



## 반응표면분석법에 따른 경량기포콘크리트 최적배합 도출에 관한 연구

이상안<sup>1)</sup> · 정찬우<sup>1)</sup> · 김희중<sup>1)</sup> · 안정현<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>경북대학교 건축토목공학과

### Optimized Mixing Design of Lightweight Aerated Concrete by Response Surface Analysis

Sang-An Lee,<sup>1)</sup> Chan-Woo Jung,<sup>1)</sup> Wha-Jung Kim,<sup>1)</sup> and Jung-Hyun Ahn<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

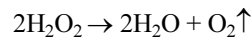
**ABSTRACT** This paper presents the optimized mixing design of lightweight aerated concrete using hydrogen peroxide. Design of experiments in order to the optimized mixing design was applied and commercial program (MINITAB) was used. Statistical analysis was used to Box-Behnken (B-B) method in response surface analysis. The influencing factors of experimental are unit cement content, water ratio and hydrogen peroxide ratio. According to the analysis of variance, at the hardened state, water ratio and hydrogen peroxide ratio affects on dried density, compressive strength and bending strength of lightweight aerated concrete, but unit cement content affects on only dried density. In the results of response surface analysis, to obtain goal performance, the optimized mixing design for lightweight aerated concrete using hydrogen peroxide were unit cement content of 800 kg/m<sup>3</sup>, water ratio of 44.33% and hydrogen peroxide ratio of 10%.

**Keywords :** lightweight aerated concrete, hydrogen peroxide, response surface analysis, Box-Behnken (B-B) method

#### 1. 서 론

샌드위치 패널은 밀도 대비 높은 강성과 낮은 열전도성, 건식공법의 장점 등으로 인하여 건축 공사 전반에 널리 사용되어오고 있지만, 샌드위치패널의 화재성능 확보 방안이 인명 및 재산보호 측면에서 매우 시급한 과제를 시사하고 있다.<sup>1)</sup> 따라서 이 연구에서는 샌드위치 패널의 문제점을 보완하여 기존에 있는 샌드위치 패널을 보다 환경적이고, 내화, 차음, 단열, 내구성능이 우수한 고성능 샌드위치 패널을 개발하고자 하며 샌드위치 패널 심재의 내부 충전재로서 경량성을 유지하고 취약한 내화성을 극복하기 위해 경량기포콘크리트를 적용하고자 한다. 경량기포콘크리트는 기포성형 방법에 따라 가스콘크리트(gas concrete)와 폼콘크리트(foamed concrete)로 대별되며, 또한 양생 방법에 따라 NAAC(non-autoclaved)와 AAC (autoclaved)로 분류 된다.<sup>2,3)</sup> 가스콘크리트는 굳지 않은 콘크리트에 발포제를 혼입하였을 때, 그 화학적 반응에 의해서 생성된 기체로 인하여 기공이 형성되는 원리이다. 폼콘크리트는 기포제의 물리적 계면활성 작용에 의해 얻어진 기포를 굳지 않은 콘크리트에 혼입시키는 원리이다.<sup>2,3)</sup> 이 연구에서는 가스콘크리트의 대부분을 차지하고 있

는 알루미늄 분말로 발포한 고온고압양생 방법이 아닌, 과산화수소를 이용한 상온양생으로 강도 특성만을 고찰 하였으며, 후속 실험에서 내화, 차음, 단열, 내구성능 실험을 할 것이다. 발포는 시멘트 슬러리 내에 과산화수소를 혼합하여 산소가스의 발생을 유도하는 방법이다.



#### 2. 반응표면분석법

반응표면분석<sup>4)</sup>(response surface analysis)은 여러 개의 독립변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수( $\eta$ )에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 일반적으로 반응표면분석을 통해 독립변수들( $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ )과 반응변수( $\eta$ )간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 따른 반응양(반응변수의 값)의 변동성을 예측하며, 독립변수들의 어떠한 값에서 반응양이 최적화(optimize)될 것인가를 찾아낸다. 또한 인자들의 주어진 범위 이내에서 기존의 요인실험법으로 실시하면 다수의 수준을 설정하여 그 결과값으로 통계적 분석을 실시한다.

독립변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 와 반응변수 ( $\eta$ )간의 관계를 함수  $f$ 로 나타내면

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$$

\*Corresponding author E-mail : f1126611@knu.ac.kr

Received May 11, 2009, Revised July 10, 2009

Accepted August 18, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

새로 정의된 독립변수에 의한 1차 회귀 모형을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k$$

최소 제곱법에 의하면 적합한 반응표면식은

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

로 표현된다. 만약 독립변수의 수가 3으로  $k=3$ 인 경우

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_3x_3 + \hat{\beta}_{11}x_1^2 + \hat{\beta}_{22}x_2^2 + \hat{\beta}_{33}x_3^2 + \hat{\beta}_{12}x_1x_2 + \hat{\beta}_{13}x_1x_3 + \hat{\beta}_{23}x_2x_3$$

위식을 행렬을 이용하여 간략히 바꾸어 쓰면

$$\hat{y} = \beta_0 + (x_1, x_2) \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} + (x_1, x_2) \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 \\ \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx$$

$\hat{y}$  를  $x$ 로 미분하면

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\beta_0 + x'b + x'Bx) = b + 2Bx$$

$x_0$ 를 정상점이라고 부르며

$$x_0 = -B^{-1}b/2$$

의 공식에 의하여 구해진다. 이 정상점은 적합한 2차 반응표면에서 다음의 세 가지 중 하나가 된다.

- (1)  $\hat{y}$  가 최대가 되는  $x$ 의 점
- (2)  $\hat{y}$  가 최소가 되는  $x$ 의 점
- (3)  $\hat{y}$  가 최대도 아니고 최소도 아닌  $x$ 의 안부점 위의 세 가지 경우를 두 개의 독립변수인 경우에 대하여  $\hat{y}$ 의 등고선표에서 흥미영역을 그린다.

### 3. 실험 개요

#### 3.1 실험 계획

이 연구의 실험은 Box-Behnken(B-B)계획법<sup>5,6)</sup>에 따라 배합을 수행하고 그 결과를 분석하여, 이를 통한 최적 배합비를 도출하였다. 이 계획법은 인자수가  $k$ 개인 경우에 요인배치법<sup>4)</sup>보다는 실험점의 수가 많지 않으면서도 직교블록(orthogonal blocking)을 만들기 용이하고, 2차 회귀방정식을 구할 수 있기 때문에 반응표면분석에서 흔히 사용되는 방법이다. 이 연구의 최종목표는 경량기포 콘크리트로 발포폴리스티렌이 주종을 이루고 있는 샌드위치 패널 시공의 대체재 개발이므로 연구의 목표 성능은 Table 1

과 같이 설정하였다. KS F 4039 「현장 타설용 기포콘크리트」 Table 2의 0.6품 기준에서 절건밀도와 압축강도의 목표값을 설정하였으며, KS M 3808 「발포폴리스티렌(PS)단열재」규정의 기준에 맞는 발포폴리스티렌 1종 1호 제품을 직접 휨강도 시험을 통해 휨강도 목표값을 설정하였다. 경화콘크리트 실험체는 최종 제품의 공장생산성을 고려하여 재령 3일을 기준으로 실험하였다.

Table 1의 목표 범위로 한 예비 실험에서 단위시멘트량은  $500 \text{ kg/m}^3$  이상, 물시멘트비 30% 이상, 과산화수소비 10% 이상에서 기포발생과 경화콘크리트의 경량화를 확인할 수 있었다. 또한 응결축진을 위해 무수석고의 일종인 도자기 형재용 석고(원료석고로 만든 소석고)를 3, 6, 9, 12%로 치환한 결과 6%에서 응결효과 및 최경량화 됨을 확인하고, 이 실험에서는 석고비를 6%로 고정하여 독립변수에서 제외하였다. 이상의 예비 실험 결과 이 실험의 인자와 수준 및 경화콘크리트의 시험 항목을 Table 2와 같이 설정하였다.

이 실험에서는 Box-Behnken(B-B)계획법에 따라 Table 3과 같이 15회의 실험을 행하여 독립변수와 반응변수와의 관계를 통계적으로 해석하여 각 요인의 주 효과 및 최적배합 수준을 도출하였다. 통계분석 툴(tool)은 미국 펜실베이니아 주립대학에서 개발한 교육용 통계프로그램인 MINITAB R14<sup>5)</sup>를 사용하였다.

#### 3.2 사용 재료

##### 3.2.1 시멘트

이 연구에 사용한 시멘트는 KS L 5201을 만족하는 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 화학적 조성은 Table 4와 같다.

##### 3.2.2 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

과산화수소는 KS M 1112를 만족하는 D사의 공업용 과산화수소(함유량 35%)를 사용하였다.

##### 3.2.3 석고(도자기 형재용 석고)

형재용 석고란 KS L 9001의 규정에 정한 원료석고(천

Table 1 The goal performance of products

Properties	Code	Goal performance	Curing
Dried density ( $\text{g/cm}^3$ )	KS F 4039	0.50~0.70	3 days
Comp. strength (MPa)	KS F 4039	Over 2.0	
Bend. strength (MPa)	KS M 3808	Over 0.3	

\*Comp.: compressive, bend.: bending

Table 2 Experimental factors and range

Factor	Range		Testing items
	Lower limit	Upper limit	
C ( $\text{kg/m}^3$ )	500	800	Dried density Comp. strength Bend. strength
W/C (%)	30	50	
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{C}$ (%)	10	30	
Gypsum/C (%)	6	6	

**Table 3** The design of experiment

Std. order	Run order	Pt. type	Block	C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /C (%)	Gypsum/C (%)
1	11	2	1	500	30	20	6
2	10	2	1	800	30	20	6
3	9	2	1	500	50	20	6
4	13	2	1	800	50	20	6
5	15	2	1	500	40	10	6
6	7	2	1	800	40	10	6
7	3	2	1	500	40	30	6
8	2	2	1	800	40	30	6
9	4	2	1	650	30	10	6
10	14	2	1	650	50	10	6
11	12	2	1	650	30	30	6
12	6	2	1	650	50	30	6
13	1	0	1	650	40	20	6
14	5	0	1	650	40	20	6
15	8	0	1	650	40	20	6

\*Std.: standard, Pt.: Pareto

**Table 4** The chemical composition of cement

Materials	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig.loss
OPC	25.0	7.7	3.0	60.9	2.1	0.69	0.11	1.8	1.1

연석고, 화학석고 및 고행석고)로 만든 소석고를 말하며, 그 품질에 따라 특급, 1급, 2급으로 나누며 이 실험에서는 C사의 1급을 사용하였다.

### 3.2.4 분산분석

이 연구의 분산분석표에서는 모형의 각 항에 대한 자유도(DF), 수정편차제곱의 합(Adj SS), 수정평균제곱의 합(Adj MS), F-통계량, P-값을 표시하였다. 편차제곱의 합(분산)으로 측정치에 대한 변동의 크기를 알 수 있고, 편차제곱의 합을 자유도로 나눈 것이 평균제곱의 합(불편분산)이며, 평균제곱의 합(불편분산)을 오차의 평균제곱의 합(오차분산)으로 나눈 분산비를 F-통계량(F비)이라 한다. P값은 분산의 기대치를 말한다. 어떤 요인에 대한 검정은 F-통계량과 P값으로 실시되며 이 실험에서는 P값(분산의 기대치)으로 검정한다.<sup>4,5)</sup>

## 3.3 시험 방법

### 3.3.1 절건밀도

절건밀도 값은 KS F 2459의 절대 건조 겉보기 밀도식에 준하여 얻어졌으며, 40 × 40 × 160 mm 크기의 몰드에 기포콘크리트를 충전하여 3시간 기건양생 후, 180 ± 5°C 중에서 3시간 동안 건조하고 질량을 측정하였다.

### 3.3.2 압축강도

Fig. 1은 40 × 40 × 160 mm 크기의 몰드에서 휨강도 실험을 한 뒤, 반으로 나누어진 2개의 시험체를 각각 실험하여 평균값으로 결과 값을 나타내었다.

### 3.3.3 휨강도

Fig. 2는 40 × 40 × 160 mm 크기의 몰드에 기포콘크리트를 충전하여 KS F 2408의 중앙점 재하법에 따른 콘크리트의 휨 강도 시험 방법에 준하여 실험하였다.

## 4. 결과 및 고찰

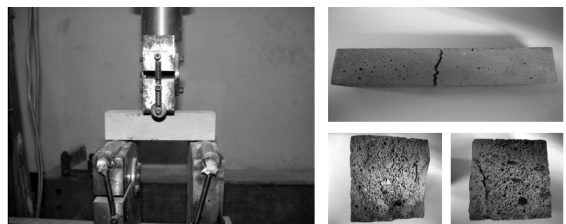
Table 5는 Box-Behnken(B-B)계획법에 의한 15회의 배합을 수행하고, 경화상태에서의 절건밀도와 압축강도, 휨강도의 실험 결과 값을 나타낸 것이다.

### 4.1 절건밀도

Table 6은 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비에 대한 절건밀도의 분산분석표이다. 수정편차제곱의 합(Adj SS)이 각각 0.019173, 0.163337, 0.150105로서 물시멘트



**Fig. 1** Compression strength test



**Fig. 2** Bending strength test

**Table 5** Test results

No.	C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /C (%)	Gypsum /C (%)	Average dried density (g/cm <sup>3</sup> )	Average comp. strength (MPa)	Average bend. strength (MPa)
1	500	30	20	6	0.677	5.32	1.17
2	800	30	20	6	0.717	5.57	1.80
3	500	50	20	6	0.424	1.57	0.54
4	800	50	20	6	0.509	2.23	0.66
5	500	40	10	6	0.688	5.64	1.90
6	800	40	10	6	0.630	4.87	1.14
7	500	40	30	6	0.373	1.09	0.36
8	800	40	30	6	0.433	1.44	0.51
9	650	30	10	6	0.902	9.65	2.52
10	650	50	10	6	0.503	2.70	0.99
11	650	30	30	6	0.587	1.91	1.04
12	650	50	30	6	0.311	0.99	0.23
13	650	40	20	6	0.660	3.92	1.11
14	650	40	20	6	0.691	3.63	1.32
15	650	40	20	6	0.669	3.39	1.02

\*Comp.: compressive, bend.: bending

**Table 6** Analysis of general linear model on dried density

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
C(kg/m <sup>3</sup> )	2	0.019173	0.009587	4.82	0.042
W/C(%)	2	0.163337	0.081668	41.10	0.000
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /C(%)	2	0.150105	0.75053	37.77	0.000
Error	8	0.015897	0.001987		
Total	14				

S = 0.0445771, R<sup>2</sup> = 95.39%, R<sup>2</sup>(Adj) = 91.92%

\*DF: degree of freedom, SS: sum of squares

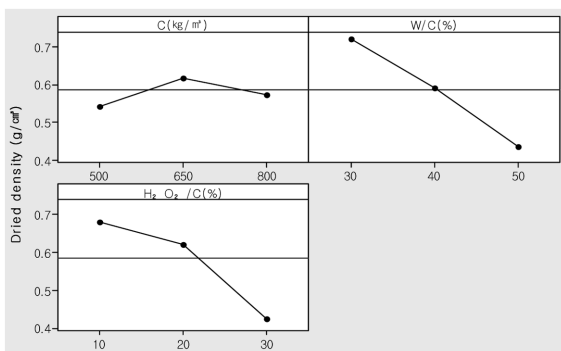
MS: mean squares, F: F-test, P: P-value

비와 과산화수소비에 대한 절건밀도의 변동 폭이 단위시멘트량에 대한 절건밀도의 변동 폭 보다 크다. 이러한 원인은 물과 과산화수소의 증감에 따라 기포의 증감이 비례하여, 공극의 다소(多少)가 밀도에 직접적인 요인이기 때문으로 판단된다. 절건밀도의 분산결과 F값은 단위시멘트량 4.82, 물시멘트비 41.10, 과산화수소비 37.77로 분산의 기대치 P값이 각각 0.05이하 이므로, 유의수준 5%에서 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비는 기포콘크리트의 절건밀도에 대한 주요 영향 인자로 판단된다.

Fig. 3은 독립변수인 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비에 대한 절건밀도의 주 효과도이다. 결과의 그래프에서 가운데 점선은 절건밀도의 총 평균이고, 각 점은 수준에서의 평균을 의미한다. 각 인자에 대한 절건밀도 변동 폭의 크기를 비교하여 보면, 단위시멘트량이 절건밀도에 미치는 영향 보다 물시멘트비와 과산화수소비가 절건밀도에 미치는 영향이 더 큼을 그래프에서 확인할 수 있다. 또한 물시멘트비 50%, 과산화수소비 30%일 때 절건밀도가 최저값으로 나타났다.

### 4.2 압축강도

Table 7은 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비에 대한 압축강도의 분산분석표이다. 수정편차제곱의 합(Adj SS)이 각각 0.286, 28.284, 38.032로서 물시멘트비와 과산화수소비에 대한 압축강도의 변동 폭이 단위시멘트량에 대한 압축강도의 변동 폭 보다 크다. 이러한 원인은 4.1절과 동일하게 물과 과산화수소의 증감에 따라 기포의 증감이 비례하여, 공극의 다소가 압축강도에 직접적



**Fig. 3** The main effects for dried density

**Table 7** Analysis of general linear model on compressive strength

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
C(kg/m <sup>3</sup> )	2	0.286	0.143	0.11	0.895
W/C(%)	2	28.284	14.142	11.14	0.005
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /C(%)	2	38.032	19.016	14.98	0.002
Error	8	10.154	1.269		
Total	14				

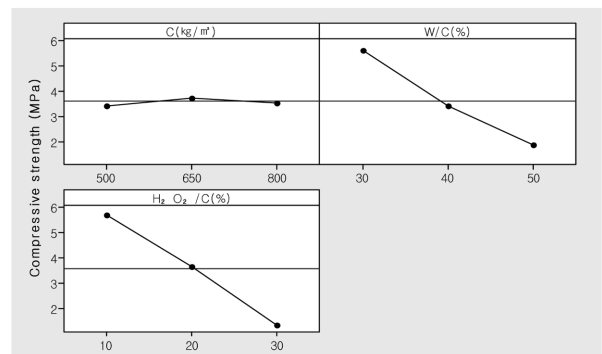
S = 1.12661, R<sup>2</sup> = 86.78%, R<sup>2</sup>(Adj) = 76.86%

인 요인이기 때문으로 판단된다. Table 7의 분산 결과는 물시멘트비와 과산화수소비에 대한 F값 11.14와 14.98은 분산의 기대치 P값이 0.05 이하이므로, 유의수준 5%에서 물시멘트비, 과산화수소비는 기포콘크리트의 압축강도에 대한 주요 영향 인자로 판단되며, 단위시멘트량은 이 실험의 범위 이내에서는 압축강도에 미치는 영향이 유의수준 5%에서 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 4는 독립변수인 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비에 대한 압축강도의 주 효과도이다. 결과의 그래프에서 가운데 점선은 압축강도의 총 평균이고, 각 점은 수준에서의 평균을 의미한다. 각 인자에 대한 압축강도 변동 폭의 크기를 비교하여 보면, 단위시멘트량이 압축강도에 미치는 영향 보다 물시멘트비와 과산화수소비가 압축강도에 미치는 영향이 더 큼을 그래프에서 확인할 수 있다. 또한 물시멘트비 30%, 과산화수소비 10%일 때 압축강도가 최고값으로 나타났다.

### 4.3 휨강도

Table 8은 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비에 대한 휨강도의 분산분석표이다. 수정편차제곱의 합(Adj SS)이 각각 0.09995, 2.12268, 2.43138로서 물시멘트비와 과산화수소비에 대한 휨강도의 변동 폭이 단위시멘트량에 대한 휨강도의 변동 폭 보다 크다. 이러한 원인은 4.1절 및 4.2절과 동일하게 물과 과산화수소의 증감에 따라 기포의 증감이 비례하여, 공극의 다소(多少)가 휨강도에 직접적인 요인이기 때문으로 판단된다. Table 8의 분산 결과는 물시멘트비와 과산화수소비에 대한 F값 11.77과 13.48은 분산의 기대치 P값이 0.05이하 이므로, 유의수준



**Fig. 4** The main effects for compressive strength

**Table 8** Analysis of general linear model on bending strength

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
C(kg/m <sup>3</sup> )	2	0.09995	0.04998	0.55	0.595
W/C(%)	2	2.12268	1.06134	11.77	0.004
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /C(%)	2	2.43138	1.21509	13.48	0.003
Error	8	0.72147	0.09018		
Total	14				

S = 0.300307, R<sup>2</sup> = 86.59%, R<sup>2</sup>(Adj) = 76.54%

5%에서 물시멘트비, 과산화수소비는 기포콘크리트의 휨강도에 대한 주요 영향 인자로 판단되며, 단위시멘트량은 이 실험의 범위 이내에서는 휨강도에 미치는 영향이 유의수준 5%에서 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5는 독립변수인 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비에 대한 휨강도의 주 효과도이다. 결과의 그래프에서 가운데 점선은 휨강도의 총 평균이고, 각 점은 수준에서의 평균을 의미한다. 각 인자에 대한 휨강도 변동 폭의 크기를 비교하여 보면, 단위시멘트량이 휨강도에 미치는 영향 보다 물시멘트비와 과산화수소비가 휨강도에 미치는 영향이 더 크음을 그래프에서 확인할 수 있다. 또한 물시멘트비 30%, 과산화수소비 10%일 때 휨강도가 최고값으로 나타났다.

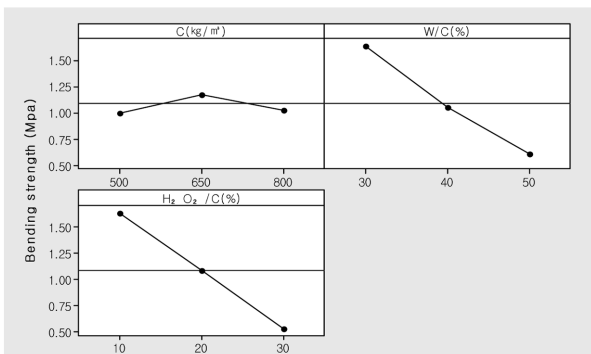
#### 4.4 압축강도와 절건밀도의 관계

압축강도에 대한 절건밀도의 회귀식은 식 (2)와 같으며, 이 회귀식의 결정계수 R-제곱값이 변동의 90.8%를 만족하는 높은 신뢰도를 보이고 있다.

$$C = 1.885 - 7.78D + 14.27D^2 + 4.35D^3 \quad (2)$$

- C : compressive strength(MPa)
- D : dried density(g / cm<sup>3</sup>)
- R<sup>2</sup> : 90.8%

Fig. 6의 회귀곡선 그래프는 압축강도와 절건밀도의 관계가 3차 곡선으로 적합 타당하다는 것을 보여준다. 이는 전체 체적에 대한 기포가 증가함에 따라 내부 공극량이 증가하고, 공극주변으로 응력이 집중되어 압축강도가 감소하는 기존의 연구 결과들과 일치함을 볼 수 있다.



**Fig. 5** The main effects for bending strength

#### 4.5 휨강도와 절건밀도의 관계

휨강도에 대한 절건밀도의 회귀식은 식 (3)과 같으며, 이 회귀식의 결정계수 R-제곱값이 변동의 89.58%를 만족하는 높은 신뢰도를 보이고 있다.

$$B = -0.470 + 2.46D - 1.46D^2 + 2.70D^3 \quad (3)$$

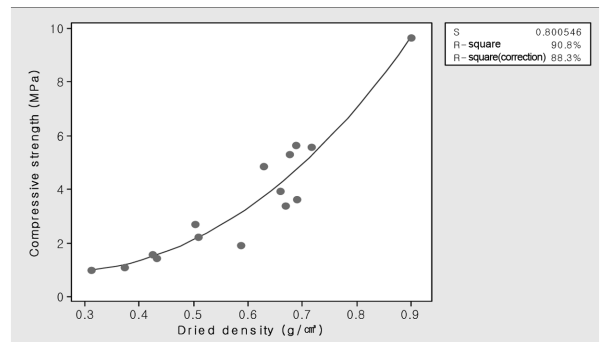
- B : bending strength(MPa)
- D : dried density(g / cm<sup>3</sup>)
- R<sup>2</sup> : 89.5%

Fig. 7의 회귀곡선 그래프는 휨강도와 절건밀도의 관계가 3차 곡선으로 적합 타당하다는 것을 보여준다. 휨강도와 절건밀도와의 관계는 4.4 압축강도와 절건밀도와의 관계와 동일하게, 내부 공극량이 증가하면 공극주변으로 응력이 집중되어 휨강도가 감소하는 것으로 판단된다.

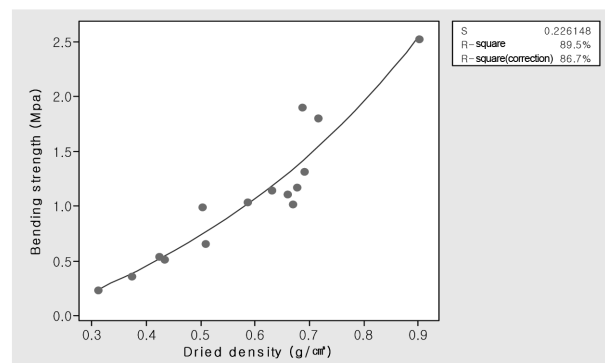
#### 4.6 반응 표면 설계 분석

##### 4.6.1 절건밀도에 대한 반응 표면 분석

등고선도는 반응 표면 설계의 결과를 2차원 평면으로 그린, 반응 표면 분석 그래프 중의 하나이다. 각 등고선은 인자의 조합에 대한 반응곡선을 나타내는 것으로, 등고선의 모든 지점에서의 반응치 값은 동일하다. Fig. 3에서 절건밀도의 최저값은 물시멘트비 50%, 과산화수소비 30%일 때 이므로, 동일한 조건으로 등고선도를 그리면 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 등고선도에서 물시멘트비를 50%,



**Fig. 6** The relation between compressive strength and dried density



**Fig. 7** The relation between bending strength and dried density

단위시멘트량  $500 \text{ kg/m}^3$ , 과산화수소비 30%에 수렴할 경우 절건밀도는  $0.25 \text{ g/cm}^3$  이하로 추정된다.

#### 4.6.2 압축강도에 대한 반응 표면 분석

Fig. 4에서 압축강도의 최고값은 물시멘트비 30%, 과산화수소비 10%일 때 이므로, 동일한 조건으로 등고선도를 그리면 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 등고선도에서 물시멘트비가 30%로 고정일 때 단위시멘트량  $500\sim 800 \text{ kg/m}^3$ , 과산화수소비 약 14%이하 이면 압축강도는 8 MPa 이상으로 추정되고, 과산화수소비가 10%로 고정일 때 단위시멘트량  $500\sim 750 \text{ kg/m}^3$  물시멘트비 약 31% 이하이면 압축강도는 9 MPa 이상으로 추정된다.

#### 4.6.3 휨강도에 대한 반응 표면 분석

Fig. 5에서 휨강도의 최고값은 물시멘트비 30%, 과산화수소비 10%일 때 이므로, 동일한 조건으로 등고선도를 그리면 Fig. 10과 같다. Fig. 10의 등고선도에서 물시멘트비가 30%로 고정일 때 단위시멘트량  $500\sim 800 \text{ kg/m}^3$ , 과산화수소비가 약 15% 이하이면 휨강도는 2 MPa 이상으로 추정되고, 과산화수소비가 10%로 고정일 때 단위시멘트 약  $540\sim 690 \text{ kg/m}^3$ , 물시멘트비가 약 30.0~30.5% 이면 휨강도는 2.4 MPa 이상으로 추정된다.

### 4.7 다중 반응 최적법

다중 반응 최적법은 여러 개의 반응변수들의 중첩 등고선도를 그려서 반응값들을 동시에 고려하는 연구방법으로 여러 반응변수들의 타협영역을 시각적으로 확인 할

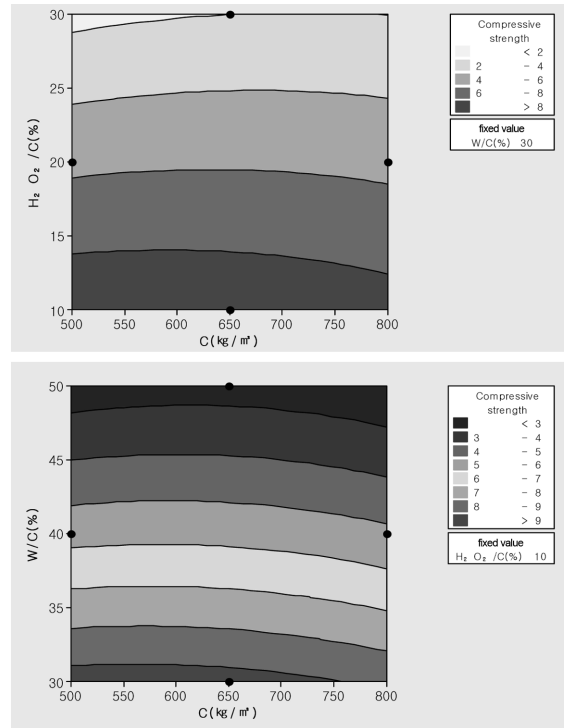


Fig. 9 The contour plot of compressive strength

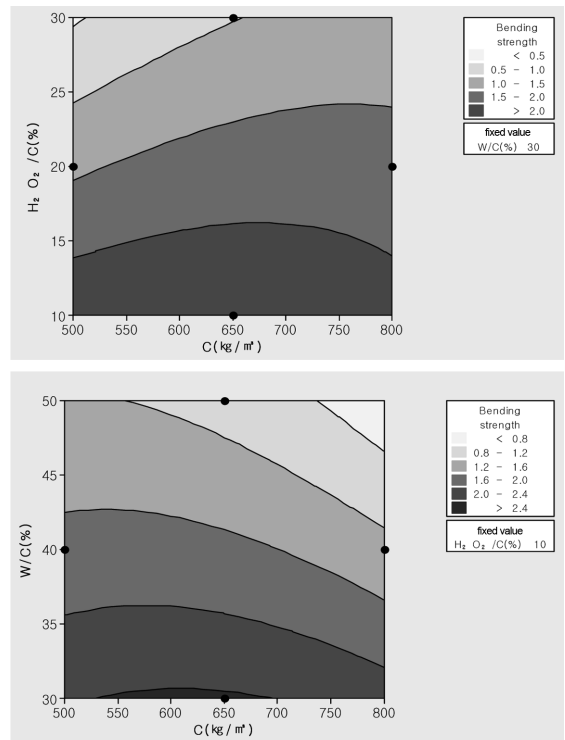


Fig. 10 The contour plot of bending strength

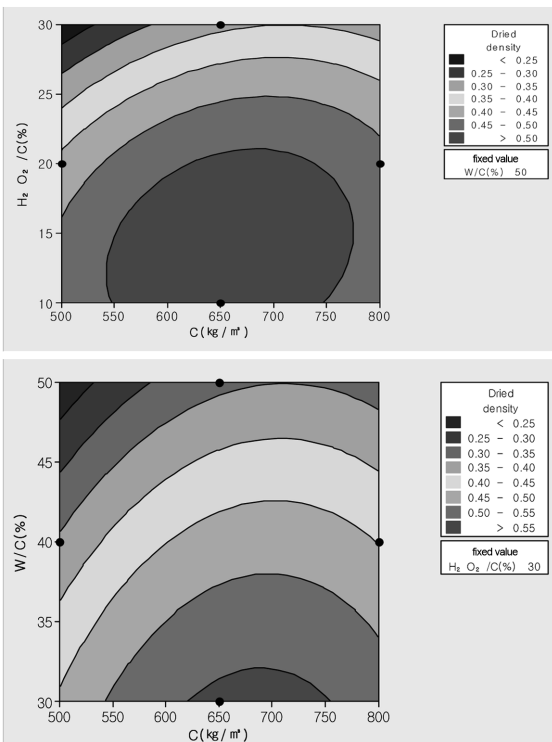


Fig. 8 The contour plot of dried density

수 있다. Figs. 8, 9, 10의 최적값들은 각각의 단일 인자에 대한 최적 반응값 이므로, 경량기포콘크리트는 경량화만 고려하면 건축재료로서의 소요의 강도 문제와 상충되고, 반대로 강도만 고려하면 경량화 문제와 상충된다. 그러므로 건축재료로서 경량기포콘크리트는 적당한 밀도와 압축강도 및 휨강도가 동시에 고려되어야 하므로, 다중 반응 최적법을 사용하여 절건밀도, 압축강도, 휨강도

를 동시에 충족하는 영역을 찾고자 한다. Table 4에서의 절건밀도 범위를 압축강도 회귀방정식 (2)와 휨강도 회귀방정식 (3)에 대입하여, 압축강도 및 휨강도의 최대값 4.9 MPa 및 1.4 MPa를 구할 수 있다. 압축강도는 큰 변동 폭을 고려하여 임의로 4.0 MPa로 조정하여 Table 4와 조합하면 Table 9와 같다.

Fig. 11은 Figs. 8, 9, 10의 절건밀도, 압축강도, 휨강도 각각에 대한 최적 등고선도를 중첩시킨 것이다. 목표범위를 Table 9와 같은 조건으로 타협영역을 시도한 결과 중첩 등고선도의 상단의 하얀 부분이 3가지 반응변수 모두를 만족시키는 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비의 영역이다. 범례에서 보이는 6개의 등고선중 그래프에 나타나지 않는 2개의 등고선은, 목표 반응변수값을 충족시키는 독립변수 값이 물시멘트비 30~50%, 단위시멘트량 500~800 kg/m<sup>3</sup>의 범위 바깥에 존재하므로, 이 중첩등고선에서는 나타나지 않는다. 따라서 이 실험에서의 다중 반응 최적 영역은 과산화수소비 10%로 고정일 때 물시멘트비는 약 44~50%, 단위시멘트량은 대략적으로 전 범위(500~800 kg/m<sup>3</sup>)에 걸쳐 유효하지만, 단위시멘트량이 약 650 kg/m<sup>3</sup> 정도일 때 최대 폭의 최적 범위임을 시각적으로 확인할 수 있었다.

#### 4.8 최적배합비 도출 및 검증

중첩 등고선도는 주어진 반응영역들 사이의 면(面)적인 최적조건 영역을 나타내므로 여러 개의 반응변수의 목표값을 만족하는 점(點)적인 최적 배합비 도출을 위해서 MINITAB R14 툴의 반응 최적화 도구를 사용하여 최적배합비를 도출하였다. Table 10과 같이 절건밀도는 0.7 g/cm<sup>3</sup> 이하 최소값을 추구하고, 압축강도는 2.0 MPa 이상의 최고값을 추구하고, 휨강도는 0.3 MPa 이상의 최고값을 추구하는 조건으로 하는 최적점을 도출하고자 한다. Fig. 12는 MINITAB R14 툴의 최적 반응 도구를 사용한 반

Table 9 The goals of multi-response surface analysis

Response	Lower limit	Upper limit
Dried density (g/cm <sup>3</sup> )	0.5	0.7
Comp. strength (MPa)	2.0	4.0
Bend. strength (MPa)	0.3	1.4

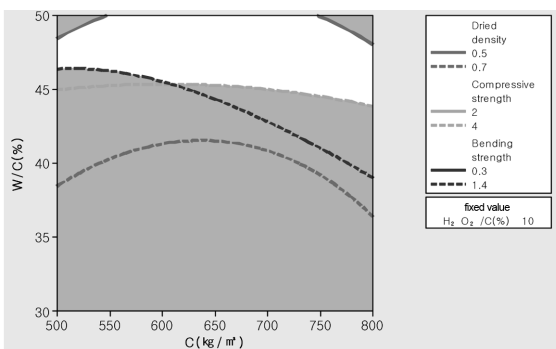


Fig. 11 Overlaid contour plot

응 최적화 결과 화면을 캡처한 그림이다.

반응표면분석법의 반응최적화 결과 Fig. 12와 같이 단위시멘트량 800 kg/m<sup>3</sup>, 물시멘트비 44.33%, 과산화수소비 10%의 최적배합이 도출되었으며, 각 반응변수별 결과에 대한 적합성은 절건밀도 1.0, 압축강도 0.92, 휨강도 0.96으로 나타났다. 목표성능에 대한 최적배합비와 반응변수의 추정값은 Table 11과 같이 정리할 수 있다.

Table 11에서 도출된 최적배합으로 예측된 절건밀도와 압축강도, 휨강도 값과 실험값을 비교하기 위해 확인 실험을 하였다. 3개의 동일한 공시체를 만들어 기존과 같은 방법으로 실험하였으며, 그 결과 값은 Table 12와 같다.

여기서 살펴보면 예측값에 대하여 실험 평균값이 차이를 타나내고 있다. 절건밀도의 경우 +28.9%, 압축강도의 경우 -5.7%, 휨강도의 경우 +21.2%로 이는 실험오차 등과 관련있다고 사료된다. 특히 절건밀도와 휨강도의 경우를 살펴보면 이는 시멘트의 경화 속도보다 가스의 누출속도가 빠르기 때문에 일어나는 현상으로 이는 시멘트 경화속도에 영향을 주는 실험 조건으로, 즉 온도, 습도 등과 밀접한 관계를 가진다고 사료되므로, 같은 실험 조건에서 좀 더 많은 실험을 통한 후속 확인이 필요하다고 판단된다.

Table 10 Optimal response of products

Response	Goal	Lower limit	Upper limit
Dried density (g/cm <sup>3</sup> )	Minimize	-	0.7
Comp. strength (MPa)	Maximize	2.0	-
Bend. strength (MPa)	Maximize	0.3	-

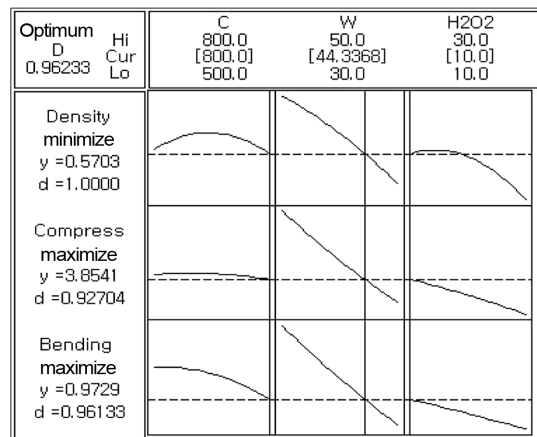


Fig. 12 The screen of optimization

Table 11 Optimum factors / response values using numerical analytical methods in the object goal

Factors/response	Level/goal	Numerical optimization
C (kg/m <sup>3</sup> )	500~800	800
W/C (%)	30~50	44.3368
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /C (%)	10~30	10
Dried density (g/m <sup>3</sup> )	minimize	0.5703
Comp. strength (MPa)	maximize	3.8541
Bend. strength (MPa)	maximize	0.9729

**Table 12** The result of verification test

Factors	Experimental results				Prediction value
	1	2	3	Average	
Dried density (g/cm <sup>3</sup> )	0.7382	0.7265	0.7421	0.7356	0.5703
Comp. strength (MPa)	3.5	3.35	4.05	3.6333	3.8541
Bend. strength (MPa)	1.1896	1.1286	1.2201	1.1794	0.9729

그러나 ALC부재에 대한 압축강도의 독일, 프랑스 규정에서는 3~6개의 시험체에 대하여 -15~+25% 실험체 편차를 인정<sup>7)</sup>하고 있는 것을 감안 할 때, 최적배합이 어느 정도는 신뢰성이 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

실험계획법의 하나인 반응표면분석법(Box-Behnken법)을 이용하여 과산화수소(hydrogen peroxide)로 발포한 경량기포콘크리트의 최적배합 도출에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경량기포콘크리트의 절건밀도에 영향을 주는 주요 인자에 대한 분산분석 결과 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비는 모두 유의수준 5%에서 유의한 영향이 있음으로 추정되었다.
- 2) 경량기포콘크리트의 압축강도 및 휨강도에 영향을 주는 주요 인자에 대한 분산분석 결과 물시멘트비, 과산화수소비는 유의수준 5%에서 유의차가 있었지만, 단위시멘트량은 500~800 kg/m<sup>3</sup> 범위에서는 유의수준 5%를 벗어나 있음으로 추정되었다.
- 3) 압축강도와 절건밀도 사이의 상호관계에서는 회귀식의 결정계수 값이 변동의 90.8%를 만족하고, 휨강도와 절건밀도 사이의 상호관계에서는 회귀식의 결정계수 값이 변동의 89.5%를 만족하는 높은 신뢰도를 보이고 있다.
- 4) 절건밀도, 압축강도, 휨강도 각각에 대한 반응 표면 분석결과 등고선도를 보면 모든 Table 1의 목표값을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 밀도, 강도 등은 시멘트경화체 내의 갇힌 공극량에 관계되므로 기포의 발생속도와 시멘트의 경화속도가 연관되어 있다고 사료되며, 따라서 시멘트 경화에 관계되는 많은 요인이 전부 실험결과 값에 관련이 있다고 판단된다. 그리고 단위시멘트량이 많다고 하여 강도가 높지 않고, 물과 과산화수소의 함량에 따라 밀

도와 강도가 저하되는 것을 확인 할 수 있다.

- 5) 다중 반응 최적법인 중첩 등고선도를 적용해 이 결과 과산화수소비 10%, 단위시멘트량 500~800 kg/m<sup>3</sup>, 물시멘트비 44~50%에서 목표성능에 유효한 반응변수들의 영역을 시각적으로 확인 할 수 있었다.
- 6) 반응최적화도구를 사용하여 목표성능 범위내의 최적반응을 분석한 결과 단위시멘트량 800 kg/m<sup>3</sup>, 물시멘트비 44.33%, 과산화수소비 10%의 최적배합이 도출되었다.
- 7) 확인실험에 대한 검증 결과 실험 평균값은 예측값에 대하여 최대 28.9%의 차이를 나타내고 있다. 이는 실험오차 등과 관계가 있다고 사료되며, ALC부재에 대한 압축강도의 독일, 프랑스 규정에서는 3~6개의 실험체에 대하여 -15~+25% 편차를 인정<sup>7)</sup>하고 있는 것을 감안 할 때, 최적배합이 어느 정도는 신뢰성이 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 BK21 미래지향 글로벌 방재전문 인력양성사업단의 일부 연구비 지원에 의해 실시된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김운형, "ISO 13784 샌드위치 패널 화재 시험 방법," 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 25권, 1호, 2005, pp. 23~26.
2. Narayanan, N. and Ramamurthy, K., "Structure and Properties of Aerated Concrete: a Review," Building Technology and Construction Management Division, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600 036, India, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, 2000, pp. 321~329.
3. Narayanan, N. and Ramamurthy, K., "Microstructural Investigations on Aerated Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 3, 2000, pp. 457~464.
4. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 2006, pp. 453~498.
5. 이레테크 Minitab 사업팀, 새 Minitab 실무완성, 이레테크, 2009, pp. 617~653.
6. 신태용, Minitab을 활용한 현장사례 위주의 실험계획법, 두양사, 2008, pp. 158~177.
7. 콘크리트공학, 핸드북, 朝倉書店, 1981, 523 pp.

**요 약** 이 논문에서는 과산화수소를 사용한 경량기포콘크리트의 최적배합비를 제안하고 있다. 최적배합을 도출하기 위해 상용프로그램인 MINITAB을 사용하여 실험계획법을 적용하였다. 통계적 분석방법은 반응표면분석법 중 하나인 Box Behnken(B-B)계획법으로 하였다. 실험시 고려한 영향인자로는 단위시멘트량, 물시멘트비, 과산화수소비를 설정하였다. 분산분석에 따르면 경화상태에서 경량기포콘크리트의 물시멘트비와 과산화수소비는 절건밀도, 압축강도, 휨강도에 유의차가 있고, 단위시멘트량은 절건밀도에만 유의차가 있는 것으로 나타났다. 반응표면분석의 결과에서 과산화수소를 사용한 경량기포콘크리트의 최적배합비는 단위시멘트량 800 kg/m<sup>3</sup>, 물시멘트비 44.33%, 과산화수소비 10%로 도출되었다.

**핵심용어** : 경량기포콘크리트, 과산화수소, 반응표면분석, Box-Behnken(B-B)