

탄소섬유케이블을 이용한 철근콘크리트 건물의 내진보강 공법

Seismic Strengthening Method of R/C Buildings Using Carbon Fiber Composite Cable



하 지 명^{1)*}

Ha, Ji Myung



김 형 민²⁾

Kim, Hyung Min



최 세 환³⁾

Choi, Se Hwan



허 준⁴⁾

Hur, Jun



이 용 호⁵⁾

Lee, Yong Ho



이 강 석⁶⁾

Lee, Kang Seok

1. 서론

우리나라는 지금까지 지진피해의 경험이 적은 나라로 인식되어졌기 때문에 지진피해의 위험성에 대한 인식이나 내진에 대한 연구가 국외 지진 다발국에 비교하면 부족한 실정이다. 그러나, 기상청 통계자료에 의하면 지난 1978-2008년의 31년간 총 816회의 지진이 관측되어, 연평균 26회의 빈도를 보이고 있으며, 이중 유감지진횟수가 212회이고, 지진규모(M) 3 이상의 지진발생이 274회로 빈발하고 있다.

또한, 역사지진 및 계기지진에 관한 연구결과에 의하면 국내에도 과거 막대한 인명 및 재산

피해를 준 지진이 발생하였고, 가까운 미래에도 인명 및 재산 피해를 줄 수 있는 지진이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 대규모의 지진에 대한 대책마련(내진보강)의 중요성이 점차 고조되고 있다.

최근 들어 1995년에 발생한 일본 고베(神戸) 지진(M=7.2, 사상자: 6,310명), 1999년에 발생한 터키 이즈밋 지역지진(M=7.4, 사상자: 15,657명), 2001년에 발생한 인도 구자라트지진(M=7.7, 사상자: 20,085명), 2005년에 발생한 파키스탄 지진(M=7.6, 사상자: 86,000명), 2008년에 발생한 중국 쓰촨성 지진(M=7.9, 사상자: 68,712명) 등의 한반도 주변을 포함한 세계각지에서 막대한 인명 및 재산의 피해를 유발한 대규모 지진이 빈발하고 있으며, 학교건물, 일반주택을 포함한 각종 건축물에 큰 피해가 발생하였다.

국내 건축물에 대한 내진설계기준은 1988년 최초로 제정되었으며, 상기에 기술한 바와 같이 국외에서 증가하는 지진발생 및 지진피해 사례

1) ㈜콘크리닉 기술연구소 소장

2) ㈜콘크리닉 기술연구소 연구원

3) ㈜콘크리닉 기술연구소 연구원

4) ㈜콘시스 기술팀

5) ㈜콘시스 기술팀

6) 전남대학교 건축학부 부교수

* E-mail : jmha@conclinic.co.kr

보고에 따라 KBC 2005에서는 기존의 내진기준을 강화하여 내진설계 적용범위를 6층 이상, 연면적 10,000m² 이상 건축물에서 3층 이상, 연면적 1,000m² 이상 건축물로 확대하는 등 단계적으로 강화하여 KBC-2009에 이르고 있다. 하지만, 내진설계 제/개정 이전에 건설된 국내 비내진 건축물이 약 82%에 달하고 있어 지진안전성을 확보하기 위한 내진보강 기반기술의 구축이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

한편, 내진설계가 반영되지 않은 건물에서 설계기준에서 요구하는 내진성능을 확보할 수 있도록 내진보강을 실시할 경우 초기 건축비와 유사할 정도로 큰 소요경비가 예상된다. 또한 내진보강을 하더라도 기존 건물 부재들의 단면을 증설하거나 보강재를 추가해야 하므로 내진보강공사 중 건물의 사용이 불가하여 그 경제적 손실이 더욱 증가된다. 따라서 기존건물의 내진성능 확보가 가능한 효율적이며, 경제적인 내진보강 시스템 개발이 필요하다.

특히 국내 학교건물의 경우 전체의 약 87%가 내진설계 없이 건설되어 지진에 매우 취약할 것으로 판단된다. 이에 따라, 2010년 1월 교육과학기술부에서는 학교건물 내진성능 평가 및 내진보강 대책을 발표한 바, 학교 건물의 내진보강 법제화에 대비하여 효율적이고 경제적이면서 국내 학교건물의 구조양식에 적합한 내진보강 시스템 개발이 시급히 요구된다.

본 기사에서는 국내 철근콘크리트 학교건물의 내진보강에 효과적으로 적용할 수 있는 공법을 소개하고 그 성능검증 시험 및 평가결과에 대해 제시하고자 한다.

2. 공법개요 및 특징

본 공법은 탄소섬유 케이블을 이용하여 지진에 의해 충격이 가해지는 경우 구조물의 강도를

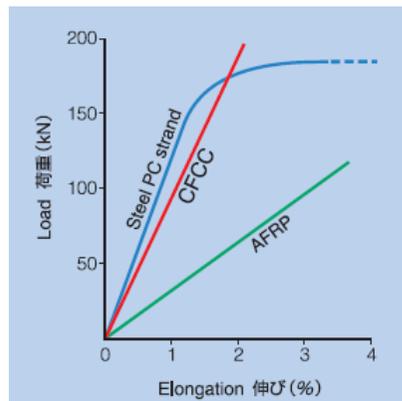
보강하여 내하력을 향상시키는 내진보강공법이다. 탄소섬유 케이블은 고강도, 고탄성, 경량, 고내식성, 비자기성, 저선팡창 등 기존 케이블보다 우수한 특성을 가지고 있으며, 주로 부식환경에 놓여있는 구조물의 보강, 해양 및 온천, 산성지역의 구조물, 플랜트, 학교내진 등에 적용하기 위하여 개발되었다.

2.1 탄소섬유케이블의 특징

탄소섬유케이블은 탄소섬유와 열경화성 수지를 복합화하여 성형한 케이블로서, 일본 동경로프(Tokyo Rope)에서 최초로 개발되었다.

탄소섬유의 우수한 소재성능을 최대한 보유하도록 하였기 때문에 아래에 제시된 바와 같이 기존 케이블의 특징을 초월하는 특징을 가지고 있다. 또한, 선형에 가깝기 때문에 코일감기가 가능하여 긴 케이블 제작도 가능하다.

- 경량: 비중이 1.5로서, 강재의 약 1/5배
- 고내식성: 산 및 알칼리에 우수한 내식성
- 저선팡창성: 강재의 약 1/20배
- 유연성: 선재에 가까워 코일감기가 가능
- 고강도: PC강에 의한 선재와 동등이상



· CFCC : Carbon Fiber Composite Cable
· AFRP : Aramid Fiber Reinforced Plastic

Fig. 1 탄소섬유 케이블의 하중-변형곡선

- 고탄성: PC강에 의한 선재와 동일한 탄성을
- 고인장 피로성: PC강에 의한 선재를 상회

2.2 제안 내진보강 공법의 특징

탄소섬유케이블을 이용한 기존 콘크리트 구조물의 내진보강공법은 탄소섬유케이블을 수평하중에 저항 할 수 있는 X-브레이스 형태로 시공하고, 그 단부를 접합용 철물을 이용하여 기계적으로 고정시킴과 동시에 최종적으로 볼트식 방법으로 긴장시켜 기존의 구조물을 내진보강하는 방법이다.

탄소섬유케이블을 이용한 X-브레이스 내진보강공법의 특징은 기존 댐퍼등을 이용한 브레이스 공법 및 철골 브레이스 보강법 대비 접합부시공, 표면처리 등의 사전준비가 간단하며 중량증가가 거의 없는 것이다.

또한 경량이므로 인력으로 운반 및 시공이 가능한 점 등 현장시공성이 우수하고 중량 및 체적 대비 큰 강도(인장)가 발휘된다. 아울러 탄소섬유케이블의 직경을 변경함으로써 다양한 인장내력을 발휘시킬 수가 있어서 내진보강 목적에 대응한 내진보강이 가능하다.

한편, 매우 단순한 구조이기 때문에 산뜻한 내관 및 외관을 창출할 수가 있으며, 기존건물과 조화롭게 디자인 또한 가능하다.

탄소섬유케이블은 부식에 매우 강해서 유지관리가 용이하며, 산이나 알칼리에 대한 저항능력이 탁월하여 해안지역 및 염해지역에 유리하다.

또한, 기존구조물에 부가적인 하중이 거의 생기지 않기 때문에 기초공사가 필요 없으며 간단하게 조립해서 시공하기 때문에 건물 사용 중에도 내진보강이 가능한 특징을 보유하고 있는 공법이다.

3. 제안공법의 성능검증 실험

3.1 실험개요

탄소섬유케이블을 이용한 내진보강 공법의 성능 효과를 검증할 목적으로 비내진 상세를 가지는 국내 기존 철근콘크리트 학교건물의 골조를 대상으로 약 60% 크기로 축소된 1스팬 1층 규모의 비보강 골조 실험체 1개, 탄소섬유 케이블 내진보강실험체 2개(평판형 및 돌출형)의 골조 실험체를 제작하여 반복가력 횡하중 구조실험을 수행하였다.

평판형과 돌출형 실험체는 기둥의 돌출유무에 따라 사용되는 철물이 달라지는데 Fig. 2에서 보

Table 1 실험체 일람표

실험체 명칭		전단 경간비	콘크리트 압축강도	철근 항복강도
1	RCFR	5.6	21MPa	300MPa
2	CFCC-1	5.6		
3	CFCC-2	5.6		

- ① RCFR : 조적조 정두리벽을 가지는 무보강 골조
- ② CFCC-1 : CFCC 내진보강접합부(평판형 접합부)
- ③ CFCC-2 : CFCC 내진보강접합부(돌출형 접합부)

Table 2 탄소섬유케이블의 재료특성

보강부재	Cross Section	부재직경 (mm)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
탄소섬유 케이블		15.2	270	155



RCFR (무보강 골조) CFCC-1 (평판형) CFCC-2 (돌출형)

Fig. 2 비교용 실험체 시공현황

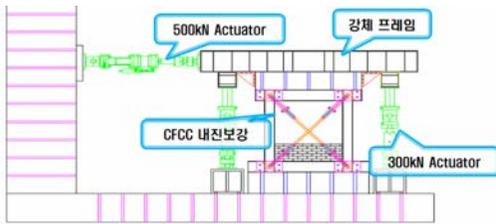


Fig. 3 실험체 셋팅 현황

Table 3 실험기기 및 장치

구 분	실험기기	용량	수량
가력장치	Actuator	50tonf (500kN)	1
	Actuator	30tonf (300kN)	2
측정장치	변위측정기(LVDT)	100, 200mm	5
	스트레인게이지	FLA-2-1L-11 (철근용)	19×5
Data 측정장치	Data Logger	SDS303 (30ch)	1
	Switch Box	50ch	1



Fig. 4 실험체 설치장치 및 측정장치

는바와 같이 기둥이 조적벽체보다 돌출되어 있는 경우에는 평판형 철물을 사용하여 체결하고, 기둥과 조적벽체가 나란할 경우 돌출형 철물을 사용하여 체결하는 방식을 선택하였다.

본 실험에 사용된 실험기기 및 장치를 Table 3에 나타내었고, 실험체의 설치 및 측정 장치를 Fig. 4에 나타내었다.

Table 4 하중 가력계획

사이클	1	2	3	...	13	14	15
부재각 (%)	0.08	0.1	0.12	...	1.24	1.54	2
횡변위 (mm)	1.344	1.68	2.1	...	21	26.25	33.6

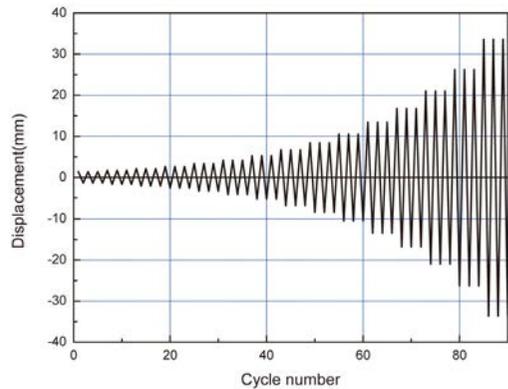


Fig. 5 하중 가력 계획도

3.2 실험방법

축력은 실제 기존 골조(기둥 2개)에 가해지는 축하중, 즉 43.8tonf을 배분하여 각각의 기둥에 21.9tonf을 실험체 양쪽에 설치된 30tonf Actuator를 이용하여 일정하게 가력하였으며, 수평하중은 반력벽에 설치된 50tonf Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력 하였다.

실험체에 역대칭 모멘트가 발생하도록 횡력을 가하는 Actuator의 가력점을 실험체 상부 가력용 철골빔의 중심에 일치시켰으며, 횡 변위는 수평 부재각(%)에 따라 0.08, 0.1, 0.12, 0.15, 0.2, 0.25, 0.31, 0.4, 0.49, 0.62, 0.79, 1, 1.24, 1.54, 2의 순서로 각 3cycle씩 단계별로 점증 가력 하였다. 실험체에 적용된 하중 가력 계획을 Table 4, Fig. 5에 나타내었다.

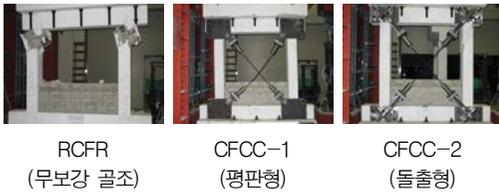


Fig. 6 비교용 실험체 파괴현황

3.3 실험결과

실험체 균열 및 파괴 상황을 각 실험체별로 나타내었고, 각각의 하중-변위 곡선을 분석하여 기준 실험체 Case1-RCFR 대비 CFCC X-브레이스로 보강된 실험체의 실험결과를 분석하였다.

3.3.1 Case1: RCFR 무보강

RCFR은 무보강 비교용 실험체이다. 본 실험체는 4cycle (R=0.15%)의 정가력에서 우측 기둥하단부에서 미세한 휨 균열이 발생하였고, 기둥 중앙부에서는 균열이 전혀 발생하지 않았다.

그 후 균열은 점차 기둥중앙부로 확대되었으며, 7cycle (R=0.31%)의 정가력에서 기둥 상부 중앙에 전단균열이 다수 발생하였다. 같은 사이클 부가력일 경우도 동일하게 상부 중앙에 전단균열이 다수 발생하였다. 부재각이 증가 되면서 전단균열이 점점 커지고, 전단 균열 수가 증가되었고, 폭 3mm을 넘는 전단균열이 다수 발생하였다.

14cycle (R=1.54)에서 기둥 양단부에 전단 균열의 폭이 매우 커지면서 콘크리트 피복이 박리되었으며, 15cycle (R=2%)에서 양기둥의 상부에 전단붕괴가 발생하였다.

3.3.2 Case2: CFCC-1 실험체 (평판형)

본 실험체는 CFCC를 이용한 평판형 X-브레이스 내진보강한 실험체이다. CFCC-1은 2cycle (R=0.1%)의 정가력에서 기둥 상하단부에서 미

세한 휨균열이 발생하였다. 그 이후 균열은 점차 증가하였으며, 4cycle (R=0.15%)에서 전단균열이 발생하기 시작하였다.

전단균열은 변위가 증가함에 따라 양 기둥 중앙부로 확대되었고, 13cycle (R=1.24%)에서 하중이 감소하기 시작하여 최종상태에 도달하였다.

3.3.3 Case3: CFCC-2 실험체 (돌출형)

본 실험체는 CFCC를 이용한 돌출형 X-브레이스 내진보강한 실험체이다. CFCC-2는 1cycle (R=0.08%)의 정가력 및 부가력에서 기둥 상하단부 미세한 휨균열이 발생하였다.

그 이후 2cycle, 3cycle에서도 미세한 휨균열이 발생하였으며, 4cycle에서 전단균열이 발생하기 시작하였다. 이후 전단균열은 10cycle까지 점차 증가하였으며, 전단균열은 변위가 증가함에 따라 양 기둥 중앙부로 확대되었고, 13cycle (R=1.24%)에서 하중이 감소하기 시작하여 최종상태에 도달하였다.

3.4 실험결과 분석

각각의 실험체의 정가력과 부가력 가운데 최대내력(극한하중)이 큰값을 사용하여 그 하중 변위의 포락곡선을 상호 비교하였으며, 그 결과를 Table 5, 6에 나타내었다. 그리고, Table 7에는 최대강도 시의 강도비, 변위비 및 예상 최대강도를 동시에 나타내었다.

Table 5, 6의 최대강도는 정가력과 부가력 중

Table 5 정가력 실험 결과

실험체	정가력		최종 파괴모드	
	극한하중 Vu [tonf]	극한변위 δu [mm]		
Case1	RCFR	16.3	32.9	전단파괴 및 붕괴
Case2	CFCC-1	26.3	33	골조 전단파괴
Case3	CFCC-2	27.5	31.2	골조 전단파괴

Table 6 부가력 실험 결과

실험체		부가력	
		극한하중 Vu [tonf]	극한변위 δu [mm]
Case1	RCFR	-16	-33.6
Case2	CFCC-1	-25.7	-26.2
Case3	CFCC-2	-29.3	-32.3

큰값을 나타내며, 기준실험체 대비 강도비를 나타낸다. 변위비는 최대강도 시의 변위를 나타내며, 기준실험체 대비 변위비를 각각 나타낸다.

무보강 실험체인 RCFR(Case-1)은 정가력에서 최대하중 16.3tonf (변위 32.9 mm)에 도달하였으며, -16tonf 및 -33.6mm인 부가력 경우와 큰 차이는 없었다. 실험체는 전형적인 전단 파괴 및 전단붕괴를 보여주었으며, 이는 대상 학교건물인 비내진상세를 가지는 1980년대 건설된 학교건물이 매우 취약적인 파괴모드를 나타내어 주는 중요한 자료라고 판단된다.

CFCC를 이용하여 평판형으로 내진보강한 Case-2 실험체도 최종적으로 골조가 전단파괴 모드를 보여주어, CFCC 내진보강법은 전형적인 강도보강법이라고 판단된다.

Case-2(CFCC-1) 실험체의 최대하중은 정가력에서 26.3tonf, 최대하중 시의 변위는 33mm이며, -25.7tonf 및 -26.2mm를 보여준 부가력인 경우와 큰 차이는 없었다.

Case-3, 즉 CFCC-2 실험체는 돌출형 내진보강법으로 내진보강한 실험체로써 CFCC-1 실험체인 평판형과 동일하게 골조가 최종적으로 전단파괴에 의해서 파괴모드가 결정되었으며, 최대내력은 CFCC-1 실험체보다 약간 높지만(부가력에서 -29.3tonf) 큰 차이는 없었다.

다음 Fig. 7 및 Table 7에 의하면, 기준실험체 대비 CFCC 평판형 내진보강법은 약 1.6배정도, CFCC 돌출형은 약 1.8배정도 내력이 증가하여 양쪽 모두 유사하며, 또한 변위비도 양쪽

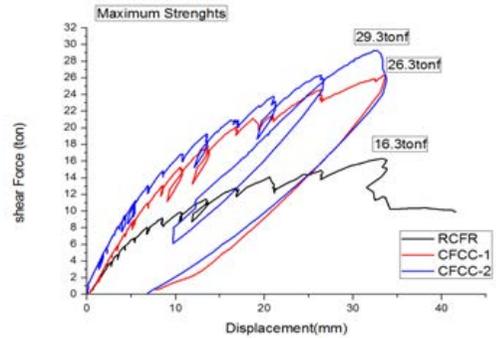


Fig. 7 최대내력과 변위의 포락곡선 상호 비교

Table 7 강도비 및 변위비의 비교

실험체	실험결과		
	최대강도×1 (tonf)	최대강도비×1 (tonf)	변위비×1
RCFR	16.3	1.00 (16.3/16.3)	1.00 (32.9/32.9)
CFCC-1	26.3	1.61 (26.3/16.3)	1.00 (33/32.9)
CFCC-2	29.3	1.8 (29.3/16.3)	0.98 (32.3/32.9)

모두 기준실험체와 거의 동일하다. 본 연구에서 개발한 평판형 및 돌출형 내진보강법 모두 기준 실험체 대비 약 1.7배의 강도가 증가하여 보강 효과가 우수한 공법이라고 판단되며, 변위비가 동일하다는 사실을 고려한다면 전형적인 강도저항형 내진보강방법이라고 판단된다.

4. 결론

본 고의 목적은 탄소섬유 케이블을 이용한 X-브레이스 내진보강공법의 내진성능에 대한 유효성을 재료시험 및 구조시험을 실시하여 평가·검증한 결과를 제시함에 있으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

내진보강에 사용된 탄소섬유 케이블은 탄소섬유와 열경화성 수지를 복합화하여 성형한 케이블로 부식에 매우 강하여 유지관리가 거의 필요

없으며, 산이나 알칼리에 대한 저항능력이 탁월하여 해안지역 및 염해지역 시공시 내구성이 우수하다. 그리고 기존구조물에 부가적인 하중이 거의 생기지 않기 때문에 기초공사가 필요 없이 간단하게 조립·시공할 수 있는 것이 큰 특징이다. 탄소섬유 케이블의 직경을 변경함으로써 다양한 인장내력을 발휘시킬 수가 있어서 내진보강 목적에 대응한 내진보강이 가능한 것으로 검토되었다.

본 고에서 제시된 평판형 및 돌출형 내진보강법 모두 기준실험체 대비 약 1.7의 강도가 증가하여 보강효과가 우수한 공법이라고 사료되며, 변위비가 동일하다는 사실을 고려한다면 전형적인 강도저항형 내진보강공법이라고 판단된다.

향후 본 고에서 제안된 내진보강공법이 실용화 될 경우 학교시설을 포함하여 콘크리트 구조물 또는 플랜트 등의 내진보강 분야에 크게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 교육과학기술부, 한국교육개발원. “학교시설 내진성능 및 내진보강 가이드라인”, 2011.
2. 동경로프 카다로그, “Carbon Fiber Composite Cable”.
3. 이강석 등, 「국내 철근콘크리트 건물의 내진안전성 평가에 관한 연구」, 한국콘크리트학회 가을 학술발표 논문집, 2010.
4. Lee, K. S., “Seismic Capacity Requirements for Low-rise Reinforced Concrete Buildings Controlled by both Shear and Flexure”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 1, 2010, pp.75-91.
5. Lee, K. S., Nakano, Y., Kumazawa, H. and Okada, T., “Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings Damaged by the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake (Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings on Awaji Island)”, Journal of Structural Engineering, Architectural Institute of Japan, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 42B, 1996 (in Japanese).

담당 편집위원: 진남희
 ((재)한국건설품질연구원)
 nhjin70@hanmail.net