

고성능 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체의 수분영향에 관한 연구

An Experimental Study on Moisture Sensitivity of High Performance Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites



원종필*

Jong-Pil Won



문제길**

Je-Kil Moon

요 약

셀룰로우스 섬유는 강도와 강성측면에서 우수하고 동시에 적은 에너지로 가공이 가능하며, 또한 가격면에서도 유리하고 풍부한 양으로 인해 시멘트의 보강재료로서 적당하다. 셀룰로우스 섬유 시멘트 복합체는 일반적으로 슬러리-탈수 가공에 의해 생산되며 평면이나 곡면 등의 시멘트 복합체품으로 얇은 판을 만드는데 주로 사용되어진다. 본 연구에서는 셀룰로우스 섬유 혼입률과 여러가지 수분 상태에서의 강도 특성을 실험에 의해 고찰하였다. 이들 시멘트 복합체의 강도효과에 대한 실험결과들의 검증을 위하여 통계학적인 분산분석과 다중비교에 의한 분석을 수행하였다.

휨강도는 섬유 혼입률이 약 8%까지 상승할 때 증가하였으며, 휨인성은 섬유 혼입률의 증가에 따라 증가하였다. 수분함유량은 휨강도에 중요한 요인으로 작용하였는데, 수분 함유량의 증가는 휨강도의 감소를 가져온 반면, 휨인성의 증가를 보여주었다.

시멘트 복합체에 포졸란 재료를 사용하였을 경우 수분에 의한 영향은 크지 않은 것으로 나타났으며 약간의 휨인성의 감소와 더불어 휨강도의 증가를 보였다.

* 정회원, 삼성물산 건설부문 기술연구소 선임연구원, 공학박사

** 정회원, 건국대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의록 1996년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1997년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

Cellulose fibers, being fairly strong and stiff as well as cheap and plentiful with low energy demand during manufacture, are strong contenders for the reinforcement of cement-based materials. Cellulose fiber-cement composites, generally manufactured by slurry-dewatering procedure, can find applications in the production of flat and corrugated cement sheets and many other thin-sheet cement products. This paper presents the results of an experimental study concerned with the effects of fiber content and moisture conditions on the flexural performance of these composites. An effort was also made to study the effect of pozzolanic admixtures on the flexural performance in different moisture conditions. The test results obtained were analyzed statistically using the analysis of variance in order to derive reliable conclusions. The results generated in this study were indicative of significant effects of fiber content and moisture condition on flexural performance. There is a tendency in flexural strength to increase with increase in fiber content up to 8%; flexural toughness values continue to increase even at higher fiber contents. Moisture content has a significant effect on the flexural performance. There is a tendency in flexural strength to decrease and flexural toughness to increase with increasing moisture content. Composites incorporating pozzolans showed an increase in the flexural strength while slightly reducing the flexural toughness and were sensitive to variations in moisture content.

Keywords: cellulose fiber, composites, flexural performance, moisture, strength, toughness

1. 서 론

셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체는 다른 섬유보강 시멘트 복합체와 비교해서 높은 성능과 더불어 가격면에서도 저렴한 인체에 유해한 석면의 대체재로 고려되어진다.^(1,2) 셀룰로우스 섬유는 석면 시멘트 산업체에서 사용되어지며 보강효과 측면보다는 가공적인 면에서 더욱더 높은 효과를 보여주었다. 최근의 연구에 의하면 셀룰로우스 섬유의 보강효과는 다른 종류의 섬유(예를들면 유리섬유)보다도 우수한 것으로 보고되고 있다.⁽³⁾ 셀룰로우스 섬유는 침엽수와 활엽수로부터 얻어지고, 섬유자체가 높은 강도를 가지며 강성이어서 얇은판의 시멘트 제품 보강에 적당하다. 이 섬유는 시멘트 매트릭스의 파괴에너지를 증진시키는데 효과적이며 재료의 인장강도, 휨강도, 인성 그리고 충격방지에 효과

적이며 미세한 균열의 멈춤이나 균열방향의 변동, 파괴시의 섬유의 뽑힘 등의 거동을 보여준다. 일반적으로 침엽수재에서 길이가 긴 섬유가 추출되는데 부러지지 않은 셀룰로우스 섬유의 길이는 2.5~7mm (평균은 3~5mm)이며 직경은 약 15~80 microns (평균은 30~45 microns) 정도이다. 그러나 같은 종류의 나무라 할지라도 섬유의 길이는 아주 다르다. 활엽수재에서 나오는 셀룰로우스 섬유의 평균길이는 침엽수재의 약 1/3-1/2이며 직경은 약 1/2이다. 활엽수재에서 추출된 셀룰로우스 섬유는 침엽수재에서 추출된 섬유보다 작은 입자를 많이 포함하고 있다.⁽⁶⁾

셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체는 일반적으로 슬러리-탈수 방법에 의해 생산되는데 이 제조방법은 시멘트 복합체 안에서 많은 양의 셀룰로우스 섬유가 고루 분포되게 할 수 있다.^(3,4,5) 슬러리-탈수

제조 방법에서는 묽은 슬러리로부터(약 20%가 고체) 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 제품을 얻는데 섬유는 슬러리안에서 퍼지며, 여기서 남은 물들은 흡입과 압력에 의해 제거되어진다. 흡입하는 동안 시멘트입자를 보존하기 위하여 섬유와 시멘트 매트릭스 사이에 충분한 접촉이 필요하게 되는데 섬유의 고해작용(beatng), 화학적인 정제 또는 배합중 접합물질 첨가를 통해 흡입하에서 시멘트입자를 보존할 수 있도록 섬유의 능력을 증진시켜준다. 얇은판의 셀룰로우스 섬유 보강 시멘트 복합체 생산에서는 석면보강 시멘트 제품에서 처음 개발하여 사용하였던 해척(Hatscheck) 방법을 약간 변형하여 상업적 제조 방법으로 사용한다.

셀룰로우스 섬유 성질 변화에 가장 큰 영향중의 하나는 수분에 의한 영향으로 섬유 자체 뿐만이 아니라 복합체의 성질에 까지도 영향을 끼친다. 즉 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체가 서로 다른 수분함량을 포함하고 있을 때 휨강도와 파괴인성의 값이 다른 것으로 나타났으며, 이러한 결과로부터 수분영향으로 인한 파괴 메카니즘의 변화가 있음을 알 수 있다. 본 연구는 슬러리-탈수(Slurry-Dewatered) 공법으로 제조된 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체의 최적 구성요소들과 복합체 재료들의 휨효과에 대한 수분의 영향을 조사하고, 포졸란 혼화제와 셀룰로우스 섬유 혼입률의 조정을 통하여 복합체의 최적화를 시도하고자 하였다.

2. 실험개요와 방법

실험계획 및 실행은 두가지로 설계하였다. 첫번째는 섬유 혼입률과 수분상태를 변화시켰을 때 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체의 휨성능 효과를 고려하였고, 두 번째는 포졸란 재료의 사용으로 인하여 발생하는 상이한 수분상태에서의 휨성능에 대하여 조사하였다. 실험계획은 I 과 II 로 구별하였으며, 표 1(a)와 1(b)에 요약하였다. 이곳에서 사용한 섬유 혼입율은 섬유와 고체물질(binder, 모래)과의 무게 비율이다.

본 연구에서 사용한 셀룰로우스 섬유는 침엽수에서 나온 크라프트 펄프(southern softwood kraft pulp)이며, 그 특성은 표 2에 나타나 있다.¹⁷⁾ 표에

Table 1 Experimental Program

Moisture Condition	Fiber Mass Fraction (%)
Air-Dried	4, 6, 8, 10, 12, 14
Oven-Dried	
Saturated	

(a) Phase I (Effects of Fiber Mass Fraction and Moisture Content)

Moisture Condition	Pozzolan Addition
Air-Dried	Pure Cement, 15% Silica Fume, 30% Fly Ash
Oven-Dried	
Saturated	

(b) Phase II (Effects of Pozzolan and Moisture Condition at Optimum (8%) Fiber Mass Fraction)

서 표현된 CSF는 캐나다 표준여수도(Canadian Standard Freeness)값으로 기계적 분쇄를 통해 얻어진 섬유의 고해도를 나타내는 지수이다. 리파인드(refined, beaten)섬유들은 표면조직을 휘브릴화(fibrils)하며, 기계적인 결합을 개발하도록 도와주는데, 낮은 CSF 값은 높은 리파이닝

Table 2 Properties of Cellulose Fibers¹⁷⁾

Type	Species	Average Length	CSF
Kraft	Softwood	3.0 mm	700

(refining, beating) 수준을 의미한다.

얇은 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 판들은 약 20%의 고체로 되어진 묽은 슬러리로부터 만들어지며(시멘트/실리카 모래 = 1) 섬유 혼입율의 범위는 4~14%이다. 섬유를 물속에 24시간 담근 후 빠른 속도의 믹서를 이용하여 5분 동안 분산시킨다. 그후 시멘트와 모래를 넣어 5분 동안 저어준 다음 시멘트 입자의 부착성능을 향상시키기 위해서 소량의 부착제(coupling agent)를 넣어 슬러리 안의 시멘트 물질이 응집하기 좋게 해준다. 부착제는 슬러리-탈수 공정 동안 스크린을 통해 시멘트 입자의 손실을 막아준다. 배합이 끝난 후 배합물을 흡수성이 있는 성형상자에 붓고 스크린 위에 퍼트린 후 0.6kg/cm²(계이지 압력)의 흡입력으로 약 5분간 흡입한다. 흡입이 끝나고 나면 판을 필터 스크린으

로부터 분리하여 두 개의 철판 사이에 놓고 프레스로 약 5분간 압축한다. 이후 판을 24시간 동안 플라스틱 카바에 쌓아서 양생한 후 5일간 수증양생을 실시한다. 샘플은 실험실 환경하($50 \pm 5\%$ RH, $22 \pm 3^\circ\text{C}$)에서 실험기간인 28일 동안 둔다. 본 연구에서는 각각의 배합에 따라 3개의 판($125 \times 125 \times 10\text{mm}$)을 제작하였다.

각각의 판으로부터 다이아몬드 톱을 이용하여 휨시편($38.1 \times 152.4 \times 10\text{mm}$)을 채취하였으며, 채취된 시편의 수분함량 효과를 조사하기 위하여 다음의 세가지 다른 환경하에 놓아 두었다 : (a) 습도 $50 \pm 10\%$, 온도 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ (air-dried); (b) 오븐온도 116°C 에 24시간 놓아둔 후 실험실 안에서 식힘 (oven-dried); (c) 물속에 48시간 놓은 후 실험하기 전 꺼내 천으로 물을 제거(saturated).

휨 실험은 일본규정 JCI-SF에 의해 실시하였으며 실험장치는 그림 1에 나타내었다.⁽⁸⁾ 이 실험방법은 시편의 강제운동에 따른 국부변형(local deformation)으로 발생하는 지지점과 하중 재하점에서의 오차를 감소시키는데 효과적이다.

섬유보강 시멘트 복합체의 휨인성 값의 산정에서 정확한 변형률을 측정하는 것은 중요한데, 일본 규준 JCI-SF에 의하면, 휨인성은 휨실험에서 얻은 아래부분의 면적으로 정의되어 있다. 이 규준에서 인성의 계산 지표는 휨 응력-변형도 곡선에서 시편의 길이를 150으로 나누어준 변형률의 길이의 면적을 구하는데, 본 실험에서의 경우는 0.76mm 이다.

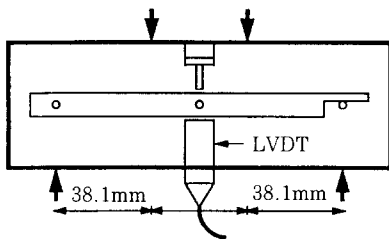
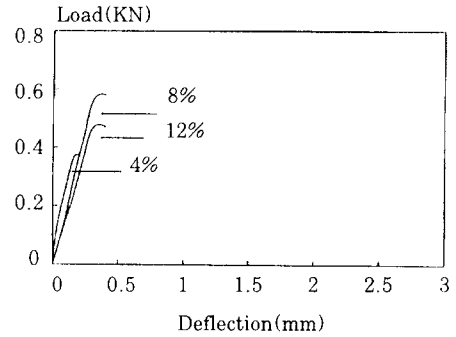


Fig. 1 Japanese standard flexural test setup⁽⁸⁾

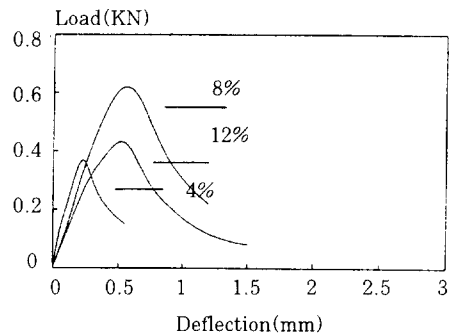
3. 실험결과와 토의

실험 계획 I 에서는 셀룰로우스 섬유-시멘트 복

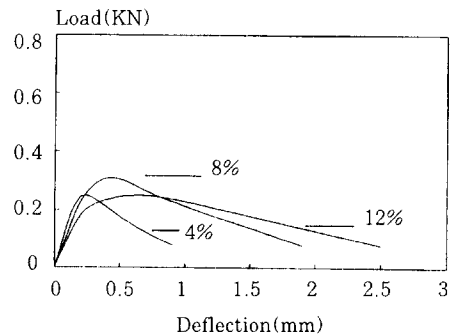
합체의 상이한 수분상태하에서의 휨성능을 섬유혼입률에 따른 효과에 대해 고려하였다. 그림 2 와 3 은 각각 상이한 수분상태에서의 섬유 혼입률과 서로 다른 섬유 혼입률하에서의 수분상태 효과에 따



(a) Oven-dried

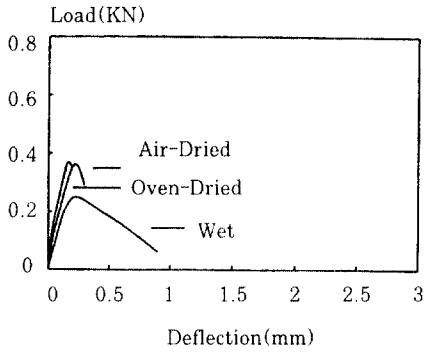


(b) Air-dried

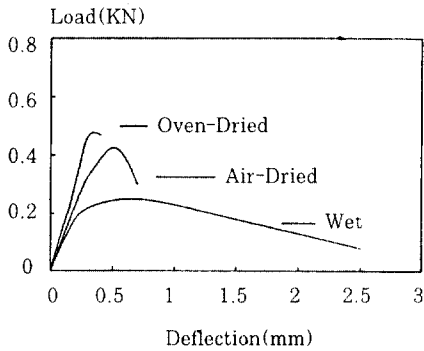


(c) Saturated

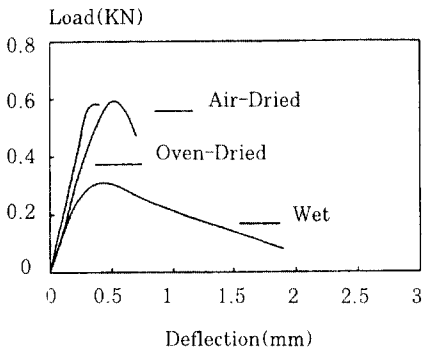
Fig. 2 Effects of fiber mass fraction on flexural load-deflection curves in different moisture conditions



(a) 4% Fiber mass content



(b) 8% Fiber mass content



(c) 12% Fiber mass content

Fig. 3 Effects of moisture condition on flexural load-deflection curves at different fiber mass fractions

큰 휨실험에서의 응력-변형도 상태를 나타낸 것이다. 그림 3 에서 휨인성은 섬유 혼입율이 증가될 때 계속해서 증가하나, 휨강도는 섬유의 양이 8% 까지 증가할 때까지만 증가되는 것을 보여준다. 그림 2에서의 결과를 보면 습윤상태(saturated)하에서 휨인성은 증가하나 휨강도는 감소하며, 공기건조와 오븐건조 상태에서도 비슷한 결과를 보여준다.

Table 3 Flexural strength test results(kg/cm²)

(a) Phase I (Effects of fiber mass fraction and moisture content)

Moisture Condition	Fiber Mass Fraction					
	4%	6%	8%	10%	12%	14%
Air-Dried	107.10	145.14	158.65	137.96	130.27	116.32
	108.41	138.04	154.10	151.76	137.58	123.64
	110.45	153.14	167.06	146.38	145.51	125.55
Mean	110.95	145.44	159.94	145.37	137.7	121.84
(St.Dev.)	(1.69)	(7.55)	(6.58)	(6.96)	(7.62)	(4.87)
OvenDried	108.11	154.45	172.44	146.38	138.52	121.21
	111.22	140.11	165.69	148.59	146.79	130.52
	114.11	144.93	158.72	161.14	135.14	134.87
Mean	111.15	146.50	165.62	152.03	140.13	128.86
(St.Dev.)	(3.00)	(7.30)	(6.86)	(7.96)	(5.99)	(6.98)
Saturated	69.78	99.22	94.26	81.22	84.05	68.66
	84.88	87.43	94.32	85.71	76.05	68.40
	77.82	96.74	97.43	81.36	68.81	76.53
Mean	77.49	94.46	95.34	82.76	76.31	71.20
(St.Dev.)	(7.56)	(4.62)	(6.22)	(1.81)	(2.55)	(7.62)

(b) Phase II (Effects of pozzolan and moisture condition at optimum(8%) fiber mass fraction)

Moisture Condition	Pozzolan Addition		
	Pure Cement	15% Silica Fume	30% Fly Ash
Air-Dried	158.6	154.10	167.06
	186.23	192.92	202.29
	179.13	185.96	174.44
Mean	159.94	193.82	179.84
(St.Dev.)	(6.58)	(8.07)	(5.79)
Oven-Dried	172.44	165.69	158.72
	197.40	196.85	208.37
	175.82	187.68	175.75
Mean	165.62	200.87	179.75
(St.Dev.)	(6.86)	(6.50)	(6.87)
Saturated	94.25	94.32	97.43
	133.21	135.55	144.93
	122.25	132.52	124.87
Mean	95.34	137.90	126.54
(St.Dev.)	(1.82)	(6.20)	(5.34)

휨강도와 휨인성 실험결과는 표 3과 4에 나타나 있었다.

그림 4(a)와 (b)에서는 섬유 혼입률에 대한 다른 수분상태하에서 셀룰로우스 섬유보강 시멘트의 휨강도와 인성의 효과를 보여준다. 그림에서 각 점들은 3번 실험의 평균값이며, 회귀선과 함께 95% 신뢰구간을 보여주고 있다. 일원배치법과 함께 다중

Table 4 Flexural toughness test results(kg-mm)

(a) Phase I (Effects of fiber mass fraction and moisture content)

Moisture Condition	Fiber Mass Fraction					
	4%	6%	8%	10%	12%	14%
Air-Dried	398.08	740.75	1354.5	1864.3	2471.9	2547.9
	378.74	815.55	1468.4	1756.3	2322.3	2560.9
	465.85	866.40	1570.4	1720.0	2134.2	2696.6
Mean	394.56	807.57	1464.4	1780.2	2309.5	2601.8
(St. Dev.)	(45.74)	(63.20)	(108.0)	(75.06)	(169.22)	(82.36)
Oven-Dried	289.13	640.53	1292.9	1373.4	2033.9	2145.9
	385.07	675.22	1341.2	1571.9	1920.5	2357.5
	313.88	740.42	1443.5	1458.9	1845.1	2290.1
Mean	329.36	685.39	1359.2	1468.1	1933.2	2264.5
(St. Dev.)	(49.81)	(50.72)	(76.90)	(99.57)	(95.04)	(108.18)
Saturated	563.48	1421.1	1800.0	2455.5	3161.4	4594.5
	601.21	1328.7	1954.8	2334.6	3272.8	4645.2
	652.51	1254.2	1768.3	2568.7	3277.8	4836.9
Mean	605.73	1334.9	1841.0	2452.9	3237.4	4692.2
(St. Dev.)	(44.69)	(83.61)	(99.79)	(117.07)	(65.81)	(127.85)

(b) Phase II (Effects of pozzolan and moisture condition at optimum(8%) fiber mass fraction)

Moisture Condition	Pozzolan Addition		
	Pure Cement	15% Silica Fume	30% Fly Ash
Air-Dried	1354.5	1129.0	1142.3
	1468.4	1355.0	1356.0
	1570.4	1242.6	1318.9
Mean	1464.4	1242.2	1272.4
(St. Dev.)	(108.0)	(113.03)	(114.19)
Oven-Dried	1292.9	1016.3	1016.1
	1341.2	874.87	1154.9
	1443.5	1128.2	1241.9
Mean	1359.2	1006.5	1137.6
(St. Dev.)	(76.90)	(126.95)	(113.89)
Saturated	1800.0	1356.1	1468.9
	1954.8	1481.6	1456.0
	1768.3	1593.3	1594.5
Mean	1841.0	1477.0	1506.5
(St. Dev.)	(99.79)	(118.67)	(76.51)

비교에 의해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체의 휨강도와 인성에 대한 섬유 혼입률의 영향은 통계적으로 99.9% 신뢰수준에서 영향이 있음을 알 수 있다. 상이한 수분상태하에서 최대 휨강도는 8%의 섬유 혼입률의 경우 공기중에서는 160kg/cm², 오븐건조하에서는 165kg/cm², 습윤상태에서는 96kg/cm² 를 보여준다. 습윤상태하의 복합체에서 휨 강도는 섬유 혼입률이 4%와 8%인 경우가 거의 비슷하게 나타났다는데, 이것은 95% 신뢰 수준에서 보여주었다.

복합체안의 수분상태는 섬유량의 증가와 함께 증가하였으며, 최대 인성치는 14%의 섬유 혼입률 하에서 최대를 기록했다. 공기중과 비교할 때 오븐상태에서의 휨강도에는 통계적으로 유의한 효과가 없었으나, 99.9%의 신뢰수준에서 다른 효과를 보여주었다.

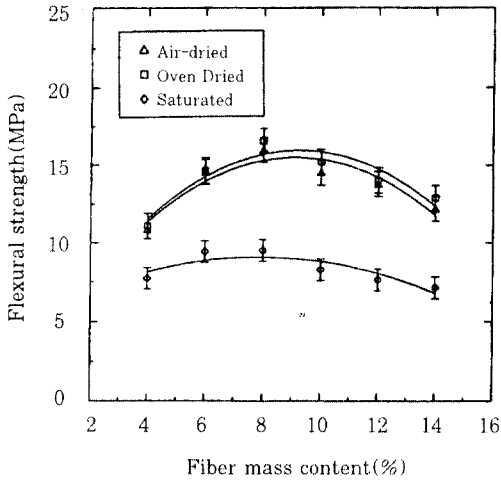
습윤상태는 휨인장 강도에 나쁜 영향을 주고 (8% 섬유 혼입률에서 40%의 감소), 휨인성에서는 99.9% 신뢰구간에서 증가효과를 보여준다(14% 섬유 혼입률일 때 93%의 증가).

섬유 혼입률과 수분 함유량 사이에는 강한 교호 작용(interaction)을 보여주는데 섬유 혼입률은 휨강도에 적은 효과를 보여주는 반면 습윤상태하의 복합체에서는 휨인성에 큰 효과를 보여주었다.

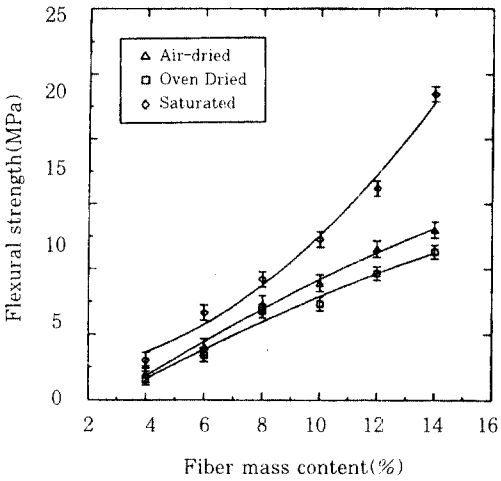
섬유 혼입률이 8%인 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체에 포졸란 재료를 첨가함에 따른 휨강도와 인성의 변화를 그림 5 (a)와 (b)에 나타내었다.

포졸란(실리카 흙 및 플라이애쉬)은 복합체의 휨강도를 증가시키나, 인성은 약간 감소시키는데 이들 결과는 통계적 분석 방법을 통하여 95%의 신뢰수준에서 확인하였으며 실리카 흙에서 보다 확실한 효과를 나타내었다. 포졸란 재료 첨가시 휨강도의 증가는 습윤상태하에서 가장 높았는데 실리카 흙이나 플라이애쉬에 의한 휨강도의 증가는 공기건조와 오븐건조에서 평균 20%와 10%이며, 습윤상태에서는 45%와 33%이다. 서로 다른 수분상태에서 포졸란 재료의 첨가에 대한 인성의 감소는 거의 같이 이루어졌으며, 인성의 감소는 평균적으로 15% 정도이다.

공기건조나 오븐건조 복합체의 휨거동에서 포졸란 재료의 첨가는 통계적으로 거의 유의하지 않은



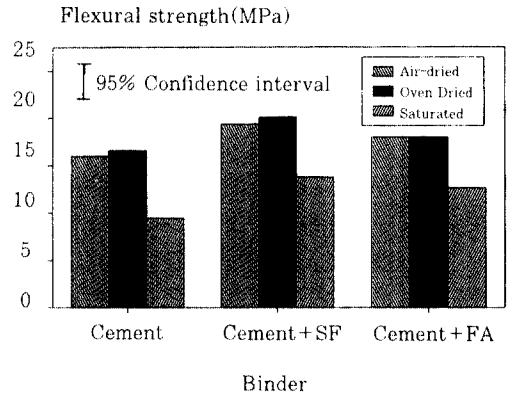
(a) Flexural strength



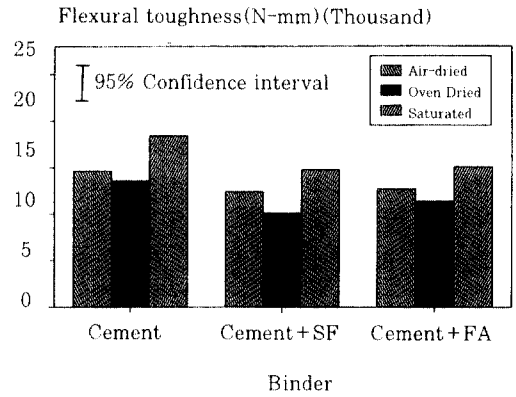
(b) Flexural toughness

Fig. 4 Effects of fiber mass content and moisture condition on flexural performance (Regression analysis with 95% confidence interval)

것을 보인다. 습윤상태는 휨 강도에 좋지 않은 영향을 주나 인성에는 좋은 효과를(99.9%의 신뢰수준에서) 보여주고, 바인더와 수분효과 사이에는 교호작용이 있다. 포졸란 재료는 셀룰로우스 섬유-시멘트 복합체의 수분에 대한 민감성을 감소시켜 주는 반면, 공기 건조 때보다 습윤상태에서 평균강도를



(a) Flexural strength



(b) Flexural toughness

Fig. 5 Effects of pozzolan and moisture condition on flexural performance (at optimum (8%) fiber mass content)

40% 감소시켰다.

실리카흙 또는 플라이애쉬의 첨가는 습윤상태에서 30%의 휨강도를 감소시켰으며, 평균 휨인성의 증가는 습윤상태에서 포졸란이 없을 때와 있을 때 26%와 18% 정도이다. 수분에 대한 민감성을 감소시키는 포졸란 효과는 분산분석을 통해 99%의 신뢰수준에서 확인되었다.

4. 결과 및 고찰

두가지 다른 실험을 통하여 셀룰로우스 섬유보강

참 고 문 헌

시멘트 복합체의 휨성능을 평가, 고찰하였다. 첫 번째 방법은 섬유 혼입량과 수분을 증가시켰을 때 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체의 휨성능에서 발생하는 효과를 고려하였고, 두 번째 방법은 포졸란 재료의 사용으로 인하여 발생하는 상이한 수분상태에서의 휨성능에 대하여 검토하였다. 이때 고려된 수분상태는 공기건조, 오븐건조 그리고 습윤상태등이다. 실험결과들은 통계학의 분산분석과 다원 비교법에 의해서 평가·분석하였다. 다음의 결론들은 실험결과로부터 도출해 낸 것이다.

(1) 셀룰로우스 섬유보강 시멘트 복합체의 휨강도와 인성에 대한 섬유 혼입률의 영향은 통계적으로 99.9% 신뢰수준에서 영향이 있음을 보여주었다. 휨인장 강도는 8% 섬유 혼입률에서 최대치를 기록하였으며, 최대 인성치는 14%의 섬유 혼입률 하에서 최대를 기록했다.

(2) 복합체에서의 오븐건조가 휨강도에 미치는 영향은 통계적으로 유의하지는 않았으나 휨인성에 대해서는 99.9%의 신뢰수준에서 나쁜 효과를 보여주었다. 습윤상태 복합체의 휨강도에는 나쁜 영향을 준 반면, 휨인성에는 긍정적인 효과를 보여주었는데 이것은 99.9%의 신뢰수준에 의하였다.

(3) 8%의 섬유 혼입률에 포졸란의 첨가(실리카 흙 또는 플라이 애쉬)는 복합체 휨인장 강도의 증가와 더불어 약간의 휨인성의 감소를 모든 건조 상태 하에서 보여주었다. 이들 효과들은 통계적으로 95% 신뢰수준에서 확인되었는데, 실리카 흙의 첨가와 습윤상태에서 더욱더 효과적이었다.

(4) 공기건조나 오븐건조를 거친 복합체의 휨거동에서 포졸란 재료의 첨가는 통계적으로 거의 유의하지 않은 것을 보여 주었다. 습윤상태는 휨인장 강도에 좋지 않은 영향을 주나 휨인성에는 좋은 효과를 99.9%의 신뢰수준에서 보여준다. 수분에 대한 민감성을 감소시키는 포졸란 효과는 분산분석을 통해 99%의 신뢰수준에서 확인되었다.

1. Coutts, R. S. P., "Sticks and Stones", Forest Product Newsletter, Vol. 2, No. 1, January 1988, pp. 1-4.
2. Anon, "New-A Wood Fiber Cement Building Board", CSIRO Industrial Research News, May 1981, pp. 1-4
3. Vinson, K.D. and Daniel, J. I., "Specialty Cellulose Fibers for Cement Reinforcement", Thin Section Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement, American Concrete Institute Publication SP-124, 1990, pp. 99-124.
4. Coutts, R. S. P., "Air-Cured Wood Pulp Fiber-Cement Matrices," Composites, Vol. 18, No. 4, 1987, pp. 325-328.
5. Coutts, R. S. P. and Michell, A. S., "Wood Pulp Fiber Cement Composites", Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium 37, John Wiley & Sons, Inc., 1983, pp. 829-844.
6. Kocurek, M. J. and Stevens, C. F. B., "Pulp and Paper Manufacture, Vol. 1: Properties of Fibrous Raw Materials and their Preparation for Pulping", Joint Text Book Committee of the Paper Industry, Atlanta, GA, USA, 1983, pp. 182.
7. Procter and Gamble Cellulose, Paper Grade Wood Pulp HP-11, Technical Bulletin, Memphis, Tennessee.
8. Japanese Concrete Institute, "JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete", Report No. JCI-SF, 1984, pp. 68.
9. Coutts, R. S. P., "Autoclaved Beaten Wood Fiber Reinforced Cement Composites", Composites, Vol. 15, No. 2, April 1984, pp. 139-143.
10. Douglas C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments-Third Edition", John Wiley & Sons, pp. 649. (접수일자 : 1996. 8. 7)