

초속경 라텍스개질 콘크리트로 보강된 RC보의 비선형 휨해석

최성용^{1*}, 윤경구¹, 김용빈², 강문식³
¹강원대학교 토목공학과, ²부양산업, ³한국도로공사

Nonlinear Flexural Analysis of RC Beam Rehabilitated by Very-Early Strength Latex-Modified Concrete

Sung-Yong Choi^{1*}, Kyong-Ku Yun¹, Yong-Bin Kim² and Mun-sik Kang³

¹Department of Civil Engineering, Kangwon National University

²Buyang Industry, ³Korea Expressway Co.

요 약 라텍스로 개질된 콘크리트는 높은 휨강도 뿐만 아니라 부착강도 및 투수저항성이 좋은 재료특성을 제공한다. 이러한 이점을 활용한 초속경 라텍스개질 콘크리트(VES-LMC)에 관련된 연구결과는 재료에 관한 것이 대부분으로, VES-LMC로 덧씌우기 보강된 RC 보의 부착 경계면 거동특성에 대한 체계적인 연구는 미진하다. 따라서 본 논문에서는 VES-LMC로 보강된 철근콘크리트 보의 비선형 휨 거동에 대한 특성을 알아보고자 ABAQUS를 매개변수 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 비선형 휨 해석을 위하여 본 논문에 적용된 모델의 적합성 여부를 확인한 결과 실험값과 비교적 유사한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 두께가 증가함에 따라 최대 저항강도가 증가하는 경향을 보여주었으며, 또한 강성 이 증가하여 내하력이 증진되는 결과를 확인할 수 있었다. 부착강도를 변수로 해석한 결과, 전단강도가 증가함에 따라 휨 저항능력이 향상되는 결과를 확인 하였으며, 두 이질재료의 부착능력이 구조물의 내하력에 지배적인 인자로 작용하는 것을 알 수 있었다.

Abstract Latex modification of concrete provides the material with higher flexural strength, as well as high bond strength and reduced water permeability. One of the most advantages of the very early-strength latex-modified concrete (VES-LMC) could be the similar contraction and expansion behaviour to normal concrete substrate, which enable to ensure long-term performance. The purpose of this study was to parametric nonlinear flexural nonlinear analysis of RC beam rehabilitated by VES-LMC. The results were as follows; The flexural nonlinear analysis model of RC beam overlaid by VES-LMC in ABAQUS was proposed to predict the load-deflection response, interfacial stress, and ultimate strength. The proposed FE analysis model was verified by comparison of an experimental data and the FE analysis results. The FE analysis results showed that yield point as well as flexural stiffness increased as the depth increased; the stiffness of beam overall increased as the bond stiffness became larger; the bond strength between two different materials is a key factor in composite beam. A parametric study showed that an overlay thickness was a main influencing factor to the behavior of RC beam overlaid by VES-LMC.

Key Words : VES-LMC, ABAQUS, Nonlinear, FE analysis, Rehabilitation

1. 서론

Latex Modified Concrete: 이하 VES-LMC)란 초속경시멘트 콘크리트에 라텍스를 첨가해서 만든 콘크리트이다. 콘크리트에 라텍스를 첨가하였을 경우 염분 및 수분의 침

*교신저자 : 최성용(choisy@kangwo.ac.kr)

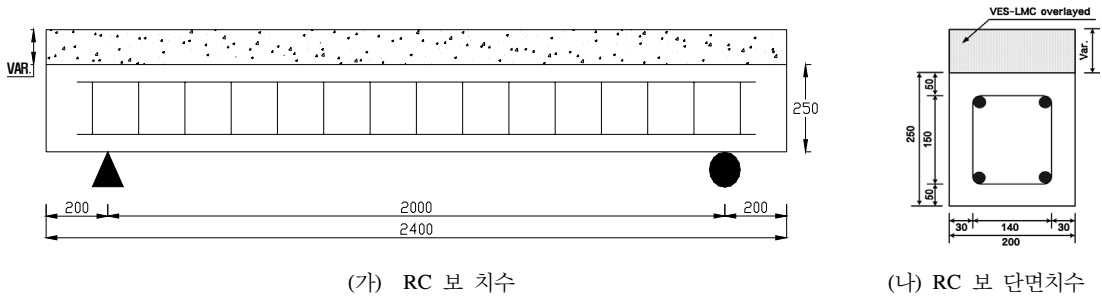
접수일 10년 07월 15일

수정일 (1차 10년 10월 12일, 2차 10년 11월 16일)

게재확정일 10년 11월 19일

[표 1] 배합표

Class of Concrete	Gmax (mm)	Slump (mm)	Air content (%)	W/C	S/a	Mix proportion(kg/m ³)					Admixture (g/m ³)
						Water	Cement	Fine Agg.	Course Agg.	Latex	
OPC(Beam)	25	80	4.5	0.45	0.40	160	350	696	1087	-	350
VES-LMC	19	210±10	4.0	0.33	0.58	67	400	930	716	125	-



(가) RC 보 치수

(나) RC 보 단면치수

[그림 1] RC 보 시편 제원 (단위 : mm)

투에 대한 투수저항성이 증대되고 휨강도가 증대되는 강도특성을 지닌다. 또한 보통 콘크리트와 유사한 수분의 증발 또는 흡수 등에 의한 건조수축 또는 팽창현상으로 체적변화의 안전성을 지님으로써 신구 콘크리트의 내구성이 증진된다[3].

교량상판의 덧씌우기나 노후 된 도로의 보수처럼 콘크리트구조물은 종종 새로운 콘크리트가 기존 콘크리트에 적용되어 신구 콘크리트로 구성된 복합 구조체를 이룬다. 두 가지의 서로 다른 콘크리트로 구성된 신구 콘크리트구조물의 성능은 새로이 적용되는 신 콘크리트 재료의 물성보다는 구 콘크리트와 신 콘크리트 사이의 부착성능에 의해서 크게 좌우된다. 기존에 발표된 VES-LMC에 관한 연구는 재료에 관한 것이 대부분으로, VES-LMC로 덧씌우기 보강된 RC 보의 부착 경계면 거동특성에 대한 체계적인 연구는 미진하다[1]. 더욱이 구조물의 강성 및 내력이 부족하거나, 부재에 과다한 외력 및 기후변화 등이 발생한 경우에는 구조물에 예상치 못한 변위, 변형 등이 나타나 비선형적인 거동에 대한 우려를 내포하게 된다.

따라서 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 비선형 해석을 통하여 실험결과 값을 비교 검토하여 적합성 여부 판단 후 휨 실험 시 고려되지 못했던 변수들에 대하여 매개변수 연구를 실시하였고 부재의 비선형적인 거동 특성을 규명하고자 하였다.

2. 실내 보실험

2.1 개요

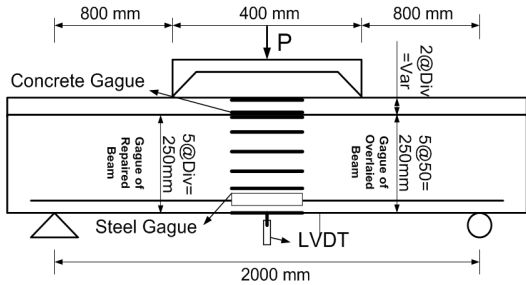
보강재료의 보강 효과 및 휨거동 특성 파악을 위해서는 실제 실험에 의해 하는 것이 가장 적절하나, 여러 매개변수를 고려하여 휨 실험할 때는 많은 제한을 받게 된다. 따라서 해석을 통해 다양한 변수에 따른 비선형 휨 거동에 대한 특성을 알아보고자 함이 본 연구의 목적으로 실제 보강된 보실험을 통해 모델링의 적합성을 파악하고자 실내 보실험을 실시하였다[4].

2.2 VES-LMC로 보강된 RC 보 실험

콘크리트 배합은 기 개발되어 현장에서 적용되고 있는 라텍스 혼입물 15%의 VES-LMC와 콘크리트 교량 상판을 모사하기 위하여 28일 설계강도 27 MPa를 목표로 보통포틀랜드 시멘트 콘크리트로 구분하여 표 1과 같이 배합설계를 하였다.

덧씌우기 보강된 시험체는 그림 1과 같은 150×250 mm의 기준 보에 추가적인 덧씌우기 높이 4cm 와 표준 시험체인 보통 포틀랜드 콘크리트 보를 각각 제작하였다. 주철근은 D13, D16 전단철근은 D10을 사용하였다. 휨 거동 특성을 알아보기 위하여 그림 2와 같이 시간중양 하단부의 LVDT 2기를 설치하였으며, 설치된 LVDT로 시험체의 하중에 따른 처짐량을 측정하여 기존 철근콘크리트 보와 최대 저항강도 및 하중-처짐 관계를 얻어 모델링의 적합성을 판단하고자 한다. 또한, 기존 콘크리트와 보

강재료인 VES-LMC의 강도 및 탄성계수 시험을 실시하여 모델링의 제한으로 사용하고자 한다[4].



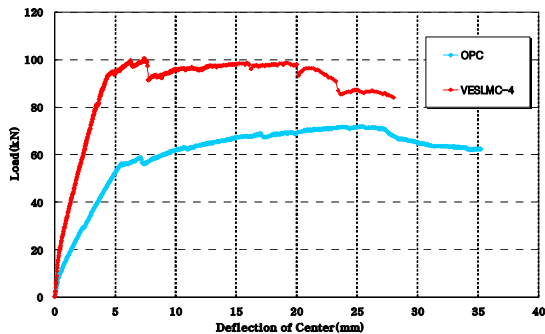
[그림 2] RC 보 실험의 측정시스템

실험결과 일반 철근콘크리트 보와 VES-LMC로 4cm 덧씌우기 보강된 철근콘크리트 보의 정적 휨 파괴 시험은 재령 28일에 있어 200 톤 용량의 UTM시험기를 사용하여 하중단계에 따른 처짐을 측정된 결과는 그림 3과 같으며, VES-LMC로 덧씌우기 한 경우의 보강효과에 대한 실험적 결과이다[4]. 또한 일반콘크리트와 VES-LMC의 강도와 탄성계수를 시험을 통해 측정하였고, 그 결과는 표 2와 같다[4].

실내 휨실험과 재료의 강도 및 역학적 특성은 휨해석 모델링에 적합성 및 해석 모델의 재료특성에 적용하였다.

[표 2] VES-LMC와 OPC의 역학적 특성

	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)
OPC	28	-	20,332
VES-LMC	37	9.1	25,893



[그림 3] VES-LMC로 보강된 RC 보의 하중-처짐 관계

3. ABAQUS를 이용한 비선형 휨해석

3.1 개요

본 연구에서는 유한요소 해석프로그램 중 비선형해석에 장점을 가진 ABAQUS 6.5-1을 사용하여 수행하였다. 해석모델에 사용된 요소로 콘크리트인 OPC와 VES-LMC는 8절점 솔리드 요소를 사용하였으며, 철근은 2절점 트러스 요소를 사용하였다. 또한 신·구 콘크리트의 계면의 슬립영향을 고려하기 위하여 스프링 요소를 적용하였다.

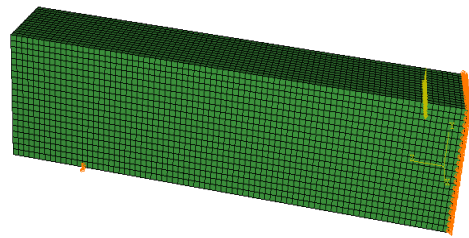
재료모델로서 콘크리트는 Menetrey - William 모델, 철근은 Hsu 모델, 스프링은 劉玉擎이 제안한 모델을 사용하였다.

모델링에 사용된 데이터는 실험을 통하여 얻은 실험값을 사용하였으며, 실험체와 동일하게 재료와 하중을 모델링한 후 해석을 수행하여 모델의 적정성 및 타당성을 검증하였다.

3.2 재료모델

3.2.1 적용요소

해석에 사용된 모델은 해석의 편의성을 위해서 그림 4와 같이 실험체 총 경간에 반만을 모델링하여 해석에 적용하였다. 사용된 요소로 OPC 및 VES-LMC는 8절점 솔리드 요소를 사용하였고, 철근은 2절점 트러스 요소를 사용하였다. 두 이질재료의 계면을 표현하기 위하여 OPC와 VES-LMC 요소 사이의 공유절점에 스프링 요소를 연결하여 거동하도록 하였다. 지점은 롤러로 처리하였고, 중앙은 처짐만 거동하도록 하였다.



[그림 4] 적용 모델

3.2.2 콘크리트 모델

Menetrey-William의 콘크리트 파괴기준은 인장과 압축 항복강도가 크게 다른 복합재료와 같이 압축의존성 항복 특성을 나타내는 재료에 적용 가능한 모델로서 3축응력 상태를 정확하게 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 변수 수정을 통해 기존의 개발된 모든 파괴기준을 구현할 수 있는 특성이 있다[9]. 이 콘크리트 파괴기준은 Rankine의 인장

응력조건과 Mohr-Columb 전단파괴기준의 조합을 통한 Hoek와 Brown의 제안식을 수정함으로써 삼축응력상태를 나타낼 수 있도록 구축된 모델이다.

Menetry-William의 콘크리트 모델의 경우 콘크리트의 인장 응력-변형률 관계의 자료가 요구된다. 이 관계는 Kent에 제안식을 적용하였다[8][9].

$$\epsilon_c \leq \epsilon_{tp} \quad f_t = E_c \epsilon_c \quad (1)$$

$$\epsilon_{tp} < \epsilon_c < \epsilon_{tf} \quad f_t = f_r - (\epsilon_c - \epsilon_{tp})(-E_t) \quad (2)$$

$$\epsilon_c > \epsilon_{tf} \quad f_t = 0 \quad (3)$$

여기서,

$$E_t : \text{변형률 연화 계수} \quad (E_t = -\frac{70}{57 + f_r} E_c)$$

f_t : 균열 직각 방향의 콘크리트 인장응력

f_r : 콘크리트 파괴계수

ϵ_c : 콘크리트 일축 변형률

ϵ_{tf} : 최대 인장응력 시 변형률

ϵ_{tf} : 콘크리트의 인장응력이 0일 때 변형률

3.2.3 철근모델

Hsu의 연구결과에 의하면 철근이 콘크리트에 묻힌 경우의 항복강도는 순수 철근만의 항복강도에 비해 작은 것으로 나타났다[7]. 그러나 현재까지는 이와 같은 철근의 거동특성을 무시하고 순수 철근의 항복강도만을 고려함으로써 실제 상황보다 큰 철근의 항복강도를 고려하여 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다.

Hsu의 연구결과 콘크리트 속에 묻힌 철근의 응력-변형률관계는 식 (4), 식 (5) 및 그림 5에 나타난 것과 같이 2개의 직선으로서 이상화할 수 있다[7]. 항복 전까지는 기울기 E_s 를 갖는 직선으로 표현되며 항복 후에는 기울기 E_p' 을 갖는 직선으로서 나타낼 수 있다. 두 직선의 경계가 되는 응력은 f_y' 이다.

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad (f_s \leq f_y') \quad (4)$$

$$f_s = f_o' + E_p' \epsilon_s \quad (f_s > f_y') \quad (5)$$

여기서, f_o' 은 항복 후 기울기 E_p' 을 갖는 직선을 f_s 축까지 연장했을 때 f_s 축 상의 값을 나타낸다. f_y' 과 E_p' 은 외관상 항복응력 f_y^* 와 선형관계를 가지므로 f_y^* 로서 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_y'}{f_y} = 0.43 + 0.5 \frac{f_y^*}{f_y} \quad (6)$$

$$\frac{E_p'}{E_p} = 3.3 - 2.5 \frac{f_y^*}{f_y} \quad (7)$$

여기서, E_p 는 순수 철근의 변형경화구역에서의 기울기를 나타낸다. 시험에 의해 순수철근의 응력-변형곡선이 결정되면 소성계수 E_p' 는 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

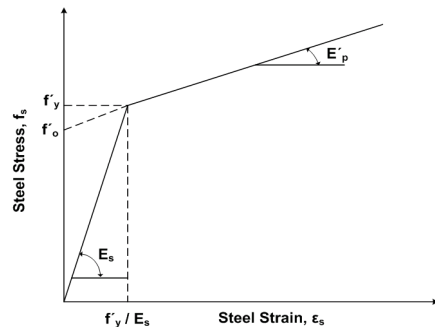
$$E_p' = \frac{f_{0.05} - f_y}{0.005 - \epsilon^h} \quad (8)$$

여기서, $f_{0.05}$ 는 변형경화 구역내 변형 0.05에서의 순수 철근의 응력을 나타내며 ϵ^h 는 변형경화 구역 시작점에서의 순수 철근의 변형을 나타낸다.

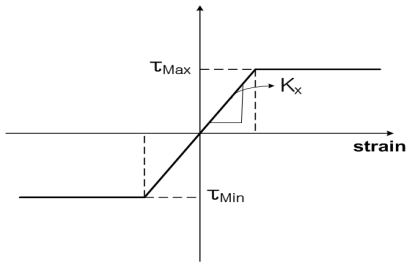
3.2.4 스프링모델

보강된 철근콘크리트 보에서 모체콘크리트 표면과 보강 재료 표면 사이의 부차거동을 나타내기 위하여 좌표계의 세 방향 방향성을 갖는 스프링으로 이상화하였다. 이 때 사용한 각 방향의 스프링의 강성 K_s 는 전단흐름 계산 시 적용하였던 Kent의 이론을 기초로 하여 전단면에 작용하는 압축력을 계산하였고[8], 이 압축력을 제안된 식(9)에 적용하여 스프링의 강성을 계산하였다. 그러나 본 연구에서는 계면에 발생하는 변형량만을 고려하기 위하여 수평방향을 제외한 나머지 방향의 스프링 강성은 무한 강성을 갖도록 처리하였다. 그림 7은 모델에 적용된 스프링요소를 나타내고 있다.

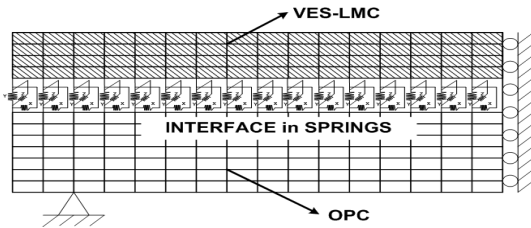
$$K_h = \frac{E_h}{2(1 + \nu_h)t} \quad (9)$$



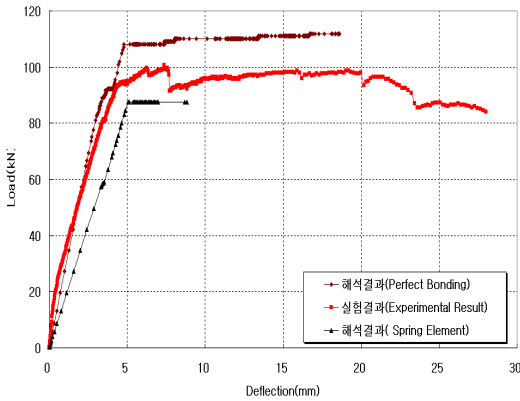
[그림 5] 철근의 응력-변형률 곡선[7]



[그림 6] 전단응력-변형률[7]



[그림 7] 스프링요소를 적용한 모델



[그림 8] 보의 하중-처짐 관계 실험결과와 해석결과 비교

3.3 가정된 모델의 적합성 검토

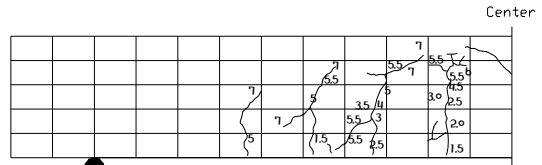
3.3.1 하중-처짐 관계

적용된 모델의 적합성을 평가하고자 VES-LMC로 40mm 덧씌우기 한 시험체와 모델링 결과 값과 계면거동을 고려하여 스프링 처리된 모델 결과 값을 비교한 그래프를 그림 8에 나타내었다. 그림과 같이 계면을 고려하지 않았을 경우 단면이 증가하면 그 만큼 휨 강성이 증가하여 실험체와는 상이한 기울기를 보이며 최대 저항강도 또한 증가하는 결과를 얻었다. 스프링 요소를 적용한 결과, 초기 인장강성 영역에서는 완전부착 모델이 유사한 경향을 보였으나 초기균열 발생 후 스프링 요소를 적용

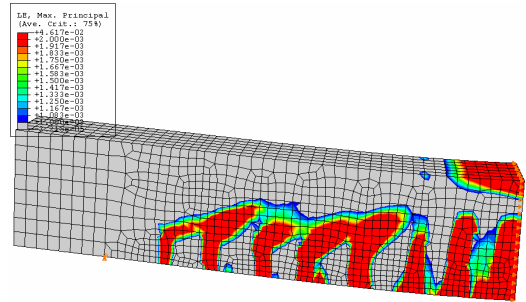
한 모델의 강성이 실험 데이터와 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 최대 저항강도 차이는 휨 실험 시 측정 한 보 중앙에서의 변형률(전단 슬립량)이 모델의 전체 요소에 적용 되었기 때문에 실험값보다 비교적 작게 해석 된 것으로 판단된다.

3.3.2 균열진전양상

그림 9는 각각 기준 시험체와 FE 해석결과의 균열진전양상을 비교하여 나타낸 그림이다. 두 결과를 비교해 보면 기준 시험체의 항복하중 55~65 kN 까지의 균열양상이 모델결과와 비슷한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 적용된 Menetrey -Willam 모델이 콘크리트 구조물의 균열진전형태를 표현하는데 충분하다고 판단된다.



(가) 실험결과



(나) 해석결과

[그림 9] 균열진전 결과 비교

4. 매개변수가 VES-LMC 보강에 미치는 영향 고찰

VES-LMC 덧씌우기가 보강에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 비선형 휨해석을 수행하였다. 우선 부착 계면이 완전 부착조건에서 VES-LMC 보강두께에 따른 보강효과를 확인하였고, 부착계면이 완전부착이 아닌 경우 보강효과를 여러 매개변수별로 해석 검토하였다. 이때 설정한 매개변수는 표 3과 같이 설정하였다. 우선 계면에서의

거동을 고려하여 스프링강성 변화에 따른 특성을 알아보고자 계면에서 발생하는 최대 전단응력을 변화시켜 변수를 설정하였다. 덧씌우기 강도에 따라 변화는 VES-LMC가 발현될 수 있는 최대 및, 최소 값으로 한정하여 변수로 선정하였다. 인장축에 적용 될 수 있는 요소로 철근을 선정하여 철근비에 따른 변화를 알아보고자 하였다.

4.1 완전 부착 조건에서 보강두께에 따른 최대 저항강도 변화

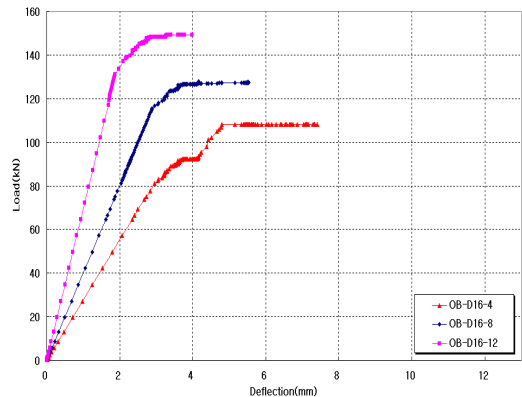
그림 10은 완전부착 계면 조건에서 보강 두께 변화에 따른 철근콘크리트 보의 거동을 알아보고자 두께를 40, 80, 120mm 증가시켜 해석을 수행한 결과를 나타내는 그래프이다. 덧씌우기 두께가 증가함에 따라 최대 저항강도가 92, 122, 145kN으로 증가하는 경향을 보여주었으며, 단면 증가로 인하여 보의 강성이 증가하여 두께가 증가함에 따라 항복 전까지 내하력이 증진되는 결과를 확인할 수 있었다.

4.2 부착전단강도(스프링강성)에 따른 영향

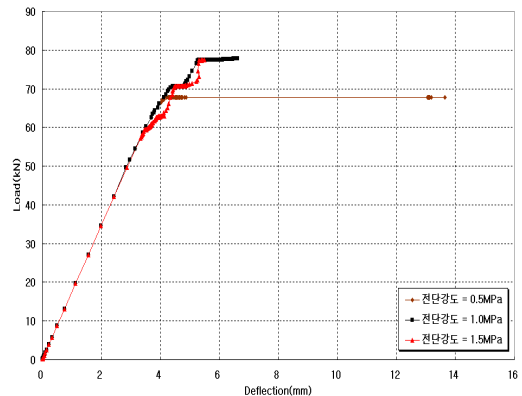
그림 11은 부착전단강도(스프링강성)에 따른 철근콘크리트 보의 하중-처짐 해석결과를 나타내는 그림이며, 해석 시 적용한 스프링요소의 강성을 조절하여 계면에서의 거동을 확인하고자 하였다. 부착전단강도가 0.5 MPa인 경우에는 68 kN에서 항복 값이 나타났다. 그러나 부착전단강도가 증가함에 따라 10kN이상 최대 저항강도가 증진되는 결과를 확인할 수 있었다. 부착능력이 향상됨에 따라 두 재료가 일체로 거동하게 되어 항복이후에도 부착전단강도가 0.5 MPa인 경우와는 다른 거동을 확인할 수 있었다.

[표 3] 매개변수

계면처리	전단강도 (MPa)	스프링 요소					
		0.5		1.0		1.5	
		입축철근	인장철근	입축철근	인장철근	입축철근	인장철근
D16	D13	1	2	3	4	5	6
	D16	7	8	9	10	11	12
D19	D13	13	14	15	16	17	18
	D16	19	20	21	22	23	24



[그림 10] 보강 두께에 따른 하중-처짐관계



[그림 11] 스프링강성에 따른 하중-처짐관계

4.3 덧씌우기 강도에 따른 영향

그림 12는 VES-LMC의 압축강도 변화에 따른 철근콘크리트 보의 거동에 대한 해석결과를 나타낸 그림이다. 전단강도가 1.0MPa인 경우 압축강도 변화에 따른 보의 거동에 대한 해석결과는 압축강도 35MPa일때 70kN, 45MPa일때 75kN으로 유사한 최대 저항강도를 보였으며 항복이후에도 유사한 경향으로 거동하였다. 그러나 전단강도가 1.5MPa인 경우 최대 저항강도에서 20kN이상의 큰 차이를 보였다. 이는 합성보의 경우 힘에 대한 저항능력은 덧씌우기 재료의 압축강도 보다는 두 재료의 부착능력이 지배적이라는 결과를 확인할 수 있었다.

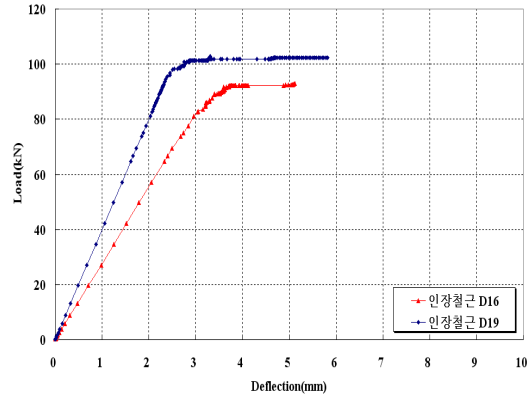
4.4 인장 철근에 따른 영향

압축 및 인장 철근의 영향을 알아보기 위하여 철근을 D16, D19로 변화시켜 해석을 실시하였으며, 해석결과를 그림 13에 나타내었다. 인장철근의 영향은 인장철근 D16

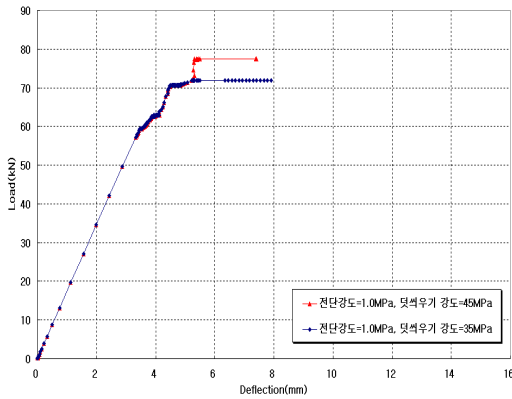
기준 44% 증가함에 따라 최대 저항강도 및 강성이 15% 이상 증가하는 경향을 보였다.

4.5 종합분석

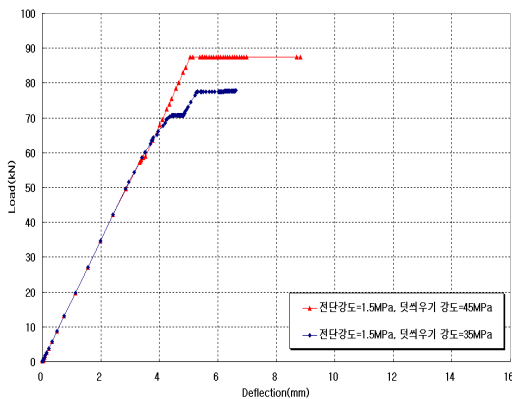
계면에서의 거동을 고려하여 스프링강성 변화에 따른 특성, 덧씌우기 재료(VES-LMC)강도에 따라 변화되는 특성, 인장축에 적용 될 수 있는 요소로 철근을 선정하여 철근비에 따른 변화 보강효과 즉 최대 저항강도를 비교 분석하였다. 그 결과 부착능력 즉 부착전단강도(스프링강성)의 변화에 따라 보강효과를 확인하였으며, 특히 보강 재료의 강도가 증진되어도 부착능력 저하되면 최대 저항 강도의 차이 없는 결과에서 부착능력이 보강효과 큰 영향 변수임을 확인하였다.



【그림 13】 인장철근에 따른 하중-처짐관계



(가) 전단강도 1.0 MPa



(나) 전단강도 1.5MPa

【그림 12】 덧씌우기 강도에 따른 하중-처짐관계

5. 결론

VES-LMC로 보강된 RC 보의 비선형 휨 거동에 대한 특성을 알아보기 위하여 ABAQUS를 이용하여 매개변수 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 비선형 휨 해석을 위하여 본 논문에서 적용된 모델의 적합성 여부를 확인한 결과 하중-처짐의 경향과 균열 양상이 실험값과 비교적 유사한 경향을 보이는 것을 확인 및 검토하였다.
2. 부착강도(전단강도)를 변수로 해석한 결과, 전단강도가 증가에 따라 휨 저항능력이 향상을 확인 하였으며, 두 이질재료의 부착능력이 구조물의 내하력에 지배적인 인자로 작용하는 것을 알 수 있었다.
3. VES-LMC 압축강도를 변수로 해석한 결과, 부착능력이 확보된 경우 압축강도가 증가함에 따라 내하력이 증진되는 결과를 확인 할 수 있었다.
4. 인장철근에 따른 매개변수 연구를 한 결과 인장철근 비가 증가 할수록 항복 및 휨 강성이 크게 영향을 받는 것을 확인 할 수 있었다.
5. 종합적으로 비선형 해석을 통한 매개변수 영향평가 결과 부착능력(부착전단강도)이 VES-LMC 보강효과에 큰 영향 변수임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 김성환 “LMC로 덧씌우기 보강된 철근콘크리트 보의 비선형 휨 해석”, 강원대학교 대학원 박사학위, 2005.
- [2] 이승준 “정 모멘트를 받는 합성보의 비선형 해석”,

단국대학교 대학원 석사학위 논문, 2000.

- [3] 윤경구, 김경진, 이남주, 장홍균, 심도식 “라텍스 개질 콘크리트의 부착강도특성”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, Vol.22, No.2, pp.647-652, 2000.
- [4] 최성용, 윤경구, 최승식 “초속경 라텍스개질콘크리트로 덧씌우기 및 보수된 철근콘크리트 보의 보강효과”, 한국콘크리트학회 논문집 Vol. 20 No. 4, 2008.
- [5] Abaqus, "Version 6.4-1 User's Manual", Abaqus, inc
- [6] Bass, R.A., Carrasquillo, R.L. and Jiras, J.O. "Interface Shear Capacity of Concrete Surfaces used in Strengthening Structure", Report on Research project, Dept. of Civil Eng., Univ. of Texas at Austin, 1985.
- [7] Hus, T.C. "Unified Theory of Reinforced Concrete", CRC, 1992.
- [8] Kent, Dudley Chales, and Park, Robert. "Flexural member with confined concrete", Proceeding, ASCE, Vol. 97, ST7, pp.1969~1990, 1971.
- [9] Menetrey, Ph., and K. J. William “Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization,” ACI Structural Journal, 1995.

최 성 용(Sung-Yong Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 강원대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2003년 1월 : 한석엔지니어링 구조부 재직
- 2009년 6월 ~ 현재 : 강원대학교 BK21 사업팀 박사후과정

<관심분야>

구조공학, 콘크리트공학

윤 경 구(Kyong-Ku Yun)

[정회원]



- 1991년 12월 : 미시간 주립대학교 토목·환경공학과 (공학석사)
- 1995년 12월 : 미시간 주립대학교 토목·환경공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 2000년 2월 : 한국도로공사 연구소 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 철근콘크리트공학, 콘크리트공학

김 용 빈(Yong-Bin Kim)

[정회원]



- 2007년 8월 : 강원대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 박사과정
- 1988년 8월 ~ 현재 : 부양산업(주) 상무이사

<관심분야>

구조공학, 콘크리트공학

강 문 식(Mun-sik Kang)

[정회원]



- 1987년 2월 : 강원대학교 토목공학과(공학학사)
- 2003년 8월 : 성균관대학교 토목공학과(공학석사)
- 1989년 12월 ~ 현재 : 한국도로공사 재직중 (건설환경부장)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

구조공학, 콘크리트공학