순환골은골재, 황토, 고로슬래그 미분말 및 마섬유를 사용한 레인가든 구조물 콘크리트의 최적배합설계 및 역학적 특성

Optimum Mix Proportion and Mechanical Properties of Rain Garden Structure Concrete using Recycled Coarse Aggregate, Hwang-Toh, Blast Furnace Slag and Jute Fiber

김동현* · 박찬기**,*

Kim, Dong-Hyun · Park, Chan Gi

ABSTRACT

In this study, the optimum mix proportions of rain garden structure concrete were decided and the mechanical properties were evaluated. Experimental parameters were blast furnace slag, hwang-toh, recycled aggregates and natural jute fibers. The target compressive strength and chloride ion penetration were more than 24 MPa and less than 1000 coulombs, respectively. The response surface method was used for statistical optimization of experimental results. The optimal mixing ratios of the blast furnace slag, hwang-toh, recycled coarse aggregate and jute fiber volume fraction were determined 59.98 %, 8.74 %, 12.12 % and 0.2 %, respectively. The compressive strength, flexural strength and chloride ion penetration test results of optimum mix ratio showed that the 24.56 MPa, 3.88 MPa and 999.08 coulombs, respectively.

Keywords: Blast furnace slag; Hwang-toh; Rain garden structures; Optimum mix proportions; Recycled aggregate; Statistical optimization

1. 서 론

빗물을 최대한 토양에 많이 침투시켜 대상 지역에 보유할 수 있는 식재지역으로 설계되는 레인가든은 개발지역의 비점오염 물질 저감을 위한 최적관리방안 (BMP)으로써, 또한 저영향개발 (LID)을 위한 생태공학적 대안으로 활용가능성이 점차 증가되고 있다 (Dietz and Clausen, 2005; Dunnett and Clayden, 2007). 미국과 유럽에서는 이미 오래전부터 레인가든에 대한 연구가 진행되었으며 (Wossink and Hunt, 2003; Hsieh and Davis, 2005; Erikson et al., 2007; Davis et al., 2001), 국내에서도 초본류를 활용한 레인가든 적용성 평가, 레인가든이 지하유출 및 침투유량 감소에 미치는 효과 등에 다양한 연구가 진행되었다 (Kim and Sung, 2011). 이와 같이 레인가든에 대한 대부분이 주로 강우 유출수 관리와 오염물질 제거 등에 집중되어 수행되었다. 그러나 레인가든 구조물을 구성하는 재료에 대한 연구는

거의 이루어지지 않았다. 레인가든은 친환경적인 시설물로 이에 적용되는 구조물 역시 환경친화적인 구조물로 적용하는 것이 바람직하다. 그러나 현재까지 레인가든 구조물에 적용되는 재료는 일반적인 콘크리트로 친환경적 구조물인 레인가든에는 적합하지 않다. 또한 레인가든 구조물의 특성상 항상 물과 접하고 오염물질이 유입되기 때문에 이에 대한 충분한 내구성을 확보하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 레인가든 구조물의 환경친화성과 성능을 향상시킬 수 있도록 건설폐기물인 순환골재, 산업부산물인 고로슬래그 미분말, 최근 환경친화형 콘크리트에 적용이 증가하고 있는 황토, 천연마섬유 등을 이용하여 레인가든 구조물의 친환경성을 확보하고자 하였다. 레인가든의 구조물의 친환경성을 확보하기 위하여 본 연구에서는 시멘트 사용량을 감소시키고자 하였다. 시멘트 사용량 감소는 CO₂의 배출량을 감소시킬 수 있다. 전체 CO₂ 배출량 중 8 %는 콘크리트 제조 분야에서 배출되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 콘크리트 제조공정에서 이산화탄소의 배출량을 줄이고 폐자원을 적극 활용하여야 한다. 기존 연구결과에 의하면 일반적으로 1톤의 시멘트를 생산하는데 0.8톤의 이산화탄소가 발생된다 (Yang et al., 2011; Han et al., 2009). 따라서 산업부산물인 고로슬래그 등을 이용하여 시멘트를 대체하여 적용하는 연구가 진행되고 있다 (Cho et al., 2012; Kim et al., 2010; Mun et al., 1997). 또한 천연재료

* 공주대학교 일반대학원 농공학과

** 공주대학교 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-41-330-1266

Fax: +82-41-330-1269

E-mail: cgpark@kongju.ac.kr

2013년 3월 7일 투고

2013년 4월 3일 심사완료

2013년 4월 22일 게재확정

인 활성 황토를 콘크리트용 혼화재료로 사용하는 연구가 다양하게 진행되고 있다. 활성 황토는 활발한 포졸란 반응에 의해 압축 강도 발현이 일반 무혼입 콘크리트보다 높게 나타나, 건설 신재료로서의 황토의 개발이 가능할 것으로 보고하였다 (Choi et., al., 2001; Kim et., al., 2010). 본 연구에서는 상기와 같은 고로슬래그 및 황토를 콘크리트의 주요재료인 시멘트를 대체하고자 하며 레인가든 구조물의 성능을 고려하여 최적량을 결정하고자 한다. 두 번째로 자원순환측면에서 천연골재를 대체하여 순환골재를 적용하고자 한다. 건설폐기물중 가장 높은 비율을 차지하는 것은 폐콘크리트이다. 따라서 폐콘크리트의 재활용에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 현재 콘크리트용 골재로 재활용되고 있다. 콘크리트용 골재로 재활용은 천연골재를 대체하여 적용함으로써 환경파괴를 방지하는 동시에 자원순화 측면에서도 매우 효과적인 방법이다 (Kim and Hong, 2010). 그러나 천연골재를 순환골재로 치환하는 것은 구조물의 성능에 맞게 최적량을 사용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 레인가든 구조물의 환경친화성과 성능을 만족시키기 위하여 통계학의 반응표면분석법을 이용하여 성능과 친환경성을 모두 만족시킬 수 있는 최적 배합비를 결정하고 역학적 특성을 평가하였다.

II. 실험계획

1. 반응표면분석법

반응표면분석법은 실험적인 반응의 모델링 및 시스템을 최적화하는 데 필요한 계획된 실험을 분석하는 통계 기법이다. 이 기법은 Box and Wilson에 의해서 개발되었다 (Box George EP, 1978). 그리고 화학공학에 첫 번째로 적용되었으며, 그 후 화학, 물리 의학, 공학 문제와 같은 다양한 분야에 적용되었다. 일반적으로 반응표면분석법은 계획과 반응의 수학적 모델링에 사용된 실험분석 기술로 구성된다. 반응 표면에 의해서 분석된 대부분의 문제는 변수 사이의 알고 있는 관계를 가지지 않는 것이며, 그것은 종속변수와 독립변수 간의 상호 작용을 설명하는 수학적 모델을 찾을 필요가 있다. 일반적으로 종속변수 y 가 목표 값이라면 이를 최대화시키는 독립변수 x 들의 값을 결정하게 되는데, y 를 최적화시키는 x 들의 값을 최적반응조건이라고 한다. 실험 시 목표로 하는 결과를 흥미영역 R 에서 2차 회귀모형이 적절할 것이라고 생각하여 종속변수의 측정치를 y 로 놓으면, 그 모형은 식 (1)과 같다 (Box George EP, 1978).

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

여기서, $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 이고 서로 독립이라고 가정되며, 최소제곱법에 의하여 적합한 반응표면은 식 (2)로 표현된다 (Box George EP, 1978).

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

여기서, 각 실험결과와 추정치이고 $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_i$, $\hat{\beta}_{ij}$ 는 각각 β_0 , β_i , β_{ij} 의 최소제곱 추정량을 나타낸다.

이러한 반응표면분석법은 콘크리트의 배합설계를 최적화하는데 최근 적용되어 왔다 (Patricia et., al., 2012). 본 연구에서는 레인가든 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 고로슬래그 미분말, 황토, 순환굵은골재 및 보강섬유의 사용량을 최적화 하는데 반응표면분석법을 사용하였다.

2. 사용재료

가. 시멘트 및 잔골재

본 연구에서는 국내 S사의 비중 3.14의 1종 보통 포틀랜드 시멘트 및 비중 2.61의 잔골재를 사용하였다.

나. 굵은골재

본 연구에서는 레인가든 구조물 콘크리트의 친환경성을 확보하기 위하여 천연 굵은 골재 (Natural coarse aggregate; NCA)를 순환 굵은 골재 (Recycled coarse aggregate; RCA)로 치환하여 적용하였다. 본 연구에서 사용된 천연 골재 및 순환 굵은 골재의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

다. 고로슬래그 미분말 및 황토

본 연구에서는 레인가든 구조물 콘크리트의 친환경성, 역학적 성능 및 투수저항성 향상을 위하여 고로슬래그 미분말 (Blast furnace slag; BFS) 및 소성황토를 시멘트를 치환하여 적용하였다. 고로슬래그 미분말의 주성분인 수산화칼슘과 황토의 포졸란

Table 1 Physical properties of natural and recycled coarse aggregate

Aggregate	Density (g/mm ³)	Absorption (%)	Fineness modulus
Natural coarse aggregate (NCA)	2.65	0.35	6.92
Recycled coarse aggregate (RCA)	2.62	1.14	7.12

Table 2 Physical and chemical properties of blast furnace slag

Density (g/mm ³)	Fineness	L.O.I (%)	Chemical compositions (%)							
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO	S
2.8	4000~6000	3.0	33.1	13.9	0.29	42.4	6.1	0.4	0.96	0.66

Table 3 Physical and chemical properties of hwang-toh

Grading				Composition (% weight)							Density (g/mm ³)
Cumulative percentage passing (%)				SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.08 mm	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
100	100	99	88	40.0	7.79	32.9	0.39	1.54	0.76	1.73	2.72

Table 4 Properties of jute fibers

Elastic modulus (GPa)	Density (g/mm ³)	Fiber length (mm)	Fiber diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Surface
61	1.26	3	0.015	510	Hydrophilic

Fig. 1 Photo of natural jute fiber

반응으로 인하여 생성되는 스트레틀링가이트 겔 및 아플라이트 겔과 결합하여 압축강도를 상승시키는 것으로 알려져 있다. 고로슬래그 미분말 및 황토의 물리·역학적 특성은 Table 2 및 Table 3과 같다.

라. 보강섬유

본 연구에서는 레인가든 구조물 콘크리트의 역학적 성능 및 투수저항성을 향상시키기 위하여 보강섬유를 적용하였으며, 보강섬유로는 천연재료인 마섬유를 적용하였다. 천연마섬유의 물리·역학적 특성 및 형상은 Table 4 및 Fig. 1과 같다.

3. 배합설계

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 레인가든 구조물 콘크리트의 친환경성과 성능을 만족시

Table 5 Levels of variables chosen for the design

Factor	Name	Units	Low Actual	High Actual	Low Coded	High Coded
A	Blast furnace slag (BFS)	%	40	60	-1	1
B	Hwang-toh	%	0	20	-1	1
C	Recycled coarse aggregate (RCA)	%	0	100	-1	1
D	Jute fiber	%	0	0.2	-1	1

키는 최적배합비를 결정하기 위하여 본 연구에서는 목표성능을 염소이온투과저항성은 1,000 Coulombs 이하, 압축강도는 24 MPa 이상으로 설정하였다. 목표 염소이온투과저항성은 수리구조물이라는 조건을 고려하여 내구성을 확보하기 위하여 설정하였으며, 압축강도는 기존 인공습지 구조물에 적용시 적용되는 콘크리트의 설계기준강도를 고려하여 결정하였다. 실험변수로는 고로슬래그 미분말 및 황토를 시멘트 중량에 각각 40~60 % 및 0~20 %로 치환하였으며, 순환 골재 치환율은 0~100 %, 천연마섬유의 혼입률은 0~0.2 %로 하여 반응표면분석법의 Box-behnken법을 적용하였다 (Table 5). Table 5와 같은 변수에 따른 배합비는 Table 6과 같다.

4. 시험방법

가. 압축강도

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 레인가든 구조물 콘크리트의 압축강도 특성을 평가하기 위하여 KS F 2405에 준하여 압축강도 시험을 실시하였다.

나. 휨강도

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에

Table 6 Mix proportion

No.	W/B (%)	S/a* (%)	kg/m ³								
			B**	W***	Fine agg.	Cement	BFS	Hwang-toh	NCA	RCA	Jute fiber
No.1	48.2	50.5	340	164	922	136.00	170.00	34.00	0	918	0
No.2						170.00	136.00	34.00	459	459	0
No.3						136.00	170.00	34.00	918	0	0
No.4						102.00	204.00	34.00	459	459	0
No.5						170.00	170.00	0.00	459	459	0
No.6						102.00	170.00	68.00	459	459	0
No.7						102.00	170.00	68.00	918	0	1.26
No.8						102.00	204.00	34.00	0	918	1.26
No.9						102.00	204.00	34.00	918	0	1.26
No.10						170.00	136.00	34.00	0	918	1.26
No.11						136.00	204.00	0.00	459	459	1.26
No.12						170.00	170.00	0.00	0	918	1.26
No.13						170.00	170.00	0.00	918	0	1.26
No.14						170.00	136.00	34.00	918	0	1.26
No.15						68.00	204.00	68.00	459	459	1.26
No.16						102.00	170.00	68.00	0	918	1.26
No.17						136.00	136.00	68.00	459	459	1.26
No.18						204.00	136.00	0.00	459	459	1.26
No.19						136.00	170.00	34.00	918	0	2.52
No.20						170.00	170.00	0.00	459	459	2.52
No.21						170.00	136.00	34.00	459	459	2.52
No.22						102.00	204.00	34.00	459	459	2.52
No.23						102.00	170.00	68.00	459	459	2.52
No.24						136.00	170.00	34.00	0	918	2.52

*: Fine aggregate / (fine aggregate + NCA + RCA)

**: Binder (cement + BFS + hwang-toh)

***: Water

따른 레인가든 구조물 콘크리트의 휨강도 특성을 평가하기 위하여 KS F 2408에 준하여 휨강도 시험을 실시하였다.

다. 염소이온투과저항성

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 레인가든 구조물 콘크리트의 투수성능을 평가하기 위하여 ASTM C 1202에 따라 염소이온투과저항성 실험을 실시하였다. 실험은 $\varnothing$ 100 mm×200 mm의 공시체를 제작하여 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 58 %에서 24시간동안 초기양생 후 23 ± 2 °C의 수중에서 28일간 양생을 실시하였다. 양생 후 콘크리트 절단기를 사용하여 공시체 중앙부를 50 mm 두께로 절단하여 전처리를 실시하였다. 전처리 과정이 끝난 후 공시체를 A.V.Cell에 고정시키고 (+)극에는 0.3N의 NaOH 용액, (-)극에는 3 %의 NaCl 용액을 채우고 6시간 동안 직류 60V의 전류를 통과시켜 Coulombs (Q)을 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 압축강도

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 압축강도 시험결과는 Fig. 2와 같다. 압축강도는 각 치환율에서 18.46 MPa~30.57 MPa의 범위를 보이고 있다. 설계 압축강도 24 MPa를 만족시키는 배합은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3은 각 변수의 치환율에 따른 압축강도의 3차원 분석 그래프를 보여준다. 압축강도는 고로슬래그 미분말 치환율이 증가할수록 증가하고 황토 및 순환골재 치환율이 증가할수록 감소하는 결과를 나타냈다. 황토, 고로슬래그 미분말 및 순환골재 치환율이 가장 적을 때의 압축강도는 26.62 MPa의 값을 나타냈으며, 황토, 고로슬래그 미분말의 치환율이 가장 적고 순환골재의 치환율이 가장 클 때 22.98 MPa의 결과 값을 나타내었다. 또한, 황토, 고로슬래그 미분말 및 순환골재의 치환율이 가장 클 때 압축강도

Fig. 2 Compressive strength of concrete with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

Fig. 3 Cube graph of compressive strength with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

Fig. 4 Response surface of compressive strength with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

는 14.46 MPa의 값을 나타내었다. 황토, 고로슬래그 미분말의 치환율이 가장 크고 순환골재의 치환율이 가장 적을 때의 압축 강도는 22.03 MPa의 결과 값을 나타내었다. 압축강도가 가장 클 때의 값은 29.01 MPa으로 고로슬래그의 치환율이 가장 크고 황토 및 순환골재의 치환율이 가장 적을 때로 나타났다. 순환골재의 치환율을 고정하고, 고로슬래그 미분말 및 황토의 치환율 변화에 따른 압축강도 시험결과의 반응표면 변화는 Fig. 4와 같다.

2. 휨강도

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 휨강도 시험결과는 Fig. 5와 같다. 휨강도는 각 변수에 따

라 2.58 MPa~5.04 MPa의 범위를 보여주었다. 휨강도는 고로 슬래그 미분말, 황토 및 순환골재의 치환율이 증가할수록 감소하는 결과 값을 나타냈다 (Fig. 6). 황토, 고로슬래그 미분말 및 순환골재의 치환율이 가장 적을 때의 가장 큰 휨강도인 4.73 MPa의 값을 나타냈으며, 황토, 고로슬래그 미분말의 치환율이 가장 적고 순환골재의 치환율이 가장 클 때 3.46 MPa의 결과 값을 보여주었다. 황토, 고로슬래그 미분말 및 순환골재의 치환율이 가장 클 때는 3.15 MPa의 값을 나타내었으며, 황토, 고로 슬래그 미분말의 치환율이 가장 크고 순환골재의 치환율이 가장 적을 때 휨강도는 3.23 MPa의 결과 값을 보여주었다. 휨강도가 가장 작을 때의 값은 3.07 MPa으로 고로슬래그 미분말의 치환율이 가장 적고 황토 및 순환골재의 치환율이 가장 클 때이다.

Fig. 5 Flexural strength of concrete with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

Fig. 6 Cube graph of flexural strength with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

Fig. 7 Response surface of flexural strength with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

순환골재의 치환율을 고정하고, 고로슬래그 미분말 및 황토의 치환율 변화에 따른 휨강도 시험결과의 반응표면의 변화는 Fig. 7과 같다.

3. 염소이온투과저항성

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율을 변수로 실시한 염소이온투과저항성 시험결과는 Fig. 8과 같다. 목표 염소이온 투과량 1,000 Coulombs를 만족시키는 배합을 Fig. 8에 나타내었으며, 염소이온투과량의 범위는 799~2417 Coulombs이다. 황토 및 고로슬래그 미분말의 적용은 염소이온투과량을 감

소시키는데 효과적이다. Fig. 9는 각 변수별 치환율에서 염소이온투과량 3차원분석 그래프를 보여준다. 황토, 고로슬래그 및 순환골재의 치환율이 가장 적을 때의 염소이온투과저항성은 2,013.5 Coulombs의 값을 나타냈으며, 황토, 고로슬래그의 치환율이 가장 적고 순환골재의 치환율이 가장 클 때 2,079 Coulombs의 결과를 나타내었다. 또한, 황토, 고로슬래그 및 순환골재의 치환율이 가장 클 때의 염소이온투과저항성은 748.67 Coulombs의 값을 나타내었으며, 황토, 고로슬래그의 치환율이 가장 크고 순환골재의 치환율이 가장 적을 때의 염소이온투과저항성은 424.17 Coulombs의 결과를 보여주었다. 염소이온투과저항성이 가장

Fig. 8 Chloride ion permeability of concrete with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

Fig. 9 Cube graph of chloride ion permeability with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

클 때의 값은 2,079 Coulombs으로 고로슬래그 미분말 및 황토의 치환율이 가장 작고 순환골재의 치환율이 가장 클 때이다. 순환골재의 치환율을 고정하고, 고로슬래그 미분말 및 황토의 치환율 변화에 따른 염소이온투과량 시험결과의 반응표면의 변화는 Fig. 10과 같다.

4. 최적배합설계 및 역학적 특성, 염소이온투과시험 결과

황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유를 적용한 콘크리트의 목표 염소이온투과저항성 1,000 Coulombs, 목표 압축강도 24 MPa로 설정하여 이를 만족하는 최적배합비를 결정

Fig. 10 Response surface of chloride ion permeability with RCA, hwang-toh, BFS and natural jute fiber contents

하였다. Fig. 11은 목표성능수준에 따른 desirability의 그래프를 나타낸 것으로 콘크리트의 목표성능수준을 만족하는 desirability는 0.829이며 이때 최적배합비는 Table 7과 같다. 최적배합비에 따른 압축강도, 휨강도 및 염소이온투과량은 각각 24.56 MPa, 3.88 MPa 및 999.08 Coulombs 목표성능을 만족시켰다.

IV. 결 론

본 연구에서는 목표 염소이온투과량 1,000 Coulombs 이하와 압축강도를 24 MPa 이상을 만족하는 친환경 레인가든 구조물

(a) 2D response surface

(b) 3D responses surface

Fig. 11 Desirability of target performance

Table 7 Optimum mix proportion

W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)							
		Water	Fine agg.	Cement	BFS	Hwang-toh	RGA	RCA	Jute fiber
48.2	50.5	164	922	106.35	203.94	29.71	806.80	111.20	2.52

콘크리트의 최적배합비를 결정하기 위한 것으로 고로슬래그 미분말, 순환골재, 황토 및 천연마섬유를 변수로 하여 통계학의 반응표면분석법을 이용하였다. 또한 최적배합비에 따른 압축강도, 휨강도 및 염소이온투과시험을 실시하였으며 시험결과를 이용한 결론은 다음과 같다.

1. 황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 압축강도는 고로슬래그 미분말 치환율이 증가할수록 증가하고 황토 및 순환골재의 치환율이 증가할수록 감소하는 결과를 나타냈다.

2. 황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율에 따른 휨강도는 각 변수에 따라 2.58 MPa~5.04 MPa의 범위를 보여주었으며, 고로슬래그 미분말, 황토 및 순환골재의 치환율이 증가할수록 감소하는 결과 값을 나타냈다.

3. 황토, 고로슬래그 미분말, 순환골재 및 천연마섬유 치환율을 변수로 실시한 염소이온투과저항성 시험결과 염소이온투과량의 범위는 799~2,417 Coulombs이다. 황토 및 고로슬래그 미분말의 적용은 염소이온투과량을 감소시키는데 효과적이지만 순환골재 치환율이 증가할수록 염소이온투과량은 증가하는 결과를 나타냈다.

4. 시험결과를 이용하여 목표성능을 만족하는 최적 배합비는, 고로슬래그 미분말 치환율 59.98 %, 황토 치환율 8.74 %, 순환골재 치환율 12.12 % 및 천연마섬유 혼입률 0.2 %일 때로 결정

되었으며, 최적배합비에 따른 압축강도, 휨강도 및 염소이온투과량은 각각 24.56 MPa, 3.88 MPa 및 999.08 Coulombs로 나타나 목표성능을 만족시켰다.

이 논문은 2011년도 정부 (중소기업청)의 미래선도과제의 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: SA113320).

REFERENCES

- Box George EP. Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building. New York: John Wiley & Sons; 1978.
- Cho, C. G., B. J., Kim, K. H., Yang, and J. K., Song, 2012. Strength development of blended sodium alkali-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) Mortar. *Journal of the Korea Concrete Institute* 24(2): 137-145 (in Korean).
- Choi, H. Y., M. H. Kim., H. Z. Hwang., and S. W. Choi, 2001. Experimental study on the properties of concrete by the kinds of admixture and the replacement ratios of activated hwangtoh. *Journal of the korea concrete institute* 13(2): 123-129 (in Korean).
- Davis, A. P., M., Shokouhian, H., Sharma, and C., Minami, 2001. Laboratory study of bioretention for urban stormwater management. *Water Environment Research* 73(1): 5-14.
- Dietz, M. E. and J. C., Clausen, 2005. A field evaluation

- of rain garden flow and pollutant treatment. *Water, Air, and Soil Pollution* 167: 123-138.
6. Dunnett, N. and A., Clayden, 2007. Managing water sustainably in the garden and designed landscape. Timber Press, Inc.
7. Erickson, A., J. S., Gulliver, and P. T., Weiss, 2007. Enhanced sand for storm water phosphorous removal. *Journal of Environmental Engineering* 133(5): 485-497.
8. Han, S. H., and M. J. Yong, 2009. The future of concrete admixture industry for low carbon. green growth. *Magazine of Concrete Research* 21(4): 41-43.
9. Hsieh, C. H. and Davis, A. P., 2005. Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff. *Water Science Technology* 151: 77-181.
10. Kim, C. S., and K. J., Sung, 2011. Effects of rain garden on reduction of subsurface runoff and peak flow. *The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology* 14(5): 69-79 (in Korean).
11. Kim, C. S., and K. J., Sung, 2012. Changes in concentrations of nutrients and heavy metals of plants and soils in rain garden systems used for non-point source pollution management. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment* 17(4): 27-35 (in Korean).
12. Kim, H. H., S. M., Kang, J. S., Park., S. W. Park., J. H. Jeon., J. H. Lee., S. S., Cha., and C. G. Park., 2010. Performance evaluation of porous hwang-toh concrete using blast furnace slag cement. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 52(3): 9-17 (in Korean).
13. Kim, I. J., and C. W., Hong, 2010. Durability and strength of dense grate permeable concrete using silica sand and flexible alkyd resin. *Journal of Kreaan Institute of Resources Recycling* 19(6): 36-42 (in Korean).
14. Mun, H. Y., S. J. Jung., and N. K. Lim, 1997. Blast-furnace slag aggregate. *Magazine of the Korea Concrete Institute* 9(6): 18-22.
15. Patricia S. Lovato, Edna Possan, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Ângela B. Masuero, and José Luis D. Ribeiro, 2012. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials* 26: 437-447.
16. Wossink, G. A., and W. F., Hunt, 2003. The economics of structural stormwater BMPs in North Carolina. North Carolina Water Resource Research Institute. Raleigh, 11-24.
17. Yang, K. H., J. K., Song, and K. H., Lee, 2011. A stress-strain relationship of alkali-activated slag concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute* 23(6): 765-772 (in Korean).