

구속된 건조수축에 따른 ECC의 인장거동에 관한 연구

Study on ECC Tensile Behavior due to Constrained Drying Shrinkage

이도근¹ · 이경찬² · 이치동³ · 신경준^{4*}

Do-Keun Lee¹ · Kyoung-Chan Lee² · Chi-Dong Lee³ · Kyung-Joon Shin^{4*}

(Received October 23, 2019 / Revised November 11, 2019 / Accepted November 12, 2019)

Drying shrinkage in the hardened cement is known to change in volume by decreasing the moisture content in the hardened body, and it is known that the higher the W / C and the higher the content of the paste, the larger the drying shrinkage. In the case of ECC, more drying shrinkage occurs compared to concrete, since it does not contain coarse aggregate. Since ECC is an important material for tensile performance, the effect of restrained tensile stress on mechanical tensile behavior should be considered. The purpose of this study is to analyze the effect of stress caused by restraint on the tensile behavior of ECC. The mechanical properties of the specimens were tested by uniaxial tension tests with different restraints. As a result, the difference of tensile behavior according to restraint stress was observed and the cause was analyzed.

키워드 : ECC, 건조수축, 구속, 인장거동

Keywords : ECC, Drying shrinkage, Restraint, Tensile behavior

1. 서론

콘크리트는 널리 활용되고 있는 건설 재료로 우수한 압축강도와 경제성을 지닌 재료로 평가받고 있다. 하지만 구조물의 대형화와 더불어 지진, 충격 등에 대비한 안전성을 확보하기 위하여 콘크리트의 취성적인 특성을 줄이고 연성을 높인 고성능 건설재료에 대한 수요가 높아지고 있다(Kim et al, 2006). 이중 대표적으로 시멘트 매트릭스에 섬유를 혼입하여 인장변형성을 극대화 시킨 ECC(Engineered Cementitious Composite)는 철근 콘크리트 구조물에 적용 가능성이 높은 재료로 평가 받고 있으며(Kim 2007), 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim and Li 2003; Krouma and Syed 2016). ECC는 높은 인장변형률(최대 4%)을 수용할 수 있고, 다수의 미세균열의 유발을 통해 균열폭 제어 및 균열을 분산시킬 수 있다고 알려져 있다(Yu 2017). 우수한 변형경화 및 균열분산효과로 인해 실제 건설현장에 적용되기도 하였다(Kim et al, 2006).

ECC는 포틀랜드 시멘트, 잔골재, 물을 주결합재로 하는 모르타르에 2% 이상의 섬유를 혼입하여 제작하며, 재료의 배합은 마이크 로역학(micromechanics)을 근거로 구성요소간의 역학적인 상호 관계를 해석하여 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 통해 연성을 구현한다(Kim and Li 2003; Li 2011).

안정상태의 미세균열 유발을 위해서 소요의 조건을 만족하는 재료 및 배합을 사용하여야 한다. 잔골재의 입경이 작을수록 파괴 인성이 낮아져 연성적인 측면에서는 유리하나 입경이 시멘트보다 작을 경우, 유동성 및 수화반응을 저해하게 된다. 반대로 잔골재의 입경이 커질 경우 파괴인성이 높아지므로 균열분산에 불리한 점이 있다(Kim 2007).

콘크리트 구조물은 타설후 경화되는 과정에서 건조수축으로 인한 체적변화가 발생한다. 만약, 구조물에 대한 구속 효과가 없을 경우에는 부피 변화가 발생하더라도 구조물 내부에 구속 응력이 발생하지 않는다. 하지만 지반 또는 기타설 구조물 위에 새로운

* Corresponding author E-mail: kjsin@cnu.ac.kr

¹충남대학교 토목공학과 박사수료 (Department of Civil Engineering, Chung-nam University, Daejeon, 304-764, Korea)

²한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 철도구조연구팀 선임연구원 (Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea)

³디엠엔지니어링 부사장 (DM Engineering, Seoul, 05288, Korea)

⁴충남대학교 토목공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Chung-nam University, Daejeon, 304-764, Korea)

콘크리트를 타설하는 일반적인 콘크리트 구조물의 시공 조건에서는 필연적으로 외부 구속이 발생하며, 수축이 발생하는 콘크리트 재료에 인장력을 발생시키고 건조수축 균열을 유발할 수 있다(Ryu et al. 2011; Han et al. 2009).

한편, 굵은 골재를 포함하지 않고, 단위시멘트량이 높은 배합을 특징적으로 사용하는 ECC는 탄성계수가 낮고, 수축량이 큰 특징이 있다. 이는 수축을 유발하는 시멘트 수화물의 비율이 일반 콘크리트에 비하여 상대적으로 높으며, 동시에 굵은 골재를 포함하지 않아, 굵은 골재에 의한 구속효과(Mindess 2003)가 없기 때문이다.

일반적인 콘크리트는 설계에서 인장 성능을 무시하므로 수축 및 구속에 의한 역학적 특성 변화에 대한 고려가 필요하지 않았다. 하지만 ECC는 인장성능이 중요한 재료이며, 수축이 콘크리트에 비해 상대적으로 많이 발생한다. 이러한 구속조건에서 수축이 일어날 경우 양생중인 ECC 재료에 인장응력이 발생하며, 구속인장응력은 재료의 역학적 인장거동에 영향을 줄 가능성이 있다. 그러나, 아직 이에 대하여 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 구속된 상태에서 양생된 ECC에 대하여 직접인장 실험을 수행하여, 구속의 유무에 따른 인장 거동의 차이를 분석하고자 하였다.

2. ECC의 구속응력

2.1 시멘트의 건조수축

시멘트 경화체의 수축은 소성수축, 건조수축, 자기수축, 수화수축 등이 있으며(ACI Committee 209R-92; Park 2017; Kwon and Kim 2016), 건조수축은 경화된 콘크리트 내에 존재하는 수분이 증발하면서 발생하는 수축 현상이다. 콘크리트는 다공성재료(porous material)의 일종으로 콘크리트 내부에는 다양한 크기의 공극이 있다. 초기에는 이러한 공극을 수분이 채우고 있지만, 시멘트의 수화와 외부로의 수분건조가 발생하면 공극내부의 수분이 확산·증발 하며, 이러한 수분의 감소 과정에서 모세관압력, 분리압, 표면장력의 변화가 발생하여 부피의 수축이 발생한다.

재료의 물성치에 따른 시멘트 재료의 건조수축은 여러 연구자들에 연구가 진행되어 왔다(Ryu 2017; Yang et al. 2004). 일반적으로 페이스트의 함유량이 많을수록, W/C비가 클수록 수축은 증가한다고 알려져 있다(Metha and Moteiro 2014). 또한 골재가 시멘트 페이스트의 수축을 구속하기 때문에(Mindess 2003), 콘크리트의 건조수축은 골재의 부피 및 강성이 증가함에 따라 감소한다(Ryu 2017; Yang et al. 2004). ECC는 일반 콘크리트 대비 시멘트 풀의 함유량이 높기 때문에 콘크리트에 비해 건조수축이 더 많이 발생한다고 알려져 있다(Li et al. 2003).

2.2 외부 구속 작용에 의한 응력 및 크리프

초기재령 콘크리트는 수화과정에서 자기수축 및 건조수축이 발생하며, 체적의 변화가 발생한다. 하지만 구속에 의해 부피변화가 제한될 경우, 구속에 의한 인장응력이 구조체에 작용한다(Ryu et al. 2011). 한편 초기재령 콘크리트의 경우 크리프와 릴렉세이션 현상이 크게 발생하는 특징이 있다. 따라서, 구속된 시편은 수축의 지속적인 발생과 함께 내부에 구속응력이 발생하며, 크리프 및 릴렉세이션 변형이 지속적으로 발생하게 된다(Cha et al. 2002).

구속을 받고 있는 양생중인 콘크리트의 구속조건을 제거하면, 잔류하고 있던 구속 인장응력이 사라지며, 그에 따라 변형이 발생한다. Fig. 1과 같이 구속이 제거된 동시에 탄성변형이 소실된다. 그리고, 이후 크리프의 회복으로 인해 점차 변형은 증가한다(Metha 2014). 하지만 크리프는 상당 부분이 회복이 불가능하기 때문에(Mindess 2003) 구속되지 않은 시편과 동일하게 회복되지는 않는다.

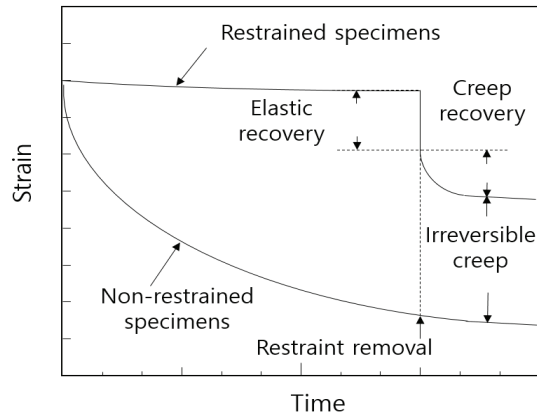


Fig. 1. Tensile creep curve with drying shrinkage

현재까지 콘크리트에 대해서 구속에 의한 응력을 평가할 수 있는 실험 방법은 많이 부족한 실정이며(Abbasnia et al 2005), 이를 평가하기 위해 기존의 강재에서 사용되고 있는 실험 방법을 활용한 사례도 있다(Lee 2014). 하지만 강재와 달리 시멘트계 재료는 수화에 의해 재료의 물성치가 변화하게 되므로, 좀 더 다양하고 복잡한 변수에 대한 고려가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 구속여부에 따라 ECC 시험체의 인장 거동이 달라질 수 있다는 가설을 세우고, 이를 실험으로 분석하고 검증하고자 하였다. ECC 직접인장시편을 제작하여 구속 또는 비구속 조건으로 양생을 수행하였고, 직접인장실험을 수행하여 역학적 특성 변화를 분석하였다.

3. 실험 방법

3.1 사용 재료 및 배합

시멘트는 국내 A사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 섬유는 Polyvinyl alcohol(PVA) 단섬유를 사용하였으며, 매트릭스에 섬유가 혼합되었을 때 균일한 분산이 가능한 재료이다. 섬유의 상세는 Table 1에 표기하였다.

Table 1. Properties of PVA fiber

Material	Density (g/cm ³)	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PVA fiber	1.3	0.04	12.1	1,597	37

슬래그 및 플라이애시를 결합재로 사용하였으며, Table 2에 특성을 표기하였다. 또한 비결합 재료로 쇄석 #4~7호 규사를 혼합하여 사용하였으며, 경량골재(Lightweight Aggregate, LA) 및 고성능 유동화제(Super Plasticizer, SP)가 사용되었다. 배합의 상세는 Table 3과 같다.

Table 2. Properties of binding materials

Specification	Density (g/cm ³)	Specific surface (cm ² /g)	Flow value (%)	Loss ignition (%)	Basicity	SiO ₂ content (%)
Slag	2.90	4,260	102	0.85	1.81	-
Fly ash	2.22	1420	98	3.6	-	60.24

Table 3. Mixture proportions of ECC

Specification	Binder(kg/m ³)			Non-binder (kg/m ³)			Water (kg/m ³)	W/B	Fiber (%)
	Cement	Slag	FA	Sand	LA	SP			
A1	412	220	412	275	14	1.92	343	31.6	2.07

3.2 시편의 제작 및 변수

시멘트와 슬래그, 플라이애시, 규사, 감수제를 믹서에 투입하여 90초간 건비빔을 진행한 후, 배합수를 투여하여 120초 동안 습비빔을 진행하였다. 유동성이 확보되었을 때 PVA 섬유를 첨가하였고, 섬유가 고르게 분산될 때까지 120초 동안 비빔을 진행하였다.

타설시 부터 양생기간동안 시편의 부피변화를 측정하기 위하여 매립형 변형률 게이지를 사용하였다. 인장시편 몰드에 타설 시 내

부에 콘크리트 매립형 변형률 게이지를 Fig. 2(a)와 같이 매립하였다. 온도 20±3℃, 습도 60%의 항온항습실에서 3일간 거치한 후에 구속도에 따른 수축 실험을 진행하였다.



(a) Gauge insertion (b) Curing and restraint removal

Fig. 2. Specimen fabrication and curing

3.3 구속도에 따른 건조수축 실험

총 21개의 시편이 제작되었고, 앞서 서술한 바와 같이 타설된 시편은 몰드와 함께 3일간 거치하였다. 이후, 비구속 실험체는 탈형을 하여 동일 환경의 항온항습실에서 기건 양생을 진행하였다. 구속 시험체는 Fig. 2(b)와 같이 몰드에 시편을 거치한 상태에서 기건 양생을 진행하였다. 몰드에 시편을 거치한 경우 몰드에 의하여 수축변형이 구속을 받아 길이 변화가 구속되고 내부에 인장응력이 발생하게 된다. 한편, 상하면의 균일한 건조수축을 유도하기 위하여 하판은 제거하였다. 구속의 유무와 재령기간에 따라서 시편을 구분하였으며, 시편의 상세 조건은 Table 4에 기술을 하였다.

Table 4. Number of fabricated specimens and testing method

Condition		Air dry curing time		Test methods
		14 days	28 days	
Drying shrinkage test	Restrained	2	3	Monitor the length change using the embedded strain gauge
	Non-restrained	2	3	
Tension test	Restrained	3	3	Uniaxial tensile test
	Non-restrained	3	2	

수축의 관찰을 위해 시편을 28일간 양생하며 변형률을 측정하였다. 인장실험은 재령 14일과 28일에 수행하였으며, 구속된 시편은 몰드에서 탈형하여 구속을 제거한 후에 인장실험을 진행하였다. 14일 시험은 구속을 제거한 뒤 5시간 동안의 수축 거동을 관찰하였다.

3.4 인장강도의 측정

인장강도 실험은 양생 14일과 28일차 시편을 대상으로 수행하였다. 양생 14일차 시편의 경우, 구속 제거 이후 탄성변형의 확인을 위해 몰드탈형 후 5시간의 변형률을 관찰한 이후에 직접인장강도 실험을 진행하였다. 양생 28일차 시편의 경우는 탈형 후 15분 이내에 직접인장강도 실험을 진행하여, 구속제거 후 거치시간에 따른 영향을 최소화하였다. Fig. 3과 같이 최대용량 200kN의 만능 재료 시험기를 사용하여 실험체의 중앙부에 변위계를 설치하여 하중에 따른 변위를 측정하고, 시편의 기하학적인 형상을 고려하여, 변형률을 대비 인장응력의 값으로 변환하였다.

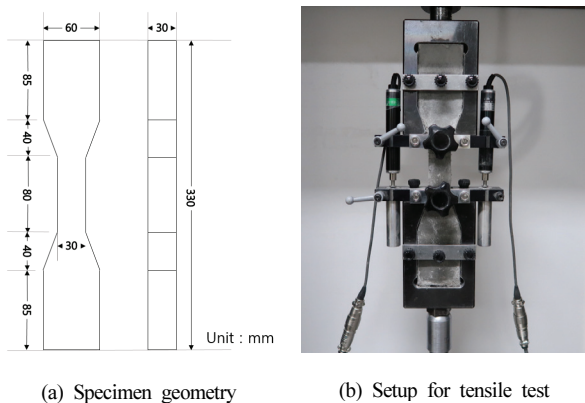


Fig. 3. Specimen geometry and set-up for uniaxial tensile test

4. 실험 결과 및 분석

4.1 응결시점의 추정

응결은 굳지 않은 콘크리트에서 강성이 발현되는 시점으로 정의된다. 따라서, 배합의 유동성이 상실되면서 탄성계수 및 강도의 발현이 시작되는 기준점으로 정의할 수 있는 동시에, 건조수축이 발생하는 부피변화의 기준으로 정의할 수 있다. 즉, 부피변화의 기준이 되는 시점으로 정의할 수 있다.

결합재로 고로슬래그 및 플라이애쉬가 혼입될 경우, 응결시간은 지연되는 것으로 알려져 있으며(Son et al. 2015; Han 2006), 본 연구에서 사용한 ECC는 Table 3에서와 같이 시멘트 대비 고로슬래그 및 플라이애쉬의 함유량이 상대적으로 높아 응결이 느리게 일어난다.

본 연구에서는 매입한 변형률 게이지로부터 측정된 부피변화 양상을 활용하여 응결 시점을 추정하였다. 기존의 연구(Shin et al. 2016)에 따르면 모르타르는 타설 이후 부피팽창이 먼저 발생하며 이후

수축의 진행에 따라 수축이 발생한다고 보고 하였다. 따라서 타설 이후 수축이 증가하는 시점을 부피변화의 기준으로 설정하였다.

4.2 구속의 영향에 따른 수축량

수축 관찰 실험으로 구속여부에 따른 건조수축의 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 응결을 기준으로 발생한 수축(부피변화)을 나타내며, 구속 여부에 따라 수축의 경향 차이가 두드러지게 나타났다.

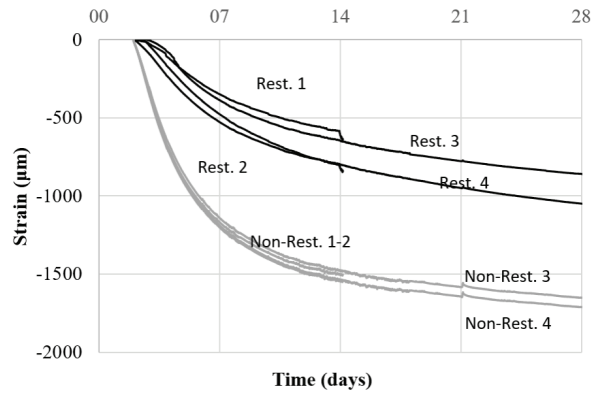


Fig. 4. Measured shrinkage with respect to curing time

비구속시편의 시험 결과에 따르면 28일의 양생기간동안 자기 수축과 건조수축에 의하여 약 1700µε의 변형량 수축이 발생하였다. 수축은 초기에 많이 발생하였으며, 10일 이후에 완만하게 수렴하는 경향을 나타내었다. 구속된 시편에서는 몰드의 구속효과에 비구속 시편에 비하여 수축이 감소하는 경향을 나타내었다.

한편 몰드에 의해 발생한 구속의 크기를 구속도로 정의하였다. 구속된 시편의 변형률은 구속도에 따라 결정 된다. 완전 구속된 경우에는 시편의 부피변화가 전혀 일어나지 않게 되며, 완전 비구속된 경우에는 자유 건조수축시편과 동일한 변형률을 보이게 된다. Fig. 5에 비구속시편과 구속시편에서 측정된 변형률을 사용하여 식 (1)에 의해 계산된 구속도를 나타내었다.

$$\text{degree of restraint} = 1 - \frac{\epsilon_{rest,t}}{\epsilon_{nonrest,t}} \quad (1)$$

여기서 $\epsilon_{rest,t}$ 와 $\epsilon_{nonrest,t}$ 는 각각 구속시편과 비구속시편의 재령 t에서의 변형률이다. Fig. 5에 따르면 구속도는 시간에 따라서 점차 줄어드는 형상을 보인다. 재령 14일, 28일의 구속시편의 변형률은 각각 비구속시편의 약 53%, 62%에 해당하는 것으로 나타났다.

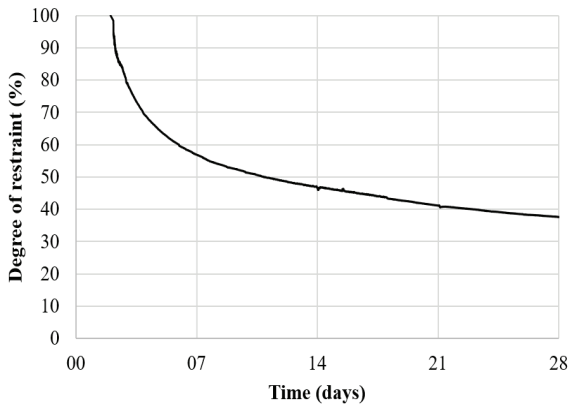


Fig. 5. Measured degree of restraint with respect to the time

이는 14일 재령의 시편에 적용된 구속도는 약 47%이며, 28일 재령에 적용된 구속도는 38% 인 것으로 해석할 수 있다.

구속시편 중에서 Restrain 1, 3과 Restrain 2, 4의 수축량 차이가 관찰되었으며, 이것은 몰드의 기하학적인 배열에 따른 차이로 판단된다. 사용한 몰드는 Fig. 2(b)와 같이 총 5개의 시편틀이 하나의 몰드로 구성되어 있으며, 바깥쪽에 위치한 틀은 내부에 위치한 틀보다 상대적으로 구속도가 높기 때문에 상대적으로 낮은 수축이 관찰되었다. 반면에 몰드를 완전히 제거하여 자유 수축을 유도한 시편에서는 모두 동일한 조건에서 양생이 되었기 때문에 거의 동일한 수축량을 나타낸다.

양생후 14일이 지난 이후에 구속시편에 대한 인장실험을 진행하였다. Fig. 6은 재령 14일차에 구속시편의 구속을 제거한 경우에 대한 변형률 변화를 나타낸 그래프 이다. 재령 14일에 구속을 제거하여 인장 시험을 진행한 시편과 계속하여 구속조건에서 변형률을 측정된 시편의 실험결과를 함께 나타내었다.

구속시편은 탈형을 하여 구속을 제거함과 동시에 급격한 변형률의 변화가 관찰되는데, 이는 구속에 의한 인장력이 제거되면서,

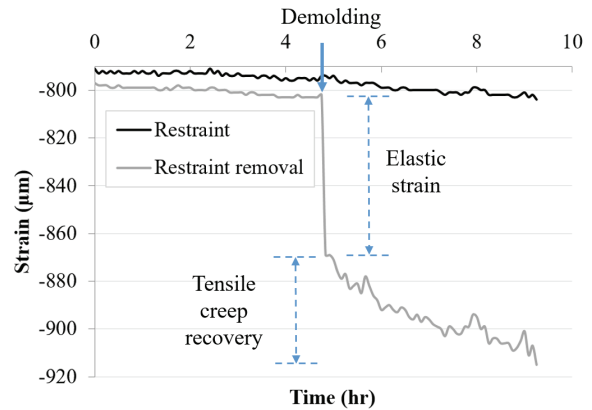


Fig. 6. Shrinkage variation due to demolding(restraint removal)

탄성변형이 발생한 것으로 생각할 수 있다. 탄성변형이 종료된 이후에는 인장크리프의 일부가 점진적으로 회복이 되며 변형률의 변화가 지속적으로 발생하였다.

한편 탄성변형 및 일부 인장크리프의 회복이 완료되면 Fig. 4와 같이 일정시간 경과 후 비구속 시편의 기율기와 유사하게 진행될 것으로 판단된다. 하지만 모든 구속변형이 회복 가능한 것이 아니며, 비가역적인 인장크리프로 인한 잔류변형이 남아 있을 것으로 예상된다.

4.3 구속여부에 따른 인장거동 분석

4.3.1 구속조건에 따른 인장강도 분석

수축 실험을 수행한 시편은 재령 14일 및 28일에 직접인장실험을 수행하였으며, Fig. 7에 시편의 직접인장강도 실험 결과를 나타내었다. 실험 결과에 따르면 경화의 진행에 따라 인장강도와 탄성계수는 재령 28일에서 모두 증가하는 것으로 나타났다. 상세한 결과는 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Uniaxial tensile test result

Specification		Maximum tensile strength(MPa)		Initial crack stress(MPa)	
Specimens age	Specimen No.	Restrained	Non-restrained	Restrained	Non-restrained
14 days	1	3.09	2.52	2.40	1.75
	2	3.38	2.61	2.50	1.48
	3	2.42	2.09	2.23	1.61
	Average	2.96	2.41	2.38	1.61
28 days	1	3.70	2.81	2.42	2.09
	2	3.21	2.25	2.32	1.78
	3	3.70	-	2.67	-
	Average	3.54	2.53	2.47	1.94

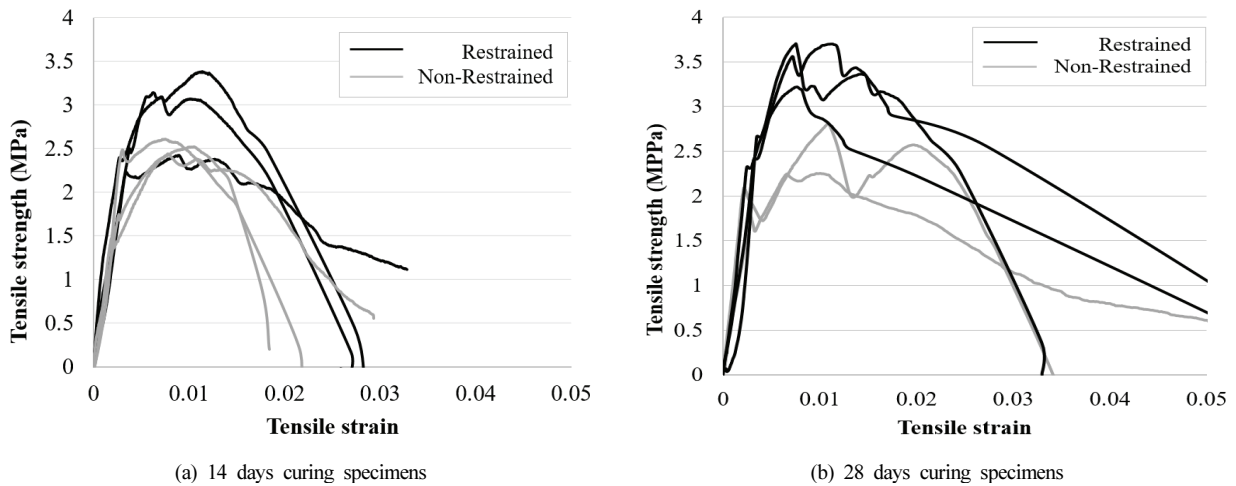


Fig. 7. Uniaxial tensile test result

구속에 의한 효과를 살펴보면, 재령에 관계없이 구속된 시편의 인장강도가 비구속 시편의 인장강도보다 높게 나오는 경향을 보였으며, 이는 최초 실험을 계획할 단계의 예상과는 반대의 결과이다. 애초에는 구속인장응력에 의하여 인장강도가 낮게 나올 것으로 예상하였으나, 실험 결과는 구속시편의 강도가 높게 측정되었다. 이에 대한 원인은 몇가지로 추론해 볼 수 있을 것이나, 정확한 원인 분석은 추가실험을 통해 규명을 하고자 한다. 우선 두 가지의 원인을 가정 할 수 있다.

첫째로 양생조건에 의한 차이를 생각해 볼 수 있다. 구속시편은 상하부가 공기 중에 노출되는 조건이었으며, 비구속시편은 모든 면이 대기에 노출된 조건으로 실험이 수행되었다. 따라서, 옆면이 추가로 노출된 비구속 시편에서 상대적으로 건조수축이 더 발생하였을 가능성이 있다. 이로 인하여 비구속시편체의 강도발현이 다소 낮았을 가능성이 있다.

두 번째는 구속 변형으로 인한 영향에 의해 강도가 증가하였을 가능성이 있다. 본 연구의 구속수축 실험은 타설단계부터 연속적으로 진행되었고, 초기 재령 단계부터 시편은 수축과 경화가 동시에 진행된다. 비구속시편은 내부 응력 및 미세 구조의 변화가 발생하지 않는 상태에서 재령이 경과함에 따라 경화가 진행되어 강도

가 발현된다.

반면 구속시편은 수축이 구속되면서 내부에 인장응력이 발생하고 내부 미세구조의 손상이 발생한다. 하지만, 시멘트의 수화와 경화는 계속적으로 진행되기 때문에 내부 미세구조의 손상이 회복된 것으로 추측된다.

4.3.2 구속응력의 추정

Fig. 7에서와 같이 물드를 제거하여 구속을 제거함과 동시에 탄성변형이 발생함을 알 수 있었으며, 이를 통하여 구속이 제거되기 전의 인장응력을 유추할 수 있다. Table 6에 구속 제거시에 발생한 탄성 변형과 이로부터 역산한 구속 응력을 나타내었다. 한편, 탄성계수의 산정시, 직접인장실험에 의해 측정된 탄성계수는 비소성변형을 포함하고 있기 때문에(Yoshitake et al, 2012) 실제 시편의 인장탄성계수를 반영하기 어렵다. 따라서 압축강도실험으로부터 측정된 탄성계수를 사용하였다.

재령 14일에서 구속시편과 비구속시편의 강도차이의 평균값은 0.55MPa 이었다. 한편, 구속응력 제거로 인한 탄성 변형률 회복은 67 μ m 으로 관찰되었으며, 이를 통하여 구속응력은 0.98MPa으로 유추할 수 있다.

Table 6. Material characteristics and elastic stress determine by tensile test

Curing times	Elastic modulus(MPa)	Strength(MPa)			Elastic strain recovery(μ m)	Removed restrained stress (MPa) [(1) × (6)]
	Average (1)	Non-restrained (2)	Restrained (3)	Difference (5) [(2)-(3)]	Non-restrained (6)	
14 days	13707	2.96	2.41	0.55	67	0.98
28 days	15419	3.54	2.53	1.01	-	-

5. 결론

ECC 시편에서 구속 응력이 인장거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 일련의 실험을 진행하였다. 직접인장시편을 제작하여 구속조건을 달리하여 양생하였고, 직접 인장강도 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. ECC 재료로 직접 인장시편을 제작하여 구속 및 비구속 상태를 설정하고, 기건상태에서 건조수축을 측정하였다. 구속된 시편의 수축 변형률은 14일 재령에서 비구속된 시편의 약 53%, 28일 재령에서는 62%에 해당하였다. 이로부터 각각 47%, 38%의 구속도에 의한 실험이 진행되었음을 알 수 있었다.
2. 구속된 인장시편에서 구속을 제거할 경우 구속 제거와 동시에 탄성변형이 발생함을 확인하였고, 이후 점차적으로 구속 변형의 회복이 나타났다. 구속 제거시 측정된 탄성변형률을 사용하여 구속응력을 추론할 수 있었으며, 본 연구의 실험에서 발생한 구속 응력은 0.98MPa 정도로 나타났다.
3. 인장강도의 실험결과 동일한 재령임에도 불구하고 구속유무에 따라 인장강도가 다르게 관찰되었다. 구속시편의 인장강도가 비구속시편의 인장강도 보다 큰 것으로 관찰되었다. 이에 대한 원인은 자세한 추가 실험과 분석 연구를 통해 검증되어야 할 것이다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C152090-01).

References

Abbasnia, R., Godossi, P., Ahmadi, J. (2005). Prediction of restrained shrinkage based on restraint factors in patching repair mortar, *Cement and Concrete Research*, **35(10)**, 1909–1913.

ACI Committee 209R-92. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Practice Manual.

Arundhathy, S., Vasugi, V. (2016). Engineered cementitious

composites for sustainable construction, *Key Engineering Materials*, **692**, 17–26.

Cha, S.W., Oh, B.H., Lee, H.J. (2002). Evaluation of thermal and shrinkage stresses in hardening concrete considering early-age creep effect, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **14(3)**, 382–289 [in Korean].

Deshpande, U.L., Murnal, P.B. (2016). Ductile Concrete Using Engineered Cementitious Composites, *International Journal of Engineering Research*, **5013(5)**, 756–760.

Haji, E.Y., Sanders, D.H., Weitzel, N.D. (2016). Development of Specifications for Engineered Cementitious Composites for Use in Bridge Deck Overlays, NDOT Project 13–39, Nevada Department of Transportation, February 2016, FINAL REPORT.

Han, C.G., Han, M.C., Song, S.H., Yoon, S. (2009). Drying shrinkage of concrete combining expansive additives and shrinkage reducing agent, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **93**, 87–94 [in Korean].

Han, M.C. (2006). Prediction of setting time of super retarding concrete incorporating blast furnace slag, *Architectural Research(structural part)*, **22(12)**, 87–95 [in Korean].

Kim, J.H., Yoon, H.D., Jun, E. (2006). Material design, characteristics and application of engineered cementitious composites, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **18(1)**, 28–35 [in Korean].

Kim, Y.Y. (2007). Design and constructibility of an engineered cementitious composite produced with cement-based mortar matrix and synthetic fibers, *Korean Society for Composite Materials*, **20(2)**, 21–26 [in Korean].

Kim, Y.Y., Li, V.C. (2003). Performance of Engineered Cementitious Composites (ECC) Link Slabs for Jointless Bridge Deck System, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers A*, **23(6A)**, 1143–1154 [in Korean].

Krouma, A., Syed, Z.I. (2016). A review on the use of engineered cementitious composite in bridges, *Materials Science Forum*, **860**, 125–134.

Kwon, S.H., Kim, J.K. (2016). Understanding of drying shrinkage and autogeneous shrinkage in concrete, special articles, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **28(6)**, 22–26 [in Korean].

Lee, H.B. (2014). Evaluation of residual stress using IITC of experimental stress analysis on concrete structure, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **34(2)**, 415–424 [in Korean].

Li, V.C. (2011). Engineered Cementitious Composites (ECC)—Material, Structural, and Durability Performance.

Li, V.C., Fischer, G., Kim, Y.Y., Lepech, M., Qian, S., Weimann, M.,

- Wang, S. (2003). Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Base on Strain-Hardening Cementitious Composite, MODT Project, Michigan Department of Transportation, November 2003, FINAL REPORT.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2014). Concrete, Microstructure Properties and Materials, Third edition, McGraw-Hill, NewYork.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003). Concrete, Second edition, Prentice Hall.
- Oluokun, F.A. (1991). Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength evaluation relations for normal weight concrete, ACI Materials Journal, **88(3)**, 302-309.
- Park, S.G. (2017). Prediction and reduction technology of concrete shrinkage, Technology Lecture, Magazine of the Korea Concrete Institute, **29(6)**, 57-64 [in Korean].
- Ryu, D.Y., Park, J.J., Kim, S.W., Yoon, Y.S. (2011). Characteristics of early-age restrained shrinkage and tensile creep of ultra-high performance cementitious composites (UHPC), Journal of the Korea Concrete Institute, **23(5)**, 581-590 [in Korean].
- Ryu, S.S. (2017). Effect of Pore Structures in Coarse Aggregate on the Shrinkage of Concrete, Ph.D Thesis, Joongbu University, Korea [in Korean].
- Shin, K.J., Lee, D.K., Seo, D.W., Yoo, C.M., Lim, M.H., Lim, S.H. (2016). Setting estimation of cement paste using new-type embedded sensor, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(4)**, 483-488 [in Korean].
- Son, S.W., Ahn, T.H., Jeon, Y.S., Ahn, S.K., Jung, S.H. (2015). Bleeding and setting time of concrete using modified fly ash, Korea Concrete Institute Spring Convention, **27(1)**, 577-578 [in Korean].
- Yang, S.C., Ahn, N.S., Choi, D.W., Kang, S.M. (2004). Drying shrinkage of concretes according to different volume-surface ratios and aggregate types, International Journal of Highway Engineering, **6(4)**, 109-121 [in Korean].
- Yoshitake, I., Rajabipour, F., Mimura, Y., Scanlon, A. (2012). A Prediction Method of Tensile Young's Modulus of Concrete at Early Age, Advances in Civil Engineering, Hindawi.
- Yu, K., Wang, Y., Yu, J., Xu, S. (2017). A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%, Construction and Building Materials, **137**, 410-419.
- Yu, K., Wang, Y., Yu, J., Xu, S. (2017). Experimental study on crack bridging in engineered cementitious composites under fatigue tensile loading, Construction and Building Materials, **154**, 167-175.

구속된 건조수축에 따른 ECC의 인장거동에 관한 연구

시멘트 경화체에서 건조수축은 경화체내의 수분량이 감소하므로써 체적이 변화하게 되며, W/C가 높고 페이스트의 함유량이 많을수록 건조수축이 커진다고 알려져 있다. ECC의 경우, 굵은 골재를 포함하지 않기 때문에, 콘크리트에 비해서 더 많은 건조수축이 발생하게 된다. 만약, 양생중인 ECC에 구속이 작용할 경우, 일반 콘크리트 보다 큰 인장 응력이 발생하게 되며, ECC는 인장성능이 중요한 재료이므로 이러한 구속인장응력이 역학적 인장거동에 주는 영향을 고려해야 한다. 본 연구에서는 구속에 의해 발생한 응력이 ECC의 인장거동에 미치는 영향을 분석하고자 하였고, 구속여부를 달리하여 양생한 시험체에 직접인장 시험을 수행하여 역학적인 특성 변화를 관찰하였다. 그 결과, 구속응력에 따른 인장거동의 차이를 관찰하였고, 그 원인을 분석하였다.