

나일론 및 셀룰로스 섬유 혼입률 변화가 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향

Effect of the Nylon and Cellulose Fiber Contents on the Mechanical Properties of the Concrete

한 천 구*

Han, Cheon-Goo

한 민 철**

Han, Min-Cheol

신 현 섭***

Shin, Hyun-Sup

Abstract

This study is to investigate the effects of nylon(NY) and cellulose(CEL) fiber contents on the mechanical properties of the concrete. The results were summarized as following. Test showed that increase of NY and CEL fiber contents decreased fluidity of fresh concrete, so the loss of the fluidity would be considered when they were over added. Air contents were slight increased, but they satisfied the target air content. Bleeding capacity of concrete containing fiber significantly was declined. In addition, concrete containing higher amounts of fiber retarded setting time remarkably. Plastic shrinkage crack was reduced with the use of fiber due to increasing fiber contents and changing fiber classes, and NY fibers to prevent the plastic shrinkage crack effectively. Compressive and tensile strength of almost specimens were increased when air contents of the fresh concrete were fixed according to fiber contents, and flexural strength was increased according to fiber contents. For the impact strength of specimens, the specimen containing 0.6kg/m³ of NY fibers, showed the most favorable impact strength, The fiber reinforced concrete using NY fibers exhibited superior mechanical performance, and it was considered that 0.6kg/m³ was desirable as the most favorable adding amount.

키워드 : 섬유보강 콘크리트, 나일론 섬유, 셀룰로오스 섬유, 소성수축 균열, 충격강도

Keywords : Fiber Reinforced Concrete, Nylon Fiber, Cellulose Fiber, Plastic Shrinkage Crack, Impacting Resistance Performance

1. 서 론

최근 우리나라의 건축 산업은 고도화, 고층화 및 대형화 되어감에 따라 대표적인 건설재료인 콘크리트에 요구되는 성질 또한 다양하고 복잡하게 발전하고 있다. 이러한 콘크리트는 압축강도가 크고, 내구, 내화성이 우수하며 경제성, 시공성, 형태구성의 편리함 등의 장점으로 많이 쓰여지고 있지만, 강도발현에 시간이 소요되고, 인장에는 약한 취성적 성질과 건조수축이 크고, 타설 직후 가소성의 유동체로 응결될때, 표면 건조에 의해 인장응력이 작용하여 소성수축 균열이 발생하는 등의 문제점이 존재한다.¹⁾

이러한 소성수축 균열은 콘크리트를 타설 한 후 건조한 외기에 노출될 경우 급작스런 표면의 수분증발로 말미암아 콘크리트 외부에 수축현상이 일어나는 것을 말하는데, 이러한 수축현상은 건조되지 않은 내부 콘크리트의 구속으로 표면에 인장응력이 발생하게 되고, 콘크리트의 초기 인장강도를 초과하게 될 경우 균열발생으로, 궁극적으로는 콘크리트의 내구성을 저하시키는 등 하자의 요인으로 작용하게 된다.

한편, 소성수축에 의한 균열발생을 저감시키는 방법으로는 수분 증발을 억제시키는 방법, 수축력을 완화시키는 방법 이외에도, 섬유를 첨가시켜 응력분산에 대응하는 방법이 있다.²⁾ 이 중 특히, 섬유를 첨가시키는 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete : 이하 FRC)는 최근에 많이 이용되어 지고 있는 추세이나, 섬유 뭉침 현상, 슬럼프 감소, 마감성능 저하 등 여러 가지 해결해야할 문제점들이 존재하고 있는 실정이다.

그런데, 이러한 섬유 중 나일론 섬유(Nylon fiber : 이하 NY)의 경우는 비교적 탄성계수가 크고, 시멘트 페이스트와의 높은 부착력을 가지며, 시멘트 입자 크기에 비해 유효직경이 작아 콘크리트를 밀실하게 만들고, 표면적이 크면서 단위면적당 차지하는 수가 많아 콘크리트 내에 발생하는 미세균열을 억제하고 안정화하여 콘크리트의 역학적 성질을 증대시키는 것으로 알려져 있어 향후 폭넓은 활용이 기대된다.

따라서 본 연구에서는 FRC의 성능향상과 소성수축으로 인하여 발생하는 균열을 저감할 목적으로 NY 섬유를 사용한 콘크리트의 제반공학적 특성을 실무 현장에서 많이 보급되어 사용되고 있는 셀룰로오스 섬유(Cellulose fiber : 이하 CEL) 콘크리트와 상호 비교하여 그 특성에 대하여 분석하고자 한다.

* 정희원, 청주대 건축공학부 교수, 공학박사

** 정희원, 청주대 건축공학부 전임강사, 공학박사

*** 정희원, 청주대 대학원 석사과정

한편, 소성수축 균열 실험은 그림 2와 같이 500×500×50mm의 실험 시편을 제작하여, 시편의 중앙에 콘크리트를 구축하기 위해서 Ø200mm PVC링을 설치하였으며, 바닥으로부터의 구축을 최소화하기 위해서 비닐막을 설치하였다. 소성수축균열에 대한 실험 조건은 30±3℃의 온도와 40±3%의 상대습도에서 콘크리트표면에 4~4.5m/sec의 바람을 24시간 작용시켜 소성수축 균열을 유발하고, 균열폭과 길이를 측정하여 균열면적을 산출하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도 시험은 ø100×200mm 공시체를 KS F 2403 규정에 따라 제작하고, 계획된 재령에서 KS F 2405에 의거하여 측정하였으며, 인장강도는 KS F 2423, 휨강도는 KS F 2408의 규정에 의거하여 측정하였다.

한편, 내충격성 시험은 KS F 2221에 의거 낙하높이 300mm의 시험 장치를 제작한 후 전자석을 설치하여 1000g의 쇠구슬을 500×400×30mm의 콘크리트 시편(기건상태)에 자유 낙하시켜 낙하에 의해 첫 번째 균열이 나타난 횟수와 시편이 파괴되기까지의 횟수를 측정하도록 하였다.

건조수축 길이변화율은 KS F 2424 규정에 의거 다이얼 게이지법으로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

3.1.1 유동성 및 공기량

그림 3은 섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프 및 슬럼프플로우를 꺾은선 그래프로 나타낸 것이다.

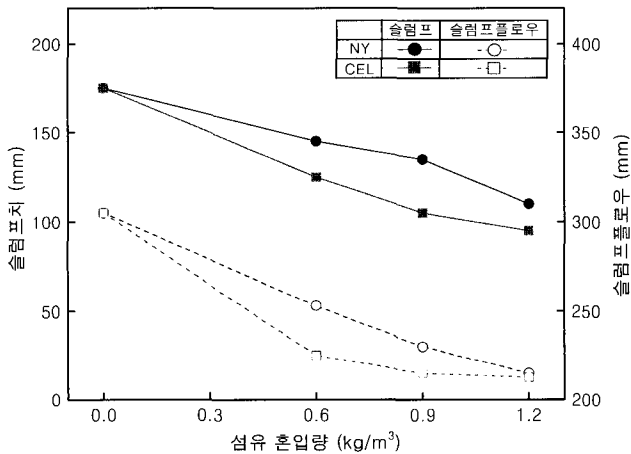


그림 3. 섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프 및 슬럼프플로우

전반적으로 유동성은 섬유 혼입률이 증가함에 따라 NY 섬유 및 CEL 섬유 공히 감소하였는데, 이는 섬유 혼입률이 증가함에 따라 콘크리트 매트릭스 내에 단위체적당 차지하는 섬유수가 증가하여 섬유 상호간의 가교작용(bridging)⁴⁾으로 말미암아 유동성이 감소한 것으로 분석된다. 또한, NY 섬유보다 CEL 섬유에서 슬럼프가 급격히 감소하였는데, 이는 NY 섬유의 경우 섬유 자체내에 4~5%의 수분을 함유하고 있는 친수성 섬유이기 때문에 유동성 감소가 적은 것으로 사료되고,⁵⁾ CEL 섬유

는 제조시 사용되는 주원료가 목재를 원통형 펠렛으로 특수 가공한 것이기 때문에 콘크리트 믹싱 과정 중 배합수를 흡수하여 유동성 감소에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

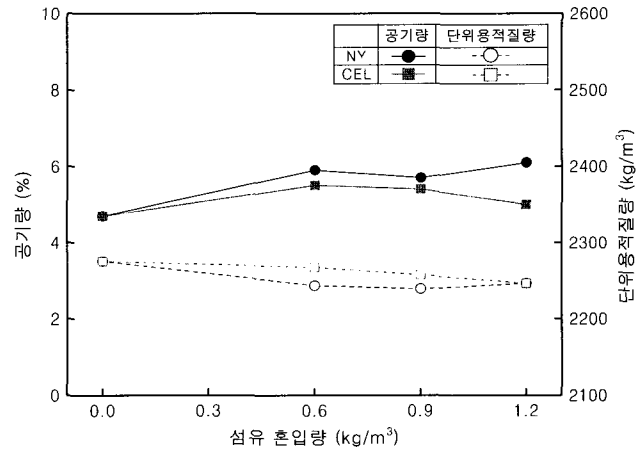


그림 4. 섬유 혼입률 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량

한편, 슬럼프 플로우는 섬유 혼입률이 증가함에 따라 슬럼프의 결과와 유사한 경향으로 저하하였다.

그림 4는 섬유 혼입률 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량을 나타낸 것이다. 공기량은 섬유 혼입률이 증가함에 따라 NY 섬유 및 CEL 섬유 공히 다소 증가하는 경향이었는데, 이는 기존의 연구결과⁶⁾에서 보듯이 섬유의 혼입률이 증가할수록 섬유와 시멘트 매트릭스사이의 미세공극이 증가하기 때문인 것으로 사료되며, 분산성이 양호한 NY 섬유가 CEL 섬유에 비해 공기량이 증가되었다.

한편, 단위용적질량의 경우는 섬유 혼입률이 증가함에 따라 공기량의 증가와 반대 경향으로 감소하였는데, 당연한 결과로 CEL 섬유보다 NY 섬유가 공기량 증가로 단위용적질량이 더욱 감소하였다.

3.1.2 블리딩

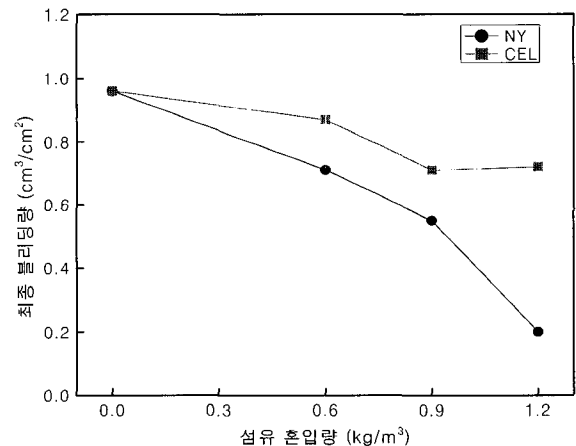


그림 5. 섬유 혼입률 변화에 따른 최종 블리딩량

그림 5는 섬유 혼입률 변화에 따른 최종 블리딩량을 나타낸 것이다. 섬유 혼입률이 증가함에 따라 모든 섬유에서 블리딩량은 감소하였는데, 이는 콘크리트 내부에서 각각의 섬유가 잉여

수를 떠오르지 못하게 하는 역할을 하기 때문에 사료된다. 즉, 섬유혼입은 콘크리트 구성중 매트릭스 내에 섬유가 그물망 처럼 존재하여 상승하는 잉여수를 제어하기 때문에 분석된다. 섬유 종류별에 따라서는 CEL 섬유보다 NY 섬유가 블리딩량이 더 감소하였는데, 이는 섬유의 분상성이 저하하는 CEL 섬유가 잉여수를 흡수하는 것보다 상대적으로 섬유길이가 길고 분상성이 좋은 NY 섬유가 매트릭스 내부에 치밀한 구조를 만들어 잉여수의 상승을 억제하는 역할이 더 우수하기 때문으로 사료된다.

3.1.3 응결시간

그림 6은 섬유 혼입량별 경과시간에 따른 관입저항치를 나타낸 것이다. 섬유가 혼입됨에 따라 모든 섬유에서 응결시간은 지연되었는데, 이는 섬유가 떠오르려는 잉여수를 잡아주는 역할을 하여 매트릭스 내에 많은 잉여수가 존재하기 때문에 프록터 관입저항침의 저항이 작아져 플레인보다 응결이 지연된 것

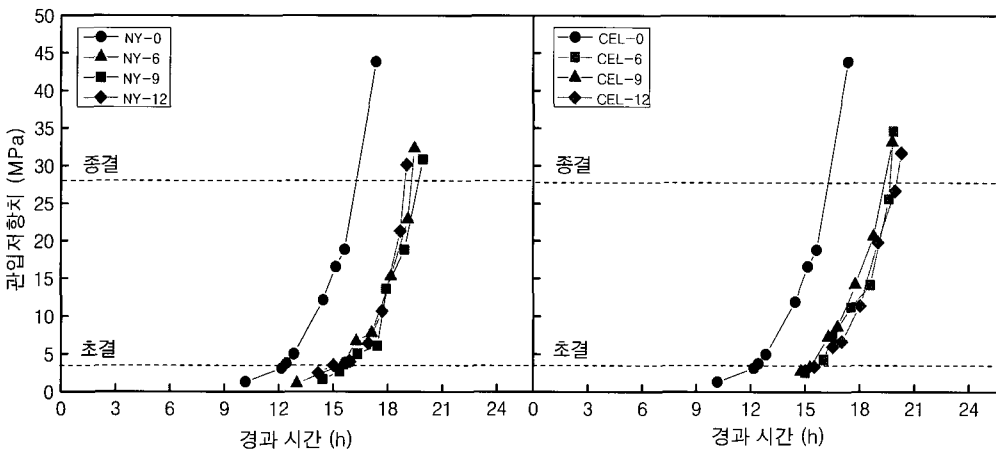


그림 6. 섬유 혼입량별 경과시간에 따른 관입저항치

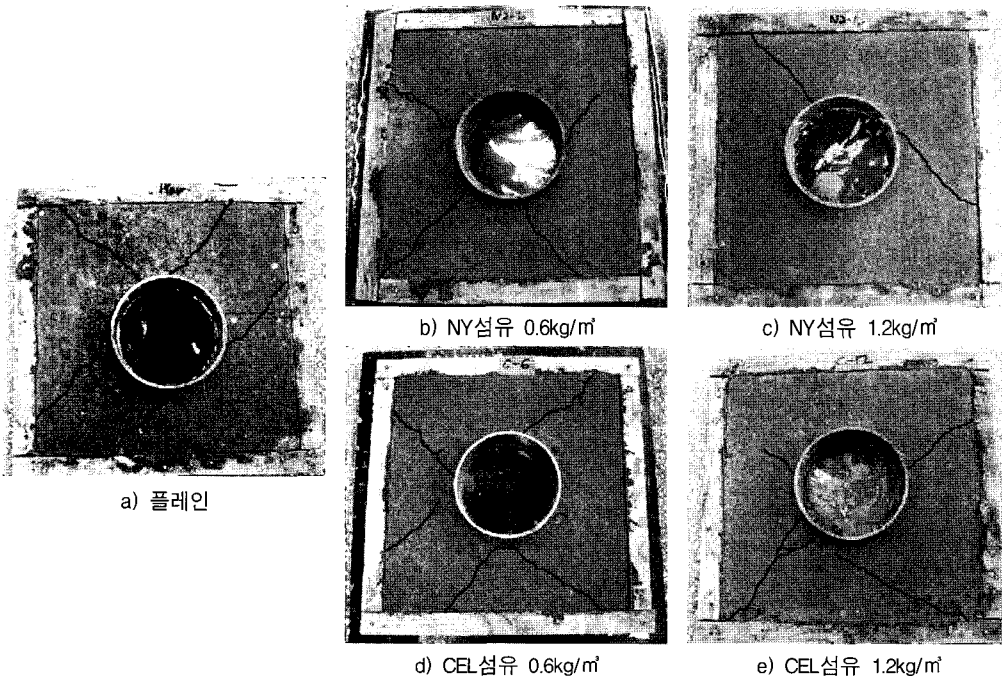


그림 7. 소성수축 균열 실험 후 시편

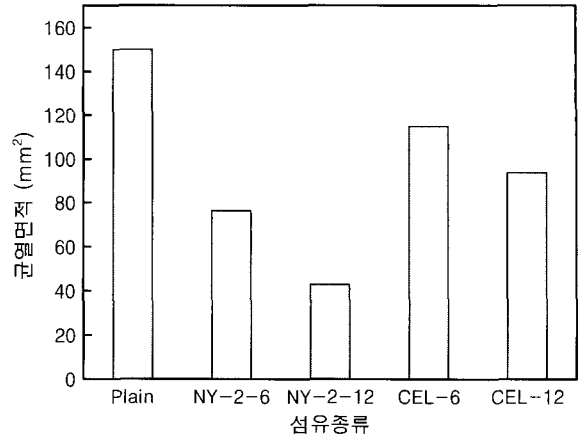


그림 8. 섬유 혼입량 변화에 따른 소성수축 균열면적

으로, 혼입량 증가에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 섬유종류별에 따라서는 큰 차이는 없는 것으로 분석되었다.

3.2 소성수축 균열특성

3.2.1 소성수축균열 발생 상황

그림 7은 소성수축 균열 측정 시험체를 이용하여 실험을 진행한 후의 균열 발생상황을 나타낸 모습이다. 단, 본 사진은 균열을 좀 더 명확히 하기 위하여 균열부분을 따라 선을 삽입하였다. 플레인의 경우 균열폭이 섬유를 혼입한 시편보다 상당히 크게 나타났으며, 섬유 혼입량이 증가할수록 균열폭과 균열 깊이는 현저하게 감소하였는데, NY 섬유를 사용한 경우가 CEL 섬유를 사용한 경우보다 균열발생이 적음을 알 수 있었다.

3.2.2 소성수축 균열면적

그림 8은 섬유 혼입량 변화에 따른 소성수축 균열면적을 나타낸 그래프이다. 이때, 균열은 실을 사용하여 균열 정상대로 가리런히 늘어뜨린 후에 균열 길이를 측정하였으며, 균열 폭은 균열 게이지를 사용하여 측정한 후 균열길이

와 균열폭을 곱하여 균열면적을 구하였다.

NY 섬유 및 CEL 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 소성수축 균열은 플레인보다 감소하였는데, 이는 콘크리트 매트릭스 내에 섬유가 네트워크를 형성하여 빠른 건조에 의해 표면이 수축할 때 섬유의 인장응력이 작용하여 균열을 저감시키는 것으로 사료되며, 섬유길이가 짧은 CEL 섬유보다 상대적으로 섬유길이가 긴 NY 섬유 혼입시 소성수축 균열 제어에 더욱 효과적인 것으로 분석된다.

3.3 경화 콘크리트 특성

3.3.1 압축강도

그림 9는 섬유 혼입률 변화에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 그래프 중 실선으로 표시한 것은 실측압축강도를 나타낸 것이고, 점선으로 표시한 것은 공기량 1% 증가에 대한 압축강도 감소를 5%로 가정하여 보정한 값을 나타낸 것이다.

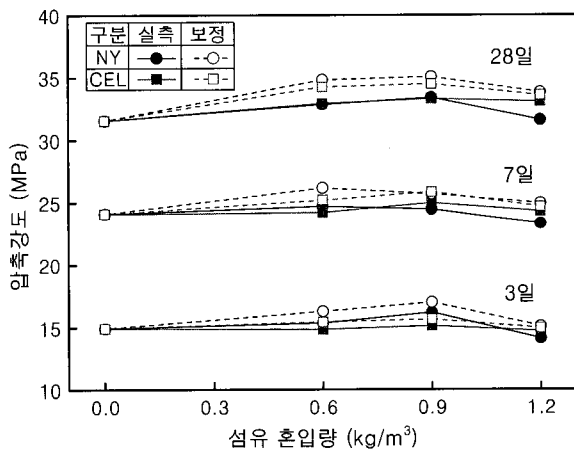


그림 9. 섬유 혼입률 변화에 따른 압축강도

실측강도의 경우 전반적으로 섬유 혼입률 변화에 따른 압축강도는 재령 3일 및 7일에서는 플레인과 비교하여 거의 차이가 없었으나, 재령 28일의 경우 혼입률이 증가함에 따라 다소 증가하는 경향이 있었다. 섬유종류별에 따른 압축강도의 차이는 큰 차이를 보이지 않았으며, 섬유 혼입률에 따라서 0.9kg/m³ 혼입까지는 증가한 후 1.2kg/m³ 혼입시 다소 감소하였는데, 이는 섬유 과다 첨가에 의한 섬유 뭉침 현상과 단위체적당 섬유의 수가 적정치보다 많아져 콘크리트 계면과의 접착력 불량에 따른 것으로 분석된다.

한편, 보정강도의 경우 동일한 섬유 혼입률일 경우 CEL 섬유보다 NY 섬유에서 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 섬유의 물리적 성질에 기인하여 콘크리트 계면과의 부착력이 뛰어나고 파괴시 섬유의 인장응력이 작용하여 압축강도 증진에 보다 효과적인 것으로 분석된다.

3.3.2 인장 및 휨강도

그림 10은 섬유 혼입률 변화에 따른 28일 재령에서 인장강도 및 휨강도를 나타낸 것이다. 압축강도와 동일한 요령으로 그래프 중 실선은 실측 인장강도 및 휨강도이고, 점선으로 표

시한 부분은 보정된 인장강도 및 휨강도를 나타낸 것이다.

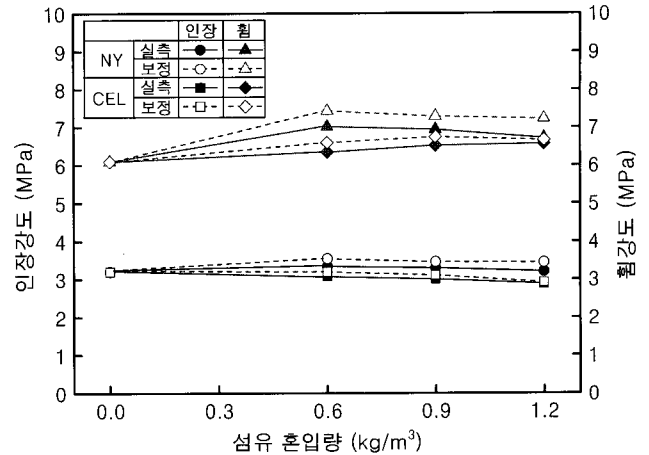


그림 10. 섬유 혼입률 변화에 따른 인장강도 및 휨강도

인장강도는 섬유 혼입률이 증가함에 따라, 섬유 종류별에 따라서 실측 및 보정강도 공히 큰 차이를 보이지 않고, 플레인과 비슷한 값을 보였다.

한편, 휨강도는 섬유 혼입률이 증가함에 따라 NY 섬유의 경우 0.6kg/m³ 혼입까지 증가 후 감소하였는데, 이는 NY 섬유의 인장강도로 말미암아 휨강도가 증진된 것으로 사료 된다. CEL 섬유의 경우는 섬유 혼입률 1.2kg/m³까지 증가하였으나, NY 섬유보다 작은 값을 보였는데, 이는 종전의 연구⁶⁾와 유사하게 CEL 섬유의 적정 혼입률이 1.2kg/m³이기 때문이고, 섬유 길이가 NY 섬유보다 상대적으로 짧아 인장응력을 충분히 전달할 만큼의 Aspect Ratio(형상비)를 확보하지 못하기 때문으로 사료된다.⁷⁾

3.3.3 내충격성

그림 11은 섬유 혼입률 변화에 따른 시편의 최초균열 및 파괴까지의 낙하횟수를 나타낸 것이다. CEL 섬유는 섬유혼입률 증가에 따라 플레인에 비해 낙하횟수는 증진되지만, 첫 균열발생에서 최종파괴까지의 낙하횟수는 5회 미만으로써 CEL 섬유가 시험체 내에서 연성이 거의 작용하지 않는 것으로 분석된다.

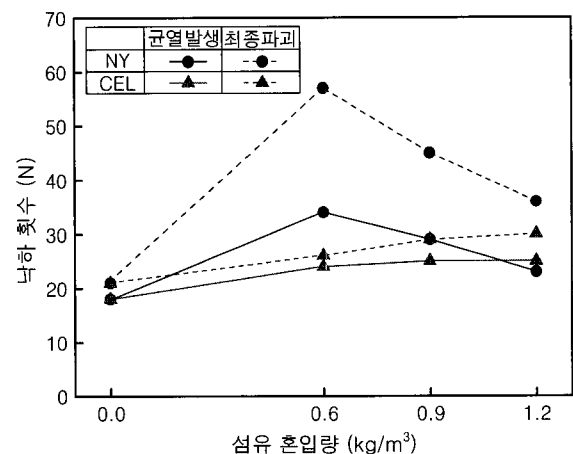


그림 11. 섬유 혼입률 변화에 따른 낙하횟수

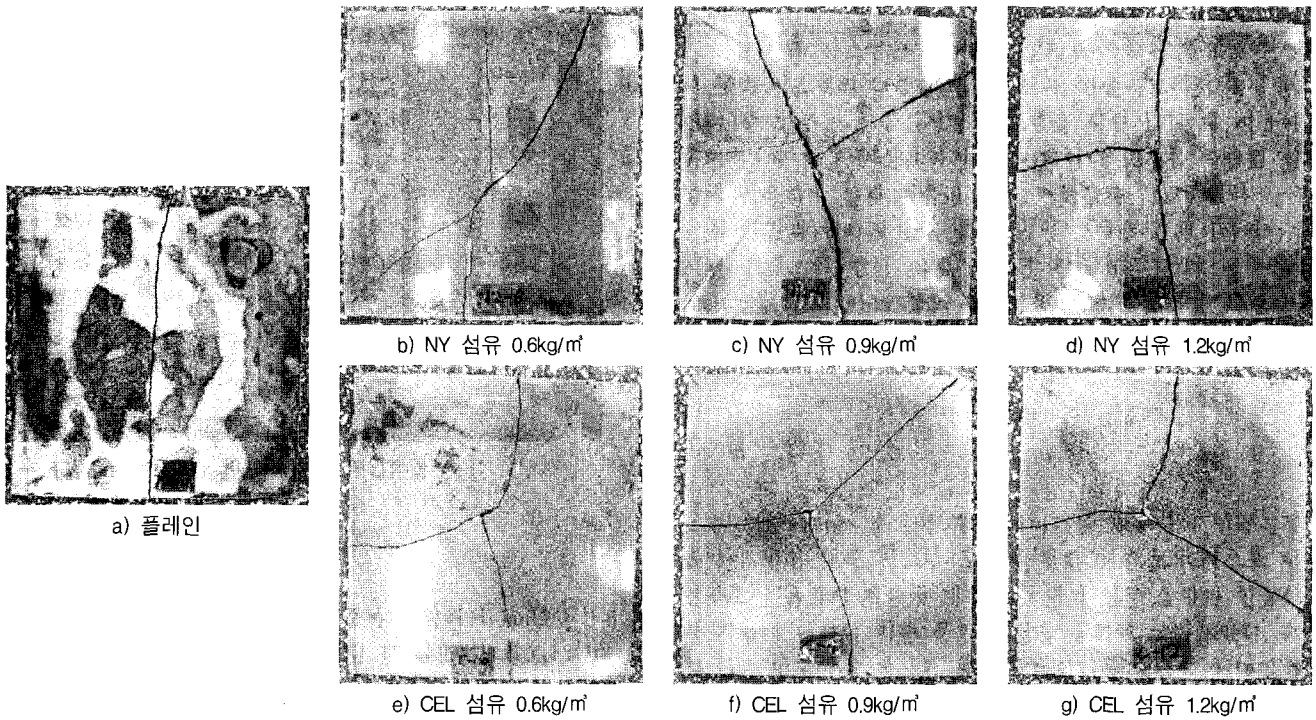


그림 12. 섬유 종류 및 혼입량 변화에 따른 시편의 파괴 형상

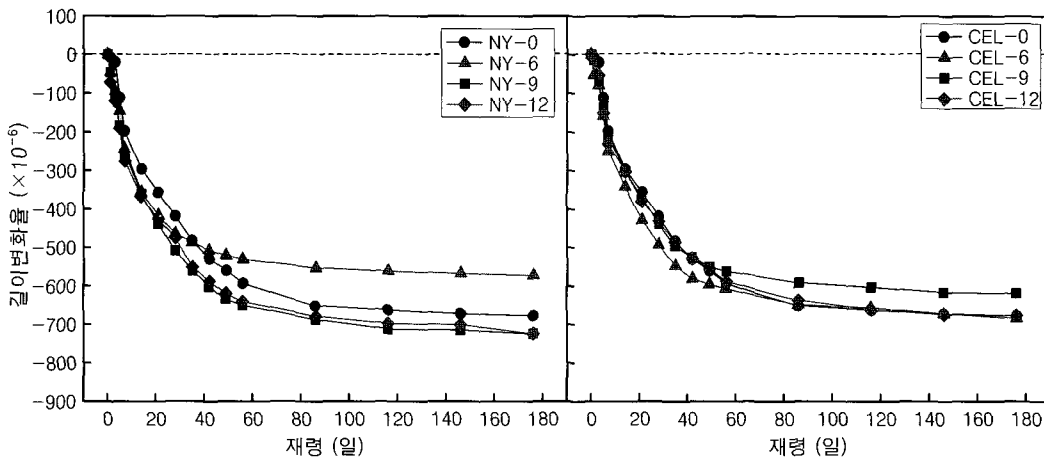


그림 13. 재령별 경과시간에 따른 건조수축 길이변화율

그에 반해 NY 섬유는 0.6kg/m³ 혼입시의 경우 처음 균열 발생 후 최종파괴까지의 낙하횟수차가 23회로써, 처음 균열이 발생한 후에 섬유의 연성이 시편에 작용하여 낙하횟수가 증가되었다. 또한, 플레인보다 첫 균열발생의 낙하횟수는 2배정도 증진되는 것으로 나타나 섬유가 매트릭스 내에 네트워크를 형성, 가교(Bridging)작용을 하여 충격 강도가 시편에 전체적으로 분산되어 첫 균열발생 시기가 늦춰진 것으로 분석된다.⁸⁾⁹⁾

한편, NY 섬유 0.9kg/m³ 이상 혼입시 낙하횟수는 감소하였는데, 이는 섬유 과다 첨가에 의한 시멘트 페이스트와의 부착력 감소, 유동성 저하로 인해 다짐이 밀실하지 못했던 점 및 공기량 증가에 의한 강도저하로 낙하횟수는 감소하는 것으로 분석된다.

그림 12는 섬유 종류 및 혼입량 변화에 따른 내충격성 시험 후 시험체의 파괴 양상을 나타낸 것이다. 플레인의 경우 시험체가 취성적인 1방향의 균열이 발생하여 파괴된 반면, 섬유를

혼입한 시험체에서는 방사형의 균열성상을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 외부로부터 전해지는 충격을 매트릭스 내의 섬유가 인장력을 발휘하여 내충격성이 증가한 것으로 분석된다.

3.3.4 길이변화율

그림 13은 재령별 경과 시간에 따른 길이변화율을 나타낸 것이다.

전반적으로 건조수축 길이변화율은 초기재령

에서 급격한 수축을 보였으며, 재령이 경과함에 따라 완만한 경향이였다. 섬유 종류별로는 크고 작음이 교차하는데, 이는 오차요인으로 플레인과 비슷한 결과를 보이며 건조수축량에는 거의 효과가 없는 것으로 판단된다.

4. NY 및 CEL 섬유의 영향에 대한 종합평가

이상의 결과를 토대로 NY 및 CEL 섬유의 혼입량 변화에 따른 콘크리트의 제반 공학적 특성을 종합적으로 분석하면 표 8과 같다.

즉, 굳지않은 콘크리트에서 유동성은 NY 섬유 0.6 kg/m³ 혼입을 제외하면 모든 수준에서 유동성을 고려하여야 하고, 공기량은 섬유가 혼입됨에 따라 다소 증가하는 경향이 있지만, 모

표 8. NY 및 CEL 섬유가 콘크리트의 제반 물성에 미치는 영향 평가

구분 섬유	슬럼프	공기량	블리딩	소성수축 균열	응결 시간	강도특성					내충격성		길이 변화율	
						압축강도			인장 강도	휨강도	균열 시점	파괴 균열 횟수		
						3일	7일	28일						
플레인	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
NY	0.6	◎	●	◎	●	○	◎	◎	◎	◎	●	●	●	●
	0.9	◎	●	◎	-	○	●	◎	●	◎	●	●	●	○
	1.2	○	●	◎	●	◎	○	◎	◎	◎	●	●	●	○
CEL	0.6	○	●	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	○	●	●	◎
	0.9	○	●	◎	-	○	◎	◎	●	◎	●	●	●	●
	1.2	○	●	◎	●	○	◎	◎	◎	○	●	●	●	◎

기호중 : ● : 양호, ◎ : 보통, ○ : 불량

- 주 1) 슬럼프는 플레인과 비교하여 ±25mm 이내인 경우 보통, 그 이상은 양호, 그 이하는 불량으로 평가함.
 2) 공기량은 플레인과 비교하여 ±1.5% 이내인 경우 양호, ±1.5~2.5% 일 때 보통, 그 이상은 불량으로 평가함.
 3) 블리딩은 플레인과 비교하여 ±25% 이내인 경우 보통, 그 이하는 양호, 그 이상은 불량으로 평가함.
 4) 소성수축균열은 플레인과 비교하여 ±25% 이내인 경우 보통, 그 이하는 양호, 그 이상은 불량으로 평가함.
 5) 응결시간은 플레인과 비교하여 ±1시간 이내인 경우 양호, ±1~2시간인 경우는 보통, 그 이상은 불량으로 평가함.
 6) 압축강도, 인장강도 및 휨강도는 플레인과 비교하여 ±5% 이내인 경우 보통, 그 이상은 양호, 그 이하는 불량으로 평가함.
 7) 충격강도는 플레인과 비교하여 ±5% 이내인 경우 보통, 그 이상은 양호, 그 이하는 불량으로 평가함.
 8) 길이변화율은 플레인과 비교하여 ±5% 이내인 경우 보통, 그 이하는 양호, 그 이상은 불량으로 평가함.

두 목표 공기량을 만족하였고, 블리딩의 경우는 섬유 혼입률이 증가됨에 따라 급격히 감소하여 NY 섬유 1.2kg/m³ 혼입시 블리딩 제어에 우수한 것으로 나타났다.

소성수축균열의 경우는 섬유를 혼입함에 따라 감소하였는데, 그중 NY 섬유 혼입시 균열이 현저하게 감소되었다. 응결시간은 섬유가 혼입됨에 따라 플레인에 비해 지연되는 것으로 나타났다.

경화 콘크리트의 특성에서 강도는 공기량을 보정한 강도를 사용하였는데, 압축강도는 NY 섬유 0.6kg/m³~0.9 kg/m³, CEL 섬유 0.9kg/m³ 혼입시 우수한 강도특성을 보였다. 인장강도는 CEL 섬유보다 NY 섬유 혼입시 증가하였고, 휨강도 역시 NY 섬유를 혼입한 수준에서 양호하였다. 한편, 내충격성으로 균열이 최초로 발생하는 낙하횟수와 최종파괴를 일으킬 때까지의 낙하횟수를 고려하면 NY 섬유 0.6kg/m³ 혼입시 가장 우수한 내충격성을 보였다. 건조수축 길이변화율은 섬유가 혼입됨에 따라 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

이상을 종합하여 분석하면, 보통콘크리트에 NY 섬유를 0.6kg/m³ 전후를 사용할 경우, 친수성이면서 시멘트 입자 크기에 비해 유효표면적이 작아 콘크리트를 밀실하게 만들며, 표면적이 크면서 단위면적당 차지하는 수가 많아 콘크리트 내에 발생하는 미세균열을 억제하고 안정화하는 등 콘크리트의 제반 품질을 향상시키는 것으로 분석되었다.

- 1) 유동성은 섬유 혼입률이 증가함에 따라 NY 섬유 및 CEL 섬유 공히 감소하였는데, NY 섬유의 친수성에 기인하여 CEL 섬유보다 적게 감소되었다. 공기량은 섬유 혼입률이 증가함에 따라 섬유 상호간의 미세공극이 증가하여 다소 증가하였으며, 단위용적질량은 공기량 증가로 인해 감소하였다.
- 2) 최종 블리딩량은 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 잉여수의 상수를 억제하여 감소하였으며, 응결시간 또한 섬유에 의한 잉여수의 구속으로 플레인에 비해 지연되었다.
- 3) 소성수축 균열의 경우 전반적으로 섬유혼입률이 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데, 특히 NY 섬유 혼입시 현저하게 감소하였는데, 이는 섬유길이가 상대적으로 길어 콘크리트 매트릭스내 섬유의 네트워크 형성에 보다 양호하게 기여하기 때문으로 분석된다.
- 4) 강도특성으로 섬유 종류 및 혼입량별로는 CEL 섬유보다 NY 섬유가 전반적으로 우수한 강도특성을 보였으며, 0.9kg/m³ 혼입까지는 압축강도가 증가한 후 감소하였다. 인장강도 및 휨강도는 압축강도와 비슷한 경향을 보였으며, 충격저항성은 NY 섬유 0.6 kg/m³ 혼입시 섬유의 연성으로 인해 가장 우수한 내충격성 보였다.

감사의 글

본 연구는 KG 케미칼(주)의 연구비 지원에 의해 이루어 졌음에 위 기관에 감사한다.

5. 결론

본 연구에서는 NY 섬유 및 CEL 섬유가 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

참 고 문 헌

1. 김광련, 권용주, 백인상, 김용태, 김병기, 나일론 섬유보강 콘크리트의 물리적 특성 및 모르타르 소성수축균열 제어성능 평가, 한국콘크리트 학회지, 제17권 제2호, pp.575~578, 2005. 11
2. 김병기, 김용태, 안태호, 김광련, 섬유보강 콘크리트에서 나일론 섬유의 응용가능성, 한국콘크리트 학회지, 제16권 제6호, pp.65~73, 2004. 11
3. 박춘근, 김남호, 이종필, 김학연, 섬유 혼입 비율에 따른 섬유보강 콘크리트의 재료특성, 한국콘크리트 학회지, 제16권 제1호, pp.632~635, 2004
4. 오병환, 김지철, 박대균, 원종필, 합성섬유보강 콘크리트 보의 균열후 거동예측, 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제14권 제6호, pp.900~909, 2002. 12
5. 원종필, 박찬기, 특수 가공된 셀룰로오스 섬유보강 콘크리트의 초기 특성, 한국콘크리트 학회지, 제11권 제1호, pp.349~354, 1999
6. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트 공학, 기문당, 2005
7. 한천구, 레미콘 품질관리, 기문당, 2004
8. A. E. Naaman, T. Wongtanakitcharoen, G. Hauser, Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete, ACI Materials Journal, Vol.102 No.1, pp.49~58, 2005.2
9. Bentur, A. and Mindess, S, Fiber Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, New York, U.S.A, pp.30~124, 1992
10. K. Wang, P.S. Shah, P. Pariya, Plastic shrinkage cracking in concrete materials influence by fly ash and fibers, ACI materials Journal, Vol.98 No.6, pp.454~464, 2001
11. Nelson, P.K, Li, C.V, and Kamada C, Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.98 No.5, pp.384~391, 2002. September October
12. P. Kumar Metha, Concrete, Prentice Hall, 2001
13. Y.Chan, V.C.Li, Age effect on the characteristics of fiber cement interfacial bond, Journal of material science, Vol.32 No.19, pp.5287~5292, 1997