

고기능성 시멘트계 복합재료 배합비 및 양생조건에 따른 휨부재의 거동

Behavior of Engineered Cementitious Composite(ECC) Flexural Members Based on Mix Proportions and Curing Conditions

경 민 수^{*} 김 동 원^{**} 배 병 원^{***} 전 경 숙^{****} 임 윤 목^{*****} 김 장 호^{*****}
Kyoung, Min Su Kim, Dong Wan Bae, Byung Won Jun, Kyung Suk Lim, Yun Mook Kim, Jang Ho

ABSTRACT

Recently, construction materials have been quickly advancing. Especially, the rate of development of cement based construction materials is much quicker than steel or composite materials. In order to optimize the ductility and strength of cement based materials, Micro-Mechanics based fiber concrete called Engineered Cement Composite (ECC) has been developed and studied extensively by many researchers in the field due to ECC's remarkable flexural strain and strength capacities, many leading nation (i.e., US, Japan and European countries) have reached the point of being able to use ECC in actual constructions. But, due to the belated interest in the field, Korea is lagging behind the leading countries. ECC's ability to use its short fibers to bridge micro-cracks (50~80 μ m in width) allows great ductility and strength. In this study, ECC with superior material capacities are manufactured using domestic materials such as cement, silica sand, metal cellulose, etc. Using only domestic products, the optimal W/C ratio and mixing procedures are determined.

1. 서론

최근 토목·건축 구조물에 사용되는 건설재료의 변화 및 발전은 매우 빠르게 진행되고 있으며, 특히 시멘트를 주 원료로 하는 재료의 변화속도는 강재와 같은 건설재료의 변화 속도 보다 빠르게 진전되고 있다. 따라서 시멘트를 원료로 하는 건설재료의 단점인 취성적 파괴거동을 보완하기 위해서 연성이나 강도가 일반 콘크리트보다 월등한 고기능성 시멘트계 복합재료인 ECC (Engineered Cementitious Composite) 재료 연구가 현재 미국을 선두로 하여 활발히 진행중에 있다. 그리고 일본, 유럽이 그 뒤를 이어 활발히 연구하고 있으나 국내에서는 아직 미비한 수준이다. ECC 재료는 기존의 재료와 달리

* 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사 후 연구원

*** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

**** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

***** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

***** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수

처음 발생한 균열이 파괴로 연결되는 것이 아니라 보강섬유의 bridging effect에 의해 여러개의 미소 균열(50~80 μ m)로 확산됨으로서 외부의 하중을 지속적으로 받을 수 있는 기능을 보유하고 있다. 이러한 재료의 우수한 성질에도 불구하고, 실질적인 사용성은 현재 매우 제한적으로 비-구조적인 부분에 국한되어 있는 실정이다. 본 연구에서는 섬유를 제외한 그 외 배합재료를 국산재료로 배합하였으며, 그 배합재료들을 이용하여 만들어진 ECC 휨부재의 연성과 강성에 대한 거동을 파악하고자 했다. 그리고 물·시멘트비(W/C)를 다르게 배합하여 만든 시편을 수중·건기 양생시켜 휨 실험에서의 파괴 거동을 관찰하고자 하였다. 또한, 모르타르 및 콘크리트와 비교함으로써 ECC 복합재료의 우수성을 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험개요

본 실험에서는 섬유를 제외한 그 외 배합재료를 국산재료로 대체하였으며, 그 배합재료들을 이용하여 만들어진 ECC 휨부재의 연성과 강성에 대한 거동을 정확히 평가하는 것이 그 목적이며, 물·시멘트비(W/C), 양생상태를 실험변수로 선택하였다. 변위제어 방식을 이용하여 0.005mm/sec의 속도로 공시체가 파괴에 도달하기까지의 거동변화와 파괴양상을 파악하여 휨 부재의 응력-처짐 관계를 실험적으로 도출하였다. 또한, 실험을 통해 얻은 자료를 비교·분석하여 최적의 성능을 발휘할 수 있는 휨 부재의 배합비와 양생상태를 파악하고자 하였다.

2.2. 거푸집 제작

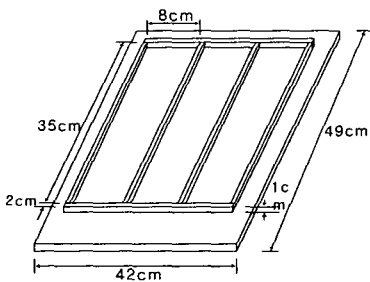


그림 1 거푸집 치수

본 실험에 사용된 거푸집의 치수는 가로8cm 세로35cm이며 두께가 1cm인 시편을 동시에 3개씩 제작할 수 있는 일체형으로 2세트를 제작하였고, 타설중 내면을 관찰할 수 있는 아크릴 재질로 제작하였다. 그림 1은 아크릴 몰드로 제작한 거푸집의 치수를 나타내고 있다.

2.3. 재료

본 실험에 사용된 콘크리트 시멘트는 국내에서 시판되는 L사 1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. 섬유는 일본 K사의 고인성 PVA 섬유를 사용하였으며, 물성치는 표 1에 나타나 있다.

표 1 섬유의 물성치

Diameter (μ m)	Tensile Strength (MP_a)	Elongation (%)	Young's Modulus (GP_a)	Specific Gravity
39	1620	6	42.8	1.3

잔골재로는 일반적으로 콘크리트에 사용하는 잔골재보다 입자가 더 작은 골재를 사용함으로써 골재로 인한 PVA 섬유 분포에 영향을 최소화하여 재료의 성능을 향상시켰으며, Fly Ash는 일반적으로 많이 이용하고 그 특성이 검증된 재료를 사용하였다. 그 밖에 물·시멘트비(W/C)를 낮추기 위해 쓰이는 물질로서 물을 적게 넣으면서 배합작업을 원활하게 해주는 SP(Super plasticizer)가 쓰였다. SP는 미국의 W사의 제품을 사용하였다. 그리고 배합물의 작업성을 증진시키고 재료분리를 막아주는 MC(증점제)는 국산 S사제품을 사용하였다.

2.4. 배합비

본 연구에서 ECC 부재의 배합비는 크게 0.3과 0.45 두가지(W/C) 경우로 배합하였다. 배합비는 표 3과 같다. 또한, ECC 부재의 연성거동을 비교·관찰하기 위해서 일반 모르타르와 콘크리트 시편을 제작하였다. 콘크리트 시편의 설계기준강도는 300kgf/cm²이며, 최대치수는 4.6mm의 굵은 골재를 사용하였다. 모르타르와 콘크리트 배합비율은 표 4에 나타나 있다.

표 3 ECC 시편의 배합비

W/C \ Material	0.3	0.45
Cement	1	1
Water	0.3	0.45
Fly ash	0.11	0.15
Sand	0.5	0.7
SP	0.02	0.01
MC	0.002	0.0018
섬유(Volume %)	2	2

표 4 모르타르·콘크리트 배합비

Material	모르타르	콘크리트
Cement	1	1
Water	0.45	0.45
Fly ash	0.15	0.15
Sand	0.7	0.7
SP	0	0
MC	0.0018	0
Aggregates	0	0.7

2.5. 배합순서 및 타설

재료의 배합은 20리터 용량의 회전형 믹서에 분말형태로된 시멘트, 플라이 애쉬, 잔골재를 마른 형태로 고르게 2~3분 정도 배합하고, 여기에 물을 조금씩 첨가하여준다. 이때 일부의 물은 증점제와 함께 섞어 투입한다. 물과 증점제 투입 후 유동제를 넣는데 이 유동제는 전체적으로 반죽이 매우 묽어진 상태를 유지하면서 약 3분 정도 균일하게 혼합을 유지한다. 약 3분이 지나면 여기에 섬유를 손으로 여러 등분하여 투입하고 투입한 시간으로부터 3분 동안 계속 배합을 실행한다. 이 반죽의 배합물을 제작된 거푸집에 집어넣고 적당히 고르게 넓게 편 후 진동테이블 위에 올려놓고 약 20초 정도 진동을 가한다. 이 진동은 성형 과정에서 생길 수 있는 기포 등을 없애주는 역할을 한다.

2.6. 양생 및 시편수

시편의 타설 이후 표면을 잘 마무리 한 다음 젖은 종이타월을 이용하여 표면의 빠른 건조를 막아주고 성형된 시편을 성형틀과 함께 수분이 증가하지 않도록 비닐로 밀폐시켜 24 시간 후 시편을 탈형하였다. 양생은 28일 동안 수중양생과 건기양생 두 가지 경우로 하였다. 시편의 수는 총 36개를 제작하였다.

2.7. 부재 설치 및 휨 실험

부재의 휨 실험에는 MTS-810 25ton 용량의 시험기를 사용하였고 4 point 휨 실험을 실시하였다. 지점은 시편 양끝에서 2.5cm 떨어진 지점에 위치하고 가력시험을 하였다. 그림 2는 시편 거치 모습을 보여준다. 측정시스템의 데이터를 관측하고 관측 하중이 최대하중의 30% 선으로 떨어지면 시편의 파괴로 판단하여 하중 재하를 중단하였다. 그림 3은 시편의 하중 재하시 균열이 전파, 분산되는 모습을 보여준다.

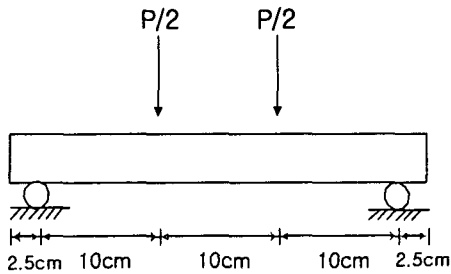


그림 2 시편 거치 모습



그림 3 부재 밑면에서의 균열분포 모습

3. 실험결과 및 분석

3.1. ECC · 모르타르 · 콘크리트부재 휨 실험결과

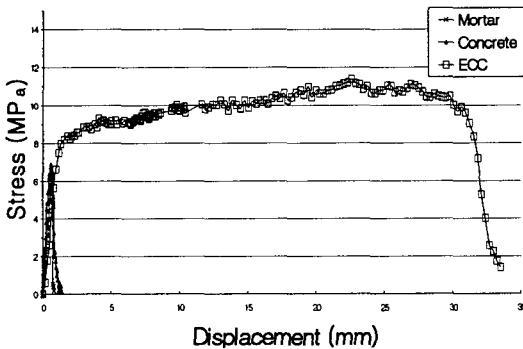


그림 4 ECC · 모르타르 · 콘크리트 부재 실험결과 비교

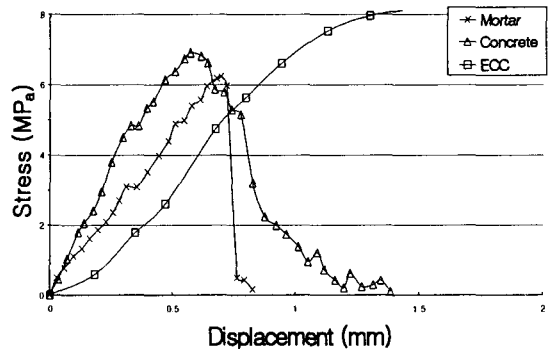


그림 5 모르타르 · 콘크리트 부재 실험결과 확대 비교

본 실험을 통해 ECC 부재의 신뢰도 높은 연성과 강성을 도출해 내었다. 그림 4는 ECC · 모르타르 · 콘크리트 부재의 휨 실험결과를 나타낸 것이며, 실험결과가 가장 우수한 시편들이다. ECC 부재는 최고 11MPa까지 계속 증가하다가 처짐이 30mm정도 발생한 후부터는 천천히 응력이 감소하는 현상을 보였다. 그림 5는 그림 4의 모르타르 · 콘크리트부재의 실험결과를 확대하여 비교해 놓은 그림이다. 그림 5의 휨 실험에서 모르타르는 6.2MPa의 강도에서 갑작스럽게 파괴되는 양상을 보였으며, 콘크리트 부재는 7.0MPa 강도에서 파괴되는걸 볼 수 있었다. 콘크리트부재가 모르타르 부재보다 좀 더 안정적인 거동을 하였지만, 2 부재모두 취성적인 파괴를 하였다. ECC부재의 연성은 모르타르와 콘크리트부

재 연성보다 15~20배 정도 크게 나타났다. 따라서, ECC부재는 연성확보 측면에서 우수한 거동을 보였으며, 취성적인 파괴를 막을 수 있는 고인성 복합재료의 타당성을 확인하였다.

3.2. ECC 부재의 물·시멘트비(W/C)에 따른 실험결과 비교

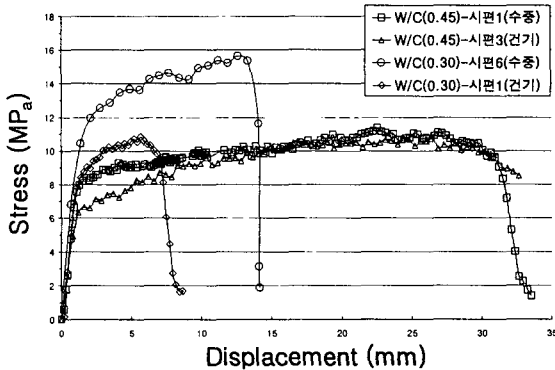


그림 6 ECC 부재의 물·시멘트비(W/C)에 따른 실험결과

통해 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그림 6에 나타나 있듯이 물·시멘트비가 0.3인 경우 0.45인 경우에 비하여 시편의 연성이 줄어들고 시편의 강도가 증가하는 현상을 관찰 할 수 있었다. 따라서, 물·시멘트비에 따라 연성 및 강도의 변화를 확인할 수 있었다. 이는 물·시멘트비의 변화로 인해 재료적인 Matrix의 물성 변화와 섬유와 매트릭스 사이 경계면의 물성이 변화하여 나타나는 현상이다.

3.3. 양생상태에 따른 실험결과 및 분석

시편의 양생은 물·시멘트비가 0.3인 시편 12개중 수중 양생 시킨 시편 6개와 건기 양생시킨 시편 6개를 28일 양생시켰으며, 물·시멘트비가 0.45인 시편도 12개중 수중 양생 시킨 시편 6개와 건기 양생 시킨 시편 6개를 28일 양생 시켰다.

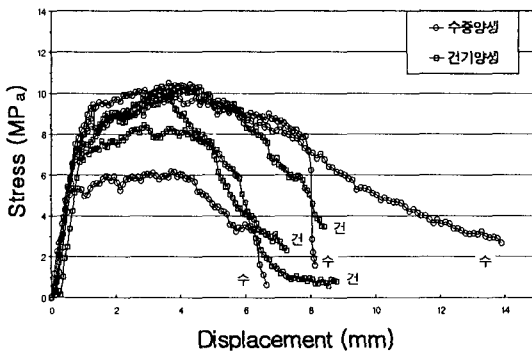


그림 7 양생상태에 따른 실험결과(W/C= 0.3)

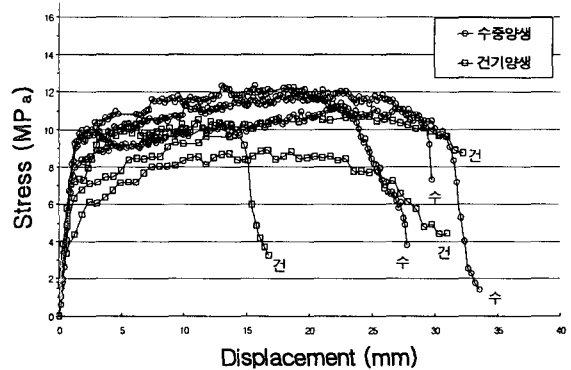


그림 8 양생상태에 따른 실험결과(W/C= 0.45)

그림 7은 건조양생 시킨 시편 6개와 습윤양생 시킨 시편 6개중에서 3개의 시편 실험결과를 각각 비교한 것이다. 그림 7에 나타나 있듯이 물·시멘트비가 0.3인 경우 양생방법에 따라 실험 결과는 큰 차이를 보이지 않았으며 휨 실험 시 모든 부재들이 처음 미소 균열에서 파괴되는 양상을 보였다. 이것은 섬유배열이 고루 분포되어 있지 않다는 것으로 판단할 수 있다. 그림 8은 물·시멘트비가 0.45이며 수중 양생시킨 시편과 건기 양생시킨 시편의 휨 실험 결과이다. 물·시멘트비가 0.45인 시편의 휨 실험에서는 처음 미소균열이 생긴 이후 시편 전체적으로 균열이 퍼지는 현상을 보였다. 이 실험결과에서 물·시멘트비가 0.45로 배합된 시편은 양생방법에 따라 연성적인 거동의 과정이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 수중 양생시킨 시편의 연성적인 거동을 살펴보면 10~12MPa의 응력을 유지하면서 건기 양생시킨 시편의 실험 결과보다 더 안정된 연성거동을 하였다. 이것은 섬유와 Matrix(ECC 재료)의 접촉면에서 재료가 일관성 있게 나타나는 것으로 추정할 수 있다.

4. 결론

고기능성 시멘트계 복합재료 부재의 휨 실험을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고기능성 시멘트계 복합재료인 ECC는 연성확보 측면에서 우수한 거동을 보였으며 취성적인 파괴를 막을 수 있는 복합 재료로서의 타당성을 확인하였으며, 국내재료를 사용하여도 우수한 강성과 연성을 확보할 수 있다고 판단하였다.
- 2) 배합비 조건에 따른 실험결과에서 물·시멘트비가 0.3인 시편의 경우보다 0.45인 시편의 실험결과가 더 우수한 연성을 확보함으로써 인해 최적의 배합비 라고 판단된다.
- 3) 수중·건기 양생시킨 시편을 휨 실험한 결과 물·시멘트비가 0.3인 시편의 휨 실험결과에서는 뚜렷한 차이를 볼 수 없었으나, 물·시멘트비가 0.45인 시편은 건기 양생시킨 시편보다 수중 양생시킨 시편에서 더 우수한 휨 연성과 강성을 볼 수 있었다. 따라서, 수중 양생상태에서의 부재가 더 좋은 연성을 확보할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. H. Stang, T. Aarre., "Evaluation of crack width in FRC with conventional reinforcement," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 14, No. 2, 1992. pp. 143-154.
2. V.C Li., "From micromechanics to structural engineering-The design of cementitious composites for civil engineering applications," *JSCE J of structural mechanics and earthquake engineering*, Vol. 10, No. 2, 1993, pp. 37-48.
3. Y.M. Lim, V.C. Li., "Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 373-385.
4. S. Matsui., "Technology developments for bridge decks-innovations on durability and construction," *Kyouryou To Kiso 97*, 1997, pp. 84-92.
5. V.C. Li, T. Kanda., "Engineering cementitious composites for structural applications," *ASCE Journal Materials in civil engineering*, Vol. 10, No. 2, 1998, pp. 66-69.