

CSG 공법적용을 위한 배합설계기법 Mix design of CSG method

김기영¹⁾, Kim Ki-Young, 전제성²⁾, Jeon Je-Sung 조성은³⁾, Cho Sung-Eun, 이종욱⁴⁾, Lee Jong-Wook

¹⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Safety Research Center KIWE

²⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Safety Research Center KIWE

³⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Safety Research Center KIWE

⁴⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 연구원, Principal Researcher, Dam Safety Research Center KIWE

SYNOPSIS : The CSG(Cemented Sand and Gravel) method is construction technique using as raw materials earth and gravel generated from a local construction site, mixing them with cement and rolling with vibration rollers. Recently, The use of this method for cofferdam and large dam is gradually increasing in Japan. The purpose of an CSG mix design is to develop project specific properties to meet the structure design requirements. But uniform mix design of CSG method has not yet been established. The experience of practitioners from the geotechnical and concrete disciplines has given rise to two general approaches to mix design for CSG. This paper reports the concept of how to set the mix design according to modified Proctor compaction test process and the test results on properties such as compaction, compressive strength and modulus of elasticity that obtained by unconfined compression test.

Keywords : CSG(Cemented sand and Gravel), Mix design, Unconfined compression test, elastic modulus

1. 서론

근대적인 댐 건설은 확실성과 신뢰성으로 인정받은 중력식 콘크리트댐을 필두로 댐체적의 감축을 통해 경비절감을 지향한 중공중력식 콘크리트댐과 아치식 콘크리트댐의 건설로 전개되어왔으며 이후 기계화의 시공에 의한 필댐의 건설이 가속화 되었다. 이 후 월댐과 같은 기계화 시공을 지향한 콘크리트댐의 시공방법이 검토되면서 선진외국에서는 RCC, RCD 공법을 이용한 댐축조술이 널리 보급되고 있는 실정이다. 그러나 최근 자연환경 보호에 대한 국민의식의 향상과 댐 건설에 따른 지역주민과 환경단체와의 마찰은 신규댐의 건설을 더욱 어렵게 만들고 있는 것이 현실이며, 따라서 시공성 뿐만이 아니라 환경을 배려한 댐 축조공법의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 시작된 축조공법이 CSG 공법이다. 이 공법은 댐 건설 현장으로부터 손쉽게 얻을 수 있는 하상자갈과 굴착토를 물, 시멘트와 함께 혼합한 후 진동로울러를 이용하여 댐을 축조해 나가는 공법으로 최근 국내에서는 화북댐 건설공사에 하상자갈을 본 댐 축조재료로 활용하는 CFGD 형식의 댐 축조공법이 처음으로 도입되어 현재 시공이 진행 중에 있으나 CSG 재료를 이용한 댐체 시공은 국내의 경우 전무한 실정이다. CSG 재료를 이용한 댐 축조술의 가장 큰 장점은 하상 및 굴착된 토사를 인위적인 입도조절을 거치지 않고 그대로 이용하는데 있으며, 불가피할 경우 최소한의 선별작업을 통해 성토함으로써 기존의 댐 축조시 필요한 채석장 개발과 플랜트 건설에 투입되는 제반경비를 줄일 수 있다는 점 그리고 체제 단면의 축소와 연속적인 타설을 통한 시공기간의 단축 등을 들 수 있다. 이 연구의 주된 목적은 CSG 재료를 이용한 댐축조 설계시 필수적인 배합설계 방법과 절차 그리고 관련 실내시험을 소개하고 화북댐 건설지내의 하상재료를 대상으로 실내시험을 통한 배합설계와 역학적 특성을

고찰함으로써 CSG 공법설계에 필요한 기초적인 자료를 제공하는데 있다.

2. CSG 공법의 배합설계 개요

2.1 배합설계방법

배합설계의 목적은 댐체 및 기초저부의 축조재료로 사용한 CSG 재료가 허용설계 기준강도를 만족하는 가장 경제적이고 합리적인 단위 재료량을 산정하는데 있다. 현재까지 CSG 공법설계에 대한 배합설계 방법은 명확하게 제시되어 있지 않지만 문헌을 통해 검토한 결과 크게 다짐시험을 활용한 토질역학적인 방법과 전통적인 콘크리트 배합설계방법으로 구분할 수 있다. CSG 공법은 소량의 시멘트를 하상재료와 함께 혼합한 후 진동로울러를 이용하여 댐을 성토해 가는 공법으로 성토초기에는 일반적인 토사와 같은 다짐 및 강도특성을 나타내지만 재령에 비례하여 강도증가를 나타내는 복합적인 재료특성을 나타낸다. 아래 표 1은 두 가지 개념의 배합설계 방법과 그 순서를 도시한 것이며, 본 연구에서는 이 중 다짐이론 개념에 기초하여 배합설계를 실시하였다.

<i>Soil Compaction Method</i>	<i>Concrete Mix Design(RCD공법 기준)</i>
<i>Step 1</i> : 설계기준강도 및 필요조건설정	<i>Step 1</i> : 설계기준강도 및 필요조건설정
<i>Step 2</i> : 기본물성 및 입도시험실시	<i>Step 2</i> : 기본물성시험실시
<i>Step 3</i> : 단위시멘트량 가정	<i>Step 3</i> : 최대골재별 단위수량 및 공기량추정
<i>Step 4</i> : 골재의 용적계산	<i>Step 4</i> : 압축강도에 따른 시멘트량 계산
<i>Step 5</i> : 다짐시험을 위한 단위재료량산정	<i>Step 5</i> : 굵은골재 비율계산
<i>Step 6</i> : 다짐시험실시	<i>Step 6</i> : 잔골재 양의 결정
<i>Step 7</i> : 간극비, 공기량, 수량 및 골재량산정	<i>Step 7</i> : 배합성분의 절대용적 및 부피산정
<i>Step 8</i> : 단위체적(m ³)당 재료량산정	<i>Step 8</i> : 모르타르양 계산
<i>Step 9</i> : 표준공시체제작	<i>Step 9</i> : 페이스트 부피계산
<i>Step 10</i> : 강도시험(일축,인장,삼축)	<i>Step 10</i> : 시험배치를 통한 강도측정
<i>Step 11</i> : 적정단위시멘트량 결정	
<i>Step 12</i> : 시험배합 및 강도확인	

(a) Soil Compaction 방법

(b) 콘크리트 배합설계방법

표 1. 배합설계방법

2.2 실내시험

배합설계에 필요한 실내시험 항목은 관련 대상구조물 및 시방기준에 따라 달라질 수 있으며 본 연구에서는 댐 축조시 배합설계에 필요한 실내시험 항목만을 소개하고자 한다.

2.2.1 재료선별

CSG 공법에 사용되는 재료는 현장에서 얻어지는 하상재료를 그대로 사용하는 것을 대 전제로 하며 이것이 불가할 경우 최소한의 선별작업과 입도조정을 통해 시멘트와 혼합하고 축조하는 공법으로 그 재료적 특성이 다양하고 입도분포의 범위가 상당히 넓다. 일본의 경우 댐 축조에 사용되는 최대골재치수는 대략 150mm 이하이며 Skelton 버킷을 탑재한 백호우를 이용하여 현장에서 1차 스크린 작업을 한 후 백호우나 간이식 혼합장치를 이용하여 현장에서 시멘트와 혼합한다. 실내시험에 사용되는 재료의 최대입경은 시험장비의 규모에 따라 달라질 수 있으나 통상적으로 다짐시험 및 강도시험시에 사용하는 최대입경은 대략 40mm 이하로 제한하고 있다.

2.2.2 다짐시험

다짐시험은 후절에서 언급할 강도시험용 표준공시체 제작에 필요한 단위재료량을 결정하기 위한 선행시험으로 먼저 단위시멘트량을 몇 가지로 변화시켜 각 단위시멘트별 최적함수비와 최대건조단위중량을 도출하고 삼상관계로부터 간극비, 간극률, 공기량, 수량 및 골재량을 산정함으로써 기본적인 단위재료량을 확정하게 된다. 현재

CSG 공법설계에 대한 정확한 다짐시험방법은 제시되어 있지 않지만 국내의 경우 최대허용입경을 37.5mm로 규정함으로써 현장입도를 최대한 반영할 수 있을 것으로 판단되는 [KSF 2319] 수정다짐(E다짐)과 표준다짐(B다짐) 방법이 적절할 것으로 판단된다. 일본의 경우 문헌상에 나타난 CSG 재료의 배합설계에 적용된 다짐시험 방법은 [JSF T 711-1990]기준이며, 이 기준은 국내 다짐시험기준과 동일하다. 미국 역시 CSG 재료에 대한 다짐기준이 제시되어 있지 않지만 본 공법과 유사한 RCC(Roller Compacted Concrete)공법의 경우 배합설계에 사용되는 다짐기준을 표준다짐(ASTM D 698)과 수정다짐(ASTM D 1557)으로 규정하고 있다.

2.2.3 강도시험

일반적으로 CSG 공법의 설계는 탄성해석으로 이루어지는 만큼 강도시험과 이를 통한 탄성계수 측정에 신중을 기해야 한다. 강도시험은 다짐시험에서 구해진 최적함수비와 최대건조단위중량을 기준으로 단위시멘트량(kg/m³)에 대한 각각의 재료량을 산정하고 규격화된 몰드(직경 15cm* 높이 30cm)를 이용하여 공시체를 성형한 후 재령별로 일축압축시험, 인장시험 그리고 삼축압축시험등을 실시하게 된다. CSG 공법에 대한 강도시험용 표준공시체의 제작방법은 국내외적으로 연구가 진행 중인 만큼 확정된 방법은 없다. 다만 아래 표 2 는 일본의 연구동향을 기준으로 살펴본 공시체 제작방법을 요약한 것이며, 사진 1은 CSG 공법과 유사한 미국 RCC 공법에서 추천하고 있는 표준공시체 제작방법을 도시한 것이다.

표 2. 강도시험용 표준공시체 제작방법

일 본	
□ 재료준비	· CSG재료는 목표한 시험입도가 되도록 입경별로계량 · 스크린 작업을 통해 최대입경은 40mm이하로 제한.
□ 혼합	· 혼합은 간이식 포트믹서(용량 90-165l)를 사용하며 혼합온도는 대략 20°C. · 1회 혼합량은 시험에 필요한 양보다 5l이상, 믹서 공칭용량의 1/2이상을 넘지 않도록 혼합. · 하상재료와 시멘트를 첨가 후 1분간 혼합하고 물 투입 이후 3분간 재 혼합.
□ 다짐기계	· 충격식 진동탬퍼 : 무게 11kg, · 가진력 : 140-150kg (50-60Hz), · 회전수 : 3000-3600회/분
□ 공시체제작	· 공시체 치수는 지름 150mm, 높이 300mm.이며 재료분리가 생기지 않게 3층으로 나누어 다짐 · 각층을 다짐봉으로 15회 다진후 진동탬퍼로 약 1분간 다짐
□ 양 생	· 20°C 항온실에서 양생하며 3일, 7일 28일, 91일 양생 후 강도시험 실시



사진 1. 강도시험용 표준공시체 제작방법(미국 RCC 공법기준)

3. 배합설계

본 절에서는 전철에서 언급한 실내시험방법에 기초하여 경상북도에 군위군 고로면에 위치한 화북댐 건설현장에서 채취한 하상재료를 대상으로 CSG 재료에 대한 배합설계를 실시하였다. 배합설계시 목표 설계기준강도는 7 일 강도를 기준으로 30kg/cm²으로 선정하였으며, 활중계수는 일반적인 콘크리트기준인 1.1을 적용한다.

3.1 시료채취 및 선별

먼저 실내시험에 사용할 하상재료의 채취를 위하여 화북댐 수몰지내 가물막이댐 시공지점의 하상재료를 대상으로 입도 및 부존량에 대한 육안 관찰조사를 실시하였다. 이 중 하상자갈의 분포가 비교적 양호하고 실험 및 현장시공시 최소한의 혼합 및 선별을 통한 모재료의 확보가 가능한 지역을 선정하였다. 먼저 아래 사진과 같이 체 버킷을 장착한 백호우를 이용하여 최대 직경이 150mm정도 되도록 1차 선별하였다. 이후 2, 3차 재료선별 작업을 통하여 40mm-20mm, 20-10mm, 10mm미만 시료로 분리 선별하여 채취하였다.



사진 2. 시료채취 전경

3.2 기본물성시험

현장에서 채취한 하상재료를 최대골재치수 40mm이하로 선별하여 기본적인 물리특성 및 입도분포시험을 실시한 결과는 아래 표 3 및 그림 1과 같다. 현장 자연시료의 입도시험결과 균등계수(C_u)는 51-65, 곡률계수(C_g)는 1.16-6.7의 범위로 나타났으며, 통일 분류법상 GW에 해당하는 것으로 나타났다. 동일한 장소에서 채취된 시료라 하더라도 그 분포양상이 조금씩 차이가 있으나 본 공법의 주된 취지가 현장입도를 최대한 활용한다는 측면에서 시료 균일성의 오차는 어느 정도 감안하지 않을 수 없다. 시험에 사용된 입도는 아래 입도 중 평균입도를 적용하였다.

표 3. 화북댐 시료의 물리적 특성

비중(G_s)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_g	USCS
2.65-2.69	0.31-0.35	2.4-7.2	16-22	51-65	1.16-6.7	GW

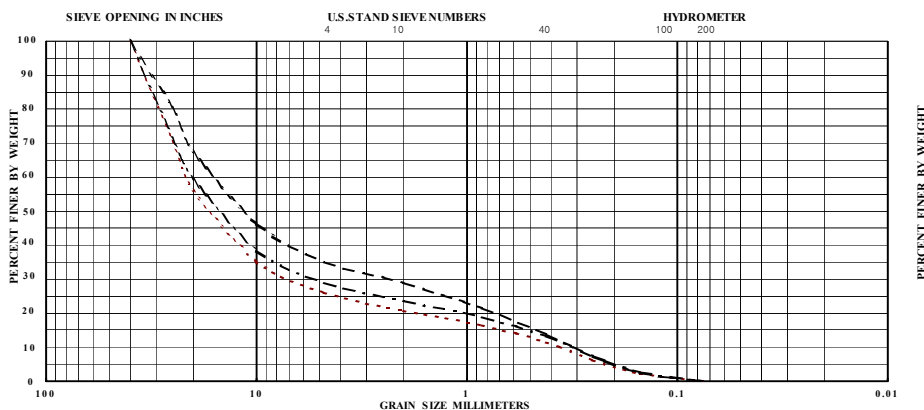


그림 1. 입도분포(40mm 이하)

3.3 다짐시험

2장에서 언급한대로 배합설계를 위한 위한 첫 단계로 시멘트량을 60, 80, 100kg/m³으로 달리하여 수정 E다짐 [KSF 2319]에 의한 다짐시험을 실시하고 각 단위시멘트량에 대한 최대건조단위중량 및 최적함수비를 도출하였다. 아래 그림 2와 표 4는 단위시멘트량을 변화시켜 실시한 다짐시험결과를 도시한 것으로 단위시멘트량은 전체 중량 대비 약 2.5% - 4.2% 내외이며, 시험결과 시멘트량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 2.17 - 2.19g/cm³로 증가하는 것으로 나타났으나 최적함수비는 대략 6.5 - 7.5% 정도로 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

K. Watanabe & Tateyama(2003)은 2.5%의 시멘트를 혼합한 지바 및 큐슈지역의 CSG 재료를 대상으로 실시한 연구에서 지바지역 CSG 재료의 최적함수비는 A, B 다짐방법에 따라 차이가 있으나 대략 5% - 8.7%, 최대건조단위중량은 2.15 - 2.2g/cm³ 정도인 것으로 발표한 바 있으며, 큐슈지역 CSG 재료의 경우 B 다짐으로 실시한 다짐시험결과 최적함수비는 약 5.5%, 최대건조단위중량은 약 2.65g/cm³ 정도로 전자에 비하여 최적함수비는 작고 최대건조단위중량은 상당히 크게 나타났다. 2가지 시료 모두 본 연구에 비하여 다짐에너지가 작으면서도 최대건조단위중량이 비슷하거나 크게 나타나는 것은 이 지역 모재료의 비중이 각각 2.71, 3.03으로 본 연구에 사용된 모재료의 비중 2.65-2.69 보다 크기 때문으로 판단된다.

표 4. 다짐시험결과

단위 시멘트량 (kg/m ³)	최적 함수비 (%)	습윤단위 중량 (g/cm ³)	최대건조 단위중량 (g/cm ³)
60	7.0	2.32	2.17
80	6.5	2.33	2.19
100	7.0	2.37	2.22

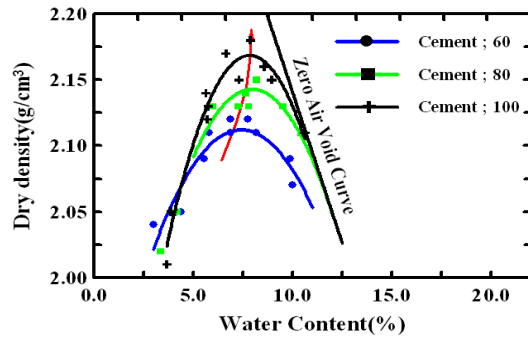


그림 2. 단위시멘트별 다짐시험결과

참고적으로 일본 수자원개발공단, 국토교통성의 우수전환 및 사방댐 13개소의 CSG 공법적용 현장을 대상으로 현장다짐시의 통계치를 분석해보면 다짐시의 평균 건조단위중량은 대략 2.15-2.25t/m³, 최적함수비는 약 5.93-8.47% 정도로 파악되었다. 이중 최대골재치수가 150mm인 경우가 10개소 그리고 80mm이하의 골재를 사용한 경우가 3개소였으며 사용된 단위시멘트량은 60kg/m³인 경우가 12개소 그리고 80kg/m³인 경우가 1개소로 나타났다. 일반적으로 현장 다짐에너지가 실내 다짐에너지보다 큰 점을 감안한다면 본 연구결과에서 나타난 실내 다짐도가 상기 연구의 실내다짐도 보다 다소 클 것으로 예상할 수 있으며 최적함수비는 거의 비슷한 범주에 속해 있는 것을 알 수 있다.

3.4 시험배합

다짐시험결과를 토대로 2장에서 언급한 배합설계기법을 적용하여 각 단위시멘트량에 필요한 재료량을 선정한 결과는 표 5와 같다. 먼저 최대 건조단위중량으로부터 포화도와 간극비, 간극률을 계산하고 공기량과 물량 그리고 전체 골재량을 산정하게 되며, 각 체별 재료량은 입도 분포결과를 토대로 전체 골재량에 대한 체별 중량비율을 곱해 결정하게 된다. 단위시멘트별 재료량을 검토한 결과 골재 총량은 m³ 당 약 2079~2092kg 정도로 나타났으며, 단위수량은 142.4~155.4kg로 나타났다. CSG 공법과 비슷한 RCC(Roller Compacted Concrete)공법의 경우 최대골재의 크기는 대략 50mm 이하로 규정하고 있으며, 골재의 상·하한입도를 시방기준에 의하여 제한하고 있다. RCC 공법의 경우 최적함수비는 대략 6-6.5% 정도의 값을 가지는 것으로 보고되고 있으며, 골재선별을 통한 품질관리를 별도로 실시하므로 배합설계시 단위재료량의 변화 폭이 CSG공법에 비하여 상대적으로 작다. 그러나 CSG 공법의 경우 현장입도를 최소한으로 조정하면서 소정의 강도를 지닐 수 있도록 단위시멘트량을 산정하게 됨으로써 대상지역의 하상재료 특성에 따라 배합설계의 입도 변화폭이 상대적으로 넓다고 할 수 있다.

아래 표는 RCC 댐의 시공시 사용된 배합설계 예를 표시한 것이다. 전반적으로 골재의 양은 비슷하지만 단위 시멘트량이 130~227kg/m³ 정도로 CSG 공법에 비하여 상당히 많이 투입되며 혼화제인 플라이애쉬가 혼합된 것을 알 수 있다. 그러나 단위수량은 대략 131~151kg으로 본 연구결과의 단위수량과 거의 비슷하게 나타났다.

표 5. 화북댐 CSG재료의 시험배합결과 및 RCC 배합설계 예 [kg/m³]

장소 재료	화북댐 CSG재료			탐진댐 CSG재료	Whipps Mill Road, KY	Prairie Creek TX(1)	North Bosque River, TX(1)
	60	80	100	80	65	173	227
시멘트량	60	80	100	80	65	173	227
물량	152	142	155	1676.9	136	151	148
골재량	2079	2079	2092	2074	2136	2159	2063
플라이애쉬	-	-	-	-	65	-	-
총배합량	2291	2301	2347	2321	2402	2483	2438

표 6은 CSG공법과 RCC공법의 현장입도에 대한 차이점을 분석한 것으로 CSG 공법의 경우, 본 연구에서 실시한 40mm 이하의 현장입도 분포와 김기영, 박한규(2005)의 탐진댐 하상재료를 대상으로 실시한 현장입도분포 양상은 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있다. 즉 CSG 공법이 대상지역의 하상재료를 선별 없이 그대로 이용함으로써 경제성에 우선 점을 두고 있는 반면 RCC 공법을 적용한 미국의 Fawell, Mona 그리고 Leyden 댐의 경우 인위적인 합성배합을 통한 표준화된 배합입도를 사용하고 있다. 따라서 CSG 공법에 비하여 그 배합입도의 차이가 크지 않음을 알 수 있으며 CSG 공법에 비하여 품질관리 측면을 중시하는 공법이라 할 수 있다.

표 6. CSG 골재배합 입도와 RCC 배합입도의 비교

장소 입도	화북댐 CSG	탐진댐 CSG	표준 RCC	Fawell Dam Illinois	Mona Dam Utah	Leyden Dam Colorado
	실입도 통과율(%)	실입도 통과율(%)	규정입도 통과율(%)	실입도 통과율(%)	규정입도 통과율(%)	실입도 통과율(%)
37.5mm	100	100	100	100	100	100
25mm	80-70	-	100-85	96	96	-
19mm	67-55	89.3	-	-	84	75
12.5mm	-	-	80-60	69	-	-
9.5mm	45-35	75	-	-	59	58
4.75mm	35-25	69	55-40	46	41	43
2.36mm	-	-	41-28	-	-	28
2.0mm	28-20	-	-	-	-	-
1.18mm	-	-	23-33	23	21	-
0.425mm	-	35	-	-	-	-
0.3mm	15-12	-	20-10	-	-	13
0.15mm	-	-	13-5	-	-	9
0.075mm	0.2	4.7	2-7	7	4	6

3.5 강도시험

3.5.1 재하장치 및 실험방법

사진 3은 본 연구에 사용된 재하장치로써 정적 및 동적재하시험이 가능하며 응력 및 변형제어를 자동적으로 조절할 수 있는 다기능 재하시험 장치이다. 현재 수자원 연구원에서 보유하고 있으며, 최대 재하 축 하중은 75ton으로 일축압축 및 정,동적 삼축압축시험이 가능하다. 일축압축시험시 단위 시멘트량에 대한 강도특성을 파악하기 위하여 시멘트량을 각각 60, 80, 100 kg/m³으로 나누어 시험을 수행하였으며, 각 단위시멘트량에 대한 재령은 7일 강도만을 살펴보았다.



사진 3. 시험장치

3.5.2 시료성형

압축시험시 표준공시체의 제작방법은 전절에서 언급한 방법 중 Vibrating 방법에 기초하여 표준공시체를 성형하였다. 일축압축강도시험에 사용된 몰드는 직경 15cm 높이 30cm의 일반적인 콘크리트 몰드이며, 시료의 최대 직경은 37.5mm로 제한하였다. 다짐시험에서 계산된 재료량을 기초로 공시체를 제작하고 항온항습실에서 7일간 양생후 탈형하였으며 유향을 사용한 캠핑작업을 실시한 후 강도시험을 수행하였다.

3.5.3 일축압축시험

일축압축시험은 목표한 설계기준강도를 만족할 수 있는 최소한의 단위시멘트량이 얼마인가를 산정하기 위한 실험으로 일축압축시험에 필요한 단위재료량은 반드시 다짐시험을 통해 얻어진 결과를 토대로 산출되어진다. 특히 CSG 공법의 설계가 탄성해석을 기본으로 설계되는 만큼 일축압축시험에서 얻어진 강도와 탄성계수는 단위시멘트량의 결정과 기본설계를 위한 필수적인 시험으로 상당히 중요하다. 표 7은 일축압축강도 시험결과를 요약한 것이며, 그림 3은 목표 설계기준강도를 만족하는 단위 시멘트량을 도기한 결과이다. CSG 재료의 강도는 단위시멘트량과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 시멘트량이 많을수록 강도는 비례하여 증가하지만 많은 양의 시멘트량이 사용되게 된다면 그만큼 경제성은 떨어지게 된다. 따라서 목표 설계기준강도를 만족할 수 있는 최적의 단위시멘트량 산정이 무엇보다 중요하다. 단위시멘트량이 60kg/m³인 경우 재령 7일 강도는 약 30.6kg/cm²로 목표 설계기준강도를 초과하고 있다. 그러나 활중계수 1.1을 고려한 설계기준강도 33kg/cm²은 만족하지 못한다. 그러나 단위시멘트량이 80, 100kg/m³인 경우의 7일 강도는 각각 45.5와 82.3kg/cm²로 목표 설계기준강도를 훨씬 상회하였다. 따라서 본 연구에서 필요한 단위시멘트량은 활중계수를 고려할 경우 대략 65kg/m³으로 판단된다. 또한 단위시멘트량이 80에서 100으로 증가할 경우의 강도증가율이 60에서 80으로 증가할 경우에 비하여 큰 것으로 보아 단위시멘트량이 80kg/m³을 초과할 경우 CSG 재료의 강도특성은 시멘트에 의해 지배될 가능성이 크다고 할 수 있다.

표 7. 일축압축강도 시험결과

시료 재령	화북댐 유역 CSG재료								
	60kg/m ³			80kg/m ³			100kg/m ³		
재령 7일	No.1	32.0	평균강도 30.6 (kg/cm ²)	No.7	44.6	평균강도 45.5 (kg/cm ²)	No.13	80.7	평균강도 82.3 (kg/cm ²)
	No.2	30.5		No.8	45.3		No.14	75.0	
	No.3	30.1		No.9	48.4		No.15	88.6	
	No.4	29.5		No.10	46.5		No.16	86.3	
	No.5	32.3		No.11	44.9		No.17	82.4	
	No.6	29.1		No.12	43.2		No.18	81.2	

일본 토목기술(2000.7) 자료에 의하면 단위시멘트량을 20-100kg/cm³으로 변화시켜 고찰한 일축압축강도의 경우 단위시멘트량 60kg/m³의 재령 7일 강도는 대략 1~4 MN/m² 으로 나타났으며, 시멘트량이 증가함에 따라 일축

압축강도는 증가하고 단위시멘트량이 커질수록 강도의 오차범위가 크게 나타났다. 또한 일본의 수자원개발공단 및 국토교통성에서 시공한 호안공의 경우 단위시멘트량이 61.2kg/m³일 경우 재령 7일후의 강도는 23kg/cm²로 보고된바 있으며, 단위시멘트량 65.1kg/m³로 시공한 하류가물막이 댐의 재령 7일 후의 일축강도는 27kg/cm²로 보고된바 있다. 본 연구결과에서도 단위시멘트량이 증가함에 따라 일축압축 강도는 비례하여 증가하지만 강도편차의 범위가 상기 연구결과와 달리 작게 나타났으며 비슷한 양의 단위시멘트량일 경우 일축압축강도는 상기 연구결과보다 오히려 크게 나타났다. 이러한 연구결과는 그림 5에서처럼 김기영, 박한규(2005)의 탐진댐 하상재료를 대상으로 실시한 시험결과에서도 찾아볼 수 있다. 그러나 탐진댐 시료의 경우 조립분이 상대적으로 많은 화북댐 시료에 비하여 동일 시멘트량을 기준으로 강도발현 정도가 작음을 알 수 있으며, 따라서 설계기준강도를 만족하는 단위시멘트량도 증가될 수밖에 없다. 이러한 원인은 하상 모재료의 특성 및 입도분포의 차이로 판단할 수 있다.

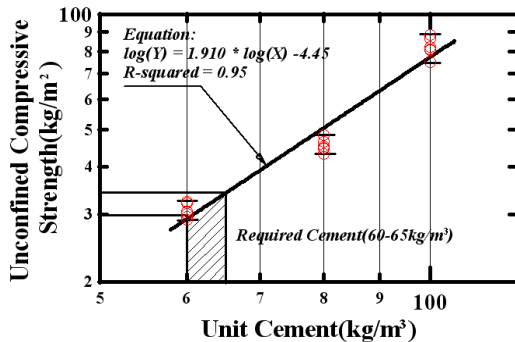


그림 3. 단위시멘트량 - 일축압축강도(화북댐)

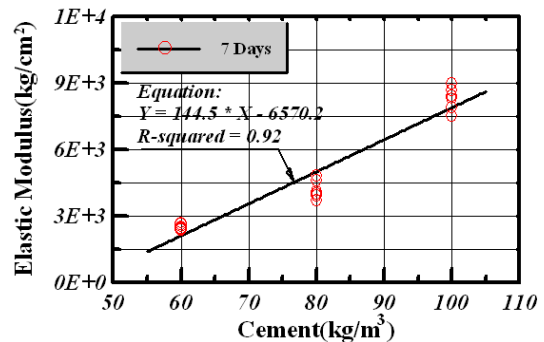


그림 4. 시멘트량-탄성계수(화북댐)

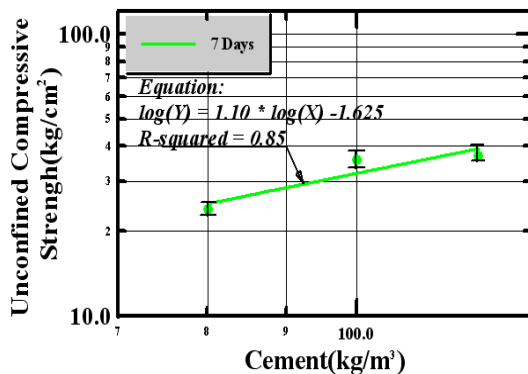


그림 5. 단위시멘트량-일축압축강도(탐진댐)

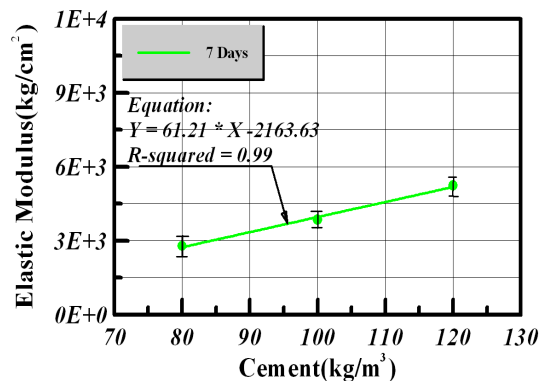


그림 6. 단위시멘트량-탄성계수(탐진댐)

표 8. 일축압축강도-시멘트량-탄성계수의 상관식

상관식 시료	단위시멘트량 - 일축압축강도의 상관식	R ²	탄성계수 & 시멘트량	R ²
화북댐	재령 7일 : $\ln(Y) = 1.91 * \ln(X) - 4.45$ [* (X) Range : 60 ~ 100 kg/m ³]	0.95	$Y = 144.5 * (X) - 6570.2$ [(X) Range : 60~100kg/m ³]	0.92
탐진댐	재령 7일 : $\ln(Y) = 1.105 * \ln(X) - 1.62$ [* (X) Range : 80 ~ 120 kg/m ³]	0.85	$Y = 61.21 * (X) - 2163.6$ [(X) Range : 80~120kg/m ³]	0.99

일본의 경우 CSG 재료의 설계 및 안정해석은 탄성해석을 위주로 설계되고 있으며 본 연구에서도 응력-변형에 대한 거동양상이 일반적인 토사에서 나타나는 비선형거동보다는 탄성체적 거동이 우세하게 나타나고 있다. 즉 소량이라 할지라도 시멘트가 전체적인 응력 거동특성을 지배하는 중요 인자임을 알 수 있다. 표 8은 화북댐과 탐진댐 시료에 대한 일축압축 시험결과를 바탕으로 도출된 단위시멘트별 일축압축강도와 탄성계수와의 상관성을 관련식으로 나타낸 것으로 각 인자별 상관성이 최소 0.85 이상으로 나타나 매우 높은 수준의 상관성을 확인

할 수 있었으며 조립분이 많은 화북댐 시료의 탄성계수가 동일 재령에서의 탐진댐 시료에 비하여 상당히 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

1. CSG공법에 대한 배합설계는 현장입도를 최대한 활용하는 것임 만큼 대상지역의 하상재료에 따라 그 변화폭이 큰 것을 알 수 있으며 소량의 시멘트로 강도 증가효과를 볼수 있어 댐 체제 규모의 축소에 따른 경제적, 환경적 측면에서 유리하고 연속적인 시공을 통한 공기의 단축을 기대할 수 있어 시공적인 측면에서도 기존의 활댐이나 중력식 콘크리트댐 보다 효과적일 것으로 판단된다.
2. 화북댐 시료의 경우 입도분포가 균등하고 기존의 RCC공법에서 추천하고 있는 평균입도에 비하여 조립질이 상대적으로 많이 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 현장입도를 그대로 적용해서 얻어진 실내 다짐도는 다른 연구결과에 비하여 비슷하거나 크게 나타나고 있어 댐 축조재료서의 사용이 충분할 것으로 판단된다.
3. CSG 공법은 하상재료의 모재특성에 따라 그 다짐특성이 달라질 수 있으므로 그 특성을 단적으로 결정지을 수 는 없으나 화북댐 시료의 경우 시멘트량이 증가함에 따라 최대 건조단위중량은 비례하여 증가하며, 최적함수비는 단위시멘트량에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
4. 일축압축시험을 통해 살펴본 적정 단위시멘트량은 활중계수를 고려할 경우 단위 m^3 당 약 65kg정도 인 것으로 판단되며, 단위시멘트량이 80, 100kg/ m^3 일 경우 상당히 우수한 강도특성을 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 시멘트가 강도증가에 지배적인 인자임에는 틀림없으나 동일한 시멘트량이라 할 지라도 그 모재료의 특성에 따라 강도발현의 차이가 큰 것을 감안한다면 대상지역의 하상재료에 대한 정확한 특성파악이 무엇보다 중요한 것으로 판단된다.
5. 일축압축시험결과 단위시멘트량이 증가함에 따라 강도는 비례하여 증가하고 있으나 동일한 양의 시멘트 증가라 할지라도 강도증가의 폭이 다르게 나타나는 것으로 보아 단순히 설계기준을 만족하는 단위시멘트량보다 강도발현이 최대이면서 설계기준강도를 만족할 수 있는 경제적인 단위시멘트량의 산정이 필요하다.
6. CSG 재료의 전반적인 응력-변형특성은 짧은 변형률에서 최대강도를 발현한 후 급격한 파괴를 나타내는 탄성체적 거동이 지배적인 것으로 나타났으며 시멘트량과 일축압축강도 그리고 탄성계수는 서로 밀접한 상호관계가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김기영, 박한규(2005)외 2인, "CSG 재료의 강도특성에 관한 연구" 한국지반공학회 학술발표회 논문집 pp.619-626.
2. Watanabe, K., Tateyama, M., Jiang, G., 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. IS Lyon 03, Balkema, Sept. 2003.