

## 다항회귀분석을 활용한 혼합경량토의 강도산정 모델 개발

임병권\* · 김윤태\*

\*부경대학교 해양공학과

### Development of Strength Prediction Model for Lightweight Soil Using Polynomial Regression Analysis

Byung-Gwon Lim\* and Yun-Tae Kim\*

\*Department of Ocean Engineering, Pukyong University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Regression analysis 회귀분석, Lightweight soil 경량토, Unconfined compressive strength 일축압축강도, Dredged soil 준설토

**ABSTRACT:** The objective of this study was to develop a strength prediction model using a polynomial regression analysis based on the experimental results obtained from ninety samples. As the results of a correlation analysis between various mixing factors and unconfined compressive strength using SPSS (statistical package for the social sciences), the governing factors in the strength of lightweight soil were found to be the crumb rubber content, bottom ash content, and water-cement ratio. After selecting the governing factors affecting the strength through the correlation analysis, a strength prediction model, which consisted of the selected governing factors, was developed using the polynomial regression analysis. The strengths calculated from the proposed model were similar to those resulting from laboratory tests ( $R^2=87.5\%$ ). Therefore, the proposed model can be used to predict the strength of lightweight mixtures with various mixing ratios without time-consuming experimental tests.

#### 1. 서 론

최근 폐자원을 친환경 건설재료로 재활용하는 것은 세계적인 추세이며, 국내에서도 천연골재 채취로 인한 자연훼손방지, 토취장 확보문제 해결, 천연골재의 부족과 가격상승 등과 같은 이유로 폐자원의 재활용이 시급한 실정이다. 일반적인 폐자원으로는 준설토와 페타이어, 석탄회 등이 있으며, 이들 폐자원의 발생량은 매년 증가하고 있는 실정이다(김윤태 등, 2008).

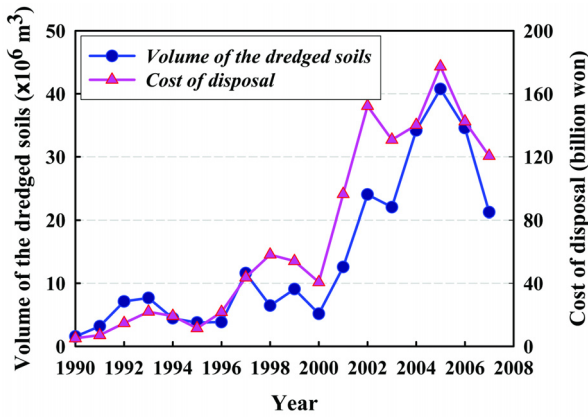
준설토(Dredged material) 발생량은 Fig. 1 (a)와 같이 1990년대 이후 증가하고 있으며, 그에 따른 처리비용 또한 증가하고 있다. 우리나라는 지리적 요건으로 인하여 국내 수출입 물동량의 상당량 해양에서 이루어지고 있는 실정이다. 이에 따라 연안개발 및 항만건설 등 대규모 개발공사, 선박의 대형화, 물류의 컨테이너화로 인한 항로의 수심유지 및 신항만건설과 오염해역 정화사업 등으로 인해 준설토가 발생되고 있다. 항로유지 준설과 해안건설 현장에서 채취된 해양 준설토는 일반적으로 큰 함수비를 가진 점토이다.

준설토와 마찬가지로 페타이어 또한 매년 발생량이 증가하고 있고, 이를 재활용 하기 위한 연구가 국내외적으로 활발히 이루어지고 있다(김윤태와 강효섭, 2009; Abdrabbo et al., 2005; Barluenga et al., 2002; Hataf and Rahimi, 2006; Lee and Roh, 2007; Eldin and Senouci, 1993). 산업의 고도성장과 경제생활의

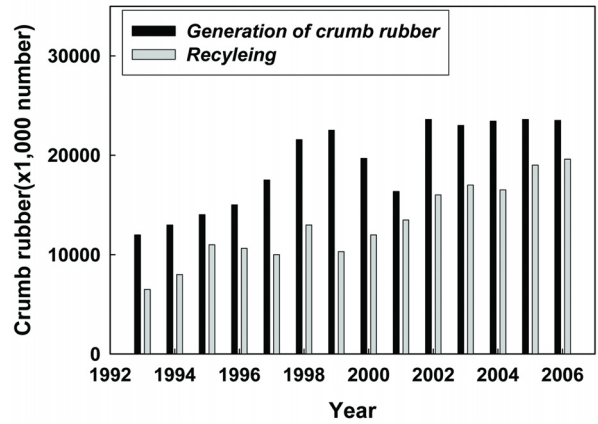
향상과 더불어 자동차수가 매년 증가함에 따라 Fig. 1 (b)와 같이 국내에서는 매년 약 2000만 본의 페타이어가 발생되어 약 70%가 회수되고 있는 것으로 나타났다. 회수된 페타이어의 70%가 재생타이어 제조용, 시멘트 킬른 등의 열이용, 건류소각용, 고무분말 및 토목공사 매립용 등으로 사용되고 있으나, 회수나 처리되지 못한 페타이어는 환경적, 사회적 문제를 야기하고 있다. 최근 30년 동안 워싱턴 도로국(Washington state department of transportation)에서는 경량성을 확보할 수 있는 페타이어를 연약지반 위에 도로로 성토하여 안전하게 시공·유지관리를 하였다(이성진 등, 2011). 또한, 페타이어와 모래와 같은 여러 재료를 혼합하여 지반재료로서 사용하기 위한 연구가 여러 학자들에 의해 연구되어지고 있다(Cetin et al., 2006; Shatanawi et al., 2011; Salgado et al., 2003; Zornberg et al., 2004a; Zornberg et al., 2004b).

석탄회의 경우 2005년까지 600만 톤이 발생했으며, 이 중 재활용량은 약 350만 톤으로 재활용이 약 58% 정도에 머무르고 있다. 석탄회 발생량 중 약 15~25%를 차지하는 저회(Bottom ash)는 대부분 매립되고 있다.

본 연구에서는 경량성을 확보할 수 있는 재료인 페타이어와 재활용이 필요한 준설토 및 저회를 동시에 활용할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 그러나 혼합경량토의 강도는 페타이어, 준설토, 저회, 시멘트 등과 같은 배합재료의 배합비에 크게 의존



(a) Generation of dredged soil



(b) Generation of crumb rubber

Fig. 1 Generation of dredged soil and crumb rubber(Kang et al., 2010)

함에 따라 목표강도 산정 시 다양한 예비배합이 필요하다. 그러나 배합된 경량혼합토의 예비 배합설계 시 양생과정에서 많은 시간과 노력이 소요됨에 따라 다항회귀분석 기법을 적용하여 일축압축강도를 쉽게 산정할 수 있도록 강도모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해 재활용 재료인 페타이어, 저회, 준설토, 시멘트를 배합하여 일축압축시험을 수행하였다. 또한 수년간 축적된 실험데이터를 활용하여 통계분석용 프로그램인 SPSS(Statistical package for the social sciences)와 Minitab(2004)을 사용하여 강도에 영향을 주는 유의한 인자들을 찾고, 이들 배합인자를 변수로 하는 강도산정 모델을 제안하였다. 그리고 제안된 모델의 검증은 위해 실제 실험 결과와 예측된 일축강도를 상호 비교분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실내 실험

혼합경량토는 페타이어, 저회, 준설토, 시멘트, 물이 혼합된 유동화된 지반재료로서 혼합경량토의 강도는 혼합재료의 배합비에 크게 의존한다(Kim and Kang, 2011). 배합특성에 따른 혼합경량토의 역학적 특성을 평가하기 위해 Table 1과 같이 다양한 배합비로 구성된 공시체를 제작하였다. 공시체의 직경은 50mm, 높이는 100mm이다. 재료별 함량은 건조된 준설토 중량에 대한 비율이다. 페타이어 함량을 0%, 25%, 50%, 75%, 100%까지, 저회 함량을 0%, 25%, 50%, 75%, 100%까지 변화시켰다. 양생은 시료의 함수비 감소를 최소화 하기 위해 밀폐된 상자에 담아 습도와

온도를 유지했다. 혼합경량토의 함수비, 시멘트, 저회의 함량은 단위중량 및 유동특성을 고려한 예비실험 결과를 바탕으로 결정되었다. 통계처리에 충분한 표본크기를 확보하기 위해 직접 강도 실험을 수행하여 나온 결과데이터 외에도 기존 실험결과 DB(김운태와 강효섭, 2010)를 함께 활용하였다.

### 2.2 실험 재료

본 연구에서 석회석(CaO), 이산화규소(SiO<sub>2</sub>), 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 주원료로 하는 보통 1종 포틀랜드 시멘트를 배합하여 사용하였다. 저회는 삼천포 화력발전소에서 발생한 저회를 이용하였으며, 일관된 실험결과를 얻기 위해 저회를 No.4체에 통과시켜 자갈크기의 입자를 배제하였다. 준설토는 실트가 함유된 실트질 점토이며, 부산신항 배후부지에서 채취된 시료를 사용하였다.

### 2.3 일축압축시험

다양한 배합조건에 따라 제작된 혼합경량토의 공시체를 양생시킨 후 응력-변형률 거동 특성을 파악하기 위하여 일축압축강도 시험(KS F2314)을 수행하였다. 일축압축강도 시험은 변형률 제어 가능한 D사의 시험기를 사용하였으며 축변형률을 1%/min로 제어하였다.

## 3. 배합비에 따른 강도특성

배합비에 따른 일축압축강도 결과를 정리하면 Table 2와 같다. 혼합경량토의 강도는 혼합토를 구성하는 배합비에 따라 다양한 결과를 나타냈다. Fig. 2 (a)는 페타이어, 저회함량에 따른 강도 특성을 나타내며 전체적으로 페타이어 분말 함량이 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 반면에 저회함량이 증가함에 따라 강도는 증가하고 페타이어 분말함량이 100%일 때에는 저회의 함량에 상관없이 페타이어가 시료의 지배인자로 작용하여 200kPa로 수렴하는 것으로 나타났다(강효섭, 2010). Fig. 2 (b)는 통계처리에 쓰이는 90개의 표본을 나타내며, Fig. 2 (c)에 강도범위에 대한 확률분포곡선을 제시하였다. 배합비에

Table 1 Mixing ratio of experimental test

Mixture	Mixing Ratio (%)
Cement	20
Water	130, 140
Water-Cement ratio (W/C)	6.5, 7
Bottom ash	0, 25, 50, 75, 100
Crumb rubber	0, 25, 50, 75, 100
Dredged soil	100
Curing time	28

**Table 2** Database for statistical analysis (CR=Crumb rubber(%), BA=Bottom ash(%), W/C=Water-Cement ratio, CRD10=Effective grain size of crumb rubber(mm), qu=Unconfined compressive stress(kPa))

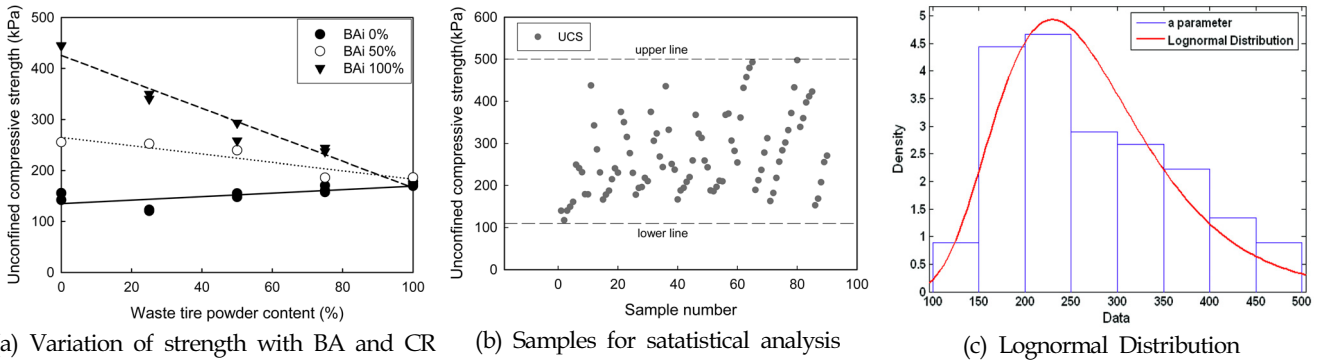
No.	CR factor1	BA factor2	W/C factor3	CRD10 factor4	qu response	No.	CR factor1	BA factor2	W/C factor3	CRD10 factor4	qu response
1	0	0	7	0.2	139.8	46	0	100	7	0.93	367.5
2	25	0	7	0.2	117.3	47	25	100	7	0.93	322.6
3	50	0	7	0.2	140.1	48	50	100	7	0.93	312.9
4	75	0	7	0.2	149.3	49	75	100	7	0.93	258.8
5	100	0	7	0.2	160.9	50	100	100	7	0.93	242.9
6	0	50	7	0.2	249.2	51	0	0	7	2.16	188
7	25	50	7	0.2	241.1	52	25	0	7	2.16	186.2
8	50	50	7	0.2	231.3	53	50	0	7	2.16	196.3
9	75	50	7	0.2	178.9	54	75	0	7	2.16	210.9
10	100	50	7	0.2	178.8	55	100	0	7	2.16	209.5
11	0	100	7	0.2	437.5	56	0	100	7	2.16	367.5
12	25	100	7	0.2	342.5	57	25	100	7	2.16	370.6
13	50	100	7	0.2	285.5	58	50	100	7	2.16	306.5
14	75	100	7	0.2	230.8	59	75	100	7	2.16	282.1
15	100	100	7	0.2	166.4	60	100	100	7	2.16	254.4
16	0	0	7	0.93	178	61	0	0	6.5	0.93	361.09
17	25	0	7	0.93	187.6	62	0	25	6.5	0.93	431.68
18	50	0	7	0.93	214.7	63	0	50	6.5	0.93	457.09
19	75	0	7	0.93	240.5	64	0	75	6.5	0.93	479.09
20	100	0	7	0.93	230.2	65	0	100	6.5	0.93	492.74
21	0	100	7	0.93	374.5	66	50	0	6.5	0.93	189.5
22	25	100	7	0.93	350.2	67	50	25	6.5	0.93	212.4
23	50	100	7	0.93	314.9	68	50	50	6.5	0.93	236.8
24	75	100	7	0.93	276.5	69	50	75	6.5	0.93	277.8
25	100	100	7	0.93	229.8	70	50	100	6.5	0.93	312.1
26	0	0	7	2.16	178	71	100	0	6.5	0.93	162.9
27	25	0	7	2.16	194	72	100	25	6.5	0.93	182
28	50	0	7	2.16	196.2	73	100	50	6.5	0.93	217.8
29	75	0	7	2.16	217.9	74	100	75	6.5	0.93	256.3
30	100	0	7	2.16	210.1	75	100	100	6.5	0.93	283.4
31	0	100	7	2.16	374.5	76	0	0	6.5	0.93	301.7
32	25	100	7	2.16	305.9	77	0	25	6.5	0.93	331.3
33	50	100	7	2.16	323.4	78	0	50	6.5	0.93	372
34	75	100	7	2.16	268.4	79	0	75	6.5	0.93	432.9
35	100	100	7	2.16	243.5	80	0	100	6.5	0.93	497.5
36	0	100	7	0.2	435.6	81	50	0	6.5	0.93	338.9
37	25	100	7	0.2	332	82	50	25	6.5	0.93	359.6
38	50	100	7	0.2	250.7	83	50	50	6.5	0.93	397.2
39	75	100	7	0.2	237.1	84	50	75	6.5	0.93	411.5
40	100	100	7	0.2	166.6	85	50	100	6.5	0.93	423
41	0	0	7	0.93	188	86	100	0	6.5	0.93	152.9
42	25	0	7	0.93	194.1	87	100	25	6.5	0.93	168.6
43	50	0	7	0.93	208.3	88	100	50	6.5	0.93	207.6
44	75	0	7	0.93	219.7	89	100	75	6.5	0.93	255.3
45	100	0	7	0.93	259.2	90	100	100	6.5	0.93	270.5

**Table 3** Pearson coefficient of correlation and significance level

		CR	BA	qu	W/C	D10
CR	Pearson correlation coefficient	1	.000	-.509*	.000	.000
	Significance		1.000	.000	1.000	1.000
	Covariance	1404.494	.000	-1748.421	.000	.000
	Number	90	90	90	90	90
BA	Pearson correlation coefficient	.000	1	.532**	.045	-.080
	Significance	1.000		.000	.676	.454
	Covariance	.000	1958.489	2161.62	.468	-2.363
	Number	90	90	90	90	90
qu	Pearson correlation coefficient	-.509**	.532**	1	-.346**	.024
	Significance	.000	.000		.001	.821
	Covariance	-1748.421	2161.62	8416.002	-7.528	1.484
	Number	90	90	90	90	90
W/C	Pearson correlation coefficient	.000	.045	-.346**	1	.118
	Significance	1.000	.676	.001		.267
	Covariance	.000	.468	-7.528	.056	.019
	Number	90	90	90	90	90
D10	Pearson correlation coefficient	.000	-.080	.024	.118	1
	Significance	1.000	.454	.821	.267	
	Covariance	.000	-2.363	1.484	.019	.447
	Number	90	90	90	90	90

\*. The correlation coefficient is significant at 0.05 level (both sides)

\*\*.. The correlation coefficient is significant at 0.01 level (both sides)



**Fig. 2** Experimental result for statistical analysis

따라 강도는 약 100kPa에서 500kPa 범위에 있다.

#### 4. 회귀분석에 의한 강도모델 산정

본 논문의 목적은 실내시험을 통해 축적된 혼합경량토의 일축압축강도 DB를 활용하여 추후 현장설계 시 요구되는 목표강도를 만족하는 배합비를 통계적 기법으로 산정할 수 있는 강도 모델을 제안하기 위함이다. 이를 위해 우선 배합재료와 강도의 상관관계를 규명하고 강도에 상관성이 높은 실험인자들을 선정한다. 선정된 실험 인자들과 강도를 회귀분석(Regression analysis)하여 가중치 즉, 선형적 계수 및 상수를 구함으로써 강도모델이 개발된다. 또한 반응표면기법(Response surface method)를

활용하여 강도에 미치는 인자들을 규명하고 삼차원 표면플롯을 얻었다.

##### 4.1 상관성 분석

상관성 분석이란 같은 실험단위에서 관찰한 두 변수 사이에 원인과 결과의 관계가 있으면 회귀방정식을 구하여 그 인과관계를 설명하고, 한 변수의 변화에 따른 다른 변수의 변화를 예측할 수 있다. 이때 두 변수 사이에 관계가 얼마나 강한지, 또 회귀방정식이 얼마나 정확하게 예측할 수 있는지를 상관분석에 의해 알 수 있다. 상관분석은 두 변수의 공분산으로부터 상관계수를 구하고 유의성을 검정한다. 상관계수는 단위(Unit) 없이 두 변수 사이에 상관정도만을 나타내며 상관계수(-1 ≤ R ≤ 1)가 -1

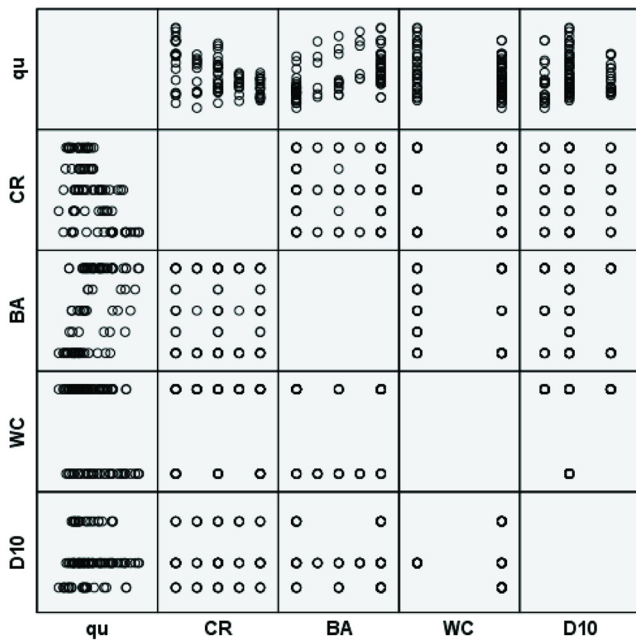


Fig. 3 Matrix plot

이나 +1에 가까울수록 상관성은 강하고 0에 가까울수록 상관성은 약하다. 상관성 분석을 하는 두 변수는 모두 독립변수이다. 따라서 두 변수 간에 인과관계가 있다면 반드시 상관성이 있지만, 상관성이 있다고 해서 언제나 인과관계가 성립하는 것은 아니다 (노형진과 정한열, 2008). 강도와 페타이어,저회, 물-시멘트 비, 유효입경과 같은 5가지 실험인자를 Pearson 상관계수

(Pearson correlation coefficient)를 이용하여 서로간의 상관관계를 분석하고 상관행렬 산점도(Matrix plot)을 얻었다(Fig. 3). 배합재료들 사이의 상관성을 살펴보면, 뚜렷한 정비례 혹은 반비례 형태의 그래프를 나타내지 않은 것으로 보아 재료들 간의 상관성은 낮거나 없음을 알 수 있다. Table 3은 상관성 분석을 통해 얻은 강도와 각 배합재료간의 Pearson 상관계수와 유의도 (Significance)를 구한 것으로 전술한 바와 같이 Pearson 상관계수는 음과 양에 관계없이 클수록, 유의도가 0에 가까울수록 상관성이 높음을 의미한다. 그리고 상관계수의 음은 반비례 관계를, 양은 비례 관계를 뜻한다. 공분산(Covariance)은 두 변수간의 관계를 나타내는 양을 말하며, 비례관계 혹은 반비례관계가 뚜렷할수록 공분산은 큰 값을 가지게 된다. 공분산이 0인 경우는 두 변수 간에 직선적인 혹은 비례적인 관계를 발견할 수 없을 경우를 말한다. 강도에 미치는 상관인자를 살펴보면, 페타이어 (CR)는 음의 상관계수를 나타낸 것으로 보아 페타이어 함량이 많아짐에 따라 강도를 저하시키고 저회(BA)는 양의 상관계수를 나타낸 것으로 보아 함유량이 증가함에 따라 강도발현에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있다. 결과적으로 유의수준이 가장 높은 페타이어, 저회, 물-시멘트 비를 선정하여 강도회귀식의 설명변수로 사용하였다.

4.2 다항회귀분석(Polynomial regression analysis)

상관성 분석으로부터 상위 상관관계를 가지는 유의한 변수인 페타이어, 저회, 물-시멘트비를 이용하여 다항회귀분석을 실시한 결과는 Table 4와 같다. 회귀분석 과정에서 독립변수(페타이어, 저회, 물-시멘트 비)를 관심영역이 (-1, 1)사이에 있도록 선형 변

Table 4 Result of regression analysis

(a) Coefficient of regression related to strength					
Paragraph	Coefficient	SE coefficient	T	P-value	
Constant	267.7	4.102	65.26	0.000	
W/C	-24.05	4.068	-5.91	0.000	
CR	-60.81	4.942	-12.3	0.000	
BA	60.01	3.904	15.37	0.000	
W/C*CR	23.99	4.87	4.92	0.000	
CR*BA	-43.38	5.362	-8.09	0.000	
S		30.57			
R2/Adj R2		88.3/87.5			

(b) Analysis of variance(ANOVA) related to strength						
	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	p
Regression	5	507173	507173	101435	108.5	0.0
Linear	3	420075	407958	135986	145.5	0.0
Interaction	2	87098	87098	43549	46.61	0.0
Residual error	72	67272	67272	934		
Lack of compatibility	22	31254	31254	1421	1.97	0.024
Pore error	50	36019	36019	720		
Total	77	574445				

환하여 회귀분석을 하였다. 독립변수(실험인자)를 선형변환하는 이유는 실험진행이 편리하고, 실험을 마친 후에 회귀모델을 만들어 반응을 분석하기가 훨씬 수월해지기 때문이다. 선형변환의 일반식은 식 (1)과 같다.

$$x_i = \frac{\text{Experimental variable} - \text{Median of experimental range}}{0.5 \times \text{Experimental range}} \quad (1)$$

(Restrictive Condition(%), W/C=6.5-7, BA=0-100, CR=0-100)

신뢰성 높은 강도식을 도출하기 위해 표준화 잔차가 큰 비정상적인 관측치를 제거해가며 추정하였으며, 최종적인 강도모델은 식 (2)와 같다. 분산분석의 유의확률  $P \leq 0.05$ 이고, 수정결정계수는 87.5%로서 회귀모델이 적합하다고 볼 수 있다.

$$q_u = 60(BA - CR) + 24\left(\frac{W}{C}\right)(CR - 1) - 43.38(CR \times BA) + 267.72 \quad (2)$$

4.3 반응표면기법

양생기간 28일 실험 결과를 토대로 반응표면기법을 활용하여 좀 더 정확하고 시각적인 분석을 해보았다. 반응표면기법이란 관심

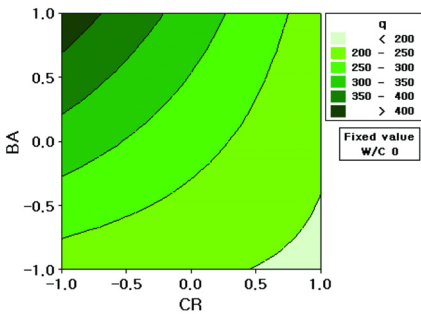
을 갖고 있는 어떤 특성치를 최대 또는 최소(본 연구에서는 최대 강도)로 하는 최적조건을 찾는 것이다. 이러한 분석의 목적은 엔지니어가 합리적인 실험계획법에 의해서 얻어진 실험 자료를 분석한 후, 실험의 결과에 영향을 주는 유의한 인자효과들을 찾는 것이고, 또한 관심을 갖고 있는 어떤 특성치를 최대 또는 최소로 하는 최적의 조건을 찾는 것이다(박성현과 김종욱, 2010).

Fig. 4 (a)와 Fig. 4 (b)는 저회와 페타이어가 강도에 미치는 영향을 알 수 있으며 페타이어가 증가할수록 강도가 저하되고, 저회가 증가할수록 강도가 커짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 4 (c)는 물-시멘트비가 강도에 주는 효과를 표면상 시각적으로 볼 수 있다. 통계처리에서 설명변수로서 물-시멘트비 6.5, 7 두 가지 경우만 고려했기 때문에 하한 값과 상한 값에 대한 정보가 누락되어 있다. 그러나 전반적으로 물-시멘트비가 적을수록 강도 발달에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.4 반응 최적화 기법(Response optimization)

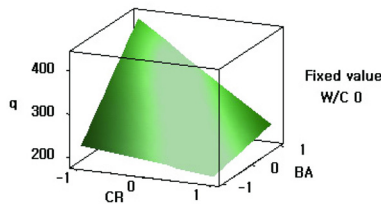
반응최적화 기법이란 입력변수 조합에 대한 최적 솔루션과 최적화 플롯을 제시해주는 기법으로서, 실험 결과 분석에서 가

Effect of bottom ash and crumb rubber for strength



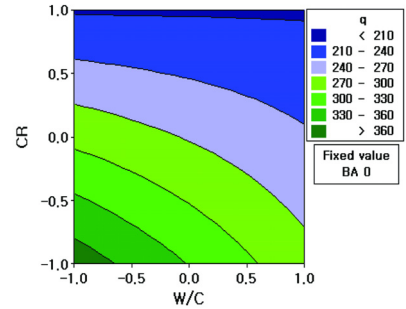
(a) Effect of BA and CR

Effect of w/c and crumb rubber for strength



(b) 3-Dimension plot

Effect of water-cement ratio and crumb rubber for strength

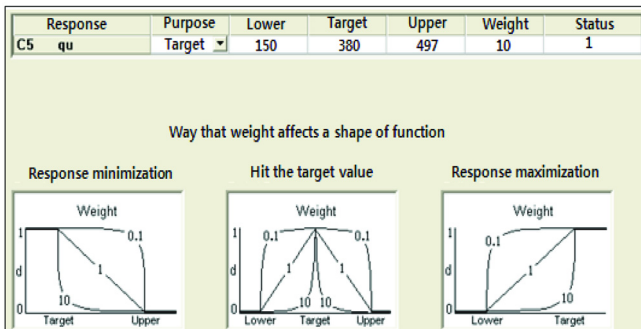


(c) Effect of W/C and CR

Fig. 4 Surface plot of strength using response surface method

Table 5 Description of weighting factor

Weighting factor $\leq 1$	If weighting factor is less than 1, assign less importance to target value
Weighting factor = 1	If weighting factor is equal 1, assign same importance to target value and threshold
Weighting factor $\geq 1$	If weighting factor is more than 1, assign more importance to target value



(a) Weighting factor option

optimum	W/C	CR	BA
D	1.0	1.0	1.0
Cur	[0.0]	[-0.5017]	[1.0]
1.0000	-1.0	-1.0	-1.0
$q_u$			
Target : 380			
$y = 380.0000$			
$d = 1.0000$			

(b) Result of response optimization

Fig. 5 Response optimization

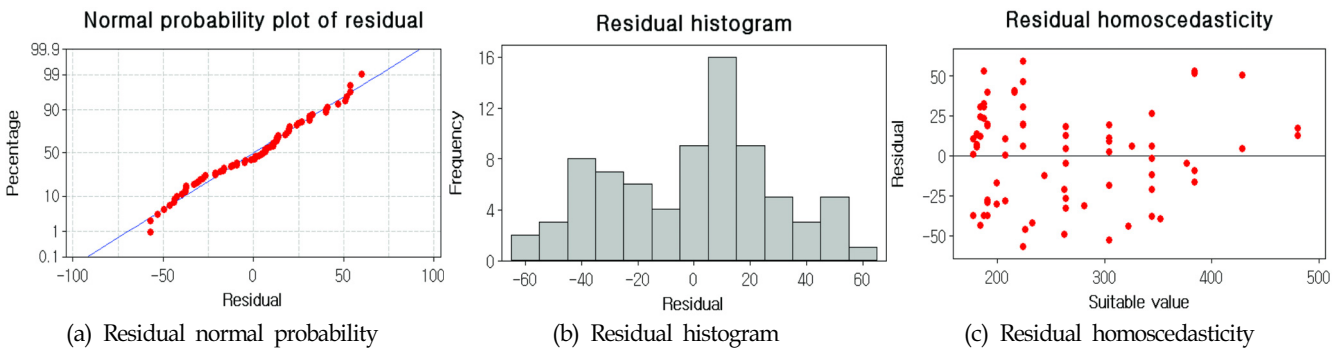


Fig. 6 Result of residual analysis

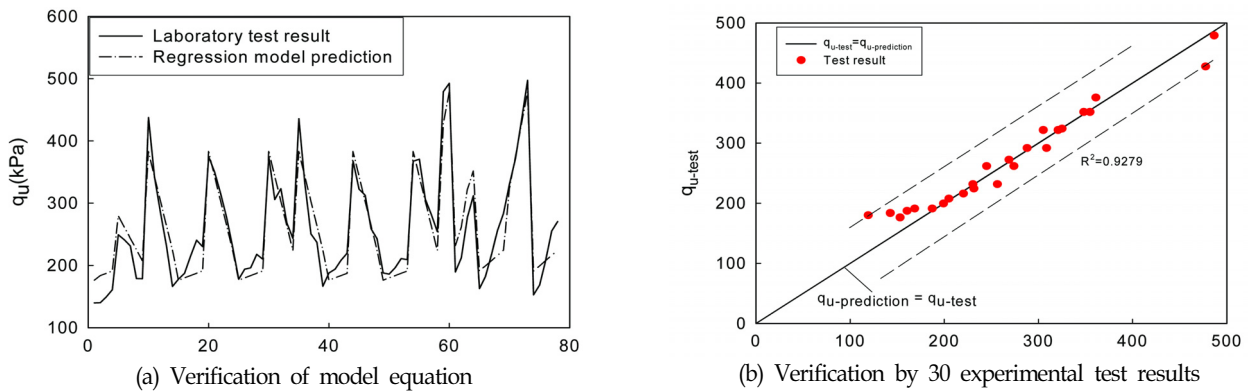


Fig. 7 Comparison between experimental result and predicting result

장 좋은 반응 값을 산출할 수 있는 최적 조건을 결정할 수 있다 (Minitab, 2004). 이 과정에서 각 반응에 가중치를 제어하여 목표값의 중요성을 부여한다. 각 반응에 대해 가중치(0.1~10)를 선택하면 목표 값을 더 강조하거나 덜 강조할 수 있다. 가중치에 대한 자세한 설명은 Table 5에 나타내었다. Fig. 5 (a)와 같이 만약 경량혼합토의 강도 목표값이 380kPa이고, 강도에 대한 가중치를 10으로 가정하여 최적의 배합비를 도출해 보았다. Fig. 5 (b)는 반응최적화에 대한 결과를 나타내며, 식 (1)을 사용하여 건조준설도가 1일 때의 상대적인 비율로 역변환하여 사용할 수 있다. 이러한 반응 최적화 기법을 이용하여 교량의 뒷채움재 (Back filling material)나, 옹벽 뒷채움재로서 혼합경량토가 사용될 때 원하는 설계 강도에 대한 최적의 배합비를 얻을 수 있다. 그러나 수치 최적화가 그래프 분석과 더불어 유용한 정보를 제공할 수는 있지만 해당 분야의 전문적 지식을 대체할 수는 없다. 이러한 방법을 적용하는 경우에는 관련 배경 정보, 이론적 원리, 관찰 또는 과거의 실험을 통해 얻은 지식 등을 병행하여 사용해야 한다(Minitab, 2004).

4.5 잔차 분석(Residual analysis)

회귀 분석의 잔차 분석을 실시하여 정규성(Normality), 등분산성(Homoscedasticity)을 만족하여야 분석한 결과가 통계적인 의미가 있다고 볼 수 있다(김진경 등, 2010). Fig. 6에 잔차의 정규성과 등분산성을 그래프로 나타내었다. 정규성이란 도수 분포 곡선이 평균값을 중앙으로 하여 좌우 대칭인 종모양을 이루는

것으로 편리하게 통계적 추론을 가능하게 한다. 등분산성은 독립변수가 정량적인 변수이든 질적인 변수이든 이들 변수에 대한 종속변수가 이루는 정규분포의 분산이 동일한 것을 의미한다 (김계수, 2006). 잔차의 정규성과 등분산성이 확보된다는 것은 회귀모형이 적합하다는 것을 의미한다. 즉, 회귀분석의 회귀식이 데이터를 설명하는데 적합하다는 것이다. Fig. 6 (a)와 (b)는 잔차의 정규성을 알아 볼 수 있는 그래프로서, 만약 잔차들이 정확하게 정규분포를 따른다면 Fig. 6 (a)와 같이 잔차들이 정확하게 정규분포를 따른다면 직선위로 일렬로 배열된다. Fig. 6 (c)와 같이 자료들이 일정한 규칙 없이 고르게 분포되어 있는 것으로 보아 등분산성을 만족하는 것으로 판단된다.

4.6 제안된 강도모델 검증

회귀분석을 통해 제안된 강도모델을 검증하기 위하여 Fig. 7 (a)와 같이 실제 실험값과 식(2)를 사용하여 나타낸 예측값을 비교해 보았다. 또한 페타이어 함량, 지회함량, 물-시멘트 비 등과 같은 다양한 배합비율을 가지는 30개의 시료를 각각 제작하여 일축압축시험을 실시하였다. 실내실험으로부터 얻은 30개의 실험 결과 값과 제안된 강도모델에 의해 산정된 강도를 비교하여 Fig. 7 (b)에 나타내었다. 또한 검증을 위한 실험 데이터의 배합비는 Table 6에 나타내었다. Fig. 7 (b)와 같이 실험에서 구한 강도값과 제안된 강도모델에 의한 예측 값은  $R^2=92.79\%$ 로서 비교적 잘 일치한다.

Table 6 Database for verification

No.	CR	BA	W/C	$q_u$ (predict)	$q_u$ (test)	No.	CR	BA	W/C	$q_u$ (predict)	$q_u$ (test)
1	50	0	6.5	231.72	256.5	16	0	0	7	176.34	153.1
2	50	25	6.5	261.72	274.0	17	0	25	7	180.03	119.4
3	50	50	6.5	291.72	308.7	18	0	50	7	183.72	142.7
4	50	75	6.5	321.72	320.9	19	0	75	7	187.41	160.6
5	50	100	6.5	351.72	354.8	20	0	100	7	191.1	168.6
6	0	0	6.5	272.34	268.7	21	50	0	6.5	231.72	230.5
7	0	25	6.5	324.03	325.1	22	50	25	6.5	261.72	245
8	0	50	6.5	375.72	361.10	23	50	50	6.5	291.72	288
9	0	75	6.5	427.41	477.52	24	50	75	6.5	321.72	305.2
10	0	100	6.5	479.1	486.63	25	50	100	6.5	351.72	348.1
11	0	0	7	176.34	153.1	26	100	0	6.5	191.1	187.2
12	0	25	7	180.03	119.4	27	100	25	6.5	199.41	199.2
13	0	50	7	183.72	142.7	28	100	50	6.5	207.72	205
14	0	75	7	187.41	160.6	29	100	75	6.5	216.03	220.3
15	0	100	7	191.1	168.6	30	100	100	6.5	224.34	231.5

## 5. 결 론

혼합경량토는 페타이어, 저회, 준설토, 시멘트, 물이 혼합된 유동화 된 지반재료로서 혼합경량토의 강도는 혼합재료의 배합비에 크게 의존하고, 배합설계 과정에서 많은 시간과 노력이 소요됨에 따라 다항회귀분석을 이용하여 강도산정모델을 개발하였다. 강도에 미치는 상관인자를 알아보기 위해 상관성 분석을 실시하였고, 유의수준이 가장 높은 페타이어, 저회, 물-시멘트비를 선정하여 강도회귀식의 설명변수로 사용하였다. 개발된 강도산정 모델을 실제 실험값과 비교하여 검증하였으며, 잔차 분석을 통해 모델의 적합성과 신뢰성을 확보하였다.

(1) 상관분석을 통해 강도와 배합재료간의 상관관계를 분석한 결과, 페타이어(CR)와 물-시멘트 비(W/C)는 음의 상관계수를 나타낸 것으로 보아 함량이 많아짐에 따라 강도를 저하시키고, 저회(BA)는 양의 상관계수를 나타낸 것으로 보아 함량이 증가함에 따라 강도발현에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있다. 즉 페타이어, 저회, 물-시멘트 비는 강도산정 시 유의수준이 높은 인자이다.

(2) 다항회귀분석을 통해 개발한 강도산정 모델식은 정규성과 등분산성이 모두 만족하며, 분산분석의 유의확률  $P \leq 0.05$ 이고, 수정결정계수는 87.5%로서 회귀모형이 적합하다고 볼 수 있다. 또한 모델의 신뢰도 검증을 위해 추가로 준비한 30개의 실험결과를 적용했을 경우 실험 강도 값과 제안된 강도모델에 의해 예측된 강도 값 간의 결정계수는 약 92.79%로서 높은 상관성을 보였다.

(3) 합리적인 실험계획법에 의해서 얻어진 실험 자료를 분석한 후, 실험의 결과에 영향을 주는 유의한 인자효과들을 찾기 위해 반응표면기법을 활용하여 페타이어, 저회, 물-시멘트비가 강도에 미치는 효과를 시각적으로 제시하였다. 또한 원하는 설계 강도에

대한 최적의 배합비를 제시해 줄 수 있는 반응최적화 기법을 사용하여 입력변수 조합에 대한 최적 솔루션과 최적화 플롯을 제시함으로써 실제 설계에서 제안된 강도산정 모델의 활용 가능성을 보여주었다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0007023)의 성과이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 강효섭 (2010). "산업부산물물 재활용한 페타이어 혼합경량토의 공학적 특성에 관한 연구", 석사학위논문, 부경대학교 대학원, pp 27-91.
- 김계수 (2006). "AMOS 구조방정식 모형분석", 한나래, pp 505-663.
- 김운태, 강효섭 (2009). "직접전단시험에 의한 페타이어 혼합경량토의 전단특성 연구", 한국해양공학회지, 제23권, 제3호, pp 20-29.
- 김운태, 강효섭 (2010). "페타이어-저회가 혼합된 복합지반재료의 공학적 특성", 한국해양공학회지, 제24권, 제3호, pp 52-58.
- 김운태, 한우종, 정두희 (2008). "준설토와 Bottom Ash 재활용을 위한 복합지반재료 개발", 한국지반공학회논문집, 제23권, 제11호, pp 77-85.
- 김진경, 박진호, 박현진, 이재준, 전홍석, 황진수 (2010). "공학도를 위한 통계학", 자유아카데미, pp 238-251.
- 노형진, 정한열 (2008). "SPSS에 의한 통계분석 입문", 한울출판사, pp 205-218.
- 이성진, 김윤기, 고태훈, 이수형, 신민호 (2011). "성토재 적용을 위한 경량폐기물의 기본물성 및 압축특성 연구", 한국지반



- 공학회논문집, 제27권, 제5호, pp 61-74.
- 박성현, 김종욱 (2010). "Minitab을 활용한 현대실험계획법", 민영사, pp 421-482.
- Abdrabbo, F.M., Abouseeda, H.M., Gaaver, K.E. and El-Marassi, M.A. (2005). "Behavior of Strip Footings Resting on sand Reinforced with Tire-Chips", American Society of Civil Engineers, Part of Geo-Frontiers 2005.
- Barluenga, B., Hernandez-Olivares, F., Bollati, M. and Witozsek, B. (2002). "Static and dynamic behaviour of recycled type rubber-filled concrete", Cement and Concrete Research, Vol 32, Issue 10, pp 1587-1596.
- Cetin, H., Fener, M. and Gunaydin, O. (2006). "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", Engineering Geology, Vol 88, pp 110-120.
- Eldin, N.N. and Senouci, A.B. (1993). "Rubber-Tire Particle as Concrete Aggregate", American Society of Civil Engineers, Vol 5, No. 4, pp 478-496.
- Hataf, N. and Rahimi, M.M. (2006). "Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds", Construction and Building Materials, Vol 20, pp 910-916.
- Kim, Y.T., Kang, H.S. (2011). "Engineering Characteristics of Rubber-Added Lightweight Soil as a Flowable Backfill Material", Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), Vol 23, Issue 9, pp 1289-1294.
- Lee, H.J. and Roh, H.S. (2007). "The use of recycled tire chips to minimize dynamic earth pressure during compaction of backfill", Construction and Building Materials, Vol 21, pp 1016-1026.
- Minitab Manual (2004). Minitab Inc, pp 49-60.
- Salgado, R., Yoon, S. and Siddiki, N.Z. (2003). "Construction of Tire Shreds Test Embankment", Final Report No. FHWA/IN/JTRP2002/35, Joint Transportation Research program, Purdue University, Indiana Department of Transportation.
- Shatanawi, K.M., Biro, S., Geiger, A. and Amirkhani, S.N. (2011). "Effects of furfural activated crumb rubber on the properties of rubberized asphalt", Construction and Building Materials, Vol 28, No 2012, pp 96-103.
- Zornberg, J.G., Costa, Y.D. and Vollenweider, B. (2004a). "Performance of Prototype Embankment build with Tire Shreds and Nongranular Soil", Journal of the Transportation Research Board, No. 1874, pp 70-77.
- Zornberg, J.G., Cabral, A.R. and Viratjandr, C. (2004b). "Behaviour of Tire Shred-Sand Mixtures", Canadian Geotechnical Journal, Vol 41, No 2, pp 227-241.

---

2011년 12월 22일 원고 접수

2012년 2월 11일 심사 완료

2012년 4월 19일 게재 확정