

방진용 폴리우레탄 매트 물리적 특성과 안정성 향상에 관한 연구

우 경 하*·이 창 호*

*인하대학교 산업경영공학과

A Study on Quality Characteristic and Stability Improvement of Vibration-Proof Polyurethane Mat

Kyung-Ha Woo*·Chang-Ho Lee*

*Department of Industrial Engineering, INHA University

Abstract

Along with industrial development, various architectural structures have become bigger and higher, leading to an expansion in the size and capacity of construction equipment. And with the development of public transportation, the use of subways as a means of transportation in the city center is increasing, so that vibrations and structural noises are emerging as a new environmental issue. Considering that architectural structures may be used from several decades to hundreds of years after the time of construction, they can be seen as semi-permanent. Due to changes in the vibration-proof polyurethane mats installed in the foundation of these structures, settling may occur and vibration reduction may become inadequate. Therefore, in view of service life, it is necessary to have a high-level standard of reliability and stability. In accordance with this, the Floating Floor System, which uses soft polyurethane foam and can be constructed within a relatively short period of time, has excellent vibration resistant characteristics. It is presented as a great alternative solution to the issue of vibrations caused by subways, railways and building structures. At present, vibration-proof polyurethane mats have been developed up to the same product level as in other advanced countries. However, in the construction of structure foundations, the physical properties of this product and its shape incur changes. If they are installed as such in the structure of a building, it may cause significant impact on stability, requiring that this cause be urgently identified and improved.

Keywords : Polyurethane Mat, Stability, Floating Floor System

1. 서론

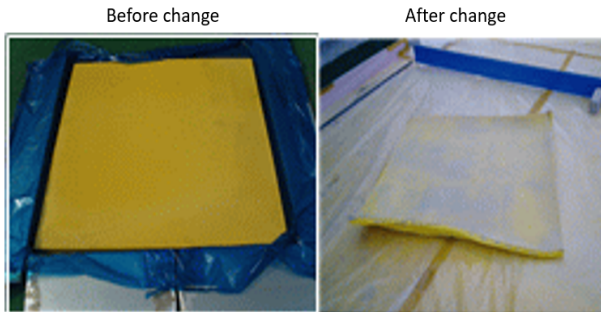
산업발전과 더불어 각종 건축구조물이 대형화, 고층화됨에 따라 건축설비도 대형화, 대용량화 되는 추세이다. 또한 대중교통수단의 발달과 더불어 도심 내 운송수단으로 지하철의 비중이 날로 증가하고 있고 이로 인한 진동과 구조소음이 새로운 환경문제로 대두되고 있다. 건축 구조물은 한번 시공 시 수십년에서 수백년 간의 사용기간으로

볼 때 반영구적으로 사용된다고 볼 수 있다. 이에 따라 구조체 기초에 설치하는 폴리우레탄매트는 물성변화에 따른 정적 침하현상 및 방진효과의 저감 등이 발생할 수 있어 사용 수명에 비추어 신뢰 수준과 안정성이 상당히 높은 수준까지 요구되는 상황이다. 이에 연질 발포 폴리우레탄을 이용한 Floating Floor System은 비교적 짧은 기간 동안 시공이 가능하고 우수한 진동 절연특성으로 건축구조물 방진과 더불어 지하철 및 철도 진동으로 인한 내진 문제를

†Corresponding Author : Chang-Ho Lee, Professor, INHA UNIVERSITY, 100, inha-ro, Nam-gu, Incheon,
E-mail: lch5601@inha.ac.kr

Received February 18, 2019; Revision Received March 7, 2019; Accepted March 25, 2019.

해결할 수 있는 획기적인 대안으로 제시되고 있다. 현재 폴리우레탄 방진 매트는 형상 및 압축하중에 따른 변화율이 선진국 제품 수준에 동등한 수준까지 발전하였으나, 구조체 기초의 시공에서 [Figure 1]의 형상변화 등 제품 물성변화가 초래되었다. 건축물의 구조체 기초에 설치될 경우 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 원인규명 및 개선이 시급한 상황이다.



[Figure 1] Changes in volume and elasticity

2. 이론적 배경

2.1 방진용 폴리우레탄 매트

폴리우레탄 매트는 자재 내부에 미세한 공기층이 형성되어 탄성이 좋으며 동적하중 범위가 넓다. 특히 하중이 전면적으로 고르게 분포되기 때문에 Floating Slab의 두께를 줄일 수 있다. 매트 자체에 의해 탄성이 유지되고 소음이 절연되는 능동적 자재로서 별도의 Floating Slab의 상승작업이 필요 없다. 밀도별로 설계에 적용하기 쉬우며 취급 및 설치가 간편한 장점이 있다. 7Hz 이상의 고유진동수를 가지며 발포고무 제품이 Hardening을 일으키는 반면 변형율의 범위에서 오히려 Softening 현상이 일어나 더 좋은 방진효율을 얻을 수 있다. 물리적 특성 중에는 압축영구줄임율이 낮아 Rubber Pad, EVA MAT 등 다른 방진재보다 내구수명과 안정성이 높다. 단점으로는 생산 설비 구축과 제품단가가 비싸며 국산제품의 물리적 특성이 외산제품의 물리적 특성보다 떨어지는 기술력의 차이가 있다. 용도로는 철도, 지하철 궤도 방진, 공조실 및 기계실의 이중바닥으로 쓰인다[4] [5].

2.2 외국 방진용 폴리우레탄 매트 분석

Getzner Werkstoffe GmbH는 철도, 산업 및 건설 응용 프로그램의 진동 절연 분야에서 전문 기업이다. 이 회

사는 1975년부터 진동 차단 및 완화에 대한 제품을 생산하고 있으며 이 분야의 선도 기업 중 하나다. 첨단 소재인 Sylomer 및 Syloodyn은 Getzner의 연구 팀에 의해 개발되었다. 이 중 Syomer 제품은 발포 폴리우레탄 탄성중합체로 만들어지며 탁월한 진동 차단 및 완화에 세계 각국에서 이중 바닥 시스템으로 쓰이고 있다. Sylomer 제품의 물리적 특성은 <Table 1>과 같이 여러 항목들이 있지만 내구수명과 안정성에 영향을 미치는 압축영구줄임율을 연구과제의 목표로 잡았다. 국내 여러 소재의 방진매트들이 고장수명에 대한 연구가 부족하여 신뢰성을 보증하지 못했고 압축영구줄임율 시험 경우 상온에서 5%이내에 들어오나 온도(70℃)가 증가된 환경 조건에서는 20%이상으로 나타나 선도기업의 제품과는 차이가 있었다. 층간소음에서는 여러 가지 소음특성이 발생하고 있는데 그 중 충격음을 동반한 연속적인 조화진동이 건물 슬라브에 영향을 미치고 구조진동을 일으켜 소음원에서 연결되어 있는 모든 구조체 안정성에 영향을 미치고 있다[4] [5].

<Table 1> Quality characteristics of getzner sylomer

Quality characteristics		Getzner Sylomer
Failure life(B ₁₀)		600년
Failure rate(%)		1%
Compression set(%)		5%
Loss factor		0.3
Static modulus of elasticity		0.03± 20%
Dynamic modulus of elasticity		0.18~0.36
Water resistance	Changes in volume	± 5 %
	Rated load	0~0.035
	Compression set(%)	10 %
	Loss factor	0.3
Static/Dynamic modulus of elasticity		±20%
Ozone resistance		Good

2.3 가속수명시험 설계

고분자재료인 폴리우레탄 매트의 물리적 특성 변화를 알기 위해서는 긴 시간동안 측정해야 하지만 요구되는 시간범위가 커 동일 조건에서 내구수명 및 안정성을 측정하기란 불가능하다. 응력완화시험결과를 적용하기 위해서는 시간-온도 중첩원리를 이용하였고 온도가 높아지면 응력 변화의 시간이 짧아지며 최소의 측정시간에서 물리적 특성 변화를 예측할 수 있다. 가속수명시험은 높은 신뢰도를 갖는 아이템의 신뢰성 평가 시 부딪치게 되는 시험시간과 시료수의 문제를 극복하기 위해 실시하는 시험이다. 가속

수명시험에서는 스트레스를 사용조건보다 높게 인가하여 고장메커니즘이 진행되는 속도를 촉진시킨다. 가속수명시험의 설계는 사용조건에서의 신뢰성 특성에 대한 추정량의 정도를 만족스럽게 하기위하여 스트레스 수준을 설정하고 수준별 시료를 배분하는 과정이다. 가속수명시험설계에서는 시료수와 분산 이외에 스트레스 수준, 스트레스 수준별 시료 할당, 시험기간 등이 고려되어야 한다. 일반적으로 가속성이 성립하는 범위에서 가장 높은 스트레스 수준과 가장 낮은 스트레스 수준에서 시험을 실시(2 수준 시험 설계)하거나 그 사이에 하나의 수준을 추가(3 수준 시험 설계)해서 시험하는 것이 바람직하다[1] [2] [3] [6].

3. 개선과정과 결과분석

3.1 고장유형분석과 가속수명시험

시공 전 옥외 보관 조건과 시멘트 타설 후 발열현상에서의 온도와 구조물의 압축하중으로 인한 영구변형이 고장의 요인으로 조사되었다. 이를 토대로 온도와 압축하중을 가속인자로 선정하여 가속수명시험을 설계하였다. 온도의 경우 실제 사용조건과 폴리우레탄의 물성변화로 인한 고장 메커니즘을 변화시키지 않을 것으로 판단되는 80℃, 85℃, 90℃의 3조건을 가속수준으로 결정하였다. 폴리우레탄 매트 7Hz 이상의 고유진동수를 가지려면 25mm 제품의 6~6.5mm 변위가 발생하였을 때 가장 높은 기댓값을 얻을 수 있으며 제품의 물성치 변화로 인한 탄성값이 줄 경우 고유진동수는 떨어진다. 따라서 압축하중의 시험품을 25% 압축하였을 때의 반발하중을 초기 하중으로 하고, 초기 하중 대비 50% 감소될 때를 고장으로 판단하여 시험하였다. 방진용 폴리우레탄매트의 시공현장분석과 고장재현 시험에서 발생한 고장모드를 근거로 <Table 2>와 같이 고장판정 기준을 설정하였다.

<Table 2> Failure criteria of polyurethane mat

Failure mode	Failure criteria	Test method
Permanent strain	50% less than initial load	25% Compress the specimen under temperature(80℃, 85℃, 90℃) (KS M 6604)

가속수명시험은 시험품을 로드셀(Load Cell)이 장착된 전용지그에서 시험품을 25% 압축해 장착하고, 온도 유지 능력이 우수한 [Figure 2]의 항온항습 챔버(Vötsch Temperature & Humidity Chamber, C4-180)에서 가

속 조건별(80℃, 85℃, 90℃)로 유지하면서 시험품의 하중변화를 DAQ(Data logger, LX-10, TEAC) 장비를 이용해 측정하였다. 각 온도 가속 조건별 시료는 5개를 시험하였으며 KS M 6604를 근거로 한 고장 기준으로 시험하였다. 가속수명시험결과 각 가속조건별 고장 발생 시간은 <Table 3>과 같았다. 시험기간 단축을 위한 가속수명시험을 진행한 결과 최대 31일에서 고장이 발생하였다.



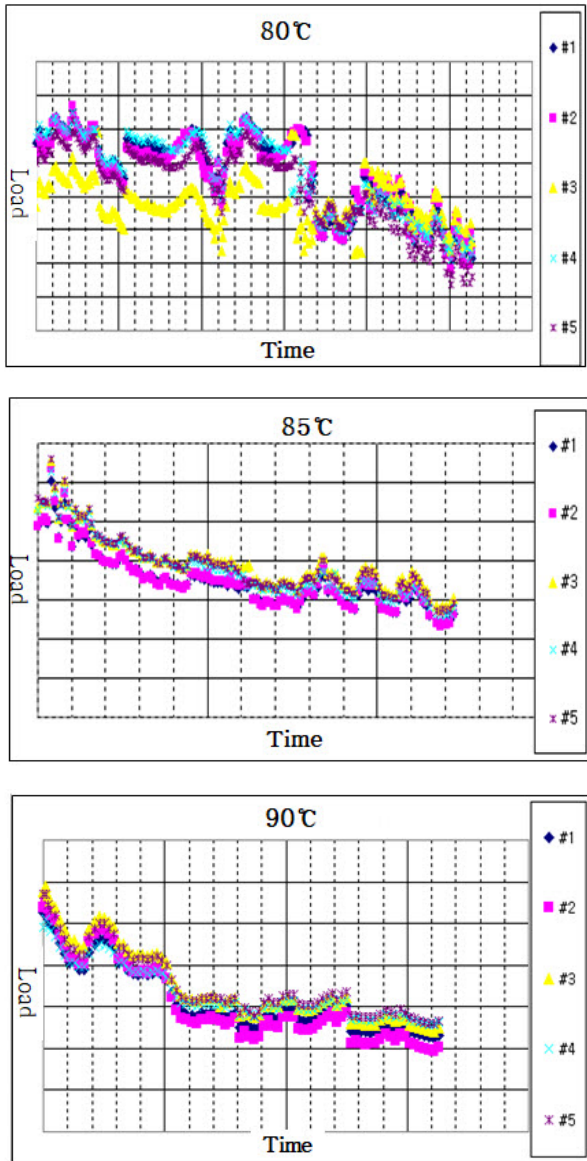
[Figure 2] C4-180

<Table 3> Failure time of polyurethane mat

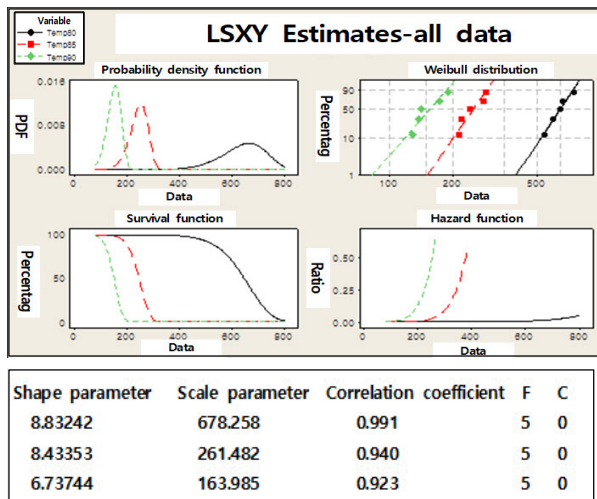
Type	Temperature (℃)	Sample No.1	Sample No.2	Sample No.3	Sample No.4	Sample No.5
PO-MAT	80℃	605hr	674hr	649hr	751hr	547hr
	85℃	215hr	279hr	286hr	241hr	221hr
	90℃	129hr	174hr	141hr	137hr	190hr

방진용 폴리우레탄 매트의 가속수명시험은 각 온도 조건별(80℃, 85℃, 90℃)로 시간에 따른 하중의 변화로 시험하였다. [Figure 3]과 같이 측정되었으며 시험결과 방진용 폴리우레탄 매트는 열화속도가 완만한 형태의 일반적인 고분자 소재의 열화 메커니즘을 나타내었다.

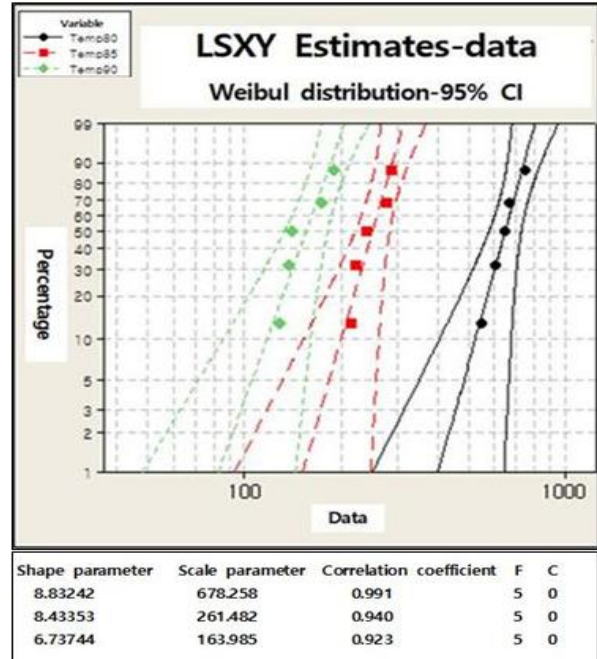
다음으로 미니탭(Minitab)을 이용하여 가속수명시험 고장데이터의 적합한 분포를 검토하였다. 분포의 적합성을 나타내는 척도인 Anderson Darling(adj) 값을 이용하였다. 고장 데이터의 분포 적합성을 분석한 결과 Weibull 분포가 가장 적합한 것을 확인되었다. Weibull 분포를 적용하여 각각의 가속조건별 형상모수(Shape Parameter)와 척도모수(Scale Parameter)를 추정해 본 결과 [Figure 4], [Figure 5]와 같은 값을 얻을 수 있었다.



[Figure 3] Load[N]-Time curve (80°C, 85°C, 90°C)



[Figure 4] Measuring parameters by stress level



[Figure 5] Analysis of parameter distribution

그 결과 형상모수(Shape Parameter)는 온도(80°C, 85°C, 90°C)에 따라 각각 8.83242, 8.43353과 6.73774의 값을 가지며, 척도모수(Scale Parameter)는 각각 678.258, 261.482와 163.985의 값인 것을 확인하였다.

<Table 4> Characteristics of distribution

Temperature (°C)	Percentage (%)	Percentile (hrs)	Standard error	95% Normal distribution	
				Lower (hrs)	Upper (hrs)
80	10	525.7	69.0	406.4	680.0
85	10	200.2	27.6	152.9	262.3
90	10	117.4	18.8	85.8	160.7

<Table 5> Identity test of Shape parameter

Test statistics	Degree of freedom	P
0.277290	2	0.871

<Table 4>, <Table 5>는 분포의 특성을 파악하고 가속성 성립을 확인하였으며 P값이 0.871로서 형상모수가 동일한 것으로 나타났으며, 적용한 온도의 범위에서 가속성이 성립함을 알 수 있다. 아레니우스 모델을 적용한 수명-온도관계에서는 폴리우레탄매트의 설치 조건을 고려하여 사용온도를 25°C로 설정하고 이 온도에서 방진용 폴리우레탄 매트의 수명과 백분위수 검·추정 및 활성화에

너지를 <Table 6>과 같이 분석하였다. B10 수명은 611년(신뢰수준95%)으로 산출되었다.

<Table 6> Percentile number estimation and activation energy for temperature

Temperature (°C)	Percentile (B10, hrs)	Standard error	95% Normal distribution	
			Lower (hrs)	Upper (hrs)
25	5,354,838	-	1,644,767	17,433,652
80	525.7	69.0	406.4	680.0
85	200.2	27.6	152.9	262.3
90	117.4	18.8	85.8	160.7
Activation energy	1.54844 eV			

3.2 공정개선

Polyol을 구성하는 원료들 중 관능기를 포함하고 있는 Glycol 류들의 Total 평균값(OH value)을 계산한 후 MDI의 %NCO 값으로 필요량을 계산하여 배합비를 결정한다. 정 배합비 보다 과량일 경우는 경도가 상승하고 탄력이 줄어들며 정 배합비 보다 소량일 경우에는 경도가 하락하며 반응성도 느려지게 된다. 이 시험에서는 약 2~5% 가량의 Prepolymer를 사용하였다. 그것은 미반응 Glycol 류들을 최소한으로 줄여 Compression set 특성을 향상시키기 위함이다. Micro-cellular Polyurethane foam의 물성은 Polyol System과 Isocyanate Prepolymer의 양쪽 모두 중요한 영향을 미치기 때문에 다양한 실험이 요구되며 방진용품 요구물성 중 탄성이 중요한 요인 중에 하나이므로 탄성이 가장 우수한 시제품으로 Lab Scale 수준에서 실험을 진행하고 개선점을 도출하였다.

<Table 7> Mixing condition of polyurethane mat

	U-1/M-1	U-1/M-2	U-1/M-3
Mixing ratio (Pol/Iso)	100/39	100/42	100/36
Apparent destiny (kg/m ³)	230.5	231.9	229.8
Tensile strength (N/mm ²)	0.22	0.31	0.26
Elongation at break (%)	150	175	180
Compression set (%)	10	14	11
Rebound resilience (%)	41	38	42

<Table 7>의 결과로 압축영구줄임율을 영향을 미치는 탄성을 올리기 위해서는 비교적 분자량이 큰 Polyol을 사용하여야 한다. 또한 가교결합성이 좋은 Triol이 좋은 것으로 나타나며, U-1/M-3가 최적의 조건임을 알 수 있었다. 작업표준에 따른 적정가황온도와 시간을 지키지 않으면 우레탄 셀이 커지고 불균일하게 되는 것을 알 수 있었다. 반면 적정온도와 시간을 준수하면 기포안정화로 인한 셀의 파괴, 셀막이 얇아지는 문제를 예방하여 폼의 꺼짐 현상이 없도록 하고 제품밀도를 균일하게 할 수 있었다. 가황시간을 7분 30초, 금형온도를 60°C, 가황온도를 30/30°C 정확하게 유지하고 폴리우레탄 매트를 성형하고 가황시간과 온도를 변화를 준 제품을 비교분석하였다.

<Table 8> Vulcanization temperature, time, mold temperature for experiment

	U-1	U-2	U-3
Vulcanization temperature (°C)	Poly/Mdi 28/28	30/30	32/32
Vulcanization time (Min.)	7	7.5	8
Mold temperature (°C)	58	60	62
Apparent destiny (kg/m ³)	189	219	245
Compression set (%)	16	9	9

<Table 8>과 같이 U-2와 U-3의 압축영구줄임율이 좋게 나왔으나 온도가 높고 가황시간이 길어지면 겔비밀도가 상승하는 것을 알 수 있었다. 이에 U-2의 조건이 최적조건임을 알 수 있었다.

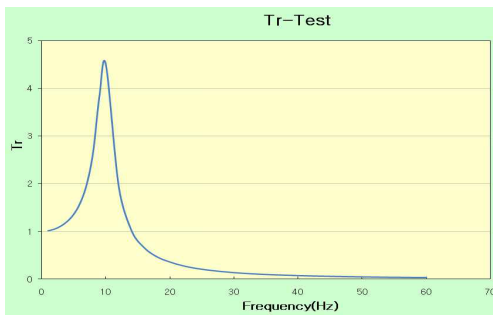
3.3 폴리우레탄매트의 물리적 특성 결과분석

본 시험에서는 방진용 폴리우레탄매트의 가속수명시험과 공정개선을 통하여 수명특성을 산출하였다. 이의 수명특성에 맞는 수명분포 및 가속모델을 도출하였다. 내열수명분포는 와이블 분포가(Weibull)가 적합하였고, 형상모수 동일성 검증을 실시 결과 가속성이 입증되었다. 폴리우레탄 매트를 고장메커니즘이 변하지 않는 범위에서 80°C, 85°C, 90°C의 온도 조건으로 가속하여 수명시험을 진행하였으며, 그 결과를 아레니우스(Arrhenius) 모델식을 활용하여 가속계수를 산출하고, 실제 제품 사용조건인 25°C에서의 수명을 예측하였다.

<Table 9> Results analysis

Indicators of confidence level	Target	Result
Percentile (B10), 95% Confidence level	600Year	611Year
Compression set (%)	5	5

<Table 9>와 같이 가속수명시험을 통한 폴리우레탄 매트 수명을 비교한 결과 611년으로 예상되며 압축영구 줄음율(70℃, 22hr, 50% 압축) 시험 후 변화율이 5% 이하의 결과가 나왔다. 이는 제품의 물리적 특성과 안정성 향상으로 설비 및 건축구조물의 사용수명을 연장시킬 것으로 예상하고 있다. Getzner Sylomer 제품과 비교하여 내구수명 및 압축영구 줄음율이 동등한 수준을 유지하였으며, 진동전달률 테스트를 통해 폴리우레탄 매트의 고유진동수를 시험한 결과 [Figure 6]과 같이 10.6Hz로 Sylomer 제품의 11Hz수준으로 나타났으며 향후 층간소음의 물리적 특성 향상의 단계를 볼 수 있었다.



[Figure 6] Natural frequency of polyurethane Mat

3.4 공정개선 후 고장건수의 변화

직접적인 물성변화가 공정 및 생산에 어떠한 영향을 미쳤는지는 사내 결과분석을 통해 알아보았다. 공정개선 후 폴리우레탄 매트에서 발생하는 고장은 압축영구 줄음율과 겉보기 밀도, 체적 변화가 있으며 각각 10% 이상과 ±10mm 이상일 경우 고장으로 판단한다. <Table 10>은 2012년도에서 2015년까지 폴리우레탄 B종의 고장발생 건수를 분석하였다.

상세 고장건수로 보면 압축영구 줄음율이 가장 많이 발생하였으며 그다음으로 겉보기 밀도, 체적변화순으로 발생하였다.

압축영구 줄음율과 겉보기 밀도는 공정상의 불량량 대부분이었다. 압축영구 줄음율은 금형의 가열온도가 60℃가 되지 않는 상황에서 작업을 진행하여 불량량이 많으며 겉보기 밀도는 MDI 배합 후 가황온도 미준수로 인한 초도 제품 불량량 대부분을 차지하였다. 체적변화는 현장 설치

<Table 10> Failure mode of polyurethane B from 2012 to 2015

Year	Production Quantity (m ²)	Failure mode	Total number of failures	Number of failures mode	Failure criterion
2012	40,726	Compression set	489	389	10% over
		Apparent destiny		78	±10%
		Changes in volume		22	±10mm
2013	34,531	Compression set	125	86	10% over
		Apparent destiny		24	±10%
		Changes in volume		15	±10mm
2014	32,596	Compression set	89	52	10% over
		Apparent destiny		12	±10%
		Changes in volume		25	±10mm
2015	30,986	Compression set	69	32	10% over
		Apparent destiny		9	±10%
		Changes in volume		28	±10mm

후 형상변화가 발생된 경우로 가황시간 미준수와 원액의 배합이 부족해 발생한 것으로 판단된다.

공정개선을 통해 고장건수가 지속적으로 감소한 것을 알 수 있었다.

4. 결론 및 향후 연구 과제

방진용 폴리우레탄 매트의 물리적 특성으로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다. 가속수명 시험을 통해 폴리우레탄 방진 매트 B10 수명은 611년(신뢰수준 95%)으로 예상되며 공정개선을 통한 압축영구 줄음율은 5% 이하로 내구수명과 물리적 특성, 안정성이 향상되었다. 공정개선을 통해 고장건수가 2012년부터 2015년까지 감소하였다. 향후 연구에서는 본 연구방법에서 제시한 방법론을 통해 연속생산설비를 적용하였을 때 지금 수준보다 향상된 물리적 특성과 안정성이 높은 제품을 생산할 수 있는 방법을 제시 할 것이다.

5. References

- [1] Jaejung Kim(2009), "Accelerated Life Test." The Journal of Trans. Korean Soc. Mech., 49(12)
- [2] J. G. Kim, J. M. Song(2011), "Research Results and Trends Analysis on Accelerated Testing for Ensuring High Reliability." Korea Safety Management & Science, No.12013.02
- [3] Y. B. Lee, H. E. Kim, Y. C. Yoo, J. H. Park, J. M. Ko(2004), "Life Analysis of High Pressure Hydraulic Hose Assemblies by Impulse Test." The Korean Society of Fluid Power & Construction Equipments, 1(1)
- [4] Janghuyn Lee, Gyuhyung Lee, Jinwoo Oh(2010), "A Study of Dynamic Characteristic for Floating Floor." Conference of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering
- [5] Jongsuk Lee, Janghuyn Lee, Daehyun Kim, Eunjoon Yoon(2006), "Development of Ventilation Isolation Design and Material for Vibration Reduction of Road Passing through Buildings." Conference of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering
- [6] Haisung Jeong(2007), "A Study on Optimal Design of Accelerated Life Tests." The Journal of The Korean Reliability Society, 7(2)

저자 소개



우 경 하

한라대학교 산업경영공학과 공학사 취득. 인하대학교 산업공학과 석사 취득. 현재 인하대학교 산업 경영공학과 박사과정 중.

관심분야 : MES, 물류, SCM 등

주 소 : 인천광역시 남구 용현동 253, 인하대학교 산업공학과



이 창 호

인하대학교 산업공학과 학사 취득. 한국과학기술원 산업공학과 석사, 경영과학과 공학박사 취득. 현재 인하대학교 교수로 재직 중.

관심분야 : 물류, RFID, SCM 등

주 소 : 인천광역시 남구 용현동 253, 인하대학교 산업경영공학과