

반응표면분석법에 의한 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 최적배합 도출에 관한 연구

Optimized Mixing Design of Carbon-Capturing and Sequestering Activated Blast-Furnace Slag Mortar by Response Surface Analysis

장 봉 진 Jang, Bong Jin
박 철 우 Park, Cheol woo
김 승 원 Kim, Seung Won
주 민 관 Ju, Min Kwan
박 기 태 Park, Ki Tae
이 상 윤 Lee, Sang Yoon

정회원 · 강원대학교 대학원 토목건설공학과 석사과정 (E-mail : wowbjb@naver.com)
정회원 · 강원대학교 공학대학 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr)
정회원 · 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : inncoms@naver.com)
강원대학교 공학대학 토목공학과 연구교수 (E-mail : j_dean21@naver.com)
한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원 (E-mail : ktpark@kict.re.kr)
한국건설기술연구원 인프라구조연구실 전임연구원 (E-mail : sylee@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : In this study blast furnace slag, an industrial byproduct, was used with an activating chemicals, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and Na_2SiO_3 for carbon capture and sequestration as well as strength development.

METHODS : This paper presents the optimized mixing design of Carbon-Capturing and Sequestering Activated Blast-Furnace Slag Mortar. 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.

RESULTS : The influencing factors of experimental are water ratio, Chemical admixture ratio and Curing temperature. In the results of response surface analysis, to obtain goal performance, the optimized mixing design for Carbon-Capturing and Sequestering Activated Blast-Furnace Slag Mortar were water ratio 40%, Chemical admixture ratio 58.78% and Curing temperature of 60°C.

CONCLUSIONS : Compared with previous studies of this experiment is to some extent the optimal combination is expected to be reliable.

Keywords

carbon capturing and sequestering, blast furnace slag, response surface analysis, Box-Behnken (B-B) method

Corresponding Author : Park, Cheol woo, Associate Professor
Department of Civil Engineering, Kangwon National University,
#1 Joongang-ro Samcheok-si, 245-711 Korea
Tel : +82.33.570.6515 Fax : +82.33.570.6517
E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

1.1. 연구배경

전 세계적으로 지구 온난화로 인한 기후변화와 생태계 파괴는 개발과 성장위주의 정책일로를 걷던 인류에게 더

이상 묵과할 수 없는 인류생존의 위협이 될 수도 있는 중차대한 사안이 되었다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서에 따르면, 지난 100년 세계 평균기온은 0.74°C 상승했으며, 금세기 말

최고 6.4℃ 상승할 것으로 예상되고 있다(Barker T. I. et al, 2007). 이에 따라 ‘저탄소 녹색성장(Low Carbon Green Growth)’이 전 세계적인 주요 현안이 되었으며, ‘교토의정서’를 중심으로 글로벌 차원의 온실가스 저감 대책을 마련 및 추진 중이다. 온실가스 배출순위 세계 10위인 우리나라도 2008년 저탄소 녹색성장을 새로운 국가 성장 비전의 축으로 삼고 관련 법 및 계획의 수립과 이에 따른 관련 기술개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라 전체 온실가스 배출량의 16%를 차지하고 있는 도로 분야에서도 저탄소 녹색성장에 일조하기 위해서는 녹색 도로 법·제도 등을 제정, 정비하고 탄소 모니터링을 통한 통합관리시스템을 구축할 필요가 있으며, 도로의 생애주기인 생산-유지관리-재활용 전단계의 CO₂ 배출을 최소화하고, 발생된 CO₂를 흡수, 전환, 해소하는 환경친화형 도로 설계 및 시공기술을 개발할 필요가 있다. 또한 국내 온실가스 총 배출량(CO₂와 다른 온실가스 포함)이 2000년 이후 연평균 2.82% 증가하여 온 추세를 유지한다고 가정하여 교토의정서의 2차 공약기간(2013년~2017년) 동안의 연평균 총 배출량을 산정하면 약 8억 톤에 달하며, 이 기간 동안 탄소배출권 거래시장을 통해 연평균 3.7억 톤을 감축해야 할 것으로 추정된다. 따라서 CO₂를 방출하는 제품에 대해서 탄소세 또는 탄소배출부과금이 추가로 부가된다고 가정할 경우, 이로 인한 시멘트의 단가 상승률은 대략 150%~200%로 예측할 수 있다. 이러한 시멘트 가격의 상승은 도로 시설물 건설 및 유지관리 비용의 급격한 상승요인으로 작용하게 되며, 사회·경제적으로 매우 큰 영향을 미칠 것이다. 결과적으로 콘크리트에서 CO₂를 저감하는 기술은 미래를 선도할 새로운 기술로 평가받고 있으며, “Green Concrete(CO₂ 저감 콘크리트)”는 2010년 MIT Technology Review에서 발표한 10대 신기술 중 하나이고, 유럽 EU 선진국에서는 미래성장 산업으로 “CO₂ 소량배출 및 흡수 콘크리트 개발”을 선정하고 연구 개발 중에 있다. 따라서 국내에서도 대량의 탄소를 발생시키는 콘크리트의 CO₂ 저감을 목적으로 하는 재료기술의 개발이 절실히 필요한 실정이며, 산업부산물의 CO₂ 포집격리효과를 극대화하여 도로 재료로 사용하면 온실가스 저감효과 뿐만 아니라 폐기물 재활용 효과까지 얻을 수 있어 경제적이며 친환경적인 기술이 될 수 있다. 녹색도로는 기술개발 결과의 활용가능성이 크고 생산유발효과가 막대하여 녹색 성장의 주축이 될 수 있을 것으로 판단되며, 탄소포집을 목적으로 건설재료 개발을 위한 원천기술이 필요한 실정이다(Barker T. I. et al, 2007).

1.2. 연구목적

국내 도로 총 연장은 10만km 이상으로 이를 녹색도로화하면 시멘트 재료를 사용하는 도로포장 재료로부터 배출되는 온실가스를 능동적으로 포집·격리하는 주요 저감원으로 활용할 수 있다. 국내에서 석탄소각재 또는 광산부산물 등의 산업부산물의 일부를 기존 시멘트 또는 아스팔트와 혼합하여 도로재료로 사용하고 있으나, 탄소포집격리용 산업부산물 재료분야의 활용은 전무한 상황으로 산업부산물의 CO₂ 포집격리효과를 극대화하여 도로재료로 사용하면 온실가스 저감효과 뿐만 아니라 폐기물 재활용 효과까지 얻을 수 있어 경제적이며 친환경적인 방법이 될 것이다. 지난 20년 간 교통수요가 증가함에 따라 정부는 도로시설 확충에 치중해 왔으며 이로 인하여 혼잡지체와 그로 인한 온실가스 배출량은 증가하고 있다. 국내에서도 녹색기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만, 많은 온실가스를 발생하고 있는 도로에서 기술개발에는 관련 연구가 부족한 실정이다. 따라서 대기 중 CO₂를 능동적으로 포집할 수 있는 DAC(Development Assistance Committee) 기술 등 도로에서 발생하는 온실가스를 흡수·제거할 수 있는 기술개발이 필요하다.

최근 탄소저감을 위하여 콘크리트 제조 시 보편적으로 사용되는 방법이 산업부산물을 활용하여 기존의 포틀랜드 시멘트를 대체하는 것이다. 하지만 대체물질 사용량 증가와 같은 수동적인 탄소저감방법에는 한계가 있어, 보다 능동적인 탄소저감노력과 산업폐기물 재활용을 동시에 이루어야 할 필요가 있다(장봉진 외, 2013).

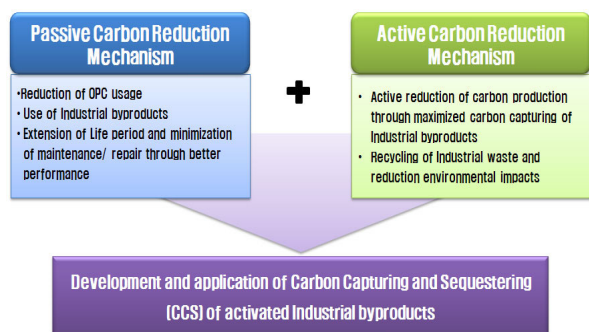


Fig. 1 Development of Carbon Capture Road Materials

따라서 본 연구는 이러한 수동적 탄소저감과 능동적 탄소저감을 모두 만족하는 새로운 개념의 탄소흡수용 도로재료를 개발하고자 하며, 도로재료 뿐만 아니라 건축, 건설, 사회기반시설에 다양하게 활용하고자 한다. 이에 따라 “활성산업부산물을 활용한 탄소흡수용 도로

재료 개발"을 위한 기초연구로서 대표적인 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 활용한 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 기초특성을 분석하고 실험에 근거한 최적배합을 도출하고자 한다.

2. 반응표면분석법

반응표면분석(response surface analysis)은 여러 개의 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수(η)에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석 방법을 말한다. 일반적으로 반응표면분석을 통해 독립변수들($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$)과 반응변수(η)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 내에서 기존의 요인실험법으로 실시하면 다수의 수준을 설정하여 그 결과값으로 통계적 분석을 실시한다(이상안 외, 2009).

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

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

새로 정의된 독립변수에 의한 1차 회귀모형을 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (1)$$

최소 제곱법에 의하면 적합한 반응표면식은

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

로 표현된다. 만약 독립변수의 수가 3으로 $k=3$ 인 경우

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 \\ & + \hat{\beta}_{33} x_3^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 \end{aligned}$$

위 식을 행렬을 이용하여 간략히 바꾸어 쓰면

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

\hat{y} 를 x 로 미분하면

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

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

위 세 가지 경우를 두 개의 독립변수인 경우에 대하여 \hat{y} 의 등고선표에서 흥미영역을 그린다(이상안 외, 2009).

3. 실험개요

3.1. 실험계획

이 연구의 실험은 Box-Behnken(B-B)계획법에 따라 배합을 수행하고 그 결과를 분석하여, 이를 통한 최적 배합비를 도출하였다(이레테크, 2009; 신태용, 2008). 이 계획법은 인자수가 k 개인 경우에 요인배치법(박성현, 2006)보다는 실험점의 수가 많지 않으면서도 직교블록(orthogonal blocking)을 만들기 용이하고, 2차 회귀방정식을 구할 수 있기 때문에 반응표면분석에서 흔히 사용되는 방법이다. 이 연구의 최종목표는 활성 산업부산물을 활용한 탄소흡수용 도로재료 개발이므로 연구의 목표성능은 Table 1과 같이 설정하였다. Table 1의 목표범위로 한 예비실험에서 A/B 5% 이상, W/B 50%, 양생온도 23℃ 이상에서 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 유동성과 압축강도를 확보하는 것을 알 수 있었다. 또한 A/B와 W/B의 경우 40% 및 60%를 초과할 경우 압축강도와 유동성을 적절하게 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 이 실험의 인자와 수준 및 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 시험항목을 Table 2와 같이 설정하였다.

Table 1. The Goal Performance of Products

Properties	Goal performance	Curing
Compressive strength (MPa)	Over 27	28 days
Flow (mm)	Over 160	

Table 2. Experimental Factors and Range

Factor	Range		Testing items
	Lower limit	Upper limit	
A/B (%)	5	40	Compressive strength, Flow
W/B (%)	50	60	
Curing temp. (°C)	23	60	

*A/B : 활성화제와 바인더 비율, W/B : 물과 바인더 비율
Curing temp. : Curing temperature

이 실험에서는 Box-Behnken(B-B)계획법에 따라 Table 4와 같이 15회의 실험을 행하여 독립변수와 반응 변수와의 관계를 통계적으로 해석하여 각 요인의 주 효과 및 최적배합수준을 도출하였다. 통계분석 툴(tool)은 미국 펜실베니아 주립대학에서 개발한 교육용 통계프로그램인 MINITAB R14를 사용하였다(이레테크, 2009).

3.2. 사용재료

3.2.1. 고로슬래그 미분말 및 잔골재

본 연구에서는 국내 H사의 KS F 2563에 적합한 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 잔골재는 주문진 표

Table 3. Chemical Composition and Physical Properties of Blast Furnace Slag

Chemical Compositions	
Compositions	Weight percent (%)
CaO	46.2
SiO ₂	32.7
Al ₂ O ₃	13.0
Fe ₂ O ₃	0.497
MgO	3.01
K ₂ O	0.491
TiO ₂	0.588
SrO	0.0721
MnO	0.336
SO ₃	2.83
P ₂ O ₅	0.0129
Na ₂ O	0.173
NiO	0.0041
Physical properties	
Specific gravity	2.90
Fineness (cm ² /g)	4326
Color	White

준사를 사용하였다. Table 3은 본 연구에서 사용한 고로슬래그 미분말의 화학적 및 물리적 특성을 나타내고 있다.



Fig. 2 Appearance of used Blast Furnace Slag Powder

3.2.2. 탄소포집 활성화제(수산화칼슘, 규산나트륨)

탄소포집 활성화제로 사용된 수산화칼슘은 국내 S사의 분말형 제품으로 순도 95% 이상의 수산화칼슘을 사용하였으며, 규산나트륨은 국내 S사의 SSP-30의 분말형 제품을 사용하여 실험을 수행하였다.



Fig. 3 Used of Calcium Hydroxide (Ca(OH)₂)

탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 탄소흡수능을 증가시키기 위하여 수산화칼슘과 규산나트륨을 고로슬래그 미분말과 적정 비율로 혼합하여 모르타르를 제조하여 실험을 수행하였다.

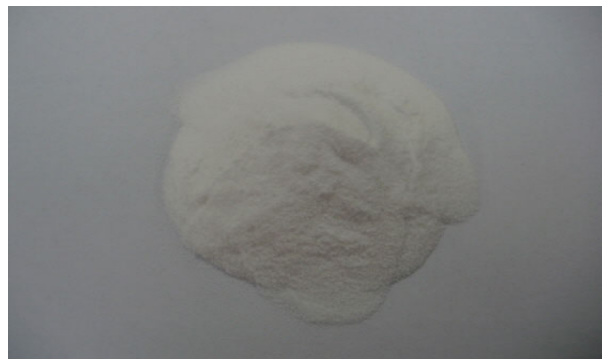


Fig. 4 Used of Sodium Silicate (Na₂SiO₃)

Table 4. The Design of Experiment

Std. order	Run order	Pt. type	Block	A/B (%)	W/B (%)	Curing temperature (°C)
1	4	2	1	5.0	50	41.5
2	3	2	1	40.0	50	41.5
3	1	2	1	5.0	60	41.5
4	10	2	1	40.0	60	41.5
5	2	2	1	5.0	55	23.0
6	15	2	1	40.0	55	23.0
7	11	2	1	5.0	55	60.0
8	8	2	1	40.0	55	60.0
9	13	2	1	22.5	50	23.0
10	7	2	1	22.5	60	23.0
11	9	2	1	22.5	50	60.0
12	14	2	1	22.5	60	60.0
13	5	0	1	22.5	55	41.5
14	6	0	1	22.5	55	41.5
15	12	0	1	22.5	55	41.5

*Std : standard, Pt : pareto

3.2.3. 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(박성현, 2006; 이레테크, 2009).

3.3. 실험방법

3.3.1. 압축강도 시험방법

압축강도 시험은 KS L 5105규정에 의거하여 플로우 시험이 끝나는 즉시 모르타르를 50mm×50mm×50mm 크기의 입방체 칸에 두께 약 25mm 정도로 넣고 10초 동안 32회 다짐 후 모르타르를 가득 채우고 다시 10초 동안 32회 다짐하여 공시체를 제작하였다.

압축강도 측정용 시험체는 각 변수별 3개씩 제작하여 재령 28일 압축강도를 측정하였으며, 양생온도는 각각 23°C, 41.5°C, 60°C에서 양생을 실시하였다.



Fig. 5 Compressive Strength Test of Mortar Cube (KS L 5105)

3.3.2. 플로우 시험방법

탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 플로우 시험은 KS L 5105의 규정에 의거하여 실험을 수행하였다. 실험변수는 Table 5에 나타나 있으며, 플로우 테이블의 윗면을 깨끗이 마르게 닦고 플로우 틀을 중앙에 놓고 모르타르를 약 25mm 두께의 층으로 하여 틀 안에 넣고 템퍼로 20회 다짐을 하였다. 다음에 모르타르로 플로우 틀을 채우고 처음 층에서와 같이 20회 다짐 후 틀의 윗면에 맞추어 모르타르를 평면으로 잘라낸 다음 플로우 틀을 모르타르로부터 들어올리고, 플로우 테이블을 15초 동안에 25회, 12.7mm의 높이로 낙하시켜 흘러내린 모르타르의 밑지름을 거의 같은 간격으로 4개의 지름을 측정하여 이의 평균값을 플로우 값으로 측정하였다.



Fig. 6 Flow Test of Mortar (KS L 5105)

4. 결과 및 고찰

Table 5는 Box-Behnken(B-B)계획법에 의한 15회의 배합을 수행하고, 그에 따른 압축강도 및 Flow의 실

험결과 값을 나타낸 것이다.

4.1. 압축강도 실험

Table 6은 A/B, W/B, 양생온도에 대한 압축강도의 분산분석표이다. 수정편차제곱의 합(Adj SS)이 각각 756.83, 41.57, 53.41로서 A/B와 양생온도에 대한 압축강도의 변동폭이 W/B에 대한 압축강도의 변동폭 보다 크다. 이러한 원인은 탄소포집 활성화제의 비율과 양생온도에 따라 모르타르의 수화반응 및 중합반응에 다소 큰 영향을 주어 압축강도에 직접적인 요인으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 5. Test Results

Std. order	Run order	Pt. type	Block	A/B (%)	W/B (%)	Curing temp. (°C)	Average comp. strength (MPa)	Average Flow (mm)
1	4	2	1	5.0	50	41.5	11.8	236.3
2	3	2	1	40.0	50	41.5	32.5	119.5
3	1	2	1	5.0	60	41.5	9.1	278.3
4	10	2	1	40.0	60	41.5	27.7	182.4
5	2	2	1	5.0	55	23.0	6.9	253.6
6	15	2	1	40.0	55	23.0	26.3	150.9
7	11	2	1	5.0	55	60.0	12.5	253.6
8	8	2	1	40.0	55	60.0	30.8	150.9
9	13	2	1	22.5	50	23.0	22.5	143.4
10	7	2	1	22.5	60	23.0	15.8	201.5
11	9	2	1	22.5	50	60.0	26.2	143.4
12	14	2	1	22.5	60	60.0	22.4	201.5
13	5	0	1	22.5	55	41.5	21.5	155.9
14	6	0	1	22.5	55	41.5	21.8	155.9
15	12	0	1	22.5	55	41.5	22.1	155.9

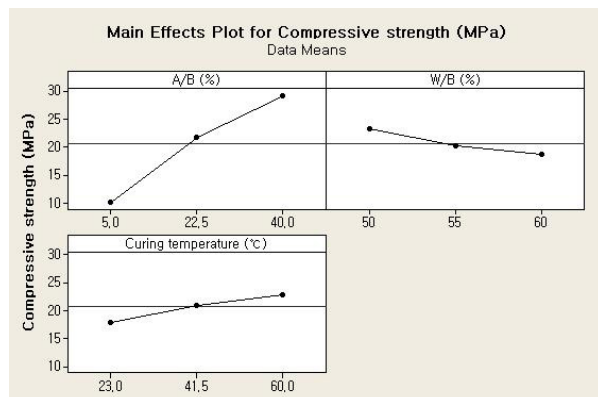


Fig. 7 The Main Effects for Compressive Strength

Table 6의 분산결과 A/B, W/B, 양생온도에 대한 F값 0.000과 0.000, 0.000은 분산의 기대치 P값이 0.05 이하이므로, 유의수준 5%에서 A/B, W/B 양생온

도는 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 압축강도에 대한 주요 영향 인자로 판단된다. Fig. 7은 독립변수인 A/B, W/B 양생온도에 대한 압축강도의 주 효과도이다. 결과의 그래프에서 가운데 점선은 압축강도의 총 평균이고, 각 점은 수준에서의 평균을 의미한다. 각 인자에 대한 압축강도 변동폭의 크기를 비교하여보면, W/B와 양생온도에 비해 A/B의 비율이 압축강도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 A/B 40%, W/B 50%, 양생온도 60°C일 때 압축강도가 최고값으로 나타났다.

Table 6. Analysis of General Linear Model on Compressive Strength

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
A/B (%)	2	756.83	378.42	589.26	0.000
W/B (%)	2	41.57	20.78	32.36	0.000
Curing temperature (°C)	2	53.41	26.70	41.58	0.000
Error	8	5.14	0.64		
Total	14				

S = 0.801366, R² = 99.40%, R² (Adj) = 98.95%
 *DF : degree of freedom, SS : sum of squares
 MS : mean squares, F : F-test, P : P-value

4.2. Flow 실험

Table 7은 A/B, W/B에 대한 Flow의 분산분석표이다. 모르타르의 Flow 실험은 경화 전 실험이므로 양생온도에 대한 부분은 분산분석에서 고려하지 않았다. 수정편차제곱의 합(Adj SS)이 각각 27341.6, 6388.4로서 A/B와 W/B에 대한 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 Flow 변동폭이 다소 큰 것으로 나타났다. 이러한 원인은 탄소포집 활성화제의 비율과 단위수량의 첨가량에 따라 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 유동성에 다소 큰 영향을 주어 Flow 값의 변화에 직접적인 요인으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. Table 7의 분산결과는 A/B, W/B에 대한 F값 0.000과 0.000은 분산의 기대치 P값이 0.05 이하이므로, 유의수준 5%에서 A/B, W/B는 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 Flow에 대한 주요 영향 인자로 판단된다.

Fig. 8은 독립변수인 A/B, W/B에 대한 Flow의 주 효과도이다. 결과의 그래프에서 가운데 점선은 Flow의 총 평균이고, 각 점은 수준에서의 평균을 의미한다. 각 인자에 대한 Flow 변동폭의 크기를 비교하여 보면, A/B와 W/B는 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 유동성에

다소 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 A/B 5%, W/B 60%일 때 Flow가 최고값으로 나타났다.

Table 7. Analysis of General Linear Model on Flow

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
A/B (%)	2	27341.6	13670.8	413.50	0.000
W/B (%)	2	6388.4	3194.2	96.61	0.000
Error	10	330.6	33.1		
Total	14				

S = 5.74991, R² = 99.03%, R² (Adj) = 98.64%

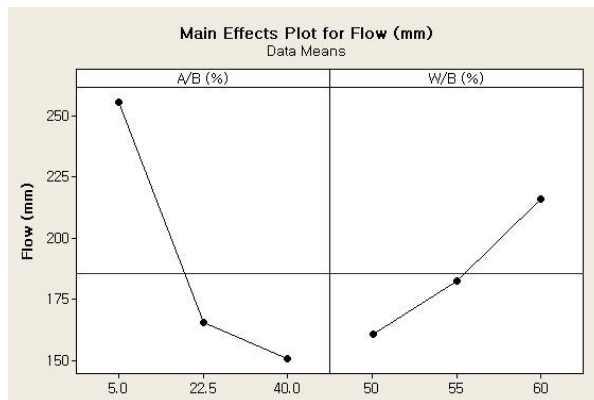


Fig. 8 The Main Effects for Flow

4.3. 압축강도와 Flow의 관계

압축강도에 대한 Flow의 회귀식은 Eq. (2)와 같으며, 이 회귀식의 결정계수 R-제곱값이 변동의 80.1%를 만족하는 신뢰도를 보이고 있다.

$$C = 47.07 - 0.1423F \quad (2)$$

- C : Compressive strength (MPa)
- F : Flow (mm)
- R² : 80.1%

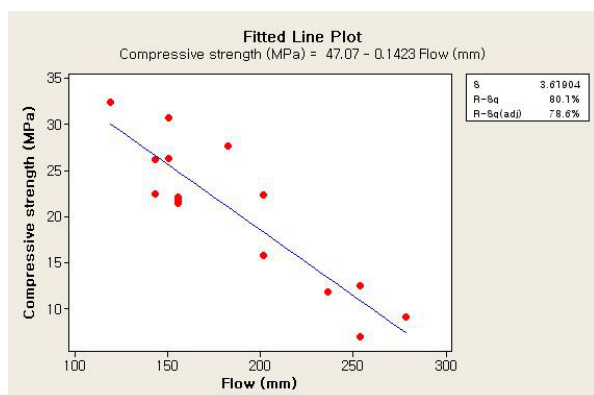


Fig. 9 The Relation between Compressive Strength and Flow

Fig. 9의 회귀곡선 그래프는 압축강도와 Flow의 관계가 3차 곡선으로 적합 타당하다는 것을 보여준다. 이는 단위수량이 증가함에 따라 Flow는 증가하고, 반면에 Flow 증가에 따라 압축강도가 감소하는 기존의 연구 결과들과 일치함을 볼 수 있다(장봉진 외, 2013).

4.4. 반응표면 설계 분석

4.4.1. 압축강도에 대한 반응표면 분석

등고선도는 반응표면설계의 결과를 2차원 평면으로 그린, 반응표면 분석 그래프 중의 하나이다. 각 등고선은 인자의 조합에 대한 반응곡선을 나타내는 것으로 등고선의 모든 지점에서의 반응치 값은 동일하다(이상안 외, 2009).

Fig. 7에서 압축강도의 최고값은 A/B 40%와 양생온도 60℃일 때 이므로 동일한 조건으로 등고선도를 그리면 Fig. 10과 같다. Fig. 10의 등고선도에서 W/B가 약 50~53% 정도일 때 양생온도가 약 35℃ 이상이면 압축강도는 32MPa 이상으로 추정되고, W/B가 약 50~58%일 때 A/B가 약 31% 이상이면 압축강도는 30MPa 이상으로 추정된다.

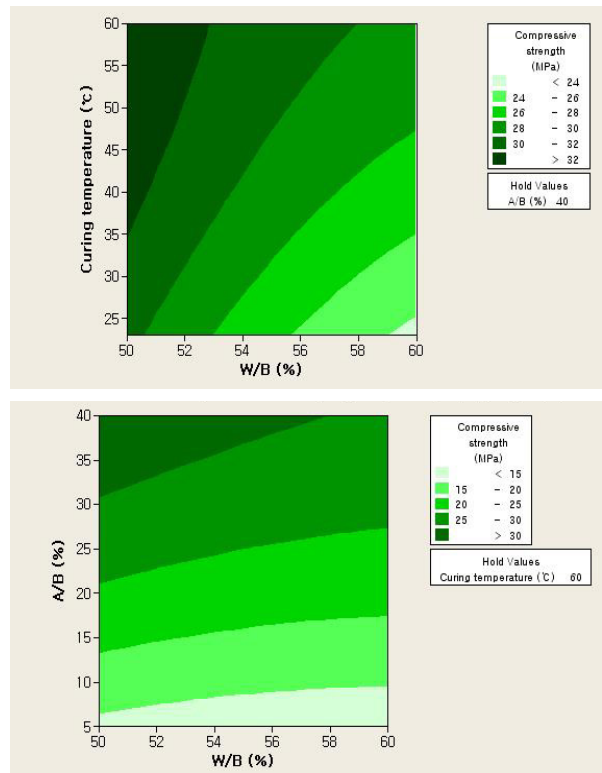


Fig. 10 The Contour Plot of Compressive Strength

4.4.2. Flow에 대한 반응표면 분석

Fig. 8에서 Flow의 최고값은 A/B 5%와 W/B 60%

일 때이므로, 동일한 조건으로 등고선도를 그리면 Fig. 11과 같다. Fig. 11의 등고선도에서 A/B가 약 5%로 고정일 때 W/B는 약 59% 이상이면 Flow는 280mm 이상으로 추정되고, W/B가 60%로 고정일 때 A/B가 약 6% 이하이면 Flow는 280mm 이상으로 추정된다.

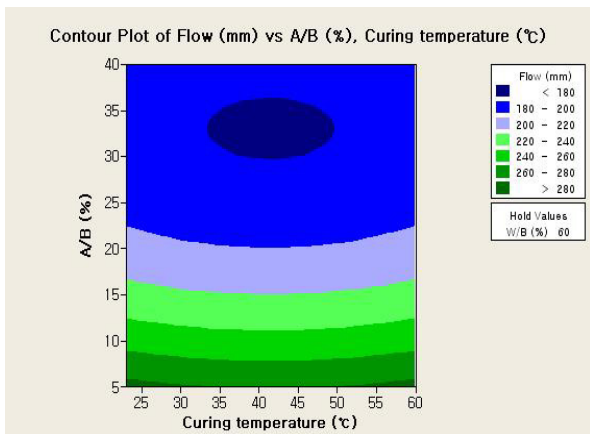
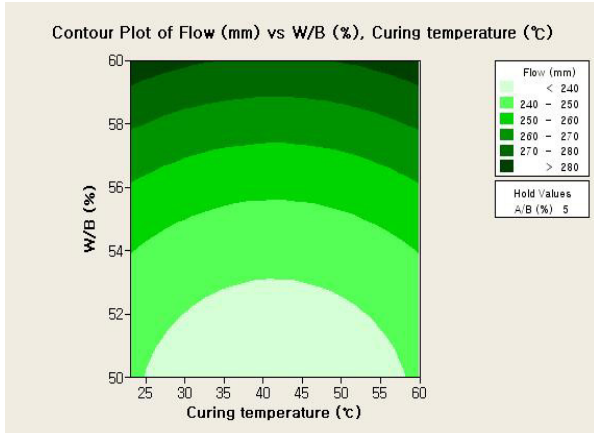


Fig. 11 The Contour Plot of Flow

4.5. 다중반응 최적법

다중반응 최적법은 여러 개의 반응변수들의 중첩등고선도를 그려서 반응값들을 동시에 고려하는 연구방법으로 여러 반응변수들의 타협영역을 시각적으로 확인할 수 있다. Figs. 10, 11의 최적값들은 각각의 단일 인자에 대한 최적 반응값 이므로, 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 강도발현만 고려하면 도로재료로서의 유동성 문제와 상충되고, 반대로 유동성만 고려하면 강도발현 문제와 상충된다. 그러므로 도로재료로서 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르는 적당한 유동성과 압축강도가 동시에 고려되어야 하므로 다중반응 최적법을 사용하여 압축강도, Flow를 동시에 충족하는 영역을 찾고자 한다.

4.3의 Eq. (2) 회귀방정식을 보면 R-제공값이 변동

의 80.1%를 만족하는 신뢰도를 보이고 있으며, 압축강도와 Flow의 비교적 큰 변동폭을 고려하여 Table 8과 같이 압축강도와 Flow를 임의로 30MPa 및 180mm로 조정하였다.

Table 8. The Goals of Multi-Response Surface Analysis

Response	Lower limit	Upper limit
Compressive strength (MPa)	27	30
Flow (mm)	160	180

Fig. 12는 Figs. 10, 11의 압축강도, Flow 각각에 대한 최적 등고선도를 중첩시킨 것이다. 목표 범위를 Table 8과 같은 조건으로 타협영역을 시도한 결과 중첩 등고선도 상단의 하얀 부분이 2가지 반응변수 모두를 만족시키는 A/B, W/B, 양생온도의 영역이다.

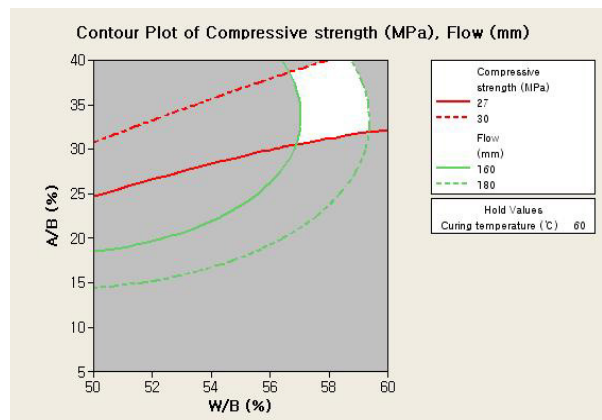


Fig. 12 Overlaid Contour Plot

따라서, 이 실험에서의 다중반응 최적영역은 양생온도가 60°C로 고정일 때 W/B는 약 56%~59%, A/B는 약 30%~40% 정도일 때 최적 범위임을 시각적으로 확인할 수 있었다.

4.6. 최적배합비 도출 및 검증

중첩등고선도는 주어진 반응영역들 사이의 면(面)적인 최적조건영역을 나타내므로 여러 개의 반응변수의 목표 값을 만족하는 점(點)적인 최적배합비 도출을 위해서 MINITAB R14 툴의 반응최적화 도구를 사용하여 최적배합비를 도출하였다. Table 8과 같이 압축강도는 27MPa 이상의 최고값을 추구하고, Flow는 160mm 이상의 최고값을 추구는 조건으로 하는 최적점을 도출하고자 한다. Fig. 13은 MINITAB R14 툴의 최적 반응 도구를 사용한 반응최적화 결과화면을 캡처한 것이다.

반응표면분석법의 반응최적화 결과 Fig. 13과 같이 A/B 40%, W/B 58.78%, 양생온도 60℃의 최적배합이 도출되었으며, 각 반응변수별 결과에 대한 적합성은 압축강도 0.9, Flow 1.0으로 나타났다. 목표성능에 대한 최적배합비와 반응변수의 추정값은 Table 10과 같이 정리할 수 있다.

Table 9. Optimal Response of Products

Response	Goal	Lower limit	Upper limit
Compressive strength (MPa)	Maximize	27	-
Flow (mm)	Maximize	160	-

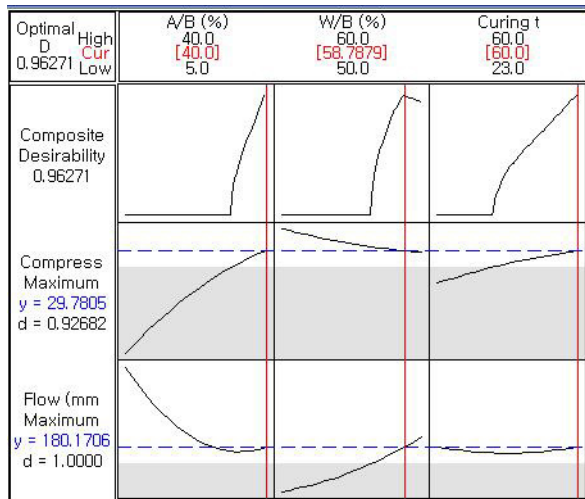


Fig. 13 The Screen of Optimization

Table 10. Optimum Factors / Response Values using Numerical Analytical Methods in the Goal

Factors / response	Level / goal	Numerical optimization
A/B (%)	5~40	40
W/B (%)	50~60	58.7879
Curing temperature (°C)	23~60	60
Compressive strength (MPa)	Maximize	29.7805
Flow (mm)	Maximize	180.1706

Table 10에서 도출된 최적배합으로 예측된 압축강도, Flow 값과 실험값을 비교하기 위해 확인실험을 수행하였다. 3개의 동일한 공시체를 만들어 기존과 같은 방법으로 실험하였으며, 그 결과 값은 Table 11과 같다. 여기서 살펴보면 예측값에 대한 실험 평균값이 차이를 나타내고 있다.

압축강도의 경우 -1.6%, Flow의 경우 -4.3%로 이

는 실험오차 등과 관련이 있다고 사료된다. 특히 Flow의 경우 실험진행 시 모르타르의 유동성에 영향을 주는 온도 및 습도 등과 같은 실험조건과 밀접한 관계를 가진다고 사료되므로 거의 같은 조건에서의 추가적인 실험을 통한 후속 확인이 필요하다고 판단된다.

Table 11. The Result of Verification Test

Factors	Experimental results					Prediction value
	1	2	3	4	Average	
Compressive strength(MPa)	30.1	28.6	29.2	-	29.3	29.7805
Flow (mm)	171.3	173.1	172.4	173.2	172.5	180.1706

5. 결론

실험계획법의 하나인 반응표면분석법(Box-Behnken 법)을 이용하여 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 최적배합 도출에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 압축강도에 영향을 주는 주요인자에 대한 분산분석결과 A/B, W/B, 양생온도는 유의수준 5%에서 유의한 영향이 있으므로 추정되었다.
2. 탄소포집 활성 고로슬래그 모르타르의 Flow에 영향을 주는 주요인자에 대한 분산분석결과 A/B, W/B는 유의수준 5%에서 유의한 경향이 있는 것으로 추정되었다.
3. 압축강도와 Flow 사이의 상호관계에서는 회귀식의 결정계수 값이 변동의 80.1%를 만족하는 신뢰도를 보이고 있다.
4. 압축강도와 Flow의 각각에 대한 반응표면분석결과 압축강도의 경우 Fig. 10의 등고선도에서 W/B가 약 50~53% 정도일 때 양생온도가 약 35℃ 이상이면 압축강도는 32MPa 이상으로 추정되고, W/B가 약 50~58%일 때 A/B가 약 31% 이상이면 압축강도는 30MPa 이상으로 추정되는 것으로 나타났다. Flow의 경우 Fig. 11의 등고선도에서 A/B가 약 5%로 고정일 때 W/B는 약 59% 이상이면 Flow는 280mm 이상으로 추정되고, W/B가 60%로 고정일 때 A/B가 약 6% 이하이면 Flow는 280mm 이상으로 추정되는 것으로 나타났다. 또한 W/B가 증가할수록 압축강도는 저하되고 Flow는 향상되며 A/B가 증가할수록 압

축강도는 증가되고 Flow는 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 양생온도는 경화 전 실험인 Flow에는 영향을 주지 않지만 압축강도에는 양생온도가 높을수록 강도발현에 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

5. 다중반응 최적법인 중첩등고선도를 적용한 결과, Fig. 12는 Figs. 10, 11의 압축강도 Flow 각각에 대한 최적 등고선도를 중첩시킨 것이다. 목표범위를 Table 6과 같은 조건으로 타협영역을 시도한 결과 중첩등고선도의 하얀 부분이 2가지 반응변수 모두를 만족시키는 A/B, W/B 양생온도의 영역이다. 따라서 이 실험에서의 다중반응 최적영역은 양생온도가 60℃로 고정일 때 W/B는 약 56%~59%, A/B는 약 30%~40% 정도 일 때 최적 범위임을 시각적으로 확인할 수 있다.
6. 반응최적화도구를 사용하여 목표성능 범위내의 최적 반응을 분석한 결과 A/B는 40%, W/B는 58.78%, 양생온도는 60℃의 배합이 최적배합으로 도출되었다.
7. 확인실험에 대한 검증결과 실험 평균값은 예측값에 대하여 압축강도의 경우 -1.6%, Flow의 경우 -4.3%의 차이를 보이고 있으며, 이는 실험오차 등과 관련 있다고 사료된다. 특히 Flow의 경우 실험진행 시 모르타르의 유동성에 영향을 주는 온도 및 습도 등과 같은 실험조건과 밀접한 관계를 가진다고 사료되므로 거의 같은 조건에서의 추가적인 실험을 통한 후속 확인이 필요하다고 판단된다. 또한 선행연구결과(이상안 외, 2009)와 비교해 볼 때, 본 실험결과의 최적배합이 어느 정도는 신뢰성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2012년 국토해양기술연구개발과제 “탄소중립형 도로 기술개발” 연구단과 한국건설기술연구원의 “FRP Hybrid Bar를 활용한 해양항만구조물 수명향상 기술 개발” 과제의 연구지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

References

- Barker T. I. et al, 2007: *Technical Summary. In: Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jang, B.J., Kim, S.W., Song, J.H., Park, H.M., Ju, M.K., Park, C.W., (2013), “Fundamental Characteristics of Carbon-Capturing and Sequestering Activated Blast-Furnace Slag Mortar”, *JOURNAL of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 95-103
- Park, S.H., “*Modern Experimental Design(현대실험계획법)*”, Minyoungsa, 2006, pp. 453-498.
- Eretec Minitab, “*Practical completion of the new Minitab(새 Minitab 실무완성)*”, Eretec, 2009, pp. 617-653.
- Shin, T.Y., “*Oriented practices utilizing MINITAB Experimental Design site(Minitab을 활용한 현장사례 위주의 실험계획법)*”, 두양사, 2008, pp. 158-177.
- Lee, S.A., Jung, C.W., Kim, H.J., Ahn, J.H., (2009), “Optimized Mixing Design of Lightweight Aerated Concrete by Response Surface Analysis”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 6, pp. 745-752.

(Received : Oct. 30 2013, Revised : Nov. 2 2013, Accepted : Nov. 25 2013)