



## 직교배열표를 이용한 고강도콘크리트 내화성능 보강재의 배합 최적화 연구

이문환<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 건축구조·자원연구실

## A Study on the Optimization of the Mix Proportions of High Strength Concrete Fire-Resistant Reinforcement Using Orthogonal Array Table

Mun-Hwan Lee<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Building Structure & Resource Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

**ABSTRACT** The peculiarity pointed out for high strength concrete is the occurrence of spalling during a fire. Recently, there are many efforts such as development of all types of spalling reducing materials and other innovative materials in various fields. Need is now to examine the adequate mixing proportions of these materials. This study intended to derive experimentally and statistically mix proportions that can represent the basic quality requirements as well as the optimal effects on the fire-resistance for 4 types of functional materials that are metakaolin, waste tire chip, polypropylene fiber and steel fiber. Here, the tests were planned through an optimal test method using an orthogonal array table with 4 parameters and 3 levels. The statistical analysis adopted the response surface analysis method. Results verified mutual complementary contribution between the materials when using a combination of the functional materials selected as parameters for the strengthening of the fire-resistance of 80 MPa-class high strength concrete. Besides, the optimal conditions of the fire-resistance strengthening materials derived through response surface analysis were a volumetric replacement of silica fume by 80% of metakaolin, a volumetric replacement of fine aggregates by 3% of tire waste chip, and an addition of 0.2% of the whole volume by polypropylene fiber without mixing of steel fiber. In such cases, the basic characteristics as well as the fire-resistant characteristics of high strength concrete were also satisfied.

**Keywords :** high strength concrete, fire-resistant, spalling, orthogonal array, response surface analysis

### 1. 서 론

화재시 발생하는 고온은 고강도콘크리트의 시멘트 매트릭스와 골재간의 결합을 가져오게 되며, 또한 폭발현상의 주원인이 된다. 그 동안 고강도콘크리트의 내화성능을 개선하기 위한 다수의 재료적 보강과 공법연구가 이루어져 왔으나 60 MPa 급 이하의 콘크리트에 국한되거나 비용 상승의 부담 등으로 성능 개선에 있어 한계점을 나타내었다. 이에 따라 근본적으로 고강도콘크리트 재료특성 자체의 개량으로 보다 높은 강도범위에서 내화성능을 보강하는 방안의 개발이 고려되어 왔다.

콘크리트의 내화특성 개선을 재료 자체적으로 확보하기 위해서는 다양한 기능성 소재의 기여가 필요할 것이다. 본 연구에서는 80 MPa 급 고강도콘크리트의 내화성능 개선 소재들의 최적 조성비를 찾기 위해 주요 혼화재인 실리카폼 대신 내화성능을 갖고 있는 메타카올린으

로 대체하여 콘크리트의 내화성능 확보 효과를 우선적으로 기대하였다.

또한 페타이어칩과 폴리프로필렌섬유의 혼입으로 기존 폴리프로필렌섬유가 갖고 있던 콘크리트 매트릭스 내의 수증기를 배출하는 네트워크 메커니즘에 페타이어칩의 터미널 공극 형성을 통한 수증기압 분산과 이를 중심으로 미세균열을 유도하는 두 이중섬유간의 시너지 효과를 이용하고, 강섬유의 사용으로 폭발로 인한 매트릭스의 결합으로부터 발생하는 균열들 사이의 응력전달에 대한 다리효과 (bridge effect)와 섬유 뽑힘 (pull-out)의 인성 부여를 통하여 폭발 부위의 탈락을 방지하는 기능을 도입한 후, 화해에 저항하는 복합적 효과의 전체적 기여도를 분석하고, 그 결과를 토대로 실용적인 배합수준을 도출하고자 하였다.

### 2. 실험 계획 및 방법

#### 2.1 실험 계획

실험을 위해 Table 1을 모배합으로 하는 고강도콘크리

\*Corresponding author E-mail: mhlee@kict.re.kr  
Received August 6, 2008, Revised November 18, 2008  
Accepted December 22, 2008  
©2009 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Mix proportions of concrete mixture (kg/m<sup>3</sup>)

W	B (binder)			Fine agg.	Coarse agg.	AD (B×1.7)	W/B (%)	S/a (%)	Air (%)
	Blast furnace slag cement	Fly ash	Silica fume	Sea sand	Lime stone				
160.0	557.2	32.4	51.0	702.5	874.3	12.2	25	45	1.5

트에 내화성능 보강을 위한 주요재료로서 메타카올린, 페타이어칩, 폴리프로필렌섬유, 강섬유 4인자를 Table 2와 같이 3수준으로 배치하였다. 실험 수준은 기왕의 실험 결과 및 예비실험에서 유효범위로 규명된 범주를 적용한 것이며, 각 인자의 수준은 메타카올린의 실리카폼에 대한 용적치환율, 페타이어칩의 잔골재에 대한 용적치환율, 폴리프로필렌섬유의 전체용적에 대한 첨가율, 강섬유의 전체용적에 대한 치환율로서 구성하였다.

한편 4인자 3수준의 전조합실시법에 의한 총 실험횟수는 81가지의 배합실험에 이르게 된다. 본 실험에서는 각 인자간의 교호작용 (interaction) 가운데 기술적으로 무시할 수 있는 것을 주 효과 (main effect)에서 교락 (confounding) 시켜 최소한의 실험으로 모든 경우에 대한 실험 결과를 예측할 수 있는 L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>)의 직교배열표를 이용하여 실험 계획을 수립하였다.<sup>1,2)</sup>

## 2.2 사용 재료

### 2.2.1 메타카올린

메타카올린은 국내 C사에서 판매하는 밀도 2.5의 중국산으로서 물리적 성능 및 화학성분은 Table 4와 같다.

### 2.2.2 페타이어칩

페타이어칩은 국내 K사의 제품으로서, 구성 성분과 물리적 성능은 Table 5와 같다.

### 2.2.3 폴리프로필렌 섬유

폴리프로필렌 섬유는 국내 S사 제품으로 길이 15 mm의 스트레이트형 (straight type)을 친수처리하여 사용하였으며, 그 형상과 물리적 성질은 Table 6과 같다.

### 2.2.4 강섬유

강섬유는 국내 K사 제품의 치수 Ø0.5 mm × 30 mm의

**Table 2** Parameters and their levels

Factors	Levels			Tests
	1	2	3	
A : Metakaolin <sup>(1)</sup>	0	50	100	slump flow air content compressive st. flexural st. max. rebar temp. spalling volume
B : Waste tire chip <sup>(2)</sup>	0	5	10	
C : Polypropylene fiber <sup>(3)</sup>	0	0.1	0.2	
D : Steel fiber <sup>(4)</sup>	0	0.5	1	

<sup>(1)</sup>Volume replacement of silica fume

<sup>(2)</sup>Volume replacement of fine aggregate

<sup>(3)</sup>Adaptive rate of total volume

<sup>(4)</sup>Replacement rate of total volume

**Table 3** Layout using orthogonal array (L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>))

No.	Factor				Mix condition
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	A1B1C1D1
2	1	1	2	2	A1B1C2D2
3	1	1	3	3	A1B1C3D3
4	1	2	1	2	A1B2C1D2
5	1	2	2	3	A1B2C2D3
6	1	2	3	1	A1B2C3D1
7	1	3	1	3	A1B3C1D3
8	1	3	2	1	A1B3C2D1
9	1	3	3	2	A1B3C3D2
10	2	3	1	1	A2B3C1D1
11	2	3	2	2	A2B3C2D2
12	2	3	3	3	A2B3C3D3
13	2	1	1	2	A2B1C1D2
14	2	1	2	3	A2B1C2D3
15	2	1	3	1	A2B1C3D1
16	2	2	1	3	A2B2C1D3
17	2	2	2	1	A2B2C2D1
18	2	2	3	2	A2B2C3D2
19	3	2	1	1	A3B2C1D1
20	3	2	2	2	A3B2C2D2
21	3	2	3	3	A3B2C3D3
22	3	3	1	2	A3B3C1D2
23	3	3	2	3	A3B3C2D3
24	3	3	3	1	A3B3C3D1
25	3	1	1	3	A3B1C1D3
26	3	1	2	1	A3B1C2D1
27	3	1	3	2	A3B1C3D2

**Table 4** Properties of metakaolin

Density	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Ignition loss (%)	Chemical composition (%)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
2.5	11,500	2.1	52.0	40.0	3.0	1.2	0.5

양단 후크형 번들을 사용하였으며, 형상 및 제원은 Table 7과 같다.

## 2.3 실험 방법

내화성 고강도콘크리트의 최적조건을 도출하기 위한 평가항목은 ① 기본특성 실험과 ② 내화특성 실험으로 나누어 진행하였다. 기본특성 실험 항목으로는 슬럼프플로


**Table 5** Properties of waste tire chip

Density	Ignition loss (%)	Organic impurities (%)	Water absorption (%)	Particle size (mm)	Polymer (%)	C/B (%)	Ash (%)
1.16	0.76	9.73	0.03	1.12~3.00	52.0	40.0	3.0

**Table 6** Properties of polypropylene fiber

Density	Length (mm)	Diameter (μm)	Meltung temp. (°C)	Evaporation temp. (°C)	Burning temp. (°C)	Thermal conductivity (W/m.k)
0.9	19	50	171	341	460	0.15

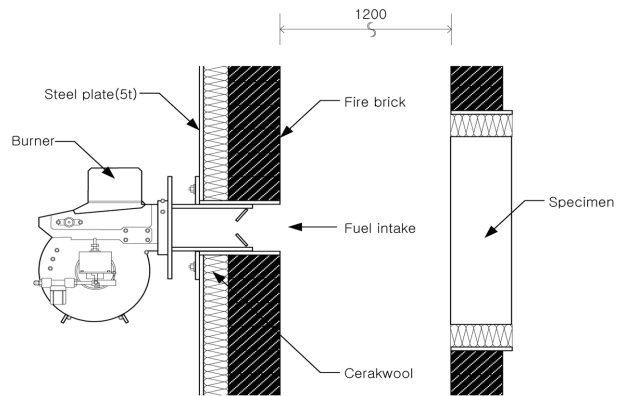
**Table 7** Properties of steel fiber

Geometry of fibers	Cross section shape	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	
	hooked end	round	30	0.5	60	7.85	10.79

우, 공기량, 압축강도 및 휨강도를 선정하였고, 내화특성 실험항목은 500 × 500 × 150 mm 크기의 내부에 철근을 배근한 피복두께 40 mm의 실험체를 Fig. 1과 같이 제작하여, 고온 가열시 주근의 온도 측정과 표층폭렬에 의한 체적손상률을 측정하였다. 이때, 실험체의 기본특성 항목 중 휨강도는 규정된 요건은 아니지만, 대부분의 폭렬 현상이 매트릭스의 휨인성 부족에 기인하는 경향이므로 요구 성능을 가중시키기 위해 추가하였으며, 내화특성 항목으로 주근최고온도와 표층폭렬체적을 모두 채택한 것은 통상 실험체의 내화성능을 주근최고온도로 평가할 수 있지만 온도측정 위치의 대표성에 제약이 있기 때문이고, 표층폭렬체적 역시 균열이나 비탈락성 박리에 의한 온도영향을 반영하기 곤란하기 때문에 양자를 동시에 고려하여 실험체의 내화성능을 평가하고자 하였다.

내화시험 가열장비는 고강도콘크리트의 주근온도 평가와 부재의 폭렬특성 분석을 위하여 Figs. 2 및 3과 같이 1면 가열이 가능하고 Fig. 4에 나타낸 ISO 834-1의 표준 온도 가열곡선을 모사하는 콘크리트 시험용 고온가열로를 제작하였다.

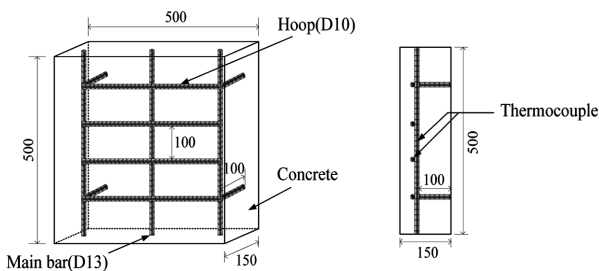
기본특성 실험 항목의 수행 방법은 규정된 KS 규격에 의해 수행하였으며, 내화특성 실험 항목으로 내화실험체의 주근의 온도, 내화실험 가열로 내부의 온도 등을 측정하기 위하여 데이터로거를 사용하여 1회/분의 기록으로 3개소에서 180분까지 측정한 평균값을 채택하였다 (Fig. 5 참조). 또한, 내화실험이 끝난 후 실험체를 디지털 이미지로 스캐닝한 후 흑백의 두 가지 색으로 전환하는 2분법에 의하여 각 이미지의 폭렬면적을 측정하고, 실험체에 10 mm 간격의 x축, y축의 그리드를 설정하여



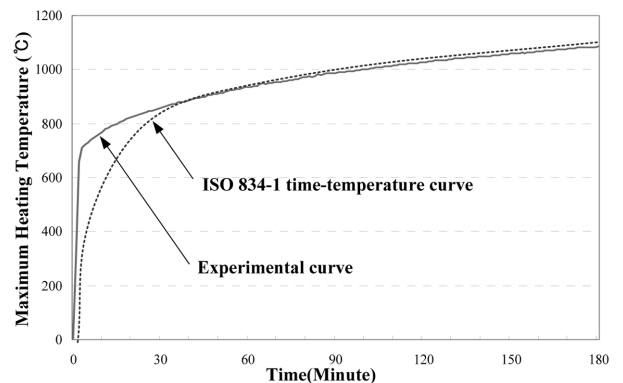
**Fig. 2** Schematic diagram of fire-resistance test apparatus



**Fig. 3** Installation of fire-resistance test apparatus



**Fig. 1** Schematic diagram of specimen



**Fig. 4** Experimental and ISO 834-1 temperature-time curves



Fig. 5 Measurement of temperatures using data logger

각 깊이 측정 데이터의 평균값에 폭렬면적을 곱하여 표층폭렬체적으로 취급하였다.

### 3. 실험 결과 및 최적화 도출

#### 3.1 실험 결과

직교배열에 의한 총 27가지의 각 배합에 대해 기본실험 항목인 슬럼프플로우, 공기량, 압축강도, 휨강도 실험 결과와 내화특성인자인 주근의 최고온도, 표층폭렬체적의 측정 결과를 정리하여 Table 8에 나타내었다.

##### 3.1.1 슬럼프플로우

슬럼프플로우 실험 결과, 목표 슬럼프플로우인  $650 \pm 150$  mm를 대부분 만족하였으나 5(M1W2P2S3), 9(M1W3P3S2), 12(M2W3P3S3)의 배합은 420~520 mm를 나타내어 비교적 낮은 수준의 유동성을 보였으며, 기본배합 외에 13(M2W1P1S2), 19(M3W2P1S1), 26(M3W1P2S1) 등의 배합은 목표값보다 높은 수준을 나타내었다. 메타카올린의 혼입량 증가에 따른 슬럼프플로우 손실은 고로슬래그시멘트와 플라이애쉬의 배합설계로서 실리카폼을 100% 치환한 배합에서도 790 mm의 결과값을 나타내는 등 양호한 유동성을 보였다.

또한, 12(M2W3P3S3)의 결과에서 알 수 있듯이 페타이어칩, 폴리프로필렌섬유, 강섬유가 3수준으로 혼입된 배합은 메타카올린을 50% 치환한 2수준으로 혼입하였음에도 가장 좋지 못한 결과를 보이는 것으로 확인되었다.

##### 3.1.2 공기량

공기량 실험 결과, 목표 공기량인 1.5%를 대부분 만족하였으며 메타카올린의 혼입량이 증가할수록 목표 수준에 근접해지며 안정적으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한, 페타이어와 강섬유의 혼입은 공기량을 증가시키는 작용을 하고 있는데 이는 재료의 배합초기 유동성이 충분히 확보되지 않은 상태에서 다른 재료들과 혼합되며 생기게 되는 공극형성에 따른 것으로 분석된다.

Table 8 Test results of each test using the orthogonal array

Test no.	Tested type	Slump flow (mm)	Air cont. (%)	Comp st. (MPa)	Flexural st. (MPa)	Max. rebar temp (°C)	Spalling volume (cm <sup>3</sup> )
1	M1W1P1S1	800	1.5	84.40	6.68	865.9	2,958.4
2	M1W1P2S2	670	1.5	88.60	7.20	539.1	956.0
3	M1W1P3S3	610	1.6	87.35	7.59	459.6	432.9
4	M1W2P1S2	700	1.7	82.99	6.80	521.9	1,743.3
5	M1W2P2S3	520	1.9	81.08	7.15	457.7	453.7
6	M1W2P3S1	590	1.8	78.76	6.70	452.0	97.8
7	M1W3P1S3	560	2.2	76.20	6.83	448.5	381.9
8	M1W3P2S1	640	2.0	77.77	6.10	503.5	372.7
9	M1W3P3S2	460	2.2	74.54	6.87	459.8	139.6
10	M2W3P1S1	710	1.7	71.02	6.21	613.4	1,662.3
11	M2W3P2S2	610	1.9	73.40	6.65	558.9	312.0
12	M2W3P3S3	420	2.2	78.55	7.03	471.3	88.7
13	M2W1P1S2	760	1.4	90.95	7.21	647.5	2,305.7
14	M2W1P2S3	680	1.5	93.15	7.43	481.5	504.7
15	M2W1P3S1	700	1.2	86.45	6.91	440.1	0.5
16	M2W2P1S3	620	1.7	83.62	6.92	519.9	1,918.8
17	M2W2P2S1	680	1.5	76.60	6.44	452.5	2.0
18	M2W2P3S2	510	1.7	82.39	6.82	469.5	123.2
19	M3W2P1S1	790	1.5	79.40	6.25	714.4	2,209.6
20	M3W2P2S2	700	1.7	75.40	6.64	470.6	430.7
21	M3W2P3S3	560	1.6	80.78	7.01	437.7	1.5
22	M3W3P1S2	740	1.5	71.37	6.15	490.7	680.2
23	M3W3P2S3	580	2.0	72.78	7.20	444.2	230.9
24	M3W3P3S1	630	2.2	68.52	6.32	444.7	5.1
25	M3W1P1S3	740	1.4	84.72	6.92	531.3	1,745.7
26	M3W1P2S1	780	1.3	86.28	6.67	457.5	91.0
27	M3W1P3S2	680	1.5	86.44	6.97	441.2	1.6

##### 3.1.3 압축강도

먼저, 강섬유는 수준별로 혼입량의 증가에 따라 다소 압축강도가 증가되는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 폴리프로필렌섬유도 비슷한 경향을 보였다. 실리카폼을 치환한 메타카올린은 혼입 수준이 증가할수록 강도의 감소 특성이 다소 나타나는 것을 확인하였으나 이는 미미한 수준이라 할 수 있다. 페타이어칩은 예비실험과 같이 혼입량의 비율이 많아질수록 강도의 감소가 나타나는 것으로 분석되었다.

##### 3.1.4 휨강도

휨강도 실험 결과의 특이사항은 강섬유 혼입에 대한 변동경향이다. 즉, 강섬유의 혼입률이 증가할수록 휨강도는 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였고 최대 휨과괴하중 이후에도 유의한 연성을 보임을 알 수 있었다.

이러한 경향은 강섬유를 혼입하지 않은 배합보다 고온시의 내부압력에 대한 부재의 안정성으로 기대될 수 있다.

### 3.1.5 주근최고온도 및 표층폭렬

실험체1 (M1W1P1S1)을 제외하면 철근이 노출되는 폭렬현상은 일어나지 않았으며, 내부온도조건의 분포는 10 mm, 20 mm, 띠철근, 30 mm, 주철근, 40 mm, 50 mm의 순으로 모든 실험체에서 동일한 양상을 나타내었다.

실험체의 표층폭렬은 무시할 수 있는 수준이며, 주근의 최고온도가 국토해양부 공고 제2008-146호의 허용기준 (649°C) 이내의 이력을 유지한 실험체는 Table 9와 같다.

또한, 폭렬이 시작된 시점부터 온도상승에 따른 실험체 내부로부터의 수증기 배출이 가열 이면에서 확인되었으며, 폭렬음이 더 이상 발생하지 않은 약 30분 후부터 수증기의 배출량이 증가하였다. 이는 수증기압이 폭렬의 원인이 된다는 가설을 뒷받침 할 수 있는 현상이다.

모든 실험체가 온도 상승과 함께 실험 개시 후 30분까지 폭렬이 발생하는 것은 아니었다. 일부 실험체는 1시간에서 길게는 2시간까지 폭렬이 진행되는 것이 관찰되었는 바, 폭렬지속 시간이 길수록 깊이가 작은 형태로 폭렬이 발생하였다. 짧은 시간동안 폭발적으로 폭렬이 발생된 경우에는 비교적 깊이가 깊은 형태를 나타냈으며 폭렬면적도 넓게 형성되었다. 이와 같은 현상은 각 배합에 따른 실험체의 수증기 배출 능력과 직접적으로 연관이 있는 것으로 분석된다.

Fig. 6은 주요 실험체의 폭렬 양상을 예시한 것이다.

### 3.2 기여도 분석

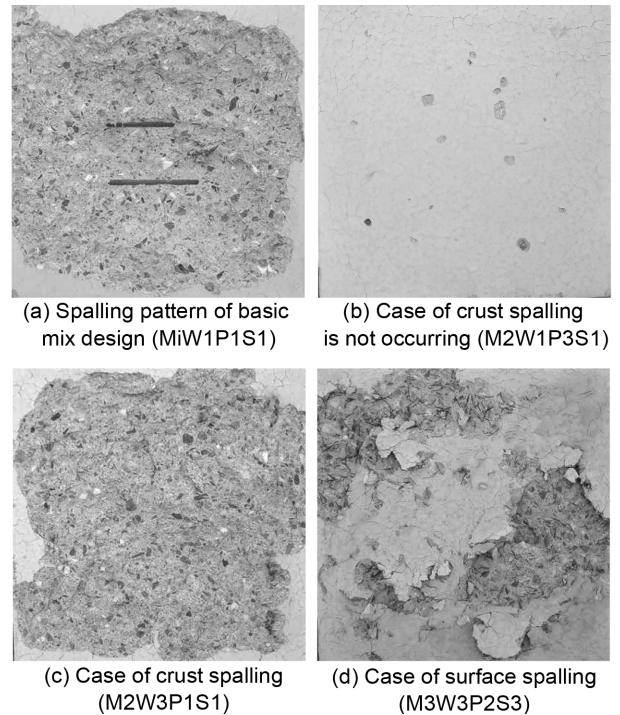
직교배열표상의 실험값을 대상으로 ANOVA 분석을 통해 구한 결정계수 ( $R^2$ )를 이용하여 독립변수의 기여도를 산출하였다. 각 독립변수의 기여도 ( $R_{xi}^2$ )는 각 독립변수의 결정계수 ( $SSR_{xi}$ )를 결정계수의 총합 (SST)으로 나누어 계산하였다. 또한, 전체의 결정계수는  $R^2 = SSR/SST$

**Table 9** Maximum rebar temperature results of fire resistance test

Experimental no. (level of each factors)	Maximum rebar temperature (°C)
15(M2W1P3S1)	440.1
17(M2W2P2S1)	452.5
21(M3W2P3S3)	437.7
24(M3W3P3S1)	444.7
26(M3W1P2S1)	457.5
27(M3W1P3S2)	441.2

**Table 10** ANOVA analysis results using adjust SS (dum of dquare)

	Slump flow		Air content		Compressive strength		Flexural strength		Max rebar temp.		Spalling volume	
	c (%)	p	c (%)	p	c (%)	p	c (%)	p	c (%)	p	c (%)	p
R-Sq (%)	94.03		84.36		89.78		88.99		55.69		80.15	
Metakaolin	10.31	0.000	9.36	0.015	5.58	0.020	5.35	0.028	1.88	0.682	1.38	0.547
Wast tire chip	26.56	0.000	64.61	0.000	79.80	0.000	26.98	0.000	4.74	0.393	7.56	0.055
PP fiber	35.10	0.000	5.04	0.081	0.01	0.920	7.66	0.009	39.52	0.003	70.45	0.000
Steel fiber	23.38	0.000	5.35	0.071	4.39	0.040	49.00	0.000	10.55	0.140	0.77	0.711



**Fig. 6** Main cases of surface spalling

로 계산하며, 오차의 분산비로서 결정계수가 높을수록 모형의 설명력이 높은 것으로 취급하였다. 독립변수인 메타카올린, 페타이어칩, 폴리프로필렌섬유, 강섬유가 종속변수인 슬럼프플로우, 공기량, 압축강도, 휨강도, 주근최고온도, 표층폭렬체적에 미치는 영향에 대한 기여도 분석 결과는 Table 10과 같다.

한편 Fig. 7은 일반선형모형을 통한 분석의 결과로 내화성능 보강인자의 혼입수준별 각 실험항목의 결과값에 대한 효과를 나타낸 추세선이다.

### 3.3 반응표면분석

반응표면분석은 내화성능 보강인자를 각 실험 결과값 간의 미지의 함수로 나타내는 것으로서, 최소자승법에 의하여 적합한 반응표면 수식으로 표현할 수 있으며 이를 행렬로 나타내어 최적 반응조건을 결정하게 된다.

일반적으로 반응표면식은 알려져 있지 않으므로 근사적인 모형을 상정한 후 결합결여검정을 통하여 모형식의 적합성을 평가할 필요가 있다.<sup>3)</sup> 반응표면분석에서는 근사적인 모형으로 1차 모형 혹은 2차 모형이 사용되는데

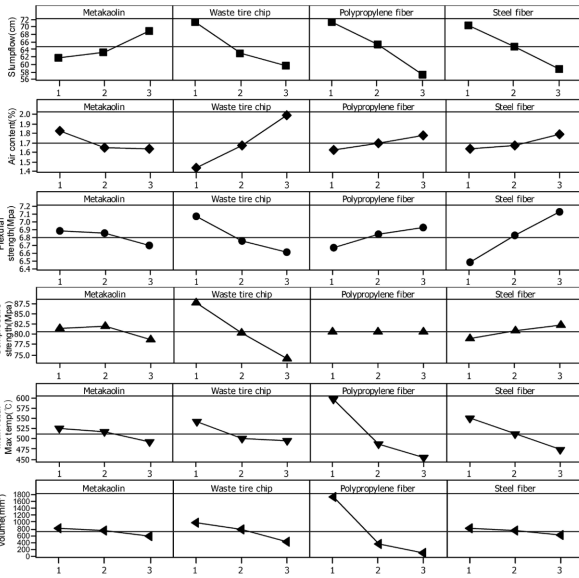


Fig. 7 Main effect plots for independent variables

예로, 독립변수가 둘인 경우에 1차 모형은

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_{12} x_{1i} x_{2i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

로 표현된다. 그리고 2차모형은 1차모형에 제곱항이 추가되어

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_{11} x_{1i}^2 + \beta_{22} x_{2i}^2 + \beta_{12} x_{1i} x_{2i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

로 표현할 수 있다.

Table 11은 반응표면분석에 대한 결과값이다.

### 3.4 배합인자의 최적배합 도출

각 실험 항목에 대한 2차 반응표면 모형식이 추정되면,

Table 11 Response surface modeling analysis

Term	Slump flow	Air content	Comp. strength	Flexural strength	Max rebar temp.	Spalling volume
Cons'	102.800	1.73556	88.0456	6.97222	1509.81	75503.1
$x_1$	-9.367	-0.39222	8.3356	0.09611	-43.58	-3743.8
$x_2$	-11.811	-0.02000	-7.5061	-0.89667	-227.95	-8310.7
$x_3$	-1.311	-0.22000	-1.7894	0.23611	-424.91	-40987.6
$x_4$	-2.922	0.15778	1.3372	0.30889	-184.73	-4788.1
$x_1^2$	2.056	0.08333	-1.9378	-0.06611	-9.38	-504.0
$x_2^2$	2.389	0.03333	1.1221	0.08222	17.02	-605.3
$x_3^2$	-0.778	0.00000	-0.0928	-0.04278	38.80	5436.4
$x_4^2$	-0.278	0.03333	-0.2628	-0.01444	-0.15	-124.8
$x_1 x_2$	1.400	-0.01778	0.8195	0.06556	19.64	1537.7
$x_1 x_3$	0.378	0.06222	0.2362	-0.00511	2.55	26.1
$x_1 x_4$	0.600	-0.06222	-0.0296	-0.02600	10.71	721.6
$x_2 x_3$	-1.733	0.11556	0.2449	0.03733	41.24	3222.8
$x_2 x_4$	-1.511	-0.01556	0.1184	0.06378	7.15	-818.3

내화성능 보강인자의 수준 즉, 반응변수를 최적화하는 최적공정조건 (optimal response condition)을 구할 수 있게 된다. 최소제곱법에 의하여 적합한 반응표면은 식 (3)과 같다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

식 (3)에 따라 독립변수의 수에 따른 2차 반응표면 모형식을 유도할 수 있다. 독립변수의 수가 4로서  $k=4$ 이면, 이때 2차 반응표면 모형식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_4 x_4 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 \\ & + \hat{\beta}_{13} x_3^2 + \hat{\beta}_{44} x_4^2 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{33} x_3^2 + \hat{\beta}_{44} x_4^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 \\ & + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{14} x_1 x_4 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 + \hat{\beta}_{24} x_2 x_4 + \hat{\beta}_{34} x_3 x_4 \end{aligned} \quad (4)$$

위 식을 행렬을 이용하여 표현하면 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + (x_1, x_2, x_3, x_4) \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12/2} & \beta_{12/2} & \beta_{14/2} \\ \beta_{12/2} & \beta_{22} & \beta_{23/2} & \beta_{24/2} \\ \beta_{13/2} & \beta_{23/2} & \beta_{23} & \beta_{34/2} \\ \beta_{14/2} & \beta_{24/2} & \beta_{34/2} & \beta_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \hat{\beta}_0 + x' b + x' B x \quad (5)$$

여기서,  $x$ ,  $b$ ,  $B$ 는 각각 다음과 같다.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12/2} & \beta_{12/2} & \beta_{14/2} \\ \beta_{12/2} & \beta_{22} & \beta_{23/2} & \beta_{24/2} \\ \beta_{13/2} & \beta_{23/2} & \beta_{23} & \beta_{34/2} \\ \beta_{14/2} & \beta_{24/2} & \beta_{34/2} & \beta_{24} \end{bmatrix}$$

최적반응조건을 구하기 위하여,  $\hat{y}$ 를  $x$ 로 미분하면 식 (6)이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (\beta_0 + x' b + x' B x) \\ &= b + 2Bx \end{aligned} \quad (6)$$

$x$ 에  $x_0$ 을 대입하여  $b + 2Bx_0$ 을 계산하면 식 (7)을 구할 수 있다.

$$x_0 = -B^{-1} b \quad (7)$$

이 점  $x_0$ 을 정상점 (stationary point)이라고 부르며, 추정된 2차 반응표면식의 형태에 따라 최대, 최소, 혹은 변곡점 세 가지 중 하나가 된다.<sup>4)</sup> 그리고 정상점이 최대, 최소, 혹은 변곡점인지를 판정하기 위한 방법으로 정준

분석 (canonical analysis)과 그림을 이용한 방법 두 가지의 방법이 있으나 본 연구에서는 정준분석을 이용하여 최적배합을 유도하였다.

최적배합비를 결정하기 전에 각 실험값에 대해 얻고자 하는 물성 범위를 각 실험 항목별로 결정한 뒤 최적배합을 결정할 수 있다.

Table 12는 최적배합비 결정을 위한 실험항목의 물성 한계값을 나타낸 것이다. 여기서 슬럼프플로우는 작업성을 고려하여 목표값이었던 650 mm의 범위에서 유동성이 확보되는 ±150 mm의 범위로 설정하였다. 공기량은 배합 설계시 목표값인 1.5%에서 ±0.5%의 범위로 정하였으며, 압축강도와 휨강도의 목표는 각각 80 MPa, 7 MPa로 설정하였으나 내화성능 보강인자로 인한 물성변화를 고려하여 약 10% 범위수준인 ±10 MPa, ±2 MPa로 최적배합의 조건 범위를 한정하였다. 주근최고온도의 상한값은 국내 내화구조 인정기준인 538°C로 설정하였으며 하한값은 본 연구에서 채택한 실험체 중에서 주근최고온도가 가장 낮게 나온 수치를 기준으로 하였다. 표층폭렬체적의 한계값 범위 중 상한값은 비교적 양호한 체적 손실로 판단할 수 있는 범위인 625 cm<sup>3</sup> (전체체적의 약 2%)로 설정하였으며 하한값은 실험체 중에서 가장 작게 폭렬체적 손실을 보인 실험체를 기준으로 설정하였다.

위와 같이 각 실험 항목의 물성 한계값 설정 후, 최적 배합비를 결정하기 위하여 각 실험 항목의 Table 10에서 결정된 최적배합 추정식의 계수를 바탕으로 통계 프로그램인 Minitab ver.14.2의 반응최적화 도구를 통해 Fig. 8과 같은 최적배합곡선과 최적배합값을 얻을 수 있었다.

최적배합비 도출 결과, 메타카올린은 2.6129 수준으로서 이를 배합설계시 계산된 실리카폼과의 체적 치환률로서 환산하면 약 80% 비율에서 최적 수준이 되며, 마찬가지로 페타이어는 3%의 잔골재와 체적 치환율이, 폴리프로필렌섬유는 콘크리트 전체 체적의 0.2% 첨가가, 강섬유는 혼입하지 않아도 최적수준의 배합이 유도됨을 알 수 있다. 내화성능 분석 결과로는 강섬유가 유의한 인자임이 확인되었으나, 초기의 심층 폭렬에 대하여 내화성

Table 12 Response optimizer setup

Tests	Lower	Target	Upper
Slump flow (mm)	500	650	800
Air content (%)	1.0	1.5	2.0
Compressive strength (MPa)	70	80	90
Flexural strength (MPa)	5	7	9
Maximum rebar temperature (°C)	437.7	-	538
Spalling volume (cm <sup>3</sup> )	0.5	-	625

Table 13 Results of optimizing verification test

Condition	Slump flow (mm)	Air cont. (%)	Comp. strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Max rebar temp. (°C)	Spalling volume (cm <sup>3</sup> )
Basic mix design (M1W1P1S1)	800	1.5	84.40	6.68	865.9	2,958.4
Optimize mix design (M2.6W1.6P3S1)	730	1.6	83.42	6.88	443.6	23.7

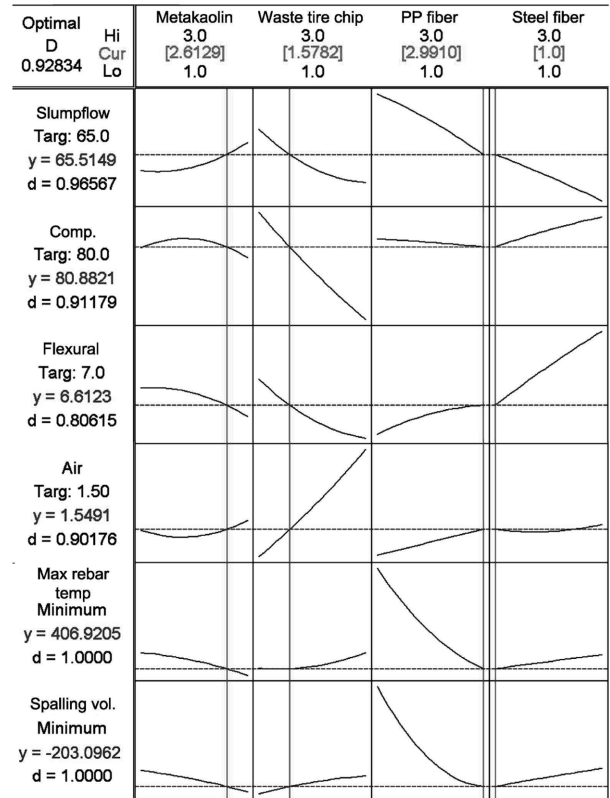


Fig. 8 Results of response optimization

능을 발휘하기 어려우며 슬럼프플로우와 같은 시공성 측면에서 다른 인자보다 불리함을 가지고 있는 한편, 경제성 측면 등을 고려할 때 강섬유의 사용 없이 다른 인자들만의 배합조정으로도 소요의 성능을 발현할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 3.5 도출된 최적배합 수준의 성능 확인

상기 과정을 통해 도출된 내화성능 보강인자의 최적조건은 해석에 의한 결과이므로, 실제로 제작된 콘크리트 매트릭스의 품질특성 및 내화성능이 어느 정도인지 확인할 필요가 있다.

따라서 상기 직교배열표 상의 배합 수준과 동일한 모 배합 및 형상으로 실증 실험체를 제작하고, 상기 최적화 실험과 동일한 절차를 거쳐 확인 실험을 수행하였다.

Table 13은 최적화 수준의 콘크리트를 제작하여 확인 실험한 결과이다.

실험 결과 기본물성인 슬럼프플로우, 공기량, 압축강도 및 휨강도는 목표값을 상회하거나 기준 배합과 유사한 수준을 나타내었으며, 주근 최고온도 역시 허용온도를 초

## 4. 결 론

화재시에 발생하는 고강도콘크리트의 폭발현상에 대한 대책의 일환으로, 4종의 폭발 저감성 재료의 최적 혼입률을 도출하기 위한 실험 및 통계분석 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 80 MPa급 고강도콘크리트의 내화특성을 배합재료 자체로 개량하고자 메타카올린, 페타이어칩, 폴리프로필렌섬유, 강섬유 등을 내화성능 보강인자로 선정 후, 4인자 3수준 직교배열표에 의한 ANOVA 분석을 수행한 결과, 기본물성 특성과 내화특성 간의 기여도는 상호 보완적인 작용을 하는 것으로 확인되었다.
- 2) 반응표면분석을 통해 도출한 내화성능 보강인자의 최적조건은 메타카올린을 실리카폼 대신 80% 수준으로 용적치환하고, 페타이어칩은 잔골재 대신 3% 수준으로 용적치환하는 경우와 폴리프로필렌 섬유를 전체용적에 대하여 0.2% 수준으로 첨가하는 한편, 강섬유를 혼입하지 않는 것이 유리한 것으로 분석되었으며, 이 경우 고강도콘크리트의 기초특성과 내화특성을 고루 만족할 수 있는 것으로 검토되었다.
- 3) 내화성능 분석결과로는 강섬유 역시 유의한 인자임이 확인되었으나, 시공성 측면에서 다른 인자보다 불리함을 가지고 있으며 경제성 측면 등을 고려할 때 다른 인자들만의 배합조정으로도 비슷한 수준 이상의 성능을 발현할 수 있을 것으로 판단되었다.

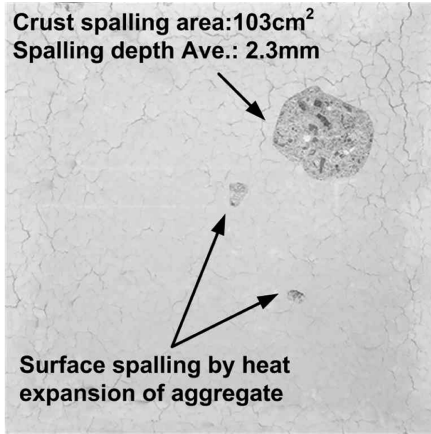


Fig. 9 Actually measured surface shape of the specimens after completion of fire-resistance test

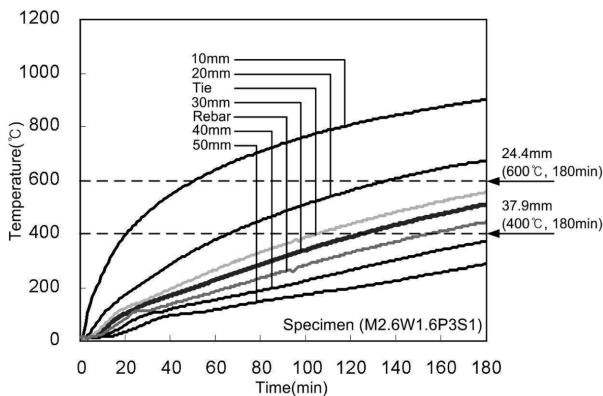


Fig. 10 Temperature of each part of the specimen measured during the fire-resistance test

과하지 않으며, 표층폭렬 역시 무시할 수 있는 상태로 미약하게 나타났다.

Fig. 9는 실증 실험체의 내화실험 종료 후 형상을, Fig. 10은 실험체 내부의 온도 이력을 나타낸 것이다.

이로서, 반응표면분석을 통해 도출된 내화성능 보강인자의 최적화 수준에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

한편, 실험 결과를 통해 Eurocode<sup>5)</sup>에서 간편화된 구조내화설계 계산법으로 유효단면 산정시 권장하는 400°C 등온선은 37.9 mm 정도이며, 기둥의 세장비 계산시 고려해야 하는 600°C 등온선은 24.4 mm 정도인 것으로 검토되었다.

## 참고문헌

1. Phadke M. S., *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, New Jersey, 1989, pp. 7~9.
2. Taguchi, G., *Systems of Experimental Design (Vol.1, 2)*, Kraus International Publications, New York, 1987, pp. 1075~1080.
3. 이승훈, Minitab을 이용한 공학통계 자료분석, 이레테크, 2006, pp. 627~629.
4. 이상복, Minitab을 이용한 다구찌 기법 활용, 이레테크, 2006, pp. 62~68.
5. Eurocode 2, *Design of Concrete Structures-Part 1-2; General Rules-Structural Fire Design*, 2004, pp. 60~62.

**요 약** 고강도콘크리트의 취약점으로 지적되고 있는 화재시의 폭발현상에 대한 대책을 마련하기 위해 각 계의 노력이 활발한 현 상황에서 각종 폭발 저감성 재료 및 새로운 개념의 소재에 대한 적정 혼입비율을 구명해야 하는 긴요한 상황이다. 본 연구에서는 메타카올린, 페타이어칩, 폴리프로필렌섬유 및 강섬유의 4가지 기능성 소재를 대상으로, 기본적인 품질 요건은 물론, 내화성능에 최적의 효과를 나타낼 수 있는 배합비를 실험적, 통계적으로 도출하고자 하였다. 여기서, 실험은 4인자 3수준의 직교배열표를 이용하여 최소실험법으로 계획하고, 통계적 분석은 반응표면분석 기법을 이용하였다. 그 결과, 80 MPa급 고강도콘크리트의 내화성능 보강인자로 선정된 기능성 소재간에는 복합 사용시 상호 보완적인 기여를 하는 것으로 확인되었다. 한편, 반응표면분석을 통해 도출한 내화성능 보강인자의 최적조건은 메타카올린을 실리카폼 대신 80% 수준으로 용적치환하고, 페타이어칩은 잔골재 대신 3% 수준으로 용적치환하는 경우와 폴리프로필렌 섬유를 전체용적에 대하여 0.2% 수준으로 첨가하는 한편, 강섬유를 혼입하지 않는 것이 고강도콘크리트의 기초특성과 내화특성을 고루 만족할 수 있는 것으로 분석되었다.

**핵심어** : 고강도콘크리트, 내화, 폭발, 직교배열표, 반응표면분석