

산불이 사방댐의 콘크리트 압축강도에 미치는 영향: 2022년 울진·삼척 산불피해지역에서의 비파괴시험 사례

조원신¹ · 이상인¹ · 김범수¹ · 봉태호² · 김동엽³ · 박찬기⁴ · 서정일^{1*}

¹국립공주대학교 산림과학과, ²충북대학교 산림학과, ³대구대학교 산림자원학과, ⁴국립공주대학교 지역건설공학과

Effects of Forest Fires on Concrete Compressive Strength of Erosion Control Dams: A Case of Non-destructive Testing Conducted in the 2022 Uljin-Samcheok Forest Fire Area

Won-Shin Cho¹, Sang In Lee¹, Beom-Su Kim¹, Taeho Bong²,
Dongyeob Kim³, Chan-Gi Park⁴ and Jung Il Seo^{1*}

¹Department of Forest Science, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

²Department of Forest Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

³Department of Forest Resources, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

⁴Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

요약: 산불이 인간의 삶에 미치는 영향을 주제로 한 많은 연구들이 수행되었지만, 사방시설이 산불로부터 받는 영향에 관한 현장기반 연구는 아직 수행된 바 없다. 이 연구에서는 2022년 울진·삼척 산불피해지역을 대상으로 피해 전후의 정규 탄화지수 변화량을 추정하여 산불 피해지역을 추출하고, 피해지역과 미피해지역에 위치한 콘크리트 사방댐을 대상으로 반발경도시험과 초음파펄스속도시험으로 콘크리트 압축강도를 측정·비교하였다. 그 결과, 반발경도시험에서는 사방댐의 콘크리트 압축강도가 산불 피해여부에 따라 다르지 않았지만, 초음파펄스속도시험에서는 열손상에 의한 콘크리트 압축강도의 유의한 차이를 확인할 수 있었다. 또한, 사방댐 시공 후 경과연수가 증가할수록 계류환경 고유의 특수성으로 인해 사방댐의 압축강도가 낮아지는 경향을 보였으며, 이로 인한 사방댐의 내구수명은 산불의 영향으로 3~4년 단축되는 것으로 나타났다. 사방댐 계류환경의 특수성을 배제하기 위해 산출한 잔류압축강도는 시공 후 경과연수가 상대적으로 긴 사방댐에서 산불로 인한 압축강도 손실이 더 크다는 것을 보여주었다. 이상의 결과들은 산불 피해지역 내 사방댐을 대상으로 한 안전진단 체계 마련의 필요성을 보여준다.

Abstract: Numerous studies have been conducted on the impact of forest fires on human life, but no fieldwork-based studies have examined their influence on erosion control structures. In this study, the forest fire severity was extracted by estimating the change in Normalized Burn Ratio before and after forest fire in the 2022 Uljin-Samcheok forest fire area, and then the concrete compressive strength for the concrete erosion control dams located in the forest fire-damaged and undamaged areas was measured through the rebound hardness test and ultrasonic pulse velocity test. The former test revealed no differences in the compressive strength of the dams between damaged and undamaged areas, while the latter did detect significant differences in this parameter due to thermal damage to the concrete structures. In addition, the compressive strength tended to decrease with the number of years since installation due to the specificity of the on-site stream conditions for dam installation, and the dams' durability was shortened by 3-4 years due to the impact of forest fires. The residual compressive strength ratio of the dams was calculated to exclude such specificity, and the results showed that the loss of compressive strength due to forest fire was greater in the dam with a relatively long elapsed year since installation. Our findings suggest the need to establish a system to assess the safety of erosion control dams damaged by forest fires.

Key words: normalized burn ratio, rebound hardness test, ultrasonic transmission velocity test, residual compressive strength ratio, safety diagnosis system

* Corresponding author
E-mail: jungil.seo@kongju.ac.kr

ORCID
Jung Il Seo  <https://orcid.org/0000-0002-5494-2306>

서론

기후변화로 인한 기상 양극화 현상 증가는 산사태와 산불의 증가로 이어지고 있다(WMO, 2023). 지구온난화에 의한 물 순환의 가속화는 대기 중의 수증기량을 증가시켜 강수량 변동의 극단화를 유발하며(Trenberth, 2011; Zhang et al., 2024), 이로 인한 강수의 집중은 산사태의 발생규모 및 빈도가 점차 증가시키는 요인으로 작용하고 있다(UNEP, 2018). 강수량 변동의 극단화는 또한 특정 시기의 가뭄을 유발하고 토양수분의 감소를 촉진하며(IPCC, 2012), 이로 인한 극심한 건조화는 산불의 규모 확대 및 빈도 증가로 이어지고 있다(FAO, 2024).

국내의 경우, 1960~1970년대의 경제발전 이면에는 화전민의 증가 및 산림황폐화로 인해 산사태와 산불 발생 위험이 증가하였다(Lee et al., 2012). 이에 대한 대책으로서 시행된 치산녹화사업의 결과로 1980~1990년대에는 산사태 발생이 큰 폭으로 감소한 반면(Chun, 2011), 산림 내 연료량 및 산림 이용객이 증가함에 따라 산불 발생 역시 증가하는 추세를 보였다(Lee et al., 2005). 기후변화의 영향이 가시화된 2000년대 이후부터 산사태의 연평균 피해면적이 481 ha/yr에 달해 2000년대 이전의 연평균 피해면적인 289 ha/yr에 비해 192 ha/yr 정도 늘었으며 같은 기간 연평균 복구비용은 10배 이상 증가하였다(KFS, 2024). 또한, 산불의 경우 2000년대 이후의 연평균 피해면적은 3,253 ha/yr에 달해 2000년대 이전의 연평균 피해면적인 1,220 ha/yr에 비해 약 2.7배 증가하였으며, 연평균 피해금액은 60배 이상 증가하였다(KOSIS, 2024).

우리나라는 이러한 산림재해에 대하여 다양하고 선제적인 정책을 펼쳐 왔다. 산사태 피해에 대응하기 위해 1986년 이래 꾸준히 사방댐 설치사업을 실시하여 2024년 현재 전국에 13,851기의 사방댐을 설치하였으며, 전국에 33,000개소 이상의 산사태취약지역을 지정하여 적극적인 예방활동을 추진하고 있다(KFS, 2024). 또한, 산불 피해를 예방하기 위해 2020년부터 2023년까지 562 km의 산불진화임도를 설치하였으며, 산불에 특별히 취약한 산림구역을 대상으로 산불예방 숲가꾸기를 실시하고 있다(KFS, 2023b, 2024).

이러한 국가적 차원의 노력은 산사태와 산불에 대한 다양한 연구로 이어져 왔다. 산사태 분야에서는 산지가 주거공간과 연결된 경우가 많은 우리나라 지형여건으로 인해 산사태 발생 예측 및 위험성 평가에 관한 연구(e.g., Kim and Kim, 2013; Kim et al., 2020)가 주로 이루어 왔으며, 산불 분야에서는 강우기와 건조기의 계절적 편차가 큰 우리나라의 기후여건으로 인해 산불의 발생 원인과 확산 및

대응에 관한 연구(e.g., Jeon and Chae, 2017; Jeong and Kim, 2022)가 주를 이루어 왔다. 그러나 최근에는 산불이 사방댐과 임도와 같은 산림 내 기반시설에 미치는 영향에 주목한 융합형(hybrid) 연구도 진행되고 있다. Choe et al.(2023)은 반발경도시험을 통해 산불이 임도에 설치된 다양한 콘크리트 구조물의 강도에 미치는 영향을 파악하였으며, Bae et al.(2024)은 산불이 강재 투과형 사방댐의 구조적 안정에 미치는 영향을 수치해석 프로그램을 활용하여 분석하였다. 그러나 산지토사재해를 예방하기 위한 대표적 시설물인 사방댐의 구조적 안정에 대하여 산불이 미치는 영향을 주제로 한 현장기반 연구는 전 세계에 걸쳐 지금까지 수행된 바 없다.

한편, 우리나라에 가장 많이 설치된 사방댐은 중력식 콘크리트 사방댐으로, 2023년까지 전국에 걸쳐 3,936기가 시공되어 있다(KFS, 2023a). 우리나라의 중력식 콘크리트 사방댐은 저강도의 무근 콘크리트로 타설하는 것이 특징이며, 시공목적과 설치환경에 있어서도 일반적인 고강도의 유근 콘크리트 구조물과 구별되는 특수성을 가진다(Chun, 2011). 그러나 고강도의 유근 콘크리트 구조물의 고온특성을 연구한 사례는 비교적 많은 반면(e.g., Atarashi et al., 2017; Noguchi et al., 2012), 콘크리트 사방댐을 대상으로 산불과 같은 고온 환경에서의 내구성을 연구한 사례는 전무한 실정이다.

이 연구에서는 산불이 콘크리트 사방댐의 압축강도 변화에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고자 하였다. 이를 위하여 산불 피해지역의 사방댐 8기와 미피해지역의 콘크리트 사방댐 15기를 선정하고, 이에 대한 비파괴시험(반발경도시험과 초음파펄스속도시험)을 수행하였으며, 통계 분석을 통하여 산불로 인한 피해 여부와 사방댐 시공 후 경과연수에 따른 콘크리트 압축강도의 저하를 검토하였다. 이를 통해 산불로 인한 피해를 입은 사방댐의 유지관리 체계를 마련하는 데에 이바지하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

1) 연구대상지의 모집단 선정

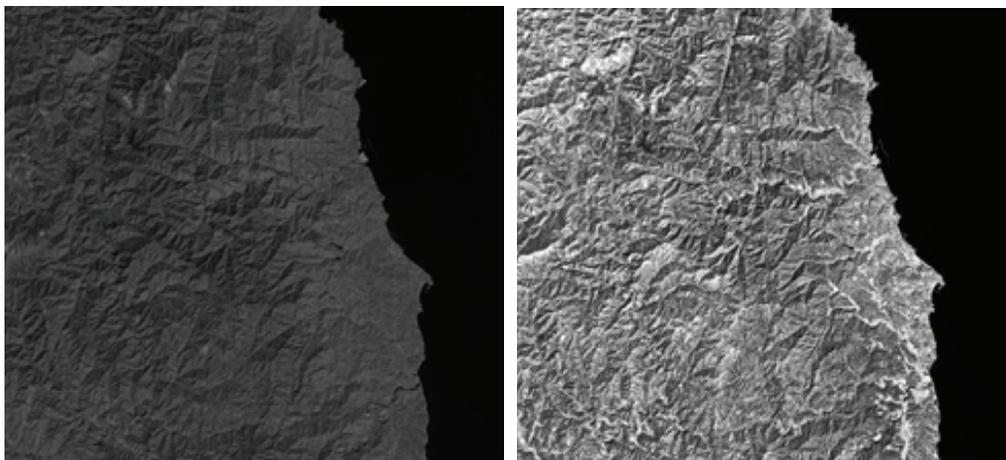
이 연구의 연구 목적을 달성하기 위해서는 먼저 사방댐의 콘크리트 압축강도에 영향을 미칠 수 있는 잠재적 인자들 중에서 산불 이외의 인자들, 즉 시계열적 기후조건, 사방댐의 유형 등의 영향을 최대한 배제할 필요가 있다. 이를 위해 연구대상지는 가급적 인접한 지역에 위치하고, 동일한 시기에 발생한 산불 피해지역 내에 해당하며, 동일한

구조로 시공된 사방댐이어야 한다는 것을 전제조건으로 설정하였다. 이러한 조건에 따라 연구대상지의 선정을 위한 모집단은 지난 2022년 3월 4일부터 13일까지 총 10일간에 걸쳐 단일 산불로는 우리나라 역사상 가장 큰 규모의 산림을 태운 ‘2022년 울진·삼척 산불’ 피해지역 내에 설치되어 있는 사방댐으로 한정하였다.

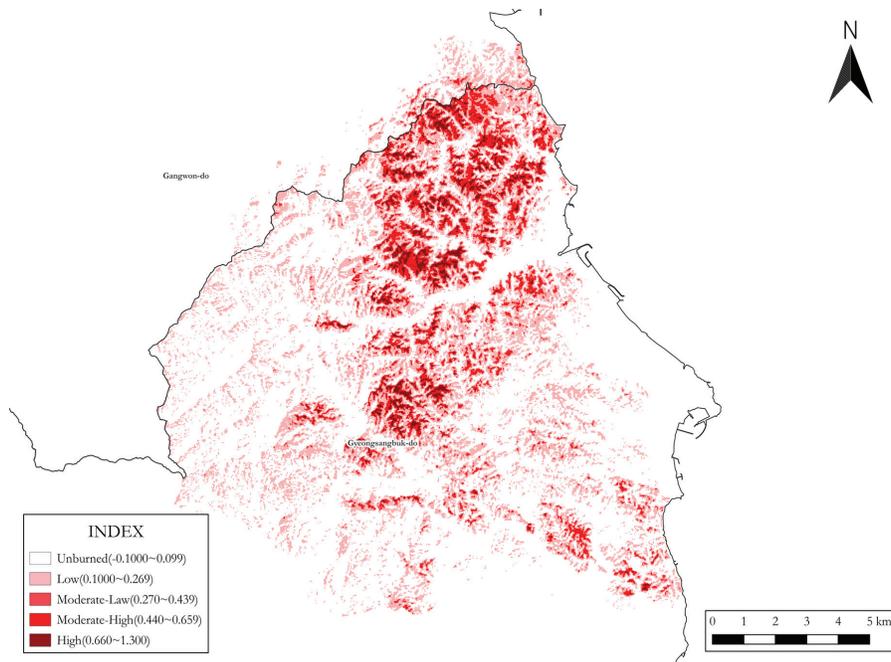
2022년 울진·삼척 산불 피해지역 내에 위치하고 있는 사방댐은 산사태정보시스템 기준 총 42기로, 이중에서 불투과형 콘크리트 사방댐은 20기로 나타났다(KFS, 2023a). 이는 최근 10년간(2015~2024) 발생한 단일 산불 피해지역 내의 사방댐 기수 중에서 가장 많은 수이다.

2) 산불 피해지역 내 위치한 사방댐의 추출

총 20기의 모집단 사방댐 중에서 산불의 영향을 받았을 것으로 추정되는 불투과형 콘크리트 사방댐을 추출하기 위해 산불 발생 1일 전인 2022년 3월 3일과 산불 종료 3주 후인 2022년 4월 4일에 Landsat 8 위성으로 촬영된 근적외선 영상(Near-infrared, NIR)과 단파적외선 영상(Shortwave-infrared, SWIR)을 취득하였으며, 위성 영상 중첩분석을 통해 아래의 식과 같이 각 사방댐 위치별 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio, NBR) 변화량(delta Normalized Burn Ratio, dNBR)을 파악하였다 (Figure 1).



(a) NIR and SWIR images taken by the Landsat 8 satellite



(b) Determining changes in NBR using satellite imagery analysis

Figure 1. Forest burn severity map of the study area.

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

여기서, NBR_{pre} 는 산불 발생 전의 정규탄화지수이고, NBR_{post} 는 산불 발생 이후의 정규탄화지수이다.

이렇게 파악된 각 사방댐 위치별 정규탄화지수 변화량을 미국지질조사국(USGS)이 제안한 5단계의 산불피해 심도, 즉 고심도(high severity, 0.660~1.300), 중고심도(moderate-high severity, 0.440~0.659), 중저심도(moderate-low severity, 0.270~0.439), 저심도(low severity, 0.100~0.269), 미피해(unburned, -0.100~0.099)의 분류체계에 적용하였으며 (USGS, 2023), 이중에서 미피해를 제외한 네 개의 카테고리에 해당하는 산불 피해지역의 불투과형 콘크리트 사방댐을 현장답사 및 외관점검의 대상으로 선정하였다.

3) 현장답사 및 외관점검을 통한 연구대상지 확정

앞서 선정된 사방댐을 대상으로 현장답사를 통해 실제로 산불 피해지역 내에 위치하고 있는지, 산림청의 산사태 정보시스템 상에 분류되어 있는 유형과 일치하는지를 육안으로 직접 확인하였다. 이 과정에서 주변 산림식생이 소

실되지 않거나 사방댐의 유형이 불투과형 콘크리트 사방댐이 아닌 12기의 사방댐이 연구대상지 선정에서 제외되었다.

이와 동시에 산불 이외의 요인으로 인해 훼손되어 사방댐의 콘크리트 강도 저하가 이미 발생했을 가능성을 감안하여 「사방사업법」에서 정한 ‘사방시설의 유지관리 지침’에 준한 외관점검을 실시하였다. 그러나 이 과정에서는 그 외를 제외하고 타 파손상황을 확인할 수 없었다.

이렇게 최종 선정된 8기의 산불 피해지역 내 콘크리트 사방댐을 시공연도별로 분류하고, 각 시공연도별로 산불 미피해지역에 시공되어 있는 가장 근접한 사방댐을 3개소씩 총 15기의 불투과형 콘크리트 사방댐을 추출하여 산불 피해지역 사방댐에 대한 참조 사방댐으로 선정하였다. 이는 산불 피해지역 내 8기의 콘크리트 사방댐에 대한 초기 압축강도 정보의 부재를 극복하기 위한 수단이며, 레디믹스트 콘크리트(ready-mixed concrete)를 구성하는 재료의 물리·역학적 특성 및 배합비가 지역별로 상이하다는 선행연구(Seo et al., 2011)의 결과에 근거한다.

최종 선정된 연구대상지의 위치 및 기본 정보는 각각 Figure 2 및 Table 1과 같다.

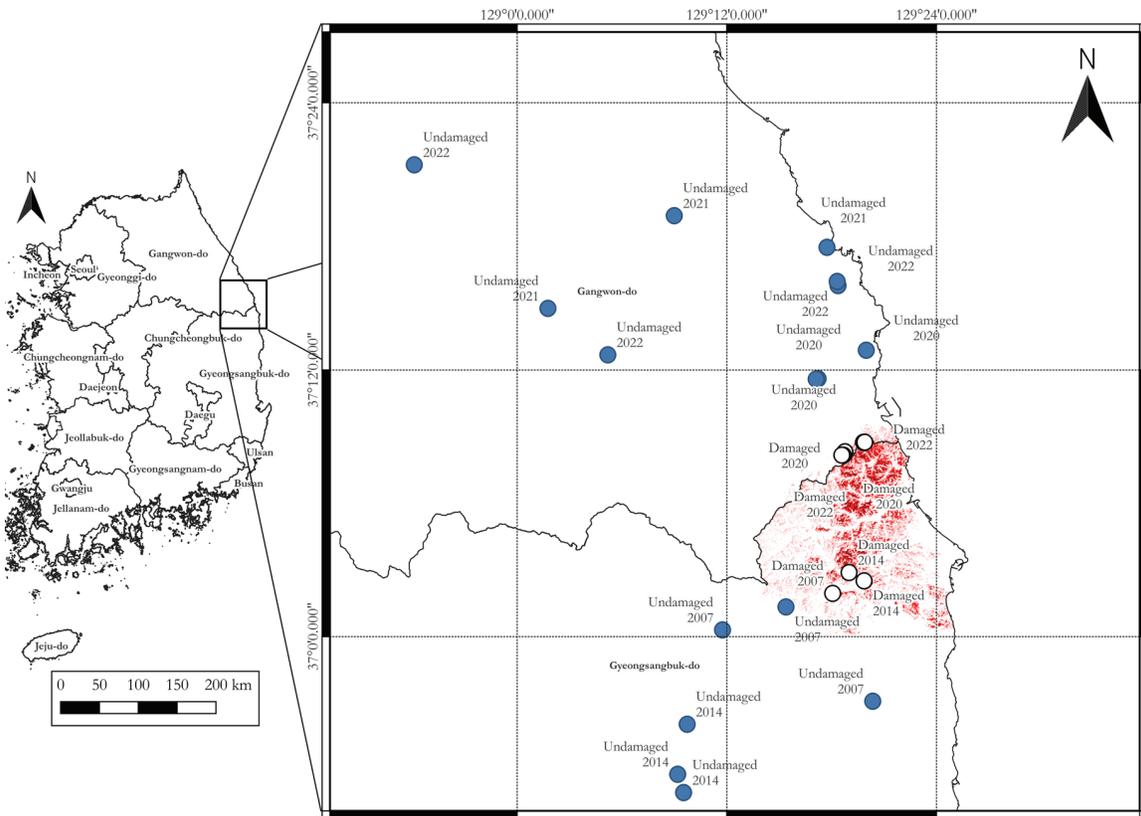


Figure 2. Location of the erosion control dams. White and blue circles represent the dams located in forest fire-damaged and undamaged areas, respectively.

Table 1. General information of the erosion control dams.

| No. | Location | Installed year | delta Normalized Burn Ratio (dNBR) | Burn severity |
|--|---|----------------|------------------------------------|------------------------|
| <i>Erosion control dams located in the areas damaged by forest fires</i> | | | | |
| 1 | San 73, Ducheon-ri, Buk-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2007 | 0.311 | Moderate-low severity |
| 2 | San 17, Hadang-ri, Buk-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2014 | 0.448 | Moderate-high severity |
| 3 | San 39, Hadang-ri, Buk-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2014 | 0.281 | Moderate-low severity |
| 4 | San 277-3, Sanyang-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2020 | 0.320 | Moderate-low severity |
| 5 | San 286, Sanyang-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2020 | 0.258 | Low severity |
| 6 | San 25, Nokoung-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2021 | 0.237 | Low severity |
| 7 | San 288-1, Sanyang-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2022 | 0.322 | Moderate-low severity |
| 8 | San 19, Nokoung-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2022 | 0.246 | Low severity |
| <i>Erosion control dams located in the areas undamaged by forest fires</i> | | | | |
| 9 | San 235, Sugok-ri, Geunnam-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2007 | — | Unburned |
| 10 | San 1, Sogwang-ri, Geumgangsong-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2007 | — | Unburned |
| 11 | San 276, Sogwang-ri, Geumgangsong-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2007 | — | Unburned |
| 12 | San 1-1, Gwanghoe-ri, Geumgangsong-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2014 | — | Unburned |
| 13 | San 8-1, Gwanghoe-ri, Geumgangsong-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2014 | — | Unburned |
| 14 | San 8-1, Gwanghoe-ri, Geumgangsong-myeon, Uljin-gun, Gyeongsangbuk-do | 2014 | — | Unburned |
| 15 | San 427, Icheon-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2020 | — | Unburned |
| 16 | San 42-1, Icheon-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2020 | — | Unburned |
| 17 | San 103, Nogok-ri, Wondeok-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2020 | — | Unburned |
| 18 | San 140, Yonghwa-ri, Geundeok-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | 2021 | — | Unburned |
| 19 | San 15, Hagucheon-ri, Nogok-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | 2021 | — | Unburned |
| 20 | San 166-3, Jeom-ri, Dogye-eup, Samcheok-si, Gangwon-do | 2021 | — | Unburned |
| 21 | San 83, Janghori, Geundeok-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | 2022 | — | Unburned |
| 22 | San 113, Janghori, Geundeok-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | 2022 | — | Unburned |
| 23 | San 52-1, Chudong-ri, Hajang-myeon, Samcheok-si, Gangwon-do | 2022 | — | Unburned |

Note: The dNBR in the areas undamaged by forest fires was not estimated. Therefore, 'unburned', the burn severity in the areas undamaged by forest fires is not one of the classification systems based on dNBR, but indicates that forest fires have not actually occurred.

2. 사방댐 콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파괴시험

1) 반발경도시험

반발경도시험은 일정한 에너지로 작용하는 테스트해머 (Figure 3)를 부재 표면에 충격시켜 스프링의 반발력을 판독하여 부재의 경도를 측정한다(Malhotra, 1976). 이러한

반발경도시험은 부재 표면의 온도 및 상태, 탄산화의 진행 정도, 테스트해머의 타격방향, 콘크리트 거동의 영향에 민감하게 변동한다는 단점이 있지만, 시험 대상물에 대한 어떠한 파괴 없이 현장에서 간편하게 콘크리트의 강도를 측정할 수 있다는 장점이 있다(Kovler et al., 2018).

먼저 이 연구에서는 압축강도를 측정하기 위한 위치로



Figure 3. Concrete test hammer (SANYO NSR-2) for the rebound hardness test.

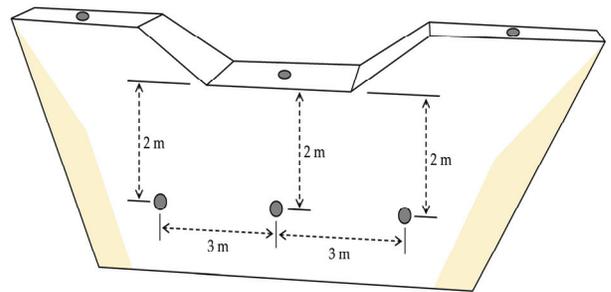
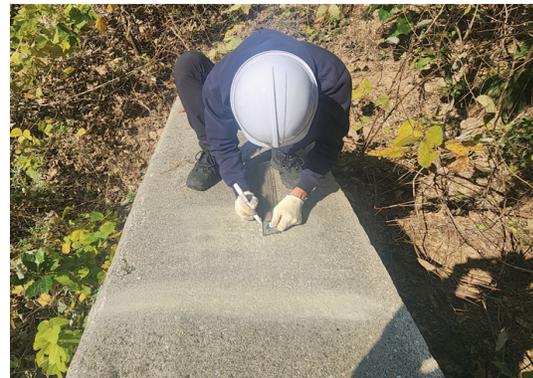


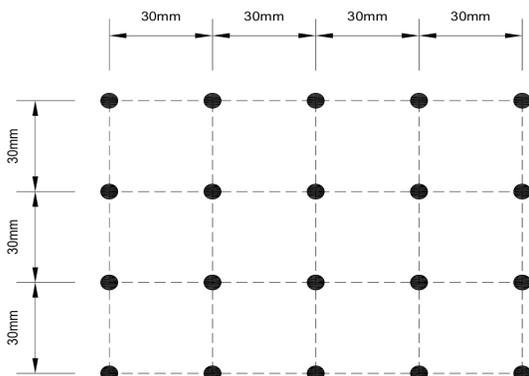
Figure 4. Strike zones of the rebound hardness test in each erosion control dam.



(a) Polishing of a strike zone.



(b) Marking of strike points in a zone.



(c) Example of strike point marking.



(d) Striking at the marked points.

Figure 5. Procedure of the rebound hardness test.

서 각 사방댐 본체 상부의 3개 지점(우측댐어깨, 방수로천단, 좌측댐어깨)과 대수면 하부 3개 지점(댐본체우측하부, 댐본체중양하부, 댐본체좌측하부), 총 6개 지점을 Figure 4와 같이 설정하여 사방댐 제체 전체가 고루 받는 산불의 영향을 고려하고자 하였다.

이후 국가표준(KS F 2730 : 콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도시험방법)에 의하여 국토안전관리원이 제시한 절차에 따라 반발경도시험을 진행하였다(KALIS, 2023). 먼저, 시험 대상 지점의 표면을 연마하여 매끄럽게 하고 [Figure 5(a)], 120×90 mm 크기의 구획 내에 30 mm 간격으로 타격점을 표기하였다[Figure 5(b) and 5(c)]. 이후 각 타격점을 1회씩 총 20회 타격하여 반발경도를 측정하였는데, 이때 사방댐 본체 상부의 3개 지점(우측댐어깨, 방수로천단, 좌측댐어깨)에서는 수평면에 대해 연직방향으로, 산림청이 고시한 ‘사방사업의 설계·시공 세부기준’에 따라 1:0.1~0.2의 기울기(약 79~84°)로 조성된 대수면의 하부 3개 지점(댐본체우측하부, 댐본체중양하부, 댐본체좌측하부)에서는 수평면을 기준으로 약 6~11°로 타격하였다[Figure 5(d)].

측정된 반발경도 값들을 이용하여 시험 지점별 평균반발경도(R)를 산정하였으며, 타격방향에 따른 보정경도를 가감하여 보정된 평균반발경도(R_o , kgf/cm²)를 산출하였다. 이때, 경도의 보정은 사방댐 본체 상부의 3개 지점에서 수평면에 대해 연직방향으로 타격하여 측정된 R 에 한하여 Table 2에 제시된 기준에 따라 수행하였으며, R 이 연속된 두 기준값 사이에 해당할 경우에는 해당 보정경도 간 간격을 두 기준값 간 정수로 나누어 가산하였다(Sanyo, 2002). 이에 반해 대수면 하부 3개 지점에서 거의 수평방향으로 타격하여 측정된 R 에 대해서는 별도의 보정을 수행하지 않았다.

콘크리트는 재령의 증가에 따라 탄산화의 효과로 인해 표면의 경도가 점차 증가하게 된다(Kim et al., 1999). 따라서 이 연구에서는 부재의 표면을 테스트해머로 타격하는 반발경도시험에 한하여 재령에 따른 차이를 최소화하기 위해 앞서 산출한 보정 평균반발경도에 Table 3의 재령기준일별 보정계수(α)를 곱하여 최종 보정된 평균반발경도(R_{O28} , kgf/cm²)를 산출하였다. 다만, 재령일은 타설 이후 소요일수를 기준으로 해야 하지만, 이 연구에서는 사방댐별 타설일의 확인이 불가능하여 준공일자를 기준으로 재령일을 추정하였다. 또한, 해당 사방댐의 재령일이 연속된 두 재령기준일 사이에 해당할 경우에는 해당 보정계수 간격을 두 재령기준일 간 일수로 나누어 일별 보정계수를 가산하였다.

$$R_{O28} = R_o \times \alpha$$

한편, 반발경도시험에서는 전술한 타격방향 및 재령에 따른 보정 이외에 콘크리트 표면의 습윤상태에 따른 보정도 경우에 따라 필요하지만(Kim and Kim, 2022; KALIS, 2023), 이 연구에서는 연중 강우시기가 종료된 11월 초순부터 12월 초순까지의 기간 중 대상 사방댐의 표면이 습하지 않을 때 시험을 실시하여 습윤상태에 따른 보정은 수행하지 않았다.

이렇게 구한 최종 평균반발경도(R_{O28})를 일본건축학회 가 제안한 다음의 추정식에 적용하여 최종 추정압축강도(F_c , MPa)를 산출하였다.

$$F_c = (7.3R_o + 100) \times 0.098$$

Table 2. Correction value according to the mean hardness value (R) and strike angle in the rebound hardness test (Sanyo, 2002).

| Standardized rebound hardness in each strike zone (R , kgf/cm ²) | Correction value at the strike angle with -90° (kgf/cm ²) |
|---|---|
| 10 | 3.20 |
| 20 | 3.40 |
| 30 | 3.10 |
| 40 | 2.70 |
| 50 | 2.20 |
| 60 | 1.70 |

Table 3. Correction factor (α) according to concrete age.

| Age (day) | 28 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 750 | 1000 | 2000 | 3000 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| α | 1.00 | 0.78 | 0.72 | 0.70 | 0.68 | 0.67 | 0.66 | 0.65 | 0.64 | 0.63 |

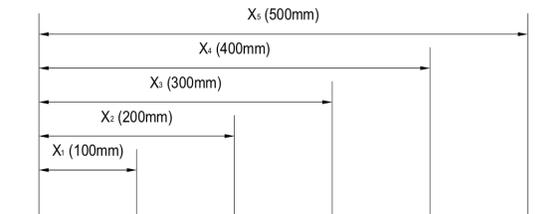
2) 초음파펄스속도시험

초음파펄스속도시험은 초음파펄스속도 측정기(Figure 6)를 활용해 구조체의 품질과 내부 상태를 평가하기 위해 사용하는 시험방법으로, 고주파의 초음파펄스를 구조체의 내부에 통과시켜 그 속도를 측정하는 방식을 사용한다(Whitehurst, 1951). 초음파의 전파속도는 밀도, 탄성계수, 강도 및 내부 결함의 존재 여부에 따라 다르게 나타나므로 이를 통해 구조체의 내부 상태를 빠르고 정확하게 평가할 수 있다(Hong et al., 2018).

이 시험 역시 국가표준(KS F 2731: 콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파펄스속도시험방법)에 의하여 국토안전관리원이 제시한 시험절차에 따라 진행하였다(KALIS, 2023). 다만, 국토안전관리원은 초음파펄스속도시험의 트랜스듀서 배치방법으로서 직접법, 간접법, 표면법을 제시하였으며, 이 중에서 부재의 전후면을 관통하여 측정하는 직접법의 신뢰성이 가장 높다고 하였다(KALIS, 2023). 그



Figure 6. Ultrasonic velocity meter (TAESUNG TS-5000) for the ultrasonic pulse velocity test.



(a) Example of transducer placement.



(b) Testing at the placed points.

Figure 7. Procedure of the ultrasonic pulse velocity test.

러나 이 연구에서는 사방댐 제체의 특성과 기계적인 측정 한계에 의해 직접법의 적용이 불가능하므로 KALIS(2023)가 대안으로 제시한 표면법과 직접법의 혼합법, 즉 표면법을 적용한 후 직접법으로 보정하는 방법을 채택하였다.

먼저 반발경도시험에 의해 사전에 표면이 연마된 사방댐 상·하부의 6개 지점을 대상으로 트랜스듀서 배치지점을 표기한 후, 전자펄스를 기계적 펄스로 변환하는 발신 트랜스듀서를 시험 지점에 고정시킨 다음, 수신 트랜스듀서를 발신 트랜스듀서로부터 100 mm 간격의 수평방향으로 5회 이동하면서 사방댐 표면에서의 거리에 따른 초음파펄스속도를 측정하였다(Figure 7).

거리에 따라 측정된 초음파펄스속도는 다음의 선형회귀식의 기울기 함수를 적용하여 초음파전달속도(V_i , Km/s)를 산출하였다.

$$V_i = \frac{dS}{dT}$$

여기서, dS 는 거리에 따른 선형회귀식의 기울기이며, dT 는 거리에 따른 전달시간이다.

표면법의 트랜스듀서 배치방법으로부터 산출된 초음파 전달속도(V_i)를 직접법의 초음파전달속도(V_d , km/s)로 보정하기 위하여 다음의 보정식을 이용하였다.

$$V_d \approx 1.05 V_i$$

이렇게 산출된 초음파전달속도를 일본재료학회가 제안된 다음의 식에 적용하여 추정압축강도(F_C , MPa)를 산출하였다.

$$F_C = (102 V_d - 117) \times 0.098$$

한편, 초음파펄스속도시험은 콘크리트 표면이 아닌 구조체 내부를 통과하는 초음파의 속도로 콘크리트의 강도를 직접 평가하는 방법이기 때문에 반발경도시험에서 고려한 타격방향, 재령 및 콘크리트 표면상의 습윤상태에 따른 보정을 수행하지 않았다.

3. 자료 분석

1) 산불피해 여부에 따른 콘크리트 압축강도 차이 검정
 이 연구에서는 반발경도시험 및 초음파펄스속도시험에 있어서 산불 피해 여부(피해지역 vs. 미피해지역)에 따른 사방댐의 콘크리트 강도 차이를 확인하고자 시공연도별로 압축강도 차이에 대한 유의성 검정을 실시하였다. 이 분석에서는 콘크리트 압축강도를 측정한 사방댐의 수가 적고 측정값이 비모수의 형태를 나타내기 때문에 Mann-Whitney U test를 사용하였다. 다만, 콘크리트의 압축강도를 각 사방댐별로 본체의 여섯 지점에서 측정하였기 때문에 측정값 간의 상호 종속성이 발생할 수 있으므로 각 사방댐을 무작위효과(random effect)로 설정하였다(Hedges and Vevea, 1998).

Mann-whitney U test 결과를 해석하는데 있어 *p*-value 수치가 0.05보다 작은 경우 산불 피해 여부(피해지역 vs. 미피해지역)에 따른 통계적 차이가 존재하는 것으로 판단하였다.

2) 사방댐 시공 후 경과연수에 따른 콘크리트 압축강도 변화 추정

이 연구에서는 산불 피해지역과 미피해지역에 있어서 반발경도시험 및 초음파펄스속도시험에 의해 추정된 사방댐 시공 후 경과연수에 따른 콘크리트 압축강도 변화를 파악하고, 이를 통해 콘크리트 사방댐의 비파괴시험 압축강도 기준인 21 MPa(Kim et al., 2019; Kim and Kim, 2022)에 이르는 시점을 추정하기 위해 일반화 선형 혼합모형(Generalized Linear Mixed Model, GLMM)을 사용하였다. GLMM은 회귀분석의 한 종류로, 고정효과(fixed effect)와 무작위효과(random effect)를 동시에 고려하여 데이터의 구조적 종속성을 도출하는 분석 방법이다(Agresti et al., 2000).

이 분석에서도 각 사방댐을 무작위효과(random effect)로 설정하였으며(Hedges and Vevea, 1998), 사방댐 시공 후 경과연수를 고정효과(fixed effect)로 설정하였다.

3) 산불 미피해지역 사방댐 대비 피해지역 사방댐의 잔류압축강도율 산정

이 연구에서는 산불 피해지역 사방댐의 손상정도를 정량적으로 추정하여 안전성을 판단하고자 반발경도시험

및 초음파펄스속도시험에 따른 사방댐의 잔류압축강도율을 산정하였다. 잔류압축강도율(Residual Compressive Strength Ratio)은 콘크리트가 원래 가지고 있는 압축강도에 대한 손상 후 남아있는 압축강도의 비율을 의미하며, 건축 자재의 내구성 평가와 손상 평가에 일반적으로 사용되는 지표이다(Phan and Carino, 2000).

$$\text{Residual Compressive Strength Ratio (\%)} =$$

$$\frac{\text{Post-damage Compressive Strength (MPa)}}{\text{Pre-damage Compressive Strength (MPa)}} \times 100$$

결 과

1. 산불피해 여부에 따른 콘크리트 압축강도 차이

1) 반발경도시험 결과

반발경도시험을 통해 측정된 콘크리트 압축강도를 시공연도별로 분류하고, 산불 피해 여부(피해지역 vs. 미피해지역)에 따라 그 차이를 비교한 결과(Figure 8), 모든 시공연도의 사방댐에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(*p*≥0.05).

2) 초음파펄스속도시험 결과

초음파펄스속도시험을 통해 측정된 콘크리트 압축강도를 시공연도별로 분류하고, 산불 피해 여부(피해지역 vs. 미피해지역)에 따라 그 차이를 비교한 결과(Figure 9), 모든 시공연도의 사방댐에서 산불 피해지역의 압축강도가 미피해지역에 비해 낮게 나타났다(*p*<0.05).

2. 사방댐 시공 후 경과연수에 따른 콘크리트 압축강도 변화

1) 반발경도시험 결과

산불 피해지역과 미피해지역에서 반발경도시험을 통해 측정된 압축강도의 변화를 사방댐 시공 후 경과연수에 따라 살펴본 결과(Figure 10), 산불 피해지역과 미피해지역의 사방댐 모두 시공 후 경과연수에 따라 압축강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 감소추세의 기울기에는 서로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

그러나 산불 미피해지역의 사방댐의 경우 시공 후 13~14년 정도에 콘크리트 사방댐 비파괴시험 압축강도 기준인 21 MPa 수준으로 감소한 반면, 산불 피해지역의 사방댐은 그보다 빠른 10~11년 정도에 21 MPa 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

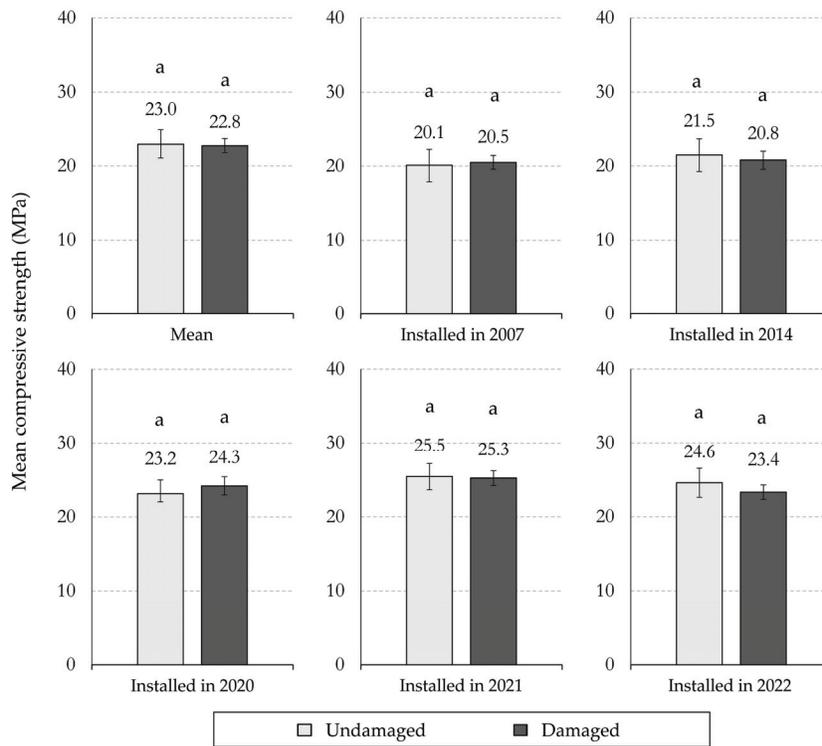


Figure 8. Differences in concrete compressive strength of erosion control dams measured by rebound hardness test in forest fire-damaged and undamaged areas.

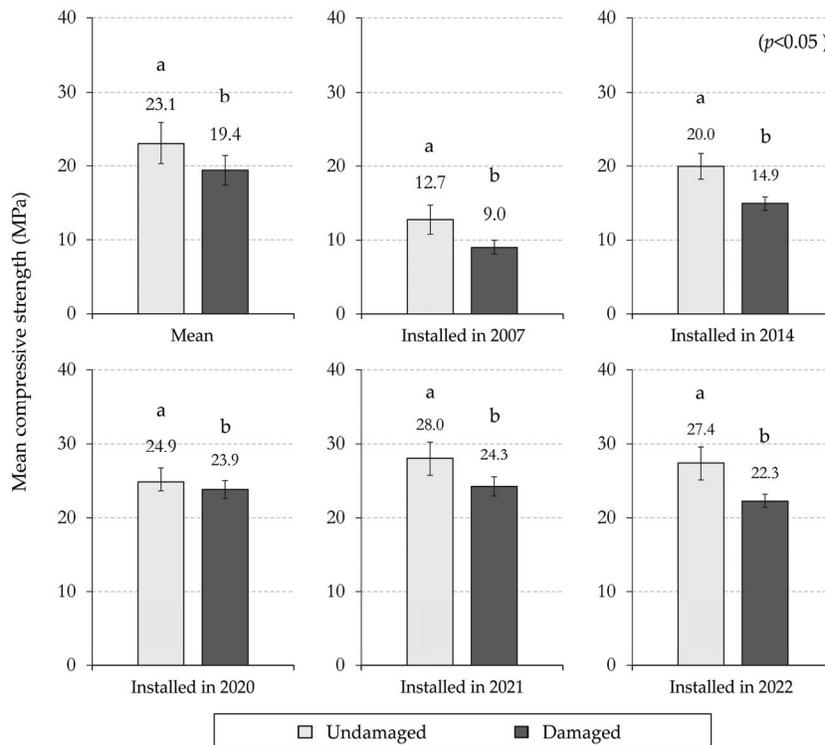


Figure 9. Differences in concrete compressive strength of erosion control dams measured by ultrasonic pulse velocity test in forest fire-damaged and undamaged areas.

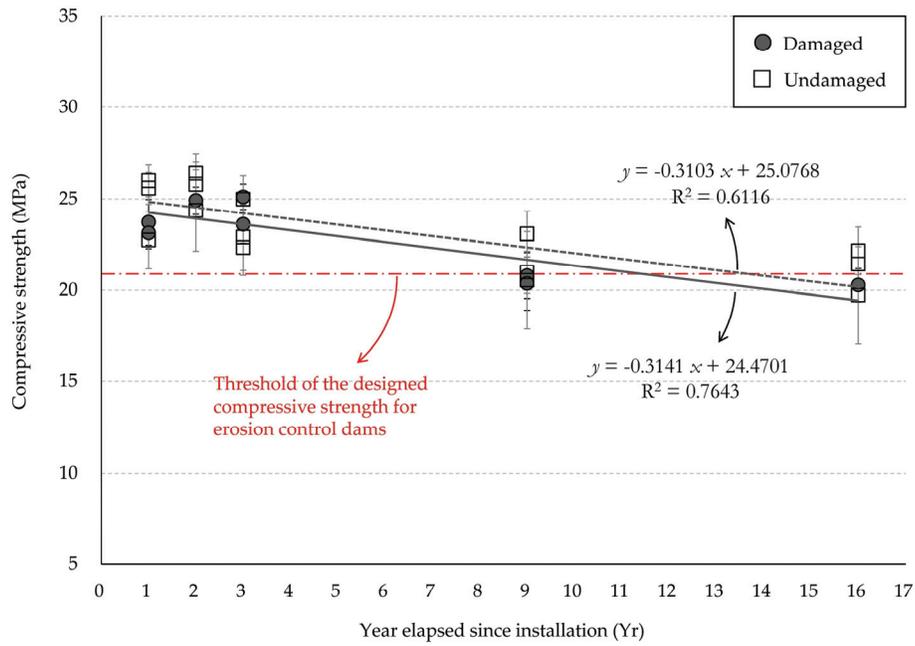


Figure 10. Changes in concrete compressive strength of erosion control dams measured by rebound hardness test with increasing year elapsed since installation in forest fire-damaged and undamaged areas.

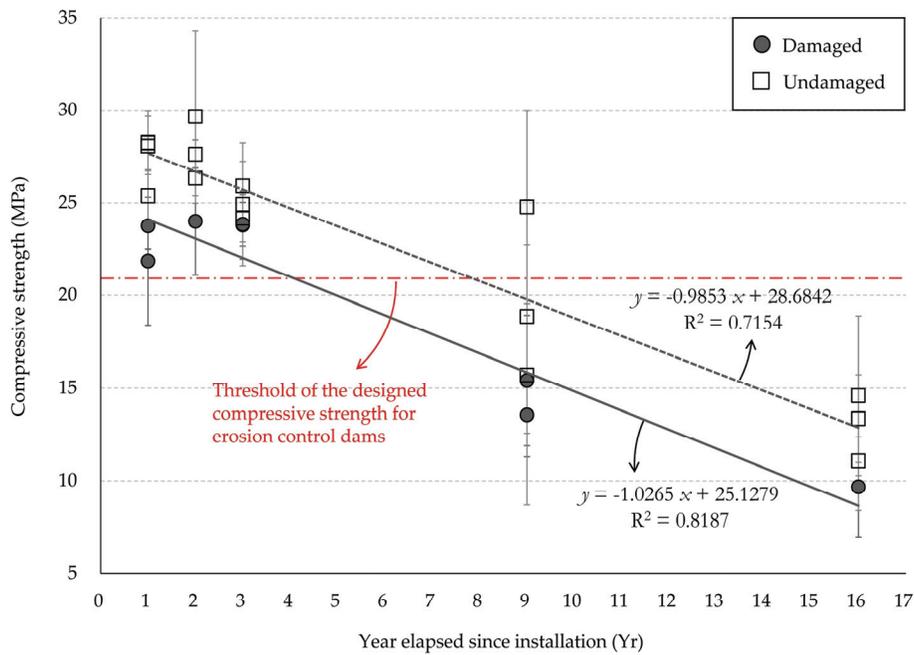


Figure 11. Changes in concrete compressive strength of erosion control dams measured by ultrasonic pulse velocity test with increasing year since installation in forest fire-damaged and undamaged areas.

2) 초음파펄스속도시험 결과

산불 피해지역과 미피해지역에서 초음파펄스속도시험을 통해 측정된 압축강도의 변화를 사방댐 시공 후 경과연수에 따라 살펴본 결과(Figure 11) 반발경도시험 결과와 동일하게 두 지역의 사방댐 모두 시공 후 경과연수에 따라 감소하였으며, 감소추세의 기울기 역시 큰 차이는 없으므로 나타났다. 그러나 초음파펄스속도시험 결과가 반발경도시험 결과에 비해 감소추세가 약 3배 크게 나타났다.

한편, 초음파펄스속도시험에서는 반발경도시험의 결과보다 짧은 기간 내에 사방댐 압축강도가 콘크리트 사방댐의 비파괴시험 압축강도 기준인 21 MPa 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 산불 미피해지역의 사방댐의 경우 시공 후 7~8년 정도에 21 MPa 수준으로 감소한 반면, 산불 피해지역의 사방댐은 그보다 빠른 3~4년 정도에 21 MPa 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

3. 산불 피해지역 사방댐의 잔류압축강도율

1) 반발경도시험 결과

반발경도시험 결과로부터 추정된 산불 미피해지역 사방댐 대비 피해지역 사방댐의 잔류압축강도율 변화는 Table 4와 같다. 즉, 반발경도시험에 의해 추정된 잔류압축강도율은 평균적으로 95~104% 수준으로 나타나 시공 후의 경과연수에 따른 변화를 보이지 않았다.

2) 초음파펄스속도시험 결과

초음파펄스속도시험 결과로부터 추정된 산불 미피해지역 사방댐 대비 피해지역 사방댐의 잔류압축강도율 변화는 Table 5와 같다. 즉, 초음파펄스속도시험에 의해 추정된 잔류압축강도율의 평균값은 반발경도시험 결과에 비

해 상대적으로 낮은 73~95% 범위를 보였으며, 특히 시공 후 3년까지는 84~95% 수준을 보이다가 시공 후 9년 이후에는 73~75% 수준으로 낮아지는 것으로 나타났다.

고찰

1. 산불피해 콘크리트 사방댐의 안전점검을 위한 적정 비파괴시험

우리나라 소나무림에서의 산불을 가정하여 실내 연소실험을 실시한 연구(Kim et al., 2014)에서는 산불 발생 후 27초 만에 1,028°C까지 올라가는 것으로 확인되었다. 또한, 북부 캐나다의 소나무림 산불에서 측정된 지표화 온도는 550~976°C 수준으로 보고되기도 하였다(Santín et al., 2016). 이에 비해 사방댐의 주된 소재인 콘크리트는 목재, 강재, 복합구조재 등 건축에 사용되는 타 자재에 비해 내화성이 뛰어나지만 안전한계온도는 500°C에 불과하다(Kwon et al., 2003). 즉, 화재 발생 시 콘크리트의 표면온도가 100°C에 근접하면 내부의 공극에서 수분 증발이 발생하여 외부의 미세한 균열을 야기하며(Atarashi et al., 2017), 표면온도 100~300°C 범위에서 콘크리트 표면의 폭발현상이 발생한다. 또한, 300°C 이상일 경우 시멘트 회합물과 골재 사이의 팽창압 차이로 인해 내부의 균열과 급격한 강도 저하가 발생하며(Noguchi et al., 2012), 이러한 콘크리트의 열손상은 단기적으로 고온에 노출되었을 때 더욱 심하다(Khoury, 1992).

이상의 선행연구 결과에 근거하여 볼 때, 반발경도시험은 콘크리트 표면의 경도로부터 압축강도를 추정하기 때문에 시험의 특성상 구조물 내부에서 발생한 압축강도 저하를 평가하기 어렵다는 단점이 있다(Jedidi, 2020). 게다가 콘크리트 표면에서 측정된 경도는 골재의 경도가 개입

Table 4. Residual compressive strength ratio estimated by rebound hammer test.

| Year elapsed since installation (yr) | | 1 | 2 | 3 | 9 | 16 |
|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mean compressive strength (MPa) | Damaged | 23.4±1.6 | 24.9±0.9 | 24.4±2.6 | 20.6±2.3 | 20.3±1.5 |
| | Undamaged | 24.8±4.7 | 25.5±3.5 | 23.4±2.8 | 21.5±5.5 | 21.1±4.2 |
| Residual compressive strength ratio (%) | | 94.6 | 97.6 | 104.0 | 95.6 | 96.3 |

Table 5. Residual compressive strength ratio estimated by ultrasonic pulse velocity test.

| Year elapsed since installation (yr) | | 1 | 2 | 3 | 9 | 16 |
|---|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| Mean compressive strength (MPa) | Damaged | 22.8±6.5 | 24.0±5.7 | 23.8±3.1 | 14.5±7.2 | 9.7±3.4 |
| | Undamaged | 27.3±4.5 | 27.9±6.4 | 25.0±6.8 | 19.8±14.6 | 12.9±5.9 |
| Residual compressive strength ratio (%) | | 83.6 | 86.1 | 95.3 | 73.2 | 74.8 |

한 값으로, 화재에 의한 경도 저하가 시멘트 화합물에 비해 적은 골재의 경도가 반영되는 것은 반발경도시험을 통한 화재손상 평가의 한계라고 볼 수 있다(Phan and Carino, 2000). 반면, 초음파펄스속도시험은 제체 내부의 밀도와 강도, 즉 탄성계수를 기반으로 콘크리트 압축강도를 추정하는 방법으로서 반발경도시험과 달리 구조물 내부의 강도를 탐지하는 것이 가능하다. 따라서 사방댐과 같이 제체의 규모가 비교적 큰 구조물의 평가에 유리하고(Bungey and Grantham, 2018), 화재로 인한 물리적인 특성 변화를 파악할 수 있다는 것이 특징이다(Hong et al., 2018). 이러한 시험 원리의 차이로 인한 결과의 상이함은 Al-Neshawy et al.(2022)의 연구에서도 찾아볼 수 있다. 그들은 1 m 두께의 콘크리트 벽체를 대상으로 코어압축강도 측정하고, 이를 반발경도시험 및 초음파펄스속도시험에 의한 콘크리트 압축강도 결과와 비교하는 연구를 진행하였다. 그 결과, 초음파펄스속도시험과 달리 반발경도시험의 결과는 콘크리트 벽체 내부의 공극의 영향으로 인하여 코어압축강도의 결과와 큰 차이를 보였다고 보고하였다. 이러한 시험 원리의 차이로 인해 산불에 의해 콘크리트 내부에 발생한 손상과 물리적인 특성 변화가 반발경도시험과 초음파펄스속도시험에서 서로 다르게 반영된 것으로 사료된다(Figure 8 and 9).

한편, 현행 「사방사업법」의 ‘사방시설의 유지관리 지침’에서는 사방댐 정밀점검 시 반발경도시험을 활용한 압축강도 시험과 초음파펄스속도측정기를 활용한 균열깊이 측정을 실시하고, 정밀점검으로 불충분한 경우 안전진단을 실시하여 콘크리트 표면파기법(Spectral Analysis of Surface Wave Method)을 활용한 비파괴시험을 진행할 것으로 규정하고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 반발경도시험은 화재손상을 평가하는데 한계가 있고, 표면파기법은 고가의 장비와 숙련된 인력을 요구하기 때문에 신속한 평가가 어렵다는 단점이 있다. 그에 반해 이 연구의 결과는 향후 산불로 인한 사방댐의 화재손상을 평가하는 데 있어 초음파펄스속도시험을 통한 압축강도시험의 필요성을 제시하고 있다. 다만, 이 연구는 산불 이외의 압축강도 저하 요인을 배제하기 위해 외부손상이 발생한 사방댐을 연구대상지에서 제외하였는데, 이 과정에서 산불로 인한 손상을 평가하기에 충분한 수의 사방댐을 확보하기 어려웠을 뿐만 아니라 산불로 인하여 외부에 손상을 입은 사방댐마저 연구대상지에서 배제되었을 수도 있다. 이것이 반발경도시험을 통해 산불 피해 여부에 따른 압축강도의 차이가 나타나지 않은 원인일 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 산불피해 사방댐의 안전점검 시에는 반발경도시험과 초음파펄스속도시험을 통한 압축강도의 추정을 병행하여

외부손상과 내부손상을 모두 파악하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

2. 산불로 인해 단축되는 콘크리트 사방댐의 내구수명

산불 피해지역과 미피해지역에서 콘크리트 사방댐의 압축강도 변화를 시공 후 경과연수에 따라 확인한 결과, 반발경도시험과 초음파펄스속도시험 모두에서 시공 후 경과연수에 따른 압축강도의 저하가 확인되었다(Figure 10 and 11). 다만, 두 시험 모두에서 시공 후 경과연수 2년의 콘크리트 압축강도가 경과연수 1년보다 높게 나타난 것은 콘크리트의 양생과 수화작용에 의한 것으로 사료된다. 일반적으로 콘크리트 초기 압축강도는 타설 후 28일까지 급격히 상승하여 최고강도의 75~90% 수준에 도달하며, 이후 환경에 따라 장기적이고 지속적인 경화가 이루어진다(Baek et al., 2016).

그러나 장기적인 경화가 콘크리트 압축강도의 지속적인 상승을 의미하는 것은 아니다. 콘크리트 구조체는 외부의 다양한 환경영향에 따라 열화가 발생하여 최고강도에 도달한 일정시점부터 다양한 양상으로 강도의 저하가 발생하는데(MSIT, 2011), 이 연구에서는 산불 피해지역은 물론 산불 미피해지역에서도 13~14년(반발경도시험 결과) 및 7~8년(초음파펄스속도시험 결과) 경과한 시점에 사방댐 비파괴시험 압축강도 기준인 21 MPa 수준 이하로 감소하는 것으로 나타났다(Figure 10 and 11). 이는 보통강도의 콘크리트 구조물이 30년 정도의 목표 내구수명을 갖는다는 MOLIT(2006)의 연구 결과에 비해 매우 낮은 수치이다.

이러한 현상의 원인으로서는 사방댐 설치 환경의 특수성을 지목할 수 있다. 산지계류에 설치되는 사방댐의 주변은 콘크리트의 수화작용에는 분명 유리한 환경이지만(Bushlaibi, 2004), 그에 반해 무근의 저강도 콘크리트로 설치되는 사방댐이 산지계류의 낮은 수온에 노출되기 때문에 겨울철 동결융해 등의 손상에 취약할 수밖에 없을 것이다. Lee and Woo(2021)은 산지계류에 설치된 사방댐이 하천의 수리구조물에 비해 손상과 노후화에 취약하다는 점을 지적하였으며, 그 원인으로 수온이 낮은 계류수와 지속적인 접촉과 이런 계류수에 의해 이동 및 퇴적하는 침전물이 사방댐의 열화로 이어진다고 보고하였다. 비록 산림환경에 설치된 콘크리트 구조물의 동결융해 특성을 분석한 연구는 아니지만, Koh et al.(2015)은 겨울철 저온 일수의 증가가 옥외 콘크리트 구조물의 다공화와 박리 등의 동결융해 피해를 증가시키고 결국 질량 손실과 압축강도 저하로 이어진다고 보고하였다. 결국 일조량과 고도 등 사방댐이 설치되는 환경을 고려할 때 사방댐이 일반적인 콘크리트 구조물보다 동결융해에 더 취약할 수 있음을 추

정할 수 있다. 이것이 산불 피해지역은 물론 미피해지역에서도 사방댐의 콘크리트 압축강도가 시공 후 경과연수에 따라 감소된 원인으로 사료되며, 여기에 앞서 고찰된 산불에 의한 콘크리트 열손상의 영향이 더해져 결국 산불 미피해지역의 사방댐에 비해 피해지역의 사방댐이 약 3년(반발경도시험 결과)이나 4년(초음파펄스속도시험 결과) 짧은 내구수명을 나타낸 것으로 사료된다. 다만, Kim and Kim(2022)은 경상북도 지역의 노후 사방댐을 대상으로 한 반발경도시험 결과를 통계적으로 분석하여 시공 후 약 27년 경과된 시점에 콘크리트 압축강도가 21 MPa 수준으로 저하되는 것으로 보고하였는데, 그들의 연구에서는 대수면은 물론 반수면과 댐둑마루 중 한 곳을 타격의 대상으로 하였을 뿐만 아니라 타격방향과 재령뿐만 아니라 습윤상태에 대한 보정까지도 실시하여 이 연구에 비해 상대적으로 긴 내구수명을 나타낸 것으로 추정된다.

한편, 각각의 두 시험에서 산불 미피해지역의 사방댐과 피해지역의 사방댐이 갖는 압축강도 감소추세의 기울기는 유사하게 나타났다(Figure 10 and 11). 이는 곧 사방댐의 콘크리트 압축강도에 대한 산불의 영향은 시공 후 경과연수에 따라 좌우되지 않음을 의미한다. 그러나 시공 후 경과연수의 증가에 따른 잔류압축강도율의 변화는 다른 결과를 나타냈다. 즉, 반발경도시험에서는 산불 미피해지역 사방댐의 압축강도(100%)에 대하여 산불 피해지역의 사방댐은 평균 $\pm 5\%$ 수준의 압축강도 차이를 보인 반면, 초음파펄스속도시험에서는 시공 후 9년이 지난 시점에서 최대 27% 정도의 압축강도가 저하되는 것으로 나타났다(Table 4 and 5). 잔류압축강도율은 특정한 사건 전후 콘크리트 구조물에 대한 영향을 평가하기 위해 사용되는 방법으로, 구조물의 설치환경에 의한 영향을 최소화한 손상 정도를 확인하기 위해 일반적으로 사용된다(McDaniel, 1915). 따라서 이 연구에서 살펴 본 잔류압축강도율 변화는 앞서 설명한 짧은 내구수명의 원인인 사방댐 설치 환경의 특수성이 배제된 결과로 볼 수 있으며, 결국 시공 후 경과연수가 비교적 긴 사방댐에서 산불로 인한 압축강도 손실이 더 크다는 것을 보여준다.

결론

이 연구에서는 2022년 울진·삼척 산불 피해지역을 대상으로 피해 전후의 정규탄화지수 변화량을 추정하여 산불피해 심도를 추출하고, 산불 피해지역과 미피해지역에 위치한 콘크리트 사방댐을 대상으로 반발경도시험과 초음파펄스속도시험을 통해 콘크리트 압축강도를 측정하였다. 그 결과, 반발경도시험에서는 산불 피해여부에 따른

압축강도 차이가 없는 것으로 나타났으나, 초음파펄스속도시험에서는 콘크리트 구조물의 열손상으로 인한 유 의한 압축강도 차이가 나타났다. 또한, 사방댐 설치 환경의 특수성으로 인해 시공 후 경과연수가 증가할수록 사방댐의 압축강도가 낮아지는 경향을 보였으며, 이로 인한 사방댐의 내구수명은 산불의 영향으로 3~4년 단축되는 것으로 나타났다. 사방댐 설치 환경의 특수성을 배제하기 위해 추정된 산불 미피해지역 대비 피해지역 사방댐의 잔류압축강도율은 시공 후 경과연수가 비교적 긴 사방댐에서 산불로 인한 압축강도 손실이 더 크다는 것을 보여줬다. 이러한 결과는 산불로 인한 피해를 입은 사방댐의 안전진단체계를 마련해야 할 필요성을 보여주는 것이라 사료된다.

그럼에도 불구하고 이 논문에서는 산불 피해지역의 사방댐 기수가 매우 적다는 것을 한계로 지적할 수 있다. 비록 단일 산불로는 국내 최대 규모로 발생한 산불지역을 연구의 대상으로 설정하였지만, 조사가 가능한 사방댐은 총 8기에 불과했으며, 일부 시공연도의 사방댐은 1기뿐인 경우도 있었다. 따라서 대상지를 전국으로 확대하는 등 연구결과를 일반화할 수 있는 방안을 강구하는 것이 필요하다. 더불어 이 논문에서 추론한 산불 미피해지역 콘크리트 사방댐의 강도 저하 원인에 대한 구명 역시 숙제일 것이다. 과거 해수, 풍속과 일조량 등이 콘크리트 강도에 미치는 영향에 관한 연구는 수행되었지만, 계류수 또는 주변의 어떤 인자가 사방댐의 압축강도 저감에 어느 정도 기여하는지는 여전히 미지로 남아 있어 추후 정량적 접근을 통한 연구가 반드시 필요하다. 이와 함께 사방댐 설치 자재 운반 및 소모의 취약성이 미치는 영향에 관한 연구도 필요할 것이다. 특히 콘크리트의 경우 수분 상실로 이어져 가수행위를 하게 되고, 그로 인해 사방댐의 품질이 저하될 수 있다는 점은 이미 많은 지적이 이루어지고 있는 부분이다. 이상에서 제안된 연구가 향후 수행된다면 그 결과는 분명 사방댐의 장수명화에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 ‘2024년 국립공주대학교 학술연구지원사업(2024-0438-01)’의 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Agresti, A., James, B., James, P. and Caffo, B. 2000. Random-effects modeling of categorical response data. *Sociological Methodology* 30: 27-80.
- Al-Neshawy, F., Ferreira, M. and Puttonen, J. 2022.

- Experiences of the use of NDT techniques to assess compressive strength of thick reinforced concrete structures. Proceedings of the 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology: Divison IIX.
- Atarashi, D., Yoshida, N., Tawara, A. and Takahashi, S. 2017. Chemical changes in hardened cement caused by heating. Proceedings of the Annual Meeting of the Japan Concrete Institute 39(1): 649-654.
- Bae, Y.J., Lee, S.M. and Jung, W.Y. 2024. An analytic study for the development of composite material grid structures for open type check dam. Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures 15(1): 10-17.
- Baek, S.J., Park, K.H., Song, Y.S. and Hur, H.K. 2016. Properties of concrete strength of the initial curing period in hot weather concrete. Journal of the Korea Concrete Institute 28(2): 271-272.
- Bungey, J.H. and Grantham, M.G. 2018. Testing of Concrete in Structures. CRC Press. NY, U.S.A.
- Bushlaibi, A.H. 2004. Effects of environment and curing methods on the compressive strength of silica fume high-strength concrete. Advances in Cement Research 16(1): 17-22.
- Choe, Y.J., Hwang, J.S., Hwang, Y.I., Jeon, H.J., Kweon, H.K. and Lee, J.W. 2023. Change in the concrete strength of forest road drainage systems caused by forest fires. Journal of Korean Society of Forest Science 112(4): 451-458.
- Chun, K.W. 2011. New Erosion Control Engineering. Hyangmunsa. Seoul, Korea.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2024. Integrated Fire Management Voluntary Guidelines: principles and strategic actions. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Geneva, Swiss.
- Hedges, L.V. and Vevea, J.L. 1998. Fixed- and random-effects models in meta-analysis. Psychological Methods 3(4): 486-504.
- Hong, S.G., Lee, Y.T., Kim, S.H. and Kim, J.H. 2018. Estimation of compressive strength of reinforced concrete vertical and horizontal members using ultrasonic pulse velocity method. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection 22(6): 197-205.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2012. Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation; SREX. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Jedidi, M. 2020. Evaluation of the quality of concrete structures by the rebound hammer method. Current Trends in Civil & Structural Engineering 5(5), DOI: 10.33552/CTCSE.2020.05.000621.
- Jeon, B. and Chae, H. 2017. A study of analysis on relationship between Korea forest fire occurrence and weather factor. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 17(5): 197-206.
- Jeong, K. and Kim, D.J. 2022. A study on the improvement of safety management by analyzing the current status and response system of forest fire accidents. Journal of the Society of Disaster Information 18(3): 457-469.
- Houry, G.A. 1992. Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment. Magazine of Concrete Research 44(161): 291-309.
- Kim, J.H. and Kim, W.Y. 2013. Review of research trends on landslide hazards. The Journal of Engineering Geology 23(3): 305-314.
- Kim, J. and Kim, D. 2022. A statistical analysis of results of detailed inspections on aged concrete erosion control dams in Gyeongsangbuk-do. Journal of Korean Society of Forest Science 111(2): 276-286.
- Kim, Y.J., Lee, S.M. and Choi, H.S. 1999. Nondestructive evaluation of concrete strength considering aging effect. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection 3(3): 157-165.
- Kim, H.S., Kang, Y.J., Kim, J.H., Kim, K.H., Lee, B.D. and Kim, J.H. 2014. Comparison of experimental and FDS data for calculating heat-affected range in forest fires. Journal of the Korean Society of Safety 29(4): 91-96.
- Kim, M.S., Ahn, Y.S., Lee, M.S., Seo, J.I. and Lim, S.J. 2019. Inspection and Maintenance of Landslide Disaster Prevention Facilities [1]: general inspection, detailed inspection, and safety diagnosis. Chonnam National University Press. Gwangju, Korea.
- Kim, S.W., Chun, K.W., Kim, M., Catani, F., Choi, B. and Seo, J.I. 2020. Effect of antecedent rainfall conditions and their variations on shallow landslide-triggering rainfall thresholds in South Korea. Landslides 18: 569-582, DOI: 10.1007/s10346-020-01505-4.
- Koh, K.T., Han, M.C. and Lee, B.D. 2015. Design for freezing and thawing durability of concrete. Magazine of the Korea Concrete Institute 27(5): 30-35.
- Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (KALIS). 2023. Detailed Guidelines for Safety and Maintenance of Facilities (Commentary). Korea Authority of Land & Infrastructure Safety. Jinju, Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 2023a. Landslide Information

- System. <https://sansatai.forest.go.kr>. (Accessed 2024. 10.25.).
- Korea Forest Service (KFS). 2023b. Standards for the Implementation of Afforestation Projects for Forest Fire Prevention. Korea Forest Service. Dajeon, Korea.
- Korea Forest Service (KFS). 2024. Statistical Yearbook of Forestry. Korea Forest Service. Dajeon, Korea.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2024. Forest Fire Statistics. <https://kosis.kr>. (Accessed 2024.02.28.).
- Kovler, K., Wang, F. and Muravin, B. 2018. Testing of concrete by rebound method: Leeb versus Schmidt hammers. *Materials and Structures* 51(138), DOI: 10.1617/s11527-018-1265-1.
- Kwon, Y.J., Lee, C.H., Oh, K.H., Park, Y.H. and Kim, M.H. 2003. Literature study on the estimation of temperature in concrete structures at fire accident. *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference 2003*: 297-301.
- Lee, K. and Woo, C. 2021. Study on the applicability of the exterior condition assessment to evaluate the physical vulnerability of check dams. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 21(6): 71-84.
- Lee, B., Song, J., Chung, J., Lee, M., Kim, D. and Lee, S. 2005. Analyzing temporal characteristics of forest fire based on national forest fire statistics. *Proceedings of the Annual Meeting of the Korean Society of Forest Science*: 453-455.
- Lee, M., Lee, S. and Lee, J.H. 2012. Study of the characteristics of forest fire based on statistics of forest fire in Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(5): 185-192.
- Malhotra, V.M. 1976. *Testing Hardened Concrete: nondestructive methods*. Iowa State University Press & American Concrete Institute. IA, U.S.A.
- McDaniel, A.B. 1915. *Influence of Temperature on the Strength of Concrete*. University of Illinois Bulletin No. 81, Engineering Experiment Station. Chapman and Hall, Ltd. London, U.K..
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2006. *Research on the Strategy for Securing Durable Life of Concrete Structures by Efficient Maintenance*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Seoul, Korea.
- Ministry of Science and ICT (MSIT). 2011. *Research Group for Control of Crack in Concrete*. Korea Advanced Institute of Science and Technology. Seoul, Korea.
- Noguchi, H., Maruya, T., Kanda, T., Ichise, K., Huruichi, S., Michikoshi, S., Nojima, S. and Morita, T. 2012. High-temperature properties of concrete and fire resistance of concrete structures. *Proceedings of the Annual Meeting of the Japan Concrete Institute* 34(1): 1-8.
- Phan, L.T. and Carino, N.J. 2000. Fire performance of high strength concrete: research needs. *Proceedings of the ASCE 2000 Structures Congress*. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860213 (Accessed 2024. 02.28.).
- Santín, C., Doerr, S.H., Merino, A., Bryant, R. and Loader, N.J. 2016. Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration. *Geoderma* 264(A): 71-80.
- Sanyo. 2002. *Concrete Test Hammer Instruction Manual*. Sanyo Testing Machines Co., Ltd. Tokyo, Japan.
- Seo, H.W., Kim, Y.I., Ghang, U.K. and Han, C.G. 2011. Analysis of the mixing conditions by domestic ready-mixed concrete rage sphere. *Journal of the Korea Institute of Building Construction* 11(1): 274-275.
- Trenberth, K.E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research* 47(1): 123-138.
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2018. *Navigating a New Climate*. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- United States Geological Survey (USGS). 2023. *Landsat Normalized Burn Ratio*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-burn-ratio-2> (Accessed 2024. 06.01.).
- Whitehurst, E.A. 1951. Soniscope tests concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute* 47(2): 433-444.
- World Meteorological Organization (WMO). 2023. *State of the Global Climate 2023*. WMO-No.1347. Geneva. Swiss.
- Zhang, W., Zhou, T. and Wu, P. 2024. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century. *Science* 385(6707): 427-432.

Manuscript Received : January 28, 2025

First Revision : February 8, 2025

Accepted : February 10, 2025