Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 34, No. 6: 1919-1924/ December, 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.6.1919

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Construction Management **시공관리**

댐 홍수조절기능의 회복탄력성 산정

김병일* · 신사철** · 김두연***
Kim, Byungil*, Shin, Sha Chul**, Kim, Du Yon***

Resilience Assessment of Dams' Flood-Control Service

ABSTRACT

Recently, due to the climate change, the frequency and intensity of extreme rainfall events have been continuously increased in regions of South Korea. As a consequence, safety issues have been raised especially in the hydrologic safety of old dams designed and constructed by the old standards. In general, for improving hydrologic safety of existing dams, two options are considered: 1) raising dam crest; and 2) constructing or expanding an emergency spillway. In this process, the main criteria of alternative selection are overtopping possibility and cost efficiency of each alternative. This approach is easy to implement but it is subject to major limitation for the proper evaluation of alternatives, overlooking downstream flood damages by any controlled flow of water that is intentionally released from dams to eliminate the possibility of overtopping. Therefore, this study suggests a framework for evaluating the dam safety strengthening alternatives in terms of a comprehensive flood control by applying the concept of resilience. The case study shows that the resilience-based evaluation framework which considering downstream flood damages is effective in the selection of dam safety strengthening alternatives.

Key words : Alternative selection, Dam safety, Flood control, Hydrologic safety, Resilience

초 록

최근 기후변화로 인해 극한강우사상의 빈도 및 강도가 증가함에 따라 과거 기준에 의해 설계·시공되어 현재 운영 중인 댐의 수문학적 안전성에 의문이 제기되고 있다. 이에 따라 댐을 증고하거나 여수로를 확장/신설하는 방안이 추진되고 있는데, 이러한 대안을 선정할 때 월류 가능성에 매몰된 나머지 하류 홍수피해를 간과하는 경향이 있다. 이에 본 연구는 회복탄력성의 개념을 도입해 종합적인 홍수조절기능의 관점에서 댐의 안전성 강화 대안을 평가할 수 있는 프레임워크를 제시하였다. 제시된 프레임워크를 활용해 기 수행된 사례에 적용한 결과 각 대안에 따른 홍수유출 특성이 선정과정에서 중요한 요소로 평가되어야 함을 확인할 수 있었다.

검색어 : 대안선택, 댐 안전성, 수문학적 안전성, 홍수조절기능, 회복탄력성

1. 서 론

댐은 하천을 가로질러 세워지는 구조물로 하천수를 저류하고 방류량을 조절해 홍수 발생의 빈도 및 강도를 경감시키는 대표적인 수단이다. 하지만 설계홍수량(design flood)을 초과하는 하천수가 댐에 유입되는 경우 댐이 붕괴되기도 하며 이는 극단적인 홍수 발생을 초래한다(Pidgeon et al., 2003; National Research Council, 2012). 최근 기후변화로 인해 극한강우사상(extreme rainfall event)의 빈도 및 강도가 증가함에 따라(Hughes, 2003; Dore, 2005; Hewitson and Crane, 2006) 댐의 수문학적 안전성 검토기준이 상향되고

* 정회원 · 안동대학교 토목공학과 조교수 (Andong National University · bkim@anu.ac.kr)
** 정회원 · 안동대학교 토목공학과 교수 (Andong National University · scshin@anu.ac.kr)
*** 정회원 · 교신저자 · 경일대학교 건설공학부 조교수 (**Corresponding Author** · Kyungil University · duyonkim@kiu.ac.kr)

Received August 26, 2014/ **revised** September 11, 2014/ **accepted** September 30, 2014

Copyright ⓒ 2014 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 일반적으로 댐 유역의 가능최대강수량(probable maximum precipitation, PMP)을 기준으로 산정된 가능최대홍수량(probable maximum flood, PMF)을 토대로 안전성을 검토하는데 이 PMP가 증가하고 있는 것이다. 이때 주어진 PMP 아래 저수가 댐 마루를 월류(overtopping)할 가능성이 있다면 안전성에 문제가 있다고 볼 수 있다. 이는 전 세계적으로 댐 붕괴 사례의 약 34%가 월류에 기인했다는 데 근거한다(Costa, 1985). 따라서 최근 발생한 극한강우사상이 반영된 PMP를 기준으로 설정하면 과거 기준에 의해 설계·시공되어 현재 운영 중인 댐은 붕괴 위험성이 있다고 할 수 있다. 실제로 1999년 월류로 인해 연천댐이 붕괴돼 약 2,500명의 이재민과 약 1,110억 원의 경제적 피해가 발생했다(Ministry of Government Administration and Home Affairs, Republic of Korea, 2000).

댐의 수문학적 안전성은 대표적으로 다음의 두 가지 방안을 통해 확보하게 된다: 1)댐 증고를 통해 저수량을 확대하는 방안; 2)여수로 확장 또는 신설을 통해 방류량을 확대하는 방안. 지금까지 최적 대안을 선택하는 핵심 기준은 월류 가능성 대비 공사비였다(Lave and Balvanyos, 1998). 즉 주어진 조건 하에 월류 가능성을 분석하는 연구가 주류를 이루었고 (Joo et al., 2013; Park et al., 2013), 월류 가능성을 차단할 수 있는 다양한 방법들 중에 경제성을 위시해 가장 우수한 방안을 선정하는 연구가 다수였다(Park et al., 2003; Yi and Nam, 2007). 그러므로 어떤 대안을 기존 댐에 적용하든 주어진 PMP 아래 월류 가능성이 없다면 가장 공사비가 적게 투입되는 대안이 우선적으로 고려된다. 하지만 각 대안에 따라 홍수피해를 좌우하는 홍수유출량과 그 특성(예: 최대방류량, 지속시간)이 다르다는 점을 고려하면, 대안별 공사비 차이보다 홍수피해액 차이가 더 클 수 있기 때문에 댐 자체의 안전성에 국한해 대안을 선택하는 것은 합리적이지 못하다고 할 수 있다. 따라서 월류 가능성을 포함해 홍수조절기능의 관점에서 댐의 안전성 강화 방안을 평가해야 최적 방안을 합리적으로 도출할 수 있다. 이에 본 연구는 댐의 수문학적 안전성 강화의 측면에서 대안을 선정하기 위해 댐 홍수조절기능의 평가 시 회복탄력성(resilience)이라는 개념을 도입하고자 한다. 일반적으로 회복탄력성은 특정 시스템이 제공하는 서비스 수준이 극한사상 이후 감소하는 정도 및 원래 수준으로 회복하는 데 소요되는 시간으로 측정하는데(Mayunga, 2007), 이러한 틀은 홍수유출량과 그 특성을 고려해야 하는 댐 홍수조절기능 평가에 적합하다. PMP는 극한사상에, 최대방류량은 서비스 감소 최대치에, 지속시간은 회복시간에 대입이 가능하기 때문이다.

본 연구는 댐의 수문학적 안전성 강화 측면에서 대안을 선정하기 위해 회복탄력성의 개념을 토대로 댐 홍수조절기능을 평가하는 프레임워크를 제시하고자 한다. 이를 위해, 먼저 회복탄력성의 개념과 선행 연구를 고찰해 본 연구를 위한 시사점을 도출하며, 이를 바탕으로 댐 홍수조절기능의 회복탄력성을 산정하는 프레임워크를 제시한다. 또한 이의 적용을 통해 기 수행된 사례(댐 수문학적 안전성 강화 사업 결과)를 재평가하여, 본 연구에서 제시한 회복탄력성 프레임워크의 실효성을 검증하게 되며, 마지막으로 시사점과 본 연구의 한계를 제시한다.

2. 문헌고찰

2.1 회복탄력성의 개념적 정의

회복탄력성(resilience)이라는 용어는 Holling (1973)에 의해 생태학 분야에서 처음 사용되었는데 이 연구는 시스템(생태계)이 교란을 감내하려는 속성을 회복탄력성으로 규정했다. 시스템이 평형으로 복귀하려는 속성은 다른 용어, 즉 안정성(stability)으로 구분했다. 이후 회복탄력성 개념은 연구 분야 및 목적에 따라 다양하게 활용됐고, 특히 생태계와 지역사회(community)의 복잡계적 특성을 이해하기 위해 현재 활발히 적용되고 있다(Klein et al., 2003; Walker et al., 2006).

Timmerman (1981)은 회복탄력성을 개념적으로 정의하는 데 있어 가장 많이 인용되는 연구 중 하나로 Holling (1973)과는 뚜렷한 차이점을 지닌다. 이 연구는 기반시설 고유의 능력에 더하여 지역사회의 역량측면, 즉 기반시설이 충격에 견디는 속성뿐만 아니라 이 시설이 입은 손상을 복구하는 일련의 과정까지를 회복탄력성의 일부로 보았다. 자연 재해로 인해 기반시설이 손상되면 그 정도는 그 시설의 구조적 특성에 국한되는 문제이지만 손상을 복구하는 과정은 기술적인 수준, 경제적인 여건 등 지역사회와 관계된 복합적 문제이며, 복구기간 동안 발생하는 사회경제적 손실을 최소화하는 일은 지역사회의 역량과 직결된다는 관점에서의 접근이다.

Timmerman (1981) 이후 재해 및 재난 분야에서 급수 시설(Rose, 2004; Rose and Liao, 2005; Baños et al., 2011), 송전 시설(Xu et al., 2007; Ouyang and Dueñas-Osorio, 2012), 교량(Bocchini et al., 2014) 등 다양한 기반시설을 대상으로 회복탄력성의 개념이 활용되었고 시설 특성에 따라 그 정의가 세분화되었다. 이처럼 다양한 정의에도 불구하고 회복탄력성은 다음의 두 가지 공통적인 속성을 갖는다(Zhou et al. 2010): 1)외부 충격에 대한 강건성(robustness); 2)원래 상태로 복구되기까지의 신속성(rapidity). 이에 본 연구도 상술한 두 가지 속성을 활용해 댐 홍수조절기능의 회복탄력성을 측정하고자 한다. 하지만 기존의 재해 및 재난 분야의 연구가 지역사회의 회복탄력성에 주목했던 반면 본 연구는 댐 홍수조절기능 자체에 초점을 두고자 한다. 전술한 바와 같이 댐은 적용되는 안전성 강화 방안에 따라 상이한 홍수유출량을 갖게 되는데, 이 차이는 방안의 기술적 특성에 기인할 뿐 지역사회의 역량과는

별개의 문제이기 때문이다. 무엇보다 본 연구의 목적이 댐의 수문학적 안전성 강화 대안을 선정하는 체계를 마련하는 데 있기 때문에 연구의 범위를 댐 고유의 기능에 한정하고자 한다. 요약하면 본 연구에서 정의하는 회복탄력성은 댐 홍수조절기능에 국한되며, 강건성은 최대방류량을 통해, 신속성은 홍수가 발생하는 시점부터 종료하는 시점까지의 시간을 통해 측정한다.

2.2 회복탄력성의 해석적 정의

회복탄력성은 여러 속성을 지니는데 이를 하나의 통합된 수치로 표현하기 위해 다양한 해석적 정의가 개발되었다. 그 중 대표적인 정의는 Eq. (1)과 같다(Bruneau et al., 2003; Cimellaro et al., 2010; Bocchini et al., 2014).

$$R_L = \int_{t_o}^{t_r} Q(t)dt \tag{1}$$

여기서, R_L은 시스템 기능의 총 손실, t_o는 시스템 기능이 손실되는 시점, t_r은 기능이 완전히 복구되는 시점, Q는 기능 수준의 백분율이다. Eq. (1)은 특정 시스템의 회복탄력성의 크기를 반비례 관계인 시스템 기능의 총 손실로 측정한다. 즉 강건성이 클수록, 신속성이 클수록 R_L은 작은 값을 갖는다. 따라서 R_L이 작을수록 회복탄력성 측면에서 바람직한 시스템이라 할 수 있다.

위와 같은 해석적 정의를 사용하면 대안별 회복탄력성의 비교우위를 손쉽게 파악할 수 있다. 하지만 이러한 정의를 댐 홍수조절기능에 그대로 사용하는 데는 한계가 있다. 기존의 연구를 살펴보면, 극한사상으로 인해 기능손실이 발생할 경우 관련 수치가 감소하는 것을 관찰할 수 있는데, 예를 들어 지진으로 인해 교량에 균열이 발생하면 차량 통행량이 감소하는 것이 대표적이다. 하지만 댐의 경우 극한강우사상으로 인해 홍수조절기능을 상실하게 되면 홍수유출량이 증가하는 상반된 양상을 나타낸다. 따라서 교량의 경우 균열 직전의 통행량을 기준으로 기능의 100% 수준을 정의할 수 있지만 댐의 경우 이러한 접근이 어렵다. 이에 본 연구는 Q를 기존 연구에서와 같이 백분율로 정의하지 않고 댐의 특성을 반영하여 홍수유출량으로 정의한다. 이러한 관계를 도시하면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 세로축은 홍수조절기능의 강건성을, 가로축은 신속성을, 점선으로 둘러싸인 삼각형의 면적이 기능의 총 손실(R_L)을 나타낸다. 따라서 R_L이 작을수록 회복탄력성 측면에서 더 우수한 방안이라고 볼 수 있으며 이러한 체계를 바탕으로 댐 홍수조절기능의 회복탄력성을 산정하는 프레임워크를 구성할 수 있다.

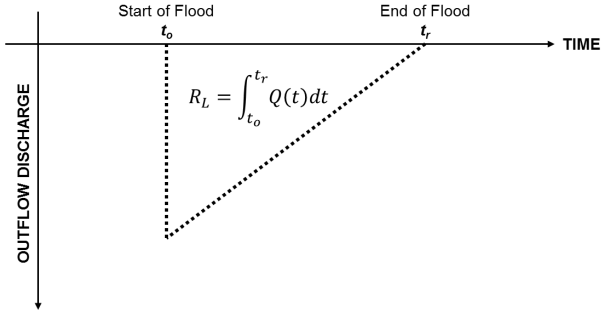

Fig. 1. Resilience Loss as Computed by Eq. (1)

3. 회복탄력성 산정 프레임워크

댐 홍수조절기능의 회복탄력성은 홍수유출량으로 산정이 가능한데, 홍수유출량은 댐의 유입량, 저수량, 및 방류량 간의 관계를 통해 산출할 수 있다. 또한 댐이 하천에 방류하는 유량이 하류 제방을 월류할 시에도 홍수가 발생하므로 제방의 설계홍수량도 회복탄력성 산정에서 중요한 고려대상이 된다. 이러한 관계를 절차적으로 정의하면 아래와 같다(Fig. 2).

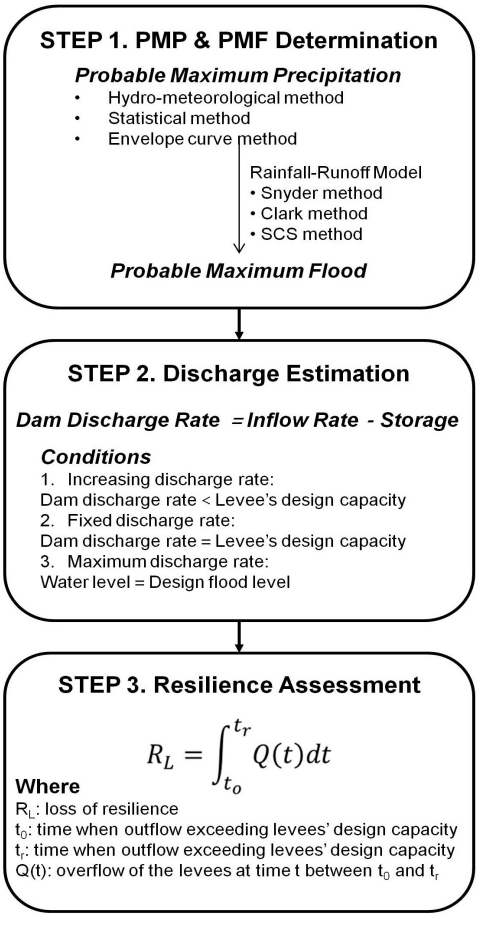

Fig. 2. Resilience Assessment Framework

첫 번째 단계는 PMP와 그에 따른 PMF를 산정해 댐에 유입되는 극한 유량을 구하는 것이다. PMP는 대규모 수공 구조물의 설계, 평가에 필요한 절대적 수문량으로 주어진 기상조건 아래 특정 유역에 발생할 수 있는 이론적 최대 강수량을 뜻한다(World Meteorological Organization 2009). PMP는 수문기상학적 방법(hydro-meteorological method), 통계학적 방법(statistical method), 및 포락선 방법(envelope curve method) 등을 통해 산정할 수 있다. PMP를 유량으로 환산하면 댐 유입량을 구할 수 있고 그 중 최대유입량이 PMF가 된다. PMF는 PMP의 시간에 따른 분포를 토대로 설계우량주상도(design hyetograph)를 얻은 뒤 유역 공간분포를 고려해 구할 수 있다. 이 단계에 대한 세부적인 산출과정은 기존 수문학적 지식체계를 따르며, 자세한 과정은 World Meteorological Organization (2009) 등을 참고할 수 있다.

이전 단계에서 구한 PMF를 기준으로 댐 방류량을 구하는 것이 두 번째 단계이다. 이 유량은 댐의 홍수조절방식과 밀접한 관련이 있는데, 댐은 일반적으로 다음의 절차에 따라 홍수를 조절한다:

① 댐 방류량이 하류 제방의 설계홍수량에 도달하기 전까지 조절없이 방류한다(댐 방류량 < 제방 설계홍수량);
② 댐 방류량이 하류 제방의 설계홍수량에 도달하면 방류량을 일정하게 유지한다(댐 방류량 = 제방 설계홍수량);
③ 댐 수위가 계획홍수위에 도달하면 모든 문비를 전개해 최대한 방류한다 (댐 방류량 > 제방 설계홍수량).

여기서 ①~②까지는 홍수피해를 방지하는 구간이고 ③은 댐의 안전성 확보(즉 월류 방지)를 위해 홍수피해를 고려하지 않고 최대한 방류하는 구간이다. PMP가 발생해 PMF가 댐에 유입되는 상황은 ③에 도달함을 의미하며, 여기서 ③에 진입하는 시점(t_o)부터 홍수조절기능을 상실하게 되고, 다시 ③에서 ②로 복귀하는 시점(t_r)에서 홍수조절기능이 복원된다. 이 시간 동안 댐 방류량에서 제방 월류량을 차감한 값이 홍수유출량 Q가 되며 Q를 t_o부터 t_r까지의 시간에 대해 적분한 값이 R_L이 된다(Eq. (1) 참조).

세 번째 단계는 R_L 값과 Q의 형상을 고려해 홍수피해를 추정하는 것이다. 전술한 바와 같이 홍수피해는 제방월류량(R_L)뿐만 아니라 홍수유출특성(Q의 시간에 따른 형상)에도 큰 영향을 받는다. 따라서 이러한 점들을 고려해 최종적으로 대안별 회복탄력성의 비교우위를 결정할 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 사례 개요

사례 연구 대상은 낙동강 수계에 위치한 높이 83m, 길이 612m의 중앙차수형 토석댐(earth core rock-fill dam)이다. 이 댐은 유역면적 1,584km^2, 총저수용량 1,248백만m^3, 홍수조절용량 110백만m^3, 용수공급량 926백만m^3, 및 발전시설용량 90,000kW 규모로 계획됐으며, 1971년 착공해 1977년부터 현재까지 운영되고 있다. 이 댐은 2007년 비상 여수로 신설공사 착공 전까지 네 차례에 걸쳐 수문학적 안전성을 평가 받았다. 이때 사용했던 PMP와 그에 따른 PMF는 Table 1과 같다(Ministry of Construction and Transportation, Republic of Korea, 2005).

Table 1을 통해 시간이 흐를수록 PMF가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 마지막 PMP는 설계 당시(1971년)보다 9.4% 증가했고 이로 인해 PMF는 80.8% 상승했다. 이처럼 PMF가 급격히 상승한 이유는 마지막 평가(2004년) 직전에 루사(2002년), 매미(2003년)와 같은 기록적인 태풍이 있었기 때문이다.

1971년 및 1988년 평가 시에는 기존 여수로 만으로도 월류가 발생하지 않는다는 결론을 내릴 수 있었으나, 2001년부터는 다른 양상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 2001년에는 계획홍수위를 낮추어야만 월류가 발생하지 않는다는 결론을 얻었고, 2004년에는 저수량 혹은 방류량 증대 방안을 확보하지 못하면 댐의 안전성에 문제가 예상됐다. 이러한 배경 하에 기존 댐 증고, 기존 여수로 확장, 비상 여수로 신설 등의 대안이 검토됐으며 최종적으로 개착식 비상 여수로를 건설(즉 방류량 증대)하는 방안이 채택됐고 현재 시공 중에 있다. 하지만 대안의 선택 과정에서 월류 가능성 차단에 경도된 나머지 각 대안에 따른 홍수유출특성이 간과되었는데, 이로 인해 모든 문비를 개방할 경우 발생할 수 있는 하류 홍수피해는 충분히 고려되지 못했다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 전장에서 제시한 프레임워크를 활용해, 해당 사업의 결과를 가장 유력했던 두 가지 대안(즉 기존 댐 증고 및 비상 여수로 신설)에 대해 회복탄력성 측면에서 재평가하고자 한다.

4.2 대안별 회복탄력성 산정

PMP 및 그에 따른 PMF를 동일한 조건 하에 재평가하기 위해 비상 여수로 신설공사 시에 사용했던 것(Table 1의 2004년 값)을 그대로 활용했다. 이때 PMP는 수문기상학적 방법을 활용해 추정했

Table 1. Comparison of PMP and PMF for Case Study Dam Watershed

Year	1977	1988	2001	2004
PMP (mm)	530	434	573	580
PMF (m^3/s)	8,350	10,251	13,016	15,100

고, 허프 방법(Huff, 1967)을 이용한 시간에 따른 분포를 바탕으로 Fig. 3와 같은 유입량 곡선을 얻었다.

다음으로 대안별 홍수조절방식을 고려해 회복탄력성을 산정했다. 이때 두 대안 모두 PMF가 댐에 유입되기 전 댐 수위는 상시만수위(E.L. 160.0m)로 유지되어 있고, 계획홍수위는 E.L. 161.7m이며, 하류 제방의 설계홍수량은 2,990m^3/s라고 가정했다. 이에 따라 전장의 프레임워크 2단계의 산출과정에 따라 ①댐에 유입되는 홍수가 2,990m^3/s에 도달하기 전까지 조절없이 방류하고; ②유입량이 2,990m^3/s에 도달하면 일정량을 방류하게 되며; ③마지막으로 댐 수위가 E.L. 161.7m에 도달하면 최대한 방류한다는 가정이 적용되었다. 이러한 홍수조절방식을 대안별로 적용한 결과 Fig. 4과 같은 회복탄력성 산출 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 4에서 보듯이 댐 증고안(7,451m^3/s)의 최대방류량이 여수로 신설안(11,193m^3/s)보다 작고, 제방월류량이 다시 0이 되는데 소요되는 시간은 댐 증고안(45시간)이 여수로 신설안(34시간)보다 더 오래 소요된다. 즉 강건성은 댐 증고안이 더 우수하고 신속성은 여수로 신설안이 더 낫다. 이러한 속성들을 종합한 값인 R_L은 댐 증고안(319백만m^3)이 여수로 신설안(418백만m^3)보다 더 작았다. 따라서 두 대안 모두 월류 가능성은 없었기 때문에 회복탄력성 측면에서 댐 증고안이 더 우수하다고 말할 수 있다. 이는 여수로 신설안을 선택했던 기존 결과와 배치된다. 다시 말해 본 연구와 같이 회복탄력성에 기초하여 하류 홍수피해까지 종합적으로 고려할 경우, 댐 안전성 자체에만 문제를 국한시키는 기존 방법에 의한 대안 선택과는 다른 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

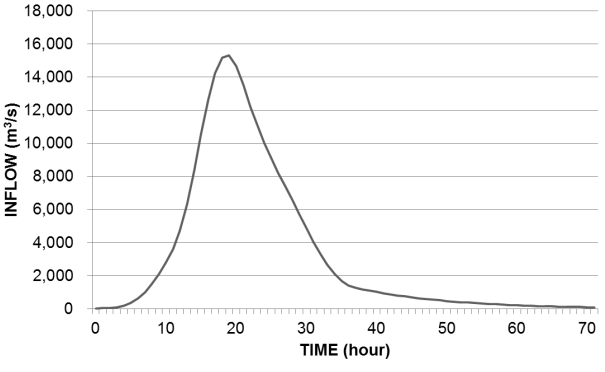

Fig. 3. Inflow Hydrograph under PMP

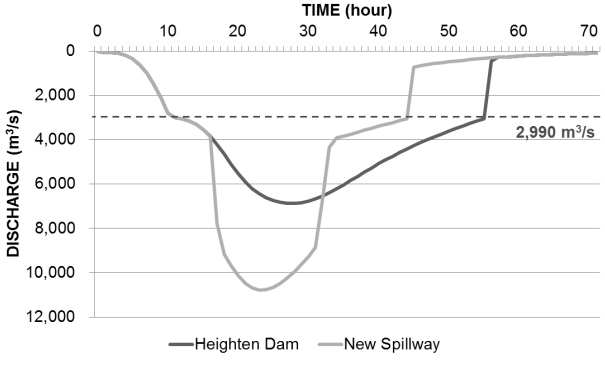

Fig. 4. Comparison of Resilience Losses

5. 결 론

최근 기후변화로 인해 극한강우사상의 빈도 및 강도가 증가함에 따라 과거 설계·시공돼 현재 운영 중인 댐의 수문학적 안전성에 의문이 제기되고 있다. 댐이 붕괴되면 상상을 초월하는 재난이 발생하므로 댐을 증고하거나 여수로를 확장/신설하는 방안이 추진되고 있다. 하지만 이러한 방안을 선정할 때 월류 가능성에 매몰된 나머지 하류 홍수피해를 간과하는 경향이 있다. 이에 본 연구는 회복탄력성의 개념을 도입해 종합적인 홍수조절기능의 관점에서 댐의 안전성 강화 대안을 평가할 수 있는 프레임워크를 제시했다. 또한 제시된 프레임워크를 활용해 기 수행된 사례를 재평가한 결과, 댐에서 수위를 하강시키기 위해 의도적으로 방류한 물이 야기하는 홍수가 간과되었음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 PMP가 발생하는 경우에 한해 대안별 회복탄력성을 평가하는 체계를 제시했다. 하지만 PMP 미만의 확률강수량(예 1,000년 빈도 강수량)에서도 제방월류가 발생할 수 있기 때문에 PMP뿐만 아니라 확률강수량별 회복탄력성까지 산정한다면 더 신뢰성 높은 평가결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구의 범위는 회복탄력성 산정에 국한되었으나 이 결과를 토대로 홍수피해액을 산정하게 되면 방안별로 공사비 및 회복탄력성을 동일선상에서 비교할 수 있다. 따라서 향후 후행 연구를 통해 이러한 한계점들이 극복된다면 댐의 수문학적 안전성 증대 방안을 좀 더 합리적으로 선정하는 체계를 완성할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업-기본연구지원사업(NRF-2013R1A1A2010875)의 지원으로 이루어졌습니다.

References

Baños, R., Reca, J., Martínez, J., Gil, C. and Márquez, A. L. (2011). "Resilience indexes for water distribution network design: A Performance Analysis under Demand Uncertainty." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 10, pp. 2351-2366.

Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T. and Zinke, T. (2014). "Resilience and sustainability of Civil infrastructure: Toward a Unified Approach." *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 20, No. 2.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A. and von Winterfeldt, D. (2003). "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.

Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. and Bruneau, M. (2010). "Framework for analytical quantification of disaster resilience." *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 11, pp. 3639-3649.

Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures*, Open-File Report 85-560, US Geological Survey, Vancouver, WA, USA.

Dore, M. H. I. (2005). "Climate change and changes in global rainfall patterns: What do we know?" *Environment International*, Vol. 31, No. 8, pp. 1167-1181.

Hewitson, B. C. and Crane, R. G. (2006). "Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: Precipitation downscaling over South Africa." *International Journal of Climatology*, Vol. 26, No. 10, pp. 1315-1337.

Holling, C. S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, pp. 2-23.

Huff, F. A. (1967). "Time distribution of rainfall in heavy storms." *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.

Hughes, L. (2003). "Climate change and Australia: Trends, Projections and Impacts." *Austral Ecology*, Vol. 28, No. 4, pp. 423-443.

Joo, Y. H., Yeo, C. G. and Lee, S. O. (2013). "Retardation effect on the breach of the earth filled embankment using the stiffener during overtopping." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1377-1387 (in Korean).

Klein, R. J. T., Nicholls, R. J. and Thomalla, F. (2003). "Resilience to natural hazards: How useful is this concept?" *Environmental Hazards*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 35-45.

Lave, L. B. and Balvanyos, T. (1998). "Risk analysis and management of dam safety." *Risk Analysis*, Vol. 18, No. 4, pp. 455-462.

Mayunga, J. S. (2007). "Understanding and applying the concept of disaster resilience: A Capital-Based Approach." A Draft Working Paper Prepared for the Summer Academy for Social Vulnerability and Resilience Building, July 22-28, 2007, Munich, Germany.

Ministry of Construction and Transportation (2005). *Report on improving the hydrologic safety of Andong multipurpose dam*, Ministry of Construction and Transportation, Gyeonggi-do, Republic of Korea (in Korean).

Ministry of Government Administration and Home Affairs (2000). *1999 Korea natural disaster yearbook*, Ministry of Government Administration and Home Affairs, Seoul, Republic of Korea (in Korean).

National Research Council (2012). *Dam and levee safety and community resilience: A Vision for Future Practice*, The National Academies Press, Washington, DC, USA.

Ouyang, M. and Dueñas-Osorio, L. (2012). "Time-dependent resilience assessment and improvement of urban infrastructure systems." *Chaos*, Vol. 22, No. 3, p. 033122

Park, S. H., Kim, K. D., Shin, E. W. and Moon, Y. I. (2003). "A study on the development of discharge capacities of the existing dam." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 3B, pp. 157-164 (in Korean).

Park, S. J., Han, K. Y. and Choi, H. G. (2013). "Flood routing of sequential failure of dams by numerical model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1797-1807 (in Korean).

Pidgeon, N., Kasperson, R. E. and Slovic, P. (2003). *The social amplification of risk*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Rose, A. (2004). "Defining and measuring economic resilience to disasters." *Disaster Prevention and Management*, Vol. 13, No. 4, pp. 307-314.

Rose, A. and Liao, S. Y. (2005). "Modeling regional economic resilience to disasters: A Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions." *Journal of Regional Science*, Vol. 45, No. 1, pp. 75-112.

Timmermann, P. (1981). *Vulnerability, resilience and the collapse of society, No. 1 in environmental monograph*, Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Toronto, Canada.

Walker, B. H., Anderies, J. M., Kinzig, A. P. and Ryan, P. (2006). "Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: Introduction to the Special Issue." *Ecology and Society*, Vol. 11, No. 1.

World Meteorological Organization (2009). *Manual for estimation of probable maximum precipitation*, 3rd edition, WMO - No. 1045, Geneva.

Xu, N., Guikema, S. D., Davidson, R. A., Nozick, L. K., Çağnan, Z. and Vaziri, K. (2007). "Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, No. 2, pp. 265-284.

Yi, J. and Nam, D. S. (2007). "Determination of hydrological stability increase alternative for Andong multi-purpose reservoir using multi-criteria decision analysis." *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 53, pp. 93-110 (in Korean).

Zhou, H., Wang, J., Wan, J. and Jia, H. (2010). "Resilience to natural hazards: A Geographic Perspective." *Natural Hazards*, Vol. 53, No. 1, pp. 21-41.