

탄소섬유쉬트 올방향에 따른 콘크리트 기둥 보강성능

The Strengthening Effects of Concrete Columns Confined with Carbon Fiber Sheets along the Fiber Direction

김 양 중* 홍 갑 표
Kim, Yang-Jung* Hong, Gap-Pyo

Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seodaimoon-ku, Seoul, 120-749, Korea

Abstract

Carbon, Aramid, Boron and Glass fibers are used as fibrous materials to promote structural bearing strength. Of these fiber types, carbon fiber is the most commonly used material, and is characterized by having a one-way direction, which is strengthened by tensile strength due to the attached direction only, while other types of fibers are two-way. Therefore, when applied in the field, the attachment direction of fiber is a very important factor. However, when fiber direction is not mentioned in the design drawing, there sometimes is no improvement in structural strength, as the fiber is being installed by a site engineer or workers who lack structural knowledge. The purpose of this study was to propose an optimal direction of carbon fiber through a comparison & analysis of reinforcing efficiency with reinforced experimental columns that used carbon fibers in each of the inclined, horizontal and vertical directions. According to the results, horizontal direction in the reinforced column was improved by 153.43%, but vertical direction was 104.61% only, and it was understood this was due to increased tensile strength along the fiber direction. For this reason, it is necessary to include information regarding fiber direction in design and site management.

Keywords : strengthening, carbon fiber sheet reinforcing, carbon fiber, sheet reinforcing

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

철근콘크리트 구조물은 시공직후 또는 사용 중 시간의 경과에 따라 화학적, 물리적 요인에 의한 노후화가 진행되어 단면감소 또는 내력저하 등의 성능이 저하되는 경우가 빈번하며, 특히 압축력을 받는 기둥부재의 경우 콘크리트의 강도가 증가할수록 증대되는 재료의 취성적 특성의 영향을 받아 급격한 파괴거동을 나타내므로 보수 및 보강을 필요로 하는 경우가 발생한다[1].

내하력이 부족한 철근콘크리트 부재의 내력증진 보강방법

으로 단면증대, 강판부착, 섬유부착, 강선 텐서닝 및 보강메쉬 부착에 의한 방법 등이 있으며, 이중에서도 섬유보강공법은 경량재로서 시공이 간편하고 가격이 저렴하여 현장 적용성이 좋으므로 많이 쓰이고 있다. 보강섬유 쉬트는 탄소섬유와 아라미드섬유 브론섬유 및 유리섬유 등이 있으며, 특히 탄소섬유 쉬트는 철의 약 10배의 인장강도를 지니면서도 중량이 철의 1/4정도로서 국내에서 생산되어 가장 많이 쓰이고 있다[2]. 그러나 아라미드, 브론 및 유리섬유 쉬트들의 섬유율은 2방향성인 반면 탄소섬유 쉬트의 올은 1방향성으로서 보강부재에 부착되는 섬유율의 방향으로만 인장내력에 의해 보강되는 것이므로 현장적용 시 섬유율의 부착방향이 구조적 보강 성능상 매우 중요한 요소가 된다[3].

1995년 국내 탄소섬유가 도입되던 초기에 탄소섬유방향에 따른 콘크리트 압축부재의 강도증진효과에 대한 연구 결과가 논문으로 발표된바 있으나[4] 이는 수평 및 수직방향을 변수로 하였으며, 2006년 탄소섬유의 올방향을 0°~90°의 변수로 탄소섬유 쉬트 및 에폭시레진에 의해 선 제작된

Received : January 18, 2011

Revision received : July 17, 2011

Accepted : July 20, 2011

* Corresponding author : Kim, Yang-Jung

[Tel : 82-2-423-1799, E-mail: yjkim7573@hanmail.net]

©2011 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

튜브를 이용하여 만들어진 원형기둥 실험체로 압축재의 성능평가에 대한 연구[5]가 있었으며, 2008년 탄소섬유 슈트를 60° 방향으로 보강한 실험체에 대한 압축성능 평가에 대한 연구[6]가 있었을 뿐, 그 이후 이에 대한 연구가 활발치 못하여 섬유를 방향성에 대한 중요성이 현장적용에 제대로 인식되지 못함에 따라 여전히 안전진단 또는 구조보강 설계 시 섬유를 방향에 대한 뚜렷한 도시나 명시가 없는 경우가 많아 구조적 지식이 없는 현장기술자 또는 인부들의 무개념적인 판단만으로 시공되는 사례가 빈번하며, 특히 탄소섬유슈트의 제품이 폭 50cm의 롤 형태로 출하되기 때문에 재료손실이 적고 작업이 용이한 방향으로 절단 및 가공 후 보강작업이 이루어지므로 보강성능을 전연 확보하지 못하는 사례가 종종 발생되고 있는 실정이다[3].

따라서 본 연구에서는 탄소섬유 올의 방향성에 대한 중요성을 재인식시킴과 아울러 기존의 연구가 수평 및 수직방향[4], 탄소섬유슈트 튜브에 의한 원형단면[5], 60° 방향[6]의 실험체에 국한되었던 반면 현장에서의 제품 절단가공시의 절단조각 사용에 따른 수평 및 수직과 45° 경사방향을 변수로 실제구조물에 많이 적용되는 각형기둥을 채택하여 보강성능을 검토하였으며, 이를 통하여 올 방향에 대한 최적의 보강설계 방안을 제시하고자 하는 것을 목적으로 한다.

1.2 기존 보강섬유에 관한 고찰

탄소섬유슈트는 다른 보강섬유에 비하여 인장강도가 35.3MPa로서 가장 뛰어나며 특히 국내생산시설이 풍부하고 무수지형 탄소섬유는 국제특허 제품으로서 해외로 수출되는 등 가장 많이 쓰이고 있다. 기존 보강섬유슈트의 종류별 특성 및 탄소섬유슈트의 규격별 물리적 특성은 Table 1 및 2와 같다[3,7,8].

Table 1. Classifications of reinforcing fiber sheet

Type	Specification	Tensile strength
Carbon fiber sheet	Inorganic high strength, durability, low strain, high fatigue strength	35.3 MPa
Glass fiber sheet	Inorganic glass fiber, low alkalic, good barrier property.	19.6 MPa
Bron fiber sheet	Inorganic steel fiber, heat resistant, light weight structural material.	34.5 MPa
Aramid fiber sheet	Organic synthetic polyaramid fiber, anti-chemistry, heat resistant	26.6 MPa

Table 2. Physical properties of carbon fiber sheet

Description	Middle strength		High strength	
Weight (g/m ²)	200	300	200	300
Gravity (g/cm ³)	1.80	1.80	1.82	1.82
Thickness (mm)	0.11	0.167	0.11	0.167
Tensile strength (kgf/cm width)	300	456	390	590
Tensile elasticity strength (kgf/cm w)	25,850	39,250	25,850	39,250

1.3 연구의 범위 및 방법

탄소섬유보강은 콘크리트의 슬래브, 보 및 기둥뿐 만 아니라 철제빔의 휨보강에도 많이 사용되고 있다. 그러나 탄소섬유제품이 폭 50cm의 롤 형태로 출하되어 슬래브나 보의 휨보강 작업인 경우 섬유를 방향대로 작업이 이루어져 그다지 문제되지 않으나, 구조적으로 가장 중요한 압축부재인 기둥에서도 섬유를 방향대로 수직 또는 경사방향을 보강이 흔히 이루어지고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 시공상의 방향성에 대한 변수가 가장 많은 기둥을 연구대상으로 탄소섬유 올의 부착방향을 실험변수로 하여 각기 방향에 따른 보강성능을 비교 분석하여 섬유를 방향에 대한 최적의 보강설계 방안을 제시하고자 하는 것으로서 섬유올의 45° 경사, 수평 및 수직 방향별로 보강된 기둥 실험체를 Figure 3~6과 같이 10,000kN의 만능시험기(UTM)를 이용하여 가력에 따른 파괴양상 및 파괴강도와 변형량을 도출하고 무보강 표준실험체와 대비분석하는 방법으로 섬유를 방향이 보강성능에 미치는 영향을 대비 분석 하였다.

1.4 재료 역학적 고찰

횡 구속된 콘크리트의 압축강도를 예측하는 식은 Richart 등에 의해서 제안된 식(1)이 많은 연구에서 사용되고 있다[6].

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \tag{1}$$

식(1)에서 f_{cc} 는 횡 구속된 콘크리트의 압축강도를, f_{co} 는 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도를, k_1 은 구속 압계수를, f_l 은 구속에 의한 횡구속압을 나타낸다[6].

이정훈 등은 상기식의 양변을 콘크리트의 순수 압축강도로 나누어서 횡구속 효과와 횡구속비에 대한 식 (2)를 기본으로 가정하고 횡구속효과에 대한 비선형거동을 표현하기 위하여 지수함수 계수인 p를 도입하였다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^p \quad (2)$$

위 식의 변수인 k_1 과 p 의 값을 카본슈트의 배치각도에 따른 실험결과와 회귀분석을 수행하여 다음과 같은 카본슈트의 각도와 슈트의 장수에 따라 구속된 콘크리트의 압축응력을 계산하는 식을 제안하였다[5].

$$0^\circ \quad f_{cc} = f_{co} [1 + 0.66 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.30}] \quad (3)$$

$$30^\circ \sim 90^\circ \quad f_{cc} = f_{co} [1 + 1.26 \theta^{0.49} \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.30}] \quad (4)$$

상기의 식 (3)과 (4)에 따르면 탄소섬유 보강슈트의 섬유를 배치각도에 따른 거동은 섬유율이 횡방향에 가까울수록, 즉 각도가 커질수록 극한강도가 증가하게 됨을 알 수 있으므로 본 연구실험에서도 수평방향의 파괴하중이 가장 크며 경사방향이 그 다음인 것으로 예측된다.

2 실험 개요

2.1 사용 재료 및 기기

본 연구를 위한 실험체 제작용 시멘트는 비중 3.14, 분말도가 $3,250\text{cm}^2/\text{g}$ 인 국내 H사 제품의 제1종 포틀랜드 시멘트이며, 콘크리트의 사용재료 구성은 재령 20여년이 경과된 기존구조물들의 단위수량 등 당시의 현장 시공상황을 고려하여 21MPa의 일반강도 콘크리트를 기준으로 Table 3과 같이 하였으며, 기건양생 재령 28일로 하였다. 또한 보강섬유용 탄소섬유슈트는 섬유중량 $200\text{g}/\text{m}^2$ 의 무수지 고강도 탄소섬유슈트(NR72)를 사용하였으며, 탄소섬유 부착 전용 에폭시 프라이머 및 수지를 사용하였다. 본 실험에 사용된 탄소섬유슈트 및 에폭시수지의 재료적 특성은 Table 4 및 5와 같다.

Table 3. Mixing proportion of concrete

W/C (%)	S/a (%)	Weight proportion (kg/m^3)				Air (%)
		W	C	S	G	
60	42	196	328	671	1123	4±1.5

Table 4. Physical properties of carbon fiber sheet (NR72)

Description	Weight (g/m^2)	Gravity (g/cm^3)	Thickness (mm)	Elasticity ($\times 10^6 \text{kg}/\text{cm}^2$)	Breaking Strain (%)	Tensile strength (kgf/cm^2)
High strength (NR72)	200	1.82	0.11	2.35	1.5	35,500

Table 5. Physical properties of epoxy resin

Elongation (%)	Tensile elasticity strength (kgf/cm^2)	Density (g/cm^3)	HDT ($^\circ\text{C}$)	Tensile strength (kgf/cm^2)	Compressive strength (kgf/cm^2)	Bending strength (kgf/cm^2)
2.0	28,000	1.16	76	500	880	800
KSM 3006-93	ASTM D683	ASTM D792	ASTM D648	KSM 3006-93	KSM 3015-92	KSM 3006-93

2.2 실험체 종류 및 제작

실험체는 Figure 1의 단면상세 도시와 같이 규격은 $150 \times 150 \times 550\text{mm}$ 로서 4-D13규격의 이형철근을 주근으로 사용하였으며 띠철근은 #10 철선을 @120으로 배근하였고 콘크리트는 Table 3의 배합설계에 따라 제작하였다. 또한 본 실험체의 표준강도 산정을 위하여 KSF 2405에서 표준으로 제안하고 있는 $\varnothing 150 \times 300$ 규격의 표준공시체 3개를 실험체 제작 시 동시에 제작하였다.

보강실험체는 Table 6 및 Figure 2의 도시와 같이 탄소섬유 올의 방향에 따라 무보강과 45° 경사방향과 수평 및 수직방향의 4개 종류로 각 종류별 2개씩 8개의 보강실험체를 탄소섬유 전문용 에폭시 프라이머 및 수지를 이용하여 1겹으로 부착 제작하고 7일간 양생하였다.

Table 6. Specimen design

description	Model no.	Size	Fiber direction
Column	CR1-A, B	$150 \times 150 \times 550$	Non reinforced
	CR2-A, B	"	Inclined direction
	CR3-A, B	"	Horizontal direction
	CR4-A, B	"	Vertical direction

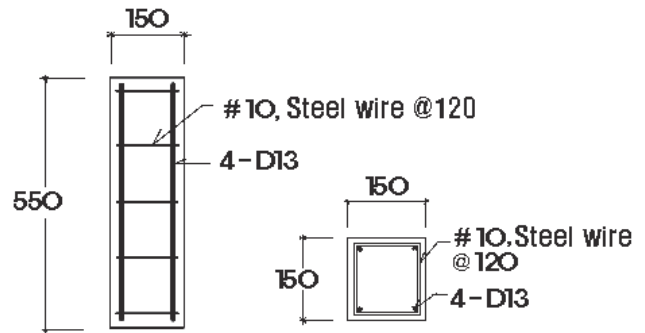


Figure 1. Section details of column specimen

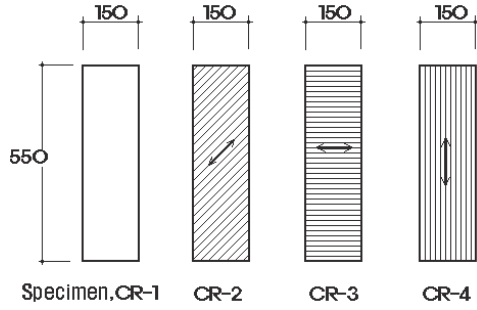


Figure 2. Direction details of reinforced column specimens

2.3 실험 방법

본 연구에서는 시공상의 방향성에 대한 변수가 가장 많은 기둥부재를 대상으로 탄소섬유 올의 방향에 따라 무보강과 45° 경사방향과 수평 및 수직방향으로 보강된 4가지 종류로 각 종류별 2개씩 8개의 보강실험체를 제작하여 Figure 3~6과 같이 10,000kN의 만능시험기(UTM)를 이용하여 압축가력에 따른 파괴양상 및 파괴하중과 변형량을 도출하고 이에 의한 하중-변위곡선을 작성하여 무보강 표준실험체와 보강실험체간 상호 대비분석하는 방법으로 섬유올 방향에 따른 보강성능을 분석하였다.



Figure 3. Non reinforced specimen (CR1-A)



Figure 4. Inclined reinforced specimen (CR2-A)



Figure 5. Horizontal reinforced specimen (CR3-A)

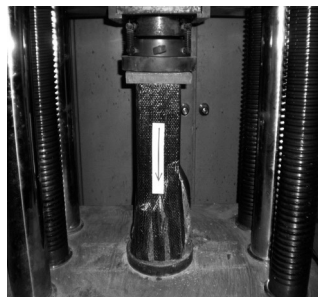


Figure 6. Vertical reinforced specimen (CR4-A)

3. 실험 결과 및 분석

3.1 표준강도

본 실험체 콘크리트의 표준강도 산정을 위한 KSF2405에 따른 $\varnothing 150 \times 300$ 규격의 표준공시체 3개를 만능시험기(UTM)를 이용하여 가력 시험결과 Table 7과 같이 도출된 파괴강도의 평균값은 21,20MPa로서 재령 20여년의 기존 건축구조물의 압축강도와 유사하였다.

Table 7. Result of mould concrete specimen

Mould	Size	Mould section area (cm ²)	Compression strength (MPa)
#1	#1-01	$\varnothing 150 \times 300$	21.6
	#1-02	"	21.2
	#1-03	"	20.8
	Average	176.6	21.2

3.2 보강실험체의 파괴 양상

보강실험체의 하중가력 실험결과 파괴양상은 탄소섬유 올의 직교방향으로 인장응력이 작용하여 섬유올이 뜰어지며 파괴되는 양상을 보였으며, 대표적으로 수직방향의 보강인 경우 섬유올의 접합면보다 섬유올이 먼저 뜰어지며 파괴되는 양상을 보인 반면 수평방향의 보강인 경우에는 접합면의 이격현상이 먼저 나타나면서 2차적으로 섬유올이 직교방향으로 뜰어지는 양상을 보였다. 경사방향의 보강인 경우에는 접합면의 이격과 동시에 섬유올이 뜰어지며 파괴되었다. 각 보강실험체별 파괴양상의 모습은 다음의 Figure 7, 8, 9 및 10과 같다.

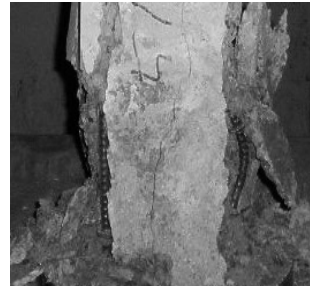


Figure 7. Non reinforced specimen (CR1-A)

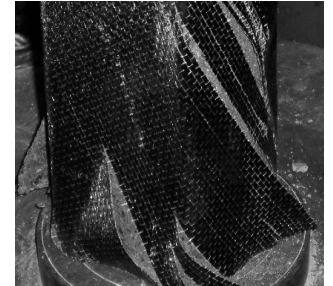


Figure 8. Inclined reinforced specimen (CR2-A)



Figure 9. Horizontal reinforced specimen (CR3-A)

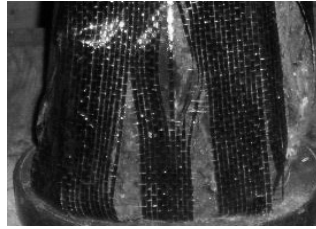


Figure 10. Vertical reinforced specimen (CR4-A)

3.3 가력실험 결과 하중-변위곡선

가력실험 결과 전체적으로 무보강 시험체에 비하여 보강 시험체의 파괴강도는 증가하지만, 수직방향 보강에 비해 경사 및 수평방향의 보강시험체가 더 증가함을 알 수 있었으며, 이러한 파괴강도의 증가에 비하여 변형량은 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 탄소섬유쉬트에 의한 콘크리트 횡보강 효과에 의한 것으로 사료된다. 각기의 보강 실험체별 하중-변위곡선은 다음의 Figure 11~14와 같다.

3.3.1 무보강 실험체의 응력-변위곡선

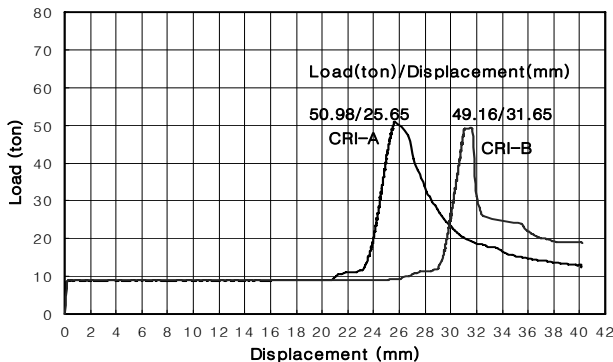


Figure 11. Load displacement curve of CR1-A & B

3.3.2 45°경사보강 실험체의 응력-변위곡선

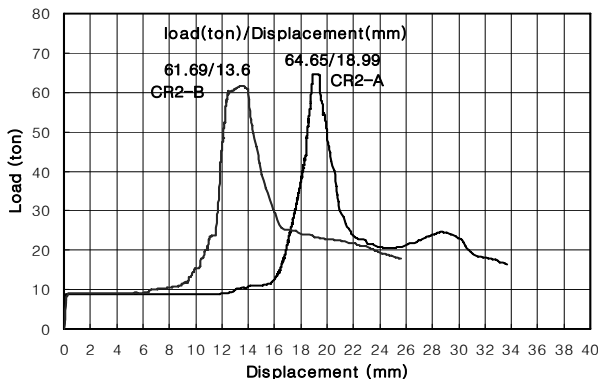


Figure 12. Load displacement curve of CR2-A & B

3.3.3 수평방향 보강실험체 응력-변위곡선

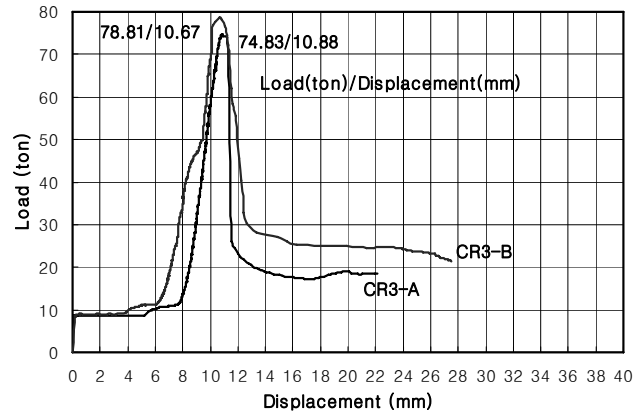


Figure 13. Load displacement curve of CR3-A & B

3.3.4 수직방향 보강실험체의 응력-변위곡선

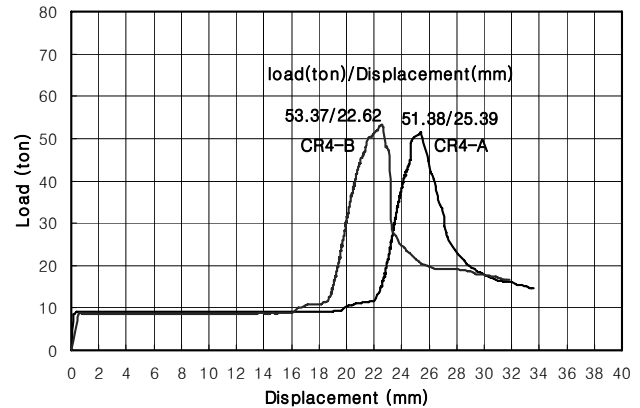


Figure 14. Load displacement curve of CR4-A & B

3.4 성능 대비

탄소섬유 을 방향에 따른 각 실험체에 대한 보강성능을 무보강 실험체의 평균 파괴하중 50.07ton을 기준으로 대비 분석한 결과 Figure 15 및 16과 같이 섬유 을 방향이 수평방향으로 보강된 경우 파괴하중 76.82ton으로서 무보강 실험체에 비하여 153.43%의 보강력 증진으로 보강효과가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 경사방향으로 보강된 경우 파괴하중 63.17ton으로서 126.16%의 보강증진 효과가 있는 반면 수직방향으로 보강된 경우에는 파괴하중이 겨우 52.38ton으로서 보강증진이 104.61%에 불과하여 수직방향 보강인 경우에는 거의 보강효과가 없는 것으로 볼 수 있다.

본 실험은 중량 200g/m²의 고강도 탄소섬유 1겹 보강 실험체에 대한 것으로서 중량 300g/m² 제품 또는 2겹의 보강과 같이 탄소섬유쉬트의 보강비가 증진하게 되면 보강성능

도 함께 향상될 것으로 기대되며, 이에 따라 섬유 방향에 따른 보강성능도 차이가 있을 것으로 예상된다.

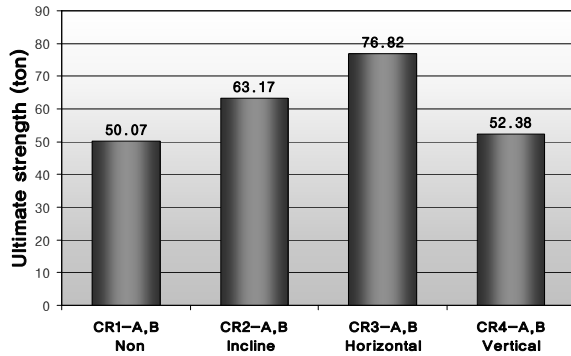


Figure 15. Comparison of ultimate strength

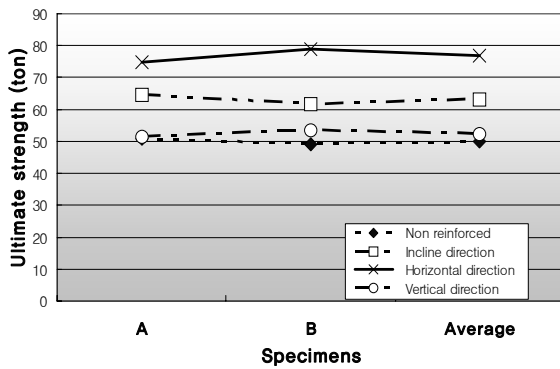


Figure 16. Ultimate strength of each specimen

파괴시 실험체별 변형량은 Figure 17과 같이 수평방향 보강실험체가 10.78mm로서 무보강 실험체 변형량 28.65mm의 37.62%로 가장 적었으며, 경사방향 실험체의 변형량은 16.34mm로서 57.03%로 나타났다. 그러나 수직방향 실험체의 변형량은 24mm로서 83.77%로 나타났다.

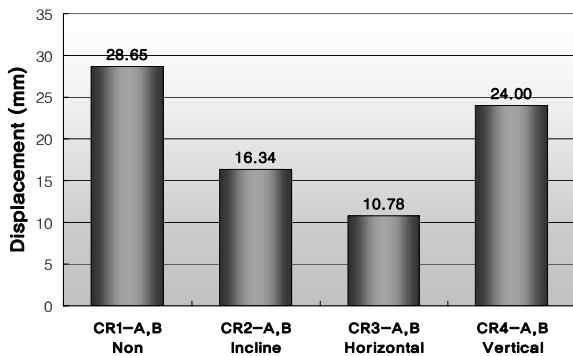


Figure 17. Comparison of maximum displacement

보강 실험체별 보강효과와 변형량의 관계는 수평방향인 경우 보강효과가 153.43%로서 가장 우수한 반면 최대 변형량은 37.62%로서 가장 적었으며, 수직방향인 경우 보강효과가 104.61%로서 거의 없었으며 최대변형량 역시 83.77%로서 무보강인 경우와 별 차이가 없었다.

4. 결론

탄소섬유시트 부착에 의한 보강작업은 섬유를 1방향성 제품이 폭 50cm의 롤 형태로 출하되어 보강공사 현장에서는 재료손실이 적고 작업이 용이한 방향으로 절단가공하여 부착하므로 보강성능을 전연 확보하지 못하는 사례가 종종 발생하는 실정이며[3], 특히 압축부재인 기둥에서도 수직방향 보강이 흔히 이루어지고 있으나, 시공관리기술자의 구조적 지식결여로 이를 간과하는 사례가 빈번하다.

이에 따라 본 연구에서는 시공상 방향성에 대한 변수가 가장 많은 기둥을 대상으로 탄소섬유 올의 부착방향을 실험 변수로 보강성능을 비교 분석하여 섬유 방향에 대한 최적의 보강설계 방안을 제시코자 하는 목적으로 각 기둥 실험체별로 경사, 수평 및 수직방향으로 부착 보강하고 가력에 따른 파괴양상과 파괴강도 및 파괴시의 변형량을 무보강실험체와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 탄소섬유시트보강은 섬유를 방향에 따라 무보강실험체에 비하여 내력증진효과를 나타내어 콘크리트기둥 부재에서 탄소섬유 올 방향의 인장내력 증진에 따른 횡구속 효과에 의해 보강효과를 얻을 수 있다.
- 섬유올의 방향이 수평 및 경사방향인 경우 153.43% 및 126.16%의 보강효과를 나타낸 반면 수직방향인 경우 불과 104.61%로서 구속효과가 거의 없다.
- 보강부재의 하중가력시 변형량이 수평 및 경사방향 순으로 적었으나 수직방향인 경우 무보강인 경우와 거의 근사하게 거동하였다.
- 수평보강인 경우 보강시트의 접착면이 먼저 이격되며 파괴되고 경사방향인 경우 이격과 파괴가 동시에 나타난 반면 수직보강인 경우에는 접착면보다 섬유올이 먼저 직교방향으로 뜰어지며 파괴되는 양상을 보여 탄소섬유 보강 시 에폭시의 접착성보다 섬유방향성이 보강성능에 더욱 중요한 요소가 된다.
- 탄소섬유올의 방향성에 대한 학계의 다양한 연구와 아

올려 탄소섬유шит 보강설계 시 탄소섬유의 올방향에 대한 뚜렷한 명시가 필요하며, 이에 대한 철저한 현장 관리가 요구된다.

요 약

구조물의 내력증진 방법으로 적용되는 섬유재료에는 탄소 섬유와 아라미드섬유 브론섬유 및 유리섬유 등이 있다. 이 중에서도 탄소섬유는 가장 많이 쓰이는 재료로서 다른 종류의 섬유율이 2방향성인 반면 탄소섬유 올은 1방향성으로서 부착되는 섬유율 방향으로만 인장내력에 의해 보강되므로 현장적용 시 섬유율의 부착방향이 매우 중요한 요소이나 보강설계 시 이에 대한 뚜렷한 도시가 되지 않아 구조적 지식이 없는 현장기술자 또는 인부들의 무개념적인 시공으로 보강성능을 전연 확보하지 못하는 사례가 종종 발생되곤 한다.

본 연구는 콘크리트 기둥에 대한 탄소섬유шит 방향에 따른 보강성능을 파악코자 각 실험체별로 섬유 올의 경사, 수평 및 수직방향으로 보강한 후 가력을 통한 보강성능을 비교 분석하여 섬유율 방향이 보강성능에 미치는 영향을 대비 분석함으로서 섬유방향에 대한 최적의 보강설계 방안을 제시하고자 하였으며, 실험결과 수평방향의 보강성능은 153.43%인 반면 수직보강은 겨우 104.61%로서 거의 보강 효과가 없는 것으로 나타났다. 이는 섬유율 방향의 인장내력 증진에 따른 구속효과에 의한 보강효과로서 보강설계와 현장관리에 철저한 관리가 절대적이다.

키워드 : 구조보강, 탄소섬유보강, 탄소섬유, 섬유보강

References

1. Jang JS, Jo SC, Joo SS. A Study on the Strength Characteristics of Reinforced Concrete Columns Confined with Carbon Fiber Sheets, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 2001 May;5(3):163-71.
2. Korea Concrete Institute(KR). [Concrete Inspection and Maintenance]. Seoul (Korea): Gimundang; 2005. p. 460-2. Korean.
3. Kim YJ. [Facility Maintenance Engineering]. Seoul(Korea): Mirim Publishing Co.; 2007. p. 540-7. Korean.
4. Shin YS, Hong KS, Hong YK, Choi YC. The Strength Effects of Concrete Confined with Carbon Fiber Sheets, Journal of Architectural Institute of Korea, 1995 Oct;11(10):323-8.
5. Lee KH, Kim HC, Hong WK. Capacity Evaluation of Compressive Member Confined by Carbon Sheet Tube, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 2006 May;10(3):152-8.
6. Yoo YJ, Lee KH, Kim HL, Lee YH, Hong WK. Experimental Study on Compressive Strength of Concrete Column Retrofitted by Carbon FRP Sheet, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 2008 May;12(3):119-26.
7. Korea Institute for Structural Maintenance Inspection(KR). [Korea Structural Maintenance and Inspection Engineering]. Seoul (Korea): Kumiseokan; 2006. p. 383-90. Korean.
8. Na JM. Retrofitting Effectiveness for Reinforced Concrete Members using Carbon Fiber Sheet [dissertation]. Seoul (Korea): HanYang University; 2002. p. 86-97.