

가속열화시험에 의한 콘크리트용 탄소섬유 강화플라스틱 바의 사용수명 예측

권영일*, 김승진**, 이형욱**

청주대학교 산업공학과*, 한국건설자재시험연구원 신뢰성평가센터**

Service life prediction of CFRP bar for concrete reinforcement based on accelerated degradation tests

Young Il Kwon*, Seung Jin Kim**, Hyoung Wook Lee**

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

Abstract

This paper discusses the service life prediction methods for CFRP bar for concrete reinforcement using accelerated degradation tests. The relationship between performance degradation and the rate of a failure-causing chemical reaction is assumed for the temperature accelerated degradation tests. Methods of obtaining acceleration factors and predicting service life of the CFRP bar using the degradation model are presented.

Key words : performance degradation(성능열화), CFRP(탄소섬유강화플라스틱), service life(사용수명), service life prediction(사용수명예측), accelerated degradation test(가속열화시험)

1. 서론

오늘날 대표적인 콘크리트 구조물 강화용 자재로 강철(steel)이 주로 사용되고 있다. 그러나 강철은 고온, 습기, 염화칼슘 등의 환경에 노출될 경우 부식(corrosion)에 취약하며, 부식된 철강은 콘크리트 구조물의 강도를 치명적으로 약화시키는 위험한 결과를 초래할 수 있다. 최근 여러 가지 우수한 재료특성을 갖는 섬유강화플라스틱(fiber reinforced plastic; FRP) 복합재료(composite)가 토목/건설 분야에서도 강철을 비롯한 전통적인 자재들의 대안으로 부상하고 있다. 그동안 파이프라인, 지하 저장탱크, 건물 파사드(facade) 등의 분야에서 FRP 자재가 기존의 자재에 비해 수명이 길고 유지비용이 절감되는 등 우수성이 확인되고 있으나, 구조용으로 사용될 경우 자재의 유형, 그리고 적용환경이나 부하가 앞에서 언급한 적용분야와는 매우 다르다는 점을 유의해야 한다. 일반적으로 구조용으로 사용되는 FRP 자재나 부품은 단일 또는 복합적으로 작용하는 다양한 환경에 노출된다. 특히 습기/용액, 알칼리성 환경, 온도, 피로, 크리프/이완(creep /relaxation), 자외선 노출, 화재 그리고 이들의 복합적 환경들이 이들 구조용 자재의 사용수명에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

FRP 복합재료의 내구수명 평가나 예측문제는 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. Degrieck과 Paeppegem (2001)은 섬유강화 복합재료에 대한 피로모델과 수명예측 방법들에 대해 고찰하였으며, Dejke (2001)는 콘크리트용 GFRP bar의 내구성과 사용수명 예측에 대해 연구하였다. Gonenc (2003)는 여러 유형의 콘크리트용 FRP 재질에 대한 열화시험을 수행하고 사용수명 예측을 위한 방법들을 제시하였다. Mufti et al. (2005)은 실제 필드에 설치되어 있는 구조물로부터 GFRP 강화콘크리트 코어를 추출하여 각종 성능과 내구성을 분석하여 그 결과를 제시하였으며, Minnetyan (2005)은 시뮬레이션을 이용하여 단조 증가하는 각종 주기적 부하 하에서 복합재료 구조물의 점진적 손상(damage)과 파손을 평가하였다. Park 과 Colton (2006)은 폴리머 기반 복합소재로 제조된 금형용 다이(die)의 피로수명 추정방법을 제시하였으며, Majumdar (2008)는 FRP 복합재료로 제작된 교량판(bridge deck)의 강도와 고장모드, 그리고 피로수명 예측방법에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 온도 가속열화시험에 의한 콘크리트용 탄소섬유 강화플라스틱 바(carbon fiber reinforced plastic bar; CFRP bar)의 사용수명 예측방법을 다루고 있다. 온도를 스트레스로 적용하는 가속열화시험에서 수학적 열화모형을 설정하고, 실험실에서 실시된 가속열화시험 데이터(Gonenc (2003))를 이 모델에 적용하여 필드조건에서의 사용수명분포(service life distribution)를 예측하는 방법을 제시한다. 복합재료의 성능열화모형으로 자주 사용되고 있는 로그모형을 적용하여 실제 열화시험 데이터로부터 열화모형의 모수들을 추정하고, 도출된 열화모형을 이용하여 가속계수(acceleration factor)와 필드에서의 사용수명분포를 예측하였다. 제안된 방법을 사용하여 비교적 간편하게 데이터의 분석을 수행할 수 있으며, 가속열화시험에서 충분한 데이터가 축적되기 이전의 초기데이터만으로도 조기에 대상소재의 사용수명을 예측할 수 있다.

2. 성능열화모형

2.1 반응속도론과 아레니우스 방정식

■ 반응속도론

화학반응에 있어서 반응율(rate of reaction)이란 단위시간동안 소비된 반응물질(reactant)의 양 또는 생성된 산물(product)의 양으로 정의된다. 반응이 일어나는 동안 반응율은 일정하지 않으며 반응물질의 농도변화에 따라 변하게 된다. 시간 t 에서 반응물질의 농도를 $[A(t)]$ 라 할때 반응율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{reaction rate} = k[A(t)] \quad (1)$$

반응율이 단일 반응물질의 농도에 비례하는 다음과 같은 반응에서



반응물질의 양을 A , 생성된 산물의 양을 P 라 하면, 시간에 따른 A 의 농도의 변화는 다음 방정식으로 표현된다.

$$-\frac{d[A(t)]}{dt} = k[A(t)] \quad (3)$$

위 방정식을 풀면

$$\begin{aligned} [A(0)] - [A(t)] &= [A(0)][1 - e^{-kt}] \\ &\simeq [A(0)]kt \end{aligned} \quad (4)$$

가 되어 시간 t 동안 농도의 감소량이 근사적으로 kt 에 비례함을 볼 수 있다. 본 연구에서 위와 같이 시간 t 동안 반응물질의 농도 감소량 $D(t) = [A(0)] - A[(t)]$ 가 kt 에 비례하는 경우를 고려한다.

■ 아레니우스 방정식

온도를 올리면 반응율이 증가한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 반응율과 온도의 정량적 관계는 다음의 아레니우스 방정식으로 결정된다.

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{k_B T}} \quad (5)$$

E_a = activation energy

k_B = Boltzmann's constant ($8.617 \times 10^{-5} eVK^{-1}$)

T = absolute temperature in Kelvins

A = frequency factor

위방정식에서 $\frac{E_a}{k_B} = B$ 라 두고 양변에 로그를 취하면

$$\ln k = \ln A - B \frac{1}{T} \quad (6)$$

가 되어 $\ln k$ 와 $\frac{1}{T}$ 이 선형관계를 갖는다.

2.2 로그열화모형

열화모형이란 소재의 성능저하를 유발하는 반응물질의 농도변화(감소)와 성능의 관계를 수학적으로 나타낸 것이다. 여기서 시간 t 에서의 성능을 $P(t)$ 라 하고 $P(t)$ 의 중위수(median)를 $\mu(t)$ 로 나타내기로 한다. 일반적으로 열화시험에 있어서 대상소재의 반응물질 농도변화에 해당하는 $D(t)$ 를 직접 관측하기는 쉽지 않다. 그보다는 $D(t)$ 에 의해 영향을 받는 강도나 효율, 신장율 등 대상소재의 성능 $P(t)$ 가 관측되는 것이 일반적이다. 복합소재의 경우 열화모형으로서 로그모형이 종종 이용되고 있다(Minnetyan (2005), Park 과 Colton (2006) 등 참조). 로그모형은 다음과 같이 성능 $\mu(t)$ 의 감소가 $D(t)$ 의 로그 값에 비례하는 모형이다.

$$\mu(t) = a - b \ln D(t) \quad (7)$$

다음은 온도를 스트레스로 적용하는 가속열화시험에서 성능열화가 로그모형을 따를 때 가속계수와 사용조건에서의 수명을 추정하는 방법을 전개한다. 로그모형에서는 시간 t 동안의 성능저하를

$$g(t) = a' + b \ln t \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서

$$a' = c - \frac{B'}{T} \quad (9)$$

이고 $B' = bB$ 이며, c 는 미지의 상수이다. 이 모형에서는 절편 a' 와 $\frac{1}{T}$ 이 선형관계를

갖게 된다. 성능의 저하가 d^* 에 도달하면 고장으로 판정할 때 온도 T 에서의 중앙수명 $L(T)$ 는 다음과 같이 아레니우스 관계식으로 표현된다.

$$L(T) = e^{\frac{d^* - c}{b}} e^{-\frac{B}{T}} \quad (10)$$

사용조건의 온도를 T_U , 가속조건의 온도를 T_A 라 하면 가속계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} AF(T_A, T_U) &= \frac{L(T_U)}{L(T_A)} \\ &= e^{\frac{a'_A - a'_U}{b}} \\ &= e^{B\left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A}\right)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 a'_A , a'_U 는 각각 가속조건 및 사용조건에서의 a' 의 추정 값을 말한다.

3. 모형 모수추정

여기서는 성능열화가 로그모형을 따르는 경우에 대해 가속열화시험 데이터로부터 최소자승법(least square estimation; LSE)을 사용하여 모수를 추정하는 방법을 제시한다. 시료의 산포를 반영하기 위해 시간 t 에서 관측된 시료 j 의 열화량을 $y_j(t)$ 라 할 때 다음의 모델을 가정한다.

$$y_j(t) = g(t) + \epsilon_j \quad (12)$$

여기서 ϵ_j 는 시료의 변동을 반영하는 오차변수로서 서로 독립이며 평균이 0, 분산이 σ^2 인 정규분포를 따른다고 가정한다.

가속열화시험에서 온도 T_i ($i = 1 \sim l$)에서의 관측시간들을 t_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n_i$)라하고, t_{ij} 의 로그값을 x_{ij} , t_{ij} 에서 관측된 열화데이터를 y_{ij} 라 두면 모델 (12)는

$$y_{ij} = \alpha - \frac{\beta}{T_i} + bx_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (13)$$

와 같다. 이 식에서 $\alpha = c$, $\beta = bB$ 를 말한다. 이때 오차 제곱합은 다음과 같이 표현된다.

$$SS = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} \left(y_{ij} - \alpha + \frac{\beta}{T_i} - bx_{ij} \right)^2 \quad (14)$$

오차제곱합 SS 를 최소로 하는 α , β 와 b 의 최소제곱추정치는 각각 다음과 같이 구해진다. 참고로 이 모형에서 모수들의 최소제곱추정치는 최우추정치(maximum likelihood estimates; MLE)와 동일하다.

$$\hat{b} = \frac{s_{ww}s_{xy} - s_{xw}s_{wy}}{s_{ww}s_{xx} - s_{xw}^2}, \quad (15)$$

$$\hat{\beta} = \frac{s_{xy}s_{xw} - s_{xx}s_{wy}}{s_{xx}s_{ww} - s_{xw}^2},$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} + \hat{\beta}\bar{w} - \hat{b}\bar{x}.$$

여기서

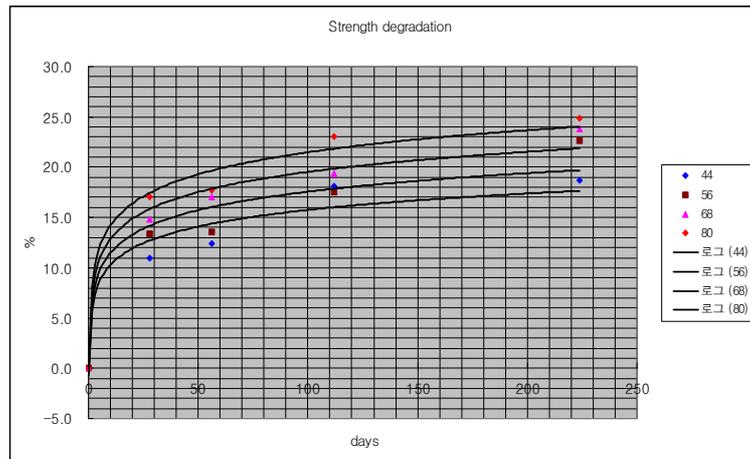
$$\begin{aligned} w_i &= 1/T_i, \quad N = \sum_{i=1}^l n_i, \\ \bar{x} &= \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}}{N}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{N}, \quad \bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^l n_i w_i}{N}, \\ s_{xx} &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - N\bar{x}^2, \quad s_{ww} = \sum_{i=1}^l n_i w_i^2 - N\bar{w}^2, \\ s_{xy} &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} y_{ij} - N\bar{x}\bar{y}, \quad s_{wy} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} w_i y_{ij} - N\bar{w}\bar{y} \end{aligned}$$

이다. 또한 오차 분산 σ^2 의 불편추정치(unbiased estimate)는 $\hat{\sigma}^2 = SSE/(N-3)$ 이다. 여기서 SSE 는 잔차제곱합을 말한다. α , β 와 b 의 추정치로부터 식(10)의 모수 c 와 B 는 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{c} = \hat{\alpha}, \quad \hat{B} = \hat{\beta}/\hat{b} \quad (16)$$

4. CFRP bar 사용수명 예측

다음 <그림 1>은 콘크리트 구조물 강화용 CFRP bar 에 대한 가속열화시험 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 토목/건설자재의 가속시험에서 가장 일반적으로 사용되는 스트레스인 온도를 가속스트레스로 적용하였으며, 섭씨 44도, 56도, 68도 및 80도의 온도에서 220일간 시간의 경과에 따라 콘크리트 구조물 강화용 CFRP bar의 가장 중요한 성능특성인 전단강도(shear strength)를 측정한 데이터이다.

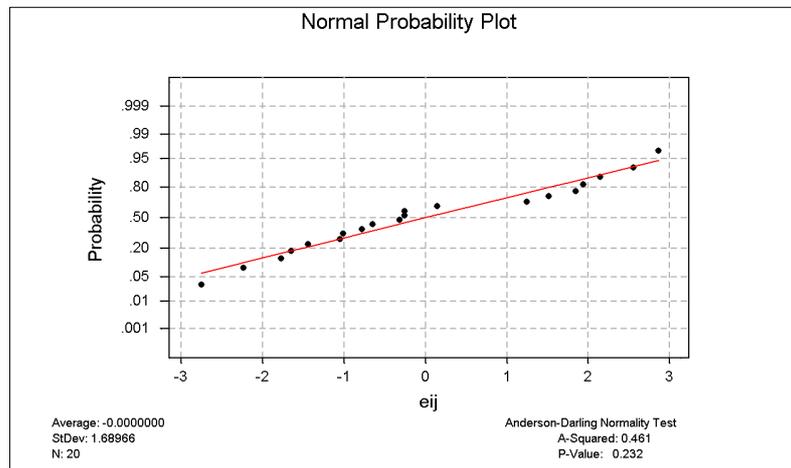


<그림 1> 온도가속에 의한 CFRP bar의 전단강도 데이터

참고로 그래프 상의 데이터는 5개 시료의 측정값들의 평균을 나타낸 것이다. 시료에 대한 시험은 해양환경과 동절기 도로용 해빙제의 영향을 반영하기 위해 ASTM B 117에 따라 준비된 NaCl 5%, H2O 95%의 용액 속에서 진행되었으며 용액의 PH는 7로 유지되었다. 그림에서 열화모형은 반응물질의 농도가 높은 초기에 열화가 빠르게 진행되고 시간이 경과 할수록 열화진행이 완만해지는 전형적인 로그모형의 패턴을 나타내고 있다. 로그모형을 적용하여 3절의 방법에 따라 모형 모수들의 최소제곱 추정 값을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{B} = 5069.51, \quad \hat{c} = 47.79, \quad \hat{\sigma}^2 = 15.95$$

다음 <그림 2>는 오차 ϵ_{ij} 의 정규성을 검토하기 위해 모형의 잔차를 정규확률지에 플롯한 결과이며, 정규분포가 적합한 것으로 판단된다.



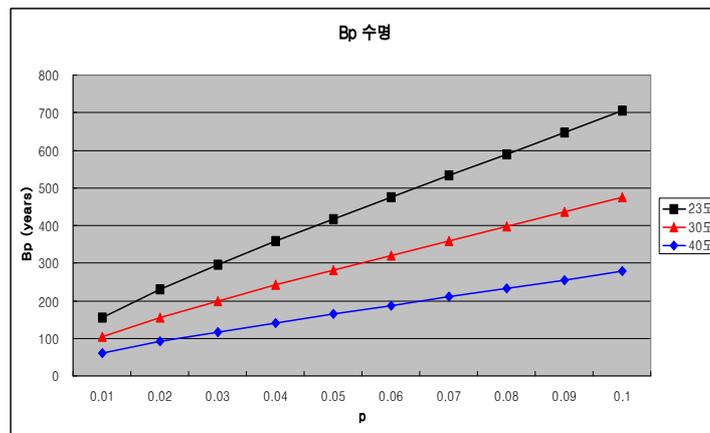
<그림 2> 열화모형의 잔차에 대한 정규성 검토결과

고장기준으로서 전단강도가 초기값의 60%에 도달하는 시점, 즉 강도가 40% 저하되는 시점을 고장으로 판정할 경우 각 사용온도 조건에서 추정된 중앙수명 $L(T)$ 와 가속계수는 <표 1>과 같다. 가속계수는 사용조건 온도 23도를 기준으로 산출된 값이다.

<표 1> 가속열화시험에 의한 중앙수명 $L(T)$ 및 가속계수 추정값

온도(°C)	온도(°K)	$L(T)$ (year)	가속계수
23	296.15	4474.7	1.0
30	303.15	3013.7	1.5
44	317.15	1440.5	3.1
56	329.15	804.3	5.6
68	341.15	467.9	9.6
80	353.15	282.4	15.8
100	373.15	130.8	34.2

<그림 3>은 필드조건이 각각 섭씨 23도, 30도 및 40도일 때의 백분위 수명을 나타내고 있다.



<그림 3> 사용온도별 백분위 수명 B_p

5. 결론

본 연구에서는 가속열화시험에 의한 콘크리트 강화용 CFRP bar의 사용수명 평가방법을 제안하였다. 온도를 가속인자로 적용하는 경우에 대해 반응속도론과 아레니우스 방정식에 기초한 가속열화모형을 설정하고 시험 데이터를 로그 열화모형에 적합시켜 모형의 모수들을 추정하였다. 또한 추정된 열화모형으로부터 가속계수와 필드조건에서의 사용수명분포(백분위 수명)를 예측하였다. CFRP bar의 열화시험자료의 분석 결과, 필드 사용조건 온도가 23

도 및 30도일 때 예측된 B_1 수명이 각각 156년과 105년으로서 100년 이상 사용 가능하고 신뢰도의 제품임을 보여주고 있다. 여기서 제안된 방법은 수치해석적인 방법을 사용하지 않고도 간편히 모형모수들을 추정할 수 있으며, 시험 초기의 데이터만으로도 조기에 사용수명을 추정할 수 있는 방법을 제공한다. 끝으로 여기서 예측된 CFRF bar의 사용수명은 220일간 가속 시험한 데이터로부터 도출된 결과이므로, 궁극적인 열화모형의 적합성과 필드 사용수명 예측 값의 정확성을 보장하기 위해서는 실제 필드에 시공한 제품의 성능열화를 지속적으로 모니터링 하고 확인하여 그 결과를 열화모형과 수명예측에 반영하고 개정해 나가는 것이 중요한 과제라 할 수 있겠다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Degrieck, J. and Paepegem, W.V. (2001), "Fatigue Damage Modeling of Fiber-reinforced Composite Materials; Review", *Applied Mechanics Reviews*, 54(4), 279-300.
- [2] Dejke V. (2001), "Durability of FRP reinforcements in concrete - Literature Review and Experiment", *Thesis for Degree of Licentiate of Engineering*, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [3] Gonenc, O. (2003), "Durability of service life prediction of concrete reinforcing materials", *Thesis for Master of Science in Civil and Environmental Engineering*, University of Wisconsin-Madison.
- [4] Majumdar, P.K. (2008), "Strength and Life Prediction of FRP Composite Bridge Deck", *Thesis for Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics*, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [5] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A. (1998), *Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley & Sons, New York.
- [6] Meeker, W.Q., Escobar, L.A., and Lu, C.J. (1998), "Accelerated degradation tests: modeling and analysis", *Technometrics*, 40, 89 - 99.
- [7] Minnetyan, L. (2005), "Computational Simulation of Composite Structural Fatigue", NASA/CR-2005-213573.
- [8] Mufti, A. et al., (2005), "Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures", *7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7)* - New Orleans, Louisiana, USA, November 7-10.
- [9] Nelson, W. (1981), "Analysis of performance degradation data from accelerated tests", *IEEE Transactions on Reliability*, R-30, 3, 149 - 155.
- [10] Nelson, W. (1990), *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, John Wiley & Sons, New York.
- [11] Park, Y.B. and Colton, J.S. (2006), "Fatigue of reinforced-polyurethane-based, sheet metal forming dies", *International Journal of Fatigue*, 28, 43 - 52.