

## 댐체 비탈면 녹화지역의 수목 생장 및 토양환경 특성에 관한 연구\*

반권수

K-water 환경본부 차장

## Studies on the Tree Growth and Soil Environmental Characteristics in the Planting Zone on the Back Slope of Dam\*

Bahn, Gwon-Soo

Dept. of Water Environmental Management, K-water, Senior manager.

### ABSTRACT

In this study, the characteristics of tree growth and soil environment were analyzed at 5 sites that had been planted on the back slope of dam for more than 15 years in Korea. First, as a result of investigating the growth of 15 trees planted on the back slope of the dam, the average height was 10.6m, diameter at roots was 27.3cm, and DBH was 22.9cm, showing good growth status of most of the trees. In particular, the growth levels of pine, hackberry, and oak were similar or better than those of general forests and artificial ground. As a result of excavating and investigating the roots of trees, horizontal roots grew well in the left and right directions of the back slope of the dam, and the growth of vertical roots was insufficient. Currently, the roots of trees do not directly affect dam safety, but they may continue to grow in the long term and interfere with dam management. Second, the physicochemical characteristics of the soil on the back slope of dam were generally above the intermediate level in terms of landscape design standards, and were similar to those of the domestic forest soil. Therefore, although it was judged to be suitable for plant growth, isolation of the site, soil acidification, and nutrient imbalance may affect tree growth and forest health in the long term. Through this study, it was possible to confirm the potential and applicability of planting area on the back slope of dam as an ecological base. Continuous monitoring is required for safety management and ecological value of dams in the future, and through this, it will be possible to secure the feasibility of planting trees on the slopes of new or existing dams and improving management.

**Key Words** : *Artificial ground, Dam, Green Infra, Soil properties, tree growth*

\* 본 연구는 K-water의 친환경 식재법 관리방안 수립의 일환으로 수행되었습니다.

**First author** : Bahn, Gwon-Soo, Dept. of Water Environmental Management, K-water, Senior manager.

Tel : +82-42-629-4330, E-mail : [populus76@kwater.or.kr](mailto:populus76@kwater.or.kr)

**Corresponding author** : Bahn, Gwon-Soo, Dept. of Water Environmental Management, K-water, Senior manager.

Tel : +82-42-629-4330, E-mail : [populus76@kwater.or.kr](mailto:populus76@kwater.or.kr)

**Received** : 29 April, 2021. **Revised** : 13 June, 2021. **Accepted** : 11 June, 2021.

## I. 서 론

댐 건설은 이수적인 측면에서 안정적인 용수공급을 보장해주는 수자원개발사업의 일환으로 추진되어 왔다. 특히 다목적댐은 하도의 침투홍수유출량을 줄여 하류 구간 도시지역의 홍수 피해를 예방하는데 크게 기여해 왔다(Yeo et al, 2004). 그러나 댐 건설은 하천의 중, 횡적 생태계 단절, 담수로 인한 안개 일수 증가와 일조량 감소 등 환경적 영향의 원인으로 되어왔다(Jeon, 2004). 우리나라에 건설된 댐들은 대부분 환경영향평가가 실시되기 전인 1980년대 이전에 건설되었고 이 당시는 환경에 대한 고려가 부족하였다(Choi and Kim, 2003).

1992년 ‘리우환경회의’(Rio environment summit)에서 ‘Agenda 21’의 실천전략으로서 ‘환경적으로 건전하고 지속가능한 개발’(Environmentally sound and sustainable development, ESSD)이 정식 채택되었고 수자원개발 사업에 있어서도 환경친화적인 건설과 관리라는 새로운 패러다임의 전환이 이루어졌다(WCD, 2000; Woo and Han, 2020). 즉, 댐 건설 및 운영에 있어서도 환경에 미치는 영향의 최소화가 중요한 문제로 대두되었으며 다양한 생태복원 기법을 적용하여 비환경적인 요소를 보완하는 방안이 모색되기 시작하였다(Choi and Kim, 2003). 댐은 하천 상류의 일정구간을 암석 및 콘크리트 등의 인공재료로 쌓아 건설되는 대표적인 그레이 인프라(grey infra)로서(Woo and Han, 2020) 상하류간의 유량, 유사 공급, 수생동물 이동 단절과 같은 환경적 영향과 더불어 댐체로 인한 수역과 육역간의 완충 기능, 생물 이동 제약 등에 대한 대책 마련도 필요하게 되었다.

이러한 배경으로 2000년대 들어 환경친화적 댐 설계지침이 마련되었고 댐체 비탈면에 식생 녹화가 시작되었다(Jeon, 2005). 댐체 비탈면에 성토 후 주변 산림과 조화를 이루도록 다양한 식생을 도입하여 그레이 인프라로서의 한계를 완화하고(Lee and Yang, 2013; Kang et al, 2015) 그린 인프라로 전환하기 위한 시도라고 볼 수 있다. 댐체

비탈면 녹화는 2000년 보령댐 건설시에 최초 적용되었고 이후 대곡댐, 감포댐, 장흥댐, 평림댐, 군위댐, 김천부항댐, 영주댐까지 총 8개 댐에 적용되었다(K-water, 2019).

최근 댐체 비탈면 녹화 이후 십수 년 이상이 경과됨에 따라 당초 도입 취지에 부합되는 효과 입증의 필요성과 함께 과도한 수목 성장, 번무 등이 댐체의 안정성에 미치는 영향에 대해 문제가 제기되었다(K-water, 2019). 이미 해외에서는 건설 후 수십 년 이상 경과된 댐의 비탈면에서 자라는 수목들이 댐의 안정성에 미치는 영향에 대해 다양한 연구들이 시행되어 왔다. 예를 들면 수목 고사시 구멍 발생 및 사면 훼손, 뿌리에 의한 침투 흐름 및 침식 유발로 인한 필터 존의 간섭, 수목 성장시 경사면의 하중 증가, 수목의 그늘로 인한 사면 피복도 저하, 유지보수 간섭 및 비용 증가 그리고 땅을 파고 사는 동물의 환경 제공 등이 문제점으로 보고된 바 있다(Marks and Tschantz, 2002; Haselsteiner and Strobl, 2004; 2006; MSD, 2005; US Army Corps of Engineers, 2007; Haselsteiner, 2010; Laasonen, 2013; Froehlich, 2017). 이는 국내에도 노후화되는 댐들이 점차 늘어나는 추세(Lee and Jang, 2016)임을 감안할 때 댐체 비탈면의 수목에 대한 영향 연구가 필요함을 시사한다. 국내에서 아파트 옥상 및 주차장 상부 등 일반적인 ‘인공지반 조경’에 대해서는 다양한 설계, 시공기준과 연구 사례가 있으나(Jang and Yoon, 2021) 댐체 비탈면 녹화와 같이 거대한 인공구조물 상부에 조성된 식재공간에 대해서는 연구가 미진하였다. 장흥댐 비탈면에 대해 수목 식재 후 3년간 식생 활착 및 이입 등에 대한 모니터링이 시행된 바 있으나(Kim et al, 2005) 이후 진행되지 않았으며 수목의 장기간 생장이 댐체에 미치는 영향에 대해서는 연구가 전무하였다. 즉, 댐체의 부정적인 환경 영향을 완화하고 생태적 기능을 확보하자는 당초 도입 취지를 되돌아보고 식재공간 보전에 대한 타당성과 적정 관리방안을 함께 마련해야 할 시기가 도래하였다.

이를 위해서는 우선 댐체 비탈면 수목들에 대한 현재 성장 정도와 환경을 분석하여 댐 안정성에 미치는 영향에 대한 막연한 우려를 해소할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 댐체 비탈면 녹화 이후 15년 이상 경과한 5개 댐을 대상으로 수목의 성장 특성과 댐 체체에 미치는 영향을 조사하고 식생기반으로써 토양 환경의 특성을 분석하였다. 그리고 이를 통해 향후 댐체 비탈면을 포함하여 이와 유사한 구조물에서의 식재 적용성과 관리방향을 도출하고자 하였다.

## II. 연구의 범위 및 방법

### 1. 연구범위

본 연구의 대상지는 보령, 대곡, 감포, 장흥, 평림댐 등 5개 댐을 대상으로 하였다(Figure 1). 대상 댐들은 댐체 비탈면에 녹화 이후 15년 이상이 경과하여 수목들이 충분히 활착되고 성장한 지역이다.

2020년 4월부터 현황조사를 시작하여 수목 성장 현장조사 및 토양환경 분석은 7월부터 9월까지 진행하였다.

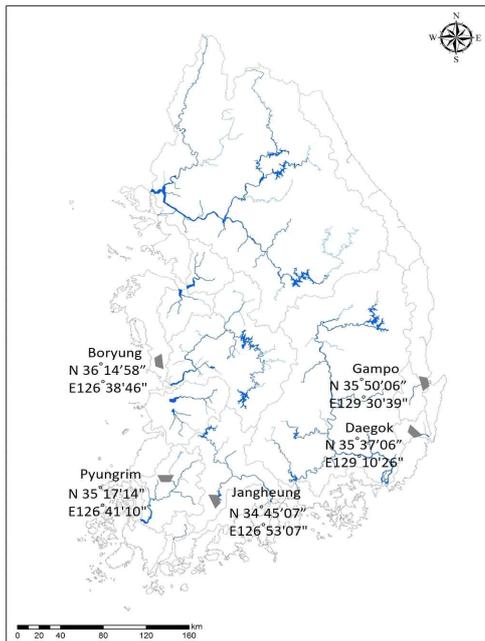


Figure 1. Map showing the study area.

### 2. 연구방법

본 연구는 문헌을 통해 댐체 비탈면 녹화구간의 조성 현황을 조사 후 현장 조사를 통해 수목 성장 및 토양환경의 특성을 분석하는 순으로 진행하였다.

첫 번째로 댐 관리기관의 댐 건설 계획 당시 설계도서, 준공도서 및 정밀안전진단 보고서 등을 수집하여 각 댐별 비탈면 녹화지역에 대한 식재 기반 조성규모와 식재 수목 등에 대한 현황자료를 조사하였다. 준공 후 오랜기간이 경과하여 전산화된 설계도서 구득에 어려움이 있는 경우, 업무 관련자 인터뷰 및 현장 조사를 통해 전반적인 현황을 분석하였다.

두 번째로 각 댐체 비탈면의 수목 성장 현황 및 근계 발달 현황과 댐 체체의 간섭여부 등을 조사하였다. 조사 수목은 각 댐별 3주씩 총 15주를 선정하였는데 대형목 중 인력 및 장비의 접근성이 용이하고 굴착시 댐 체체의 안전에 직접적인 영향과 훼손을 최소화할 수 있는 수목을 대상으로 하였다. 선정된 수목에 대해 장비와 인력으로 뿌리를 굴취하고 함척, 윤척(홍고자), 줄자 등을 이용하여 수고, 근원직경 및 홍고직경을 측정하였으며 수직근과 수평근의 길이와 발달현황을 조사하였다. 그리고 주요 일부 수종에 대해서는 우리나라 주요 수종의 성장 예측(Choi et al, 2014) 및 조경수목 성장예측모형(Kim et al, 1988) 등의 연구사례를 참고하여 수령에 따른 성장수준을 확인하였다.

세 번째로 수목의 생육기반으로서 댐 비탈면 녹화구간의 토양환경 특성을 분석하였다. 먼저 수목 굴취시 토양 층위별 유기물층과 표층의 토심을 측정하였고 물리적 특성인 토성, 가비중, 수분함량, 공극률, 견밀도 등을 분석하기 위해 각 댐별 3개소씩 3깊이(0~20cm, 20~40cm, 40cm이하)로 총 45개의 토양시료를 채취하였다. 토성은 비중계법으로 측정하고 가비중은 100cc캔으로 채취된 시료의 건조량을 측정하였다. 수분함량은 시료채취한 토양의 건조 전 무게와 건조 후 무게

**Table 1.** Status of planting ground and planting on the back slope of dam

Sites	Completion Year	Dam type	Dam Size (Height × width, m)	Planting area (m <sup>2</sup> )	Soil depths (m)	Planting species (Quantity)	
						Tree	Shrub
BR <sup>1)</sup>	2000	E.C.R.D <sup>6)</sup>	50.0×291.0	29,500	1~12	18 (2,225)	3 (21,500)
DG <sup>2)</sup>	2005	C.F.R.D <sup>7)</sup>	52.0×192.0	5,100	3.9	9 (192)	3 (1,740)
GP <sup>3)</sup>	2006	E.C.R.D	35.0×108.0	2,685	2.4	7 (840)	1 (134)
JH <sup>4)</sup>	2006	C.F.R.D	53.0×403.0	25,908	3~16	10 (5,057)	9 (27,254)
PR <sup>5)</sup>	2007	E.C.R.D	37.3×390.5	18,000	10	8 (4,000)	2 (3,639)

<sup>1)</sup> BR: Boryung dam, <sup>2)</sup> DG: Daegok dam, <sup>3)</sup> GP: Gampo dam, <sup>4)</sup> JH: Jangheung dam, <sup>5)</sup> PR: Pyungrim dam  
<sup>6)</sup> E.C.R.D: Earth Core Rock Fill Dam, <sup>7)</sup> C.F.R.D: Concrete Face Rockfill Dam

를 비교하여 수분량을 계산하였다. 공극률은 진 비중 대비 가비중의 비율을 뺀 비율로 산출하였다. 견밀도는 토양 경도계를 사용하여 측정하였다(National Institute of Forest Science, 2014a).

화학적 특성은 각 댐별 4개소씩 10~20cm의 깊이로 총 20개의 토양시료를 채취하였으며 pH, 전기전도도, 유효인산함량, 치환성양이온, 전질소 함량 등을 분석하였다. 토양 중 pH 분석은 1:5법으로, 치환성 양이온은 EDTA적정법으로, 토양 전질소 함량 분석은 Kjeldahl법으로, 유기물 함량은 Tyurin법으로, 그리고 유효인산함량 분석은 Lancaster법을 활용하였다(National Institute of Forest Science, 2014b). 대상지 토양의 이화학적 특성 평가는 국토교통부에서 고시한 조경설계기준(2019)의 평가등급과 Jeong et al.(2002)이 연구한 우리나라 산림토양 특성 등을 참고하였다.

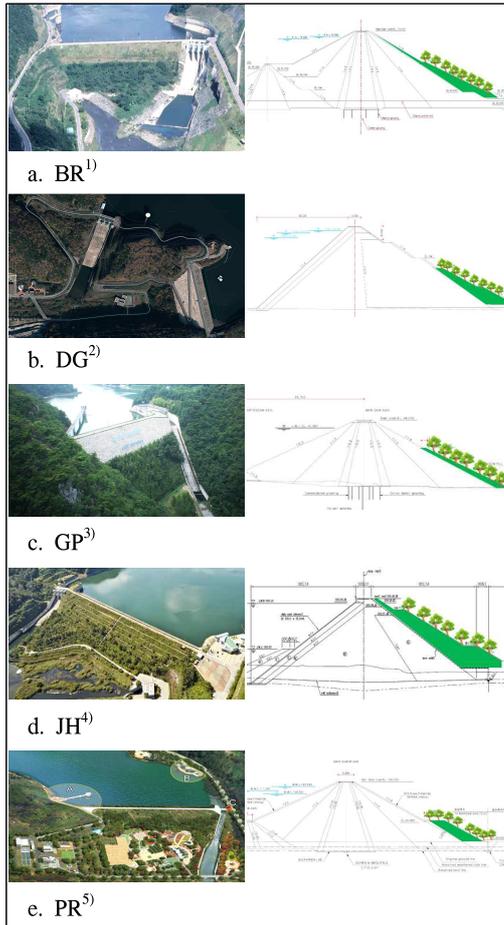
### III. 결과 및 고찰

#### 1. 댐체 비탈면 녹화 현황

댐체 비탈면 녹화는 2000년 보령댐을 시작으로 대곡댐, 감포댐, 장흥댐, 평림댐 순으로 5개 댐에 81,193m<sup>2</sup>의 규모로 시행되었다. 주로 중심 코아형 석괴댐(ECRD: Earth Core Rock Fill Dam) 및 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD: Concrete

Face Rockfill Dam)과 같이 비탈면의 암석층에 공극과 마찰력이 확보되어 토사의 흘러내림과 지반 다짐이 가능한 필댐을 대상으로 하였다. 댐 체제 공사 후 비탈면 상부에 토사를 추가로 복토하여 식재를 위한 기반을 조성하였다. 대부분 댐체 사면의 중간 소단을 기준으로 충분한 토사확보가 어려운 상단부는 초본류 녹화를 시행하고 하단부의 경우 충분한 토심을 확보하여 다양한 수목을 식재하였다. 성토면의 환경사 확보를 위해 하부로 내려올수록 깊게 토심을 조성하였다. 보령댐과 장흥댐은 최상단부터 1:2.5의 경사, 1~16m의 토심으로 전면적인 성토를 시행하였으며 대곡댐, 감포댐, 평림댐은 중간단부터 2.4~10m의 토심으로 부분적인 성토를 시행하였는데 국토교통부 조경설계기준(2019)상 심근성 교목의 생육최소토심이 1.5m임을 감안할 때 전반적으로 적절한 것으로 판단되었다(Table 1, Figure 2).

댐체 비탈면의 식재는 조성 당시 설계 및 준공도서 등을 확인한 결과, 대부분 주변에 자생하고 있는 수종 위주로 침엽수, 낙엽활엽수 군락 등의 모듈 식재로 시행되었다. 주로 댐 건설로 수몰되는 지역의 수목을 이식하거나 주변의 그루터기를 옮겨와 식재하였으며 5개 댐에 교목류 총 52종 12,314주, 관목류 17종 54,267주가 식재되었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 1991; 1996; 1999; 2001; 2006).



**Figure 2.** Bird's eye view and cross sections of dam  
<sup>1</sup>BR: Boryung dam, <sup>2</sup>DG: Daegok dam, <sup>3</sup>GP: Gampo dam,  
<sup>4</sup>JH: Jangheung dam, <sup>5</sup>PR: Pyungrim dam

\* Source : <http://www.kwater.or.kr>, The cross sections on the right were redrawn on the standard section for each dam provided by K-water.

보령댐에서 교목류는 소나무, 잣나무, 밤나무, 참나무, 호도나무 등 18종 2,225주, 관목류는 산철쭉, 조팝나무, 영산홍 등 3종 21,500주가 식재되었고 대곡댐에서 교목류는 소나무, 잣나무, 매죽나무, 물푸레나무 등 9종 192주, 관목류는 산철쭉, 진달래 등 3종 관목류 1,740주가 식재된 것으로 확인되었다. 감포댐에서 교목류는 곶솔, 모감주나무, 산벚나무, 생강나무, 신갈나무, 졸참나무 등 7종 840주, 관목류는 진달래 1종 134주, 장흥

댐에서 교목류는 소나무, 동백나무, 갈참나무, 졸참나무, 상수리나무, 소사나무 등 10종 5,057주, 관목류는 조록싸리, 산초나무, 쥐똥나무, 국수나무 등 9종 27,254주가 식재되었다. 가장 최근에 조성된 평림댐에서 교목류는 소나무, 스트로브잣나무, 졸참나무, 상수리나무 등 8종 4,000주, 관목류는 조팝나무, 산철쭉 등 2종 3,639주가 식재되었다. 단위면적당 식재 수량은 교목의 경우 감포댐(0.3주/m<sup>2</sup>)이 가장 많았고 대곡댐(0.04주/m<sup>2</sup>)이 가장 적었다. 관목의 경우는 장흥댐(1.05주/m<sup>2</sup>)이 가장 많았고 감포댐(0.05/m<sup>2</sup>)이 가장 적었다.

## 2. 수목 성장 특성

### 1) 수목 성장 현황 및 제체 간섭 현황

댐체 비탈면 녹화구간의 수목 성장 현황 및 댐 제체 간섭 여부를 조사하고자 보령댐, 대곡댐, 감포댐, 장흥댐, 평림댐 등 5개 댐 비탈면에서 주요 수목을 굴취하였다. 각 댐별로 생육 상태가 왕성하여 수고와 흉고직경이 비교적 큰 심근성 수목 중에서 현장 사면으로의 장비 진입이 용이하고 사면 훼손을 최소화할 수 있는 지점의 수종을 선정하였다. 굴취 수목에 대해 식재방법(이식수목, 자생수목), 수고, 근원직경, 흉고직경, 뿌리의 두께, 뿌리의 길이, 뿌리의 발달 방향 등을 조사하였다. 그리고 댐별로 굴취된 수목의 뿌리 길이와 식재 구간의 성토 깊이를 비교하여 댐 제체로의 간섭 여부를 육안으로 확인하였다(Figure 3).

대상지별 수목 성장 현황 조사 결과는 Table 2와 같다. 댐체 비탈면 녹화지역 5개소에서 조사된 수목들의 평균 수고는 10.6m, 평균 근원직경은 27.3cm, 평균 흉고직경은 22.9cm로 분석되었는데 전반적으로 조성 후 경과 기간 및 수령이 높은 수목들에서 높게 나타났다. 수고의 경우 대곡댐의 상수리나무(b)가 15.5m로 가장 높았으며 평림댐의 굴참나무(c)가 6.2m로 가장 낮았다. 근원직경은 보령댐의 리기다소나무가 38.0cm로 가장 컸으며 평림댐의 굴참나무(c)가 15.0cm로 가장 작게 나타났다. 흉고직경은 보령댐의 리기다

소나무가 35.0cm로 가장 컸으며 평림댐의 굴참나무(b)가 14.5cm로 가장 작게 나타났다.

식재 당시 설계 도면의 수목 규격 표기방식(수고, 흉고직경, 근원직경 등)이 불균일하여 모든 수목의 성장량을 객관적으로 분석하기에는 어려움이 있었다. 소나무, 팽나무, 참나무류 등 일부 수종에 대해서 조성 후 경과년수와 수령에 따른 성장량 연구사례 등을 통해 성장수준을 확인하였다.

소나무의 경우 장흥댐에서 19년된 수목의 흉고직경이 24.5cm, 수고는 12.0m로 조사되었다. 이는 수고 성장 속도가 매우 느린 소나무의 특성(Lee, 2011)과 제5차 국가산림자원조사(2010)시 전국 산림 표본목 성장조사에서 소나무 33년생의 흉고직경이 20cm, 수고가 11m이고(Choi et al, 2014) 아파트 단지 인공지반 상부에 식재 후 17년 경과된 소나무의 수고가 7m로 조사된 사례(Jang and Yun, 2021)와 비교할 때 양호한 성장 수준으로 판단되었다.

팽나무의 경우 보령댐에서 13년된 수목의 수고가 7.0m로 조사되었는데 수목 성장예측 회귀 모형(Kim et al, 1988)에 따른 수령 17년생의 수고가 약 5.93m임(Jang and Yun, 2021)을 감안할 때 양호하게 성장한 것으로 판단되었다. 참나무류의 경우도 보령댐, 대곡댐, 장흥댐, 평림댐에서 상수리나무, 졸참나무의 평균 수령은 20년, 평균 흉고직경은 21.3cm, 평균 수고는 10.8m으로 조사되었는데 Choi et al.(2014)의 연구에서 제시된 참나무류 15년생의 흉고직경이 6cm, 수고가 5m임과 비교할 때 양호한 수준으로 판단되었다.

댐체 비탈면 녹화지역 5개소에서 수목의 뿌리 길이와 발달 형태를 조사한 결과, 수평근의 평균 길이는 214cm, 수직근의 평균길이는 130cm로 분석되었다. 수평근의 최대길이는 장흥댐의 소나무(b)가 354cm로 가장 길었으며 수직근의 최대길이는 보령댐의 상수리나무가 220cm로 가장 길게 측정되었다. 조사 수목들의 수직근은 댐 체체로부터 토심인 1~16m 내의 범위에서 발달하고 있었다. 수목의 뿌리 형태는 전반적으로 댐체 사면의 상하



**Figure 3.** Sample tree excavation work and root growth status for each dam  
 ¹)BR: Boryung dam, ²)DG: Daegok dam, ³)GP: Gampo dam, ⁴)JH: Jangheung dam, ⁵)PR: Pyungrim dam

방향으로는 발달이 상대적으로 미약하였고 댐체 사면과 직각 방향 즉, 좌우 방향으로 주로 발달하고 있어 댐 체체에 도달하거나 안정성에 직접적인 영향을 주는 수준은 아닌 것으로 확인되었다.

일반적으로 수목의 뿌리는 수관폭의 3배까지 또는 수고의 1~1.5배까지 뻗어 자란다(Martin, 1995). 수목의 뿌리는 인공지반에 이식되는 경우에 자연 상태의 생육 형태와 명확한 차이를 보인다. 자연 상태에서 수목의 근계는 토양 조건과 특성에 따라서 일정한 형태와 분포를 나타내나 이식 수목은 굴취 시 뿌리 자르기를 하는 경우가 많

**Table 2.** Tree growth and roots development status survey results in the planting zone on the back slope of dam

Sites	Species	Age (year)	Planting	Height (m)	DR <sup>6)</sup> (cm)	DBH <sup>7)</sup> (cm)	Roots System Length (cm)	
							Horizontal	Vertical
BR <sup>1)</sup>	<i>Pinus rigida</i>	30	T <sup>8)</sup>	9.0	38.0	35.0	71 ~ 125	105 ~ 125
	<i>Quercus acutissima</i>	28	T	12.0	31.5	28.5	120 ~ 230	120 ~ 220
	<i>Celtis sinensis</i>	13	N <sup>9)</sup>	7.0	24.0	19.5	81 ~ 210	48 ~ 120
DG <sup>2)</sup>	<i>Pinus thunbergii</i>	35	T	14.0	37.0	29.2	131 ~ 352	56 ~ 82
	<i>Quercus acutissima</i> (a)	28	T	14.0	31.0	24.0	75 ~ 140	49 ~ 87
	<i>Quercus acutissima</i> (b)	32	T	15.5	37.6	29.5	88 ~ 162	54 ~ 120
GP <sup>3)</sup>	<i>Pinus thunbergii</i> (a)	20	T	9.0	20.6	15.5	87 ~ 178	63 ~ 86
	<i>Pinus thunbergii</i> (b)	18	T	9.0	24.2	17.5	130 ~ 205	65 ~ 95
	<i>Alnus firma</i>	11	N	9.8	26.0	20.0	231 ~ 288	142 ~ 191
JH <sup>4)</sup>	<i>Pinus densiflora</i> (a)	20	T	14.0	33.8	32.3	130 ~ 251	70 ~ 120
	<i>Pinus densiflora</i> (b)	19	T	12.0	28.5	24.5	170 ~ 354	112 ~ 182
	<i>Quercus acutissima</i>	14	N	11.2	21.0	17.8	52 ~ 153	90 ~ 178
PR <sup>5)</sup>	<i>Quercus variabilis</i> (a)	15	N	9.0	26.0	20.5	120 ~ 250	89 ~ 152
	<i>Quercus variabilis</i> (b)	12	N	8.0	16.0	14.5	68 ~ 210	48 ~ 110
	<i>Quercus variabilis</i> (c)	13	N	6.2	15.0	14.6	52 ~ 110	41 ~ 89

<sup>1)</sup>BR: Boryung dam, <sup>2)</sup>DG: Daegok dam, <sup>3)</sup>GP: Gampo dam, <sup>4)</sup>JH: Jangheung dam, <sup>5)</sup>PR: Pyungrim dam, <sup>6)</sup>DR: Diameter at Roots, <sup>7)</sup>DBH: Diameter at Breast Height, <sup>8)</sup>T: Transplanted Tree(Roots pruning), <sup>9)</sup>N: Natural Tree

기 때문에 형태가 변한다. 이식 수목은 뿌리분 형태로 식재되므로 수직근의 수세가 상당히 약해진 상태이기 때문에 수직근의 발달이 수평근보다 상대적으로 약할 수 있다(Jang and Yoon, 2021).

본 연구에서도 일부 이식 수목의 경우에는 이식 전 뿌리분을 만드는 과정에서 뿌리 자르기 처리를 하였기 때문에 수직근의 발달이 더딘 것으로 확인되었다. 자생수목의 경우에는 뿌리 발달이 댐체 사면과 직각 방향 즉 좌우 방향으로 양호하게 이루어지고 있었으며 흉고직경 및 수령에 따라 일반적인 산림에서와 유사한 성장 수준을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 보령댐에서 조사한 이식 수목들은 식재 후 약 20년이 경과함에 따라 뿌리도 상당히 성장한 것으로 확인되었다. 따라서 장래에 댐체 비탈면에 식재된 수목들의 수령이 높아질수록 지하부 내 수직근도 계속 더 깊게 발달할 것으로 예상되므로 댐의 안정성 측면에서 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단되었다.

## 2) 토양환경 특성 분석

### (1) 물리적 특성

댐체 비탈면 녹화지역 5개소에서 토양 층위의 토심과 토성을 조사하였다(Table 3). 유기물층은 낙엽층(Oe)과 발효, 부숙층(Oi, Oa)으로 구분하여 조사하였는데 각각 0.9~3.3cm, 0.7~2.5cm의 범위로 확인되었다. 유기물층은 보령댐, 대곡댐과 감포댐에서 잘 발달한 것으로 나타났는데 조성 후 장기간 경과되었고 장흥댐, 평림댐에 비해 대상지 내에 다양한 낙엽수종을 많이 식재함에 따른 영향으로 판단되었다. A층의 평균 토심은 12.0~21.0 cm이며 B층의 평균 토심은 33.7~63.0cm까지 양호하게 발달하고 있었다. 토성 조사 결과, 보령댐, 감포댐, 평림댐은 사질양토, 장흥댐은 사질식양토, 대곡댐은 양토 및 식양토로 모든 대상지가 수목 식재 환경으로서 양호한 것으로 나타났다.

다음으로 각 대상지의 토양 깊이별(0~20cm, 20~40cm, 40cm이하)로 채취한 토양 시료에 대해

**Table 3.** The soil profile and texture properties of soil in the planting zone on the back slope of dam

Sites	Organic layer		Layer A(cm)	Layer B(cm)	Soil texture
	Oe (cm)	Oi, Oa (cm)			
BR <sup>1)</sup>	1.5	2.4	21.0	63.0	sandy loam
DG <sup>2)</sup>	3.3	2.2	14.3	34.3	loam, clay loam
GP <sup>3)</sup>	3.3	2.5	12.0	38.7	sandy loam
JH <sup>4)</sup>	1.5	0.9	16.7	44.0	sandy clay loam
PR <sup>5)</sup>	0.9	0.7	13.3	33.7	sandy loam

<sup>1)</sup>BR: Boryung dam, <sup>2)</sup>DG: Daegok dam, <sup>3)</sup>GP: Gampo dam, <sup>4)</sup>JH: Jangheung dam, <sup>5)</sup>PR: Pyungrim dam

**Table 4.** Physical properties of soil in the planting zone on the back slope of dam

Sites	Soil depth (cm)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water content (%)	Porosity (%)	Soil consistence (kg/cm <sup>3</sup> )
BR <sup>1)</sup>	0~20	1.26	38.9	50.7	1.5
	20~40	1.39	20.5	43.3	2.3
	40~60	1.48	10.8	37.3	4.5<
DG <sup>2)</sup>	0~20	1.52	19.4	48.0	2.0
	20~40	1.53	18.0	44.7	3.4
	40~60	1.76	17.7	36.3	4.5<
GP <sup>3)</sup>	0~20	1.55	12.8	47.3	1.5
	20~40	1.66	14.0	41.0	3.5
	40≤	1.66	4.2	35.3	4.5<
JH <sup>4)</sup>	0~20	1.42	14.4	46.3	1.5
	20~40	1.42	15.1	41.3	3.0
	40~60	1.55	13.5	41.7	4.5<
PR <sup>5)</sup>	0~20	1.30	18.8	48.7	1.5
	20~40	1.42	16.0	40.3	3.7
	40~60	1.58	13.1	36.3	4.5<

<sup>1)</sup>BR: Boryung dam, <sup>2)</sup>DG: Daegok dam, <sup>3)</sup>GP: Gampo dam, <sup>4)</sup>JH: Jangheung dam, <sup>5)</sup>PR: Pyungrim dam

가비중, 수분함량, 공극률 및 견밀도를 분석하였다(Table 4). 토양의 가비중은 식물의 뿌리 자람과 배수성 및 투수성의 지표가 되고 점토와 유기물의 함량이 많아지면 가비중은 작아지는 일반적인 특징이 있다(National Institute of Forest Science, 2014a). 대상지들의 가비중을 분석한 결과 0~20cm, 20~40cm, 40cm이하의 깊이에서 각각 평균 1.26~1.55g/cm<sup>3</sup>, 1.39~1.66g/cm<sup>3</sup>, 1.48~1.76g/cm<sup>3</sup>으로 확인되어 대부분 토심이 깊어질수록 가비중은 증가하는 경향을 보였다.

수분함량은 0~20cm, 20~40cm, 40cm이하의 깊이에서 각각 평균 12.8~38.9%, 14.0~20.5%, 4.2~17.7%로 분석되어 대부분의 댐에서 국토교통부

조경설계기준(2019)의 토양 물리적 특성 평가기준 상 중급 이상으로 확인되었다.

공극률은 0~20cm, 20~40cm, 40cm이하의 깊이별로 각각 평균 46.3~50.7%, 40.3~44.7%, 35.3~41.7%로 분석되었다. 국토교통부 조경설계기준(2019)의 토양 물리적 특성 평가기준을 적용시 40cm이하의 깊이에서 일부 불량 등급이 있었으나 40cm이상에서는 모두 하급 이상으로 확인되었다. 가비중이 높아질수록 토양 내 공극은 줄어들고 수분 또한 이 공극 내에 존재하게 되기 때문에 공극이 줄어들면 수분 함량에도 영향을 끼치게 된다(National Institute of Forest Science, 2014a). 본 연구에서도 토심이 깊어질수록 가비중은 증가하였

**Table 5.** Chemical properties of soil in the planting zone on the back slope of dam

Sites	pH (1:5, w/w)	E.C (dS/m)	Avail.P (mg/kg)	Exchangeable cation (cmol <sup>+</sup> /kg)			T-N (%)	O.M (%)	Nacl (%)	C.E.C (cmol <sup>+</sup> /kg)
				K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>				
BR <sup>1)</sup>	5.2	0.16	73.41	0.36	3.06	0.71	0.13	3.44	0.010	12.07
DG <sup>2)</sup>	5.7	0.11	1.70	0.15	4.93	6.20	0.08	0.84	0.006	11.09
GP <sup>3)</sup>	5.5	0.11	8.21	0.13	4.10	3.02	0.04	0.40	0.010	9.41
JH <sup>4)</sup>	7.0	0.34	26.08	0.18	13.13	1.08	0.12	2.20	0.004	13.08
PR <sup>5)</sup>	6.3	0.11	13.56	0.16	3.43	0.87	0.06	1.15	0.002	5.75

<sup>1)</sup>BR: Boryung dam, <sup>2)</sup>DG: Daegok dam, <sup>3)</sup>GP: Gampo dam, <sup>4)</sup>JH: Jangheung dam, <sup>5)</sup>PR: Pyungrim dam

으며 공극률은 감소하였고 이에 따라 수분함량도 감소하는 경향을 보였다.

토양의 견밀도는 0~20cm, 20~40cm, 40cm이하의 깊이별로 각각 평균 1.5~2.0kg/cm<sup>2</sup>, 2.3~3.7kg/cm<sup>2</sup>, 4.5 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 측정되었다. 토양의 견밀도는 토양에 압력을 가했을 때 토양의 저항하는 정도를 의미하는데(National Institute of Forest Science, 2014a) 0~20cm 깊이에서는 대곡댐(2.0kg/cm<sup>2</sup>)을 제외한 모든 대상지에서 1.5kg/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 20cm 이상 깊이에서는 2.3kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 견밀도가 높고 토심이 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 댐체 비탈면 녹화구간의 인공지반 성토시 사면 안정성을 위한 중장비 다짐에 따른 결과로 판단되나 수목의 생육에 큰 문제는 없을 것으로 판단되었다.

(2) 화학적 특성

대상지별 토양의 화학적 특성은 각 댐별 4개 소씩 10~20cm의 깊이로 총 20개의 토양시료를 채취하여 pH, 전기전도도, 유효인산 함량, 치환성양이온, 전질소함량 등을 분석하였다. 그리고 분석 결과에 대해 국토교통부 조경설계기준(2019)의 토양 화학적 특성 평가기준과 Jeong et al.(2002)이 제시한 우리나라 산림토양 특성을 참고하여 평가하였다(Table 5).

토양 산도는 평균 pH 5.2~7.0의 범위로 분석되었으며 조경설계기준과 비교할 때 보령댐과 감포댐은 하급으로 대곡댐, 장흥댐 및 평림댐은 중, 상급으로 평가되었다. 우리나라 산림토양의 평

균 토양산도(A층: pH 5.48, B층: pH 5.52)와 비교할 때 양호한 수준으로 확인되었다.

전기전도도는 0.11~0.34dS/m로 분석되어 조경설계기준과 비교할 때 대상지 전체에서 상급으로 평가되었다. 유효인산 함량은 평균 1.70~73.41mg/kg로 분석되어 조경설계기준과 비교할 때 대상지 전체가 하급으로 평가되었으나 우리나라 산림토양의 평균 유효인산(A층: 25.6mg/kg, B층: 11.9mg/kg)과 비교할 때 보령댐과 장흥댐은 양호하거나 다소 낮은 수준으로 판단되었다.

치환성 칼륨은 평균 0.13~0.36cmol/kg으로 분석되어 조경설계기준과 비교할 때 대상지 전체가 하급으로 평가되었고 보령댐(0.36cmol/kg)을 제외한 4개 대상지는 우리나라 산림토양 내 평균 치환성 칼륨(A층: 0.23cmol/kg, B층: 0.15cmol/kg)보다도 낮은 수치로 나타났다. 치환성 칼슘은 평균 3.06~13.13cmol/kg으로 분석되어 조경설계기준과 비교할 때 장흥댐(13.13cmol/kg)은 상급, 나머지 대상지들은 중급으로 평가되었으나 우리나라 산림토양의 평균 치환성 칼슘(A층: 2.44cmol/kg, B층: 1.64cmol/kg)보다는 높은 수준으로 확인되었다. 치환성 마그네슘은 평균 0.71~6.20cmol/kg로 분석되어 대곡댐(6.20cmol/kg)과 감포댐(3.02cmol/kg)은 조경설계기준상 상급에 해당하였으며 보령댐, 장흥댐, 평림댐은 중급으로 평가되었다. 보령댐(0.71cmol/kg)과 평림댐(0.87cmol/kg)은 우리나라 산림토양의 평균 치환성 마그네슘(A층: 1.01cmol/kg, B층: 1.03cmol/kg)보다도 다소 낮은 수준으로 확인되었다. 일반적으로 산림토양에서

치환성 양이온 양은  $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+}$  순으로 감소한다고 보고된 바 있는데(河田弘, 1989; National Institute of Forest Science, 2014b) 본 연구에서도 대곡댐만 예외하고 4개댐에서 유사한 경향이 나타났다.

전질소함량의 경우 평균 0.04~0.13%로 분석되었는데 보령댐(0.13%)은 조경설계기준상 상급에 해당되었고 대곡댐과 장흥댐은 중급, 감포댐과 평립댐은 하급으로 평가되었다. 대상지 모두 우리나라 산림토양의 평균 전질소함량(A층: 0.19%, B층: 0.09%) 보다는 다소 낮은 수준으로 확인되었다. 전질소 함량과 밀접한 상관관계를 보이는 유기물 함량을 분석한 결과 보령댐(3.44%)은 조경설계기준상 중급에 해당하였으며 대곡댐, 감포댐, 장흥댐, 평립댐은 하급으로 평가되었다. 이는 댐체 비탈면 녹화 이후 인위적인 시비가 없었으며 대상지 특성상 주변으로부터의 자연적인 유기물 유입이 제한적임에 따른 현상으로 판단되었다.

치환성양이온은 평균 2.75~13.08cmol/kg로 분석되었는데 보령댐, 대곡댐, 감포댐, 장흥댐의 경우 조경설계기준상 중급, 그리고 평립댐은 하급으로 평가되었다. 감포댐, 평립댐을 제외하고 우리나라 산림토양의 평균 치환성양이온(A층: 12.5cmol/kg, B층: 10.7cmol/kg)과 유사한 수준으로 나타났다.

현재 댐 비탈면 녹화지역 5개소에 대한 토양의 화학적 특성을 분석한 결과 일부 댐에서 하급으로 평가된 항목들이 있었으나 전반적으로 중급 이상으로 평가되었으며 우리나라 산림토양의 일반적인 화학적 특성과 유사한 수준으로 나타나 인공지반 상부 식재기반으로써 양호한 환경으로 판단되었다.

그러나 전 세계적으로 기후변화 및 대기오염 등에 따른 토양 산성화로 인한 산림 쇠퇴 현상이 지속적으로 보고되고 있다(Godbold et al, 1988; Izuta et al, 2001; Lee et al, 2004; Hogberg et al, 2006). 주로 황(S)과 질소(N)와 관련된 산성 물질

의 유입은 노출된 지역에서 토양 산성화를 유발하여  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^{+}$ 와 같은 양분들을 용탈시키고 양분 유효도를 떨어뜨려 전반적인 토양의 영양 상태를 악화시킬 수 있다(Ohno and Erich, 1990; Sikka and Kansal, 1995; Likens et al, 1996; Driscoll et al, 2003; Choi et al, 2010; Lee and Koo, 2020 재인용). 토양의 질적 저하는 식물 생육에 악영향을 미치며 생태계 전반과 밀접하게 연관되어 있다. 특히, 본 연구의 대상지는 주변 산림과 물리적으로 고립된 댐체 비탈면의 인공 조림 지역으로서 외부로부터의 물질 유입이 어렵고 대상지 내의 식생과 토양에 대한 의존도가 커서 장기적으로 토양 산성화와 양분 불균형이 심화될 수 있다. 식생 기반환경으로써 토양 개선을 위해 인위적인 양분투입이 고려될 수도 있으나 댐 운영의 주요 목적인 깨끗한 상수원 확보 측면에서 현실적으로 어려움이 있으므로 식생 모니터링과 더불어 토양환경에 대해서도 장기적이고 주기적인 모니터링이 필요할 것으로 판단되었다.

#### IV. 결 론

본 연구는 국내에 조성 후 15년 이상 경과된 댐체 비탈면 녹화지역 5개소를 대상으로 수목의 생장 현황 특성과 댐 체체에 미치는 영향을 조사하고 식생기반으로써 토양 환경에 대한 특성을 분석하였다.

첫 번째, 댐체 비탈면에 식재된 대형 심근성 수목 중 수령 11~35년의 15주에 대한 생장 현황과 뿌리에 대한 발달 특성을 조사한 결과 평균 수고 10.6m, 근원직경 27.3cm, 흉고직경 22.9cm로 수목들의 생장 수준이 대부분 양호한 것으로 분석되었다. 특히 소나무, 팽나무, 참나무 등 3종의 생장 수준은 일반 산림 및 인공지반 환경에서의 생장량 연구사례와 비교할 때 유사하거나 상회하는 수준으로 나타나 댐체 비탈면 녹화지역이 생태기반 환경으로서 우수함을 확인할 수 있었다. 수목의 뿌리를 굴취 조사한 결과 평균 수직

근은 130cm, 평균 수평근은 214cm로 대체적으로 댐 체체로부터 토심인 1~16m 이내로 발달하고 뿌리 형태는 주로 댐체 사면의 상하 방향보다 좌우 방향으로 발달하고 있었다. 특히 이식 수목의 경우 뿌리자르기 처리 후 식재되므로 자생 수목에 비해 뿌리 발달이 더디고 수평근 위주로 발달하는 경향을 보였으며 현재 수목들의 뿌리 생육 수준은 댐 체체의 안정성에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 양호한 수목의 성장 추세를 고려시 장기적으로 수목의 하중 증가와 뿌리 발달이 댐체 안정성 영향에 미칠 수도 있으므로 주기적인 모니터링이 필요할 것으로 판단되었다.

두 번째, 댐체 비탈면 녹화지역 토양의 이화학적 특성을 분석하여 국토교통부 조경설계기준(2019)의 토양 특성 등급과 Jeong et al.(2002)이 제시한 산림토양 특성 등을 통해 평가한 결과 일부 댐, 항목별로 하급도 있었으나 대부분 중, 상급으로 평가되어 댐체 비탈면이 식물 생육기반으로서 양호한 토양환경임을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 수목이 더욱 왕성하게 성장할 수 있을 것으로 판단되나 고립된 대상지의 특성, 토양 산성화 및 양분 불균형 등은 장기적으로 수목 생육 및 숲의 건강성에 지장 요인이 될 것으로 예상되었다.

본 연구를 통해 댐체 비탈면 녹화지역의 수목 생육환경으로서 적정성과 잠재력을 확인할 수 있었다. 단, 수목 성장현황 조사시 댐별 충분한 수의 표본목을 선정하고 굴취 및 측정이 이루어졌어야 하나 국가 안전시설인 댐 출입 제한, 장비작업 여건 등을 고려 일부 수종들에 국한하여 조사가 진행되었으며 수목들의 식재 당시 규격, 뿌리분 상태에 대한 정확한 자료가 부재하여 식재종에 대한 성장량을 객관적으로 분석하기에도 한계가 있었다. 본 연구와 더불어 댐체 비탈면 녹화지역의 생태적 기능과 효과 평가를 위해 조성 후 식재종과 이입종을 포함한 경쟁, 도태 등 식생 천이 과정과 동물상을 포함한 대상지 내의

부의 생태적 연결성 및 건전성에 대해서도 지속적인 모니터링과 연구가 수반되어야 할 것이다. 그리고 댐체 비탈면 녹화지역의 생태적 기능과 안정성을 조화롭게 보전하기 위해서는 적정한 가지치기, 숲아베기, 보식 및 수질 영향을 최소화하는 범위 내 토양 양분공급과 산성화 방지 등 적극적인 관리대책 수립도 필요할 것이다.

이를 통해 거대한 인공구조물이자 대표적 인그레이 인프라인 댐을 생태기반의 그린 인프라로 탈바꿈하여 건강한 국토 생태축 형성에 기여할 수 있게 될 것이다. 또한 과학적인 모니터링과 효과 검증을 바탕으로 신규 댐 또는 기존 댐들의 비탈면에도 추가적으로 녹화를 도입하기 위한 타당성도 확보할 수 있을 것이다.

## References

- Cho, Y., Driscoll, C.T., Johnson, C.E. and Siccama, T.G. 2010. Chemical changes in soil and soil solution after calcium silicate addition to a northern hardwood forest. *Biogeochemistry* 100(1-3) : 3-20.
- Choi JY and Kim HN. 2003. Case study for environmentally friendly dam management. Interim Research Report. 2003.6 : 1-162. (in Korean)
- Choi KM, Kim MI, Lee WK, Gang HU, Chung DJ, Ko EJ, Yun BH and Kim CH. 2014. Estimating Radial Growth Response of Major Tree Species using Climatic and Topographic Condition in South Korea. *J. of Climate Change Research*. 5(2) : 127-137. (in Korean with English summary)
- Driscoll, C.T., Driscoll, K.M., Mitchell, M.J. and Raynal, D.J. 2003. Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State. *Environmental Pollution* 123(3) : 327-336.
- Froehlich, D. 2017. Guidelines for Safety Inspection

- of Dams. Central Water Commission Ministry of Water Resources, River Development & Ganga Rejuvenation Government of India.
- Godbold, D.L., Fritz, E. and Hüttermann, A. 1988. Aluminum toxicity and forest decline. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 85(11) : 3888-3892.
- Haselsteiner, R. and Strobl, T. 2004. Zum Einfluss von Bewuchs und Hohlräumen auf die Durchsickerung von Deichbauten; Lebensraum Fluss-Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie; Beiträge zum Symposium vom 16.-19. Juni 2004 in Wallgau (Oberbayern). *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Berichtsheft*, (101) : 92-100.
- Haselsteiner, R. and Strobl, T. 2006. Deichertüchtigung unter besonderer Berücksichtigung des Gehölzbewuchses. Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen. *Handbuch für Theorie und Praxis*. Hrsg. Hermann und Jensen, Universitätsverlag Siegen - universi, Siegen.
- Haselsteiner, R. 2010. Woody Vegetation on Small Embankment Dams. na.
- Hoegberg P., Fan H., Quist M., Binkley, D. and Tamm C.O. 2006. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest. *Global Change Biology*, 12(3) : 489-499.
- Izuta, T., Yamaoka, T., Nakaji, T., Yonekura, T., Yokoyama, M., Matsumura, H., Ishida, S., Yazaki, K., Funada, R. and Koike, T. 2001. Growth, net photosynthetic rate, nutrient status and secondary xylem anatomical characteristics of *Fagus crenata* seedlings grown in brown forest soil acidified with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. In *Acid rain 2000*: 1007-1012. Springer, Dordrecht.
- Jang BK and Yoon JC. 2021. Studies on the Growth Characteristics of the Trees in Parking Lot in the Apartment Complex. *J. of Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 24(1) : 111-119. (in Korean with English summary)
- Jeon BI. 2004. Analysis of meteorological changes before and after dam construction in the Nakdong River System. *Nakdong River Research*, (86) : 3-14. (in Korean)
- Jeon BS. 2005. Current status and policy direction of water resources in Korea. *River and Culture*, 1, 72-76. (in Korean)
- Jeong JH, Koo KS, Lee CH and Kim CS. 2002. Physico-chemical Properties of Korean Forest Soils by Regions. *J. of Korean Forest Science*. 91(6) : 694-700. (in Korean with English summary)
- Kang KH and Lee WS. 2015. Introduction for eco-friendly project of Yeongju multi-purpose Dam, *Water for Future*, 48(9) : 72-77. (in Korean)
- Kim NC, Choi JS. and Moon SK. 1988. A Study on the treesize prediction Model. *The Korean Institute of Landscape Architecture*. 16(1) : 27-35. (in Korean)
- Kim SH, Choi WK, Park HJ, Ryu JH, Ji YH and Oh GG. 2005. Tamjin Dam Recycling Eco Rehabilitation Work Monitoring (II). *J. of the Korean Society of Environmental Ecology*: 115-117. (in Korean)
- K-water. 2016. Daegok Dam Precision Safety Diagnosis Report. (in Korean)
- K-water. 2017a. Gampo Dam Precision Safety Diagnosis Report. (in Korean)
- K-water. 2017b. Jangheung Multipurpose Dam Precision Safety Diagnosis Report. (in Korean)
- K-water. 2019a. Boryeong Multipurpose Dam 3rd Precision Safety Diagnosis Report. (in Korean)

- K-water. 2019. Audit Report (in Korean)
- Laasonen, J. 2013. Risk of the trees and the stumps to the embankment dam safety. Experimental study. In IECS2013, 9th ICOLD European Club Symposium, Venice, Italy.
- Lee AL and Koo NI. 2020. Comparison of Soil Physicochemical Properties According to the Sensitivity of Forest Soil to Acidification in the Republic of Korea. *J. of Korean Forest Science*. 109.2 : 157-168. (in Korean with English summary)
- Lee JH and Jang HW. 2016. Redevelopment of existing dams to secure new water resources. *Water for future*. 49(1) : 39-48. (in Korean)
- Lee KJ. 2011. *Tree Physiology(3rd)*, Seoul National University Press. (in Korean)
- Lee WG and Yang DS. 2013. Cases of landscape improvement by applying design elements of large-scale civil structures-Focusing on the case of Chungju Dam design murals. In *Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference* : 39-43. (in Korean)
- Lee WY, Yang JE, Park CJ, Zhang YS and Ok YS. 2004. Relationship Between Chemical Properties of Forest soil Solutions and Element concentrations in Needles of *Pinus thunbergii* in Industrial Complexes. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 37(5) : 322-328. (in Korean)
- Likens, G.E., Driscoll, C.T. and Buso, D.C. 1996. Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science* 272(5259) : 244-246.
- Marks, D.B. and Tschantz, B.A. 2002. *A Technical Manual on the Effects of Tree and Woody Vegetation Root Penetrations on the Safety of Earthen Dams*. Compiled by: Marks Enterprises of NC, Arden, North Carolina, 28704.
- Martin D. 1995. *Tree Root System*, Arboricultural Advisory and Information Service 130/95AB. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 1991. Detailed Design Report for Boryeong Multipurpose Dam Construction Project. (in Korean) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 1996. Detailed Design Report of Water Intake Center for the Ulsan Regional Waterworks Project. (in Korean) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 1999. Basic and structural statement of water source facilities in the eastern part of Gyeongbuk. (in Korean) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2001. Detailed design report for water source facility (Pyeonggrim Dam) for the metropolitan waterworks project in the western Jeonnam region. (in Korean) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2006. Detailed Design Report for Tamjin Purpose Dam Construction Project. (in Korean) Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2019. *Criteria for Landscape Design*. (in Korean)
- MSD, B. 2005. *Standicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen(MSD)*. Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau(BAW), Karlsruhe.
- National Institute of Forest Science. 2014a. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and plant Analysis I-soil physical properties*. National Institute of Forest Science, Seoul, Korea; 6-179. (in Korean)
- National Institute of Forest Science. 2014b. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and plant Analysis II-soil chemical properties*. National Institute of Forest Science. Seoul, Korea: 6-256. (in Korean)
- Ohno, T. and Erich, M.S. 1990. Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient

- levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 32(3-4) : 23-239.
- Sikka, R. and Kansal, B.D. 1995. Effect of fly-ash application on yield and nutrient composition of rice, wheat and on pH and available nutrient status of soils. *Bioresource Technology* 51(2-3) : 199-203.
- USACE(US Army Corps of Engineers). 2007. Treatment of Vegetation within Local Flood-Damage Reduction Systems. White Paper (Final Draft), US Army Corps of Engineers, Washington DC.
- Woo HS and Han SW. 2020. Typological System of Nature-based Solutions and Its Similar Concepts on Water Management. *Ecology and Resilient Infrastructure*. 7(1) : 15-25. (in Korean)
- WCD(World Commission on Dams). 2000. Dams and development: a new framework for decision-making. The Report of World Commission on Dam (WCD), Earthscan
- Yeo WK, Lim KS, Lee SY, Ji HK, Lee ST. 2004. Vegetation Development Mechanism and Flood Drainage Capability Reduction Characteristic at Downstream of Dams. *J. of the Korea Water Resources Association* : 922-926. (in Korean)
- 河田弘. 1989. 森林土壤學概論, 博友社, 399