

CFRP로 보강된 콘크리트 보의 온도 변화에 따른 영향 분석

조홍동[†] · 한상훈 · 이승수* · 신진환**

충북대학교 토목공학과 · *충북대학교 구조시스템공학과 · **충주대학교 토목공학과
(2003. 2. 21. 접수 / 2003. 6. 4. 채택)

Analysis of Effects on Concrete Beam Strengthened with CFRP Plate according to Temperature Change

Hong-Dong Cho[†] · Sang-Hoon Han · Sung-Su Lee* · Jin-Hwan Shin**

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

*Department of Structural System of Computer-Aided Engineering, Chungbuk National University

**Department of Civil Engineering, Chungju National University

(Received February 21, 2003 / Accepted June 4, 2003)

Abstract : In this study, the behavior characteristics of specimen strengthened with CFRP plate were analyzed according to the change of temperature. CFRP plate itself has a good resistance at the high temperature, but epoxy used as a adhesive is lost its bonding strength at the relatively low temperature. Therefore, this study carries out experiment on the beams slot-bonded with CFRP plates in order to maintain the successful bonding strength of epoxy at high temperature. It is presented that the range of glass transition temperature is 60~80°C and RC beams slot-bonded with CFRP plate shows more increasing resistance and failure load than that of interface bonded at the high temperature.

Key Words : CFRP plate, temperature, bonding strength

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 보수·보강에 대해 관심이 증대되면서, 이와 관련한 다양한 보강재료와 공법들이 실무에서 적용되고 있다. 특히 탄소섬유판(carbon fiber reinforced polymer plate, 이하 CFRP)은 기존에 사용되던 강판에 비해 역학적 특성이 우수하고 내부식성의 장점을 갖고 있어 사용이 증가하고 있다¹⁾.

최근까지 CFRP의 보강에 관한 연구는 주로 보강 방법 또는 CFRP의 기하학적 배치에 따른 내력 증진 효과에 관한 것이 대부분이고 보강 후의 온도 변화에 따른 거동 특성에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 일반적으로 CFRP의 부착공법은 접착제인 에폭시를 이용하여 CFRP를 구조물의 인장부에 표면 부착하는 것으로서, 접착제에 의하여 콘크리트에서 CFRP로 내력이 전달되는 메카니즘으로 되어 있다. 그러나, 온도가 높아지게 되면 CFRP 자체는 내열성

과 화염에 대한 저항성이 매우 높지만(약 1700 °C), 접착제로 사용되는 에폭시는 대부분이 비교적 낮은 온도에서 부착력을 상실하게 된다^{2,3)}. 따라서, CFRP로 보강된 구조물에 어느 이상의 온도가 가해지게 되면 부착 강도가 크게 저하되어 CFRP에서 콘크리트로 내력을 전달할 수 없게 되며, 이로 인해 CFRP를 이용한 보강은 효율성을 상실하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 CFRP로 보강된 콘크리트 구조물의 온도변화에 따른 영향을 분석하기 위해 CFRP로 보강된 무근콘크리트 보를 대상으로 온도 변화와 보강방법에 따른 거동 및 성능변화에 대해서 연구하였다. 또한 실험을 통해 온도 변화에 따른 실험체의 파괴하중과 파괴모드 변화 그리고 에폭시의 부착강도 손실 특성에 대해서 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

본 연구에서는 CFRP로 보강된 무근 콘크리트보의 온도 변화에 따른 거동특성⁴⁾을 연구하기 위해

[†]To whom correspondence should be addressed.
dcoc@orgio.net

Table 1과 같이 실험체를 제작하고 상온에서 120℃까지의 가열온도를 실험변수로 고려하였다. 또한 보강방법으로 표면부착공법과 함께 온도 변화에 따른 기존 표면부착방법의 보강 성능의 저하를 줄이기 위해 콘크리트 모체에 홈을 판 후 CFRP를 삽입하여 보강하는 홈삽입방법도 고려하였다.

Table 1. Experimental variables

No	Specimen	Heating temperature (°C)	Strengthening method	Heating time(hour)
1	CB	Normal temp.	-	-
2	T-A	Normal temp.	Type A	-
3	T40-A	40	Type A	1
4	T60-A	60	Type A	1
5	T80-A	80	Type A	1
6	T100-A	100	Type A	1
7	T120-A	120	Type A	1
8	T-B	Normal temp.	Type B	-
9	T40-B	40	Type B	1
10	T60-B	60	Type B	1
11	T80-B	80	Type B	1
12	T100-B	100	Type B	1
13	T120-B	120	Type B	1

CB : Control beam

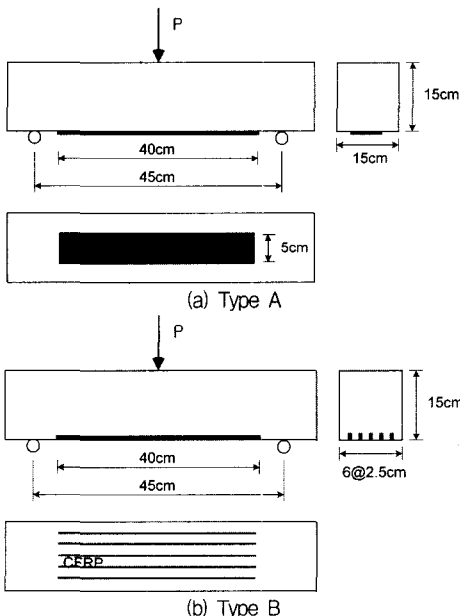
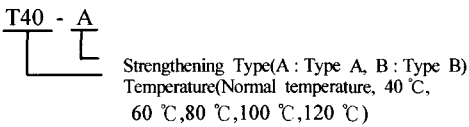


Fig. 1. Geometric configuration of specimen

본 연구에서 사용된 실험체는 보강방법에 따라 동일한 단면 상세를 가진다. 실험체 제작을 위해 Fig. 1과 같이 압축강도가 314 kgf/cm²인 15×15×55cm의 무근 콘크리트 실험체를 제작한 후 Type A에서는 40cm길이의 CFRP(5×0.14cm)를 부착하였고, Type B에서는 보강량이 동일하게 폭 1cm의 CFRP 5개를 실험체의 하부에 홈을 판 후 부착하였다. 보강을 위해 S사의 CFRP와 에폭시를 사용하였으며, 각각의 재료 특성치는 Table 2와 같다.

Table 2. Material properties(unit : kgf/cm²)

S&P laminate 150/2000	Tensile strength	27,000~31,000
	Elastic modulus	1,684,000
Epoxy resin 220	Tensile strength	269
	Compressive strength	839
	Bonding strength	47

실험체에 CFRP를 부착한 후 온도 chamber에서 40~120℃까지 20℃ 간격으로 1시간씩 일정 온도를 지속시킨 후 3점 휨실험을 수행하였다. 온도에 따른 거동 특성을 분석하기 위해 LVDT를 보의 중앙부에 설치하여 하중단계별 변위를 측정하였으며, 균열진전 상황과 최종 파괴형태 등을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Table 3은 보강방법과 온도변화에 따른 실험체의 휨실험 결과를 나타낸 것이다. 표면 부착한 경우와 홈삽입 보강한 경우 대부분의 실험체가 기준실험체(CB)에 비해 파괴하중이 증가하였으며, 온도가 증가함에 따라 부착성능이 저하되어 전반적으로 파괴하중은 감소하는 경향을 보이고 있다. 상온에서 보강된 실험체의 초기균열하중의 경우 기준 실험체에 비해 큰 값을 보이고 있어 초기균열발생 지연효과를 확인할 수 있었다. 그러나, 온도가 크게 증가하면서 초기균열하중은 기준 실험체의 경우와 비슷한 값을 보였으며, 온도가 높은 경우 홈삽입 보강된 Type B인 경우가 표면 부착한 Type A의 경우에 비해서 초기균열하중이 큰 값을 보였다. 실험을 통해 나타난 각 실험체의 파괴 형태는 휨파괴(flexural failure), 전단파괴(shear failure), 그리고 CFRP의 계면박리나 미끄러짐을 동반한 휨파괴 양상을 보였다. 즉, 보강방법과 온도변화에 따라 실험체의 파괴모드가 변화함을 확인할 수 있었다.

Table 3. Experimental results

Specimen	Load at initial crack, (P_i , tonf)	Failure load		P_u/P_i	Maximum deflection(mm)	Failure mode
		P_u (tonf)	Ratio of increase(%)			
CB	2.45	2.45	-	-	0.45	flexural failure
T-A	3.25	4.15	100	1.28	0.82	flexural+interface debonding
T40-A	2.87	3.20	77.11	1.11	1.17	flexural+interface debonding
T60-A	2.44	2.75	66.27	1.13	0.89	flexural+interface debonding
T80-A	2.00	2.10	50.60	1.05	0.76	flexural+interface debonding
T100-A	1.96	1.96	47.23	1	0.30	flexural+interface debonding
T120-A	2.20	2.20	53.01	1	0.19	flexural+interface debonding
T-B	3.44	6.65	100	1.93	-	shear failure
T40-B	2.75	5.55	83.46	2.02	1.84	shear failure
T60-B	3.28	5.09	76.54	1.55	1.98	shear failure
T80-B	2.50	5.94	89.32	2.38	2.87	flexural failure+CFRP slip
T100-B	2.43	5.40	81.20	2.22	1.71	flexural failure+CFRP slip
T120-B	2.68	4.04	60.75	1.51	0.96	flexural failure+CFRP slip

3.1. 파괴하중

Table 3에서와 같이 상온에서 측정된 파괴하중에 비해 온도가 증가함에 따라 파괴하중은 대체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 상온에서의 파괴하중과 비교하여 40℃~120℃ 사이에서 Type A의 경우는 파괴하중이 50.6%~77.1%의 범위를 보였으며, Type B에서는 파괴하중이 60.8%~89.3%의 범위를 보이고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 표면 부착한 경우와 흡입입 보강한 경우 온도변화에 따른 실험체의 파괴하중 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 60℃~80℃ 범위 이상의 온도에서 보강된 실험체의 파괴하중은 무보강 실험체의 파괴하중과 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 제시된 온도 범위 이상에서는 에폭시가 열에 의해 부착성능이 감소되어 보강효과를 기대할 수 없다는 것을 의미한다.

Fig. 3은 흡입입 보강한 경우 온도변화에 따른 실험체의 파괴하중 변화를 나타낸 것이다. 흡입입한 경우에는 표면부착 경우에는 달리 온도가 증가함에 따라 파괴하중이 일정하게 감소하는 경향을 확인할 수 없었으며, 콘크리트와 CFRP와의 부착면적 증대로 인해 온도가 증가하여도 파괴하중은 무보강 실험체 보다 크게 나타났다. Fig. 3에서 Type B는 80℃ 이후 파괴하중이 변화가 발생하였으며, 이는 파괴모드의 변화에 기인한다. 즉, 보가 휨에 대해서만 보강된 경우 전단저항능력은 크게 변화되지 않아 CFRP 단부에서 전단파괴가 발생되었지만, 온도가 높아짐에 따라 에폭시의 부착성능이 저하에 따른

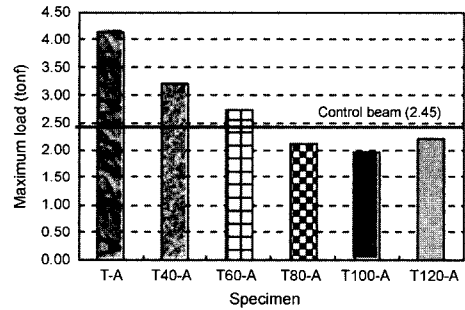


Fig. 2. Failure load (Type A)

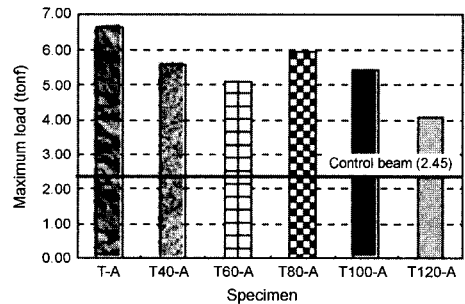


Fig. 3. Failure load (Type B)

휨파괴 발생으로 파괴모드 전이에 따른 파괴하중의 변화가 발생되었다.

Table 3에서 보강 방법별로 초기균열 하중에 대한 파괴하중의 하중 증가율(P_u/P_i)을 살펴보면 표면 부착 보강한 Type A의 경우는 증가율이 1~1.28의 범위를 보인 반면, 흡입입 보강한 Type B의 경우는 증가율이 1.51~2.38의 범위를 나타내었다. 이를 통

해 표면 부착한 경우는 초기균열 발생 이후 파괴시 까지 더 이상의 큰 하중에 저항하지 못하고 파괴되는 반면에, 흡삽입 보강된 경우에는 표면부착에 비해 상대적으로 초기균열 발생이후에도 어느 정도의 하중을 저항한다고 볼 수 있다. 이는 Type B에서는 콘크리트의 인장면에 홈을 내어 CFRP를 삽입하였기 때문에 온도에 의한 영향을 받았을지라도 표면 부착한 Type A에 비해서는 에폭시의 부착강도 저하의 영향이 적기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4는 이러한 온도 변화에 따른 초기균열 하중에 대한 파괴하중의 하중증가율을 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 표면부착한 Group T-A는 온도가 증가함에 따라 하중증가율이 1에 근접하는 것을 알 수 있다. 이는 무보강 실험체의 경우와 같이 초기균열 발생과 함께 최종파괴가 일어나는 것을 의미하며, CFRP 보강에 따른 영향이 거의 없는 것을 의미한다. 그러나, 홈 삽입한 Group T-B의 경우는 Group T-A에 비해서는 하중증가율이 큰 값을 보이며, 특히 60 °C ~ 80 °C 범위에서 파괴모드가 변화하면서 하중증가율이 다시 증가하였으며 이후 구간에서 온도가 증가함에 따라 하중증가율은 감소하였다.

3.2. 하중-처짐

Fig. 5는 표면부착 보강한 Type A의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 무보강된 기준실험체와 온도를 가하지 않은 T-A 실험체만을 비교해보면, T-A는 에폭시가 온도의 영향을 받지 않은 상태이기 때문에 에폭시가 부착성능을 충분히 발휘하여 동일 하중하에서도 처짐이 작게 나타났다. 또한 60 °C의 온도가 가해진 경우 보강된 실험체의 하중-처짐 곡선은 무보강 실험체의 실험결과와 거의 일치하고 있으며,

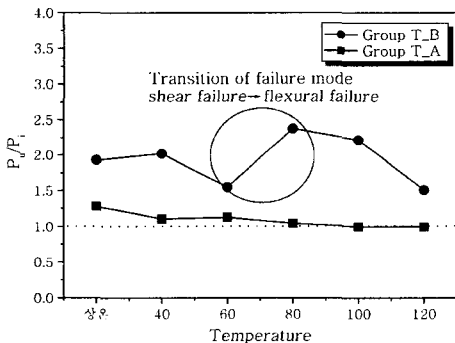


Fig. 4. Increasing ratio of failure load for initial crack load according to temperature

콘크리트의 초기균열 발생과 함께 온도를 가하지 않은 실험체에 비해 처짐이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 특성들은 표면 부착 보강된 실험체가 온도의 영향을 받아 모체와 CFRP 사이에 있는 에폭시의 부착성능이 온도가 증가함에 따라 감소하여 CFRP의 보강 효과가 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 흡삽입 보강한 Type B의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 무보강인 기준실험체와 온도를 가열한 각각의 보강된 실험체를 비교해보면 기준실험체에 비해 전체적으로 처짐이 증가함을 확인할 수 있었다.

또한 60 °C 이후의 온도에서 콘크리트 초기균열 발생을 기준으로 이전 구간에서는 처짐이 무보강 실험체에 비해 크게 나타났지만 이후 구간에서는 온도변화에 상관없이 보강된 실험체의 하중-처짐 곡선이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 콘크리트의 초기균열 발생 이후 CFRP의 보강효과를 하중-처짐 곡선을 통해 뚜렷히 확인할 수 있으며, 이는 본 실험에서 적용된 온도 범위 내에서는 흡삽입 보강된 실험체의 처짐 거동과 관련하여 온도의 영향이 크지 않음을 의미한다.

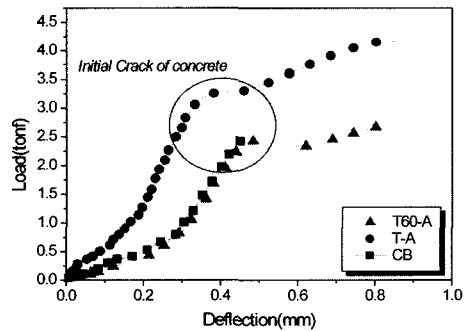


Fig. 5. Load-deflection curve (Type A)

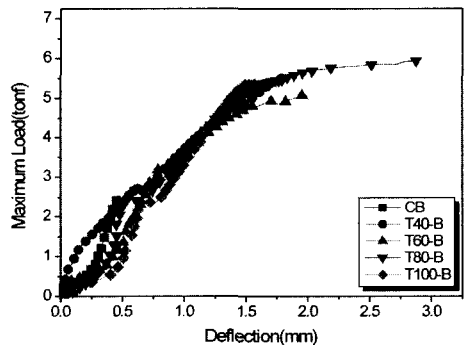


Fig. 6. Load-deflection curve (Type B)

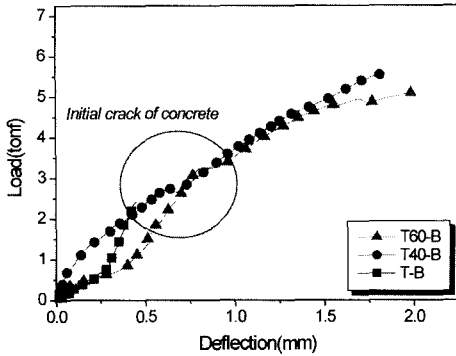


Fig. 7. Load-deflection curve (Type B)

Fig. 7은 Fig. 6에서 무보강 기준실험체와 40 °C, 60 °C의 온도를 가한 보강 실험체의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 60 °C에서 보강된 실험체는 무보강 실험체 보다 큰 처짐을 보이고 있지만, 초기균열 발생과 함께 40 °C에서의 처짐과 비슷한 양상을 보이고 있다.

3.3. 하중-휨강성

실험을 통해 얻어진 보의 경간 중앙에서의 하중 단계별 처짐을 통해 기준실험체와 보강된 실험체의 휨강성 변화를 확인해 보았다. Fig. 1과 같은 조건하에서 하중-처짐 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 실험체의 휨강성 변화를 확인할 수 있었다. 단, 휨강성은 실험체의 전길이에 걸쳐 일정하다고 가정하였다.

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (1)$$

- 여기서, EI : 휨강성
- l : 무근콘크리트 보의 순경간 길이
- P : 재하 하중
- δ : 보 중앙부에서의 처짐

일반적으로 철근콘크리트 부재의 하중 증가에 따른 휨강성 변화는 초기균열 발생 이전까지는 일정한 휨강성을 보이지만 균열발생과 함께 휨강성은 급격히 저하하게 된다. Fig. 8과 Fig. 9는 Type A와 Type B의 하중-변위 관계를 통해 계산된 최대 휨강성과 파괴시점에서의 휨강성을 나타낸 것이다.

Fig. 8과 같이 Type A의 최대 휨강성은 상온의 경우와 비교하여 온도가 증가함에 따라 감소하는 경

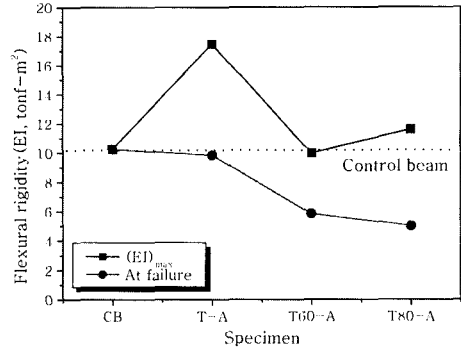


Fig. 8. Flexural rigidity according to temperature (Type A)

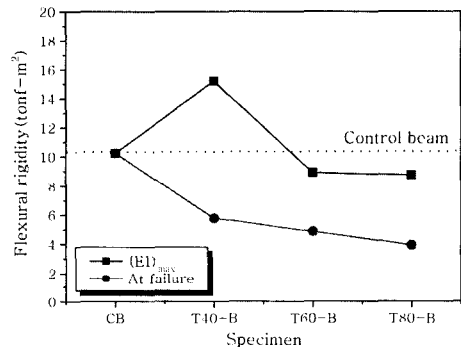


Fig. 9. Flexural rigidity according to temperature (Type B)

향을 보이고 있으며, 60 °C 이후에는 무보강 기준실험체의 휨강성과 거의 유사한 값을 보이고 있다. Fig. 9는 Type B의 휨강성을 나타낸 것으로 표면 부착한 경우와 마찬가지로 60 °C 이후 휨강성이 무보강 기준실험체와 비슷한 값을 보이고 있다. 따라서, 표면 부착한 경우와 흡입 보강한 경우 휨강성의 변화를 기초로 할 때 60 °C 정도를 기준으로 휨강성이 무보강 기준실험체와 같은 값을 보임을 알 수 있다.

3.4. 파괴특성 및 고찰

본 실험에서 CFRP로 보강된 실험체에서는 휨 파괴, 전단파괴, 그리고 휨파괴와 CFRP의 박리 또는 마끄러짐이 함께 발생되는 파괴 형태가 관찰되었다.

Fig. 10은 표면 부착 보강한 Type A의 파괴 과정을 나타낸 것으로서, 표면 부착한 실험체의 경우 모든 실험체에서 경간 중앙부에 초기 균열이 발생한 후 재하 하중이 증가함에 따라 균열이 하중 재하점으로 급격히 성장하여 급작스런 취성파괴가 발생되었다. 이는 초기 균열이 발생된 이후 예폭시가 콘크리트로부터 전달되는 하중을 CFRP로 전달시켜

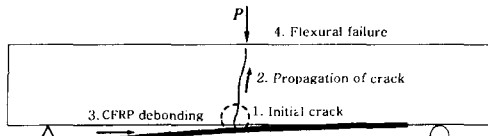


Fig. 10. Flexural and interface debonding failure

CFRP가 하중을 부담해야 하지만 온도의 영향으로 에폭시가 부착성능을 조금씩 상실하고 휨균열이 하중 재하위치로 진전되면서 종국에는 CFRP의 박리와 함께 콘크리트의 휨파괴가 발생되었다.

Type B 실험체는 Type A와 동일한 보강량을 가지고 있지만, CFRP와 콘크리트 모체사이의 부착 면적 증대로 인해 파괴 양상이 전단파괴와 휨파괴 양상을 나타내었다. Fig. 11은 흡습입 보강한 Type B의 실험체 중 상대적으로 온도가 낮은 경우에서 발생된 전단파괴의 진행과정을 나타낸 것이다. 콘크리트에 초기균열이 발생하고 하중이 증가함에 따라 균열은 상부로 진전하게 된다. 그러나, 표면부착공법에 비해 부착성능이 우수하여 휨에 대한 저항능력이 유지되면서 전단에 대해서 상대적으로 취약한 특성을 갖게된다. 따라서, CFRP 단부에서 사인장 균열이 발생하면서 급작스럽게 전단파괴가 발생하였다.

이러한 전단파괴양상이 나타난 이유는 흡습입에 따른 부착면적 증대와 함께 에폭시가 유리전이온도에 도달하지 않은 상태이므로 휨에 대한 보강효과가 유지되면서 전단파괴로 파괴모드가 전이되었기 때문이다.

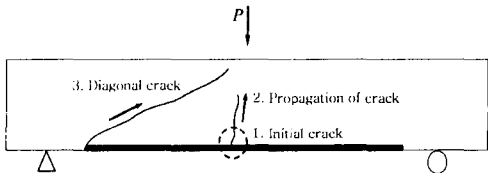


Fig. 11. Shear failure

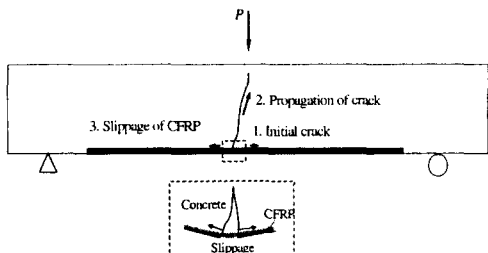


Fig. 12. Flexural failure (CFRP slip)

Fig. 12는 흡습입 보강한 Type B의 실험체 중 상대적으로 온도가 높은 경우에서의 파괴 과정을 나타낸 것으로 CFRP의 미끄러짐과 함께 휨파괴가 발생되었다.

다른 보강된 실험체와 마찬가지로 콘크리트에 초기균열이 발생하고 하중이 증가함에 따라 균열은 상부로 진전하게 된다. 유리전이온도 이상의 온도가 가해졌기 때문에 에폭시의 부착효과가 저하되어 휨에 대해 충분한 저항능력이 유지되지 못하게 된다. 이로 인해, 균열이 상부로 진행되면서 부착면에서 CFRP의 미끄러짐이 발생하게 되어 종국에는 휨 파괴양상을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 CFRP로 보강된 실험체의 온도변화에 따른 거동 특성을 분석하였으며, 상대적으로 높은 온도에서도 에폭시의 부착강도를 보다 우수하게 유지할 수 있도록 하기 위하여 콘크리트에 흡수된 후 CFRP를 보강하는 방법을 적용하여 실험을 수행하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CFRP를 표면 부착한 경우 일반적으로 알려진 에폭시의 유리전이온도와 비슷한 60 ℃~80 ℃ 범위 이후부터 에폭시의 부착강도가 손실되었다.
- 2) 흡습입에 의해 보강된 실험체는 표면부착 보강한 실험체에 비해 파괴 하중이 증가하였으며, 온도가 증가하여도 파괴하중의 큰 감소는 나타나지 않았다.
- 3) 표면부착공법의 파괴모드는 CFRP의 계면박리를 동반한 휨파괴 형태를 보이는 반면, 흡습입에 의해 보강된 실험체는 온도가 증가함에 따라 에폭시의 물성 변화로 인해 파괴모드가 전단파괴에서 CFRP의 미끄러짐에 의한 휨파괴로 변화하였다.
- 4) 따라서, 흡습입 보강한 경우가 표면 부착한 경우보다 부분 합성거동이 상대적으로 우수하며 에폭시에 미치는 온도의 영향이 감소됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 한상훈, 허열, 조홍동, 홍기남, 박명준, “탄소섬유 보강관을 이용한 철근콘크리트 보의 휨성능

- 개선에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제12권, 1호, pp. 727~732, 2000.
- 2) Hollaway, L. C., and Leeming, M. B., “Strengthening of Reinforced Concrete Structures : using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering,” CRC Press, New York, pp. 63~67, 1999.
 - 3) Balaguru, P. N., 정란, “보수·보강에 사용하는 무기계 폴리머 복합재료의 내열성능,” 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, Vol. 9, No. 2, pp. 647~652, 1997.
 - 4) Saafi, M., “Effect of Fire on FRP Reinforced Concrete Members,” Composite Structures, Vol. 58, pp. 11~20, 2002.
 - 5) 이한승, “섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 구조부재의 방·내화성능,” 한국콘크리트학회지, Vol. 14, No. 2, pp. 45~50, 2002.
 - 6) E. Ferrier, G. Lagarde & P. Hamelin, “Concrete Beams Reinforced by Fibre-Reinforced Plastics: The Effect of Temperature on the Adhesive Layer,” Composites Science and Technology, Vol. 61, pp. 425~431, 2001.