

자동차 에어백용 원단의 수명예측

구현진 · 조항원 · 장갑식

FITI시험연구원 신뢰성평가센터

Lifetime Prediction of Automotive Airbag Fabrics

Hyun-Jin Koo · Hang-Won Cho and Gap-Shik Chang

Reliability Assessment Center · FITI Testing & Research Institute

Abstract

The airbag module is an inflatable restraint system that inflates within 0.05 seconds automatically in a collision to protect the occupants. The airbag fabrics used in the module are required to have the good resilience and strength and also to have retained at least 80% of mechanical properties after using longer than 10 years.

In this study, we develop an accelerated test method in order to predict the lifetimes of airbag. In this test, we select temperature and humidity as environmental stresses by analyzing the failure mechanisms of coated and uncoated nylon 66 fabrics. It is found that the degradation of airbag fabrics is effectively accelerated under the combined conditions of high temperature and humidity. Analyzing the results of the accelerated test, the lifetimes of airbag fabrics are predicted to be longer than 10 years.

Key Words : airbag fabric, accelerated test method, lifetime prediction, temperature, humidity

1. 서론

자동차 에어백용 원단은 장기간의 보존기간을 거쳐 작동 순간에 최초로 요구되었던 품질 특성을 유지하여 탑승자를 보호하는 역할을 수행하여야 한다. 그러므로 이에 대한 에어백 원단의 요구품질 특성 및 내구성에 대한 규정은 매우 중요하며, 특히 차량의 폐차 시까지 에어백 원단은 품질의 저하없이 최초의 요구 품질 특성을 그대로 유지하고 있어야 한다. 즉 보존기간(shelf lifetime)동안 에어백용 원단의 노화정도를 평가하여 일반적인 자동차 수명기간인 10년 이상의 보존수명을 예측하는 것이 매우 중요하다. 현재 자동차 모듈 메이커에서는 대부분 ASTM D 5427(<표 2> 참조)에 의하여 노화(aging) 후 물리적 특성저하 및 공기투과도 변화를 측정하는 내환경성 시험을 수행하고 있다. 그러나 이러한 평가방법으로는 정량적인 수명예측이 불가능하므로, 본 연구에서는 사용환경(온도, 습도)을 고려하여 에어백용 원단의 가속수명시험방법을 설계하고 이로부터 국내외 에어백 원단의 수명을 비교 평가하였다.

2. 시료

에어백 원단의 내환경시험 및 가속수명시험법을 위하여 <표 1>과 같이 국내외에서 대표적으로 사용하고 있는 비코팅 및 코팅 에어백 원단을 사용하였다.

3. 내환경시험

3.1 내환경시험방법

자동차 에어백용 원단의 노화정도를 평가하기 위한 시험방법은 ASTM D 5427에 명시되어 있으며, 시험조건은 <표 2>에 나타내었다. 현재 모듈 메이커에서 수행하고 있는 내환경 시험방법은 ASTM D 5427과 유사하게 시험을 진행하고 있으며, <표 2>에 모듈 메이커에서 수행하고 있는 내환경 시험조건을 자세히 나타내었다. 모듈 메이커에서는 내환경시험 후에 인장강도, 인열강도 및 공기투과도 변화를 측정하여 노화정도를 평가하고 있다.

<표 1> 국내외 에어백용 원단

원단	코팅유무	시료 코드	섬도 (denier)	밀도 (올/inch)	중량 (g/m ²)	인장강도 (kgf)
국내원단	비코팅	A	420	49×49	190.6	219.3
		B	630	41×41	238.7	273.3
	코팅	C	420	46×46	210.8	204.2
		D	420	46×46	214.4	211.2
국외원단	비코팅	I	420	49×49	199.1	212.5
	코팅	II	420	46×46	203.8	204.8
		III	420	46×46	215.4	210.9

<표 2> 내환경 시험조건

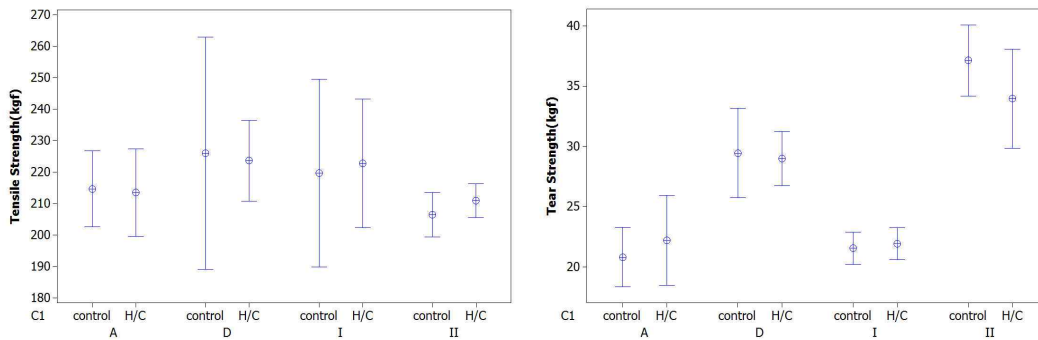
내환경시험	ASTM D 5427	Module Maker 사내규격
온습도 사이클	(-40°C, 29 h → 22°C, 95% R.H., 19 h → 107°C, 29 h → 22°C, 95% R.H., 19 h); 3 cycle	(38°C, 95% R.H. 24h → 80°C, 24h → -29°C, 6h); 2 cycle
내열성	120°C, 336h	120°C, 336h
가수분해 저항성	80°C, 95% R.H., 336h	-

3.2 내환경시험결과

자동차 에어백용 원단의 내환경 시험방법(ASTM D 5427 또는 모듈메이커 사내규격)에 따라 내환경시험을 진행하였으며, 내환경시험 후 에어백 원단의 경사방향의 기계적 물성치(인장강도 또는 인열강도)를 측정하여 에어백 원단의 노화정도를 평가하였다.

3.2.1 온습도 사이클 시험결과

자동차 에어백용 원단의 온습도 사이클 시험은 모듈메이커 시험방법에 따라 시험을 진행하였으며, 온습도 사이클 시험결과는 <그림 3>에서 보는 바와 같이 기계적 특성치의 변화가 유의하지 않은 결과를 보이고 있다.

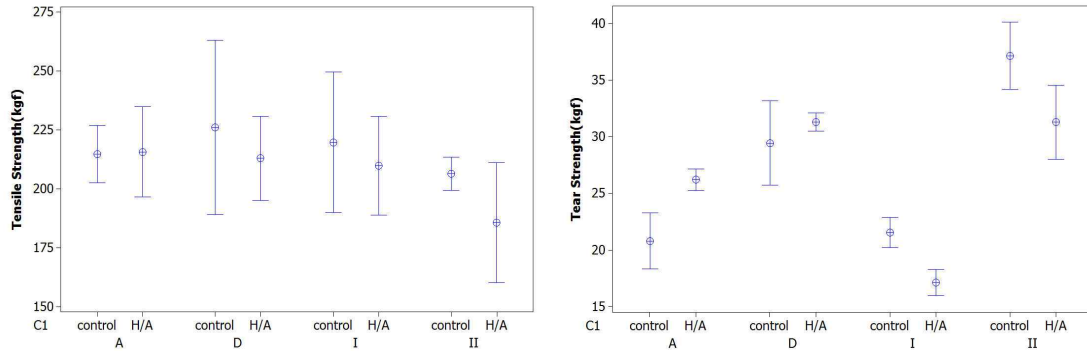


<그림 3> 에어백용 원단의 온습도 사이클 시험결과

3.2.2 내열성 시험결과

자동차 에어백용 원단의 내열성 시험방법은 ASTM D 5427과 모듈메이커 시험방법이 동일한 시험조건(120°C, 336시간)에 따라 진행하였다. 내열성 시험결과는 <그림 4>에서 보는 바와 같이 국내 에어백 원단은 내열성 시험 전후의 인장강도 및 인열강도가 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았고, 국외원단의 경우 인장강도의 감소는 통계적으로 유의하지 않으나,

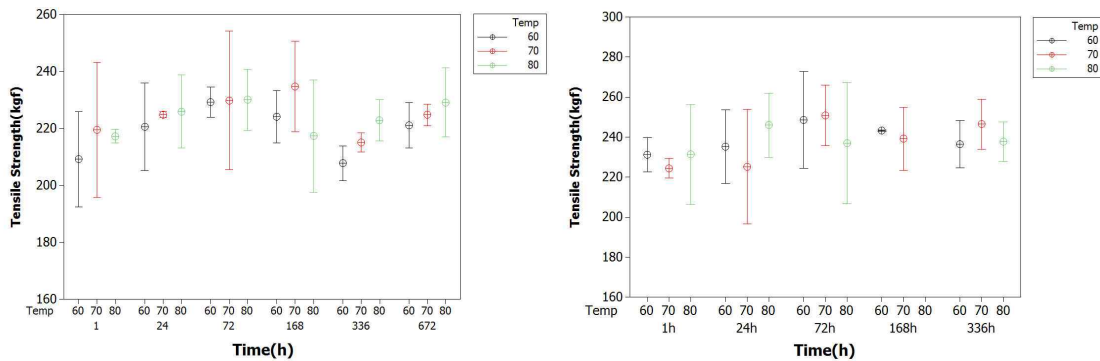
인열강도는 감소하는 경향을 보이고 있다.



<그림 4> 에어백용 원단의 내열성 시험결과

3.2.3 가수분해 저항성 시험결과

에어백용 원단의 가수분해 저항성 시험은 코팅, 비코팅 원단에 대하여 ASTM D 5427에 따라 시험조건(80°C, 95% R.H., 336h)을 포함하는 60~80°C에서 672시간까지 처리하여 인장강도 변화를 측정하였다. 가수분해 저항성 시험결과는 <그림 5>에서 보는 바와 같이 인장강도 변화에 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.



<그림 5> 에어백용 원단의 가수분해 저항성 시험결과

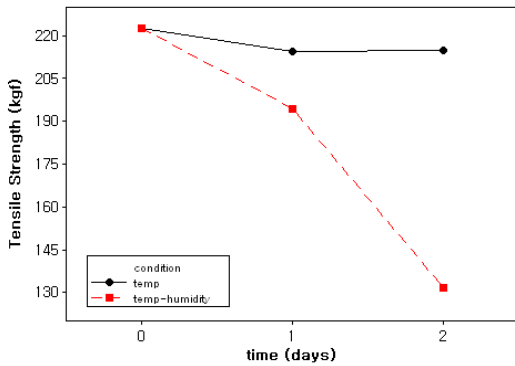
4. 가속수명시험

기존의 내환경성 시험은 앞의 결과에서 본 바와 같이 에어백용 원단의 열화평가 및 수명을 예측하기에는 적합하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 기존 자동차 에어백용 원단으로 적용되는 대표적 소재인 나일론 66는 자동차 내부에서 장기간 사용될 경우 온도와 습도에 의한 가수분해(hydrolysis) 및 열산화(thermo-oxidative degradation)에 의한 물리적 특성 저하를

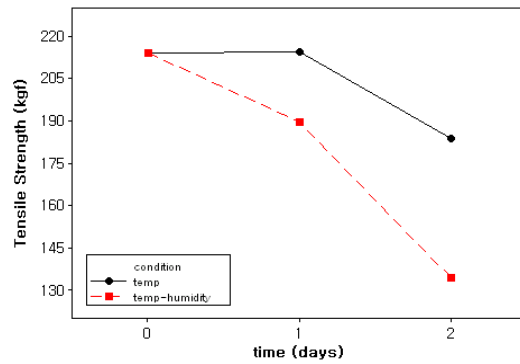
주요 고장메커니즘으로 추정할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 다양한 온·습도 조건에서 에어백용 원단을 장기간 처리하였고, 그 결과를 바탕으로 수명을 예측할 수 있는 가속수명 시험을 설계하였다.

4.1 가속수명시험설계

먼저 가속수명시험법 설계를 위한 고장메커니즘을 규명하기 위하여 고온 및 고온·고습 복합 조건에서 기계적 특성치에 대한 변화를 평가하였다. <그림 6>은 140°C의 온도에서 온도만 처리한 경우와 온도와 습도를 동시에 처리한 경우의 인장강도에 대한 열화도를 나타낸 것이다. 이로부터 온도와 습도간의 교호작용 및 처리시간(1주, 2주)의 효과를 살펴보았다. 온도만 처리한 경우에 비하여 온도와 습도를 동시에 처리한 경우, 처리시간이 1주에서 2주로 증가함에 따라 인장강도가 통계적으로 유의하게 감소하였다. 이를 통하여 자동차 에어백용 원단은 고온에 노출되었을 때 온도에 의한 열산화가 발생되지만, 고온·고습에 의한 가수분해와 열산화가 동시에 발생하는 경우 이들 상호간의 교호작용에 의해 기계적 특성치의 저하가 가속화되는 것을 확인하였다.



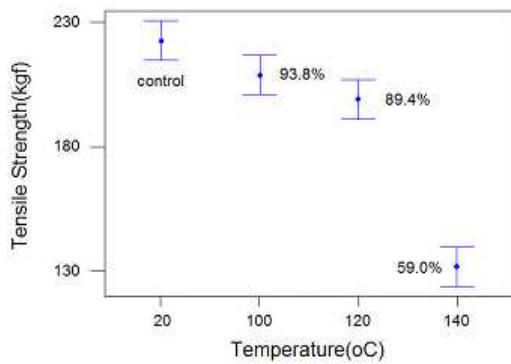
(a) 비코팅 원단



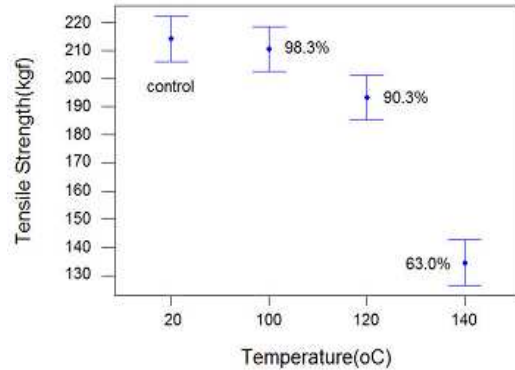
(b) 코팅 원단

<그림 6> 에어백 원단의 습도 및 처리시간에 따른 인장강도 변화

또한 가속수명시험 설계시 온도조건을 설정하기 위하여, 나일론 66의 유리전이 온도(50°C 근방)이상의 온도에서 장시간 처리한 후 인장강도 변화를 관찰하였다. <그림 7>은 비코팅 및 코팅원단에 대해 100, 120, 140°C의 온도 및 상대습도 95% 이상에서 336시간 처리한 후 인장강도 변화를 나타낸 것이다. 336시간 처리한 후 인장강도의 감소는 90% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 차이를 보인다. 특히 온도 120°C까지는 10% 정도의 인장강도 감소를 나타내고 있지만, 140°C에서는 약 40%정도로 인장강도의 감소가 급격히 발생한다. 이로부터 140°C의 온도범위에서는 120°C이하에서의 발생하는 고장 메커니즘과는 다른 거동이 발생하고 있다고 판단할 수 있다. 따라서 에어백 원단의 가속수명시험시 설계시 온도조건은 100~130°C가 적당할 것으로 판단된다.



(a) 비코팅 원단

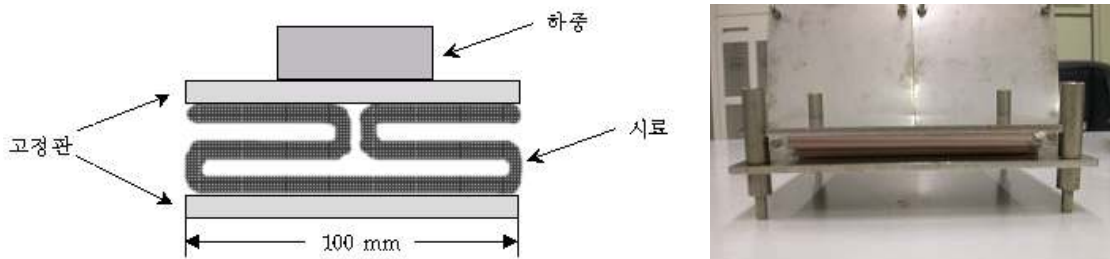


(b) 코팅 원단

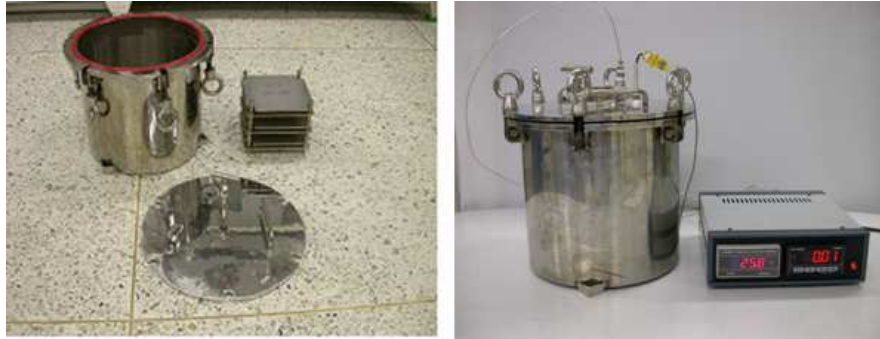
<그림 7> 에어백 원단의 온도에 따른 인장강도 감소

4.2 가속수명시험결과

에어백 원단은 <그림 8>과 같이 에어백 모듈 안에 접혀서 보관되어 있는 상태와 유사하게 시료를 준비하였다. 시험편의 크기는 (100×300)mm로 하고, <그림 8>과 같이 폭이 100mm가 되도록 시료를 접는다. 접은 시료 위에는 고정판(유리판)을 포함한 (1±0.1) kg의 하중이 균일하게 전달되도록 준비하여 가속수명시험을 진행한다. 일정시간 후 인장강도를 측정할 때는 반드시 접은 선이 인장강도 시험기 두 개의 조 사이에 포함되도록 시험편을 파지한다. 특히 일반 환경시험장비에서는 90°C 이상의 고온에서 습도 조절이 불가능하므로, <그림 9>와 같이 밀폐된 공간에서 수분량을 조절하여 포화습도를 유지하도록 하였다.

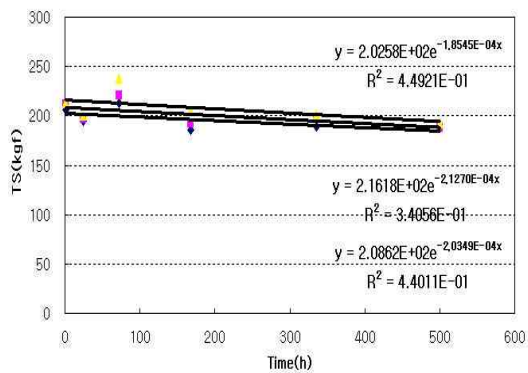


<그림 8> 에어백 원단의 샘플링 방법

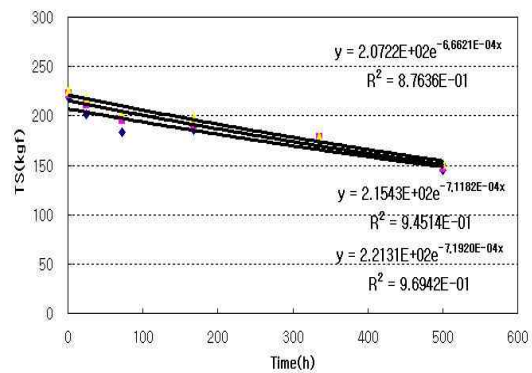


<그림 9> 에어백용 원단의 가속수명시험을 위한 시험장비

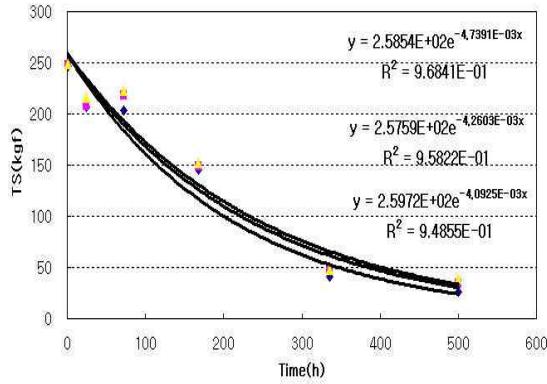
4.1의 결과를 바탕으로 온·습도 스트레스에 의한 가속수명시험조건(온도: 100, 120, 130°C, 습도: 상대습도 95% 이상)을 설계하였다. 각 조건에서 시료의 수는 3개로 하고, 1, 24, 72, 168, 336, 500 시간동안 처리된 시험편의 인장강도를 측정하여 시간경과에 따른 인장강도 변화에 대한 열화도를 구하였다(<그림 10> 참조). 에어백용 원단은 사고 발생 시점까지의 보존기간을 거친 후 사고 시점에서 이상없이 팽창되어야 하며, 그 순간 발생하는 충전 질소가스의 압력을 견딜 수 있는 인장강도가 요구된다. 따라서 본 연구에서 에어백용 원단의 초기 인장강도가 80% 미만으로 감소되는 시점을 고장시점으로 정하였다. 그러므로 3수준의 온도에서 인장강도의 열화도로 부터 지수함수를 이용하여 외삽에 의해 초기 인장강도가 80% 미만이 되는 시점을 고장시간으로 산출하였다(<표 3> 참조).



(a) 100 °C



(b) 120 °C



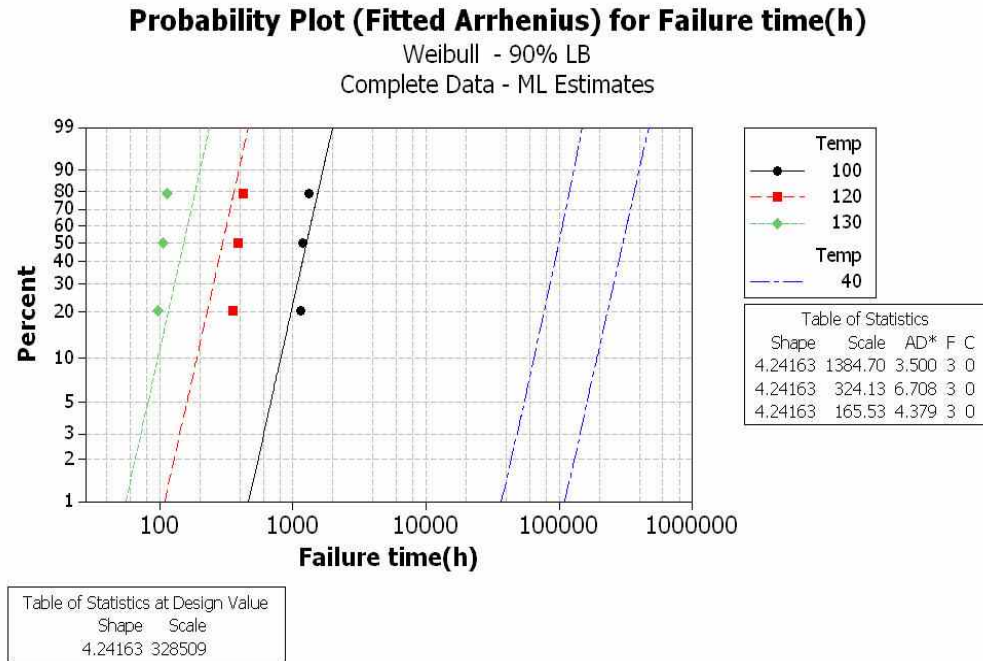
(c) 130 °C

<그림 10> 에어백용 원단의 열화도 (에어백 원단 C시료)

<표 3> 에어백 원단의 고장시간

가속시험조건	시험편	고장시간(h)						
		국내원단				국외원단		
		A	C	B	D	I	II	III
100 °C (95%RH 이상)	1	2357.4	1075.8	2035.7	2327.3	2233.1	1493.5	1551.4
	2	2022.3	1107.9	1879.3	1387.5	2218.5	1101.6	2807.2
	3	1955.8	1196.7	1528.2	1281.8	1958.3	1384.9	2593.1
120 °C (95%RH 이상)	1	346.9	365.5	163.1	217.5	624.8	862.7	2488.0
	2	318.9	394.7	175.2	299.5	976.8	970.4	1433.9
	3	280.6	424.3	202.7	322.1	1150.8	981.5	1599.8
130 °C (95%RH 이상)	1	139.0	129.1	90.4	132.6	278.4	329.1	314.2
	2	124.2	155.1	103.5	158.3	320.6	389.6	364.8
	3	117.0	163.7	109.9	164.0	377.4	436.4	416.9

가속조건에서의 수명을 실사용 조건으로 전환하기 위하여, <그림 11>과 같이 와이블 수명분포와 수명-스트레스 관계식인 아레니우스 관계식을 적용하여 <그림 11>와 같이 사용온도 40°C에서의 신뢰수준 90%에서의 수명을 예측하였다.



<그림 11> 에어백 원단의 수명분포 및 수명 예측 결과 (에어백 원단 C)

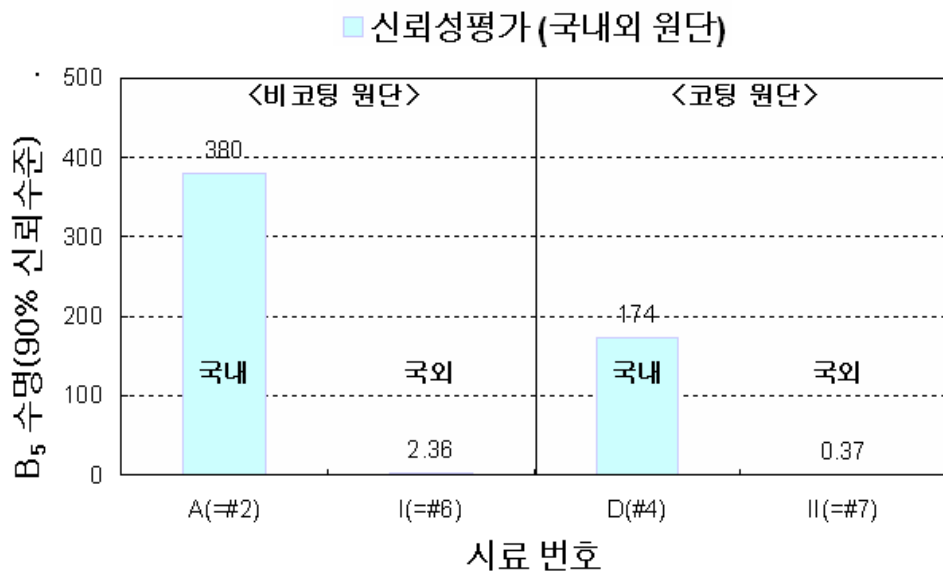
5. 에어백용 원단의 수명예측 결과

국내·외 에어백용 원단 7종(비코팅 3종(A, B, I), 코팅 4종(C, D, II, III))을 개발된 가속 수명시험법을 적용하여 수명을 예측하였다.

<표 4> 국내·외 에어백용 원단의 수명예측 결과

원단	코팅유무	시료코드	B ₅ 수명, 신뢰수준 90% (사용온도 40 °C, 상대습도 95% 이상)	
			수명 (hours)	수명 (years)
국내원단	비코팅	A	3,327,176	379
		B	9,955,187	1,136
	코팅	C	54,893	6.3
		D	1,529,739	174
국외원단	비코팅	I	20,678	2.4
	코팅	II	3,205	0.4
		III	1,710	0.2

그 결과 국내원단은 90% 신뢰수준에서 B5 수명이 6~379년, 국외원단의 수명은 0.2~2.4년으로 예측되었다. 이 중에서 동일한 구조변수(원사섬도 및 밀도)를 갖는 국내외 에어백용 원단 4종(비코팅: A vs I, 코팅: D vs. II)을 비교하면, 코팅원단이 비코팅원단에 비하여 더 우수한 수명을 보이며, 이는 코팅공정이 수명에 영향을 미치는 것으로 추정할 수 있다. 또한, 국내외 원단의 수명을 비교하면, 초기 인장강도는 국내 원단 219 kgf(비코팅 원단), 211 kgf(코팅 원단), 국외 원단 213 kgf(비코팅 원단), 204.8 kgf(코팅 원단)로 거의 유사하나, 신뢰성 측면에서 국외 에어백용 원단에 비하여 국내 에어백 원단이 우수함을 확인할 수 있었다 (<그림 12> 참조).



<그림 12> 국내·외 에어백용 원단의 신뢰성 비교평가 결과

4. 결론

자동차 에어백용 원단은 고온에 노출되었을 때, 온도에 의한 열산화가 발생되지만 고온, 고습에 의한 가수분해와 열산화가 동시에 발생하는 경우 기계적 특성치의 저하가 매우 가속되는 것을 확인하였다. 에어백용 원단의 온도에 의한 열산화 및 습도에 의한 가수분해 메커니즘을 확인하여 온도, 습도에 의한 가속수명시험법을 개발하였다. 개발된 가속수명시험을 검증하기 위하여 구조변수가 동일한 국내외 에어백용 원단의 수명에 대해 비교평가를 실시하였다. 초기 인장강도가 거의 유사한 국내외 원단의 비교평가를 실시하였으며, 그 결과 국내 에어백용 원단의 신뢰성이 더 우수한 결과를 나타내었다. 이로부터 기존의 내환경시험으로는 수명에 대한 정량적 평가가 불가능하였으나, 본 논문에서 제시한 가속수명시험법을 활용함으로써 에어백용 원단의 신뢰성 예측이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. ASTM D 5427 Standard Practices for Accelerated Aging of Inflatable Restraint Fabric
2. RS K 0027 자동차 에어백용 원단 - 비코팅 원단
3. RS K 0028 자동차 에어백용 원단 - 코팅 원단