反應表面設計法을 이용한 高爐슬래그 輕量氣泡콘크리트 製造의 最適化[†]

金相祐 · 吳樹顯 · [†]鄭文泳

世明大學校 바이오環境工學科 資源循環處理研究室

Application of response surface design for the optimization of producing lightweight aerated concrete with blast furnace slag[†]

Sang-Woo kim, Su-Hyun Oh and [†]Moon-Young Jung

Major in Resources Processing and Recycling, Semyung University*

요 약

고로슬래그(BFS) 경량기포콘크리트 제조의 최적 배합비를 도출하기 위해 반응표면분석법 중 하나인 Box-Behnken법을 이용하여 연구를 수행하였다. 경량기포콘크리트는 상압증기양생법으로 제조하였으며 주요 실험변수로는 물/분체(W/P_d)비, BFS 치환율 그리고 분체량(P_d) 기준 AI분말 첨가량을 설정하였다. 반응표면분석에 의해 경량기포콘크리트의 절건비중 및 압축강도에 대한 회귀 모델식이 유도되었다. 경량기포콘크리트의 절건비중과 압축강도에 대한 목표값을 각각 0.72와 4.42 MPa로 설정하고 회귀 모델식에 의해 도출된 경량기포콘크리트의 최적 배합비는 W/P_d비 0.62, BFS 치환율 35.5% 그리고 분체대비 AI분말 첨가량 0.05%이었다. 이처럼 도출된 배합비로 제조한 경량기포콘크리트 시험체에 대한 절건비중과 압축강도의 측정값을 통해 회귀 모델식의 신뢰성이 확인되었다.

주제어 : 고로슬래그, 경량기포콘크리트, 반응표면분석법, Box-Behnken

Abstract

This study was conducted to optimize a mixing design of lightweight aerated concrete with the blast furnace slag(BFS) using Box-Behnken method, one of response surface designs. The lightweight aerated concrete with the BFS was made on the conditions of steam curing method at atmospheric pressure. The experimental factors were unit Water(W)/total powder(P_d) ratio, BFS replacement percentage and AI powder addition based on the total powder (P_d*%). From the results of the response surface analysis, regression models for dried specific gravity and compressive strength of the lightweight aerated concrete were derived. When the target values for dried specific gravity and compressive strength of the lightweight aerated concrete were set at 0.72 and 4.42 MPa respectively, its optimized mixing conditions driven from the regression models were 0.62 of W/P_d ratio, 35.5% of BFS replacement and 0.05% of AI powder addition. This experimental design model was found to be credible by measuring the dried specific gravity and compressive strength of the sample made from the above mixing conditions

Key words : Blast furnace slag, Lightweight aerated concrete, Response surface design, Box-Behnken

1. 서 론

철강제품을 생산하기 위해서 철광석, 원료탄 및 석회석등의 천연광물이 사용된다. 이 과정에서 철강 생산량의 약 30%에 해당하는 고로슬래그가 발생한다.¹⁾ 2011

년도에 약 2035만톤의 고로슬래그가 발생되었으며, 그 중 시멘트 원료로 63.8%, 도로용 골재 22.5%, 성토용 10.4% 그리고 비료용 원료 3.3%(67 만톤)로²⁾ 부가가치가 낮은 산업 원자재로 활용되고 있다. 이를 부가가치가 높은 기능성 건축 재료의 원료로 순화자원화할 수 있는 재활용 기술개발이 필요하다. 현재 국내에서 시판되고 있는 경량기포콘크리트는 포틀랜드 시멘트, 생석회, 규사를 주원료로 사용하여 제조한 슬러리에 AI분

[†] 2012년 3월 19일 접수, 2012년 5월 8일 1차수정

2012년 5월 18일 수리

*E-mail: myjung@semyung.ac.kr

말을 소량 첨가하여 발포시킨 후 180°C 10기압에서 고온고압 증기양생시켜 생산하고 있어 시중에서는 ALC(autoclave lightweight concrete)블록으로 알려져 있다.^{3,4,5)} 포틀랜드 시멘트 1톤을 제조하는데 석회석 1,260 kg, 점토 200 kg, 규석 20 kg, 철광석 20 kg 그리고 석고 35 kg이 필요하며⁶⁾, 이때 0.8 ton의 CO₂가 방출되고 있다⁷⁾. 그러므로 경량기포콘크리트 원료로 포틀랜드 시멘트의 일부분만이라도 고로슬래그를 대체할 수만 있다면 천연광물자원 및 에너지절약과 CO₂ 방출을 절감할 수 있을 것이다.⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 고로슬래그 활용하여 고부가가치 전자재인 경량기포콘크리트 개발 연구를 수행하였다.

경량기포콘크리트 제조공정은 다양한 실험인자에 영향을 받으며, 공정최적화시 각 인자의 영향을 정량적으로 규명할 수 있는 방법이 요구된다. 제조공정에서 물리적 특성을 예측하기 위하여 기존의 결과들을 통계적으로 분석하여 수식화 하거나, 이론적인 실험조건에 많은 노력을 기울일 필요성이 대두되고 있다. 또한 경험적 모형연구(empirical simulation)인 실험 model의 최적조건에 대한 규명하는 방법으로 반응표면설계법(response surface design)이 다양한 분야(환경, 의학, 화학, 식품)에서 이용되고 있다. 하지만 경량기포콘크리트 제조에 적용된 사례는 미비하다.^{9, 10)}

따라서 본 연구는 고로슬래그 경량기포콘크리트의 최적 배합비를 도출하기 위해 실험계획법으로 반응표면설계법을 적용하여 실험을 수행하였다.

2. 실험계획, 실험재료 및 실험방법

2.1. 실험계획법

전통적 실험방법으로는 실험변수 중 한 변수를 제외한 모든 변수를 고정하여 연구를 적용하였다(one factor at a time method).¹¹⁾ 이 방법은 인자 간에 상호작용에 관한 교호작용 효과 검출이 불가능하다. 실험영역 전체를 균형 있게 고려하지 못함으로써 국소 최적해(local optimum)를 찾게 된다. 시간이 많이 소요되고 최적 조건을 찾기 위해 많은 수의 실험이 필요하게 되는 문제점이 있다. 반면에 실험계획법(design of experiments, DOE)은 해결하고자 하는 문제에 대하여 통계적으로 실험설계 및 데이터를 분석한다. 그로 인해 최소 실험횟수로 연구자가 원하는 실험요인 및 수준에서 실험결과를 추정할 수 있다.^{12, 13)}

2.2. 반응표면설계법

반응표면분석은 실험계획법에 따라 실험하여 얻은 데이터를 적절한 모델함수에 적합화(fitting)시키는 일종의 수리 통계적 기술이다. 각 공정 효과를 회귀 모델식으로 유도하며, 모델식이 적절한지를 확인 실험을 통해 규명한다.

Fig. 1은 반응표면설계법 중 하나인 Box-Behnken법(이하 B-B법이라 약 함)의 설계모형을 나타낸 것이다. B-B법은 균형 불완비 블록계획법(Balanced Incomplete Block Design; BIBD)에 2^k요인 배치계획을 결합하여 기본계획을 수립한다. 또한 중심점에서 실험수 Nc를 추가시켜서 2차 반응표면 식을 추정할 수 있는 실험계획법이다.¹⁴⁾ B-B법은 반응표면의 1차, 2차효과를 효율적으로 추정할 수 있다. 실험요인수가 같을 경우 중심합성 설계법(central composite design)보다 실험 횟수가 적은 것이 특징이다. 실험비용을 많이 소비하거나, 현실적으로 실험이 불가능할 경우 유리하게 사용될 수 있다.¹⁵⁾

본 연구에서 사용한 경량기포콘크리트의 독립변수로 물/분체비(이하 W/P_d라 약함), 고로슬래그(이하 BFS라 약함) 치환율, 분체(P_d) 대비 AI분말 첨가량(P_d*%)을 설정하였다.

Table 1은 경량기포콘크리트 공시체 목표 절건비중 및 압축강도를 나타낸 것이다.

Table 2는 실험 요인 및 수준을 나타낸 것이다. 각 요인과 수준은 예비실험을 통하여 큰 영향을 미치는 실험조건을 선정하였다.

Table 3은 경량기포콘크리트의 배합비 및 실험결과를

Fig. 1. Box-Behnken method concept.

Table 1. The goal performance of product

Properties	Goal performance
Dried specific gravity	0.70 ~ 0.75
Compressive strength	over 2 MPa

Table 2. Experimental factors and range

Factor	Range		Testing item
	lower limit	upper limit	
W/P _d	0.50	0.70	dried specific gravity, compressive strength
BFS replacement ratios	12	59	
Al powder (P _d *%)	0.05	0.07	

나타낸 것이다. B-B법에 의한 실험 결과는 MINITAB 16을 사용하여 통계처리를 하였으며, 모든 실험은 3회 반복 측정된 평균값을 사용하였다. 실험은 총 15회 수행하였으며, 가운데 3개의 중앙점(실험번호 4, 5, 10)은 반복실험으로 회귀모형의 적합성을 판단기준으로 사용된다. 적합성 판단은 적합성 결여 검정을 실시하여 판단한다. 본 연구에서는 경량기포콘크리트 절건비중과 압축강도에 대한 분산분석으로 적합성 검정을 실시하였다. 적합성 검정의 귀무가설은 “회귀 모델식은 타당하다”, 대립가설은 “회귀 모델식은 타당하지 않다”라고 가설을 세운다. 적합성 결여 검정 임계값 P값(critical point)을

5%로 설정하며, 그 값이 5% 미만이면 대립가설을 채택하여 추정된 회귀모형은 사용할 수 없다.¹⁶⁾ 분산분석은 여러 효과(1차효과, 2차효과, 교호효과)로 나누어져 있고, 각 효과 관찰 값의 자료를 분석한다. 분산분석의 가설은 귀무가설과 대립가설로 나뉘는데 귀무가설은 “각 실험요인에 대한 변화는 없다”, 대립가설은 “각 실험요인에 대한 변화가 있다”라고 설정한다. 검정 임계값 5%미만이 나오면 대립가설을 채택한다. 분산분석에서 F값의 크기에 따라 경량기포콘크리트에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 회귀분석에서 여러 변수 사이에 1차효과, 2차효과 및 교호효과 관계가 성립되지 않으면 회귀분석을 사용하는 것 자체가 무의미하다. 회귀모형의 기울기(β)가 0으로부터 유의하게 차이난다면 회귀모형이 성립한다고 말할 수 있다. 이 경우에는 표본의 기울기 b가 모수 β 를 중심으로 t분포를 이룬다고 가정하여 t검정을 실시한다. t검정의 가설은 귀무가설과 대립가설로 나누어진다. 귀무가설은 “각 항의 회귀모형 기울기는 0과 같다”, 대립가설은 “각 항의 회귀모형 기울기는 0이 아니다”라고 설정한다. 일반적인 연구에서 검정 임계값(critical point)을 5%로 규정하고 있다.¹⁷⁾

Table 3. The design of experiment and test results

Run	Test factor			Results of an experiment		remark
	W/P _d	BFS replacement ratios (%)	Al powder (P _d *%)	dried specific gravity	compressive strength (MPa)	
1	0.50(-)	12(-)	0.06(0)	0.793	3.93	(coded unit)
2	0.60(0)	12(-)	0.05(-)	0.733	4.03	
3	0.60(0)	12(-)	0.07(+)	0.667	2.72	
4	0.60(0)	35(0)	0.06(0)	0.73	3.85	
5	0.60(0)	35(0)	0.06(0)	0.71	4.08	
6	0.60(0)	59(+)	0.07(+)	0.66	3.97	
7	0.70(+)	59(+)	0.06(0)	0.64	3.82	
8	0.70(+)	35(0)	0.05(-)	0.681	4.18	
9	0.60(0)	59(+)	0.05(-)	0.736	4.68	
10	0.60(0)	35(0)	0.06(0)	0.73	3.50	
11	0.70(+)	35(0)	0.07(+)	0.659	3.29	
12	0.50(-)	35(0)	0.05(-)	0.845	5.63	
13	0.50(-)	35(0)	0.07(+)	0.81	4.84	
14	0.70(+)	12(-)	0.06(0)	0.66	2.42	
15	0.50(-)	59(+)	0.06(0)	0.85	5.64	

Table 4. Physical properties of raw materials for the lightweight aerated concrete

Material	Symbol	Physical properties
Cement	C	normal portland cement
Blast furnace slag	BFS	fineness 4700
Quicklime	CaO	CaO content 83.03%
Aluminium powder	Al	Al purity 92~96.2%

2.3. 실험재료

Table 4는 경량기포콘크리트 제조에 사용한 재료를 나타낸 것이다. 시멘트는 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 분말도 4700 cm²/g의 BFS, H사의 생석회를 사용하였다. 또한 발포제는 Y사의 AI분말을 사용하였다.

2.4. 실험방법

Fig. 2는 경량기포콘크리트 배합 및 양생과정을 나타낸 것이다. 경량기포콘크리트의 배합은 물과 생석회를 모르타르 배합기로 혼합하고, BFS와 포틀랜드 시멘트를 투입하여 섞어준 슬러리에 AI분말을 첨가하여 다시

혼합을 실시하였다. 이렇게 제조한 슬러리를 성형몰드(50 × 50 × 50)에 부어 발포된 경량기포콘크리트 시편체를 제작하였다. 증기양생(5일)하여 절건비중 및 압축강도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1. 경량기포콘크리트의 절건비중

Table 5와 6은 반응표면설계법에 의해 진행된 경량기포콘크리트의 실험결과(Table 3) 중 절건비중 결과를 이용하여 도출된 회귀계수와 분산분석표를 나타낸 것이다. 식 (1)은 Table 5에서 도출된 경량기포콘크리트 절건비중 회귀 모델식으로 $R^2_{(수정)}$ 값은 91.05%로 확인되었다. 보통 R^2 는 그 회귀 모델식이 데이터를 얼마만큼 근접하게 예측하고 있는가를 나타내는 척도이다. 하지만 회귀 모델식의 적합성을 판단하는 기준으로 사용할 수 없다. 그 이유는 R^2 의 값은 자유도가 고려되지 않았기 때문이다.¹⁸⁾ 따라서 R^2 를 사용하는 대신에, 자유도가 고려된 수정 R^2 (adjust R^2)를 사용한다. Table 5는 경량

Fig. 2. Flowchart for the production process of lightweight aerated concrete.**Table 5.** Estimated regression coefficients for dried specific gravity

Section	Coefficient	SE coefficient	T	P
Constant	0.70943	0.007659	92.627	0.000
W/P _d (M)	-0.08225	0.007164	-11.481	0.000
Al(P _d *)	-0.02487	0.007164	-3.472	0.005
M ²	0.03282	0.010487	3.130	0.010

SE : standard error, T : coefficient / SE coefficient, P : defined as the smallest level of significance leading to rejection of the null hypothesis

Table 6. Regression analysis and response surface model fitting on dried specific gravity

	DF	SS	MS	F	P
Regression analysis	3	0.0631	0.0210	51.21	0.000
Linear	2	0.0591	0.0295	71.93	0.000
W/P _d (M)	1	0.0541	0.0541	131.80	0.000
AI(P _d *%)	1	0.0050	0.0050	12.05	0.005
Square	1	0.0040	0.0040	9.79	0.010
M ²	1	0.0040	0.0040	9.79	0.010
Residual error	11	0.0045	0.0004		
Lack-of-fit	5	0.0024	0.0005	1.36	0.357
Pure error	6	0.0021	0.0004		
Total	14	0.0676			

DF : degree of freedom, SS : sum of squares, MS : mean squares, F : MSR/MSE, P : defined as the smallest level of significance leading to rejection of the null hypothesis

기포콘크리트 절건비중에 대해 추정된 회귀계수를 나타낸 것이다. 절건비중 회귀계수 중 BFS 치환률 1차효과, BFS 치환률 및 분체 대비 AI분말 첨가량의 2차효과 그리고 교호효과항은 검정 임계값(P 5%)이상으로 확인되었다. 그래서 경량기포콘크리트 절건비중 회귀 모델식 중 BFS 치환률 1차효과, BFS 치환률 및 분체 대비 AI분말 첨가량의 2차효과 그리고 교호효과항의 기울기가 0과 같아 회귀 모델식에서 제외하였다.

$$D = 0.70943 - 0.08225M - 0.02487A + 0.03282M^2 \quad (1)$$

여기서, D=절건비중, M= W/P_d, A= 분체대비 AI분말 첨가량, 여기서 M과 A는 코드화된 단위 사용, R² : 92.32%, R²_(수정) : 91.50%

Table 6은 경량기포콘크리트 절건비중의 분산분석 표이다. Table 6에서 W/P_d비의 1차효과의 F값이 131.81로 조사되었으며, 이는 절건비중 분산분석에 가장 큰 F값이다. 따라서 경량기포콘크리트 절건비중에 가장 큰 영향을 미치는 것은 W/P_d라 언급할 수 있다.

Fig. 3은 식 (1)에 의해 도출된 그래프로써, W/P_d비 및 분체대비 AI 분말 첨가량에 따른 경량기포콘크리트 절건비중 등고선도를 나타낸 것이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 W/P_d비와 분체대비 AI분말 첨가량이 높아질수록 절건비중은 선형적으로 감소하였다. 절건비중 0.65 경계선에서 직선이 아닌 곡선이 나타난다. 이 부분은 W/P_d비의 2차효과를 나타낸 것이다. 여기서 W/P_d비의

Fig. 3. The contour plot of dried specific gravity.

2차효과는 W/P_d비가 증가하여도 그에 비례하여 절건비중이 감소하지 않음을 의미한다.

3.2. 경량기포콘크리트의 압축강도

Table 7과 8은 반응표면설계법에 의해 진행된 경량기포콘크리트의 실험결과(Table 3) 중 압축강도 결과를 이용하여 도출된 회귀계수와 분산분석표를 나타낸 것이다. 식 (2)는 Table 7에서 도출된 경량기포콘크리트 압축강도 회귀 모델식으로 R²_(수정)값은 86.67%로 확인되었다. Table 7은 경량기포콘크리트 압축강도에 대해 추정된 회귀계수를 나타낸 것이다. 압축강도 회귀 모델식 중 BFS 치환률, 분체대비 AI분말 첨가량, 2차효과 그리고 교호효과 항은 검정 임계값 이상이 나와, 경량기포콘크리트 압축강도 회귀 모델식 중 BFS 치환률, 분체대비 AI분말 첨가량, 2차효과 그리고 교호효과 항은 기울기가 0과 같아 회귀 모델식에서 제외하였다.

Table 7. Estimated regression coefficients for compressive strength

Section	Coefficient	SE coefficient	T	P
Constant	3.692	0.12779	28.891	0.000
W/P _d (M)	-0.7928	0.11697	-6.778	0.000
BFS	0.5299	0.09954	5.323	0.005
Al(P _d *)%	-0.4631	0.11697	-3.959	0.003
M ²	0.3879	0.17123	2.265	0.047

Table 8. Regression analysis and response surface model fitting on compressive strength

	DF	SS	MS	F	P
Regression analysis	4	10.4056	2.6014	23.77	0.000
Linear	3	9.8439	3.2813	29.98	0.000
W/P _d (M)	1	5.0283	5.0283	45.94	0.000
BFS	1	3.0998	3.0998	28.32	0.000
Al	1	1.7157	1.7157	15.67	0.003
Square	1	0.5619	0.5619	5.13	0.047
M ²	1	0.5619	0.5619	5.13	0.047
Residual error	10	1.0946	0.1095		
Lack-of-fit	8	0.9261	0.1158	1.36	0.488
Pure error	2	0.1685	0.0843		
Total	14	11.5004			

$$C = 3.692 - 0.7928M + 0.5299B - 0.4631A + 0.3879M^2 \quad (2)$$

여기서, C : 압축강도, M : W/P_d, B : BFS 치환률, A: 분체대비 Al분말 첨가량, 여기서 M, B 그리고 A는 코드화된 단위 사용, R² : 92.32%, R²_(수정) : 86.67%

Table 8은 경량기포콘크리트 압축강도의 분산분석을 나타낸 것이다. Table 8에서 경량기포콘크리트 압축강도의 증가 및 감소에 영향을 끼친 순서는 W/P_d비, BFS 치환률, 분체대비 Al 분말첨가량 그리고 W/P_d비 2차효과로 확인되었다.

BFS 치환률은 압축강도의 증가 및 감소에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 그러나 절건비중에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 이와 같이 절건비중에는 영향을 미치지 못하지만 강도에 영향을 미친 이유는 고로슬래그의 잠재수경성 때문이라 판단된다.¹⁹⁾

Fig. 4는 식 (2)로 도출된 그래프로서, W/P_d비 및

Fig. 4. The contour plot of compressive strength.

BFS 치환률에 따른 경량기포콘크리트 압축강도 등고선도를 나타낸 것이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 경량기포콘크리트 압축강도 4.50 MPa에서 BFS 치환률에 따른 등고선의 기울기가 직선인 것을 알 수 있다. 하지만 압축강도 4.00 MPa 이하에서는 등고선에 2차효과가 발생한다. 이는 일정 W/P_d비가 되면 BFS 치환률이 증가하여도 압축강도는 계속적으로 증가하지 않음을 의미한다.

3.3. 다중반응분석법

다중반응분석법은 여러 반응변수들(절건비중과 압축강도)의 등고선도를 동시에 고려하는 방법이다. 이 분석법은 각각의 실험결과에 대해 타협영역을 설정하고 전체 반응인자를 고려하는 것이다. Fig. 3과 4는 각각 단일인자들의 최적 반응값이다. 경량기포콘크리트에서 경량화만 고려하면 압축강도 문제가 있고, 압축강도만 고려하면 절건비중에 문제가 있다. 이처럼 절건비중과 압축강도는 서로 반비례적인 관계를 형성한다. 그래서 본 연구진은 절건비중과 압축강도 모두 만족하는 타협 영역을 설정하였다. Table 9는 경량기포콘크리트의 타협 영역을 나타낸 것이다.

Fig. 5는 식 (1), (2)로 도출된 그래프로서, W/P_d 비 및 분체대비 AI 분말 첨가량 변화에 따른 경량기포콘크리트 절건비중 및 압축강도에 대한 상관관계 중첩등고선도를 나타낸 것이다. 그림에서 하얀 범위는 절건비중 (0.70~0.75)와 압축강도(2~5 MPa)를 동시에 만족하는 영역이다. Fig. 5를 보면 알 수 있듯이 일정 W/P_d 비에서 절건비중과 압축강도의 타협영역을 만족하는 것을 알 수 있다. 이는 W/P_d 의 1차효과가 경량기포콘크리트의 절건비중과 압축강도에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

3.4. 최적 배합비 도출 및 검증

중첩등고선도는 주어진 반응영역들 사이의 면(面)적인 최적조건 영역을 나타낸 것이다. 점적인 최적 실험

Table 9. The goals of multi-response surface analysis

Response	Lower limit	Upper limit	Goal
Dried specific gravity	0.60	0.80	0.72
Compressive strength(MPa)	2	5	4.42

Fig. 5. Overlaid contour plot.

조건을 MINITAB 16의 반응최적화도구를 사용하여 도출하였다.

Table 10은 경량기포콘크리트 시제품의 물리적 특성 목표값을 나타낸 것이다. Table 10을 보면 알 수 있듯이 절건비중 0.72, 압축강도 4.42 MPa 이상의 값을 추구하는 조건으로 최적점을 도출하고자한다.

Fig. 6은 반응 최적화 결과를 갈무리(capture) 한 그림이다. 반응최적화 결과 W/P_d 0.62, BFS 치환율 35.5%, 분체대비 AI분말 첨가량 0.050%의 최적 배합비가 도출되었다.

Table 11은 목표성능에 대한 최적배합비와 절건비중 및 압축강도의 추정값을 정리한 것이다. Table 12는 유도된 회귀 모델식에서 도출된 배합비로 예측된 경량기포콘크리트의 절건비중 및 압축강도와 실제 제조한 공

Table 10. Optimal response of products

Response	Lower limit	Upper limit
Dried specific gravity	0.70	0.75
Compressive strength(MPa)	2.0	5.0

Table 11. Optimal factors / response values using numerical analytical method in the object goal

Factors / response	Level / Goal	Numerical optimization
W/P_d	0.5~0.7	0.62
BFS replacement ratios	12~59	35.5
AI powder (P_d^* %)	0.05~0.07	0.05
Dried specific gravity	Goal	0.725
Compressive strength(MPa)	Goal	4.42

Fig. 6. The capture screen of optimization for producing lightweight aerated concrete with blast furnace slag.

Table 12. The result of verification test

	Goal	Experimental results (By KCL)				Measuring efficiency (%)	R ² (adjusted) of regression equation
		1	2	3	average		
Dried specific gravity	0.72	0.740	0.750	0.745	0.75	4.2	91.50
Compressive strength(MPa)	4.42	4.75	5.04	6.12	5.30	19.9	86.67

시체의 물성값을 비교하기 위해 한국건설생활시험연구원 (KCL)에 시험을 의뢰하여 얻은 측정값을 나타낸 것이다. 고로슬래그 경량기포콘크리트의 절건비중에 대한 예측값과 측정값의 평균 오차율은 +4.2%이었다. 또한 경량기포콘크리트 압축강도의 평균값은 5.30 MPa이며 목표 압축강도에 대해 +19.9%의 오차를 보이고 있지만, 압축강도에 대한 독일 및 프랑스 규정에서는 3~6개의 시험체에 대하여 -15~+25% 실험편차를 인정하는 것을 감안할 때⁹⁾ 본 연구에서 유도된 회귀 모델식은 신뢰성이 있다고 판단되었다.

4. 결 론

실험계획법의 하나인 반응표면분석법 중 Box-Behnken법을 이용하여 고로슬래그 경량기포콘크리트의 최적배합 도출에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반응표면분석의 1차효과에 따르면 W/P_d비와 분체 대비 AI분말 첨가량은 경량기포콘크리트의 절건비중과 압축강도에 영향이 있고, BFS 치환율은 압축강도에만 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

2) Box-Behnken법으로 설계한 여러 배합비로 제조한 고로슬래그 경량기포콘크리트 공시체의 절건비중과 압축강도를 반응표면분석한 결과, 신뢰도가 높은 경량기포콘크리트 절건비중 및 압축강도의 회귀 모델식을 도출할 수 있었다.

3) 상압증기양생 고로슬래그 경량기포콘크리트의 절건비중과 압축강도에 대한 목표값을 각각 0.72와 4.42 MPa로 설정하고 회귀 모델식을 이용하여 도출된 최적배합조건은 W/P_d비 0.62, BFS 치환율 35.5% 그리고 분체대비 AI 분말 첨가량 0.05 %이었다. 그리고 도출된 최적배합비로 제조한 경량기포콘크리트 공시체의 절건비중과 압축강도는 각각 0.74과 5.30 MPa이었다. 경량기포콘크리트 압축강도의 오차율은 19.9%로 다소 크지만 경량기포콘크리트의 압축강도에 대한 독일 및 프랑스의 규정에서 -15~+25% 실험편차를 인정하는 것을

감안할 때, 본 연구에서 유도된 회귀 모델식은 신뢰성이 있다고 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 2010년 철강 냉각 슬래그를 이용한 친환경 제품화 기술개발에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 손건목, 2000: “철강슬래그의 활용 동향 및 전망”, POSCO.
2. 한국철강협회, <http://www.kosa.or.kr/>
3. 강철 등, 2005: 오토클레이브 양생시간에 따른 경량기포콘크리트의 강도 변화에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회지, pp. 57-60.
4. 김영엽 등, 2006: 혼화재 혼입에 따른 경량기포콘크리트 (ALC)의 강도특성, 대한건축학회지, 26(1), pp. 513-516.
5. 추용식 등, 2010: 규석 분말도에 따른 ALC의 물리적 특성 변화, 한국세라믹학회지, 47(5), pp. 407-411.
6. 최재진 등, 2003: 최신 토목재료학, 기문당, 서울, pp.25-26
7. 박영규, 김정인, 2010: 시멘트산업공정에서의 CO₂배출량 저감을 위한 청정기술 적용에 관한 연구, 청정기술학회지, 16(3), p. 183.
8. 이운성 등, 2010: 고로슬래그와 레머트를 사용한 무시멘트 복합체의 유동 및 강도특성에 관한 연구, 한국건축시공학회지, 10(2), pp. 91-94.
9. 이상안 등, 2009: 반응표면분석법에 따른 경량기포콘크리트 최적배합 도출에 관한 연구, 한국콘크리트학회지, 21(6), pp. 745-752.
10. 강철, 2010: 바텀애시 및 페콘크리트 미분말을 이용한 오토클레이브 경량기포콘크리트의 개발, 공주대학교 박사학위논문.
11. Lee K D, Lee J E, Kwon C H, 2000: Application of response surface methodology in food chemistry food Sci, Ind. 33(1), pp. 33-45.
12. Kim D S, Park Y S, 2010: Application of the central composite design and response surface methodology to the

- treatment of dye using electrocoagulation / flotation process, J. Korean Soc. Water Qual. 26(1), pp. 35-43.
13. Lee S H, 2008: Data Analysis of Engineering Statistics using Minitab, revision, Iretec Inc, Kunpo, ROK, pp. 647-778.
 14. Cho IH et al., 2006: Analysis of characteristics and optimization of photo-degradation condition of reactive orange 16 using a Box-Behanken method, J.of KSEE, 28(9), pp. 917-925.
 15. 송원용, 장순웅, 2009: UV공정을 이용한 NDMA처리 통계적 최적화 연구, 한국물환경학회, 19(1), pp. 115-121.
 16. 이종선, 2011: 실험계획법, 이레테크, 군포, pp. 239-270.
 17. 박정식, 윤영선, 박래수, 2010: 현대 통계학 5판, 다산출판사, 서울, pp. 304-315.
 18. Ferreira SLC et al., 2007: Statistical design and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems, J. Chromatogr. A.1158, pp. 2-14.
 19. 한천구, 김성환, 손호정, 2009: 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 공학적 특성 분석, 한국건설순환자원학회지, 4(3), pp. 62-68.

金 相 祐

- 세명대학교 바이오환경공학 학사
- 세명대학교 환경안전시스템공학 석사

吳 樹 顯

- 세명대학교 바이오환경공 학사
- 세명대학교 환경안전시스템공학 석사과정

鄭 文 泳

- 현재 세명대학교 바이오환경공학 교수
- 당 학회지 제19권 3호 참조