한국전산구조공학회
2001년도 가을 학술발표회 논문집

콘크리트 합성 GFRP 복합소재 파일의 휨-압축특성
Flexure-Compression Characteristics of GFRP Composite Pile

이 성 우* 손 기 훈** 조 남 훈***
Lee, Sung Woo Sohn, Ki Hoon Cho, Nam Hoon

ABSTRACT

In this paper flexure-compression characteristics of concrete filled glass fiber reinforced composite pile was studied. Confinement model of composite pile was derived from experimental data. Also numerical method to find P-M diagram of composite pile was developed. The flexure-compression test results were compared with analytical P-M diagram and it is demonstrated that they agree well each other. Utilizing these results, pilot composite pile was designed and fabricated.

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 설계에 필요한 콘크리트 합성 복합소재 파일의 구속효과 분석과 강도설계법에 따른 복합소재 모델파일의 P-M 상관도를 수치해석적 방법으로 예측하여 이를 실험결과와 비교분석하여 서로 근접함을 확인하였으며, 이를 통해 얻어진 설계내력을 사용하여 모델파일을 설계제작하였다.

2. 콘크리트 합성 복합소재 파일의 구속모델 추정강도곡선식

콘크리트 합성 복합소재 파일은 일반 무근콘크리트 공시체에 비해 수 배에 이르는 보강효과를 갖는다. 이러한 보강효과는 복합소재튜브와 콘크리트의 구속모델에 의해 설명할 수 있으며, 복합소재 튜브로 구속된 콘크리트만의 구속모델 추정강도곡선식은 식(1)과 같은 평방근 모델로 나타낼 수 있다.[1][2]

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2)\,\varepsilon_c}{\left[1+\left(\frac{(E_1 - E_2)\,\varepsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{1/n}} + E_2\,\varepsilon_c \qquad (1)$$

여기서, f_c = 콘크리트의 일축압축 응력, ε_c = 콘크리트의 일축압축 변형률, E_1, E_2 = 1, 2차 탄성계수, f_o = 2차 탄성곡선의 y절편 응력값, n = 곡률보정계수 이다. 그림 1에 추정식의 계수들과 추정곡선의 관계를 나타었다.

위의 추정강도곡선식에 대하여 일차탄성계수 E_1은 다음의 콘크리트의 할선탄성계수 식(2),(3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_1 = 15000\sqrt{f_c} \qquad (f_{ck} \le 400 kgf/cm^2) \qquad (2)$$

$$E_1 = 10500\sqrt{f_c} + 70000 \qquad (f_{ck} \ge 400 kgf/cm^2) \qquad (3)$$

* 정회원 · 국민대학교 건설시스템 공학부 교수
** 국민대학교 건설시스템 공학부 박사과정
*** 국민대학교 구조안전연구소 선임연구원 공학석사

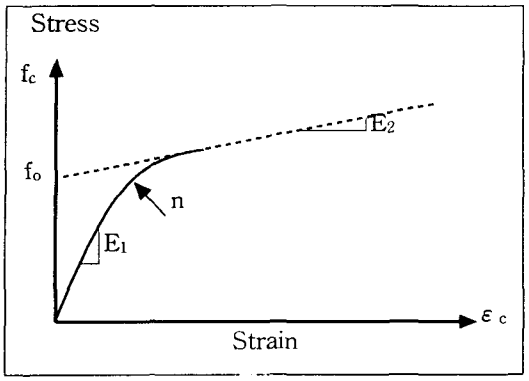

그림1 추정식의 계수들과 추정곡선의 관계

그림2 복합소재 합성압축 공시체의
단주 압축강도 실험모습

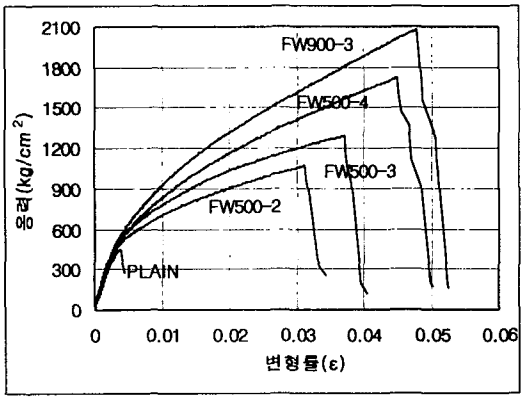

그림 3 필라멘트 와인딩으로 제조한 대표적인 공시체의
응력-변형률 곡선

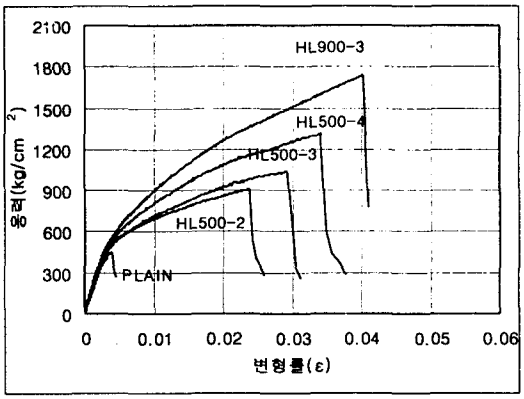

그림 4 수적층법으로 제조한 공시체의 대표적인
응력-변형률 곡선

2차 탄성계수 E_2는 복합소재 튜브(내경 100㎜)의 성형공정, 튜브 두께, 횡방향 탄성계수를 각각 달리하여 제작한 합성압축공시체들을 단주압축시험[3]하여 구속효과를 분석한 결과, 강성비 (stiffness ratio = (Ej tj/fco D)) 대 탄성계수비(slope ratio = (E_2/E_1))로 비교한 선형회귀분석 추세식을 통해 구할 수 있었다.[4] 그림 2에 콘크리트 합성 복합소재 파일의 단주압축강도 실험의 모습을 나타내었고, 그림 3, 4에 대표적인 복합소재 성형공정에 대하여 튜브의 두께와 탄성계수를 달리한 4종의 합성압축공시체 단주압축강도실험 결과를 응력-변형률 곡선으로 나타내었다. 그림 5에는 이들 단주압축강도실험 결과를 강성비대 탄성계수비의 비교하여 얻은 추세선을 유도하였으며 추세식에 따른 E_1과 E_2의 관계식은 다음의 식(4)와 같다.

$$E_2 = E_1\left(0.0009\frac{E_h\, t}{f_{co}\, D} + 0.0281\right) \tag{4}$$

여기서, E_h는 복합소재 튜브의 Hoop방향 탄성계수로 적층설계에 대해 EASAcomp를 이용하여 계산하였고, t는 복합소재 튜브의 두께이다. f_o는 참고문헌 [1]에 수록한 보강효과이론을 통하여 다음의 식(5)으로 구한다.

$$f_o = 0.5895\, f_{co} + 1.252\, f_r + 1.6474 \tag{5}$$

여기서, f_r = 구속압력, n = 곡률보정계수이다. 이렇게 얻어진 추정강도곡선식은 다음의 식(6),(7)의 극한강도 및 극한변형률의 관계를 통해 극한변형에 이를 때까지 계산된다.

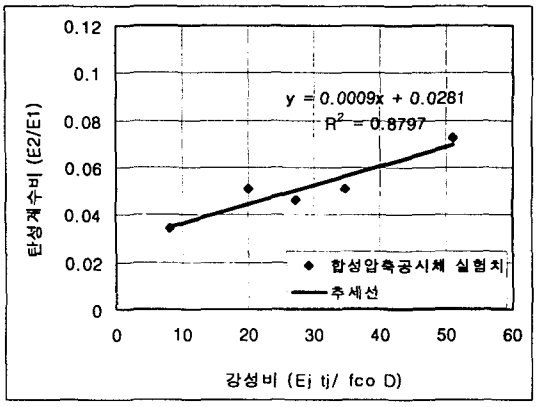

그림 5 단주압축강도 시험에 대한 강성비(Ej tj/f'co D) 대 1,2차 탄성계수비(E_2/E_1)와 추세선

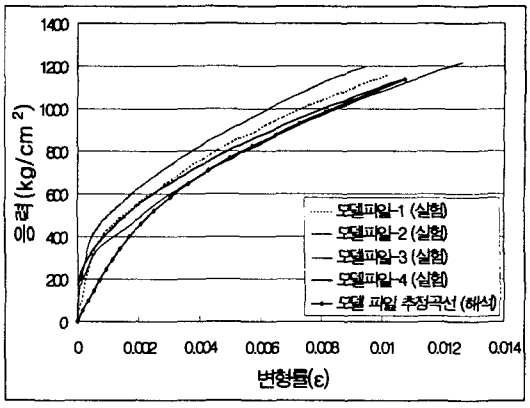

그림 6 응력-변형율곡선의 실험치와 추정치 비교

$$f_{cu} = f_o + E_2 \varepsilon_{cu} \tag{6}$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{cu} - f_o}{E_2} \tag{7}$$

여기서 f_{cu} = 파괴 응력, ε_{cu} = 파괴변형률이다.

콘크리트 합성 복합소재 파일의 추정강도곡선식을 이용하여 직경 165㎜인 모델파일[2]의 응력-변형율곡선을 예측한 결과, 그림 6에서와 같이 실험치와 해석치가 잘 근접함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 산출한 추정강도곡선식을 콘크리트 합성 복합소재 파일의 내력설계에 적용할 수 있음을 확인하였다.

3. 콘크리트 합성 복합소재 파일의 P-M 상관도

콘크리트 합성 복합소재 파일의 휨-압축 거동을 평가하고 이론치와 비교하기 위하여 휨-압축 실험을 실시하였다.[2][5] 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. 그림 5와 그림 6에 실험 모사도와 실험모습 사진을 도시하였으며, 각각의 하중케이스에 대한 파괴 축하중과 파괴 모멘트를 표1과 같다.

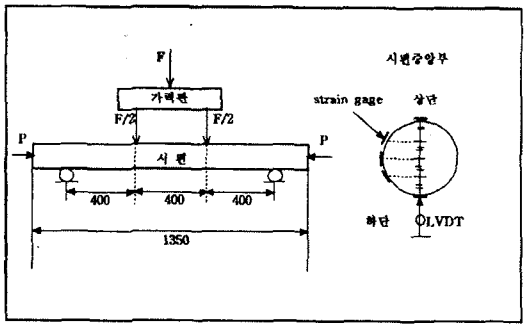

그림7 순수 휨실험 및 휨-압축 실험 모사도

그림8 순수 휨실험 및 휨-압축 실험모습

표1 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

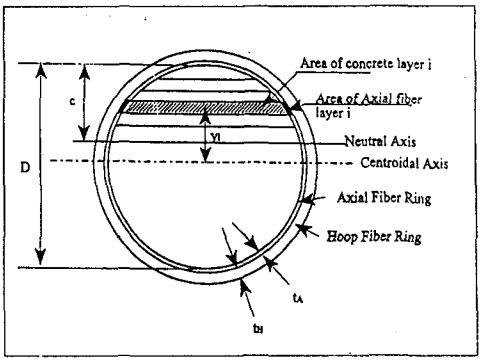

그림9 수치적분을 위한 단면의 이산화 모습

축력과 휨을 동시에 받는 콘크리트 합성 복합소재 파일의 내력은 P-M 상관도를 통하여 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 다양한 하중 조건에 놓인 콘크리트 합성 복합소재 파일의 성능을 예측하고 표준화하기 위하여 콘크리트 합성 복합소재 파일의 P-M상관도 산출 프로그램을 개발하였다. 그림 9은 P-M 상관도를 계산하기 위해 파일단면을 이산화한 모습을 보여주고 있다. P-M 상관도를 도출하기 위해 사용한 중립축 거리에 따른 콘크리트 합성 복합소재 파일의 압축내력과 휨내력을 구하는 연산식은 다음과 같다. 구간 i의 변형률(ε i)에 대한 콘크리트 구간 i의 응력(fci)을 구하기 위하여 2항에서 다룬 콘크리트 합성 복합소재 파일의 구속모델 추정강도곡선식을 사용하였다.

복합소재 튜브에 충진된 콘크리트의 극한 압축력(P_c) $$P_c = \sum_{i=1}^{n} f_{ci} A_{ci} \quad (8)$$

유리섬유 복합소재 튜브의 극한 압축력(P_s) $$P_s = \sum_{i=1}^{n} E_s \varepsilon_i A_{si} \quad (9)$$

복합소재 파일의 극한 압축내력(P) $$P = P_c + P_s \quad (10)$$

복합소재 파일의 콘크리트의 극한 휨내력(M_c) $$M_c = \sum_{i=1}^{n} f_{ci} A_{ci} y_i \quad (11)$$

유리섬유 복합소재 튜브의 극한 휨내력(M_s) $$M_s = \sum_{i=1}^{n} E_s \varepsilon_i A_{si} y_i \quad (12)$$

복합소재 파일의 극한 휨내력(M) $$M = M_c + M_s \quad (13)$$

여기서 f_{ci} = 추정강도곡선식으로 계산한 콘크리트 구간 i의 응력, A_{ci} = 콘크리트 구간 i에서의 면적, E_s = 복합소재 튜브의 부재길이방향 탄성계수, ε_i = 구간 i의 변형률, A_{si} = 복합소재 튜브의 구간 i에서의 면적, y_i = 구간 i의 중심에서 소성중심(단면중심)까지의 거리이다.

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 휨내력(M)을 구하는 방법을 이용하였다. 이를 콘크리트 합성 복합소재 모델파일에 대한 실험결과와 이론적 수치해석에 의해 구해진 P-M상관도[2]를 함께 도시해보면 그림 10와 같다. 그림 10에서 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 적절히 예측할 수 있는 것으로 판단하였다.[5]

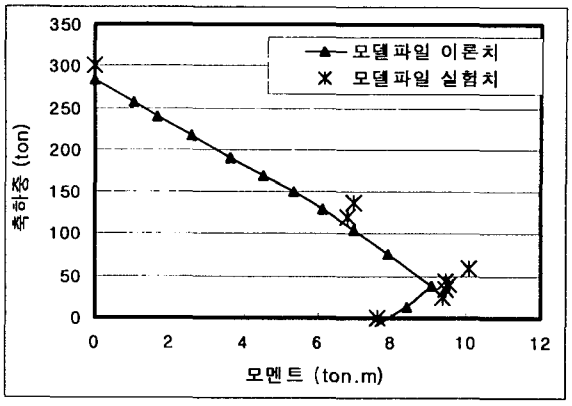

그림10 복합소재 개선 압축부재 모델 P-M상관도의
수치해석치 대 실험치 비교

4. 콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일의 내력설계

4.1 목표강관파일 선정

복합소재 시제품 파일의 극한내력설계를 위하여 국내에서 실험이 가능한 압축부재의 현실적 크기를 감안하여, SPS400 강재를 사용한 KS D3566 일반구조용 탄소강관을 목표 강관압축부재로 선정하였다. 목표강관파일의 단면성질과 물성치는 표2에 나타냈으며, 목표강관파일의 극한구조내력은 표 3과 같다.

표2 목표강관파일의 단면성질과 물성치

외경 (O.D)	400 mm	인장강도 σ_u	4100 kg/㎠
강관두께	14 mm	항복강도 σ_y	2400 kg/㎠
단면적	169.8 ㎠	허용강도 σ_a	1400 kg/㎠
단면 2차 모멘트 I	31660.7㎝^{4}	탄성계수 E_s	2.1×10^6 kg/㎠

표3 목표 강관파일과 콘크리트 합성 복합소재 시제품파일의 극한구조내력 비교

구분	두께(㎜)	휨내력(ton · m)	압축내력(ton)	전단내력(ton)
목표 강관파일	14.0	37.99	407.5	117.7

4.2 콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일의 적층설계

시제품 파일의 복합소재 튜브 적층설계를 위하여 다축 유리섬유 직포를 이용한 수적층구조(HL)와 유리섬유 로빙사를 이용한 필라멘트 와인딩 적층 구조를 복합한 4가지 적층안을 제시하여, 표 4에 나타내었다.

적층설계에는 파일 축방향으로 단위 m'당 900g, 1800g의 섬유량을 가지는 L900, L1800다축 유리섬유 직포의 적층겹수와 필라멘트 와인딩 공정에서 섬유적층을 위한 멘드릴 왕복횟수를 기준단위로 설정하였다. 또한 각 적층 설계안에 대하여 복합소재 적층해석 프로그램인 ESAcomp를 이용하여 적층판의 방향별 강성과 두께, 및 방향별 섬유량을 계산하였다.

4.2 설계안에 따른 시제품 파일의 추정강도곡선과 P-M 상관도

콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일의 추정강도곡선식을 사용하여 각각의 복합소재 튜브 설계안에 대하여 설계강도 270kg/cm^{2}인 콘크리트의 추정강도곡선과 복합소재 튜브를 포함한 합성압축공시체의 추정강도곡선을 도출하여 그림 11에 도시하였다. 또한 각각의 적층설계에 대한 복합소재 튜브의 물성치와 계산된 추정강도곡선을 사용하여 복합소재 시제품 파일의 P-M 상관도를 도출하여 이를 목표강관파일의 극한구조내력과 비교하여보았다. 그림 12에 설계안에 따른 콘크리트 합성 복합소재 시제품파일의 P-M 상관도를 도시하였다.

표4 시제품 파일 복합소재 튜브의 적층설계안

	설계 1안	설계 2안	설계 3안	설계 4안
HL 섬유 부피비(%)	35	35	35	35
FW 섬유 부피비(%)	45	45	45	45
적층 구조	L1800-2PLY L900-1PLY FW-2PLY	L1800-3PLY L900-1PLY FW-3PLY	L1800-4PLY L900-1PLY FW-4PLY	L1800-3PLY L900-1PLY FW90-2PLY FW45-2PLY
총두께(mm)	6.7	9.57	12.45	10.41
Ex(kg/cm^2)	2.37×10^5	2.62×10^5	2.60×10^5	2.58×10^5
Ey(kg/cm^2)	1.76×10^5	1.78×10^5	1.79×10^5	1.70×10^5
Gxy(kg/cm^2)	4.85×10^4	5.09×10^4	5.09×10^4	5.87×10^4
NUxy	0.22	0.225	0.223	0.283
콘크리트 코아 지름 (mm)	400	400	400	400
복합소재 파일의 추정 극한압축 변형률 ε_u	0.01	0.01	0.01	0.01
콘크리트 합성 공시체의 추정 압축파괴 강도 (튜브제외) (kg/cm^2)	419	458.9	526.9	475.9
복합소재 파괴인장강도 (kg/cm^2)	3500	3500	3500	3500

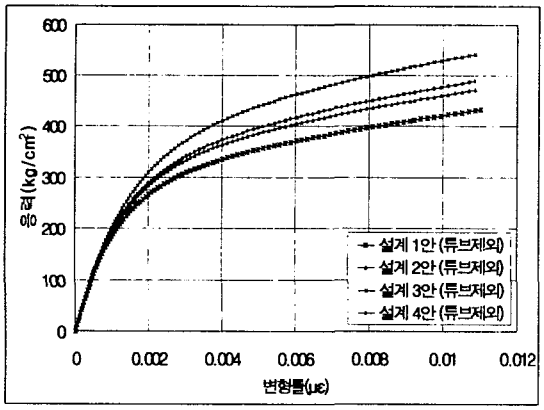

그림11 각각의 설계안에 따른 콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일의 추정강도곡선

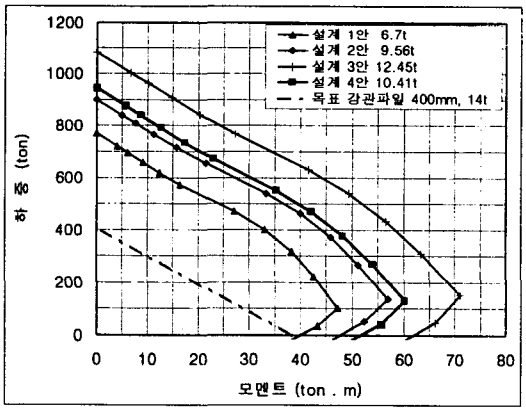

그림12 각각의 설계안에 따른 콘크리트 합성 복합소재 시제품파일의 P-M 상관도 해석

표 5에는 P-M 상관도를 통해서 계산된 목표강관 파일과 복합소재 시제품파일 설계안들의 극한구조내력을 도시하였다. 표 5에서 알 수 있듯이 모든 설계안에서 목표강관파일의 극한구조내력 보다 뛰어난 내력성능을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 최소량의 유리섬유 적층구조를 갖는 복합소재 튜브 적층설계 1안의 경우에도 목표강관파일보다 극한 휨내력에 대하여 1.06배, 극한 압축내력에 대하여 1.88배의 극한구조내력을 지니고 있음을 알 수 있어, 시제품 파일의 복합소재 튜브 적층설계안으로 가장 경제적인 단면을 갖는 것으로 판단되었다. 표 6에는 복합소재 설계 1안의 적층구조를 자세히 도시하였다.

표5 설계된 시제품 파일의 극한구조내력 비교

	두께(㎜) Vf 30%	휨내력 ton·m	압축내력 ton
목표 강관파일 400mm	14.0	37.99	407.5
설계 1안	8.03	40.5(1.06)	770(1.88)
설계 2안	9.59	47.5(1.25)	910(2.23)
설계 3안	12.45	61.7(1.63)	1081(2.65)
설계 4안	10.41	52.1(1.37)	944(2.44)

( )의 수치는 목표 강관파일(400mm×14t) 내력 대비

표6 복합소재 튜브 설계 1안의 적층구조

파일 내부면 (콘크리트 부착면)

1st ply	L900 유리섬유 직포 적층 (0°) - HL
2nd ply	L1800 유리섬유 직포 적층 (0°) - HL
3rd ply	L1800 유리섬유 직포 적층 (0°) - HL
4th ply	원주방향 와인딩(90°) - FW
5th ply	원주방향 와인딩(90°) - FW

파일 외부면 (optional acrylic coating)

5. 콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일의 제작

콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일의 제작은 복합소재 튜브 성형에 있어 4장에서 선정한 적층설계 1안을 적용하였다. 복합소재 튜브의 제작 공정은 그림 13에서 16에 도시한 것과 같다. 그림 13에는 튜브 성형후 탈형을 위한 몰드 처리 과정을 보여준다. 그림 14에는 몰드 표면처리 후 콘크리트 접착면에 소량의 와인딩사를 감아 접착부 마찰돌기를 성형하는 모습을 보여준다. 그림 15에는 수정층 성형공정 이후 필라멘트 와인딩 성형공정 모습을 나타내고 있다. 그림 16에는 완성된 복합소재 시제품 파일 튜브의 모습을 보여주고 있다.

콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일은 제작된 복합소재 튜브에 설계강도 270kg/cm^2 의 굳지 않은 콘크리트를 충진하여 28일간의 양생과정을 거친 후에 완성된다. 향후 완성된 시제품 파일에 대하여 순수휨실험을 실시하여 그 결과를 설계치와 비교분석할 예정에 있다.

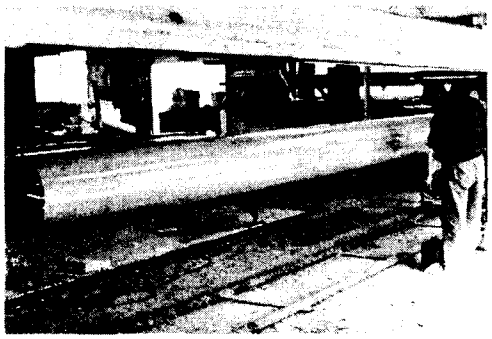

그림 13 탈형을 위한 몰드처리

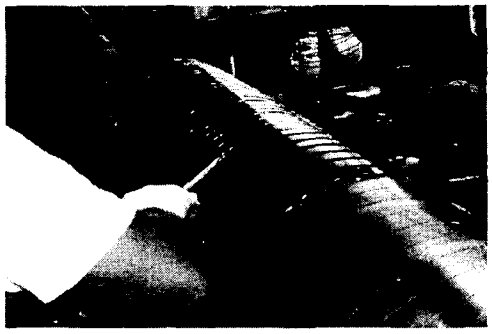

그림 14 콘크리트 접착부 마찰돌기 성형

그림 15 수적층 성형후 필라멘트 와인딩 성형 공정

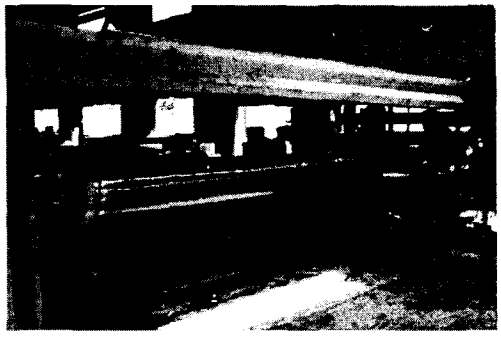

그림 16 완성된 시제품 파일용 복합소재 튜브

6. 결 론

1. 콘크리트 합성 복합소재 파일의 단주압축강도 실험에서 나타나는 복합소재 튜브의 횡방향 구속효과에 의한 콘크리트 강도증가 현상을 예측하기 위하여 복합소재 튜브의 성형공정, 튜브 두께, 횡방향 탄성계수를 각각 달리하여 제작한 합성압축공시체들을 단주압축시험하여 구속효과를 분석한 결과, 강성비대 탄성계수비에 대한 선형회귀분석 추세식을 얻어 낼 수 있었으며, 이를 이용하여 콘크리트 합성 복합소재 파일의 추정강도 곡선식을 도출하였다.

2. 콘크리트 합성 복합소재 파일의 추정강도곡선식을 이용하여 모델파일의 응력-변형율곡선을 예측한 결과, 실험치와 해석치가 잘 근접함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 산출한 추정강도곡선식을 콘크리트 합성 복합소재 파일의 내력설계에 적용할 수 있음을 확인하였다.

3. 추정강도곡선식과 복합소재의 해석적 물성치를 이용하여 극한 내력상태하의 콘크리트 합성 복합소재 파일의 P-M 상관도를 수치적으로 해석할 수 있었다.

4. 콘크리트 합성 복합소재 모델파일에 대한 휨-압축 실험결과와 이론적 수치해석에 의해 구해진 P-M상관도를 비교한 결과 수치해와 실험치가 잘 근접함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 제시된 수치해석적인 이론식을 이용하여 콘크리트 합성 복합소재 파일의 휨-압축 거동을 적절히 예측할 수 있는 것으로 판단하였다.

5. 추정강도곡선식과 P-M 상관도의 수치해석적 기법을 이용하여 목표강관파일에 준하는 시제품 파일의 복합소재 튜브를 설계제작하였다.

6. 향후 콘크리트 합성 복합소재 시제품 파일을 완성하여, 순수 휨실험을 수행하고 이를 설계치와 비교분석함으로써 추정강도 곡선식과 P-M 상관도의 수치해석적 설계기법의 적절성을 확인할 예정에 있다.

감사의 글
본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행되고 있으며, 해양수산부의 연구지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Mirmiran, A., "Analytical and Experimental Investigation of Reinforced Concrete Columns Encased in Fiberglass Tubular Jackets and Use of Fiber Jacket for Pile Splincing," Final Report, Contract No. B-9135, Florida Department of Transportation. Tallahassee, Fla., 1997
2. Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M.(1997). "Behavior of concrete columns by fiber composite," J. Struct. Engrg., ASCE, 123(5), 583-590
3. 이성우외, 고내구성 신소재해상파일 개발연구[Ⅰ], 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서, 1999/12
4. 이성우외, 고내구성 신소재해상파일 개발연구[Ⅱ], 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서, 2000/12
5. 이성우, 최석환, 손기훈, 김성태, "콘크리트 합성 유리섬유 복합소재 압축부재의 거동특성", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제 14권 제 1집, 2001.4