

와이어링 PVC테이프 내구 수명 예측

김성우¹ · 정원욱^{1*} · 박종구² · 안미정²

현대자동차¹ · 태영화학공업²

Prediction Method of Useful Life of PVC Tape for Wiring Harness

Seong Woo Kim¹ · Won Wook Jung¹ · Jong Koo Park² · Mi Jung Ahn²

Hyundai-Motor¹ · Taeyoung Chemical Ind.²

ABSTRACT

Phenomenon, such as hardening, cracking or breaking etc.. of PVC tape for wiring harness by aging were detected on driven automobile in field. Hardening or cracking of PVC tape were confirmed decline of elongation by surrounding stress. The accelerated heat aging test was carried out applying temperature most important factor of aging, and then deduced an equation of useful life using arrhenius model. Prediction method of useful life of PVC tape was developed using miner rule calculating damage value by thermal energy classified temperature by matching deduced equation of useful life and measured temperature value on driven automobile in field.

Key Word : PVC Tape, Wiring Harness, Useful Life, Miner Rule, Arrhenius Model

1. 서 론

PVC 테이프는 자동차의 와이어링 하네스에서 최외장재 중 하나로 사용되고 있다. 최외장재로서 와이어링을 보호하는 역할을 하고 있기 때문에 외부의 환경 스트레스로부터 가장 많은 영향을 받고 있다. 필드차량의 엔진룸 와이어링에서 PVC 테이프의 내구열화로 인한 경화, 크랙, 부스러짐 등의 발생을 Fig.1에서 볼 수 있다. 이와 같이 와이어링 PVC 테이프의 수명은 자동차의 수명을 판단하는 일에 영향을 미친다고도 할 수 있다

PVC 테이프는 자동차내에서도 광범위하게 사용되고 있으나 아직 내구 수명을 예측하

는 연구사례는 없었다. 사용조건이 복잡하고, 수명예측에 필요한 데이터가 부족하여 수명을 예측하는 것은 매우 어려운 일 이었다.

수명을 예측하는 방법에는 세 가지가 있다. 첫째, 실제 PVC 테이프가 사용되는 곳에서 수명을 직접 판단하는 것인데 시간이 너무 많이 소요되는 단점이 있다. 둘째, 경험에 의한 방법으로서 이는 오랜 시간 동안 PVC 테이프를 다룬 기술자가 필요할 뿐만 아니라 객관적이지 못할 수 있다.

마지막으로, 실제 사용환경이나 조건보다 가혹하게 시험을 수행하는 가속시험으로 수명을 예측하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 가속시험의 기본개념은 특성저하인자의 수준을 증가시켜 제품의 특성이나 성능을 감소시키는 것이다. 이것은 실제 정상적으로 내구가 진행되는 것을 재현할 수 있고 비교적 빠른 시간에 제품의 수명을 판단할 수 있다는 장점이 있다.



<Figure 1> 엔진룸 와이어링

본 연구에서는 열화의 원인인 환경 스트레스 인자 중 가장 중요한 온도를 적용하여 실제 사용되는 곳의 온도보다 높은 온도에서 열 노화시키는 가속 시험방법을 선택하였다.

가속시험으로부터 얻어진 데이터로 수명을 예측하는 방법에는 아레니우스 모델과 WLF(Williams Landel Ferry)모델이 있다. 아레니우스 모델은 여러 온도에서 PVC 테이프의 초기 특성값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 Master Curve와 관계식으로 표현되며, 이러한 관계로부터 특정온도에서 예측수명을 계산할 수 있게 한다.

WLF 모델은 여러 온도에서의 시간-특성값의 데이터를 시간-온도 중첩의 원리를 기본으로 하여 Master Curve를 구하는 것이다. 즉, 기준온도에서 시간-특성치의 관계를 얻는 것이다. 따라서 WLF 모델은 수명시간을 직접 계산하여 예측하기보다는 기준온도에서 시간에 따른 특성값의 변화를 알아보는 데 유용한 모델이다.

본 연구에서는 가속열화시험을 통하여 온도와 반응속도간의 관계를 확인하였으므로 아레니우스 모델을 적용하여 열화수명 방정식을 도출하였다.

도출된 열화수명 방정식과 PVC 테이프 적용부위별 온도계측값 매칭으로 온도별 열에너지에 대한 Damage를 계산하는 마이너툴을 이용하여 필드에서의 잔존수명을 알아보았다.

2. 본 론

2.1 환경Stress인자 결정

와이어링 하네스 고분자의 열화의 원인은 환경 스트레스 이다. 환경 스트레스 인자인 온도, 습도, 공기, 바람, 진동, 빛 등의 영향으로 화학적, 기계적, 광적 열화현상이 일어난다. 그러나 환경 스트레스 인자를 모두 적용하여 가속시험을 하기란 현실적으로 어려운 일이기 때문에 영향도 조사를 통해 가장 중요한 인자를 적용 실시하기로 하였다.

영향도 평가는 초기대비 물성 변화량을 통해 실시하였다. 평가결과, 온도인자가 와이어링 하네스 고분자의 열화의 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 확인되었다, 따라서 본 연구에서는 가속시험에 온도인자를 적용하기로 결정하였다.

2.2 고장의 정의

필드에서의 고장을 정량적으로 정의하기 위해 전선 번들에 PVC테이프를 감아서 가속 열화시험을 통해 고장을 재현하였다. 일정시간마다 와이어링을 벤딩시켜 크랙 유무를 확인한 결과 PVC 테이프의 크랙이 발생될 때 테이프의 신장율은 30%이하로 추정되었다. 따라서 신장율이 30%이하로 측정되었을 때를 고장이라고 정의하였다.

2.3 가속열화시험

2.3.1 시료제작 및 시험조건

PVC테이프 폭19mm, 길이250mm의 시료를 각 80, 100, 110, 120℃의 노화시험기 내에 방치하여 열 노화(Heat Aging)시켰다. 시료 방치조건을 Figure.2 에 나타내었다.



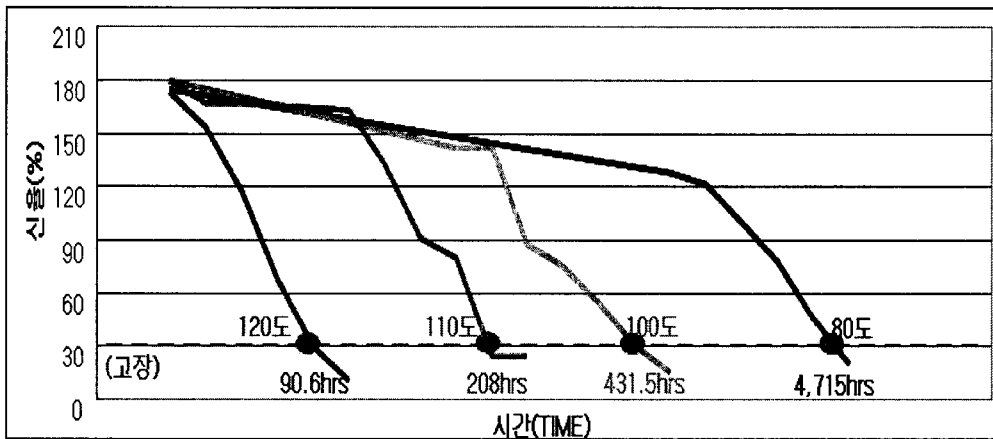
<Figure 2> 시료방치

2.3.2 시험방법

일정한 시간마다 시료를 꺼내어 상온에서 30분 간 방치 후 만능재료시험기(Universal Testing Machine)를 이용하여 표점거리 100mm, 300mm/min의 속도로 신장율을 측정하였다. 시료의 수는 6개로 하였고 데이터는 6개 측정값의 중간값(Median)을 택하였다

2.3.3 시험결과

방치 온도별 시간별 신장율의 변화추세를 Figure.3 에 나타내었다. 80℃에서 4,715hrs, 100℃에서 430hrs, 110℃에서 210hrs, 120℃에서 90hrs에 고장이 발생되었다. 온도의 증가에 따라서 열화가 빠르게 진행되며 고장시간이 빨라진다는 것을 알 수 있다. 즉, 방치온도와 온도별 반응속도(고장시간)는 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다.



<Figure 3> 방치온도별 시간별 신장율 변화추세

2.4 열화수명 방정식

가속열화시험결과, 온도와 반응속도가 밀접한 관계를 갖는 것을 확인하였다. 따라서 방치온도와 온도에 따른 고장시간을 아레니우스 모델에 적용하여 PVC 테이프의 열화수명 방정식을 도출하였다.

2.4.1 아레니우스 모델

아레니우스 모델은 온도에 의한 가속수명시험에서 가장 널리 사용되는 수명-스트레스 모델이다. 액체, 기체 또는 고체가 화학반응을 할 때 발생하는 활성화 에너지와 온도의 반응율에 대하여 다음과 같은 식이 성립된다.

화학반응속도(K)는

$$K = A e^{-\frac{Ea}{kT}} \tag{1}$$

E : 활성화에너지(단위:eV)

k : 기체상수(8.6173X10⁻⁵eV/°C)

T : 절대온도(섭씨온도+273.16)

A : 재료와 시험조건에 따른 상수

수명은 화학반응 속도에 반비례하므로

$$t \propto \frac{1}{K} = \frac{1}{A} e^{\frac{Ea}{kT}} \tag{2}$$

식(2)에 적당한 비례상수를 곱하면

$$t = C \times \frac{1}{K} = C \frac{1}{A} e^{\frac{Ea}{kT}} = B e^{\frac{Ea}{kT}} \tag{3}$$

식(3)은 수명이 상수 B , 절대온도 T , 활성화에너지 Ea 에 의해 결정된다는 것을 보여준다. 상수 B 와 활성화에너지 Ea 결정을 위해 로그를 취하면

$$\ln t = \ln B + \frac{Ea}{kT} \tag{4}$$

식(4)는 $\ln t$ (고장시간)는 $1/T$ (절대온도)와 기울기가 Ea/k 인 선형적인 관계를 보여준다.

$$\frac{Ea}{k} = a \cdot \ln B = b$$

로 정리하면,

$$\ln t = a \frac{1}{T} + b \tag{5}$$

절대온도와 고장시간에 대한 식(5)로 나타낼 수 있다. 가속시험으로부터 얻은 온도와 온도별 고장시간데이터를 식(5)에 대입하여 직선의 기울기(활성화에너지)와 Y절편(상수)값을 결정하였고, 열화수명 방정식을 도출할 수 있다.

2.4.2 열화수명 방정식 도출

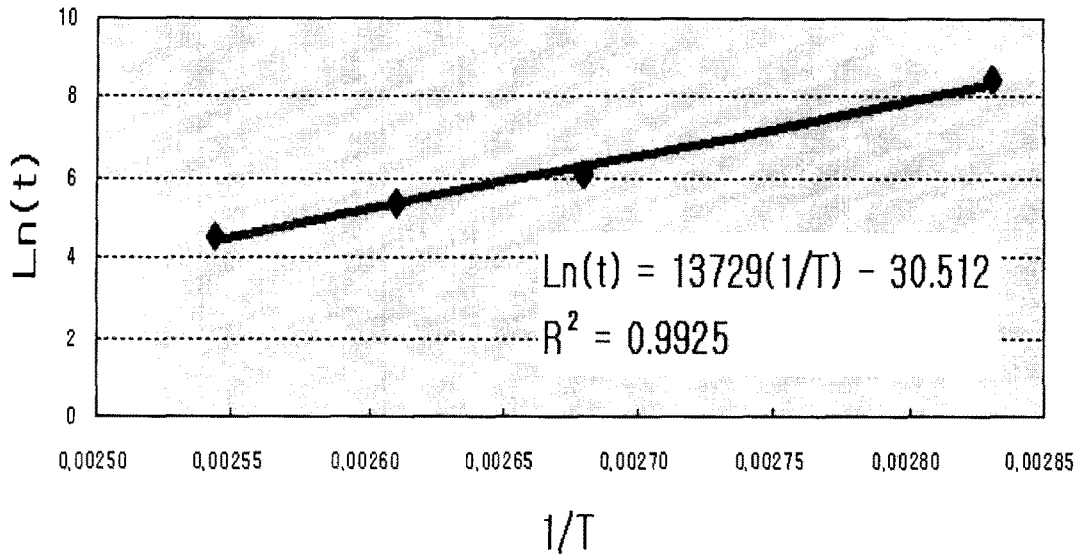
가속열화시험을 통해 얻은 온도와 온도별 고장시간을 아레니우스 모델에 적용한 결과, 다음의 열화수명 방정식이 도출되었다.

$$\ln(t) = 13.729 \frac{1}{T} - 30.612 \tag{6}$$

t : 각 온도에서의 고장시간

T : 절대온도(섭씨온도+273.16)

도출된 열화수명 방정식과 그래프를 Figure.4 에 나타내었다. R²값이 0.99로 정밀도가 높은 그래프를 얻을 수 있었다. R²값은 1에 가까울수록 직선의 관계를 가진다.



<Figure 4> PVC 테이프의 열화수명 방정식

2.4.3 열화수명 방정식 검증

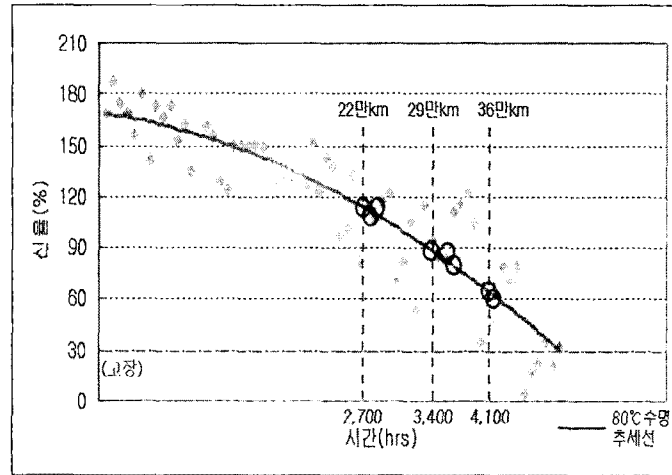
도출된 열화수명 방정식을 검증하기 위하여 90℃에서 가속열화시험을 추가 실시 하였다. 시험 결과, 고장시간은 1,500hrs으로 측정되었고, 이는 열화수명 방정식으로부터 구한 90℃ 수명인 1,469hrs 와 비교하였을 때 98% 일치하는 것으로 확인되었다.

2.5 필드수명예측

2.5.1 필드 내구품 분석

필드 차량에서의 PVC 테이프의 수명을 예측하기에 앞서 현재의 실제 수준을 파악하기 위해 22~36만km 주행한 Taxi 8대의 엔진룸 브레이크 부스터 부위에서 내구품을 탈거하여 신장율을 측정하였다.

Figure.5은 필드내구 품에서 탈거한 시료의 신장율 측정치와 80℃ 가속열화 시험시 얻은 PVC 테이프의 수명추세 선을 매칭시킨 것으로 주행거리에 따른 신장율 감소 추세가 80℃ 수명선과 비슷한 커브를 보인 것을 알 수 있다.



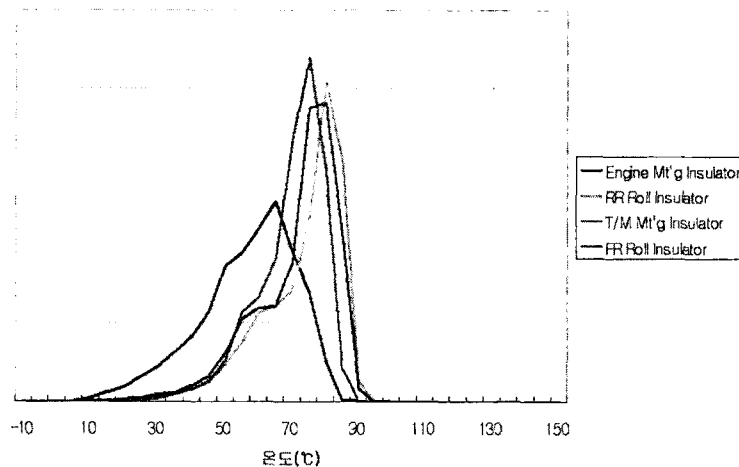
<Figure 5> 필드내구품의 측정치 80°C 수명선에 적용

2.5.2 필드 잔존 수명 예측 방법

필드에서의 잔존수명을 예측하기 위한 방법으로 본 연구에서 도출된 열화수명 방정식과 실제 차량에서의 PVC 테이프 적용부위별 온도 계측 값을 매칭하여 온도별 열에너지에 대한 Damage 를 계산하는 마이너를 이용하였다.

Time at Level 분석으로 이루어진 실제 차량의 온도계측 값을 Figure.6 에 나타내었다.

실제 차량의 온도계측 값을 열화수명 방정식 으로부터 구한 각 온도에서의 수명과 매칭시켜서, 온도별 열에너지에 대한 Damage를 구했고, 전체 온도에서의 Damage 합 역수를 취하면 필드차량에서 PVC 테이프의 내구수명을 구할 수 있다.

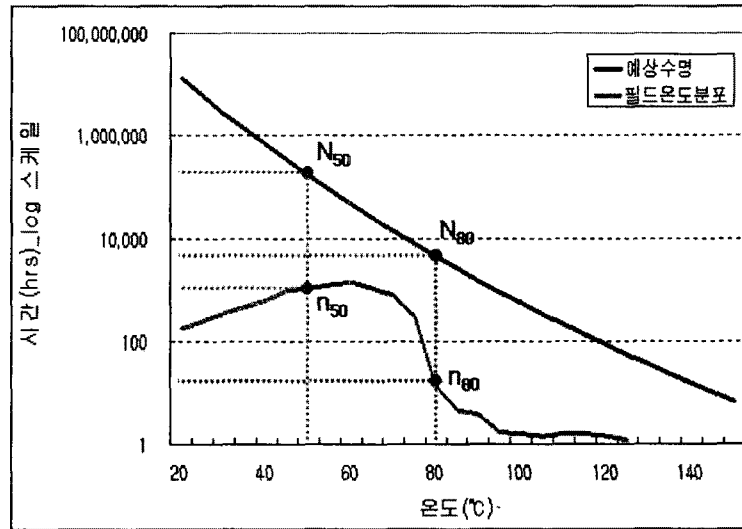


<Figure 6> Time at Level 분석(필드차 온도계측)

2.5.3 필드차량 수명 예측 실시

수명예측법의 증명을 위해 20만km 주행한 Taxi의 온도계측데이터를 취하여 잔존수명을 예측하였다.

열화수명 방정식으로부터 구한 예상수명에 대한 필드차량 온도분포를 Figure.7에 나타내었다. Table 1 은 Taxi 20만 km 주행 후 차량의 Engine Mt'g부위 온도계측 값과 예상수명에 대하여 Damage를 계산한 것이다.



<Figure 7> 예상수명에 대한 필드온도분포

각 온도에서 계산한 Damage 합으로 현재까지의 PVC 테이프 Damage를 알 수 있으며, 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

열에너지에 대한 총 Damage

$$= \dots + \frac{n_{40}}{N_{40}} + \frac{n_{50}}{N_{50}} + \frac{n_{60}}{N_{60}} + \frac{n_{70}}{N_{70}} + \dots = 0.48 \quad (7)$$

여기서 n(소문자)은 필드차량에서 각 온도에서의 빈도이고 N(대문자)은 열화수명 방정식으로부터 구한 각 온도에서의 예상수명이다. Damage=1 일 때를 고장이라고 정의하며, 20만 km 주행된 Taxi의 총 Damage 는 0.48 이었다.

총 Damage에 대해 역수를 취하게 되면 필드차량에서 PVC 테이프의 수명을 알 수 있다.

$$\text{수명} = \frac{1}{\text{Damage}} = \frac{1}{0.48} = 2.09 \quad (8)$$

여기서 수명 2.09 는 현재 온도조건으로 사용시, 현재까지 16개월을 사용했다면 향후 16개

월을 더 사용할 수 있다고 할 수 있다. 즉, 필드차량에 서 PVC 테이프의 내구수명은 16개월의 209%인 32개월 이라는 것을 의미한다.

<Table 1> 온도별 Damage

RANGE(°C)	예상수명(hrs)	빈도(sec)	Damage
-10	2,545,982,954	-	-
-5	962,501,843	-	-
0	377,062,278	-	-
5	152,776,324	-	-
10	63,908,025	90,415	0.0000004
15	27,554,328	240,000	0.0000024
20	12,226,081	381,322	0.0000087
25	5,574,690	636,861	0.0000317
30	2,608,582	888,428	0.0000946
35	1,251,097	1,259,484	0.0002796
40	614,282	1,650,139	0.0007462
45	308,428	2,255,967	0.0020318
50	158,197	3,465,648	0.0060853
55	82,810	3,774,854	0.0126624
60	44,198	4,415,073	0.0277482
65	24,032	5,099,505	0.0589445
70	13,301	3,782,379	0.0789925
75	7,488	2,772,363	0.1028485
80	4,284	1,053,805	0.0683234
85	2,490	47,682	0.0053193
90	1,469	16,401	0.0031014
95	879	13,527	0.0042746
100	533	6,012	0.0031313
105	328	5,723	0.0048479
110	204	4,960	0.0067474
115	129	5,548	0.0119753
120	82	5,613	0.0189986
125	53	4,949	0.0259687
130	35	4,355	0.0350485
135	23	-	-
140	15	-	-
145	10	-	-
150	7	-	-

3. 결 론

본 연구에서는 와이어링 PVC 테이프의 필드수명 예측법 개발을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 필드차 와이어링 하네스에서 발생하는 PVC테이프의 크랙이나 부스러짐과 같은 고장에 대한 정량적 계측방법으로 열화에 따른 신장율의 감소를 찾을 수 있었다.

(2) 온도별 가속열화시험을 통하여 온도와 반응속도 간에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 따라서, 온도와 고장시간을 아레니우스 모델에 적용하여 열화수명 방정식을 도출하였고, 90℃ 가속열화시험을 통한 검증으로 열화수명 방정식의 적합성을 확인하였다.

(3) 열화수명 방정식과 실제 필드차의 온도계측 값을 매칭하여 온도별 열에너지에 대한 Damage 를 계산하고 필드차량에서의 와이어링 PVC 테이프의 수명을 예측할 수 있었다.

(4) 개발된 수명 예측법은 필드차 와이어링 PVC 테이프의 내구수명을 평가하고 예측함으로써, 내구성능과 품질 향상을 위한 틀로 활용될 것이다.

(5) 본 연구를 토대로 타 부품에도 응용, 적용하여 수명을 예측할 수 있고, 객관적인 신뢰도를 얻을 수 있으리라고 본다.

참고문헌

- [1] Plastics Materials, Fifth Edition, J.A. Brydson, 1989, 291p~342p
- [2] Polymer Data Handbook, J. E. Mark, 1998, 928p~934p
- [3] Perry's Chemical Engineers Handbook, Robert H. Perry, 1997