

PPF 섬유 첨가에 따른 건조수축 특성에 관한 연구

A Study on the Effects of PPF Fiber on Drying Shrinkage

한만엽*

Han, Man Yop

요 약

폴리프로필렌 섬유를 첨가하여 콘크리트의 물성을 개선하려고 하는 많은 노력이 있어 왔으나, 아직 플라스틱계 섬유의 첨가에 따른 콘크리트의 거동에 대한 메카니즘은 명확히 밝혀지지 않은 상태이다. 플라스틱 섬유의 첨가에 따른 건조수축 균열의 조절 가능성을 분석하기 위하여 섬유의 첨가에 따른 유동성과 건조수축의 변화를 조사하였다. 섬유의 첨가에 따른 유동성의 변화와 건조수축을 측정하기 위한 실물 크기의 슬라브가 제작되었고, 섬유의 수분 흡착 특성 실험도 실시되었다. 실험 결과 섬유의 첨가는 상당한 유동성의 감소를 유발하기 때문에, 이를 보정하기 위한 추가적인 배합수가 필요했으며, 이에 따라 섬유의 첨가량에 비례하는 건조수축의 증가가 관측되었으나, 강도에는 큰 변화가 없는 것으로 관측되었다.

Abstract

The advantages of polypropylene fibers in concrete have been widely advertised abroad. However, the behavior of concrete containing plastic fibers has not been fully understood. In order to study the effect of fibers on possible crack control, the effects of fibers on workability and drying shrinkage have been studied. The workability change due to the addition of fibers has been studied, and full size concrete slabs have been cast at field to investigate the effect of fibers on the shrinkage properties. Moisture absorption characteristics of fibers has also been studied. The addition of fibers was found to reduce workability significantly and required additional water to maintain the workability, which caused increased drying shrinkage depending on the amount of addition, but strength has not been changed significantly.

Keywords : fiber concrete, moisture absorption, workability, drying shrinkage, slab,

* 정회원, 아주대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 1994년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 외국에서는 폴리프로필렌 섬유(Polypropylene Fiber, 이하 PPF)의 사용이 증가하면서 이를 첨가하여 건조수축과 온도강하에 의한 콘크리트의 균열 억제 가능성에 대한 다양한 연구 결과가 발표되고 있다.^(1,2,3) 이들 연구 결과는 섬유의 첨가에 따른 인성의 증가등에는 이점이 별로 없으나 양생초기 균열조절 여부에 대해서는 여러가지 상반된 의견을 보이고 있다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 콘크리트에 PPF섬유를 첨가한 효과와 관련하여 PPF 섬유가 양생초기 콘크리트의 응력을 조절할수 있는가 하는 문제와, 또 조절이 가능하다면 어떤 메카니즘으로 섬유소가 이런 기능을 하는가를 규명할수 있는 기초 자료를 제공하고자 건조수축 특성을 중심으로한 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 우선 섬유의 수분흡착성과 섬유의 첨가로 인한 콘크리트의 유동성 변화에 관한 실험을 실시하여 섬유의 첨가가 콘크리트의 유동성 및 사용 수량에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 섬유상의 재료를 첨가하게 되면 일반적으로 유동성의 저하를 동반하게 되는데, 일반적으로 이를 극복하기 위해서 유동화제를 사용하거나 배합수를 증가시키는 방법을 사용한다. 그러나 유동화제를 사용하게 되면 콘크리트 물성의 증진 효과가 유동화제에 의한 것인지, 섬유소의 첨가에 의한 것인지가 불분명해지며, 반면에 사용 수량을 증가하게 되면 물-시멘트 비가 증가하여 콘크리트 물성의 향상보다는 오히려 부작용이 나타날 가능성이 커진다. 따라서 섬유의 첨가에 따른 유동성의 변화에 대한 실험과 이를 보정하기 위한 방법의 적용에 따른 물성의 변화에 대한 연구가 절대적으로 필요하다.

콘크리트의 건조수축 특성을 포함한 제반 물성을 측정하는 실험을 일반 콘크리트와 PPF 섬유 첨가 콘크리트의 시편들을 쌍으로 제작하여 비교 분석하였다. 아울러 건조수축 균열의 억제 여부를 판별하는 실험으로서 실제 크기의 슬라브를 제작하여 그들의 거동을 관측하였는데, 결과의 비교 분석을 위하여 기존의 균열 조절 방법인 와이어

메쉬 보강 콘크리트 슬라브를 포함하여 실험을 실시하였다.

2. 실험 개요

2.1 PPF 섬유의 수분흡착성 실험

실험에 사용된 PPF 섬유는 포장에서 꺼낸 상태에서 먼저 무게를 측정하고, 물속에 24시간 동안 담가두었다가 여분의 수분을 제거한 뒤, 무게를 다시 측정하고, 밀폐된 데시케이터 속에서 무게 변화가 없을때까지 걸리는 시간을 측정하여 평균 증발속도를 계산하였다. 데시케이터는 상대습도가 33%, 52%, 95%가 되도록 조정하였으며, 진공 펌프로 내부의 공기압을 낮추어 빠른 시간에 평형 상태에 도달할 수 있도록 하였다. 본 흡착성 실험에 사용된 섬유는 1.3cm 길이의 fibermesh와 forta fiber의 2개 제품이 이용되었다. 수분흡착성 실험을 제외한 다른 모든 실험에서는 fibermesh 제품만이 사용되었다.

2.2 PPF 콘크리트의 유동성 실험

PPF 섬유의 첨가에 따른 유동성의 변화를 측정하기 위한 실험은 섬유를 첨가하지 않은 일반 콘크리트(F0) 와 PPF 섬유를 0.89kg/m³(F1), 1.78kg/m³(F2), 2.97kg/m³(F3) 등의 양을 첨가한 콘크리트를 제작하여 실험을 실시하였다. PPF 섬유의 권장 사용량은 0.9kg/m³ 이지만 첨가 효과를 극대화하고 권장 사용량의 근거를 알아 보기 위하여 그 이상의 양을 사용한 경우도 실험변수로 선정하였다. 유동성을 측정하기 위한 방법으로는 슬럼프 실험, Vebe 실험, Hobart믹서의 동력 측정(107rpm & 197rpm), Bingham 모델의 점성계수⁽⁴⁾ 측정등의 실험을 실시하였다. Bingham 모델에 의한 유동성은 다음식으로 나타낸다.

$$T=g+hw$$

여기서 T와 w는 토크와 회전속도이고, g 와 h 는 Yield와 Viscosity를 나타내는 상수이다.

유동성을 보정하기 위한 방법으로 측정 방법 자

Table 1 Mix design and properties of fresh concrete (kg/ m³)

	W/C	Cern.	Water	Sand	Agg.	Fiber	Slump	Air
F0	0.53	279	148	745	1388	0.0	8.8	2.5
F1	0.56	279	155	745	1388	0.9	10.0	2.5
F2	0.57	279	160	745	1388	1.8	10.0	3.3
F3	0.60	279	167	745 </td <td>1388</td> <td>3.0</td> <td>8.8</td> <td>3.8</td>	1388	3.0	8.8	3.8

* Air Ent. Agent=2.5g /kg, Retarder=9.4g /kg

체의 상관관계를 규명하기 위한 분석이 실시되었다. 이 유동성 측정 실험에서는 슬럼프값을 2.5cm에서 12.5cm로 증가하도록 사용 수량을 증가시키면서 측정 방법들끼리의 상관관계를 분석하였으며, 건조수축 실험등 기타 실험에서는 목표 슬럼프 10cm 를 갖는 배합이 사용되었는데 이들 실험에 사용된 콘크리트의 배합설계표와 굳기전 콘크리트의 물성 측정결과가 Table 1 에 요약되어 있다. 여기서 섬유첨가 콘크리트는 표준 배합에 섬유를 첨가하고 같은 유동성(슬럼프 10cm) 이 유지되도록 수량을 조정한 배합이므로 같은 종류의 배합임을 강조하기 위하여 배합설계표의 재료의 사용량을 1m³이 되도록 조정하여 표시하지는 않았다.

2.3 PPF 콘크리트의 슬라브 실험

일반 콘크리트(F0) 와 2종(F1, F3)의 섬유첨가 콘크리트로 각각 2개씩의 슬라브를 제작하여 온도 변화와 건조수축에 의한 거동을 측정, 비교하였다. 이 슬라브 실험에서는 또한 와이어 메쉬가 보강된 일반 콘크리트(F0)로 만든 슬라브(W)2개를 추가로 제작하여 총 8개의 슬라브로 재래적인 균열조절 방법과 PPF 섬유에 의한 조절 방법을 비교, 분석하였다.

실험용 슬라브는 30cm 두께의 다짐 자갈층위에 설치되었으며, 길이 9m에 폭 1.65m, 두께 10cm, 의 크기로 제작되었고, 슬라브의 양쪽 끝에는 앵커를 설치하여 중앙부의 체적변화를 억제하여 응력이 발생하도록 하였다. Fig. 1 에 슬라브의 설계도가 나와 있으며, 표면 변위의 측정을 위하여 설치된 DeMec gage의 배치도 표시되어 있다. 이 개이지의 배치는 중앙부에서 길이 방향의 구속된 건

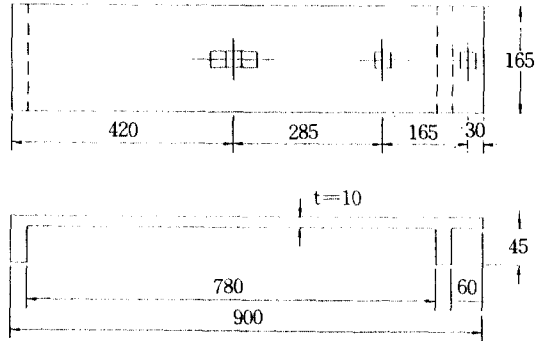


Fig. 1 Slab design and deMec point arrangement

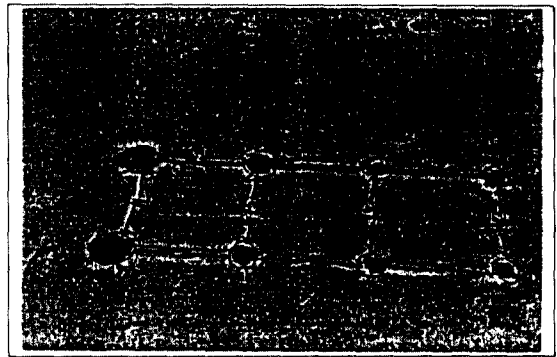


Fig. 2 DeMec points on a slab

조수축과 횡방향의 자유 건조수축, 그리고 슬라브 정착장치의 외부에 설치된 자유 건조수축 등으로 구분 측정할 수 있도록 설계된 것으로서 측정정도를 향상시키기 위하여 Fig. 2 와 같이 격자형으로 배열한뒤 총 18개의 측정점을 갖도록 설계하였으며, 측정점마다 3회씩 측정을 하였다.

2.4 PPF 콘크리트의 병행 실험

이 슬라브 실험과 병행하여 별도의 표준 시편을 제작하여 건조수축과 수분손실 특성을 현장에서 측정하였으며, 이 실험 역시 측정 정도를 높이기 위하여 양단 측정과 측면 측정을 병행 실시하였고 이를 위하여 Fig. 3 과 같은 시편을 제작하였다. 28일 후에는 슬라브마다 2개씩의 10cm 직경의 코아를 채취하여 할열인장강도를 측정하였다. 또한 PPF 섬유의 첨가에 의한 콘크리트의 강도 보강



Fig. 3 Shrinkage bars with end points and deMec points

효과를 알아보기 위하여 압축강도와 휨강도도 병행 측정하였다. 강도 실험용 시편들은 수중 양생을 하였고 시험 재령은 7일과 28일이었다.

3. 결과 및 분석

3.1 PPF 섬유유 수분 흡착성 실험

측정 결과 forta fiber는 섬유 자체 무게의 30%에서 130% 정도의 수분을 흡착하였고, fibermesh는 280%에서 450% 정도의 수분을 흡착하였다. 이는 fibermesh의 경우 권장 사용량을 콘크리트에 사용한다고 가정할때 약 2.5kg/m³ 내지 4.0kg/m³의 수분을 흡착할 수 있음을 의미한다. 또한 수분의 증발은 노출 조건에 따라 24시간에서 400시간까지 지속되었다. PPF 섬유유는 대부분의 석유화학 제품이 그렇듯이 비흡습성 물체이다. 그러나 가늘고 긴 형상과 상대적으로 작은 크기로 인하여 높은 비표면적을 갖게 됨으로써 PPF 섬유유의 표면에 상당한 양의 수분을 흡착할 수 있음이 측정된 것이다.

측정된 증발속도를 그림으로 표시한 것이 Fig. 4이다. 노출조건에 따라 증발속도가 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 또한 섬유유의 상표에 따른 차이가 심한 것으로 나타났는데 이는 이들 섬유유의 미세형상이 다르기 때문인 것으로 믿어진다. 이 섬유유들은 95%의 상대 습도하에서 증발이 일어나고 있으며, 이는 섬유유가 수분을 흡착하기는 해도 그 흡착력의 크기는 별로 강한 것이 아님을

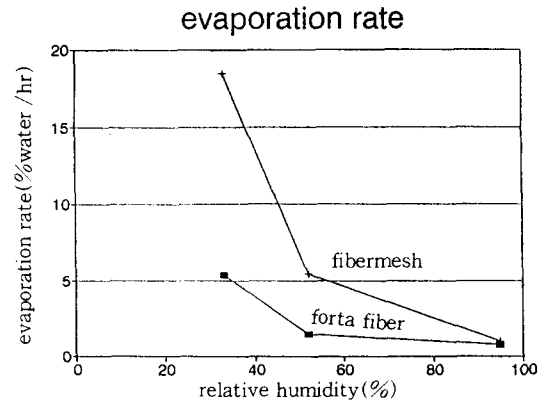


Fig. 4 Evaporation rate of PPF fiber

의미한다.

3.2 PPF 콘크리트의 유동성 실험

PPF 섬유유의 사용량의 증가에 따른 유동성의 측정 결과를 일반 콘크리트를 기준으로 한 상대적 값으로 계산한 것이 Fig. 5에 나와있다. 슬럼프 값은 일반 콘크리트를 기준으로 했을 때 권장 사용량의 PPF 섬유유를 첨가한 콘크리트의 경우에도 그 값이 절반 이하로 감소되었으며, 3.0kg/m³을 첨가한 경우는 슬럼프가 발생하지 않았다. 슬럼프 측정법으로 측정하기 어려운 범위의 유동성을 측정하기 위하여 다른 측정 방법들이 이용되었다. Vebe 측정 결과나 믹서의 동력 측정, Bingham 모델에 근거하여 계산된 점성계수도 섬유유의 첨가량이 증가함에 따라 측정값이 증가함으로써 유동성이 감소함을 보여주며, 측정방법의 차이에 따

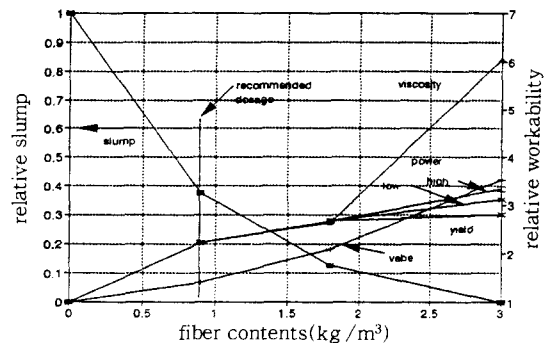


Fig. 5 Relative workability due to addition of PPF fiber

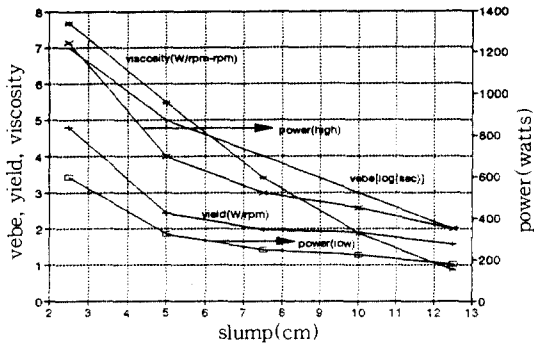


Fig. 6 Relationships between test methods

른 유동성의 측정결과의 차이는 별로 크지 않다는 것을 알 수 있다. 여기서 Vebe 측정값은 대수변환을 한 값을 비교한 것이다.

일반 콘크리트를 대상으로 슬럼프를 증가시키면서 여러가지 유동성 측정 방법들의 측정값들을 비교한 결과가 Fig. 6 에 요약되어 있다. 모든 측정 결과들이 슬럼프 값과는 일반적으로 비선형적인 반비례 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 이들 관계가 비선형적인 것은 각각의 측정 가능 범위가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

이 결과에 근거하여 각각의 방법으로 측정된 $9\text{kg}/\text{m}^3$ 의 PPF 섬유 첨가 콘크리트의 유동성을 슬럼프 값으로 환산하면 2.5cm 에서 6.3cm 범위의 값을 가지며, 평균값은 3.8cm 정도가 된다. ACI Manual⁽⁵⁾에 따르면 슬럼프 3.8cm(1.5inch)의 콘크리트를 10cm(4.0inch)의 슬럼프를 갖는 콘크리트로 만들기 위해서는 약 $15\text{kg}/\text{m}^3$ ($25\text{lb}/\text{cy}$)의 물이 추가로 필요한 것으로 제시되어 있다. 그러나 본 실험에서는 그 절반인 $7.1\text{kg}/\text{m}^3$ ($12\text{lb}/\text{cy}$)의 물을 추가로 사용하여 목적하는 슬럼프 값을 얻을 수 있었다. 따라서 유동성 보정을 위한 배합수의 사용량에 관한 지침서의 값은 섬유첨가 콘크리트의 경우에는 과다한 것으로 판단된다.

3.3 PPF 콘크리트의 슬라브 실험

4조(F0, W, F1, F3)의 슬라브의 건조수축의 측정 결과가 Fig. 7, 8, 9, & 10 에 순서대로 제시되

어 있다. 실험기간 동안 외부에 노출되어 있었기 때문에 측정 후기의 측정값에는 기상변화에 따른 약간의 굴곡이 관측되었으나, 초기에는 기상변화와 무관하게 거의 일관되게 증가하고 있음을 알

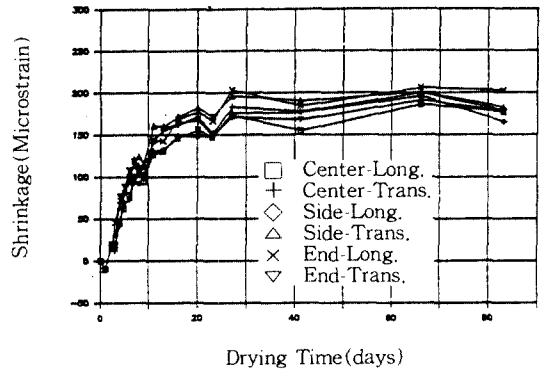


Fig. 7 Drying shrinkage of plain concrete slab

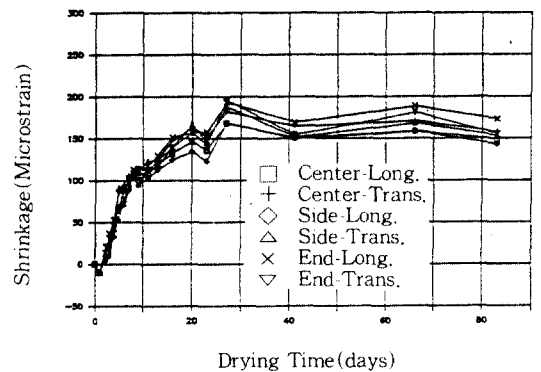


Fig. 8 Drying shrinkage of wire mesh concrete slab

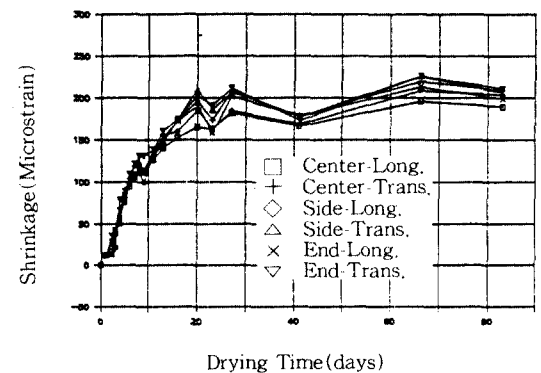


Fig. 9 Drying shrinkage of PPF fiber concrete slab ($0.9\text{kg}/\text{m}^3$)

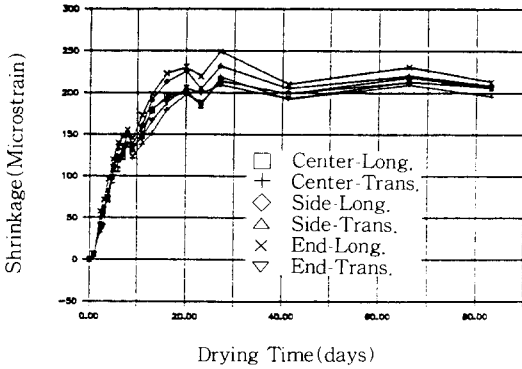


Fig. 10 Drying shrinkage of PPF fiber concrete slab(3.0kg/ m³)

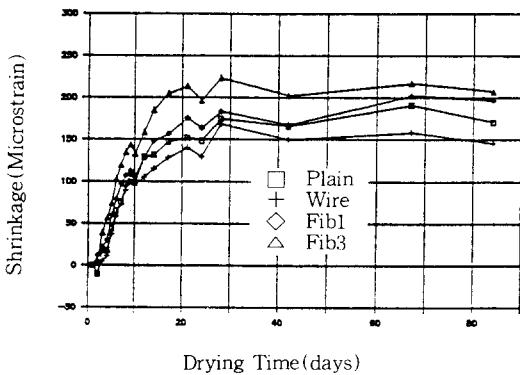


Fig. 11 Longitudinal drying shrinkage of concrete slab

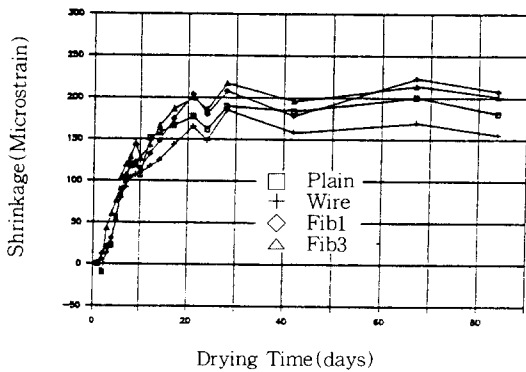


Fig. 12 Transverse drying shrinkage of concrete slab

수 있다. 이는 양생초기에는 슬라브로부터의 수분의 증발이 기상변화에 영향을 받지 않을 정도로 빠르게 지속적으로 발생함을 의미하며, 28일 이상 지난후에는 자체 증발 속도가 떨어져, 기상 상태

의 변화에 따라 건조수축과 습윤팽창이 반복되는 상태가 됨을 의미한다.

슬라브의 외적인 구속 조건에 따른 건조수축 변형량의 영향을 분석하기 위하여 측정값을 구속 조건별로 구분 도시하였다. 구속 조건별 건조수축 측정 결과를 보면 자유단부의 길이 방향 수축이 가장 크고 중앙의 길이 방향 수축이 가장 작은 것을 알 수 있다. 이들 측정값의 차이는 30에서 40 정도로 전체 수축량 200의 15% 내지 20%에 해당되며, 슬라브의 양단에 설치된 정착기가 슬라브의 수축에 따라 각각 중앙 방향으로 약 0.6mm 정도 이동됐음을 의미한다. 또한 건조수축의 차이는 서서히 증가하여 28일 후에는 그 차이가 더 이상 증가하지 않는 안정된 상태에 도달하였으며, 이 측정값의 차이가 콘크리트에 인장응력을 발생시키는 것으로 추정된다.

Fig. 11 과 Fig. 12 에서는 각각 종방향 건조수축과 횡방향 건조수축에 대한 PPF 섬유 첨가에 따른 효과를 비교 분석하였다. 이 비교 분석에서는 재래적인 균열 조절 방법인 와이어 메쉬를 사용한 슬라브가 가장 작은 건조수축을 보였으며, 그 다음이 일반 콘크리트이고, 섬유첨가 콘크리트의 경우는 섬유의 첨가량이 증가할수록 건조수축이 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 따라서 PPF 섬유의 첨가로 인한 유동성 상실을 보정하게 되면 건조수축을 감소시키는 효과는 기대하기 힘든 것으로 판명되었다.

3.4 PPF 콘크리트의 병행 실험

슬라브의 실험 결과를 비교 분석하기 위하여 표준 크기의 건조수축 시편등을 제작하여 건조수축과 수분 손실에 의한 무게 감소등을 측정하였다. Fig. 13 은 시험 기간 동안의 무게 변화를 보여주는데 F0 나 F1 은 별 차이가 없으나, F3 의 경우는 수분 손실이 상당히 큰것을 알 수 있었다. Fig. 14 는 같은 시편의 건조수축의 변화를 보여주는데 이것 역시 F3 가 가장 큰 수축량을 보이고 있으며, F0 와 F1 은 별로 큰 차이가 없다.

콘크리트의 공극 크기 분포의 세립 정도를 파악하기 위하여 건조수축과 무게 변화의 상관관계를

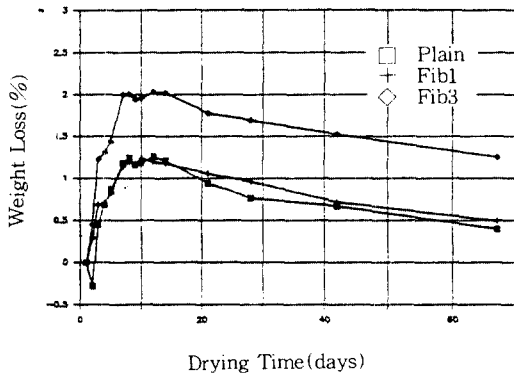


Fig. 13 Weight loss of shrinkage bar

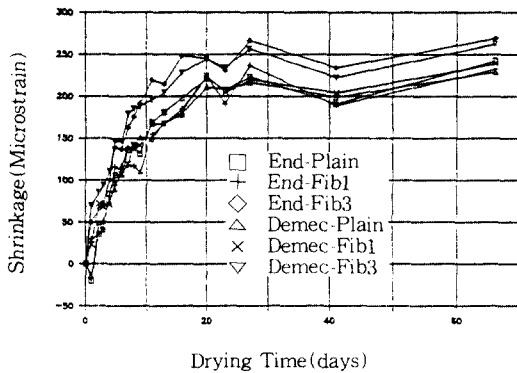


Fig. 14 Drying shrinkage of concrete bar

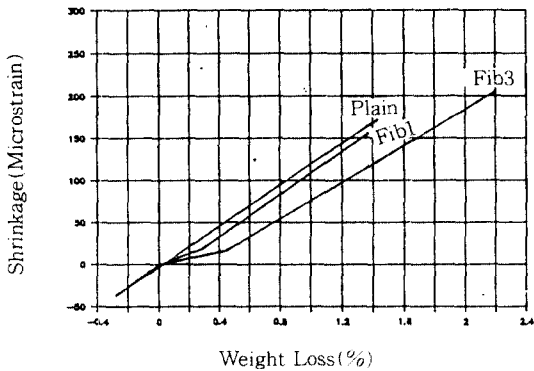


Fig. 15 Correlations between weight loss and shrinkage

나타낸 것이 Fig. 15 이다. 같은양의 수분의 손실에 대하여 일반 콘크리트가 가장 큰 건조수축을 나타내고 있으며, 섬유 첨가량이 증가할수록 건조수축량이 작아짐을 알 수 있다. 같은 양의 수분

손실이 있을때 내부 공극의 크기가 작을수록 발생하는 응축력은 커진다. 따라서 이러한 측정 결과는 섬유의 첨가량이 증가할수록 공극 크기가 더 커지는 것을 의미한다. 또한 F3의 경우 수분 손실량 차체가 크기 때문에 건조수축이 크게 관측된 이유는 공극 크기와 수분 손실량이 모두 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 이는 PPF 섬유를 큰

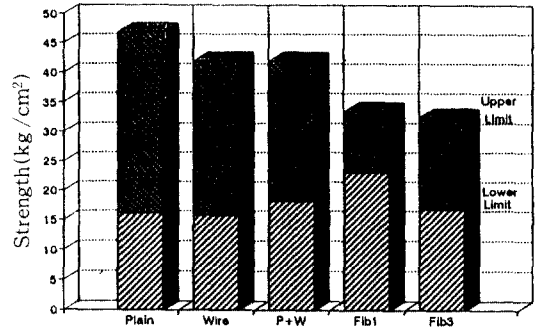


Fig. 16 Indirect tensile strength range for 90% confidence

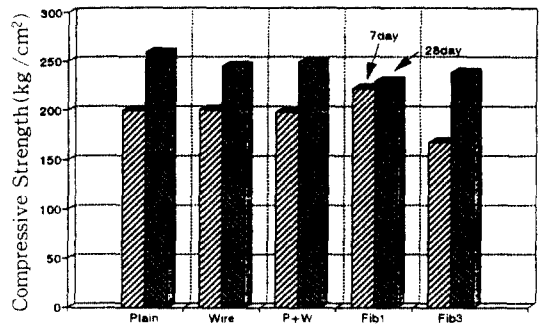


Fig. 17 Average compressive strength at 7days and 28days

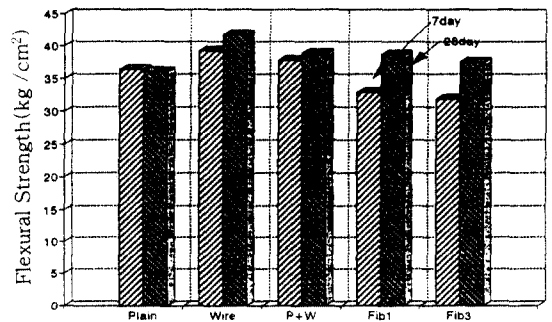


Fig. 18 Average flexural strength at 7days and 28days

크리트에 권장 사용량만큼 첨가하는 것은 건조수축 특성이나 공극율에 그리 큰 변화를 주지 않지만, 사용량이 과다해지면 수분 손실량과 공극구조가 증가하여 건조수축이 증가하는 등의 부작용이 나타날 수 있음을 의미한다.

슬라브에서 채취한 코아의 활열인장 강도와 표준시편의 압축강도, 휨강도등의 측정결과가 Fig. 16 과 Fig.17, Fig.18에 나와있다. 이 그림들에서 P+W는 Plain과 Wire가 같은 콘크리트이므로 이들의 평균을 구한것이다. Fig. 16에는 코아의 활열인장 강도의 측정결과가 나와있는데, 통계학적으로 분석된 90%의 신뢰도를 갖는 측정값의 범위를 표시한 것으로 섬유첨가 콘크리트와 일반콘크리트가 별로 차이가 없음을 보여준다. 이 코아 실험의 경우는 채취된 코아가 일정치 않은 길이와 형상을 갖고 있기 때문에 상당히 측정 범위가 큰 편이다. Fig. 17에는 압축강도의 실험 결과가 나와있는데, 7일 강도에서는 F1의 측정값이 F0보다 12% 더 크며, F3의 경우는 15% 더 작게 관측되었으며, 또한 28일 강도의 경우는 F1이 F0보다 8% 더 작은 것으로, F3는 오히려 차이가 없는 것으로 관측됐다. 또한 Fig. 18에는 들보의 휨강도가 나와있는데, 7일 강도의 경우 F1과 F3의 강도는 F0에 비하여 각각 13%와 16%씩 줄어들었으며, 28일 강도의 경우는 모든 경우에 거의 차이가 없는 것으로 판명됐다. 이 강도실험 결과를 종합해보면 어떤 일관성 있는 경향을 찾을 수 없는데, 이는 PPF섬유의 첨가에 따른 유동성 감소를 보정하게 되면 강도의 보강이나 감소 효과를 기대하기는 어렵다는 것을 의미하며, 섬유의 사용량이 과다하게 증가하게 되면 오히려 강도감소가 일어날 수도 있음을 보여준다.

4. 결 론

1. Fortafiber와 Fibermesh는 평균 자체 무게의 80%와 365%에 상당한 수분을 흡착하며, 상대 습도 95%의 환경에서도 주변으로 수분을 방출하며 그 증발속도는 상대습도에 영향을 받는다.
2. Fibermesh의 권장 사용량을 사용했을 때 유동성은 측정방법에 따라 62%에서 122%까지 줄어들며, 유동성의 감소량은 섬유소의 사용량에 비례하여 증가한다. 또한 슬럼프 실험 방법과

기타 유동성 측정 방법들 사이에는 비선형적 반비례 관계가 있다.

3. PPF 섬유소의 권장 사용량을 사용했을 때 유동성의 감소를 보정하기 위하여 추가로 필요한 수량은 $7.1\text{kg}/\text{m}^3$ 으로서 ACI 권장량의 약 1/2 정도로서 섬유첨가 콘크리트의 경우 유동성 보정에 대한 권장 수량에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.
4. 슬라브의 건조수축은 측정방향과 구속 상태에 영향을 받으며, 와이어 매쉬 슬라브의 건조수축이 가장 작고 PPF 섬유의 첨가량이 증가할수록 증가한다. 또한 PPF 섬유의 사용량의 증가에 따른 건조수축의 증가는 사용 수량의 증가에 기인한 것으로 판단된다.
5. PPF 섬유의 권장 사용량 이내의 첨가에 따른 강도상의 차이는 거의 없으나, 과다한 양이 사용될 때는 강도저하가 예상된다.
6. PPF섬유의 첨가에 따른 유동성의 감소를 보정하게 되면 보정하지 않았을때와 상반되는 결과가 나올수도 있으므로 섬유소의 사용에는 세심한 주의가 요망된다.

참 고 문 헌

1. Zellers,R.C. and Biddle,D.T., "Forta Corporation's Response to the Wire Reinforcement Institute's Position on CFP Fibers," Research Report, Forta Fiber Co., Grove City, PA, 1986
2. Beresford,F.D., "Polypropylene Fiber Reinforcement in Concrete Slab-on-Ground," presented at the CSIRO Division of Building Research, Australia, Asia-Pacific Concrete Technology Conference, Indonesia, 1986
3. Lytton,R.L., Olsen,M., Han,M.Y. and A., "The Effects of Polypropylene Fibers in Concrete," Research Report, Texas A&M University, Texas, 1988
4. Aitcin,P., Laplante,P., and LaPalme,Y., "The Use of Fiber Reinforced Concrete for Highway Rehabilitation," Research Report, Etude #231, IGM-85-305-231, Quebec, Canada, 1985
5. Tattersall, G. H., "Ratioanle of a two point workability test," Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, 1973
6. ACI Manual of Concrete Practice 211.1

(접수일자 : 1994. 5. 23)