

## 열화성능에 의한 건설자재 수명평가에 관한 연구

권 영 일

청주대학교 산업공학과

### Assessment of Service Life of Building Materials Based on Performance Degradation

Kwon, Young Il

Department of Industrial Engineering, Chongju University

#### Abstract

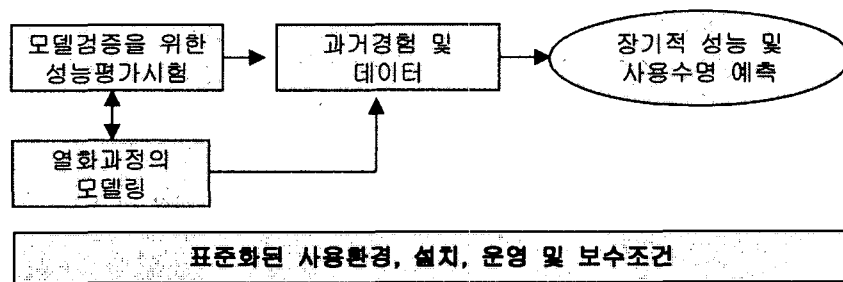
A test method for assessing service life of building materials and components based on performance degradation data is developed. The performance of a building material degrades as time goes by and the failure of the material is often defined as the point at which the performance of the material reaches a pre-specified degraded level. A performance-based test method is developed and a numerical example is provided to illustrate the use of the developed test method.

Key words : performance degradation(성능열화), building materials (건설자재), service life(사용수명), assessment of service life(사용수명평가)

## 1. 서 론

최근 들어 건설분야에 기능성 신소재와 친환경자재의 사용이 증가하고 권장됨에 따라 사용 경험이나 데이터가 부족한 이들 자재에 대한 기능의 확인 및 사용수명에 대한 예측이 더욱 절실히 요구되고 있다. 한편 건설자재의 경우 전기/전자, 기계류 제품 등 다른 내구재 제품에 비해 상대적으로 오랜 사용수명(service life)이 요구된다. 일반적으로 기계, 전기, 전자 등 부품에 대한 신뢰성 평가나 인증은 주로 고장시간의 관측에 의해 이루어지나 플라스틱, 도료, 실란트 등과 같은 소재 중심의 건설자재의 경우에는 그 특성상 자재의 고유 물성이나 성능이 특정 수준으로 저하되는 시점을 고장으로 판정하는 경우가 대부분이다.

이러한 특성을 지닌 자재의 경우, 정확한 고장 시간보다는 시간의 경과에 따른 성능이나 물성의 변화를 관측하기가 훨씬 용이하며 사용수명 평가나 보증방법도 물성이나 성능의 관측치를 바탕으로 설계하는 것이 효과적이다. <그림 1>은 성능열화에 의한 건설자재나 부품의 수명 평가 방법론을 개략적으로 나타내고 있다.



<그림 1> 건설자재 및 부품의 사용수명 평가를 위한 방법론

성능의 열화모형과 열화데이터의 통계적 분석에 관해서는 Meeker(1998), Bain(1978), Nelson(1990) 등을 비롯한 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. 그리고 최근 들어 건설/토목 분야에서도 열화성능에 기초한 건설자재의 수명평가 방법들에 대한 연구의 필요성과 함께 접근방법에 대한 논의가 Beek et al.(2003)을 비롯하여 BS7453(2003), ISO 15686-1(2000), ISO 15686-2(2001), ISO 15686-3(2002), 그리고 European organization for technical approvals(1999) 등의 국가 및 국제기구에서 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 성능 열화현상에 의해 고장이 유발되는 건설자재에 대한 수명평가 시험방식을 설계하고 현장의 분석가들이 대상 자재나 제품에 적합한 시험방법을 적용할 수 있도록 통계적 방법, 시험절차 및 사례를 제공하고자 한다. 한편 금속소재로 이루어진 유압용기에 대해 강도(strength)의 저하(열화)에 기초한 사용수명의 평가방법이 미국의 National Fluid Power Association(2000)에 의해 제시된바 있다. 금속자재의 경우 그 특성상 임의의 사용시간에서 강도(strength)의 측정이 불가능 하고 고장시간만을 관측할 수 있다. 따라서 이 방법에서는 단지 주어진 정격수명(rated life)에서의 강도가 정격피로압력을 견디어 내는지의 여부(고장여부)만을 이용하여 사용수명을 평가한다. 그에 반해 도료, 실란트, 접착제, 플라스틱, 고무 등을 비롯한 건설자재의 경우 대부분 특정 사용시간에서의 성능(표면경도, 접착강도, 인장강도, 신장률 등) 측정이 가능하므로 본 연구에서는 이들 성능 측정값에 기초한 사용수명

평가방식을 제시하였다. 여기서 개발 할 수명평가방법은 다음의 조건에 해당하는 건설자재를 대상으로 한다:

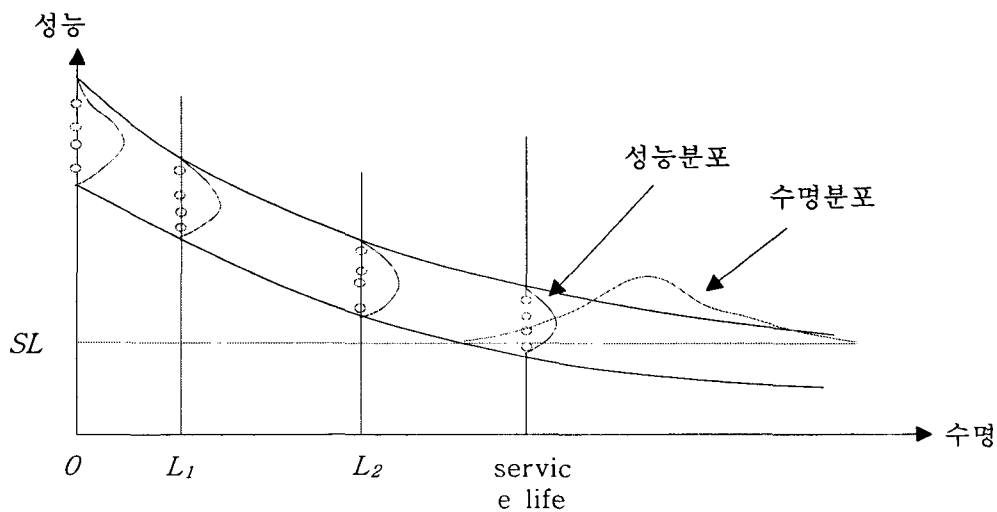
- 평가대상 자재의 주요성능이 사용시간이 경과함에 따라 열화되는 특성을 갖는다.
- 자재의 고장은 “성능이 특정수준 이하로 저하된 상태”로 정의된다.
- 성능의 분포는 정규분포를 따르며 성능의 산포는 다음 중 한 가지 조건을 만족한다.
  - i. 성능의 표준편차가 사용시간의 경과와 무관하게 일정하며 그 값이 알려져 있거나 시험 데이터 등을 통해 추정할 수 있다.
  - ii. 성능의 변동계수가 사용시간의 경과와 무관하게 일정하며 그 값이 알려져 있거나 시험 데이터 등을 통해 추정할 수 있다.

이 인증시험방식이 갖는 가장 큰 특징이자 장점은 고장시간의 분포를 알 수 없는 경우라도 상대적으로 측정이 수월한 성능의 분포를 이용하여 시험방식을 설계할 수 있으며, 고장이 판측되지 않더라도 성능의 수준만을 평가하여 사용수명을 평가할 수 있다는 점이다.

### 용어 및 기호

본 연구에서 사용될 용어와 기호는 다음과 같다:

- 성능(performance): 대상 자재의 인장강도, 신장율, 경도 등 요구되는 기능의 수행수준을 나타내는 척도를 말한다.
- 수락한계 SL(specification limit): 요구되는 성능수준의 하한. 자재의 성능이 이 하한을 초과하면 고장으로 판정한다.



<그림 2> 사용수명 L에서 열화 성능의 분포

- 열화(degradation): 시간의 경과에 따라 자재의 성능(performance)이 저하되는 현상이다. 성능이 수락한계 이하로 저하되면 고장이다.
- 사용수명 L(service life): 규정된 사용조건에서 고장 없이 유지되는 시간 또는 시간에 준하는 사용횟수, 주행거리, 사이클 등으로 보증수명과 같다.
- 소비자위험  $A_1$  (consumer's risk): 사용수명 L에 미달하는 자재가 인증시험에서 합격될 확률의 상한이다.
- 신뢰수준 CL(confidence level): 사용수명 L에 미달하는 자재가 인증시험에서 불합격될 확률의 하한으로  $1-A_1$ 이 된다.
- 불신뢰도  $A_2$ (unreliability): 사용수명 L에서 성능이 수락한계 SL 이하(고장)인 자재의 비율 또는 자재의 수명이 사용수명 L 이하일 확률이다. 이 때 사용수명 L 은  $100 \times A_2$  백분위수명이 된다. 예를 들어  $A_2 = 0.1$  이면  $L = B_{10}$  수명 (10% 백분위 수명)에 해당한다.
- $B_{100p}$  수명: 불신뢰도 값이 p인 시간을 말한다.
- 신뢰도 입증수준: 사용수명 L에서 입증하고자 하는 신뢰도로서  $1-A_2$  가 된다.
- 모집단 성능분포: 사용수명 L에서 시험대상 자재의 성능을 나타내는 통계적 분포로서 평균 및 분산이 각각  $\mu_P, \sigma_P^2$  인 정규분포로 가정한다.
- 정격성능분포(rated performance distribution): 사용수명 시점 L에서 불신도가  $A_2$  인 자재의 성능을 나타내는 통계적 분포로서 정규분포로 가정한다.
- 변동계수  $k_0$ : 성능분포에서 표준편차의 평균에 대한 비율이다.

## 2. 열화성능의 분포와 수명평가지험 설계

### 2.1 성능의 분포

임의의 시점에서 성능의 분포는 정규분포를 따른다고 가정한다. 사용수명 L에서의 정격성능분포 (rated performance distribution)는 평균 및 분산이 각각  $\mu_R, \sigma_R^2$  인 정규 분포로 나타낸다.

#### 산포에 대한 가정

(i) 성능의 표준편차  $\sigma_R$  이 사용시간과 무관하게 일정한 경우

플라스틱이나 접착제 강도, 고무자재의 신장률 등 다양한 자재의 성능이 이러한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.

(ii) 변동계수(coefficient of variation)  $k_0$  가 사용시간과 무관하게 일정한 경우

주로 철강, 비철금속, 합금 등으로 제조된 금속자재나 구조물 강도(strength)의 변동계수가 사용시간의 경과와 무관하게 일정한 것으로 알려져 있다.

## 2.2 수명평가시험의 설계

### 1) 보증신뢰도 결정

사용수명  $L$ 에서 성능에 대한 수락한계  $SL$ 에 미달하는 비율, 즉 불신뢰도(unreliability)  $A_2$ 를 정한다. 이때 사용수명에서의 보증 신뢰도는  $1 - A_2$ 가 된다. 사용수명  $L$ 에서 불신뢰도가 1% 이면  $A_2 = 0.01$ 이 된다. 이는 정격수명  $L$ 에서 신뢰도  $1 - A_2 = 0.99$  로 보증하는 것과 같다.

### 2) 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. 만약 소비자위험이 10%, 즉  $A_1 = 0.1$ 이면 신뢰수준  $CL = 1 - A_1 = 0.9$  (90%)가 된다.

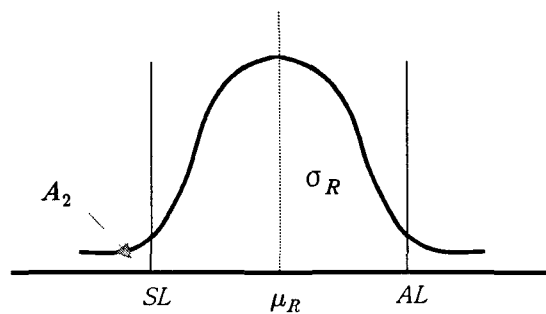
### 3) 시험 시료수 및 시험기간 결정

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

### 4) 합격기준

시험 종료 후 시험에 투입된  $n$ 개 시료의 성능을 측정하여 그 평균값  $\bar{S}$ 를 구한다.  $\bar{S} \geq AL$  이면 합격이며, 이는 신뢰수준  $CL = 1 - A_1$  에서  $B_{100 \times A_2}$  수명  $L$ 을 보증함을 의미한다. 합격 판정기준값  $AL$  은 다음과 같이 결정된다.

(i) 성능의 표준편차  $\sigma_R$  이 일정한 경우



<그림 3>  $A_2$ ,  $SL$ 과  $\mu_R$ 의 관계

그림 3에서  $\mu_R = S_L + z_{A_2} \sigma_R$  이고,  $\bar{S}$ 는 평균과 분산이 각각  $\mu_R$ ,  $\sigma_R^2/n$ 인 정규분포를 따르므로 신뢰수준 CL 을 만족하는 판정기준

$$\Pr(\bar{S} \geq AL | \mu_R = S_L + z_{A_2} \sigma_R) = 1 - CL$$

로부터

$$AL = SL + (z_{A_2} + z_{A_1} / \sqrt{n}) \sigma_R$$

이 얻어진다.

(ii) 성능의 변동계수  $k_0 = \frac{\sigma_R}{\mu_R}$  가 일정한 경우

$$AL = \mu_R + z_{A_1} \sigma_R / \sqrt{n}$$

$$SL = \mu_R - z_{A_2} \sigma_R$$

로부터  $AL = SL \times K_v$ 를 만족하는 상수  $K_v$  를 다음과 같이 계산한다:

$$\begin{aligned} K_v &= \frac{AL}{SL} = \frac{\mu_R + z_{A_1} \frac{\sigma_R}{\sqrt{n}}}{\mu_R - z_{A_2} \sigma_R} \\ &= \frac{1 + \frac{z_{A_1}}{\sqrt{n}} \frac{\sigma_R}{\mu_R}}{1 - z_{A_2} \frac{\sigma_R}{\mu_R}} \\ &= \frac{1 + \frac{z_{A_1}}{\sqrt{n}} k_0}{1 - z_{A_2} k_0} \end{aligned}$$

따라서 합격판정기준값 AL은

$$AL = SL \times K_v$$

식에서 구할 수 있다. 이 식을 사용하여 사용수명 L에서의 불신도  $A_2$ , 신뢰수준  $CL = 1 - A_1$ , 시료수 n으로부터  $K_v$ 가 계산되고 이로부터 합격판정기준 AL이 결정된다.

##### 5) 합격확률 계산

사용수명 L에서 모집단 성능  $S_P$  가 다음의 분포를 가질 때

$$S_P \sim N(\mu_P, \sigma_P^2)$$

합격확률  $P_a$  는 다음과 같이 구해진다.

$$P_a = \Pr(\bar{S}_P \geq AL) = \Pr(Z \geq \frac{AL - \mu_P}{\sigma_P / \sqrt{n}})$$

이 된다. 여기서 Z는 표준정규분포를 따르는 확률변수를 뜻한다.

6) 안전율

안전계수와 유사한 개념으로서 모집단의 성능평균  $\mu_P$ 를 정격 성능평균  $\mu_R$ 로 나눈 값을 안전률(degree of conservatism)이라 하고  $F_R$ 로 표기한다.

(i) 표준편차  $\sigma$ 가 일정할 때

먼저 정격성능분포에서  $\Pr(\bar{S} \geq AL) = A_1$ 의 관계식으로부터

$$AL = \mu_R + z_{A_1} \frac{\sigma_R}{\sqrt{n}}$$

이므로

$$F_R = \frac{\mu_P}{\mu_R} = \frac{\mu_P}{AL - z_{A_1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

이 된다.

(ii) 변동계수  $k_0$ 가 일정할 때

$$AL = \mu_R + z_{A_1} \frac{\sigma_R}{\sqrt{n}},$$

$$\mu_P = AL + z_{A_3} \sigma$$

이므로

$$\mu_P = \mu_R + z_{A_1} \frac{\sigma_R}{\sqrt{n}} + z_{A_3} \sigma_P$$

의 관계가 성립한다. 따라서 안전율은

$$F_R = \frac{\mu_P}{\mu_R} = 1 + \frac{z_{A_1}}{\sqrt{n}} k_0 + z_{A_3} \frac{\sigma_P}{\mu_R}$$

이고  $\frac{\sigma_R}{\mu_R} = \frac{\sigma_P}{\mu_P}$ 의 관계로부터  $\sigma_P = \sigma_R F_R$  이므로 이를 위식에 대입하면

$$F_R = \frac{\mu_P}{\mu_R} = 1 + \frac{z_{A_1}}{\sqrt{n}} k_0 + z_{A_3} k_0 F_R$$

이 되어

$$F_R = \frac{1 + \frac{z_{A_1}}{\sqrt{n}} k_0}{1 - z_{A_3} k_0}$$

가 된다.

### 3. 적용사례

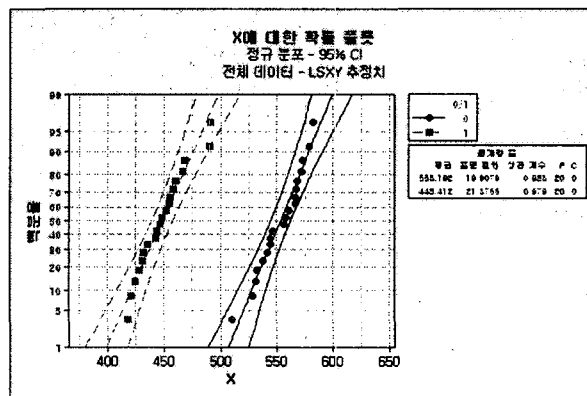
여기서는 건축구조물의 진동 및 충격 흡수용으로 사용되는 건설자재의 사용수명 평가 사례를 소개한다. 이 자재는 고분자 소재로 이루어져 있으며 주 고장모드는 신장률의 저하에 의한 진동 및 충격 흡수기능상실이다. 옥외노출환경에서 사용되며 사용수명은 20년이 요구되고 있다. 신뢰수준, 시험방법, 사용수명 및 고장의 기준은 다음과 같다.

사용수명의 보증: 신뢰수준 90% ( $A_1 = 0.1$ )에서 20년간 90%이상 고장 없이 ( $A_2 = 0.1$ ) 사용할 수 있을 것.

수명시험방법: 사용환경에서 20년간의 열화량과 동일한 열화를 유발하는 열 및 충격에 의한 가속노화시험을 실시한다.

고장판정기준: 주요성능특성인 파단 신장률이 초기값의 70% 이하로 저하되면 고장으로 판정한다.

다음 그래프는 각 20개의 시료를 사용하여 초기성능(신장률)과 가속노화시험 실시 후의 성능 데이터를 정규확률지에 플롯한 것이다.



<그림 4> 가속 노화시험 전후 신장률 데이터의 정규확률지 플롯



그림에서 성능이 정규분포를 따름을 알 수 있고 분산의 동일성 검정에서도 카이제곱 통계량 값 및 p-value가 각각 0.0838 과 0.772 가 되어 노화시험 전과 후의 분산이 동일함을 보여 주고 있다. 또한 공통의 표준편차는  $\hat{\sigma}=20.64$  로 추정되었다.  $n=10$ 개의 시료로 시험할 경우 합격판정기준은 다음과 같이 구해진다.

- 고장판정기준:  $SL = 553.2(\text{초기성능평균}) \times 0.7 = 387.24$
- 합격판정기준:  $AL = SL + (1.282 + 1.282/\sqrt{10})(20.64) = 422.07$

즉  $n=10$ 개의 시료를 대상으로 사용환경에서 20년에 해당하는 기간동안 가속노화시험을 실시한 후 성능을 측정하고 그 평균  $\bar{S}$ 를 계산한다.  $\bar{S} \geq 422.07$ 이면 신뢰수준 90%에서 사용수명 20년을 보장한다.

다음 데이터는  $n=10$ 개의 시료를 가속노화시험한 후 신장률을 측정한 것이다.

444.2   476.8   461.8   471.8   441.2   454.7   455.4   479.8   418.0   464.0

이 자료의 샘플평균은  $\bar{S}=456.76$ , 샘플 표준편차는  $\hat{\sigma}=19.84$ 이다.  $\bar{S} \geq 422.07$ 이므로 이 자재는 신뢰수준 90%에서 사용수명 20년을 보장할 수 있다. 현재 모집단의 평균 추정값  $\hat{\mu}=\bar{S}=456.76$  을 이용하여 안전율을 구하면 다음과 같다.

$$F_R = \frac{456.76}{422.07 - 1.282 \frac{20.64}{\sqrt{10}}} = 1.104$$

이는 사용수명 L에서 대상 자재의 성능평균이 정격성능평균에 비해 10.4% 정도 여유가 있음을 의미한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 성능열화에 의해 고장이 유발되는 건설자재에 대한 수명평가 시험방식을 설계하고 현장에서 제품이나 자재에 적합한 시험방법을 적용할 수 있도록 통계적 방법, 시험절차 및 사례를 제공하였다. 여기서 제공하는 열화성능에 의한 수명평가 시험방법은 대상 소재나 부품의 고장시간을 정확히 정의 또는 관측하기 어렵거나, 수명분포를 알 수 없는 경우에도 상대적으로 시험이나 관측이 용이한 열화성능 데이터와 분포를 이용하여 사용수명평가를 할 수 있다는 특징을 갖는다.

## 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] Beek A.V. et al. (2003), Validation model for service life prediction of concrete structures, 2nd International RILEM workshop on life prediction and aging management of concrete structures, Paris, France, pp. 257-267.
- [3] British standard BS7543 (2003), Guide to durability of buildings and building elements, products, and components, BSI
- [4] European Organization for Technical Approvals (1999), Assessment of working life of products
- [5] ISO, International Organization for Standardization (2000), Building and constructed assets . Service life planning . Part 1: General principles, ISO 15686-1.
- [6] ISO, International Organization for Standardization (2001), Building and constructed assets . Service life planning . Part 2: Service life prediction procedures, ISO 15686-2.
- [7] ISO, International Organization for Standardization (2002), Building and constructed assets . Service life planning . Part 3: Performance audits and reviews, ISO 15686-3.
- [8] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A. (1998), Statistical Method for Reliability Data, Wiley
- [9] Nelson, W. (1990), Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, John Wiley & Sons
- [10] NFPA/T2.6.1 R2-2000 (2000), Fluid power components-Method for verifying the fatigue and establishing the burst pressure ratings of the pressure containing envelope of a metal fluid power component, National Fluid Power Association