

노후 저수지 보강을 위한 환경 친화적 그라우팅 주입재 적용에 관한 기초연구

A Fundamental Study on Application Eco Friendly Grouting Material for Old Aged Reserve Reinforcement

송 상 환*
Song, Sang-Hwon

전 기 표**
Jeon, Ki-Pyo

임 양 현***
Lim, Yang-Hyun

서 세 관****
Seo, Se-Gwan

Abstract

There are 17,427 reservoirs in Korea, of which about 96% were built before the mid 1980s. Therefore, aging is severe and reinforcement are necessary. In addition, aged reservoirs, which are more than 50 years old, account for 70% of the total. Therefore, there is a problem such as the collapse of the reservoir and the decrease of the storage capacity due to progress of aging with time. The grouting method using cement is mainly used as maintenance and reinforcement method of old reservoir. However, the grouting method using cement has engineering and environmental problems. In order to solve the engineering and environmental problems of cement grouting method, an eco-friendly grouting material was developed that mixes circular resource grouting binder, high molar ratio sodium silicate and colloidal silica. The engineering and environmental properties of the developed injection materials were evaluated by conducting gel time, homo-gel strength, sea water resistance test and environmental stability evaluation. Also, examined the possibility of replacing OPC existing aged reservoir reinforcement methods. As a result, it was found out that it was better than the conventional cement method in terms of engineering and environment. However, since this study is the result of laboratory test, it is necessary of verify the application at field of aged reservoir.

주 요 어 : 순환자원, 노후 저수지, 무시멘트, 그라우팅 결합재, 그라우팅공법

Keywords : Circulation Resources, Aged Reservoir, Non-Cement, Grouting Binder, Grouting Method

1. 서 론

우리나라 저수지는 총 17,427개소가 있으며, 이중 약 96 %가 1980년대 중반 이전에 건설되어 노후가 심하거나 내구성이 취약한 것으로 조사되었다. 또한 축조된 지 50년 이상 경과된 노후 저수지가 전체의 70 %를 차지하고, 점차 시간경과에 따라 노후화의 계속적 진행에 따른 저수지 붕괴 위험, 저수지 하부 토사퇴적에 따른 저수량 감소 등 심각한 문제점을 내포하고 있다. 더불어 최근 들어 기후변화에 의한 집중호우의 빈도가 증가하고 있으며, 이는 수위 급상승 및 침투를 동반하여 저수지의 안전을 지속적으로 위협하고 있는 실정이다.¹⁾

저수지는 삶에 필요한 용수를 저장하고, 공급해주는 중요한 시설이지만 붕괴 시 많은 인명과 재산피해를 주기 때문에 지속적인 점검 및 확인과 보수·보강이 이루어져야만 한다.²⁾ 노후 저수지 제체의 보수·보강은 주로 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)을 이용하여 이루어지고 있다.³⁾

그러나, 노후 저수지 보수·보강공법에 사용하는 주입재인 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)는 지속적으로 내구성과 환경문

제가 제기되고 있는 실정⁴⁾으로 이를 대체하는 경제적이고 환경 친화적인 제품개발이 필요하다.

또한 차수 및 지반보강을 위해 시공되어온 물유리 약액을 사용한 알칼리성 물유리계 그라우팅공법은 주입 후 시간결과에 따라 자유수 및 흡착수 등 지하수에 의해 주입재의 대부분이 유실·소멸되는 등 내구성이 약한 문제점이 있다.⁵⁾

이러한 공학적·환경적 문제로 본 연구에서는 순환유동층 보일러 플라이 애시를 고로슬래그의 알칼리 활성화 자극제로 활용한 그라우팅 주입재(New Grouting Binder, NGB)와 고몰비 규산나트륨(High molar ratio sodium silicate) 및 콜로이드 규산(Colloid silica)를 혼합한 주입재에 대하여, 겔타임, 호모겔 강도, 내해수성 시험 및 환경 안정성 평가를 실시하여, 주입재로서의 공학적·환경적 특성을 규명하고, 이를 통해 보통 포틀랜드시멘트 및 기존 노후 저수지 보강공법의 대체 가능성을 검토하였다.

* 전주비전대학교 교수, 공학석사

** 정선이엔씨(주) 대표이사, 공학석사

*** ㈜대웅 기술이사, 공학석사

**** ㈜지안산업 연구소장, 공학석사

(Corresponding author : Research director, Zian Company Ltd, ssg7902@gmail.com)

본 논문은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(2018년, 18TBIP-C144472-01, 국토교통기술사업화 지원사업)임.

- 1) 박성용, 장석현, 임현택, 김정민, 김용성, "수치해석에 의한 노후저수지의 침투 및 동적거동", 한국농공학회논문집 제58권, 제3호, 2016, pp.81-90.
- 2) 한국농어촌공사 농어촌연구원, "저수지 시설물의 노후현상과 보수·보강공법 적용방안 연구(신공법중심)(II)", 연구보고서, 2015.
- 3) 배형섭, 원경식, 이영동, "표면과탐사를 이용한 저수지 제체 그라우팅 보강효과 검증 연구", 지질공학, 제28권, 제2호, 2018, pp.297-312.
- 4) 천병식, 약액주입의 원리와 실제, 구미서관, 2011, pp.283- 288.
- 5) 김영훈, "알칼리성 실리카졸 주입재의 공학적 특성에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문, 2014.

2. 환경 친화적 그라우팅 주입재의 특성

2.1 순환자원 활용 그라우팅 주입재의 특성

일반적으로 순환유동층 보일러에서 발생하는 플라이 애쉬는 다량의 유리석회(Free CaO)를 함유하고 있어, 포졸란 반응을 유도할 수 있으나, 국내의 산업기준인 “플라이 애쉬(KS L 5405)”⁶⁾에 제시된 물리·화학적 성능을 만족시키지 못하여 재활용에 어려움을 겪고 있다. 그러나 활성도가 우수한 고로슬래그 미분말의 자극제로 사용하게 되면 알칼리 활성화 반응을 유도할 수 있어 시멘트와 비교하여 동등의 성능을 발휘시킬 수 있다.⁷⁾

본 연구에 사용된 NGB는 이러한 점에 착안하여 화력발전에서 사용되는 순환유동층 보일러에서 발생하는 플라이 애쉬를 대량으로 재활용한 제품으로 화학조성 성분을 엑스선 형광 분석(XRF, X-ray fluorescence)을 통해 분석하였으며, OPC와 비교하여 Table 1에 나타내었고, 고로슬래그 미분말의 알칼리 활성화 반응에 대한 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical constituents of materials

Material	Chemical constituents					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
NGB	51.80	25.50	10.40	0.72	2.22	7.75
OPC	67.10	18.50	3.76	1.96	2.38	3.84

2.2 고몰비 규산나트륨

물유리는 규사와 소다회 또는 규사와 가성소다를 혼합하여 만든 것으로 국내의 한국산업규격(KS M 1415)⁹⁾에서는 무수규산(SiO₂)과 알칼리(Na₂O)의 몰비율과 용액의 농도에 따라 품질이 구분된다. 그라우팅재료는 일반적으로 몰비가 3.0-3.3인 3종이 사용되고 있으며, 3종보다 높은 몰비를 갖는 규산나트륨을 고몰비 규산나트륨이라고 한다. 본 연구에서는 NGB와의 반응성과 겔타임(Gel-time)의 조정이 용이한 정도까지 나트륨이온(Na⁺)의 수준을 낮춘 고몰비 규산나트륨(High molar ratio sodium silicate)을 사용하였다. Table 2에 본 연구에 사용된 고몰비 규산나트륨을 기존의 규산나트륨과 비교하여 나타내었다.

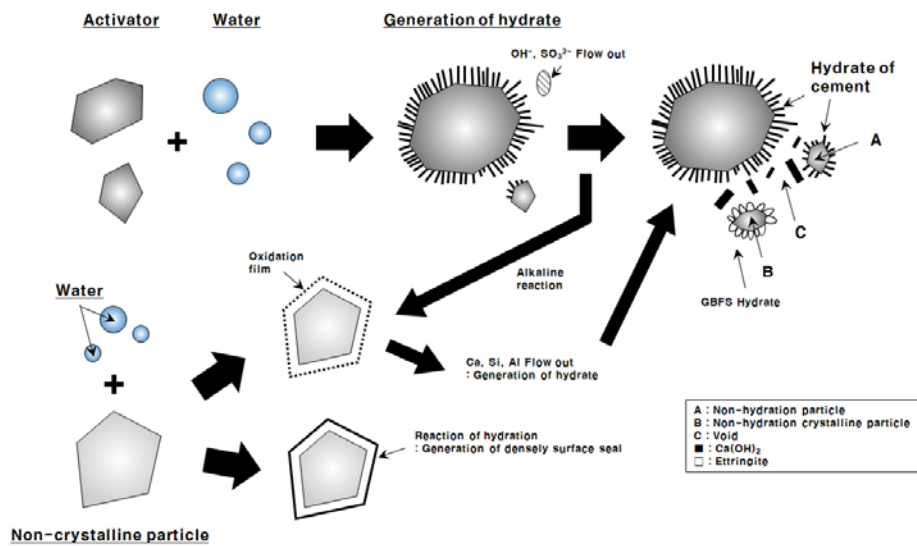


Fig. 1. Diagram of alkali-activation⁸⁾

Table 2. Specifications of sodium silicate(KS M 1415)

Material	Grade(KS M 1415)				High molar ratio sodium silicate
	1	2	3	4	
Specific Gravity (G _s , at 20°C)	1.690 over	1.590over	1.380 over	1.260 over	1.300 over
Insoluble matter (%)	0.2 under	0.2 under	0.2 under	0.2 under	6.5~7.5
Na ₂ O (%)	17~18	14~15	9~10	6~7	6.5~7.5
SiO ₂ (%)	36~38	34~36	28~30	23~25	24.5~27.5
Fe ₂ O ₃ (%)	0.05 under	0.05 under	0.03 under	0.03 under	6.5~7.5

6) 한국산업규격, "KS L 5405 : 플라이 애시", 2016.

7) 송상원, "고갈습 연소재를 활용한 PHC파일 채움재의 현장적용성 평가에 관한 연구", 전북대학교 석사학위논문, 2017.

8) 문경주, "산업폐기물을 이용한 비소성 시멘트 및 콘크리트의 특성", 전북대학교 박사학위논문, 2004.

9) 한국산업규격, "KS M 1415 : 액상 규산 나트륨(규산소다)", 2015.

2.3 콜로이드 규산

콜로이드 규산(Colloid silica)은 물이나 유기용제(Organic solvent)와 같은 액체에 고품의 실리카 입자가 침전되거나 응집되지 않은 상태로 안정하게 분산되어 있는 것을 의미하며, 일반적으로 5-100nm의 직경을 갖고 있다.¹⁰⁾ 콜로이드 규산에 염화나트륨(Sodium chloride) 또는 황산나트륨(Sodium sulfate)과 같은 금속염을 첨가하게 되면 콜로이드 입자내 표면전하의 전기적 균형을 깨뜨려 입자간 응집이 발생하게 되어 겔(Gel)화된다. 이러한 겔화의 정도는 콜로이드 규산의 종류와 농도, 온도, pH에 따라 다르게 발생한다. 본 연구에서는 고몰비 규산나트륨과의 NGB와 반응하여 강도발현이 우수하고 내구성 있는 고결체를 유도할 수 있도록 구형도와 입자분산성이 우수한 콜로이드 규산을 사용하였다(Fig 2).

2.4 고몰비 규산나트륨 및 콜로이드 규산의 반응 메커니즘

고몰비 규산나트륨(High molar ratio sodium silicate)과 콜로이드 규산(Colloid silica)의 혼합하는 경우 분자의 재배열은 서서히 진행되고, 일부는 상당히 안정적인 기하

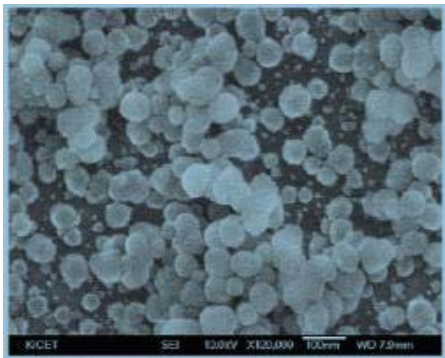
학적 구조를 갖고 있어 혼합액이 안정화되는데 시간이 필요하다. 그러나 고몰비 규산나트륨과 콜로이드 규산의 혼합액에 NGB를 혼합하게 되면 알칼리 활성화 반응을 통해 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같이 칼슘(Ca²⁺)과 알루미늄(Al³⁺) 이온이 규산(SiO)과 결합하게 되어 강도발현이 우수하고 내구성이 우수한 고결체의

유도가 가능하다. 또한 고몰비 규산나트륨과 콜로이드 규산의 혼합은 SiO₂와 Na₂O 함량의 평균몰비를 높게 되어 알칼리 용출에 대한 안정성을 확보할 수 있고, 얇은 그물 형태의 3차원 실리케이트 네트워크를 보장하는 역할을 함으로써 물리적 충격에 의한 내구성을 향상시킬 수 있다.

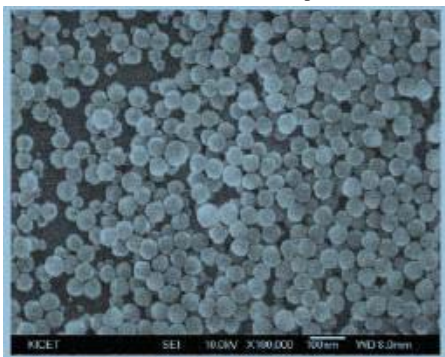
3. 실내시험

3.1 겔타임(Gel-time)측정시험

NGB와 고몰비 규산나트륨 및 콜로이드 규산을 혼합한 그라우팅 결합체의 성능을 확인하고, 현장적용을 위한 기초자료를 확보하기 위해 반응제인 B액의 재료에 NGB와 OPC를 적용하여 겔타임(Gel-time) 측정 시험을 수행하였다. 고몰비 규산나트륨과 콜로이드 규산, NGB와 OPC에 대한 배합비를 Table 3에 나타내었고, 사용수는 20±3℃를 사용하였다. 시험결과 NGB를 사용한 경우의 겔타임은 60.67초, OPC를 사용한 경우의 겔타임은 30.54초인 것으로 나타나 약 2배가량 긴 것으로 나타났으나, 국토교통부 “가설공사표준시방서 시공편. 제6장 가설 흙막이공, 2.8 지반 그라우팅”¹¹⁾에 따르면 LW공법 주입재의 경우 겔타임이 60-120초가 확보되어야 하고, SGR공법 주입재의 경우 급결형은 6-12초, 완결형은 60-90초가 확보되어야 한다고 제시되어 있어, 본 순환자원활용 그라우팅 결합체의 경우 LW공법과 SGR(완결)공법 기준에 만족하므로 현장적용이 가능할 것으로 판단된다.



(a) General colloid silica particle



(b) Colloid silica particle in this study

Fig. 2. Comparison of Colloid silica particle

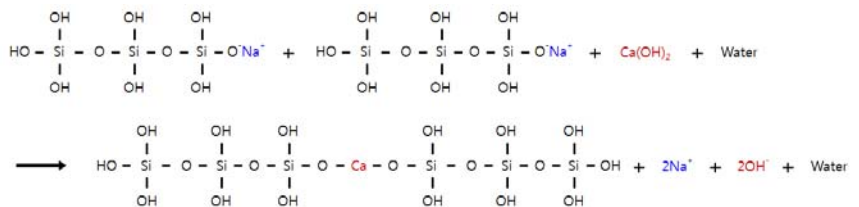


Fig. 3. Combination of silica and calcium by alkali activation

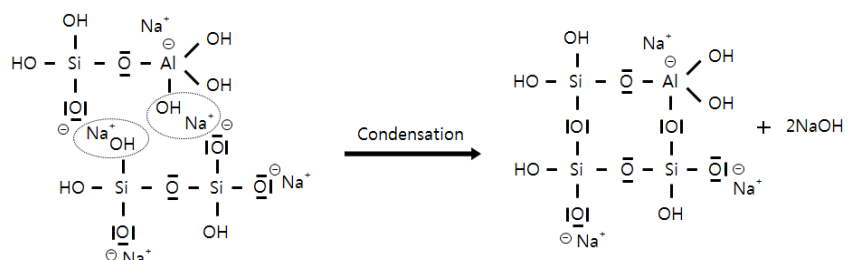


Fig. 4. Combination of silica and alumina by alkali activation

10) E. Bergna and William O. Roberts, "Colloidal Silica Fundamentals and Applications", Surfactant Science Series Vol.131., pp.9-37, 2005.

11) 국토교통부, “가설공사표준시방서”, 2016.

Table 3. Mixing ratio of materials

Liquid A			Liquid B	
Sodium silicate (mL)	Colloid Silica (mL)	Water (mL)	Binder (OPC or NGB, g)	Water (mL)
274	13.7	294	290	406

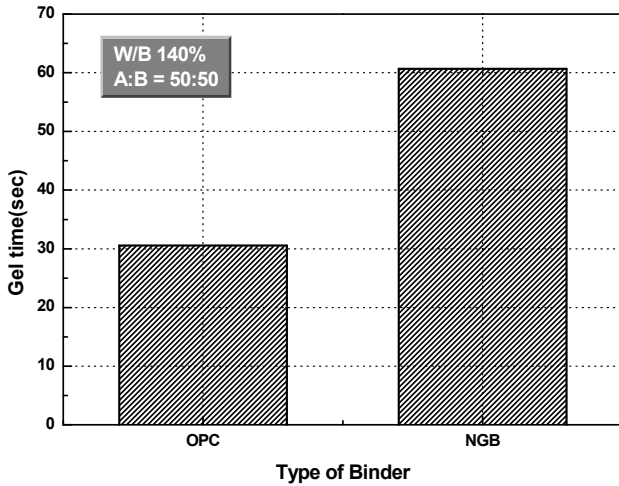


Fig. 5. Test result for gel-time(W/B=140%)

3.2 호모겔(Homo-gel) 압축강도 시험

호모겔 압축강도 시험의 배합비는 다음의 Table 4와 같이 고물비 규산나트륨, 콜로이드 규산, 규산소다3호, NGB, OPC등을 사용하였으며, 호모겔 압축강도 시험시료의 제작은 동일한 조건에서 각각의 호모겔 시료(5cm×5cm×5cm)를 table 6과 같이 제작하고, 제작한 시료는 몰드와 같이 수중양생을 실시하였다. 그리고, 양생 일자별로 탈형 후 KS F 2405 : 2010¹²⁾ 시험규준에 만족하도록 만능시험기를 이용하여, 호모겔 압축강도를 측정하였다. 시험결과 콜로이드 실리카를 사용시 NGB를 적용한 시료

의 압축강도가 동일 양생일수에서 큰 것으로 나타났다. 또한 기존 그라우팅인 급결제인 규산소다 3호와 비교한 결과 W/B=120, 140%에서 양생 7일시 압축강도가 큰 것으로 나타나, 고물비 규산나트륨과 콜로이드 실리카를 혼합하여 NGB와 혼합시 기존 그라우팅 공법인 규산소다 3호 및 OPC를 사용한 것 보다 큰 압축강도를 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Mixing ratio of materials for Homo-gel strength

Liquid A				Liquid B	
Sodium silicate (mL)	Colloid Silica (mL)	Sodium silicate (No.3) (mL)	Water (mL)	Binder (OPC or NGB, g)	Water (mL)
274	13.7	-	294	290	406
274	13.7	-	294	290	348
-	-	294	294	290	406

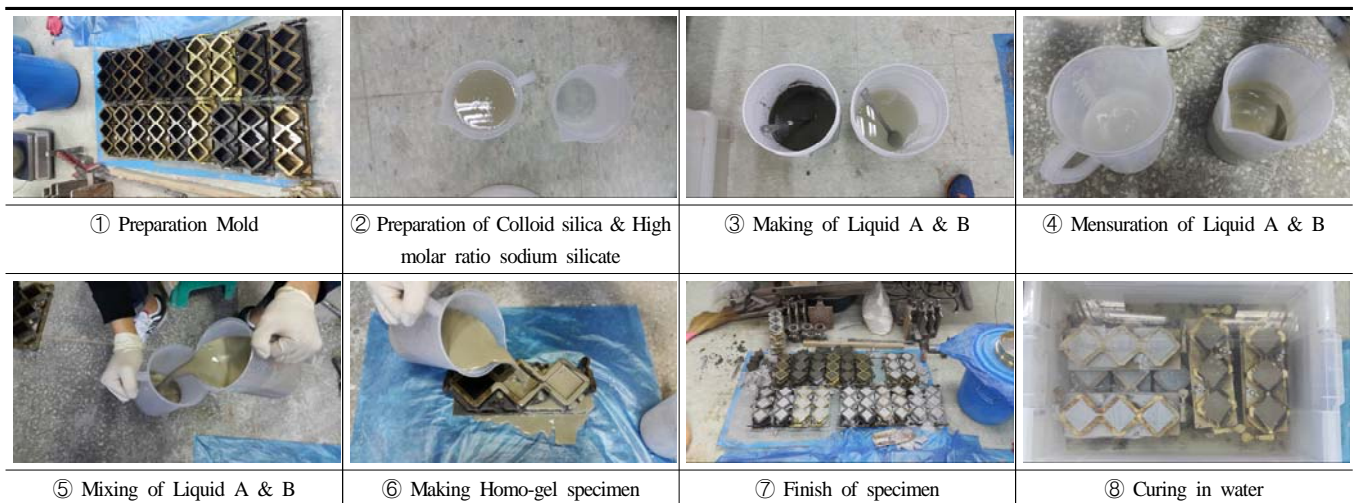
Table 5. Mixing ratio of materials for Sea Water Resistive

Liquid A				Liquid B	
Sodium silicate (mL)	Colloid Silica (mL)	Sodium silicate (No.3) (mL)	Water (mL)	Binder (g)	Water (mL)
274	13.7	-	294	290 (NGB)	406
-	-	294	294	290 (OPC)	406

3.3 내해수성 시험

내해수성 시험은 OPC와 NGB를 B액의 결합재로 사용하고, 고물비 규산나트륨 및 콜로이드 규산을 A액으로 사용하여, 기존의 규산소다 3호 용액과 OPC를 사용한 시료와 비교(Table 5)

Table 6. Making specimen of Homo-gel Strength



12) 한국산업규격, "KS F 2405 : 콘크리트의 압축강도 시험방법", 2010.

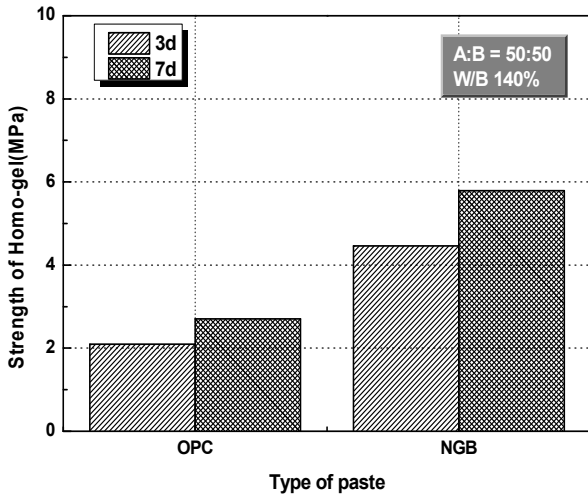


Fig. 6. Test result for Hopmo-gel Strength (Colloid silica, W/B=140%)

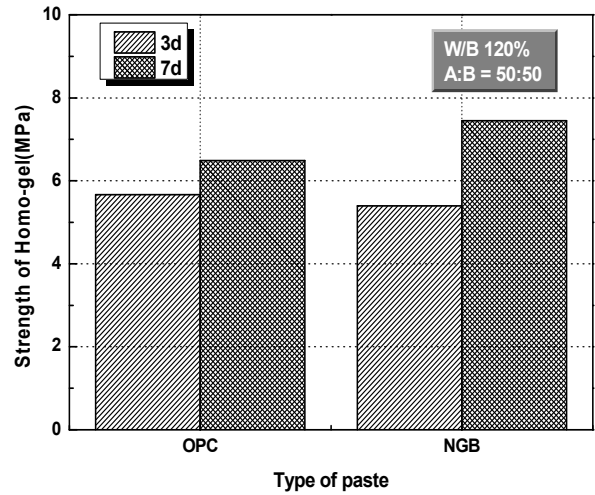


Fig. 7. Test result for Hopmo-gel Strength (Colloid silica, W/B=120%)

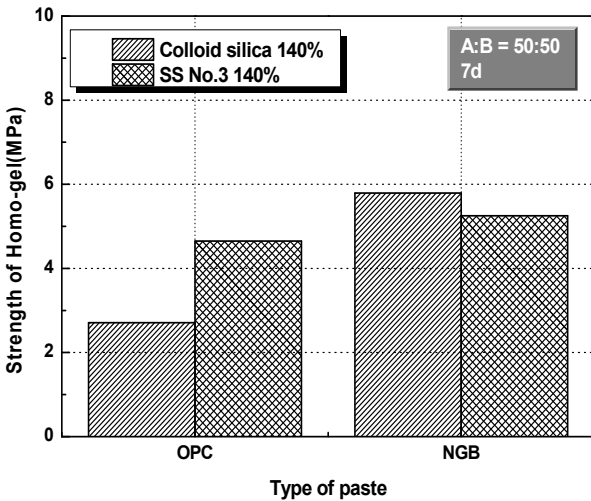


Fig. 8. Test result for Hopmo-gel Strength(W/B=140%)

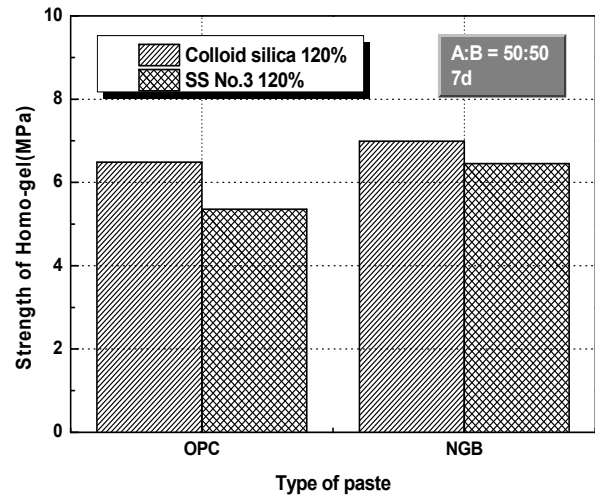


Fig. 9. Test result for Hopmo-gel Strength(W/B=120%)

하였으며, 큐빅형(5×5×5cm)으로 제작하였다. 시험방법은 담수에서 10일 양생한 후 5배농도로 제작한 인공해수(ASTM D 1141 기준준용)¹³⁾에 침지하여, 해수침지7일, 14일에 KSF 2405 : 2010 시험규준에 만족하도록, 만능시험기를 이용하여 압축강도를 측정하여 내해수성을 평가하였다. 시험결과 수중 양생 3일에는 OPC적용 시료가 큰 압축강도를 나타냈으나, 양생 7일 후 부터는 NGB시료가 큰 압축강도를 나타냈다. 그리고 해수침지 14일 경과후 OPC의 경우 시료가 부서져 압축강도시험을 진행할 수 없었으며(Fig. 11.), NGB와 콜로이드 실리카를 사용한 시료의 경우 일부 시료에서 부서짐이 발생(Fig. 12.)하였으나, 부서진 정도가 OPC의 경우보다 양호하며, 압축시험이 가능하였다.

내해수성 시험결과 NGB 및 콜로이드 실리카를 사용한 시료의 해수침지 14일의 강도가 수중 양생 10일 강도에 약 48%인 것으로 나타나, NGB 및 콜로이드 실리카를 사용한 시료가 OPC, 규산소다 3호를 사용한 기존 공법보다 내해수성이 우수한 것으로 판단된다.

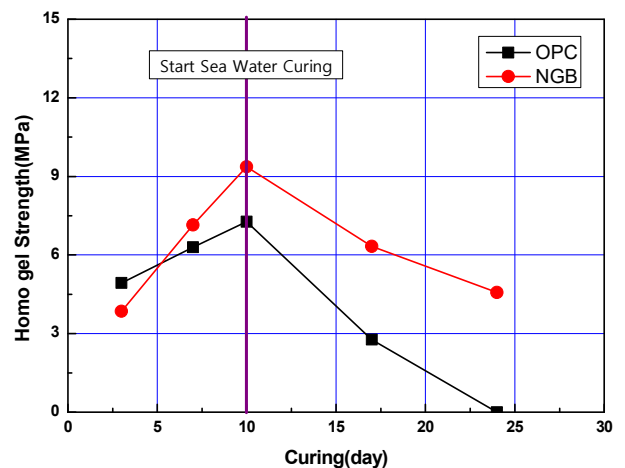


Fig. 10. Test Result of resistance to sea water

13) ASTM, "D1141-98 : Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water", 2013.



Fig. 11. Sea water curing in 14day(OPC)



Fig. 12. Sea water curing in 14day(NGB)

4. 환경성 검증

4.1 순환자원 활용 그라우팅 결합재의 토양오염공정시험결과

NGB의 환경성 검증을 위해 토양오염공정시험기준¹⁴⁾을 적용

하여, 검증을 실시하였으며, OPC도 같이 비교분석을 실시하였다. 토양오염공정시험결과(table 7) NGB는 우려기준 1지역(농경지, 주거용지, 어린이 놀이시설등)에 만족하는 결과로 나타났으며, OPC의 경우 우려기준 1지역에 만족하지 못하는 것으로 나타나, 순환자원 활용 그라우팅 결합재가 OPC보다 환경 친화적인 것으로 판단된다.

4.2 순환자원 활용 그라우팅 결합재의 폐기물 용출시험결과

NGB의 환경성 검증을 위해 폐기물공정시험기준¹⁵⁾을 적용하여, 검증을 실시하였으며, 폐기물공정시험결과(table 8) NGB는 지정폐기물에 함유된 유해물질 기준에 미치지 못하는 것으로 나타나 환경적으로 안정적인 것으로 판단된다.

4.3 어독성시험결과

NGB와 콜로이드 규산 적용 시료의 환경적 안정성을 비교하기 위하여 OPC와 규산소다 3호를 적용한 시료와 같이 어류 급성독성시험을 진행하였다. 시험방법은 'Fish, Acute Toxicity Test'¹⁶⁾ 기준을 적용하였다. 시험방법은 같은 환경에서 사육한 송사리를 10마리씩 무처리 수조와 해당 시료를 넣은 수조 2개에 넣어 비교 시험을 진행하였으며, 최종 96시간까지 시험을 진행하여 송사리의 개체수 및 중량 변화를 측정하였다. 시험결과 OPC의 경우 어류 급성독성시험을 실시한 결과 48 시간 치사율은 0%, 96시간 치사율은 30%로 나타났으며, NGB의 어류(송사리, *Oryzias latipes*) 급성독성시험을 실시한 결과 48, 96시간 모두 치사율은 0%로 나타났다. 따라서 어류의 급성독성시험 결과 순환자원 활용 그라우팅 결합재의 환경안정성이 기존의 OPC보다 안정적인 것으로 판단된다.

Table 7. Result of Standard test method for Soil pllution

item	Criteria of Concern 1area	Criteria of Concern 2area	Criteria of Concern 3area	Result of NGB	Result of OPC
Cd	4	10	60	0.46	2.09
Cu	150	500	2000	19.6	203.2
As	25	50	200	N.D	10.07
Hg	4	10	20	N.D	N.D
Pb	200	400	700	N.D	58.4
Cr ⁶⁺	5	15	40	N.D	11.8
Zn	300	600	2000	49.8	414.4
Ni	100	200	500	60.6	27.2
F	400	400	800	N.D	1,228

Table 8. Result of Standard test method for industrial waste

item	Pb	Cu	As	Hg	C ₂ N ₂	Cr ⁶⁺	Cd
Acceptance criteria(mg/L)	3	3	1.5	0.005	1.0	1.5	0.3
Result of NGB(mg/L)	N.D	0.009	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D

14) 환경부, "토양오염공정시험기준 : ES 07000.b", 2015.

15) 환경부, "폐기물공정시험기준 : ES 06002.a", 2017.

16) OECD guidelines for the testing of chemicals 203, "Fish, acute toxicity test", 1992.

Table 9. Testing of Fish, Acute Toxicity Test

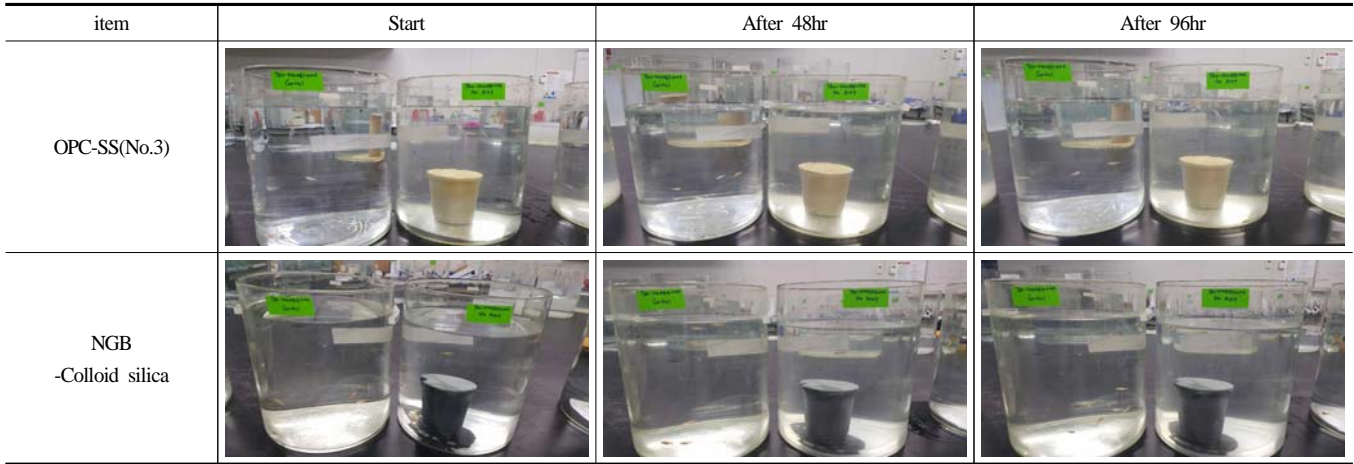


Table 10. Cumulative mortality of fish

Test substans	Number of dead fish					Mortality
	3h	24h	48h	72h	96h	
Negative control	0	0	0	0	0	0%
OPC-LW	0	0	0	1	3	30%
NGB-Colloid silica	0	0	0	0	0	0%

5. 결론

본 연구에서 순환유동층 보일러 플라이 애시를 고로슬래그의 알칼리 활성화 자극제로 활용한 그라우팅 결합재 New Grouting Binder, NGB)와 고몰비 규산나트륨(High molar ratio sodium silicate) 및 콜로이드 규산(Colloid silica)를 혼합한 그라우팅 주입 재료에 대한, 노후저수지 보수·보강공법의 적용 가능성에 대한 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) NGB와 고몰비 규산나트륨, 콜로이드 규산을 사용한 주입 재료의 겔타입은 기존의 OPC에 비해 약 2배정도 증가하는 것으로 나타났으나, 관련기준에 만족하는 것으로 나타나 현장적용이 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 호모겔 강도시험결과 콜로이드 실리카, 고몰비 규산 나트륨 및 NGB를 적용한 시료의 압축강도가 동일 양생일수에서 큰 것으로 나타났으며, 또한 규산소다 3호와 비교한 결과 역시 압축강도가 큰 것으로 나타나, 고몰비 규산나트륨과 콜로이드 실리카를 혼합하여 NGB와 혼합시 강도 측면에서 우수한 것으로 나타났다.
- (3) 내해수성 시험결과 NGB 및 콜로이드 실리카를 사용한 시료가 OPC, 규산소다 3호를 사용한 기존 공법보다 내해수성이 우수한 것으로 나타났다.
- (4) 토양오염공정시험결과 NGB는 우려기준 1지역에 만족하는 결과로 나타났으며, OPC의 경우 우려기준 1지역에 만족하지 못하는 것으로 나타나, 순환자원 활용 그라우팅 주입재가 OPC보다 환경 친화적인 것으로 판단되며, 또한 폐기물공정시험을 통한 중금속용출에 대한 검토 결과 역시 관련기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- (5) 급성어류독성시험 결과 OPC의 경우 48 시간 치사율은 0%, 96 시간 치사율은 30%로 나타났으며, NGB의 경우

48, 96시간 모두 치사율은 0%로 나타나 환경 안정성이 기존 주입재인 OPC보다 우수한 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 노후저수지 보수·보강공법에 적용하는 약액주입공법에 사용하는 OPC를 대체하는 순환자원을 활용한 환경 친화적 결합재에 대한 실내시험결과로 노후저수지 보수·보강공법 적용에 적합한 것으로 나타났으며, 이에 따라 실제 현장에서 현장 적용성 및 성능 검증 등의 현장 적용 시험이 추가적으로 반드시 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 박성용·장석현·임현택·김정면·김용성, 수치해석에 의한 노후저수지의 침투 및 동적거동, 한국농공학회논문집, 58(3), 2016
2. 한국농어촌공사 농어촌연구원, 저수지 시설물의 노후현상과 보수·보강공법 적용방안 연구(신공법중심)(II) 연구보고서, 2015
3. 배형섭·원경식·이영동, 표면파탐사를 이용한 저수지 체체 그라우팅 보강효과 검증 연구, 지질공학, 28(2), 2018
4. 천병식, 약액주입의 원리와 실제, 구미서관, 2011
5. 김영훈, 알칼리성 실리카졸 주입제의 공학적 특성에 관한 연구, 한양대학교 박사학위논문, 2014
6. 한국산업규격, KS L 5405 : 플라이 애시, 2016
7. 송상현, 고갈습 연소재를 활용한 PHC파일 채움재의 현장적용성 평가에 관한 연구, 전북대학교 석사학위논문, 2017
8. 한국산업규격, KS M 1415 : 액상 규산 나트륨(규산소다), 2015
9. 문경주, 산업폐기물을 이용한 비소성 시멘트 및 콘크리트의 특성, 전북대학교 박사학위논문, 2004
10. E. Bergna and William O. Roberts, Colloidal Silica Fundamentals and

Applications, Surfactant Science Series, 131, 2005

11. 국토교통부, 가설공사표준시방서, 2016
12. 한국산업규격, KS F 2405 : 콘크리트의 압축강도 시험방법, 2010
13. ASTM, D1141-98 : Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water, 2013
14. 환경부, 토양오염공정시험기준 : ES 07000.b, 2015
15. 환경부, 폐기물공정시험기준 : ES 06002.a, 2017
16. OECD guidelines for the testing of chemicals 203, Fish, acute toxicity test, 1992

접 수 일 자 : 2019. 04. 12

수정일자 1차 : 2019. 05. 02

게재확정일자 : 2019. 05. 06