수 있는 재료 개발 및 형상설계가 본 연구의 개발 내용이다. <표 4>는 일반적으로 적용되어지는 마운트의 기능별 분류 내용을 보여주고 있다.

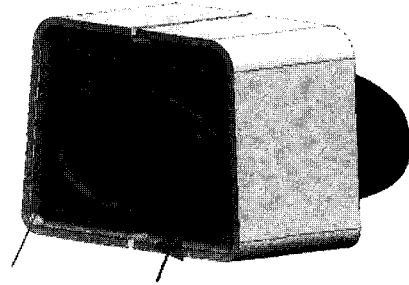
<그림 5>는 일반적인 산업용 증장비 마운트의 설치 구조를 나타낸 것이다. <그림 5>(a)에서 보는바와 같이, 차량의 프레임(100)에 마운트 덮개를 볼트결합 또는 용접 결합하여 구성하고, 마운트 하우징(21) 내부에 형성된 인슐레이터(23)의 중공부(26)를 통해 마운팅 브라켓(230)의 일단을 삽입한다. 마운팅 브라켓의 끝단을 상대부품(80)과 체결하여 프레임에 상대부품을 결합하도록 하는 것이다. <그림 5>(b)에 나타낸바와 같이 마운트와 마운트덮개(210)는 상대부품의 양측단에 구성하여 마운트와 상대부품의 결합이 용이하게 이루어지도록 구성되어 있다.

<그림 6>은 개발 전 종래의 마운트 형상이다. 전면이 사다리꼴 형상인 마운트 하우징(21) 내부에 탄성체의 인슐레이터(23)를 삽입 설치하여 구성한 것이다. 종래의 마운트의 경우 상대부품에 연결된 마운팅 브라켓이 마운트에 가하는 비틀림 응력과 수직응력에 의해 응력이 집중되는 형상이 발생하게 되고, 이로 인해 인슐레이터(23)의 상단부에 Barreling(볼록 튀어나오는 형상)이 발생하거나 Fracture(파단)가 발생하게 된다. 또한, 상대부품의 자체무게와 관성에 의해 과도한 하중(3.2ton)을 받게 되며, 마운트의 내, 외측이 고정되어 있지 않고 유동적이기 때문에 상대부품과의 마찰에 의한 마모로 인하여 인슐레이터의 변위를 발생시켜 고유진동수를 변화시킨다. 이는 공진현상으로 인한 소음과 진동을 과도하게 유발시킴으로써 승차감을 크게 저하시키게 되는 문제점이 있으며, 이로 인해 사용주기가 짧아 자주 교체해야 하는 등의 문제점이 있어왔다.

<표 4> 마운트의 기능별 분류

분류	특징	형상에제
압축형	단위 면적당 큰 하중을 받는 것으로 방진고무를 장착할 공간이 작은 경우에 많이 사용되어 진다. 오른쪽과 같이 중간에 PLATE를 삽입하여 SPRING 정수를 높여 큰 하중에 견딜 수 있도록 하는 방법	
전단형	축 방향의 SPRING 상수를 낮게 하기 위한 경우에 사용되며, 특히 BUSH의 경우 자유 표면적이 고무의체적보다 작으므로 가류 후 수축현상으로 인하여 고무내부에 큰 잔류 응력이 발생하여 접착문제를 야기시키므로 Swaging 공정을 사용함(한국 5~8%, 일본 12% 이하).	
복합형	상기 2가지 경우에는 어려운 Spring 정수비를 요구할 경우에 사용함. 통상적으로 자동차용 방진고무에 많이 적용됨(압축/전단 복합형).	

부에 마운팅 브라켓을 관통할 수 있도록 하는 중공부를 형성하고, 중공부의 상단부에는 플레이트를 형성한 것을 특징으로 한다.



<그림 7> 형상 개선된 마운트의 사시도

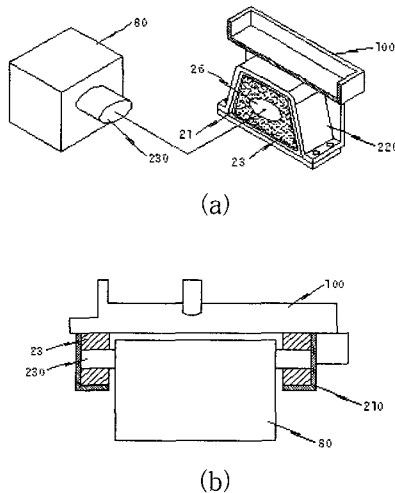
2.3 공정개선 설계

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

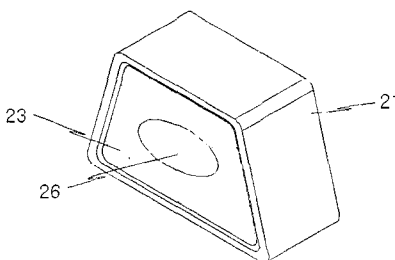
접착공정에서 고려하여야 할 접착강도는 시험방법, 접착방법, 시험시의 조건, 시편의 기하학에 따라 다르게 나타난다. 도포방법으로는 침지법(Dipping), 붓칠법(Brushing), 롤 코팅법(Roll Coating), 스프레이법(Air Spray), 그리고 덤브링법(Tumbling)이 있다.

가류공정은 고무분자의 공유결합을 유도하여 기계적 강도를 높이는 작업이다. 가황 또는 가류라고 하며 생 고무에 유황 같은 가황제를 가하여 고무 분자 간에 결합을 강하게 하고 탄성, 인장강도 등을 증가시킨다.

본 연구에서는 가류온도를 $B_1 = 420^\circ$, $B_2 = 480^\circ$, $B_3 = 500^\circ$, $B_4 = 520^\circ$ 네 가지를 선택하여 이 중 내구성을 가장 높일 수 있는 인자의 조합을 실험계획법으로 판별하였다.



<그림 5> 중장비 마운트의 설치구조



<그림 6> 종래의 마운트

<그림 7>은 개발된 마운트의 사시도이다. 사각형의 형상으로 내부에 인슐레이터를 삽입 결합할 수 있도록 하는 마운트 하우징과, 그의 내부에 삽입되어 탄성체로 구성되는 인슐레이터로 설계되어 있다. 인슐레이터는 내

3. 신뢰성성장 관리

신뢰성성장관리(Reliability growth management) 기술은 제품을 개발하는데 소요되는 많은 시간과 비용 및 엔지니어링 노력을 절감하면서 개념선택, 제품과 공정의 신뢰성, 그리고 비용효율을 달성할 수 있도록 유용한 정보를 제공해 준다. 군사장비, 자동차 및 전자, 중장비개발 등에 적용된 최근의 신뢰성 성장시험 관리기술은 각 분야의 경쟁적인 사업 환경 아래에서 제품개발을 효율적으로 조직하여 신뢰성평가를 시작하고, 신뢰성 성장 과정을 추적할 수 있도록 해준다. 신뢰성성장관리기술은 제품 및 공정설계 관련사항 및 검증시험 항목들에

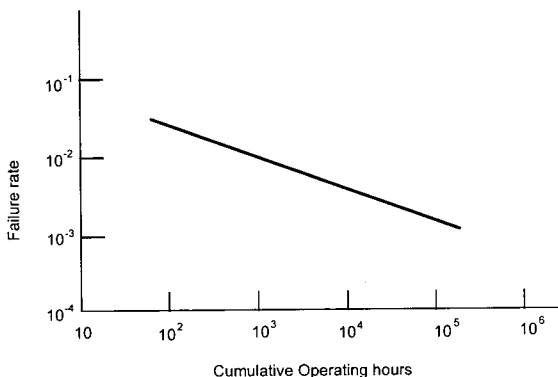
대하여 사용 환경에 따른 신뢰성 성장 진행과정을 확인하고, 그 결과로부터 성장시험곡선을 개발할 수 있게 한다. 또한, 설계단계 사이의 여러 가지 관련성을 확인하여 관찰하고, 그 정보를 다른 제품보증분석들과 연결하여 고객 요구사항에 대한 제품의 적합도를 적절히 평가하는 데 도움을 준다.

신뢰성 성장은 개발시스템에 대하여 여러 시험 단계가 시리즈로 이루어지는 동안 고장모드를 발견하고 이를 개선하는 TAAF(Test Analyze And Fix)과정을 거쳐 이루어진다[5]. 제품개발과정에 적용되는 신뢰성 성장시험관리 프로세스는 다음과 같다.

- 신뢰성 성장시험조건을 결정하고, 시험 사이클을 개발한다.
- 신뢰성 성장시험곡선의 사용을 통하여 시험과정을 실행하고 추적한다.
- 시험결과를 평가하고 다른 선행된 분석연구결과들과 비교한다.
- 확인된 결함을 제거하기 위해 설계변경을 실시한다.
- 설계검증시험을 준비한다.

신뢰성 성장시험의 주된 목적은 설계상의 약점을 확인하고 제거함으로써 설계의 신뢰성을 증가시키는 것이다. 정확하게 신뢰성 수준이 변화되는 진행상황을 추적하기 위해서는 요구사항에 대한 불합치성(Nonconformance)을 확인하고 불합치성이 일어난 시간을 모두 추적하여야 한다. 시험을 시작하기 전에 적절한 시정조치를 용이하게 하기 위해 사전계획이 수립되어야 하며 고장분포를 결정하기 전에 각각의 고장부품에 대한 고장원인을 분리할 수 있어야 한다.

신뢰성 성장을 일반적인 수식으로 처음 나타낸 사람은 Duane[4]이다. Duane은 시험 데이터를 관찰한 결과 누적 고장시간 대 누적고장수를 로그 그래프에 도식하였을 때 직선으로 나타나는 것을 발견하였다. 정의된 수식모델은



<그림 8> Duane 그래프

$$\log \rho_c(t) = \log \lambda - \alpha \log t \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)의 양변에 로그를 제거하면, 식 (1)은 식 (2)와 같은 누적 고장률에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_c(t) = \lambda t^{-\alpha} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\rho_c(t)$ = 시간 t 동안의 누적 고장률이며, λ = 상수, α = 성장률, t = 총 시험시간을 나타낸다.

식 (2)는 시스템에 대한 신뢰성을 향상시키기 위한 노력을 계속하는 한, 시간 t 가 증가함에 따라 누적 고장률은 감소하고, 신뢰성은 성장한다는 것을 의미한다. 성장 기간 동안 고장시간은 지수분포를 하며 누적 MTBF는

$$M_c(t) = [\rho_c(t)]^{-1} = \frac{1}{\lambda} t^\alpha, \quad t > 0 \dots\dots\dots (3)$$

이 함수에서 $N(t)$ 를 시간 t 까지의 누적고장수라고 하면($t > 0$), 누적 고장률 $\rho_c(t)$ 는 $\rho_c(t) = N(t)/t$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 식 (2)로 부터, $N(t) = \lambda t^{1-\alpha}$ 이다. 시스템의 순간 고장률(Instantaneous failure rate) $\rho_i(t)$ 는 누적 고장수 $N(t)$ 의 단위 시간 당 변화율을 나타낸다. 즉,

$$\rho_i(t) = dD(t)/dt = \lambda(1-\alpha)t^{-\alpha} \dots\dots\dots (4)$$

이다. 그러므로 순간(Instantaneous) MTBF는

$$M_i(t) = \frac{1}{\lambda(1-\alpha)} t^\alpha, \quad t > 0 \dots\dots\dots (5)$$

이 된다. 식 (3)과 식 (6)에서, 순간 MTBF와 누적 MTBF의 관계는 식 (6)과 같다.

$$M_i(t) = \frac{1}{(1-\alpha)} M_c(t) \dots\dots\dots (6)$$

Crow[1]는 Duane의 가정으로부터 NHPP(Non Homogeneous Poisson Process) 개념을 수식화에 추가하였으며, 순간 고장률 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\rho_i(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 λ 는 척도모수(scale parameter), β 는 형상모수(shape parameter)이다. NHPP의 특성은 평균이 시간에 따라 변하는 것 외에는 모든 특성이 포아송 프로세스의 조건을 만족한다.

시간 간격 $[s, t]$, $t \geq s \geq 0$ 에서의 기대고장수를 $N(s, t)$ 라고 하면, 기대 고장수는

$$N(s, t) = \int_s^t \rho_i(t) dt \dots\dots\dots (8) \\ = \lambda t^{1-\alpha} - \lambda s^{1-\alpha}$$

NHPP 가정 하에서는 시간간격 $[s, t]$ 에서 정확히 a 개의 고장이 발생할 확률은 평균 $N(s, t)$ 를 가진 포아송 분포를 한다. 즉, 모든 $N(s, t), t \geq s \geq 0$ 에서

$$P_r\{X=a\} = \frac{[N(s, t)]^a e^{-N(s, t)}}{a!} \dots\dots\dots (9)$$

이다. 여기서 X 는 $[s, t]$ 에서의 고장수이다.

Duane 모델은 목표 B_{10} 수명에 대하여 초기 시작품(Early Prototype)으로부터 후기 시작품(Later Prototype)까지의 신뢰성 개선을 추적관리할 수 있다. 부품의 개발과정에서 작은 표본에 대한 고장시간 자료가 주어졌을 때, 신뢰성 성장관리를 행하면 다음의 정보를 얻을 수 있다.

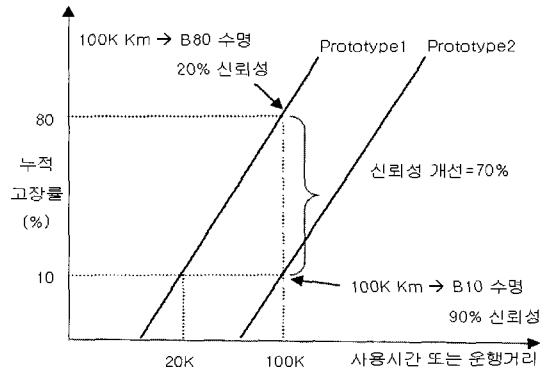
- 신뢰성 개선은 목표 B_{10} 수명이 달성될 때까지 하나의 프로토타입에서 다음 프로토타입까지 추적할 수 있다.
- 신뢰성 개선은 시험한 프로토타입에 대해 성장곡선의 타점으로 표현되고, 빠르게 방향을 파악하여 신뢰성 진전과정에 대한 양적 측면의 관리능력 향상을 그래프로 확인할 수 있다.
- 컴포넌트를 고장 날 때까지 시험하는 것은 고장모드에 대한 아주 귀중한 정보를 제공하고, 따라서 시정 조치 활동이 필요하다.
- 많은 표본이 더 좋은 신뢰도를 얻을 수 있지만 Duane 분석은 많은 표본을 필요로 하지 않는다.
- 고객의 운영(사용)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

Duane 모델은 <그림 9>와 같이 특성 수명과 기울기로 고장시간(Cycle, Km)을 설명한다. 기본 가정 및 제한 사항은 다음과 같다.

- 각 분석에서 오직 하나의 고장모드만 포함되어야 한다. 두 개나 그 이상의 고장 모드가 검출된다면 각각에 대해 분리하여 분석해야 한다.
- 신뢰도는 시험 제한(한계)로 인해 장시간(예를 들면 10,000시간)까지 확장하여 외삽하면 안 된다. 왜냐하면 시험 제한(한계)로 인해 다른 고장모드가 발생할 것인지 알 수 없기 때문이다.
- 하나의 프로토타입에서 다음 프로토타입까지 기울기가 변하는 데는 특별히 주의를 하여야 한다. 왜냐하면 초기(후기)수명에서 더 높은 신뢰도와 후기(초기)수명에서 더 낮은 신뢰도의 trade-off 할 수도 있기 때문이다.

초기 프로토타입(Prototype1)으로 부터 6개의 표본을

고장 날 때까지 가속시험하고 고장모드를 기록하였다. 여러 개선작업을 거친 후 후기 프로토타입(Prototype2)으로부터 6개의 표본을 고장 날 때까지 시험하고 고장모드를 기록하였다. 시험 데이터는 <표 5>에 주어져 있다.

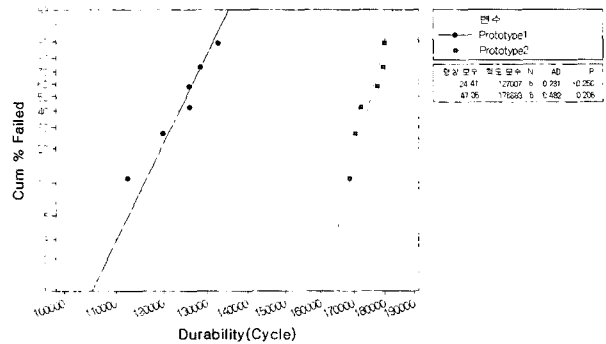


<그림 9> Duane 모델에 의한 B_{10} 수명 비교

<표 5> 고장시간(hr)

Prototype 1	Prototype 2
1871	2811
1996	2842
2097	2871
2099	2961
2141	2993
2209	2997

EXCEL에 고장데이터를 입력하고, 각 프로토타입 단계별로 log-log 용지에 결과를 타점한 결과, <그림 10>과 같은 Duane곡선이 생성되었다.

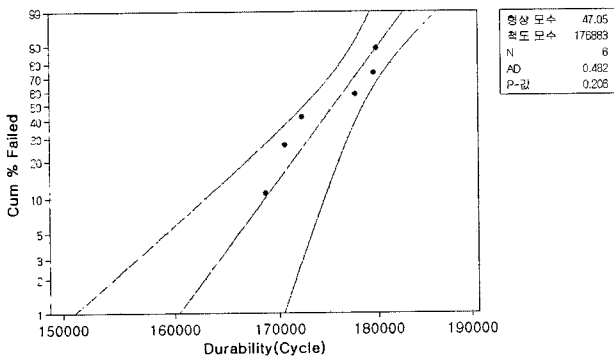


<그림 10> 신뢰성성장 곡선

시험데이터로 부터 Prototype 1의 평균수명 추정치는 2,123hr이고, Prototype 2의 평균수명 추정치는 2,948hr로서 40%의 개선을 이루었음을 알 수 있다. B_{10} 수명은 Pro-

totype 1은 1,878hr이었으나, Prototype 2의 B_{10} 수명은 2,810 hr로서 상당한 개선이 이루어졌음을 볼 수 있다. B_{10} 수명에 대한 95% 신뢰하한은 2,716hr로 추정되었다. 따라서, 시험데이터분석 결과, 개선활동(재료배합개선, 형상설계개선, 공정개선)에 의하여 내구성 목표가 달성되었음을 알 수 있다.

<그림 11>은 90% 신뢰구간을 보여주고 있다.



<그림 11> 90% 신뢰구간

4. 결 론

본 연구를 통하여 중장비 고무마운트의 개발프로세스에서 내구성 및 신뢰성향상을 위해 고무 배합설계, 형상설계, 공정설계의 개선방안을 제시하였다. 특히, 실험계획법을 활용하여 설계요인(Factor)별 수준(Level)이 품질특성에 미치는 영향을 분석하였다. 고무부품의 개발과정에서 몇 개의 표본에 대한 고장시간 데이터가 있을 때, Duane 성장곡선을 활용하면, 프로그램이 운영되는

동안 신뢰성 수준의 변화를 추적할 수 있어 목표하는 신뢰성 수준을 달성하기 위하여 충분한 비율로 성장하고 있는지의 여부를 가능한 빠른 시간 내에 판단할 수 있고, 그에 따라 필요한 자원을 적절히 배분할 수 있다. 따라서 시험데이터로부터 현재 시스템의 신뢰성 수준, 성장률의 평가, 앞으로 기대되는 달성 가능한 수준에 대한 결정이 가능하다.

향후 연구계획으로는 고무부싱부품의 특성상 내구성만의 개선이 최선이 아니고, 정특성과 동특성을 일정수준으로 동시에 고려하여야 한다. 따라서 이 부분에 대한 동시적인 실험설계가 시스템화 되도록 추가적인 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] 김명웅; 고무공업화학, 선진문화사 : 260-282, 2006.
- [2] 박성현; 실험계획법, 민영사 : 505-522, 2003.
- [3] Crow, L. H., "On Tracking Reliability Growth," *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium* : 484-489, 1975.
- [4] Duane, J. T.; "Learning Curve Approach to Reliability Monitoring," *IEEE Transactions on Aerospace*, 2 : 556-563, 1962.
- [5] IEC 61014, Programmes for Reliability Growth, 2003.
- [6] Jung, W.; "Practical Application of Reliability Growth in Automotive New Product Cycle," *IE Interfaces*, 12 (1) : 158-165, 1999.
- [7] McLean R. A. and Anderson V. I.; "Extreme Vertices Design of Mixture Experiments," *Technometrics*, 8(3) : 447-454, 1966.