

## PE 도막철근의 휨거동에 대한 실험적 연구

### Experimental Investigations on the Flexural Behavior Using PE-Coated Rebars

김 영 진\* / 강 영 종\*\*

Kim, Young-Jin\* / Kang, Young-Jong\*\*

#### Abstract

Recently, The corrosions of reinforced concrete structures are severe problems of economical · social effects. PE-coated bars protecting from corrosion and enhancing durability of reinforced concrete structures are testified to evaluate structural properties. Tests are verified by comparative bending tests of the three type materials of epoxy coating, without coating and pe-coating. Load-deflection relations are superior in pe-coated bar than any other materials(bare bar and epoxy bar). These are proved bonding properties enhancement by using cement powder.

**Key words** : reinforced concrete, pe-coated bars, epoxy-coated bars, bare bars, cement power

#### 요 지

최근의 철근콘크리트 구조물의 부식현상은 경제·사회적인 문제를 야기시키고 있다. 콘크리트내 철근의 부식을 방지하고 내구성을 향상시키고자 PE도막철근을 이용하여 구조적 성능을 실험적으로 검증하였다. 에폭시도막, 무도막과 PE도막철근의 세가지 재료에 대하여 휨실험을 수행하였고 그 결과치를 비교 검증하였다. 하중-변위간의 관계를 통하여 무도막철근과 에폭시도막철근보다는 PE도막철근의 성능이 다소 우수함을 보였다. 이러한 결과를 통하여 도막재료에 시멘트를 살포하였던 것이 부착성능을 향상 시켰을 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 철근콘크리트, PE-도막철근, 에폭시도막철근, 무도막철근, 시멘트가루

\* 정회원 · 한국토지공사 연구개발처 주임연구원 · 공학박사 · 031-738-7790 (E-mail : yjkim@koland.co.kr)

\*\* 정회원 · 고려대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 02-3290-3317 (E-mail : yjkang@korea.ac.kr)

## 1. 서 론

해양환경하에 건설된 사회간접시설물들을 염해로부터 보호하기 위한 방법들 중 처음부터 철근에 방식처리를 하는 방법에 대한 필요성이 급격히 대두되고 있는 실정이다. 최근 우리나라에서도 경제 성장과 더불어 기간산업의 발전에 따른 물류수송의 급증 및 자가용차량의 급격한 증대로 인하여 고속도로, 고속철도, 신공항, 지하철건설 및 해양도시 건설 등에 사회간접자본이 많이 필요로 되어지고 있다. 이렇게 축조되는 건설관련 시설물들은 철근 콘크리트 또는 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 건설되어 있으며, 현재도 철근콘크리트로 만든 시설물들은 전체구조물에서 많은 부분을 차지하고 있다.

철근 콘크리트나 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 경우 이러한 해양환경하에 오랜 기간동안 노출될 경우 해수 중의 염화물의 작용에 의하여 콘크리트가 침식되고, 콘크리트 속에 묻힌 철근이나 PC 강재가 녹이 슬기 시작하여 부식을 일으키며, 체적의 팽창으로 인하여 콘크리트내의 인장응력발생으로 인한 체적팽창을 야기 시키게 되고, 최종적으로 철근콘크리트 구조물에 균열 및 박리를 일으키게 되어 심할 경우 구조물의 붕괴에 까지 이르게 된다. 이러한 철근의 부식문제를 해결하기 위해서 1960년대부터 미국에서는 에폭시(Fusion Bonded Epoxy) 도막을 통한 콘크리트의 중성화 및 철근의 부식에 대한 방식공법으로 활용해왔다. 국내에서도 에폭시 도막철근에 대한 연구가 이루어져왔지만 최초로 적용되어진 교량은 1995년 서해대교가 처음이었으며, 현재에도 염해의 피해가 예상되는 지역의 교량에 적용이 되고 있지만 도막에 따른 추가비용이 무도막철근 비용에 육박하거나 다소 비싸게 사용되고 있기에 저변에 폭넓게 사용되지는 못하고 있는 실정이므로, 이에 대한 재료비용의 절감을 위한 새로운 대체 재료의 개발이 절실히 필요로 하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 단순보(L=3,000mm)를 제작하여 PE(Polyethylene)도막철근, 무도막철근과 에폭시도막철근에 대하여 휨강도에 대한 비교실험을 실시하고, 도막에 따른 단순보의 균열양상을 살펴 보았으며 무도막과의 파괴형상을 비교하고자 하였다. 또한 철근의 부식상태는 염분혼입 몰탈상태(NaCl =1.0%, 2.0%)에서도 부식이 발생하지 않았

음을 알 수 있었다. 이에 대한 결과는 참고문헌에서만 나타내고자 한다.<sup>1)</sup>

## 2. RC 보의 휨거동 실험

### 2.1 재료설명

실제 RC보를 대상으로 폴리에틸렌도막철근과 일반 이형철근을 주근으로 사용한 경우의 RC보의 휨 재하실험을 통하여 도막상태별로 비교 평가함으로써 폴리에틸렌도막철근의 유효성을 구조적인 관점에서 평가하고자 하며, 폴리에틸렌도막철근을 RC보의 주근으로 사용한 경우의 구조성능 자료 확보와 스티럽 철근에 대한 구조적 성능을 검토하고자 한다.<sup>2)</sup>

#### 2.1.1 휨내력 실험 해석 모델

단면이 200×300(mm×mm)이고, 총길이가 3,000mm (span=2,700mm)인 철근콘크리트 보를 철근비가 0.007%로 휨파괴가 유도 되도록 실험을 실시하였다. 주근에는 무도막철근(BS), 폴리에틸렌도막철근(PE), 에폭시 도막철근(EY)을 각각 사용(HD-13)하였다. 실험체 구성은 표 1. 과 같다.

표 1. 폴리에틸렌도막철근을 주근으로 사용한 RC보의 휨내력 평가 실험체 구성

구분	실험체	
도막 유무	BS	HD13(주철근), 횡 보강근
	PE	HD13(주철근), 횡 보강근(도막)
	EY	HD13(주철근), 횡 보강근(도막)
도막 두께	200 μm	

#### 2.1.1.1 하중 재하 방법 및 실험체 제작

지간의 중앙부에 2점 하중을 재하하여 휨변위에 따른 구조체의 거동을 파악하였으며, 실험체에 대한 배근도 및 보강 상세는 그림 1 과 같다. 보강재는 보의 하중과 변위의 거동을 파악하고 콘크리트의 취성파괴를 방지하여 계측기기의 파손을 방지하기 위하여 설치하였다.

#### 2.1.1.2 실험체 설치 및 방법

하중은 2점재하로 하였고 보의 중앙에 LVDT를 설치하여 재하하중-수직변위와의 관계를 그림 2.

### 시험체 배근도 및 보강상세

(단위 : mm)

$f'c = 240 \text{ kgf/cm}^2$

$f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$

상부철근 2-HD 13 (3000mm X 2 EA)

하부철근 3-HD 13 (3000mm X 3 EA)

스터럽 HD 10 @ 100 (전 스패)

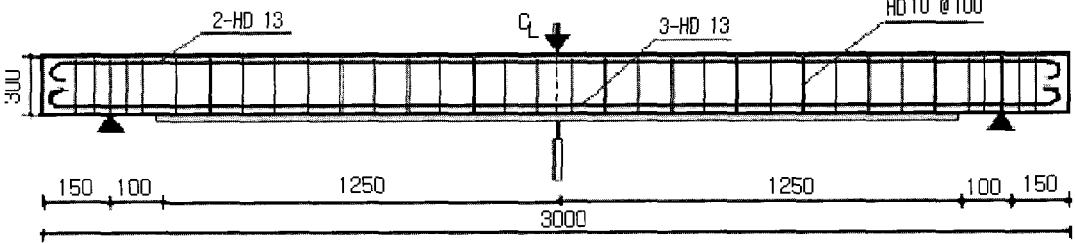
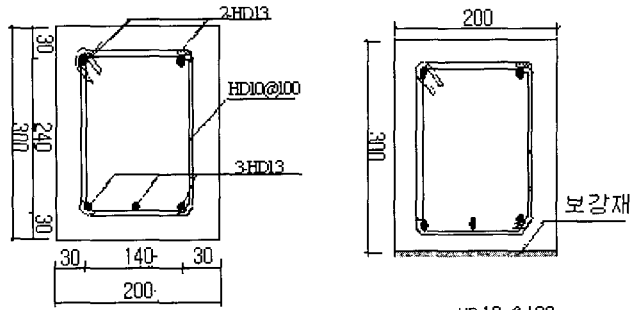


그림 1.

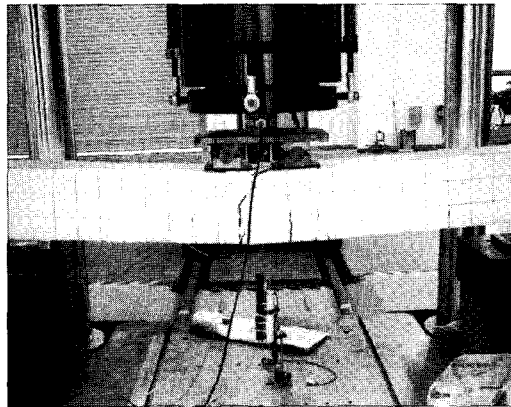


그림 2. 시험체 설치 및 하중제하 방법

와 같이 나타났다. 변위하중제어방식으로 하중을 가했으며 도막의 종류에 따른 전체적인 균열의 양상을 파악하고자 하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

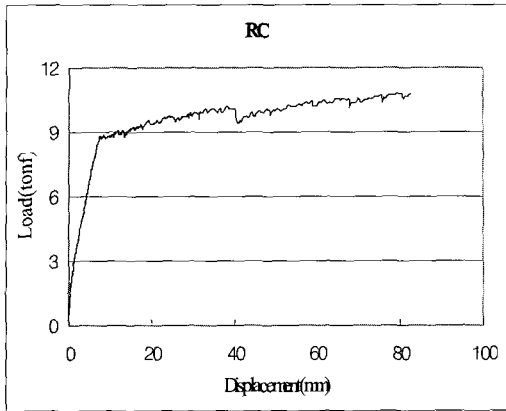
본 실험에서는 보의 중앙부에 2점하중(변위제어)을 가한 후 하중과 변위와의 관계를 분석하였고, 최대하중상태에서의 변위량과 그 거동을 분석해 보고자 하였다.

또한 종래에 알고 있는 RC보의 균열도와 도막칠근단순보의 경우에 대한 균열양상에 대하여 알아보 고자 하였으며, 그 결과는 그림 3. 과 그림 4. 에 도

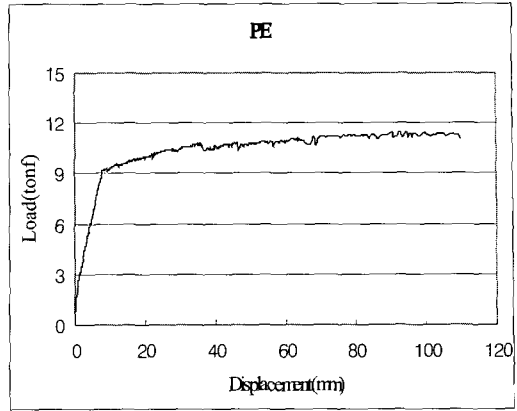
식화하였다.

#### 3.1 도막상태별 하중-변위 관계

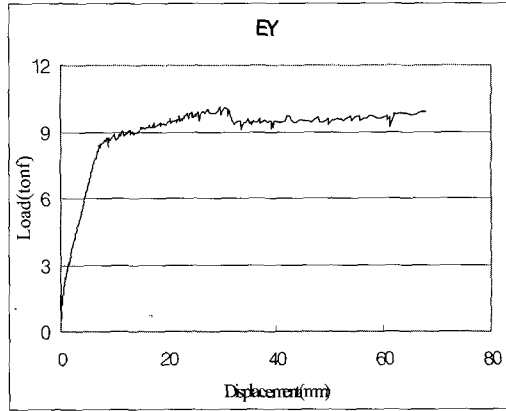
그림 3. 에 나타낸바와 같이, 무도막철근과 에폭시도막철근에서의 최초의 균열하중은 1.5tonf에서 발생하였으며, 상부에까지 이르는 균열상태는 각각 10.1tonf와 10tonf에서 균열하중의 증가 없이 변위의 증가만 지속적으로 나타났다. 이후 하중의 계속적인 증가는 이미 균열이 심각한 수준으로 벌어진 상태이며, 내부적으로 압축철근사용에 따른 연성을 증가시키고, 사용하중하에서 어느 정도의 stiffness(강성)을 증가시킨 것으로 보인다. 또한 스테럽과



a) 무도막 철근보의 하중-변위 관계



b) PE도막 철근보의 하중-변위 관계



c) 에폭시도막 철근보의 하중-변위 관계

그림 3. 도막별 단순보의 하중-변위 곡선

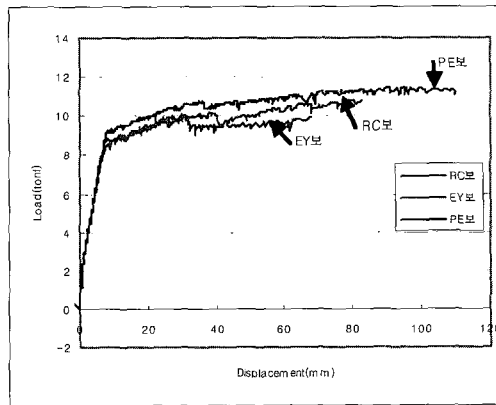


그림 4. 도막별 하중-변위 곡선

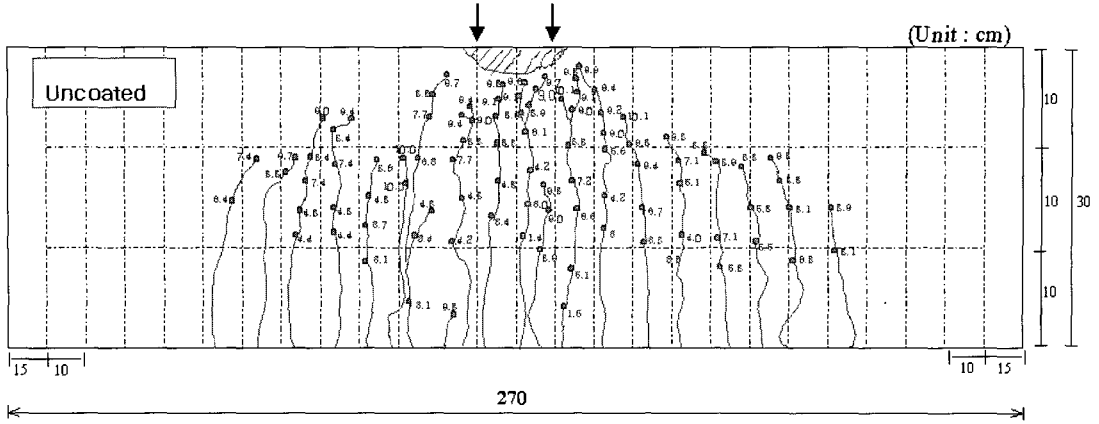


그림 5. 무도막철근보의 균열도

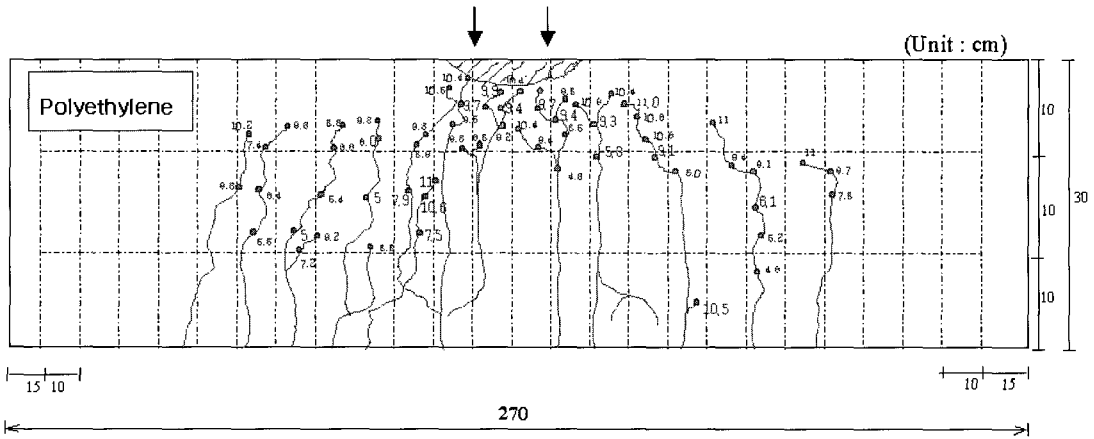


그림 6. 폴리에틸렌도막철근보의 균열도

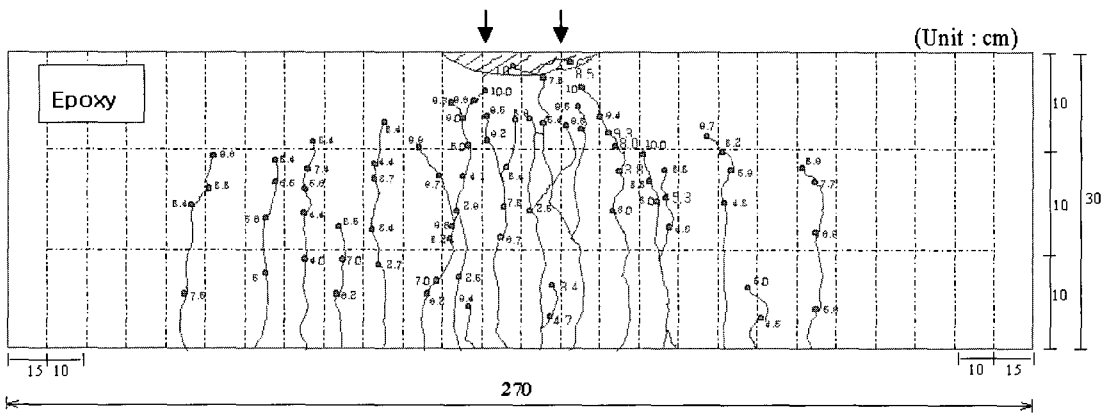


그림 7. 에폭시도막철근보의 균열도

같은 구속력이 작용함으로써 하중의 계속적인 증가가 발생하였으나, 폴리에틸렌도막철근에서의 경우 최초의 균열하중은 4.3tonf에서 발생하였고, 균열이 팔고루 퍼졌으며, 최종균열하중은 11tonf로 나타났다. 균열의 양상은 전체적으로 하중지점부를 향하여 진행하였고, 보의 전체부분으로 확산되는 경향을 보였다. 폴리에틸렌도막철근에서의 하중의 증가는 시멘트성분이 철근과의 부착효과를 개선한 것으로 보여지며, 연성재료인 폴리에틸렌도막재료가 계속적인 하중과 변위량을 잡아주기 때문인 것으로 판단된다.

하중재하에 의한 도막별 균열도를 단순보에 균열이 발생하였을때의 하중과 균열진전상황을 육안으로 관찰하고 표시를 하였다. 그 결과 균열의 양상은 다음 그림 5. ~ 그림 7. 과 같이 나타났고, 하중과 균열진전상황은 무도막철근보에서는 최대균열하중이 10.07톤과 지간중앙부의 수직변위는 20.38 mm 가 나왔으며, PE에서는 최대균열하중이 10.55 톤과 수직변위가 20.53mm로 나타났고, EY에서는 최대균열하중이 9.74톤과 수직변위는 30.92mm가 나왔다. 이는 상부의 압축철근과 스티럽이 균열을 제어해주는 역할을 하면서 하중재하점으로 진행성 균열이 발생함으로 알 수 있었고, PE경우에는 하중이 RC보다 더 높게 나온 이유를 분석해보니 도막재료에 있는 시멘트와 콘크리트와의 결합에 의해서 휨응력을 높인 것으로 사료된다.

### 3.2 단순보의 도막별 FEM 해석 결과

철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소 해석을

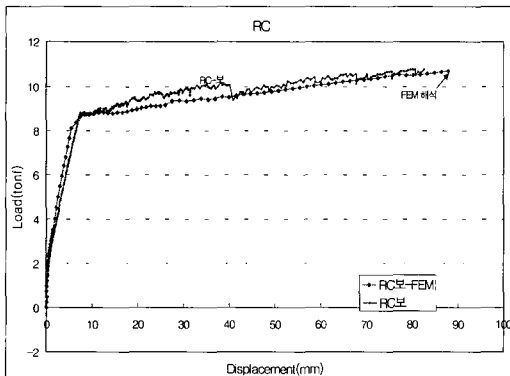


그림 9. RC보의 휨실험에 대한 FEM 해석 결과

비롯한 해석적 연구는 여러 가지 제약들로 인하여 제한적인 실험이 이루어질 수 밖에 없을 경우에 실험적 연구를 보완하거나 심화하는 도구로서 매우 유용하다. 이 경우 콘크리트 구조물을 포함하여 그 밖의 재료로 만들어진 구조물의 비선형 해석은 해석에서 사용된 요소들이 실제 구조물의 탄성·비탄성 거동을 얼마나 효과적으로 표현할 수 있는가에 따라 그 유용성이 판단되어진다. 본 연구에선 사용된 해석적 연구는 철근콘크리트 전용해석 프로그램인 Total-RC<sup>3)</sup>의 비선형성을 고려하여 모델링하였다.

#### 3.2.1 보의 해석방법 및 해석모델

보의 해석을 위해서 시험체의 제원은 이미 앞에서 언급하였고, 그림 8. 과 같이 요소분할을 하였다. 실험체의 대칭성을 이용하여 1/2모델로 실험체의 제작 상세 및 실험상황과 동일한 조건으로 모델링을 하였으며, 하중은 강제변위를 적용하여 제어하였다.

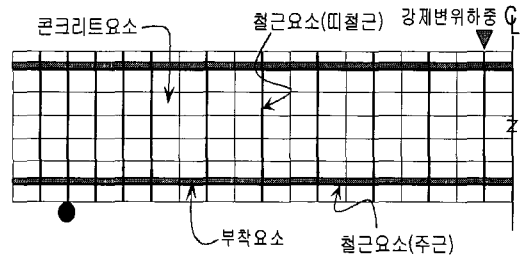


그림 8. FEM 해석을 위한 요소분할

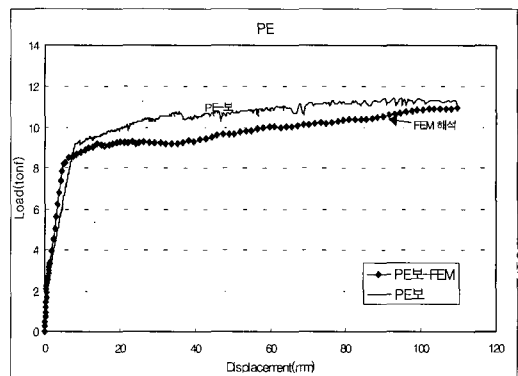


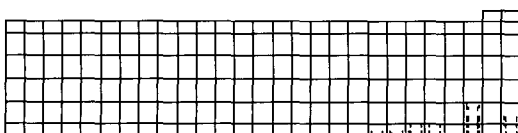
그림 10. 폴리에틸렌보의 휨실험에 대한 FEM 해석 결과

### 3.2.2 보의 균열도에 대한 FEM 해석결과

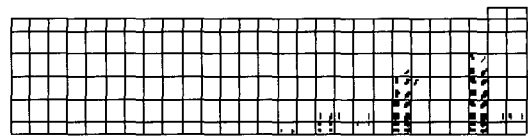
보의 균열도에 대한 FEM 해석결과는 RC, EY보의 실험결과가 비슷하게 나왔으며, 균열하중의 분포도 전체적으로 균등하게 분포하는 양상을 보였으며, 이는 PE에 수정성 시멘트를 살포한 효과가 나타난 것으로 판단된다. 28일을 양생한 후의 시멘트 경화도는 80%에 도달한다는 앞서의 언급에서라면, 콘크리트와의 부착성능에 기여함을 알 수 있다. RC와 EY는 수직변위가 0.45mm 정도 진행되었을 때, 균열하중이 2.04톤에 다다랐고, PE는 동일한 수직변위가 발생(0.45mm)할 때, 2.07톤으로 작은 하중에서는 변위와 하중의 차이는 크지 않았다. RC와 EY의 수직변위가 5.4mm 일 때, 하중은 7.85톤, PE의 경우, 수직변위가 5.4mm 일 때 8.71톤의 하중을 받고 있었다. RC와 EY의 수직변위가 87.6mm 일 때의 균열하중은 10.84톤, PE의 경우 수직변위가 109.4mm 일 때 11.05톤의 하중을 받을 수 있었다. 단순보에 대한 휨실험 결과치와 FEM 해석결과치는 그림 9. ~ 그림 11.에 보는바와 같다.

### 3.2.3 비선형 유한요소 해석

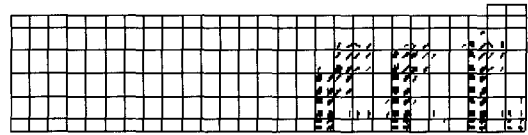
Total-RC는 비균질재료인 철근콘크리트 구조물에 발생하는 균열진행 상황의 효과적인 표현이 가능하여 여러 변수에 따라 구조물에 발생하는 균열 패턴의 차이를 파악하기가 용이하다. 또한 콘크리트의 압축파괴 이후의 거동을 연성화(softening)처리하고 있고, 철근의 항복이후의 거동 및 철근과 콘크리트의 미끄러짐파괴에 의한 인발거동의 효과적인 표현이 가능하므로 본 연구의 목적을 달성하기에 적합하다고 판단되어 해석전용 프로그램으로 채택하였고 그 결과치를 그림 12. ~ 그림 13.에 나타냈다. 여기서 그림 12.는 RC와 EY의 균열도에 대한 비슷한 양상을 보여주고 있으며, 이는 PE보다는 작은 하중에서도 균열의 진행양상이 하중작용점에 집중함을 알 수 있었고, 그림 13.에서는 PE의 하중과 균열양상이 전체적으로 균등하게 진행됨을 알 수 있었다.



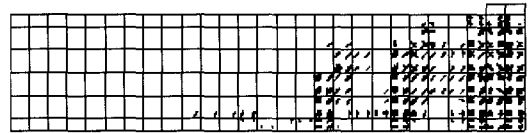
(a) 0.45mm, 2.04tonf



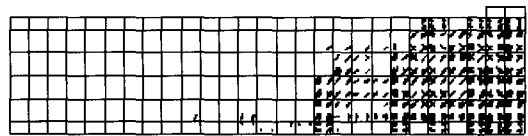
(b) 1.45mm, 3.46tonf



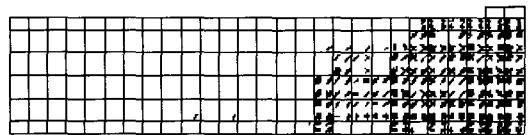
(c) 5.44mm, 7.85tonf



(d) 26.08mm, 9.06tonf

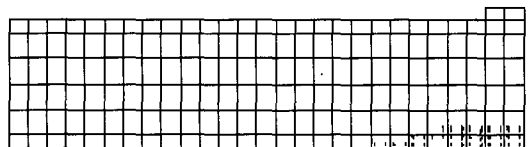


(e) 56.92mm, 10.1tonf



(f) 87.6mm, 10.84tonf

그림 12. 균열도에 대한 RC, EY 보의 FEM 결과



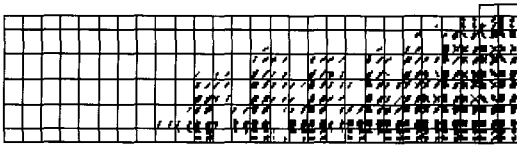
(a) 0.45mm, 2.07tonf



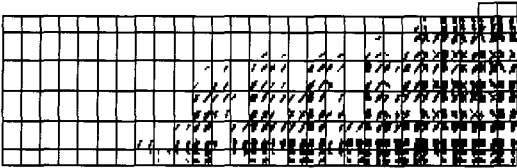
(b) 1.45mm, 3.71tonf



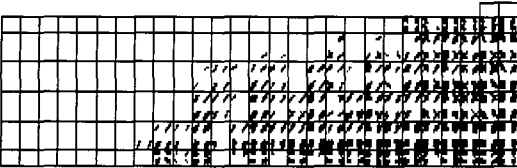
(c) 5.47mm, 8.71tonf



(d) 41.22mm, 9.76tonf



(e) 86.82mm, 10.60tonf



(f) 109.4mm, 11.05tonf

그림 13. 균열도에 대한 PE 보의 FEM 결과

#### 4. 결론

위의 실험결과들의 분석을 통하여 휨내력 실험체에 대한 파괴 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 하중재하시 무도막과 도막철근보에 대한 보의 높이(H=30cm)를 제외한 전 구간에 걸쳐 휨균열이 고르게 발생하였다. 무도막철근과 에폭시도막철근에서는 균열의 양상이 일반보의 균열양상과 비슷하게 나타났다. 또한 지점의 전단구역에서는 압축철근까지의 진행성균열이 발생하지 않았고 하중재하지역으로 집중적으로 균열이 발생하였다. 반면, 폴리에틸렌도막철근에서는 전단지역에서도 하중이 증가함에 따라 진행성 균열이 압축철근까지 도달한 것으로 보아 연성재료인 폴리에틸렌도막이 균열

하중을 흡수하는 효과가 있는 것으로 판단된다. 물론 압축철근이 균열을 어느정도 제어하는 효과가 있지만, 실험의 공정성을 기하기 위해서 에폭시 도막철근과 폴리에틸렌도막철근의 스티럽에도 도막처리를 하였다. 그림 12.와 13.에서 알수 있는 바와 같이 단순보의 10톤을 재하시킨 하중하에서의 균열양상은 PE 경우에는 보에 균등하게 분포되었고 RC와 EY의 경우에는 균열양상이 집중되었음을 보았다. 수직변위도 단순보의 처짐변위의 한계인 탄성변위내인 15mm 를 초과하였기에 소성변위를 이루고 있음을 알 수 있었다.

2. 실험결과에 의하면 최대하중과 최대하중시의 수직변위는 무도막철근의 경우 최대하중이 10.07tonf일 때의 수직변위는 20.38mm 였고, 폴리에틸렌도막철근의 경우는 최대하중이 10.55tonf일 때 수직변위는 20.53mm 였으며, 에폭시도막철근의 경우 최대하중이 9.74tonf 였을때의 수직변위는 30.92mm 였음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 (주)젠트로의 기술개발 지원사업과제로 이루어졌으며, 또한 (주)위스코의 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 1) 김영진외 2, "PE-코팅철근의 내부식성 및 부착 성능에 관한 연구", 2003, pp 33-41
- 2) 건설교통부, "철근콘크리트 구조물의 보수·보강 신기술 개발", 1995, pp 68-93
- 3) TOTAL RC, "RC구조물 전용 비선형FEM 해석 시스템 사용자 매뉴얼", 토탈인포메이션서비스, 1996