

가속열화시험에 의한 건축용 실란트의 사용수명 평가

권영일*, 김승진**, 이형욱**

청주대학교 산업공학과*, 한국전자재료시험연구원 신뢰성평가센터**

Service Life Assessment of Construction Sealants with Accelerated Degradation Test

Young Il Kwon*, Seungjin Kim**, Hyoung Wook Lee**

Dept. of I.E., Cheongju University*, Korea Institute of Construction Materials**

Abstract

Field and accelerated tests are performed to assess the service life of construction sealants. Mathematical degradation models for tensile strength and elongation, that are the two major performance characteristics of sealants, are derived from the test results. Accelerated degradation test methods for assessing service life of construction sealants are developed based on the degrading performance and a numerical example is provided.

Key words : *performance degradation*(성능열화), *construction sealants* (건축용 실란트), *service life*(사용수명), *assessment of service life*(사용수명평가), *degradation model*(열화모형), *accelerated test*(가속시험)

1. 서 론

건축용 실란트(sealants)와 같은 접착성 재료에 대한 사용수명예측은 매우 불확실(risky)한 것으로 알려져 있다. 그 이유는 실란트가 여러 요소로 구성되며 일부 요소들 간에 교호작용(interaction)을 갖는 경우도 있기 때문이다. 또한 구성요소의 성분과 비율, 그리고 설계, 제조 및 사용환경의 변화에 민감한 성능변화로 인해 옥외폭로시험(field test)이나 가속시험(accelerated test) 데이터의 산포가 매우 크고 불규칙하여 각 구성요소들의 열화(degradation)를 이해하고 예측하기가 쉽지 않다. 이러한 문제들이 실란트의 수명평가를 위한 옥외폭로시험과 가속시험간에 상관성을 파악하는데 어려움을 주는 요인이 되고 있다.

다른 전기/전자, 자동차, 기계류 부품 등과 마찬가지로 실란트의 사용수명 예측을 위한 첫 단계는 실란트의 고장기준(failure criterion)을 규정하는 것이다. 고장의 기준을 규정하기 위해서는 실란트의 기능을 명확히 정의해야 한다. 고장기준으로는 인장강도(tensile strength)와 신장률(elongation)의 허용수준 이하로의 감소, 주어진 스트레스 하에서의 크리프 고장(creep failure), 허용범위를 초과한 모듈러스(modulus) 변화나 크랙(crack)의 성장 등을 포함한 다양한 고장기준이 사용될 수 있다. 고장기준이 정의되면, 다음은 이들 고장을 유발할 수 있는 고장원인과 메커니즘을 규명한다. 예를 들어 UV나 열산화(thermal oxidation)에 의해 강도나 신장률이 저하될 수 있다. 실란트의 성능열화를 유발하는 환경요인들로는 온도/온도변화, 습도, 물, 태양광/UV, 마찰, 기계적 스트레스 등이 있다(표 1 참조).

고장메커니즘이 무엇이든, 가능한 열화과정과 열화율을 요인별로 규명할 필요가 있다. 끝으로 예상되는 사용환경에서 주요성능의 변화율을 측정해야 한다. 현장 사용조건에서의 측정이 어려울 경우 가속시험을 사용할 수도 있을 것이다. 가속시험을 적용할 때 주의할 점은 가능한 한 현장의 사용조건을 실제로 반영할 수 있도록 가속시험 조건을 설정해야 한다는 것이다. 예를 들어 온도를 이용한 가속시험의 경우 필드에서는 발생하지 않는 고장모드를 유발할 정도로 높은 온도를 사용하는 것은 피해야 한다.

<표 1> 실란트 사용수명에 영향을 미치는 요인들

설 계	시 공	제 품	기 후조건	사 용조건
<ul style="list-style-type: none"> • substrate 유형 • substrate 강도 • joint 형상, 두께, 폭 • substrate와 sealant 교호작용 	<ul style="list-style-type: none"> • cure조건, 시간 • 시공당시 온도/습도와 사용환경의 차이 • 표면상태 	<ul style="list-style-type: none"> • sealant formulation • 생산공정 품질관리 • 저장기간 	<ul style="list-style-type: none"> • 습도(물/수증기) • 온도/온도변화 • 태양광/UV 	<ul style="list-style-type: none"> • joint movement • 마찰 • 화학물질 • 옥내/옥외

가속시험 하에서 각 열화과정의 열화율이 결정되면 보외법(extrapolation)을 사용하여 실 사용 조건에서의 열화율로 변환한다. 여기에는 적용되는 스트레스에 따라 주로 아레니우스(Arrhenius)나 역승(inverse power) 관계식이 사용된다.

일반적으로 기계, 전기, 전자 등 부품에 대한 신뢰성 시험에 의한 평가는 주로 고장시간의 관측에 의해 이루어지나 플라스틱, 복합재료, 실란트 등과 같은 소재 중심의 건설자재의 경우에는 그 특성상 자재의 주요성능이 특정 수준으로 저하되는 시점을 고장으로 판정하는 경우가 대부분이다. 이러한 특성을 지닌 자재의 경우, 정확한 고장시간보다는 시간의 경과에 따른 성능의 변화를 관측하기가 훨씬 용이하며 사용수명의 평가도 성능의 관측치를 바탕으로 설계하는 것이 효과적이다. Meeker (1998), Bain (1978), 그리고 Nelson (1990) 등을 비롯한 많은 학자들이 성능의 열화모형과 열화데이터의 통계적 분석에 관해 연구하였다. 최근 들어 건설이나 토목분야에서도 Bakker, J.D. et. al. (1999), Van Noortwijk (1998, 1999)을 비롯하여 BS7453(2003), ISO 15686-1 (2000), ISO 15686-2 (2001), ISO 15686-3 (2002), 그

리고 European organization for technical approvals (1999) 등의 국가 및 국제기구에서 열화성능에 기초한 건설자재의 수명평가 방법들에 대한 연구 필요성과 함께 방법론에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있다. 실란트의 사용수명평가나 가속시험방법에 대해서도 여러 학자들에 의해 다양한 실험과 분석이 진행되어 왔다. Wolf(1997, 2004)는 RILEM 및 ASTM의 지원 하에 개최된 건물 및 건축용 실란트의 내구성(durability)에 관한 국제 심포지엄에서 발표된 연구논문들을 편집하여 각각 단행본으로 발간하였으며, ASTM에서는 “Science and technology of building seals, sealants, glazing, and waterproofing”에 관한 심포지엄에서 발표된 논문집을 제공하고 있다. Wolf (2004)는 sealed joint의 사용수명 추정을 위한 기존의 방법들을 정리하고, 이들 방법들을 사용하기 위한 필요사항들과 그 확장 가능성에 대해 토의하였다. Ding과 Liu(2006)는 열과 UV를 적용한 실리콘 및 폴리우레탄계 실란트의 가속시험에서 인장강도와 신장률, 그리고 경도의 변화추이를 분석하고 각각에 대한 변동계수(deviation coefficients)를 제시하였으며, Petrie (2006)는 접착제의 사용수명 예측을 위한 가속시험 방법의 개요와 주 고장모드(critical failure mode)의 결정방법에 대해 토의하였다.

본 연구에서는 콘크리트 도로용 줄눈재로 사용되는 폴리우레탄계 실란트에 대해 옥외폭로 시험 자료와 가속시험 자료로부터 가속성과 열화모형을 분석, 평가하고 가속시험에 의한 실란트 사용시험평가방식을 설계하였다. 실란트의 주요성능으로 인장강도(tensile strength)와 신장률(elongation)의 변화를 측정하였다. 여기서 도출된 결과는 현재까지 진행된 시험자료에 근거한 것이며 추후 옥외시험과 가속시험자료가 누적됨에 따라 현장에서 적용할 수 있는 실효성 있는 가속계수와 사용수명 평가시험방법을 도출할 수 있을 것이다.

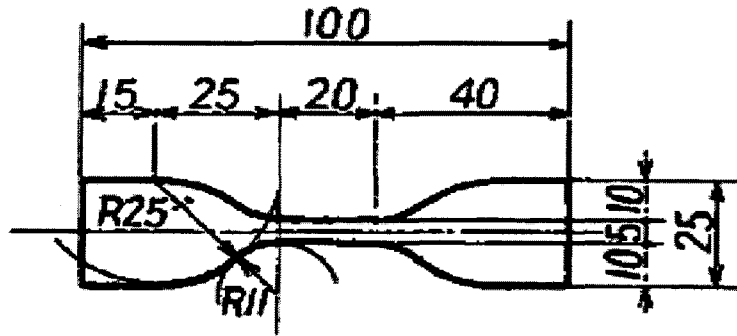
2. 시험자재, 장치 및 방법

2.1 시험자재

본 시험에서 다양한 건축용 실란트 중 폴리우레탄계 실란트로서 이액형(주제+경화제)을 대상으로 하였으며, 옥외시험 및 가속시험에 사용할 시험시편은 23 ± 2 °C, 상대습도 (50 ± 5) %RH에서 28일간 경화된 시료를 사용하였다. 시료의 형상은 KS M6518에 따라 아령형 3호 형태를 사용하였다.

2.2 Field 시험

본 연구에서 사용한 실 사용환경 시험데이터는 실제 국내 콘크리트 도로에 시공되어 2년이 경과한 실란트로서 보수공사에서 채취된 시료로부터 측정하였다.



<그림 1> 옥외폭로시험 및 가속시험을 위한 실란트 시료형태

2.3 가속시험

가속시험은 KS M ISO 4892-2 (플라스틱-실험실 광원에 의한 폭로 시험 방법- 제2부 : 제논-아크 광원)와 KS F 2621 건축용 실링재 시험 방법에 따라 제논 내후성시험기 (Xenon arc Weather meter ; 제조회사 : ATLAS MTT, USA)를 사용하여 실시하였다. 촉진내후성 시험은 UV 조건 290~800 nm, 550 W/m², 블랙패널온도 63±3℃ 조건에서 102분 조사, 18분 물 분무의 2시간 주기로 반복하였다.

3. 성능열화모델 및 분포

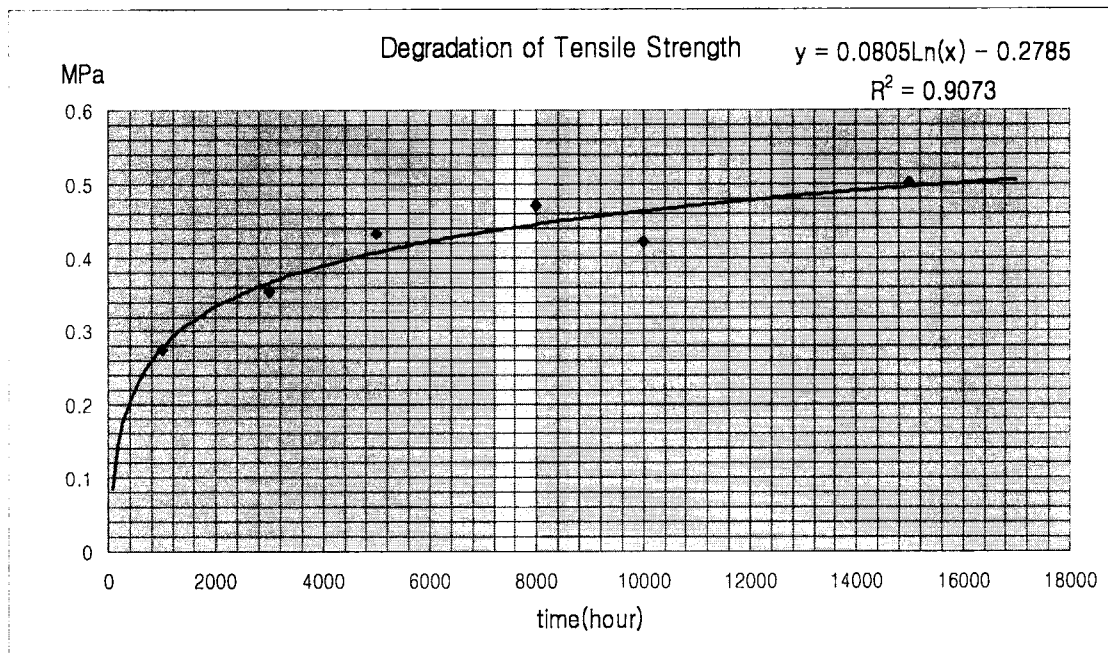
3.1 인장강도

여기서는 옥외시험 또는 가속시험에서 실란트 인장강도의 수학적 열화모델과 분포에 대해 분석한다. 서론에서도 언급한 바와 같이 옥외시험이든 가속시험이든 일반적으로 실란트의 성능변화를 측정할 데이터의 산포가 크고 변화 추이가 불규칙하여 수학적 열화모델을 도출한 사례를 찾기 어려운 것이 현실이다. 본 연구와 관련하여 국내에서 현재 진행 중인 실란트에 대한 옥외시험과 가속시험에 있어서도 수학적 열화모델을 도출할 수 있을 만큼의 데이터가 축적되지 않은 상태이다. 실란트의 주요성능인 인장강도와 신장률의 수학적 열화모델 도출을 위해 Wolfe (1997)의 RILEM Proceeding 36, 171쪽에 실려있는 Sugiyama의 가속시험데이터를 사용하여 열화모델을 분석하였다. Sugiyama는 제논램프(Xenon lamp)에 의한 실란트 가속시험에서 15,000시간동안의 인장강도와 신장률 변화시험을 실시한 데이터를 제시하였다. 여기서 적용된 가속시험 조건과 실란트 성분이 본 연구에서의 시험조건이나 실란트 구성성분과 동일하지는 않으나 전반적인 추이를 관찰하는 데 참고가 될 것으로 사료된

다. 이 가속시험 데이터를 사용하여 실란트 인장강도의 열화모형을 분석한 결과 그림 2에서와 같이 로그모형(log-linear model)이 가장 적합한 것으로 나타났다(식 (1)).

$$y = 0.0805 \ln t - 0.2785 \tag{1}$$

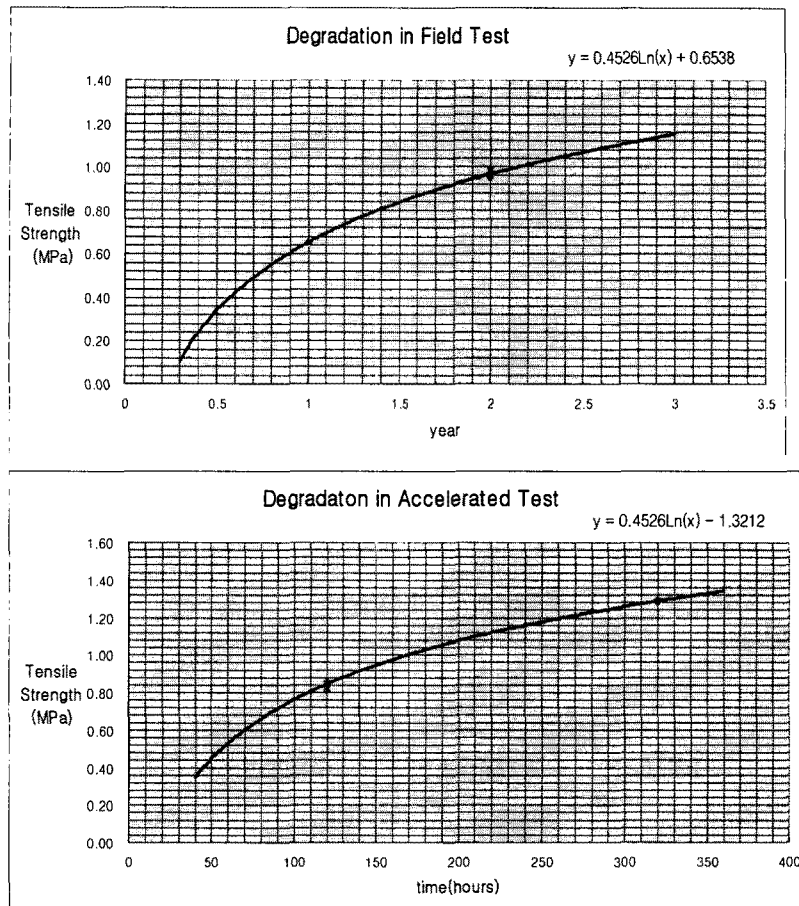
식 (1)에서 t 는 가속시험 시간을, y 는 초기값에서 저하된 강도(MPa)를 나타낸다. 그림 2의 열화그래프에서 초기에는 급속한 열화를 보이다가 시간이 경과 할수록 열화가 매우 완만하게 진행됨을 볼 수 있다.



<그림 2> 제논램프 가속시험(accelerated weathering)에서의 실란트 인장강도 열화모형

본 연구에서 수행하고 있는 실란트의 수명시험에서 초기 데이터 및 옥외시험 2년, 가속시험 120시간 및 320 시간에서의 데이터가 각각 수집되어 있다. 이들 데이터를 로그모형에 적합시킨 결과가 다음 그림 3과 같다.

시험 데이터로부터 도출된 옥외 및 가속시험 열화모형 식으로부터 가속시험조건에서의 가속계수(acceleration factor; AF)를 산출하였다. 동일한 열화량을 가져오는 필드시험시간 t_f 와 가속시험시간 t_a 간에 $\frac{t_f}{t_a} = AF$ (AF 는 상수)의 관계가 성립한다는 가정 하에 추정된 열화모형 식으로부터 가속계수 $AF = 112$ 를 도출하였다. 이는 가속시험에서 1시간동안의 열화량이 필드에서 112시간 동안의 열화량과 동일함을 뜻한다. 여기서 구한 가속계수는 현재 까지 진행된 시험데이터에 근거한 것이며 옥외시험 및 가속시험이 진행됨에 따라 시험 데이터가 누적될수록 더욱 정확한 가속계수를 구할 수 있을 것이다.



<그림 3> 옥외 및 가속시험에서 실란트 인장강도 열화모형

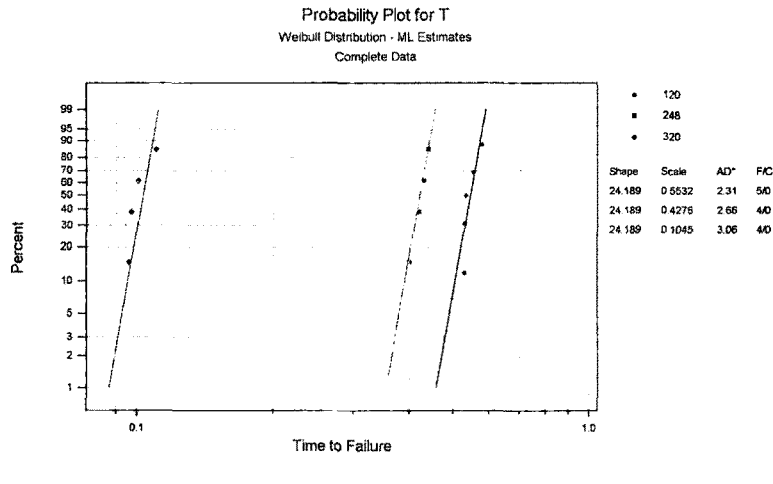
다음은 옥외시험 및 가속시험에서 관측된 실란트 시료의 인장강도 데이터로부터 인장강도의 분포를 추정하였다. 2년의 옥외시험, 그리고 120시간 및 320 시간의 가속시험을 거친 각각의 시료의 인장강도 데이터를 사용하여 적합한 분포를 도출한 결과 와이블 분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 그림 4는 이들 데이터의 와이블 플롯을 나타내며 형상모수에 대한 동일성 검정결과 3 시료 모두 형상모수가 동일한 것으로 나타났다 (표 2 참조). 추정된 공통의 형상모수 값은 $\beta = 24.2$ 이다.

3.2 신장률

신장률 역시 Sugiyama의 가속시험데이터를 사용하여 수학적 열화모형을 도출하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 인장강도와 마찬가지로 로그모형(식 (2))이 적합한 것으로 나타났다. 신장률의 저하추이도 초기에는 급속한 감소를 보이다가 시간이 경과 할수록 열화가 완만히 진행되는 경향을 보이고 있다.

$$y = 21.042 \ln t - 20.881 \tag{2}$$

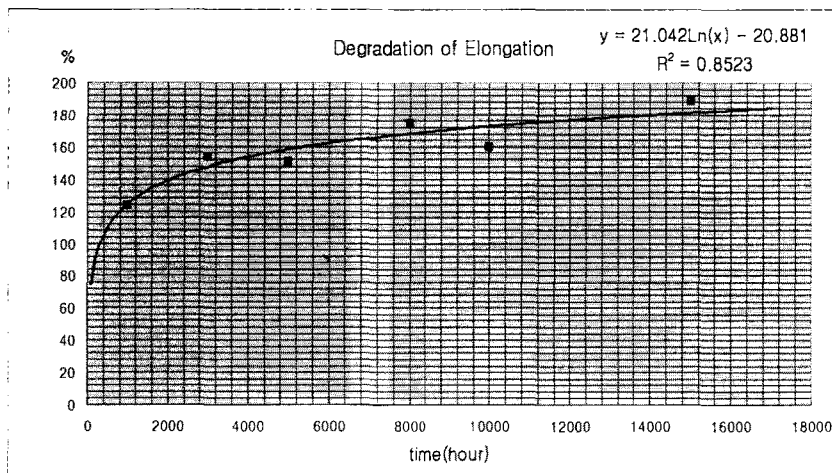
식 (2)에서 t 는 가속시험 시간을, y 는 초기 값에서 저하된 신장률 (%)을 나타낸다.



<그림 4> 인장강도 데이터의 와이블 플롯결과

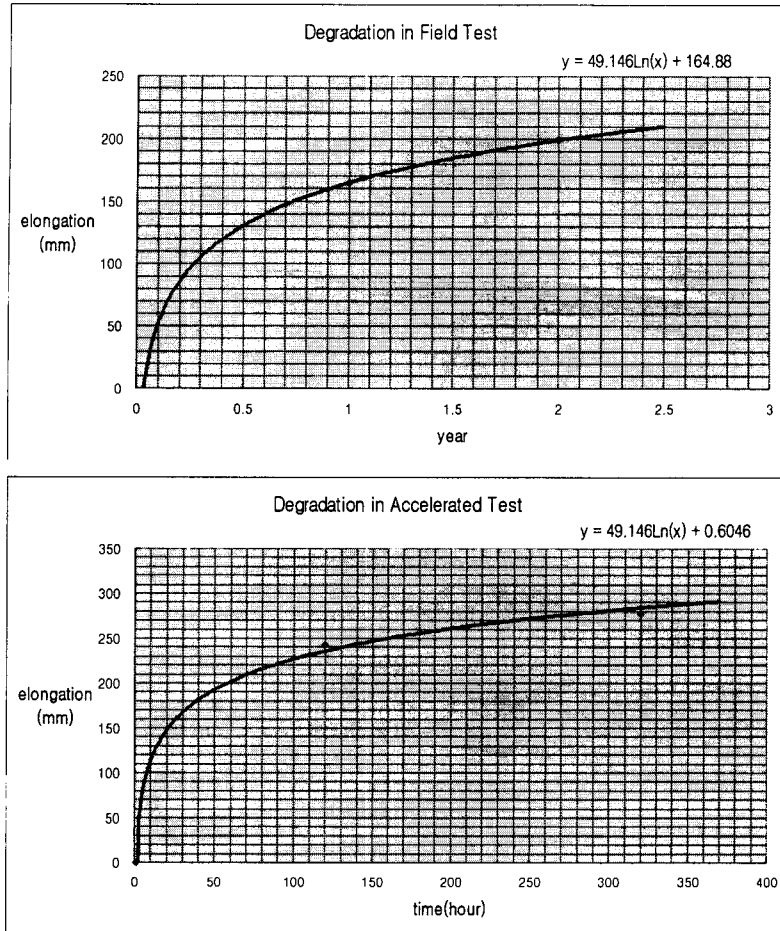
<표 2> 인장강도 데이터의 형상모수 동일성 검정결과

Chi-Square	DF	P
1.743	2	0.418



<그림 5> 제논램프 가속시험에서의 실란트 신장률 열화모형

다음 현재까지 진행된 실란트의 수명시험데이터 (옥외시험 2년, 가속시험 120시간)를 사용하여 로그모형에 적합 시킨 결과가 그림 6에 주어져 있다. 여기서 신장율은 mm 단위로 측정된 것이다.



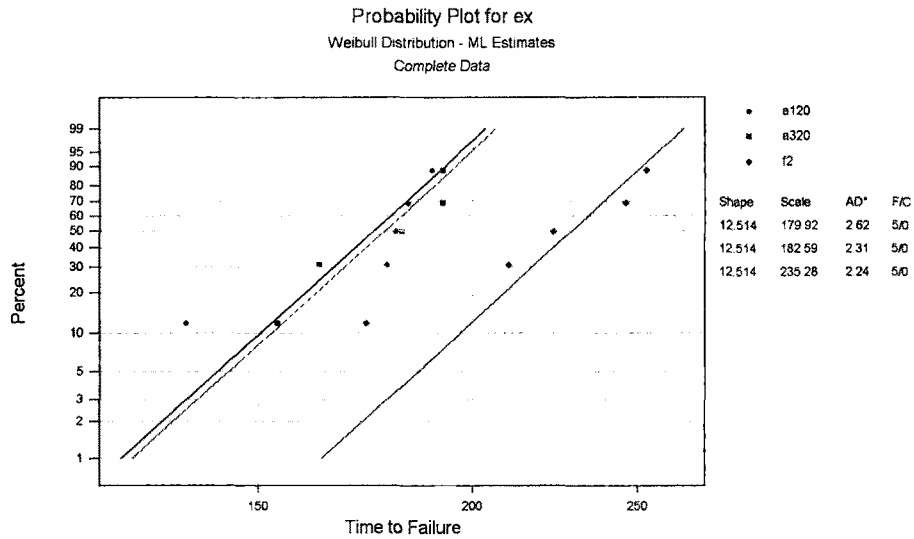
<그림 6> 옥외 및 가속시험에서 실란트 신장률 열화모형

3.1절에서와 같은 방법으로 가속시험에 대한 가속계수를 구하면 $AF=310$ 이 얻어진다. 이 가속계수 역시 현재까지 진행된 제한적인 시험자료로부터 도출된 것이며 신뢰할 수 있는 가속계수 산출을 위해서는 옥외시험 및 가속시험을 계속 진행하여 충분한 시험데이터를 구축하여야 할 것이다.

옥외시험 및 가속시험에서의 신장률 역시 와이불분포를 따르는 것으로 나타났다. 다음 그림 7은 옥외시험 2년, 그리고 가속시험 120시간 및 320시간에서의 각 시료에 대한 신장률 데이터의 와이불 플롯이다. 형상모수의 동일성 검정결과는 표 3과 같으며 공통의 형상모수는 $\beta=12.5$ 로 추정되었다.

<표 3> 신장률 데이터의 형상모수 동일성 검정결과

Chi-Square	DF	P
0.74	2	0.691



<그림 7> 신장률 데이터의 와이불 플롯

4. 가속열화시험에 의한 사용수명 평가 시험 설계

여기서는 열화시험에 의한 사용수명 평가시험을 설계하는 방법을 제시하였다. 인장강도와 신장률 모두 와이불 분포를 따르며 시간 경과에 따라 형상모수값 β 가 일정한 것으로 나타났다. 사용수명 평가시험의 설계과정은 다음과 같다.

1) 고장의 정의

실란트의 주요성능은 인장강도와 신장률이며 이들 성능이 특정 값 SL (예: 초기값의 50%) 이하로 저하되면 고장으로 간주한다.

2) 사용수명 및 사용수명에서의 신뢰도 결정

사용수명 L 을 정하고, 사용수명 L 에서 성능에 대한 수락한계인 SL 에 미달하는 비율, 즉 불신뢰도(unreliability) A_2 를 정한다. 이때 사용수명에서의 보증 신뢰도는 $1 - A_2$ 가 된다.

3) 신뢰수준 CL 결정

신뢰수준 CL 을 결정한다. 불신뢰도 A_2 인 제품의 합격확률, 즉 소비자 위험 A_1 과 신뢰수준의 관계는 $CL = 1 - A_1$ 이다.

4) 시험 시료수 및 시험기간 결정

시료수 n 을 정하고, 임의로 추출된 n 개 시료를 사용조건에서 사용수명 L 동안 시험하거나 가속시험조건에서 L 에 해당하는 기간 동안 시험한다.

5) 합격기준

시험 종료 후 시험에 투입된 n 개 시료의 성능 S_i ($i = 1 \sim n$)를 구한다.

시험 종료 후 모든 $S_i \geq AL$ 이면 합격, 즉 신뢰수준 $CL=1- A_1$ 에서 $B_{100 \times A_2}$ 수명 L 을 보증한다. 합격판정 기준값 AL 은 다음과 같이 결정된다.

사용수명 L 에서의 신뢰도가 $1- A_2$ 인 와이불 성능분포에서 척도모수는

$$\theta_L = \frac{SL}{[-\ln(1- A_2)]^{1/\beta}} \tag{3}$$

이고, 위의 합격기준에서 신뢰수준 $CL=1- A_1$ 을 만족하는 AL 은

$$\Pr(\text{all } S_i \geq AL) = [\Pr(S_i \geq AL)]^n = e^{-\left(\frac{AL}{\theta_L}\right)^{\beta}} = A_1 \tag{4}$$

에서부터

$$AL = SL \left[\frac{\ln A_1}{n \ln(1- A_2)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{5}$$

이 얻어진다. 여기서

$$K_v = \frac{AL}{SL} = \left(\frac{\ln A_1}{n \ln(1- A_2)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{6}$$

라 두면

$$AL = SL \times K_v \tag{7}$$

로 표현할 수 있다. 여기서 K_v 는 고장기준에 대한 합격기준의 배율을 나타낸다. 다음 표는 형상모수 β , 사용수명에서의 보증신뢰도 $1- A_2$, 시료수 n , 그리고 신뢰수준 $CL=1- A_1$ 에 따른 K_v 값을 산출한 것이다.

<표 4> 형상모수 β , 사용수명에서의 보증신뢰도, 시료수 n , 신뢰수준 CL 에 따른 K_v 값

β	신뢰도 (%)	시료수 n	신뢰수준 CL (%)					
			99	95	90	80	70	60
1.0	99	2	229.11	149.04	114.55	80.07	59.90	45.59
		5	91.64	59.61	45.82	32.03	23.96	18.23
		10	45.82	29.81	22.91	16.01	11.98	9.12
		20	22.91	14.90	11.46	8.01	5.99	4.56
	95	2	44.89	29.20	22.45	15.69	11.74	8.93
		5	17.96	11.68	8.98	6.28	4.69	3.57
		10	8.98	5.84	4.49	3.14	2.35	1.79
		20	4.49	2.92	2.24	1.57	1.17	0.89
	90	2	21.85	14.22	10.93	7.64	5.71	4.35
		5	8.74	5.69	4.37	3.06	2.29	1.74
		10	4.37	2.84	2.19	1.53	1.14	0.87
		20	2.19	1.42	1.09	0.76	0.57	0.43

1.5	99	2	37.44	28.11	23.59	18.58	15.31	12.76
		5	20.33	15.26	12.80	10.09	8.31	6.93
		10	12.80	9.61	8.07	6.35	5.24	4.36
		20	8.07	6.06	5.08	4.00	3.30	2.75
	95	2	12.63	9.48	7.96	6.27	5.16	4.30
		5	6.86	5.15	4.32	3.40	2.80	2.34
		10	4.32	3.24	2.72	2.14	1.77	1.47
		20	2.72	2.04	1.71	1.35	1.11	0.93
	90	2	7.82	5.87	4.92	3.88	3.20	2.66
		5	4.24	3.19	2.67	2.11	1.74	1.45
		10	2.67	2.01	1.68	1.33	1.09	0.91
		20	1.68	1.26	1.06	0.84	0.69	0.57
2.0	99	2	15.14	12.21	10.70	8.95	7.74	6.75
		5	9.57	7.72	6.77	5.66	4.89	4.27
		10	6.77	5.46	4.79	4.00	3.46	3.02
		20	4.79	3.86	3.38	2.83	2.45	2.14
	95	2	6.70	5.40	4.74	3.96	3.43	2.99
		5	4.24	3.42	3.00	2.51	2.17	1.89
		10	3.00	2.42	2.12	1.77	1.53	1.34
		20	2.12	1.71	1.50	1.25	1.08	0.95
	90	2	4.67	3.77	3.31	2.76	2.39	2.09
		5	2.96	2.38	2.09	1.75	1.51	1.32
		10	2.09	1.69	1.48	1.24	1.07	0.93
		20	1.48	1.19	1.05	0.87	0.76	0.66
3.0	99	2	6.12	5.30	4.86	4.31	3.91	3.57
		5	4.51	3.91	3.58	3.18	2.88	2.63
		10	3.58	3.10	2.84	2.52	2.29	2.09
		20	2.84	2.46	2.25	2.00	1.82	1.66
	95	2	3.55	3.08	2.82	2.50	2.27	2.07
		5	2.62	2.27	2.08	1.84	1.67	1.53
		10	2.08	1.80	1.65	1.46	1.33	1.21
		20	1.65	1.43	1.31	1.16	1.05	0.96
	90	2	2.80	2.42	2.22	1.97	1.79	1.63
		5	2.06	1.78	1.64	1.45	1.32	1.20
		10	1.64	1.42	1.30	1.15	1.05	0.95
		20	1.30	1.12	1.03	0.91	0.83	0.76
5.0	99	2	2.96	2.72	2.58	2.40	2.27	2.15
		5	2.47	2.27	2.15	2.00	1.89	1.79
		10	2.15	1.97	1.87	1.74	1.64	1.56
		20	1.87	1.72	1.63	1.52	1.43	1.35
	95	2	2.14	1.96	1.86	1.73	1.64	1.55
		5	1.78	1.63	1.55	1.44	1.36	1.29
		10	1.55	1.42	1.35	1.26	1.19	1.12
		20	1.35	1.24	1.18	1.09	1.03	0.98

	90	2	1.85	1.70	1.61	1.50	1.42	1.34
		5	1.54	1.42	1.34	1.25	1.18	1.12
		10	1.34	1.23	1.17	1.09	1.03	0.97
		20	1.17	1.07	1.02	0.95	0.89	0.85
10	99	2	1.72	1.65	1.61	1.55	1.51	1.47
		5	1.57	1.50	1.47	1.41	1.37	1.34
		10	1.47	1.40	1.37	1.32	1.28	1.25
		20	1.37	1.31	1.28	1.23	1.20	1.16
	95	2	1.46	1.40	1.36	1.32	1.28	1.24
		5	1.33	1.28	1.25	1.20	1.17	1.14
		10	1.25	1.19	1.16	1.12	1.09	1.06
		20	1.16	1.11	1.08	1.05	1.02	0.99
	90	2	1.36	1.30	1.27	1.23	1.19	1.16
		5	1.24	1.19	1.16	1.12	1.09	1.06
		10	1.16	1.11	1.08	1.04	1.01	0.99
		20	1.08	1.04	1.01	0.97	0.95	0.92
20	99	2	1.31	1.28	1.27	1.25	1.23	1.21
		5	1.25	1.23	1.21	1.19	1.17	1.16
		10	1.21	1.18	1.17	1.15	1.13	1.12
		20	1.17	1.14	1.13	1.11	1.09	1.08
	95	2	1.21	1.18	1.17	1.15	1.13	1.12
		5	1.16	1.13	1.12	1.10	1.08	1.07
		10	1.12	1.09	1.08	1.06	1.04	1.03
		20	1.08	1.06	1.04	1.02	1.01	0.99
	90	2	1.17	1.14	1.13	1.11	1.09	1.08
		5	1.11	1.09	1.08	1.06	1.04	1.03
		10	1.08	1.05	1.04	1.02	1.01	0.99
		20	1.04	1.02	1.00	0.99	0.97	0.96

<적용사례>

여기서는 본 연구에서 시험한 폴리우레탄계 실란트의 사용수명 평가를 위한 가속시험 방법을 도출한다. 도로용 줄눈제로 사용되는 실란트의 사용수명은 2년이며, 주요성능인 인장강도와 신장률이 초기값의 50%로 저하되는 시점을 고장으로 간주한다. 시료수 5개를 사용할 경우 사용수명 $L=2$ 년에서 신뢰도 90%를 신뢰수준 $CL=60\%$ 로 보증하는 가속시험방법은 다음과 같다.

<표 5> 사용수명 $L=2$ 년, 신뢰도 90%를 신뢰수준 $CL=60\%$ 로 보증하는 가속시험방법

주요성능	고장기준 SL	형상모수 β	가속계수 AF	가속시험 시간	시료수 n	K_r	합격기준 AL
인장강도	0.7 MPa	24.2	112	156 시간	5	1.0231	0.72 MPa
신장률	216 mm	12.5	310	57 시간	5	1.0453	226 mm

인장강도의 경우 시료 5개를 2.3절의 가속조건에서 156시간 시험한 후 5개 시료 모두 인장강도가 0.72 MPa 이상이면 합격, 즉 인장강도에 대해 신뢰수준 60%로 B_{10} 사용수명 2년을 보장한다. 신장률의 경우는 시료 5개를 2.3절의 가속조건에서 57시간 시험한 후 5개 시료 모두 신장률이 226 mm 이상이면 합격, 즉 신장률에 대해 신뢰수준 60%로 B_{10} 사용수명 2년을 보장한다.

실제로는 인장강도와 신장률 모두 합격기준을 만족해야 하므로 이 두 가지를 함께 고려할 경우 보증 신뢰도는 $0.9 \times 0.9 = 0.81$, 즉 81%의 신뢰도가 되고 신뢰수준은 $1 - (0.4) \times (0.4) = 0.84$, 즉 84%가 된다. 인장강도와 신장률 모두 합격기준을 만족할 경우 사용수명 2년, 신뢰도 81%를 신뢰수준 84%로 보증할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 건축용 실란트를 대상으로 현장시험 및 가속시험을 실시하고 그 주요성능인 인장강도와 신장률의 변화를 측정하였다. 관측된 시험데이터로부터 수학적 열화모형과 성능의 분포를 추정하고 이들 결과를 적용하여 가속시험에 의한 사용수명 평가방법을 설계하였다. 수학적 열화모형으로서 로그모형이 적합한 것으로 나타났으며 인장강도와 신장률은 형상모수가 일정한 와이불 분포를 따르는 것으로 나타났다. 여기서 도출된 열화모형과 성능분포, 그리고 가속계수는 현재까지 진행된 시험자료에 근거한 것이다. 앞으로 충분한 시험자료의 축적과 함께 열화모형, 성능분포, 가속계수 및 관련 파라미터들에 대한 개정과 확인이 이루어진다면 현장에서 적용할 수 있는 실효성 있는 가속시험법과 사용수명 평가방법을 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 “건설생산성 향상을 위한 건설자재 표준화 연구”(과제번호 : 06기반구축A02)의 일환으로 건설교통부 건설기술기반구축사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Bain, L.J. (1978), Statistical Analysis of Reliability and Life-Testing Models: Theory and Methods, Statistics: Textbooks and Monographs, Vol 24, Marcel Dekker.
- [2] Bakker, J.D. et. al. (1999), Model of Lifetime-extending maintenance, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Faults and Repair, London, UK, pp. 13-15.
- [3] British standard BS7543 (2003), Guide to durability of buildings and bulding

elements, products, and components, BSI.

- [4] Ding, S.H. and Liu, D.Z. (2006), Durability evaluation of building sealants by accelerated weathering and thermal analysis, *Construction and Building Materials*, 20, pp. 878-881.
- [5] European Organization for Technical Approvals (1999), Assessment of working life of products.
- [6] ISO, International Organization for Standardization (2000), Building and constructed assets. Service life planning, Part 1: General principles, ISO 15686-1.
- [7] ISO, International Organization for Standardization (2001), Building and constructed assets. Service life planning, Part 2: Service life prediction procedures, ISO 15686-2.
- [8] ISO, International Organization for Standardization (2002), Building and constructed assets . Service life planning, Part 3: Performance audits and reviews, ISO 15686-3.
- [9] Kolosowski, J.M. (1999), Science and technology of building seals, sealants, glazing, and waterproofing, 7th Volume, ASTM.
- [10] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A. (1998), *Statistical Method for Reliability Data*, Wiley
- [11] Nelson, W. (1990), *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, John Wiley & Sons.
- [12] Noortwijk, J.M. (1998), Optimal replacement decisions for structures under stochastic deterioration, In Andrzej S. Nowak, editor, *Proceedings of the Eighth IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems*, Kraków, Poland, 1998, pages 273-280. Ann Arbor: University of Michigan.
- [13] Noortwijk, J.M., and Klatter, H.E. (1999), Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier, *Reliability Engineering and System Safety*, 65(3), pp. 203-211.
- [14] Petrie, E.M. (2006), *Accelerated Aging of Adhesives to Estimate Service Life*, <http://www.omnexus4adhesives.com>.
- [15] Wolfe, A.T. (1997), Durability of building sealants, *RILEM Proceedings* 36, E & FN SPON.
- [16] Wolfe, A.T. (2004), Durability of building and construction sealants and adhesives, ASTM.