

## 구조용 합성섬유의 최적형상합수 결정

원종필<sup>1)\*</sup> · 임동휘<sup>1)</sup> · 박찬기<sup>1)</sup> · 한일영<sup>2)</sup> · 김방래<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>건국대학교 지역건설환경공학과 <sup>2)</sup>SK건설 기술연구소

(2001년 10월 9일 원고접수, 2002년 5월 13일 심사완료)

## Optimum Geometry Factor of Structural Synthetic Fibers

Jong-Pil Won<sup>1)\*</sup>, Dong-Hui Lim<sup>1)</sup>, Chan-Gi Park<sup>1)</sup>, Il-Yeong Han<sup>2)</sup>, and Bang-Lae Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Rural Engineering Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

<sup>2)</sup> SK Engineering & Construction, R&D Center, 192-18, Seoul, 110-300, Korea

(Received October 9, 2001, Accepted May 13, 2002)

### ABSTRACT

The purpose of the study is to establish an optimum geometry and optimum geometry factor through bond test of a structural synthetic fiber, which fully utilizes matrix anchoring without fiber fracturing with the maximum pullout resistance. Seven deformed structural synthetic fibers with widely different geometries were investigated and pullout test was conducted. Included parameters are seven different types of fiber and two of mortar matrixes.

The test result shows that the crimped type structural synthetic fiber is significant improvement in the interface toughness(pullout energy) and pullout load. The pullout test was performed with various size of crimped type structural synthetic fiber in order to invest optimum geometry factor, In the basis of the test results, optimum gometry factor is established such as  $D=b^{a_0 a} h^{\lambda \beta}$ .

**Keywords :** interface toughness, optimum geometry, optimum geometry factor, pullout, structural synthetic fiber

### 1. 서 론

1960년대부터 일반구조물, 해안구조물, 내진설계 구조물, 방호벽, 터널라이닝과 사면 등의 균열발생 후의 안정적 거동을 위하여 섬유는 콘크리트 보강재료로써 현재 광범위하게 사용되고 있다<sup>1-6)</sup>.

특히 각종 터널공사시 많이 사용되고 있는 강섬유보강 스틱크리트의 사용은 스틱크리트의 인성 및 파괴저항성을 확보할수 있어 현재 널리 사용되고 있다<sup>3,7)</sup>. 이러한 강섬유보강 스틱크리트는 철근 및 와이어매쉬 등이 갖는 정확한 공정시기의 지보설치의 곤란으로 인한 공사기간의 장기화화 같은단점을 해소하고 충분한 인성의 확보측면에서 대단히 우수하다고 알려져 있다<sup>3)</sup>. 그러나 강섬유는 자체의 비중이 높아서 스틱크리트 타설시 리바운드 양의 증대로 인한 안정성 및 경제성이 떨어지고 수분이 다량으로 포함되어 있는 장소나 지하수가 침투되는 곳에서 부식이 발생하여 구조적으로나 미관적으로 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개발된 구조용 합성섬유는 자체중량이 적고, 수분에 대한 저항성이 높아 강섬유의 부식으로 인한 내구성 저하의 문제점을 해결할 수 있다<sup>4-6)</sup>.

일반적으로 콘크리트 및 스틱크리트의 인성을 증진하는데 있어서 섬유의 기여는 섬유의 인발(pullout)과 관련된 에너지 분산 메카니즘에 의해서 우선적으로 지배된다. 즉 우수한 부착성능이 콘크리트 및 스틱크리트의 성능을 향상시킨다<sup>2,8,9)</sup>.

구조용 합성섬유는 성분이 폴리올레핀계(polyolefin)로써 섬유의 표면이 비친수성이라 시멘트 모체와의 부착성이 나쁜 근본적인 단점을 가지고 있다. 이와 같이 섬유와 시멘트 모체간의 부착성에 대한 문제점을 해결하고자 섬유의 역학적 변형, 천이대(transition zone)변경 및 섬유의 표면을 변경하는 부착강화 등 다양한 연구가 진행되었는데 이러한 부착을 강화시키는 메카니즘 중에서 섬유의 역학적 변형에 의한 부착강화가 가장 좋은 방법으로 보고되었다<sup>10)</sup>. Banthia 등은 섬유의 역학적 변형에 따른 인발시험을 통하여 인발강도 및 인발에너지를 추론할 수 있는 형상합수식을 제안하였으며 콘크리트 보강섬유에 있어서 최적형상을 찾으려 하였다<sup>11,12)</sup>.

본 연구에서는 첫 번째로 구조용 합성섬유와 시멘트 모체와의 부착성능을 향상시키기 위하여 섬유의 표면을 여러 모양으로 변형시킨 섬유를 가지고 부착시험을 실시하여 부착성능을 파악하며 두 번째로 우수한 부착성능의 섬유를 가지고 섬유의 역학적 변형(높이 및 주기를 바꾸어)을 통하여 다시 부착시험을 실시하여 부착성을 최대한으

\* Corresponding author

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

E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

로 향상시킬 수 있는 섬유유 최적형상 및 이론적 접근을 통한 최적형상 함수식을 도출하려 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용재료 및 배합

#### 2.1.1 시멘트

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

#### 2.1.2 잔골재

잔골재는 주문진 표준사를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 2와 같다.

#### 2.1.3 구조용 합성섬유

본 연구에서 사용된 구조용 합성섬유의 재료적 특성은 Table 3과 같으며, Table 4과 같은 형상을 가졌다.

#### 2.1.4 표준배합

본 연구에서의 표준배합은 JCI SF-8의 "METHOD OF TEST FOR BOND OF FIBER"에 제시된 배합을 사용하여 2종류의 모르타르를 만들었으며 모르타르의 배합설계는 Table 5와 같다.

### 2.2 시험방법 및 시험계획

JCI SF-8의 "METHOD OF TEST FOR BOND OF FIBERS"에 규정된 기준 모르타르의 배합에 의해 시편을 제작하여 부착시험을 실시하였다.

Table 1 Physical properties of cement

Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Specific gravity	Stability (%)
3,488	3.15	0.08

Table 2 Physical properties of standard sand

Standard sand		
Specific gravity	Bulk	2.61
	Bulk(SSD)	2.62
	Apparent	2.63
Absorption		0.48
F.M.		2.92

Table 3 Properties of structural synthetic fiber<sup>13)</sup>

Property	Structural synthetic fiber
Elastic modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	3.5×10 <sup>4</sup>
Specific gravity	0.91
Fiber length(mm)	50
Tensile strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	4500
Ultimate elongation	15%
Water absorption	0
Melting temperature	175°C
Ignition temperature	360°C
Acid/Alkali resistance	High
Electrical conductivity	Very low

Table 4 Fibers investigated

Schematic	Fiber	Fiber geometry	Length (mm)	Cross section
	F1	Crimped type	50	
	F2	Twist type	50	
	F3	Enlarged ends type	50	
	F4	Sinusoidal ends type	50	
	F5	Hooked type	50	
	F6	Double duoform type	50	
	F7	Straight type	50	
	F8	Steel fiber (hooked type)	30	

### 2.2.1 부착용 시험체 제작

0.5 mm 두께의 플라스틱 판을 시편중앙에 놓은후 1(단섬유), 4(다섬유)개의 구멍을 뚫어서 섬유를 삽입시킨 후 시편을 제작한다.

### 2.2.2 부착시험

본 시험에서는 2가지 종류의 배합에 대해 각 배합당 12개의 부착시험을 실시하였다. 시편제작 후 28일 후에 변위 제어방식의 UTM을 사용하여 0.5 mm/min의 재하속도로 시험을 실시하였다. 인발에너지(계면인성) 산정에서 JCI SF-8에서는 변위를 2.5 mm까지 정의하였는데 본 연구에서는 대부분의 경우 최고 하중에서 변위가 2.5 mm를 초과함에 따라 단섬유에서는 5 mm, 다섬유에서는 10 mm까지의 변위까지 인발에너지(계면인성)를 측정하였다. Table 6는 기본형상에 따른 부착시험계획을 나타냈다.

## 3. 시험결과 및 고찰

Table 5 Mix proportions of mortar

Type	Water-cement ratio	Cement-sand ratio(wt.)
I	0.50	1:1.7
II	0.65	1:1

Table 6 Design of experiments

Structural synthetic fibers	7 (fiber types)×2(two types of mix proportion)×2(single fiber, four fibers)×2(repeat)
Steel fiber	hooked type×2(two types of mix proportion)×2(single fiber, four fibers)×2(repeat)

Table 7 Pullout performance of fibers

Fiber type	Single fiber								Four fiber					
	High strength (Type I)				Normal strength (Type II)				High strength (Type I)			Normal strength (Type II)		
	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Energy to 5mm (kgf-mm)	Failure mode*	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Energy to 5mm (kgf-mm)	Failure mode*	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Energy to 10mm (kgf-mm)	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Energy to 10mm (kgf-mm)
Crimped type	17.03 (2.43)	5.79 (0.65)	51.36 (8.94)	P or F	11.48 (2.4)	5.3 (1.42)	35.5 (7.25)	P	71.09 (7.63)	5.58 (1.11)	368.51 (77.48)	69.48 (4.72)	5.93 (1.1)	434.66 (59.96)
Twist type	2.10 (0.91)	3.34 (0.65)	8.43 (4.88)	P	4.52 (0.44)	5.25 (0.48)	11.49 (1.76)	P	19.35 (3.52)	6.66 (1.33)	156.51 (28.25)	19.63 (4.82)	7.34 (1.48)	157.21 (32.52)
Enlarged ends type	8 (1.47)	2.99 (0.72)	25.04 (7.7)	F	6.71 (1.07)	2.86 (0.6)	20.25 (6.4)	F	29.61 (2.61)	3.17 (0.65)	107.20 (23.41)	28.9 (3.68)	3.26 (0.44)	105.96 (23.74)
Sinusoidal ends type	4.43 (1)	2.5 (0.74)	15.46 (4.15)	P	4.53 (0.93)	2.7 (0.35)	15.77 (4.61)	P	23.99 (4.87)	2.93 (0.31)	164.94 (23.41)	22.67 (5.39)	2.81 (0.42)	143.05 (47.56)
Hooked type	4.16 (0.99)	1.85 (0.62)	12.91 (5.28)	P	2.49 (1.57)	1.28 (0.58)	6.29 (5.55)	P	16.09 (3.47)	2.38 (0.5)	110.04 (35.64)	9.65 (2.39)	2.27 (0.42)	51.27 (20.86)
Double duoform type	7.89 (2.65)	2.47 (0.91)	16.47 (9.29)	F	7.91 (2.66)	2.68 (0.97)	20.33 (7.63)	F	25.36 (4.48)	1.93 (0.38)	47.32 (17.05)	25.49 (4.85)	25.75 (0.51)	59.18 (19.56)
Stright type	1.77 (0.63)	2.34 (1.89)	4.51 (2.13)	P	1.74 (0.69)	2.77 (1.88)	4.73 (2.18)	P	4.65 (1.88)	2.01 (1.67)	27.98 (16.54)	4.76 (1.46)	2.73 (2.76)	33.63 (13.77)
Steel fiber (hooked type)	9.14 (2.44)	1.47 (0.41)	22.71 (6.41)	F	6.45 (1.05)	1.6 (0.41)	17.55 (6.41)	F	44.48 (10.77)	1.96 (0.38)	194.96 (63.14)	34.44 (6.15)	1.87 (0.51)	140.86 (37.42)

\* P: pullout F: fracture

### 3.1 모르타르 압축강도 결과

JCI SF-8의 "METHOD OF TEST FOR BOND OF FIBERS"에 규정된 기준 모르타르의 배합설계에 의한 모르타르의 압축강도를 측정하기 위하여 KS L 5105에 따라 50×50×50 mm의 공시체를 제작하여 온도 23±2 °C, 습도 50%의 조건에서 24시간의 초기양생을 실시한 후 탈형하여 23±2 °C의 항온수조에 7일, 14일, 28일 양생 후 각각 3개씩 2회 반복하여 압축강도를 측정하였다. 각 재령에서의 압축강도 시험결과는 Fig. 1과 같으며, 재령 28일 압축강도의 경우 type I 배합은 400 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 고강도를 보여주었으며, type II 배합은 약 250 kgf/cm<sup>2</sup>의 보통강도를 보여주었다.

### 3.2 부착시험 결과 및 분석

Table 7은 섬유형상에 따른 부착시험 결과를 나타낸 것이며 단섬유와 다섬유의 섬유형상에 따르는 인발거동은 Fig. 2 및 3과 같다. 부착시험 결과, 각 섬유형상 중에서 crimped type이 인발하중과 계면인성에서 모두 가장 뛰어난 결과를 나타냈다. double duoform type과 enlarged ends type은 인발시 섬유의 변형된 부분에서의 파괴로 인

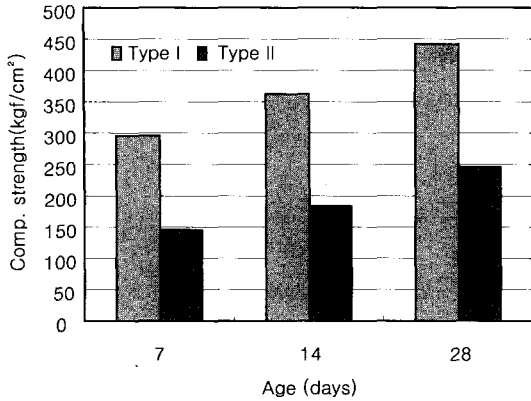


Fig. 1 Compressive strength of mortars

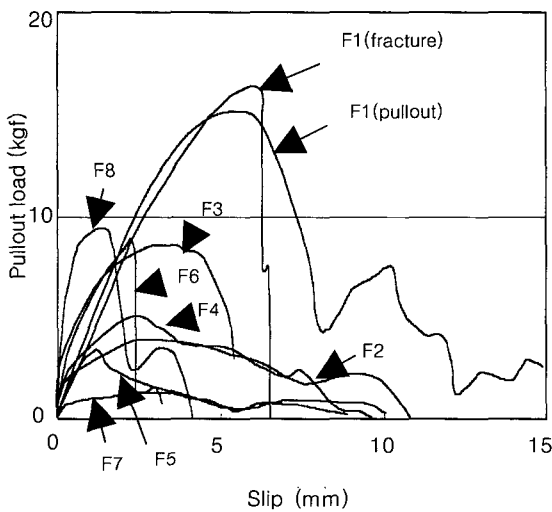


Fig. 2 Pullout response of single fiber

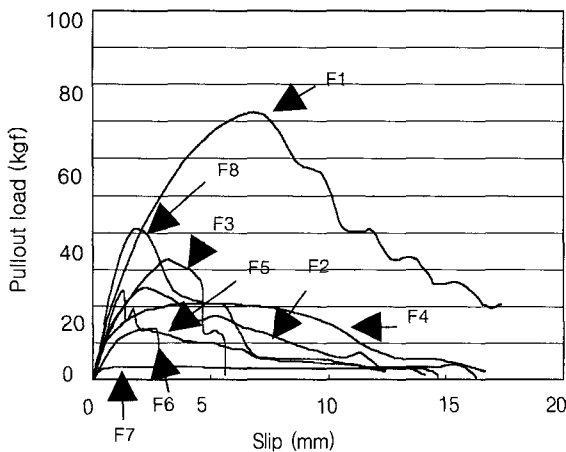


Fig. 3 Pullout response of four fibers

하여 계면인성이 급격하게 감소되었다. 섬유 일부가 변형된 hooked type과 sinusoidal ends type은 섬유가 인발되었고 인발강도와 계면인성은 crimped type보다 작게

나왔다. 따라서 섬유의 일부분에 대한 변형보다 섬유 전 길이에 대한 변형이 섬유와 시멘트 모체간의 부착을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 twist type은 crimped type과 마찬가지로 섬유의 전 부분에서 변형되었지만 꼬움에 의한 섬유의 단면변화로 형상비(aspect ratio)가 감소하여 인발강도 및 계면인성이 작게 나타났다. 섬유변형이 없는 straight type은 하중과 계면인성이 다른 섬유들에 비해서 아주 작게 나타났다. 이는 인발될 때 시멘트 모체와 섬유표면에서 마찰로 인한 부착이 없는 것으로 판단되며, 이는 straight type의 구조용 합성섬유의 경우 변형된 다른 섬유에 비해서 섬유보강의 효과가 크지 않음을 나타낸다. crimped type의 경우 배합 I에서는 6 : 4의 비율로 섬유의 인발과 파괴가 발생하였으며, 배합 II에서는 전체적인 섬유의 인발이 발생하였다. 인발시험 후 crimped type 섬유의 파괴형태는 Table 8에 나타내었다. 인발 후의 섬유형상별 특성은 Fig. 4와 같으며, Fig. 4(a)의 crimped type의 경우 섬유표면에서의 마찰로 인하여 전 섬유길이에 대해서 굽힘 현상이 나타났다. Fig 4(c)와 (f)와 같이 enlarged ends type과 double duoform type은 변형된 부분에서의 섬유의 파괴되는 형태를 보인다. Fig. 4(g)의 강섬유에서는 hooked 된 부분에서 섬유의 파괴가 발생하였다. twist type과 straight type은 Fig 4(b),(h)의 매끈한 표면을 보였고, Fig. 4(e),(d)의 hooked type과 sinusoidal ends type에서는 변형된 부분에서만 섬유의 굽힘 현상이 나타났다. 부착시험 후 인발강도 및 계면인성과 SEM 사진의 종합적인 분석결과 부분적인 섬유형상의 변형보다는 섬유 전체에 변형을 주었을 때 우수한 성능을 나타내며, 7가지 섬유형상중 crimped type이 가장 좋은 형상을 가진 섬유로 나타났다.

#### 4. 구조용 합성섬유의 최적형상 결정을 위한 부착시험

##### 4.1 부착시험 계획 및 분석방법

7가지 종류의 구조용 합성섬유에 대한 부착시험을 통하여 crimped type의 구조용 합성섬유가 인발강도 및 계면인성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 성능이 가장 우수한 최적형상결정을 위하여 주기( $\lambda$ )와 높이( $a_0$ )를 변화시킨 각 섬유 형상에 대해 고강도, 보통강도의 시멘트 모체에서 다 섬유 및 단섬유로 배열된 시편 6개를 한 번 반복하여 총 144개의 시편의 부착강도 시험을 실시하였다(Fig. 9, Table 10). 계면인성은 단섬유에서 5 mm와 10 mm, 다섬유에서는 10 mm와 15 mm까지 계면인성을 측정하였으며 이로 인한 각 섬유에서의 인발하중 및 계면인성을 비교 분석하였다. 또한 단섬유 시편에서는 섬유의 파괴형태를 관찰하였다.

Table 8 Pullout performance of crimped fibers

Matrix type	Peak load (kgf)	Slip at peak(mm)	Energy to 5mm (kgf-mm)	Pullout		Fracture	
				Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)
High strength matrix	17.03(2.43)	5.79(0.65)	51.36(8.94)	16.2(1.63)	5.8(0.38)	17.59(2.85)	5.79(0.83)
Normal strength matrix	11.48 (2.4)	5.3(1.42)	35.5(7.25)	11.48(2.4)	5.3(1.42)	.	.

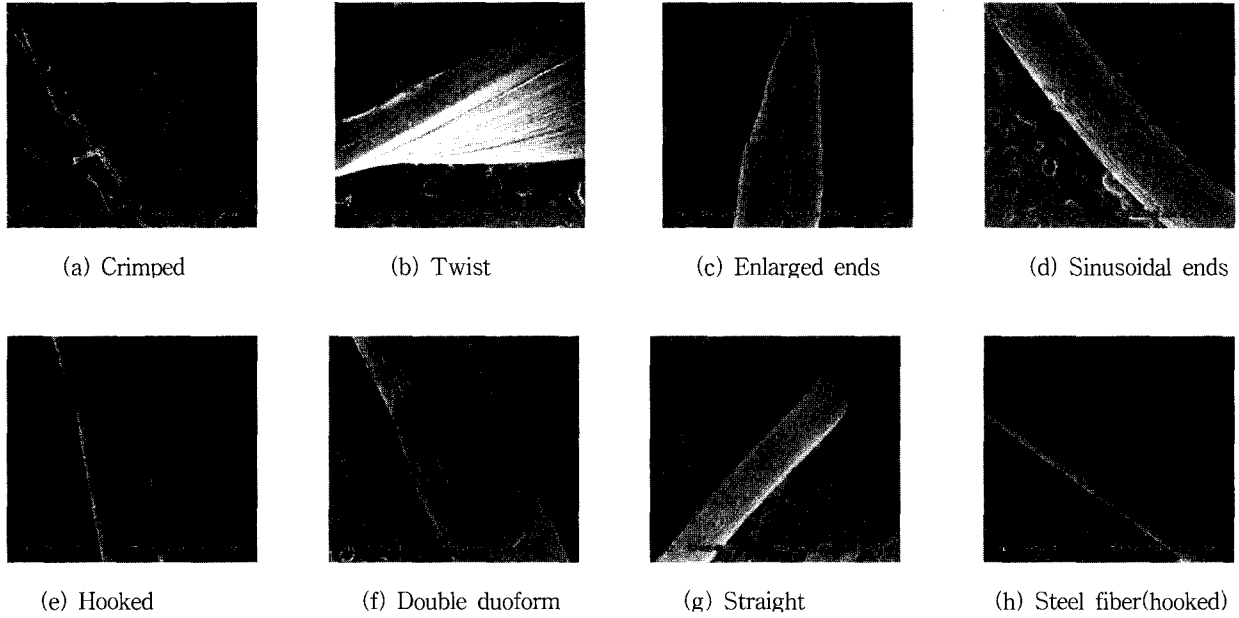


Fig. 4 SEM photograph of fibers after pullout test

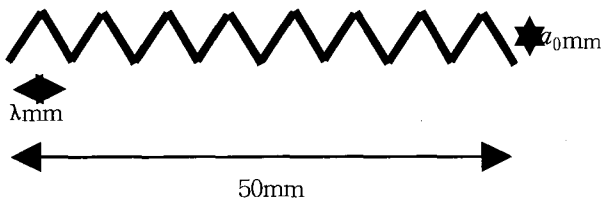


Fig. 5 Geometry of crimped type

Table 9 Geometry of crimped type fiber

Crimped type	$a_0$	$\lambda$
#1	1.2 mm	6 mm
#2	1.2 mm	4 mm
#3	1.8 mm	6 mm
#4	1.8 mm	4 mm

#### 4.2 부착시험결과 및 분석

Crimped type 섬유는 주기 및 높이를 변수로 하여 부착시험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 6, 7 및 Table 10과 같다. 시험결과 인발강도 및 계면인성 모두 단

섬유 및 다섬유, 고강도 및 보통강도 배합에 상관없이 섬유의 높이가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 인발강도의 측면에서는 #1 type보다 #2, #3, #4 type에서 더 큰 인발강도를 보였으며, 계면인성측면에서는 #1, #2 type보다는 #3, #4 type의 섬유가 우수한 계면인성을 보였다.

인발강도와 계면인성에서 가장 우수한 #3와 #4 type의 비교에 있어서 인발강도 측면에서는 #3 type보다 #4 type이 약간 큰 것으로 나타났다. 그러나 계면인성에서는 #3 type이 #4 type보다 크게 나타났다. 이것은 단섬유의 부착 시험결과와 연관해서 생각할 수 있는데 고강도 매트릭스 내에서 단섬유 파괴의 경우, #3와 #4 type의 단섬유 파괴 형태를 보면, 25%만 파괴된 #3 type의 섬유와 비교하여 #4 type은 100% 섬유파괴가 발생하였다. 또한 보통강도 모체의 #3type에서는 섬유가 100% 인발된 반면 #4 type은 100% 파괴되었다. 그러므로 15mm이상의 계면인성을 측정할 경우 계면인성의 차이는 더욱 클 것으로 판단된다. 이로써 인발하중, 계면인성 및 섬유가 끊이지 않고 버틸수 있는 섬유의 최대 길이인 임계길이(critical length)와 연관한 섬유의 파괴 등을 고려하면  $\lambda=6$   $a_0=1.8$  인 #3 type이 가장 우수한 섬유로 판단되었다.

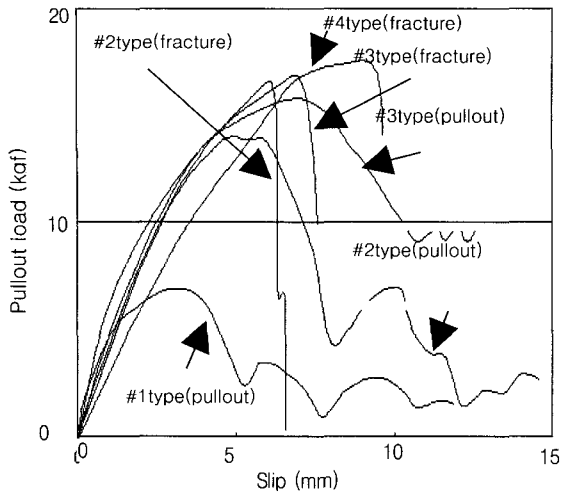


Fig. 6 Pullout response of crimped type four fiber

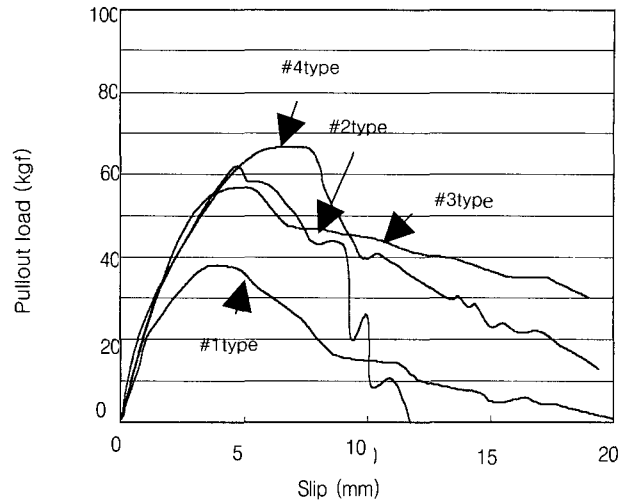


Fig. 7 Pullout response of crimped type four fiber

Table 10 Pullout performance of crimped type fibers

	Single fiber									
	High strength matrix					Normal strength matrix				
	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Failure* mode	Energy to 5mm (kgf-mm)	Energy to 10mm (kgf-mm)	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Failure* mode	Energy to 5mm (kgf-mm)	Energy to 10mm (kgf-mm)
#1	8.32	4.03	P(100 %)	29.44	52.16	6.67	3.40	P(100 %)	23.90	33.00
#2	16.91	5.69	P(40 %) F(60 %)	51.53	89.24	11.58	5.71	P(100 %)	34.91	65.10
#3	16.35	7.03	P(75 %) F(25 %)	47.07	117.64	12.36	5.98	P(100 %)	37.54	88.63
#4	16.77	9.96	F(100 %)	34.15	106.29	15.34	8.73	F(100 %)	35.74	101.93
	Four fiber									
	High strength matrix					Normal strength matrix				
	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Energy to 10mm (kgf-mm)	Energy to 15mm (kgf-mm)	Peak load (kgf)	Slip at peak (mm)	Energy to 10mm (kgf-mm)	Energy to 15mm (kgf-mm)		
#1	36.93	4.33	254.91	317.26	31.41	3.71	205.56	256.47		
#2	68.64	5.53	346.98	384.69	70.04	6.19	421.19	495.23		
#3	58.87	6.4	439.77	556.45	56.32	6.62	427.00	546.68		
#4	73.34	7.26	422.69	524.04	62.08	8.61	386.51	545.83		

\*P : pullout, F : fracture

## 5. 최적 형상 결정을 위한 이론적 형상함수 결정

### 5.1 형상의 선택

최적형상함수(D)를 나타내기 위하여 Fig. 8과 같은 crimped type을 식 (1)로써 정의하였으며, 섬유의 높이 ( $a_0$ ) 및 주기 ( $\lambda$ )의 범위는  $1.2 \leq a_0 \leq 1.8$ ,  $4 \leq \lambda \leq 6$  이다.

$$f(x) = \frac{2a_0}{\lambda} |x|, \quad \left(-\frac{\lambda}{2} \leq x \leq \frac{\lambda}{2}\right) \quad (1)$$

$$f(x) = f(x + \lambda)$$

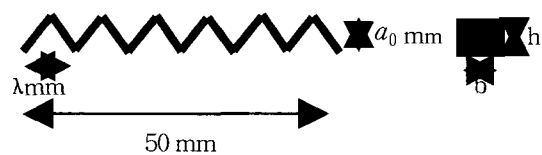


Fig. 8 Definition of crimped type structural fiber for optimum geometry factor

### 5.2 형상함수의 정의

4장의 4종류의 변형을 가진 crimped type에 있어서 Fig. 8에서 정의된 crimped type 섬유의 단

면 즉 밀변과 높이를 기본으로 하여 섬유 주기의 ( $\lambda$ )와 높이( $a_0$ )를 변수로 각 변수에 대해서 선형적으로 증가하는 형상함수를 도출하였으며 식 (2)와 같다.

$$D = b^{a_0} h^{\lambda \beta} \quad (2)$$

여기서,  $D$  : 형상함수  
 $b$  : 섬유단면의 밀변(1.4 mm)  
 $h$  : 섬유단면의 높이(0.7 mm)  
 $a_0$  : 섬유높이  
 $\lambda$  : 섬유주기  
 $\alpha$  : 1/1.2       $\beta$  : 1/6

### 5.3 형상함수와 최대인발에너지

섬유형상 변수는 형상의 주기 및 높이로 인한 인발응력, 인발강도 및 인발에너지(계면인성)에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 섬유보강 효율으로써 일반적으로 가장 크다고 알려진 인발에너지를 기준으로 하였고 부착시험을 통해 단섬유인발의 경우 10 mm, 다섬유 인발의 경우는 15 mm까지 측정된 인발에너지(계면인성)와 형상함수와의 관계를 도출하였다. 이렇게 도출된 최대 인발에너지와 형상함수와의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\psi_{peak} = K_1 D^2 + K_2 D + C \quad (3)$$

여기서,  $\psi_{peak}$  : 최대 인발에너지  
 $D$  : 형상함수  
 $K_1, K_2, C$  : 형상함수(D) 계수

### 5.4 Crimped type별 최대인발에너지와 형상함수와의 관계

식 (3)과 같이 도출된 형상함수( $D$ )와 인발에너지의 관계에 있어서 crimped type의 높이( $a_0$ ) 및 주기( $\lambda$ )의 범위가  $1.2 \leq a_0 \leq 1.8$ ,  $4 \leq \lambda \leq 6$  일 때의 경우에 있어서 인발에너지를 추론할 수 있다.

#### 5.4.1 고강도 모르타르 단섬유

고강도 모체, 단섬유 인발의 경우 형상함수와 인발에너지와의 관계는 Fig. 9와 같다. 형상함수의 범위가  $1 \leq D \leq 1.3$  일 때 회기방정식은  $y = -1210.7D^2 + 2975.5D - 1714.2$  이고, 최대인발에너지는 형상함수( $D$ )가 1.23일 때 114이다.

#### 5.4.2 보통강도 모르타르 단섬유

보통강도 모체, 단섬유 인발의 경우 형상함수와 인발에너지와의 관계는 Fig. 10와 같다. 형상함수의 범위가  $1 \leq D \leq 1.3$  일 때 회기방정식은  $y = -470D^2 + 1311.3D - 808.4$  이고, 최대인발에너지는 형상함수( $D$ )가 1.3일 때 102.9이다.

#### 5.4.3 고강도 모르타르 다섬유

고강도 모체, 다섬유 인발의 경우 형상함수와 인발에너지와의 관계는 Fig. 11과 같다. 형상함수의 범위가  $1 \leq D \leq 1.3$  일 때 회기방정식은  $y = -2485.2D^2 + 6508.6D - 3721.6$  이고, 최대인발에너지는 형상함수( $D$ )가 1.3일 때 539.6이다.

#### 5.4.4 보통강도 모르타르 다섬유

보통강도 모체, 다섬유 인발의 경우 형상함수와 인발에너지와의 관계는 Fig. 12와 같다. 형상함수의 범위가  $1 \leq D \leq 1.3$

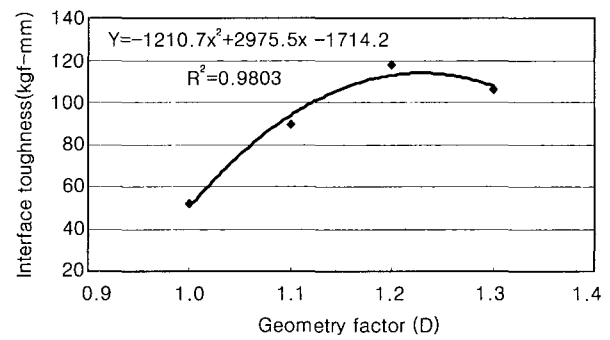


Fig. 9 Interface toughness of single fiber in a high strength matrix

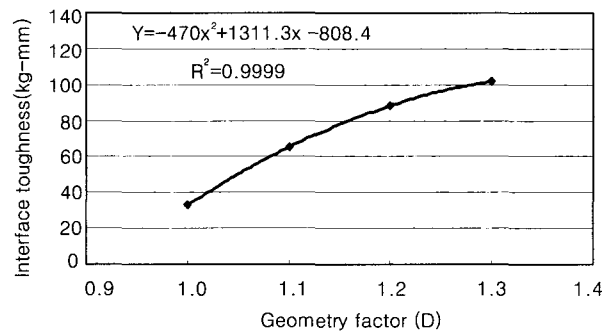


Fig. 10 Interface toughness of single fiber in a normal strength matrix

일 때 회기방정식은  $y = -5990.2D^2 + 14697D - 8443.6$  이고, 최대인발에너지는 형상함수( $D$ )가 1.23일 때 571.14이다.

### 5.5 최적형상함수 도출

형상함수와 인발에너지의 관계에서 형상함수가 증가함에 따라 인발에너지가 감소하기 시작하는 형상함수의 값을  $D_{critical}$ 로 정의하였다. 본 연구에서 실험값 Table 10

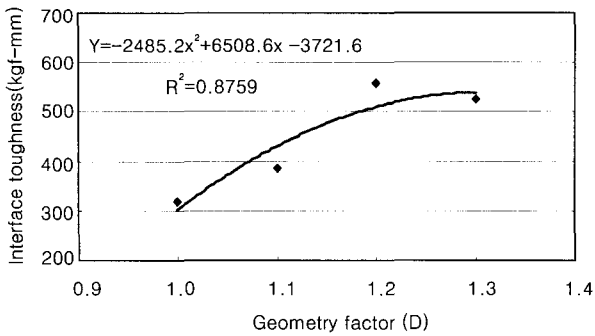


Fig. 11 Interface toughness of four fibers in a high strength matrix

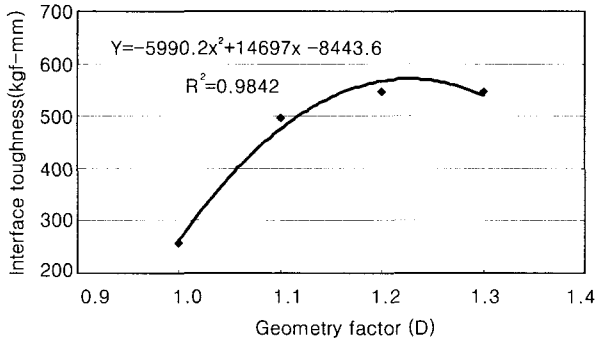


Fig. 12 Interface toughness of four fibers in a normal strength matrix

과 Fig. 9~12의 회귀방정식을 통하여 형상함수가 약 1.2~1.3일 때를 기준으로 하여 감소하는 경향을 보여주었다. 따라서  $D_{critical}$ 을 약 1.2~1.3으로 하였다. crimped type의 구조용 합성섬유에서 최적형상함수 즉  $D_{optimum}$ 을 배합강도에 따른 단섬유 및 다섬유의 인발에너지와 형상함수와의 관계를 종합적으로 평가하여 범위를 1.15~1.25로 결정하였으며,  $D_{optimum} \approx (0.9 \sim 1.05)D_{critical}$ 과 같다.

## 6. 결 론

본 연구는 시멘트 모체와 부착성능이 우수한 최적의 형상을 가진 구조용 합성섬유를 결정하기 위하여 부착성능이 우수하다고 알려진 7가지 섬유 형상을 가지고 JCI SF-8에 따른 인발시험을 통하여 인발강도 및 계면인성을 측정하는 기본시험을 실시하였다. 기본시험결과 7가지의 형상 중 가장 우수한 부착성능을 가지고 있는 1종류의 섬유형상을 결정하여 주기와 높이를 변수로 하여 최적 형상을 결정하기 위한 시험을 실시하여 부착성능이 가장 우수한 최적의 섬유 형상을 시험적으로 결정하였다. 또한 이론적 접근을 통한 최적의 형상함수식을 결정하여 시험과 이론적으로 부착성능이 가장 우수한 최적의 형상을 결정하였다. 부착시험과 이론적 접근을 통한 결과를 요약하면

다음과 같다.

1) 섬유의 인발강도 및 계면인성은 보통 강도 배합보다는 고강도 배합에서 대체적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 이와 같은 결과는 배합의 특성상 고강도 배합이 섬유와 시멘트 모체와의 계면에서 보통강도 보다는 상대적으로 강한 부착력이 작용하기 때문이라 판단된다.

2) 7가지 섬유형상을 가지고 예비시험을 실시한 결과 crimped type이 인발강도 및 계면인성이 가장 우수한 형상을 가진 섬유임을 알 수 있었다.

3) crimped type의 섬유 형상을 주기 및 높이를 변수로 하여 인발시험을 실시한 결과 계면인성은 단섬유 및 다섬유, 고강도 및 보통강도 배합에 상관없이 섬유의 높이가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서는 섬유의 인발강도 및 계면인성과 섬유의 임계길이와 관련된 섬유의 파괴와 같은 모든 조건을 고려하여 #3 type의 형상을 최적 형상으로 결정하였다.

4) 최적의 형상함수를 결정하기 위한 시험결과를 토대로 부착성능이 가장 우수한 crimped type의 섬유를 선택하여 형상함수식을 유도하였으며, 결정된 형상함수식은  $D = b \cdot a^{\alpha} h^{\lambda \beta}$  이다.

5) 결정된 형상함수식에 따른 부착성능이 우수한 최적의 형상을 가진 섬유는  $D_{optimum} \approx (0.9 \sim 1.05)D_{critical}$ 으로  $D_{critical}$ 은 약 1.2~1.3임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Bentur, A. and Mindess, S., "Fiber-Reinforced Cementitious Composites," Elsevier Applied Science, London, 1990, pp.1~11.
2. Balaguru, P. N. and Shah, S. P., "Fiber-Reinforced Cement Composites," McGraw-Hill, Inc., New York, 1992, pp.2~8.
3. Morgan, D. R., "Steel Fiber Reinforced Shotcrete for Support of Underground Openings in Canada," *Concrete International*, November 1991, pp.56~64.
4. Morgan, D. R., Heere, R., McAskill, N., and Chan, C., "Comparative Evaluation of System Ductility of Mesh and Fibre Reinforced Shotcretes," *Engineering Foundation*, New York Sponsored Conference Shotcrete for Underground Support VIII Campos do Jordao, Brazil, April 1999, pp.1~23.
5. Melvyn A. Galinat, "High Performance Polymer Fiber Reinforced Shotcrete," The Millennium Hotel, Sydney, *Proceedings of the 1998 Australian Shotcrete Conference*, 8-9 October 1998.



6. Morgan, D. R., Heere, R., McAskill, N., and Chan, C., "System Ductility of Mesh and Fibre Reinforced Shotcrete," *Proceedings of the ACI Spring Convention*, Chicago(USA), 1999.
7. 이정렬, "강섬유 보강 슛크리트의 현장 적용성 연구," 96-C05-140, 삼성건설 기술연구소, 1996,10. pp.1~3.
8. Clyne, T. W. and Watson, M. C., "Interfacial Mechanics in Fibre-Reinforced Metals," *Composites Science and Technology*, V. 42, 1991, pp.25~55.
9. Naaman, A. E. and Najm. H., "Bond-Slip Mechanism of Steel Fibers in Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 88, No. 2, Sept.-Oct. 1991, pp.135~145.
10. Victor C. Li, and Henrik stangt, "Interface Property Characterization and Strengthening Mechanism in Fiber Reinforced Cement Based Composites," *Advn. Cem. Bas. Mat.* 6. 1997, pp.1~20.
11. Banthia et al. "Metal Fiber With Optimized Geometry for Reinforcing Cement-Based Materials," *United States Patent*, Patent Number : 5,443, 918, Date of Patent : Aug. 22, 1995.
12. Banthia et al. "Fiber Having Improved Sinusoidal Configuration, Concrete Reinforced Therewith and Related method." *United States Patent*, Patent Number : 5,981,630 , Date of Patent : Nov.9, 1999.
13. Synthetic Industries, "S-152 High Performance Polymer," (Tech. Notes), 1998.

## 요 약

본 연구의 목적은 섬유 부착시험을 통하여 섬유의 파괴없이 최대 인발저항을 가지고 시멘트 모체 내에서 완전한 정착작용을 하는 구조용 합성섬유의 최적형상과 최적형상함수를 도출하는데 있다. 7가지 다른 형상의 구조용 합성섬유를 조사하였고 부착시험을 수행하였다. 부착시험의 변수는 7가지의 다른 형상이고, 2종류의 시멘트 모르타르의 배합이다. 부착시험 결과, 7가지 다른 형상중 crimped type이 계면인성(인발에너지)과 인발하중에서 가장 우수한 성능을 보였다. Crimped type을 기본으로 하여 섬유의 주기와 높이를 바꾸어 부착시험을 실시한 결과 최적형상함수,  $D = b^{a_0} h^{A\beta}$  를 도출하였다.

**핵심용어 :** 부착시험, 인발저항, 최적형상, 최적형상함수, 계면인성, 인발하중