

벤토나이트 함량에 따른 지반 그라우팅 재료의 점성 및 블리딩 특성 분석*

Analysis of Viscosity and Bleeding Characteristics of Grouting Materials according to the Proportion of Bentonite

이종원** · 원조현*** · 최현용**** · 오태민*****

Jong-Won Lee** · Jo-Hyun Weon*** · Hyeon-Yong Choi**** · Tae-Min Oh*****

Abstract

Grouting has been widely used to enhance the strength of the ground and prevent waterflow into the underground space in the geotechnical engineering field. Cement with bentonite can be considered a helpful grouting material because the bentonite has a swelling ability with water. Therefore, it is essential to evaluate the characteristics of grouting materials according to the mixing ratio for a successful grouting process. In this regard, the study investigated the viscosity and bleeding characteristics of grouting materials according to the mixing ratio (i.e., water/cement ratio and bentonite/cement ratio). In the experimental result, the viscosity increases with decreasing water/cement ratio and rising proportion of bentonite by weight of cement. However, the results of the bleeding ratio show the tendency is inversely proportional to the viscosity results. Bentonite was explored in terms of the viscosity and bleeding criterion. This result is expected to be meaningful to determine the optimized mixing ratio of bentonite-cement in the grouting field.

Keywords : Bentonite, Grouting, Viscosity, Bleeding Ratio

1. 서 론

지반 내 설치되는 토목 구조물(e.g., 기초, 하수관, 터널 등)은 공간의 부족 및 공간 활용 효율성 등을 위하여 필요성이 증대되고 있다. 이러한 지반 내 구조물을 장기적으로 안전하게 활용하기 위해서는 시공 과정 및 시공 후 주변 지반과 구조물 사이의 안정성을 유지하는 것이 중요하다. 만약, 주변 지반 및 지반

내 구조물에서 손상이 발생하는 경우 지상구조물 붕괴와 같은 막대한 사회적 피해가 발생할 수 있다. 이를 위하여, 지반공학 분야에서는 구조물 시공과정 및 시공 후 구조물 기초 보강, 터널 내 차수, 매립지 지반의 보강을 위하여 그라우팅 공법이 폭넓게 적용되고 있다(Benyounes and Benmounah, 2014).

그라우팅 공법은 지반의 강도특성 증진이나 지하 공간 내 차수능력 향상을 위하여 빈 공간 내 주입재

*이 논문은 한국연구재단 4단계 BK21 사업의 스마트 해양도시 인프라 교육연구단 과제를 통해 수행된 연구결과임(4199990614525).

**부산대학교 사회환경시스템공학과 박사수료(주저자: lee.j@pusan.ac.kr)

***부산대학교 사회환경시스템공학과 학사과정(kyenotkai@naver.com)

****부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(eureka@kwater.or.kr)

*****부산대학교 사회환경시스템공학과 조교수(교신저자: geotaemin@pusan.ac.kr)

료를 지반 속으로 침투 및 충전시키는 방법이다(Azadi et al., 2017). 그라우팅 주입재료는 지반 개량 목적에 따라 시멘트, 벤토나이트, 플라이애시, 에폭시, 레진 등이 활용되고 있다(Warner, 2004). 최근에는 이러한 그라우팅 주입재료 중 시멘트 재료와 벤토나이트를 함께 혼합한 재료를 터널, 하수관거 및 시추공 뒤채움을 위하여 활용하고 있다(Indacochea-Vega et al., 2018; Minoretti et al., 2020).

벤토나이트는 몬토릴로나이트(montmorillonite)로 구성된 점토로 물과 혼합 시 팽창하는 특성을 이용하여 지반 투수성 저감을 위하여 활용된다(Mao et al., 2020). 따라서 이러한 장점으로 벤토나이트를 그라우팅 재료로 활용하는 경우 지반 내 빈 공간을 효과적으로 충전시키는데 유리하다. 또한, 벤토나이트는 열전도도가 낮기 때문에 단열을 위한 뒤채움 재료로 활발하게 사용되고 있다(이철호 외, 2010). 마지막으로 그라우팅 재료로서 시멘트를 벤토나이트로 대체하는 경우, 시멘트 제조 공정 시 발생하는 온실가스를 저감할 수 있는 측면에서 벤토나이트는 친환경적인 그라우팅 재료로 고려되고 있다(Mesboua et al., 2018, Zhou et al., 2020).

이러한 벤토나이트-시멘트 혼합재료를 그라우팅 재료로 활용하기 위해서는 재료 배합 후 주입과정 및 양생과정을 기준으로 재료의 특성을 분석하는 것이 중요하다. 벤토나이트-시멘트 혼합재료는 배합수와 함께 배합될 때 화학적인 반응에 따라 유동특성이 달라질 수 있으며, 특히 유동특성은 각 재료 간의 배합비율에 의존적이다(Contreras et al., 2007). 또한, 혼합재료와 배합수의 비율에 따라 재료분리가 발생할 수 있으며, 재료분리가 과도하게 발생하는 경우 그라우팅 성능이 저하될 수 있다(Lee et al., 2019). 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 원활한 주입을 위한 유동특성은 점성도(사공명 외, 2018), 슬럼프(Sonebi and Perrot, 2019), L-box 시험(Alyousef et al., 2018) 등으로 평가할 수 있다. 또한, 벤토나이트-

시멘트 그라우팅 재료의 양생특성은 블리딩(Gustin et al., 2007), 양생시간(Atahan et al., 2009) 측정 등으로 평가할 수 있다. 이러한 시험방법 중, 배합비율에 따른 점성도와 블리딩 발생비율을 분석지표로 활용하는 경우 신뢰도 높은 그라우팅 재료의 특성 평가가 가능하다.

벤토나이트-시멘트 그라우트 재료가 원활하게 주입되고 목표 도달거리까지 전달되기 위해서는 그라우트 재료의 유동성 확보가 중요하며, 이는 점성도로 평가할 수 있다. 단위시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 증가하는 경우, 벤토나이트의 팽창 특성에 의하여 점성도는 증가하고 재료분리 발생 비율은 감소하게 된다(최항석 외, 2007). 그러나 벤토나이트 함량을 과도하게 증가시키는 경우, 점성도를 급격히 증가시키기 때문에 그라우팅 재료 주입 시 원활한 주입이 불가능할 수 있다. 또한, 벤토나이트-시멘트 혼합재료의 점성도는 벤토나이트의 팽창잠재력(swelling potential)에 의하여 벤토나이트 함량이 증가하거나 배합 후 시간경과 시 급격하게 증가하는 특성을 보인다(Lee et al., 2014).

또한, 주입이 완료된 벤토나이트 그라우트 재료가 안정적으로 유지되기 위해서는 블리딩 현상(bleeding effect)과 같은 재료분리에 의한 주입재료의 손실을 고려하는 것이 중요하다. 시멘트 기반 그라우팅 재료의 물/재료 비율(water/solid ratio)과 벤토나이트 함량에 따른 블리딩 발생비율을 측정하는 연구가 수행된 바 있다(Tan et al., 2005). 해당 연구결과에서 그라우팅 재료의 블리딩을 감소시키기 위해서는 벤토나이트 함량을 증가시키는 것이 유리할 것으로 파악되었다. 또한, 시멘트 기반의 그라우팅 재료에 벤토나이트를 첨가하는 경우 블리딩 발생비율이 감소하여 그라우팅 성능이 증가할 수 있을 것으로 파악된 바 있다(Gustin et al., 2007). 그러나, 기존 연구에서는 한정적인 물/시멘트 배합비율과 벤토나이트 함량만을 고려한 연구가 대부분이며, 벤토나이트 그

라우팅 재료의 점성도와 블리딩 발생비율을 함께 고려하여 적합한 물/시멘트 배합비율과 시멘트 증량 대비 벤토나이트 함량 선정에 관한 연구는 제한적인 상황이다.

본 연구에서는 지반 내 그라우팅 주입단계에서 원활한 유동성 확보를 위하여 물/시멘트 배합비율과 벤토나이트 함량에 따른 그라우팅 재료의 점성도와 블리딩 발생비율을 평가하였다. 그라우트 재료는 1종 보통 시멘트와 벤토나이트를 이용하였으며, 기존 연구에서 보고되었던 물/시멘트 비, 벤토나이트 함량을 참고하여 배합비율을 설정하였다. 실내실험 후, 배합비율에 따른 점성도와 블리딩 발생비율을 종합적으로 분석하여 지반 그라우팅을 위한 벤토나이트-시멘트 재료의 적합한 배합비율을 선정하였다. 본 연구에서 파악된 벤토나이트-시멘트 재료의 점성도와 블리딩 발생 특성은 향후 현장 지반 내 그라우팅 시공 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 재료 준비 및 주입특성 측정방법

2.1 시편 재료 및 배합비율

본 연구에서는 그라우트 재료로 주로 사용되는 1종 보통 시멘트(ordinary Portland cement, OPC),

벤토나이트를 재료로 사용하였다(Fig. 1). 배합수는 현장 내 그라우팅 재료 배합의 신속성 및 편리성을 위하여 수도물을 사용하였다. 배합에 사용된 시멘트 재료의 비중(specific gravity [-])은 3.15, 입자크기 (particle size diameter)는 D_{50} 일때 16~20 μm , D_{95} 일때 120 μm 미만에 해당한다. 또한, 벤토나이트는 일반토목 및 시추공 현장에서 활용될 수 있는 갈슘 계열 벤토나이트(Ca-bentonite)를 사용하였다. 벤토나이트의 입자크기는 200 mesh 체는 기준(74 μm) 통과분포가 85% 이상, 팽윤도(swelling)는 24 cc / 2g 이상에 해당한다.

물/시멘트 배합비율(water/cement ratio, W/C [-]) 과 벤토나이트/시멘트 배합비율(bentonite/cement ratio, B [%])은 기존 연구에서 지반 내에 활용되고 있는 뒤채움재의 배합비율을 참고하였다. 물/시멘트 배합비율은 주로 0.5에서 3.0 내 범위에서, 시멘트 증량 대비 벤토나이트 함량은 5%에서 33% 내의 범위에서 사용되는 것으로 파악되었다(Table 1). 따라서, 본 연구에서는 현장 내 적용성 향상을 위하여 물/시멘트 배합비율을 1.0과 3.0으로 설정하였으며, 시멘트 증량 대비 벤토나이트 함량을 5%, 10%, 15%, 33%, 50%, 67%로 설정하여 배합비율에 따라 그라우팅 재료의 점성도 및 블리딩 발생 특성을 평가하였다.



(a) Portland Cement



(b) Bentonite

Fig. 1. Grouting Materials used for Evaluation of Viscosity and Bleeding Ratio

Table 1. Literature reviews for grouting materials according to the water/cement ratio (W/C) with bentonite proportion (B)

Reference	* W/C [-]	** B [%]
Mikkelsen (2002)	2.5, 6.6	30, 40
Contreras et al. (2007)	2.0, 2.49, 2.5, 6.55, 3.99	35, 36, 40, 41, 67
Memon et al. (2012)	0.55	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21
Azadi et al. (2017)	2.5	3, 5, 6, 10
Sagong et al. (2018)	4.3	30
Indacoechea-Vega et al. (2018)	0.6, 1.0, 1.3	8, 17, 43
Zhang et al. (2020)	1.0	5

* W/C [-]: water/cement ratio, ** B [%]: proportion of bentonite by weight of cement

2.2 점성도 실험 방법

점성도는 유체 점성의 정도, 즉 전단응력(shear stress)과 전단율(shear strain)의 비율을 나타내는 물리적 단위이다. 시멘트계 그라우트는 점성도가 증가할수록 유동성이 저하되며, 반대로 낮은 점성도에서는 높은 유동성을 보인다. 이에 따라, 지반 내 주입되는 그라우팅 재료의 점성도에 따라 주입성능이 결정될 수 있으므로 배합비율에 따른 점성도를 사전에 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 점성도는 Brookfield 사의 회전형 점도계(DV2T)를

사용하여 측정하였다. 점성도 측정장비는 Fig. 2와 같이 측정 장비 컨트롤러 및 저장장치와 실제 측정이 이루어지는 스피들(spindle)로 구성된다. 회전형 점도계의 경우, 사용하는 스피들과 점도계의 작동 회전속도(revolution per minute, RPM)에 따라 측정 가능한 점성도의 범위가 달라지게 된다. 따라서 사전실험을 통하여 준비한 시험 케이스의 점성도를 측정할 수 있는 스피들과 회전속도를 선택해야 한다.

그라우팅 재료의 점성도는 국제재료시험학회(American Society Testing and Materials, ASTM)에서 제안된 시험방법(ASTM D2196)을 참고하여

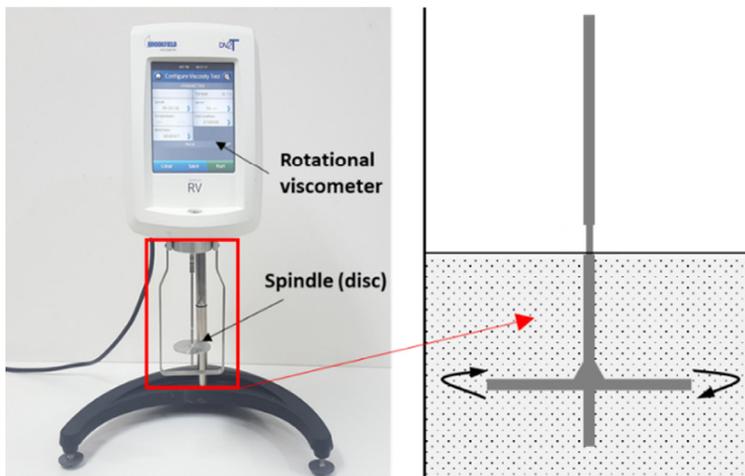


Fig. 2. Test Setup for Viscosity Measurement of Grouting Material with Bentonite

측정을 실시하였다(ASTM, 2020). 시험편은 설정한 배합비율에 따라 직경 85~100mm, 부피 500~600 ml를 만족하는 비커에 정량(300ml)으로 준비하였으며, 블리딩 영향을 방지하기 위하여 재료 준비 및 점성도 측정은 60초 이내로 실시하였다. 이때 스피ndl의 높이 및 비커 내 위치는 일정하도록 설정하였으며, 주변 온도는 $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였다. 본 연구에서는 준비한 주입재료의 배합비율에 따른 점성도를 일정한 조건(스핀들 종류 및 회전속도)에서 측정할 수 있도록 스피ndl은 RV-3(직경 34.69mm, 두께 1.65mm), 회전속도는 150RPM으로 결정하였으며, 이때 측정 가능한 점성도의 범위는 10~667cP(mPa·s)에 해당한다. 점성도는 동일한 조건으로 시험편 배합비율에 따라 각각 3회 측정 후 평균값을 이용하여 평가하였다.

2.3 블리딩 실험 방법

블리딩 현상은 물과 시멘트 재료가 배합된 후 시간 경과에 따라 물과 재료가 분리되어 배합수가 혼합물 상부에 떠오르는 현상이다(Draganović, 2009). 이러한 블리딩 현상은 시멘트 재료와 물의 비중 차이 및 입자 간의 결합력에 의하여 발생하게 된다. 블리딩이 과도하게 발생하는 경우, 그라우팅 재료의 경화 후 빈 공간의 발생으로 인하여 충전능력이 저하되기 때문에 배합비율에 따른 블리딩을 사전에 평가하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 블리딩 측정실험을 수행하였다(Fig. 3). 설정한 시험편 배합비율에 따라 시멘트, 벤토나이트, 배합수를 배합하여 블리딩 측정 실린더에 설치하여 블리딩을 측정하였다. 블리딩 측정시험은 국제재료시험 학회에서 제안된 측정방법(ASTM C940)에 따라 수행하였으며, 1,000ml 부피의 실린더에 $800 \pm 10\text{ml}$ 의 시험편을 설치하였다(ASTM, 2016). 시험편은 설

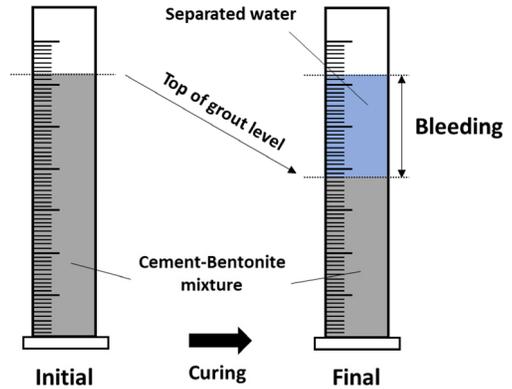


Fig. 3. Concept of Bleeding Test for Grouting Material with Bentonite

정한 물/시멘트 배합비율 1.0 및 3.0과 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량 5%, 10%, 15%, 33%, 50%, 67%로 60초 동안 배합하여 준비하였다. 시험편 설치 후에는 증발과 같은 외부 영향 최소화를 위해 실린더 상부를 밀봉한 후 주변 온도를 $23.0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 유지하여 블리딩 발생비율을 측정하였다. 블리딩 발생비율은 배합비율에 따라 시험편 설치 24시간 후의 블리딩 비율로 설정하여 3회 반복 설치 및 평가하였다.

3. 벤토나이트 함량에 따른 그라우팅 재료의 점성도 및 블리딩 측정결과

본 연구에서는 벤토나이트 함량에 따른 그라우팅 재료의 점성도와 블리딩 발생비율을 측정하였다. 점성도는 벤토나이트-시멘트 혼합재료가 지반 내 주입되면서 목표 거리까지 전달되는 특성을 고려하여 측정되었다. 또한, 지반 내 주입된 그라우팅 재료가 양생과정에서 물리적 반응(e.g, 재료분리) 및 화학적 반응(e.g, 수화반응)이 발생한 후 남아있는 재료의 양을 고려하고자 배합비율에 따른 블리딩 발생비율을 분석하였다.

3.1 점성도 측정 결과

벤토나이트 함량에 따라 벤토나이트-시멘트 그라우팅 주입재의 점성도가 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 벤토나이트 함량에 따른 점성도를 측정하였다. Fig. 4는 벤토나이트 함량 증가에 따른 물/시멘트 배합비율 1.0과 3.0의 점성도 측정 결과를 나타낸다. 물/시멘트 배합비율에 관계없이 벤토나이트 함량이 증가할수록(5% → 67%) 점성도는 비선형적으로 증가하는 것으로 평가되었다. 또한, 점성도는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 급격히 증가하는 것으로 파악되었다. 특히, 물/시멘트 배합비율이 1.0인 조건에서 시멘트 중량에 비하여 벤토나이트 함량이 15%를 초과하는 경우 점성도는 본 연구에서 설정한 조건에 따라 측정 가능한 범위를 초과하는 결과를 보였다. 이에 따라 물/시멘트 배합비율이 3.0인 조건에서는 본 연구에서 설정한 벤토나이트 함량에 따라 모든 케이스에서 점성도 측정이 가능한 반면, 물/시멘트 배합비율이 1.0인 경우에는 벤토나이트 함량이 5%, 10%, 15%의 시편에서만 측정을 실시하였다.

물/시멘트 배합비율이 1.0인 경우, 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%에서 10%로 증가할 때 점성도는 2.1배 증가하는 것으로 파악되었다. 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%에서 15%로 증가할 때 점성도는 4.0배 증가하는 것으로 평가되었다.

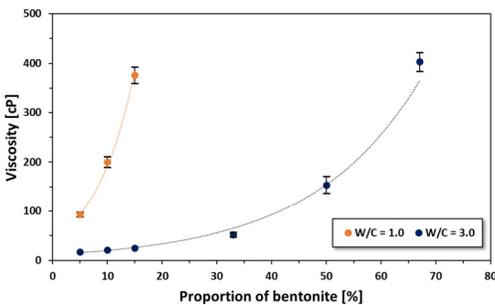


Fig. 4. Results of Viscosity according to the Proportion of Bentonite by Weight of Cement

반면에 물/시멘트 배합비율이 3.0인 경우 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%에서 15%까지 증가할 때 점성도는 약 1.5배 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 같은 물/시멘트 배합비율 조건에서 벤토나이트 함량이 약 67%까지 증가할 때 점성도는 벤토나이트 함량이 5%일 때에 비하여 23.0배 증가하는 것으로 파악되었다.

물/시멘트 배합비율이 낮을수록(3.0 → 1.0) 그라우팅 주입재의 점성도는 증가하는 것으로 파악되었다. 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%~15%인 조건에서 물/시멘트 배합비율이 1.0인 재료의 점성도가 물/시멘트 배합비율이 3.0인 재료에 비하여 월등히 높은 결과를 보였다. 또한, 벤토나이트 함량 증가에 따른 점성도 증가율 또한 물/시멘트 배합비율이 낮은 재료에서 높은 결과를 보였다. 벤토나이트 함량이 5%에서 15%로 증가할 때 점성도는 물/시멘트 배합비율이 1.0과 3.0일 때 각각 4.0배 및 1.4배 증가하는 결과를 보였다.

벤토나이트 함량 증가에 따른 그라우팅 주입재료의 점성도가 증가하는 원인으로는 벤토나이트 재료와 물이 혼합되는 경우 벤토나이트가 팽창하기 때문으로 판단된다. 벤토나이트-시멘트 혼합재료가 그라우팅 재료로서 주입을 위하여 물과 배합되는 경우 벤토나이트가 팽창되는 특성으로 인하여 점성도가 급격히 증가하게 된다(Zhou et al., 2020). 이에 따라, 벤토나이트 함량이 증가할수록 그라우팅 주입재료의 유동성은 감소하게 된다. 또한 물/시멘트 배합비율이 감소하는 경우, 시멘트 재료의 수화(hydration) 반응을 위한 물의 양이 감소하게 되므로 주입재료의 점성도가 급격히 증가하게 되는 것으로 분석된다.

3.2 블리딩 측정 결과

그라우팅 재료의 블리딩 발생비율은 물/시멘트 배합비율과 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량에 따라 달라질 수 있다(Fig. 5). Fig. 6은 벤토나이트 함량

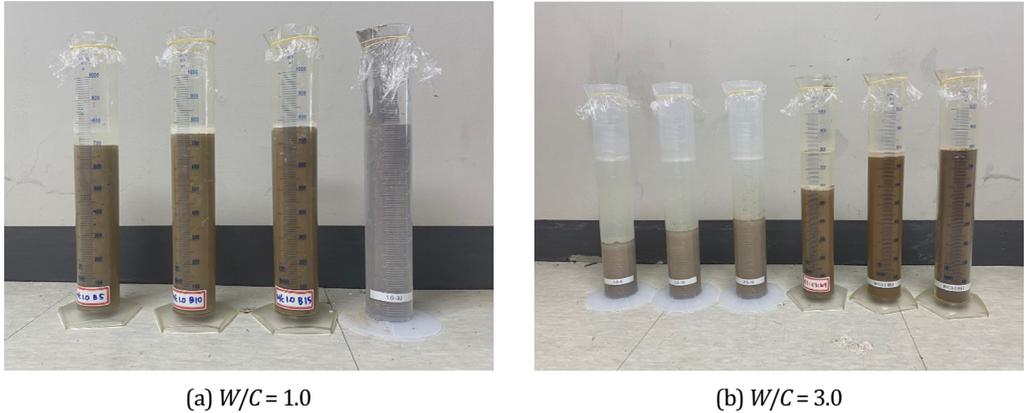


Fig. 5. Bleeding Tests according to the Proportion of Bentonite by Weight of Cement after 24 Hours

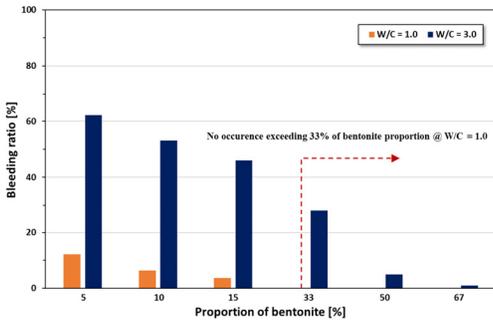


Fig. 6. Results of Bleeding Ratio according to the Proportion of Bentonite by Weight of Cement

증가에 따른 블리딩 발생비율 변화를 보여준다. 물/시멘트 배합비율이 1.0과 3.0인 경우 모두, 벤토나이트 함량이 증가할수록 블리딩 발생비율이 선형적으로 감소하는 결과를 나타냈다. 물/시멘트 배합비율이 1.0인 경우, 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%, 10%, 15%일 때 블리딩 발생비율은 각각 12%, 6%, 4%인 것으로 평가되었다. 특히, 물/시멘트 배합비율이 1.0인 조건에서는 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 15%를 초과하는 경우 블리딩이 발생하지 않는 것으로 파악되었다.

물/시멘트 배합비율 3.0인 경우, 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%, 10%, 15%, 33%, 50%, 67%로 증가할 때 블리딩 발생비율은 각각 62%,

53%, 46%, 28%, 5%, 1%에 해당하는 것으로 측정되었다. 벤토나이트 함량이 15% 이하인 조건에서는 초기 준비 시편의 부피(100%)에 비하여 벤토나이트-시멘트 재료의 부피가 최종적으로 60%도 남아 있지 않은 결과를 보였다. 향후 최종 부피기준 90% 이상의 벤토나이트-시멘트 주입재료를 유지하기 위해서는 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량을 50% 이상 포함시켜야 할 것으로 분석되었다.

이러한 물/시멘트 배합비율의 증가가 블리딩 발생비율을 감소시키는 원인으로는 물과 시멘트의 수화반응에 필요한 물의 양에 비하여 물이 과잉 공급되었기 때문으로 판단된다. 일반적으로 블리딩 현상은 중력에 의한 그라우팅 주입재료의 침강(sedimentation) 현상과 시멘트 입자 사이의 인력(attractive force)에 의하여 입자들이 서로 결합되면서 발생하게 된다(Dragonović, 2009). 또한, 이러한 입자들 간의 수화반응에 필요한 물의 양에 비하여 그라우팅 주입재료의 물/시멘트 배합비율이 너무 높게 설정되는 경우, 물이 과잉 공급되기 때문에 추가적인 블리딩을 발생시키게 된다(Lee et al., 2019).

그라우팅 주입재료 내 벤토나이트 함량의 증가는 동전기적(electrokinetic) 측면에서 블리딩 발생비율을 감소시킬 수 있다. 벤토나이트-시멘트 혼합물

은 점토광물인 벤토나이트에 의하여 입자들 사이의 반발력과 인력의 크기를 의미하는 제타전위(zeta potential)가 음의 값을 갖게 되며 벤토나이트 함량이 증가할수록 값은 증가하게 된다. 이러한 특성은 벤토나이트-시멘트 현탁액의 동전기적 안정성을 유지할 수 있도록 하며, 이에 따라 블리딩 발생비율이 감소하게 된다(Mesboua et al., 2018).

4. 적합한 벤토나이트 그라우팅 재료 선정에 관한 논의

본 연구에서는 지반 내 그라우팅 주입단계에서 주입을 향상을 위하여 그라우팅 재료의 적합한 배합비율을 선정하는데 목적이 있다. 이를 위하여 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 원활한 주입성능 및 주입 후 안정적인 유지성능을 주요한 그라우팅 재료 성능지표로 설정하였다. 이를 위하여 물/시멘트 배합비율 및 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량에 따른 점성도와 블리딩 발생비율을 측정 및 분석하였다. 실험결과, 벤토나이트 함량이 증가할수록 점성도는 급격히 증가하는 경향을 보였으며 블리딩 발생비율은 감소하는 결과를 보였다. 벤토나이트는 물과 혼합될 때 팽창하는 특성을 지니기 때문에 그라우팅

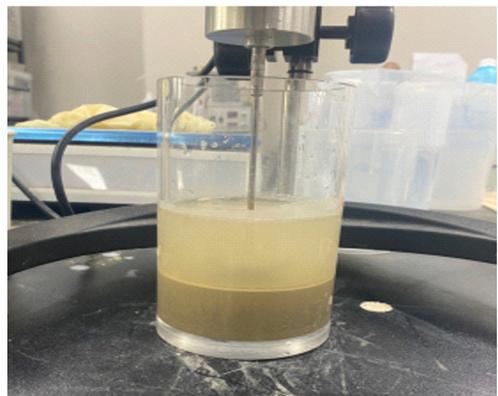
주입재료에 함께 혼합되는 경우 블리딩 발생비율이 감소하는 장점이 있는 것으로 파악되었다.

그러나 물/시멘트 배합비율이 상대적으로 낮은 경우($W/C = 1.0$), 벤토나이트 함량의 증가는 그라우팅 재료의 유동성을 심각하게 저하시키기 때문에 원활한 주입이 불가능할 것으로 분석되었다. 물/시멘트 배합비율이 1.0인 조건에서 벤토나이트 함량을 시멘트 중량 대비 67%까지 증가시키는 경우 재료의 배합이 원활히 이루어지지 않아 지반 그라우팅 재료로 적합하지 않은 결과를 보였다(Fig. 7a). 이와 반대로, 벤토나이트 함량이 낮은 재료에서는 블리딩이 과도하게 발생하기 때문에 양생완료 후 유지되는 그라우팅 재료의 부피가 작아 그라우팅 성능이 저하될 것으로 분석되었다(Fig. 7b).

따라서, 적합한 벤토나이트 그라우팅 주입재료 선정을 위해서는 배합비율에 따른 점성도와 블리딩 발생비율을 함께 고려해야 할 것으로 판단된다. 그러나, 그라우팅 주입재료 선정을 위하여 점성도와 블리딩 발생비율이 함께 고려된 기준은 제안된 바 없다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 보고된 연구에서 지반 내 구조물 기초와 시추공 내 그라우팅 시 제안된 블리딩(Shirlaw et al., 2014) 및 점성도(Lee et al., 2019) 기준을 참고하였다. 적합한 그라우팅 재



(a) Viscosity Problem ($W/C = 1.0, B = 67%$)



(b) Bleeding Problem ($W/C = 3.0, B = 5%$)

Fig. 7. Examples of Inappropriate Mixing Ratio of Grouting Materials for (a) Viscosity and (b) Bleeding

료 선정을 위한 기준을 블리딩 발생비율 10% 이하 및 점성도 100cP 이상 1,000cP 이하로 설정하였으며, 이에 따라 벤토나이트 함량에 따른 적합한 재료를 선정하였다.

실험 결과, 점성도와 블리딩 발생비율은 반비례의 관계에 해당되는 것으로 분석되었다. Fig. 8은 물/시멘트 배합비율 1.0과 3.0에서 벤토나이트 함량에 따른 블리딩 발생비율과 점성도를 나타낸 그래프에 해당한다. 블리딩 발생비율이 증가할 때 점성도는 감소하는 경향을 보였으며, 이와 반대로 블리딩 발생비율이 감소하는 경우에는 점성도가 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서 설정한 재료 배합비율에서 물/시멘트 배합비율이 1.0인 경우, 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 10%~15%일 때 사용 가능한 배합비율로 파악되었다. 또한, 물/시멘트 배합비율이 3.0인 경우에는 벤토나이트 함량이 시멘트 중량의 50%~67%가 배합되었을 때 활용 가능할 것으로 평가되었다. 이러한 벤토나이트 그라우팅 최적 재료 선정은 적용현장내 제안 기준 및 추가적인 평가지표(e.g, 밀도, 일축압축강도 등)에 따라 달라질 것으로 예상된다. 또한, 본 연구에서는 그라우팅 주입단계에서의 주입율을 평가하는 것을 목적으로 하기 때문에 재료 배합 직후(60초 이내) 주입을 가정하였다. 따라서 향후 시간 경과에 따른 점성변화를 고려한다면 다양한 현장 내 적용성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

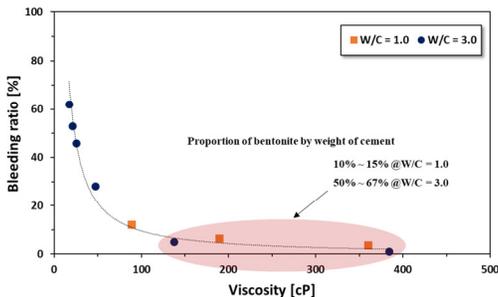


Fig. 8. Relationship of Bleeding Ratio and Viscosity according to the Proportion of Bentonite by Weight of Cement

5. 결론

지반 내 다양한 토목공사 현장에서 지반 강도특성 증대 및 차수성능 향상을 위하여 뒤택음을 목적으로 벤토나이트를 이용한 그라우팅 공법이 활용되고 있다. 이러한 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료를 활용하는 경우 주입재료의 유동성을 확보하고 재료분리를 방지하는 것이 중요하다. 만약, 주입재료의 점성도 및 블리딩 발생비율이 과도하게 높은 경우 그라우팅 재료가 원활히 주입되지 않거나 주입된 재료가 유지되지 않는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지반 내 그라우팅 주입단계에서 재료의 배합비율에 따른 점성도와 블리딩 발생비율을 측정함으로써 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 특성을 사전에 분석하고 적합한 재료 배합비율 선정을 위한 가이드라인을 정립하는데 목적이 있다.

- (1) 벤토나이트 함량에 따른 주입재료의 점성도 측정 결과, 벤토나이트 재료의 팽창 특성으로 인하여 함량 증가에 따라 점성도는 증가한다. 물/시멘트 배합비율이 1.0인 조건과 3.0인 조건에서는 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 5%에서 15%로 증가할 때 점성도는 각각 4.0배 및 1.5배 증가한다.
- (2) 블리딩 측정결과, 벤토나이트 함량 증가에 따라 블리딩 발생비율은 감소한다. 물/시멘트 배합비율이 1.0인 경우, 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 15% 이상인 조건에서 블리딩이 발생하지 않는다. 또한, 물/시멘트 배합비율이 3.0인 경우에는 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 15% 이하인 조건에서 블리딩 발생비율이 40%를 초과하기 때문에 적용 시 주의가 필요할 것으로 분석된다.
- (3) 본 연구에서 설정한 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료 배합비율 중, 적합한 점성 및 블리딩

특성을 확보한 재료는 물/시멘트 배합비율이 1.0일 때 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 10%~15%인 것으로 평가된다. 또한, 물/시멘트 배합비율이 3.0인 조건에서는 시멘트 중량 대비 벤토나이트 함량이 50%~67%인 것으로 파악된다.

- (4) 본 연구에서 선정된 배합재료 및 배합비율은 기존 연구에서 제안된 재료를 참고하였으며, 적합한 재료 선정을 위한 기준은 향후 현장 조건 및 추가적인 재료 물성에 따라 달라질 수 있다. 그러나, 본 연구 결과는 벤토나이트 함량에 따른 그라우팅 재료의 점성도 및 블리딩 특성을 기준으로 파악한 기초 연구결과로서 향후 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 배합비율 선정 시 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 사공명·이준석·박정준·조충식(2018), “강관다단공법에 적용되는 썰링제(벤토나이트-시멘트 슬러리)의 점성 특성에 대한 실험”, 『한국터널지하공간학회 논문집』, 20(5): 773~786.
2. 이철호·위지혜·박문서·최항석·손병후(2010), “지중 열교환기용 벤토나이트 뒤채움재의 화학적, 물리적 영향 요소에 관한 연구”, 『한국지반공학학회논문집』, 26(12): 19~30.
3. 최항석·이철호·길후정·최효범·우상백(2007), “수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤채움재의 열전도 및 점도 특성 연구”, 『신재생에너지』, 3(4): 38~46.
4. Alyousef, R., M. A. Khadimallah, C. Soussi, O. Benjeddou and M. Jedidi (2018), “Experimental and Theoretical Study of a New Technique for Mixing Self-Compacting Concrete with Marble Sludge Grout”, *Advances in Civil Engineering*, 2018: 3283451.
5. ASTM (2016), “Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory”, ASTM International.
6. ASTM (2020), “Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer”, ASTM International.
7. Atahan, H. N., O. N. Oktar and M. A. Taşdemir (2009), “Effects of Water-Cement Ratio and Curing Time on the Critical Pore Width of Hardened Cement Paste”, *Construction and Building Materials*, 23(3): 1196~1200.
8. Azadi, M. R., A. Taghichian and A. Taheri (2017), “Optimization of Cement-Based Grouts Using Chemical Additives”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4): 623~637.
9. Benyounes, K. and A. Benmounah (2014), “Effect of Bentonite on the Rheological Behavior of Cement Grout in Presence of Superplasticizer”, *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, 8(11): 1095~1098.
10. Contreras, I. A., A. T. Grosser and R. H. Ver Strate (2007), “The Use of the Fully-Grouted Method for Piezometer Installation”, *7th FMGM 2007: Field Measurements in Geomechanics*, 1~20.
11. Draganović, A. (2009), “Bleeding and Filtration of Cement-Based Grout”, Ph.D. Thesis, Div. of Soil and Rock mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
12. Gustin, E. J. G., U. F. A. Karim and H. J. H. Brouwers (2007), “Bleeding Characteristics for Viscous Cement and Cement-Bentonite Grouts”, *Geotechnique*, 57(4): 391~395.
13. Indacoechea-Vega, I., P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno and D. Zamora-Barraza (2018), “Durability of Geothermal Grouting Materials Considering Extreme Loads”, *Construction and Building Materials*, 162: 732~739.
14. Lee, C., S. Park, D. Lee, I. M. Lee and H. Choi (2014), “Viscosity and Salinity Effect on Thermal Performance of Bentonite-Based Grouts for Ground Heat Exchanger”, *Applied Clay Science*, 101: 455~460.
15. Lee, J. W., T. M. Oh, H. Kim and M. K. Kim (2019), “Coupling Material Characteristics with Water-Cement Ratio for Elastic Wave Based Monitoring of Under-Ground Structure”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84: 129~141.
16. Mao, J. H., D. J. Yuan, D. L. Jin and J. F. Zeng (2020), “Optimization and Application of Backfill Grouting

- Material for Submarine Tunnel”, *Construction and Building Materials*, 265: 120281.
17. Memon, S. A., R. Arsalan, S. Khan and T. Y. Lo (2012), “Utilization of Pakistani Bentonite as Partial Replacement of Cement in Concrete”, *Construction and building materials*, 30: 237~242.
 18. Mesboua, N., K. Benyounes and A. Benmounah (2018), “Study of the Impact of Bentonite on the Physico-Mechanical and Flow Properties of Cement Grout”, *Cogent Engineering*, 5(1): 1446252.
 19. Mikkelsen, P. E. (2002), “Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments”, *Geotechnical News*, 20(4): 38~42.
 20. Minoretti, A., X. Xiang, I. L. Johansen and M. Eidem (2020), “The Future of the Tunnel Crossing: The Submerged Floating Tube Bridge”, *Structural Engineering International*, 30(4): 493~497.
 21. Shirlaw, J. N., W. Kay and P. Venu (2014), “Rock Fissure Grouting in Singapore Granite for Building Protection during Station Construction”, *Proceedings of the eighth International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Seoul, 375~380.
 22. Sonebi, M. and A. Perrot (2019), “Effect of Mix Proportions on Rheology and Permeability of Cement Grouts Containing Viscosity Modifying Admixture”, *Construction and Building Materials*, 212: 687~697.
 23. Tan, O., A. S. Zaimoglu, S. Hınıslıoglu and S. Altun (2005), “Taguchi Approach for Optimization of the Bleeding on Cement-Based Grouts”, *Tunnelling and underground space technology*, 20(2): 167~173.
 24. Warner, J. (2004), *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures*: John Wiley & Sons.
 25. Zhang, Y., S. Wang, B. Zhang, D. Hou, H. Li, L. Li, J. Wang and C. Lin (2020), “A Preliminary Investigation of the Properties of Potassium Magnesium Phosphate Cement-Based Grouts Mixed with Fly Ash, Water Glass and Bentonite”, *Construction and Building Materials*, 237: 117501.
 26. Zhou, Y., G. H. Wang and Y. F. Yuan (2020), “Basic Properties and Engineering Application of Bentonite-Cement-Water Glass Grouting”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(9): 2742~2750.

요약

그라우팅 공법은 지반 내 토목구조물 활용 시 지반 강도특성을 증진시키거나 지하공간 활용 시 차수효과를 위하여 활발하게 적용되고 있다. 최근에는 그라우팅 기밀특성을 향상시키기 위하여 벤토나이트가 시멘트 재료와 함께 활용되고 있다. 이러한 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 원활한 주입을 위해서는 주입재료의 배합비율에 따른 특성을 사전에 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 그라우팅 재료로 주로 활용되고 있는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 벤토나이트를 이용하여 물/시멘트 배합비율 및 벤토나이트 함량에 따른 점성도 및 블리딩 발생비율을 분석하였다. 실험결과, 물/시멘트 배합비율이 감소하거나 벤토나이트 함량이 증가할수록 점성도는 급격히 증가하고 블리딩 비율은 감소하는 반비례 경향을 보였다. 또한, 적합한 재료 선정 기준에 따라 물/시멘트 배합비율 따른 적용가능한 벤토나이트 함량을 선정하였다. 본 연구에서 분석한 벤토나이트-시멘트 그라우팅 재료의 평가 결과는 향후 지반 내 적합한 그라우팅 재료 선정을 위하여 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 벤토나이트, 그라우팅, 점성도, 블리딩