

강섬유의 형상비와 혼입률에 따른 강섬유 보강 콘크리트 보의 역학적 특성 추정 모형 개발

Development of Estimation of Model for Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete according to Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber

곽 계 환*† · 황 해 성** · 성 배 경* · 장 화 섭*

Kae-Hwan Kwak · Hae-Sung Hwang · Bai-Kyung Sung · Hwa-Sup Jang

Abstract

Practially useful method of steel fiber for construction work is presented in this study. The most important purpose of this study is to develop a model which can predict mechanical behavior of the structure according to aspect ratio and volume fraction of steel fiber. Experiments on compressive strength, elastic modulus, and splitting strength were performed with self-made cylindrical specimens of variable aspect ratios and volume fractions. The experiment showed that compressive strength was not in direct proportion to volume fraction which doesn't seem to have great influence over compressive strength. However, splitting strength showed almost direct proportion to aspect ratio and volume fraction.

Improvement of optimal efficiency was confirmed when the aspect ratio was 70. Experiments on flexural strength, fracture energy, and characteristic length were carried out with self-manufactured beams with notch.

As a result, increases of flexural strength, fracture energy, and characteristic length according to increase of volume fraction tend to be prominent when aspect ratio is 70. The steel fiber improves concrete to be more ductile and tough. Moreover, regression analysis was the performed and predictable model was developed after determining variables. With comparison and analysis of suggested estimated values and measured data, reliance of the model was verified.

Keywords : Steel fiber, Aspect ratio, Volume fraction of steel fiber, Regression analysis, Model

I. 서 론

콘크리트는 압축강도, 내구성, 강성 등 우수한 물성을 가지고 있으나 인장, 휨 및 충격강도가 낮고 에너지 흡수능력이 작아 취성적이며 균열에 대한 저항성이 작은 단점을 가지고 있다. 반면, 강섬유

* 원광대학교 토목환경공학과 교수
** 원광대학교 토목환경공학과 박사과정
† Corresponding author. Tel.: +82-63-850-6867
Fax: +82-0505-850-6867
E-mail address: kkh6720@kwang.ac.kr

보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete: SFRC)는 콘크리트 내에 임의로 분산된 강섬유를 혼입함으로써 연성의 증가를 얻게 되는 건설 재료이다. 이러한 강섬유 보강 콘크리트는 콘크리트의 취성적인 성격을 보완하여 콘크리트를 연성적이고 인성적인 재료로 완성시킨 것이라고 할 수 있다(이차돈, 1992)(이현호, 2003). 실험을 통한 역학적 특성 추정은 적용성, 실험비용, 실험장소 등의 문제에 직면하게 된다.

본 연구에서는 형상비와 혼입률의 변화를 주어 강섬유 보강 콘크리트 보의 역학적 특성에 대한 모형을 개발토록 하였다. 모형은 기존의 단순 1차방정식의 모형이 아닌 2차 방정식 모형을 통하여 보다 정밀한 예측 값을 추정할 수 있게 하였다.

II. 역학적 특성 추정 모형화

본 연구에서 이용한 강섬유의 형상비 및 혼입률 변수는 실험을 통하여 구한 데이터를 독립변수 x_1 (강섬유의 형상비), x_2 (강섬유 혼입률)으로 구성하였으며, 계수는 총 6개로 이루어진 전체 2차방정식 모형(full quadratic model)을 선정하여 아래 수식으로 표현하였다(Simon, 1999).

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \dots\dots\dots (1)$$

각 계수들은 회귀분석(regression analysis)을 수행하여 산출하였으며, 형상비 및 혼입률의 적절한 실험범위는 기존 연구 자료에 가장 많이 사용되고 있는 범위를 적용하였다 (이차돈, 1992)(곽계환, 2003)(Bayramov, 2004). 즉,

$$55 \leq L/d \leq 80$$

$$0.25\% \leq V_f \leq 1.25\% \dots\dots\dots (2)$$

Table 1 The properties of steel fiber

Type	Length (L), mm	Diameter (d), mm	Aspect ratio (L/d)
Hook	60	0.75	80
	60	0.85	70
	60	0.92	65
	30	0.55	55

III. 실험

1. 실험 개요

본 실험에 사용된 강섬유는 훅(hooked) 모양이며, 강섬유의 특성은 Table 1에 표시하였다. 훅 모양을 선정한 이유는 가장 일반적으로 사용되고 있는 모양이며, Straight 모양의 강섬유 보다 역학적 특성이 개선됨을 확인할 수 있어 사용하였다.

배합설계 시 SFRC는 일반 콘크리트 보다 낮은 작업성을 가지고 있어 고성능 감수제를 사용하였다. 고성능 감수제의 양은 시험배합을 통하여 슬럼프 7.5±2 cm 를 만족하도록 가감하였다. 본 실험에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 비중 2.62인 백마강 강모래를, 굵은골재는 최대치수 25 mm인 쇄석골재를 사용하였다. 본 연구에 사용된 배합설계 및 시험체의 명칭은 Table 2와 같다.

압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도를 위한 시편은 재령 28일 습윤양생하였다. 시편은 각 변수당 10 개씩 제작하여 실험을 실시하였다. 휨강도, 파괴에너지 등의 측정을 위한 시편의 체원은 220×300×360 mm이며, 주철근 D19, 스티럽은 D10을 사용하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 압축강도 실험(KS F 2405), 쪼갬인장강도 실험(KS F 2403), 휨강도실험(KS F

Table 2 The details of mix concrete proportions

Type	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	L/d	Unit volume (kg/m^3)					
							V_f	W	C	S	G	SP (g/m^3)
RC	25	10	2.0	36.1	45.7	-	-	156.24	433	711.24	981.83	866
A55V26	25	8	1.42	36.1	45.7	55	0.26	156.24	433	711.24	981.83	866
A55V75	25	6	1.45	36.1	45.7	55	0.75	156.24	433	711.24	981.83	866
A55V100	25	7	0.65	36.1	45.7	55	1.0	156.24	433	711.24	981.83	866
A55V125	25	7	0.78	36.1	45.7	55	1.25	156.24	433	711.24	981.83	866
A65V26	25	7	0.74	36.1	45.7	65	0.26	156.24	433	711.24	981.83	1732
A65V75	25	6	0.47	36.1	45.7	65	0.75	156.24	433	711.24	981.83	1732
A65V100	25	6	0.79	36.1	45.7	65	1.0	156.24	433	711.24	981.83	1732
A65V125	25	7.5	1.6	36.1	45.7	65	1.25	156.24	433	711.24	981.83	1732
A70V26	25	6	1.48	36.1	45.7	70	0.26	156.24	433	711.24	981.83	2598
A70V75	25	5	1.52	36.1	45.7	70	0.75	156.24	433	711.24	981.83	2598
A70V100	25	7.5	1.62	36.1	45.7	70	1.0	156.24	433	711.24	981.83	2598
A70V125	25	6	1.45	36.1	45.7	70	1.25	156.24	433	711.24	981.83	2598
A80V26	25	8	0.79	39.2	45.7	80	0.26	169.93	433	703.65	946.15	2165
A80V75	25	8	0.79	39.2	45.7	80	0.75	169.93	433	703.65	946.15	2165
A80V100	25	8	0.46	39.2	45.7	80	1.0	169.93	433	703.65	946.15	2165
A80V125	25	9	0.46	39.2	45.7	80	1.25	169.93	433	703.65	946.15	2165

주 - L/d: Aspect Ratio, V_f : Fraction volume of fiber

SP: Superplasticizer agent, Specimen: A55V26 - Aspect ratio 55, Fraction volume 0.26%

Table 3 The details of mix concrete proportions

Test type	Specimen	Dimensions	Parameters
Compression	Cylinder	150×300	Compressive strength(f_{ck}) Modulus of elasticity(E)
Splitting	Cylinder	150×300	Splitting tensile strength(f_{sp})
Three-point bending	Beam	220×300×360 a=40	Fracture energy(G_F) Flexural strength(f_{flex})

2408)을 실시하여 SFRC의 역학적 특성을 분석하였다.

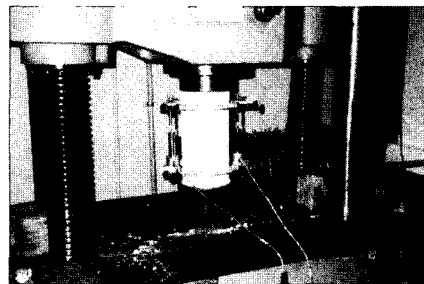


Fig. 1 Test of compressive strength and elastic modulus

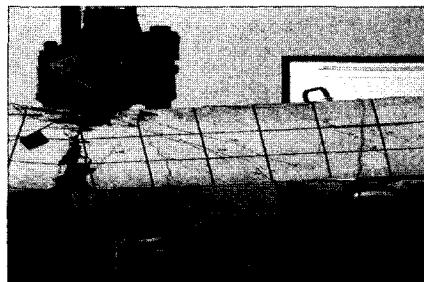


Fig. 2 Test of flexural strength

IV. 실험 결과 및 고찰

강섬유 혼입 시험체의 압축강도, 휨강도 실험 결과를 총괄적으로 나타내면 Table 4와 같다.

1. 압축강도 시험 결과

원주형 공시체의 압축강도 실험결과 Fig. 3 과 같은 결과를 얻었다. SFRC의 압축강도는 강섬유의 형상비의 영향보다는 혼입률의 영향에 따라 증가 경향이 뚜렷하였다. 형상비 65일 경우, 강섬유 혼입률 증가에 따라 압축강도는 최적의 증가형상을 보였으며, 약 2.5 MPa 정도 증가하였다.

Fig. 4에 탄성계수 실험결과를 나타내었다. 탄성 계수 역시 강섬유와 형상비의 영향에 따른 영향보다는 혼입률이 증가함에 따라 탄성계수가 미세하게 증가함을 확인할 수 있었다.

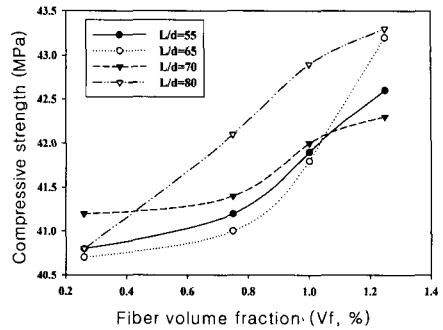


Fig. 3 Compressive strength versus v_f and L/d

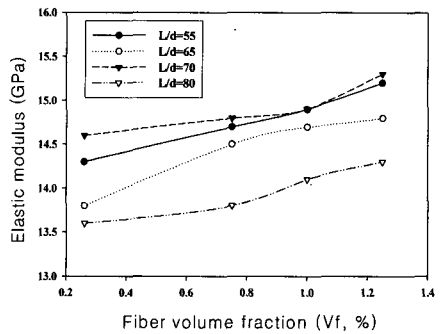


Fig. 4 Elastic modulus versus v_f and L/d

Table 4 Strength and fracture properties of concrete tested

Type	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Splitting strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Fracture energy (N/m)	Characteristic length (mm)
RC	41.8	14.6	4.173	5.65	72	169
A55V26	40.8	14.3	4.017	5.45	1326	1175.1
A55V75	41.2	14.7	4.218	6.28	1468	1212.9
A55V100	41.9	14.9	4.266	6.59	1579	1292.7
A55V125	42.6	15.2	4.345	7.12	1668	1342.9
A65V26	40.7	13.8	4.126	5.89	1419	1150.2
A65V75	41	14.5	4.322	6.24	1628	1263.7
A65V100	41.8	14.7	4.418	6.78	1785	1344.3
A65V125	43.2	14.8	4.490	7.98	2345	1721.5
A70V26	41.2	14.6	4.418	6.08	1865	1395.0
A70V75	41.4	14.8	5.016	6.66	2018	1187.0
A70V100	42	14.9	5.458	6.89	2198	1099.4
A70V125	42.3	15.3	5.662	7.35	2645	1262.3
A80V26	40.8	13.6	4.395	6.25	2010	1415.1
A80V75	42.1	13.8	4.418	6.69	2849	2014.2
A80V100	42.9	14.1	4.520	7.12	2978	2055.2
A80V125	43.3	14.3	4.533	8.19	2898	2016.8

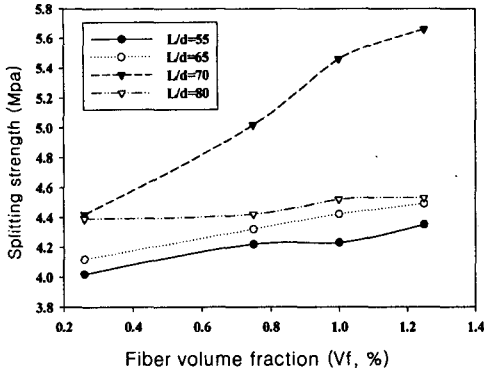


Fig. 5 Splitting strength versus v_f and L/d

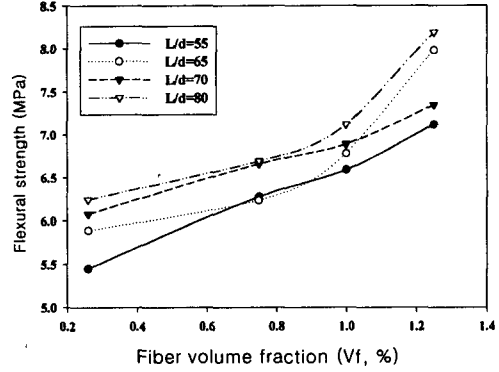


Fig. 6 Flexural strength versus v_f and L/d

2. 쪼갬인장강도 시험 결과

원주형 공시체의 쪼갬인장강도 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 강섬유의 형상비 55일 경우, 혼입률이 증가함에 따라 쪼갬인장강도 역시 4.02 MPa, 4.22 MPa, 4.27 MPa, 4.35 MPa 로 일정하게 미세하게나마 증가하였고, 65일 경우도 4.13 MPa, 4.32 MPa, 4.42 MPa, 4.49 MPa로 정도로 약간 증가하였다. 강섬유의 형상비 70일 경우 인장강도가 강섬유의 혼입률 증가에 따라 약 3 MPa 정도 증가하다. 쪼갬인장시험에서도 강섬유의 형상비의 영향보다는 혼입률의 영향이 더 크다는 것을 확인하였다.

3. 휨강도 시험 결과

노치(Notch)가 있는 보의 휨강도의 측정은 다음 식 (3)에 의하여 측정할 수 있다(Hillerborg, 1976).

$$f_{flex} = \frac{3PS}{2b(h-a)^2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, f_{flex} : 휨강도(MPa), P: 극한하중(kN), S: 경간(cm), b: 두께(cm), h: 높이(cm), a: 노치 길이(cm)이다.

시편의 휨강도 측정결과(Fig. 6), 형상비(L/d)의

증가에 따라 휨강도 역시 증가하는 양상을 보이고 있었다. 강섬유 혼입률에 따른 휨강도는 거의 비례적으로 증가하는 양상을 나타내고 있으며, 휨강도는 형상비(L/d)가 80인 경우 최고 8.19 MPa로 측정되었다.

4. 파괴에너지 해석 결과

강섬유의 중요한 특징 중의 하나인 파괴에너지는 균열의 제어를 통하여 파괴시의 에너지를 증가시키는 역할을 한다. 파괴에너지(G_F)는 하중-처짐 곡선에서 처짐 5 mm 일 때의 면적을 구함으로써 측정이 가능하다(Hillerborg, 1976).

파괴에너지는 다음 식 (4)에 의하여 구할 수 있다.

$$G_F = \frac{W_0}{b(h-a)} + \frac{m(1-\alpha^2)g\delta}{b(h-a)} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, b: 폭, h: 높이, a: 노치길이, m: 보의 중량, g: 중력가속도, δ : 변위, $\alpha = \frac{L}{S} - 1$ 이다.

파괴에너지는 Table. 4, Fig. 7에서 보는 바와 같이 강섬유의 형상비, 혼입률이 증가함에 따라 증가하고 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나, 형상비 80일때 혼입률이 증가함에 따라 파괴에너지는 다소 감소하였는데 이는 배합시 강섬유의 뭉침현상이 발생된 것으로 분석된다. 강섬유의 형상비, 혼입률

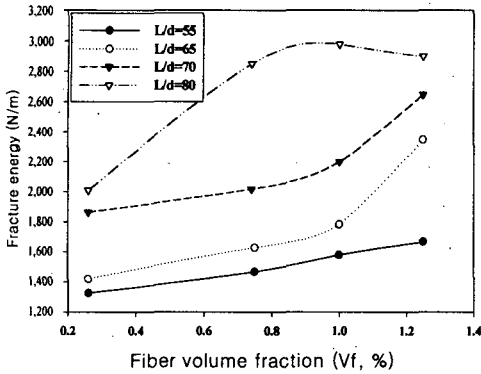


Fig. 7 Fracture energy versus v_f and L/d

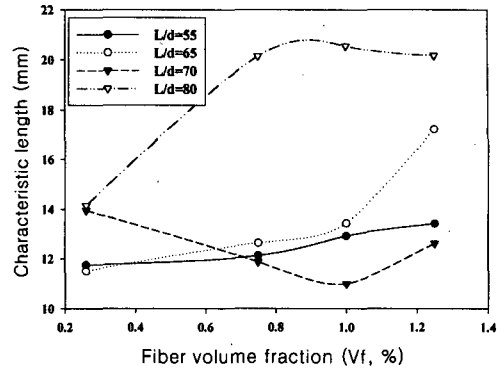


Fig. 8 Characteristic length versus v_f and L/d

이 증가함에 따라 콘크리트를 더욱 연성화 시킴을 알 수 있었고, 이 값은 일반콘크리트의 대략 40배 정도인 것으로 조사되었다(Hillerborg, 1976).

특성길이는 감소하고 있음은 강섬유의 뭉침현상이 심하였다고 판단된다. 그래서 제한사항으로 형상비 70인 경우에는 제외토록 한다.

5. 특성길이(Characteristic length) 해석 결과

특성길이(l_{ch})란 응력 집중 현상이 발생하는 체결부의 파괴를 판정하기 위하여 원공 선단에서 일정한 거리만큼 떨어진 지점에 대하여 파괴를 평가하기 위한 일정한 거리를 말한다.

특성길이는 강도, 파괴모드, 균열길이 등의 제어에 중요한 인자이기 때문에 콘크리트 배합시 신중히 고려해야 한다. 본 연구에서는 특성길이를 구하기 위해 Hillerborg이 G_F , E , f'_t 를 이용해 제안한 다음 식을 적용하였다(단, 직접 인장강도가 아닌 쪼갬인장강도 측정값을 본 연구에서는 적용하였다).

$$l_{ch} = \frac{G_F E}{f_{sp}^2} \dots \dots \dots (5)$$

특성길이는 형상비(L/d)가 55, 65일 경우 증가하는 양상을 보이고 있으나 70일 경우는 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 강섬유 혼입률 역시 혼입률 증가에 따른 특성길이는 증가하고 있으나, L/d=70일 경우는 오히려 혼입률 증가에 따라

V. 회귀분석을 통한 모형식 제안

본 연구에서 제안한 모형의 변수를 구하기 위하여 통계 프로그램을 이용하였다. 실험데이터를 선형 회귀분석을 실시함으로써 적정 변수값을 선정하였다. 회귀분석의 신뢰도는 95%로 하였고, 결정계수는 0.32~0.84, 오차는 0.2~7.8로 추정하였다. 회귀분석결과 변수값들은 Table. 5에 나타내었다.

위에서 구한 변수들을 이용해 처음 제안한 full quadratic function 모형에 적용시키면 다음과 같은 함수들로 표현할 수 있다.

- ▶ Compressive Strength (MPa)

$$= 43.41279 - 0.12129(L/d) + 0.47591V_f + 0.00115(L/d)^2 + 1.272918V_f^2 - 0.00321(L/d)V_f$$
- ▶ Elastic Modulus (MPa)

$$= 5.967903 + 0.260839(L/d) + 1.236489V_f - 0.00208(L/d)^2 + 0.160827V_f^2 - 0.00964(L/d)V_f$$
- ▶ Splitting Strength (MPa)

$$= 12.19502 - 0.088332(L/d) + 10.3234V_f$$

Table 5 Model fitting results for each response

Responses	Coefficients					
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
Compressive strength (f _{ck})	43.41279	-0.12129	0.47591	0.00115	1.272918	-0.00321
Tensile strength (f _{sp})	121.9502	-0.88332	-103.234	-0.00165	13.4878	1.198999
Elastic modulus (E)	5.967903	0.260839	1.236489	-0.00208	0.160827	-0.00964
Flexural strength (f _{flex})	3.517941	0.046532	-0.59719	-0.00015	1.484105	0.001117
Fracture energy (G _F)	2766.743	-68.3137	-1059.49	0.7275	184.2744	22.34926
Characteristic length (l _{ch})	8240.199	-223.792	-753.699	1.75125	133.5989	12.47377

$$- 0.000165(L/d)^2 + 1.34878V_f^2 + 0.119899(L/d)V_f$$

▷ Flexural Strength (MPa)

$$= 3.517941 + 0.046532(L/d) - 0.59719V_f - 0.00015(L/d)^2 + 1.484105V_f^2 + 0.001117(L/d)V_f$$

▷ Fracture Energy (N/m)

$$= 2766.743 - 68.3137(L/d) - 1059.49V_f + 0.7275(L/d)^2 + 184.2744V_f^2 + 22.37926(L/d)V_f$$

▷ Characteristic Length (mm)

$$= 8240.199 - 223.792(L/d) - 753.699V_f + 1.75125(L/d)^2 + 133.5989V_f^2 + 12.47377(L/d)V_f$$

위의 함수들을 이용하여 도해적으로 나타내면 Fig. 9~Fig. 14와 같다.

VI. 모형 검증

회귀분석으로 구한 모형의 신뢰성을 검증하기 위하여 실험 데이터 값과의 오차율을 비교, 분석하였다. 압축강도의 추정모형과 측정 데이터 값과의 비교

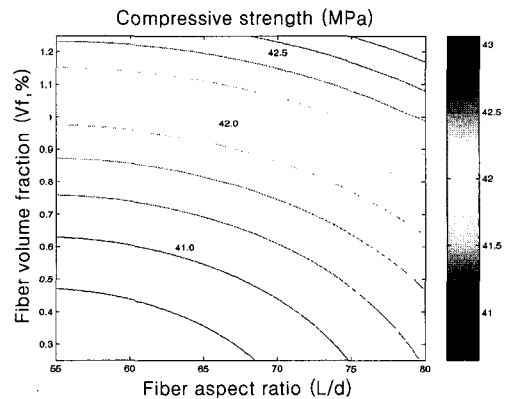


Fig. 9 Estimated compressive strength versus v_f and L/d

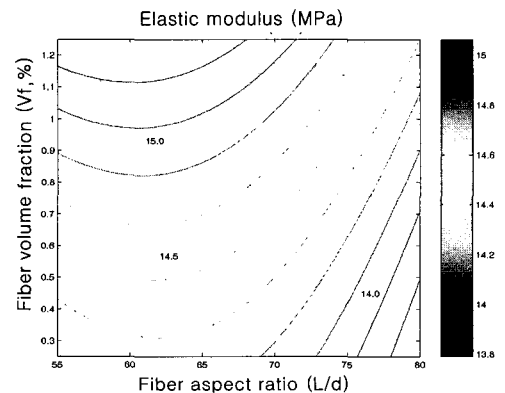


Fig. 10 Estimated elastic modulus versus v_f and L/d

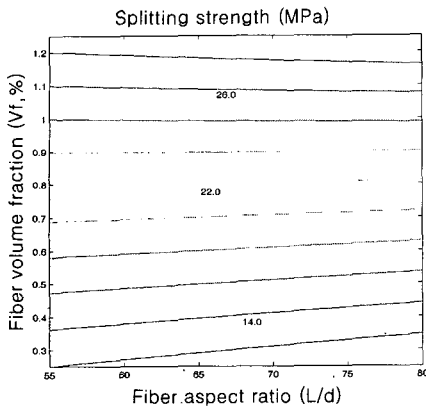


Fig. 11 Estimated splitting strength versus v_f and L/d

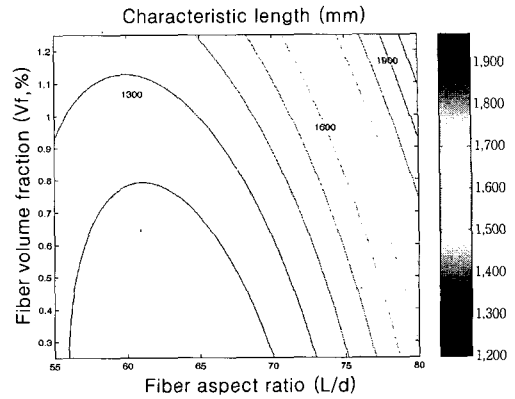


Fig. 14 Estimated characteristic length versus v_f and L/d

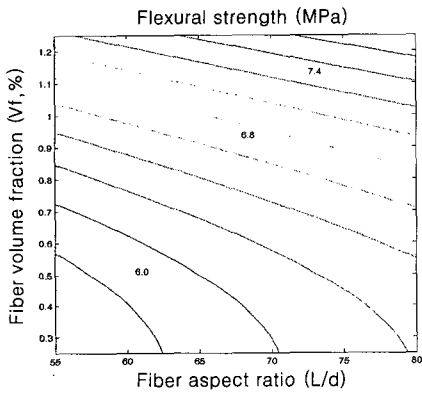


Fig. 12 Estimated flexural strength versus v_f and L/d

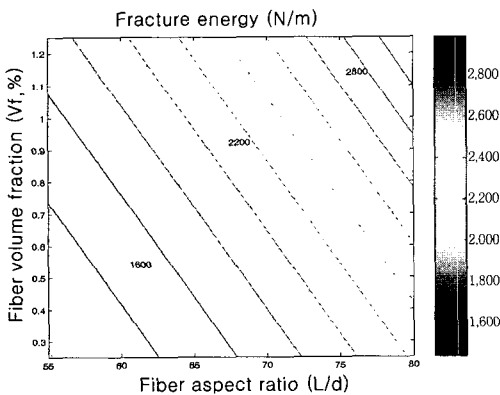


Fig. 13 Estimated fracture energy versus v_f and L/d

결과 오차율 ($\frac{\text{실험데이터} - \text{추정데이터}}{\text{실험데이터}} \times 100$)이 0.566 %로 비교적 정밀도가 높음을 확인할 수 있었다. 탄성계수 값에서는 오차율이 1.319 %, 인장강도값에서는 11.7 % 정도로 다른 결과값에 비해 비교적 낮은 정확도를 확인하였다. 휨강도값에서는 오차율이 2.04 %, 파괴에너지 오차율은 5.73 %, characteristic length 오차율은 9.18 %를 나타내었다. 위의 오차율을 보면 본 연구에서 제안한 모형의 오차율이 약 5 % 정도로 높은 정밀도를 갖음을 확인할 수 있었다.

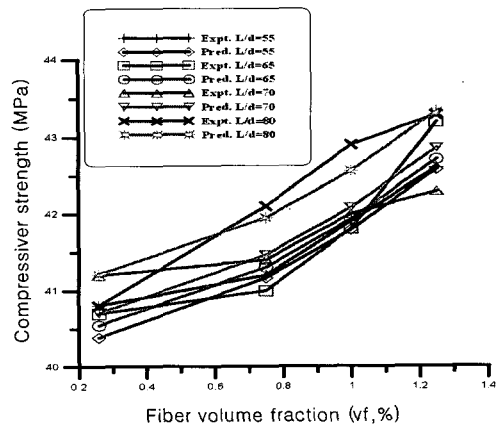


Fig. 15 Compressive strength, Pred. and Expt.

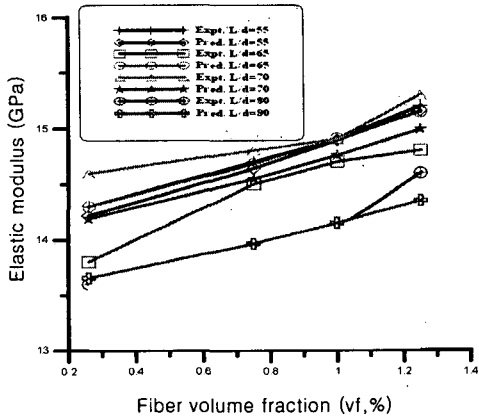


Fig. 16 Elastic modulus, Pred. and Expt.

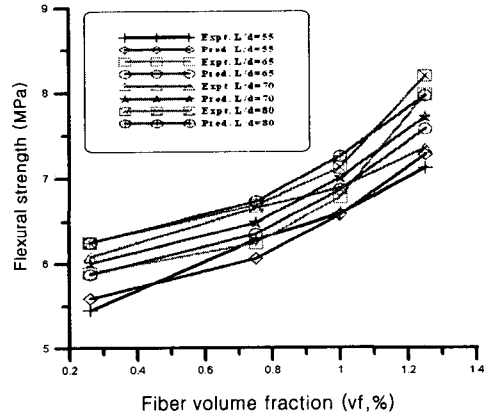


Fig. 19 Fracture energy, Pred. and Expt.

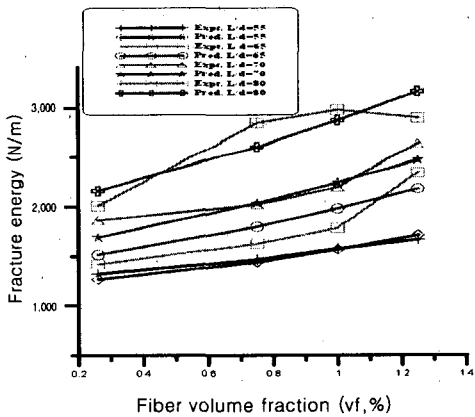


Fig. 17 Splitting strength, Pred. and Expt.

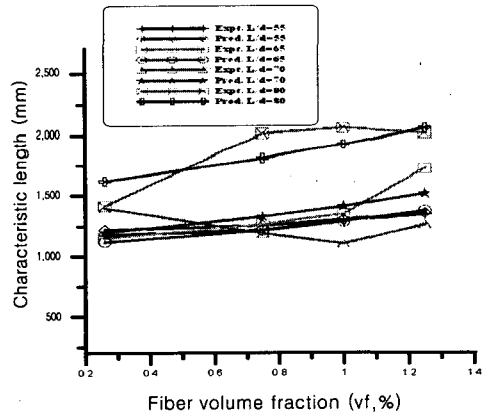


Fig. 20 Characteristic length, Pred. and Expt.

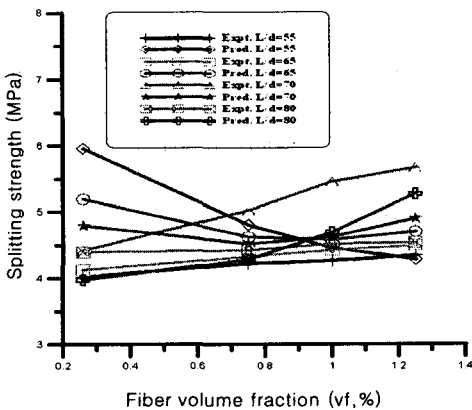


Fig. 18 Flexural strength, Pred. and Expt.

Ⅶ. 결 론

본 연구에서는 역학적 특성을 규명하기 위해 full quadratic model의 모형화를 설정한 후, 변수를 구하기 위하여 회귀분석을 실시하여 다음과 같은 함수식을 도출하였다. 위의 함수식으로부터 강섬유의 형상비(L/d), 혼입률(V_f)에 따른 구조물의 역학적 특성을 예측할 수 있다.

▷ Compressive Strength (MPa)

$$= 43.41279 - 0.12129(L/d) + 0.47591V_f$$

$$+ 0.00115(L/d)^2 + 1.272918V_f^2 - 0.00321(L/d)V_f$$

▷ Elastic Modulus (MPa)

$$= 5.967903 + 0.260839(L/d) + 1.236489V_f - .00208(L/d)^2 + 0.160827V_f^2 - 0.00964(L/d)V_f$$

▷ Splitting Strength (MPa)

$$= 12.19502 - 0.088332(L/d) - 10.3234V_f - 0.000165(L/d)^2 + 1.34878V_f^2 + 0.119899(L/d)V_f$$

▷ Flexural Strength (MPa)

$$= 3.517941 + 0.046532(L/d) - 0.59719V_f - 0.00015(L/d)^2 + 1.484105V_f^2 + 0.001117(L/d)V_f$$

▷ Fracture Energy (N/m)

$$= 2766.743 - 68.3137(L/d) - 1059.49V_f + 0.7275(L/d)^2 + 184.2744V_f^2 + 22.37926(L/d)V_f$$

▷ Characteristic Length (mm)

$$= 8240.199 - 223.792(L/d) - 753.699V_f + 1.75125(L/d)^2 + 133.5989V_f^2 + 12.47377(L/d)V_f$$

본 연구에서 제안한 모형의 오차율이 약 5 % 정도로 높은 정밀도라는 사실을 확인할 수 있었다.

또한, 강섬유 형상비와 혼입률이 증가함에 따라 역학적 특성 또한 증가하는 경향을 나타내고 있다.

제언사항으로 강섬유 보강 콘크리트의 경우 섬유 의 뭉침현상으로 응력 집중이 발생할 우려가 있으므로 배합시 철저한 품질관리가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 원광대학교 교비 지원에 의해 연구되었습니다.

References

1. Lee Cha Don, "Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications", Korean society of steel construction, 1992, pp. 53-59.
2. Lee Hyun-Ho, Keon Young-Ho, Jung Hyun-Seok, "Determination of Optimum Reinforcing Ratio Considering Steel Fiber Shape and Volume Fraction Ratio", Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 2003, pp. 251-256.
3. Kwak Kae-Hwan, Park Jong-Gun, Jang Hwa-Sup, "Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Continuous Beams under Cyclic Loading", Journal of the Korean society of agricultural engineers, Vol. 46, No. 6, 2004, pp. 47-58
4. Simon M. J., Lagergren E. S. and Wathne L. G., "Optimising high-performance concrete mixtures using statistical response surface method". In: Proceeding of the 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Oslo, Norway: Norwegian Concrete Association, 1999, pp. 1311-1321.
5. Hillerborg A, Modeer M and Peterson P. E., "Analysis of crack formation and crack growths in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", Cement & Concrete Research, 1976, pp. 773-782.
6. Bayramov F., Tasdemir C. and Tasdemir M. A., "Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method", Cement & Concrete Composites, 2004, pp. 665-675.