강관다단 그라우팅에 적용하는 속경성 실링재 개발

신현강[1] · 정혁상[2*] · 김동현[3] · 유용선[4] · 김동훈[5]

[1]정회원, (주)포스코건설 인프라사업본부 인프라솔루션그룹 차장
[2]정회원, 동양대학교 철도건설안전공학과 조교수
[3]비회원, 동양대학교 철도건설안전공학과 정교수
[4]비회원, (주)케미우스코리아 대표이사
[5]비회원, 제주시 도시건설국 도시계획팀 팀장

Development of rapidly hardening seal material applicable to steel pipe multistage grouting

Hyunkang Shin[1] · Hyuksang Jung[2*] · Donghyun Kim[3] · Yongsun Ryu[4] · Donghoon Kim[5]

[1]Senior Manager, Infrastructure Solution Group, Infra Division, POSCO E&C
[2]Assistant Professor, Dept. of Railway Construction and Safety Engineering, Dongyang University
[3]Professor, Dept. of Railway Construction and Safety Engineering, Dongyang University
[4]CEO, Chemius Korea Co., Ltd.
[5]Team Leader, City Planning Team of Jeju Urban Construction Department

***Corresponding Author :** Hyuksang Jung, yoricom@dyu.ac.kr

Abstract

The development of a rapidly hardening seal material applicable to steel pipe multistage grouting is described in this paper. In the multistage technique, seal materials are inserted to prevent the backflow of main grouting material. The grouting material must be inserted only after sufficient time has passed for the seal material to reach a gel state. Otherwise, the fluid seal material mixes with the main grouting material and a backflow of the grouting material occurs, thereby making its in situ insertion difficult. Furthermore, if the seal material remains in the gel state for too long a time, it solidifies; and the main grouting material will not be able to seep into the soil. The gel time, i.e., the time needed for the fluid seal material to turn into a gel state, determines the construction period of steel pipe multistage grouting. The gel time is one of the important factors in this technique, because it impacts the total tunnel construction period significantly. This study develops a rapidly hardening calcium aluminate material, which can reduce the gel time and shorten the construction period while retaining proper sealing function. It also presents a method to determine whether the seal material has reached the gel state as well as the quality standard and bleeding rate testing method for the seal material in the gel state.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(2)301-321(2019)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.2.301

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received February 13, 2019
Revised March 4, 2019
Accepted March 8, 2019

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 ⓒ2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: Steel pipe multistage grouting, Seal material, Seal material gel time, Seal material bleeding, Seal material quality standard

초 록

본 논문에서는 강관다단 그라우팅에 적용하는 속경성 실링재 개발에 관한 실험적 내용을 다루었다. 강관다단 그라우팅 공법에서 실링재는 본 주입재의 주입시 역류를 방지하기 위해 주입하며 주입 후 일정시간이 지난 다음 겔화 상태에서 본 주입재를 주입해야 한다. 그러나 주입된 실링재가 겔 상태가 되기 이전 유동성이 있을 경우 본 주입재와 함께 혼합됨은 물론, 주입재의 역류가 발생되어 원지반으로 주입이 곤란하며, 반대로 너무 시간이 지나 겔화단계를 넘어 고결되었을 경우 본 주입재가 지반내로 주입되지 못하는 경우가 발생된다. 실링재의 유동성이 없어져 겔화 상태로까지 걸리는 시간에 따라 강관다단 그라우팅의 공사시간이 결정되며, 이는 전체 터널의 공사기간과 밀접한 관련이 있어 중요한 요소 중에 하나이다. 따라서 본 연구에서는 실링재 본연의 역할과 기능을 할 수 있을 뿐 아니라 공사기간을 단축시킬 수 있도록 실링재의 겔화시간을 단축시킬 수 있는 칼슘알루미네이트 재료를 개발하였고, 실링재 겔화 여부를 판단하는 방법에 대해 제시하고, 아울러 실링재의 겔 상태에서 블리딩율에 대해서도 각 품질기준과 시험방법에 대해 제안하였다.

주요어: 강관다단 그라우팅, 실링재, 실링재 겔화시간, 실링재 블리딩, 실링재 품질기준

1. 서 론

강관다단 그라우팅 공법은 터널 굴착 중 아칭현상이 발휘되기 곤란한 갱구부와 같은 저토피 구간이나 굴착지반이 풍화토 혹은 풍화암과 같이 불량한 경우, 연암 이상의 암반이지만 불연속면이 발달하여 절리면으로 용수 등이 발생되는 경우 자주 적용되는 터널 보조공법이다. 굴착지반의 강성보강이나 차수보강을 목적으로 할 경우 주입재료나 배합비가 변경되기도 한다. 강관다단 그라우팅 공법은 기존의 파이프 루프(piperoof)공법에서 발전된 공법으로 불량한 지반을 보강하기 위해 굴착 전 지지대 등을 설치하고 강관과 강관을 연결하여 완전한 구조체를 형성함으로써 지반을 보강하던 방법에서 다소 자립이 가능한 지반의 경우 지반의 전단강도 유발을 통해 지지가 가능하도록 강관과 강관 사이를 분리하여 설치한 후 강관 사이의 지반에 강관내부에서 외부로 주입재를 주입하여 지반 보강을 하여 굴착 지반의 아칭효과가 발현되도록 발전시킨 공법이다.

즉, 강관다단 그라우팅 공법은 다공질 강관을 지반 속으로 삽입하고 지반조건에 따라 주입길이를 조정하여 단계별로 그라우트를 주입하는 싱글패커(single packer)방식이다. 주입재료로는 시멘트 밀크를 주재료로 이용하지만 지반조건과 용수유입상태에 따라 화학약재(chemical grout)를 혼합, 병용하여 주입한다.

최근 강관다단 그라우팅 공법이 적용되는 현장에서 실링 후 24시간의 양생시간을 지키지 않는다는 의혹이 제기되었고, 이로 인해 실링재에 대한 관심이 높아지기 시작했다. 그 동안 실링재에 대한 명확한 품질기준이나 시방기준의 부재로 인해 실링재에 대한 현장관리의 중요성이 저하되었으며, 이로 인해 그라우팅의 건전성이 손상될 수 있기 때문에 실링재의 품질기준은 반드시 필요한 것으로 사료된다.

최근 발주기관에서는 실링재에 대한 현장시험을 실시하여 실링재의 겔화에 필요한 배합예시를 제시하고 적정 시간을 23 ± 1시간으로 규정하는 시방(안)을 제시하였으나 강관다단 그라우팅 보강시간이 실링재 겔화에 필요한 시간(24시간)과 본 주입재의 주입 후 양생시간(24시간)을 고려할 때 실링재와 주입재의 겔화 및 양생시간만 48시간(2일)이 소요된다는 것은 실제 시공현장에서 공기지연의 문제와 직결되기 때문에 겔화시간을 단축시킬 수 있는 속경성 실링재의 필요성이 대두되고 있다.

이에 본 논문에서는 연구를 통해 실링재 본연의 역할과 기능을 할 수 있을 뿐 아니라 공사기간을 단축시킬 수 있도록 실링재의 겔화시간을 단축시키는 속경성 실링재를 개발한 내용과 실링재의 겔화 여부를 판단하는 방법에 대해 제시하고 아울러 실링재의 겔 상태에서 블리딩이 발생되지 않도록 하는 방안 등 품질기준과 시험방법을 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 실링재의 역할과 기능

강관다단 그라우팅에 적용되는 실링재는 1980년대 이탈리아의 트레비사가 개발한 우산망 보강공법(RPUM)에 최초로 적용된 것으로 알려지고 있다. 구조물 균열부의 보수보강에도 자주 사용되는 실링재는 균열부 주면을 실링하여 본 주입재를 밀실하게 주입할 수 있도록 주입효율을 높여주는 재료이다. 강관다단 그라우팅 공법의 경우에도 최종적으로 지반내로 주입재를 주입하기 위해 강관과 천공홀 간극을 실링재로 채워 본 주입재가 주입부 외부로 역류를 방지하여 지반내로 밀실하고 충분히 주입이 될 수 있도록 하기 위함이다.

이러한 원리를 이해하기 위해 실링재의 역할과 본 주입재의 원리를 형상화하면 아래 Fig. 1과 같다.

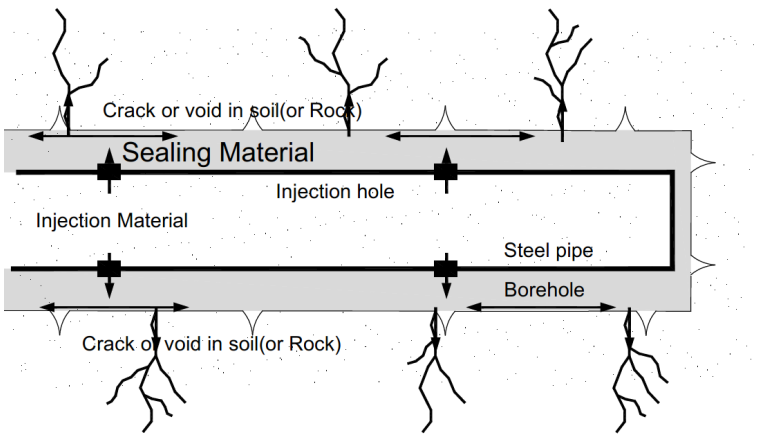


Fig. 1. Role of sealing material and principle of main injection

일반적으로 강관다단 그라우팅 공법의 시공방법 및 순서는 Fig. 2와 같다.

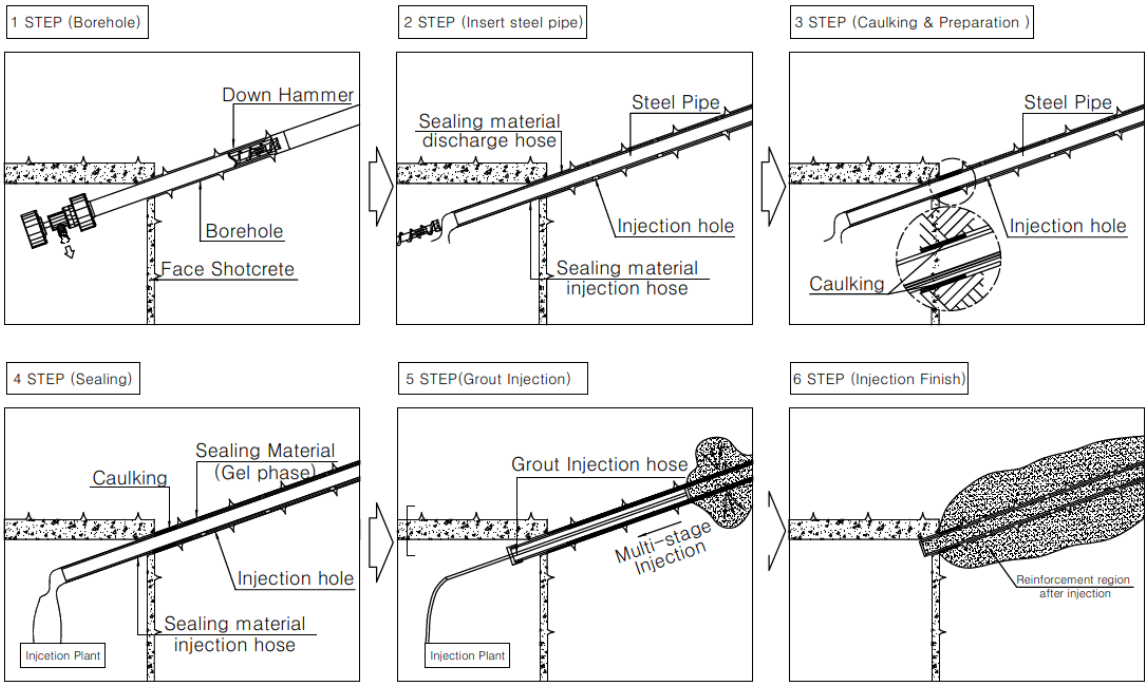


Fig. 2. Step-by-step construction sequence for multi-stage grout of steel pipe

이러한 실링재의 역할을 수행하기 위한 품질기준이나 시방규정이 명확히 규정된 바가 없다. 다만, 공사의 특성에 따라 일부 특정공사의 시방서에 명기된 내용은 다음과 같다(Korea Rail Network Authority, 2016).

① 실링재 주입 후 천공홀 내 큰 부피의 변화가 없어야 한다.
② 실링재는 너무 큰 강도를 갖지 않아야 한다.
③ 그라우트 본 주입시 역류를 방지할 수 있도록 충분히 채워지고, 적정한 강도를 지녀야 한다.
(시간대별 겔화 상태 확인, 즉, 90° 유지 확인 및 응결상태 강도 확인)
④ 본 주입 그라우트가 쉽게 분사될 수 있어야 한다.
⑤ 실링재는 천공홀 내에 주입되어 주입재의 역류를 방지하는 역할을 하며 고결강도가 약하고, 부피가 팽창하여 공간을 남기지 말아야 한다.

실링재가 이러한 역할을 충실히 수행하기 위해서는 본 주입이 완료되기 전까지 완전 고결이 된 상태가 아닌 겔화 상태로 존재하여야 한다. 그러나 최근 지적된 바와 같이 규산소다를 이용하여 실링재로 사용할 경우 겔 타임을 매우 짧게 할 수는 있지만 경화되는 속도도 매우 빨라져 본 주입재를 주입할 경우 실링재가 이미 양생된 상태로 주

입이 거의 되지 않는 현상이 발생하게 된다. 따라서 본 주입재의 주입에 영향이 없도록 겔 상태를 유지하는 것이 중요하다.

2.2 실링재에 대한 연구사례

앞서 언급한 바와 같이 강관다단 그라우팅에 적용되는 실링재에 대한 연구사례를 매우 미흡한 편이다. 실링재의 적정 겔화시간에 대한 연구는 1994년에 한국건설기술연구원에서 수행한 "강관보강형 다단 그라우팅공법의 개발" (Hong et al., 1994) 연구에서 다루어졌다. 당시에는 실링재의 충분한 겔화를 위해 48시간 경과 후 본주입을 실시하였는데, 시료완성 직후와 24시간 경과 후, 48시간 경과 후, 72시간 경과 후에 대한 시료의 수축성을 측정한 결과 24시간 이후부터는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, 당시 실링재의 충분한 겔화를 위해 48시간 경과 후 본주입 공정을 24시간으로 대폭 줄일 수 있는 연구결과를 얻은 것이다. 그 이후 현재까지 명확한 실링재의 공학적 기준이 제시되지 못한 상태에서 통용적으로 실링재 주입 24시간 경과 후 본주입을 실시하는 방안이 적용되고 있다.

최근들어 벤토나이트와 시멘트, 물을 혼합한 실링재가 충분히 팽창하여 제 기능을 하기 위해서는 24시간이 소요되는데, 이에 대한 세부사항에 대한 기준이 부재하고 잘 지켜지고 있지도 않는다는 내용과 규산소다를 이용하여 실링재의 겔타임을 임의로 단축시켜 본 주입재가 주입되지 못하는 조건으로 시공이 되었다는 내용이 발표되었다(Korea Rail Network Authority, 2018a).

Ahn (2018)는 강관다단그라우팅 공정에서 실링재에 대한 규정된 시험방법은 없고, 겔화시간 및 투입재료에 대한 관리기준 부재로 현장시험 사례 또는 경험적 관리기준에 의거하여 품질관리를 하고 있는 것으로 조사하였다. 이와 관련된 조사 결과를 요약하면 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 한국철도시설공단에서 고시한 시방서의 경우 실링재 배합시 급결재 사용은 금하고 있으나 해당 논문의 시험사례 비교 결과표에서는 급결재를 사용하는 사례가 2건으로 나타났다. Ahn (2018)은 발주기관 및 현장별 품질관리 기준이 제 각각이므로 실링재의 품질관리에 대한 개념 정립이 필요한 것으로 결론을 내었다.

Table 1. Comparison of sealing material test cases (Ahn, 2018)

Kinds	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Test method	Penestration value	Uniaxial compressive strength	Mold shrinkage	Amount of injection material
Management standard	-	After 7 days: 100 kg/cm^2 After 28 days: 210 kg/cm^2	-	-
Curing time	24 hr	-	-	12 hr
Bentonite quality standard	Suggest (swelling value)	-	-	-
Quickly hardening admixture	Apply	Apply	-	-

한편, 한국철도기술연구원은 한국철도시설공단에서 제시한 “소구경 강관다단그라우팅 공사시방서(안)”을 개선하기 위하여 “철도터널 보강용 강관다단공법 시공개선 연구”를 수행한 바 있으며 실링재에 대한 연구사례는 상기에서 언급한 정도로 매우 미흡한 실정이며 최근에 활발히 연구가 진행되고 있다. 이에 본 고에서는 앞선 사례를 토대로 실링재에 대한 추가적인 연구를 진행하고자 한다.

2.3 실링재의 품질기준 사례

앞서 언급된 바와 같이 최근까지 실링재에 대한 품질기준 사례는 거의 제시된 바가 없으나 최근 한국철도시설공단은 “강관다단 그라우팅 보강시 실링재 및 주입재의 배합비 시험”과 관련된 연구를 실시하여 “소구경 강관다단그라우팅 공사시방서(안) (Korea Rail Network Authority, 2018b)”을 작성하여 배포하였고 한국철도시설공단의 “소구경 강관다단그라우팅 공사시방서(안)”에서 실링재 관련 사항(3.6절)인 배합비, 배합방법 및 겔화시간, 겔화 판단기준 등을 다음과 같이 제시하였다.

실링재의 주입목적은 강관과 천공홀 사이를 채워 천공홀의 공벽붕괴 및 주입재의 역류를 방지하는 것이며, 적정 겔화시간을 준수하여야 한다. 실링재 배합시 물과 벤토나이트를 선배합하여 실링재의 팽창성이 확보되도록 한 후 시멘트를 배합하여야 하며, 실링재의 주입작업은 기 설치된 주입호스에 그라우팅 펌프를 연결하여 강관과 굴착면 사이의 공간이 완벽하게 충전되도록 주입관리를 하여야 한다. 또한, 여러 가지 배합비로 시험시공 및 실내시험을 수행하여 결정하여야 하며, 실링재 배합비는 아래의 Table 2와 같이 배합비(예시)를 제시하였다.

Table 2. Example of compounding ratio (Korea Rail Network Authority, 2018b)

Water (L)	Cement (kg)	Bentonite (kg)	Remark
910	200	62.5	Per 100 L

또한, 위 배합비의 경우 실링재 겔화시간은 23 ± 1시간으로 하여야 하는 것으로 규정하였고, 겔화시간 단축을 위해서는 배합비 및 배합재료를 달리하여 시험시공 및 실내시험을 통해 적정 겔화시간이 확인된 경우 건설사업관리기술자의 승인을 득한 후 변경할 수 있도록 하였으며 단, 배합재료로 급결재는 사용하지 않는 것을 원칙으로 제시하였다. 특히, 겔화의 판단기준은 비카트 침에 의한 수경성 시멘트의 응결시험(KS L 5108)을 시행하여 관입량이 30초간 최대 10 mm 이하로 규정하였다.

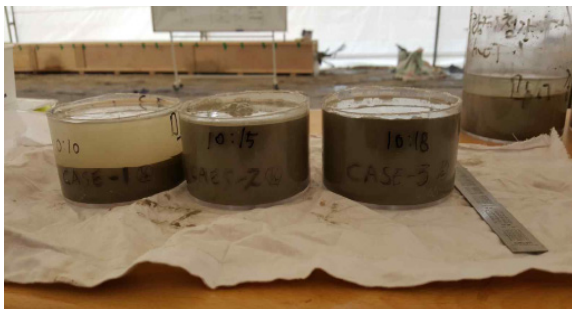
3. 속경성 실링재의 개발

3.1 기존 실링재에 대한 시험사례

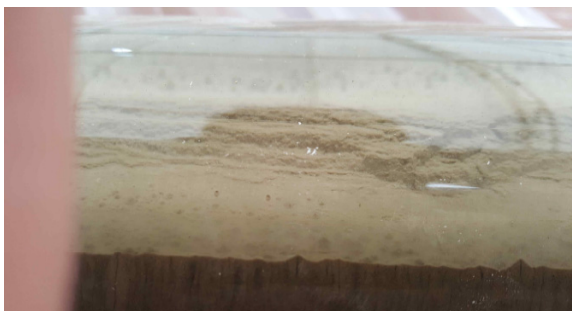
기존에 사용하던 실링재(시멘트 + 벤토나이트 + 물)에 대한 배합비 시험을 수행하여 작성한 “강관다단 그라우팅 보강시 실링재 및 주입재의 배합비 시험결과 보고서”를 참조하면 시방서(안)에 제시된 일반 배합비로는 24시

간 이후에 겔 상태가 되는 것을 확인하였다. 또한, 모형시험시 실링재 주입 후 실링재의 재료분리가 발생되었고, 이는 물과 시멘트의 재료분리로 인해 실링재의 겔화가 늦어지는 것으로 파악된다. 재료분리 현상은 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 실링재의 역할과 기능을 확보하기 위해 점도와 팽윤성을 목적으로 벤토나이트를 사용하고 있으나 재료분리에 의한 겔화지연, 응결종료 후 블리딩 문제로 인해 시공 후 원 지반과 강관의 일체화가 되지 않는 상태로 존재하게 되어 보강공법의 적정성에도 문제가 될 수 있다고 나타내고 있다.

(a) Primary test material separation



(b) Secondary test material separation



(c) Separation of materials in acrylic tubes

Fig. 3. Separation of materials in sealing materials (Korea Rail Network Authority, 2018a)

기존 실링재의 겔화 지연, 재료분리 문제(블리딩 포함) 등은 강관다단 그라우팅 공법을 적용하기 위해서는 반드시 선결되어야 하며, 이에 본 연구에서는 겔화시간을 단축하고 블리딩이 발생되지 않는 새로운 속경성 실링재를 개발하였으며 개발된 실링재의 적정성에 대한 검증을 실시하였다.

3.2 속경성 실링재 개발

기존에 사용되어온 실링재는 시멘트 + 벤토나이트 + 물로 구성되어 있다. 여기서, 벤토나이트는 4면체-8면체-4면체 광물 결정이 연속적으로 배열된 판상의 구조를 가지며, 이 판과 판 사이에 물 분자를 흡착한 뒤 팽윤(swelling)하여 부피가 급격히 증가하게 된다. 이러한 부피 증가에 따라 실링재의 점도가 변화하게 되는 원리를 가진다. 팽윤된 벤토나이트는 점도가 상승하긴 하지만 계속 유동성을 가지고 있으며 흐름이 정지된 겔 상태를 만들기 위해

시멘트를 첨가하게 된다. 시멘트 수화물이 벤토나이트 입자사이에 침전하여 구속하면서 흐름정지가 이루어지며, 지속적인 시멘트의 수화를 통해 응결하여 최종적으로 경화하는 메커니즘을 지니고 있다. Fig. 4는 Kaolinite 점토 광물의 판상구조를 현미경 관찰을 통해 보여주고 있고, Fig. 5는 벤토나이트의 결정구조를 나타낸다.

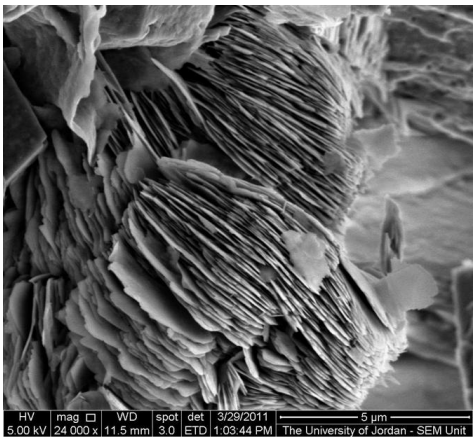


Fig. 4. Structure of clay minerals (Kaolinite) (Storr and Murray, 1986)

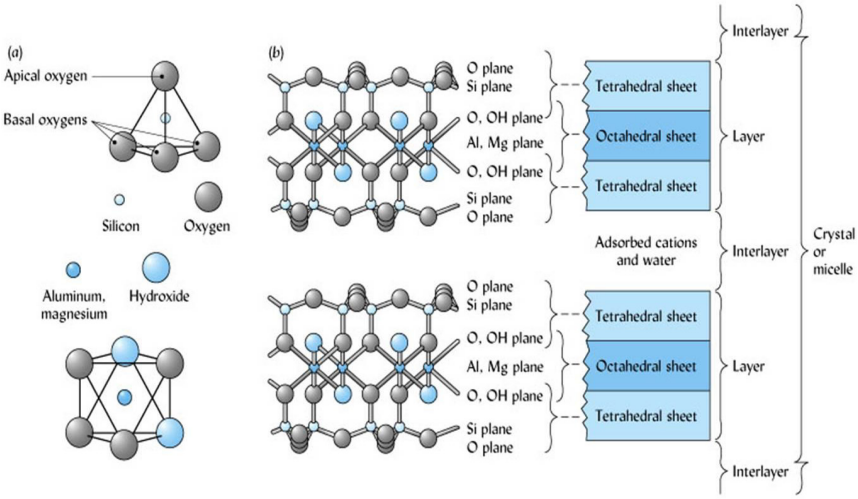


Fig. 5. Crystalline structure of bentonite (Masindi, 2015)

시멘트를 구성하는 주요 광물은 C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF이며, 이 가운데 강도 발현에 주로 기여하는 것은 C_3S로 알려져 있다. 시멘트 강도발현에 기여하는 주요 반응은 수화 반응으로 이루어지는데 수 시간이 소요되며, KS L 5201에 규정된 시멘트의 응결시간은 초결 60분 이상 종결 10시간 이내이다. 주요 반응에 대한 수식은 다음 식 (1)과 같다.

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$
$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \quad (1)$$

새로 개발된 실링재는 벤토나이트의 팽윤성을 이용하는 것은 동일하나, 시멘트 수화물에 의한 입자구속에 걸리는 시간을 단축하기 위해 주요 바인더를 칼슘알루미네이트로 변경하였고, 이로 인해 칼슘알루미네이트 강도발현에 기여하는 주요 반응은 다음 식 (2)와 같다.

$$CA + H \rightarrow CAH_{10}$$
$$C_{12}A_7 + H \rightarrow C_2AH_8 + AH_3 \quad (2)$$

그러나 SO_4^{2-} 이온이 존재하는 경우 칼슘알루미네이트는 에트링자이트(Ettringite, $C_6AS_3H_{32}$)를 생성하며, 칼슘알루미네이트의 수화반응 속도는 시멘트에 비해 매우 빠르다(식 (3)).

$$3CA + 3CSH_2 + 32H \rightarrow C_3A \cdot 3CS \cdot 32H + 2AH_3 \quad (3)$$

이러한 수화반응의 속도 차이에 의해 벤토나이트 입자의 유동을 구속하여 흐름을 정지시키고 경화되는 시간이 시멘트에 비해 크게 단축되는 효과가 있다. 개발된 실링재의 효과를 확인하기 위해 기존의 일반 실링재와 같이 겔화 및 블리딩 발생여부 확인시험, 비카트 침의 근입도 시험을 실시하여 개발된 실링재의 성능을 비교, 검증하였다.

4. 실내시험

실링재는 천공홀 내에 주입되어 부피가 팽창하여 천공홀과 강관사이의 공간이 남지 않도록 하고 주입재의 역류를 방지하며, 겔 상태에서 본 그라우트재의 지반내로 원활한 주입이 가능하여야 한다. 이러한 실링재에 대한 설계기준 및 관련 문헌상의 품질기준이 명확히 없는 상태에서 한국철도시설공단이 제시한 실링재의 겔화판단기준인 비카트 침의 관입량 기준(10 mm 이하의 침입도), 겔화시간 23 ± 1시간 기준 등은 주입성능 저하, 공기지연 등으로 현장 적용성이 낮은 것으로 판단된다.

본 고에서는 기존에 사용된 실링재를 “소구경 강관다단 그라우팅의 공사시방서(안)”에서 제시한 시험 방법으로 비교, 검증하고 이를 근거로 실제 현장에서 적용성이 높고 간편한 시험기준을 제안하고자 한다. 시험에 적용된 기존 실링재의 배합과 개발된 실링재의 배합표와 금회 실시한 시험 항목은 Table 3과 Table 4와 같다.

기존 실링재에 적용된 벤토나이트는 팽윤도 20 이상의 나트륨계 벤토나이트를 적용하였으며, 새로 개발된 New sealing Type의 경우 주요 바인더를 칼슘알루미네이트로 변경한 것으로 화학조성과 물리적 특성은 Table 5와 같다.

Table 3. Binding table of sealing material

Kinds	Water (L)	Cement (kg)	Bentonite (kg)	New seal	Remarks
New sealing Type #1 (W/C = 100%)	715	-	-	715	Per 100 L
New sealing Type #2 (W/C = 150%)	787.5	-	-	525	
New sealing Type #3 (W/C = 200%)	830	-	-	415	
Normal sealing material	910	200	62.5	-	

Table 4. Test items of sealing material

Kinds	Standard	Remarks
Check for bleeding	Not occurred	Within 5%
Gelation time	Gelled state visually observed when tilted 90 °	-
Vicat needle penestration	The maximum penetration amount is 10 mm or less (Korea Railway Authority Standard)	-

Table 5. Chemical composition and physical properties of New sealing Type

Kinds	Chemical composition									Physical properties	
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Total	Deg. powder (cm^2/g)	Density (g/cm^3)
Cement	22.5	4.6	3.5	63.7	1.6	0.2	0.2	2.1	98.4	3,400	3.14
Bentonite	64.5	14.8	3.7	2.1	2.0	0.8	3.8	0.1	91.8	1,900	2.61
New seal	31.1	8.7	2.6	49.6	2.6	0.3	1.6	2.0	98.5	3,100	3.01

4.1 겔화(Gelation) 및 블리딩 확인시험

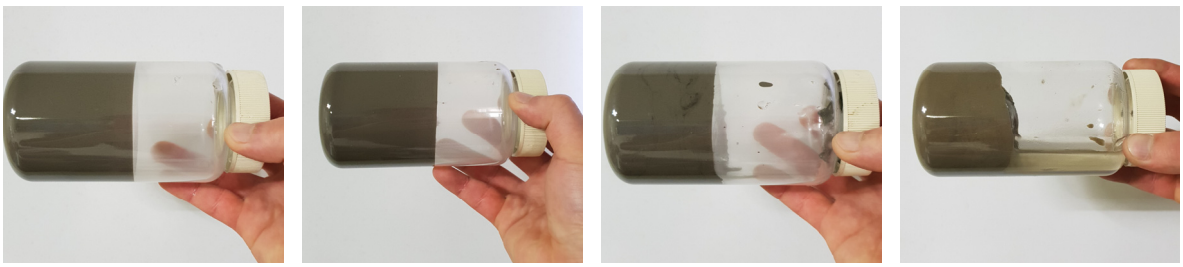
실링재의 겔화여부와 블리딩 여부를 확인하기 위해 배합비에 맞도록 Fig. 6과 같이 5분간 교반하여 시험용 투명컵에 담은 후 겔화여부와 블리딩 여부를 확인하였고 Fig. 7과 Fig. 8에 시험결과를 나타냈다. 블리딩 여부 측정은 24시간 이후 관측된 결과이다.

개발된 실링재는 배합은 다르지만 교반 후 30분 이내에 흐름정지 상태인 겔화 상태로 되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 일반 실링재의 경우에는 약 10시간이 지나서야 흐름이 정지하는 겔화 상태가 되었으며, 이 경우에도 기존 시험사례와 동일하게 블리딩이 발생되었다.

또한, 블리딩 여부에 대한 측정을 위해 교반 배합 후 24시간이 지나고 관측한 결과 새로 개발된 실링재는 블리딩이 전혀 발생하지 않았으나 일반 실링재의 경우 블리딩율이 34%정도 발생되는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 상기 3.1 기존 실링재의 문제점에서 나타낸 기존 시험(Fig. 3; Korea Rail Network Authority, 2018a)과 동일한 결과이다.

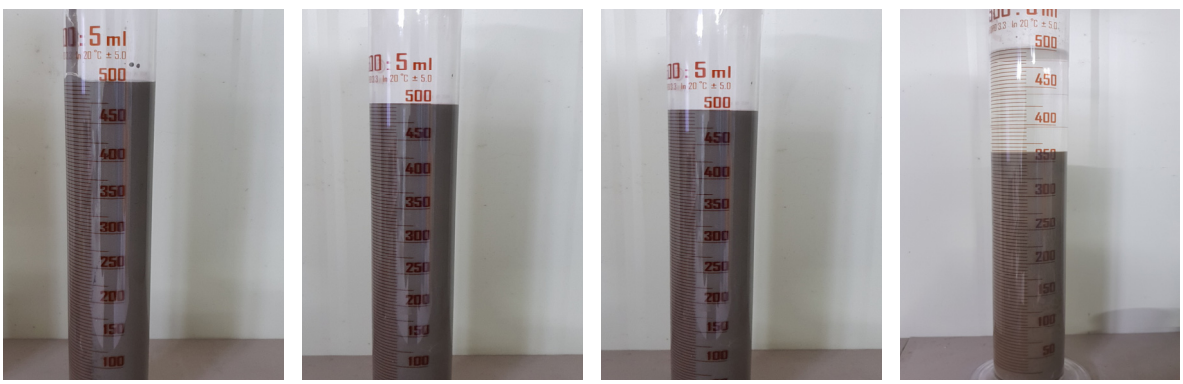
(a) New sealing Type#1 (b) New sealing Type#2 (c) New sealing Type#3 (d) Normal seal material

Fig. 6. Sealing materials mixing



(a) New sealing Type#1 (within 30 minutes) (b) New sealing Type#2 (within 30 minutes) (c) New sealing Type#3 (within 30 minutes) (d) Normal seal material (after 10 hours)

Fig. 7. Gelled state visually observed when tilted 90°



(a) New sealing Type#1 (b) New sealing Type#2 (c) New sealing Type#3 (d) Normal Seal Material

Fig. 8. Bleeding observation result

4.2 비카트 침의 관입시험

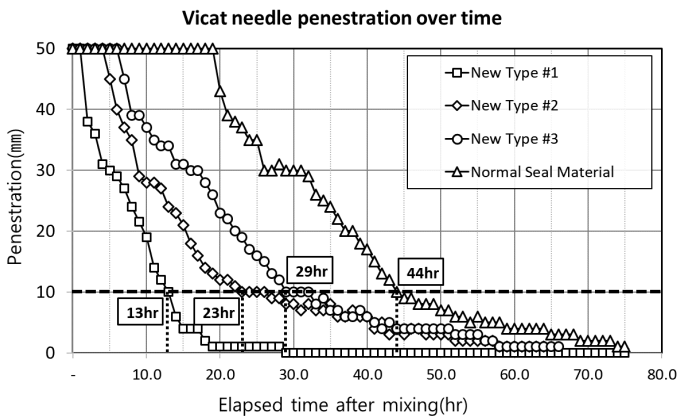
비카트 침에 의한 수경성 시멘트 응결시험(KS L 5108)을 배합비에 따라 시행하였다. 시험시간은 “소구경 강관 다단 그라우팅의 공사시방서(안)”에서는 경화시간 18시간 이후에 비카트 침의 관입시험을 수행하도록 하였으나

본 연구에서는 관입량에 대한 경향파악을 위해 교반후 매 1시간마다 비카트 침의 관입시험을 수행하여 시간별 실제 관입량을 모두 측정하였다. 측정결과 일반 실링재의 경우 비카트 침의 관입량이 10 mm 이내가 되는 시간은 44시간이 지나야 해당 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 일반 실링재는 10시간이 되어야 흐름정지에 해당되는 겔화상태를 육안으로 확인할 수 있었고, 기존과 동일 시험에서도 제시한 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 각 실링재에 대한 시험결과는 Table 6과 Fig. 9와 같다.

Table 6. Test Result of Vicat needle penestration

Elapsed time after mixing	New sealing Type #1	New sealing Type #2	New sealing Type #3	Normal sealing material
30 min	Gelled	Gelled	Gelled	No Gelled
1 hours	50 mm or more	50 mm or more	50 mm or more	50 mm or more
5 hours	30 mm	45 mm	50 mm or more	50 mm or more
10 hours	19 mm	28 mm	37 mm	50 mm or more (Gelled)
15 hours	4 mm	21 mm	31 mm	50 mm or more
20 hours	1 mm	12 mm	23 mm	43 mm
25 hours	1 mm	10 mm	16 mm	35 mm
30 hours	0 mm	8 mm	10 mm	30 mm
35 hours	End of measurement	8 mm	7 mm	24 mm
40 hours	-	6 mm	6 mm	17 mm
45 hours	-	3 mm	4 mm	9 mm
55 hours	-	2 mm	3 mm	6 mm
65 hours	-	1 mm	1 mm	3 mm
75 hours	-	End of measurement	End of measurement	1 mm

(a) Test of Vicat needle penestraion
(W/C = 150%, Elapsed time 23 hrs)



(b) The results of the penestraion of vicat needle
by elapsed time after mixing

Fig. 9. Test of Vicat needle penestration and results

시험 결과 비카트침 관입량 10 mm 이하에 만족하는 겔화 판단시간은 개발된 실링재의 경우 13시간(W/C = 100%), 23시간(W/C = 150%), 29시간(W/C = 200%)으로 측정되었고, 기존 일반 실링재의 경우에는 44시간이 되어서야 관입량이 10 mm 이하로 측정되었다. 기존 실링재에 비해 개발된 실링재의 겔화시간이 34~70%가량 단축된 것으로 나타났지만 기존 실링재는 "소구경 강관다단 그라우팅의 공사시방서(안)"에서 제시한 겔화시간과 차이가 있었다.

이번 시험을 통해 다음과 같은 의문이 들었다. 첫 번째는 비카트 침의 관입량 10mm 이하일 때를 측정한 결과 공사시방서(안)에서 제시된 겔화시간과 차이가 발생했다는 점이고, 두 번째는 겔화 여부를 판정하는 것은 강관다단 그라우팅 공법에서 본 주입재를 주입할 수 있는 시간을 결정하기 위함인데 육안판정을 통해서는 흐름정지 상태인 겔화 상태로 판단할 수 있었으나 비카트 침의 관입량 시험에서 10mm 이하인 상태에서 본 주입재가 원할하게 주입이 되는가에 대한 의문이다.

첫 번째 의문에 대한 해답은 실링재의 배합 교반시 혼합수의 온도와 양생조건에서의 외기온도의 차이로 기인된 문제라고 판단된다. 이는 콘크리트 배합시험시에도 콘크리트의 응결조건에 영향을 미치는 인자가 혼합수와 외기온도이기 때문이다. 본 실험실의 외기온도는 20~22°였으며, 배합수의 온도는 15~16°였다. 두 번째 의문에 대한 해답을 찾기 위해 본 연구에서는 별도의 주입시험을 실시할 필요성을 갖게 되었다. 즉, 1.5 Mpa 이하의 저압으로 주입하는 강관다단 그라우팅 공법에서 비카트 침 관입량 10 mm 이하의 굳기를 가진 실링재를 뚫고 역류 없이 원지반으로 주입되는지는 시험을 통해서만 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 평가를 위해 원지반을 모사한 모형토조에 비카트 침의 관입량 10 mm 이하를 가진 실링재를 주입하고 나서 본 그라우트 주입성능 시험을 실시하여 실링재의 겔화에 대한 고찰을 실시하였다.

5. 그라우트 주입성능 모형시험

5.1 모형시험 개요

앞서 기술한 바와 같이 실링재의 겔화시 주입 성능을 확인하기 위해 모형토조를 이용한 실내주입시험을 실시하였으며, 주입에 따른 침투정도와 고결체의 형성크기를 파악하기 위하여 고결성 시험을 실시하였다. 시험은 실링재(New sealing Type#1, W/C = 150%)를 주입 후 비카트 침 근입량 10 mm 이하일 때 본 그라우트재를 주입하는 경우와 실링재(New sealing Type#2, W/C = 150%) 를 주입 후 겔화라고 판단되는 흐름정지 상태가 유지되는 30분 후에 본 그라우트재를 주입하는 경우를 적용하였고 또한 실링재의 역할을 고찰하고자 실링재 없이 본 그라우트 재료를 주입할 경우에 대해서도 시험을 시행하여 비교해 보았다. 시험 Case는 Table 7과 같다.

Table 7. Test Cases

Kinds	Contents	Remarks
Case 1	New sealing materials Type#1 with Vicat needle penestration 10 mm or less	W/C = 100%
Case 2	New sealing materials Type#1 in gelled after 1 hour with injection	W/C = 150%
Case 3	Without sealing materials	-

모형지반 몰드는 직경(내경) D = 490 mm, 높이 h = 500 mm, 두께 t = 10 mm의 원통형 조립박스를 사용하였다. 모형지반은 규사 5호사(D0.7~1.4 mm)를 사용하여 몰드 내에서 진동다짐방법을 사용하여 조성하였고 모래지반의 투수계수는 1.21×10^{-2} cm/sec이다. 주입시험을 위한 주입관은 길이(l) = 300 mm, 직경(d) = 15 mm, 두께(t) = 3 mm의 원통형 PVC관으로서 직경 d = 5 mm의 주입구가 25 mm 마다 90° 회전에서 2개씩 설치되었으며 주입관의 개요도와 실물사진은 Fig. 10과 같다.

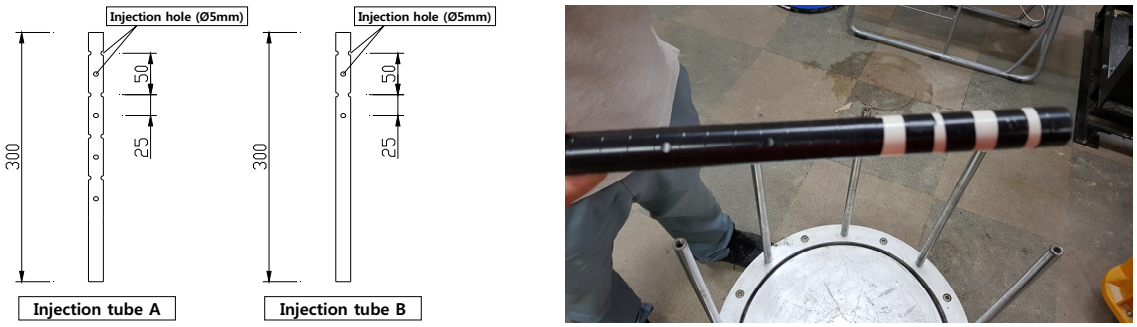
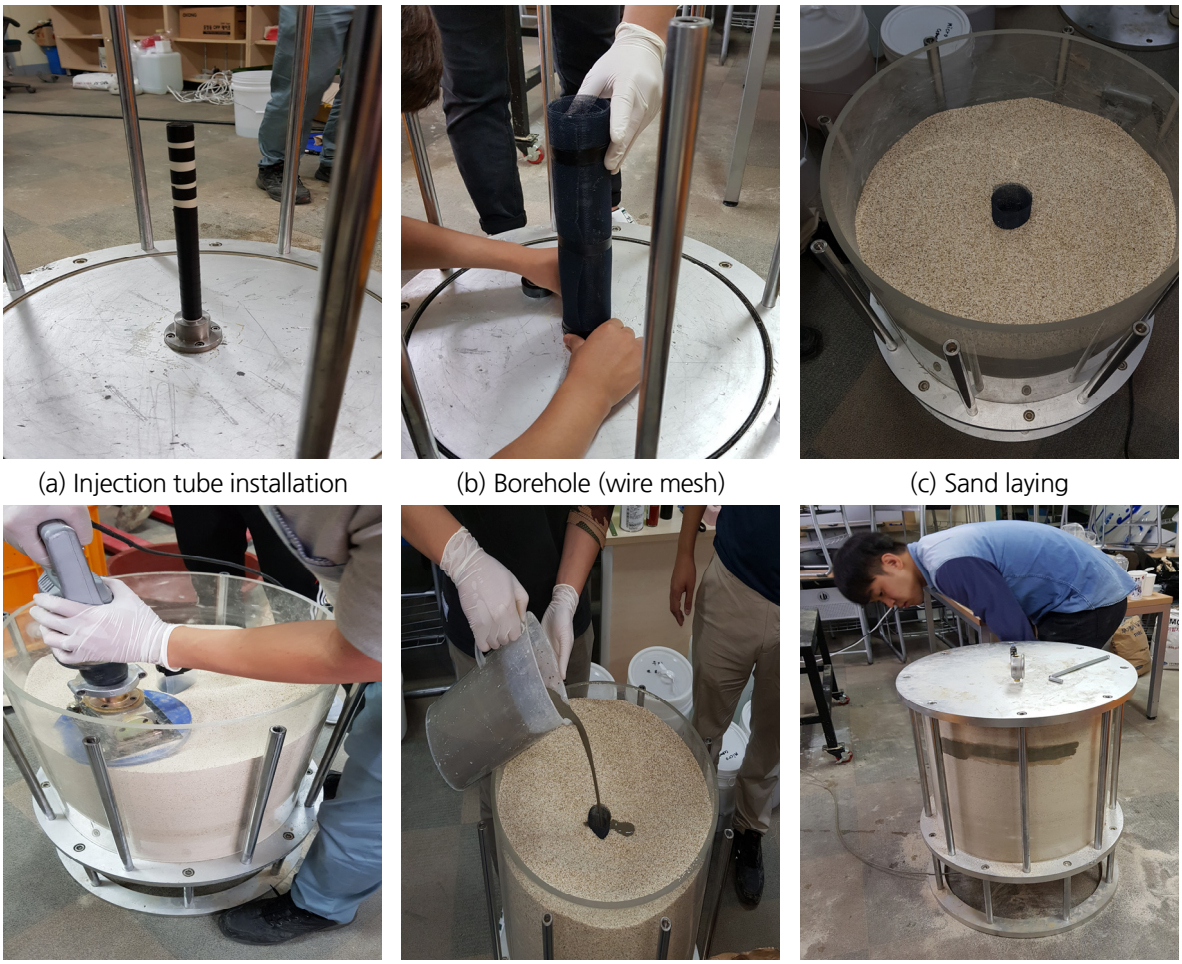


Fig. 10. Injection tube design overview and real picture

천공홀을 모사하기 위해서 철망(직경 0.4 mm, Mesh size 20 × 20)을 2~3겹정도 말아서 홀안으로 모래가 들어오는 것을 방지하고 그라우트재의 모래층으로 주입이 가능하도록 하였다. 또 모래다짐시 철망 사이로 모래가 들어오는 것을 방지하기 위해 천공홀 보호관(아크릴)을 설치하였고 모래다짐후 지반에 영향을 최소하하며 제거 하였다. 시험 순서에 따라 주입시험을 하되 시험별에 따라 약간의 시험순서 및 조건을 달리하였다.

먼저, Case 1의 경우 실링재를 교반하여 주입 후 비카트 침 관입시험을 진행하면서 관입량이 10 mm 이하일 때 본 그라우트 재를 주입하였고, Case 2의 경우 실링재를 주입하고 흐름정지가 발생되는 30분이 지나고 난 후 본 그라우트재를 주입하였으며, 다단 효과를 모사하기 위하여 주입관B를 이용해 주입구를 일정 개수만 설치한 후 주입하였으며, Case 3의 경우 실링재를 주입하지 않고 다단효과를 모사하지 않기 위해 주입관A를 이용해 그라우트를 한 번에 주입하였다. 시험 순서는 Fig. 11과 같다.



(a) Injection tube installation (b) Borehole (wire mesh) (c) Sand laying

(d) Sand compaction (e) Injection of sealing materials (f) Injection of Grout materials

Fig. 11. Model test sequence for sealing materials

5.2 모형시험 결과

먼저 Case 1의 시험을 위해 실링재 교반 후 비카트 침 관입시험을 시간별로 시행하였고, 관입량이10 mm에 도달된 시간은 기존과 동일한 13시간이었다. 이를 확인 후 본 그라우트재를 주입하였다.

그라우트 주입압 1.5 MPa로 그라우트를 30초 동안 20 liter를 모두 주입한 결과 모래 일부가 뭉쳐있는 정도였고 주입관 주변으로 주입재의 주입흔적은 Fig. 12와 같이 살펴볼 수 없었으며, 실링재의 경우도 겨우 걷어낼 수 있어 그라우트재는 일부 할열주입만 이루어진 것으로 판단된다.

Fig. 12. Test result of Case 1: Grout injection failed into sandy soil and Hardened sealing materials

이러한 결과로 볼 때 한국철도시설공단에서 제시한 비카트 침 관입시험에서 10 mm 이하의 관입량을 갖는 실링재를 겔화상태로 판단한다는 기준은 적합하지 않은 것으로 판단된다. 근입량이 10 mm 이하의 겔 상태에서는 저압주입되는 그라우트재가 실링재를 통과하여 원 지반으로 침투되기 곤란한 것으로 시험결과 판단된다.

Case 2는 Case 1과 마찬가지로 실링재를 주입하고 흐름정지를 육안으로 확인한 30분~1시간 후에 그라우트재를 주입하였다. 시험결과 Case 1과는 다르게 Fig. 13과 같이 침투주입이 발생된 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 13. Test result of Case 2: Grout size: Long axis: 43.5 cm, Short axis: 21.75 cm, Width: 17 cm

그라우트 고결체의 크기는 장축 43.5 cm, 단축 21.75 cm 정도이며 두께는 17 cm로 주입구의 위치에서 그라우트 고결체가 형성되었음을 확인할 수 있었다. 일반적인 강관다단 그라우팅시 확산범위인 5배보다 큰 범위로 확산되어 주입된 것을 알 수 있었다. 확산범위가 큰 이유는 입경이 고른 모래만을 사용하였기 때문에 주입범위가 향상된 것으로 사료된다. 또한, 주입량이 20 liter로 한정되어 있었고, 다단 효과를 모사하기 위해 주입관 B를 사용하였기 때문에 본 형상으로 주입되었을 것으로 판단되며, 주입량이 더욱 많았다면 하부까지 모두 침투되었을 것으로 사료된다.

한편, Case 3의 경우는 실링재 없이 그라우트재를 주입한 경우인데 Fig. 14에서 보이는 바와 같이 Case 2의 경우보다 크기는 작지만 전체적으로 주입이 일정하게 되었음을 알 수 있다. 고결체의 형상은 위에서 보면 타원형이며 측면에서는 다단 형태로 되어 있는데 이러한 이유는 주입관A를 사용하여 주입하였기 때문에 주입구를 통해 그라우트가 침투되었으나 침투확산범위는 Case 2에 비해 미치지 못한다. 이는 실링재 없이 전체 천공홀에 본 주입재를 주입할 경우 본 주입재의 역류 등이 발생되어 원 지반으로의 침투를 방해하기 때문이다. 고결체의 크기는 평균 길이가 약 20 cm 정도로 주입관의 주입구가 주입압에 비해 많고 천공홀과 강관사이의 빈 공간에 실링재가 없어 저압 주입을 통해 빈공간에 먼저 그라우트재가 채워지며 모래지반내로 주입되기 때문에 주입효과는 크지 않은 것으로 판단된다. 가장 큰 고결체를 형성한 선단부의 폭이 약 17.3 cm이었고, 아래쪽의 가장 작은 고결체는 약 6.8 cm정도로 형성된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 14. Test result of Case 3: Grout size: Width range: 6.8~12.3 cm, Average length: 20 cm

이러한 결과로 볼 때 실링재를 주입하여 다단 주입을 하는 것이 실링재 없이 일시적으로 주입하는 경우보다 고결체의 주입폭이 크고, 주입효과도 더욱 양호한 것으로 판단된다.

6. 실링재의 품질기준 제안

6.1 겔화의 판단기준

"소구경 강관다단 그라우팅의 공사시방서(안)"에서 겔화의 판단기준은 "비카트 침에 의한 수경성 시멘트의 응결시험(KS L 5108)을 시행하여 관입량이 30초간 최대 10 mm 이하여야 한다."로 규정되어 있으나 본 연구에서 시행한 모형시험결과 본 그라우트재가 주입이 곤란하다고 판단되므로, 관련 시방서(안)은 일부 수정이 필요한 것으로 판단된다. 실링재는 본 그라우트재의 역류방지의 역할과 원활한 주입을 위해 필요한 재료이므로 그 역할을 충실히 할 수 있도록 겔화상태를 유지하면서도 본 그라우트재의 원활한 주입이 될 수 있을 정도까지의 시간과 굳기 값이 제시될 필요가 있다고 판단된다.

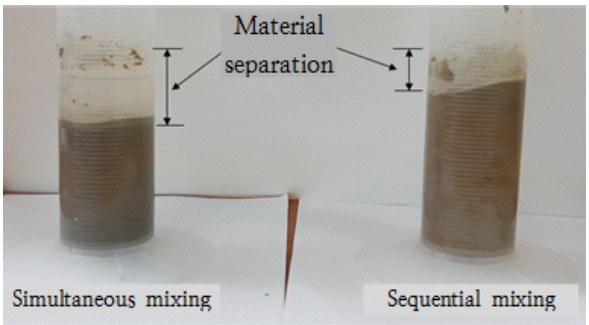
앞서 육안확인시 시행한 컵도립법을 이용하여 90°를 유지하여 유동성이 없는 상태일 때의 시간을 측정하여 흐름정지 상태인 것을 겔화 상태라고 판단한 다음, 본 그라우트재의 겔화 유지시간(본 그라우트재가 주입될 수 있는 시간)을 판단하기 위해 비카트 침의 최대 관입량을 측정한다. 소구경 강관다단 그라우팅의 천공홀의 직경은 일반적으로 105 mm이고, 소구경 강관의 외경은 60.5 mm로 빈 공간은 양측으로 약 22.5 mm 공간이 형성되며 이 공간으로 실링재가 채워지게 된다. 즉, 저압주입을 통해 두께 22.5 mm의 실링재를 통과해서 원 지반으로 주입이 되어야 하므로 비카트 침의 최소 관입량은 25 mm 이상을 유지하는 시간까지를 본 주입을 위한 겔화 유지시간으로 제안한다.

이는 비카트 침 관입량이 10 mm 이하가 된다면 실링재의 두께인 22.5 mm를 통과하여 지반면에 도달하는 것은 곤란하다는 전제이다.

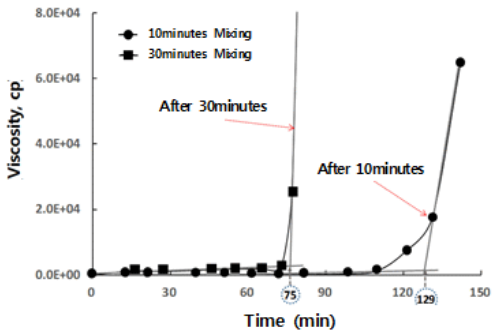
6.2 실링재의 블리딩 최소화

"소구경 강관다단 그라우팅의 공사시방서(안)"에는 실링재의 블리딩에 대한 언급은 없으나 실제 일반 실링재에 대한 배합시험시 발생된 재료분리, 블리딩 현상을 고려할 때 이에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다. 이에 대해 한국철도기술연구원에서 수행중인 "철도 보강용 강관다단 공법 시공개선 연구" (Korea Railroad Research Institute, 2018)에서는 실링재료의 배합방법(동시혼합과 순차혼합)에 따른 재료분리 현상, 배합시간에 따른 점도 특성 등을 분석하였다.

실링재의 배합시 동시혼합에 비해 순차혼합을 시행할 경우 재료분리 현상이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 실링재를 구성하는 성분은 벤토나이트, 물, 시멘트인데, 세 가지 재료를 한 번에 섞는 동시혼합방법에 비해 순차혼합(벤토나이트와 물을 먼저 충분히 혼합 후 시멘트를 추가로 배합) 방법이 재료분리 현상이 덜 발생하였다(Fig. 15(a)). 그리고 혼합시간에 대한 점도시험 결과, 배합시간이 길어질수록 상대적으로 짧은 시간에 점도가 커지는 경향을 나타내었다. 따라서 일정시간 이내에 실링재의 충분한 겔화 정도(점도)를 얻기 위해서 믹싱시간을 증가시키는 것이 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 15(b)).



(a) Test Results of material separation according to sealing material mixing method



(b) Test result of viscosity according to sealing material mixing time

Fig. 15. Test result of material separation and viscosity (Korea Railroad Research Institute, 2018)

상기 결과에 따라 일반 실링재를 사용할 경우 물과 벤토나이트를 30분에서 약 3시간 믹싱한 다음 시멘트를 첨가하여 약 30분간 믹싱 후 겔화 시간 및 재료분리 여부를 확인하고 실링재를 사용하는 것이 유용할 것으로 판단되며, 블리딩율은 5% 이내로 하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

블리딩율은 실링재가 최종 응결이 종료되었을 때 측정하도록 하며, 이는 지중에서 실링재가 응결종료 후 지반면과 강관주면 사이에 채워진 상태에서 블리딩이 발생될 경우 이격된 상태로 지반내에 묻혀 있게 되어 지반-실링재-강관의 일체화가 되지 않아 터널의 안정성 측면에서 불리하게 작용할 수 있을 것으로 판단되기 때문이다. 따라서 블리딩은 가급적 발생되지 않도록 하되 재료 자체가 가지는 오차를 고려하여 약 5% 이내로 선정함이 타당할 것으로 사료된다.

한편, 추가적으로 "소구경 강관다단 그라우팅의 공사시방서(안)"에서는 "배합재료로 급결재는 사용하지 않는 것을 원칙으로 한다."고 하였으나 실링재의 응결시간을 지배하는 요인은 시멘트 성분이므로 응결시간 단축을 위해 초속경시멘트 등의 특수시멘트를 사용하는 것도 문제가 없을 것으로 사료된다.

7. 결 론

본 연구에서는 터널의 강관다단 그라우팅에 적용되는 실링재에 대한 기존의 연구사례를 조사하고일반 실링재의 문제점을 분석하여 새로운 실링재를 개발하였으며, 실내시험 및 모형시험 결과를 통해 실링재를 검증하고 기존에 제시된 품질기준을 수정 제안하였다. 본 연구결과를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 강관다단 보강 그라우팅 공정에서 실링재에 대한 규정된 시험방법이 없었으나, 최근 제시된 겔화 필요시간(23 ± 1시간)과 겔화 판단기준은 현장 공기지연의 문제, 본 그라우트재 주입성능에 대한 문제 등으로 일부 수정이 필요한 것으로 판단된다.

2. 실링재의 겔화시간 단축을 위해 본 연구에서는 주요 바인더를 칼슘알루미네이트로 변경하여 새로운 실링재를 개발하였으며, 컵도립법에 의한 흐름정지가 발생되는 겔화시간을 확인한 결과 30분으로 확인되었고, 비카트 침 관입량 10 mm 이하의 값은 배합 후 배합비별로 13~29시간에 만족하는 것으로 나타났으며, 재료분리 및 블리딩도 전혀 발생되지 않았다.
3. 모형 토조시험을 통해 실링재를 주입한 후 본 그라우트재에 대한 주입성능에 대한 시험결과 비카트 침의 근입량이 10 mm 이하가 되는 실링재를 사용할 경우 본 그라우트재가 전혀 주입되지 않았으며, 이는 저압주입으로 시공하는 그라우트 재료가 이미 단단히 굳어버린 실링재를 통과하여 침투주입이 되지 않고 일부 할열주입만 이루어진 것으로 판단된다. 실링재를 흐름정지가 발생된 겔화상태(1시간 후)에서 본 그라우트재를 주입하였을 때에는 주입효과가 우수한 것으로 나타났으며, 실링재 없이 본 그라우트재만 주입하였을 경우 주입은 가능하였으나 본 주입재의 역류 등 주입을 방해하는 요인으로 인해 실링재를 사용하여 다단 주입을 했던 경우에 비해 주입효과는 저하되었다.
4. 본 연구에서는 겔화의 판단기준을 유동성이 없는 상태를 확인하기 위해 컵도립법으로 90°를 기울였을 때 유동성이 멈춰진 상태를 겔화 판단기준으로 하고, 겔화의 유지시간, 즉 본 그라우트재가 주입이 가능한 시간을 결정하기 위해 실제 소구경 강관다단 그라우팅의 천공홀 내 강관과 지반면의 이격거리인 22.5 mm를 고려하여 비카트 침 관입량을 25 mm 이상을 겔화의 유지시간으로 제안한다.
5. 또한, 실링재의 배합시 동시배합이 아닌 순차배합을 원칙으로 하며, 재료분리 및 블리딩이 5% 이내로 발생되도록 배합시간 등을 사전에 시험하여 실링재의 최적 배합비를 선정하는 것이 타당할 것으로 사료된다.
6. “소구경 강관다단 그라우팅의 공사시방서(안)”에서는 급결제 사용을 금지하였으나 실링재의 응결시간을 지배하는 요인은 시멘트 성분에 의존하므로 응결시간 단축을 위하여 초속경시멘트(칼슘알루미네이트 등) 등의 특수시멘트 사용은 필요할 것으로 사료된다.
7. 본 연구를 통해 개발된 실링재는 겔화시간 지연, 재료분리, 주입성능 저하 등 현장의 실질적인 문제를 일부 해결할 수 있었다고 평가하며, 현장에서 판단하기 쉬운 품질기준으로 기존 한국철도시설공단의 품질기준을 일부 수정제안하였다. 향후 혼합수와 양생시 외기온도의 영향, 비카트 침 관입압과 본 그라우트재의 주입과의 상관관계, 비카트 침 관입량별 주입시험 등의 추가적인 연구를 통해 더 명확한 품질기준을 마련할 필요가 있다고 사료된다.

References

1. Ahn, J.H. (2018), Evaluation of construction management techniques and standards for the umbrella method, Master Thesis, Graduate School of Global Convergence, Korea National University of Transportation, pp. 11-35.
2. Hong, S., Bae, K., Koo, H., Mun, H., Yoo, Y., Lee, Y., Lee, S. (1994), Development of umbrella arch method for tunneling difficult ground condition, Korea Institute of Construction Technology, pp. 222-225.

3. Korea Rail Network Authority (2016), Construction specification in Donghae line Pohang-Samcheok railway construction section11, pp. 10-75~154.
4. Korea Rail Network Authority (2018a), Report on the mixing ratio test results of sealing material and injection material for reinforcement of steel pipe multi-stage grouting, pp. 16-42.
5. Korea Rail Network Authority (2018b), Small diameter steel pipe multi-stage grouting construction specification (plan), pp. 2-14.
6. Korea Railroad Research Institute (2018), Study on improvement of steel tube multi-story construction method for rail tunnel reinforcement, pp. 24-38.
7. Masindi, V. (2015), Remediation of acid mine drainage using magnesite and its bentonite clay composite, Doctor of Philosophy Thesis, Graduate School of Environmental Sciences, University of Venda, pp. 41.
8. Storr, M., Murray, H. H. (1986), "Well-ordered kaolinite in siderite concretions from the Brazil Formation, western Indiana", Clays and Clay Minerals, Vol. 34, No. 6, pp. 689-691.