

폐지섬유보강 시멘트 복합체의 최적배합비 도출

원종필^{1)*} · 배동인¹⁾ · 박찬기¹⁾ · 박종영²⁾

¹⁾건국대학교 농공학과 ²⁾입업연구원 목재가공과

(2001년 2월 7일 원고접수, 2001년 7월 19일 심사완료)

Optimum Mix Design for Waste Newsprint Paper Fiber Reinforced Cement Composites

Jong-Pil Won^{1)*}, Dong-In Bae¹⁾, Chan-Gi Park¹⁾, and Jong-Young Park²⁾

¹⁾ Dept. of Agricultural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

²⁾ Korea Forest Research Institute, Seoul, 130-019, Korea

(Received February, 7, 2001, Revised July 19, 2001)

ABSTRACT

This research investigates the mixture proportioning of waste newsprint paper fiber for thin-cement product. Waste newsprint paper fibers obtained through shredded mechanically by a dry process. Waste newsprint paper fiber reinforced cement composites was manufactured by slurry-dewatering method.

The waste newsprint paper fiber reinforcement conditions (fiber mass fraction, level of substitution of virgin fibers, level of fiber beating) and processing variables (pressed, unpressed) are optimized through experimental studies and statistical analyses based on factorial design of experiments and analyses of variance. The optimized recycled waste newsprint paper fiber reinforced cement composites were technically evaluated. The results are shown to possess acceptable properties and strong potentials of the recycling of waste newsprint paper of the reinforcement of thin-cement products.

Keywords : newsprint paper fiber, slurry-dewatering, thin-cement product

1. 서 론

석면섬유는 우수한 재료적 특성으로 인해 1970년부터 시멘트 복합체의 보강섬유로 널리 사용되었다. 하지만, 현재 석면섬유는 대부분의 선진국에서 석면이 가지는 인체 유해성을 인식하면서, 전면 사용금지 내지는 극히 일부의 사용을 허가하고 있기 때문에 무석면 시멘트 복합체로의 전환이 불가피하였다^{1,2,3)}. 이러한 관점에서 석면섬유를 순수 목질섬유로 대체한 시멘트 복합체는 석면 시멘트 복합체와 유사한 강도 및 인성을 가질 뿐 아니라 상대적으로 낮은 에너지를 필요로 하며 환경친화적인 재료이기 때문에 보강재로 널리 사용하게 되었다^{1,2,3)}.

폐지 재활용은 자원절약 및 환경보전뿐 아니라 매립지 한계를 극복하는 길로 많은 분야에서 재활용을 하고 있다. 국내의 경우 연간 제지원료 804만톤 중 폐지 사용량이 약 600만톤으로 재활용율이 약 74.5%이다. 따라서, 건설자재

로 폐지 재활용의 범위를 확대함으로써 폐지 재활 용율 증진에 기여할 수 있다. 폐지섬유는 순수 목질섬유에 비해 다수의 불순물을 함유하고 있으며, 섬유 재생 과정시 섬유길이 짧아지고, 섬유강도가 떨어진다^{2,4,5)}. 이로 인해 시멘트 복합체 내에 폐지섬유를 다량 혼입할 경우, 시멘트 모체와의 부착성능 저하 및 보강효과의 감소로 역학적 성능이 감소한다^{2~4)}. 따라서, 소정의 물리·역학적 성능을 발휘하는 폐지섬유 시멘트 복합체의 개발은 경제성 및 환경적 측면에서 많은 효과를 가져다준다^{4,6)}.

이러한 측면에서 폐지섬유 재활용 및 환경친화적 건설 재료 개발을 위해 본 연구에서는 폐지섬유를 보강재로 사용한 시멘트 복합체의 최적배합비를 도출하였다.

2. 사용재료

2.1 폐지섬유

본 연구에서 사용된 폐지는 신문용지이며, 폐지는 건조 상태에서 분쇄기기로 갈아서 섬유화시켰다. 폐지섬유의 길

* Corresponding author

Tel : 02-450-3750 Fax : 02-2201-0907

E-mail: jpwon@konkuk.ac.kr

이분포는 Fig. 1과 같다. 폐지섬유의 표면형태를 주사 전자 현미경(scanning electron microscope)을 사용하여 관찰하였는데, Fig. 2에서와 같이 폐지섬유의 형상은 원통형이며, 폐지섬유는 표면에 노출된 미세섬유를 가짐으로써 상대적으로 거친 형태를 띠고 있다.

2.2 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트(Type I)를 사용하였으며, 사용된 시멘트의 특성은 Table 1과 같다.

2.3 규 사

사용된 규사의 물리·화학적 성질은 Table 2와 같으며, 표에서 보듯이 규사의 높은 SiO₂ 함량은 고압증기양생을 통해 빠른 시간(24시간)내에 소정의 강도를 발현할 수 있게 한다.

3. 영향인자의 결정

본 연구에서는 폐지섬유보강 시멘트 복합체의 최적배합비를 도출하기 위하여 시멘트 복합체의 특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 예상되는 세 가지 변수를 채택하여 Table 3과 같이 실험설계를 실시하였다. 여기서, 사용처에 따른 구분을 위하여 압력을 가한 복합체(주로 외장재에 사용)와 가하지 않은 복합체(주로 내장재에 사용)로 구분하여 실험을 실시하였다.

4. 시편 제작

슬러리-탈수공법을 이용한 폐지섬유보강 시멘트 복합체는 다음 순서와 같이 제조하였다.

1) 일정량의 순수 목질섬유와 폐지섬유가 소정의 여수도(freeness)에 도달할 때까지 비터기를 이용하여 섬유를 정제한다²⁾.

2) 섬유와 다른 혼합물(시멘트, 규사 등)을 첨가하고 5분간 믹서기에서 혼합한다(여기서, 시멘트:규사는 중량비로 1:0.7이다).

3) 슬러리 내에서 시멘트 고체의 응집(슬러리-탈수 동안 여과 스크린을 통해 시멘트 입자 손실의 양을 줄임)을 위해 1% 농도의 묽은 응집제를 고형량 대비 0.0001 wt% 첨가한다.

4) 속이 빈 주물 박스(400×400×10 mm)에 혼합물을 붓고 스크린에 고무 편 후, 5분 동안 진공압을 적용하여 잉여수를 제거한다.

5) 여과 스크린으로부터 복합체를 분리한 후, 가압시료의 경우 두 개의 강철판 사이에 놓고 30분 동안 모든 잔

류수가 제거될 때까지 64 kgf/cm²의 일정한 가압을 적용하고, 비가압 시료의 경우 공장제품과 흡사한 조건을 맞추기 위해 2.4 kgf/cm²의 약한 압력을 가한다.

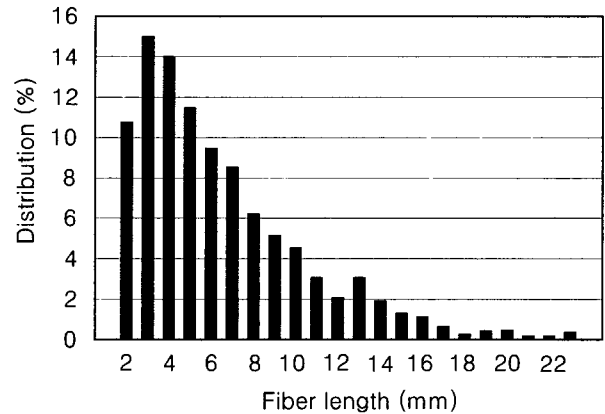


Fig. 1 Length distribution of waste newspaper paper fiber

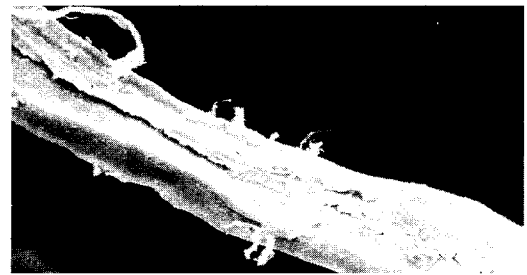


Fig. 2 Scanning electron micrographs of waste newspaper paper fiber (×1000)

Table 1 Properties of cement

Fineness (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (%)	Compressive strength(kgf/cm ²)		
			3 days	7 days	28 days
3,488	3.15	0.08	224	308	404
Initial setting time			231 min.		
Final setting time			6 h. 47 min.		

Table 2 Physical and chemical properties of silica-sand

Specific gravity		Fineness (cm ² /g)		Water content (%)			L.O.I (%)
2.65		6,120		<0.1			0.69
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
92.75	3.34	3.34	0.04	0.85	-	0.67	0.20

Table 3 Design of experiments

Compaction pressure (kgf/cm ²)	Fiber mass fraction (%)	Fiber beating level (CSF)	Fiber substitution level (%)
2.4(Unpressed) 64(Pressed)	8, 10, 12	350, 500	20, 35, 50

6) 각 시료를 12시간동안 대기중에서 양생한 후 고압증기양생을 실시한다.

5. 실험결과 및 분석

실험결과는 각각의 시편에 대해 ASTM C 1185에 따라 역학적 특성으로 휨강도, 물리적 특성으로 밀도와 물흡수율을 측정하였다. 실험값은 각 실험마다 2개의 시편을 제작하고 2회 반복 실험을 실시한 평균치로 하였다. 실험결과는 Table 4, 5와 같다.

휨강도는 영향인자인 섬유혼입율과 섬유정제수준에 영향을 받는데, 섬유의 여수도가 500인 경우에는 섬유혼입율의 증가에 따라 휨강도가 감소하지만, 여수도 350인 경우는 섬유혼입율 8%에서보다 10%에서 증가하며, 12%에서는 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 섬유대체수준은 폐지섬유의 양이 증가함에 따라 휨강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

밀도는 섬유혼입율과 섬유대체수준이 낮을수록, 섬유정제수준이 높을수록, 높게 나타나며, 물흡수율은 이와 반대의 경향을 보여 주었다.

이러한 실험결과를 바탕으로 각 인자들 (섬유혼입율, 섬유정제수준, 섬유대체수준)과 이들 상호작용의 종속변수 (휨강도, 밀도, 물흡수율)에 대한 유의성을 검정하기 위한 분산분석을 실시하였으며 그 결과는 Table 6, 7에서와 같이 휨강도에 대해서는 섬유혼입율과 섬유정제수준이 95% 신뢰수준에서 유의성을 가지며, 밀도와 물흡수력에 대해서는 모든 인자들이 95% 신뢰수준에서 유의성을 가져 섬유혼입율과 섬유정제수준이 폐지시멘트 복합체의 특성치에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig. 3 ~5는 각 인자들에 의한 특성치의 경향을 도시한 것이다.

6. 최적배합비 결정

위의 분석결과를 바탕으로 종속변수에 영향을 미치지 않는 불필요한 인자를 삭제하고 적절한 인자를 선택하여 Table 8과 같이 최적 배합비 도출을 위한 실험설계를 실시하였다.

실험설계에 따른 실험결과는 Fig. 6~8과 같다.

일반적으로 순수 목질섬유를 사용한 상업적 제품에서 요구되는 적정수준의 물리·역학적 특성[가압 복합체: 휨강도→85 kgf/cm²이상, 밀도→1.2 g/cm³이상, 물흡수율→30%이하), (비가압 복합체: 휨강도→45 kgf/cm²이상, 밀도→1.1 g/cm³이상, 물흡수율→35%이하]을 만족하고 가장 경제적인 최적배합비 결정을 위해 통계적 분석방법 중 하나인 반응표면분석법을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 9(a)와 (b)와 같다.

반응표면분석법을 통한 통계적 분석결과 가압 시멘트 복합체의 경우 섬유혼입율 9%와 섬유대체수준 22%에서 최적배합이 도출되었으며, 비가압 시멘트 복합체의 경우는 섬유혼입율 9%와 섬유대체수준 35%에서 도출되었다.

Table 4 Test results of waste newsprint paper fiber reinforced cement composites(pressed)

CSF*	Fiber fraction (Substitution, %)	Flexural strength (kgf/cm ²)	Density (g/cm ³)	Water absorption (%)
500	8(20)	90.29(0.837)	1.24(0.014)	28.37(0.530)
	8(35)	79.90(1.099)	1.21(0.000)	29.43(1.606)
	8(50)	70.43(1.783)	1.19(0.022)	31.07(2.320)
350	8(20)	85.87(1.760)	1.25(0.016)	26.54(2.059)
	8(35)	80.35(0.956)	1.23(0.014)	28.25(1.514)
	8(50)	68.27(1.338)	1.21(0.022)	30.01(2.750)
500	10(20)	85.67(1.307)	1.17(0.018)	31.65(1.839)
	10(35)	82.62(0.429)	1.14(0.012)	32.94(0.710)
	10(50)	73.85(0.229)	1.10(0.008)	34.39(0.466)
350	10(20)	89.36(0.443)	1.19(0.008)	31.01(0.442)
	10(35)	83.25(1.688)	1.16(0.014)	32.03(1.028)
	10(50)	73.62(0.826)	1.12(0.008)	33.93(1.185)
500	12(20)	80.27(0.780)	1.10(0.014)	34.63(0.911)
	12(35)	74.05(0.678)	1.08(0.012)	36.34(0.406)
	12(50)	67.34(1.946)	1.06(0.018)	37.79(0.282)
350	12(20)	82.42(2.556)	1.12(0.023)	33.54(1.225)
	12(35)	76.19(0.183)	1.09(0.012)	35.84(0.598)
	12(50)	70.06(0.885)	1.07(0.008)	36.44(0.372)

* Fiber beat levels ; ** (St. Dev)

Table 5 Test results of waste newsprint paper fiber reinforced cement composites(unpressed)

CSF*	Fiber fraction (Substitution, %)	Flexural strength (kgf/cm ²)	Density (g/cm ³)	Water absorption (%)
500	8(20)	54.85(0.595)	1.13(0.008)	32.77(0.635)
	8(35)	46.56(1.320)	1.11(0.014)	34.02(0.860)
	8(50)	39.14(0.562)	1.10(0.018)	35.34(0.542)
350	8(20)	49.41(0.388)	1.14(0.008)	32.01(0.641)
	8(35)	43.21(1.139)	1.12(0.008)	33.32(0.528)
	8(50)	36.69(0.647)	1.10(0.014)	34.96(0.685)
500	10(20)	51.78(0.774)	1.09(0.012)	35.89(1.652)
	10(35)	48.84(0.904)	1.08(0.014)	36.11(0.910)
	10(50)	42.76(1.161)	1.06(0.014)	37.34(1.305)
350	10(20)	54.32(0.781)	1.10(0.022)	34.94(0.745)
	10(35)	47.85(0.763)	1.08(0.008)	36.22(0.803)
	10(50)	42.98(1.465)	1.07(0.028)	37.03(0.481)
500	12(20)	44.35(0.888)	1.05(0.008)	38.51(1.042)
	12(35)	40.73(0.479)	1.03(0.008)	39.44(1.162)
	12(50)	36.31(1.305)	1.02(0.014)	40.13(1.566)
350	12(20)	45.22(0.330)	1.05(0.008)	38.68(0.934)
	12(35)	40.87(0.933)	1.04(0.014)	39.05(1.104)
	12(50)	37.12(1.587)	1.02(0.008)	40.11(1.095)

* Fiber beat levels ; ** (St. Dev)

Table 6 Results of the analysis of variance (pressed)

Source	Flexural Strength				
	Sum-of-squares	DF	Mean-square	F-ratio	P
A	124.496	2	62.248	25.973*	0.005
B	1.350	1	1.350	0.563	0.495
C	686.101	2	343.051	143.138*	0.000
A×B	15.841	2	7.921	2.129	0.142
A×C	24.290	4	6.072	3.305	0.195
B×C	0.689	2	0.345	2.534	0.870
Error	9.587	4	2.397		
Source	Density				
	Sum-of-squares	DF	Mean-square	F-ratio	P
A	5.490E-02	2	2.745E-02	1647.000*	0.000
B	1.250E-03	1	1.250E-02	75.000*	0.001
C	8.533E-03	2	4.267E-03	256.000*	0.000
A×B	3.333E-05	2	1.667E-05	1.000	0.444
A×C	4.667E-04	4	1.167E-05	7.000*	0.043
B×C	0.000	2	0.000	0.000	1.000
Error	6.667E-05	4	1.667E-05		
Source	Water absorption				
	Sum-of-squares	DF	Mean-square	F-ratio	P
A	139.839	2	69.920	848.653*	0.000
B	4.520	1	4.520	54.862*	0.002
C	26.673	2	13.337	161.875*	0.000
A×B	0.355	2	0.177	2.153	0.232
A×C	0.477	4	0.119	1.447	0.364
B×C	8.308E-02	2	4.154E-02	0.504	0.638
Error	0.330	4	8.239E-02		

* : Statistically significant at 95% level of confidence, A : Fiber mass fraction ; B : Fiber beating level ; C : Fiber substitution level

Table 7 Results of the analysis of variance (unpressed)

Source	Flexural Strength				
	Sum-of-squares	DF	Mean-Square	F-Ratio	P
A	162.027	2	81.013	64.507*	0.001
B	3.251	1	3.251	2.589	0.183
C	351.365	2	175.682	139.887*	0.000
A×B	18.879	2	9.440	7.516*	0.044
A×C	19.685	4	4.921	3.919	0.107
B×C	0.712	2	0.356	0.283	0.767
Error	5.024	4	1.256		
Source	Density				
	Sum-of-squares	DF	Mean-square	F-ratio	P
A	2.008E-02	2	1.004E-02	451.750*	0.000
B	1.389E-04	1	1.389E-04	6.250	0.067
C	3.011E-03	2	1.506E-03	67.750*	0.001
A×B	1.111E-05	2	5.556E-06	0.250	0.790
A×C	2.222E-05	4	5.556E-06	0.250	0.896
B×C	1.111E-05	2	5.556E-06	0.250	0.790
Error	8.889E-05	4	2.222E-05		
Source	Water Absorption				
	Sum-of-squares	DF	Mean-square	F-ratio	P
A	93.820	2	46.910	539.159*	0.000
B	0.580	1	0.580	6.662	0.061
C	12.275	2	6.137	70.540*	0.001
A×B	0.215	2	0.107	1.234	0.383
A×C	0.856	4	0.214	2.459	0.202
B×C	5.974E-02	2	2.987E-02	0.343	0.728
Error	0.348	4	8.701E-02		

* : Statistically significant at 95% level of confidence, A : Fiber mass fraction ; B : Fiber beating level ; C : Fiber substitution level

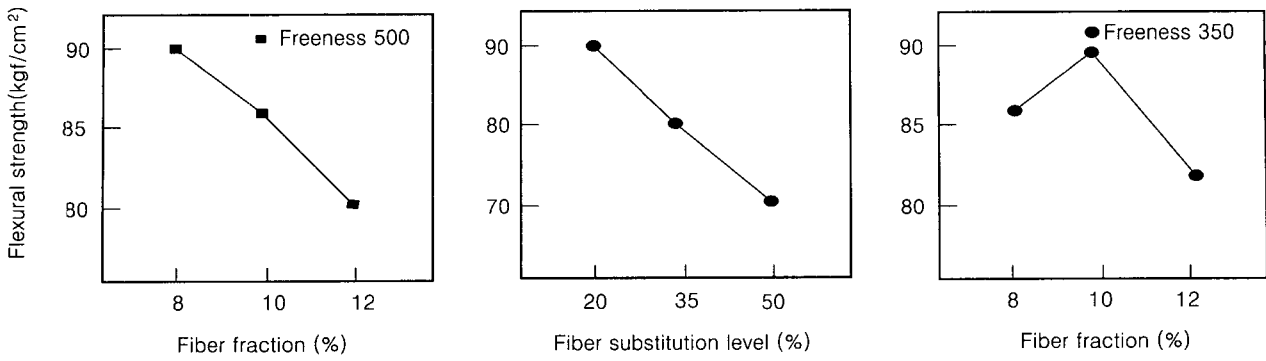


Fig. 3 Trends in flexural strength

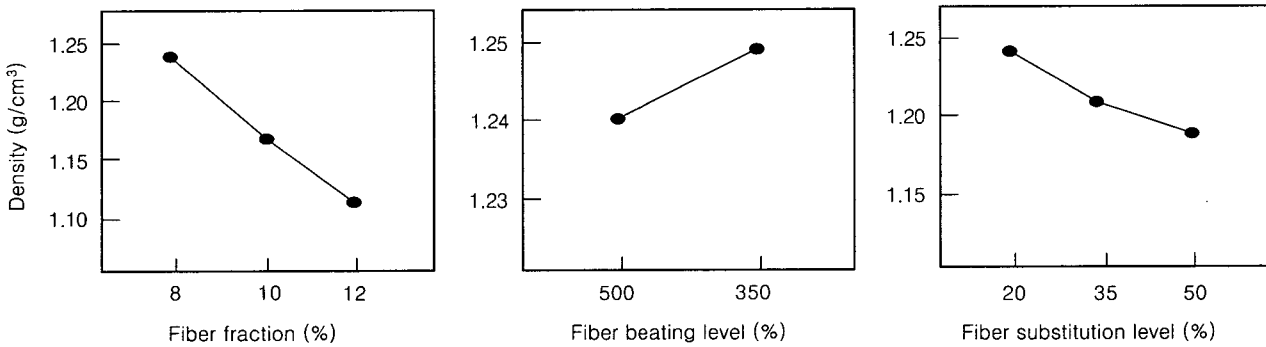


Fig. 4 Trends in density

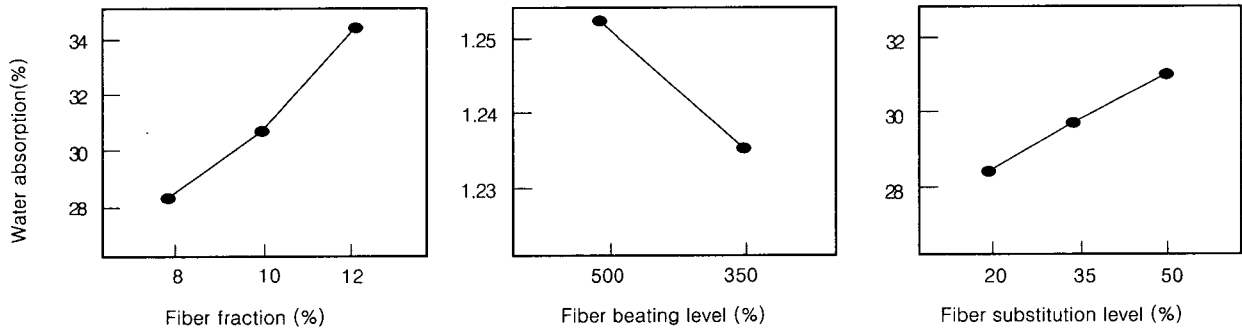


Fig. 5 Trends in water absorption

반응표면분석법을 통해 도출된 최적배합비에 따른 폐지 섬유보강 시멘트 복합체의 물리·역학적 특성을 검증하기 위한 실험을 실시하였다. 실험은 2회 반복 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다.

실험결과와 같이 최적배합비에 따른 모든 물리·역학적 특성치는 앞에서 언급한 적정수준 이상을 나타내었다.

Table 8 Experimental design for optimization

Factor Type	Fiber mass fraction(%)	Fiber beating level(CSF)	Fiber substitution level(%)
Pressed	8, 10	350	20, 30
Unpressed	8, 10	350	35, 45

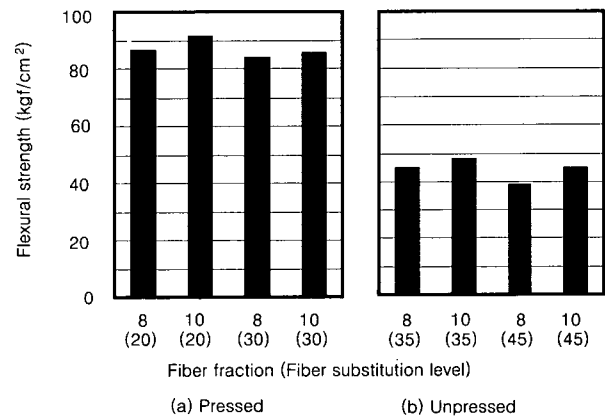


Fig. 6 Flexural strength of waste newspaper paper fiber reinforced cement composites

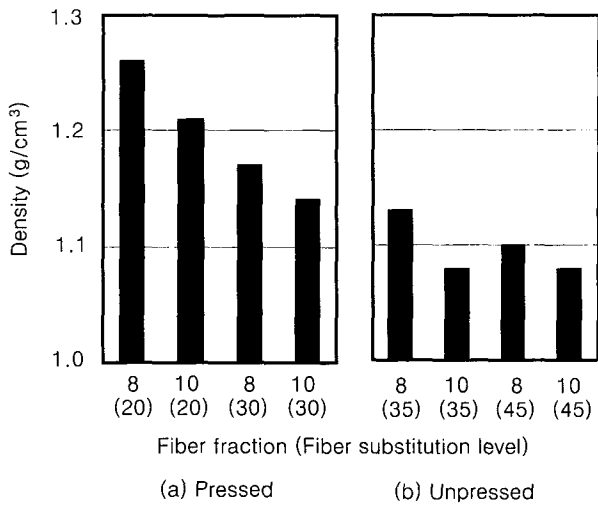


Fig. 7 Density of waste newsprint paper fiber reinforced cement composites

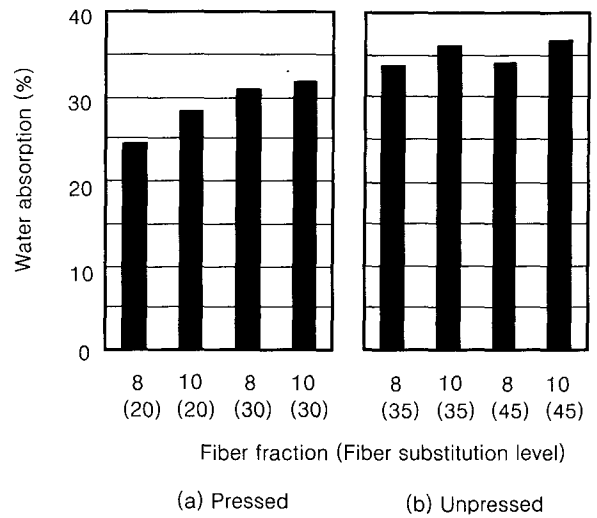


Fig. 8 Water absorption of waste newsprint paper fiber reinforced cement composites

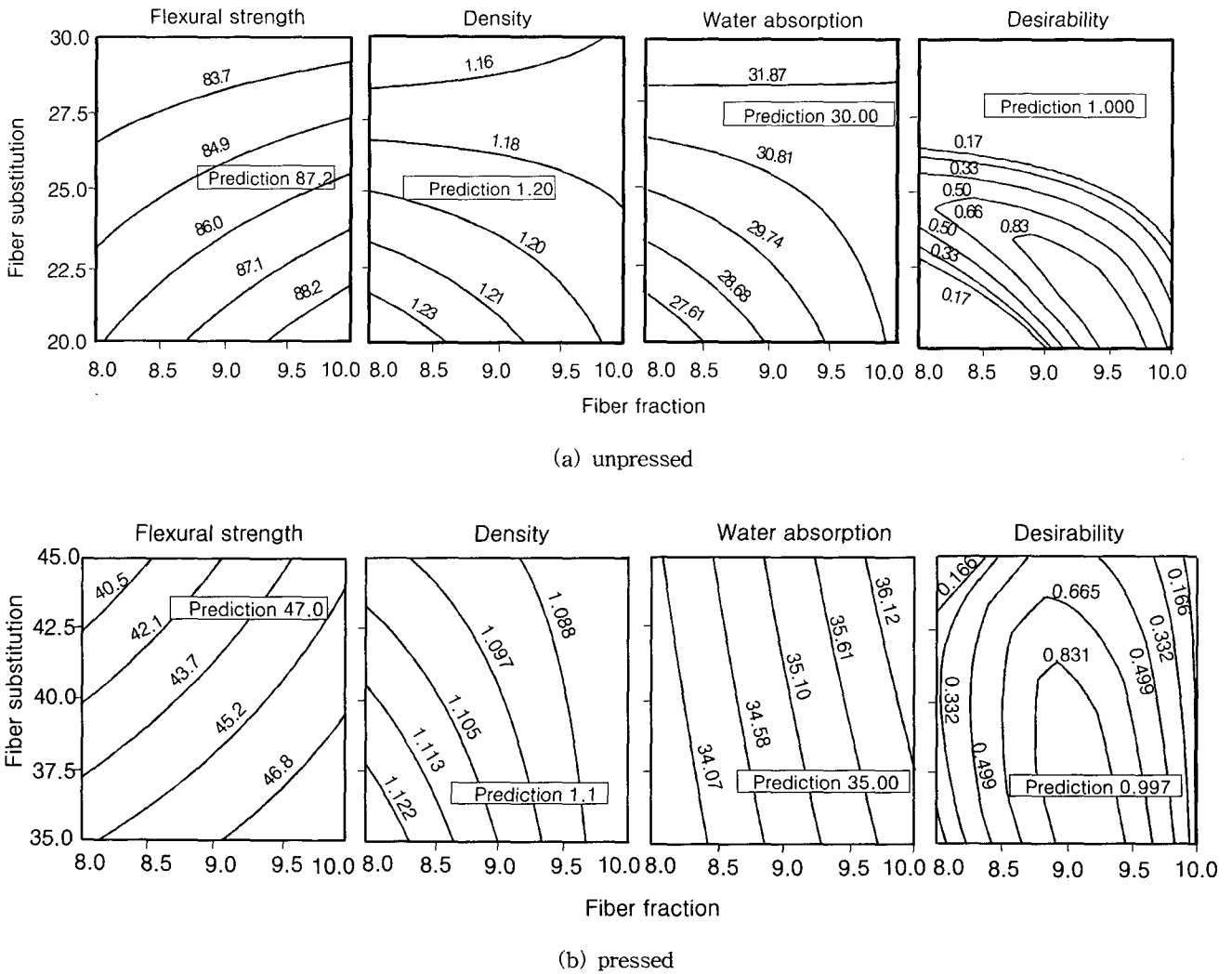
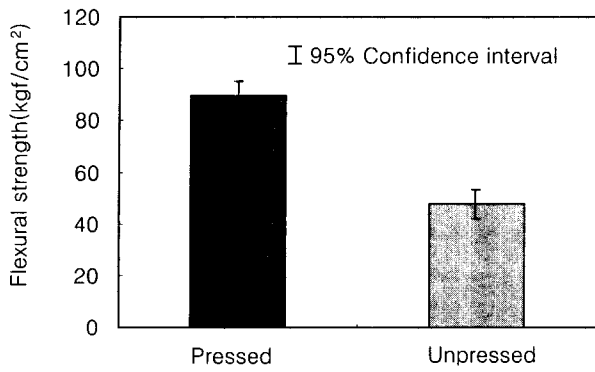
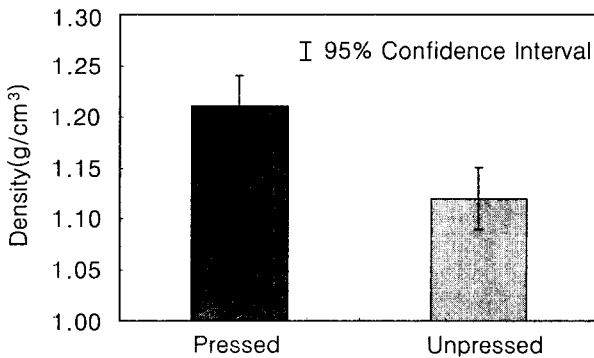


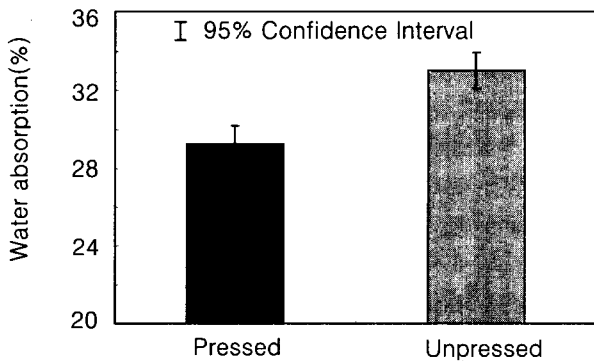
Fig. 9 Optimization of waste newsprint paper fiber reinforced cement composites : response surface analysis



(a) Flexural strength



(b) Density



(c) Water absorption

Fig. 10 Performance of optimized composites ; (a) flexural strength, (b) density, (c) water absorption

7. 결 론

본 연구는 폐지섬유 시멘트 복합체의 최적배합비를 결정하는 것을 그 목적으로 하였다. 특히, 복합체의 특성에 영향을 미칠 것으로 사료되는 세 가지 인자(섬유혼입율, 섬유정제수준, 섬유대체수준)를 고려하여 실험을 실시하였으며, 이들 인자에 따른 영향을 통계적 방법으로 해석하였다. 더욱 집약된 인자들의 영향을 고려한 최적배합비 도출을

위해 반응표면분석법을 이용한 최적배합비를 결정하였다.

폐지섬유 시멘트 복합체의 최적배합비 결정을 위한 실험결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 여수도 500의 경우, 가압상태와 비가압상태 모두 목질섬유 대비 20%의 섬유대체수준일 경우 고품질 대비 섬유혼입율 8%에서 가장 좋은 특성을 나타냈으며, 35%와 50%의 대체수준에서는 10%의 섬유혼입율에서 나타났다. 여수도 350의 경우에는 모든 섬유대체수준에서 고품질 대비 섬유혼입율 10%에서 가장 좋은 특성을 나타내었다. 또한, 섬유정제수준에 의한 영향은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 그러나, 작업성과 마무리성에서는 여수도 350이 여수도 500에 비해 좋게 나타났다.

2) 복합체의 물리·역학적 특성은 섬유혼입율과 섬유대체수준에 통계적으로 유의한 영향을 받고 있으며, 가압상태에서 섬유대체수준이 35% 이상일 경우는 기본 휨강도가 85 kgf/cm²에 미치지 못하므로 외장용으로 사용하기에는 어려움이 있다고 판단되며, 비가압상태에서는 35% 이상에서도 기본 휨강도인 45 kgf/cm²를 나타내므로 내장용으로의 사용이 가능하리라고 본다.

3) 최적배합비 도출을 위한 실험결과는 가압 보드의 경우 섬유혼입율 9%와 섬유대체수준 22%, 비가압 보드의 경우는 섬유혼입율 9%와 섬유대체수준 35%에서 결정되었다.

감사의 글

본 논문은 농림기술개발사업에 의하여 수행한 연구 결과입니다.

참고문헌

1. 원종필, 문제길, "고성능 셀룰로오스 섬유보강 복합체의 수분영향에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제 8권 제 5호, 1996. 10. pp. 163-170
2. Bentur, A. and Mindess, S., "Fiber Reinforced Cementitious Composites," Elsevier Science Publishers Ltd, 1990, pp.1~11.
3. Coutts, R. S. P., "Sticks and Stones," *Forest Products Newsletter*, (CSIRO Division of Chemical and Wood Technology (Australia), Vol. 2, No. 1, Jan. 1988, pp.1~4.
4. Andonian, R., Mai, Y. W. and Cotterell, B., "Strength and Fracture Properties of Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites," *The International Journal of Cement Composites*, Vol. 1, No. 4, Dec. 1979, pp.151~158.
5. Bentur, A. and Akers, S. A. S., "The Microstr-

ucture and Ageing of Cellulose Fiber Reinforced Autoclaved Cement Composites Cured in a Normal Environment," *The International Journal of Cement Composites and Light Weight Concretes*, Vol. 11, No. 2, May, 1989, pp.111~115.

6. Soroushian, P., Shah, Z., Won, J. P. "Optimizat-

ion of Wastepaper Fiber - Cement Composites," *ACI Materials Journal*, V. 92, No. 1, Jan.-Feb. 1995.

7. TAPPI 227, Freeness of Pulp, *Tappi Standards*, Technical Association of Pulp and Paper Industry, 1958.

요 약

본 연구는 얇은 시멘트판 제품의 보강재로써 건조공정에 의해 생산된 폐지섬유의 최적 배합비를 도출하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 순수 목질섬유 대비 폐지섬유의 대체수준을 세분화하여 실험을 실시하였으며, 슬러리-탈수 공법을 사용하여 폐지섬유보강 시멘트 복합체를 제조하였다.

본 연구는 실험적 연구와 반응표면 분석법을 활용한 통계적 분석을 통해 공정인자(가압, 비가압)와 섬유보강재 조건(섬유혼입율, 순수섬유 대체수준, 섬유정제수준)을 최적화하였다. 최적화된 재생 폐지섬유 시멘트 복합체를 기술적으로 분석하였으며, 그 결과, 폐지섬유보강 시멘트 복합체의 성능과 경제적 측면에서 폐지섬유의 재활용이 가능하리라 판단된다.

핵심용어 : 폐지섬유, 슬러리-탈수공법, 얇은 시멘트 제품