

콘크리트 합성 유리섬유 복합소재 압축부재의 거동특성 Structural Characteristics of Concrete Filled GFRP Composite Compression Member

이성우* 최석환** 손기훈*** 김성태****
Lee, Sung Woo Choi, Suk Hwan Son, Ki Hoon Kim, Sung Tae

ABSTRACT

Due to many advantage of advanced composite material, research on the composite compression member is initiated. In this paper structural characteristics of concrete filled glass fiber reinforced composite tubular member is studied. Through 4-point flexural test with various level of axial force, the performance of composite compression member was analyzed. Also numerical method to find P-M diagram of composite compression member was developed. It is demonstrated that result of numerical method agree well with experimental results.

1. 서 론

강재의 부식과 철근콘크리트의 열화로 인한 노후화는 구조물의 내구성 저하와 유지관리 비용의 상승을 유발하므로 이러한 문제를 근원적으로 해결할 수 있는 복합소재를 건설분야에 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 경량 내부식 고강도 특성을 보유한 유리섬유를 이용하여 고부식 해양환경 하에서 기존 재료의 문제점을 극복할 수 있는 복합소재 해상파일개발의 일환으로 복합소재 압축부재의 단주압축실험, 휨실험, 휨-압축실험을 수행하고, 이를 설계내력과 비교분석하였다.

2. 제작방법 및 내력설계

2.1 제작방법

복합소재 개선 압축부재 모델의 제작은 휨 및 압축에 대하여 최적화된 단면구조를 가지도록 설계하였다. 축방향에는 휨에 효과적으로 저항할 수 있게 축방향과 일치하는 방향으로 유리섬유 직포를 배치하였고, 압축부재 모델의 원주방향에는 압축력에 효과적으로 저항하도록 필라멘트 와인딩 성형공정^[1]으로 유리섬유를 배치하였다. 복합소재 압축부재는 제작된 복합소재 튜브에 설계강도 420kg/cm²의 굳지 않은 콘크리트를 충전한 후, 28일간의 양생과정을 거쳐 완성하였다.

2.2 유리섬유 복합소재 압축부재의 내력설계

복합소재 압축부재의 내력설계를 위하여 국내에서 실험이 가능한 압축부재의 현실적 크기를 감안하여, SPS400 강재를 사용한 KS D3566 일반구조용 탄소강관을 목표 강관압축부재로 선정하였다^[2]. 목표강관파일의 단면성질과 물성치는 표1에 나타냈으며, 구조 내력은 표2에 도시하였다.

표1 목표강관파일(SPS400)의 단면성질과 물성치

외경 (O.D)	165.2 mm	인장강도 σ_u	4100 kg/cm ²
강관두께	5.65 mm	항복강도 σ_v	2400 kg/cm ²
단면적	28.32 cm ²	허용강도 σ_a	1400 kg/cm ²
단면 2차 모멘트 I	902cm ⁴	탄성계수 E_s	2.1×10 ⁶ kg/cm ²

복합소재 압축부재의 내력설계에선 그림 1의 복합소재 압축부재 합성단면의 응력변형을 분포가정에 따라

* 정회원 · 국민대학교 건설시스템 공학부 교수

** 국민대학교 건설시스템 공학부 전임강사

*** 국민대학교 건설시스템 공학부 박사과정

****국민대학교 건설시스템 공학부 공학석사

압축응력 블록에 구속효과에 따른 강도증가를 감안한 강도증가계수(C_m)^[2]를 제안하여, 다음의 설계식으로 복합소재 압축부재 모델을 설계하였다. 표2, 표3은 이에 따른 복합소재 튜브의 적층설계와 적층구조를 보여주고 있으며, 표 4는 목표강관과 복합소재 압축부재 모델의 설계 구조내력을 보여주고 있다.

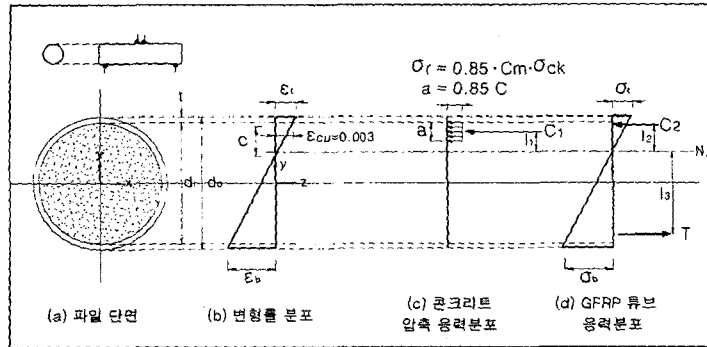


그림1 복합소재 압축부재 합성단면의 응력 및 변형률 분포가정

1) 모멘트 내력 계산식 :

$$M = C \cdot l = T \cdot l$$

압축력 : i) 콘크리트 압축력 :

$$C_1 = (0.85C_m \sigma_{ck}) A_c, \quad C_m = 1.2$$

ii) 복합소재 압축력 :

$$C_2 = \int \sigma(\theta) dA = 2 \int_0^{\theta_1} \sigma(\theta) tr d\theta$$

$$C = C_1 + C_2$$

$$l_c = \frac{C_1 \cdot l_1 + C_2 \cdot l_2}{C_1 + C_2}$$

인장력 : i) 복합소재 인장력 :

$$T = 2 \int_0^{\theta_2} \sigma(\theta) tr d\theta$$

$$l_3 = \frac{2 \int_0^{\theta_2} \sigma(\theta) tr^2 \cos \theta d\theta}{T}$$

모멘트 팔길이 :

$$l = l_c + l_3$$

2) 압축내력 계산식 : $P = C_m \times \sigma_{ck} \times A_c + \sigma_{s, \epsilon=0.0035} \times A_s$

3) 전단내력 계산식 : $V_s = (2 \times t \times d) \times \sigma_y$

표2 복합소재 압축부재 튜브의 적층설계

제작방법	수적층모델	필라멘트 와인딩모델	개선 압축부재모델
섬유 부피비(%)	30	30	30
방향별	0°	5.58	7.39
두께(mm)	90°	1.54	3.46
총두께(mm)	7.12	10.85	8.03
layer방법	유리섬유 직포 적층	유리섬유사 와인딩	L900-5PLY FW-2PLY
Ex(kg/cm ²)	2.0*×10 ⁵	1.70×10 ⁵	2.37×10 ⁵
Ey(kg/cm ²)	8.55×10 ⁴	1.06×10 ⁵	1.76×10 ⁵
Gxy(kg/cm ²)	1.51×10 ⁴	1.91×10 ⁴	4.85×10 ⁴
NUxy	0.16	0.165	0.22

표3 개선압축부재 모델의 복합소재 적층구조

파일 내부면 (콘크리트 부착면)	
1st ply	L900 유리섬유 직포 적층 (0°)-HL
2nd ply	L900 유리섬유 직포 적층 (0°)-HL
3rd ply	L900 유리섬유 직포 적층 (0°)-HL
4th ply	L900 유리섬유 직포 적층 (0°)-HL
5th ply	L900 유리섬유 직포 적층 (0°)-HL
6th ply	원주방향 와인딩(90°)-FW
7th ply	원주방향 와인딩(90°)-FW

표4 목표 강관파일과 복합소재 개선 압축부재 모델의 설계 구조내력 비교

구분	두께(mm) Vf 30%	휨내력(kg · cm)	압축내력(kg)	전단내력(kg)
목표 강관파일	5.65	261,600	68,000	19,635
개선 압축부재모델	8.03	277,748(1.06)	137,286(2.02)	51,396(2.62)

()안의 수치는 목표 강관파일 내력 대비

3. 구조성능 실험

3.1 단주압축강도 실험

단주압축강도 실험은 5개의 복합소재 개선 압축부재 합성압축 공시체를 제작하여 실험하였다. 실험에는 최대하중 500ton의 용량을 갖는 Instron사의 장비를 사용하였고, 변위조건을 이용한 하중 재하속도는 0.5mm/min였다. 직경대 높이비 1:2의 합성압축 공시체 중앙부에 변형을 측정계이지를 부착하여 축방향 변형률과 횡방향 변형률을 측정하였다. 그림 2는 합성압축 공시체 압축강도 실험 모습을 보여주고 있다.

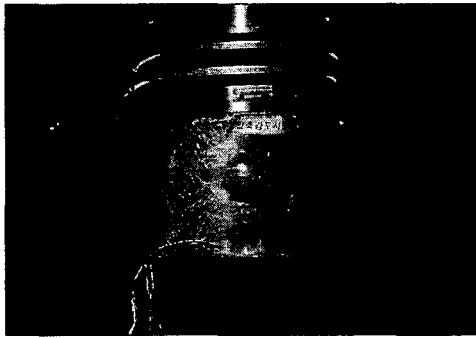


그림2 복합소재 합성압축 공시체의 단주 압축강도 실험모습

그림 3, 그림 4에서와 같이 합성압축 공시체의 파괴모드는 초기 탄성계수가 큰 1차영역과 연성이 증가하며 서서히 콘크리트 구속효과가 발휘되는 2차 영역으로 구분되었다. 구속효과의 발생은 충전 콘크리트 파괴응력의 80%정도인 약 400kg/cm²부근에서 시작되었다. 실험결과 복합소재 튜브의 구속효과로 인해 합성압축 공시체의 압축강도는 일반 콘크리트 공시체 압축강도의 1.96~2.36배로 증가하는 것을 알 수 있었으며, 변형률은 최종 파괴시 일반 콘크리트 공시체의 5.28~7.00배로 연성이 크게 증가하였다.^{[3][4]}

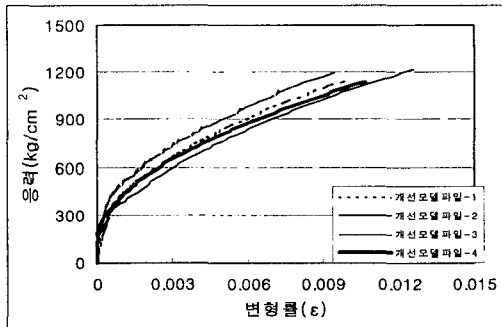


그림3 응력-변형률 곡선(Strain Gage)

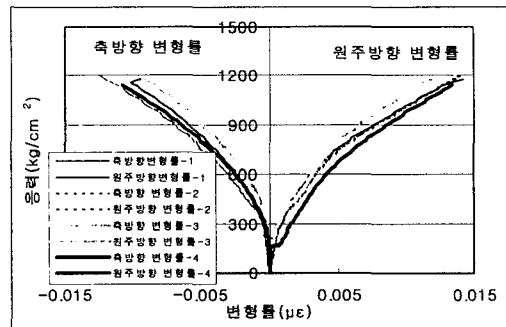


그림4 응력-변형률 곡선

3.2 휨실험

복합소재 개선 압축부재 모델 2개의 순수 휨 성능 실험을 수행하였다. 그림5와 그림 6의 실험 모사도와 실험모습사진에서 보인 것과 같이 실험은 단순지지 4점재하 순수 휨 실험으로 하였으며, 중앙부 하단과 재하점 하단의 처짐과 중앙부의 압축부와 인장부의 변형률을 측정하였다. 측정된 데이터는 이론식으로 계산된 휨내력과 비교하여 표 6에 휨하중 제하시 중립축을 비교하였다. 그림 7은 재하된 휨하중에 대한 중앙부 상하단의 모멘트-응력 곡선을 보이고 있으며, 그림 8에서는 모델파일들의 중앙부 하단의 하중-처짐 곡선을 보이고 있다. 표5 에는 개선 압축부재 모델의 휨실험 결과를 보이고 있다.

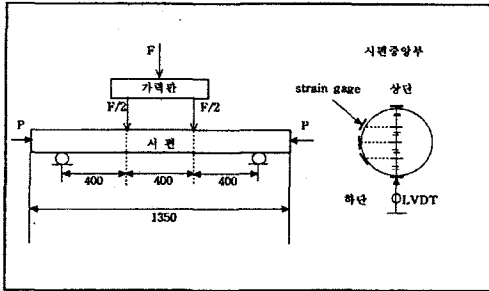


그림5 순수 휨실험 및 휨-압축 실험 모사도



그림6 순수 휨실험 및 휨-압축 실험모습

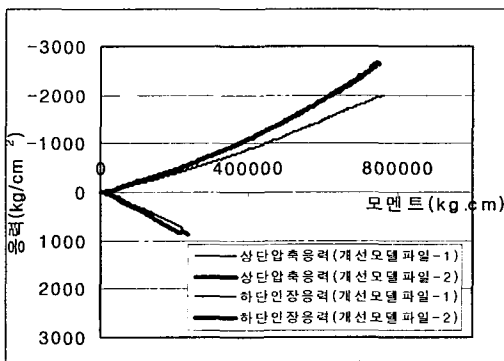


그림7 모멘트-응력 곡선

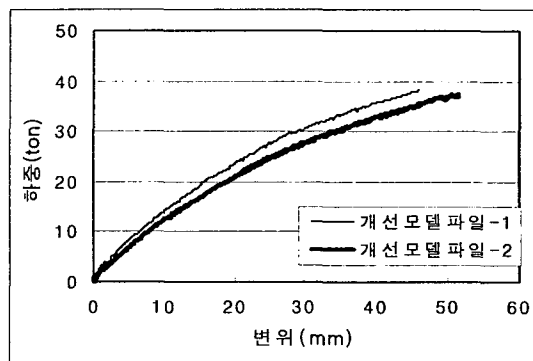


그림8 중앙하단의 하중-처짐 곡선

표5 휨성능 실험결과

구분	파괴시 하중(ton)	최대모멘트(kg.cm)	중앙부최대처짐(mm)
복합소재 개선 압축부재 모델	37.77	755,306	48.67

휨성능 실험결과 주된 파괴모드는 인장부의 내부 충전 콘크리트의 파괴에 이은 유리섬유 복합소재의 인장 파괴양상을 보였다. 이는 하중재하 초기에 인장측 콘크리트에 인장균열이 발생하고 이를 유리섬유 복합소재 튜브가 구속효과를 발휘하여 휨모멘트에 저항하다가 최종적인 인장파괴를 일으키기 때문인 것으로 보인다.

표 6에서와 같이 전체적으로 설계내력계산식에서 예상한 것보다 콘크리트에 더욱 큰 구속효과가 발생하는 것을 알 수 있었으며, 이에 따라 실제로는 더 큰 모멘트에도 저항 할 수 있는 것으로 평가되었다.^{[4][5]} 그림 9에서와 같이 중립축거리를 설계치와 비교해본 결과 실험치가 이론치보다 상하단의 변형율이 작게 나타났으며, 이에 따라 중립축거리도 줄어들었다. 이는 상단에 설계시 이론적으로 제안한 강도증가계수^[2]($C_m=1.2$)를 상회하는 구속효과가 발생하여 압축측에 더 많은 압축력을 지탱할 수 있는 여유가 있기 때문인 것으로 사료되었다.

표6 휨실험 결과분석

실험종류	복합소재 압축부재 모델	
	이론치	실험치
설계내력 모멘트(kg.cm)	277,748	277,346
상단변형률	0.003873	0.002518
하단변형률	0.008395	0.004244
중립축 (중심선으로 부터의 거리. cm)	3.34	2.29
중립축 오차율 (실험치/이론치)	69%	

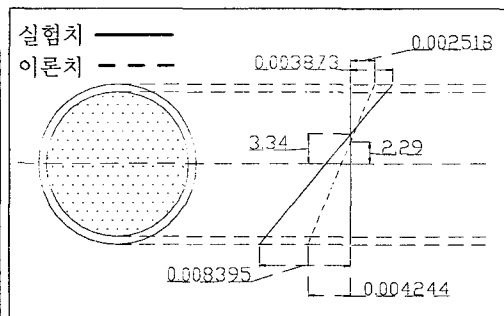


그림9 복합소재 압축부재 모델의 중립축비교

3.3 휨-압축실험

복합소재 압축부재모델의 휨-압축 거동을 평가하고 이론치와 비교하기 위하여 휨-압축 실험을 실시하였다. 휨-압축 실험에는 7개의 실험모델을 사용하였다. 압축부재의 휨-압축 파괴양상은 인장에 의해 지배되는 경우와 압축에 의해 지배되는 경우로 나뉘므로 초기 재하 축하중을 조정하고 이를 일정하게 유지한 상태에서 4점재하 방식으로 휨모멘트를 가하여 실험하였다. 휨-압축 시험시 휨으로 인한 축방향 재하단의 회전변위에 따른 편심발생으로 일정한 압축력 유지에 어려움이 있었으나, 실험모델 P-1부터 P-5에서 인장에 의한 최종 파괴와 실험모델 P-6과 P-7에서 압축에 의한 최종파괴를 유도할 수 있었다. 각각의 압축부재 모델의 파괴 축하중과 파괴 모멘트를 표7에 도시하였으며, 휨 하중에 따른 중앙부 하단의 처짐 곡선을 그림 10에 나타내었다.

표7 휨-압축에 대한 최종 휨-압축 파괴실험결과

실험모델	초기재하 축력(kg)	파괴시 축력(kg)	파괴모멘트 M(kg.cm)
P-1	20,000	23,980	936,938
P-2	30,000	34,390	944,693
P-3	60,000	40,850	951,428
P-4	80,000	43,530	943,877
P-5	100,000	58,940	1,006,122
P-6	120,000	119,810	683,469
P-7	140,000	136,150	700,000

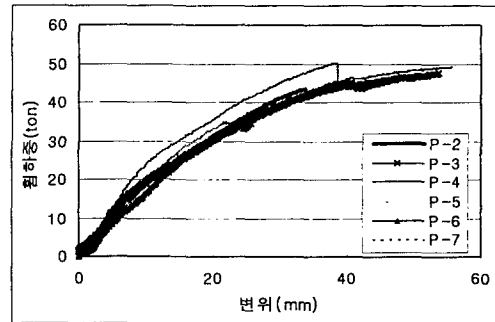
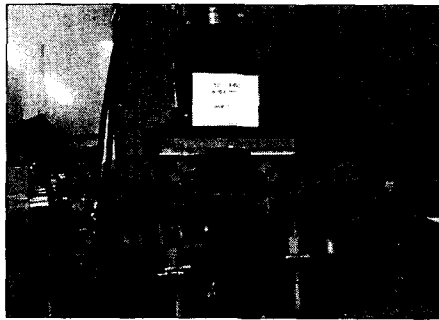
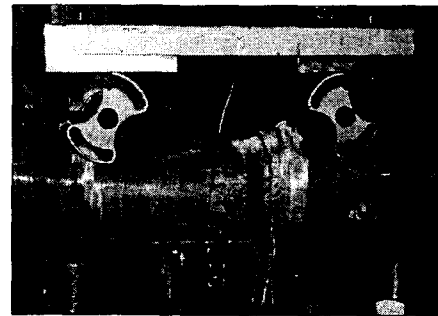


그림10 중앙부 하단 처짐비교



a. 인장에 지배되는 파괴모습(P-1)



b. 압축에 지배되는 파괴모습(P-6)

그림 11 휨-압축 실험을 통한 복합소재 개선 압축부재 모델의 파괴모습

1) 파괴모드 분석

그림 11의 a에서와 보인 것과 같이 실험모델 P-1~P-5에서 하부의 인장파괴가 발생하였다. 휨 하중이 증가함에 따라 내부의 콘크리트는 이미 파괴상태에 달하고 외부의 유리섬유가 거의 대부분의 하중을 부담하여 최종파괴에 이르므로 최종 휨강도는 인장측에서 유리섬유 복합소재의 항복에 의해서 정해졌다. 그림 12부터 그림 15에는 인장파괴를 보이는 P-1의 하중 응답곡선을 보이고 있다.

그림 11의 b에서 보인 것과 같이 실험모델 P-6~P-7에서 상부의 압축파괴가 발생하였다. 내부의 콘크리트가 구속효과 발생으로 큰 압축력을 발휘하다가 파괴에 이른 후에 유리섬유 복합소재가 압축파괴되어 최종적으로 파괴되었다. 그림 16부터 그림 19에는 압축파괴를 보이는 P-6의 하중 응답곡선을 보이고 있다.

2) 연성도 분석

모든 경우 하중조건에 대하여 동일하게 휨하중이 증가함에 따라 하중-변위곡선의 기울기가 점차 감소하다가, 파괴하중에 근접시에는 기울기가 매우 작아지는 연성파괴의 양상이 발생하였다. 복합소재 파일은 순수압축 파괴시에도 연성파괴가 일어나며, 휨-압축파괴시에도 연성적인 파괴를 보이는 것을 확인하였다.

휨-압축 실험과 순수 휨실험, 단주 압축실험을 통하여 실험적으로 P-M 상관도를 얻을 수 있었으며, 그 결

과는 다음 장에서 이론적으로 유도한 P-M 상관도와 함께 비교분석하였다.

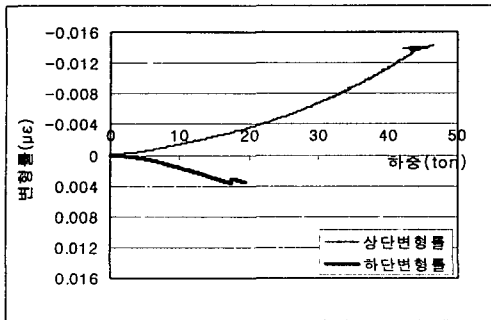


그림12 하중-변형률 곡선(P-1)

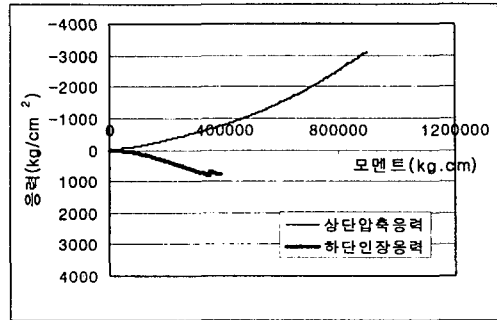


그림13 모멘트-응력 곡선(P-1)

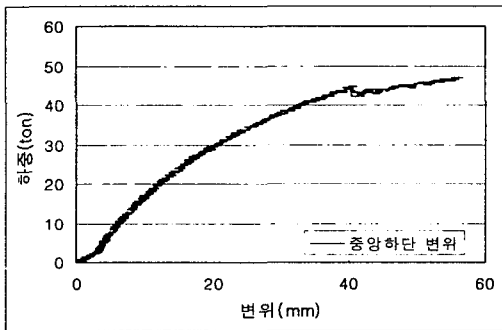


그림14 휨하중-변위 곡선(P-1)

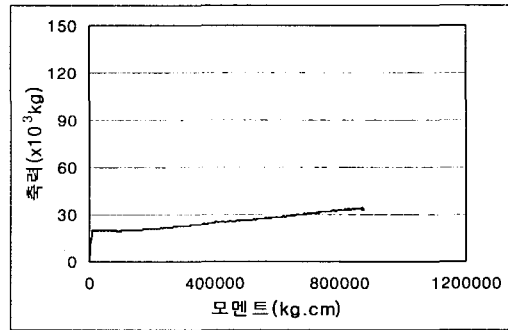


그림15 축력-모멘트도(P-1)

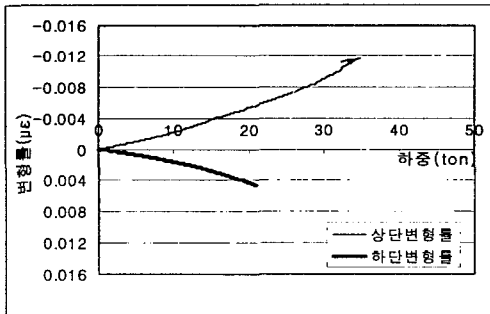


그림16 하중-변형률 곡선(P-6)

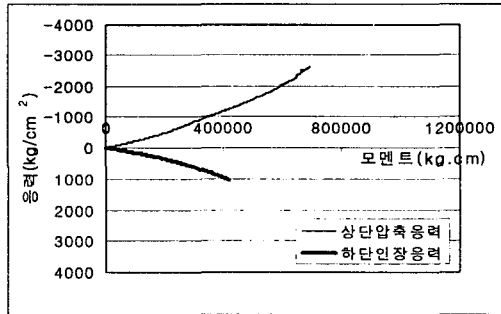


그림17 모멘트-응력 곡선(P-6)

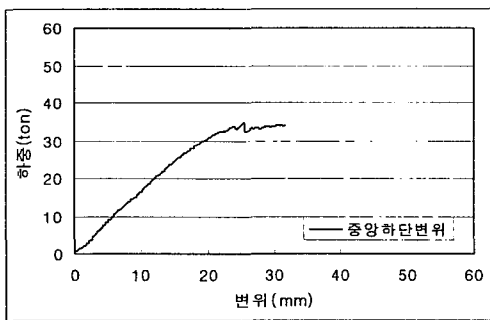


그림18 휨하중-변위 곡선(P-6)

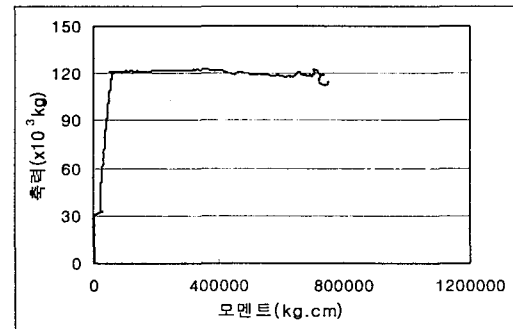


그림19 축력-모멘트도(P-6)

4. 복합소재 압축부재의 P-M 상관도

축력과 휨을 동시에 받는 복합소재 압축부재의 내력은 P-M 상관도를 통하여 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 다양한 하중 조건에 놓인 복합소재 압축부재의 성능을 예측하고 표준화하기 위하여 복합소재 합성압축부재의 P-M상관도를 계산하기 위한 프로그램¹⁶⁾¹⁷⁾을 개발하였다. 그림 20은 P-M 상관도를 계산하기 위해 파일 단면을 이산화한 모습을 보여주고 있다. P-M 상관도를 도출하기 위해 사용한 중립축 거리에 따른 복합소재 파일의 압축내력과 휨내력을 구하는 연산식은 다음과 같으며, 프로그램의 순서도는 그림 21과 같다.

$$\text{복합소재 튜브에 충전된 콘크리트의 극한 압축력}(P_c) \quad P_c = \sum_{i=1}^n f_{ci} A_{ci}$$

$$\text{유리섬유 복합소재 튜브의 극한 압축력}(P_s) \quad P_s = \sum_{i=1}^n E_s \varepsilon_i A_{si}$$

$$\text{복합소재 파일의 극한 압축내력}(P) \quad P = P_c + P_s$$

$$\text{복합소재 파일의 콘크리트의 극한 휨내력}(M_c) \quad M_c = \sum_{i=1}^n f_{ci} A_{ci} y_i$$

$$\text{유리섬유 복합소재 튜브의 극한 휨내력}(M_s) \quad M_s = \sum_{i=1}^n E_s \varepsilon_i A_{si} y_i$$

$$\text{복합소재 파일의 극한 휨내력}(M) \quad M = M_c + M_s$$

여기서 f_{ci} = 단주압축 실험으로 얻어진 콘크리트 구간 i 의 응력, A_{ci} = 콘크리트 구간 i 에서의 면적, E_s = 복합소재 튜브의 부재길이방향 탄성계수, ε_i = 구간 i 의 변형률, A_{si} = 복합소재 튜브의 구간 i 에서의 면적, y_i = 구간 i 의 중심에서 소성중심(단면중심)까지의 거리이다. ε_i 에 대한 f_{ci} 는 복합소재 합성압축 공시체의 단주 압축 실험을 통해 얻어진 응력-변형률 곡선을 사용하였다.

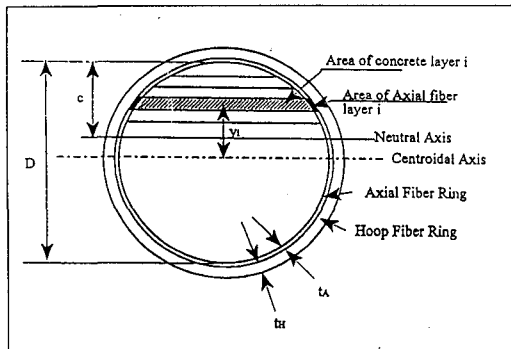


그림 20 수치적분을 위한 단면의 이산화 모습

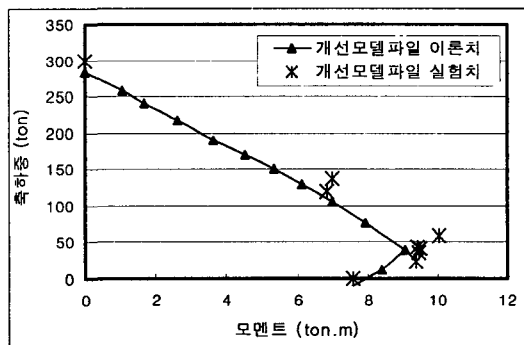


그림22 복합소재 개선 압축부재 모델 P-M상관도의 수치해석치 대 실험치 비교

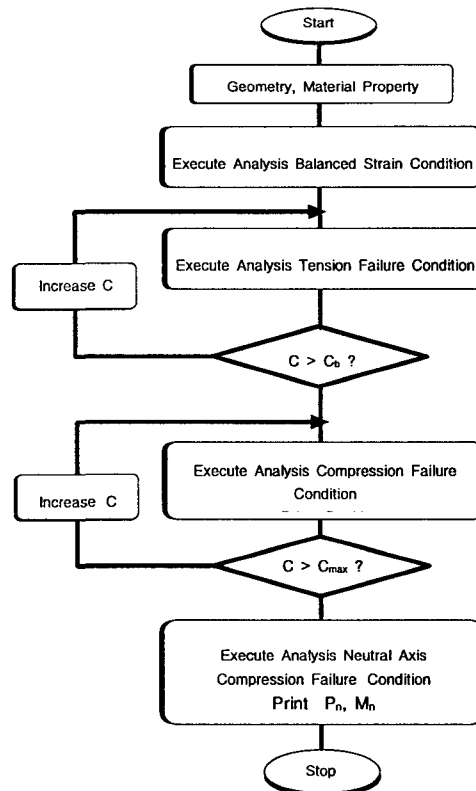


그림21 P-M 상관도 산출 프로그램의 순서도

P-M 상관도에서 인장 파괴역영과 압축파괴 영역을 구분하기 위하여 평형파괴 상태의 중립축 길이를 산출한 후, 중립축 길이의 변화에 따라 따른 극한 압축내력 P 와 극한 휨내력을 구하는 방법을 이용하였다. 개선 압축부재모델에 대한 실험결과와 이론적 수치해석에 의해 구해진 P-M상관도를 같이 도시해보면 그림 22와 같다. 그림 22에서 알 수 있는 것과 같이 해석된 순수 압축내력은 실험치의 96%이고 순수휨내력은 실험치의 105%이며 중간 값들도 수치해와 실험치가 잘 근접함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 제시된 수치해석적인 이론식을 이용하여 복합소재 압축부재의 휨-압축 거동을 예측할 수 있는 것으로 판단하였다. 다만, 이론식에서는 단주압축 실험에 의한 하중변형을 곡선을 반영하여야 하므로 이에 대한 추정식을 유도하여 설계 시 손쉽게 이용될 수 있는 추가적 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

5. 결론

1. 유리섬유 복합소재 튜브를 제작하여 콘크리트를 충전한 복합소재 압축부재 모델의 하중에 의한 거동은 복합소재 튜브와 콘크리트의 구속효과로 인해 강도가 크게 증가하는 것을 알 수 있었다.

2. 모든 실험에 대하여 복합소재 압축부재는 휨하중이 증가함에 따라 하중-변위 곡선의 기울기가 점차적으로 감소하였으며, 그후 파괴하중에 근접시에는 기울기가 매우 작아지는 양상을 보였다. 따라서 복합소재 압축부재는 단주 압축 파괴시에도 연성파괴가 일어나며, 휨-압축파괴시에도 연성적인 파괴 양상을 보임을 알 수 있었다.

3. 수치해석적 방법으로 제안한 P-M상관도와 개선 모델파일의 시험치를 비교했을 때, 순수 압축내력은 96%이고 순수 휨내력은 105%이며 중간값들도 수치해와 실험치가 잘 근접함을 알 수 있었다. 이로서 본 연구에 제시된 수치해석적인 이론식을 통해 복합소재 압축부재의 휨-압축거동을 예측가능 함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행되고 있으며, 해양수산부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조기술, 시그마프레스, 1998
2. 이성우, 손기훈외, 고내구성 신소재해상파일 개발연구, 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서, 2000/12
3. 이성우, 박신전, "GFRP 튜브에 콘크리트를 충전한 합성압축부재의 파괴특성분석", 한국콘크리트학회 학술 발표회 논문, 1999
4. Mirmiran, A., "Analytical and Experimental Investigation of Reinforced Concrete Columns Encased in Fiberglass Tubular Jackets and Use of Fiber Jacket for Pile Splicing," Final Report, Contract No. B-9135, Florida Department of Transportation. Tallahassee, Fla., 1997
5. Samaan, M. (1997). "Analytical and experimental investigation of FRP-concrete composite columns," PhD thesis, University of Central Florida, Orlando, Fla.
6. Mirmiran, A., "FRP-Concrete Composite Column and Pile Jacket Splicing-Phase II," Final Report, Contract No. B-9895, Florida Department of Transportation. Tallahassee, Fla., 1997
7. Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M.(1997). "Behavior of concrete columns by fiber composite," J. Struct. Engrg., ASCE, 123(5), 583-590