

고온손상된 GFRP 보강근의 장기 잔존 계면전단강도 예측

Prediction of Long-term Residual Inter-laminar Shear Strength of Thermally Damaged GFRP Rebar

김민철¹⁾ 문도영^{2)*} 김성도³⁾
Min-Cheol Kim Do-Young Moon Sung-Do Kim

Abstract

Mechanical properties of GFRP rebars significantly decrease due to high temperature as well as alkalinity of concrete. This study focuses on the long-term reduction of inter-laminar shear strength of pre-damaged GFRP rebars by high temperature. For this investigation, bare GFRP rebar specimens were exposed to 270°C for 1 hour and then immersed in alkali solution for several months and tested in shear. No thermally conditioned specimens were immersed and tested for the comparisons. In results, the reduction of thermally damaged GFRP rebars was greater than that of no thermally damaged ones. Based on the accelerated experimental test data, a polynomial equation is presented for prediction of long-term residual inter-laminar shear strength of GFRP rebars previously damaged by high temperature.

Keywords : GFRP reinforcement, Thermal damage, Effect of alkalinity, Inter-laminar shear strength, Accelerated test

1. 서론

GFRP 보강근은 콘크리트 구조물에 보강된 철근의 부식물체를 해결할 수 있는 우수한 재료이다 (Park et al., 2003). GFRP 보강근의 장점으로 부식이 없다는 것 이외에 강도가 높고, 경량으로 콘크리트 구조물의 인장보강재로 그 가능성이 충분하다. 그러나, GFRP 보강근은 내화성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. Saafi (2002)의 실험결과에 따르면, 고온에서 철근은 350°C 이후로부터 인장강도 감소가 일어나는 반면, GFRP 보강근은 유리전이온도 이상의 온도에 노출될 때 인장강도가 감소한다. Bisby and Kodur (2007)은 50% 인장강도 손실을 야기하는 온도를 임계온도로 정의하였으며, 철근은 580°C, GFRP 보강근은 325°C에 불과하다고 주장하였다.

한편, 콘크리트 구조물의 내부 pH는 12.5 ~ 14.0으로 강알칼리성을 띄고 있다. 이와 같이 높은 pH에 GFRP 보강근이

노출되면 강도 및 강성 저하가 발생한다 (Ceroni et al., 2006). Moon and Oh (2011)의 논문에서도 GFRP 보강근이 알칼리에 노출되면 섬유와 레진간 접착력 약화를 일으키게 되어 큰 계면전단강도 저하가 발생한다고 주장하였다.

이상과 같이 GFRP 보강근은 고온과 콘크리트의 알칼리 환경에 취약한 재료이다. 그런데 GFRP가 보강된 콘크리트 구조물에 화재가 발생하면, GFRP 보강근은 상기 두가지의 가혹한 조건에 동시에 직면한다. 우선, 보강근에는 열손상이 발생하며, 손상 정도에 대한 평가결과에 따라서 보강근이 교체되거나 계속 사용된다. 이때 교체되는 GFRP 보강근은 콘크리트 내부에서 장기간 동안 지속적인 알칼리 환경에 노출되고 화재로 인한 지배적인 손상에 의하여 기능을 상실한 보강근이다. Moon and Oh (2011)는 이와 같은 GFRP 보강근의 평가를 위하여 먼저 장기적인 알칼리 폭로 이후 고온노출로 인해 발생하는 계면전단강도 변화에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 연구결과에 의하면, 알칼리 노출이 없는 보강근

1) 정회원, 경성대학교, 공학석사
2) 정회원, 경성대학교 조교수, 공학박사, 교신저자
3) 정회원, 경성대학교 교수, 공학박사

* Corresponding author : dymoon@ks.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 고온에 의한 강도저하 보다 알칼리 노출 후 고온에 의한 손상이 10% 이상 크다고 제시하였다.

본 연구에서는 상기 제시한 논문과 달리 노출순서를 바꾸어 먼저 고온으로 손상된 GFRP 보강근이 장기간 알칼리 용액에 노출되었을 때, 계면전단성능의 변화를 실험적으로 평가하고자 하였다. 이 실험의 결과는 화재노출 후에도 교체하지 않고 손상된 GFRP 보강근을 계속 사용할 경우에 계면전단성능의 변화를 평가할 수 있는 기초자료가 될 것이다. 특히, 본 연구에서는 계면전단강도 (Inter-laminar Shear Strength, 이하 ISS 강도) 변화를 고찰하였다. Abanilla et al. (2006)은 가혹한 환경에서 인장강도의 감소보다 ISS 강도 저하가 더욱 크기 때문에 FRP 보강근의 인장성능도 중요한 성능이지만, 손상평가를 위한 중요한 평가 인자로서 ISS 강도의 평가를 강조하였다.

2. 실험

2.1 개요

본 연구에서는 Table 1과 같이 GFRP 보강근 시험편을 4가지로 분류하였다. 첫 번째 시험편은 NDS (Non-Damaged Specimen)로서, 고온과 알칼리에도 노출시키지 않은 시험편이다. 두 번째는 ADS (Alkali Damaged Specimen)로서, 40°C의 pH 12.6 NaOH 용액에 30일, 45일, 60일, 80일과 180일 동안 노출시킨 시험편이다. 세 번째는 TDS (Thermal Damaged Specimen)로서, 고온 전기로에서 270°C에 1시간 노출시킨 시험편이다. 네 번째는 TADS (Thermal and Alkali Damaged Specimen)로서, 고온 챔버에서 270°C의 온도에 1시간 동안 먼저 노출시킨 후 ADS 시험편과 같이 알칼리 용액에 노출된 시험편이다.

GFRP 보강근을 Table 1에 제시한 바와 같이 일정기간 동안 알칼리 용액에 담근 후 ISS 강도 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 계면전단강도 측정시험법으로서 ASTM D4475에 제시되어있는 방법으로 ISS 강도를 측정하였다. 실험결과 분석은 최대강도, 하중-변위 곡선을 용액노출기간에 따라

Table 1 Conditioning of GFRP rebar specimens

ID	Thermal Conditioning	Alkali conditioning (40°C)
NDS	None	None
ADS	None	30day, 45day, 60day, 80day, 180day
TDS	270°C, 1hr	None
TADS	270°C, 1hr	30day, 45day, 60day, 80day, 180day

비교하였으며, 폭로조건에 따른 실제열화기간에 대한 고찰을 수행하였다. 그리고 시편의 개수는 변수 당 5개씩 실험을 수행하였다.

2.2 GFRP 보강근

실험에 사용된 GFRP 보강근은 Photo 1 및 Table 2에서 설명한 바와 같다. 직경 9.5mm로 국내에서 제작된 제품을 사용하였으며, 유리섬유와 비닐에스테르를 ROD 형태로 합성하고 표면은 가넷으로 함침하여 제조한 보강근이다. 섬유 주위의 가넷은 콘크리트와의 부착강도를 높이는 역할을 한다. 섬유와 레진의 부피비는 섬유가 65%이고 레진이 35%로 제작되었다.

2.3 고온 노출

GFRP 보강근의 고온손상 방법으로는 1000°C까지 노출시킬 수 있는 고온전기로를 이용하였다. 고온 노출온도 및 노출시간은 Moon (2013)이 제시하고 있는 상온 ISS강도의 50%가 되는 임계온도 (270°C) 및 임계시간 (1시간)을 적용하였다. 본 연구에서 기준이 되는 NDS 시험편과 TDS 시험편을 5개씩 먼저 실험을 실시하였고, 이에 대한 결과는 Table 3에



Photo 1 GFRP Rebar

Table 2 Materials for tested GFRP rebar

Fiber	Matrix	Nominal diameter (mm)	Volume Ratio (%)	
			Fiber	Resin
E-glass	Vinylester	9.5	65	35

Table 3 ISS results for NDS and TDS

ID	Mean (MPa)	Stdev (MPa)	Cov. (%)
NDS	67.95	1.5	2.3
TDS	51.80	9.2	13.5

나타내었다. NDS 시편의 계면전단강도는 평균이 67.95MPa로 측정되었고, 표준편차 및 변동계수는 각각 1.5MPa과 2.3%로 나타났다. 그리고 TDS 시편의 ISS 강도는 평균 51.80MPa이고 표준편차 및 변동계수는 9.2MPa와 13.5%로 측정되었다. 따라서 고온에 의한 ISS 강도 감소는 23.8%로 예측한 50%에 못 미치는 것으로 나타났다.

NDS와 TDS 시편의 손상 상태를 파악하기 위하여 보강근의 단면을 연마하여 고온 손상 전과 후의 단면을 현미경으로 확인하였고, 배율은 50배로 촬영하였다. 이에 대한 사진은 Photo 2에서 확인할 수 있다. 위는 손상 전을 아래 그림은 손상 후를 나타내고 있다.

GFRP 보강근 단면의 고온 손상 전과 후를 비교해 본 결과, NDS 시편에는 없었던 균열을 TDS 시편에서 확인 할 수 있었다. 고온에 의하여 발생한 균열로, 균열폭은 0.006mm이며, 길이는 0.13mm의 균열이 수개 발생한 것으로 확인되었다. 각 균열은 실험하중 방향에 대하여 다양한 각도와 형상을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이와 같은 다양한 열에 의한 균열로 인하여 강도의 편차가 발생할 수 있다고 판단된다.

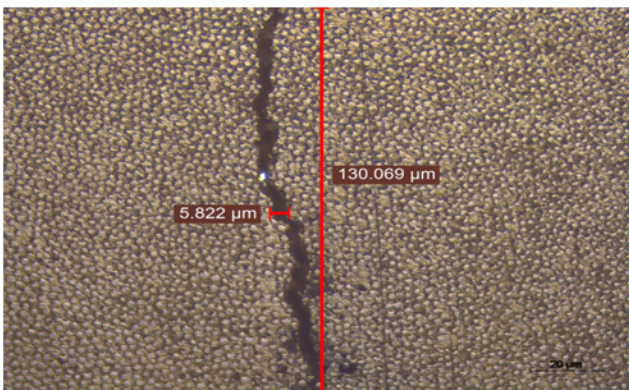
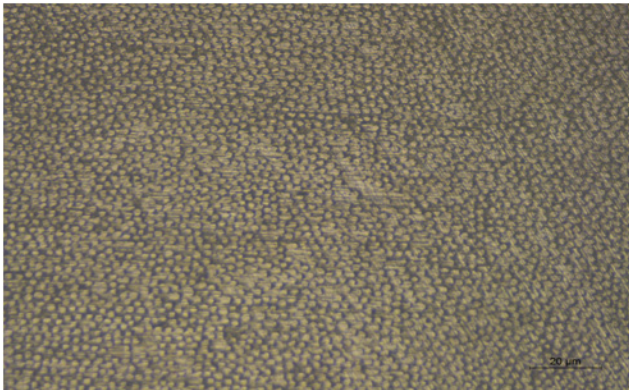


Photo 2 Images for damaged GFRP due to high temperature

2.4 알칼리 용액에 침지

고온에 노출된 시편을 알칼리 용액에 침지 전, 시편 절단면으로의 알칼리 용액 침투를 막기 위해 절단면 부분에 에폭시 레진을 얇게 도포하였다. 콘크리트 환경을 모사하기 위하여 1 mole의 NaOH 용액 (pH 12.6)을 제조하여 GFRP 보강근을 노출시켰다. Photo 3에서 볼 수 있듯이 100℃까지 용액을 가열할 수 있는 고온 Bath를 사용하였고, 열화의 가속을 위하여 40℃로 온도를 설정하였다. Bath에 침지한 시편은 왼쪽부터 상온 시편 다음에 열손상 시편 순으로 하여 용액에 노출시켰고, 해당 일수에 도달하면 시편을 꺼내어 실험을 실시하였다. 그리고 pH가 잘 유지되고 있는지를 확인하기 위하여, pH 체크 시험기를 이용하여 주기적으로 pH를 체크하였다.

2.5 ISS 실험

ISS 실험방법으로는 ASTM D4475에 규정된 방법을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 시 경간은 5d (=47.5mm)로 하였고, 총 시편 길이는 8d (=76mm)이다. 재하속도는 변위 제어로 1.3mm/min로 실시하였다. Photo 4는 실험 진행 모



Photo 3 Conditioning in alkaline solution



Photo 4 Interlaminar shear strength test

습을 나타내었고, 실험 후 GFRP 보강근의 파괴 모습을 나타내었다. 파괴 형태를 보았을 때, 섬유와 레진의 계면에 계면전단파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다.

ISS 강도 계산방법은 다음 식 (1)을 사용하였다.

$$S = 0.849 \times \frac{P}{d_b^2} \quad (1)$$

여기서, S 는 ISS 강도 (MPa), P 는 최대하중, d_b 는 실험편의 공칭직경을 의미한다.

3. 실험결과

3.1 열손상, 알칼리 손상 및 복합손상에 대한 비교

Fig. 1에서는 알칼리 용액 노출로 인한 강도저하, 고온으로 인한 강도저하 그리고 열손상 후 알칼리 용액 노출로 인한 강도저하 결과를 비교하여 나타내었다. 강도저하의 기준은 2.3장에 제시한 NDS 시편의 ISS 강도 67.95MPa로 하였다.

ADS (알칼리에만 노출) 시편의 강도 변화를 보았을 때 30일 ~ 80일까지 강도 감소는 5% 미만으로 강도감소가 크게 일어나지 않았다. 그러나 180일 노출 되었을 때에는 20.4%로 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 한편, TDS 시편은

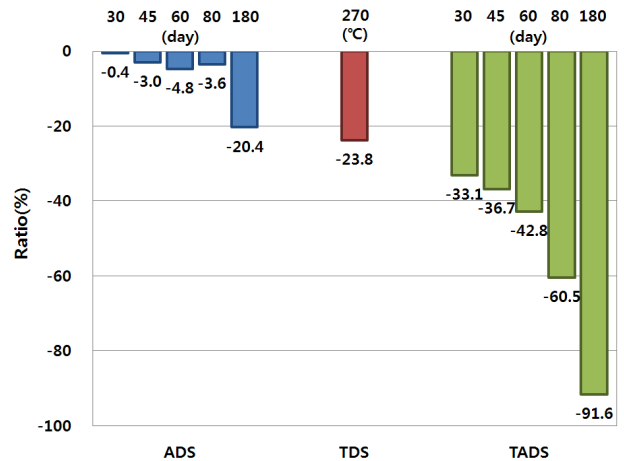


Fig. 1 ISS strength reduction by alkalinity, high temperature and both.

23.8%의 강도감소가 있었다. TADS 시편은 30일 ~ 180일까지 강도감소는 33.1%, 36.7%, 42.8%, 60.5% 및 91.6%로 나타났다.

상호 비교를 통하여 복합손상 조건과 알칼리 및 고온의 개별영향에 대하여 분석할 수 있다. 즉, 각 영향인자가 단순히 중첩된다면 알칼리 용액과 열로 인한 강도 감소의 합은 열손상 후 알칼리 용액에 노출되었을 때 강도 감소와 같아야 한다. 그러나 60일차의 결과를 확인해보면, 알칼리에 의한 감소 4.8%, 열에 의한 감소 23.8%의 합 (28.6%)과 TADS 60일 시편의 강도감소 42.8%는 상당한 차이가 있다. 따라서, 복합환경으로 인한 강도의 손상이 개별적인 영향에 의한 강도저하 보다 훨씬 크다는 것을 확인할 수 있다. 개별의 영향에 인한 손상에 추가하여 발생한 강도저하는 30일의 경우 8.9%, 45일은 9.9%, 60일 14.2%, 80일 33.1%, 180일에는 47.4%에 달하는 것으로 확인할 수 있으며, 노출일수가 증가할수록 강도감소가 가속화되는 것을 명확하게 확인할 수 있다.

3.2 상온과 열손상 시편의 알칼리 용액에 대한 영향

Fig. 2에서는 ADS 시편과 TADS 시편의 ISS 강도를 알칼리 노출시간에 대하여 비교하여 나타내고 있다. NDS 시편 및 TDS 시편의 강도를 기준으로 하였고, 이후 장기 알칼리 노출에 따른 실험결과를 나타내었다. 그리고 실험결과를 1차 선형그래프로 보간하여 상호 비교하였다. 이때, 실선은 ADS 시편의 결과를 의미하고, 점선은 TADS 시편의 결과를 의미한다.

그래프를 통해 ADS 시편의 기울기보다 TADS 시편의 기

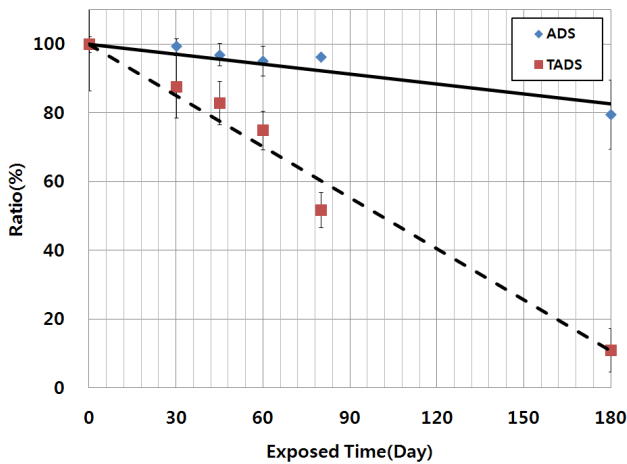


Fig. 2 ISS strength reduction by alkalinity

Table 4 ISS results for ADS and TADS

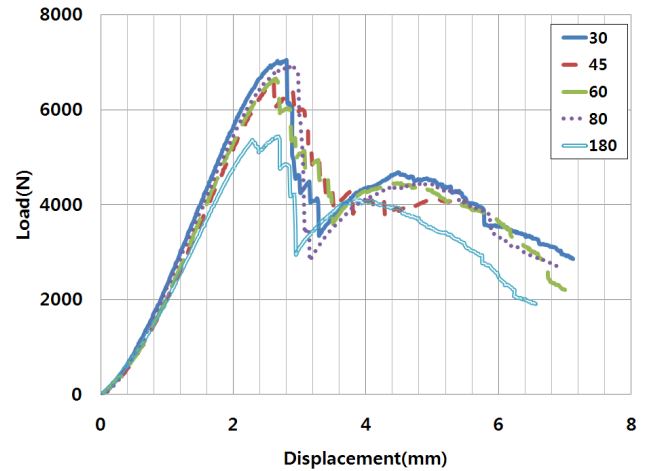
Exposed Time (Day)	ADS			TADS		
	Mean (MPa)	Stdev (MPa)	Cov. (%)	Mean (MPa)	Stdev (MPa)	Cov. (%)
30	67.65	1.37	2.02	45.44	4.32	9.03
45	65.93	2.10	3.18	42.98	4.30	6.35
60	64.67	2.82	4.36	38.87	3.82	5.63
80	65.52	0.25	0.39	26.83	3.45	5.08
180	54.12	5.44	10.06	5.72	4.29	6.31

울기가 더 커지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, GFRP 보강근이 알칼리 용액에만 노출되더라도 강도감소는 일어나지만 화재손상 후 알칼리 용액에 노출되면 강도감소는 가속화 되는 것을 확인할 수 있었다.

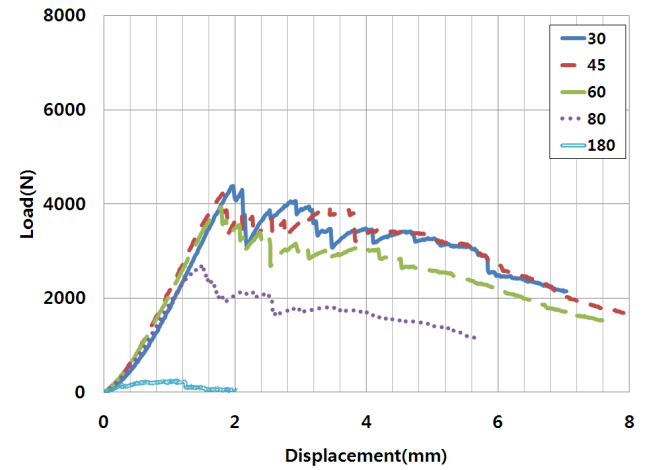
Table 4에서는 ADS 시편 및 TADS 시편의 실험결과를 정리하여 나타내었다. 전반적으로 TADS의 Cov가 ADS의 Cov 보다 큰 것을 확인할 수 있다. photo 2에 제시한 바와 같이 온도손상에 의한 국부적인 미세 균열의 형상과 각도에 따라 ISS강도에 큰 차이가 발생하기 때문에 TADS 실험치의 편차가 크다고 판단된다.

3.3 하중-변위곡선 및 강성

Fig. 3은 ADS 시편 및 TADS 시편의 하중-변위곡선을 나타내고 있다. ADS의 경우 알칼리 노출일수에 따라 최대하중에는 차이가 있지만 상승부의 강성은 동일하며, 최대하중 이후 계면파괴와 함께 하중이 급격하게 감소하였다가 계면파괴가 전단면으로 확장되면서 일시적으로 하중증가가 나타나는 전형적인 계면파괴의 경향을 나타내고 있다.



(a) ADS



(b) TADS

Fig. 3 Load-displacement curves

한편, TADS의 경우 ADS의 하중-변위곡선과 다른 양상을 나타내었다. 우선, 최대하중 이후 급격한 하중의 감소가 나타나지 않고 계면전단파괴가 전단면으로 확장되면서 일시적인 하중증가, 감소가 반복되는 것을 확인할 수 있다. 특히 80일과 180일간 노출된 시험체의 경우 하중상승부의 강성이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

또한, GFRP 보강근이 최대하중 도달 시에 해당하는 최대하중 변위를 확인 해본 결과, ADS 시편은 2.5mm인 반면, TADS 시편은 60일까지는 변위 2.0mm에서 80일과 180일에서는 이보다 훨씬 적은 변위에서 계면전단파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 장기간 알칼리에 노출될수록 최대하중이 발생하는 시점에서의 변위가 감소하는 것을 알 수 있다.

ADS 시편과 TADS 시편을 장기 알칼리 노출에 따른 강성 변화를 확인하였다. 계산방법으로는 각 시험체 최대하중

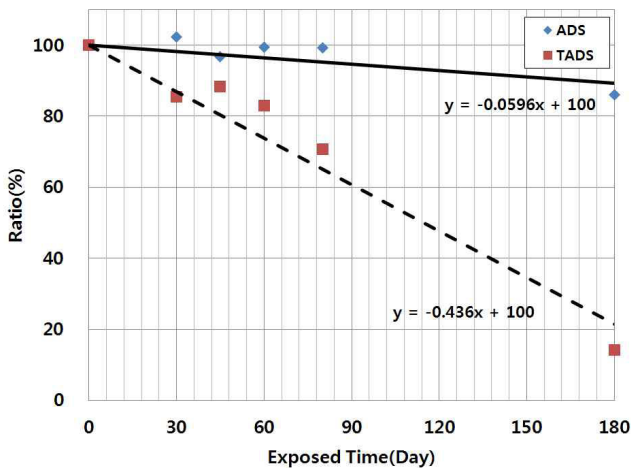


Fig. 4 Residual Inter-laminar shear stiffness

의 20% 지점과 80% 지점에 하중-변위 결과를 이용한 강성 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

강성의 변화는 ADS 시편에 대해서는 알칼리 용액에 80일 동안 노출될 때 까지는 강성저하가 크지 않은 것으로 나타났다. 이후 180일에 본격적인 강성저하가 발생하며 약 15%에 이르는 것으로 나타났다. 그리고 TADS 시편의 경우 노출일수의 증가에 따라 점차적인 강성의 감소 양상을 확인할 수 있다. 30일에서는 15%, 80일에는 거의 30%에 달하며, 180일에서는 85%의 강성저하가 발생한다.

강성감소의 양상은 강도감소와 같이 노출일수에 대하여 선형적인 감소를 나타냄을 확인할 수 있다. 제시된 선형보간식의 경사를 비교해보면, TADS의 강성감소율은 ADS의 7 배로 강도에 비하여 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.4 실제열화기간 고찰

Fig. 5는 ISS 잔존강도와 실제열화기간을 나타내고 있다. Fig. 5 횡축의 실제열화기간은 폭로시험의 노출온도와 노출기간을 Litherland (1981)가 제안한 식 (2)와 같은 모델식에 입력하여 얻은 추정된 실제열화기간을 의미한다. 한편 종축은 잔존 ISS 강도의 비로서, ADS와 TADS의 ISS 강도를 NDS의 ISS 강도로 나누어 비로 나타내었다. 각 ISS 강도비의 결과를 회귀분석결과, ADS에 비하여 TADS가 실제열화기간이 증가할수록 급격한 강도의 감소가 나타남을 확인할 수 있다. 부족한 데이터를 보충하기 위하여 실내시험에서의 시험편 노출일수 120일, 150일에 해당하는 실제열화일수를 계산하여 그래프에 추가하였다. 120일과 150일의 잔존 ISS 강도는 Fig. 2에 제시된 추세선 식으로부터 획득하였다.

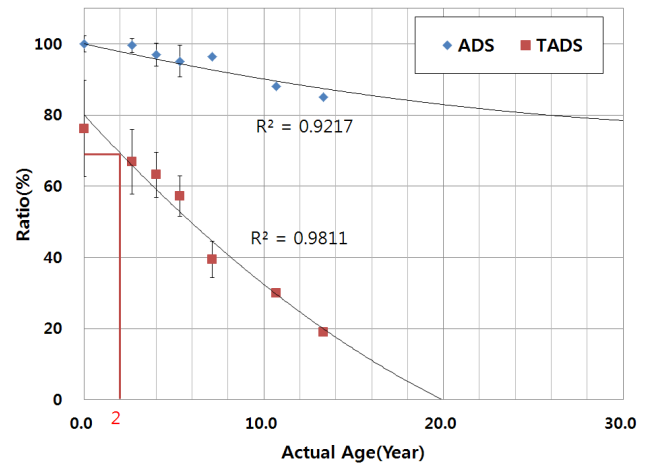


Fig. 5 Estimated actual age vs. residual ISS strength ratio

$$\frac{N}{C} = 0.098 \exp(0.0558 T) \quad (2)$$

여기서, N 은 실제열화일수 (day), C 는 실험에 적용된 폭로일수 (day), T 는 폭로온도 ($^{\circ}\text{F}$)이다.

분석결과를 토대로 ADS와 TADS의 실제열화기간과 장기 내알칼리 잔존 계면전단성능의 평가식은 식 (3), 식 (4)와 같이 2차식을 통하여 평가할 수 있다. 분석에서 실내시험의 노출일수 180일의 데이터는 Cov값이 커서 평가모델 분석에서 제외하였다.

$$R_{ISS} = 0.014 Y^2 - 1.12 Y + 100 \text{ (for ADS)} \quad (3)$$

$$R_{ISS} = 0.076 Y^2 + 5.52 Y + 80 \text{ (for TADS)} \quad (4)$$

여기서, Y 은 실제열화기간 (year)을 의미한다.

ACI 440.1R-06에서는 FRP 보강근의 설계강도를 산정할 때, 섬유 종류, 노출등급에 따라 다른 환경계수를 적용하고 있다. GFRP이며, 외기에 노출되는 구조물의 경우 환경계수는 0.7이다. 이는 보강근의 역학적 성능이 장기적인 다양한 열화인자에 의하여 감소할 것을 감안한 강도감소계수이며, 설계를 위한 임계치에 해당한다. 이를 기준으로 ADS와 TADS 계면전단강도에 대한 내구수명을 평가하였다.

우선, ADS 결과를 살펴보면, 60년이 경과하여도 잔존 계면전단강도가 70% 이상으로 영구적인 사용이 가능하다. 그러나, TADS는 고온손상으로 인해 ISS 강도가 23.8% 저하된 후 잔존 강도 70%까지 6.2%의 추가적인 손상이 발생하

는데 2년밖에 걸리지 않는 것으로 평가되었다.

감사의 글

4. 결 론

이 논문에서는 고온 손상이 없는 GFRP 보강근과 270°C에 1시간 동안 고온 노출된 고온손상이 있는 직경 9.5mm GFRP 보강근을 장기간 동안 강알칼리 용액에 노출시켜 계면전단강도의 변화를 관찰하였다. 본 연구를 통해 획득한 결론은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트와 유사한 강알칼리환경에서, 고온손상이 있는 GFRP 보강근의 계면전단강도 감소가 고온손상이 없는 GFRP 보강근의 강도 감소보다 큰 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 알칼리 노출기간이 증가할수록 강도 감소가 증가되는 것으로 나타났다.
- (2) 알칼리 노출기간에 따른 계면전단강도의 감소율을 상대 비교한 결과, 고온손상이 있는 GFRP 보강근은 고온 손상이 없는 GFRP 보강근에 비하여 강도의 감소율이 5배 증가하는 것으로 확인되었다.
- (3) 하중-변위곡선으로부터 강성을 비교한 결과, 고온손상이 있는 GFRP 보강근의 강성 감소율은 고온손상이 없는 GFRP 보강근의 강성 감소율의 7배에 달하는 것으로 나타났다.
- (4) 실험결과를 토대로 고온손상이 있는 GFRP 보강근의 알칼리 환경에서 실제열화기간에 따른 잔존계면전단강도의 평가를 위한 2차방정식을 제안하였다.
- (5) ACI 440.1R-06에서 제시하고 있는 환경계수 70% (외기노출 조건, GFRP 보강근)의 임계점에 도달하는 실제열화기간을 분석한 결과, 유리전이를 상당히 상회(270도)하는 고온에 노출된 GFRP 보강근의 알칼리 내구연한은 2년에 불과한 반면, 고온손상이 발생이 없는 경우 영구적인 사용이 가능한 것으로 판단된다. 이와 같은 실험결과를 통해 현재 ACI에서 제시하고 있는 환경계수에 대한 평가 보다 정량적인 평가기준과 근거자료를 제시할 수 있다고 판단된다.
- (6) 향후 고온손상정도, 직경, 섬유와 레진의 종류 등 다양한 인자에 대한 영향분석을 통해 보다 일반적인 예측식의 제안이 필요하다.

이 논문은 2011년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2011-0014193)

References

1. Abanilla, M. A., Karbhari, V. M., and Li, Y. (2006), Interlaminar and intralaminar durability characterization of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening, *Composites: Part B*, 37, 650-661.
2. Bisby, L. A., and Kodur, V. K. R. (2007), Evaluating the fire endurance of concrete slabs reinforced with FRP bars: considerations for a holistic approach, *Composites : Part B*, 38, 547-558.
3. Ceroni, F., Cosenza, E., Gaetano, M., and Pecce, M. (2006), Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, *Cement & Concrete Composites*, 28, 857-868.
4. Chen, Y., Davalos, J. F., Ray, I., and Kim, H. Y. (2007), Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures, *Composite Structures*, 78, 101-111.
5. Kim, H. Y., Park, Y. H., You, Y. J., and Moon, C. K. (2008), Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions, *Composite Structure*, 83, 37-47.
6. Litherland, K. L., Oakley, D. R., and Proctor, B. A. (1981), The Use of accelerated ageing Procedures to Predict the Long Term Strength of GRC Composites, *Cement and Concrete Research*, 11, 455-466.
7. Moon, D. Y. (2013), Critical Temperature for Inter-Laminar Shear Strength and Effect of Exposure Time of FRP Rebars, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(1), 45-51.
8. Moon, D. Y., and Oh, H. S. (2011), Durability of GFRP Rebar with Ribs containing Milled Alkaline Resistant Glass Fibers, *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(1), 281-287.
9. Moon, D. Y., and Oh, H. S. (2011), The Combined Effect of Concrete Environment and High Temperature on Interlaminar Shear Strength of FRP Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(6), 749-756.
10. Park, C. G., Won, J. P., and Yoo, J. K. (2003), Long-Term Effect of Chemical Environments on FRP Reinforcing Bar for concrete Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(6), 811-819.
11. Saafi, M. (2002), Effect of fire on FRP reinforced concrete members, *Composite Structures*, 58, 11-20.

Received : 12/09/2013
Revised : 02/13/2014
Accepted : 03/06/2014

요 지

GFRP 보강근의 역학적 성능은 고온과 콘크리트의 알칼리 환경에서 크게 감소된다. 본 연구에서는 GFRP 보강근이 열손상 뒤, 알칼리 환경에 추가로 노출되었을 때의 계면전단강도변화를 고찰하는데 집중하였다. 이를 위하여 GFRP 보강근 시편은 270도의 열에 1시간동안 노출된 후 알칼리 용액에 장기간 노출되었으며, 전단시험에 의하여 파괴되었다. 비교를 위하여 열손상이 없는 시편도 같은 기간 동안 알칼리 용액에 노출된 후 전단에 의하여 파괴되었다. 결과에서, 열손상을 받은 GFRP보강근의 계면전단강도의 감소가 열손상이 없는 보강근 보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 본 실험을 근거로 하여, 열손상을 미리 받은 GFRP 보강근이 알칼리에 노출되었을 때, 장기 잔존계면전단강도의 예측을 위한 2차식을 제시하였다.

핵심 용어 : GFRP 보강근, 열손상, 알칼리 영향, 계면전단강도, 폭로실험
