

# 다중회귀분석을 이용한 CLSM의 유동성 및 강도 특성 예측

## Estimation of Flowability and Strength in Controlled Low Strength Material Using Multiple Regression Analysis

한 우 진<sup>1)</sup> · 이 종 섭<sup>1)</sup> · 변 용 훈<sup>†</sup>  
WooJin Han · Jong-Sub Lee · Yong-Hoon Byun

Received: November 1<sup>st</sup>, 2017; Revised: November 8<sup>th</sup>, 2017; Accepted: November 22<sup>nd</sup>, 2017

**ABSTRACT** : Flowability and strength with curing time of controlled low-strength material (CLSM) are required differently according to the construction purpose. In this paper, the flowability and strength were estimated from the mixing ratio of CLSM using multiple regression analysis to design the CLSM. The flow values and strength at 12 hrs and 7days were measured in accordance with the mixing ratio of CLSM which consists of 7 different materials, such as CSA expansive agent, ordinary Portland cement, fly ash, sand, silt, water, and accelerator. The multiple regression was performed with the proportions of each material of CLSM as independent variables and the measured properties as dependent variables using SPSS Statistics 23 which is a statistical analysis program. The regression coefficients were estimated from the first to third order equation models for the materials. From the results, the third order model for the flow values and the first order models for 12hrs and 7days strength are the most appropriate models. This study suggests that the mixing ratio required for constructions may be effectively estimated from the regression models about the characteristics of CLSM, before performing experimental tests.

**Keywords** : CLSM (Controlled Low-Strength Material), Flow value, Unconfined compressive strength, Multiple regression analysis

**요 지** : 현장의 목적에 따라 유동성 채움재(Controlled Low-Strength Material, CLSM)의 유동성과 재령일에 따른 강도 특성은 다르게 요구될 수 있으며, 본 연구에서는 현장에 맞는 유동성 채움재의 배합설계가 가능하도록 다중회귀분석을 이용하여 유동성 채움재의 배합 비율로써 강도 및 플로우 특성을 예측하고자 하였다. CSA 팽창재, 보통 포틀랜드 시멘트, 플라이애시, 모래, 실트, 물 그리고 급결제로 구성된 유동성 채움재의 배합비에 따라 플로우값 그리고 12시간 및 7일 강도를 측정하였다. 유동성 채움재의 재료 비율을 독립변수로, 측정된 각 특성을 종속변수로 선정 후, 통계 분석 프로그램인 SPSS Statistics 23을 통하여 다중회귀분석을 수행하였으며, 독립변수항이 1~3차식으로 이루어진 회귀모형의 회귀계수를 추정하였다. 회귀분석 결과, 플로우값은 3차식의 모형, 12시간 및 7일 강도는 1차식의 모형으로 설명하는 것이 가장 적절한 것으로 판단하였다. 본 논문에서 제안된 CLSM의 플로우값 및 강도 특성에 대한 회귀모형을 통하여, 실험을 수행하기 전, 요구되는 특성에 맞는 배합비를 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 유동성 채움재, 플로우값, 일축압축강도, 다중회귀분석

## 1. 서 론

도시화가 진행됨에 따라 지하구조물의 활용이 증대되고 상하수도관, 가스관 등, 지하매설물의 종류가 다양해지고 있으며, 모래를 이용한 지하매설물의 되메움 작업 시, 매설물의 기하학적 특성에 따라 매설물 주변의 다짐 작업이 어려워 안정성에 문제가 있을 수 있다(Cheon et al., 2006). 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 되메움 작업에 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)를 적용할 수 있다. CLSM은 유동성이 높아 매설관 주변의 협소한 공간에도 흘러 들어갈 수 있으며, 자기다짐성의 특성이

있어 다짐이 필요 없고 일정 시간 경과 후에는 강도가 발현되어 안정성 확보에 효과적이다(Cheon et al., 2006; Kong et al., 2010). 또한, CLSM은 8.3MPa 이하의 저강도 콘크리트로 규정하고 있으며, 지하매설물 보수보강 시 재굴착이 가능한 배합설계를 위하여 일반적으로 2.1MPa를 초과하지 않는다(ACI Committee 116, 2000; ACI Committee 229, 1999).

유동성 채움재는 적용되는 현장에 따라 요구되는 유동성 및 강도의 크기가 다르기 때문에 현장의 요구조건에 적합한 채움재의 배합이 필요하다. 그러나, 요구 강도에 맞는 배합 시, 재료의 유동성에도 영향을 주게 되며, 반대로 요구 유동

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

† School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : yhbyun@knu.ac.kr)

성에 맞는 배합비로 유동성 채움재를 조성할 경우에도 요구 강도는 만족시키지 못하게 될 수 있다. 특히, 초기 및 장기 강도, 그리고 유동성을 동시에 조절할 필요가 있을 경우, 각각의 특성과 모든 배합재료가 서로 밀접한 관계가 있기 때문에 목표 배합비 선정은 더욱 어렵게 된다. 따라서, 목표 배합비의 선정이 용이하도록 채움재의 배합재료와 요구 특성 간의 상관성에 대해 조사할 필요가 있다.

유동성 채움재는 다수의 재료를 포함하므로 배합비와 유동성 및 강도 특성의 관계를 생성하기 위하여 다중회귀분석을 이용한 통계적 분석 방법을 활용할 수 있다. 다중회귀분석은 다양한 분야에서 적용되어 왔으며, 하나의 종속변수와 다양한 독립변수 간의 관계를 파악하는데 효과적인 방법을 알려져 있다. 지반공학분야에서는 다중회귀분석을 이용함으로써 다양한 사면의 안정성을 평가하기 위한 회귀모형을 개발하는 연구 및 점토의 지반정수와 물리적 특성의 상관성을 분석하는 연구 등이 진행되어 왔다. Hwang et al.(2013)은 자연사면에서 산사태 발생의 주요 원인인 투수계수를 간극비, 포화단위중량, 세립분 함량, 그리고 유효입경에 대한 식으로 나타낸 회귀모형을 제시하였으며, Lee et al.(2013)은 104개소 비탈면의 절취상태, 배수조건, 구조물의 변형 등을 평가하고, 이들의 연관성을 분석하여 예측결함지수를 나타내는 회귀모형을 제안한 바 있다. 한편, Yoon et al.(2004)는 여러 해안지역에서 채취한 해성점토의 압축지수를 추정하기 위하여 측정된 함수비, 초기 간극비, 건조단위중량, 비중, 소성지수, 액성한계를 이용함으로써 경험적 회귀모형으로부터 최적화된 다중회귀모형을 획득한 바 있다. 또한, 부산 및 광양지역의 해성점토와 한강 및 금강유역 점토의 압축지수를 추정하기 위하여, 산정된 점토의 물성과 압축지수 간의 단순회귀분석을 수행하여 종속변수에 영향을 미치는 독립변수를 파악하였으며, 다중회귀모형을 이용하여 압축지수를 비중, 초기 간극비 및 액성한계에 대하여 추정할 수 있도록 하였다(Kang, 2012; Hwang, 2016).

본 논문에서는 다중회귀분석을 이용하여 유동성 채움재의 배합비와 해당 배합비의 물리적 특성인 유동성 및 강도 특성 사이의 상관관계를 도출하고자 하였다. 이를 위하여 연구에 사용된 배합비와 유동성 및 강도 특성을 대표하는 플로우값과 일축압축강도에 대하여 기술하였으며, 다중회귀분석에 관한 기본적인 이론을 소개하였다. 또한, 1~3차식의 회귀모형을 이용한 회귀분석의 과정을 설명하고, 유동성 채움재의 각각의 특성을 설명하는 회귀모형의 추정 결과를 제시하였으며, 1~3차식의 모형 중 유동성 및 강도 특성을 설명하는 최적의 모형을 선정하였다.

## 2. 연구 개요

### 2.1 유동성 채움재 특성

본 연구에서 사용된 유동성 채움재는 배합재료로 CSA 팽창재, 보통 포틀랜드 시멘트, 플라이애시, 모래, 실트, 알칼리프리계 급결제, 그리고 물을 사용하였으며, 이를 Table 1과 같이 중량을 기준으로 한 비율로 배합되었다. 양생초기에 수화반응을 촉진시키고 이에 따른 건조수축을 줄이기 위하여  $C_4A_3S$ 를 포함하는 CSA 팽창재를 사용하였으며(Yoon & Ryo, 2004; Han et al., 2015), 본 논문에서 사용한 플라이애시의 성분비는 Table 2에 나타내었다. 모래 및 실트는 각각 0.25~0.6mm의 입경인 주문진사를 사용하였고, 0.035~0.084mm인 세립사를 사용하였다. 유동성 채움재의 배합비 선정은 과도한 팽창 및 급결현상이 나타나지 않도록, CSA 팽창재의 사용량을 CSA 팽창재와 보통 포틀랜드 시멘트와 혼합한 시료(CSA계 시멘트)의 20% 이하로 제한하였으며, 급결제의 비율은 CSA계 시멘트에 비교하여 15% 이하로 제한하였다. 또한, 물과 CSA계 시멘트 및 플라이애시의 비율, 즉, 물-바인더의 비율은 유동성 확보를 위하여 80% 이상이 되도록 배합비를 설정하였다.

배합 과정에 의한 CLSM 특성의 변화를 최소화하기 위하여, 모든 배합비에 대하여 동일한 순서로 시료를 조성하였다. CLSM 시료는 분말의 형태인 CSA계 시멘트, 플라이애시, 모래, 실트를 먼저 건배합한 후, 물을 혼합하고, 급결제를 마지막에 첨가하는 순서로 배합되었다. 이와 같이 배합된 CLSM의 유동성 및 강도 특성 평가를 위하여 플로우 시험 및 일축압축강도시험을 수행하였다.

플로우 시험은 ASTM D6103(2004)에 따라 수행하였다. Fig. 1과 같이 가로, 세로의 길이가 300mm 이상인 편평한 판 위에 내측의 직경 75mm, 높이 150mm이며 양끝단이 개방되어 있는 실린더형 몰드를 올린 후, 몰드의 내부에 배합된 CLSM 시료를 채우고, 시료가 채워진 몰드를 2~3초 동안 평판에 수직인 방향으로 최소 15cm 이상 들어올린다. 이때, 넓게 퍼진 시료의 최대 직경과 그에 수직인 길이를 측정하여 두 값의 평균을 플로우값으로 한다.

CLSM의 강도 특성을 평가하기 위하여 일축압축강도시험을 ASTM D4832(2002)에 기초하여 수행하였다. 강도시험을 위한 공시체는 직경 50mm 및 높이 100mm의 실린더 형태로 제작하였으며, 공기 중에서 양생하였다. 본 연구에서는 하중용량이 2tonf인 압축강도시험기를 사용하였으며, 1mm/min의 속도로 하중을 재하하였다. 양생 후 12시간, 7일 경과 시, 각각 배합비에 대하여 강도시험을 3회 수행하고 측정된 결과의 평균값을 해당 배합비의 강도로 나타내었다.

Table 1. CLSM mixing ratio by weight, flow values, and compressive strength

No.	CSA [%]	OPC [%]	FA [%]	Sand [%]	Silt [%]	Acc [%]	Water [%]	Flow value [mm]	Compressive strength [kPa]	
									12 hrs	7 days
1	0.232	4.41	27.8	26	11.1	0.278	30.1	265	102	413
2	0.234	4.44	28	26.2	11.2	0.467	29.4	225	135	541
3	0.237	4.51	28.5	26.6	11.4	0.285	28.5	210	147	535
4	0.251	2.26	8.37	5.9	52.7	0.377	30.1	178	0	441
5	0.252	2.27	8.39	5.9	52.9	0.151	30.2	225	0	397
6	0.267	2.41	8.91	18.7	43.7	0.16	25.9	210	0	528
7	0.267	2.4	8.89	18.7	43.6	0.4	25.8	130	37	690
8	0.278	2.5	9.26	32.4	32.4	0.417	22.7	138	45	980
9	0.279	2.51	9.29	32.5	32.5	0.167	22.8	208	0	740
10	0.287	2.58	9.57	46.9	20.1	0.431	20.1	168	73	1,190
11	0.288	2.59	9.6	47	20.2	0.173	20.2	220	64	775
12	0.289	2.6	9.65	60.8	6.8	0.174	19.8	203	43	808
13	0.289	2.6	9.62	60.6	6.7	0.433	19.7	188	48	806
14	0.393	1.57	9.83	48.2	20.6	0.206	19.2	200	42	341
15	0.396	1.58	9.89	48.5	20.8	0.119	18.8	210	41	347
16	0.464	4.17	27.8	26	11.1	0.278	30.1	270	102	408
17	0.467	4.21	28	26.2	11.2	0.467	29.4	225	130	475
18	0.475	4.27	28.5	26.6	11.4	0.285	28.5	210	146	475
19	0.551	2.21	2.76	36.8	36.8	0.276	20.7	208	0	515
20	0.575	2.3	2.88	53.7	23	0.288	17.3	220	0	565
21	0.63	2.52	5.25	51.4	22	0.315	17.8	200	49	628
22	0.745	14.2	7.45	36.5	15.6	0.894	24.6	200	68	3,220
23	0.822	15.6	12.3	32.9	12.3	0.986	25.1	205	195	7,110
24	0.861	16.4	12.9	30.1	12.9	1.03	25.8	210	138	5,173
25	0.922	3.69	2.76	51.6	22.1	0.461	18.4	210	19	846
26	0.935	3.74	28	26.2	11.2	0.467	29.4	210	107	512
27	0.95	3.8	28.5	26.6	11.4	0.285	28.5	200	148	425
28	0.956	8.6	2.87	46.8	20.1	0.574	20.1	200	42	2,520
29	1.03	4.1	3.08	50.3	21.5	0.513	19.5	205	25	947
30	1.51	13.6	7.56	37.1	15.9	0.908	23.4	200	79	3,687
31	1.64	14.8	12.3	32.9	12.3	0.986	25.1	200	157	3,982
32	1.67	6.69	2.51	41	26.8	0.502	20.9	205	19	1,411
33	1.72	15.5	12.9	30.1	12.9	1.03	25.8	210	141	3,670
34	1.73	6.92	8.65	42.4	18.2	0.519	21.6	220	84	1,456
35	1.76	7.04	2.64	43.1	24.6	0.528	20.2	215	40	1,549
36	1.87	7.47	4.67	45.8	19.6	0.56	20.1	210	55	2,063
37	1.88	7.5	2.81	46	21.6	0.563	19.7	210	44	2,148
38	1.91	7.65	2.87	46.8	20.1	0.574	20.1	220	42	2,008
39	2.61	10.5	6.54	32	13.7	1.96	32.7	205	8	803
40	2.89	11.6	7.22	35.4	15.2	1.44	26.4	205	0	2,009
41	3.01	12.1	7.54	36.9	15.8	0.904	23.7	210	112	2,837
42	3.29	13.1	12.3	32.9	12.3	0.986	25.1	200	162	2,111
43	3.44	13.8	12.9	30.1	12.9	1.03	25.8	200	130	1,894

Table 2. Chemical components of fly ash

SiO <sub>2</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	CaO [%]	MgO [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	K <sub>2</sub> O [%]	Na <sub>2</sub> O [%]
20.4	9.16	40.8	7.02	11.4	1.04	0.82

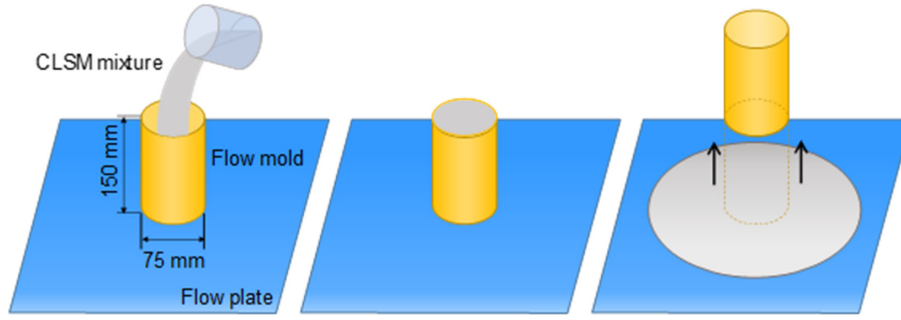


Fig. 1. Procedure of flow test for controlled low strength materials (CLSMs)

본 연구에서는 각 재료를 모두 포함한 43가지 배합비로 CLSM 시료를 제작하여 CLSM의 플로우값, 12시간, 7일 강도를 평가하였다. 일부 배합비의 경우에는 양생후 12시간에서 공시체의 자립이 불가하여 플로우값 및 7일 강도만을 측정하였다. Table 1에서 각각의 배합비를 백분율로 나타내었으며, 플로우값, 12시간 및 7일 강도의 측정결과를 함께 정리하였다.

## 2.2 다중회귀분석

회귀분석이란 종속변수와 독립변수 간의 함수적 관계를 파악하는 통계적 기법을 말하며, 회귀분석은 회귀모형 구축에 의한 자료의 기술과 모수추정, 적합된 모형을 통한 예측을 목적으로 한다. 회귀모형은 종속변수를 설명하기 위한 독립변수의 수에 따라 단순회귀모형과 다중회귀모형으로 분류되며, 단순회귀모형은 하나의 독립변수와 종속변수의 관계를 나타내고 다중회귀모형은 두 개 이상의 독립변수와 종속변수의 관계를 함수적으로 나타내는 것을 말한다. 본 논문에서는 7가지 재료 함량에 따른 플로우값, 12시간 및 7일 강도를 예측하는 것을 목적으로 하기 때문에 다중회귀분석을 적용하였다. Eq. (1)은 자료의 개수가  $n$ 개일 때, 독립변수  $x_1, x_2, x_3$ 를 이용하여 종속변수  $y$ 를 추정하기 위한 다중회귀모형을 나타낸 것이다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

여기서,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 는 회귀계수를 나타내며,  $\varepsilon_i$ 는 오차항을 나타낸다.

회귀계수를 추정하기 위해서 주로 최소제곱법(least square method)의 원리를 적용한다. 최소제곱법은 Eq. (1)을 회귀모형으로 가정하였을 때, 회귀모형에 의한 모든 독립변수와 종속변수 간의 관계에서 나타나는 오차항  $\varepsilon_i$ 의 제곱의 합, 즉, Eq. (2)가 최소가 되도록 하는 회귀계수를 추정하는 방법이다.

$$\sum \varepsilon_i^2 = [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i})]^2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

본 논문에서는 CLSM의 배합재료와 유동성 및 강도 특성

간의 상관관계를 예측하기 위하여 다중선형회귀분석을 적용하였다. 다중선형회귀분석은 종속변수와 각각의 독립변수를 설명하는 회귀계수가 선형을 이루고 있는 모형에 대한 분석을 말하며, 독립변수와 종속변수의 관계가 1차식으로 구성된 다중선형회귀모형을 적용할 경우 각각의 회귀계수는 종속변수를 예측하기 위한 독립변수의 영향력을 의미한다(Kim, 2005).

## 2.3 분석방법

회귀모형의 선택과정은 일반적으로 물리적 직관에 의하여 수행되기 어려우며, Occam's razor라 불리는 기본적인 원리에 근거하여 모형을 선택할 수 있다. Occam's razor란 어떠한 사실이나 현상을 논리적으로 설명하고자 할 때, 가장 단순한 논리가 진실일 경우가 높다는 원리를 말하며, 선형회귀모형에서는 최절약원리를 말한다.

본 연구에서는 회귀 모형의 선정 및 회귀계수의 추정을 위해 통계분석 프로그램인 SPSS Statistic 23을 사용하였으며, SPSS 내의 회귀분석기능을 이용하여 분석을 수행하였다. 회귀모형은 일반적으로 최절약원칙에 의하여 축소모형을 검토해야 하지만, 본 논문에서는 유동성 채움재의 배합에 이용된 각각의 재료를 독립변수로써 모두 포함하는 회귀모형을 Eq. (3)-(5)와 같이 1차에서 3차식으로 변화시키며 회귀계수를 추정하고 이의 적합성을 파악하고자 하였다. 최종적으로는 1~3차식의 회귀모형 중 가장 적합하다고 판단되는 회귀모형을 결정하였다.

$$y = \beta + a_1(CSA) + b_1(OPC) + c_1(FA) + d_1(Sand) + e_1(Silt) + f_1(Acc) + g_1(Water) \quad (3)$$

$$y = \beta + a_1(CSA) + a_2(CSA)^2 + b_1(OPC) + b_2(OPC)^2 + c_1(FA) + c_2(FA)^2 + d_1(Sand) + d_2(Sand)^2 + e_1(Silt) + e_2(Silt)^2 + f_1(Acc) + f_2(Acc)^2 + g_1(Water) + g_2(Water)^2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
y = & \beta + a_1(CSA) + a_2(CSA)^2 + a_3(CSA)^3 + b_1(OPC) \\
& + b_2(OPC)^2 + b_3(OPC)^3 \\
& + c_1(FA) + c_2(FA)^2 + c_3(FA)^3 + d_1(Sand) \\
& + d_2(Sand)^2 + d_3(Sand)^3 \\
& + e_1(Silt) + e_2(Silt)^2 + e_3(Silt)^3 + f_1(Acc) + f_2(Acc)^2 \\
& + f_3(Acc)^3 + g_1(Water) \\
& + g_2(Water)^2 + g_3(Water)^3
\end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $\beta, a, b, c, d, e, f, g$  는 각 독립변수의 회귀계수를 나타내며, 회귀계수의 아래첨자는 해당 독립변수의 차수를 의미한다.

### 3. 결과 분석 및 토의

#### 3.1 결과 분석

##### 3.1.1 플로우값

플로우값을 예측하기 위해 CLSM을 구성하는 7가지 각각의 재료를 독립변수로 하여 회귀분석을 진행하였으며, Table 1에 나타낸 43개 모든 배합비를 분석에 적용하였다. 분석결과로 출력된 분산분석표 및 회귀계수를 Table 3과 Table 4에 각각 정리하였다. Table 3에 정리된 결과를 보면, 1~3차 모형의 F-검정통계량이 4.622, 10.985, 9.784로 산정되었으

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) of estimated models (flow) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order

(a)

	SS <sup>a</sup>	df. <sup>b</sup>	MS <sup>c</sup>	F-value	p-value
Regression	11,047.19	7	1,578.17	4.622	0.001
Residual	11,951.6	35	341.474		
Total	22,998.79	42			

a. SS = Sum of squares

b. df. = degree of freedom

c. MS = mean square

(b)

	SS	df.	MS	F-value	p-value
Regression	19,456.43	14	1,389.745	10.985	0.000
Residual	3,542.362	28	126.513		
Total	22,998.79	42			

(c)

	SS	df.	MS	F-value	p-value
Regression	20,866.03	21	993.62	9.784	0.000
Residual	2,132.762	21	101.56		
Total	22,998.79	42			

Table 4. Summary of regression coefficients (flow) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order

(a)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		-4,187.53	-0.661	0.513	Sand	$d_1$	43.35	43.35	0.497
CSA	$a_1$	51.88	0.825	0.415	Silt	$e_1$	40.748	0.651	0.519
OPC	$b_1$	46.102	0.744	0.462	Acc	$f_1$	-83.56	-1.123	0.269
FA	$c_1$	39.523	0.638	0.528	Water	$g_1$	51.594	0.79	0.435

(b)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		-43258.2	-5.76	0.000	Sand	$d_1$	449.138	5.821	0.000
				$d_2$		-0.093	-4.536	0.000	
CSA	$a_1$	456.299	5.705	0.000	Silt	$e_1$	438.078	5.824	0.000
	$a_2$	-6.031	-1.415	0.168		$e_2$	0.026	0.822	0.418
OPC	$b_1$	453.005	5.904	0.000	Acc	$f_1$	130.264	1.557	0.131
	$b_2$	-0.748	-1.945	0.062		$f_2$	221.212	3.467	0.002
FA	$c_1$	437.147	5.737	0.000	Water	$g_1$	370.563	5.456	0.000
	$c_2$	-0.07	-0.998	0.327		$g_2$	1.783	4.826	0.000

Table 4. Summary of regression coefficients (flow) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order (Continued)

(c)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		-39918.8	-3.575	0.002	Sand	$d_1$	430.805	4.251	0.000
						$d_2$	-0.116	-1.225	0.234
						$d_3$	-0.001	-0.593	0.559
CSA	$a_1$	424.748	3.846	0.001	Silt	$e_1$	421.055	4.236	0.000
	$a_2$	-5.087	-0.144	0.887		$e_2$	-0.468	-1.865	0.076
	$a_3$	1.243	0.113	0.911		$e_3$	0.009	2.114	0.047
OPC	$b_1$	461.33	4.448	0.000	Acc	$f_1$	-126.499	-0.604	0.552
	$b_2$	-5.596	-3.379	0.003		$f_2$	734.501	1.897	0.072
	$b_3$	0.188	3.076	0.006		$f_3$	-300.135	-1.327	0.199
FA	$c_1$	412.892	3.841	0.001	Water	$g_1$	214.133	0.748	0.463
	$c_2$	0.02	0.023	0.982		$g_2$	7.003	0.772	0.449
	$c_3$	-0.003	-0.16	0.875		$g_3$	-0.068	-0.544	0.592

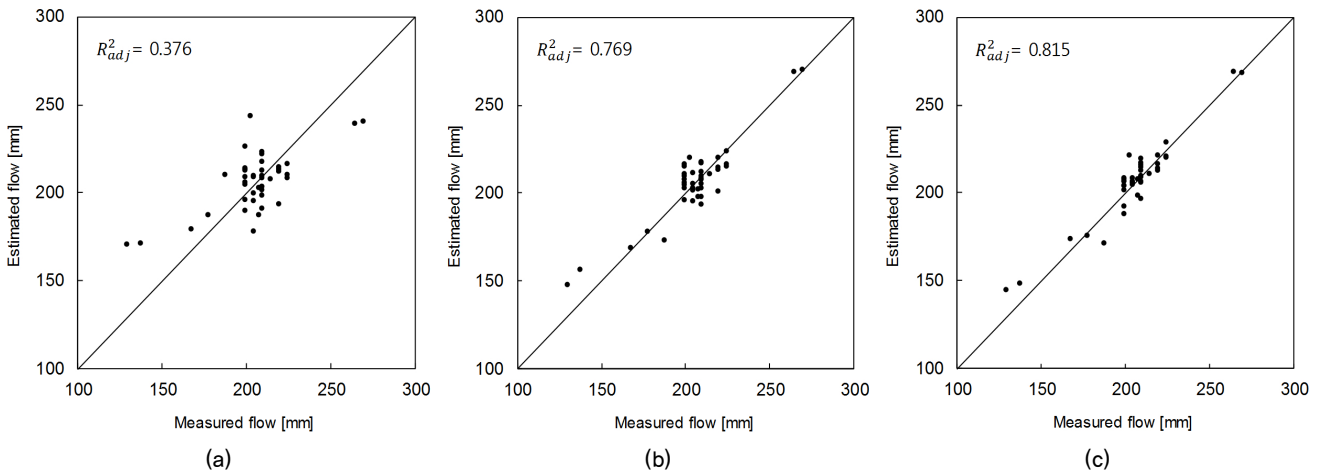


Fig. 2. Measured values vs. estimated values (flow) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order regression equation

며, 이의 유의확률은 0.001, 0.000, 0.000으로 유의수준 0.05 이하를 만족하므로 각각의 모형은 통계적으로 유의하다고 판단할 수 있다. 회귀계수를 나타내는 비표준화계수와 각각의 계수에 대한 t-검정통계량의 유의확률을 Table 4에 나타내었다. t-검정통계량의 유의확률 또한 유의수준 0.05 이하의 값인 경우 통계적으로 유의하다고 볼 수 있으며, 1차 모형에서와같이 모든 계수의 유의확률이 유의수준 0.05를 초과하는 경우에는 변수의 제거 및 차수 증가 등의 보완이 필요할 수 있다. 2차 및 3차 모형에서는 비교적 다수의 계수가 유의확률 조건을 만족하여 통계적으로 유의하였다.

회귀분석을 통하여 산정된 비표준화계수, 즉, 회귀계수를 회귀모형에 적용하여 플로우값을 산정하였으며, 이를 실험에 의해 측정된 플로우값과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 종속변수에 대한 모형의 설명력을 수치화한 결정계수( $R^2$ )는 독립변수의 수에 따라 증가하여 독립변수의 수가 증가할수록 모형의 설명력이 강한 것처럼 보이게 되는데, 독립변수

의 개수에 의한 영향을 최소화하기 위하여 다중회귀분석의 경우, Eq. (6)과 같은 수정된 결정계수를 사용한다.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{n-p-1} \quad (6)$$

(단,  $R_{adj}^2$  = 수정된 결정계수,  $R^2$  = 결정계수,  $n$  = 데이터의 개수,  $p$  = 독립변수의 개수)

플로우값을 종속변수로 하는 1~3차 회귀모형의 수정된 결정계수 값은 0.376, 0.769, 0.815로 측정되어 독립변수의 차수가 증가할수록 수정 결정계수의 값이 증가하고, Fig. 2에서도 차수가 증가함에 따라 실측값과 예측값이 유사한 경향을 보여 독립변수의 차수가 증가함에 따라 플로우값의 예측 정확도가 상승한다고 판단할 수 있다.

### 3.1.2 12시간 강도

Table 1에 나타난 CLSM에 이용된 배합비 중 7가지 배합비에서, 양생 12시간 후 압축강도의 측정을 위한 공시체의

자립이 불가능하여 강도 측정이 불가능하였으며, 12시간 강도 예측을 위한 회귀분석에는 강도 측정이 가능하였던 36가지 배합비를 사용하였다. 앞절의 내용과 같이 회귀모형의

Table 5. Analysis of variance (ANOVA) of estimated models (12hrs strength) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order

(a)

	SS	df	MS	F-value	p-value
Regression	81,074.82	7	11,582.12	43.324	0.000
Residual	7,485.484	28	267.339		
Total	88,560.31	35			

(b)

	SS	df	MS	F-value	p-value
Regression	83,057.47	14	5,932.676	22.64	0.000
Residual	5,502.838	21	262.04		
Total	88,560.31	35			

(c)

	SS	df	MS	F-value	p-value
Regression	85,133.88	21	4,053.994	16.564	0.000
Residual	3,426.43	14	244.745		
Total	88,560.31	35			

Table 6. Summary of regression coefficients (12hrs strength) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order

(a)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		653.741	2.762	0.010	Sand	$d_1$	-4.928	-2.264	0.032
CSA	$a_1$	-0.328	-0.071	0.944	Silt	$e_1$	-3.976	-1.576	0.126
OPC	$b_1$	1.309	0.487	0.630	Acc	$f_1$	77.762	2.255	0.032
FA	$c_1$	5.431	2.452	0.021	Water	$g_1$	-18.322	-4.939	0.000

(b)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		1,898.991	2.19	0.040	Sand	$d_1$	-1.154	-0.258	0.799
						$d_2$	-0.197	-1.554	0.135
CSA	$a_1$	-38.934	-1.768	0.092	Silt	$e_1$	-31.188	-1.912	0.070
	$a_2$	4.776	0.773	0.448		$e_2$	0.384	1.709	0.102
OPC	$b_1$	0.678	0.043	0.966	Acc	$f_1$	-15.972	-0.145	0.886
	$b_2$	-0.788	-1.026	0.317		$f_2$	132.917	0.941	0.357
FA	$c_1$	-4.022	-0.41	0.686	Water	$g_1$	-44.114	-1.363	0.187
	$c_2$	0.001	0.011	0.991		$g_2$	0.137	0.247	0.808

(c)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		6,226.219	1.445	0.171	Sand	$d_1$	115.057	0.777	0.450
						$d_2$	-3.619	-0.843	0.413
						$d_3$	0.025	0.737	0.473
CSA	$a_1$	-89.781	-2.302	0.037	Silt	$e_1$	-74.363	-0.666	0.516
	$a_2$	13.998	0.846	0.412		$e_2$	1.571	0.267	0.793
	$a_3$	-0.887	-0.286	0.779		$e_3$	-0.031	-0.301	0.768
OPC	$b_1$	1.382	0.037	0.971	Acc	$f_1$	79.832	0.218	0.831
	$b_2$	-5.775	-2.053	0.059		$f_2$	-213	-0.274	0.788
	$b_3$	0.185	1.793	0.095		$f_3$	223.707	0.518	0.613
FA	$c_1$	-52.057	-1.058	0.308	Water	$g_1$	-489.384	-1.16	0.265
	$c_2$	1.428	0.614	0.549		$g_2$	17.618	0.967	0.350
	$c_3$	-0.033	-0.635	0.536		$g_3$	-0.239	-0.939	0.364



통계적 유의성 검증을 위하여 Table 5에서 F-검정통계량의 유의확률을 이용할 수 있으며, 차수에 따라 모두 0.000으로 출력되어 12시간 강도 추정을 위한 1~3차 회귀모형의 유의확률이 모두 통계적 유의성을 설명하는 유의수준 0.05 이하의 값으로 나타났다. Table 6에서 t-검정통계량의 유의확률을 보면, 1차 모형에서는 일부 회귀계수의 경우에 t-검정통계량의 유의확률이 0.05를 초과한 값으로 도출되었고, 2차 및 3차 모형의 경우에는 대부분의 경우에서 0.05를 초과한 유의확률이 나타났다. 따라서, 하나 이상의 독립변수를 제거하는 해당 회귀계수의 수정이 필요하다고 판단되지만, 이와 같이 수정할 경우 배합재료의 비율이 회귀모형에서 제외되어, 본 연구의 목적인 배합비를 통한 유동성 채움재의 강도추정과 부합되지 않는 회귀모형이 도출되므로, 회귀계수의 수정은 제외되었다.

12시간 강도의 예측을 위하여 추정된 회귀모형에 실험

배합비를 적용하여 산정된 값을 실측값과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 따르면 차수가 증가할수록 실측값과 예측값이 서로 유사하였으며, 수정 결정계수도 각 차수에서 0.894, 0.896, 0.903으로 증가하여, 회귀모형의 차수가 증가함에 따라 종속변수인 12시간 강도를 더욱 잘 추정한다고 판단된다.

### 3.1.3 7일 강도

양생 후 7일 강도의 추정을 위한 회귀모형의 결정하기 위해, Table 1의 43개 배합비를 모두 이용하여 회귀분석을 수행하였으며, 회귀분석의 결과로 출력된 분산분석표와 회귀계수는 Table 7 및 Table 8과 같이 나타났다. 앞서 실시한 플로우값 및 12시간 강도의 회귀모형에 대한 유의성 검증과 같이 Table 7에 나타난 F-검정통계량의 유의확률은 모두 0.000이며, 유의수준 0.05를 초과하지 않아 각 차수의 회귀

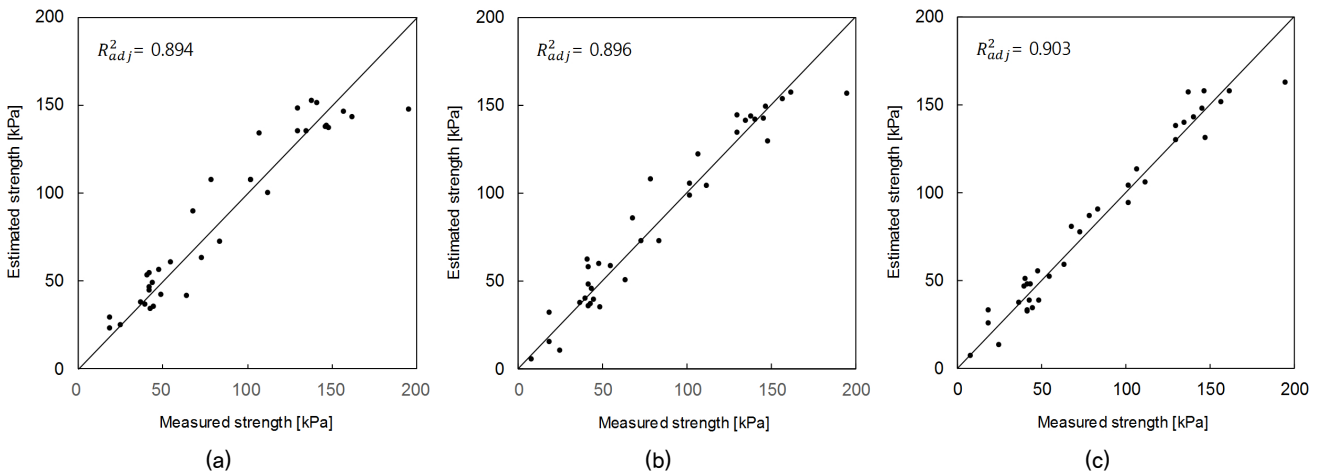


Fig. 3. Measured values vs. estimated values (12hrs strength) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order regression equation

Table 7. Analysis of variance (ANOVA) of estimated models (7days strength) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order

(a)

	SS	df	MS	F-value	p-value
Regression	80,696,257.03	7	11,528,036.72	45.752	0.000
Residual	8,818,846.13	35	251,967.032		
Total	89,515,103.16	42			

(b)

	SS	df	MS	F-value	p-value
Regression	81,282,920.08	7	5,805,922.863	19.748	0.000
Residual	8,232,183.082	35	294,006.539		
Total	89,515,103.16	42			

(c)

	SS	df	MS	F-value	p-value
Regression	84,952,752.68	7	4,045,369.175	18.62	0.000
Residual	4,562,350.483	35	217,254.785		
Total	89,515,103.16	42			



모형이 통계적 유의성을 띠다고 볼 수 있다. Table 8을 보면, 7일 강도 추정을 위한 회귀모형의 계수도 5.1절의 결과와 같이 1차 모형의 모든 계수의 유의확률이 0.05를 초과하고, 2차 및 3차 모형도 대부분의 경우에서 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 회귀계수 수정 시 하나 이상의 독립변수

가 제외되므로, 여기서도 회귀계수의 수정은 생략하였다.

7일 강도의 회귀모형을 실측값과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 7일 강도 예측모델은 1차식의 경우에도 수정 결정 계수가 0.882로 산정되어 종속변수를 비교적 잘 설명하는 것으로 나타났으며, 2, 3차 모형의 수정 결정계수가 0.862,

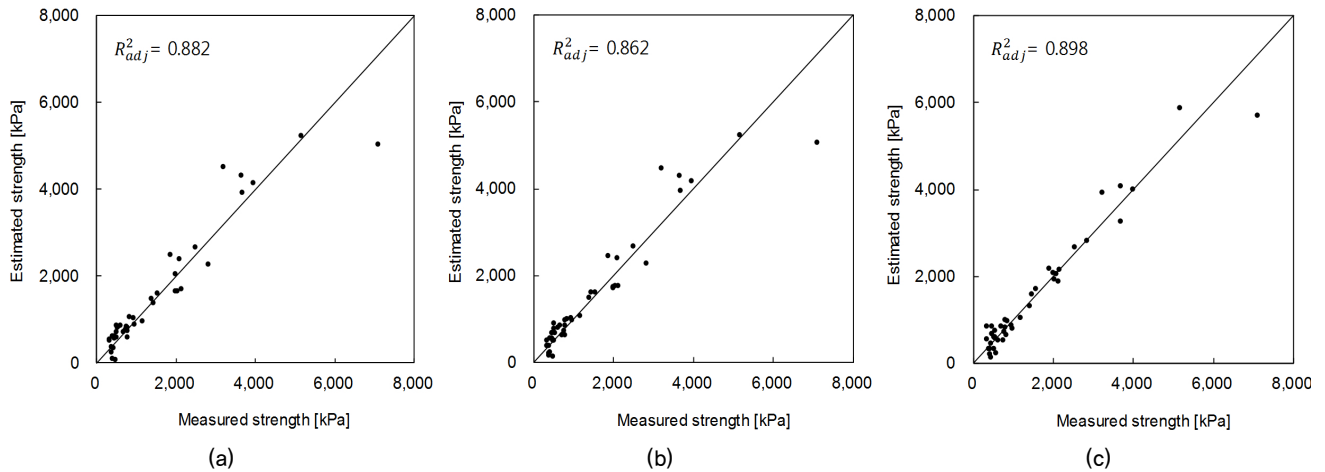


Fig. 4. Measured values vs. estimated values (7days strength) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order regression equation

Table 8. Summary of regression coefficients (7days strength) (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd order

(a)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		-43,388.2	-0.252	0.802	Sand	$d_1$	450.754	0.263	0.794
CSA	$a_1$	-241.125	-0.141	0.889	Silt	$e_1$	472.267	0.278	0.783
OPC	$b_1$	821.58	0.488	0.629	Acc	$f_1$	961.531	0.476	0.637
FA	$c_1$	471.081	0.28	0.781	Water	$g_1$	334.313	0.188	0.852

(b)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		237614.9	0.656	0.517	Sand	$d_1$	-2,453.43	-0.66	0.515
						$d_2$	0.709	0.717	0.479
CSA	$a_1$	-2,936.6	-0.762	0.453	Silt	$e_1$	-2,358.27	-0.65	0.521
	$a_2$	-17.605	-0.086	0.932		$e_2$	-0.301	-0.199	0.844
OPC	$b_1$	-2,062.05	-0.557	0.582	Acc	$f_1$	319.333	0.079	0.937
	$b_2$	4.61	0.249	0.805		$f_2$	-2,370.98	-0.771	0.447
FA	$c_1$	-2,335.14	-0.636	0.530	Water	$g_1$	-2,139.52	-0.653	0.519
	$c_2$	-0.343	-0.102	0.920		$g_2$	-8.996	-0.505	0.617

(c)

Coefficient		Value	t-value	p-value	Coefficient		Value	t-value	p-value
$\beta$		66,837.39	0.129	0.898	Sand	$d_1$	-1,451.17	-0.31	0.760
						$d_2$	1.286	0.294	0.772
						$d_3$	0.011	0.172	0.865
CSA	$a_1$	2,360.757	0.462	0.649	Silt	$e_1$	-1,264.52	-0.275	0.786
	$a_2$	-4,680.44	-2.868	0.009		$e_2$	1.247	0.108	0.915
	$a_3$	1,505.406	2.971	0.007		$e_3$	0.003	0.014	0.989
OPC	$b_1$	-338.294	-0.071	0.944	Acc	$f_1$	-9,639.46	-0.995	0.331
	$b_2$	-77.666	-1.014	0.322		$f_2$	25,004.86	1.396	0.177
	$b_3$	3.906	1.385	0.181		$f_3$	-19,082.9	-1.824	0.082
FA	$c_1$	-1,379.9	-0.278	0.784	Water	$g_1$	7,366.915	0.556	0.584
	$c_2$	32.879	0.839	0.411		$g_2$	-381.957	-0.911	0.373
	$c_3$	-0.819	-0.853	0.403		$g_3$	5.221	0.905	0.376

0.898로 나타나 앞에서 플로우값, 12시간 강도의 경우와 달리 2차식으로 구성된 회귀모형의 수정 결정계수가 가장 낮게 나타났다.

### 3.2 토의

다중회귀분석을 이용하여 유동성 채움재의 특성 중 플로우값과 12시간, 7일 강도를 각각의 재료에 의한 식으로 나타낼 수 있으며, 앞에서 분석한 결과로부터 1~3차식으로 구성된 회귀모형 중 가장 적합한 모형을 추정할 수 있다. 먼저, 플로우값의 경우에는 차수가 증가할수록 수정 결정계수의 증가 폭이 크며, 3차에서 수정 결정계수가 0.815로 가장 좋은 적합도를 나타낸다. 12시간과 7일 강도의 경우에는 3차 식에서의 수정 결정계수가 가장 크지만 1~3차식 각각의 결정계수가 유사한 값을 나타내는 것으로 볼 때, 최절약원칙에 의해 가장 간단한 모형인 1차식으로 구성된 회귀모형을 가장 적합한 모형으로 선택할 수 있다.

## 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다중회귀분석을 이용하여 CLSM의 배합비와 유동성 및 강도 특성의 관계를 추정하고, 그 결과로 획득된 회귀모형에 대한 평가를 수행하였다. CLSM은 CSA 시멘트, 플라이애시, 모래, 실트, 알칼리프리카제 급결제, 그리고 물을 다양한 비율로 배합하였으며, 이에 대한 플로우값, 12시간 및 7일 압축강도를 측정하였다. 다중회귀분석에 의한 CLSM의 배합비와 강도 및 유동성의 추정 결과는 다음과 같다.

- (1) CLSM의 배합비 및 플로우값을 이용하여 산정된 회귀모형은 각 차수에 따라 F-검정통계량이 4.622, 10.985, 9.784로 산출되어 이에 대한 유의확률이 통계적 유의미성을 가지는 0.05 이하의 값으로 나타났다. 플로우값의 추정식은 1차 모형에서 3차 모형으로 차수를 증가시켰을 때 수정 결정계수가 증가하는 경향이 나타났으며, 이에 따라 3차 회귀모형이 플로우값 추정에 가장 적합한 것으로 판단된다.
- (2) 12시간 강도의 경우, F-검정에 의하여 각 차수에 대한 모형이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 모형의 적합성을 판별하는 각 차수의 수정 결정계수는 서로 유사하게 산정되어, 최절약원칙에 따라 1차식의 모형이 12시간 강도와 배합비의 관계를 나타내는데 가장 적합하다고 사료된다.

- (3) 7일 강도의 경우, 각 차수의 모형이 F-검정에 의하여 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 수정 결정계수는 각각의 차수에 따라 0.882, 0.862, 0.898로 산출되었으며, 2차 회귀모형의 결정계수가 가장 작게 나타났다. 1차 및 3차 모형의 결정계수가 유사하므로, 7일 강도의 추정에 가장 적합한 모형은 최절약원칙에 의하여 1차 모형인 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안된 다중회귀분석에 의한 CLSM의 배합비에 따른 강도 및 유동성 추정은 실험결과가 증가할수록 보다 정확하게 수행될 수 있으며, 이러한 방식으로 추정된 회귀모형을 이용한다면 실험적 방법을 대신하여 요구 특성에 맞는 배합비를 선행적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 2017년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2017R1A2B3008466).

## References

1. ACI Committee 116 (2000), Cement and concrete terminology, American Concrete Institute, ACI 116R-00, pp. 1~73.
2. ACI Committee 229 (1999), Controlled low-strength materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-99, pp. 1~15.
3. ASTM D4832 (2002), Standard test method for preparation and testing of controlled low strength material (CLSM) Test Cylinders, American Society for Testing Materials, pp. 1~5.
4. ASTM D6103 (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low-strength material (CLSM), American Society for Testing and Materials, pp. 1~5.
5. Cheon, S. H., Jeong, S. S., Lee, D. S. and Kim, D. H. (2006), Mechanical characteristics of accelerated plowable backfill materials using surplus soil for underground power utilities, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 303~312 (in Korean).
6. Han, W. J., Lee, J. S., Cho, S. D., Kim, J. and Byun, Y. H. (2015), Study on correlation between compressive strength and compressive wave velocity for CLSM according to curing time, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 11, pp. 5~11 (in Korean).
7. Hwang, E. S., Chung, D. S., Kim, K. S., Lee, M. S. and Song, Y. S. (2013), Characteristics analysis of mudstone weathered soils in the landslide area using statistical technique, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 12, No. 3, pp. 31~41 (in Korean).
8. Hwang, I. S. (2016), Analysis of correlation between physical

- properties and consolidation parameters of clay in Han and Geum river basin, Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, pp. 149 (in Korean).
9. Kang, S. B. (2012), Correlation Analysis of Soil Parameters of Marine Clay in Busan and Kwangyang, Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, pp. 144 (in Korean).
  10. Kim, K. L. (2005), An easy interpretation of characteristics of coefficients in multiple regression, Master's thesis, Chungnam National University, pp. 44 (in Korean).
  11. Kong, J. Y., Kang, H. N. and Chun, B. S. (2010), Characteristics of unconfined compressive strength and flow in controlled low-strength materials made with coal ash, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol. 26, No. 1, pp. 75~83 (in Korean).
  12. Lee, J. G., Chang, B. S., Kim, Y. S., Suk, J. W. and Moon, J. S. (2013), Risk assessment for large-scale slopes using multiple regression analysis, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol. 29, No. 11, pp. 99~106 (in Korean).
  13. Yoon, G. L., Kim, B. T. and Jeon, S. S. (2004), Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 6, pp. 1213~1221.
  14. Yoon, S. W. and Rho, J. S. (2004), Preparation and application of CSA expansive additives using industrial wastes, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 3, pp. 369~374 (in Korean).