J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 27, No. 6, 2018, 30-37
https://doi.org/10.7844/kirr.2018.27.6.30
pISSN : 1225-8326 eISSN : 2287-4380

≫ 연구논문 ≪

수중 공동보강용 석고 활용 저 pH형 수중불분리 그라우트에 대한 실험적 연구

김영상* · 백정진** · §김형기**

*전남대학교 토목공학과, **조선대학교 건축학부 (건축공학전공)

Experimental Study on Low-pH, Anti-washing Grouts Incorporating Gypsum for Reinforcement of Underwater Cavities

Young-sang Kim*, Jeong Jin Baek and §Hyeong-Ki Kim****

**Department of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea*
***School of Architecture, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*

요 약

석회암 기반 지반 등에 존재하는 수중공동의 보강을 위해 사용할 수 있는 석고 혼입 저 pH형 수중불분리 그라우트에 대한 기초 실험을 수행하였다. 다양한 종류의 배합을 설계하였으며 이 배합들의 유동성, 강도, 환경영향성을 평가하였다. 유동성은 자연유하, 가압유하의 두 가지 조건에 대해 평가하였다. 강도는 기중 및 수중 주입의 경우에 대해 각각 측정하였다. 환경영향성은 현탁액의 pH 및 현탁물질 농도 두가지로 평가되었다. 석고혼입을 통해 pH를 10 이하로 감소시켰으며, 포틀랜드 시멘트-규사-석고 간의 배합비 및 수중불분리제-유동화제 혼입량의 변화을 통해 모르타르 자유흐름량 7-10 cm, 압축강도 4 MPa 이상의 수중불분리 그라우트 배합을 찾아내었다.

주제어 : 수중 공동, 충전 그라우트, 저 pH, 석고, 유동성, 환경영향성

Abstract

A series of experiment was conducted to evaluate basic performances of low-pH, anti-washing grouts incorporating gypsum which applied for reinforcing underwater cavities in limestone- grounds. Various types of mix proportions were designed and the fluidity, strength and environmental impact of these mixtures were evaluated. The flowability was evaluated under two conditions, i.e., flows without and with pressing, respectively. Strength was measured for the hardened mixtures fabricated under conditions of air and water injections. The environmental impacts including the pH of the suspension and the suspended solids concentration for the mixtures were evaluated. The low pH of fresh mixture suspension, below than 10, was achieved by incorporation of gypsum. The mix proportions of cement-quartz powder-gypsum binders and chemical agents resulted in mortar natural flow 7-10 cm and uniaxial compressive strength 4 MPa were derived.

Key words : Underwater cavities, filling grout, low pH, gypsum, flowability, environmental impact

· Received : September 17, 2018 · Revised : October 26, 2018 · Accepted : November 16, 2018
§ Corresponding Author : Hyeong-Ki Kim (hyeongki@chosun.ac.kr)
School of Architecture, Chosun University, Room 9108, Engineering Building 1st, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea
ⓒThe Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

석회암 기반 지반은 용해와 용식을 포함한 풍화작용에 의해 공동이 발생할 가능성이 높은데, 이는 지반 내 석회암 암질의 불균질함, 그리고 지하수의 흐름에 의한 차등 용식/용해에 기인한다[1]. 석회암의 화학적 용해는 대부분 수분 내에 존재하는 탄산이온에 의해 유발되는 경우가 많다[2]. 이렇게 형성된 석회암 공동은 그 자체적으로도 충분히 지반의 함몰 및 침하와 같은 공동구조 붕괴를 유발할 가능성이 있으며, 만약 석회암 공동구의 상부에 인위적인 하중을 발생시키는 구조물을 시공할 경우 붕괴 가능성은 더욱 증가하게 된다[3-5]. 석회암 지반에서 발생하는 공동 네트워크의 형태와 공동의 크기 등은 용해성 암석과 비용해성 암석의 분포에 따라 cm 단위에서 m 단위 까지 다양하게 형성되게 된다[3]. 석회암 공동이 지상에 존재하는 경우 석회암 공동의 규모 및 공동 크기에 대한 조사가 상대적으로 용이할 뿐 아니라 이를 보강하기 위한 기술의 제약이 적다. 그러나, 지하수위가 높은 지역 혹은 수중에 존재하는 공동은 상대적으로 내구 공동구 조사가 어려울 뿐 아니라 비록 어느 정도 정확하게 공동의 상태를 파악한다 하더라도 실제 이를 보강하는 것은 상대적으로 어려운 경우가 많다. 따라서, 육상이 아닌 수중에서도 이를 효과적으로 보강할 수 있는 방법이 필요하다.

일반적인 공동의 보강 공법은 단순지반보강 방법과 유사한데, 대표적으로 저압 주입, 고압주입, 구조체 삽입, 상부보강 등이 있다. 이러한 공법 중 요구에 맞는 공법을 선정할 때는 공동의 구조형태, 주입공법을 사용하는 정확한 목적, 경제성 등을 기반으로 판단을 하게 되는데, 대표적인 공법의 종류와 목적은 다음과 같다. 일반 지반보강용으로 사용되는, Micro silica cement grout (MSG), Soil cement mixing wall (SCW) 공법 등은 공동내부에 토사 및 진흙이 존재하는 경우에 사용할 수 있는 기술인 반면, Compaction grout system (CGS), Space injection grout (SIG) 등은 내부 토사의 존재에 상관없이 사용이 가능하다. 이 때 일반지반과 달리 공동에서는 고압 주입에 의한 공동의 붕괴 가능성을 충분히 고려해야 함은 물론 과도한 가압에 의한 공동 네트워크 내 과다 충전(목적으로 하는 공동부 이외의 부위까지 충전재가 주입되는 현상)을 주의해야 한다.

석회암 공동이 수중에 존재할 경우, 충전 재 적용에 있어 충전재의 수중혼합으로 인한 강도감소 및 충전재의 수중유실로 인한 환경문제를 고려해야한다. 물론 지상에서 역시 이와 같은 문제가 충분히 발생할 수 있으나, 상대적으로 그 중요도는 수중의 경우에 비해 낮은 편이라 할 수 있다. 국내외에서 보고되고 있는 석회암 공동의 보강사례는 대부분 육지에서의 보강이며, 이로 인해 공법의 선정이 상대적으로 용이하므로 상기의 공법을 모두 사용할 수 있다. 한편 수중 혹은 고지하수위 영역 조건에서는 기존 SIG 및 CGS 공법에 사용되는 충전재(그라우트 등)에 화학/광물계 혼화제를 사용하는 것이 일반적이다[6-9]. SIG 공법과 CGS 공법에는 각각 페이스트 그라우트와 모르타르 그라우트를 사용한다. 일반적인 보강이라면 지상과 수중에 동일한 재료를 사용하는 것도 가능하지만, 경우에 따라 수중의 공동구에 사용 시 문제를 일으킬 수 있다. 발생할 수 있는 가장 큰 문제는 그라우트에 포함된 시멘트 등의 수화 결합재로 인한 환경오염이다. 공동구 하부라면 시멘트가 확산되어 오염수가 발생할 확률이 적으므로 크게 문제가 발생하지 않으나, 상부의 경우 씻김(washing)에 의해 시멘트 미분이 섞인 오염수가 발생하여 인근의 해양환경에 영향을 미칠 수 있다. 반응성이 큰 시멘트 미분에 의한 수중 생태계의 오염에 대한 사례는 아직까지 정확히 보고된 사례는 없으므로 크게 문제되지 않으나, 시멘트의 수화에 의한 pH 상승은 지하수 오염의 원인이 될 수 있다. 일반적으로 시멘트 대비 물의 무게비가 20-50 범위의 혼탁액의 pH는 약 12-14 정도인데, 이는 환경부의 지하수 일반오염 기준 최대인 pH 9에 비해 월등히 높은 값이다[10,11]. 이로 인해 한국콘크리트학회 표준시방서의 KCI-AD102 “콘크리트용 수중 불분리성 혼화제 품질 규격”에서는, 해양에 직접 굳지 않은 시멘트 배합(수중 콘크리트 등)를 타설 할 경우 현탁액 발생량을 50 mg/l, pH 상승 범위를 12 이하로 제어하는 배합을 사용하도록 제한 하고 있다[12].

일반적으로, 수중에서 타설하는 그라우트 및 시멘트 복합재료의 두가지 문제, 즉 수중 혼합으로 인한 급격한 강도 감소 및 수질환경 오염을 동시에 해결하기 위한 방안으로 수중 불분리제를 사용한다. 대개 배합수를 흡착하는 특성을 갖는 cellulose를 기반으로 하는 불분리제는 배합 내부로 물이 섞이는 것과 동시에 배합으로부터 시멘트 입자가 밖으로 유실되는 것을 막아준다. 지금까지는 이 재료의 가격이 고가이므로 지금까지 SIG, CGS 공법 등에서는 거의 적용되지 않았고 단지 수중 지표면에 타설하는 일반강도 불분리 콘크리트에서 사용되었다. 그러나 SIG, CGS 공법 중 보강 강도가 중요한 경우, 혹은 수질 오염이 크게 우려되는 경우에는 이

재료를 사용해야 한다. 한편 일반 콘크리트에 비해 단위수량이 높은 그라우트의 경우 수중 불분리 효과를 충분히 발현하기 위해서 수중 불분리제의 사용량이 크게 늘어나 재료가격이 과도하게 상승한다. 따라서 수중 불분리제 이외에도 고유동 콘크리트 등에서 주로 사용하는 방법 중 하나인 분체계 증점 효과를 적용해 배합의 유동 특성을 변화 시킬 필요가 있다. 이 때 사용할 수 있는 준 반응성 분체 중 하나가 바로 석고이다. 분체 자체로서의 증점 효과를 보일 뿐 아니라, 황산염을 가지고 있으므로 상대적으로 pH를 낮추며, 동시에 시멘트와의 반응을 통해 에트링가이트(Ettringite)를 형성하여 팽창성을 부여하여 시공 후 공동구의 부피안정성을 확보 할 수 있다[13]. 특히, 만약 폐석고 분말을 활용 할 경우 다른 반응성 분체(슬래그 및 플라이애시) 등에 비해 가격적 이득이 있다는 큰 장점이 있다.

본 연구에서는 석회암 기반 지반 등에 존재하는 수중 공동의 보강을 위해 사용할 수 있는 석고 혼입 저 pH형 수중불분리 그라우트에 대한 기초 실험을 수행하였다. 본 그라우트의 적용현장을 고려한 대략적인 요구성능은, 1) 수중에서 적당한 작업이 가능한 수준의 저유동성(CGS 공법용 저유동 모르타르 수준), 2) 충전 후 수중 침식이 이루어 지지 않을 정도의 강도, 그리고 3) 환경영향 무해성이다. 유동성이 과도하게 높으면 주입 시 목적하는 주입공 외 다른 공간으로 충전재가 흘러가 소요되는 재료량이 증가하는 경우가 발생한다. 동시에 일부 폐색된 공극 부분으로 충분한 압력을 통해 주입되지 못하기 때문에 연결된 공극으로만 충전재가 유동하여 충전재 구근을 형성하지 못한다. 강도가 너무 약하면 지하수 혹은 해수 등에 의해 침식이 발생할 수 있으며 무엇보다 보강효율이 떨어진다. 하지만, 강도가 너무 높으면 보강된 지반 내에서 응력집중이 발생하여 하중이 고르게 지반에 분포하지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 이에 따라 목적으로 하는 강도, 유동성, 환경영향성 등의 성능기준을 더 자세히 설정하였으며, 다양한 종류의 배합에 대한 실험을 통해 이 성능기준을 만족하는 배합을 확인하였다.

2. 실험설계

2.1. 사용재료 및 배합비

본 연구에서는 I종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 석고는 최대 입경 0.1 mm 이하 공업용 이수석고

Table 1. Mix proportion (weight ratio)

Specimen	Water	Cement	Quartz powder	Gypsum	Sand	AWA[a]	SP[b]
C51	0.8	0.5	0.5	0	3	0.01	0.01
C52	0.8	0.5	0.5	0	3	0.02	0.01
C53	0.8	0.5	0.5	0	3	0.02	0.02
C71	0.8	0.7	0.3	0	3	0.01	0.01
C72	0.8	0.7	0.3	0	3	0.02	0.01
C73	0.8	0.7	0.3	0	3	0.02	0.02
G051	0.8	0.65	0.3	0.05	3	0.01	0.01
G052	0.8	0.65	0.3	0.05	3	0.02	0.01
G053	0.8	0.65	0.3	0.05	3	0.02	0.02
G101	0.8	0.6	0.3	0.1	3	0.01	0.01
G102	0.8	0.6	0.3	0.1	3	0.02	0.01
G103	0.8	0.6	0.3	0.1	3	0.02	0.02
G151	0.8	0.55	0.3	0.15	3	0.01	0.01
G152	0.8	0.55	0.3	0.15	3	0.02	0.01
G153	0.8	0.55	0.3	0.15	3	0.02	0.02

[a]Anti-washing agent
[b]Superplasticizer

(gypsum) (영남상사)을 사용하였다. 참고로 이후 폐석고 분말을 공업용 석고와 치환할 계획이다. 필러(Filler)와 골재로 각각 규사 6호(0.25-0.75 mm, 비중 2.65), 강모래(0.6-4.75 mm, 비중 2.60, 조립율 2.89, 흡수율 0.83%)를 사용하였다. 사용된 수중 불분리제 및 유동화제는 메틸셀루로오즈계 및 폴리카르복실산계 이며, 국내 A사의 제품이다. 여기서 규사를 필러로 사용하는 이유는 시멘트 사용량을 줄이면서도 배합의 점성을 유지하고 동시에 강도를 적당한 수준으로 유지해 주기 때문이다.

사용된 배합은 Table 1과 같다. 최종적인 재료의 가격 등을 고려해 모르타르 배합(잔골재 포함)을 기반으로 배합을 설정하였다. 기존 CGS 배합에서 사용되는 저유동 모르타르의 물시멘트비가 0.7-0.8 인 반면, 본 배합에서 사용된 물시멘트비는 1.6-2.7 수준이다. 본 배합이 강도 보다 충전성에 목적을 두고 있기 때문이다. 시편명에서의 첫 자 C와 G는 각각 석고가 혼입되지 않은 배합과 혼입된 배합을 나타낸다. C 이후 첫 숫자 5와 7은 각각 시멘트와 규사 의 무게 합을 1로 환산 할 때 시멘트의 무게비가 각각 0.5, 0.7임을 의미한다 G 이후 두 숫자 05, 10, 15는 각각 시멘트, 규사, 석고의 무게 합을 1으로 환산 할 때 석고의 무게비 0.05, 0.10, 0.15를 의미한다. 이 G 배합에서는 규사 무게비를 3으로 고정하였다. 모든 시편명의 맨 뒤 숫자는 수중불분리제(anti-washing agent, AWA)와 유동화제(superplasticizer, SP)의 구성에 대한 번호이다. 분체계(시멘트, 규사, 규사)에 무게를 1로 환산할 때, 물과 모래의 무게비는 각각 0.8, 3.0으로 고정하였다. 이 모든 비율은 CGS용 저강도 모르타르의 배합비를 참고하여 설정한 것이다.

2.2. 실험방법

배합은 일반적인 10 L 수직 믹서를 이용해 이루어졌으며, 모든 재료를 혼입 후 2분간 배합하여 토출 하였다. 먼저 굳지 않은 그라우트 배합의 유동성은 두 가지 종류의 실험을 통해 평가하였다. 실제 수중에 충전재를 타설 시의 유동 시나리오는 크게 자연유하 및 가압유하의 두 가지로서, 자연유하는 충전재가 공동에 관입된 이후 자체적으로 주변 공동 네트워크를 따라 흘러가는 경우이며, 가압유하는 공동 네트워크 내에서 압송압에 의해 강제적으로 유동하는 경우이다. 이론적인 유동 특성치를 얻기 위해서는 Viscometer 등을 이용한 유동항복응력(Rheological yield strength) 및 점도(Viscosity)를 측정하는 것이 이상적이나, 상대적으로 유동성이 낮은 본 배합에서 이러한 실험을 하기 위해서는 고가 및 특수한 장비가 요구되므로, 본 연구에서는 기존에 사용되는 간이시험을 사용하였다. 배합의 자연유하 특성은 ASTM D 6103 “Standard test method for flow consistency of controlled low strength material (CLSM)”의 기준에 준하여 측정하였는데, 길이 15 cm 내경 8 cm 의 관에 배합을 넣고 다진 후 관을 제거하여 흘러나간 반지름을 측정하는 실험이다[15]. 상대적으로 유동항복응력에 영향을 크게 받는 특징이 있다. 가압유하에 대한 간접적 평가는 KS L 5105 “수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법” 및 ASTM C 1437 “Standard test method for flow of hydraulic cement mortar”에서 사용되는 타격 테이블법을 사용하였는데, 순간적인 낙하력을 가하여 퍼진 면적을 측정하므로 유동항복응력과 함께 점성에 크게 영향을 받는다. 그 외에도 가압유하 특성을 묘사하기 위해 간이식 주입팩(Injection pack)을 이용해 주입특성을 정성적으로 파악 하였다.

배합 자체의 수중 응결특성을 분석하기 위해 KS F 2436 “관입 저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법”을 이용해 측정하였다. 특히, 본 실험은 일반적인 밀봉 양생조건이 아닌 수중 조건을 묘사하기 위해 굳지 않은 시료를 물에 담근 후 수행되었다.

배합의 강도는 KS L 5105 “수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법”(ASTM C 109 “Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars”와 유사)을 기준으로 측정하였는데, 실제 이를 위한 시편은 두 가지 방법에 의해 제조하였다. 먼저 대기 일반타설 시편의 경우 수중이 아닌 수상에서 제작 후 굳지 않은 상태에서 바로 수중에 침지 시켰다. 이는 재료배합 자체의 물성을 분석하기 위함이다. 또한 수중 타설 시편의 경우 위의 주입 팩을 이용해 직접 수중에서 시편을 성형하였는데, 이 때 제작기준은 KCI-CT102 “수중 불분리성 콘크리트의 수중 제작 공시체의 제작방법” 및 한국 콘크리트학회 표준 시방서 내 KCI-AD102 기준(안)을 따랐다. 이는 수중 시공 중에 발생할 수 있는 단위수량 교란(배합 내 수분이 침투하거나, 시멘트 등의 미분이 유실되어 실제 단위수량이 증가함), 혹은 과도한 시공 공극(공동구에 충전 중 물이 배합 사이에 존재하여 완벽하게 충전되지 못함)을 간접적으로 평가하기 위함이다. 위 기준에 따라 수중에서 주입된 시편의 다짐은 수중에서 진행되었다.

그 밖에도 환경영향성을 평가하였는데, 평가한 항목은 pH 특성과 현탁도 였다. KCI-AD102에 따르면 pH 변화 및 현탁물질량은 모두 KS I 3217 “공장 폐수 시험 방법”에 준하여 측정하도록 되어있다. 1 L의 매스실린더에 증류수 0.8 L를 채우고 배합 500 g을 채취하여 이를 10회에 나누어 수면에서 자유낙하 시켜 3분간 정치 후 상층부 용액 중 0.6 L를 분취하여 현탁물질 농도 및 pH를 측정하였다. 이 때 현탁물질은 현탁물질 측정 장비인 Hach 2000Q (Hach Inc., US)를 사용해 측정하였다. 여기서 현탁물질이란 대부분 시멘트 및 잔골재 내 미분(점토 등)을 의미한다. 응결, 양생을 포함한 모든 실험은 20±2°C의 실내에서 수행되었다.

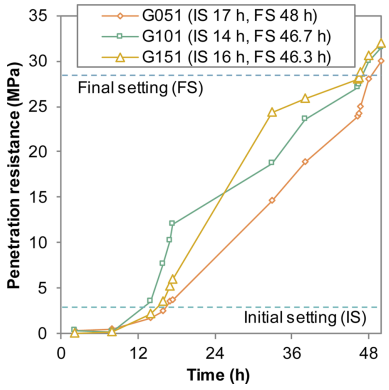

Fig. 2. Penetration resistance of hardening grout.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 유동성 및 응결

Fig. 1은 굳지 않은 그라우트의 유동성 실험 결과를 나타낸다. 일반적으로 ASTM D 6103 실험기준에 따른 자연유하 결과는 10 cm 이하에서 무유동, 10-15 cm에서 저유동, 15-20 cm 준유동, 20 cm 이상에서 고유동으로 분류한다[6,16]. 실험결과 일부의 배합을 제외하고는 모두 자연유하 시 7-10 cm 수준의 무유동 특성을 가지고 있는 것을 확인하였으며, 이는 이후 수중 작업 시 원치 않는 누출의 가능성이 매우 적음을 의미한다. CGS 공법에서 시공중 노출 문제는 매우 중요한 요소이다. 모든 시리즈에서 나타난 것과 같이, 수중 불분리제를 분체 대비 1% 이상 사용할 경우 유동성의 변화 폭이 크지 않은 특징이 있다. 이미 기초배합 자체가 무유동이었기 때문에 자연유하가 발생하지 않는 수준의 유동항복응력을 가지고 있다고 할 수 있다.

한편 KS L 5105에 의한 가압유하(테이블 충격식) 시 결과는 배합 종류에 따라 그 편차가 상대적으로 크며, 이는 유동항복응력 보다 점성의 차이가 큼을 알 수 있다. C5 배합 시리즈에 비해 시멘트량이 많은 C7 배합들은 상대적으로 1-2 cm 정도 더 큰 수준의 유동지름을 나타났다. 일반적으로 SP는 시멘트와 같은 전위입자의 표면에 전기적으로 흡착되어 분산시키는 측면에서는 유의한 반면 규사분말과 같은 단순한 비전위, 저전위 입자에 대해서는 역할을 하지 않는다. 따라서 오히려 미분인 시멘트량이 증가하였지만 유동성이 더 높아진 것이다. 이 역시 수중 불분리제를 과도하게 사용하면(분체 대비 2%) 이러한 효과는 줄어들게 된다. 한편 시멘트의 일부를 석고를 치환할 경우 유동성에 큰 변화는 발생하지 않았으며 이는 석고의 치환량이 크지 않았기 때문이다.

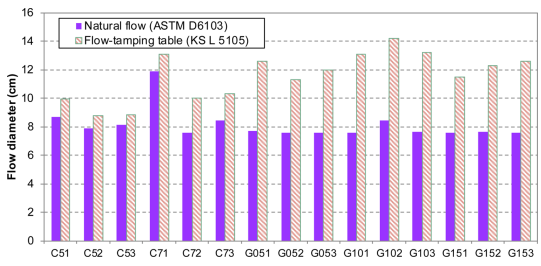

Fig. 1. Flow diameter of fresh mortar grout.

Fig. 2는 수중에서 경화 중인 배합의 응결시간 측정 결과이다. 참고로 일반 포틀랜드 시멘트에 대한 성능 규정인 KS L 5201에서는 공기 중 종결시간 한계를 10시간으로 설정하고 있으나, 수중응결의 경우 이에 대한 규정이 없다. 일반적으로 결합재로 시멘트만을 사용하는 경우는 어떠한 배합에서도 응결지연으로 인한 문제가 발생하지 않는다. 그러나, 석고와 같은 물질이 혼입되면 경우에 따라 응결지연 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있다. 응결이 과도하게 지연될 경우 공동구 내 물의 흐름에 의해 충전제가 쓸려나가는 현상이 발생할 가능성이 있다. 그러나, 실험 결과 본 배합에서 사용하는 수준의 석고량에서는 수중에서 응결지연 문제가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 석고 양에 대해 세 종류의 배합의 응결시간을 측정하였으며 석고량이 전체 분체(시멘트, 규사, 석고) 중량 대비 5%에서 15%까지 증가함에 따라 초결 및 종결 시간 모두 1시간 내외의 편차 만을 나타내었다. 일반 콘크리트의 경우 석고량에 따라 수화반응이 크게 차이 나는 반면, 단위수량이 높고 물시멘트비가 큰 본 충전재의 경우에는 그러한 수준의

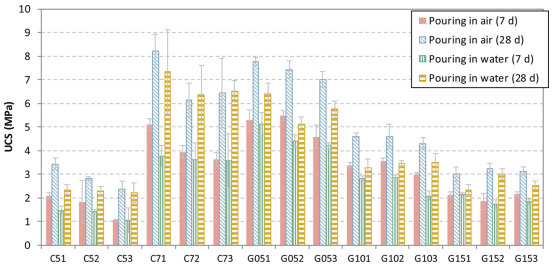

Fig. 3. Uniaxial compressive strength (UCS) of hardened grout.

민감함이 보이지 않았다.

3.2. 압축강도

실험한 배합의 압축강도는 Fig. 3과 같다. 실험 결과 C5 배합의 경우 28일 압축강도가 약 2-3 MPa 수준이며, 시멘트량을 늘린 C7 배합 시리즈의 경우 최대 8 MPa 수준 까지 상승하는 것을 알 수 있었다. 여기서 수중 지반보강을 목적으로 하는 경우 강도는 크게 중요한 요인이 아니며, 단지 해수에 의한 침식을 막을 정도면 된다. Table 2에는, 미국 콘크리트학회(America Concrete Institute, ACI)의 보고서 229에서 제안한 시멘트 기반 지반 충전재의 강도기준이다. 일반적으로 재굴착 등을 고려한 약한 충전(채움)을 위해서는 2.1 MPa 수준의 강도면 적합하며, 혹 경우에 따라 설계 변경 및 재시공 등을 고려하지 않은 반영구형 충진을 위해서는 8.3 MPa 수준이 적합하다. 참고로 본 재료를 사용해야 하는 현장조건을 고려할 때 설계상의 충전재 요구강도를 4 MPa로 선정하였으며, 본 배합 중 C7 및 G05 시리즈의 배합은 이 요구강도를 만족할 수 있다. 또한 모든 배합에 대해 수중 타설을 할 경우 기중타설한 경우에 비해 최대 20% 이상 강도가 감소하지는 않는 것으로 나타났다. 물론 이는 현지 시공 상태 및 주변 공극 연결도 등에 따라 달라질 수 있지만, 그럼에도 불구하고 상대적으로 유속이 느린 지하공동구에서 충분히 목표 강도가 달성될 수 있음을 의미하는 결과이다. 동시에, 화학혼화제량 증가에 따라 강도가 감소함을 알 수 있었다. C51에서 C53까지, C71에서 C73, G051에서 G053까지 수중 불분리제 및 유동화제를 과다하게 사용하면 유동성은 크게 개선되지 않음에도 불구하고 강도에 있어서 일부 악영향을 끼칠 수 있었다. C51배합에 비해 수중불분리제와 유동화제를 추가한 C53 배합의 경우 7일 수중양생 강도 평균이 1.5 MPa에서 1.0 MPa로 감소하였다. C71과 C73을 비교하면 역시 28일 수중양생 강도 평균값이 7.3 MPa에서 6.5 MPa로 감소하는 결과를 확인 할 수 있었다.

3.3. 환경영향성

Fig. 4는 굳지 않은 그라우트 배합을 침지시킨 현탁액의 pH를 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용한 모든 배합은 분체(시멘트, 규사, 석고) 중량 대비 약 1% 이상 수중 불분리제가 혼입되어 있기 때문에 대부분 현탁액 내 pH가 12 이내로 제어 할 수 있었다. 참고로 일반 CGS용 저유동 모르타르는 12.2-13.4 수준의 높은 pH 값을 나타낸다. 그러나, 수중 불분리제의 혼입량을 1%에서 1.5%, 2%로 점차 증가시킬 경우에도 현탁액

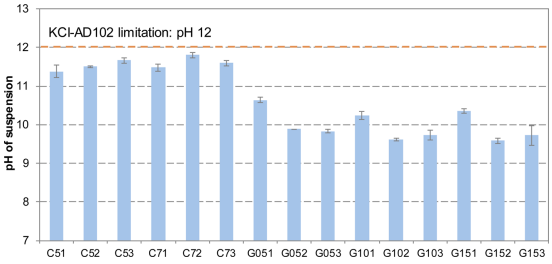

Fig. 4. pH of suspension from fresh grout.

Table 2. Specified limitation of compressive strength of cement fill[14)]

Long-term compressive strength (MPa)	Feature
8.3	Upper limit for applications where future excavation is unlikely: Structural fill and pavement bases
2.1	Upper limit for general applications to allow future excavation with backhoe: General fill
0.3~0.7	Common criterion for a well-compacted soil: Strong enough for most backfilling needs, yet easily-excavatable with conventional digging equipment
0.4	Lower limit for walkability

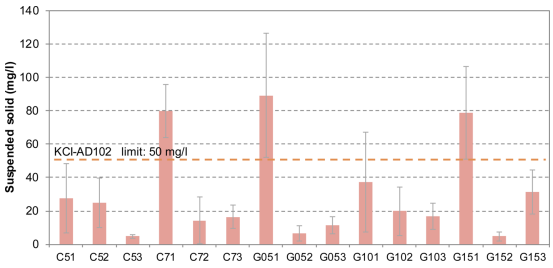

Fig. 5. Concentration of suspended solid in suspension from fresh grout.

pH가 추가로 감소하지는 않는다. 이미 수중 불분리제의 폴리머 체인에 의해 시멘트가 이미 코팅된 상태이고, 이로 인해 수중 불분리제가 흡착한 수분의 내부에 있는 알칼리 이온은 주변의 물로 확산되지 않기 때문에 이러한 현상이 발생한다고 판단된다. 이는 시멘트량 감소 시에도 동일하게 발견된다. 오히려 석고량 증가에 따른 pH 감소효과가 더 명확하다. 잘 알려진 바와 같이, 석고는 지중 뒷채움에서 시멘트에 의한 pH 증가를 막기 위해 자주 사용되는 재료로서, 시멘트와 혼합시 자체적으로 팽창반응(Ettringite 과다형성)을 일으키기 때문에 구조용 재료에는 사용량이 제한되어 있다. 예를 들어 KS L 5201 “포틀랜드 시멘트” 및 KS L 5210 “고로슬래그 시멘트” 등의 구조용 콘크리트를 대상으로 한 시멘트 기준에서는 황산이온(SO_3)의 농도는 5% 이하로 제안되어 있다. 그러나, 본 충전재와 같은 비구조용 저강도 배합에는 사용량을 늘리는 것이 가능할 수 있다.

Fig. 5는 굳지 않은 그라우트 배합을 침지시킨 현탁액의 현탁물질 농도 측정 결과이다. C51을 제외한 수중 불분리제를 1% 사용한 대부분의 배합에서 다른 배합보다 높은 현탁도가 발생함을 알 수 있었다. 수중불분리제 1% 배합 들은 KCI-AD102 기준을 만족하지 못할 수 있으나, 현탁액의 발생량 수준이 일반 CGS (예: 1000 mg/l 수준 이상)와 비교하면 월등히 낮은 수준이다[17]. 즉, 그라우트를 상대적으로 흐르는 물과의 접촉이 적은 부위에 사용할 경우에는 1%의 수중불분리제로도 충분히 환경오염 문제를 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 석회암 기반 지반 등에 존재하는 수중 공동지반의 보강을 위해 사용할 수 있는 석고 혼입 저pH형 수중불분리 그라우트에 대한 기초 실험을 수행하였다. 다양한 종류의 배합을 설계하였으며 이 배합들의 유동성, 강도, 환경영향성을 평가하였다. 유동성은 자연유하, 가압유하의 두 가지 조건에 대해 각각 평가하였다. 강도는 기중 및 수중 주입의 경우에 대해 각각 측정하였다. 환경영향성은 현탁액의 pH 및 현탁물질 농도 두가지로 평가되었다. 석고혼입을 통해 pH를 10 이하로 감소시켰으며, 포틀랜드 시멘트-규사-석고 간의 배합비 및 수중불분리제-유동화제 혼입량에 대한 변동을 통해 모르타르 플로우 7-10 cm, 일축압축강도 4 MPa 이상의 수중불분리 그라우트 배합을 찾아내었다. 이후 이 배합의 성능에 있어서 폐석고 분말 재활용에 따른 영향을 확인하고자 한다.

Acknowledgment

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 지원(과제번호: 20180323)으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 실험을 수행해 준 조선대학교 건축학부 강지웅, 이소연, 조승연 학생에게 감사의 말씀을 전합니다.

References

1. Wilson, W. L., and Beck, B. F., 1988 : *Evaluating sinkhole hazards in mantled karst terrane*. In Geotechnical aspects of karst terrains: exploration, foundation design and performance, and remedial measures, pp.1-24, ASCE.
2. Song, G. J., Yun, H. S., Jang, I. H., Choi, Y. S., and Seo, Y. S., 2015 : *Analysis of scale and shape of limestone cavities using borehole drilling and geophysical investigations*. Korean Society of Engineering Geology, 25(2), pp.251-263.
3. Goodman, R. E., 1993 : *Soluble Rocks: Limestone, Dolomite and Evaporates. Engineering Geology, Rock in Engineering Construction*, pp.143-158, Publisher John Wiley & Sons, Inc.
4. Beck, B., 2012 : *Soil piping and sinkhole failures*. In Encyclopedia of Caves, Second Edition, pp.718-723, Elsevier.
5. Waltham, A.C., and Fookes, P. G., 2003 : *Engineering classification of karst ground conditions*, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36(2), pp.101-118.
6. Katz, A., and Kovler, K., 2004 : *Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM)*. Waste Management, 24(5), pp.501-512.
7. Lee, S. C., Cho, K. H., and Lee, J. S., 2009 : *A Study on*

the reinforcement of railway bridge foundation in the limestone cavity, Proceeding of Conference of Korean Society for Railway, pp.2139-2147.
8. Kim, N. Y., Park, Y. H., and Kim, H. J., 2010 : A case study of foundation reinforcement in limestone cavity, Proceedings of Korean Geo-Environmental Society, pp.371-379.
9. Park, S., Hong, J., and Chun, B. 2013 : *A study on the reinforcement case of bridge foundation in the limestone cavity with CGS method*. Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 14(12), pp.43-52.
10. Ministry of Environment of Korea (ME), 2004 : *Guidelines for the treatment of water quality in groundwater*. Report 38000-67640-67-9731
11. Kim, Y. S., Do, T. M., Kim, M. J., Kim, B. J., and Kim, H. K., 2018 : *Utilization of by-product in controlled low-strength material for geothermal systems: Engineering performances, environmental impact, and cost analysis*. Journal of Cleaner Production, 172, pp.909-920.
12. Korea Concrete Institute (KCI), 2009: *KCI-AD102, Specification for anti-washout admixture for concrete*.
13. Jang, J. G., Ji, S., and Ahn, J. W., 2017 : *Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills*, Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 26(2), pp.71-79.
14. American Concrete Institute (ACI), 1994 : *Controlled low strength materials (CLSM)*. ACI 229R.
15. Tafesse, M., and Kim, H. K., 2017 : *Effect of pretreatment of mine tailings on the performance of controlled low strength materials*, Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 26(3), pp.32-38.
16. Ma, S. J., and Kim, D. M., 2005 : *A study on development of anti washout underwater filling material in and application of the economical filling method for reinforcement of underground cavities*, Journal of the Korean Society of Civil Engineers C, 25(1C), pp.43-53.

김 영 상

- 연세대학교 토목공학과 공학사
- 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사 및 박사
- 현재 전남대학교 토목공학과 교수

백 정 진

- 조선대학교 건축학부 건축공학전공 공학사
- 현재 조선대학교 건축공학과 석사과정

김 형 기

- 일본 Hokkaido University 사회공학부 공학사
- 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사
- 현재 조선대학교 건축학부(건축공학전공) 조교수
- 당 학회지 제25권 6호 참조