

해저터널 연약 구간 보강용 그라우트 내구성 평가

문준호¹ · 정강복² · ZHENHUA XIN³ · 김영욱^{4*}

¹중신회원, 명지대학교 박사과정

²비회원, (주)도담이앤씨 이사

³비회원, 명지대학교 박사과정

⁴중신회원, 명지대학교 교수

Evaluation of grout for reinforcing soft section in subsea tunnel

Junho Moon¹ · Ghangbok Jeong² · Zhenhua Xin³ · Younguk Kim^{4*}

¹Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

²Director, DODAM ENC

³Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

⁴Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

*Corresponding Author : Younguk Kim, yukim@mju.ac.kr

Abstract

Subsea tunnel built in abyssal zone is exposed to environment under high water pressure caused by seawater and etc., and this high pressure from underground water may facilitate leaching. In particular, since underground water can be easily flown in during construction, this might cause many problems related to cutoff water. Therefore, in order to secure safety, it is necessary to apply grouting equipment and materials which are appropriate to construction environment. Accordingly, in this research, evaluation was made on the physical characteristics of grouting materials (strength, leaching and etc. depending on curing methods for each of used materials and condition) which can be applied during subsea tunnel construction. As a result of this research, stable strength increase was found in CA and CSA type, and it is determined that no decrease in their durability was found, so these can be used as stable materials for structures under influenced by seawater.

Keywords: Subsea tunnel, Grouting, Durability, Seawater

초 록

고심도에 건설되는 해저터널은 지하수 등에 의해 높은 수압을 받는 환경에 노출되며, 고 수압 해수에 의해 용탈현상이 촉진될 수 있다. 특히, 공사중 지하수가 유입되기 쉽기 때문에 차수에 대한 많은 문제를 야기 할 수 있어 안정성을 확보하기 위해서는 시공환경에 적합한 그라우팅 장비 및 재료의 적용이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 해저터널

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(6)947-956(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.947>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 20, 2018

Revised October 2, 2018

Accepted October 12, 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

시공 시 적용할 수 있는 그라우팅 재료에 대한 물리적 특성(주입재료와 조건별 양생방법에 따라 강도특성, 용탈특성 등)을 평가하였다. 연구결과 CA계 및 CSA계에서 안정적인 강도증가를 발현하였으며, 내구성 저하가 발생되지 않아 해수 영향을 받는 구조물에서 안정적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 해저터널, 그라우팅, 내구성, 해수

1. 해저터널 그라우팅

해저터널과 같은 고심도에서 건설되는 구조물은 지하수 등에 의해 높은 수압을 받는 환경에 노출될 수 있으며 (Kim et al., 2016), 해수에 대한 용탈현상이 촉진될 수 있으므로 이를 방지하기 위한 그라우팅 장비 및 재료에 대하여 활용성 검증에 대한 세심한 고려가 요구된다. 특히, 공사 중 지하수가 유입되기 쉽기 때문에 차수로 인한 문제가 나타날 수 있어 해저터널의 안정성을 확보하기 위해서는 시공환경에 적합한 그라우팅 장비 및 재료의 적용이 필수적이다. 고심도 해저터널의 경우, 높은 수압의 지하수로 인해 일반적인 그라우팅 주입 시 주입재료의 유실이 발생할 수 있고 이에 따라 그라우팅 효과가 상실되는 결과를 야기하게 된다. 따라서 그라우팅에 의해 차수목적 달성을 위해서 수압을 갖는 지하수에 저항할 수 있을 정도의 충분한 초기 겔화시간 및 전단강도를 확보할 수 있는 재료의 선정이 매우 중요하다. 더욱이 그라우팅 재료가 갖는 내구성은 구조물의 안정성에 지대한 영향을 미칠 수 있다(Park and Chun, 2001).

2. 그라우트의 재료적 특성

그라우팅 재료 중 현탁액계의 가장 기본이 되는 것은 보통시멘트(OPC)이나, 대부분의 경우 그라우트 재료의 성능향상 및 특성개선을 위해 특수 약재 공법인 LW, SGR공법 등을 사용하고 있다(Kang et al., 2002). 이러한 특수 약재는 그 발생원에 따라 규산계, CA광물계 및 CSA광물계 등으로 구분할 수 있고, 그라우트의 겔화시간, 강도 및 내구성을 통하여 약재의 적용별 특성을 구분하여 적용하고 있다(Kim et al., 2010). 겔화시간은 유동상태의 액상 그라우트가 시간이 지남에 따라 유동성을 상실하고 소성상태로 변화되기까지의 시간을 정량화 한 것으로 이때부터 그라우트는 차수기능을 발현하는 것으로 고려된다(Ahn et al., 2016). 이후로 그라우트의 상태는 경화 단계가 되어 강도가 발현되고 내구성이 증가하여 장기적인 구조물의 보강이 가능하다.

그라우트의 성능을 평가하는 가장 중요한 기준은 강도와 내구성을 정량화 한 값으로 나타난다. 특히, 재료개발에 있어서 지반 내 침투 후 재료의 내구성을 확보하기 위해서 화학적으로 반응 메커니즘을 안정화시키거나 강도를 고강도화하고 있는 있다(Kim, 2003). 그라우트는 겔화 되고 경화과정을 거치면서 강도를 발현하게 되는데, 대부분의 시멘트형 그라우트 재료에서는 시간이 지남에 따라 강도가 증가하게 되고 내구성이 향상되어 구조물의 안정성을 향상시킨다. 특히, 해저터널과 같은 높은 수압하의 구조물의 경우 그라우트의 강도가 높을수록 유리할 것으로 판단되며, 오랜 시간이 지난 후에도 그라우트의 강도저하 또는 경화물의 역학적 성능이 저하되지 않아야

하는 재료적 특성을 보유하여야 한다.

이에 본 연구에서는 해저터널 시공 시 지반 보강에 적용할 수 있는 그라우팅 재료에 대한 내구특성을 파악하기 위하여 다양한 종류의 주입재료와 조건별 양생방법에 따라 실험을 진행하고 그라우트의 강도특성, 용탈특성 등을 평가하였다.

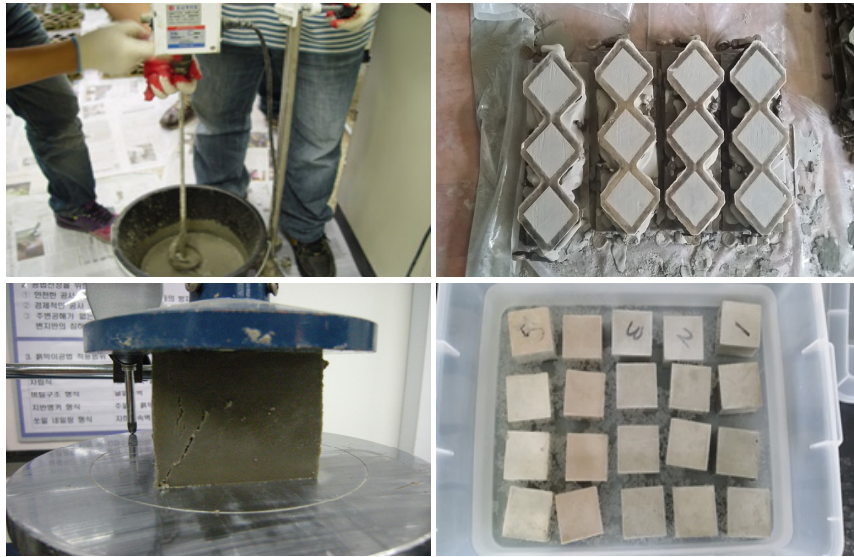


Fig. 1. Experiment of grout material

3. 실험조건

그라우트 재료는 Table 1과 같이 CA광물계, CSA광물계, 규산계를 실험 대상으로 하였다. CA광물계는 물과 CA광물계 마이크로 시멘트를 사용하였다. CSA광물계는 A(급경성혼합물)과 B(아크릴레이트고분자합성물)를 사용하였다. A약재의 비중은 2.63, 분말도는 4350 blaine이며, B약재는 비중 1.03, 점도 6.8, pH 2.72이다.

Table 1. Grouting material

	Contents
CA	A (water+ CA mineral), B (water+micro cement)
CSA	Mixing water, Cement, A (Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, SiO ₂ , MgO, K ₂ O, SO ₃), B (acrylonitrile polymer)
Water glass	A (water, cement, bentonite), B (sodium silicate)

예비실험을 걸쳐 각 재료의 적절한 배합비를 결정하였으며, 큐브몰드(50 × 50 × 50 mm)에 시편을 제작하여 압축강도 시험을 수행하였다. 배합비는 Table 2와 같다.

Table 2. Mixing ratio by grout materials

CSA		
125	150	175
Mixing water: 125, Cement: 100, A: 10, B: 5, Density: 1.45	Mixing water: 150, Cement: 100, A: 10, B: 5, Density: 1.45	Mixing water: 175, Cement: 100, A: 10, B: 5, Density: 1.45
CA		
A	B	Volume: 997 Weight: 1,265 Density: 1.27
Water: 465, CA: 100	Water: 400, M.C: 300	
Water glass		
A	B	Volume: 1,004 Weight: 1,150 Density: 1.15
Water: 430, Cement: 200, Bentonite: 20	Water: 250, Sodium silicate: 250	

Table 3은 그라우팅 재료의 내구성능을 평가하기 위한 실험조건을 나타낸다. 그라우트 재료는 규산계, CA 광물계 및 CSA 광물계로 구분하여 진행하였으며, CSA 광물계의 경우 물-시멘트비(w/c ratio, %)를 125, 150, 175로 조성하여 각각의 성능을 검토하였다. 그라우트는 대기 중, 청수침적, 해수침적(충남 서산) 3가지 양생조건을 바탕으로 각 재령별 압축강도, 중량 변화량을 측정하였다.

Table 3. Experimental conditions

	Count	Contents
Grout type	5	Silicate series, CA mineral, CSA125, CSA150, CSA175
Curing condition	3	Room temperature, Fresh water deposition and seawater deposition
Physical properties	3	Compressive strength, Weight and length variation
Curing	5	1, 2, 4, 8, 12, 24 weeks

압축강도는 그라우트 재료의 가장 기본적이며 중요한 내구성 판단기준이라고 할 수 있다. 그라우트재료는 시공 시 지중 주입과정에서는 액체상태로 존재하고, 지중 주입 후 졸(sol state)로 넘어가게 된다. 우리가 알고 있는 그라우트의 겔타입은 액체 상태의 그라우트가 겔단계까지 도달하는 시간을 나타내는 지표이고 그라우트의 강도는 경화단계 이후의 지표를 말하고 있다. 압축강도는 KSL 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법에 준하여 측정하였다. 또한 그라우트의 용탈현상을 검토하기 위하여 양생조건별 시료의 중량을 측정하였다. 그라우트가 용탈현상이 발생하게 되면 그라우트 중의 물질($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , Na_3PO_4)이 경화체에서 이탈되어 그라우트의 중량감소, 스케일링 및 체적감소가 발생되게 된다. 이러한 용탈현상은 규산계 약재를 사용한 경우에 일반적으로 발생하는 것으로 알려져 있으며, 그 양상은 그라우트 약재의 양생조건 및 관리기간에 따라 다르게 나타난다.

4. 실험결과

지반 그라우팅은 시공방법에 따라 저압공법, 고압공법 및 침층혼합공법 등 여러 가지 종류로 구별되며 약재에 따라 약액공법, 현탁액 공법 등으로 나뉜다(Heo, 2011). 본 연구에서는 상기 방법 중 저압공법과 현탁액공법을 선정하여 이에 상응하는 재료 및 실험 방법에 따라 그라우트 재료의 내구성을 검토하였다. 내구성을 평가하기 위하여 각 재령별 압축강도, 중량변화를 측정하였으며, 결과분석을 통해 해저터널 그라우팅에 적합한 그라우트 재료 적 특성을 도출하였다.

4.1 기건 양생조건

그라우트 경화체를 기건조건(공기중 양생)에서 재령별 중량 변화량, 압축강도를 측정하였다. 양생조건은 온도 $20 \pm 3^\circ$, 상대습도는 60%이며, 측정기간은 24주간 진행하였으며 결과는 Fig. 2와 같다.

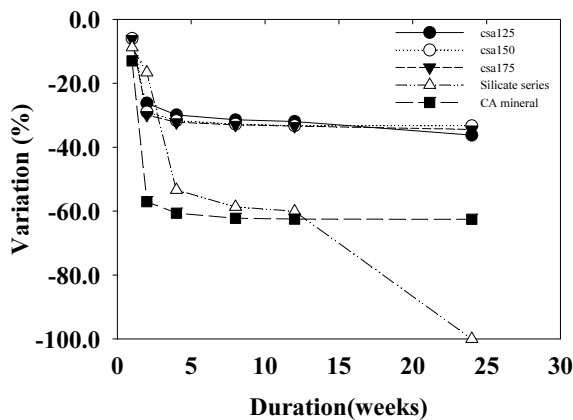


Fig. 2. Weight loss with time (room temperature)

중량변화는 (측정값-초기값)/초기값으로 계산하였으며 (+)는 중량증가, (-)는 중량감소를 나타낸다. 중량변화 측정결과 모든 조건에서 재령이 증가함에 따라 중량이 지속적으로 감소되는 결과가 나타났다. 규산계와 CA광물의 경우 초기 4주 동안 급격한 중량감소가 발생되어 4주 후 초기 중량의 50% 이상 중량손실을 초래한 것으로 나타났다. 또한, 규산계에서는 재령 24주에는 시료가 모두 파괴되어 측정이 불가능한 상태로 관찰되었다. 반면, CSA계의 경우는 재령에 따라 중량이 감소된다는 것은 유사한 특성을 보이고 있으나, 감소정도는 매우 적고 4주 이후에는 일정한 값으로 수렴하는 경향이 관찰되었다. 최종적인 24주 결과를 비교할 때, CSA계는 총 중량 손실량이 약 30% 전후로 타 액재(규산계, CA광물계)에 비하여 매우 안정적인 내구성향을 보유한 것으로 나타났다.

조건별로 양생한 시료의 압축강도 측정결과는 Fig. 3에 나타내었다. CSA계와 규산계 및 CA광물계의 압축강도 차이는 그림에서 알 수 있듯이 매우 명확히 나타나고 있다. 규산계와 CA광물계에서는 초기 1주 재령에서 높은

강도를 발현하고 이후 강도가 저하되는 경향을 나타내고 있다. 특히, 규산계는 8주 이상에서부터 시료의 손상(파손)에 의해 강도 측정이 불가능 하였다. 반면에, CSA계는 양생기간이 지속됨에 따라 점진적으로 강도가 증가하고 있으며, 배합비에 따라 일부 다른 경향을 보이고는 있으나 전체적으로 일정 기간동안 증가하다가 12주 이상에서부터 일정한 강도가 발현되는 결과를 보였다.

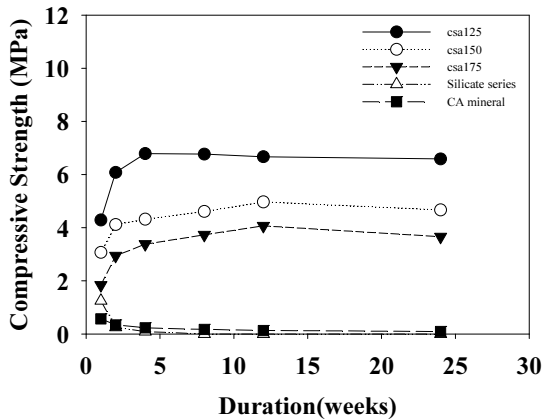


Fig. 3. Compression strength (room temperature)

4.2 청수침적 양생조건

그라우트 경화체를 청수(수도수)조건에서 양생하여 재령별 시료의 중량 변화량, 압축강도를 측정하였으며, 결과는 Fig. 4와 같다. 양생조건은 온도 $20 \pm 3^\circ$ 를 유지하였으며, 중량측정 시 표면의 수분을 모두 닦아내고 측정하였다. 측정기간은 24주 동안 진행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 중량변화 측정결과, 규산계를 제외하고 나머지 모든 조건에서 재령이 증가함에 따라 중량이 지속적으로 증가되는 결과가 측정되었다. 규산계의 경우 초기 4주 동안 소량의 중량증가가 관찰되었으나 이후 중량감소가 점진적으로 발생되어 24주 후에는 초기 중량의 94% 정도까지 중량손실이 발생하였다. 반면, 나머지 조건(CA계, CSA계)에서는 재령에 따라 중량이 점진적으로 증가되는 경향을 보이고 있으며, 그 증가치는 초기 1주에 가장 크게 나타났고 이후에는 일정한 범위에서 수렴하는 경향을 보이고 있다. 중량감소는 일부 구성물질이 물에 녹아 용출되고 있다는 것을 추측할 수 있으며, 규산계의 경우는 양생기간이 지남에 따라 그 용탈량이 지속적으로 증대함으로 장기적인 내구성을 요구하는 구조물의 보강 또는 차수 등에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 그 외 CA계나 CSA계에서는 일정한 중량증가가 발생되고 있으며 이것은 시멘트계 그라우트에서 수분공급으로 인한 지속적인 수화물(Etringite 또는 Monosulfate)의 생성에 기인하는 것으로 판단된다.

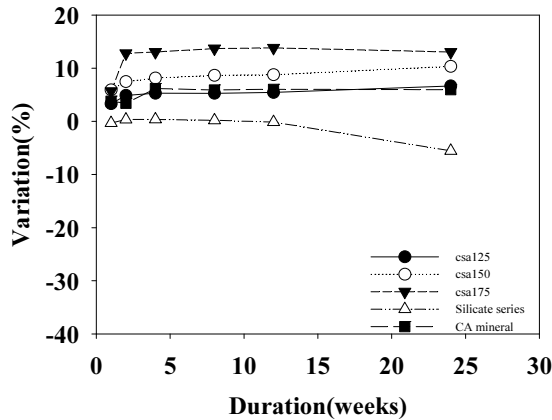


Fig. 4. Weight loss with time (fresh water deposition)

재령별 압축강도 측정결과는 Fig. 5에 나타내었다. 규산계와 CSA계 및 CA광물계와의 차이는 명확히 나타나고 있으며, 규산계에서는 초기 1주 강도에서 가장 높은 값을 나타내고 이후 재령이 지남에 따라 점차 강도가 낮아지면서 24주에는 초기강도의 약 15% 정도만 발현하고 있다. 반면에, CSA계와 CA광물계에서는 초기부터 점진적으로 강도가 증가하고 있으며 장기재령으로 갈수록 강도는 매우 큰 폭으로 증가하여 초기강도의 3배까지 상승하는 결과를 보이고 있다. 다만, CA광물계에서는 CSA계와 같이 재령이 증가함에 따라 강도는 증가하고 있으나 그 증가폭이 CSA계에 비해 현저히 낮아서 24주 최대강도는 초기치의 약 2.3배 정도에 그치고 있다. 본 실험결과에서 규산계를 제외한 나머지 계열에서는 외부에서 지속적인 수분의 공급이 있을 때, 그라우트의 강도는 지속적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 CSA계에서와 같이 물-시멘트비가 낮은 경우에서 그 증가가 매우 두드러지게 나타나고 있다.

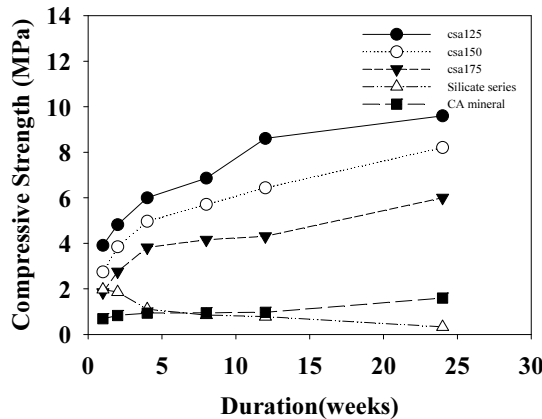


Fig. 5. Compression strength (fresh water deposition)

4.3 해수침적 양생조건

본 시험에서는 그라우트 경화체를 해수(바닷물, 서해안 해미 인근에서 채취)조건에서 양생하며 재령별 중량 변화량, 압축강도를 측정하였으며 결과는 Fig. 6과 같다. 양생조건은 온도 $20 \pm 3^\circ$ 를 유지하였으며, 측정기간은 24주간 동안 진행하였다. 중량변화 측정결과 규산계를 제외하고 나머지 모든 약재조건에서 재령이 증가함에 따라 중량이 지속적으로 증가되는 결과가 측정되었다. 규산계의 경우 초기 4주 동안 소량의 중량증가가 관찰되었으나 이후 중량감소가 점진적으로 발생되어 24주 후에는 초기 중량의 68% 정도까지 중량손실을 발생시켰다. 반면, 나머지 조건(CA계, CSA계)에서는 재령에 따라 중량이 점진적으로 증가되는 경향을 보이고 있으며, 그 증가치는 1주에 가장 크게 나타났고 이후에는 일정한 범위에서 수렴하는 경향을 보이고 있다. 또한 청수시험결과와 비교할 때, CA계 및 CSA계는 중량 증가량이 범위 내에서 비슷한 경향을 나타내었으나, 규산계의 경우는 24주 이후에 매우 높은 중량손실이 발생되어 규산계가 해수에 더욱 취약하다는 결과를 보여주고 있다.

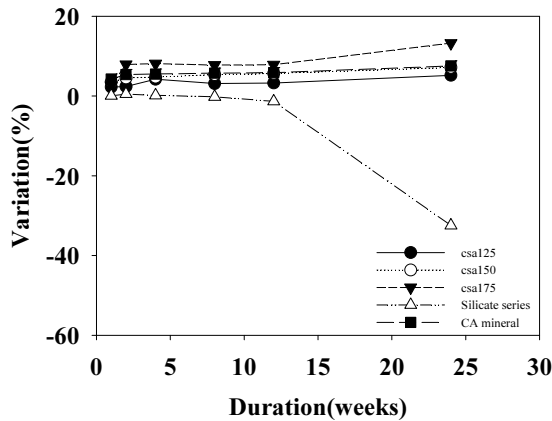


Fig. 6. Weight loss with time (seawater deposition)

압축강도 측정결과는 Fig. 7에 나타내었다. 결과로부터 규산계와 CSA계 및 CA광물계와의 차이는 명확히 나타나고 있으며, 규산계에서는 1주 이후부터 재령이 지남에 따라 점차 강도가 낮아지면서 12주 이후에는 그라우팅 재료가 손상되어 24주 강도 측정이 불가능하였다. 이것은 중량변화량 측정결과에서와 같이 상당히 큰 중량손실이 발생되면서 강도의 극단적인 저하를 동반한 것으로 판단된다. 반면에, CSA계와 CA광물계에서는 초기부터 점진적으로 강도가 증가하고 있으며 재령이 커질수록 강도는 매우 큰 폭으로 증가하여 초기강도의 약2배까지 상승하는 결과를 보이고 있다. 다만, CA광물계에서는 CSA계와 같이 재령이 증가함에 따라 강도는 증가하고 있으나 그 증가폭이 CSA계에 비해 현저히 낮게 나타나고 있으나 청수와는 달리 강도 증가율에서 조금 더 높게 형성된 것으로 나타났다. 본 실험결과에도 청수실험결과와 유사하게, 규산계를 제외한 나머지 계열에서는 외부에서 지속적인 수분의 공급이 있을 때, 그라우트의 강도는 지속적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 CSA계

에서와 같이 물-시멘트비가 낮은 경우에서 그 증가가 매우 두드러지게 나타나고 있다. 다만, 해수 침적에서는 규산계가 매우 취약하다는 것을 확인 할 수 있었으며, CA 및 CSA 광물계는 청수시험결과와 유사하게 강도증가 현상을 확인하였다.

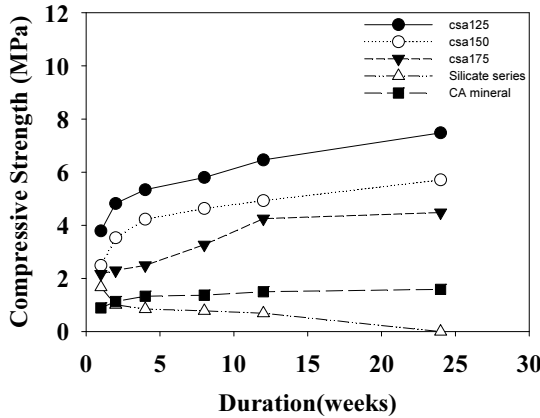


Fig. 7. Compression strength (seawater deposition)

5. 결론

해저에 건설되는 터널구조물에서는 주변 해수가 지속적으로 구조물 내부로 유입될 수 있으므로, 해수에 대한 높은 저항력을 보유하고 있어야 한다. 또한, 그라우트 약재는 경화 후에도 해수에 노출되어 황산염에 의한 열화가 가속화되어 빠르게 용탈과 형태변화가 발생된다. 따라서, 그라우팅에 사용하는 약재에 대해서도 해수에 대한 저항성을 검토함으로써 사용재료에 대한 안정성과 내구성을 확보하여야 하며, 본 연구에서는 그라우트 종류에 대한 해수영향을 확인할 수 있었다.

연구에서 검토한 규산계, CA 광물계, CSA 광물계에 대해 실시한 해수저항성 실험결과 그라우트 양생기간에 따라 규산계는 내구성 저하가 현저하여 최종 측정재령에서는 시료의 손상으로 강도 측정이 불가능한 상태에 이르렀으며, 용탈량 또한 매우 큰것으로 나타났다. 반면에 CA 광물계, CSA계에서는 안정적인 강도증가를 발현하였으며, 용탈 등 내구성 저하가 발생되지 않아 해수 환경하의 공사에 매우 적합할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발 (18SCIP-B066321-06)” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Ahn, T.H., Bang, S.Y., Cha, K.S., Kim, K.M., Kim, S.J., Goo, J.S. (2016), "Development of environmental adaptive cement-reduced inorganic grouts for water blocking and soil strengthening", Proceedings of the KSCE 2016 Convention Program.
2. Heo, W. (2011), "Practical application for eco-grouting materials", Master's Degree Thesis, Dankook University, pp. 1-8.
3. Kang, S.H., Choi, H.G., Park, C.S., Noh, J.H. (2002), "Emergence of cement-based groundfill material", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 50, No. 8, pp. 9-15.
4. Kim, H.K., Kim, Y.H., Cheon, B.S. (2010), "Characteristics strength of silicasol-cement grout material for ground reinforcement", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 9, pp. 47-53.
5. Kim, J.S. (2003), "The field applicability of the soft ground stabilization method by using high-performance grout", Master's Degree Thesis, Hanyang University, pp. 1-2.
6. Kim, J.W., Hong, E.S., Cho, G.C. (2016), "Assessment of elastic-wave propagation characteristics in grouting-improved rock mass around subsea tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 2, pp. 235-244.
7. Park, J.Y., Chun, B.S. (2001), "Soil contamination by chemical solution injection and countermeasures", 2001 Proceedings of Korean Geo-Environmental Society, KGES, pp. 26-31.