

분사식 섬유보강 코팅으로 보강된 RC보의 성능평가를 위한 유한요소해석 연구

Finite Element Analysis for Evaluating the Performance of RC Beams Strengthened with SFRP Coating

하 성 국* 양 범 주** 이 행 기†
Ha, Sung-Kug Yang, Bum-Joo Lee, Haeng-Ki
(논문접수일 : 2009년 10월 15일 ; 심사종료일 : 2009년 11월 11일)

요 지

본 연구에서는 분사식 섬유보강 코팅층(sprayed fiber reinforced polymer, SFRP)으로 보강된 RC보의 성능평가를 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 이를 위하여 미세역학을 기반으로 한 구성모델(micromechanical constitutive model)(Lee, 2001)과 손상모델(Damage models)(Lee 등, 2000; 2005)을 결합시킨 손상구성모델(damage constitutive model)을 유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용하였다. 유한요소해석 결과를 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)과 비교하여 손상구성모델의 정확성을 증명하고자 하였다. 비교분석 결과, 손상구성모델을 유한요소 프로그램에 적용한 해석은 실험결과(Ha, 2007; Ha 등, 2009)를 비교적 잘 예측하고 있음을 보여주었다.

핵심용어 : 미세역학, 손상구성모델, 유한요소해석, 분사식 섬유보강 코팅층

Abstract

In this paper, a series of finite element analyzes were carried out to evaluate the performance of the RC beams strengthened with sprayed fiber reinforced polymer(SFRP) coating. A damage constitutive model based on the micromechanical constitutive model(Lee, 2001) in conjunction with the damage models(Lee 등, 2000) for SFRP coating was implemented into the finite element code ABAQUS. The present prediction results were compared with experimental data(Ha, 2007; Ha 등, 2009) to assess the accuracy of the damage constitutive model. It was concluded from the comparative study that the computational model developed by implementing the damage constitutive model into ABAQUS is suitable for the prediction of the performance of RC beams strengthened with SFRP coating.

Keywords : micromechanics, damage constitutive model, finite element analysis, sprayed fiber reinforced polymer coating

1. 서 론

사회기반 시설물의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 구조물의 경우, 20~30여년이 경과되면서 환경조건의 변화, 차량하중크기 및 제원의 변화 또는 설계 및 시공의 오류로 인해 구조적 성능이 저하되어 내하력 증강을 위한 보수·보강이 필요한 실정이다(심중성 등, 1999).

이에 따라 다양한 형태의 복합재료(fiber reinforced polymeric composites)가 노후화된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 위한 방안으로 제시되어 왔으며, 특히 CFRP composites(carbon fiber reinforced polymer composites)의 경우 내부식성, 내화학적, 시공성 및 가공성에 우수한 특성을 가지고 있어 구조물 보수 및 보강 방법으로 많이 활용되어 왔다(Alexander, 1996; Rahimi 등, 2001; 이

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

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

홍로 등, 2008).

1990년대 중반에 열화 된 콘크리트 구조물의 보수·보강을 위해 Chopper 장치에 의해 일정한 길이로 잘려진 보강 섬유와 스프레이건을 통하여 고속·고압으로 분사된 수지(resin)를 공기 중에 혼합하여 콘크리트 표면에 부착시켜 보수·보강 코팅층을 형성하는 방법, 즉 분사식 섬유보강 코팅층(sprayed fiber reinforced polymer, SFRP)이 새롭게 개발되었다(Banthia 등, 1996). 또한 섬유길이, 섬유 혼입율 및 코팅두께 등의 다양한 변수들이 분사식 섬유보강 코팅층의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 여러 연구들이 수행되었으며, 연구결과 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 콘크리트 구조물은 내하력이 크게 증가되었고, 에너지 흡수량 및 연성의 증가에도 효과가 있는 것으로 보고되었다(Banthia 등, 2002; Harries 등, 2003; Lee 등, 2004; 2008b). 국내에서는 Ha(2007), 이강석 등(2007) 및 한승철 등(2008), Ha 등(2009)이 분사식 섬유보강 코팅층의 보수·보강 성능에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

지금까지 분사식 섬유보강 코팅층의 수치해석(numerical study)을 통한 성능예측 연구는 Lee 등(2005, 2008a)이 있으나, 국내의 연구 보고된 사례는 거의 없는 실정이다. 이에 본 논문에서는 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 성능 평가를 위해 ABAQUS의 User-defined-material subroutine code(2004)를 사용하여 콘크리트와 분사식 섬유보강 코팅층의 물성치를 입력하였으며, 손상구성모델(damage constitutive model)을 유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용하였다. 또한, 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 유한요소해석 결과를 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)과 비교하여 분석하여 손상구성모델의 정확성을 증명하고자 하였다. 손상구성모델에 관한 설명은 2장에, 유한요소해석을 위한 모델링은 3장에, 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 성능예측결과는 4장에 나타내었다.

2. 손상구성모델(Damage constitutive model)

본 논문에 사용된 손상구성모델(damage constitutive model)은 Lee 등(2005)과 Lee and Simunovic(2000)의 연구결과로부터 도출되었다. 손상구성모델에서는 콘크리트의 손상은 콘크리트 내부의 미세균열(micro cracks)의 생성에 지배 받는다고 가정하였으며, 분사식 섬유보강 코팅층의 손상은 섬유분리(interfacial fiber debonding)와 미세균열 생성으로 인해 제어된다고 가정하였다(Lee 등, 2005). 또한, 분사식 섬유보강 코팅층은 3개의 상(phase) 즉, 탄성 예폭시 기지(matrix), 랜덤하게 배열된 섬유 그리고 원형의 미세균

열(penny-shaped micro cracks)으로 구성되어 있다고 가정하였다(Lee 등, 2005). 하중이 작용함에 따라 분사식 섬유보강 코팅층 내부의 섬유들은 부분적으로 분리가 발생하기 시작하며, Zhao and Weng(1996, 1997)의 연구결과에 따라 부분적으로 분리된 섬유들은 등가(equivalent)의 완전히 부착된 섬유들(perfectly bonded fibers)로 치환된다고 가정하였다. 본 연구에 사용된 손상구성모델은 미세역학을 기반으로 한 구성모델(micromechanical constitutive model; Lee, 2001)과 손상모델(damage models; Karihaloo 등, 1989; 1990; Lee 등, 2000; 2005)의 조합으로 구성되어 있으며, 각 세부적인 모델의 내용은 다음과 같다.

2.1 미세역학 구성모델(Micromechanical constitutive model)

랜덤하게 배열된 섬유를 포함하는 탄성 복합체를 위한 지배역방정식(governing field equation; Ju 등, 1994)과 orientation averaging 과정에 관한 식(Lee 등, 2000)을 결합하면 분사식 섬유보강 코팅층을 위한 유효강성텐서(effective elasticity tensor) C^* 를 다음 식 (1)과 같이 도출할 수 있다(Lee, 2001).

$$C^* = C_1 \delta_{ij} \delta_{kl} + C_2 (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (1)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{15} [\eta_1 + 5(\eta_3 + \eta_4 + 3\eta_5)] \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{1}{15} [\eta_1 + 10(\eta_2 + 15\eta_6)] \quad (3)$$

위의 식에서 δ_{ij} 는 Kronecker delta이며, η_1, \dots, η_6 에 대한 자세한 설명은 Lee(2001)의 Appendix에 나타나있다.

2.2 손상모델(Damage models)

Karihaloo 등(1989, 1990)에 따라, 콘크리트 내부와 분사식 섬유보강 코팅층 내부에 생성된 미세균열의 밀도(microcracks density)는 균열생성 손상변수 ε^{th} , c_1 , c_2 (Lee 등, 2005)들의 관계식은 $\varepsilon^a \leq \varepsilon^{th}$ 인 경우는 ϕ_{v0} 로, $\varepsilon^a \geq \varepsilon^{th}$ 인 경우는 $\phi_{v0} + c_1(1 - \varepsilon^{th}/\varepsilon^a)^{c_2}$ 와 같은 관계식(Lee 등, 2005) 표현할 수 있다. 위의 관계식에서 ω_{v0} 은 미세균열의 초기값을, c_1 과 c_2 는 미세균열의 형상과 분포상태에 따른 재료상수(material constant), ε^{th} 은 미세균열이 발생하지

않은 변형율의 임계치(effective stress threshold)를, 그리고 ϵ^a 는 기지재료의 현재 축적된 유효변형율을 의미한다.

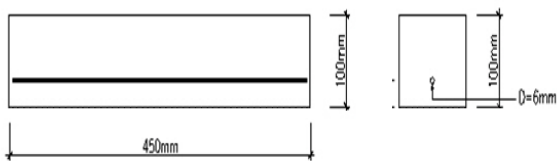
또한, Zhao 등(1996, 1997)와 Ju 등(2000)에 따라, 섬유 분리(partial debonding) 확률은 2개의 변수(parameters) S_0 와 M 을 가지는 Weibull 확률함수로 가정하여 모델화할 수 있다. Lee 등(2000)은 섬유분리 손상변수 S_0 와 M 을 사용하여, 정적 인장응력 $(\sigma_m)_1$ (hydrostatic tensile stress) 상태에서의 축적된 확률분포 함수를 $1 - \exp[-((\sigma_m)_1 / S_0)^M]$ (Lee 등, 2000)로 표현하였다.

3. 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 모델링

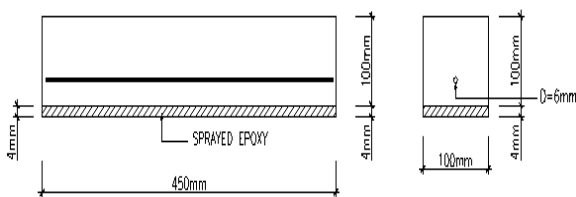
Ha(2007)와 Ha 등(2009)는 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 성능 평가를 위해 4점 재하 실험을 수행하였다. Ha(2007)와 Ha 등(2009)의 실험연구에서는 분사식 섬유보강 코팅층을 구성하는 유리섬유의 길이(fiber length), 유리섬유 혼입비율(volume fraction of fibers) 그리고 코팅두께(coating thickness)를 변수로 사용하였다. 본 유한요소해석에서는 무보강 RC보(control beam)와 일정한 유리섬유 길이(30mm)와 일정한 코팅두께(4mm)를 가지며, 서로 다른 유리섬유 혼입(부피)비율(10%와 25%)을 가지는 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보를 선택하여 유한

표 1 유한요소해석에 사용된 실험체 (cf. Ha, 2007; Ha 등, 2009)

실험체	섬유길이 (mm)	섬유혼입비율 (%)	코팅두께 (mm)
CT	-	-	-
30L-10P-4T	30	10	4
30L-25P-4T	30	25	4

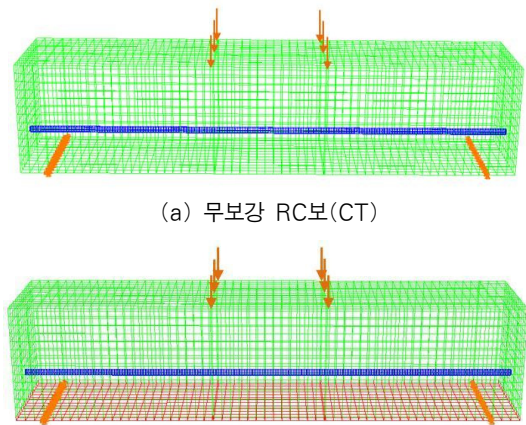


(a) 무보강 RC보(CT)

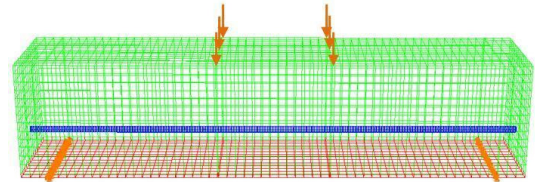


(b) 4mm 두께로 보강된 실험체 (30L-10P-4T, 30L-25P-4T)

그림 1 실험체 형상 및 보강상세(cf. Ha, 2007)



(a) 무보강 RC보(CT)



(b) 4mm 두께로 보강된 실험체 (30L-10P-4T, 30L-25P-4T)

그림 2 유한요소 메쉬(FE mesh), 하중 그리고 경계조건

표 2 유한요소해석에 사용된 재료의 물성치

항목	콘크리트	철근	에폭시	유리섬유
탄성계수(GPa)	25.0	200.0	1.3	91.0
포아송비	0.17	0.30	0.35	0.20

요소 모델링을 수행하였다. 각 실험체 이름과 변수조건은 표 1에 나타나있으며, 모델링에 사용된 실험체는 다음과 같다. (1) CT는 무보강 RC보, (2) 30L-10P-4T는 30mm 길이의 유리섬유가 10%의 부피 비율로 혼입된 4mm 두께의 코팅층으로 보강된 실험체, (3) 30L-25P-4T는 30mm 길이의 유리섬유가 25%의 부피 비율로 혼입된 4mm 두께의 코팅층으로 보강된 실험체를 의미한다. 또한, 모델링을 위한 각 실험체의 형상 및 보강상세는 그림 1에 나타나 있다.

각 실험체의 모델링은 ABAQUS의 구성요소를 사용하여 콘크리트, 철근 그리고 분사식 섬유보강 코팅층을 C3D8 즉, 8개의 절점(node)를 갖는 3차원 입체요소(solid element)를 사용하여 모델링 하였다. 각 실험체의 모델링을 위한 유한요소 메쉬(FE mesh)와 하중 및 경계조건은 그림 2에 나타나 있다. 유한요소해석을 위한 재료의 물성치는 표 2에 정리되어 있다. 표 2에서 콘크리트, 철근은 일반적인 재료의 탄성계수(Young's modulus)와 포아송비(Poisson's ratio)를 사용하였으며, 기지재료인 에폭시는 Lee 등(2008a)의 표 2의 탄성계수와 포아송비를 채택하여 적용하였다. 또한, 유리섬유의 탄성계수는 Ha(2007)와 Ha 등(2009)의 실험에 사용된 재료 물성치를 적용하였으며, 포아송비는 유리섬유의 일반적인 값을 사용하였다.

4. 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 성능예측

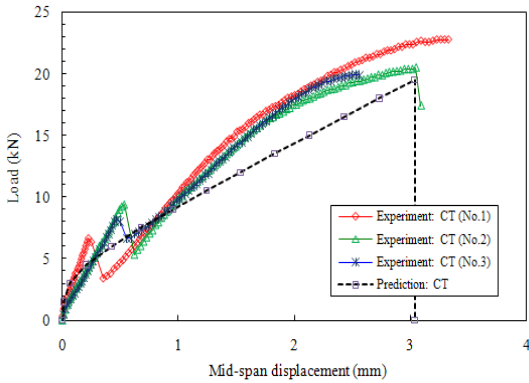


그림 3 무보강 RC보의 유한요소해석 예측값과 실험값 (Ha, 2007; Ha 등, 2009)의 하중-처짐곡선 비교

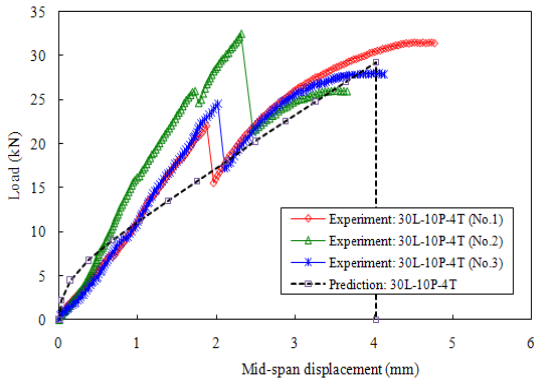


그림 4 30L-10P-4T의 유한요소해석 예측값과 실험값 (Ha, 2007; Ha 등, 2009)의 하중-처짐곡선 비교

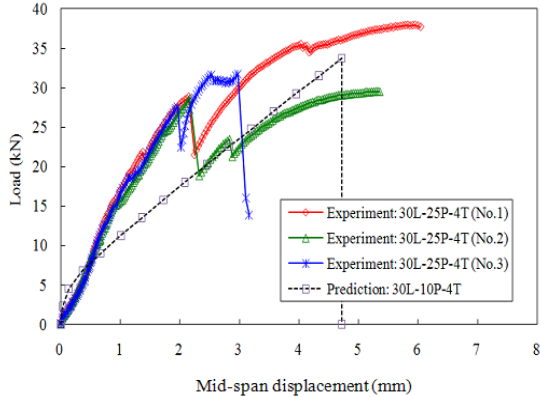


그림 5 30L-25P-4T의 유한요소해석 예측값과 실험값 (Ha, 2007; Ha 등, 2009)의 하중-처짐곡선 비교

본 연구에 사용된 콘크리트의 균열 생성에 영향을 미치는 균열 생성 손상변수 ϵ^{th} , c_1 , c_2 (Lee 등, 2005)는 Ha(2007)와 Ha 등(2009)에 의해 수행된 실험결과로부터 얻어진 무보강 RC보의 하중-처짐 곡선을 사용하여 시행착오법(try and error method)을 통해 결정하였다. 그림 3에서 보는바와 같이, 무보강 RC보의 유한요소해석 결과는 실험결과(Ha, 2007; Ha 등, 2009)와 잘 부합하고 있음을 보여주고 있으며, 예측된

표 3 극한하중의 유한요소해석 결과와 실험값 (Ha, 2007; Ha 등, 2009) 비교

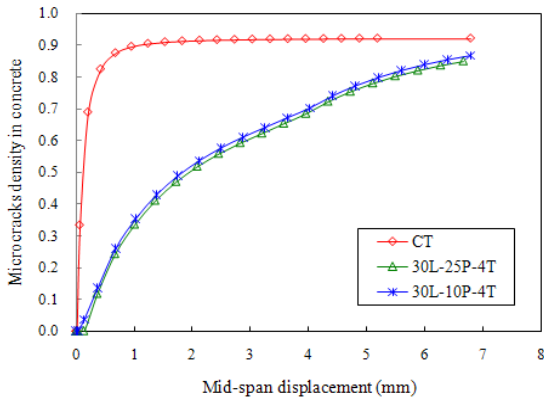
실험체	극한하중(kN)		비교 (1)/(2)
	실험값(1)	예측값(2)	
CT	21.04	19.50	1.08
30L-10P-4T	28.50	29.25	0.97
30L-25P-4T	33.07	33.75	0.98

표 4 에너지흡수량의 유한요소해석 결과와 실험값 (Ha, 2007; Ha 등, 2009) 비교

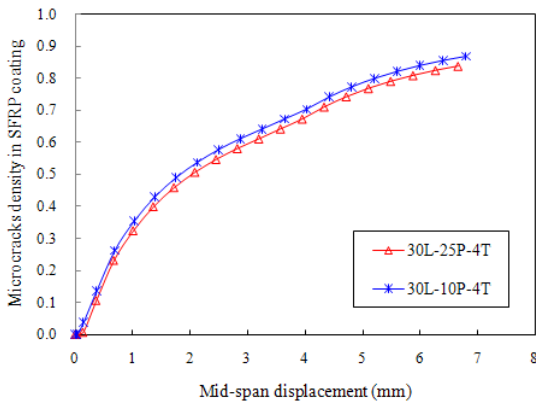
실험체	에너지흡수량(kN·mm)		비교 (1)/(2)
	실험값(1)	예측값(2)	
CT	40.28	35.58	1.13
30L-10P-4T	82.04	68.76	1.19
30L-25P-4T	114.93	91.58	1.26

콘크리트의 균열생성 손상변수 값은 다음과 같다: $\epsilon^{th} = 0.15 \times 10^{-5}$, $c_1 = 0.925$, $c_2 = 10.8$. 또한 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 유한요소해석을 위하여 섬유보강 코팅층의 섬유분리 손상변수(S_0 와 M ; Lee 등, 2000)와 균열생성 손상변수(ϵ^{th} , c_1 , c_2 ; Lee 등, 2005) 값을 $S_0 = 22.5 \times 10^2$, $M = 4.0$, $\epsilon^{th} = 2.0 \times 10^{-2}$, $c_1 = 0.0925$, $c_2 = 10.8$ 로 가정하였다.

무보강 RC를 통해 예측된 콘크리트의 균열생성 손상변수와 분사식 섬유보강 코팅층의 섬유분리 손상변수 및 균열생성 변수의 가정값을 적용하여 30L-10P-4T와 30L-25P-4T 실험체의 유한요소해석을 수행하였으며, 해석결과 얻어진 하중-처짐 곡선을 실험결과(Ha, 2007; Ha 등, 2009)와 비교하여 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4와 5에서 보는 바와 같이, 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 30L-10P-4T와 30L-25P-4T 실험체들의 유한요소해석으로 결과로 얻어진 하중-처짐 곡선들은 실험결과(Ha, 2007; Ha 등, 2009)와 비교적 잘 부합하고 있음을 보여주고 있다. 그림 4와 5에서 나타난 유한요소해석 결과와 실험값의 초기 기울기의 차이는 실험상의 오차로 인해 실험체의 초기 기울기가 작게 측정되었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 유한요소해석결과로 얻어진 하중-처짐 곡선들은 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)의 극한하중에 해당하는 지점까지 나타내었으며, 하중-처짐 곡선에서의 처짐(mid-span displacement)은 보의 중앙지점 하부에서 측정하였다(Ha, 2007; Ha 등, 2009). 또한, 측정극한하중 지점까지의 각 실험체가 흡수한 에너지량은 Origin software(downloaded from <http://www.originlab.com/index.aspx?s=12&lm=62>)를 사용하여 계산하였다. 각 실험체의 극한하중과 에너지흡수량의 유한요소해석 결과와 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)의 비교결과는 표 3과 4에 나타내었다. 그림 3~5에서 보듯이,



(a) 콘크리트 내부의 미세균열 밀도



(b) 분사식 섬유보강 코팅층의 미세균열 밀도

그림 6 콘크리트와 분사식 섬유보강 코팅층에서의 미세균열 진전양상

Ha(2007)와 Ha 등(2009)의 실험에서는 각각 3개의 실험체를 대상으로 하였으며, 극한하중과 에너지흡수량은 평균값을 구하여 분석하였다.

표 3과 4에서 보는 바와 같이, 무보강 RC보의 경우 극한하중과 에너지흡수량의 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)은 유한요소해석 결과 얻어진 결과에 비하여 각각 1.08배와 1.13배 큰 값을 보여주었다. 그리고 30L-10P-4T 실험체의 경우 극한하중과 에너지흡수량의 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)은 유한요소해석 결과 얻어진 결과에 비하여 각각 0.97배와 1.19배 큰 값을 보여주었다. 또한, 30L-25P-4T 실험체의 경우 극한하중과 에너지흡수량의 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)은 유한요소해석 결과 얻어진 결과에 비하여 각각 0.98배와 1.26배 큰 값을 보여주었다. 본 유한요소해석을 통해 분사식 섬유보강 코팅층은 RC보의 극한하중과 에너지흡수량을 증가시키는 것으로 나타났으며, 섬유혼입율이 10%에서 25%로 증가함에 따라 극한하중과 에너지흡수량이 증가하고 있음을 보여주었다. 위의 해석결과는 Ha(2007)와 Ha 등(2009)의 실험보고 결과와 잘 부합하고 있음을 보여

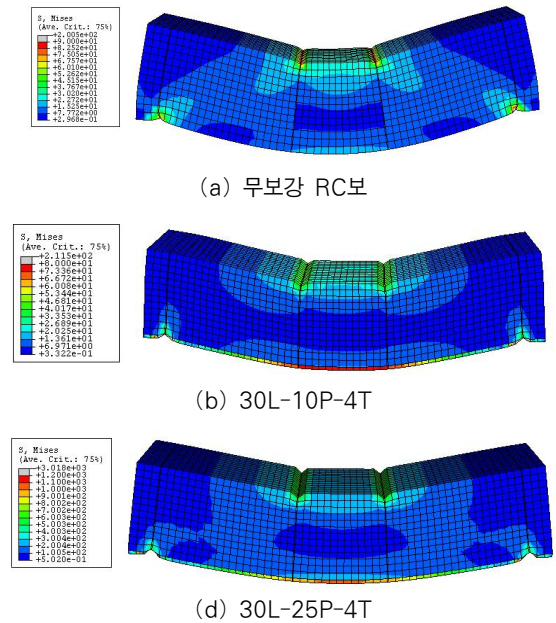


그림 7 각 실험체의 von-Mises 유효응력 분포와 변형 형상

주고 있다. 또한, 비교분석의 결과 손상구성모델(damage constitutive model)을 유한요소 프로그램에 적용한 해석결과는 실험결과(Ha, 2007; Ha 등, 2009)를 비교적 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다.

그림 6은 무보강 RC보와 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보 콘크리트의 미세균열 진행, 그리고 분사식 섬유보강 코팅층의 미세균열 진행을 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서 보는바와 같이, 치짐이 증가함에 따라 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 경우 무보강 RC보의 경우에 비하여 콘크리트 내부의 미세균열들이 더 늦게 나타남을 알 수 있다. 그림 6(b)에서는 10%의 보강섬유 혼입율을 가지는 실험체의 경우 25%의 보강 섬유 혼입율을 가지는 실험체에 비하여 미세균열들이 조금 더 일찍 나타남을 알 수 있다.

유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용한 해석결과 von-Mises 유효응력(von-Mises effective stress)의 양상 및 변형 형상은 그림 7에 나타나있다. 그림 7에서 보는바와 같이, 무보강 RC보의 경우 경계조건에서 응력이 집중적으로 나타남을 알 수 있으며, 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보, 즉 30L-10P-4T와 30L-25P-4T 실험체의 경우 섬유보강 코팅층 영역에서 응력이 집중적으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 손상구성모델(damage constitutive model)을 유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용하여 분사식 섬유

보강 코팅층으로 보강된 RC보 성능평가를 위한 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 예측결과를 실험값(Ha, 2007; Ha 등, 2009)과 비교하여 손상구성모델의 정확성을 증명하고자 하였다. 이를 위하여 ABAQUS의 구성요소를 사용하여 콘크리트, 철근 그리고 분사식 섬유보강 코팅층을 모델링하였다. 유한요소해석 결과 손상구성모델을 유한요소 프로그램에 적용한 해석결과는 실험결과(Ha, 2007; Ha 등, 2009)를 비교적 잘 예측하고 있음을 보여주었다. 또한, 무보강 RC보와 분사식 섬유보강 코팅층으로 보강된 RC보의 콘크리트의 미세균열 진행, 그리고 분사식 섬유보강 코팅층의 미세균열의 진행 양상을 분석하였다. 앞으로 보다 정확한 분사식 섬유보강 코팅층의 보강 성능을 평가하기 위해 다양한 종류의 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교하는 연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 동부건설(주)과 한국과학재단(KOSEF)으로부터 지원된 연구비(MEST)(R11-2002-101-02003, 2008) 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 유한요소해석을 위해 많은 도움을 준 한국과학기술원 김봉래 연구원의 협력에 고마움을 전합니다.

참 고 문 헌

심종성, 배인환 (1999) 국내 콘크리트교량의 보수·보강 재료의 현황, 대한토목학회지, 47, pp.24~33.

이강석, 손영선 (2007) Strengthening Performance of Sprayed Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Shear Beams, 대한건축학회, 구조계 대한건축학회 2007년도 학술발표대회 논문집, 27(1), pp.167~170.

이홍로, 이창미, 권우현, 김우석, 백승민, 박윤근 (2008) 탄소섬유판으로 보강한 철근콘크리트보의 전단보강효과, 42(4), pp.15~22.

한승철, 양준모, 윤영수 (2008) 분사식 FRP에 의한 구조물의 보강 성능 및 반발률 평가, 한국구조물진단학회지 12(1), pp.193~202.

ABAQUS analysis user's manual Version 6.5 (2004) Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.

Alexander, J.G.S. (1996) Shear Strengthening of Small Scale Concrete Beams with Carbon Fibre Reinforced Plastic Sheets, *Proceeding of Annual Conference of Canadian Society for Civil Engineering*,

2, pp.167~178.

Banthia N, Yan C, Nandakumar N. (1996) Sprayed FRPs for Repair of Concrete Structures, *In: Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials, ACMBMS 2, Canadian Society for Civil Engineering*, pp.536~537.

Banthia N, Yan C, Nandakumar N. (2002) Sprayed Fiber-Reinforced Polymers: from Laboratory to a Real Bridge, *Concr Int*, 24, pp.47~52.

Ha, S.K. (2007) An Experimental Evaluation of Strengthening Performance of RC Beams Reinforced with SFRP Coating, MS Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, pp.1~76.

Ha, S.K., Lee, H.K. (2009) Optimization of Volume Fraction and Fiber Length of Sprayed FRP used for Strengthening RC Structures, *Composites Part B: Engineering*, Submitted.

Harries, K.A., Young, S.C. (2003) Sprayed-Fiber-Reinforced Composite Materials for Infrastructure Rehabilitation, *Concr Int*, 25, pp.47~51.

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..

Karihaloo, B.L., Fu, D. (1989) A Damage-Based Constitutive Law for Plain Concrete in Tension, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 8, pp.373~384.

Karihaloo, B.L., Fu, D. (1990) Orthotropic Damage Model for Plain Concrete in Tension, *ACI Materials Journal*, 87, pp.62~67.

Lee, H.K. (2001) A Computational Approach to the Investigation of Impact Damage Evolution in Discontinuously Reinforced Fiber Composites, *Computational Mechanics*, 27, pp.504~512.

Lee, H.K., Avila, G., Montanez, C. (2005) Numerical Study on Retrofit and Strengthening Performance of Sprayed Fiber Reinforced Polymer, *Engineering Structures*, 27, pp.1476~1487.

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., Hausmann, R.L., Seaman, W.C.

- (2008a) Effectiveness of Retrofitting Damaged Concrete Beams with Sprayed Fiber-Reinforced Polymer Coating, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, pp.1269~1286.
- Lee, H.K., Kim, B.R., Ha, S.K.** (2008b) Numerical Evaluation of Shear Strengthening Performance of FRP Sheets/Strips and Sprayed FRP Coating Repair Systems, *Composites Part B: Engineering*, 39, pp.851~862.
- Lee, H.K., Simunovic, S.** (2000) Modeling of Progressive Damage in Aligned and Randomly Oriented Discontinuous Fiber Polymer Matrix Composites, *Composites Part B: Engineering*, 31, pp.77~86.
- Origin software**, Downloaded from <http://www.originlab.com/index.aspx?s=12&lm=62>.
- Rahimi, H., Hutchinson, A.** (2001) Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 5, pp.44~56.
- Zhao, Y.H., Weng, G.J.** (1996) Plasticity of a Two-Phase Composite with Partially Debonded Inclusions, *International Journal of Plasticity*, 12, pp.781~804.
- Zhao, Y.H., Weng, G.J.** (1997) Transversely Isotropic Moduli of Two Partially Debonded Composites, *International Journal of Solids and Structures*, 34, pp.493~507.