

지반주입용 활성화 실리케이트 약액 (ASG) 의 개발 및 적용

Development and Application of Activated Silicate for Chemical Grouting

천 병 식¹⁾, Byung-Sik Chun, 류 동 성²⁾, Dong-Sung Ryu, 조 산 연³⁾, San-Yeon Cho

¹⁾한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾서울산업대학교 정밀화학소재연구소 교수, Professor, Institute of Fine Chemical Materials, Seoul National University of Technology

³⁾신한케미텍 연구소 부소장, Vice-Chief, Shinhan Chemitech Institute

SYNOPSIS : In this study, novel activated silicate grout solution for injection grouting was prepared by the reaction of ordinary waterglass with alkaline earth metal salts mixture by means of the high-speed stirring method with strong shearing force, and its chemical and physical properties were investigated. The variation of its gelation time plotted with the amount of dilution water showed that this novel silicate had better gelation characteristics in comparison with ordinary waterglass. And some other engineering characteristics of this grout such as durability and mechanical properties were investigated experimentally. The whole experimental results established that this novel silicate grout was a good alternative with an existing ordinary waterglass grouting method.

Key words : injection grouting, activated silicate, waterglass, novel grout, durable grout

1. 서 론

지반보강 및 차수 등의 지반개량을 위한 약액주입공법(Chemical Grouting)에 있어서 현재 가장 보편화된 주입약액은 물유리(sodium silicate)계 약액이다. 물유리계 약액은 주입조건 및 목적에 따라 순수용액형과 시멘트를 공용하는 현탁액형 약액 등으로 구분되며, 약액의 구성면에서 여타 고분자계 주입약액 등과 비교할 때 상당히 염가인 점을 고려하면 경제성 대비 지반개량효과라는 측면에서 비교적 우수한 공법으로 인정되어 최근까지도 국내의 건설현장에서 가장 널리 이용되어 오고 있다. 그러나 일반적으로 물유리계 약액은 지반주입 고결후 시간경과에 따라 지반토양내의 흡착수 및 자유수에 의해 주입고결체로 부터 알칼리 성분의 용탈이 진행됨으로써 결국에는 주입재가 전부 유실되는 현상, 다시 말해 내구성이 약한 문제점을 지녀 주입효과 상실에 따른 안전문제 발생의 우려는 물론이고 이로 인한 지하수 오염가능성에 대한 문제도 제기되고 있다. 또한 물유리계 약액은 지반주입시 많은 양의 지하수에 의해 희석될 경우 겔화시간이 매우 지연되어 원하는 주입효과를 얻지 못하는 경우가 많고 때에 따라서는 아예 주입약액이 고결되지 못하고 유실되어 버리는 수도 있어 이에 대한 대책이 절실하다. 따라서 선진외국, 특히 일본 등지에서는 규산소

다를 화학적으로 변성, 개질하여 그 특성을 향상시킨 실리카졸 등의 주입약액이 개발되어 내구성, 수질오염 등에 있어서 많은 문제점을 개선시킨 것으로 알려지고 있으나 아직까지 국내에서는 기술적, 경제적, 현장작업여건의 문제점 등으로 인해 온전히 시행되고 있지 못하고 있는 실정이다. 전술한 바와 같이 물유리의 변성을 통해 얻어지는 실리카졸 계통의 약액은 크게 산성 실리카졸과 중성 실리카졸로 분류할 수 있다. 산성 실리카졸의 경우 대개 물유리를 황산 등의 과량의 산성제와 반응시켜 주생성물로 실리카 성분과 부산물로서 sodium sulfate 등의 황산염 등을 포함하는 준안정상태(metastable state)의 실리카졸 수용액을 적절한 제조 플랜트를 통해 현장제조하여 사용하는 것인데 현장제조원료로서 황산 등의 위험물질을 취급해야 하는 문제점이 있어 적용에 상당한 어려움이 있다. 반면에 중성 실리카졸의 경우는 물유리를 특정한 산성제 등으로 전처리한 후 이온교환수지 또는 filtration membrane 등을 통과시켜 부산물인 나트륨 등의 양이온 및 셀레이트 등의 음이온을 제거, 농축하여 얻어지는 것으로 제조공정이 까다롭고 제조시간이 비교적 길어 현장제조보다는 대개 별도의 공장에서 제조, 공급되어야 하기 때문에 성능면에서는 신뢰성이 있지만 약액의 제조단가가 상대적으로 높아 경제성에서 다소 떨어지는 단점이 있다.

이상과 같이 기존의 물유리계 약액의 단점을 보완하기 위한 약액으로서 실리카졸계의 약액의 경우 제반 특성이 우수한 주입약액으로 알려져 있지만 전술한 바와 같은 적용상의 단점 및 경제성면의 문제가 있는 것 또한 사실이다. 따라서 기존의 물유리계 약액주입공법에서 발견되는 제반 특성면에서의 단점 (용탈, 지하수 회석에 의한 미고결 현상 등)을 보완하면서도 적용성 및 경제성면에서 기존의 실리카졸계 주입약액에 비해 보다 적절한 개질 물유리계 약액에 대한 개발 필요성이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 대부분의 특성면에서 기존 물유리계 약액의 단점을 보완할 수 있는 새로운 화학조성의 물유리-개질 활성 실리케이트 주입약액 (Activated Silicate Grout)을 고안하여 그의 제조방법(원료배합 및 조건, 장치 등) 및 겔화 특성, 내구특성, 겔강도 등 지반주입약액으로서의 제반 공학적 특성을 규명하였다.

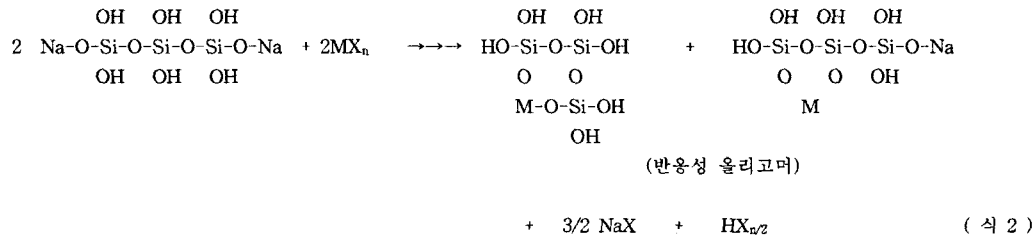
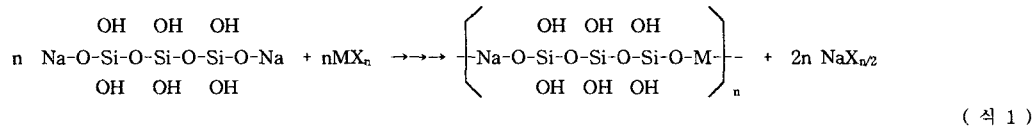
2. 활성 실리케이트 주입약액의 제조 및 특성

2.1. 활성 실리케이트 주입약액의 제조원리

활성 실리케이트의 제조는 물유리(규산)의 경화반응제에 의한 겔화과정을 기초로 하기 때문에 물유리 겔화과정의 이해가 필요하다. 물유리의 경화반응제에 의한 겔화경로는 첫째 단계로 물유리(규산)와 경화제의 반응에 의해 중간체로서 콜로이드상의 규산 올리고머(졸상태)를 생성하고 둘째 단계로 이 올리고머들이 고분자량 상태로 중합하여 실리카 중합체(겔상태)로 전환되는 것으로서 첫째 단계와 둘째 단계는 통상의 조건에서 시간간격이 거의 없이 연속적으로 일어나게 된다. 한편, 여기서 경화반응제로는 황산(H_2SO_4) 등의 산류(acids), 중탄산나트륨($NaHCO_3$) 등의 염기류(bases) 및 염화 칼슘($CaCl_2$) 등의 무기염류(salts)가 적용될 수 있다. 기존의 실리카졸의 경우는 이러한 물유리의 겔화과정에 있어서 경화반응제로서 산을 이용하여 물유리의 겔화반응을 첫째 단계까지만 진행시키고 둘째 단계로의 이행을 인위적으로 차단한 것인데 이렇게 하면 중간체인 규산 올리고머의 분자량이 최대로 성장하여 이를 차후 경화시킬 경우 보다 안정하고 견고한 실리카 겔이 얻어지기 때문이다. 따라서 이상의 원리를 응용하여 본 연구에서는 기존의 산성 반응제를 이용하는 것을 대신하여 경화반응제로서 보다 안전한 화합물인 알칼리토 금속염(alkaline earth metal salts)을 사용하여 물유리의 올리고머화 반응을 유도하여 활성 실리케이트를 제조하였다.

일반적인 반응조건하에서 물유리와 알칼리토 금속염의 반응은 아래의 (식1)과 같이 진행되어

겔화에 이르는 현상을 보였지만 이 반응을 2,000 rpm 이상의 고속교반조건으로 진행시킬 경우는 겔화가 억제되고 장시간 안정한 중간체인 반응성 올리고머 상태의 졸을 얻을 수 있었는데, 이때의 반응은 (식2)와 같이 진행되기 때문으로 추정되었다.



M : alkaline earth metal (Mg, Ca etc.)
 X : halogen, sulfate (-F, -Cl, -Br, -SO₄ etc.)
 n : 1 or 2

(식 2)와 같이 생성되는 반응성 올리고머(활성 실리케이트)는 차후 별도의 경화제에 의해 망상 구조형의 구조를 이룰 수 있는 고분자량의 실리카 고분자로 성장할 수 있는 중간체이기 때문에 이후 반응에 의해 생성되는 겔은 보다 견고하고 안정한 겔이 될 수 있는 조건을 충족할 것으로 사료되었다.

2.2. 제조장치 및 배합시스템

활성 실리케이트를 현장에서 직접제조, 사용하기 위한 제조장치는 그림 1. 에 나타낸 바와 같이 활성화 반응물(알칼리도 금속염 용액)과 물유리 용액을 적절한 비율로 고속혼합, 교반하여 얻는 체계로 구성하였으며 여기서 가장 중요한 혼합, 교반부는 내부교반구조가 특수설계된 high shear line mixer를 사용하였다.

또한, 그림 2. 에 제조장치 및 배합장치를 포함하는 주입용 배합시스템을 표시하였는 바 활성 실리케이트 제조장치의 부착 이외에는 기존의 물유리계 약액주입공법(LW, SGR 등)의 시스템과 거의 동일한 시스템으로 구성하였다.

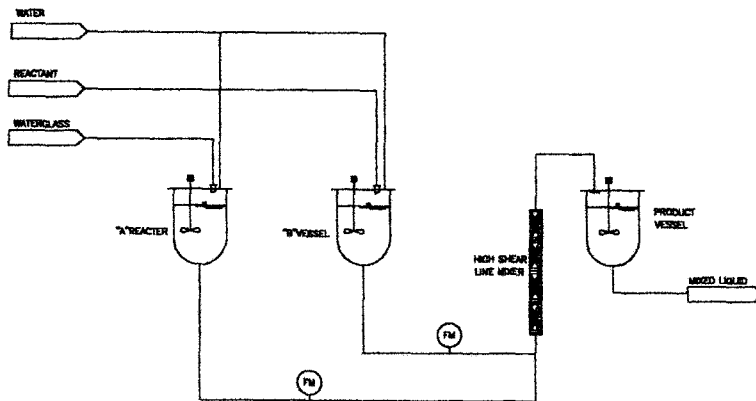


그림 1. 약액 제조장치의 개략도

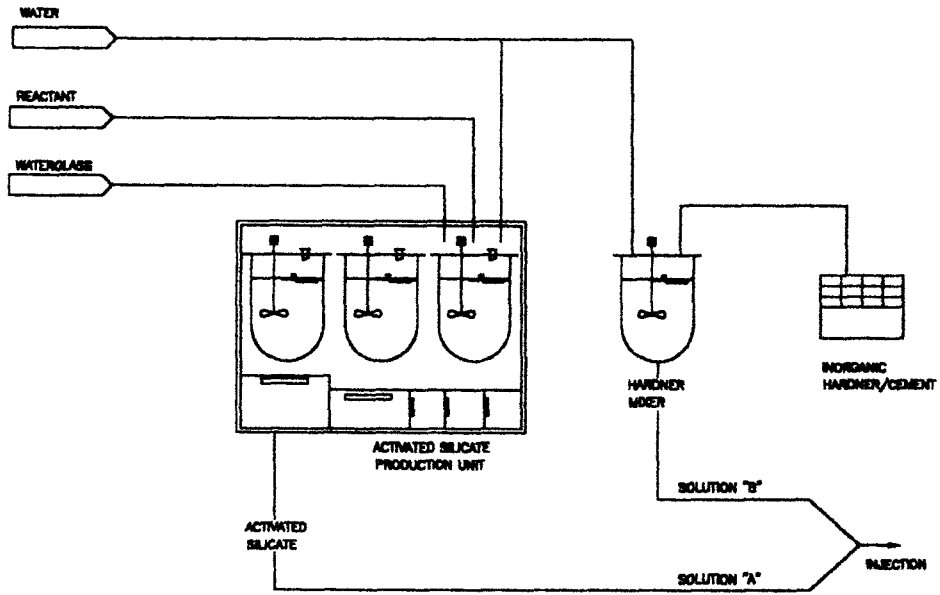


그림 2. 약액 배합 주입 시스템의 개략도

2.3. 활성 실리케이트 약액의 겔화 특성

본 연구에서 제조한 활성 실리케이트 약액의 겔화 특성을 규명하기 위하여 동일한 농도의 일반 물유리와 활성 실리케이트를 대표적인 무기경화제인 중탄산 나트륨을 이용하여 겔화시킬 경우의 gelation time 을 측정 한 결과와 동일한 배합에 의한 물유리와 활성실리케이트 약액을 별도의 희석수를 이용하여 희석시킬 경우 희석율에 따른 gelation time의 지연을 그림 3. 및 그림 4. 에 각각 표시하였다.

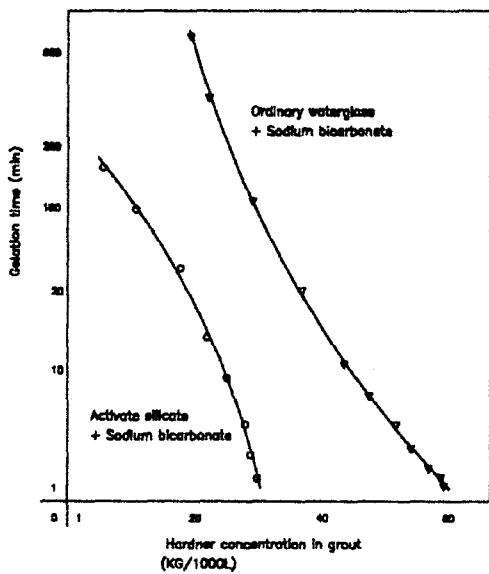


그림 3. 경화제 양에 따른 gelation time

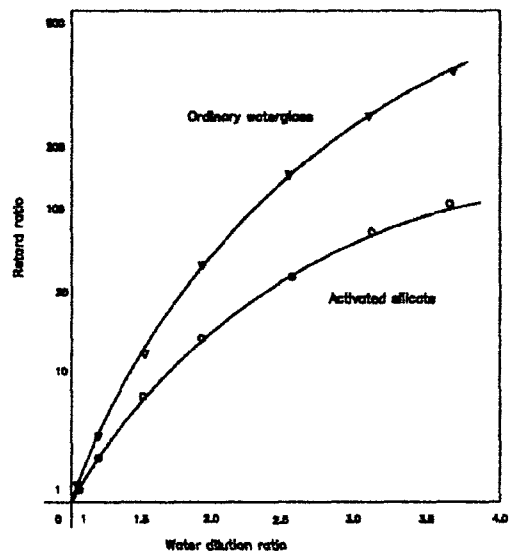


그림 4. 희석수의 양에 따른 gelation time

그

그림 3.과 같이 활성 실리케이트 약액은 일반 물유리 약액에 비하여 동일한 농도에서 동일한 양의 중탄산나트륨에 의한 gelation time 이 훨씬 단축되는 경향을 나타내었는데 이는 전술한 바와 같이 올리고머 형태의 중간체 형성에 의해 어느 정도 반응이 진행된 상태이므로 이는 최종 중합까지의 반응이 훨씬 빠르게 도달된다는 사실을 증명해 주는 결과로 사료된다. 또한 그림 4. 와 같이 활성 실리케이트는 일반 물유리에 비해 희석수에 의한 gelation time 의 지연이 훨씬 적은 경향을 나타내었는데 이 역시 활성 실리케이트는 올리고머화에 의해 어느 정도 반응이 진행된 상태로 분자량이 성장되어 있기 때문에 물에 희석이 되더라도 일반 물유리에 비해서 최종반응에 이르기까지 반응이 상대적으로 원활하게 진행되는 것으로 사료되었다.

한편, 이와 같은 결과는 활성 실리케이트 약액의 경우 지반주입시 물에 희석되더라도 기존의 일반 물유리에 비해 gelation time의 지연이 적어 많은 양의 물에 의해 희석될 경우라도 유실될 가능성이 적은 주입약액인 것으로 판단되었다.

2.4. 활성 실리케이트 겔의 특성

아래의 표 1. 에 활성 실리케이트 및 일반 물유리를 시멘트 밀크를 사용해 경화시킨 겔의 압축강도, 투수계수 및 알칼리 용탈량의 측정결과를 나타내었다.

표 1. 활성 실리케이트 겔의 특성

시 험 항 목	물유리/시멘트 겔	활성실리케이트/시멘트 겔	비 고
일축압축강도(kg/cm ²) (δ_{28})	18.5 ¹⁾	26.2 ²⁾	1) 물유리 (3호규산소다 50% 희석용액) + 시멘트 밀크 (W/C = 50%) 2) 활성 실리케이트 (50%) + 시멘트 밀크 (W/C = 50%)
투수계수 k (cm/s)	1.7×10^{-7}	3.6×10^{-8}	변수위 투수시험
알칼리 용탈농도(mg/L)	32.6	6.7	변수위 투수시험후 투과수 분석 (Na)

표 1. 에서와 같이 동일한 배합조건하에서 물유리 겔과 활성 실리케이트 겔의 일축압축강도 및 투수계수를 비교하면 활성 실리케이트 겔이 일반 물유리 겔에 비해 40% 이상의 강도 증진을 나타내었고 투수계수도 향상되는 것으로 확인하였는데 이는 전술한 바와 같이 활성 실리케이트의 분자량 증진에 따른 겔 조직의 치밀화 효과에 기인하는 것으로 판단되었다.

또한 겔로부터의 알칼리 용탈(Na⁺ 이온 검출)을 변수위 투수시험 여액으로부터 측정하였는데 일반 물유리를 사용한 겔로부터는 32.6 mg/L 의 많은 양의 나트륨이 용출되었으나 활성 실리케이트 로부터는 상대적으로 훨씬 적은 양인 6.7 mg/L 의 나트륨이 검출되어 상대적으로 용탈에 대한 내구성이 우수함을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 새로운 화학조성을 갖는 활성 실리케이트 약액을 제조하여 주입약액으로서의 제

반 공학적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일반 물유리와 특정한 알칼리토 금속염과 반응시켜 올리고머형의 준안정 상태의 활성 실리케이트 약액을 제조할 수 있었다.
- 2) 활성 실리케이트 약액을 겔화되지 않은 상태로 제조하기 위해서는 고속교반(2,000 rpm 이상) 반응이 필요로 하였다.
- 3) 고속교반반응을 위해서 특별히 설계된 high-shear line mixer를 채택하여 현장용 약액제조장치를 제작하였으며 이 현장용 약액제조장치를 부착하여 주입시스템을 구성하였다.
- 4) 약액의 겔화 특성을 조사한 결과 이것은 동일한 조건하에서 기존의 일반 물유리에 비해 전반적으로 gelation time 이 단축되었고 물에 희석될 경우 지연시간이 훨씬 짧아 우수한 겔화 특성을 갖고 있는 것을 확인하였다.
- 5) 활성 실리케이트-시멘트 겔은 물유리-시멘트 겔과 비교해 상대적으로 일축압축강도, 투수계수 및 알칼리 용탈특성 등에서 모두 우수하였다.
- 6) 이상의 결과를 볼 때 본 연구에서 제조한 활성 실리케이트 약액은 기존의 물유리계 약액 주입공법을 대체할 수 있는 우수한 주입약액임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 있어 많은 지원을 하여 주신 뉴텍건설화학(주)와 성하지질(주)의 임직원 여러분께 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Office of the Chief of Engineers(1973), Department of the Army, Chemical Grouting, EM 1110-2-3504, Washington, D.C.
2. 島田俊介 外(1989), “最先端技術の 藥液注入工法”, 理工圖書
3. C. Caron(1965), “phsico-chemical study of silica gels”, Ann. ITBTP-Essais Mesures, Vol. 81, pp.447-484
4. R. J. Krizek and M. Madden (1985), “Performance of chemically grouted sands”, Issues in Dam Grouting, Geotechnical Ebgineering division, ASCE, New York