

論文

모르타르 보의 복합재료 보강 효과에 관한 실험적 연구

차승환* · 정일섭**

An Experimental Study on Mortar Beam Stenghtened by Composite Material

Seung-Hwan Cha* and Ilsup Chung**

ABSTRACT

Excellent environmental durability and handy installation procedure as well as high specific strength and stiffness have introduced fiber-reinforced polymeric composite materials into the civil and architectural engineering field. This study presents the considerably enhanced strength characteristics of the mortar beams by being reinforced with epoxy-bonded carbon fiber sheets(CFS). Three point bending and Charpy impact tests were performed on both of bare and reinforced mortar specimens. The influences of length, and the number of reinforcing plies were investigated. Strength reduction due to pre-existent notch was lessened dramatically. The acoustic emission(AE) measurement revealed the progressive damage process in reinforced specimens.

1. 서론

1970년대 이후 급격한 경제 성장과 함께 수많은 건축 구조물이 건설된 우리나라에서는, 건설 당시의 시공적 요인, 시간의 경과에 따른 노후화, 사회적·경제적 환경의 급속한 변화에 의한 사용 조건의 변화, 부적절한 유지관리 등으로 인하여 지난 몇 년간에 걸쳐 구조물의 붕괴에 의한 대형 사고 등이 발생하여 심각한 사회 문제를 일으킨 바 있다. 또한 붕괴로까지 이어지는 않았더라도 구조내력의 저하, 하중의 변화 등으로 인하여 구조내력의 회복 및 증진이 필요한 구조물이 증가하고 있어서 이들에 대한 적절한 대책이 시급한 실정이다.

섬유와 고분자 기지재료를 사용한 복합재료는 우수한 강성과 강도, 경량성으로 인하여 항공산업을 대상으

로 활발히 연구, 개발 되어왔다. 80년대 이후 점차 그 활용범위가 넓어져 자동차 산업, 스포츠용품 뿐만 아니라 토목·건축분야로 확대되고 있는 추세이다. 그 중에서도 특히 토목·건축분야에서 경량화 재료라는 장점과 내부식성, 환경에 대한 내구성, 설계의 유연성, 시공의 편리성 등으로 인하여 기존의 강판 보강법, 단면 중타공법 등을 보완할 수 있는 보강법으로 주목받고 있다[1,2]. 이는 조기 균열의 발생 또는 노후화된 교각, 건물의 기둥, 슬라브 등에 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드 섬유 등의 복합재료를 접착, 보강시킴으로써 구조물의 강도를 증가 시키는 방법이다[3-10].

그러나, 이러한 복합재료 보강법이 과학적 이론을 바탕으로 한 검증이 수반되지 못한 채, 현장의 경험에 의존하여 시공되거나, 또는 외관상의 만족을 추구하는데 그친다면, 향후 보다 큰 대형사고를 유발할 수 있는 위

* 영남대학교 대학원

** 영남대학교 기계공학부

힘이 있으므로, 이에 대한 면밀한 연구가 필요하다.

이의 일환으로 본 연구에서는 탄소섬유 보강 복합재료를 모르타르에 접착하였을 때, 이것이 파괴거동에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 먼저, 모르타르 및 보강용 복합재료 각각의 기계적 물성치를 실험적으로 측정하였으며, 복합재료로 보강된 보 시험편에 대한 3점 굽힘시험을 통하여 보강효과를 측정하였다. 이 때, 복합재료의 적층수의 효과, 보강부의 길이, 노치의 영향 등을 살펴보았다. 또한, 보강시험편의 충격파괴 에너지를 측정하여 무보강 시험편과 비교하였다.

실험 결과 상당한 보강효과를 확인할 수 있었으며, 여기서 얻어진 결과를 향후 수행될 수치해석의 데이터로 활용하여 일반적 구조물에 대한 강도 및 파괴모우드의 예측, 보강적층의 최적설계 등에 활용하고자 한다.

2. 시험편 제작 및 실험

2.1 시험편 제작

건축물에 사용되는 콘크리트는 일반적으로 시멘트, 물, 모래 및 자갈 등이 혼합된 일종의 세라믹 복합재료이며, 그 기계적 거동은 각각의 구성재료의 함유율에 크게 의존한다. 본 연구에서는 복합재료의 접착에 따른 콘크리트 파괴에 대한 영향을 대상으로 하고 있으며, 비교적 작은 크기의 시험편을 사용하였으므로, 재료의 균질성(homogeneity)을 유지하기 위하여 자갈은 포함시키지 않고 시멘트, 모래, 물만을 혼합하여 양생한 모르타르를 사용하였다. 포틀랜드 시멘트, 모래와 물의 무게비는 1:2.6:0.6으로 하였으며, 혼합된 페이스트(paste)를 시험편 형상의 몰드(mold)에 부은 뒤, 로내에서 온도를 35℃로 유지하며, 14일간 양생하였다.

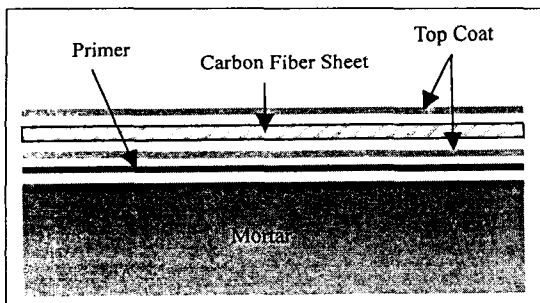


Fig. 1. Application of Reinforcing Composite Sheet on Mortar Surface

3점 굽힘시험에 사용한 시험편의 형상은 길이(mm) × 높이(mm) × 두께(mm)가 200 × 40 × 40, 200 × 20 × 40, 200 × 40 × 20 세가지로 하였다.

보강재로는 고탄성, 고인장강도를 가진 탄소섬유쉬트로서 현장에서 이미 적용되고 있는 한국화이버사의 무수지Carbon UD NR72와 에폭시 LR67을 사용하였다. 보강 접착방법은 그림 1에 나타낸 바와 같다. 이미 양생된 모르타르의 보강대상면 위에 경화제 PH33과 혼합된 프라이머 PR67를 도포한 후 24시간 동안 경화시키고 에폭시 top coat를 바른다. 그 위에 무수지의 Carbon UD를 위치시키고, 로울러를 이용하여 탄소섬유를 에폭시로 함침 시킨 뒤, 다시 top coat를 재도포하며, 이 상태로 상온에서 7일간 경화시킨다. 보강 적층수를 늘리고자 할 경우에는 1층을 보강한 후 24시간 상온 경화한 뒤, top coat를 도포하고, 같은 방법으로 보강 쉬트를 추가하였다.

2.2 기본 물성치 측정 시험

앞 2.1절의 방법에 따라 제작된 모르타르 시험편에 대하여 3점 굽힘 시험을 실시하였다. 보의 응력식에 따라 인장응력 및 강도를 계산하였으며, 굽힘하중 부과점의 반대편에 부착된 스트레인 로CKET으로부터 변형률을 읽어 탄성계수와 포아송비를 측정하였다. 또한, 50 × 50 × 50(mm) 크기의 압축시험용 모르타르 시험편을 양생하여 압축강도를 측정하였으며, 시험편 측면에는 스트레인 게이지를 부착하여 압축시의 탄성계수를 구하도록 하였다. 시험 결과, 인장 및 압축시 동일한 탄성계수를 가짐을 확인하였다.

보강용 복합재료의 기계적 특성은 앞 2.1절의 방법에 따라 제작된 1-ply 탄소섬유 0°, 45°, 90° 방향 시험편에 대하여 ASTM D 3039-76에 따른 편축(Off-axis) 시험을 실시하여 측정하였다. 전단 강성 및 강도

Table 1. Mechanical Properties of Mortar and Carbon Fiber Sheet

	Mortar		Carbon Fiber Sheet	
	Elastic Modulus (GPa)	1.80		E ₁
Poisson's Ratio	0.13		E ₂	5.5
			G ₁₂	3.0
Strength (MPa)	Tensile Compressive	5.4	X ₁	909
		22	Y ₁	17.7
			S	8.9

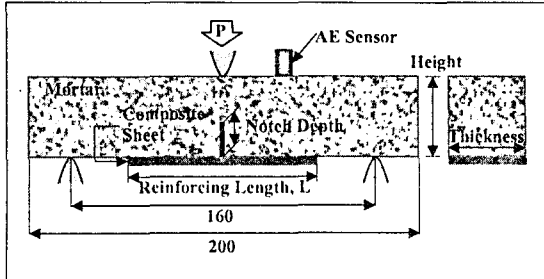


Fig. 2. Three-point-bending Test of Composite Reinforced Mortar Beam(in mm)

는 강성의 좌표 변환식과 편축 하중하의 Hill-Tsai 강도식을 사용하여 계산하였다. 구하여진 물성치는 표 1 에 보인 것과 같다.

2.3 3점 굽힘 시험

본 연구에서는 모르타르 보에 탄소섬유 복합재료쉬트를 접착시킴으로써 얻어지는 구조적 보강효과와 파괴 모우드를 알아보기 위하여, 다양한 시험편에 대한 3 점 굽힘 시험을 그림 2와 같이 수행하여 파괴강도를 측정하였으며, 그 모우드를 살펴보았다. Kimpara[11] 등의 연구방법과 유사하게, Mistras 2001를 사용하여 시험편의 파괴 과정중에 방출되는 음향신호를 측정함으로써 모르타르 보의 손상 과정을 함께 살펴보았다. 이때 사용한 센서는 Physical Acoustic Corporation사의 표준형 압전변환기로 모델명은 R15I이다.

첫째로, 섬유방향이 시험편의 축방향과 일치하도록하여(0° 보강) 1-ply 보강한 시험편에서 보강 길이 L을 20, 60, 100, 160(mm)로 각각 변화시키며 이에 따른 굽힘강도의 변화를 비교하였다. 둘째로는, 보강 쉬트의 두께에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 같은 섬유 방향의 L = 160(mm) 보강 층수를 4-ply까지 변화시키며 동일한 시험을 수행하였다. 이때 1-ply/ 160mm 보강 시험편의 섬유 방향을 시험편 축에 수직하게 하여(90° 보강) 굽힘강도도 함께 측정, 비교하였다. 셋째로, 모르타르 보의 단면 형상, 즉 높이x두께를 40x20, 20x40 (mm)로 변화시키며 강도 및 파괴 모우드를 살펴보았다.

또한 높이와 두께가 40(mm)인 모르타르 보에 균열을 모사하기 위한 노치를 가공하여 시험하였다. 0.5(mm) 두께의 다이아몬드 절단기를 사용하여 가공한 노치의 깊이는 시험편의 높이에 대하여 각각 25, 40, 75%인 10, 16, 30(mm)로 하였다. 25% 노치 시

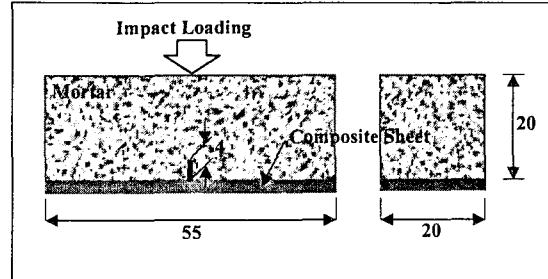


Fig. 3. Impact Test Specimen of Composite Reinforced Mortar(in mm)

험편에 대하여는 1-ply보강길이 L을 20, 60, 100, 160(mm)로 변화시켜 시험하였다. 또한 보강층수를 4-ply까지 변화시켜 강도를 측정하였다. 이 때, 현장에서 이미 널리 사용되고 있는 수지함침법(resin injection)의 효과도 함께 살펴보았다.

위의 3점굽힘 시험시 하중 부과점의 행정 속도는 0.5 (mm/min)로 일정하게 하였다.

2.4 Charpy 충격 시험

복합재료 보강에 따른 내충격성의 증대 효과를 살펴보기 위하여 그림 3과 같은 충격시험편을 제작하여 Charpy 충격시험을 수행하였다. 팔의 길이 1.075m, 무게 25.2kg의 추를 60° 위치에서 떨어 뜨릴 때 시험편의 파괴에 필요한 충격에너지를 측정하였다.

위의 모든 시험은 각각의 경우에 대해 최소 5개의 시험편을 사용하였으며, 다음 절의 실험 결과에서 알 수 있듯이 산포가 심하지 않은 비교적 일관된 데이터를 얻을 수 있었다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 무노치(Unnotched) 시험편

3.1.1 보강 길이의 영향

높이와 두께가 40(mm)인 무노치 시험편에 대하여, 보강길이를 시험편 전체 길이 200(mm)의 10%, 30%, 50%, 80%로 변화시키며 3점 굽힘실험을 실시하였다. 이 때 보강재는 1-ply로 하였다. 표 2는 이때의 최대 굽힘하중과 하중점 변위 및 이들로부터 보의 식을 사용하여 계산된 겹보기 탄성계수 및 겹보기 굽힘강도의 값을 보이며, 그림 4는 보강길이의 변화에 따

Table 2. Summary of 3-point Bending Test Results for 1-ply Reinforced Mortar Beams

Reinforcing Length (mm)	0	20	60	100	160
Max. Load (KN)	1.53	2.27	3.31	4.63	5.01
Load-line Deflection (mm)	0.26	0.31	0.54	0.80	1.26
Apparent Modulus (GPa)	2.35	2.93	2.45	2.32	1.59
Apparent Flexural Strength (MPa)	5.74	8.51	12.41	17.36	18.79

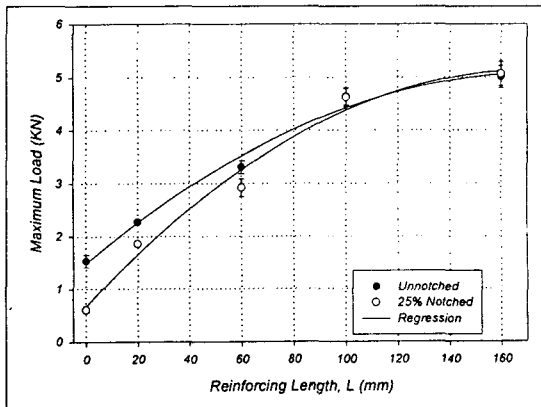


Fig. 4. Variation of Max. 3-point Bending Loads of 1-ply Reinforced Specimens due to Reinforcing Length

른 최대 굽힘하중의 변화를 보인다.

보강하지 않은 시험편에 비해 보강길이를 증가시킬수록 강도 향상 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 20mm~100mm의 보강까지는 그 강도의 증가가 뚜렷한 반면, 그 이상의 경우에는 보강효과의 증가율이 비교적 작았다. 이는 하중의 증가로 모르타르와 보강재의 계면응력이 커짐에 따라, 주로 모르타르의 미시적 손상과 이에 따른 과도한 변형을 보이기 때문으로 사료된다. 따라서 구조물에 따라 경제적 보강효과를 극대화할 수 있는 최적의 보강길이가 존재함을 예상할 수 있다. 하중점 변위를 살펴보면, 보강길이가 길어질수록 결보기 탄성계수는 감소하는 반면, 연성능력이 증가함을 보인다.

그림 5는 굽힘시험시간의 경과에 따른 하중의 변화와 이에 따른 음향방출 사상수(Hit)를 나타낸다. 순간적인 취성파괴를 일으키는 무보강 시험편과는 달리, 보

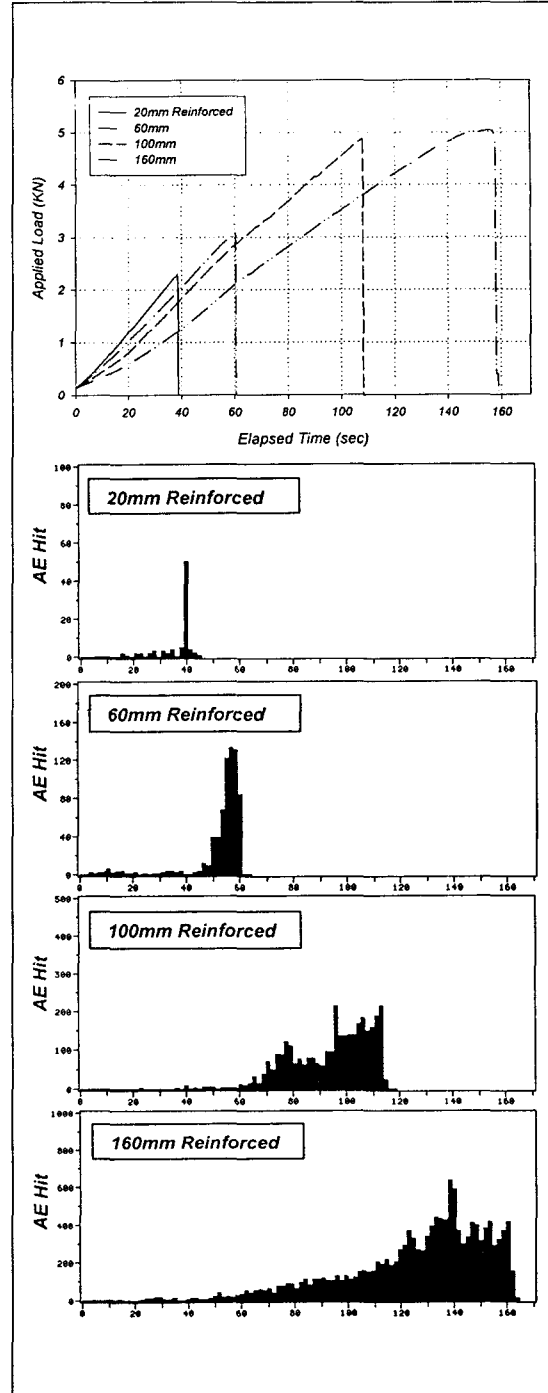


Fig. 5. History of Applied Load for 1-ply Reinforced Specimens and Corresponding Acoustic Emission Hits

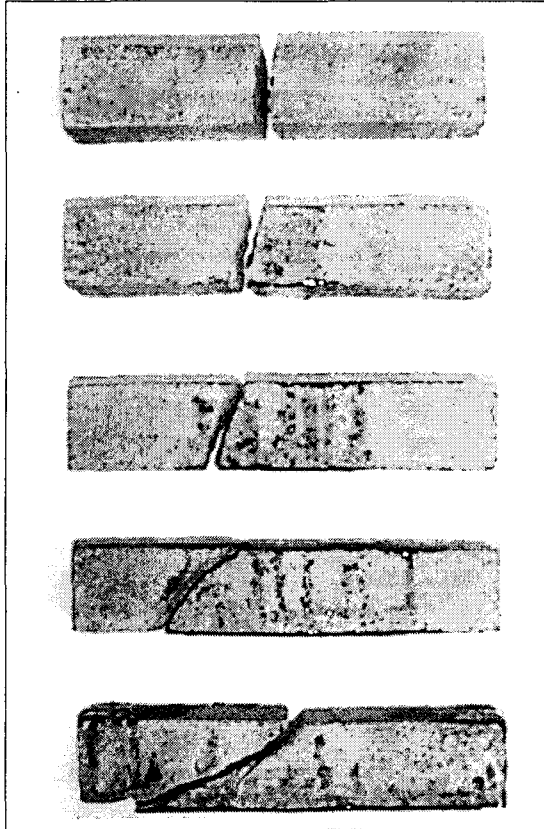


Fig. 6. Fractured Specimens with 1-ply Reinforcement (From the Top, Bare, 20, 60, 100, and 160mm of Reinforcement Length)

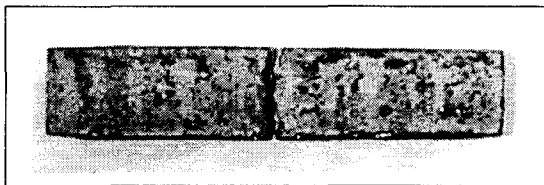


Fig. 7. Fractured Specimens of 1-ply Reinforcement with Fibers in Transverse Direction to Specimen Axis

강길이가 길어짐에 따라 강도가 증가할 뿐만 아니라, 파단 이전에 보강 보의 손상이 점진적으로 진행되고 있음을 알 수 있다. 음향신호의 발생은 모르타르의 재료 손상, 보강재의 에폭시 수지의 손상, 가력점에서의 마찰 등의 원인을 예측할 수 있으나, 본 연구에서 각 원인별 음향신호를 분리하지는 못하였다. 그러나, 시험 후 시험편에서 마찰면 또는 계면 등의 손상은 관찰되

Table 3. Summary of 3-point Bending Test Results for 160 (mm) Reinforced Mortar Beams

Reinforcing Ply Number (plies)	0	1	2	3	4
Max. Load (KN)	1.53	5.01	6.2	7.09	7.37
Load-line Deflection (mm)	0.26	1.26	1.31	1.54	1.40
Apparent Modulus (GPa)	2.35	1.59	1.89	1.84	2.11
Apparent Flexural Strength (MPa)	5.74	18.79	23.25	26.59	27.64

지 않는 반면, 모르타르에는 거시적 균열이 생성되었으므로, 가장 주된 음향신호 발생의 원인은 모르타르의 손상인 것으로 사료된다. 그림 6은 파괴된 시험편을 보인다. 보강 길이에 무관하게 모든 시험편에서의 균열은 보강재의 끝단으로부터 굽힘 하중이 가하여지는 부분으로 형성되었음을 알 수 있다.

위의 탄소 섬유가 시험편의 축방향으로 보강된 시험편과는 달리, 또한 그 수직 방향으로 1-ply를 부착하여 시험을 수행하였다. 예상한 대로 보강재의 축방향 강성이 감소함에 따라 보강효과는 그리 크지 않았으며, 강도는 2.09 ± 1.10 (KN)으로 보강하지 않은 시험편에 비하여 36.6%의 강도 향상을 가져왔다. 그림 7과 같이 파단면은 하중 부과점 밑에서 수직 방향으로 형성되었으며, 이 때 보강재도 함께 파단되었다.

3.1.2 보강 층수의 영향

높이와 두께가 40(mm)인 무노치 시험편에 대해서 보강 층수를 4층까지 변화시키며 시험을 수행하였다. 이때 보강길이는 모두 160(mm)로 하였다. 표 3은 최대 굽힘하중과 하중점 변위 및 이들로부터 보의 식을 사용하여 계산된 결보기 탄성계수 및 결보기 굽힘강도의 값을 보이며, 그림 8은 파손시의 굽힘하중과 하중점 변위를 보인다.

보강층수를 늘려감에 따라 강도 및 하중점 변위, 즉 연성 측면에서의 보강효과가 증가하나, 그 증가율은 점차 감소하고 있다. 따라서, 이 경우에도 구조물에 따른 최적 보강 층수가 존재함을 예상할 수 있다. 파단면은 그림 6의 160(mm)보강 시험편의 경우와 유사하여, 보강재의 끝단으로부터 하중 부과 부위를 향하여 생성되었다. 음향방출 사상수(Hit)의 분포 또한 그림 5의

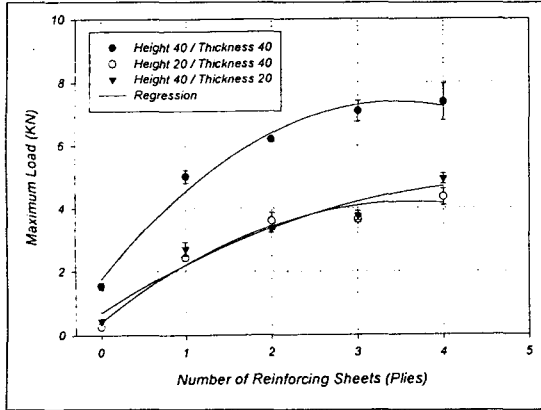


Fig. 8. Variation of Max. 3-point Bending Loads of 160mm Reinforced Specimens due to the Number of Sheets

160(mm) 보강의 경우와 같이 파단 이전에 상당한 손상이 진전됨을 보였다.

3.1.3 단면 형상의 영향

시험편의 높이×두께를 20×40, 40×20(mm)으로 변화시키며 보강 층수별 굽힘강도를 측정하였다. 그림 8에서 보인 바와 같이 40×40 시험편에 비하여는 강도가 감소되었으나, 위 2가지의 축소 단면 시험편의 강도는 상이한 단면계수에도 불구하고, 서로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 단순한 보 이론으로는 설명할 수 없는 결과이며, 따라서 다축 응력상태가 고려된 수치해석적 연구가 필요하다고 판단된다.

40×20 시험편의 파단 양상은 그림 6의 40×40 시험편과 매우 유사하였다. 그러나, 20×40 시험편의 경우에는 보강재 끝단으로부터의 균열이 약 40 mm에 걸쳐 보강재와 모르타르의 계면에 평행하게 진전하였으며, 그로부터 하중 부과점으로 방향을 바꾸어 파단면이 형성되었다. 이때, 계면에 평행한 파단면은 모르타르내에 형성되었으며, 보강재와의 접촉층은 파손 또는 분리되지 않았다. 그림 9는 파단된 20×40 시험편을 보인다.

3.2 노치(Notched) 시험편

양생된 모르타르 시험편의 중앙에 다이아몬드 절단기를 사용하여 노치 가공을 한 후 보강재를 부착하여 시험을 수행하였다. 특히, 25% 노치, 즉 노치 깊이 10(mm) 시험편에 대하여는 복합재료의 보강없이 예 폭시 수지만을 함침하여 경화시킨 뒤 강도를 측정하였다. 그 결과, 노치 가공된 모르타르 시험편의 평균 최대

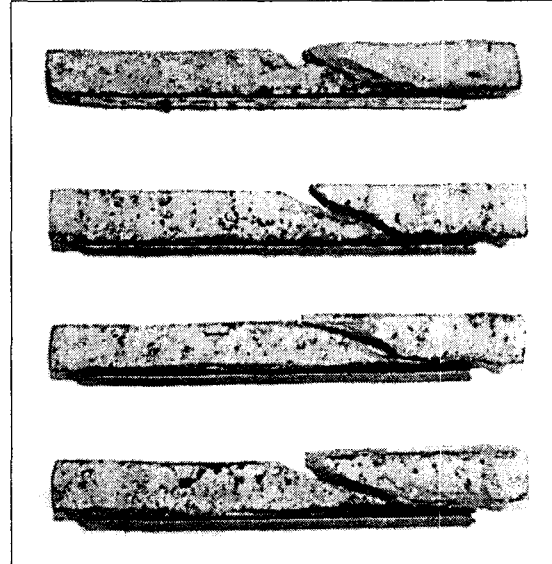


Fig. 9. Fractured 20 × 40 Specimens with 1, 2, 3, and 4-ply(from the Top) Reinforcing Sheets

하중 0.61(KN)에 비하여 1.40(KN)로 130%의 강도 향상 효과를 가져왔다.

3.2.1 보강 길이의 영향

10(mm)깊이의 노치를 가지는 시험편에 대하여 1-ply의 축방향 보강 길이를 변화시키며 강도를 측정하였다. 그림 4에 보인 바와 같이 보강 길이가 짧은 경우에는 노치의 영향에 따른 강도의 감소가 관찰되었으나, 60(mm)이상으로 보강길이가 길어짐에 따라 노치의 영향은 극히 미미하며, 무노치 시험편에 상당하는 강도를 가지는 것으로 나타났다. 160(mm) 길이의 보강 층수를 4층까지 변화시키며 강도를 측정한 결과도 이와 유사하여 그림 8의 40×40 무노치 시험편과 거의 동일한 강도를 가짐을 확인하였다. 표 4는 노치 시험편의 최대 하중 및 무노치 시험편의 최대 하중에 대한 비를 보인다.

무노치 시험편에 비하여 최대 6%의 강도 증가가 관찰되었으나, 이는 동일 조건의 시험편 제작을 위한 노력에도 불구하고, 배치(batch)별 배합비의 오차, 양생 완료 시점으로부터 시험 시점까지의 추가 양생 등으로 인한 모르타르 물성치의 변동에 따른 것으로 사료된다. 이 경우에도 파단면은 그림 6의 무노치 시험편과 유사한 양상을 볼 수 있었다.

Table 4. Averaged Max. Load of 160(mm) Reinforced Notched Mortar Beams Compared with Unnotched Ones

Reinforcing Ply Number (plies)	Maximum Load (KN)	Max. Load Ratio w.r.t Unnotched
1	5.07	1.01
2	6.23	1.00
3	7.26	1.02
4	7.82	1.06

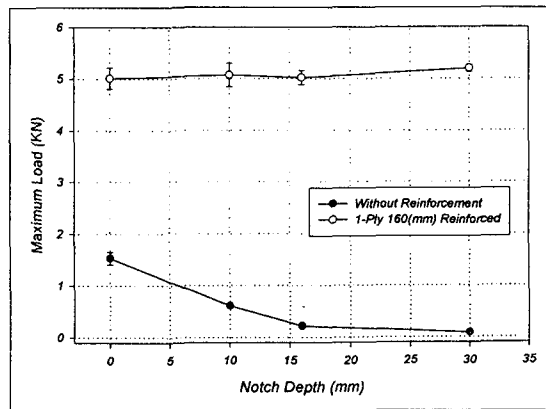


Fig. 10. Max. 3-point Bending Loads of Bare and Reinforced Specimens with Notch

위의 결과를 볼 때, 복합재료를 이용한 보강이 매우 효과적이어서 충분한 보강이 이루어질 경우, 노치 선단의 응력집중현상을 완전히 제거하며, 강도를 크게 향상시키는 것으로 결론지어진다.

3.2.2 노치 깊이의 영향

시험편 중앙의 노치 깊이를 높이의 40%, 75%, 즉 16, 30(mm)로 변화시키며, 여기에 160(mm)의 길이로 1-ply측방향 보강을 한 뒤 강도를 측정하였다. 그림 10에 보인 바와 같이 보강되지 않은 시험편의 강도는 노치의 깊이가 증가할수록 크게 감소하지만, 여기에 복합재료가 보강됨으로써 강도를 크게 증가시킬 수 있었으며, 특히 충분한 길이로 보강된 시험편은 노치의 깊이에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.3 Charpy 충격 에너지

그림 3의 충격 시험편을 사용하여 Charpy 충격에너지를 측정하였다. 보강 층수를 늘려감에 따른 충격에너지의 증가는 그림 11에 표시한 것과 같다. 굽힘 강도에 비하면 그 보강효과가 그리 크지 않았으며, 그 이유는

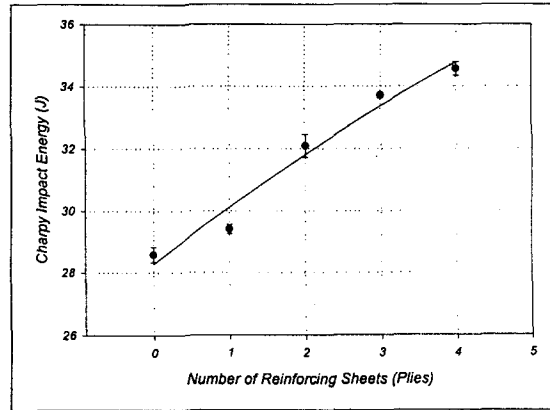


Fig. 11. Variation of Impact Energy due to the Number of Reinforcing Sheets

타격 지점이 보강되지 않은 모르타르면이었고, 이로 인하여 모르타르의 분쇄가 주된 파손 모우드였기 때문으로 사료된다. 모든 시험편에서 타격점으로부터 보강재의 끝단까지의 모르타르는 분쇄된 반면 보강재와 계면에서는 파손이 관찰되지 않았다.

4. 결 론

탄소섬유 슈트를 모르타르 외면에 접착 보강하였을 때, 그 효과와 파괴 모우드를 알아보기 위한 시험을 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 무노치 시험편의 경우, 보강 길이와 층수에 따라 3점 굽힘강도가 크게 증가하였다. 그러나, 보강재가 증가함에 따라 강도의 증가율은 점차 감소하는 경향을 보여, 구조물에 따른 적절한 보강법을 찾아 적용함으로써 보강 효과와 경제성을 도모하여야 할 것으로 사료된다.

(2) 대부분의 3점 굽힘 파단면은 보강재의 끝단으로부터 하중부와 부위로 생성되었으나, 시험편의 높이에 비하여 보강 길이가 길어짐에 따라 보강재의 끝단으로부터 안쪽으로 일정 부분에서는 보강재와의 계면에 평행한 방향으로 모르타르의 파괴가 진행됨을 볼 수 있었다.

(3) 보강이 이루어진 시험편에서는 파단 이전 상당 시간에 걸쳐 음향 신호의 방출이 계속되어, 점진적인 손상과 균열의 성장을 보였다.

(4) 노치 시험편의 보강 길이와 보강재의 층수를 증

가시킴에 따라 3점 굽힘강도가 크게 증가하였으며, 충분한 보강이 이루어진 경우에는 노치에 의한 강도 저하를 완전히 방지하여 동일한 방법으로 보강된 무노치 시험편과 동등한 강도를 나타내었다.

위의 각종 시험을 통하여 복합재료를 이용한 콘크리트의 보강방법이 매우 효과적임을 알 수 있었으며, 적절히 설계된 보강 시공을 할 경우 구조물의 강도를 크게 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 향후, 보다 복잡한 기하적 형상 및 하중 조건에 놓인 실제 구조물에 대한 효율적이고 경제적인 보강 설계를 위하여 해석적 연구의 필요성이 제기되며, 본 연구에서 얻어진 결과는 이에 필요한 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 '98 과학기술기초 중점 연구 (과제 번호: 1998-018-E00086)의 지원으로 수행되었으며, 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Furlong, R.W., "Strength of Steel-Encased Concrete Beam Columns", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.93, 1967, pp.113~1241.
2. Karbhari, V.M., "Application of Composite Materials to the Renewal of Twenty-first Century Infrastructure", Proceedings of ICCM-11, Australia, 1997, pp.I-88~I-107.
3. Shahawy, M.A., Arokiasmy, M., Beitelman, T., and Sowrirajan, R., "Reinforced Concrete Rectangular Beams Strengthened with CFRP Laminates", Composite: Part B 27B, 1996, pp.225~233.
4. Meier, U. and Kaiser, H., "Strengthening of Structures with CFRP Laminates", Proceeding of ASCE Specialty Conference on Advanced on Composites Materials in Civil Engineering Structures, ASCE, New York, 1991, pp.224~232.
5. Luis, C., Carlo, A.C., and Maria, R.A., "Experimental and Numerical Evaluation of Bond Stress of Concrete Beams Reinforced by GFRP Bars", Proceedings of ICCM-11, 1997, pp.VI-731~VI-741.
6. Philip, A.R., David, A.T., Lu, L. and Guy, M.C., "External Reinforcement of Concrete Beams using Fiber Reinforced Plastics", ACI Structural Journal, Vol. 88, 1991, pp.490~500.
7. Jones, R. and Hanna, S., "Composite Wraps for Aging Infra-Structure Theoretical and Applied Fracture Mechanics", Vol.28, 1997, pp.125~134.
8. Karbhari, V.M. and Eckel II, D.A., "On the Durability of Composite Rehabilitation Schemes for Concrete: Use of the Peel Test", Journal of Material Science, Vol. 32, 1997, pp.147~156.
9. 음성우, 임재형, 황규표, 장성재, "복합재료에 의해 보강된 휨 부재의 구조적 거동에 관한 실험 연구", 대한건축학회 논문집 제12권 9호, 1996, pp.209~216.
10. Bantia, N., Al-Asaly, M., and Ma, S., "Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Plastic Grid", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, 1995, pp.252~257.
11. Kimpara, I., Kageyama, K., Suzuki, T., Ohsawa, I., and Yamaguchi, K., "Experimental Characterization of Reinforcing Effects of FRP Sheets Bonded on Mortar and Concrete Beams", Proceedings of ICCM-11, Australia, 1997, pp.VI-16~VI-25.