

유리단섬유로 보강된 분사식 섬유보강 복합재료의 인장거동에 관한 미세역학 기반 해석

Micromechanics-based Analysis on Tensile Behavior of the Sprayed FRP Composites with Chopped Glass Fibers

양 범 주* 하 성 국* 이 행 기†
Yang, Beom-Joo Ha, Seong-Kook Lee, Haeng-Ki

요 지

본 연구에서는 유리단섬유로 보강된 분사식 섬유보강 복합재료의 인장거동 평가를 위한 실험 및 해석연구를 수행하였다. 이를 위해 다양한 변형률속도(strain rate)에 따른 에폭시수지 및 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 분사식 섬유보강 복합재료는 15mm 길이로 절단된 유리단섬유가 25% 부피비율로 혼합된 보수·보강용 재료이다. 에폭시수지의 점탄성 특성을 고려하기 위해 역산모델링(inverse simulation)을 수행하여 변형률속도에 따른 점성변화를 함수식으로 제안하였다. 역산모델링을 통해 제안된 함수식을 미세역학 기반의 점탄성 손상모델(micromechanics-based viscoelastic damage model; Yang *et al.*, 2012)에 적용하여 분사식 섬유보강 복합재료의 인장거동을 수치적으로 해석하였다. 분사식 섬유보강 복합재료의 인장거동 해석결과와 실험결과를 비교하여 미세역학 기반의 점탄성 손상모델의 정확성을 검증하였다.

핵심용어 : 분사식 섬유보강 복합재료, 변형률속도, 점탄성 거동, 미세역학 기반 점탄성 손상모델

Abstract

In this paper, experimental tests and theoretical studies were carried out to evaluate the tensile behavior of the sprayed FRP composite with chopped glass fiber. For this, a series of tensile strength tests with various strain rates were conducted on the specimens of the matrix and sprayed FRP composite. Sprayed FRP composite contained chopped glass fibers with fiber length of 15mm and a specific volume fraction of fibers of 25 %. An inverse simulation was conducted to simulate the strain rate sensitivity based on the present experimental data of the epoxy resin. The simulated viscosity value is adapted to the micromechanics-based viscoelastic damage model(Yang *et al.*, 2012), and the overall tensile behavior of sprayed FRP composites is predicted. It was seen from the comparative study between present experimental data and prediction results that the proposed methodology can be used to predict the viscoelastic behavior of the sprayed FRP composite.

Keywords : *sprayed FRP composites, strain rate, viscoelastic behavior, micromechanics-based viscoelastic damage model*

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 외부 환경, 설계하중의 변화, 재료 특성 변화, 구조 설계의 오류, 시공 결함 등의 원인에 의해 구조적 성능이 저하되고 있어 적절한 보수·보강을 통한 구조물의 안전성 확보가 필요하다(이강석 등, 2007). 최근 FRP

시트(fiber-reinforced polymer sheet)를 사용한 보수·보강 방법이 널리 사용되고 있으나, 낮은 연성거동으로 인한 취성파괴 유도, 비등방성 재료의 특성 등의 단점이 보고되었다(한승철 등, 2008).

1990년대 후반 기존 FRP시트의 단점을 극복하기 위하여 분사식 섬유보강 복합재료(sprayed FRP composite)를 활

† 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
Tel: 042-350-3623 ; Fax: 042-350-3610
E-mail: leeh@kaist.ac.kr

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 대학원 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

용한 보수·보강공법이 제안되었다(Banthia *et al.*, 2002; Lee, 2004; Lee and Hausmann, 2004; Lee *et al.*, 2008a; 2008b; Ha *et al.*, 2012). 제안된 공법은 Chopper 장치에 의해 일정하게 잘려진 유리 및 탄소단섬유(chopped glass and carbon fibers)와 스프레이건을 통해 고압으로 분사된 에폭시 및 폴리에스테르수지(epoxy and polyester resin)를 공기 중에 혼합하여 콘크리트 표면에 부착시키는 방법이다(Banthia *et al.*, 2002; Lee, 2004; Lee and Hausmann, 2004; Lee *et al.*, 2008a; 2008b; Ha *et al.*, 2012).

지금까지 국내·외 연구진은 분사식 섬유보강 복합재료의 구조적인 보수·보강성능 평가를 위한 실험실 단위의 연구를 중점적으로 수행하여 왔다(Lee and Hausmann, 2004; Lee *et al.*, 2008a; 2008b; Ha *et al.*, 2012; 이강석 등, 2007; 한승철 등, 2008). 그러나 보수·보강 재료로서의 분사식 섬유보강 복합재료의 재료특성 및 거동에 관한 연구는 제한적으로 이루어져 왔다(Furuta *et al.*, 2002; 이강석 등, 2007). 기존 보수·보강 재료의 특성연구는 분사식 섬유보강 복합재료의 최적 인장강도 특성을 나타내는 변수검증 실험을 중점적으로 다루었으며, 탄성(elastic) 및 점성(viscosity) 등의 재료적 특성을 고려한 연구사례는 거의 없는 실정이다(Furuta *et al.*, 2002; 이강석 등, 2007). 일반적으로 에폭시 등의 고분자재료는 분자구조가 사슬형태로 구성되어 있어 사슬의 영킴 및 요소(segment) 간의 상호작용에 의한 점탄성 거동(viscoelastic behavior) 형태를 보여준다(유원재, 1997; 이명규 등, 2000; 조광수, 2008). 따라서 고분자재료를 기지(matrix)재료로 갖는 복합재료의 재료특성 및 거동을 이해하기 위해서는 점탄성 특성을 고려해야 한다(유원재, 1997; 이명규 등, 2000; 조광수, 2008). 특히, 유리단섬유로 보강된 분사식 섬유보강 복합재료의 경우, 기지재료의 부피함유 비율이 상대적으로 큰 재료이므로 점탄성 특성을 고려한 연구가 요구된다.

이에 본 연구에서는 유리단섬유로 보강된 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 거동을 분석하기 위하여 실험 및 해석연구를 수행하였다. 이를 위해 다양한 변형률속도(strain rate)에 따른 에폭시 기지재료 및 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 실험을 수행하였다. 또한, 수정 점탄성 모델(Wang *et al.*, 2008)을 이용하여 기지재료의 실험결과를 기반으로 역산 모델링(inverse simulation)을 수행하였다. 마지막으로, 손상을 고려한 미세역학 기반의 점탄성 모델(micromechanics-based viscoelastic damage model) (Yang *et al.*, 2012)을 이용하여 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 특성을 예측하였으며 실험결과와 비교 분석하였다.

2. 점탄성 모델

2.1 기지재료 해석을 위한 역산 모델링

복합재료의 기지재료로서 에폭시 등과 같은 폴리머 재료는 비교적 강한 점성(viscosity)을 가지며 이로 인해 점탄성 거동이 나타난다(Yang *et al.*, 2012). 점탄성 거동은 탄성(elastic) 및 소성거동(plastic behavior)과는 다른 응력-변형을 반응을 나타내며, 폴리머 재료의 정확한 거동을 예측을 위해서 점탄성 거동에 대한 이해가 필요하다(Lakes, 2009).

Yang *et al.*(2012)은 기지재료의 점성을 변형률속도에 따른 함수로 나타내기 위하여 실험결과를 토대로 역산 모델링(inverse simulation)을 수행하였다. 역산 모델링을 위해 기지재료에 동일한 속도의 변형률이 지속적으로 가해진다고 가정하여 Maxwell의 점탄성 모델(cf. Lakes, 2009)을 변형한 수정 점탄성 모델(Wang *et al.*, 2008)을 사용하였다(Yang *et al.*, 2012). Wang *et al.*(2008)에 의해 수정된 점탄성 모델은 다음 식 (1)과 같다(cf. Li and Weng, 1994; 1996; Wang *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2012)

$$\sigma(t) = \dot{\epsilon}\eta_0 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\epsilon(t)E_0}{\dot{\epsilon}\eta_0}\right) \right\} \quad (1)$$

여기서, σ 는 응력, ϵ 는 변위, E_0 와 η_0 는 각각 기지재료의 탄성계수 및 점성을 나타낸다. 또한 t 는 시간, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도를 의미한다.

2.2 분사식 섬유보강 복합재료 해석을 위한 점탄성손상 모델

Ju and Lee(2001)에 의해 제안된 섬유강화 복합재료 손상 모델을 근간으로, Yang *et al.*(2012)은 기지재료의 점탄성 특성을 고려하며, 이차원 영역(2-dimension field)에 임의로 분포되어있는 섬유보강 복합재료의 유효 강성텐서(effective stiffness tensor)을 다음과 같이 유도하였다(cf. Yang *et al.*, 2012).

$$\langle C_{ijkl}^*(t) \rangle = \hat{C}_{IK}^{(1)}(t)\delta_{ij}\delta_{kl} + \hat{C}_{IJ}^{(2)}(t)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (2)$$

여기서, 4차 텐서 $C_{ijkl}^*(t)$ 는 복합재료의 유효강성텐서(effective stiffness tensor)이며 δ_{ij} 는 크로네커 델타(kronecker delta)를 나타낸다. 또한, 2차 텐서인 $\hat{C}_{IK}^{(1)}(t)$ 와 $\hat{C}_{IJ}^{(2)}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{C}_{11}^{(1)}(t) = \frac{\begin{bmatrix} C_{11}^{(1)}(t) + 3C_{12}^{(1)}(t) + 3C_{21}^{(1)}(t) + C_{22}^{(1)}(t) \\ + 2C_{11}^{(2)}(t) - 4C_{12}^{(2)}(t) + 2C_{22}^{(2)}(t) \end{bmatrix}}{8} \quad (3)$$

$$\hat{C}_{13}^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \{ C_{12}^{(1)}(t) + C_{22}^{(1)}(t) \} \quad (4)$$

$$\hat{C}_{31}^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \{ C_{21}^{(1)}(t) + C_{22}^{(1)}(t) \} \quad (5)$$

$$\hat{C}_{11}^{(2)}(t) = \frac{\begin{bmatrix} C_{11}^{(1)}(t) - C_{12}^{(1)}(t) - C_{21}^{(1)}(t) + C_{22}^{(1)}(t) \\ + 2C_{11}^{(2)}(t) + 4C_{12}^{(2)}(t) + 2C_{22}^{(2)}(t) \end{bmatrix}}{8} \quad (6)$$

$$\hat{C}_{13}^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \{ C_{12}^{(2)}(t) + C_{22}^{(2)}(t) \} \quad (7)$$

$$\hat{C}_{12}^{(1)}(t) = \hat{C}_{21}^{(1)}(t) = \hat{C}_{22}^{(1)}(t) = \hat{C}_{11}^{(1)}(t) \quad (8)$$

$$\hat{C}_{23}^{(1)}(t) = \hat{C}_{13}^{(1)}(t), \hat{C}_{32}^{(1)}(t) = \hat{C}_{31}^{(1)}(t) \quad (9)$$

$$\hat{C}_{12}^{(2)}(t) = \hat{C}_{21}^{(2)}(t) = \hat{C}_{22}^{(2)}(t) = \hat{C}_{11}^{(2)}(t) \quad (10)$$

$$\hat{C}_{31}^{(2)}(t) = \hat{C}_{23}^{(2)}(t) = \hat{C}_{32}^{(2)}(t) = \hat{C}_{13}^{(2)}(t) \quad (11)$$

$$\hat{C}_{33}^{(1)}(t) = \hat{C}_{31}^{(1)}(t), \hat{C}_{33}^{(2)}(t) = C_{33}^{(2)}(t) \quad (12)$$

식 (3)~(12)의 구성요소 $\hat{C}_{IK}^{(1)}(t)$ 와 $\hat{C}_{Lr}^{(2)}(t)$ 의 유도과정은 Yang *et al.*(2012)에 자세히 나타나 있다.

또한, 복합재료 내의 유리섬유는 하중 혹은 변위가 증가함에 따라 완전히 결합되어 있는 초기 상태에서 기지로부터 분리하여 보강 재료로서의 역할을 수행하지 못하는 타원형태(spheroidal shape)의 공극(voids)으로 가정할 수 있다. 이러한 손상되지 않은 유리섬유 (ϕ_1)와 손상된 유리섬유(ϕ_2)의 체적비 변화는 다음의 Weibull 확률밀도함수를 사용하여 나타낼 수 있다(Weibull, 1951; 이행기 등, 2008).

$$\phi_2 = \phi \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{(\bar{\sigma}_{11})_1}{S_0} \right)^M \right\} \right] \quad (13)$$

$$\phi_1 = \phi - \phi_2 \quad (14)$$

여기서, S_0 과 M 은 Weibull 확률함수의 모델상수, ϕ 은 초기 유리섬유 체적비, $(\bar{\sigma}_{11})_1$ 은 유리섬유의 내부응력을 나타내며 이에 대한 유도과정 및 적용사례는 Ju and Lee(2000; 2001)와 Lee(2001)에 자세히 나타나 있다.

3. 인장강도 실험 및 결과

3.1 재료 및 실험체

본 연구에서는 분사식 섬유보강 복합재료를 위한 기지재료(Matrix)로서 에폭시수지(Epoxy resin)를 사용하였으며, 보강섬유는 Owenscorning 회사의 E-glass 제품을 사용하였다. 보강섬유는 인장강도 2,700~3,700MPa, 탄성계수 72.5 GPa, 프아송비 0.2를 가지는 로빙형태(roving format)의 유리섬유를 사용하였다(Ha *et al.*, 2012). ASTM D 638(2008)에 준하여 실험체 형상 및 실험방법을 선택하였다. 기지재료 및 분사식 섬유보강 복합재료 인장강도 실험체의 기하학적 형상은 ASTM D 638(2008)의 Type 1과 3의 기준을 사용하였다. 변형률속도에 따른 기지재료 및 분사식 섬유보강 복합재료의 인장거동을 분석하기 위하여 각 변형률속도에 따라 5개의 실험체를 제작하였다(ASTM D 638, 2008). 특히, 분사식 섬유보강 복합재료는 15mm의 길이로 잘려진 유리단섬유가 25% 부피비율로 혼입되어 있다.

3.2 인장강도 테스트

인장강도 테스트를 위해서 만능시험기기(UTM)를 사용하였으며 만능시험기기에 연결된 data logger를 통해서 하중 및 변형률 값을 측정하였다. ASTM D 638(2008)에 준하여 기지재료 실험체의 가력속도는 6, 0.6, 0.06mm/min(e.g., 2.0×10^{-3} , 2.0×10^{-4} , 2.0×10^{-5} /s의 변형률 속도), 분사식 섬유보강 복합재료 실험체의 가력속도 6, 0.6mm/min(e.g., 2.0×10^{-3} , 2.0×10^{-4} /s)을 선택하였다. 그림 1에서 보는바와 같이, 만능시험기기에 부착된 로드셀(load cell)은 각 실험체의 파괴하중을 고려하여 기지재료 실험체는 10kN 용량을, 분사식 섬유보강 복합재료 실험체는 100kN 용량을 사용하였다(cf. Ha *et al.*, 2012). 또한, 실험체 형상을 고려하여 기지재료 실험체는 25mm 폭을 가진 지그(Jig)를, 분사식 보강섬유 복합재료 실험체는 50mm 폭을 가진 지그를 사용하였다(cf. Ha *et al.*,



그림 1 만능시험기기를 통한 인장강도 실험

2012). 또한, 점탄성 거동은 주위 온도 변화에 따라 거동이 변하는 특성을 나타내므로(Plaseied and Fatemi, 2008), 실험 실온도(room temperature)조건을 23°C로 일정하게 유지하였다.

3.3 실험결과 분석

인장강도 테스트를 통해 변형률속도에 따른 기지재료 및 분사식 섬유보강 복합재료의 응력-변형을 관계를 관찰하였다(그림 2~6). 또한, 응력-변형을 관계곡선을 통해 기지재료 및 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도(tensile strength), 탄성계수(Modulus of Elasticity)를 계산하였다.

3.3.1 기지용 에폭시수지의 응력-변형을 곡선

인장강도 실험결과를 통해 변형률속도에 따른 에폭시수지의 응력-변형을 관계 곡선은 표 1과 2에서 나타내었다. 각 변형률속도에 따라 각 5개 에폭시수지 실험체의 인장강도 및 탄성계수의 평균값(Average), 표준편차(Standar deviation) 그리고 변동계수(Coefficient of Variation)를 분석하여 표 1과 2에 각각 나타내었다. 여기서, 표준편차는 측정된 실험값의 산포정도를 나타내는 특성 값이며, 변동계수는 표준편차의 크기를 평

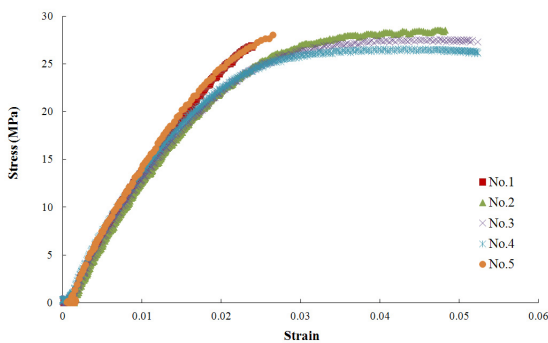


그림 2 기지재료의 응력-변형률 곡선 (Strain rate = $2.0 \times 10^{-3}/s$)

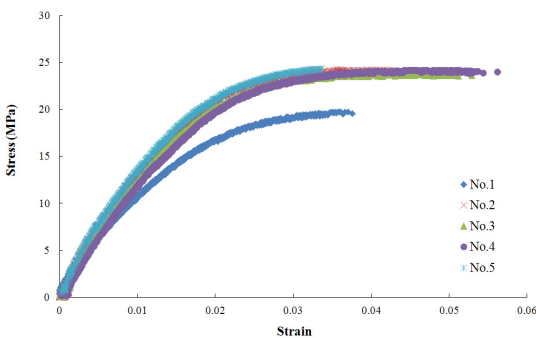


그림 3 기지재료의 응력-변형률 곡선 (Strain rate = $2.0 \times 10^{-4}/s$)

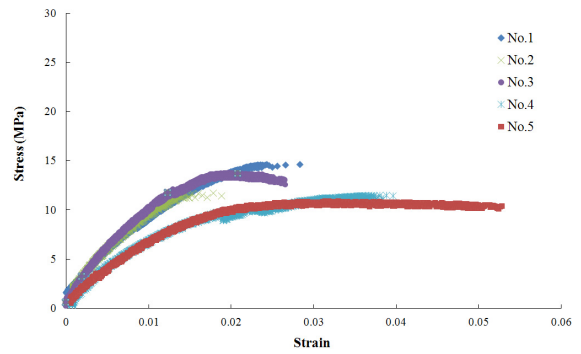


그림 4 기지재료의 응력-변형률 곡선 (Strain rate = $2.0 \times 10^{-5}/s$)

표 1 기지용 실험체의 인장강도 분석결과

변형률속도 (/s)	인장강도(MPa)		
	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation(%)
2×10^{-3}	27.7	0.701	2.6
2×10^{-4}	23.1	1.974	8.6
2×10^{-5}	12.1	1.618	13.4

표 2 기지용 실험체의 탄성계수 분석결과

변형률속도 (/s)	탄성계수(GPa)		
	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation(%)
2×10^{-3}	1.3	0.043	3.3
2×10^{-4}	1.1	0.095	8.4
2×10^{-5}	0.7	0.100	15.1

균값에 대한 백분율로 나타낸 상수 값이다(Ang and Tang, 1975).

그림 2~4에서 보는 바와 같이 변형률속도가 $2.0 \times 10^{-3}/s$ 에서 $2.0 \times 10^{-5}/s$ 로 감소할수록 인장강도와 탄성계수가 감소하는 일반적인 고분자 기지재료의 점탄성 거동특성을 나타내었다. $2.0 \times 10^{-3}/s$, $2.0 \times 10^{-4}/s$, $2.0 \times 10^{-5}/s$ 의 변형률속도에서 에폭시수지의 인장강도 분포는 평균값에 대해 약 2.6%, 8.6% 그리고 13.4%의 범위 내에 있는 것으로 나타났으며(표 1), 탄성계수는 평균값에 대해 약 3.3%, 8.4% 그리고 15.1%의 범위 내에 분포하는 것으로 나타났다(표 2).

3.3.2 분사식 섬유보강 복합재료의 응력-변형을 곡선

인장강도 실험결과를 통해 분사식 섬유보강 복합재료의 응력-변형을 관계곡선은 그림 5~6에 나타내었다. 기지용 에폭시수지의 경우와 비슷하게, 각 변형률속도에 따라 각 5개의 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 및 탄성계수의 평균값, 표준편차 그리고 변동계수를 분석하여 표 3와 4에 나타내었다.

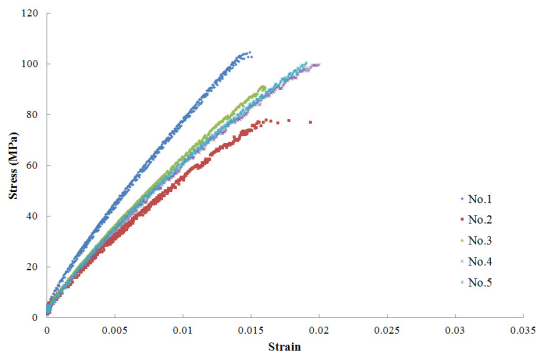


그림 5 분사식 섬유보강 복합재료의 응력-변형률 곡선 (strain rate = $2.0 \times 10^{-3}/s$)

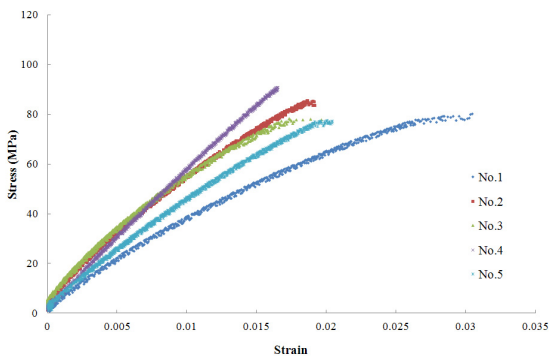


그림 6 분사식 섬유보강 복합재료의 응력-변형률 곡선 (strain rate = $2.0 \times 10^{-4}/s$)

표 3 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 분석결과

변형률속도 (s)	인장강도(MPa)		
	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation(%)
2×10^{-3}	94.9	10.569	11.1
2×10^{-4}	82.5	5.582	6.8

표 4 분사식 섬유보강 복합재료의 탄성계수 분석결과

변형률속도 (s)	탄성계수(GPa)		
	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation(%)
2×10^{-3}	5.4	0.733	13.6
2×10^{-4}	4.3	0.795	18.6

표 3과 4에서 알 수 있듯이 분사식 섬유보강 복합재료는 변형률속도가 $2.0 \times 10^{-3}/s$ 에서 $2.0 \times 10^{-4}/s$ 로 감소할수록 인장강도와 탄성계수 값이 낮아지는 점탄성 거동 특성을 나타내었다. $2.0 \times 10^{-3}/s$ 와 $2.0 \times 10^{-4}/s$ 의 변형률속도에서 분사식 섬유보강 복합재료의 인장강도 분포는 평균값에 대해 약 11.1% 그리고 6.8%의 범위 내에 있는 것으로 나타났으며 (표 3), 탄성계수는 평균값에 대해 약 13.6% 그리고 18.6%의 범위 내에 분포하는 것으로 나타났다(표 4).

4. 점탄성 거동 해석

4.1 기지재료의 점탄성 거동 해석 및 예측

본 연구에서는 Wang *et al.*(2008)이 제안한 수정된 Maxwell 점탄성 모델(식 (1))을 이용하여 본 연구에서 얻은 기지재료의 인장강도 실험결과를 기반으로 역산 모델링을 수행하였다. 이를 통해 최종적으로 기지의 점성을 변형률속도에 따른 함수로 나타내었으며, 이는 식 (15)와 같다(cf. Yang *et al.*, 2012).

$$\eta_0 = 20.0 \exp[-1.96 \cdot \log(\dot{\epsilon})] \quad (15)$$

식 (15)에 의한 변형률속도에 따른 에폭시 기지의 점성 값을 그림 7에 나타낼 수 있다. 그림 7은 변형률속도가 증가함에 따라 에폭시 기지재료의 점성 값이 급격하게 감소함을 보여주고 있다.

기지재료의 점탄성을 고려하기 위하여 변형률속도에 따른 기지의 점탄성 함수 식 (15)를 기 제안된 분사식 섬유보강 복합재료의 유효 강성텐서 식 (2)에 적용하였다(Yang *et al.*, 2012). 이때 에폭시의 물성치는 ASTM D 638(2008) 규격에 따라 변위속도 6mm/min(e.g., $2.0 \times 10^{-3}/s$ 변형률속도)인 조건으로 인장강도 테스트 결과로서 탄성계수 $E_0 = 1.3GPa$ 를 사용하였으며, 프아송 비는 $\nu_0 = 0.30$ 으로 가정하

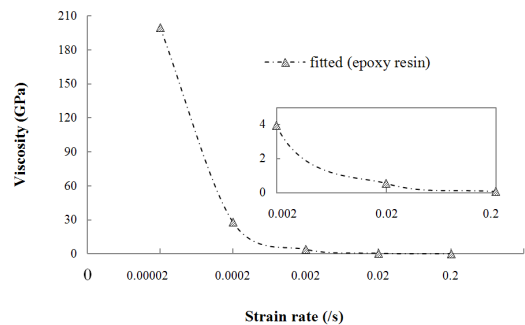


그림 7 변형률속도에 따른 기지재료 점성 값의 변화

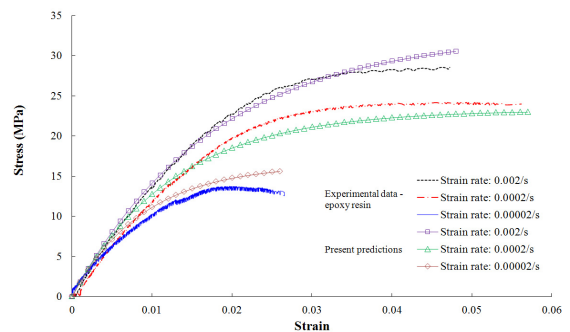


그림 8 변형률속도에 따른 기지의 응력-변형률 곡선의 예측결과와 실험데이터의 비교

였다. 기 제안된 섬유보강 복합재료의 유효 강성텐서 식 (2)의 점탄성 거동예측을 위한 모델로서 접근성을 검증하기 위해 섬유체적비 $\phi=0$ 인 순수한 에폭시 기지재료의 점탄성 거동을 예측하여 본 연구로부터 도출된 실험결과와 비교하였다. 이때 비교를 위하여 사용된 실험결과는 앞서 얻은 다섯 개의 응력-변형을 곡선의 중간 값을 선택하였다.

4.2 분사식 섬유보강 복합재료의 점탄성 거동예측

기지재료의 점탄성 특성을 고려하며, 이차원 영역(2-dimension field)에 임의로 분포되어 있는 유리단섬유로 보강된 복합재료의 손상구성 방정식을 적용하여 분사식 단섬유보강 복합재료의 점탄성 거동을 예측하였다. 이를 위해 25% 부피비율의 섬유혼입율과 15mm의 길이로 잘려진 유리단섬유로 강화된 분사식 섬유보강 복합재료의 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 해석에 사용된 기지재료의 물성치는 4.1절에 정리된 값을 사용하였으며, 유리섬유의 물성치는 탄성계수 $E_1 = 72.5\text{GPa}$, 프아송비 $\nu_1 = 0.20$, 형상비 $\alpha = 82$ 를 적용하였다. 실험결과와의 비교를 통해 Weibull 확률함수의 적절한 손상변수상수 S_0 , M 을 구하였으며 이를 다음과 같이 선정하였다: $S_0 = 500\text{MPa}$, $M = 1.0$. 서로 다른 변형율속도($2.0 \times 10^{-3}/\text{s}$ 와 $2.0 \times 10^{-4}/\text{s}$)를 적용한 실험체 모두 동일한 손상변수상수 값을 적용하였다. 복합재료의 점

탄성거동을 비교하기 위해 실험결과를 통해 얻은 극한강도에서의 변형율 구간까지 해석결과를 비교하였으며, 그림 9에 비교결과를 나타내었다.

또한 그림 10에는 Weibull 확률함수(Weibull, 1951)를 통하여 예측한 복합재료 내부의 손상된 유리단섬유와 손상되지 않은 유리단섬유의 체적비 변화를 나타내었다. 이를 통해 복합재료에 일축방향으로 변형이 증가함에 따라 복합재료 내부의 손상된 유리단섬유의 분포가 비선형거동으로 급격히 증가함을 예측할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 보수·보강 재료로 사용되는 유리단섬유로 보강된 분사식 섬유보강 복합재료에 인장거동을 평가하기 위해 실험 및 해석연구를 수행하였다. 인장강도 실험을 위해 기지재료로서 에폭시수지와 15mm 길이로 잘려진 유리단섬유가 25% 부피비율로 혼입된 분사식 섬유보강 복합재료가 제작되었다.

인장강도 실험을 통해, 에폭시 기지 및 각 복합재료들의 응력-변형을 관계 곡선을 구하였다. 또한, 에폭시 기지재료가 가지고 있는 점성특성을 고려하기 위해 인장강도 실험결과를 기반으로 역산모델링을 수행하였다. 또한 손상모델을 고려한 미세역학 기반의 점탄성 손상모델(Yang *et al.*, 2012)을 통해 분사식 섬유보강 복합재료의 점탄성 거동을 예측하였다. 보다 정확한 복합재료의 점탄성 거동해석을 위해 향후 점탄성 손상모델(Yang *et al.*, 2012)의 손상변수를 실험적으로 결정하는 기법연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 국토해양부 건설기술혁신사업의 “사회 기반시설 장수명화를 위한 고성능 방수/방식 요소기술 개발 (10기술혁신F01)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한, 연구에 도움을 주신 박일성 연구원 (한국과학기술원)에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 유원재 (1997) 섬유강화복합재의 성형시 발생하는 내부응력의 예측을 위한 점탄성 모델링, 한국복합재료학회 논문집, 13(5).
- 이강석, 변인희, 이문성 (2007) Sprayed FRP로 보강된 철근 콘크리트 전단기동의 보강성능 평가, 한국구조물진단학회 논문집, 11(3).
- 이명규, 이창주, 박종현, 정관수, 김준경, 강태진 (2000) 비

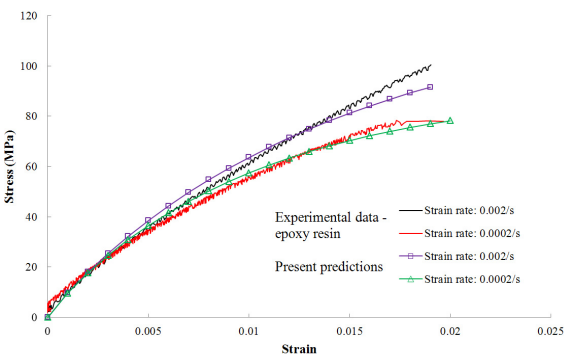


그림 9 변형율속도에 따른 분사식 섬유보강 복합체의 응력-변형률 곡선의 예측결과와 실험데이터의 비교

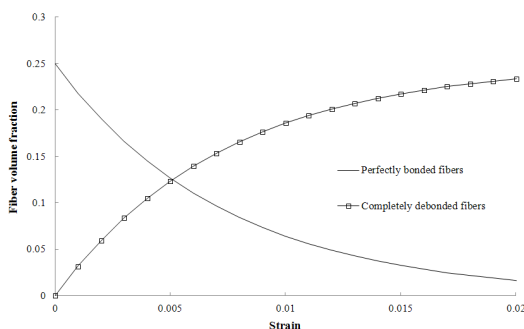


그림 10 분사식 섬유보강 복합체의 손상변수 곡선

- 대칭물성을 고려한 일축방향 섬유강화 복합재료 C링의 점탄성적 거동해석, 한국복합재료학회 논문집, 10(3).
- 이행기, 표석훈, 김형기** (2008) 계면손상과 미세균열을 고려한 입자강화 복합재료의 미세역학 탄성구성모델, 한국전산구조공학회 논문집, 21(1), pp.51~58.
- 조광수** (2008) 점탄성의 측정과 고분자 물질의 구조, *Polymer Science and Technology*, 19, pp.170~176.
- 한승철, 양준모, 윤영수** (2008) 분사식 FRP에 의한 구조물의 보강 성능 및 반발률 평가, 한국구조물진단학회지 논문집, 12(1).
- Ang, A.H.S, Tang, W.H.** (1975) Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Volume 1 Basic Principles, *John Wiley & Sons*, ISBN.0-471-03200-X.
- Banthia, N., Yan, C., Nandakumar, N.** (2002) Sprayed Fiber-reinforced Polymers: from Laboratory to a Real Bridge, *Concrete International*, 24, pp. 47~52.
- Furuta, T., Kanakubo, T., Nemoto, T., Takahashi, K., Itoh, K., Minamihara, H.** (2002) Sprayed-up FRP Strengthening for Reinforced Concrete Beams, downloaded from <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/Sprayed-Up-FRP-Strengthening-For-Reinforced-Concrete-Beams>.
- Ha, S.K., Yang, B.J., Lee, H.K.** (2012) Experimental and Theoretical Study on Retrofitting Performance of RC Beam Strengthened with Sprayed FRP Composite, *in Preparation*.
- Ju, J.W., Lee, H.K.** (2000) A Micromechanical Damage Model for Effective Elastoplastic Behavior of Ductile Matrix Composites Considering Evolutionary Complete Particle Debonding, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 183, pp.201 ~222.
- Ju, J.W., Lee, H.K.** (2001) A Micromechanical Damage Model for Effective Elastoplastic Behavior of Partially Debonded Ductile Matrix Composites, *International Journal of Solids and Structures*, 38, pp.6307~6332.
- Lakes, R.S.** (2009) Viscoelastic Materials, *Cambridge University Press*.
- Lee, H.K.** (2001) Computational Approach to the Investigation of Impact Damage Evolution in Discontinuously Reinforced Fiber Composites, *Computational Mechanics*, 27(6), pp.504~512.
- Lee, H.K.** (2004) Effectiveness of Anchorage in Concrete Beams Retrofitted with Sprayed Fiber Reinforced Polymers, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(12), pp.1285~1300.
- Lee, H.K., Hausmann, L.R.** (2004) Structural Repair and Strengthening of Damaged RC Beams with Sprayed FRP, *Composite Structures*, 63, pp.201~209.
- Lee, H.K., Kim, B.R., Ha, S.K.** (2008a) Numerical Evaluation of Shear Strengthening Performance of FRP Sheets/Strips and Sprayed FRP Coating Repair Systems, *Composites Part B: Engineering*, 39(5), pp.851~862.
- Lee, H.K., Hausmann, R.L., Seaman, W.C.** (2008b) Effectiveness of Retrofitting Damaged Concrete Beams with Sprayed Fiber-Reinforced Polymer Coating, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, pp.1269~1286.
- Li, J., Weng, G.J.** (1994) Strain-rate Sensitivity, Relaxation Behavior, and Complex Moduli of a Class of Isotropic Viscoelastic Composites, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 27, pp. 495~504.
- Li, J., Weng, G.J.** (1996) Effect of a Viscoelastic Interphase on the Creep and Stress/Strain Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, *Composites Part B: Engineering*, 27, pp.589~598.
- Plaseied, A., Fatemi, A.** (2008) Deformation Response and Constitutive Modeling of Vinyl Ester Polymer Including Strain Rate and Temperature Effects, *Journal of Materials Science*, 43, pp.1191~1199.
- Wang, W., Makarov, G., Sheno, R.A.** (2008) An Analytical Model for Assessing Strain Rate Sensitivity of Unidirectional Composite Laminates, *Composite structures*, 69, pp.45~54.
- Weibull, W.J.** (1951) A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *Journal of Applied Mechanics*, 18, pp.293~297.
- Yang, B.J., Kim, B.R., Lee, H.K.** (2012) Predictions of Viscoelastic Strain Rate Dependent Behavior of Fiber-Reinforced Polymeric Composites, *Composite Structures*, 94, pp.1420~1429.
- ASTM D 638-08** (2008) Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *ASTM International*.

- 논문접수일 2012년 2월 15일
- 논문심사일 1차 2012년 2월 26일
2차 2012년 4월 19일
- 게재확정일 2012년 4월 21일