

## C.S.G 재료의 일축압축강도에 미치는 영향인자

### The Factors Affecting the Unconfined Compressive Strength of C.S.G Materials

김 기 영<sup>1</sup> Kim, Ki-Young

#### Abstract

C.S.G is a material made by adding cement and water to rock-like material such as riverbed gravel or excavation muck that can be obtained easily near dam site. Recently, the use of C.S.G is gradually increasing as the construction material for dam, road, revetment and so on. Commonly, the strength characteristics of C.S.G is affected by various influence factors such as grade, unit cement, age and water contents. In this study, a series of compaction test and unconfined compressive strength test were performed to investigate the relationship between a strength and influence factors such as three kinds of gradation, age, unit cement and water contents with riverbed gravel in Hwa Buk dam. The results show that strength properties of C.S.G is variously affected by these influence factors. Especially, gradation and water contents are found to be very important factors for determining the strength of C.S.G material. And, from the results of experimental study, the correlation equations between uncompressive strength and these factors are proposed.

#### 요 지

C.S.G(Cemented Sand and Gravel) 재료는 댐 수몰지로부터 쉽게 얻을 수 있는 굴착토와 하상자갈에 소량의 시멘트와 물을 혼합한 재료를 총칭하는 것으로 최근 댐, 도로, 호안등의 건설재료로 그 활용성이 점차 증가하고 있다. 통상적으로 C.S.G 재료의 강도특성은 입도분포, 단위시멘트량, 재령, 그리고 함수비 등과 같은 여러 가지 요소에 의하여 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 화북댐 유역의 하상자갈을 3가지 종류의 입도분포로 재구성하여 재령, 단위시멘트량 그리고 함수비의 혼합 비율에 따른 일축압축강도의 변화를 연구하였다. 실험결과 C.S.G 재료의 일축압축강도는 상기 영향 인자들에 의하여 다양하게 영향을 받았으며, 특히 입도분포와 단위수량은 C.S.G 재료의 강도를 결정하는데 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다. 또한 이러한 실험적 결과를 토대로 각 영향인자를 고려한 강도 예측식을 제안함으로써 설계 및 시공에 필요한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

**Keywords** : Compaction test, C.S.G (Cemented Sand and Gravel), Gradation, Unconfined compression test, Water content

#### 1. 서 론

C.S.G 는 댐 건설현장에서 발생한 하상자갈, 굴착토 그리고 발파암 등을 소량의 시멘트와 혼합한 재료를 총

칭하며 C.S.G 공법은 이 재료를 간이 플랜트 또는 백호우를 이용하여 혼합하고 부설 및 포설과정 그리고 진동로울러를 활용한 다짐공정을 통해 댐이나 기타 성토구조물을 연속적으로 축조해 나가는 공법을 의미한다.

<sup>1</sup> 정회원, 한국수자원공사 댐기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, DSRC/KIWE, kky0606@kowaco.or.kr)

이 공법은 댐 축조재료원에 대한 선택의 폭을 넓히고 수물 자원을 재활용할 수 있다는 점에서 경제성과 환경성 측면에서 매우 유리한 공법이다. C.S.G 공법의 일반적인 최대골재치수는 대략 150mm 이하로 기존의 댐 축조공법인 RCD, RCC 공법에 비하여 재료선택의 폭이 상대적으로 넓고 입도조정 및 석산 개발에 필요한 기타 부대시설물의 설치를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 다만 전자의 2가지 공법이 C.S.G 공법에 비하여 입도기준에 대한 시방기준을 제시하고 있어 품질관리에 대한 신뢰성이 상대적으로 높은 반면 C.S.G 공법은 현지 발생재료를 최소한의 선별을 통해 그대로 활용하는 만큼 현장 모래의 특성에 따라 그 역학적 특성 및 품질변동의 폭이 상대적으로 커질 수 있다. 문헌상에 나타난 C.S.G 재료는 단위시멘트량, 재령, 입도분포, 함수비 그리고 입도형상 등 다양한 요인에 의하여 강도특성이 달라지는 것으로 보고되고 있다. Tashio. H et al.(2003)은 C.S.G 재료의 입도분포에 따른 강도특성 연구를 발표한 바 있으며, Okuyama. Y et al.(2003)은 지반구조물의 지진 안정성 검토 시 역질 재료의 입자크기에 따른 전단특성을 검토한 바 있다. 또한 Watanabe K. and Tateyama M. (2003)은 대형삼축압축시험을 통한 C.S.G 재료의 전단 특성 연구에서 건조단위중량에 따른 전단강도의 변화를 고찰한 바 있으며, 김기영, 박한규(2005)는 탐진댐 하상재료를 활용한 C.S.G 재료의 강도특성 연구에서 일축 압축시험과 대형삼축시험을 통하여 단위시멘트량과 재령별 변화에 따른 응력-변형특성을 검토한 바 있다. 이 밖에 Mostafa A. I. et al.(2002)은 시멘트 혼합 모래의 전단거동시 시멘트 종류에 따른 영향성을 검토한 바 있으며, Huang. J. T and Airey D. W(1998)은 시멘트 혼합 모래에 대한 강도특성 연구를 실시한 바 있다. 본 연구에서는 C.S.G 재료의 일축압축강도 발현에 미치는 영향인자를 규명하기 위하여 화북댐 수물지역의 하상재료를

3가지 입도로 재조성하여 다짐시험을 실시하였으며, 단위 시멘트량, 재령, 입도분포, 그리고 함수비의 변화에 따른 일축압축 강도특성을 파악하고 이 결과를 토대로 각 영향인자를 고려한 강도 추정식을 제안하고자 한다.

## 2. 실내시험

### 2.1 시료채취 및 선별

실내시험에 사용된 재료는 경상북도 군위군 고로면에 위치한 화북댐 건설현장지내의 하상재료로써 이 지역의 하상재료는 부존량이 상당히 풍부하고 골재의 입도분포가 매우 양호하며 비교적 건천 상태로 유지되고 있을 뿐 아니라 댐 건설현장지내에 산재하고 있어 재료 운반에도 매우 유리한 조건을 갖추고 있다. 시료채취는 아래 그림 1, 2와 같이 댐 현장내의 가배수로 터널공사가 진행 중인 하상지역에서 백호우와 간이 선별기[사진 1]를 이용하여 40~25, 20~10m 10~4.76m 그리고 4.76mm 이하로 선별 분리하여 채취하였다.

### 2.2 기본물성시험

그림 3은 현장 자연입도 및 시험입도에 대한 체분석 결과를 함께 도시한 것으로 현장 자연입도의 경우 150mm 이상 되는 시료는 전체 중량대비 약 5-25% 범위 내에 있어 C.S.G 공법의 재료원으로 활용하기에 적절하며, 통일 분류법상 GW 및 GP에 해당하는 입도 상태로 확인되었다. 실내시험에 사용된 시험입도는 다짐 및 강도시험 장치의 제약으로 최대입경을 40mm 이하로 제한하였으며, 이를 하한, 중간, 상한 3가지 입도분포로 재구성하여 실내시험을 실시하였다. 시험입도는 통일 분류법상 하한입도의 경우 GP, 중간입도는 GW에 해당하며,

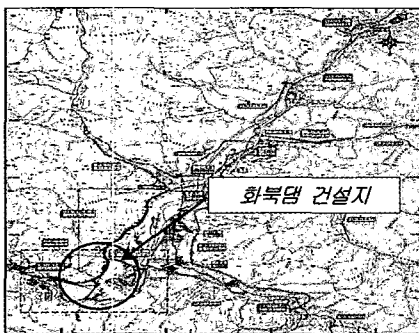


그림 1. 화북댐 위치도



그림 2. 시료채취장소

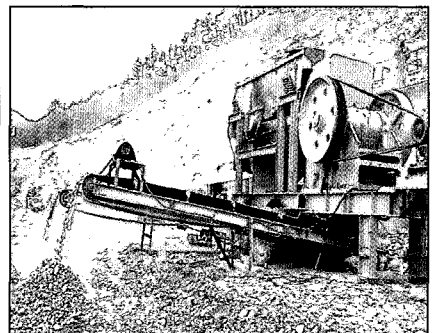


사진 1. 시료선별작업

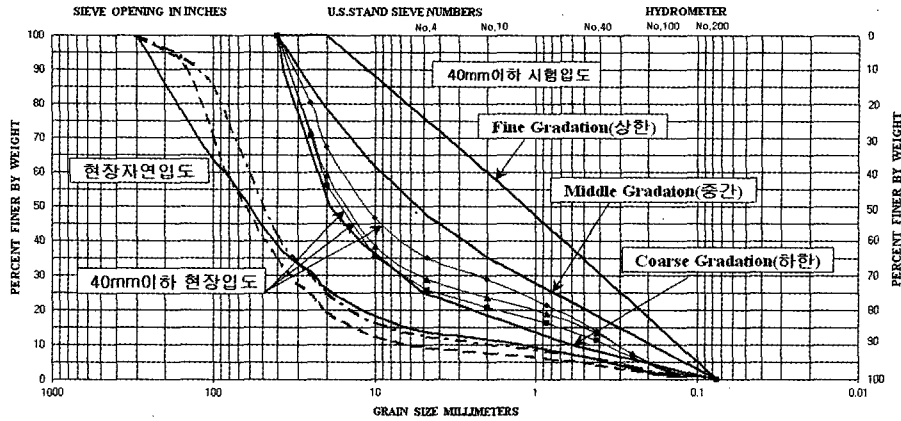


그림 3. 현장자연입도 및 40mm이하 시험입도

표 1. 현장입도 및 시험입도의 기본물성

입도	항목	G <sub>s</sub>	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>g</sub>	USCS
	현장자연입도	2.67~2.69	1.4~6.4	24~34	60~84	13~46.6	2.1~8.0	GW, GP
40mm 이하 시험입도	하한	2.680	0.6	7.0	22	37	3.7	GP
	중간	2.683	0.18	1.3	9	50	1.04	GW
	상한	2.684	0.14	0.4	2	14	0.57	SP

상대적으로 세립분이 많은 상한입도는 SP로 판명되었다. 각 입도별 기본 물성치는 아래 표 1과 같다.

### 2.3 시험방법

#### 2.3.1 다짐시험

다짐시험은 C.S.G 재료의 다짐특성 뿐만이 아니라 후 절에서 언급할 강도시험의 표준공시체 제작에 필요한 단위재료량을 결정하기 위한 선행시험으로 먼저 단위 시멘트량을 몇 가지로 변화시켜 각 단위시멘트별 최적 함수비와 최대 건조단위중량을 도출하고 삼상관계로부터 간극비, 간극률, 공기량, 수량 및 골재량을 산정함으로써 각 단위시멘트량에 대한 기본적인 단위재료량을 확정하게 된다. 현재 국내의 경우 C.S.G 공법에 대한 연구가 전무한 만큼 이에 대한 정확한 다짐시험 방법은 제시되어 있지 않다. 다만 본 연구에서는 최대 허용입경을 37.5mm로 제한하고 있는[KSF 2319] 수정 E 다짐방법을 채택하였다. 일본의 경우 문헌상에 나타난 C.S.G 재료의 배합설계에 적용되는 다짐시험 방법은[JSF T 711-1990]기준이며, 이 기준은 국내 다짐시험기준과 동일하다. 미국 역시 C.S.G 재료에 대한 다짐기준이 제시되어 있지 않지만 본 공법과 유사한 RCC(Roller Com-

pacted Concrete)공법의 경우 배합설계에 사용되는 다짐 기준을 표준다짐[ASTM D 698]과 수정다짐[ASTM D 1557]으로 규정하고 있다.

#### 2.3.2 일축압축시험

단위 시멘트량에 대한 각 입도별 재료량을 산정하기 위하여 다짐시험에서 구해진 최적함수비와 최대건조단위중량을 토대로 간극비, 간극률, 공기량, 수량 및 골재량을 결정한다. 공시체 제작은 [ASTM C 1435]에서 규정하고 있는 Hilti Vibrating 방법을[사진 3]을 채택하였다. 먼저 결정된 단위재료를 혼합하기 위하여 사진 2와 같은 간이식 믹서기를 사용하여 1 분간의 예비 혼합을 실시하고 가수한 후 3분간의 재 혼합을 실시한다. 재료 혼합 후 직경 15cm, 높이 30cm의 일반적인 콘크리트 몰드에 C.S.G 재료를 투입하고 재료분리가 발생하지 않도록 3 층으로 나누어 진동다짐을 실시하며 진동시간은 각 층당 1 분으로 하였다. 시료 성형 후 20℃ 항온실에서 양생기간을 거쳐 재령 3, 7, 28일에서의 일축강도를 측정하였으며, 각 재령별로 3개의 시료를 한 조로 구성하였다. 일축강도시험시 재하장치의 최대 재하능력은 75ton이며, 재하속도는 1mm/min로 시행하였다.

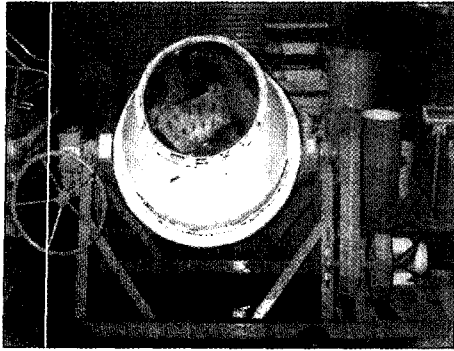


사진 2. 간이식 믹서기

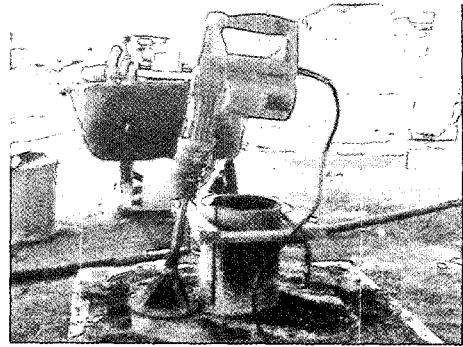


사진 3. Hilti 진동다짐기

표 2. 다짐시험결과

입도	하한입도 (Coarse)		중간입도 (Middle)		상한입도 (Fine)	
	O.M.C (%)	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	O.M.C (%)	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	O.M.C (%)	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )
시멘트 (kg/m <sup>3</sup> )						
0	7.0	2.11	6.5	2.12	8.0	2.0
60	7.0	2.13	6.4	2.13	8.0	2.02
80	6.5	2.15	7.0	2.14	8.5	2.05
100	7.0	2.18	7.5	2.16	8.5	2.06

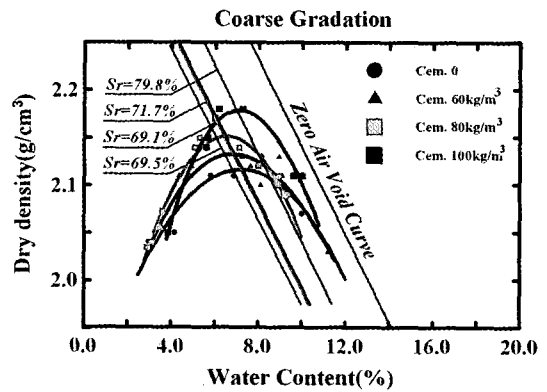


그림 4. 하한입도 다짐곡선

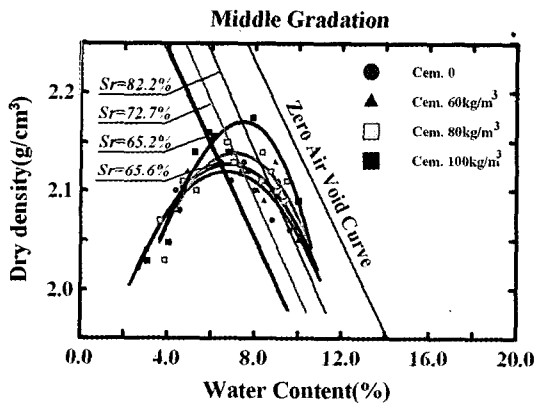


그림 5. 중간입도 다짐곡선

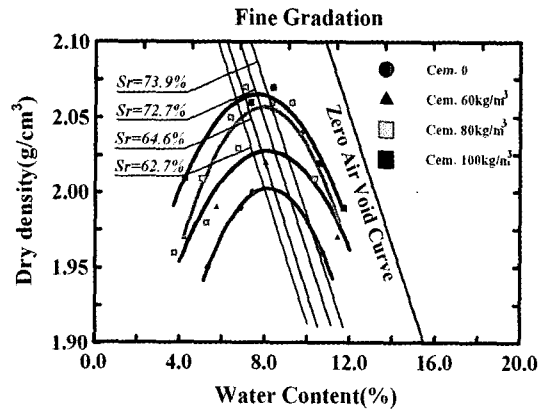


그림 6. 상한입도 다짐곡선

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 다짐시험결과

시멘트량을 60, 80, 100kg/m<sup>3</sup>으로 달리하여 수정 E다짐[KSF 2319]방법으로 실시한 다짐시험결과는 표 2 및 그림 4, 5, 6과 같다. 시멘트를 첨가하지 않은 하한입도의 경우 최적함수비는 대략 7%, 최대 건조단위중량은 2.11g/cm<sup>3</sup>로 나타났으며, 단위시멘트량이 증가함에 따

라 최대건조단위중량은 2.13~2.18g/cm<sup>3</sup>으로 조금씩 증가하였다. 그러나 최적함수비는 6.5%~7%로 시멘트를 첨가하지 않았을 때와 거의 비슷한 범위로 나타났다. 중간입도의 경우 최적함수비는 6.4~7.5%로 하한입도와 거의 비슷한 범위를 나타내었으며, 최대건조단위중량은 시멘트 미첨가시와 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>에서 하한입도 이상으로 나타났으나 단위시멘트량이 80kg/m<sup>3</sup> 이상에서는 하한입도보다 작아지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 하한입도의 경우 조립질이 상대적으로 많이 분

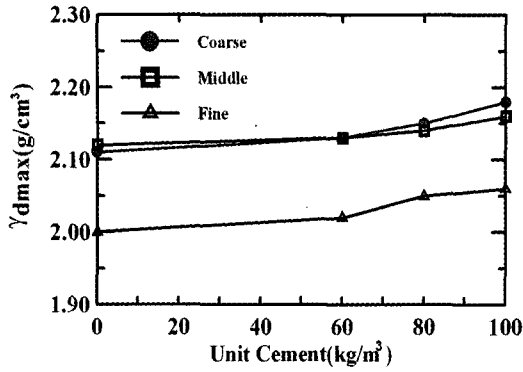


그림 7. 단위시멘트량 - 최대건조단위중량

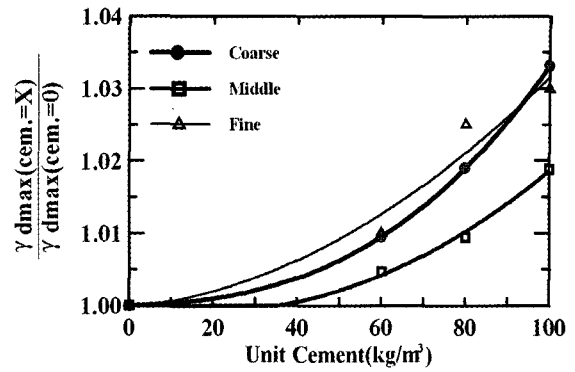


그림 8. 단위시멘트량 - 최대건조단위중량증가율

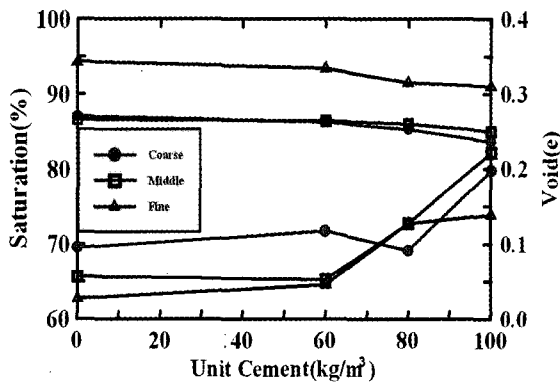


그림 9. 단위시멘트량 - 포화도

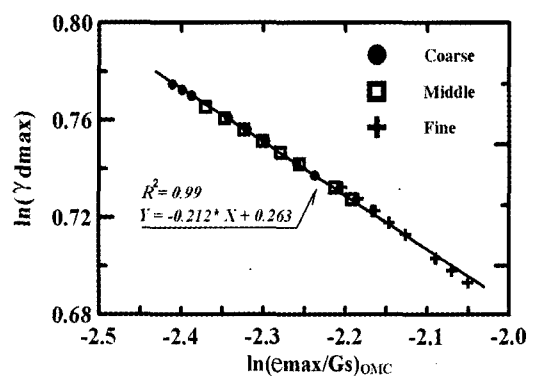


그림 10.  $(\epsilon_{max}/G_s)_{OMC}$  - 최대건조단위중량

포하고 있어 입자 상호간의 간극이 넓고 다짐성이 불량하지만 단위시멘트량이 늘어남에 따라 시멘트가 간극의 채움재 역할을 어느 정도 수행함으로써 중간입도에 비하여 단위중량이 증가하기 때문으로 판단된다. 상한 입도의 경우 최적함수비는 8~8.5%로 하한, 중간입도보다 약간 크게 나타났으며, 최대건조단위중량은 상대적으로 작게 나타났다. 전반적으로 입도분포에 상관없이 단위시멘트량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 증가하지만 단위시멘트량이 최적함수비에 미치는 상관성은 명확하지 않다.

이러한 경향은 그림 7, 8에서도 알 수 있다. 3가지 입도분포 모두 시멘트량이 증가함에 따라 건조단위중량은 증가하는 것을 알 수 있으며, 중간입도의 경우 시멘트 첨가에 따른 단위중량의 증가율이 최대 2% 미만으로 나타난 반면 상한입도와 하한입도의 경우엔 3~3.5%로 시멘트증가에 따른 단위중량의 증가율이 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 결과는 중간입도의 경우 3가지 입도 중 입도분포가 가장 양호하여 시멘트 첨가에 따른 단위중량 증가율이 비교적 작지만 하한입도와 상한입도의 경우 각각 조립분과 세립분이 상대적으로

많아 시멘트 미첨가시 다짐성이 불량하고 시멘트량이 증가함에 따라 시멘트가 다짐증가 효과에 어느 정도 기여하기 때문으로 판단된다. 그림 9는 각 입도분포별 단위시멘트량과 포화도, 단위시멘트량과 간극비의 관계를 함께 도시한 것으로 단위시멘트량이 증가함에 따라 포화도는 증가하는 반면 간극비는 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 10은 다짐시험에서의 각 입도분포별 최대건조단위중량과 이때의  $(\epsilon_{max}/G_s)_{OMC}$ 와의 관계를 도시한 것으로 입도분포에 상관없이 거의 일직선상에 분포하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 일축압축시험결과

#### 3.2.1 단위시멘트량-재령-일축압축강도

표 3은 단위시멘트량과 재령에 대한 일축압축강도 시험결과를 요약한 것으로 그림 11, 12, 13은 각 입도분포별 단위시멘트량과 일축압축강도와의 관계를 그림 14, 15, 16은 재령에 따른 일축압축강도의 증가율을 도시한 것이다. 먼저 3가지 입도 모두에서 동일한 재령을 기준으로 단위시멘트량이 증가함에 따라 일축압축강도는

표 3. 입도분포에 따른 일축압축강도

[단위:kg/cm<sup>2</sup>]

입도 재령	시멘트량	일축압축강도								
		60(kg/m <sup>3</sup> )		80(kg/m <sup>3</sup> )		100(kg/m <sup>3</sup> )				
Coarse	3일	No.141	13.0	12.7	No.144	30	33.7	No.147	50	53.7
		142	11.0		145	35		148	56	
		143	14.0		146	36		149	56	
	7일	No.59	15.7	16.1	No.66	-	45.7	No.69	73	73
		60	17.4		67	44.2		70	72.1	
		61	15.4		68	47.3		71	74	
	28일	No.105	24.4(2.11*)	22.4	No.108	64.4(2.13*)	62.7	No.111	92.0(2.16*)	92.5
		106	22.0(2.10*)		109	61.0(2.13*)		112	95.0(2.15*)	
		107	21.0(2.10*)		110	63.0(2.14*)		113	90.6(2.16*)	
Middle	3일	No.1	16.3	15.8	No.19	25.4	26.5	No.32	34.1	35.9
		2	14.3		20	26.2		33	36.5	
		3	16.9		21	27.9		34	37.0	
	7일	4	27.0	27.3	22	32.8	35.2	35	-	60.4
		5	27.0		23	36.4		36	56.4	
		6	27.8		24	36.4		37	64.3	
	28일	7	33.2(2.10*)	31.2	25	59.6(2.13*)	57.6	38	77.1(2.14*)	77.1
		8	30.0(2.10*)		26	52.4(2.12*)		39	82.0(2.14*)	
		9	30.3(2.09*)		27	60.7(1.13*)		40	72.1(2.15*)	
Fine	3일	No.150	13.5	12.8	No.153	20	21.6	No.156	27	28.3
		151	13.0		154	22		157	30	
		152	12.1		155	23		158	28	
	7일	No.84	17.1	16.7	No.87	24.4	25.3	No.90	27.3	30.7
		85	15.4		88	25.8		91	32.1	
		86	17.7		89	25.7		92	32.7	
	28일	No.114	23.8(2.01*)	23.3	No.117	33.1(2.04*)	35.3	No.120	38.0(2.06*)	42.6
		115	21.5(2.0*)		118	36.5(2.06*)		121	44.8(2.07*)	
		116	24.7(2.02*)		119	36.4(2.05*)		122	45.0(2.08*)	

( \* ) : 공시체의 건조단위중량(g/cm<sup>3</sup>)

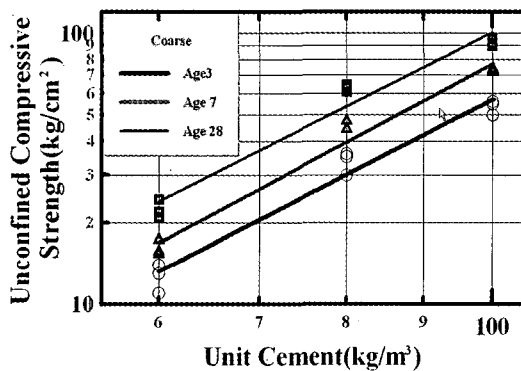


그림 11. 단위시멘트량 - 일축압축강도(하한)

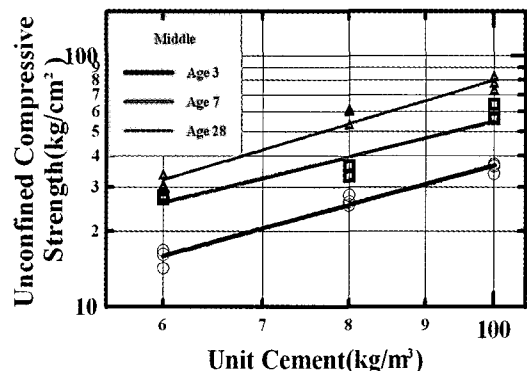


그림 12. 단위시멘트량 - 일축압축강도(중간)

비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 모든 단위시멘트량에서 재령이 증가함에 따라 일축압축강도 증가율은 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 하한입도의 경우 모든 단위 시멘트량에서 재령 28일에 대한 재령

3일의 강도 발현율은 평균 60% 이하이며 재령 7일에서의 강도 발현율은 대략 75% 수준으로 나타났다. 중간입도와 상한입도 역시 하한입도와 비슷한 강도 발현율을 보였다. 콘크리트의 경우 통상적으로 재령 7일 강도가

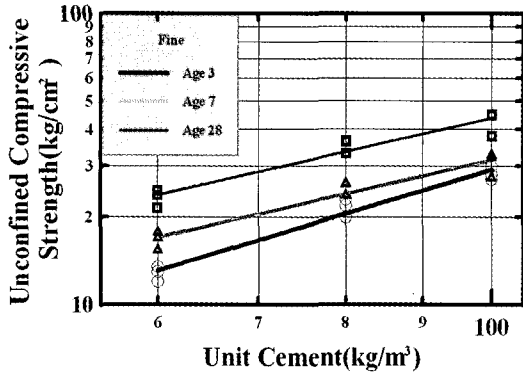


그림 13. 단위시멘트량-일축압축강도(상한)

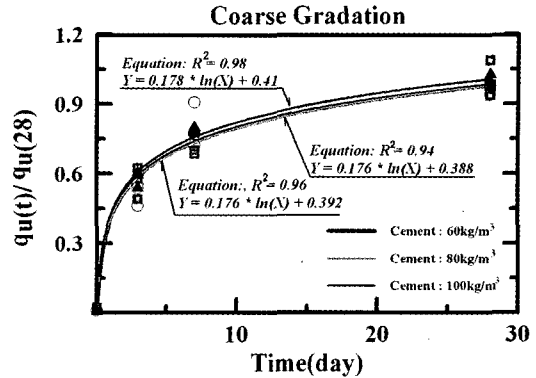


그림 14. 재령 - 일축압축강도비(하한)

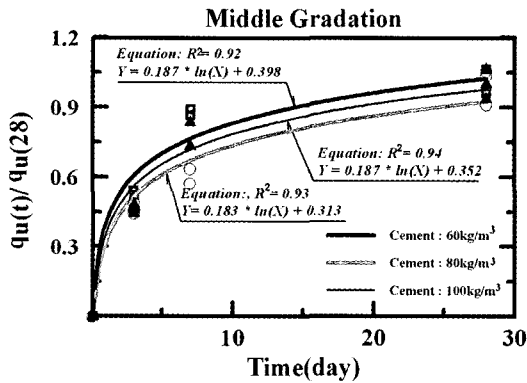


그림 15. 재령 - 일축압축강도비(중간)

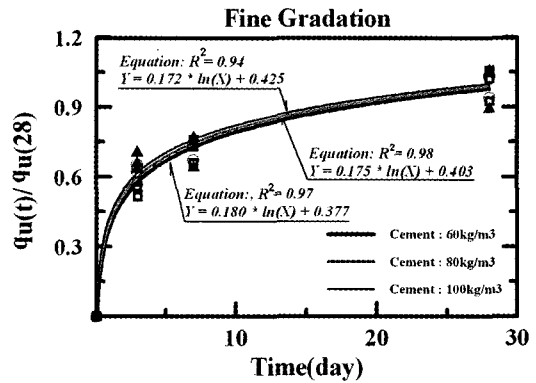


그림 16. 재령 - 일축압축강도비(상한)

표 4. 입도분포별 단위시멘트량-일축압축강도-재령과의 상관식

입도	상관식 단위시멘트량(x) - 일축압축강도(y)	R <sup>2</sup>	재령(x) - 재령별 일축압축강도(qu(t))	R <sup>2</sup>
하한입도	재령 3일: $\ln(y) = 2.86\ln(x) - 9.13$	0.96	60kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.176\ln(x) + 0.392)$	0.96
	재령 7일: $\ln(y) = 2.98\ln(x) - 9.37$	0.98	80kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.176\ln(x) + 0.388)$	0.94
	재령 28일: $\ln(y) = 2.80\ln(x) - 8.32$	0.96	100kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.178\ln(x) + 0.410)$	0.98
중간입도	재령 3일: $\ln(y) = 1.61\ln(x) - 3.83$	0.97	60kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.187\ln(x) + 0.398)$	0.92
	재령 7일: $\ln(y) = 1.45\ln(x) - 2.70$	0.90	80kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.183\ln(x) + 0.313)$	0.93
	재령 28일: $\ln(y) = 1.78\ln(x) - 3.85$	0.96	100kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.187\ln(x) + 0.352)$	0.94
상한입도	재령 3일: $\ln(y) = 1.56\ln(x) - 3.83$	0.96	60kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.180\ln(x) + 0.377)$	0.97
	재령 7일: $\ln(y) = 1.19\ln(x) - 2.07$	0.92	80kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.175\ln(x) + 0.403)$	0.98
	재령 28일: $\ln(y) = 1.18\ln(x) - 1.68$	0.92	100kg/m <sup>3</sup> : $q_u(t) = q_{u(28)} * (0.172\ln(x) + 0.425)$	0.94

28일 강도에 약 70% 인 점을 감안한다면 소량의 시멘트로 재령에 의한 C.S.G 재료의 강도 발현율이 매우 높음을 알 수 있다. 김기영, 박한규(2005)는 탐진댐 하상재료를 이용한 강도특성 연구에서 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup>에서 재령 28일 대비 재령 3일 강도비는 41%, 7일 강도비는 약 61%로 보고한바 있어 본 연구보다 약간 낮은 강도증가율을 나타내었다. 이러한 원인은 탐진댐 하상재료의 경우 본 논문의 화북댐 시료에 비하여 세립분이 상대적으로 많이 함유되어 있어 동일한 시멘트량을 기준으로 볼 때 강도발현 정도가 작은 것으로 판단된다.

본 연구의 경우 모든 단위 시멘트량에서 재령 7일을 기점으로 강도증가율은 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 이 결과를 바탕으로 단위시멘트량과 일축압축강도 그리고 재령과 강도증가율에 대한 상관식을 표 4와 같이 제안하였다. 이때 각 인자별 상관계수는 최소 0.84 이상으로 나타났다.

### 3.2.2 건조단위중량-일축압축강도

그림 17은 표 3중 O.M.C로 다져진 3가지 입도에 대한 재령 28일 공시체의  $\ln(\gamma_{dmax})$ 과  $(e_{max}/G_s)$ 와의 상관

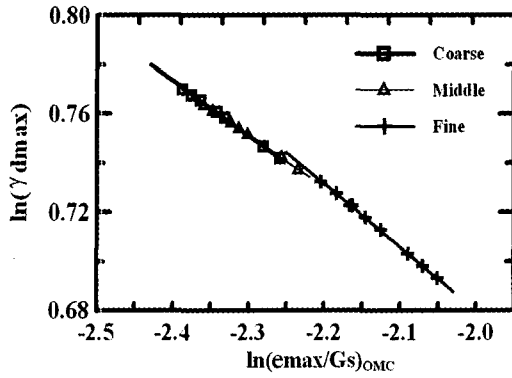


그림 17.  $\gamma_{dmax}$  -  $(e_{max}/G_s)_{O.M.C}$ 의 관계

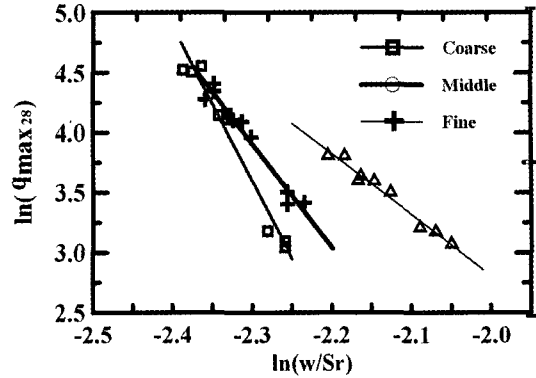


그림 18.  $(w/S_r) - (q_{max28})$ 의 관계

표 5. 입도분포별 강도예측 상수

입도	상수	$\ln(q_{max28})$ & $\ln(w/S_r)$			$\ln(\gamma_{dmax})$ & $\ln(e_{max}/G_s)_{O.M.C}$		
		$C_1$	$\alpha_1$	$R^2$	$T_1$	$\beta_1$	$R^2$
하한입도		$1.42 \times 10^{-9}$	-10.41	0.96	1.28	-0.218	0.99
중간입도		$1.05 \times 10^{-7}$	-8.683	0.95	1.31	-0.208	0.99
상한입도		$6.40 \times 10^{-4}$	-5.08	0.97	1.18	-0.256	0.99

관계를 도식한 것으로 이들 상호인자에 대한 관계는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 그림 18은  $\ln(w/S_r)$ 과  $\ln(q_{max28})$ 의 상관성을 도식한 것으로 이들 관계는 식 (2)로 표현할 수 있으며, 식 (1)의  $(e_{max}/G_s)_{O.M.C}$  항과 식 (2)의  $(w/S_r)_{O.M.C}$ 항은 동일함으로 식 (1)과 식 (2)로부터 건조단위중량을 고려한 강도예측 식을 식 (3)과 같이 제안할 수 있다.

$$\gamma_{dmax} = T_1 \times \left( \frac{e_{max}}{G_s} \right)_{O.M.C}^{\beta_1} \quad (1)$$

$$q_{28max} = C_1 \times \left( \frac{w}{S_r} \right)_{O.M.C}^{\alpha_1} \quad (2)$$

여기서,  $G_s$  : 비중,  $w$  : 함수비,  $S_r$  : 포화도

$$\therefore q_{28max} (kg/cm^2) = C_1 \times \left( \frac{\gamma_{dmax}}{T_1} \right)^{\frac{\alpha_1}{\beta_1}} \quad (3)$$

표 5는 식 (1), (2)에서 얻어진 각 입도분포별 강도예측에 필요한 제반 상수를 요약한 것으로 회귀 분석된 상관계수는 최소 0.95 이상으로 매우 높게 나타났다. 3.1 절의 다짐시험결과 건조단위중량은 동일한 시멘트량을 기준으로 상한, 중간, 하한입도 순으로 점차 증가하였으며, 이에 따라 일축압축강도도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 즉 C.S.G 재료의 단위중량과 일축압축강도는 상호 밀접한 관계가 있으며, 현장시공 시 댐 제체

에 대한 품질관리가 대부분 밀도검층으로 이루어지는 만큼 단위중량을 이용한 강도 예측식은 실무자에게 유용할 것으로 판단된다. Watanabe K. and Tateyama(2003)은 시멘트 혼합 자갈에 대한 실험적 연구에서 일축압축강도는 건조단위중량이 증가함에 따라 커진다고 발표한 바 있으며, Huang J. T. and Airey D. W(1998)도 시멘트 혼합 모래의 강도특성 연구에서 이와 유사한 결과를 발표한 바 있다. 이 밖에 Clough et al.(1990)의 연구, 연암을 대상으로 한 Mathews M. C. and Clayton C. R. I(1993)의 실험연구 그리고 Lama R. D. and Vutukuri V. S(1978)의 경암을 대상으로 한 연구에서도 건조단위중량과 일축압축강도는 서로 비례하는 것으로 보고되고 있어 본 연구결과와도 같은 경향을 보였다.

### 3.2.3 입도분포에 따른 일축압축강도

그림 19는 각 입도별 모래(4.76mm 통과시료), 자갈의 비율(S/A)과 일축압축강도와의 상관성을 검토한 것으로 동일한 단위시멘트량일 경우 역질을 가장 많이 포함하고 있는 하한입도의 일축압축강도가 가장 크게 나타났으며, 상대적으로 모래를 가장 많이 함유한 상한입도가 가장 작게 나타났다. 이러한 차이는 단위시멘트량이 증가함에 따라 더욱 분명하게 나타나며, 상관계수 역시 단위시멘트량이 증가할수록 높아진다. 그러나 단위시멘트량이  $60kg/m^3$  이하일 경우 이러한 상관성은 나타나지



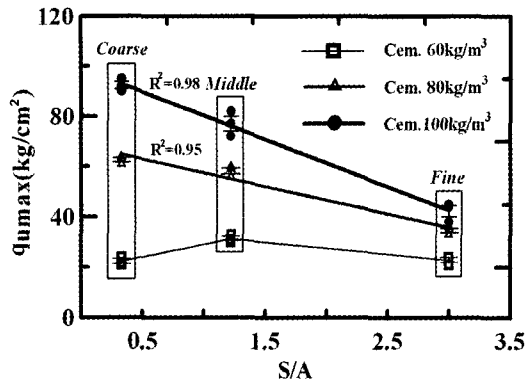


그림 19. 일축압축강도 - S/A의 관계

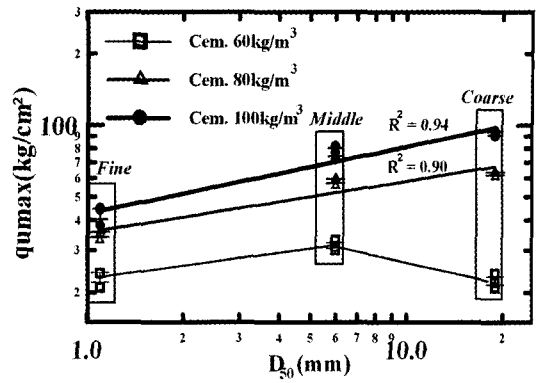


그림 20. 일축압축강도 - D<sub>50</sub>과의 관계

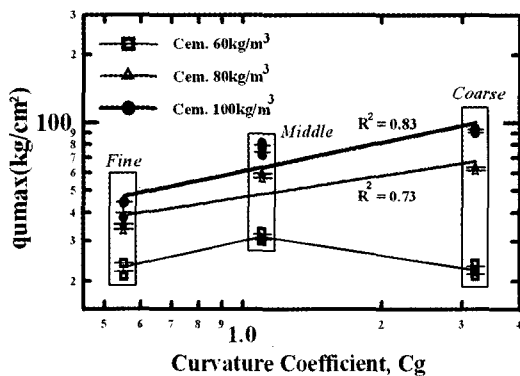


그림 21. 일축압축강도 - C<sub>g</sub>와의 관계

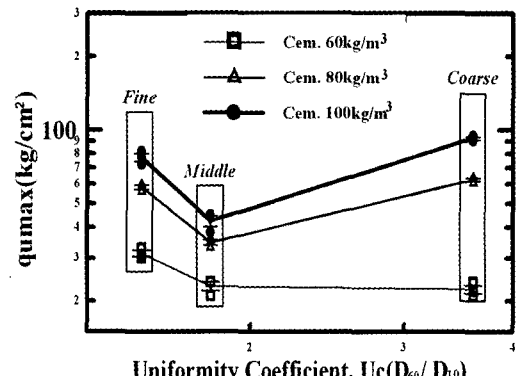


그림 22. 일축압축강도 - U<sub>c</sub>와의 관계

않았다. Tashio H. et al.(2003)은 하상자갈, 굴착원석에 대한 입도분포별 C.S.G 재료특성 연구에서 세립분이 많을수록 일축압축강도는 감소되는 것으로 보고하고 있어 본 연구결과와도 동일한 경향을 보였다. 그림 20은 일축압축강도와 D<sub>50</sub>과의 상관관계를 도시한 것으로 D<sub>50</sub>과 일축압축강도는 단위시멘트량 80kg/m<sup>3</sup> 이상의 범위에서 상호 비례하는 것으로 나타났다. 그림 21은 곡률계수(C<sub>g</sub>)와의 관계를 나타낸 것으로 곡률계수가 증가함에 따라 일축압축강도는 비례하여 증가하였으나 그림 22와 같이 균등계수(U<sub>c</sub>)와는 상호 연관성을 찾을 수 없었다. 전반적으로 단위시멘트량이 80kg/m<sup>3</sup> 이상일 경우 C.S.G 재료는 세립분이 많을수록 강도가 감소하는 경향을 보였으며, 동일한 단위 시멘트량일 경우 S/A, D<sub>50</sub> 그리고 곡률계수 순으로 일축압축강도의 발현에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 그러나 단위시멘트량이 60kg/m<sup>3</sup> 이하에서는 입도분포에 따른 강도변화의 폭이 크지 않음을 알 수 있다.

### 3.3.4 함수비와 일축압축강도

통상적으로 토사의 경우 일축압축강도는 최적함수비

보다 약간 건조측에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 함수비 변화에 따른 C.S.G 재료의 일축압축강도 변화를 살펴보기 위하여 최적함수비를 기준으로 단위수량을 조금씩 가감하여 그 영향을 검토한 결과는 표 6과 같다. 그림 23은 중간입도 재령 28일에서의 함수비 변화에 대한 강도변화 양상을 도시한 것으로 모든 단위시멘트량에서 최적함수비와 거의 비슷한 함수비에서 최대강도가 발생하였다. 단위시멘트량이 작을수록 완만한 곡선 형태를 나타내며, 단위시멘트량이 증가함에 따라 좀 더 볼록한 형태의 곡선을 나타내었다. 즉 단위시멘트량이 작을수록 함수비가 강도에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 그림 24는 하한입도의 시험결과를 도시한 것으로 동일한 양의 단위시멘트량을 기준으로 중간입도에 비하여 작은 양의 함수비 변화로 강도변화의 폭이 크게 변화함을 알 수 있다. 최대강도는 최적함수비보다 약 1.5% 정도 건조측에서 발현하고 있으며, 이를 정점으로 점차 감소하는 현상을 나타내었다.

그림 25는 상한입도에 대한 실험결과로 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup>인 경우 함수비 변화에 따른 강도 변동 폭이 비교적 완만하게 나타났으나 단위시멘트량이 증가함에

표 6. 함수비 변화에 따른 입도분포별 일축압축강도

하한입도												중간입도												상한입도																													
단위시멘트량 60kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 80kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 100kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 60kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 80kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 100kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 60kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 80kg/m <sup>3</sup>				단위시멘트량 100kg/m <sup>3</sup>																					
시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(28)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(28)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(28)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>	시료 No.	함수비 (%)	q <sub>u(7)</sub>																		
No.62	4	13.4	No.81	3.5	18.05	No.75	4	31	No.93	5	26.3	No.25	7	59.6	No.99	5	36	No.123	6	11.3	No.129	6.5	15.5	No.135	6.5	29.6	No.62	4	13.4	No.81	3.5	18.05	No.75	4	31	No.93	5	26.3	No.25	7	59.6	No.99	5	36	No.123	6	11.3	No.129	6.5	15.5	No.135	6.5	29.6
No.63	4	23.7	No.82	3.5	12.35	No.76	4	19.2	No.94	5	23.2	No.26	7	52.4	No.100	5	37	No.124	6	8.9	No.130	6.5	18.6	No.136	6.5	33.3	No.63	4	23.7	No.82	3.5	12.35	No.76	4	19.2	No.94	5	23.2	No.26	7	52.4	No.100	5	37	No.124	6	8.9	No.130	6.5	18.6	No.136	6.5	33.3
No.64	4	12.3	No.83	3.5	15.23	No.77	4	23.6	No.95	5	23.8	No.27	7	60.7	No.101	5	29	No.125	6	13	No.131	6.5	21.4	No.137	6.5	32.4	No.64	4	12.3	No.83	3.5	15.23	No.77	4	23.6	No.95	5	23.8	No.27	7	60.7	No.101	5	29	No.125	6	13	No.131	6.5	21.4	No.137	6.5	32.4
No.56	5.5	31.5	No.78	5	59.01	No.72	5.5	80.9	No.7	6.4	33.2	No.221	5.3	40	No.102	6	58	No.84	8	17.1	No.87	8.5	24.4	No.90	8.5	27.3	No.56	5.5	31.5	No.78	5	59.01	No.72	5.5	80.9	No.7	6.4	33.2	No.221	5.3	40	No.102	6	58	No.84	8	17.1	No.87	8.5	24.4	No.90	8.5	27.3
No.57	5.5	29.9	No.79	5	50	No.73	5.5	72.1	No.8	6.4	30.0	No.222	5.3	38	No.103	6	63	No.85	8	15.4	No.88	8.5	25.8	No.91	8.5	32.1	No.57	5.5	29.9	No.79	5	50	No.73	5.5	72.1	No.8	6.4	30.0	No.222	5.3	38	No.103	6	63	No.85	8	15.4	No.88	8.5	25.8	No.91	8.5	32.1
No.58	5.5	32.71	No.80	5	-	No.74	5.5	87.5	No.9	6.4	30.3	No.223	5.3	35	No.104	6	59	No.86	8	17.7	No.89	8.5	25.7	No.92	8.5	32.7	No.58	5.5	32.71	No.80	5	-	No.74	5.5	87.5	No.9	6.4	30.3	No.223	5.3	35	No.104	6	59	No.86	8	17.7	No.89	8.5	25.7	No.92	8.5	32.7
No.59	7	15.7	No.66	-	-	No.69	7	73	No.96	7.5	28	No.224	9	38	No.38	7.5	77.1	No.126	9.5	8.5	No.132	9.0	14	No.138	9	21	No.59	7	15.7	No.66	-	-	No.69	7	73	No.96	7.5	28	No.224	9	38	No.38	7.5	77.1	No.126	9.5	8.5	No.132	9.0	14	No.138	9	21
No.60	7	17.4	No.67	6.5	44.2	No.70	7	72.1	No.97	7.5	27	No.225	9	35	No.39	7.5	82.0	No.127	9.5	7.4	No.133	9.0	14.5	No.139	9	20	No.60	7	17.4	No.67	6.5	44.2	No.70	7	72.1	No.97	7.5	27	No.225	9	35	No.39	7.5	82.0	No.127	9.5	7.4	No.133	9.0	14.5	No.139	9	20
No.61	7	15.4	No.68	6.5	47.3	No.71	7	74	No.98	7.5	26.4	No.226	9	40	No.40	7.5	72.1	No.128	9.5	8.2	No.134	9.0	15.4	No.140	9	18	No.61	7	15.4	No.68	6.5	47.3	No.71	7	74	No.98	7.5	26.4	No.226	9	40	No.40	7.5	72.1	No.128	9.5	8.2	No.134	9.0	15.4	No.140	9	18
No.230	4.8	27	No.233	4.2	40	No.236	4.8	67	No.200	4.5	22	No.206	6	55	No.212	8.5	64	No.240	7	17	No.243	7.5	30	No.246	7.5	39	No.230	4.8	27	No.233	4.2	40	No.236	4.8	67	No.200	4.5	22	No.206	6	55	No.212	8.5	64	No.240	7	17	No.243	7.5	30	No.246	7.5	39
No.231	4.8	25	No.234	4.2	42	No.237	4.8	63	No.201	4.5	20	No.207	6	50	No.213	8.5	60	No.241	7	15	No.244	7.5	30	No.247	7.5	42	No.231	4.8	25	No.234	4.2	42	No.237	4.8	63	No.201	4.5	20	No.207	6	50	No.213	8.5	60	No.241	7	15	No.244	7.5	30	No.247	7.5	42
No.232	4.8	30	No.235	4.2	45	No.238	4.8	62	No.202	4.5	18	No.208	6	52	No.214	8.5	61	No.242	7	14	No.245	7.5	23	No.248	7.5	38	No.232	4.8	30	No.235	4.2	45	No.238	4.8	62	No.202	4.5	18	No.208	6	52	No.214	8.5	61	No.242	7	14	No.245	7.5	23	No.248	7.5	38
-	-	-	-	-	-	-	-	-	No.203	8.5	15	No.209	8	48	No.215	9	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	No.204	8.5	17	No.210	8	50	No.216	9	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	No.205	8.5	13	No.211	8	44	No.217	9	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

최적함수비 때의 일축압축강도, 단위[kg/cm<sup>2</sup>]

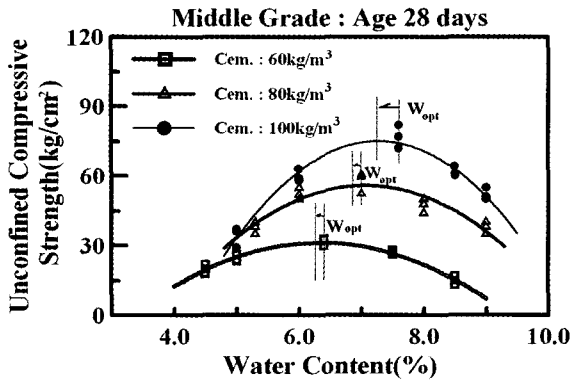


그림 23. 함수비와 일축압축강도(중간입도)

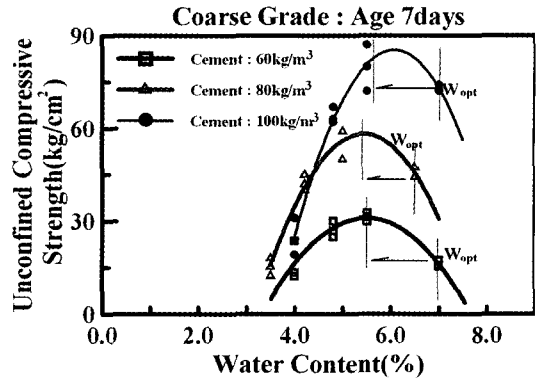


그림 24. 함수비와 일축압축강도(하한입도)

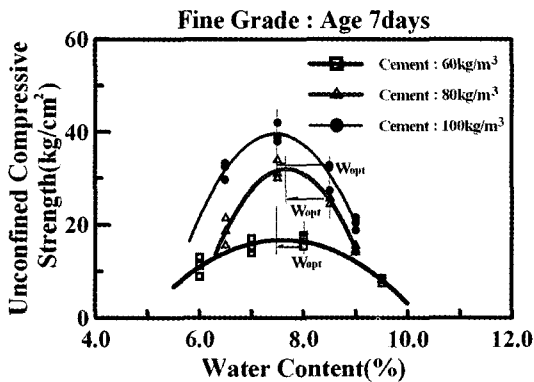


그림 25. 함수비와 일축압축강도(상한입도)

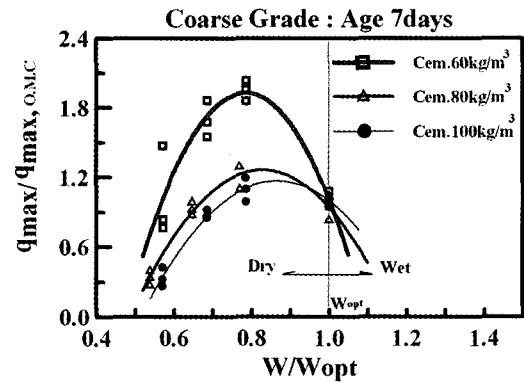


그림 26. 정규화된 함수비와 일축압축강도(하한)

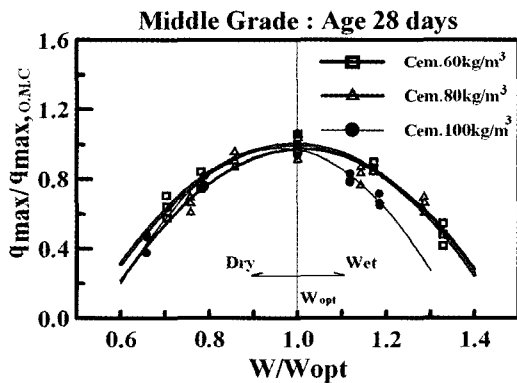


그림 27. 정규화된 함수비와 일축압축강도(중간)

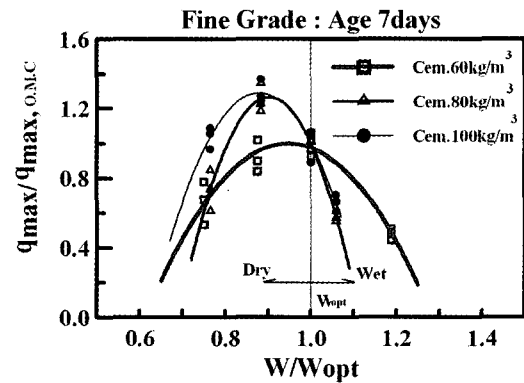


그림 28. 정규화된 함수비와 일축압축강도(상한)

따라 하한입도와 유사한 현상을 나타내었다. 이처럼 중간입도에 비해 하한입도 및 상한입도의 함수비 변화에 따른 강도 변화 양상이 민감한 원인은 하한입도와 상한입도의 경우 중간입도에 비하여 상대적으로 조립분과 세립분이 많이 포함되어 있어 입도분포가 좋지 못하고 표준공시체의 제작을 대부분 진동다짐으로 실시하는 만큼 입도분포가 좋지 않을 경우 재료분리 현상 및 다짐 불량으로 함수비 변화에 따른 일축압축강도의 변화율이 상대적으로 민감해진다고 사료된다. 또한 동일 조건

이라면 세립분이 많고 입도분포가 좋지 않을수록 강도 발현이 작고 함수비 변화에 따른 강도의 변화율도 크게 나타나는 것으로 나타났다. 따라서 C.S.G 공법의 시공 시 실내 다짐도와 설계기준 강도를 동시에 만족할 수 있는 단위수량의 산정이 무엇보다 중요할 것으로 판단되며, 특히 하한입도와 같이 조립질을 많이 포함하는 경우 실내다짐시험의 제약으로 명확한 최적함수비를 찾기가 어렵기 때문에 다짐시험과 강도시험을 병행하여 단위수량을 산정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

표 7. 함수비 변화에 따른 입도분포별 강도식

시멘트량	입도	하한입도	중간입도	상한입도
	제안식	60kg/m <sup>3</sup>	$y = -10.37x^2 + 31.3x - 19.93$	$y = -3.41x^2 + 8.89x - 4.48$
	80kg/m <sup>3</sup>	$y = -12.72x^2 + 35.9x - 22.18$	$y = -3.63x^2 + 9.12x - 4.51$	$y = -21.56x^2 + 50.58x - 28.02$
	100kg/m <sup>3</sup>	$y = -9.47x^2 + 16.4x - 5.94$	$y = -3.40x^2 + 8.89x - 4.49$	$y = -13.39x^2 + 34.39x - 19.57$

\* 여기서, x ; W/W<sub>opt</sub>, Y ; Q<sub>max</sub>/Q<sub>max,O.M.C</sub>

그림 26, 27, 28은 함수비를 최적함수비로 그리고 이때의 강도를 최적함수비 때의 강도로 정규화한 것으로 중간입도 재령 28일의 경우 거의 최적함수비 부근에서 최대강도가 발현하고 있음을 알 수 있으며, 함수비가 최적함수비를 기준으로 약 20% 가감되었을 경우 일축압축강도는 약 20% 정도 감소하게 된다. 이러한 경향은 단위 시멘트양에 관계없이 일정하게 나타나고 있다. 하한입도 재령 7일의 경우 최대강도는 최적함수비의 약 15-20% 건조측에서 발현하였으며, 이 때의 강도발현율은 단위시멘트량 80, 100kg/m<sup>3</sup> 일 경우 최적 함수비 때의 약 1.2배 그리고 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup> 인 경우 약 1.8배 가량 크게 나타났다. 또한 최적함수비의 27-45% 가량 건조측일 경우에도 최적함수비와 동일한 수준의 강도 발현율을 보였다. 상한입도의 경우 단위시멘트량이 60kg/m<sup>3</sup> 일 경우엔 최적함수비 부근에서 최대 강도가 나타났으나 단위시멘트량이 증가함에 따라 최적함수비의 약 10% 건조측에서 약 1.2배의 강도발현이 나타났으며, 이 후 단위수량이 감소함에 따라 강도는 점차 작아지며 최적함수비의 약 20-25% 부근에서 최적함수비 때의 강도와 동일한 수준의 강도발현을 나타내었다. 표 7은 함수비 변화에 따른 일축압축강도의 변화율을 상관식으로 제안한 것으로 적용 함수비의 범위는 상기 표 6에서 검토한 범위로 한정한다.

#### 4. 결론

- (1) C.S.G 재료의 다짐시험결과 단위시멘트량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 비례하여 증가하였으며 이러한 경향은 모든 입도분포에서 동일하게 나타났다. 그러나 최적함수비는 입도분포에 관계없이 거의 비슷한 범주의 값을 나타내었다.
- (2) C.S.G 재료의 일축압축강도는 단위시멘트량, 재령에 비례하여 증가하였다. 그러나 동일한 단위 시멘트량과 재령에서도 입도분포의 양상에 따른 일축압축강도의 발현 정도가 상이하게 나타났으며, 특히

단위시멘트량이 증가할수록 입도분포의 변화에 따른 강도 변화의 폭이 상대적으로 크게 나타났다. 그러나 단위시멘트량이 60kg/m<sup>3</sup> 이하에서는 입도분포의 변화에 따른 강도 변화의 폭이 작게 나타났다.

- (3) 상, 중, 하한입도의 다짐시험결과 단위시멘트량이 60kg/m<sup>3</sup> 이하일 경우 최대건조단위중량은 중간입도에서 가장 크게 나타났으나 하한입도의 경우 단위시멘트량이 80kg/m<sup>3</sup>을 초과하면서 중간입도의 단위중량보다 크게 나타났다. 상한입도의 경우 역시 단위시멘트량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 증가하지만 하한, 중간입도에 비하여 상대적으로 낮은 단위중량을 나타내었다.
- (4) 이러한 결과는 일축압축강도에도 영향을 미쳐 단위시멘트량 60kg/m<sup>3</sup> 이하의 경우 상, 중, 하한입도 중 중간입도의 일축압축강도가 가장 크게 나타났으나 그 차이가 크지 않았다. 그러나 단위시멘트량이 증가함에 따라 하한입도에서의 강도가 중간입도와 상한입도보다 크게 나타났으며 그 차이도 비교적 크게 나타났다. 즉 건조단위중량과 일축압축강도는 상호 비례관계에 있으며, 단위시멘트량은 건조단위중량을 증가시키는데 중요한 인자로 판단된다. 또한 이 결과를 이용하여 건조단위중량을 고려한 일축압축강도 예측에 관한 상관식을 제안하였다.
- (5) 입도분포에 따른 일축압축강도의 변화를 좀 더 세분화하여 검토한 결과 입도가 양호한 시료일 경우 S/A가 작을수록, D<sub>50</sub> 과 곡률계수는 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며 균등계수와 일축압축강도는 무관한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 경향은 단위시멘트량이 상대적으로 작은 60kg/m<sup>3</sup> 이하 범위에서는 나타나지 않았다.
- (6) 단위수량 역시 C.S.G 재료의 강도특성에 미치는 매우 중요한 인자로서 중간입도의 경우 최적함수비를 기점으로 단위수량의 가감에 따라 일축압축강도는 일률적으로 감소하는 것으로 나타났다. 즉 최적함수비 부근에서 최대의 강도발현을 나타낸 반면 하

한입도의 경우 단위수량의 변화에 따른 강도변동의 폭이 상대적으로 크게 나타났으며 이러한 현상은 단위시멘트량이 증감함에 따라 더욱 확연하게 나타났다. 최대강도는 최적함수비에서 대략 1.5% 정도 건조측에서 발생되었으며, 상한입도의 경우 역시 최적함수비의 약 1% 건조측에서 최대강도가 나타났다.

- (7) 따라서 현장배합 및 시공시 실내 다짐시험의 다짐도와 설계시의 목표 강도를 동시에 만족할 수 있는 단위수량의 산정이 매우 중요하며 특히, 하한입도와 상한입도의 경우 단위수량의 변화에 따른 강도변화의 폭이 큰 만큼 현장배합시 단위수량의 관리에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다. 아울러 이러한 실험적 결과를 바탕으로 단위수량의 변화에 따른 입도분포별 강도 예측식을 제안함으로써 시공 및 설계에 필요한 기초적 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김기영, 박한규, 전제성 (2005), "Cemented Sand and Gravel 재료의 강도특성", 한국지반공학회 논문집, 제 21권 10호 pp.61-71.
2. 김기영, 박한규 외 2인 (2005), "CSG 재료의 강도특성에 관한연구", 한국지반공학회 학술발표회논문집, pp.619-626.
3. Clough, G. W., Iwabuchi, J., Rad, N. S., and Kuppusamy, T. (1990), "Influence of cementation on liquefaction of sands", ASCE, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
4. Huang, J. T., and Airey, D. W. (1998), "Properties of artificially cemented carbonate sand", ASCE, Vol.124, No.6, pp.492-499.
5. Lama, R. D., and Vutukuri, V. S. (1978), "Handbook on mechanical properties of rocks", Vol.2 Trans Tech, Clansthal, Germany.
6. Matthews, M. C., and Clayton, C. R. I. (1993), "Influence of intact porosity on the engineering properties of a weak rock", Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks, Anagnostopoulos et al., eds. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.1 pp.693-702.
7. Mostafa, A. I., Hackmet, A. J., Wee, H. S., and Mark, F. R. (2002), "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", ASCE, Vol.128, No.6, pp.520-529.
8. Okuyama, Y., Yoshida, T., Tatsuoka, F., Sato, N. and Oie, M. (2003), "Shear banding characteristics of granular materials and partial size effects on the seismic stability of earth structures", Proc. 3rd Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials. Di, B. ed., Lyon, pp.607-616.
9. Toshio, H., Tadahiko, F., Hideaki, K., and Takashi, S. (2003), "Design concept of trapezoid-shaped CSG dam" Roller Compacted Concrete Dams ed., Berga et al., pp.457-464.
10. Watanabe, K., Tateyama, M., Jiang, G. L., Tatsuoka, F., and Lohani, T. N. (2003), "Strength characteristics of cement mixed gravel evaluated by large triaxial compression test", Proc. 3rd Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials. Di, B. ed., Lyon, pp.683-693.

(접수일자 2006. 3. 31, 심사완료일 2006. 10. 16)