

안전과 저수량 증대 측면의 샌드댐 설계 개선 방안

서동건¹ · 서종원¹ · 채정욱¹ · 김성준¹ · 윤태섭² · 정일문^{3*}

¹연세대학교 건설환경공학과 재학생, ²연세대학교 건설환경공학과 교수,
³한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

Improvement of Sand Dam Design for Safety and Increased Water Storage

Dong Gun Seo¹ · Jong Won Suh¹ · Jeong Uk Chae¹ · Sung Jun Kim¹ · Tae Sup Yun² · Il-Moon Chung^{3*}

¹Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University
²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University
³Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, KICT

Abstract

Sand dams are formed by installing beams across rivers and filling the secured space with water and a permeable material, such as sand, which stores the water in available pore space. These structures have mainly been reported in Kenya, Africa. This study proposes a sand dam design that improves structural safety and water intake. First, to increase the stability of the concrete wall of the dam, steel barbed wire connections are proposed for construction. Second, by using geotextile fabrics, evaporation may be reduced from 45% to 8%, and horizontal permeable discharge could be reduced markedly, therefore improving water storage capabilities. In addition, the water intake increased by ~2.4 times that of the previous design. Third, filtration efficiency is improved by selecting a sedimentary site for improved water quality. Finally, the installation of a tensiometer is suggested for monitoring the sand dam.

Keywords: sand dam, geotextile, tensiometer, evaporation

초 록

샌드댐이란 하천의 횡단에 보 등을 설치하고 확보된 공간에 모래와 같은 투수성 재료와 물을 함께 채운 후, 공극내의 물을 저장하여 사용하기 위한 구조물이다. 주로 아프리카 케냐를 중심으로 많은 사례가 보고되고 있는 샌드댐에 관해 본 연구에서는 샌드댐의 구조적 안전과 취수량 증대를 위한 설계 방안을 제시하였다. 첫째, 샌드댐의 콘크리트 벽체의 안정성을 확보하기 위해 철근을 가시철근으로 연결, 시공의 편리함을 제시했다. 둘째, 지오텍스타일을 이용하여 증발을 45%에서 8%로 감소시킬 수 있었고 수평방향 투수배출량도 크게 줄일 수 있어 취수량은 기존대비 약 2.4배 증가되는 것을 알 수 있었다. 이 밖에도 수 질개선을 위한 침사지 설계로 여과효율을 높였고, 토양수분장력계를 통한 모니터링 방법도 제시하였다.

주요어: 샌드댐, 지오텍스타일, 토양수분장력계, 증발

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Il-Moon Chung
E-mail: imchung@kict.re.kr

Received: 7 August, 2020
Revised: 17 August, 2020
Accepted: 18 August, 2020

© 2020 The Korean Society of Engineering Geology



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.

서론

샌드댐이란 하천의 횡단에 보 등을 설치하고 확보된 공간에 모래와 같은 투수성 재료와 물을 함께 채운 후, 공극 내의 물을 저장하여 사용하기 위한 구조물이다. 주로 아프리카 지역과 같은 건조 지역에서 연간 드물게 발생하는 홍수류를 저류시켜 토립자를 침전시킨 후, 그 속에 저장된 물을 건조 시에 활용하는 시설로 우리나라에는 아직 시공된 바 없다(Chung and Lee, 2019). 샌드댐은 증발 손실이 적고 지하수 함양의 증가로 수량 확보 효과가 크며, 모래층을 통과하여 자연 정화되어 수질 개선 효과가 크다(Baurne, 1984; Ertsen and Hut, 2009; Villani et al., 2018). 대표적으로는 케냐의 마차코스 지역, 우간다의 나예스 지역에서 활용되고 있다.

샌드댐은 특히 건조지역에서 가장 저렴한 방식의 저류시스템으로 유지 보수비용이 거의 없으며 60년 이상의 내구연한을 가진다. 우기 동안 저장된 샌드댐 내의 부유토사는 시간이 지남에 따라 퇴적되며 이때, 이 모래 입자 사이의 공극에는 퇴적물 부피의 40%가량의 물이 저장된다. 한편 하천과 연결된 대수층이 존재하는 경우 모래 댐은 하나의 인공대수층 역할을 하여 지하수의 유동과 하천에서 대수층으로의 인공함양이 가능해진다(Quinn et al., 2019). 따라서 하천바닥과 인근 제방에서의 저류수의 상호 유동이 진행될 수 있다. 더욱이 수면이 드러나 증발로부터 자유롭기 때문에 이 같은 지하수 유동은 연중 지속될 수 있으며 결과적으로 샌드댐 내의 지하수위도 추가적으로 증가될 수 있다(Yifru et al., 2018; Quinn et al., 2019).

샌드댐의 실제 공사기간은 약 두 달 내외로 짧게 걸리지만 제 역할을 하기 위해서는 벽체 뒤에 퇴적층이 형성되어야 하므로 수년의 기간이 추가로 소요된다. 또한, 저장되어 있는 물이 폐쇄된 형태로 보관되어 어느 정도는 손실로부터 자유롭지만 건조지역이기 때문에 증발산이 활발히 이루어지고 횡방향으로 침투현상이 발생하여 물의 손실이 발생하게 된다. 본 연구에서는 기존 샌드댐의 설계방안을 검토하고 구조적 안전과 수리학적 효율을 높이는 설계 방안을 제시하였다.

개선된 샌드댐 설계

퇴적층 형성 과정

기존의 샌드댐 공사기간을 결정하는 주요 요인은 벽체를 설치하는 시간보다 벽 뒤로 퇴적층이 형성되는 시간이다. 콘크리트 벽체를 설치한 뒤, 우기 때 강바닥의 쇄설물을 머금은 강물이 흐르고, 가뭄진 만큼의 유량 내에서 건기 때 상층부의 수분을 증발시키는 방식으로 건설이 진행된다. 하지만 강물의 유속, 측면의 식생 분포 등 여러 가지 요소에 따라 완성되는 데 걸리는 시간에 큰 변동성을 준다. 이것이 샌드댐의 공사기간을 2~7년으로 넓게 설정하는 가장 큰 이유이다. 때문에 샌드댐을 건설하는 시공업체들은 공사기간을 산정할 때 지리적 요건을 가장 중요하게 고려한다. 본 연구에서는 이러한 방해 요소를 최소화하고 공사기간의 변동성을 줄이기 위해 벽체 뒤로 흙더미를 인위적으로 채우는 아이디어를 제안하였다. 건설 후 추가답사를 통해 실제 저수량을 판단해야 하는 기존의 샌드댐과는 달리 흙의 종류를 선택하여 미리 채워 줌으로써 설계 전부터 대략적인 저수량의 예측이 가능해진다. Table 1은 퇴적된 흙의 종류에 따른 공극률과 배수공극률을 나타낸 자료이다. 본 연구에서 목표로 하는 샌드댐의 위치는 특정 지역에 국한되지 않으나, 기존 설계된 샌드댐과의 비교과정을 위해 아프리카 케냐 지역의 토질 특성을 참고하였다. 쌓인 퇴적물의 중량이 커질수록 저수용량은 커질 수 있으나 벽체에 가하는 하중이 커져 콘크리트 보강이 추가적으로 이뤄져야 한다는 점을 고려하여 중간단계의 거친 모래를 채움재 종류로 택하였다(Table 1).

Table 1. Porosity and drainable porosity tests for different sediments

Porosity & drainable porosity tests for different sediments					
	Fine sand	Medium sand	Coarse sand	Fine gravel	Coarse gravel
Porosity (%)	40%	41%	45%	47%	51%
Drainable porosity (%)	19%	25%	35%	41%	50%

기본설계

샌드댐의 콘크리트 벽체는 저수용량을 결정하는 역할의 여수로(spillway), 측면에서 벽체의 안정성을 부여하는 날개부(wing)로 이루어진다. 본 연구에서는 저수용량을 판단하기 위한 목적으로 여수로의 높이만을 고려하였고 10 m 하폭을 가지는 하천 또는 소하천을 대상으로 하였다. 통상 중앙 여수로의 높이는 지역별 강우량에 따라 결정하지만 정확한 연평균 강수량 정보를 얻기 어려운 아프리카 실정을 고려하여 여수로의 높이를 보통 2.5 m로 설정한다. 샌드댐의 길이는 벽체로부터 강 경사를 따라 상류로 올라가다 여수로의 높이와 같아지는 지점(throwback)까지의 거리를 측정한다. 샌드댐이 건설되기 적합한 하천의 종단경사는 대략 6°임을 고려할 때 길이는 25 m가 된다. 따라서 너비를 W, 높이를 H, 그리고 흩터미가 쌓이는 길이를 L이라고 할 때 퇴적층의 부피는 대략 625 m^3 이 된다.

콘크리트 벽체 설계

샌드댐의 콘크리트 벽체는 일반적인 물을 보관하는 댐 설계과정과 크게 다르지 않다. 물이 아닌 흙을 보관하는 샌드댐 또한 우기에 포화된 흙을 보유하기 때문에 같은 종류의 파괴(failure)패턴을 예방해야 한다. 이때 고려해야 할 요소는 댐의 바닥 끝부분에서 발생할 수 있는 전도(turnover), 기반암과 댐 사이의 활동(sliding), 누르는 압력에 의한 압축분쇄, 흩터미 쪽 면에서 발생할 수 있는 인장력, 우기의 흐르던 물이 아래방향으로 유동하는 침투류 등이다.

한편, 샌드댐과 관련한 설계 매뉴얼(Maddrell, 2018)에서 제시된 설계 Golden Rule은 다음과 같다.

- 1) 댐 바닥의 두께는 댐체 높이의 $\frac{2}{3}$ 로 정한다.
- 2) 댐은 사다리꼴 모양으로 1미터 연직 위 방향으로 올라갈 때마다 0.3 m의 두께 감소를 허용한다. 단, 바닥면의 최소 두께는 1.5 m를 미달해선 안 된다.
- 3) 댐은 반드시 모든 밑면적이 기반암 위에 설치되어야 한다.
- 4) 댐의 날개부분은 중앙여수로부터 1 m 멀어질 때마다 0.2 m의 두께 감소가 가능하다.
- 5) 기존 유수의 방향을 바꾸지 말아야 한다.

샌드댐의 가장 큰 파급효과로는 댐의 건설로 기존의 생태계가 변하지 않는 것에 있다. 따라서 샌드댐의 높이를 초과하는 물이 자연스럽게 유출되는지 모니터링이 필요하다.

다음으로 철근의 보강 시 가장 중요하게 생각해야 할 것은 3가지이다.

첫 번째, 전면부 보강철근은 콘크리트 전단면으로 부터 15 cm 이내에 설치되어야 한다.

두 번째, 인장철근, 압축철근은 서로 3:4:5의 직각 삼각형 모양으로 배치되어야 한다.

세 번째, 철근은 기반암(bedrock)의 7~10 cm를 파낸 후 순수한 모르타르와 함께 심어야 한다. 즉, 다음의 측면도(Fig. 1)와

평면도(Fig. 2)와 같이 철근을 배치한다. 철근의 평행 간격은 3:4:5의 거리 비를 맞춰야 하므로 0.9 m, 1.2 m, 1.5 m 간격을 두었다.

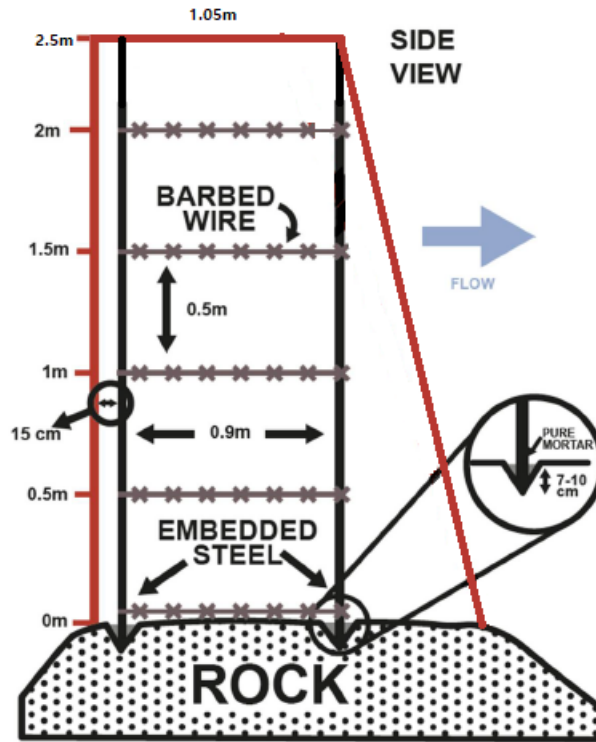


Fig. 1. Concrete wall side view (modified from Maddrell, 2018).

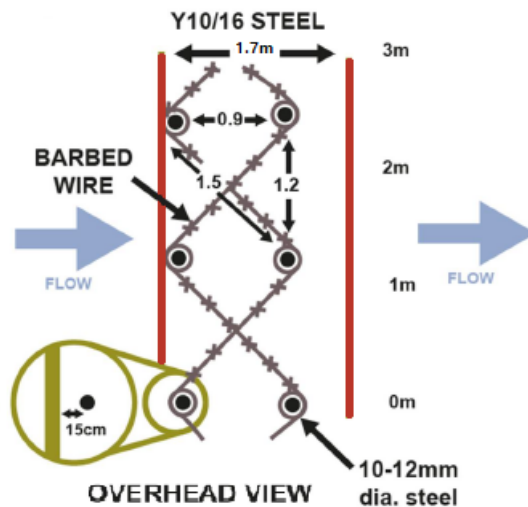


Fig. 2. Overhead view (modified from Maddrell, 2018).

철근을 콘크리트 전단면으로 부터 0.15 m의 거리를 두게 되면 2.5 m 높이에 달했을 때 철근이 노출되지 않기 위한 상단의 필요 두께는 최소 1.05 m이다. 이는 Golden rule에서 제시한 최소두께를 만족한다. 결론적으로, 콘크리트 벽체의 상단

두께는 1.05 m, 하단 두께는 1.7 m이며 높이는 2.5 m이다. 기반암에 박히는 깊이(10 cm)를 고려하였을 때 2.6 m 길이의 Y10/16철근을 사용하였다. 사용하는 철근은 Y10/16철근이다. 마지막으로, 기존 매뉴얼에서 제시한 바와 같이 철근과 철근 사이 간격을 가시철근(barbed wire)으로 엮어 시공의 편리함을 제공함과 동시에 철근 간 상호 안정성 보안을 유도한다.

손실수량 계산

홍수로 인해 샌드댐이 완전포화가 되고 난 후, 잔류 하천유량은 지표면 위로 유출되며 퇴적층 내의 지하수도 수평 또는 수직 방향으로 유출된다. 손실유량은 크게 증발에 의한 유실, 퇴적층 내부에서 수평 또는 수직 방향으로 침투 유출, 마지막으로 하천 유량으로 인한 유출이 존재한다. 증발과 침투에 의한 유출을 계산하기 위해서 흙의 공학적 성질을 파악하는 것이 손실 유량 예상에서 우선적으로 이루어져야 한다.

설계한 퇴적층은 거친 모래로 채워져 있으며 평균 입경은 0.5 mm에서 1.0 mm까지의 범위이다. 투수계수는 1.0 cm/sec에서 0.01 cm/sec의 범위이다(Table 2).

Table 2. Hydraulic conductivity of soil types

Soil type	Hydraulic conductivity (cm/sec)
Clean gravel	100~1
Coarse sand	1~0.01
Fine sand	0.01~0.001
Silty sand	10^{-3} ~ 10^{-5}
Clay	$<10^{-6}$

토양 내 수분의 증발률(evaporation rate)은 단순히 온도뿐만 아니라, 습도와 바람의 세기 등 많은 외부적 요인에 영향을 받는다. 본 연구에서는 Kim et al.(2015)의 실험연구에서 나타난 결과를 참고하여 800시간이 지난 이후에는 모래종류에 관계없이 포화도가 일정해지고 건조면(dry front)이 형성되며 900시간 이후의 젖은 흙은 증발속도가 0에 수렴하고 손실률이 약 40%임을 감안하여 다소 보수적으로 증발 손실을 기본 저수용량의 45%로 고려하였다.

대기 중으로 증발하는 유량 이외에, 퇴적층 내에서 지하수의 침투를 통해 유출되는 양도 존재한다. 이를 계산하기 위해 Darcy의 법칙을 사용했다. 샌드댐을 건설하기 위해서는 반드시 접근 가능한 기반암이 존재해야 하므로 퇴적층 하부에 기반암이 존재하여 수직투수가 없다는 가정으로 설계하였다.

또한 샌드댐에서 취수할 수 있는 물의 양을 계산할 때 고려해야 할 요인들 중 함양량(recharge)도 고려해야 한다. 그 이유는 댐 내부에서 물이 빠져나가더라도 주변에 지하수량에서 물이 댐 내부로 수압에 의해 이동되어 다시 채워지기 때문이다. 따라서 우기 때 주변지역에서 지하로 침투되는 물의 양을 가정하고 그 양이 최대한 함양될 수 있음을 감안하였다. 즉, 댐 주변 0.01 km²의 대수층에서 샌드댐으로 자연함양이 진행된다고 가정하고 케냐의 연강수량 900 mm 중에 25%의 함양률을 적용하여 연간 22,500 m³ (일평균 60 m³)의 자연함양이 진행되는 것으로 계산하였다. 이 중에서 수평으로 유출되어 손실되는 양을 Darcy 공식에 의해 계산한 36.8 m³/day (25 m² × 8.64 m/day × 0.17)를 배제하여 취수량을 산정한다. 또한 취수가능총량이 많아도 취수관로의 조건에 따른 최대 유량을 산정하여야 하므로 다음 식을 취수량으로 나타냈다.

$$\text{취수량 } Q: \min (\text{함양량} \cdot \text{수평유출량}, \text{파이프의 최대유량}) \tag{1}$$

취수량 증대 방안

점토라이너에 의한 수평 유출량의 저감

샌드담 내 수평 유출량 저감을 위해 토목섬유 중 하나인 지오멤브레인을 활용하여 검토하였다. 토목합성수지 점토라이너(Geosynthetic Clay Liner, GCL)는 규격이 작고 소규모의 방수 목적으로 활용되어 왔다. GCL은 투수성이 아주 작고 수 밀성과 팽창성이 우수한 벤토나이트 등을 분말이나 조립의 상태로 지오텍스타일이나 지오멤브레인에 부착시키거나 도포하여 만든 제품이다. 이것은 수분을 흡수한 후 팽창하여 외부의 돌출물질에 의하여 손상을 받았을 때 손상부위가 치유될 수 있는 장점을 가지고 있다. 횡방향의 배수를 억제하기 위하여 지오멤브레인과 GCL을 후보군으로 선정하고 비교하였다. 비교 결과 각각의 투수계수는 비슷하지만 내구성 부분에서 GCL이 우수한 것으로 나타났다.

GCL의 투수계수는 5.0×10^{-11} cm/sec이다(Den Hoedt, 1990). 따라서 앞서 언급된 가정사항과 Darcy의 법칙에 의해 수평흐름에 의한 손실 유량은 약 6×10^{-7} m³/day로 미미하게 나타났다. 따라서 점토라이너 설치 후 수평투수로 인한 손실은 무시할 수 있는 유량이라고 판단했다. 하지만 이 결과 값은 GCL이 손상없이 시공되고, 유지되는 동안 기능상실이 발생하지 않았을 때의 값이므로 발생할 수 있는 오차 요인들을 고려하여 예상 유량 범위를 계산해야 한다.

지오텍스타일에 의한 증발량 저감

지오텍스타일(geotextile)이란 여과, 보강, 보호 또는 배수기능을 가진 투과성 직물로 흡수성이 매우 좋아 수분제거 또는 사면안정 등 토목응용 분야에 활용된다(Jeon and Hong, 2004). 본 연구에서는 내구성이 강하고 물분자가 더욱 효과적으로 흡입되는 wicking 지오텍스타일을 선정하여 설계에 반영하였다(Guo et al., 2016). 콘크리트 내벽 뒤로 쌓은 토체상 층부에 wicking 지오텍스타일을 설치하면, wicking 지오텍스타일 보다 위에 존재하는 수분은 대부분이 응집되거나 증발로 사라진다. 따라서 설치 후에는 지오텍스타일을 설치한 높이부터 기반암 사이의 수분만 사용가능하다. 주어진 상대습도와 온도 하에 지오텍스타일이 물을 얼마나 흡입하는 지에 대한 선행연구에 따르면 포화된 상태의 지오텍스타일 부분에서는 국소적으로 상대습도가 거의 100%에 달하기 때문에 밑에 위치한 수분의 증발속도가 거의 0에 가까워진다. 하지만, 증발 손실량을 최소화하기 위해 지오텍스타일을 흙더미 상층표면에 노출시킬 경우 세굴이나 소실의 위험이 있다. 또한 지오텍스타일 자체에서 직접 증발이 발생할 수 있다. 이렇게 될 경우 흡입한 물이 직접 증발하면 또 다른 수분을 흙으로부터 끌어오고 다시 증발하는 과정을 반복하므로 오히려 흙 내부 수분이 제거되는 역효과를 낳는다. 그러므로 적당한 깊이에서 지오텍스타일을 설치하여 설치 높이 위로는 수분량이 0에 가깝게, 그리고 밑으로는 포화상태를 유지하도록 설계해야 한다. 지오텍스타일보다 위에 위치하는 물분자의 free body diagram을 그리면 연직 윗방향으로는 증발하려는 압력이 존재하며 밑으로는 중력과 지오텍스타일 간의 분자 간 인력이 작용한다(Fig. 3).

이때 연직아래 방향 힘의 합력이 윗 방향보다 유의미하게 크지 않다면 물분자에 가해지는 총 외력의 합은 0이므로 가속도가 붙지 않아 그 자리에 머문다. 이런 경우 지오텍스타일 아래의 수분처럼 간극수압을 형성하여 파이프를 통해 배출되지 않아 비효율적이고 오염의 위험도 존재한다. 따라서 지오텍스타일이 유의미하게 물 분자와 인력을 가지는 깊이에 설치되어야 한다. wicking 지오텍스타일이 거리에 따라 얼마나 수분을 제거가능한지 대한 선행연구에 따르면, 20 cm 이상의 거리부터 wicking 지오텍스타일만이 가지는 특징을 더 이상 활용하기 어렵다. 이 점을 참고하여 기존의 2.5 m 높이인 흙더미에서 0.2 m 깊이에 wicking 지오텍스타일을 설치하게 되면 기존 실험결과(Guo et al., 2019)에 따라 45%가 증발로 손실되는 샌드담에서 대략 8% 만이 증발되는 성능을 기대할 수 있다. 실험실 데이터임을 고려하여 보수적으로 책정하여 대략 10%에 해당하는 물의 양이 증발된다고 설계하였다.

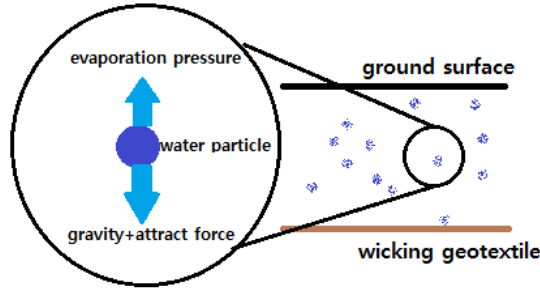


Fig. 3. Free body diagram for water particle.

설치 전후 취수량 계산

식 (2)의 Manning식을 사용하여 지오텍스타일 설치 전후의 취수량을 계산하였다.

$$Q = A \times \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

여기서, n : 조도계수, R : 경심, I : 동수경사

PVC관의 $n = 0.01$, 관의 직경은 20 cm로 설정하였다. 지오텍스타일의 경우 포화층이 올라가기 때문에 토층내부의 간극수압이 증가하게 되고 그에 따라서 동수경사 I 가 증가하게 되므로 Q 값이 커짐을 알 수 있다. 포화토 층의 높이가 기존 1.375 m (Maddrell, 2018)에서 설치 후에 2.3 m로 증가하게 되고 이 값들을 계산해보면 설치 전후의 취수량은 약 2.39배 증가했음을 알 수 있다(Table 3).

Table 3. Final intake after improvement

Item	Before	After
Recharge-horizontal flow (m ³ /day) = a	23.25	60
Pipe flow (m ³ /day) = b	33.99	55.62
Q = min (a, b) (m ³ /day)	23.25	55.62
Increased intake ratio after improvement		2.39

수질개선

수자원의 확보만큼 수질 역시 중요하다. 샌드담 건설을 활발히 진행 중인 케냐에서의 취수 수질평가를 참고하면, 생물학적 오염정도를 평가하는 대장균 지표와 화학적 오염정도를 평가하는 비소 지표가 음용수 기준을 만족하고 있다(Maddrell, 2018). 흙 입자 사이의 미세한 공극으로 물을 통과시키는 샌드담의 구조적 특징 때문이다. 하지만, 물리적 오염 부분에서는 흙입자를 포함한 비균질 혼합물의 여과를 통해 음용수로 사용한다는 결론 외에 특별한 여과장치를 제시하지는 않았다. 본 연구에서는 일단 샌드담에서 여과된 물을 침사지를 통해 다시 정화시키는 방안을 검토하였다. 침사지란, 하천에서 토사함유량이 많은 용수를 취수하는 경우 토립자를 침전시켜 맑은 물을 얻어내기 위한 수처리 시설이다.

$$L = V T \tag{3}$$

여기서, L : 침사지 길이, V : 평균유속, T : 체류시간

환경부 설계기준(Ministry of Environment, 2017)에 따른 체류시간은 30~60초 사이 이므로 30초를 적용하였다. 추가적으로 침사지의 유입부, 유출부 길이와 침사지내부 일시적인 누적으로 인한 수심증가를 고려한 여유 높이를 추가한 결과 침사지의 규모는 길이 11.3 m, 높이 0.22 m, 너비 0.5 m로 산정되었다.

한편, 침전율은 Hazen(1904)의 침강이론에 따라 다음과 같이 나타낸다.

$$E = \frac{h}{H} = \frac{v_s}{v_0} = \frac{v_s}{Q/A} \tag{4}$$

이 때 흙 입자의 침강속도인 v_s 는 Stokes(1851) 법칙에 의해

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \tag{5}$$

여기서, μ : 물의 점성계수, d : 흙 입자의 직경, ρ_s : 흙 입자의 밀도, ρ : 물의 밀도

표면부하율을 침사지의 대표값인 $1,800 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{day}$ 로 하여 나머지 물성값을 대입한 뒤 계산한 결과 침전율은 50.8%로 나타났다.

이 값을 실험으로 확인하기 위해 모래와 물을 섞은 후 섞은 직후와 30초 후의 침전된 물을 채집하여 오븐에 건조 시킨 뒤 잔류한 흙의 무게를 측정하였다. 실험의 신뢰도를 높이기 위해 각각에 대해 3회 씩 진행하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다(Table 4).

Table 4. Sedimentation filtration rate

	A	B	C	Average
Before (kg)	7.84	8.04	8.16	8.01
After (kg)	4.12	4.31	4.31	4.25
Filtration rate (%)				53.04

실험결과 53%의 여과율을 보여 계산여과율 50.8%과 유사한 결과를 얻었기 때문에 실제 시공에 있어서도 비슷한 여과율을 보일 것으로 예측된다.

모니터링 시스템

기존의 샌드댐에서 저류 용량을 개선한 이론값은 약 2.39배 증가한 $55.62 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 나타났다. 그러나 시공 과정이나 운영 과정에서 오차가 발생할 확률이 존재한다. 따라서 지오텍스타일을 통해 개선된 저수 용량이 이론값과 근사한지 확인하

기 위해 실시간으로 퇴적층의 포화도를 확인하는 시스템을 추가했다.

개선 전후의 샌드담에서 지하수의 수위가 일정 높이를 유지함을 기반으로 취수량을 계산했기 때문에 퇴적층이 일정 수준 이상 완전 포화임을 유지하는 것이 중요하다. 따라서 목표 지하수위 근처 퇴적층의 포화도를 측정하는 모니터링 시스템을 통해 취수량을 조절하고 퇴적층의 포화도를 유지하는 것을 검토한다. 포화도를 측정하기 위한 장비로 토양 수분 장력계라고 하는 토양수분장력계를 선택했다. 두 개의 진공부 중, 토양 내부에 있는 진공부는 세라믹으로 이루어져 토양 수분장력계 내부에 존재하는 물이 자유롭게 이동할 수 있다. 토양이 증발과 투수로 인해 물이 감소하게 되면, 토양은 토양 수분장력계 내부에 저장된 물을 끌어당기고 다공성 세라믹 팁에서 물이 빠져나가게 된다. 따라서 압력계가 부착된 진공부가 장력을 받게 되고, 이로 인해 압력계의 수치가 증가하게 된다. 반대로, 강수로 인해 토양이 포화하게 되면 토양수분장력계 내부로 물이 들어오게 되고, 완전 포화가 된다면 압력계의 수치는 0 kPa을 가리키게 된다.

최소한의 토양수분장력계를 이용하여 퇴적층의 포화도를 관측하기 위한 최적의 설치 위치는 다음과 같다. 전술한 바와 같이 증발방지용 wicking 지오텍스타일을 지표면 기준 약 20 cm 아래에 위치하도록 설치했다. 따라서 지표면으로부터 20 cm 아래부터는 완전 포화를 유지해야 하므로 이 위치를 일차적인 layer로 선정했다. 또한, 설계한 퇴적층이 약 2.5 m 깊이 인데, 최하단부에서 파이프에 의한 지하수 과다 추출이 발생할 수 있으므로 이곳을 2차적인 위치로 선정했다. 따라서 최종적인 토양수분장력계의 위치는 다음 그림과 같다(Fig. 4).

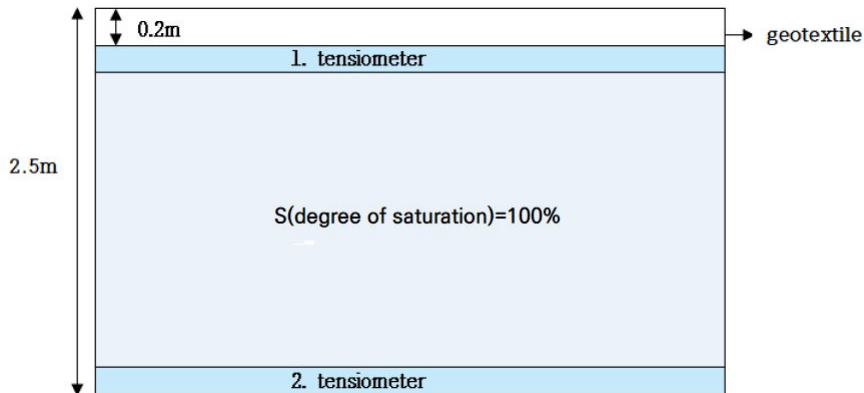


Fig. 4. Installation location of tensiometer.

퇴적층이 일정 수준 이상 포화도를 유지해야 계산과정의 가정을 만족할 것이고 이론값과 실제값이 유사하게 나타날 것이다. 만약 상단에 있는 토양수분장력계의 압력계가 불포화를 나타낸다면 증발이나 유실에 의한 포화도 감소임을 예상할 수 있고, 하단에 있는 토양수분장력계가 불포화를 나타낸다면 파이프에 의한 추출이 과다함을 예상할 수 있다.

결론

현재 아프리카에 지어지는 샌드담들은 물 부족 문제에 기여하고 있지만 구조적 안전이나 물저장 효율 면에서는 다소 부족한 점들이 노출되었다. 이에 본 연구에서는 기존 설계자료를 바탕으로 구조적 안전을 위한 방안을 제시하고 홍수도달 이전에 퇴적층을 형성하는 방법도 제시하였다. 샌드담의 가장 중요한 목표인 저수량 증대방안을 위해 GCL을 이용한 수평배수 억제방안을 검토하였고, 증발량을 저감하기 위한 지오텍스타일설치를 제안하였다. 샌드담 자체의 여과를 통해 기본적인 수질 개선이 이루어지지만, 추가적으로 배출된 물을 재 침강시키는 방안도 제시하였고 토양수분장력계를 이용한

상시 모니터링 방안도 제시하였다. 적용결과 증발량 저감은 기존 45%에서 8%로 줄일 수 있었고, 취수량 증대효과는 약 240%, 수질개선 여과율은 53%로 높게 나타났다. 기후변화로 인해 지구촌 곳곳에서 물 부족 문제는 더욱 심해질 것으로 예상되며 향후 아프리카가 아닌 우리나라를 포함한 여러 국가에서 샌드댐의 응용된 기술이 활용될 것이 예상되므로 본 연구의 성과는 추후 다각적인 측면에서 이용될 것으로 기대한다.

사사

본 연구는 연세대학교 건설환경공학과 학부졸업프로젝트로 수행되었으며 많은 지도를 해주신 김상효 교수님, 김정훈 교수님께 감사드립니다. 또한 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급 서비스사업(#146515)의 지원에 감사드립니다.

References

- Baurne, G., 1984, "Trap-dams": artificial subsurface storage of water, *Water International*, 9(1), 2-9.
- Chung, I.M., Lee, J., 2019, Preliminary hydrological design for sand dam installation at the valley of Seosang-ri, Chuncheon, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 39(6), 725-733 (in Korean with English abstract).
- Den Hoedt, G., 1990, *Geotextiles, geomembranes and related products*, CRC Press, 450p.
- Ertsen, M., Hut, R., 2009, Two waterfalls do not hear each other. Sand-storage dams, science and sustainable development in Kenya, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(1-2), 14-22.
- Guo, J., Han, J., Wang, F., Zhang, X., Han, J., 2016, Quantifying water removal rate of a wicking geotextile under controlled temperature and relative humidity, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(1).
- Guo, J., Han, J., Zhang, X., Li, Z., 2019, Evaluation of moisture reduction in aggregate base by wicking geotextile using soil column tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 306-314.
- Hazen, A., 1904, On sedimentation, *Transaction of ASCE*, 53(980), 45-88.
- Jeon, H., Hong, S., 2004, Development of PVA as geosynthetics, *Polymer Science and Technology*, 15(1), 20-30.
- Kim, D.H., Yang, H.J., Kim, K.Y., Yun, T.S., 2015, Experimental investigation of evaporation and drainage in wettable and water-repellent sands, *Sustainability*, 7(5), 5648-5663.
- Maddrell, S., 2018, *Sand dams: a practical & technical manual*, Excellent Development, 158p.
- Ministry of Environment, 2017, *Criteria of design of pump laboratory facility*, KDS 61 45 00.
- Quinn, R., Rushton, K., Parker, A., 2019, An examination of the hydrological system of a sand dam during the dry season leading to water balances, *Journal of Hydrology X*, 4, 100035.
- Stokes, G.G., 1851, On the effect of internal friction of fluids on the motion of pendulums, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 9, part ii: 8-106, p.52.
- Villani, L., Castelli, G., Hagos, E.Y., Bresci, E., 2018, Water productivity analysis of sand dams irrigation farming in northern Ethiopia, *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 112(1), 139-160.
- Yifru, B., Kim, M.G., Chang, S., Lee, J., Chung, I.M., 2018, Numerical modeling of the effect of sand dam on groundwater flow, *The Journal of Engineering Geology*, 28(4), 529-540.