

셀룰로오스 섬유 함유 콘크리트의 작업 성능 및 강도 평가

Evaluation of Workability and Strength in Concrete with Cellulose Fibers

류화성¹ · 이상석² · 권성준^{3*}

Hwa-Sung Ryu¹ · Sang-Seok Lee² · Seung-Jun Kwon^{3*}

(Received April 20, 2020 / Revised June 18, 2020 / Accepted June 19, 2020)

Cracking due to material behavior like drying shrinkage easily occurs since tensile strength in concrete is very low at initial curing stage. In this paper, workability such as air content and slump was evaluated on CFC(Cellulose Fiber Concrete) with 0.0~2.0% of fiber addition, and the tests for tensile/compressive strength were performed. With increasing addition ratio of fiber, air content and slump kept similar level to 1.0kg/m³ of addition ratio, and this trend was effective to 2 hours after mixing. Strength was enhanced with increasing addition ratio, which showed 7.0~9.0% for compressive strength and 7.0~22.0% for tensile strength, respectively. The tensile strength increased relatively more, which show the addition of cellulose fiber was very effective to crack resistance. The workability in CFC can be guaranteed for 2 hours in the following conditions like 2 minutes of mixing period and 1.0kg/m³ of addition ratio of fiber.

키워드 : 셀룰로오스 섬유 혼입 콘크리트, 혼입률, 작업성, 공기량, 슬럼프, 압축강도, 인장강도

Keywords : CFC(Cellulose Fiber Concrete), Addition ratio, Workability, Air content, Slump, Compressive strength, Tensile strength

1. 서론

콘크리트 구조물은 다양한 노출환경에서 시공되며, 매스콘크리트와 같이 대량 타설되거나 비표면적이 큰 구조물에서는 초기 재령에 대하여 균열이 쉽게 발생한다. 일반적으로 수화열에 대한 균열저항성 개선은 수화열이 낮은 바인더의 사용, 분할타설, 또는 온도철근 등의 배근을 통하여 저항성을 개선할 수 있다(Song et al, 2001; ACI 207.2R-95 2002). 그러나 최적의 배합을 통하여 자기수축 및 건조수축을 제어한다고 해도 표면에서 소성수축(Plastic shrinkage)으로 인한 균열을 제어하기는 매우 어렵다. 실제로 이러한 균열은 내구성 및 구조적 거동에 큰 영향을 미치지는 않지만 표면에 미세 균열을 야기하며, 마감이 없는 경우, 외부 열화인자의 주된 유입 통로가 된다(Gérard and Marchand 2000; Win et al, 2004).

자기수축은 수분의 유입 또는 발산이 없어도 자체적인 수화 반

응에 따라 발생하지만 건조수축과 소성수축의 경우 수분의 발산이 주된 원인이며, 이러한 균열은 외부 하중의 증가에 따라 진전이 가속화된다(Ulm et al, 2001; Yoo et al, 2012; Uno 1998). 특히 슬래브, 주차장과 같이 비표면적이 큰 구조체와 해상 교량 상판 및 방호벽 같은 구조에서는 소성수축균열의 발생은 빈번하게 발생한다(Uno 1998). 그러나 노출환경에 대하여 온도, 풍속 등과 같은 영향인자가 경험적으로 고려될 뿐 이를 고려한 모델식 또는 균열 저항성 평가에 대한 기법은 매우 부족하다(Naaman et al, 2005; Ryu et al, 2019).

많은 연구에서 콘크리트 균열저항성을 개선하려는 시도가 있었으며, 그중 섬유재(Fiber) 혼입을 통한 균열 저항성 개선은 매우 효과적이다. 초기 강섬유 보강 콘크리트의 경우 인장강도의 개선 및 슛크리트의 탈락률 개선을 위하여 많이 사용되었으나 중량의 증가 및 부식의 위험성으로 인해 사용성이 제한되고 있다(ACI 544.4R-83 1999; Cho et al, 2012). 폴리비닐, 폴리프로필렌, 나일론 섬유의 사용은 인장강도의 개선, 내화성 콘크리트, 친수성을

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹(주)한양E&C 대표이사 (Hanyang Experiment and Consulting, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea)

²한남대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

³한남대학교 토목환경공학과 부교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

이용한 내부양생 효과증가 등의 장점을 가지고 있으나, 경제적인 시공은 제한적이다(Karahan and Atiş 2011; Kim et al. 2010; Meddah and Bencheikh 2009).

또한 섬유재의 발전은 인장경화특성을 더욱 증가시켜 고인성 복합재(ECC: Engineering Cementitious Composite) 또는 초고강도 복합재(UHPCC: Ultra-High Performance Cementitious Composites) 등으로 발전하고 있다(Choi et al. 2016; Park et al. 2012; Kanda and Li 2006).

폴리머 합성 계열의 섬유재 이외에 목재와 같은 천연 재료에서 추출된 셀룰로오스 섬유는 비교적 높은 탄성계수 및 내알칼리성을 가지고 있다(Ryu et al. 2019). 매우 작은 지름을 가진 섬유재를 제조할 수 있으므로 미세 공극을 메꿀 수 있으며, 표면에 발생하는 균열에 대하여 효과적으로 저항할 수 있다. 콘크리트내의 셀룰로오스 섬유는 골재간의 마찰력으로 분산성이 유지될 수 있으며, 친수성이므로 우수한 적합성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 기존의 연구에서는 휨강도 개선, AAR(Alkali Aggregate Reaction) 저항성 개선, 흡음성 및 절연성의 개선, 고기능성 콘크리트의 강도 개선 등 몇가지 공학적인 장점들이 보고되고 있다 (Mohamed et al. 2010; Neithalath et al. 2004; Pichor et al. 2000; Rasouli et al. 2015). 국내에서도 셀룰로오스 섬유를 혼입한 시멘트 모르타르에 대한 기초적인 연구가 수행되어 역학적 성능과 작업성을 분석한 연구가 있다(Ryu et al. 2019). 그러나 셀룰로오스 섬유를 콘크리트에 적용할 경우 굵은 골재의 영향으로 인해 작업성 및 공기량에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 0.0 ~ 2.0% 까지 셀룰로오스 섬유재의 투입량을 변화시키면서 설계강도 24MPa의 콘크리트의 작업성 및 공기량을 분석하였다. 또한 재령 28일까지 압축강도를 평가하였으며, 폴리프로필렌 섬유(PPF: Poly Propylene Fiber) 1.0% 혼입 콘크리트와의 상대비교를 수행하였다.

2. 셀룰로오스 혼입 콘크리트의 작업성 평가를 위한 실험 개요

셀룰로오스 혼입 콘크리트(CFC: Cellulose Fiber Concrete)의 성능평가를 위하여 설계강도는 24MPa로, 목표 공기량은 5.0%를 목표로 배합을 수행하였다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement)를 사용하였으며, AE감수제는 결합재 중량의 0.5%를 사용하였다. 섬유로서는 셀룰로오스 섬유와 비교

군으로 폴리프로필렌 섬유를 사용하였다. 셀룰로오스 섬유는 원활한 혼입을 위하여 슬러리형을 사용하였으며(Ryu et al. 2019), 혼입률은 0.5kg/m³, 1.0kg/m³, 2.0kg/m³의 세 가지 수준을 고려하였다. 또한 폴리프로필렌 섬유는 일반적으로 고려되는 혼입률(1.0kg/m³)을 고려하였다.

기존의 연구를 고려하여 혼입 시간은 섬유를 혼입하고 건비빔 30초, 물을 투입하고 90초 등 총 120초로 하였다(Ryu et al. 2019). 콘크리트의 압축 및 쪼갬인장강도 실험은 150×300mm의 실린더 시편을 사용하여 실험을 수행하였으며, KS F 2405 및 KS F 2423에 의거하여 실험을 수행하였다. 또한 굵지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 실험은 KS F 2594 및 KS F 2421에 준하여 실험하였다.

Table 1에서는 사용된 콘크리트의 배합표를 나타내며, 사용된 골재의 특성을 Table 2에 나타내었다. 또한 Table 3에서는 사용된 셀룰로오스 섬유의 역학적 특성을 나타내고 있다.

측정항목은 굵지 않은 상태에서 슬럼프, 공기량, 슬럼프 및 공기량 경시 변화를 평가하였으며, 경화 후에는 재령 3일, 7일, 28일에서 압축강도 및 인장강도를 평가하였다. Fig. 1에서 각 측정항목의 실험 전경을 나타내고 있다.

Table 1. Mix proportions for concrete mixing

Case	CF 0.0	CF 0.5	CF 1.0	CF 2.0	PP 1.0	
W/B(%)	51.0					
S/a(%)	47.0					
Unit weight (kg/m ³)	CF	-	0.5	1.0	2.0	-
	PP	-	-	-	-	1.0
	SF	-	-	-	-	-
	W	186				
	C	171				
	F/A	48				
	S/P	146				
	S	831				
G	879					
AE(%)	0.5					

AE: Air Entraining Agent

Table 2. Physical properties of fine and coarse aggregate

Items Types	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate	25	2.64	0.82	6.87

F.M.: Fineness Modulus

Table 3. Physical characteristics of cellulose fibers

Items	CF
Length(mm)	1.9 ~ 2.3
Diameter(μ m)	14 ~ 17
Number of fiber(fibers/g)	1,590,000
Density(g/cm^3)	1.10
Surface area(cm^2/g)	25,000
Tensile strength(MPa)	600 ~ 900
Elasticity(MPa)	8,500



(a) Mixing process for CFC

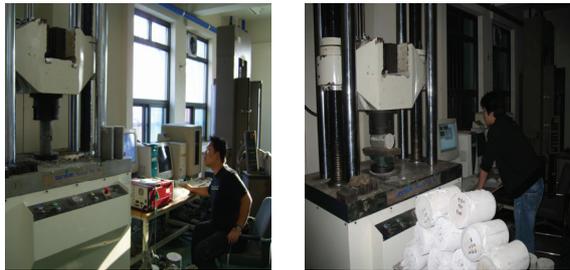


(b) Slump test

(c) Air content measurement



(d) Visual inspection of slump loss with time



(e) Measurement of compressive and tensile strength

Fig. 1. Photos for CFC mixing, air content measuring, and test for strength

3. 작업성 및 압축강도 평가

3.1 공기량 및 슬럼프 평가

3.1.1 혼입률에 따른 공기량 및 슬럼프 평가

Fig. 2는 셀룰로오즈 섬유를 혼입한 콘크리트의 공기량을 나타낸다. 기본 콘크리트(CF 0.0)의 공기량은 5.3% 이지만 슬러리형 셀룰로오즈 섬유를 첨가함에 따라 공기량이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 미세한 섬유가 다량 혼입되는 경우에 공기가 같이 혼입되어 공기량이 증가하기 때문이다. 이러한 현상은 PP섬유에서도 같은 현상으로 발생한다. 혼입량이 2.0kg/m³에서는 급격한 공기량의 증가를 나타내고 있으므로 2분 이내 혼입 시간에서는 슬러리형 셀룰로오즈 섬유의 혼입률은 1.0kg/m³ 수준으로 유지하는 것이 합리적이다.

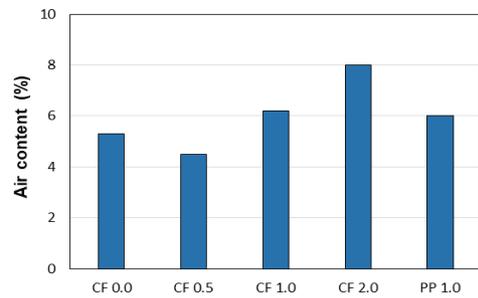


Fig. 2. Air content in CFC with different fibers

Fig. 3에서는 CFC의 타설시 슬럼프를 나타내었다. 보통 콘크리트의 슬럼프는 190mm로 평가되었으며, 셀룰로오즈 섬유를 첨가해도 섬유 혼입량 1.0kg/m³ 수준까지는 슬럼프 저하는 거의 나타나지 않았으나 2.0kg/m³ 수준으로 혼입한 경우는 슬럼프가 120mm로 급격히 저하하였다. 이는 섬유량이 지나치게 많은 경우 점성에 영향을 주어 슬럼프가 저하하기 때문이다. 육안으로 관측

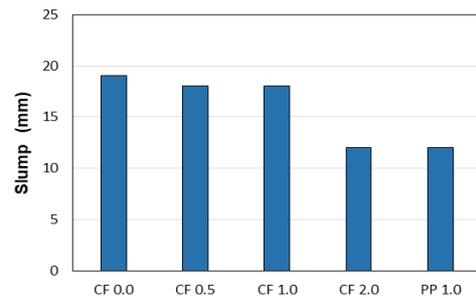


Fig. 3. Slump loss in CFC with different fibers

시 완전히 분산되지 않은 경우에는 2.0kg/m³ 혼입한 경우에도 슬럼프가 확보되는 경우가 발생하였는데, 이는 셀룰로오스 섬유가 많이 혼입되었지만 완전하게 분산되지 않아 슬럼프저하가 상대적으로 낮아보였다. 공기량과 마찬가지로 2분 이내 믹싱 시간에서 셀룰로오스 섬유의 혼입률은 1.0kg/m³ 수준이 합리적임을 알 수 있다.

3.1.2 시간에 따른 공기량 및 슬럼프 평가

3.1.1에서 비교적 우수하게 평가된 셀룰로오스 섬유 1.0kg/m³을 혼입한 배합에 대하여 시간 경과에 따른 슬럼프 및 공기량 변화를 평가하였다. 슬럼프 및 공기량의 유지기간은 레이콘의 배치 및 타설 시간에 영향을 주므로 중요한 인자이다. CFC 콘크리트(CF 1.0)의 슬럼프는 180mm 였으나 30분 경과 후는 190mm로 약간 증가하였으며 그 이후로는 감소하는 경향을 나타내었다. 공기량의 경우는 시간 경과에 따라 120분까지는 거의 변화가 없는 것으로 평가되었다.

혼입 후 2시간 정도까지는 공기량과 슬럼프에 큰 영향이 없으나, 본 실험은 소량 배합을 위하여 가경식 믹서를 사용한 결과이다. 현장 적용을 위해서는 배치 플랜트에서의 생산과 애지테이터 트럭에서의 경시 변화를 검토하는 것이 필요하다.

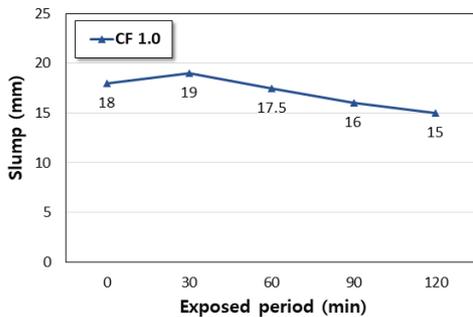


Fig. 4. Changes in slump with time in CFC(1.0kg/m³)

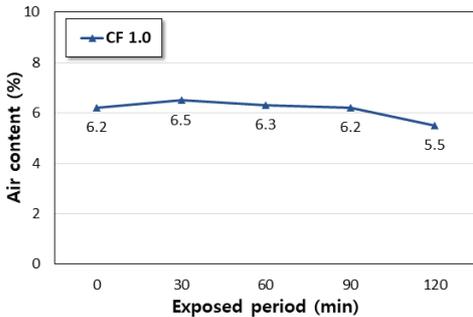


Fig. 5. Changes in air content with time in CFC(1.0kg/m³)

3.2 시간에 따른 압축 및 인장강도 평가

3.2.1 압축강도 평가

Fig. 6에서는 CFC의 재령별 압축강도를 나타내었다. 섬유를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 CFC의 경우 최대 약 7%의 압축강도 증가가 나타나고 있으며 혼입률이 증가할수록 압축강도도 약간 증가하였다. 그러나 일반적으로 섬유 혼입 콘크리트의 경우 인장강도 개선을 통한 균열저항성 증가가 주목적이므로 압축강도의 개선을 설계시 반영하는 것은 바람직하지 않다(Cho et al. 2012; Kwon et al. 2014). 폴리프로필렌 섬유 혼입의 경우는 기본 콘크리트와 비교하여 거의 동등한 강도를 나타내고 있으며, CFC의 경우에서도 2.0%수준까지는 급격한 강도 저하는 없는 것으로 판단된다. Fig. 6은 CFC의 압축강도 발현을 나타낸 것으로 기본 콘크리트와 유사한 압축강도 발현을 나타내는 것을 알 수 있으며, 재령별 기본 콘크리트와 비교하여 혼입률이 증가할수록 압축강도는 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

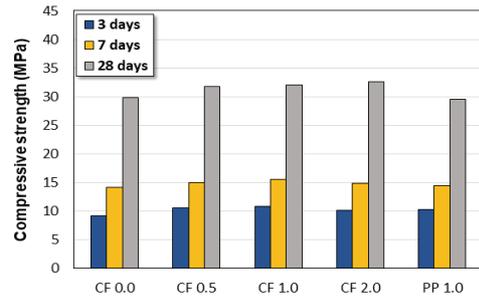


Fig. 6. Compressive strength in CRC with different cases

3.2.2 인장강도 평가

인장강도의 경우 재령 28일에서만 평가하였는데, 기본 콘크리트와 비교하여 CFC에서는 7 ~ 22% 수준의 인장강도가 평가되었으며, PP섬유의 경우, 28%의 증가가 발생하였다. 또한 상대적으로 비교한 폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트에서 인장강도가 크게 평가되었다. 이는 폴리프로필렌 섬유의 길이가 셀룰로오스 섬유보다 길고 인장강도가 셀룰로오스 섬유보다 크기 때문이다. Fig. 7에서는 CFC에서 섬유 혼입률의 증가에 따른 인장강도의 변화를 도시하였다. 또한 Fig. 8에서는 기준 콘크리트(CF 0.0)를 기준으로 각 배합의 압축강도 및 인장강도 변화율을 도시하였다. 압축강도의 경우 섬유 혼입량 1.0%일 때 가장 높은 증가량을 보였지만 뚜렷한 경향을 파악하기는 어려웠지만 인장강도의 경우 셀룰로오스 섬유의 혼입량이 증가할수록 선형적으로 증가하므로 균열저항성에 효과적으로 저항할 수 있을 것으로 판단된다.

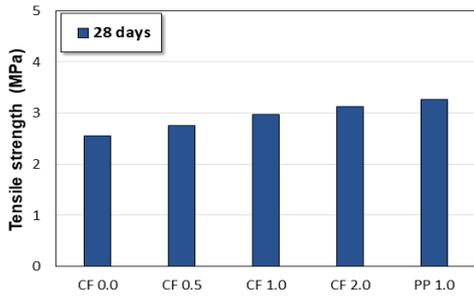
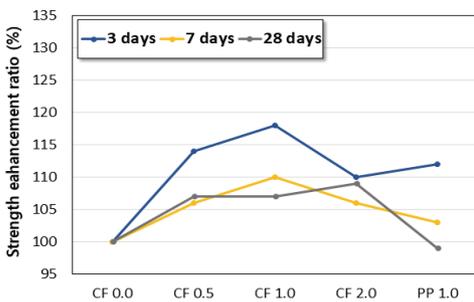
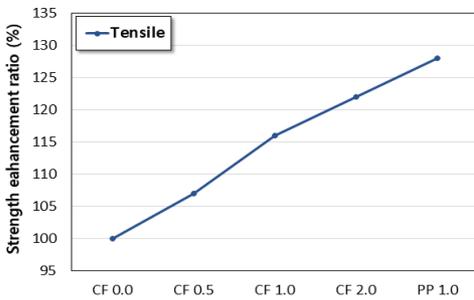


Fig. 7. Tensile strength in CFC(28 days)



(a) Compressive strength



(b) Tensile strength

Fig. 8. Comparison of strength enhancement in CFC

4. 결론

셀룰로오스 섬유 함유 콘크리트의 작업 성능 및 강도 평가를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 공기량 측면에서 2분 이내 혼입 시간과 1.0kg/m³ 수준의 셀룰로오스 섬유 혼입이 유리하며, 슬럼프 저하는 혼입률의 증가에 따라 1.0kg/m³ 까지는 큰 차이가 없었으나, 2.0kg/m³ 혼입한 경우에는 크게 감소하였다. 두 가지 모두 셀룰로오스 섬유를 1.0kg/m³ 혼입한 경우에는 120분의 경시 변화에서 슬럼프 및 공기량의 변화는 큰 차이는 없었다.

- 2) 셀룰로오스 섬유를 혼입한 콘크리트의 압축강도의 증가율은 7 ~ 9% 수준으로, 인장강도의 증가율은 7 ~ 22%로 평가되었다. 셀룰로오스 섬유의 혼입량이 증가할수록 CFC 인장강도가 증가하므로 작업성능이 확보될 경우, 비표면적이 큰 구조물의 표면 균열 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 정부의 지원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(NRF-2020R1A2C2009462).

References

ACI 207.2 R-95. (2002). Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Committee 207, USA.

ACI 544.4R-88. (1999). Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, USA.

Cho, C.G., Han, S.J., Kwon, M.H., Lim, C.K. (2012). Seismic performance evaluation of reinforced concrete columns by applying steel fiber - reinforced mortar at plastic hinge region, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(3)**, 241-248 [in Korean].

Choi, J.I., Lee, B.Y., Ranade, R., Li, V.C., Lee, Y. (2016). Ultra - high - ductile behavior of a polyethylene fiber - reinforced alkali - activated slag - based composite, *Cement and Concrete Composites*, **70**, 153-158.

Gérard, B., Marchand, J. (2000). Influence of cracking on the diffusion properties of cement - based materials : Part 1 : Influence of continuous cracks on the steady - state regime, *Cement and Concrete Research*, **30(1)**, 37-43.

Kanda, T., Li, V.C. (2006). Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **4(1)**, 59-72.

Karahan, O., Atiş, C.D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Materials and Design*, **32(2)**, 1044-1049.

- Kim, D.S., Khil, B.S., Goo, S.H., Moon, G.H., Kim, J.W., Park, J.S. (2010). Application technology of special concrete realized resistance for crack and watertightness simultaneously, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **22(1)**, 52–58 [in Korean].
- Kwon, S.J., Jo, H.J., Park, S.S. (2014). Applicability evaluation and development of high strength spacer with plastic fiber and slag cement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **18(4)**, 92–98 [in Korean].
- Meddah, M.S., Bencheikh, M. (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials, *Construction and Building Materials*, **23(10)**, 3196–3205.
- Mohamed, M.A.S., Ghorbel, E., Wardeh, G. (2010). Valorization of micro – cellulose fibers in self – compacting concrete, *Construction and Building Materials*, **24(12)**, 2473–2480.
- Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen, T., Hauser, G. (2005). Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete, *ACI Materials Journal*, **102(1)**, 49–58.
- Neithalath, N., Weiss, J., Olek, J. (2004). Acoustic performance and damping behavior of cellulose – cement composites, *Cement and Concrete Composites*, **26(4)**, 359–370.
- Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S., Koh, K.T. (2012). Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, **34(2)**, 172–184.
- Pichor, W., Petri, M., Deja, J. (2000). Properties of FRC with modified cellulose fibers, *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)*, RILEM Publications SARL, 643–652.
- Rasouli, H.R., Golestani-Fard, F., Mirhabibi, A.R., Nasab, G.M., Mackenzie, K.J.D., Shahraki, M.H. (2015). Fabrication and properties of microporous metakaolin – based geopolymer bodies with polylactic acid (PLA) fibers as pore generators, *Ceramics International*, **41(6)**, 7872–7880.
- Ryu, H.S., Shin, S.H., Kwon, S.J. (2019). Strength properties of cement mortar with slurry – typed cellulosic fiber, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **7(3)**, 210–215 [in Korean].
- Song, H.W., Cho, H.J., Park, S.S., Byun, K.J., Maekawa, K. (2001). Early – age cracking resistance evaluation of concrete structures, *Concrete Science and Engineering*, **3(10)**, 62–72.
- Ulm, F.J., Bazant, Z.P., Wittmann, F.H., Bazant, Z.P. (2001). *Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials*, Elsevier Science Ltd, Cambridge, England, 735–740.
- Uno, P.J. (1998). Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas, *ACI Materials Journal*, **95(4)**, 365–375.
- Win, P.P., Watanabe, M., Machida, A. (2004). Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **34(7)**, 1073–1079.
- Yoo, S.W., Kwon, S.J., Jung, S.H. (2012). Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures, *Construction and Building Materials*, **34**, 1–10.

셀룰로오스 섬유 함유 콘크리트의 작업 성능 및 강도 평가

콘크리트는 초기에 인장강도가 확보되지 못하므로 건조수축과 같은 재료적인 균열이 발생하게 된다. 본 연구에서는 셀룰로오스 섬유를 0.0 ~ 2.0% 혼입한 콘크리트를 대상으로 공기량, 슬럼프와 같은 작업성을 평가하였으며, 재령에 따른 압축 및 인장강도를 평가하였다. 혼입률이 증가할수록 1.0kg/m³ 수준에서는 공기량 및 슬럼프에서 저하를 확인할 수 없었으며, 이러한 작업성은 2시간까지 유효하게 작용하였다. 강도 평가에서는 혼입률이 증가할수록 인장 및 압축강도가 개선되었으며, 압축강도의 경우 7 ~ 9%수준으로, 인장강도에서는 7 ~ 22% 수준으로 증가하였다. 인장강도에서 증가율이 상대적으로 크게 평가되었는데, 이러한 효과는 균열저항성에 크게 도움을 주리라 판단된다. 본 연구를 통하여 2분간의 혼입 시간, 셀룰로오스 섬유 1.0kg/m³의 혼입률 수준이면 120분간 작업성에 큰 영향이 없으리라 평가된다.