

강관다단공법에 적용되는 썰링재 (벤토나이트-시멘트 슬러리)의 점성 특성에 대한 실험

사공명^{1*} · 이준석¹ · 박정준¹ · 조충식²

¹정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목연구본부 연구원

²비회원, 지오택엔지니어링(주) 설계팀 상무

An experimental study on the viscosity features of sealant (bentonite-cement slurry) in umbrella arch method

Myung Sagong^{1*} · Jun S. Lee¹ · Jeongjun Park¹ · Chungsik Cho²

¹Researcher, Korea Railroad Research Institute

²CTO, Geotech Engineering Co., Ltd.

*Corresponding Author : Myung Sagong, rockcore@krii.re.kr

Abstract

In this paper, viscosity features of sealant (bentonite-cement slurry), which is used for umbrella arch method in tunnel, were studied. The sealant must secure optimal strength and capacity for the waterproof and stabilization of borehole as well as to satisfy groutability. In this study, the variation of viscosity was measured with different mixing processes. With an increase of initial mixing period with water and bentonite mixture, the required time for the rapid increase of viscosity of the sealant is shorten. With increase of mixing period, the possibility of swelling of bentonite will increase and this can lead increase of the viscosity of the mixture. In addition, the behaviors of sealant vary with a drastic increase of the viscosity: thixotropy and rheopexy. Furthermore, the bentonite/water mixing period influences on the bleeding features of the sealant. Further study is required to introduce the guideline, which can be applicable in the field in the aspect of required capacity of the sealants and mixing processes of the ingredients.

Keywords: Umbrella arch method, Sealant, Bentonite, Viscosity, Tunnel reinforcement

초 록

본 연구에서는 강관다단공법에 사용되는 썰링재의 점도특성에 대한 연구를 수행하였다. 썰링재는 차수 및 공벽 안정성 확보 기능과 더불어 후속공정인 그라우트재 주입 시 주입

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(5)773-786(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.5.773>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received June 14, 2018

Revised July 13, 2018

Accepted July 19, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

이 원활히 될 수 있도록 최소한의 강도를 보유하여야 한다. 교반조건에 따른 썰링재의 특성을 점도를 통하여 간접적으로 파악하였다. 초기 물과 벤토나이트의 사전 교반 특성에 따라 점도의 급격한 증가 시점이 상이하게 나타났다. 사전교반 시간이 길수록 벤토나이트가 팽윤 할 기회가 많아지므로 상대적으로 짧은 시간에 점도의 급격한 증가 현상이 나타났다. 또한 급격한 점도 증가 이전 단계에서는 물/시멘트/벤토나이트 혼합물이 텍소트로피 거동을 보이다가 점도 증가 이후부터는 레오펙시 거동을 보인다. 또한 사전 교반 시간은 혼합물이 재료분리 거동에도 영향을 미침이 확인이 되었다. 따라서 본 연구결과를 바탕으로 썰링재의 요구성능 및 배합절차에 대해서 추가 논의가 필요하며, 향후 시멘트와 벤토나이트의 상호작용에 대해 심도 깊은 연구를 통하여 현장에서 적용 가능한 가이드 도출이 필요하다.

주요어: 강관다단공법, 썰링재, 벤토나이트, 점도, 터널보강

1. 서론

강관다단공법은 터널 상부에 파쇄대가 존재하는 등 지반조건이 양호하지 않을 경우 터널 굴착 전에 터널 상부에 강관을 삽입하고 그라우팅을 시공하여 터널에 작용하는 지반압을 지지하는 공법이다. 결합된 삽입 강관과 주입재는 빔 역할을 하며 아칭 효과를 유발하여 터널 천단부와 막장면의 안정성을 확보하여 천단의 붕락방지나 지하수 유입을 차단한다. 강관다단공법은 지반보강을 위한 보조공법으로서 적용 대상 지반은 풍화토나 풍화암 지반조건 혹은 단층 파쇄대가 존재하는 지반조건에서 적용이 가능하다.

강관다단공법은 국내터널 현장에서 자주 사용됨에도 불구하고 해당 공법의 검증된 설계법의 없어 기계학습법과 한계평형해석기법을 적용한 확률론적 설계법(Lee et al., 2018)의 제안이나 주입의 적정성 평가를 위하여 유도 초음파를 적용한 연구 사례(Hong et al., 2013) 등이 있다. 이와 더불어 최근 들어 강관다단 공법 시공 중 천공 홀과 강관사이를 채우는 썰링재의 적정 겔화 시간이 지켜지지 않는다는 지적이 있었다. 현재 국내에는 썰링재의 적정 겔화 시간에 대한 기준이 없는 상태이므로 이와 같은 현상이 발생하였으며, 그 결과 썰링재의 배합비에 따른 강도특성에 대한 연구결과를 도출하였으며 이를 바탕으로 팽윤도 20 이상의 나트륨계 벤토나이트의 사용하고 일반배합 기준으로 23 ± 1 시간을 적정 겔화시간으로 설계 시 반영하도록 권장하고 있다(KR network, 2017). 하지만 장시간의 경화시간은 현장에서 강관다단공법의 적용에 제한점이 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 강관다단 공법에서 사용되는 썰링재의 유변학적 특성을 파악하여 현재 현장에서 적용하고 있는 기준의 적절성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 벤토나이트의 특성

벤토나이트는 토목 및 수리시공 현장에서 오랫동안 사용된 재료로서 댐의 코어나, 제체의 라이닝, 차수벽체, 그라우팅등 다양한 용도로 사용되었다. 벤토나이트는 점토광물인 몬모릴로나이트(Montmorillonite)로 구성되어 있다. 몬모릴로나이트는 퇴적된 화산재의 풍화과정에서 발생을 하며 나트륨과 칼슘계 몬모릴로나이트를 가장 많

이 이용 된다. 몬모릴로나이트는 삼층 구조의 광물그룹인 스�멕타이트(smectite)의 대표적인 점토 광물이다. 지반 공학 측면에서의 벤토나이트의 주요 특성은 1) 팽윤거동, 2) 양이온 교환, 3) 미립의 입자구성을 들 수 있다(Koch, 2002). 특히 팽윤 효과를 많이 활용을 하는데 벤토나이트는 점토광물의 8~20배 물을 흡수할 수 있으며 체적으로 30배까지 팽윤이 가능하다. 팽윤의 발생은 물분자 표면에 존재하는 양이온과 몬모릴로나이트 광물의 입자표면에서의 양이온 교환 특성으로, 물분자가 점토광물 표면에 부착하면서 발생한다. 수분과 혼합된 몬모릴로나이트의 표면에서는 나트륨 입자가 이탈하면서 음전하를 띠게 되며 물과 결합하여 다양한 구조를 형성하게 된다(Fig. 1). 이때 구조적 형태는 치환 가능한 음전하 혹은 양전하의 전하밀도에 따라 결정된다. 결국 이 전하밀도는 몬모릴로나이트 표면에 부착되는 수분층의 두께와 관련이 있으며 최종적으로 몬모릴로나이트의 팽윤 특성과 관련이 있다.

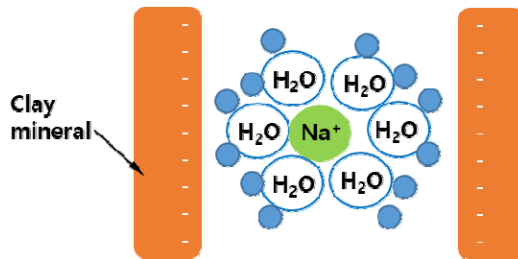


Fig. 1. Ionic interaction between clay minerals

이러한 팽윤의 거동에 있어 나트륨계 몬모릴로나이트가 칼슘계 몬모릴로나이트 보다 더 많이 팽윤하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 국내에서 채취되는 몬모릴로나이트는 칼슘계가 많은데 채취된 칼슘계 몬모릴로나이트는 칼슘이온을 나트륨 이온으로 치환하는 과정을 거친다(Noh et al., 2003). 치환 과정에서는 탄산나트륨(Na_2CO_3)과 혼합을 통하여 나트륨과 칼슘이온의 치환이 이루어진다(Durham, 1996).

음전하인 점토광물이 물입자의 양전하를 끌어당기면서 입자 주변에는 함수층이 형성되는데 이 층을 이중확산층(Diffusive Double Layer, DDL)이라고 한다(Fig. 2). 따라서 이중확산층의 특성은 광물의 특성과 공극수의

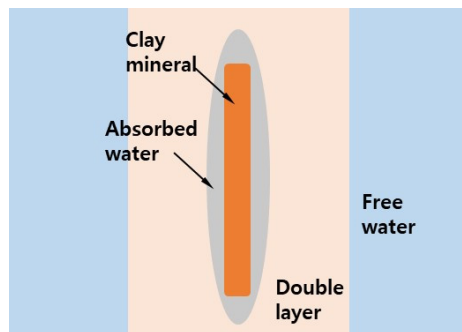


Fig. 2. Clay mineral and diffusive double layer

화학적 특성에 따라 결정된다. Fig. 3에서 확인 할 수 있듯이 나트륨계 몬모릴로나이트가 다른 점토광물에 비하여 월등히 두꺼운 이중확산층을 구성한다.

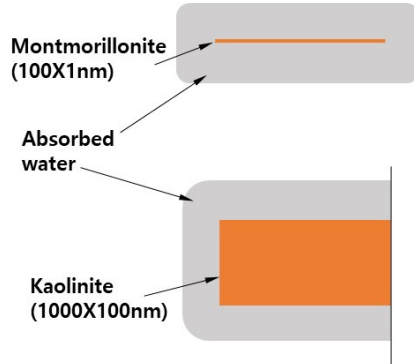


Fig. 3. Absorbed water and relative size of clay minerals (Lamb, 1958)

벤토나이트 자체의 특성에 대해서는 다양한 연구가 수행되었으며 그 결과는 다음의 논문에서 확인할 수 있다 (Ahmed et al., 2016; Luckham and Rossi, 1999; Noh, 2002; Noh et al., 2003; Kim et al., 2017).

이러한 특성을 가지는 벤토나이트에 강관다단공법에서 사용되는 썰링재 기능을 만족하기 위하여 시멘트를 혼합하는데 이때 나트륨계 벤토나이트에 있는 나트륨 이온이 시멘트에 존재하는 칼슘이온으로 대체가 된다. 칼슘 벤토나이트는 상대적으로 높은 부착강도를 가지면서 입자가 응집을 하게 되어 상대적으로 높은 겔강도(gel strength)를 보인다.

강관다단공법에서 썰링재로 사용되는 벤토나이트-시멘트 슬러리는 공벽의 안정, 차수, 주입재의 역류방지, 지반과 강관의 일체(주입강관의 고정) 등의 역할을 한다. 따라서 공벽의 안정 및 역류방지가 될 만큼 충분한 재료의 결합강도와 더불어 주입 시 주입재가 썰링재를 뚫고 나갈 정도의 최소한의 결합강도가 요구된다. 이처럼 복잡한 요구 조건에 비해 강관다단공법의 썰링재로서 벤토나이트-시멘트 혼합물이 갖추어야 할 특성에 대한 정확한 규정은 존재하지 않으며 다만 앞서 언급한 바와 같이 한국철도시설공단에서 규정한 23 ± 1 시간을 적정 꺾화시간을 권장하는 것이 가장 구체적인 수치이다.

벤토나이트-시멘트 혼합물은 상당히 복잡한 재료로서 물에 대한 두 재료의 반응뿐만 아니라 물, 벤토나이트, 시멘트 각 재료간의 상호작용도 상당히 복잡하다. 벤토나이트-시멘트 혼합물은 양생 시간과 배합과정에 따라 그 특성이 상이하므로 이에 대한 특성파악이 필요하다.

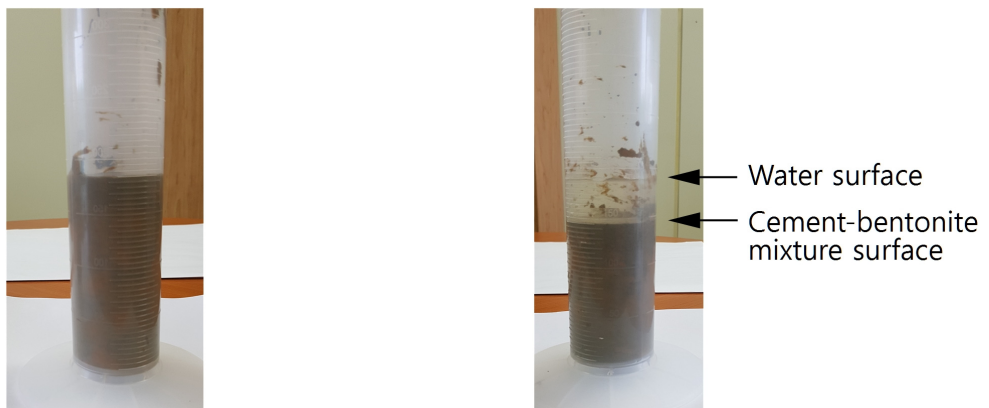
강관다단공법에서 썰링재로 적용되는 만큼 1일 이내 단기 거동특성에 대한 연구결과는 거의 없으며, 장기 거동에 대해서는 Durham (1996)이 제시한바 있다. Duham (1996)은 물/시멘트비 4, 6, 8, 10, 12 조건에서 벤토나이트 함량 5, 10, 15, 20%를 추가하여 1, 2, 14, 28, 56, 84, 168, 252, 336 일의 전단강도를 측정하였다. 베인시험기를 이용한 전단실험이었으며 시멘트와 벤토나이트의 양에 따라 그리고 시간의 경과에 따라 전단강도는 증가하는 추

세를 보였다. 1일 양생기간 조건에서는 물/시멘트비에 따른 전단강도의 차이는 크지는 않으나 시간이 경과함에 따라 물/시멘트비에 따른 전단강도의 차이는 뚜렷하게 발생하였다. 벤토나이트의 양이 많을수록 초기 강도발현이 크게 나타나며, 전단강도의 증가는 시간에 따라 지속적으로 발생하였다. 이러한 현상은 초기에 벤토나이트가 팽윤 반응을 하면서 자유수의 부재로 시멘트가 충분한 수화반응을 하지 못하는 상황이므로 시멘트 수화반응이 장기간에 걸쳐 발생하는 것을 알 수 있다. SEM 관측을 통해서 수화반응에 의한 시멘트입자의 성장을 확인할 수 있었으며 바늘형태의 시멘트 입자는 시간에 따라 길어지고 두꺼워지며 입자간 결합이 더욱 강화됨을 확인할 수 있었다.

3. 벤토나이트-시멘트 혼합물의 특성

시멘트-벤토나이트 혼합물은 매립지의 차수층으로 많이 사용되므로 관련된 연구가 다수 있다. 해당 연구에서의 관심은 시멘트-벤토나이트 혼합물의 차수능($10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec 수준)이나 화학적 저항성과 장기 강도 특성이므로 강관다단공법에서 적용하는 시멘트-벤토나이트의 요구 성능과는 다소 차이가 있다(Koch, 2002). 특히 강관다단공법에 사용되는 쉘링재는 단기적인 특성에 대한 파악이 필요하므로 기존의 연구 방향과는 다소 차이가 있다. 따라서 본 논문에서는 시멘트-벤토나이트 혼합물의 배합특성 및 시간에 따른 점도특성에 대해서 살펴보고자 한다. 현장에서 사용되고 있는 물/시멘트/벤토나이트 배합비를 적용하였다(물/시멘트/벤토나이트 배합비는 100/23/7 기준을 적용). 본 논문에서 수행된 실험은 해당 배합비를 기준으로 수행이 되었다.

Fig. 4는 배합방법에 따른 시멘트-벤토나이트 혼합물의 특성을 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 물과 벤토나이트를 10분간 사전 교반한 후 물-벤토나이트 혼합물에 시멘트를 투입하여 10분간 추가 교반을 하였다. 교반은 인력에 의한 교반이며 120 rpm 수준으로 교반을 하였다. Fig. 4(b)는 물, 시멘트, 벤토나이트를 한꺼번에 교반한 사례이며 약 5분간 교반을 수행하였다. Fig. 4는 교반 완료 후 10분 경과한 시점에서 촬영한 사진으로 Fig. 4(b)에서 재료



(a) Sequential mixing of water, cement and bentonite for 20 minutes

(b) Simultaneous mixing of water cement and bentonite

Fig. 4. Bleeding of water/cement/bentonite mixture

분리가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 전체 혼합체의 체적은 190 ml 이며 이중 45 ml의 물이 재료분리로 혼합물의 상부에 층을 이루었다. 이러한 현상은 벤토나이트의 사전 교반이 충분하지 않은 현장에서 재료분리의 발생 가능성을 보여주고 있으며, 벤토나이트와 물의 사전교반의 중요성을 보여주고 있다. 실제 강관다단 현장은 풍화암 및 파쇄대가 존재하는 구간이므로 이처럼 재료분리가 발생할 경우 분리된 물은 절리 및 파쇄대를 따라 누수가 될 가능성이 높으므로 결국에는 함수비가 낮은 시멘트-벤토나이트 혼합물이 자중에 의해서 공벽 바닥에 침전된 형태로 남게 된다. 이러한 현상으로 인하여 쥘링재로써 확보해야 할 기능을 유지할 수 없게 되므로 물과 벤토나이트의 사전 교반은 상당히 중요하다.

쥘링재 주입 후 재료의 상 변화를 파악하기 위하여 본 논문에서는 회전형 점도계를 이용하여 물-시멘트-벤토나이트 혼합물의 시간에 따른 점도 변화를 측정하였다(ASTM, 2014). 회전형 점도계는 원통형의 스피ن들을 회전시켜 계측되는 전단률과 전단응력을 바탕으로 점도를 측정한다. Fig. 5와 같은 형태의 원통형 스피ن들은 측정 실험체의 점도 범위에 따라 선택이 가능하며, 점도 측정과정에서 계측되는 부하의 범위가 100% 이상이 되지 않도록 실험체의 점도에 맞는 스피ن들의 선택이 중요하다.

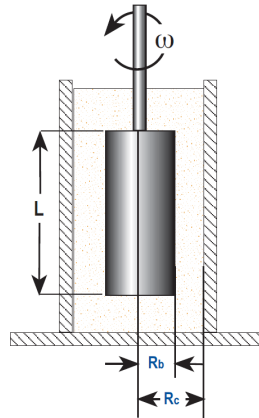


Fig. 5. Measurement of viscosity using viscometer, features of spindle L, spindle length, \$R_b\$, and \$R_c\$ radii of spindle and container

회전형 점도계를 이용한 점도의 측정 원리는 다음과 같다.

$$\dot{\gamma} = \frac{(2\omega R_c^2 R_b^2)}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L} \quad (2)$$

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (3)$$

여기서, ω 는 스피들의 각속도(rad/sec), R_c 콘테이너의 직경(cm), R_b 스피들의 직경(cm), x 전단률 계산 지점(cm), M 장비로부터 인가되는 토크, L 스피들의 유효 길이, τ 전단응력, $\dot{\gamma}$ 전단율이다.

이러한 특성을 가진 회전형 점도계를 이용하여 아래와 같이 두 조건에 대한 시간에 따른 점도를 측정하였다. 물과 벤토나이트 15분 배합 후 시멘트를 추가하여 15분 배합, 총 30분을 배합한 조건과 물, 벤토나이트, 시멘트를 섞어서 10분간 배합한 조건에 대한 점도를 측정하였다. 첫 번째 조건의 경우 30분 배합 시 점도 측정결과는 Table 1과 같다. 배합 이후 초기에는 저점도 조건에서 측정 가능한 스피들(LV2)을 사용하였으며 겔화가 진행됨에 따라 점도가 증가하므로 해당 점도 조건에 적절한 스피들(LV3)로 교체를 하여 실험을 수행하였다. 또한 동일 스피들 상에서도 점도가 변하므로 RPM 조정(10→0.1)을 통해서 일정한 수준의 토크가 유지될 수 있도록 실험을 수행하였는데 토크값이 10% 이하이거나 100% 이상인 경우 장비의 오차범위를 벗어나므로 토크값이 10~100% 사이의 값으로 유지될 수 있도록 하였다.

Table 1. Viscometer test results with water/cement/bentonite mixture with 30 minutes stirring

Elapsed time (min)	Viscosity (centipoise, cp)	Toque (%)	RPM	Spindle type
16	1,252	41.7	10	LV2
27	1,053	35.1	10	LV2
46	1,580	52.8	10	LV2
55	1,784	59.5	10	LV2
65	1,968	65.6	10	LV2
73	2,787	92.9	10	LV2
77	25,550	85.2	1	LV2
82	187,400	62.5	0.1	LV2
85	470,900	39.2	0.1	LV3
95	4,138,000	39.4	0.01	LV3
129	4,295,000	35.0	0.01	LV3

Table 1의 내용을 그림으로 표현한 것이 Fig. 6이다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 실험 시작 후 약 70분 경과하는 시점에서 급격한 점도의 변화가 발생하는 것을 알 수 있으며 90분 수준에서 측정범위에서의 한계치에 도달하였다.

각 단계별 재료의 상태는 Fig. 7에서 확인할 수 있으며, Fig. 6과 연계하여 혼합물의 표면의 상태를 관측하면 혼합물의 겔화 상태를 이해 할 수 있다.

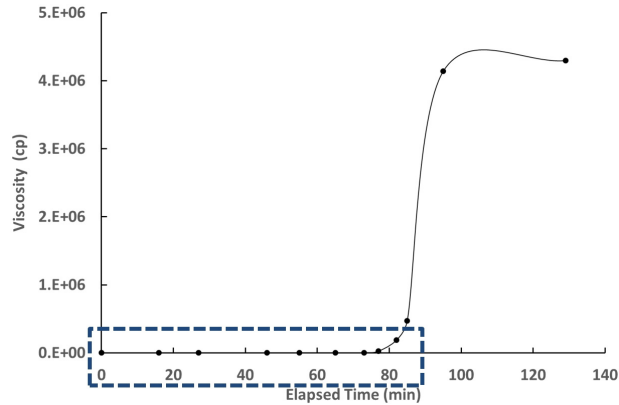
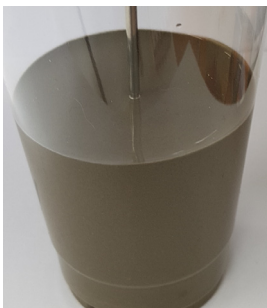
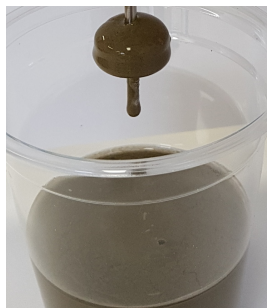


Fig. 6. Variation of viscosity of the water/cement/bentonite mixture with time after 30 minutes stirring

Fig. 7(a)는 점도실험 직후이며 Fig. 7(b)는 실험 시작 47분 경과 후, Fig. 7(c)는 실험 시작 후 107분 경과 후의 사진이다. 47분 경과 시점에서 혼합물의 표면상태는 초기 상태와 크게 다르지 않으며 혼합물의 유동성이 확인이 되는 상황이다. 스피ن들을 시료부터 제거 하더라도 회전된 자리는 주변의 재료로 되메워져서 혼합물 표면에서 점도 실험의 흔적이 보이지 않는다. 이러한 점은 점도 측정결과에서도 확인할 수 있다. 이에 비해 Fig. 7(c)와 같이 점도가 급격히 변환 상태에서 스피ن들을 회전시키면 스피ن들이 회전한 흔적이 남는다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 혼합물이 겔화된 상태이므로 일부 자립이 가능한 상태라 스피ن들의 회전에 혼합물에 미치는 영향은 제한적이므로 Fig. 7(c)와 같은 형태를 유지하는 것으로 판단된다.



(a) Initiation of the rotation of the spindle



(b) 47 minutes after the initiation of the test



(c) 107 minutes after the initiation of the test

Fig. 7. Specimen surface conditions for the water/cement/bentonite mixture with time

개별 시간대에 스피ن들 회전 시 측정되는 점도와 시간간의 상관관계를 보면 혼합물의 특성을 추가로 확인할 수 있다. Fig. 8은 실험 시작 후 16, 27, 46, 55, 65분 경과한 시점에서 스피ن들 회전에 따른 계측 점도값을 나타낸 그림이다. 혼합물의 특성이 틱소트로피(thixotropy) 현상을 보이는 것을 그림 상에서 확인할 수 있다. 혼합 후 응결된

입자가 초기 점도 측정값을 증가 시키나 스피ndl의 회전으로 응결된 입자구조가 파괴가 되면서 점도가 감소하는 특징이 나타난다. 또한 각 경과 시점별 최초 점도 측정값은(Fig. 8에서 각 케이스별 첨두값) 경과 시간에 따라서 증가하는데 이 또한 시간의 경과에 따른 입자의 응결 정도가 강화됨을 알 수 있다.

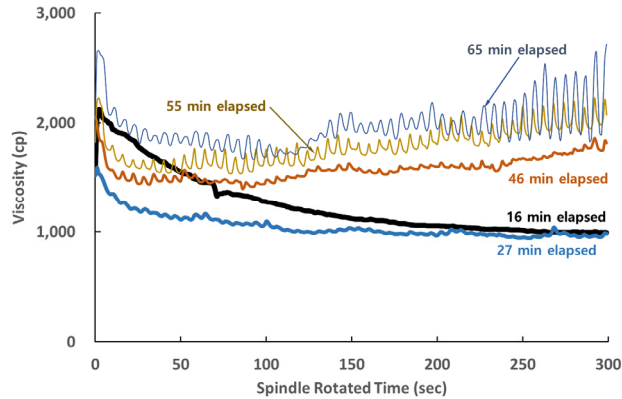


Fig. 8. Viscosity behaviors of water/cement/bentonite mixture at the low viscosity range with spindle rotated time after 30 minutes stirring

이에 반해 70분이 경과한 시점에서 혼합체의 특성은 Fig. 9에서와 같이 전단에 따라 점도가 증가하는 레오펙시 (rheopexy) 거동을 보인다. 레오펙시 거동은 전단시간 혹은 전단율에 따라 점도가 증가하는 현상으로 폴리에스테르와 같은 재료에서 관측이 된다. 시멘트 슬러리는 일반적으로 틱소트로피 거동을 보이는데(Roussel et al., 2012), 시멘트 슬러리중 벤토나이트와 같은 미립자를 다량으로 포함하는 경우 레오펙시 거동을 보인다고 보고된바 있다 (Devereux, 2012). 이러한 거동이 벤토나이트의 팽윤에 의한 것인지 아니면 시멘트의 경화에 의한 것인지 확실치는 않으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

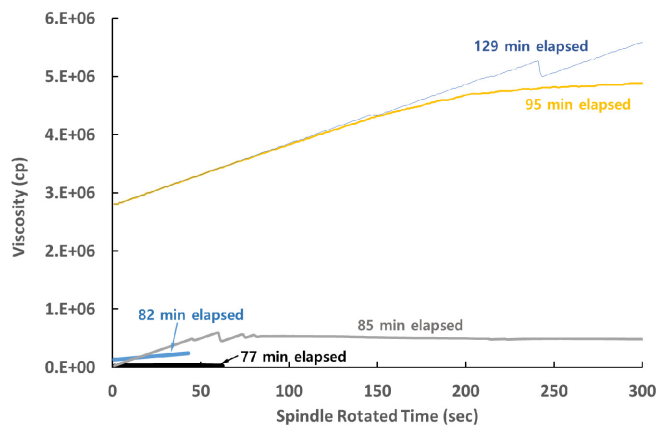


Fig. 9. Viscosity behaviors of water/cement/bentonite mixture at the high viscosity range with spindle rotated time after 30 minutes stirring

Table 2는 물/시멘트/벤토나이트를 동시에 혼합하여 10분간 교반한 경우에 대한 실험 결과이며 그림으로 표현한 것이 Fig. 10이다. Fig. 6과 달리 겔 상태가 진행되는 시점이 110분 이상 경과된 시점에서 확인 할 수 있다. 두 그림 결과를 포함한 내용이 Fig. 11이다. Fig. 11에서 보면 두 실험결과 혼합물의 상태가 급격히 변하는 시점이 충분히 교반을 할수록 짧아짐을 알 수 있다. 혼합물 재료의 상태가 변화하는 시점이 30분 교반 시에는 72분 경과 후이며, 10분 교반 시에는 110분임을 알 수 있다.

Table 2. Viscometer test results with water/cement/bentonite mixture with 10 minutes stirring

Elapsed time (min)	Viscosity (centipoise, cp)	Toque (%)	RPM	Spindle type
13	16.3	13.6	250	LV-2
21	13.1	10.9	250	LV-2
40	37.9	31.5	250	LV-2
51	48.1	26.9	230	LV-2
62	81.3	54.2	200	LV-2
72	105.8	63.5	180	LV-2
81	123.5	65.9	160	LV-2
99	364.2	60.7	50	LV-2
110	1,326.8	44.2	10	LV-2
121	7,382.1	24.6	1	LV-2
131	17,502.4	29.2	0.5	LV-2
142	64,981.0	21.7	0.1	LV-2

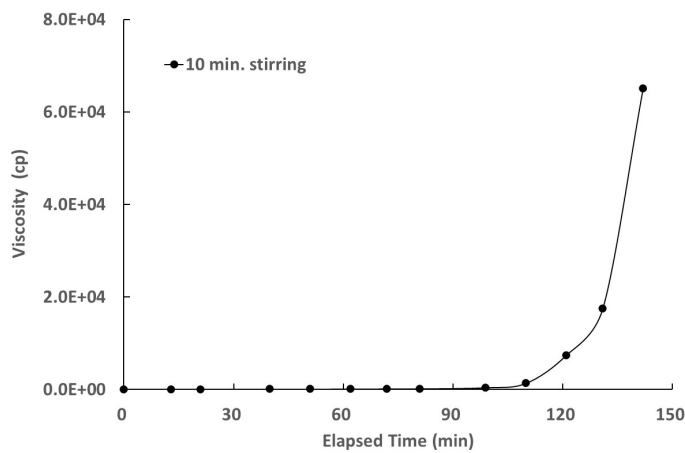


Fig. 10. Variation of water/cement/bentonite mixture with elapsed time after 10 minutes stirring

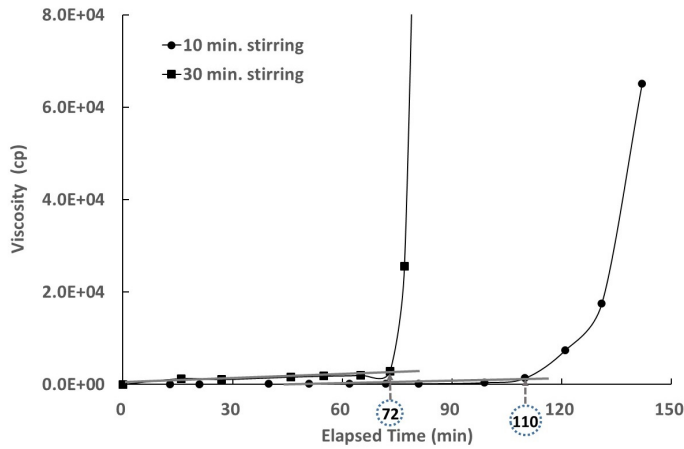


Fig. 11. A comparison between viscosity behaviors of water/cement/bentonite mixture with different stirring time of 10 and 30 minutes

각 72분과 110분을 기준으로 Fig. 8, 9와 Fig. 12, 13을 비교해 보면 흥미로운 결과를 확인할 수 있다. 혼합물의 상태가 변하는 변곡점을 기준으로 그 이전에는 틱소트로피 현상을 보이다가 변곡점을 지난 시점에서는 레오펙시 거동을 보인다. 응집이 되지 않은 벤토나이트 혼합물이나 경화가 시작되지 않은 시멘트 페이스트는 틱소트로피 현상을 보인다(Roussel et al., 2012, Tehrani, 2008). 벤토나이트와 시멘트의 응결과 응집(coagulation and flocculation)은 서로 상이한 과정을 거치지면서 응결 및 응집을 통해서 생성된 미세 구조는 스피ndl의 지속적인 전단에 의해서 파괴되면서 틱소트로피 현상을 보인다. 하지만 물과 몬모릴로나이트의 입자간의 반응을 통하여 충분한 두께의 DDL 형성과 시멘트입자의 수화반응(CSH)이 특정시점을 지나면 틱소트로피 거동은 더 이상 발생하지 않으며 레오펙시 거동을 보이는 것으로 보이는 것으로 추정된다. Koch (2002)에 따르면 시멘트의 수화반응으로 Ca^{2+} 이

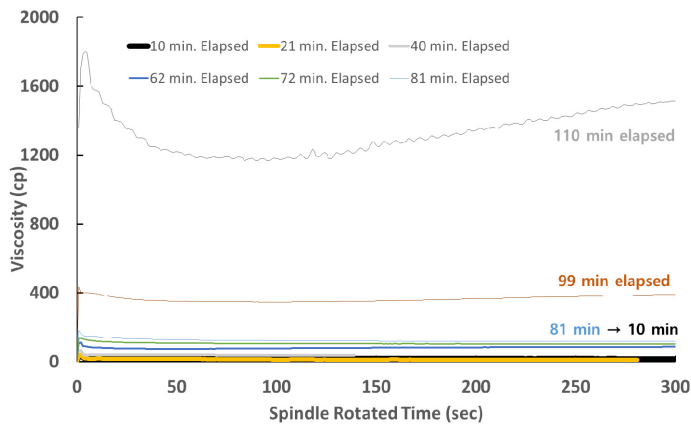


Fig. 12. Viscosity behaviors of water/cement/bentonite mixture at the low viscosity range with spindle rotated time after 10 minutes stirring

온이 이탈되면서 벤토나이트 표면에 있는 Na^+ 와 치환이 되어 Ca 벤토나이트가 되며 벤토나이트와 시멘트의 상호 작용은 Fig. 14와 같이 표현하였다. 이 부분에 대해서는 각 시간 단계별 혼합물의 미세구조 관측을 통해서 확인이 필요하다.

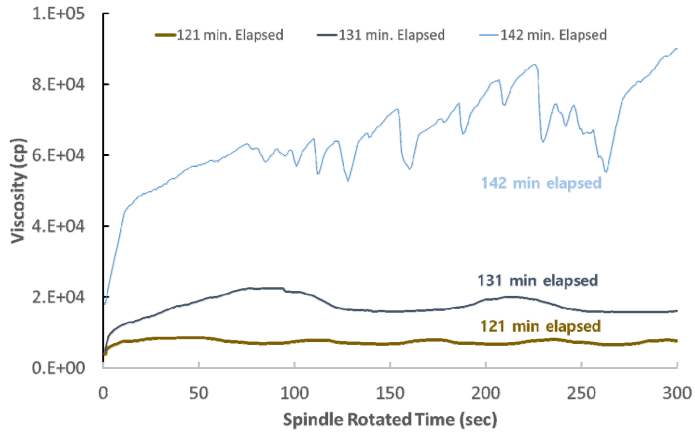


Fig. 13. Viscosity behaviors of water/cement/bentonite mixture at the high viscosity range with spindle rotated time after 10 minutes stirring

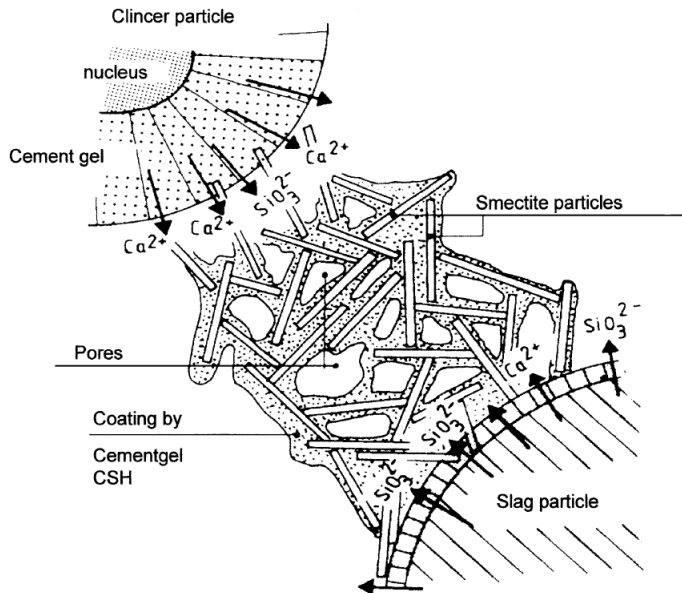


Fig. 14. Sketch of the interaction between cement and bentonite (Koch, 2002)

4. 결론

본 연구에서는 터널현장의 강관다단공법에 사용하는 썰링재인 물/시멘트/벤토나이트 혼합물 시간에 따른 점도 특성을 조사하였다. 시공 시 썰링재의 배합에 대한 명확한 기준이나 재료의 요구성능이 없으므로 이에 대한 정립이 필요하며 본 연구에서는 그 이전 단계로 혼합물의 재료적 거동 특성에 대한 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 물/시멘트/벤토나이트 혼합물은 초기 배합특성이 점도 측면에서 상당히 중요한데 물/벤토나이트의 사전 교반을 충분히 할수록 혼합물의 급격한 점도 발현 시점은 더욱 빨라짐을 알 수 있다. 물/벤토나이트/시멘트를 10분 교반한 경우와 30분 교반한 경우 혼합물 점도의 급격한 증가 양상을 보이는 시점은 교반 후 110분과 72분 이후로서, 충분한 교반이 이루어진 상태에서 점도의 증가 시점이 더 짧음을 알 수 있다. 점도의 증가 양상도 특정 시점이 후 급격한 변화 양상을 보인다. 따라서 현장에서는 썰링재 주입 후 급격한 점도의 증가가 필요하므로 사전에 물과 벤토나이트의 충분한 교반이 필수적이다.
2. 점도의 급격한 증가 이전까지는 물/벤토나이트/시멘트 혼합물은 틱소트로피 현상을 보인다. 하지만 점도의 급격한 증가 시점 이후에는 레오펙시 현상을 보이며 시간에 따른 혹은 전단율에 따른 점도의 증가 양상을 보인다.
3. 점도가 급격히 증가한 이후 혼합물의 표면 상태를 보면 어느 정도 자립이 가능한 수준으로 유동성이 급격히 저하됨을 알 수 있다.
4. 재료분리 측면에서도 충분한 물/벤토나이트의 사전 교반이 이루어진 상태에서 재료분리가 덜 발생함을 확인하였다. 특히 현장에서는 절리 등 불연속면이 존재하므로 재료분리 발생시 수화 혹은 팽윤작용을 유도해야 할 물이 누수가 될 수 있으므로 충분한 사전교반을 통하여 재료분리가 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다.

이처럼 사전 교반이 썰링재의 점도 특성과 재료분리에 있어 중요한 역할을 하므로 충분한 사전교반을 통해서 양생시간을 단축할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 물/시멘트/벤토나이트 혼합물의 다양한 거동에 대한 연구를 통하여 혼합물의 거동에 있어 충분한 이해가 있어야 할 것이다. 현재 국내에서는 해당 혼합물의 요구성능에 대한 규정도 없는바 추가 연구를 통하여 강관다단공법에 적용되는 썰링재의 요구성능 정립이 필요하며, 해당 성능을 만족하기 위한 물과 벤토나이트의 교반에 대한 상세한 절차(교반 속도, 시간 등)가 수립되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업인 철도터널 보강용 강관다단공법 시공개선 연구과제(PK1806C5)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ahmed, A.A., Saaid, I.M., Akhir, N.A.M., Rashedi, M. (2016), "Influence of various cation valence, salinity, pH and temperature on bentonite swelling behavior", AIP Conference Proceedings 1774, 04005, American Institute of Physics.
2. ASTM (2014), "Standard test method for viscosity and gel time of chemical grouts by rotational viscometer (laboratory method)", ASTM International, West Conshohocken, PA.
3. Devereux, S. (2012), "Drilling Technology in Nontechnical Language", PennWell Books, Oklahoma, USA.
4. Durham, J. (1996), The prediction of shear strength in bentonite/cement grouts, Ph.D. Thesis, Loughborough University, pp. 239-275.
5. Hong, Y.H., Yu, J.D., Byun, Y.H., Jang H.I., You, B.C., Lee, J.S. (2013), "Integrity evaluation of grouting in umbrella arch methods by using guided ultrasonic waves", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 187-199.
6. Kim, D.Y., Lee, J.W., Jung, J.H., Kang, H.B., Jee, S.H. (2017), "A fundamental study of slurry management for slurry shield TBM by sea water influence", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 3, pp. 463-473.
7. Koch, D. (2002), "Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls", Applied Clay Science, Vol. 21, No. 1-2, pp. 1-11.
8. KR Network (2017), "Report on the experiments of the mixing ratio of sealing and grouting material for umbrella arch method", Korea Rail Network Authority.
9. Lamb, T.W. (1958), "The structure of compacted clay", Journal of the Soil Mechanical and Foundation Division ASCE, Vol. 84, No. SM2, pp. 1654-1-1654-34.
10. Lee, J.S., Sagong, M., Park, J., Choi, I. (2018), "Design of umbrella arch method based on adaptive SVM and reliability concept", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 4, pp. 701-715.
11. Luckham, P.F., Rossi, S. (1999), "The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions", Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 82, No. 1-3, pp. 43-92.
12. Noh, J.H. (2002), "Applied-mineralogical characterization and assessment of some domestic bentonite (I): mineral composition and characteristics, cation exchange properties, and their relationships", Journal of the Mineralogical Society of Korea, Vol. 15, No. 4, pp. 329-344.
13. Noh, J.H., Yu, J.Y., Choi, W. (2003), "Applied-mineralogical characterization and assessment of some domestic bentonite (II): mineralogical characteristics, surface area, rheological properties, and their relationships", Journal of the Mineralogical Society of Korea, Vol. 16, No. 1, pp. 33-47.
14. Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., Brumaud, C. (2012), "The origins of thixotropy of fresh cement pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 42, No. 1, pp. 148-157.
15. Tehrani, A. (2008), "Thixotropy in water-based drilling fluids", Annual Transactions of the Nordic Rheology Society, Vol 16. pp. 1-13.