

# 저수지 제체 보강을 위한 고화재 최적 배합비 결정

## Determination of Solidified Material's Optimum Mixing Ratio for Reservoir Embankment Reinforcement

우 제 근<sup>1)</sup> · 황 정 순<sup>2)</sup> · 김 승 욱<sup>3)</sup> · 백 승 철<sup>†</sup>

Jaegeun Woo · Jungsoon Hwang · Seungwook Kim · Seungcheol Baek

Received: April 4<sup>th</sup>, 2024; Revised: April 9<sup>th</sup>, 2024; Accepted: May 10<sup>th</sup>, 2024

**ABSTRACT**: Currently, a grouting method that minimizes damage to the reservoir embankment by injecting solidification agent at low pressure is commonly used to ensure waterproofing and safety of the embankment, but the use of solidification agents can cause issues, such as a decrease in durability and a lack of clear method for determining the mixing ratio. In this study, when the base ground and solidification agent were stirred and mixed at various weight mixing ratios, the permeability coefficient and strength of the mixture were confirmed through laboratory tests, and the optimal mixing ratio was suggested through analysis of the test results. The specimen for the laboratory test was produced considering the mixing ratio of the solidification agent. The specimen for the permeability coefficient test was tested by producing one each of cohesionless and cohesive soil for a mixing amount of 1.5 kN/m<sup>3</sup> of solidification agent, and the permeability test results confirmed that the water barrier performance was secured below the permeability coefficient value required by various design criteria. A total of 24 specimens for the strength test were produced, 3 for each of 5 mixing amounts for cohesive soil and 3 mixing amounts for cohesionless soil. The strength test results showed that the uniaxial compressive strength tends to increase linearly with increasing curing time for both cohesionless soil and cohesive soil when the mixing amount is less than 2.0 kN/m<sup>3</sup>. Therefore, the optimal mixing ratio applied to the site is determined to be mixing amount of 1.5 kN/m<sup>3</sup> and 2.0 kN/m<sup>3</sup>. Finally, numerical analysis reflecting test results was conducted on design case for improvement projects for aging reservoirs embankment to verify the water barrier performance and safety improvement effects.

**Keywords**: Reservoir, Solidification agent, Optimal mixing ratio, Coefficient of permeability, Uniaxial compressive strength

**요 지**: 현재 저수지 제체의 차수성 및 안전성 확보를 위해 약액을 저압으로 주입하여 제체 손상을 최소화하는 그라우팅 공법이 보편적으로 사용되고 있으나, 내구성 확보와 체계적인 고화재의 배합비 결정방법이 정립되어 있지 않은 문제들이 있다. 본 연구에서는 원지반과 고화재를 다양한 중량비율로 교반·혼합하였을 경우 혼합체의 투수계수와 강도를 실내시험을 통해 확인하였으며, 시험 결과들의 분석을 통해 최적 배합비를 제안하였다. 실내시험을 위한 공시체는 고화재의 배합량을 고려하여 제작하였다. 투수시험용 공시체는 사질토와 점성토 별 고화재 배합량 1.5kN/m<sup>3</sup>에 대해 제작하였으며, 투수시험 결과 차수 성능이 확보되어 각종 설계기준을 만족하는 것을 확인하였다. 강도시험을 위한 공시체는 점성토의 경우 5가지, 사질토는 3가지 배합비로 각각 3개 총 24개의 시편을 제작하였으며, 시험 결과 사질토와 점성토 모두 배합량 2.0kN/m<sup>3</sup> 이하에서는 일축압축강도가 재령일이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 현장에 적용되는 최적의 배합비는 고화재 배합량을 1.5kN/m<sup>3</sup> 및 2.0kN/m<sup>3</sup>으로 결정하였다. 또한 현재 운영 중인 노후 저수지 개보수사업 설계사례를 대상으로 실험성적을 반영한 수치해석을 실시한 결과 저수지 제체의 차수 및 안전성 증대 효과를 확인하였다.

**주요어**: 저수지, 고화재, 최적 배합비, 투수계수, 일축압축강도

## 1. 서 론

국내에 설치된 농업용 저수지 중 한국농어촌공사 및 지자체 관리 저수지 수는 각각 3,429개소와 13,637개소로 총 17,066개가 있다. 2023년 기준 준공년도 별로 분류하면 1945년 이전에 준공된 저수지가 8,652개소로 전체의 50.7%를 차지하고, 50년 이상 경과(1946~1972)된 저수지는 2,225개소

(36.5%), 30년 이상 경과(1973~1992)된 저수지는 1,559개소(9.1%)이며, 30년 이내(1993년 이후)인 저수지는 630개소(3.7%)이다(농림축산식품부, 2022).

이상과 같이 저수지 87.2%가 준공 50년이 지나 대부분 노후화가 진행되었으며, 집중호우 등으로 파손 및 붕괴되는 사례가 종종 발생하여 피해가 증가하고 있다. 본 연구에서는 노후된 저수지 개량을 위해 개발된 보강공법의 설계기법

1) R&D Team Director, DBR Research Institute

2) General Manager, Doosan E&C

3) R&D Team Director, Asin C&T

† Professor, Dept. of Civil Engineering, Andong National University (Corresponding Author : [civilb@anu.ac.kr](mailto:civilb@anu.ac.kr))

정립을 위한 기초연구를 수행하였다.

보강공법은 기존의 원지반에 고화재를 첨가한 후 혼합용 기기를 장착한 굴착기로 교반-혼합하여 저수지 제체의 차수성과 강도를 증가시키는 공법이다. 본 연구에서는 저수지 제체의 기능향상을 위해 개량 효과를 최대로 발휘할 수 있는 고화재 배합설계 결정을 위한 실험을 수행하였으며, 이를 토대로 최적 배합비를 제시하였다. 또한 실험 성과를 실제 노후된 저수지 제체 개량에 적용하여 제안된 배합비의 효과를 확인하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 고화재의 일반적인 특성

일반적인 지반개량에 사용되는 고화재는 현탁액형(시멘트계, 점토계, 아스팔트계)과 용액형(물유리계, 고분자계)으로 분류되고, 고화재 사용에 따른 효과는 다음과 같다(Lee et al., 2015).

#### 2.1.1 유기성, 무기성, 유기성 오니류

활성탄 또는 제오라이트와 같은 흡착 능력으로 악취가 없으며, 고화된 후에는 절대로 다시 오니 상태로 돌아가지 않는다. 투수성, 보비성이 뛰어난 미세다공질로 형성된 토양은 식물 성장에 최적 상태인 토양으로 개량된다.

#### 2.1.2 고상폐기물

대량 소비가 가능하며, 골재난 해소 및 경비를 절감하는 효과가 있으며, 항구적이고 견고한 제방구축이 가능하다. 특히 하천 제방구축 시 전단면 보강토 고화로 홍수 범람 시 월류에 의한 유실방지 및 전단강도가 증대되어 유지·보수비가 절감된다.

#### 2.1.3 광산폐기물(광미, 광재)

대량발생 폐기물로서 상수원 오염 및 토양오염의 피해가 크다. 안정화 및 고형화 처리 후 현장에 공장부지, 연못이나 저수지 제체축조, 산림도로, 농로 등을 조성하면 안전하게 재활용할 수 있다.

#### 2.1.4 연약지반, 불량토 지반

공사기간을 단축시키고 원위치 고화로 인하여 토사 반입 및 반출의 필요성이 줄어든다. 전단파괴 및 부등침하 염려가 없는 지반조성이 가능하며, 건설폐기물 순환골재를 20~30% 혼합하여 환경개선에 유익하다.

## 2.2 고화재의 투수 및 강도 특성

Seo et al.(2000)은 고화재 20%를 원지반과 혼합한 개량체의 투수계수는  $4.163 \times 10^{-9} \sim 2.905 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 의 범위로 기준값인  $6.151 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 에 비해 100배 이상 아주 작은 값을 보인다고 제시하였다. 또한 Park(2009)은 점토에 고화재를 1.0%, 3.0%, 5.0%, 7.0%, 9.0%의 중량비로 혼합하였을 경우 투수계수 변화를 고찰한 결과 고화재의 혼합비가 5.0% 이상 되어야 차수재로서의 투수계수를 만족할 수 있는 가장 효과적인 배합비라 제안하였다.

Park(2009)은 점토에 고화재를 1%, 3%, 5%, 7%, 9%의 중량비로 혼합하여 1일, 3일, 7일, 14일, 28일 경과 후 강도 특성을 실험적으로 평가하였다. 평가 결과 1%, 3%, 5% 고화재를 함유한 시편의 강도는 일정하게 증가하는 결과를 보였으며, 5%를 넘는 구간에서는 강도 변화가 상대적으로 미미한 것으로 평가되었다. 이는 고화재의 혼합비 5% 정도가 점토의 강도 증가에 가장 효율적인 혼합비임을 의미한다.

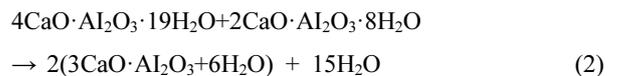
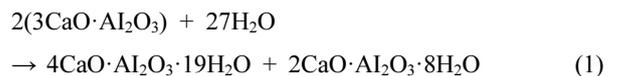
## 2.3 고화재

### 2.3.1 고화재 특성 및 메카니즘

본 연구에서 사용된 고화재는 시멘트계이며, 활성도가 높은 알루미늄이트계열의 특수광물 및 황산염계 물질을 기초로 한 미분말로 구성되어 있다. 원지반과 혼합하면 수화반응에 의해 에트링자이트(ettringite)가 형성되며, 흙 입자의 유동성을 억제하여 강도가 발현되고 중·장기적으로  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ 와 같은 반응이 일어나 가교를 중첩적으로 강화시켜 차수성이 높은 강도를 발현하는 친환경 무기질계 고화재로 분류된다.

고화처리에서는  $\text{C}_3\text{A}$ 반응이 중요한데 이것이 에트링자이트 반응이며, 간단하게  $\text{C}_3\text{A}$ 는 석고와 반응을 하여 에트링자이트가 되고 에트링자이트는 석고가 모두 소모가 되면  $\text{C}_3\text{A}$ 와 반응하여 저황산염형의 수화물이 된다. 이러한 반응은 시멘트 화합물의 반응 중 가장 빠른 반응이며, 생성물이 선형으로 형성되며 크기가 큰 반응이다.

$\text{C}_3\text{A}$ 의 반응은 아래와 같다.

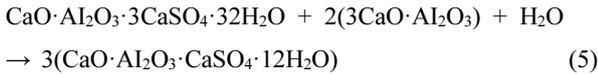
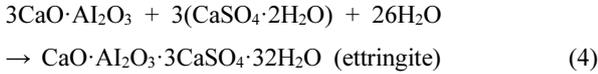


간단하게 표현하면



위의 화학식과 같이 C<sub>3</sub>A는 물과 반응을 하여 준 안정상태인 C<sub>4</sub>AH<sub>19</sub>, C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>을 생성하고 두 화합물은 이어서 안정상태인 C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>가 된다.

C<sub>3</sub>A는 석고가 존재하면 에트링자이트가 되고, 석고가 소비되고 나면 고허산염인 에트링자이트와 C<sub>3</sub>A가 반응하여 저황산염형의 수화물이 된다.



위와 같이 C<sub>3</sub>A반응은 석고(CaSO<sub>4</sub>) 성분이 모두 소비되면 저황산염(Monosulfate)이 만들어진다.

### 2.3.2 고허재의 화학성분

고화재는 흙과 혼합을 하여 연약지반 개량, 차수성 증대를 목적으로 사용된다. 이러한 용도로 사용하기 위해서는 고허재는 토사와 혼합되어 흙 입자 간의 결합력과 수밀성을 증진시키는 역할 및 일정한 내구성도 확보되어야 하므로 일반 시멘트와는 성분과 특성이 다르다. Table 1은 고허재와 일반 시멘트의 화학성분 비교이다.

Table 1. Composition of solidification agent and Portland cement

Chemical composition	Content (%)	
	Solidification agent	Portland cement
CaO	52.1	63.8
SiO <sub>2</sub>	16.50	23.1
SO <sub>3</sub>	13.80	2.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.34	3.0
MgO	3.36	1.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.52	3.0
etc	5.58	4.5

## 3. 고허재 혼합물 실내시험

고화재 배합비에 따른 투수특성 및 강도특성 파악을 위해 고허재의 단위 배합량을 다르게 교반·혼합하여 실내시험용 공시체를 제작하였다. 고허재와 혼합 현장토의 활용 가능성을 평가하기 위하여 저수지 제체에서 직접 채취한 토사와 세립분 함량을 고려한 반입토를 실험 대상으로 하였다.

사질토는 현재 공용 중인 저수지 제체에서 직접 채취하였으며, 실내시험 수행을 위한 고허재 배합비는 Table 2에 제시

Table 2. Cohesionless soil mixing ratio

Unit mixing amount of solidification agent (kN/m <sup>3</sup> )	Weight mixing ratio of test specimens		
	Soil (N)	Solidification agent (N)	Mixing ratio (%)
1.0	35	2.06	5.9
1.5	35	3.10	8.8
2.0	35	4.12	11.8

Table 3. Cohesion soil mixing ratio

Unit mixing amount of solidification agent (kN/m <sup>3</sup> )	Weight mixing ratio of test specimens		
	Soil (N)	Solidification agent (N)	Mixing ratio (%)
1.0	35	2.06	5.9
1.5	35	3.10	8.8
2.0	35	4.12	11.8
2.5	35	5.15	14.7
3.0	35	6.18	17.6

하였다. 점성토의 경우 설계기준에 부합하는 저수지 인근 토사를 채취하여 사용하였으며, 배합비는 Table 3과 같다.

배합비 변화에 따른 투수계수의 저감효과를 살펴보기 위해 변수위투수시험을 실시하였으며, 시험에 사용된 단위 배합량은 1.5kN/m<sup>3</sup>로 28일 양생을 거친 후 KSF 2322에 의거하여 투수시험을 수행하였다.

일축압축강도시험은 사질토 및 점성토 모든 배합비에 대하여 Ø50×100mm의 공시체를 제작하였다. 공시체는 배합비별 각각 3개의 공시체를 만들어 재령 7일, 14일, 28일 일축압축강도를 측정하였다(Fig. 1).

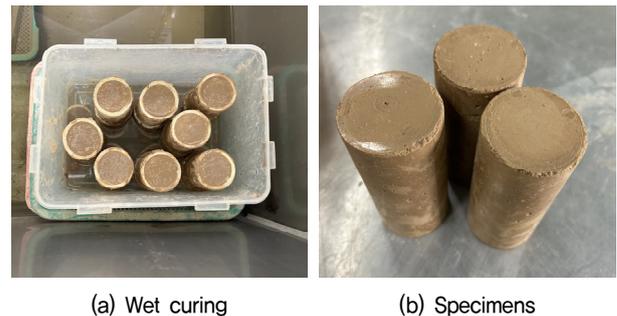


Fig. 1. Specimens

## 4. 실내시험 결과분석

### 4.1 투수시험 결과

고화재를 사용하여 원지반을 개량하였을 경우 투수계수의 변화를 확인하기 위하여 점성토 및 사질토를 배합량 1.5kN/m<sup>3</sup>

로 교반 혼합한 시편을 28일 양생 후 변수두투수시험을 시행하였다.

Fig. 2와 같이 개량 전 투수계수는 사질토의 경우  $5.12 \times 10^{-5}$  cm/sec이고, 점성토의 경우는  $3.90 \times 10^{-5}$  cm/sec로서 농업용 댐 설계기준에서 코어재료로서 요구되는 투수계수를 만족하지 못한 상태이다. 그러나 고화재를 사용하여 개량하면 투수계수가 사질토는  $2.24 \times 10^{-7}$  cm/sec, 점성토는  $1.63 \times 10^{-7}$  cm/sec로 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 현장토사와 반입토사 모두 고화재 배합을 통해 수밀성 증대에 따른 차수 성능이 개선되어 저수지 제체 코어 재료로 활용할 수 있는 것으로 확인되었다.

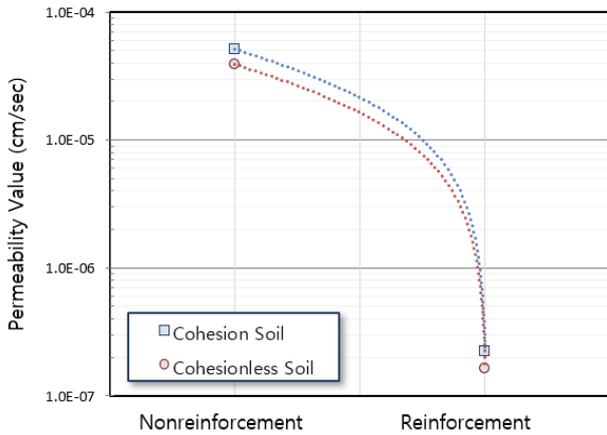


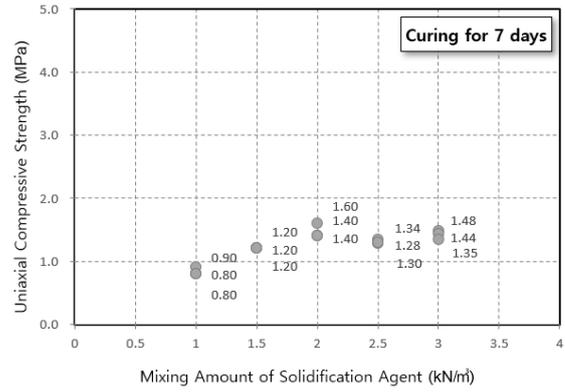
Fig. 2. Coefficient of permeability

## 4.2 일축압축강도시험 결과

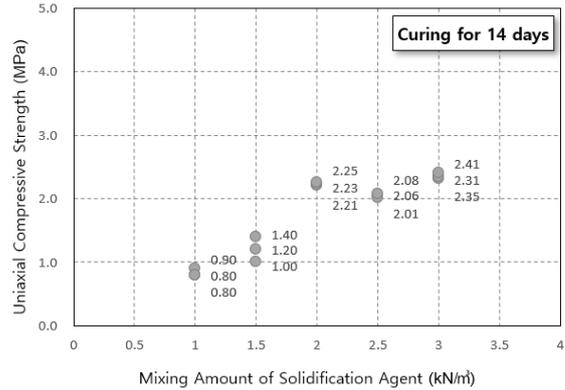
### 4.2.1 점성토

Fig. 3은 배합비별 3개씩 제작된 공시체에 대한 양생일 7일, 14일, 28일 후의 일축압축강도시험 결과이다. 고화재 배합량  $1.0\text{kN/m}^3$  (배합비 5.9%)~ $2.0\text{kN/m}^3$  (배합비 11.8%)에서 7일, 14일, 28일 양생 후 일축압축강도가 선형적으로 증가하나, 배합량  $2.5\text{kN/m}^3$  (배합비 14.7%) 이상일 때는 오히려 일축압축강도가 감소되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서 일정 정도 이상의 고화재가 혼합될 경우 개량 효과가 감소하는 것을 확인하였다.

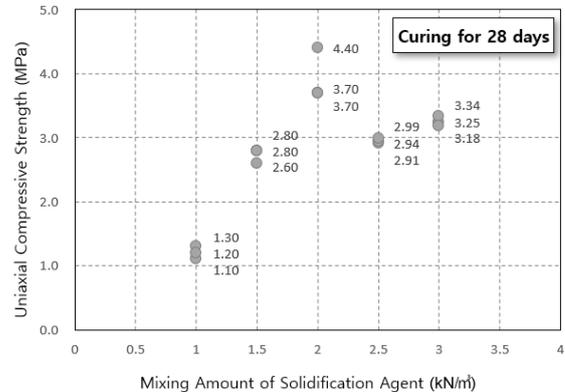
Fig. 4는 양생일 별 배합량에 대한 일축압축강도를 표시하였으며, 일반적인 소요지지력(2.0~3.0MPa) 이상을 발현하기 위해서는 배합량  $1.50\text{kN/m}^3$  이상을 요구하고 있으며, 배합량  $2.50\text{kN/m}^3$  이상 시료의 일축압축강도는 배합량  $1.50\text{kN/m}^3$  대비 감소 또는 미소한 증가를 나타낸다. 따라서 최적의 배합량은  $1.50\text{kN/m}^3$ ~ $2.0\text{kN/m}^3$ 의 범위를 확인하였다.



(a) Curing for 7 days



(b) Curing for 14 days



(c) Curing for 28 days

Fig. 3. Uniaxial compressive strength

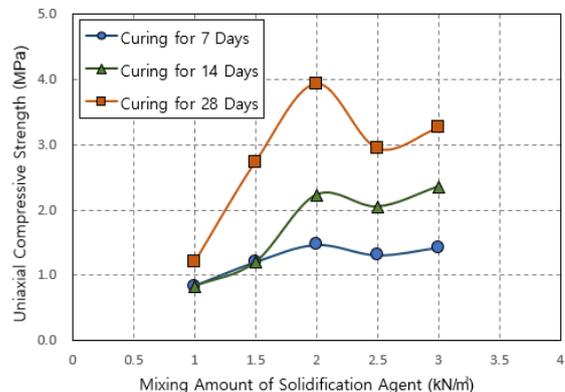


Fig. 4. Strength according to mixing amount and curing day

### 4.2.2 사질토

Fig. 5는 사질토에 3가지 고화재 배합량으로 만든 공시체를 대상으로 양생기간을 7일, 14일 및 28일로 하여 일축압축강도를 측정된 결과이다.

양생일 7일 대비 28일의 평균 일축압축강도는 고화재의 배합량 1.0kN/m<sup>3</sup>(배합비 5.9%)의 경우 약 153%의 강도가 증가하였으며, 배합량 1.5kN/m<sup>3</sup>(배합비 8.8%)의 경우는 975%, 배합량 2.0kN/m<sup>3</sup>(배합비 11.8%)의 경우는 255%의 강도 증가를 확인하였다. 또한 배합량 1.5kN/m<sup>3</sup> 및 2.0kN/m<sup>3</sup>에서 강도 발현의 증가폭이 선형적으로 뚜렷한 것을 확인할 수 있어, 해당 단위 배합량 범위에서 높은 개량효과를 발휘하는 것을 확인할 수 있다.

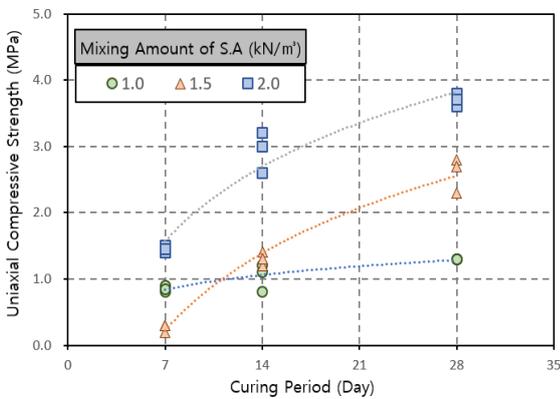


Fig. 5. Uniaxial compressive strength of cohesionless soil

### 4.3 최적배합설계 결정

실내 투수시험 및 일축압축강도시험 결과와 같이 원지반 토사와 고화재를 혼합·교반하여 복합체를 형성하면 투수계수가 크게 감소하고 강도는 증가하게 된다. 이는 원지반 토사와 고화재를 혼합하면 고화재에 포함된 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S와 물 입자들 간에 수화반응이 발생하고, 이를 통해 흙 입자들 간의 결합력과 수밀성을 증가시키기 때문이다.

Fig. 6~7에서 보듯이 일축압축강도 결과 사질토에서는

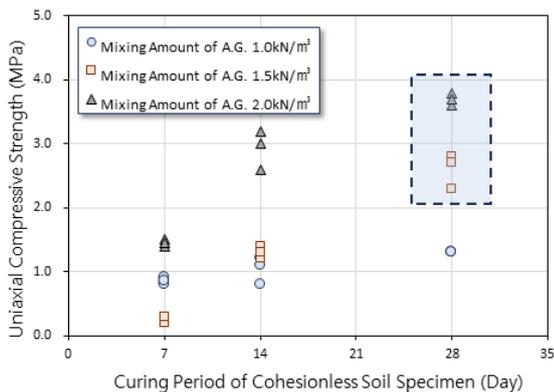


Fig. 6. Uniaxial compressive strength of cohesionless soil

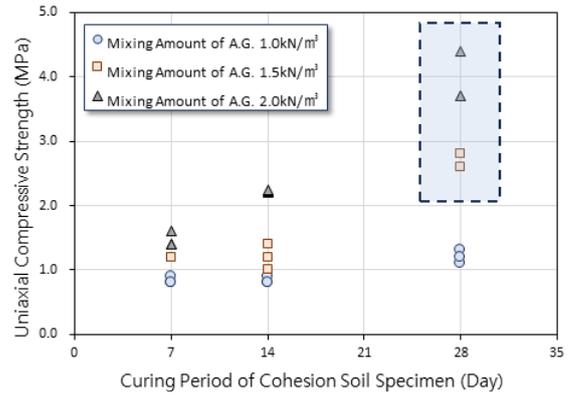


Fig. 7. Uniaxial compressive strength of cohesion soil

Table 4. Optimum design mixing ratio (◎:good, △:normal)

Soil type	Solidification agent (kN/m <sup>3</sup> )	Im-permeable	Soil reinforcement	
			Initial	Long-term
Sandy Soil	1.0	-	-	-
	1.5	◎	-	◎
	2.0	◎	◎	◎
Cohesion Soil	1.0	-	-	-
	1.5	◎	-	◎
	2.0	◎	△	◎

1.5kN/m<sup>3</sup>(배합비 8.8%), 점성토에서는 2.0kN/m<sup>3</sup>(배합비 11.8%)를 적용하는 것이 최적의 개량효과를 기대할 수 있는 것을 확인하였다. 그 결과를 토대로 Table 4와 같이 최적 설계 배합비를 도출하였으며, 현장시공 시에 대상 토질별로 차수 성능 개선, 요구되는 시점별 강도발현에 따른 최적 배합비를 정리하였다.

## 5. 제체의 안정성 증가 검증

### 5.1 제체의 제원 및 특성

현재 사용 중인 저수지 제체에 중심 코어층을 개량한 사례를 대상으로 수치해석을 통해 투수효과 및 제체의 안전성 증대 효과를 검증하였다. 중심 코어가 설치되지 않은 균일형 저수지에 고화재를 혼합·교반하여 중심 코어층을 설치하는 경우 댐의 차수성능 및 안정성 증가의 정도를 정량적으로 검토하였다. Fig. 8은 대상 제체의 제원과 수리 검토를 통해 적용된 수위조건이다.

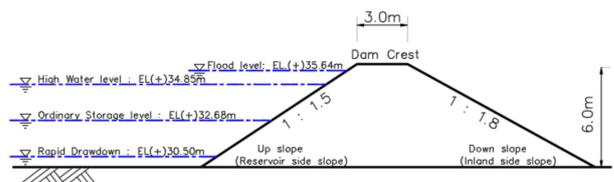


Fig. 8. Embankment cross-section and water level conditions

또한 Fig. 9와 같이 균일형 단면에 폭 1.0m, 깊이 7.2m의 고화재로 개량된 중심코어를 설치하는 경우 제체의 차수성능 및 안전성 증대 효과를 수치해석을 통해 검증하였다. 투수 성능은 중심코어를 설치하는 경우 홍수위, 만수위, 평수위, 수위 급강하 시에 대한 침투 안정성 검토를 통해 수행하였으며, 제체 안정성은 한계평형해석인 Bishop의 간편법을 수행하였다.

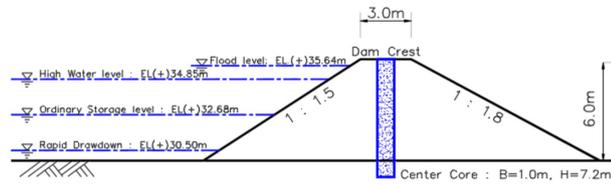


Fig. 9. Hydraulic stability review section

Table 5는 투수해석에 적용된 지반 특성값이며, Table 6은 안정해석에 적용된 지반 특성값이다.

Table 5. Soil parameters for seepage analysis

Classification	Coefficient of permeability (cm/sec)	Note
Fill soil	$5.0 \times 10^{-4}$	Design value
Deposit soil	$1.0 \times 10^{-5}$	Design value
Core material	$2.24 \times 10^{-7}$	On-site soil mixing

Table 6. Soil parameters for slope stability analysis

Classification	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Friction angle (°)
Fill soil	18.0	15.0	25.0
Deposit soil	18.0	5.0	30.0
Core material	20.0	325.0	0.0

## 5.2 침투해석을 통한 제방의 수리 안정성 평가

고화재와 현장토사가 혼합된 중심 코어층으로 보강된 제체에 대해 설계 수위 별 침투 안정성을 분석하였다. 제체에 대해서는 홍수위, 만수위, 평수위 및 수위 급강하 시에 대해 검토하는 설계 규정에 따라 수치해석을 통해 모든 수위조건에 대한 유출부 동수경사를 분석하여 수리안정성을 평가하였다.

수리안정성 검토는 2차원 침투해석 프로그램인 Seep/W를 사용하였다. Seep/W는 모관흡수력에 따라 변화하는 체적함수비와 투수계수를 고려하여 시간에 따른 침투 현상을 해석하고 불포화도층의 수두와 수압의 분포를 계산할 수 있는 장점을 지닌 상용프로그램이다(Jung et al., 2010).

Fig. 10은 해석격자망 형상이며, 제체는 성토재, 하부지반은 퇴적층으로 중심코어는 제체 전체와 하부 원지반 1.2m를 관통하여 설치되는 것으로 모델링하였다.

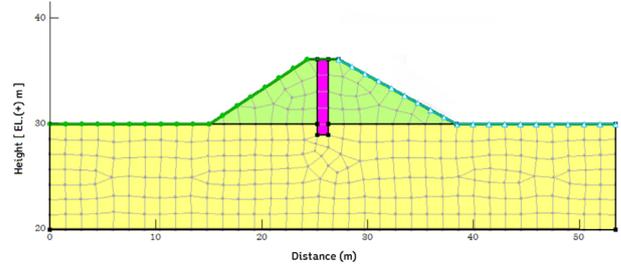
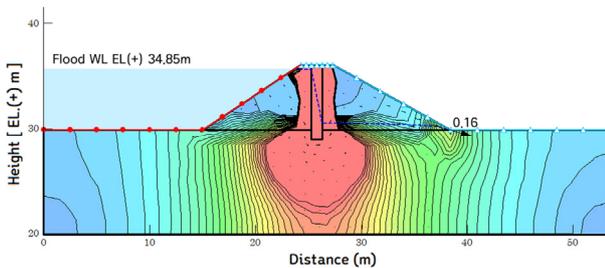
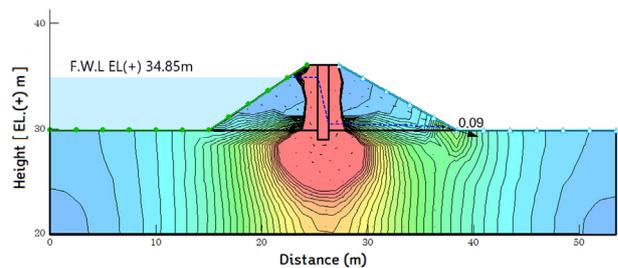


Fig. 10. Analysis mesh for hydraulic stability review

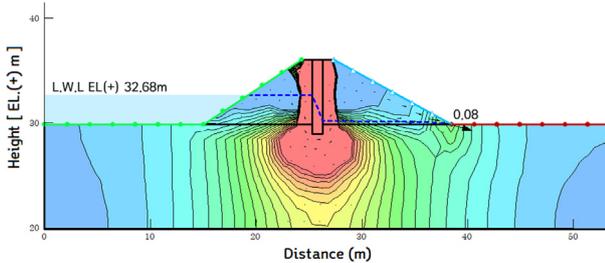
Fig. 11은 저수지 제체의 설계수위 별 침투해석 결과이다. 침투해석 시 제체의 안정성 평가를 위해 침투수가 집중되는 유출부 영역에서 침투유속 파락을 통해 동수경사를 평가한



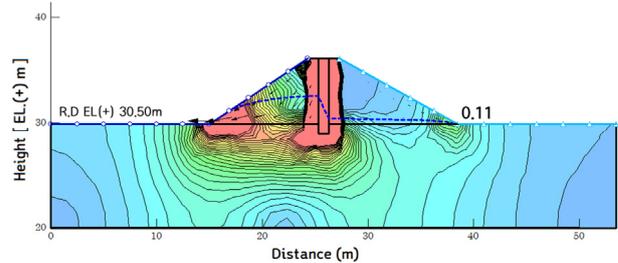
(a) Analysis result of flood water level



(b) Analysis result of high water level



(c) Analysis result of low water level



(d) Analysis result of rapid drawdown level

Fig. 11. Seepage analyses due to reservoir water levels

결과이다. 해석 결과 중심 코어층 설치에 따라 모든 수위 조건하에서 제체 내부 코어층을 통과하며, 침투수의 수두가 급격히 하강되는 것으로 검토되었다. 이에 따라 저수지 하류측의 제체 내 수두 차이가 크게 감소하고 동수경사 역시 하강되는 결과를 나타냈다. 유출부 동수경사는 홍수 시가 0.16으로 가장 큰 값을 보였으며, 수위급강하 시 0.11, 만수위 0.09 및 평수위 0.08 순으로 나타났다. Table 7은 제체 하류의 파이핑에 대한 안정성 검토 결과이며, 모든 수위조건에 대해 한계동수경사에 크게 미달하여 제체의 수리안정성은 확보되는 것으로 분석되었다.

Table 7. Results of stability analysis for piping

Classification	Hydraulic gradient	Critical hydraulic gradient	Result
Flood water level	0.16	1.12	Stable
High water level	0.09		Stable
Ordinary storage level	0.08		Stable
Rapid drawdown	0.11		Stable

※  $i_{cr} = (Gs - 1) / (1 + e) = (2.6 - 1) / (1 + 0.43) = 1.12$

### 5.3 제체의 안정성 평가

고화재를 혼합·교반하여 설치되는 중심 코어층은 일축압 축강도의 증가로 제체의 안정성을 증가시키는 역할을 한다. 농업생산기반시설 설계기준의 필댐편(농림축산식품부, 2023)에 규정된 안정성 평가기준에 의해 제체 비탈면의 안정성

증가 효과를 검토하였다.

비탈면 안정성 검토는 Slope/W를 활용하여 Bishop의 간편법을 적용한 한계평형해석을 수행하였다. 필댐의 비탈면안정성 검토는 상시조건의 경우 홍수위, 만수위, 평수위 및 수위 급강하 시에 대해 검토하며, 지진 시는 만수위와 평수위에 대해서만 검토하였다. 또한 평수위는 제체 높이의 45~50%를 적용하도록 기준에 따라(농림축산식품부, 2023), 제체 높이의 45%를 검토 수위로 적용하였다.

Table 8은 필댐의 해석 case와 기준안전율 및 내진검토 관련 규정이다. 비탈면 안정해석은 보강 이전 제체와 보강 후 제체에 대해 각각 평상 시 6개와 지진 시 4개의 조건 등, 총 20개의 조건에 대해 안정성 평가를 수행하였다. Fig. 12는 홍수 시 상류 비탈면측 안정성 검토 결과의 비교이다. 그림과 같이 중심 코어 개량으로 파괴면의 형상이 변경되고 안전율 역시 증가하는 것으로 평가되었다. Table 9는 설계 기준에서 요구하는 수위조건 및 내진해석 등 모든 조건을 반영한 안정성 평가 결과이다.

Table 8. Safety factor of fill dam

Storage water level	Safety factor		Seismic analysis
	Upper stream slope	Down stream slope	
Flood water level	1.2	1.2	Not need
High water level	1.2	1.2	Seismic
Ordinary storage level	1.15	-	Seismic
Rapid drawdown	1.2	-	Seismic

Table 9. Safety factor of slope stability analysis

Classification		Flood water level		High water level		Ordinary storage level		Rapid drawdown		Note
		Upper stream	Down stream	Upper stream	Down stream	Upper stream	Down stream	Upper stream	Down stream	
General condition	Nonreinforcement	2.683	1.349	2.391	1.352	1.628	-	1.392	-	12 cases
	Reinforcement	2.765	1.840	2.634	1.851	1.682	-	1.419	-	
Seismic condition	Nonreinforcement	-	-	1.433	1.009	1.161	-	1.057	-	8 cases
	Reinforcement	-	-	1.705	1.395	1.218	-	1.15	-	

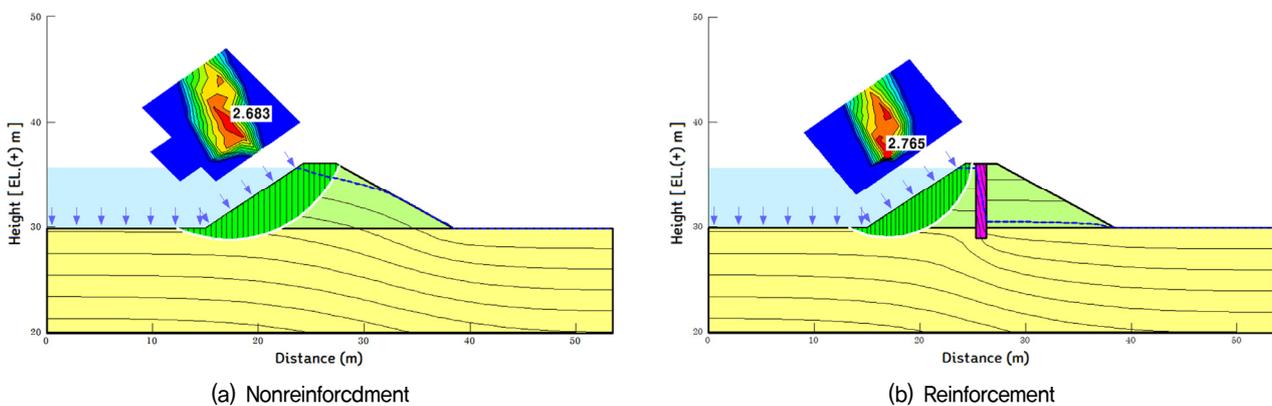


Fig. 12. Results of reservoir slope stability analysis under flood water conditions

Table 9의 상시조건에 대한 분석 결과 모든 해석 case에서 설계기준(안전율 기준 1.2)을 만족하는 것으로 평가되었다. 또한 저수지 제체에 중심 코어층을 형성함에 의해 상시 비탈면 안전율이 3.1%~36.9%까지 상승하는 것으로 분석되었으며, 특히 하류 비탈면의 경우 증가 효과가 매우 큰 결과를 보였다. 이는 저수지 중심에 설치된 코어층에 의해 하류 비탈면 내부의 침윤선이 크게 하강하여 안정해석 지지하수의 영향이 배제되기 때문인 것으로 판단된다.

이를 통해 중심 코어층 설치 시 전단강도 증가에 의한 비탈면 안정 개선 효과와 함께 침윤선 저하에 의한 안정성 개선 효과가 추가로 유발됨을 확인할 수 있었다.

Table 9의 지진 시 분석 결과 일부 해석 case에서는 지진 시 안전율 기준 1.1(국토교통부, 2020)에 미달하는 것으로 분석되었다. 만수위 하류 비탈면의 경우 지진 시 안전율이 1.009로서 기준안전율 1.1에 미달하며, 수위 급강하 시 상류 비탈면에서도 1.057로서 기준안전율에 다소 미달하는 것으로 분석되었다. 그러나 코어 보강 시에는 만수위 하류 비탈면은 1.395, 수위 급강하 시 상류 비탈면은 1.150으로 코어 보강이 이루어진 모든 경우에는 기준안전율 1.1을 상회하는 것으로 분석되었다. 지진 시 중심 코어층 형성에 의해 비탈면 안전율이 4.9%~38.3%까지 상승되며, 이 경우에도 상시 해석결과와 동일한 이유로 하류 비탈면의 안전율 증가 효과가 큰 것으로 평가되었다.

상기 결과로 노후화된 필 댐 중 개정된 안정성 평가 기준에 부합하지 못하는 저수지의 경우 고화재를 사용한 중심 코어층 형성에 의해 성능개선이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 원지반 토사(점성토 및 사질토)에 고화재의 양을 달리하여 혼합·교반하였을 경우의 투수특성 및 강도특성 변화를 실내시험을 통해 확인한 후 최적의 배합비를 산정하였으며, 현재 사용 중인 저수지 제체에 중심 코어층을 개량한 사례를 대상으로 수치해석을 수행하여 투수효과 및 제체의 안전성 증대 효과를 검증하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 원지반 토사의 투수계수와 개량된 혼합토의 투수계수를 실내시험을 통해 확인한 결과 원지반 토사에 고화재 1.5 kN/m<sup>3</sup>로 원지반토를 개량하였을 경우 개량 전 사질토 투수계수가 5.12×10<sup>-5</sup>cm/sec에서 2.24×10<sup>-7</sup>cm/sec, 점성토 투수계수가 3.90×10<sup>-5</sup>cm/sec에서 1.63×10<sup>-7</sup>cm/sec로 감소하는 것을 확인하였다.

(2) 사질토 및 점성토에서 고화재 1.0kN/m<sup>3</sup>를 혼합개량 하였을 경우 일축압축강도가 2MPa이며, 고화재 1.5~2.0kN/m<sup>3</sup>로 혼합 개량하였을 경우 재령 28일 이후 2~3MPa를 상회하는 것으로 확인되어 사질토에서는 1.5kN/m<sup>3</sup>, 점성토에서는 2.0kN/m<sup>3</sup>의 배합량을 적용하는 것이 최적으로 판단된다.

(3) 실제 저수지 제체를 대상으로 비탈면 안정성 평가를 수행한 결과, 균일형 댐의 중심코어를 고화재 혼합 재료로 보강하는 경우 안전율이 3.1%~38.3% 범위로 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 제체 하류 비탈면의 안정성 증가에 영향이 더 큰 것으로 분석되었다.

(4) 고화재를 혼합하여 전단강도와 차수성능을 개선한 중심 코어층으로 제체를 보강하는 경우 전단강도 증가에 의한 개선 효과와 함께 침윤선 저하로 안정성이 증대되는 것을 확인하였다.

이상의 결과로부터 중심 코어가 설치되지 않은 노후화된 필댐 중 향상된 내진성능 평가 기준을 만족하지 못하는 저수지는 고화재 혼합으로 전단강도와 차수성이 향상된 중심 코어층을 형성함으로써 노후화된 제체의 안전성을 확보하는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 국립안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

## References

1. 국토교통부 (2020), 비탈면 내진설계기준(KDS 11 90 00).
2. 농림축산식품부 (2022), 2022년 농업생산기반정비 통계연보.
3. 농림축산식품부 (2023), 농업용 필댐 설계(KDS 67 10 20).
4. Jung, H.S., Byun, Y.S., Chun, B.S., Choi, B.H. and Kim, J.M. (2010), Numerical analysis for integrity evaluation of river bank, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 11, pp. 19~26 (In Korean).
5. Lee, S.H., Woo, Y.I. and Cho, D.Y. (2015), Applications and technical status of solidification, Korean recycled construction institute, Vol. 10, No. 2, pp. 26~32 (In Korean).
6. Park, S.Y. (2009), Determination of Optimum Mixing Ratio for Soft Ground Improvement by Utilizing Admixture Agent, Master's thesis, Graduate School of Engineering, University of Incheon, 77 p. (In Korean).
7. Seo, D.S., Kim, Y.I., Jung, H.J., Nam, K.S., Lee, J.S. and Sung, C.Y. (2000), Experimental study on the strength and permeable properties soil-concrete, The Korean Society of Agricultural Engineers, pp. 278~283 (In Korean).