

탄소섬유шит 보강 콘크리트용 무기계 폴리머 접착제의 내화 및 구조성능

Structural Performance and Fire Resistance Capacity of Inorganic
Polymer Composites for Carbon Sheets Exposed to High Temperature



정 란*
Chung, Lan



박현수**
Park, Hyun Soo

ABSTRACT

Repair and rehabilitation of existing structures is becoming a major part of construction, both in the industrially developed and developing countries. Advanced high strength composites are being utilized more and more for these applications because they are much stronger than steel, non-corrosive, and light. The light weight reduces the construction cost and time substantially.

The fibers are normally made of aramid, carbon, or glass and the binders are typically epoxies or esters. One major disadvantage of these composites is the vulnerability to fire. In most instances, the temperature cannot exceed 300°C. Since carbon and glass can sustain high temperatures, an inorganic polymer is being evaluated for use as a matrix. The matrix can sustain more than 1000°C. The results reported in this paper deal with the mechanical properties of carbon composites made with the inorganic polymer and the structural behavior of strengthened reinforced concrete beams.

The results indicate that the new matrix can be successfully utilized for a number of structural applications.

Keywords : inorganic polymer composites, repair and rehabilitation, fire resistance, flexural strength, reinforced concrete

* 정회원, 단국대학교 건축공학과 교수, 연구담당이사

** 정회원, 신홍대학 건축설계과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 1999년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 과소 설계되었거나 과다한 하중이 작용하는 등의 이유로 보수·보강을 하여야 할 경우가 많다. 탄소섬유 보강공법은 이와 같이 내력이 부족한 부재를 보강하는데 유용하게 적용되고 있으나 탄소섬유를 사용할 때의 문제점 중의 하나가 화재에 취약하다는 점이다. 탄소섬유 자체의 내열성과 화염에 대한 저항성은 매우 높으나(약 1700℃) 접착제의 일종인 에폭시는 거의 대부분의 경우 대략 300℃의 온도에도 지탱할 수 없다.¹⁾

따라서 화재의 위험이 있는 곳에 탄소섬유를 이용하여 보수·보강을 실시하면 화재시, 콘크리트와 철근의 내력 저하와 함께 탄소섬유의 보강 효과도 동반 하락하여 구조물이 파괴에 이를 수 있는 위험이 있다.

이 연구에서는 무기계 폴리머 복합재료로 접착된 탄소섬유를 고온(약 800~1000℃, 1시간)으로 가열한 후 가열된 섬유판의 인장, 휨, 전단내력을 검토하여 내열성을 파악하고 이 섬유쉬트로 보강한 철근콘크리트 부재의 휨 성능을 실험적으로 규명하여 화재의 위험이 있는 구조물에 구조적인 보강재료로 사용이 가능한가를 검토하고자 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 실험

이 연구의 목적을 위하여 보강재료인 탄소섬유와 무기계 폴리머 접착제의 재료적 특성을 규명하기 위한 재료실험과 이를 철근콘크리트 보에 부착시켜 구조 성능 효과를 규명하기 위한 구조 실험을 각각 수행하였다.

2.1 재료실험

탄소섬유와 무기계 폴리머 접착제의 재료적 특성 규명을 위한 재료실험에서는 먼저 접착제의 점성을 구하여 실제로 현장 작업에 가능한 시간을 측정하였고 이어 섬유를 결합한 탄소섬유판의 인장, 휨 및 전단내력을 측정하였다.

2.1.1 무기계 폴리머 접착제

이 연구에서 사용된 무기계 폴리머는 미국의 Rutgers 대학에서 France의 Geopolimer Institute와 공동으로 개발한 규산화알루미늄칼륨(potassium aluminosilicate)으로서 화학 성분은 $\text{Kn}-(\text{SiO}_2)\text{Z}-\text{AlO}_2)_n \cdot \text{wH}_2\text{O}$ 이다.

이 규산화 알루미늄칼륨은 적당한 양의 (실리카+산화칼륨)에 실리카 분말을 1:1.35 비율로 섞어 제조한다. 이것은 액체와 고체 상태로 되어 있어 혼합하여 상온(약 20℃)에 방치하면 Fig. 1과 같은 점성을 가진다.

혼합 당시의 점성은 약 2 kPa-s 정도이고 작업이 가능한 시간은 상온에서 4~5시간 정도이다.²⁾

2.1.2 시험체

인장, 휨, 전단에 대한 거동을 규명하기 위해 각 실험목적에 맞추어 시험체를 제작하였다.

실험변수로는 응력의 종류와 온도 등으로 인장 시험체를 제외한 휨과 전단시험체는 실험전 변수별 온도(200℃~1000℃)에 따라 약 1시간 정도 노출시켰다.

2.1.3 인장실험

인장시험체는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 두께 2mm, 폭 12.7mm, 길이 203mm로 제작하였다. 양단부는 미끄러짐을 방지하기 위하여 두겹게 보강하고 표면을 거칠게 처리하였다.

시험체 중앙에 변위계(extensometer)를 설치하였고, 용량 250kN MTS 시스템에 의해 ASTM D3039³⁾에 따라 변형률 제어(strain control)로 가력하였다

2.1.4 휨실험

휨 시험체는 Fig. 3과 같이 두께 6mm, 폭 50.8mm, 지점거리 100mm로 하고 ASTM D790⁴⁾에 라 변위제어(deformation control)로 가력하였다. 가력속도는 중앙부에서 2.8mm/min이었고 매 0.5초마다 처짐과 하중을 기록하였다.

2.1.5 전단실험

전단 시험체는 Fig. 4와 같은 더블 노치(double notch)형으로 ASTM D3846⁵⁾에 따라

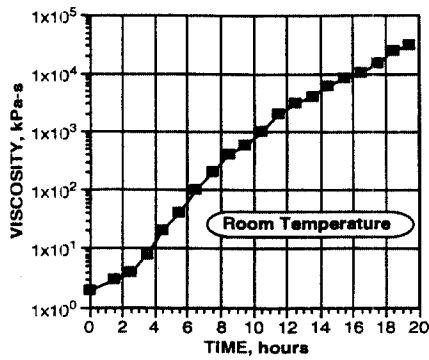


Fig. 1 Room Temperature(20°C) Viscosity of Geopolymer Resin versus Time After Mixing

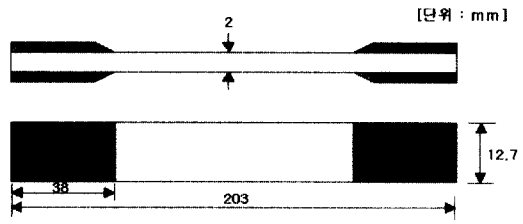


Fig. 2 Tension Specimen Geometry

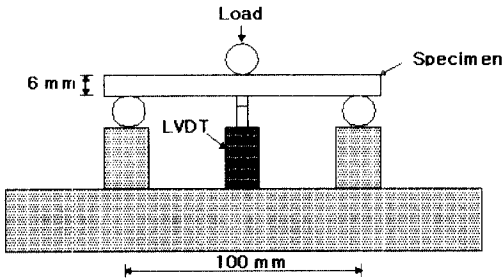


Fig. 3 Flexure Test Set-up

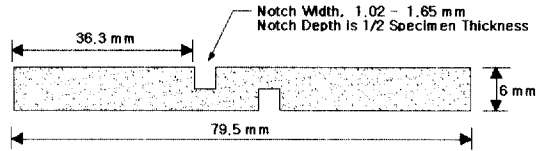


Fig. 4 Shear Specimen Geometry

약 80mm²의 전단면적에 압축력을 가하였다. 전단 파괴는 가력방향으로 두 노취 사이에서 발생하였으며, 좌굴을 방지하기 위하여 양면에 특별한 지그(jig)를 장착하였다. 실험은 용량 5kN MTS 시스템을 사용하여 변위제어 (deflection control)로 가력하였다.

2.2 구조실험

무기계 폴리머 접착제의 구조성능을 규명하기 위해서 탄소 섬유시트를 부착한 철근콘크리트 보를 제작하였다. 시험체의 치수는 Fig. 5와 같으며 시험체의 하단에 2단, 3단 및 5단의 일방향

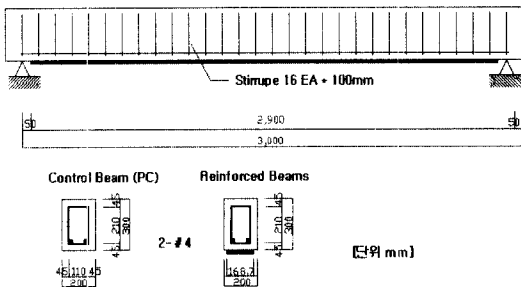


Fig. 5 Beam Specimen Geometry

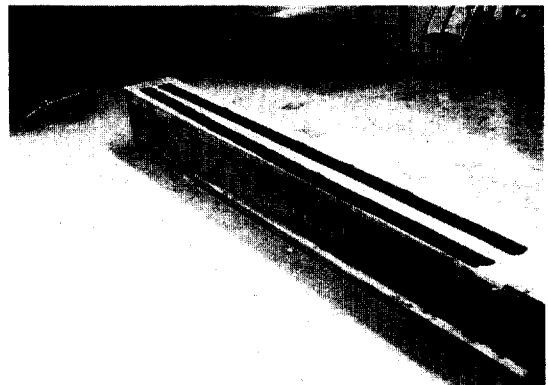


Photo. 1 Air-Drying Pre-Pegged Carbon Fabrics

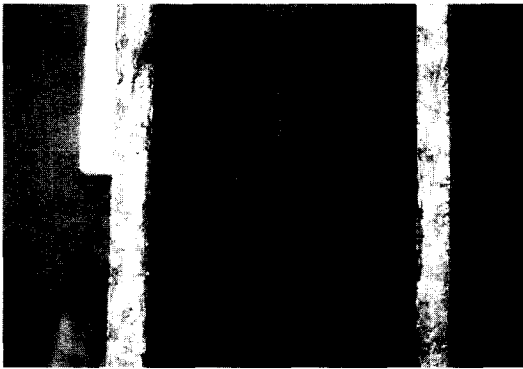


Photo. 2 Carbon Fabric Applied to Concrete Surface



Photo. 3 Beam Number Two Prior to Start of Testing

탄소섬유를 부착시켰다.(Photo. 1 및 Photo. 2 참조) 탄소섬유쉬트의 무게는 169.5 g/m^2 이었다.

시험체의 3등분점에 2점 가력하였으며, 전체적인 시험체 설치 상태는 Photo. 3에서 보는 바와 같다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 재료실험

탄소섬유의 인장실험 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 시험체의 인장강도는 파괴시까지 거의 선형 변화하고 있으며, 파괴는 중앙부 가까이에서 발생하였다. 평균 인장강도는 약 327MPa 로서 참고문헌 (6)에서 보고된 것과 비슷하다. 영계수는 대략 18GPa 로 계산되었다.

휨실험 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7

(a)는 열처리를 하지 않은 탄소섬유판의 하중-처짐 곡선을 보여주고 있고 Fig. 7 (b)는 800°C 에 1시간 노출시킨 탄소섬유판의 하중-처짐 곡선을 보여주고 있다.

Fig. 7 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 휨내력 또한 선형변형 상태를 유지하다가 파단후 급격한 내력 저하를 보여주고 있다. 열처리를 하지 않은 시험체의 평균 최대 내력은 625N 이고 800°C 로 가열한 시험체의 평균 최대 내력은 390N 으로서 열처리 이전 시험체 내력의 약 63%정도를 나타내었다.

특기할만한 것은 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 1시간 가열온도로 600°C 를 넘는 온도에 대해서는 휨내력과 전단내력 모두 그다지 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 1000°C 이상의 가열온도와 1시간 이상의 가열 시간에 관한 추가적인 연구를 통하여 보다 명확한 내열성능을 규명하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

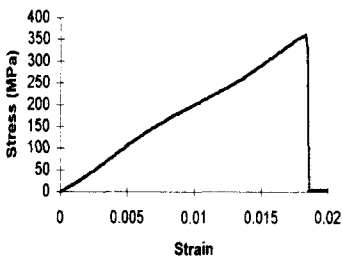


Fig. 6 Typical Stress-Strain Curve in Tension

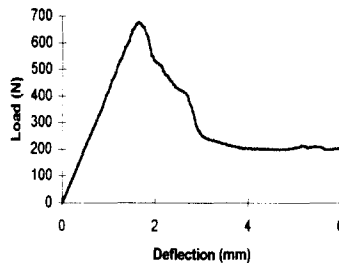


Fig. 7 (a) Load-Deflection Curve for virgin Specimen

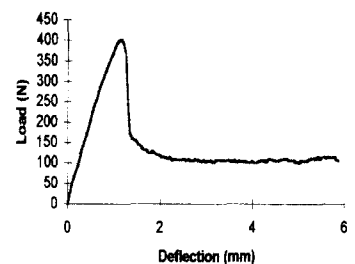


Fig. 7 (b) Load-Deflection Curve for Specimen Exposed to 800°C

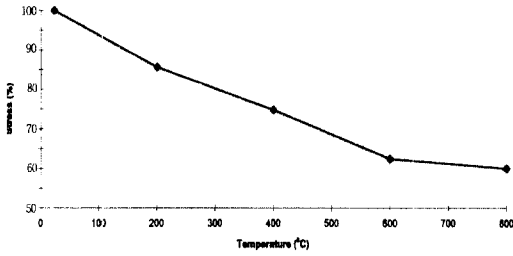


Fig. 8 Residual Flexural Strength with Respect to Temperature Exposure

Fig. 8에서는 상온, 200°C, 400°C, 600°C 및 800°C로 가열한 시험체의 휨강도를 보여주고 있는 바 Fig. 8에서 보는 바와 같이 노출된 온도가 높아지면서 거의 선형적으로 휨강도가 저하되고 있으나 800°C까지도 소정의 휨강도를 유지하여 보강효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

상온 시험체의 전단강도는 14MPa 정도로 참고문헌 (7)에서 보고된 유기계 접착제로 제작된 탄소섬유판의 전단강도 값과 비슷하다. Fig. 9는 탄소섬유판의 노출 온도별 전단강도의 변화값을 보여주고 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 1000°C 정도로 가열된 탄소섬유판의 전단강도도 소정강도(약 33%)를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 구조실험

3.2.1 실험결과

탄소섬유를 접착 보강 제작한 보 시험체의 실험결과를 항복하중, 파괴하중 및 파괴모드별로 정리하면 Table. 1과 같다.

Table 1 Summary of Test Results

Beam Design	Load at Yielding of Steel, kips	Failure load, kips	Deflection at Failure, in	Mode Failure
Control	12.5	16.0	3.5	Yielding of Steel
With 2 layers	14.0	18.1	0.76	Rupture of Composite
With 3 layers	15.8	20.5	0.90	Rupture of Composite
With 5 layers	16.5	24.7	0.92	Rupture of Composite

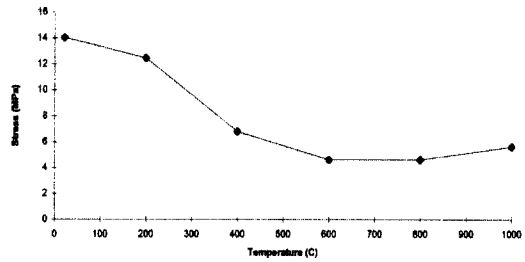


Fig. 9 Shear vs Temperature Exposure of Carbon Sheet

3.2.2 파괴양상

모든 시험체의 파괴양상은 이미 앞서 언급한 바와 같이 보 하단에 부착시킨 섬유 절단으로 나타났다. 이는 탄소섬유를 부착시킨 무기계 폴리머가 적절한 부착력을 유지하였다는 것을 의미한다. 시험체는 전단파괴를 방지하기 위하여 전단보강근을 충분히 배근하고 파소철근비로 설계되었으므로 전단파괴는 발생하지 않았다.

3.2.3 하중-처짐곡선 및 균열형태

탄소섬유를 2단, 3단 및 5단 부착한 시험체의 하중-처짐 곡선은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 일반적인 보와 마찬가지로 초기균열점, 항복점에서 각각 꺾인 형태를 보여 주었다. 당초 예상한 대로 보강섬유쉬트의 배수가 증가할수록 강도와 강성이 동시에 증대되었다. 다만 탄소섬유쉬트로 보강한 시험체는 탄소섬유 파단후 내력이 급격히 감소되는 취성파괴 형태를 보여 주었다.

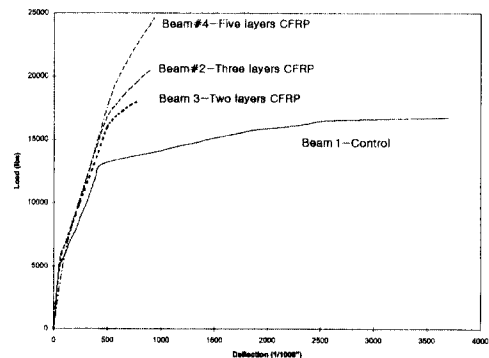


Fig. 10 Load-Deflection Curves Subjected to Third Point Loading

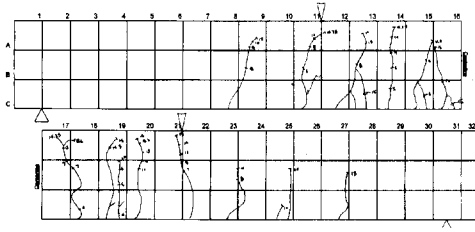


Fig. 11 (a) Cracking Pattern for Beam #1

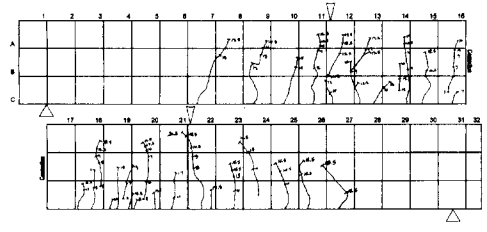


Fig. 11 (b) Cracking Pattern for Beam #2

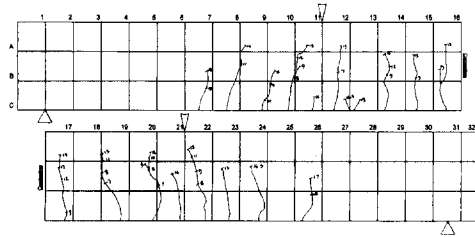


Fig. 11 (c) Cracking Pattern for Beam #3

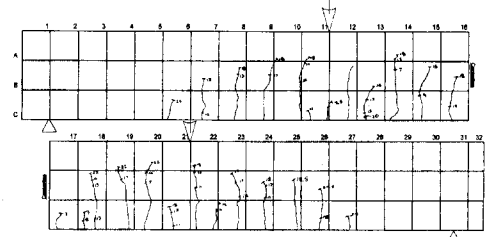


Fig. 11 (d) Cracking Pattern for Beam #4

보강된 보의 균열형태는 보강하지 않은 보의 그것과 다소 다르게 나타났다. 보강된 보에서는 보다 많은 균열이 촘촘히 발생되었다. 보강량이 많을수록 균열이 보의 전 스패에 걸쳐 더 넓게 분포되었으나 최대 균열폭은 오히려 더 작게 나타났다.

각 실험체의 균열 형태를 나타내면 Fig. 11과 같다.

4. 결론

이상과 같은 연구에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 무기계 폴리머 복합체의 인장강도와 휨강도는 각각 327MPa와 245MPa로서 유기계 복합체의 값과 거의 유사하게 나타났다.
- (2) 800℃~1000℃정도로 1시간 가열한 시험체의 휨내력과 전단내력은 각각 상온 시험체 내력의 63%, 33%정도를 유지하였다.
- (3) 무기계 폴리머 접착제는 탄소섬유를 접착시키는데 필요한 충분한 강도를 나타내었다.
- (4) 무기계 폴리머 접착제를 사용하여 탄소섬유 쉬트로 보강한 철근콘크리트 휨부재는 당

초 예상된 보강효과를 나타내어 보강재료로 사용이 가능한 것으로 사료된다.

결론적으로, 내열성이 있고 자외선에 강하며 화재시 유독가스와 화염을 발생시키지 않는 무기계 폴리머 복합체는 적절한 설계와 시공방법으로 화재의 위험이 있는 부위에도 사용 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 1997년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 (미) Rutgers, The State University of New Jersey 대학과 공동으로 연구되어진 것을 밝히며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kokin, A.A., (1985). "Properties of Carbon Fibres and Fields of their Application," Handbook of Composites : Strong Fibers, Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 1, pp. 241-273.
2. Lyon, R. E. , Balaguru, P. N, Fodeu A., Sorathia, U, Davidovits, J. and Davidovics, M. "Fire Resistant Alumino - silicate

- Composites", Geopolymer Institute, France 1997
3. "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites." Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 1992 Vol. 15.03, pp. 118-125.
 4. "Standard Test Method for Tensile Properties Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials." Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 1992 Vol. 8.01, pp. 269-278.
 5. "Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics." Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 1992 Vol. 8.03, pp. 208-210.
 6. Bishop, S., (1988) "Strength and Failure of Woven Carbon-Fibre Reinforced Plastics for High Performance Applications." Textile Structural Composites, Elsevier, New York, Vol. 3, pp. 173-207.
 7. Chiao, C.C., et al., (1977). "Measurement of Shear Properties of Fibre Composites: Part 1. Evaluation of Test Methods." Composites, pp. 161-169.

요 약

철근 콘크리트 구조물이 과소설계되어 있거나 과다 하중이 작용하게 되면 그 구조물의 구조성능을 파악하여 보수·보강을 시행하게 된다.

최근에 가장 많이 사용되는 보수·보강 재료로는 특히 휨내력을 보강하는데 탄소섬유를 들 수 있다. 탄소섬유쉬트는 내열성과 내화염성에 있어서 화재가 발생할 경우 보강재로서 충분한 성능을 가지고 있다. 그러나 이를 접착시키는데 사용되는 에폭시는 유기계 물질로서 화재시 유독가스가 발생하고 내열성능도 300℃ 정도에도 지탱하기 어려워 화재 발생이 가능한 구조물에 사용하기 어렵다.

이 연구에서는 무기계 폴리머 복합재료로 접착된 탄소섬유를 고온(약 800~1000℃, 1시간)으로 가열한 후 가열된 섬유판의 인장, 휨, 전단내력을 검토하여 내열성능을 파악하고 이 섬유쉬트로 보강한 철근콘크리트 부재의 휨 성능을 실험적으로 규명하여 화재의 위험이 있는 구조물에 구조적인 보강재료로 사용이 가능한가를 검토하였다.

연구 결과, 개발된 무기계 폴리머 복합체는 인장강도, 휨강도 및 접착강도가 유기계 접착제와 유사하게 나타났고 800℃~1000℃ 정도로 1시간 가열한 이후에도 상온 시험체 휨내력과 전단내력의 63%, 33% 정도를 유지하여 화재의 위험이 있는 부위에도 사용이 가능한 것으로 판단되었다.

(접수일자: 1998. 1.19)