

## 댐 붕괴 홍수로 인한 하류부 인명피해 예측

### Prediction of Loss of Life in Downstream due to Dam Break Flood

이 재 영\* / 이 종 석\*\* / 김 기 영\*\*\*

Lee, Jae Young / Lee, Jong Seok / Kim, Ki Young

#### Abstract

In this study, to estimate loss of life considered flood characteristics using the relationship derived from analysis of historical dam break cases and the factors determining loss of life, the loss of life module applying in LIFESim and loss of life estimation by means of a mortality function were suggested and applicability for domestic dam watershed was examined. The flood characteristics, such as water depth, flow velocity and arrival time were simulated by FLDWAV model and flood risk area were predicted by using inundation depth. Based on this, the effects of warning, evacuation and shelter were considered to estimate the number of people exposed to the flood. In order to estimate fatality rates based on the exposed population, flood hazard zone is assigned to three different zones. Then, total fatality numbers were predicted after determining lethality or mortality function for each zone. In the future, the prediction of loss of life due to dam break floods will quantitatively evaluate flood risk and employ to establish flood mitigation measures at downstream applying probabilistic flood scenarios.

**keywords** : dam break, loss of life, mortality function, flood risk

#### 요 지

본 연구에서는 기왕의 댐 붕괴 사례와 인명손실 결정인자들의 분석으로부터 유도된 상관관계를 이용하여 댐 붕괴 홍수파의 특성이 고려된 인명피해 예측을 위해 미국의 LIFESim 모형에 적용된 인명손실 모듈과 유럽연합에서 제시한 사망률 함수에 의한 인명손실 추정기법이 제시되었다. 극한홍수조건(PMF)하에서 댐 붕괴로 인한 대상지점의 수심, 유속 및 홍수도 달시간 등과 같은 홍수특성치는 1차원 수리학적 모형인 FLDWAV에 의해 모의되었으며 범람수심을 이용하여 홍수취약 지역을 예측하였다. 이를 바탕으로 경보, 대피 및 피난처에 대한 가능성을 고려함으로써 홍수위험에 노출된 인구수를 추정하였다. 이러한 홍수위험 노출인구에 대한 사망률(치사율)을 추정하기 위해 홍수위험지역을 상이한 지대로 세분하여 지대별 치사율 또는 사망률 함수를 결정하였으며 이로부터 최종적인 사망자수를 예측하였다. 본 연구를 통해 제시된 댐 붕괴 홍수의 인명피해 예측기법은 향후 확률론적 홍수 시나리오에 적용하여 하류부의 홍수위험도를 정량적으로 평가하고 저감대책을 수립하는데 활용될 수 있다.

**핵심용어** : 댐 붕괴, 인명피해, 사망률 함수, 홍수위험도

\* 교신저자, (주)신한 P&D 기술연구소 소장 (e-mail: vennard386@gmail.com, Tel: 82-31-718-0903)

Corresponding Author, Research Director, Research Institute, Shinhan P&D, Seongnam-si, Gyeonggi-do 463-020, Korea

\*\* 전북대학교 대학원 토목공학과 객원연구원 (e-mail: jslee@gmail.com)

Visiting Researcher, Graduate School of Civil Engineering, Chonbuk National University

\*\*\* 한국수자원공사 K-water 연구원 기반시설연구소 책임연구원 (e-mail: 0606kky@naver.com)

Principal Researcher, Infrastructure Research Center, K-water Institute

## 1. 서 론

일반 하천홍수와는 달리 댐 붕괴 홍수나 돌발홍수의 경우, 현저한 유속에 의해 하류부의 홍수와 도달시간이 짧고 급격한 수위상승으로 인해 막대한 인명피해를 발생시킨다. 지금까지 여러 연구를 통해 댐 붕괴로 인한 인명손실을 추정하기 위한 다양한 방법들이 제시되었으며 홍수 특성과 유역형태에 기인하여 여러 변수들이 중요한 결정인자로 작용할 수 있다는 사실을 보여주었다. 특히 대규모 댐 붕괴 홍수의 경우, 홍수파의 영향에 노출된 인구가 제한된 생존기회를 가질 때 경보시간은 매우 중요한 요소로 작용하고 대피는 인명피해 예측에서 결정인자이며 이것은 홍수에 노출된 인구를 감소시키는 역할을 할 수 있다. 따라서 홍수파의 특성, 경보 및 대피시간에 대한 국지적 변동은 하류부의 홍수발생 지역에 따라 사망자수의 차이를 가져올 수 있다. 이러한 댐 붕괴 홍수파에 의한 인명손실에 대한 연구는 McClelland and Bowles (2002)에 의해 기왕의 댐 붕괴 사례와 인명손실을 결정하는 인자들에 대한 포괄적인 분석이 수행되었으며 추정기법의 장점 및 한계를 검토하였다. Brown and Graham (1988)은 대피시간과 홍수위험 인구에 대한 함수로써 댐 붕괴에 따른 사망자수를 추정하기 위한 함수를 개발하였으며 DeKay and McClelland (1993)는 사망률이 높은 홍수와 낮은 홍수로 구별하여 인구크기와 대피가능 시간에 대한 함수로 상관관계를 제시하였다. 최근의 연구는 보다 세밀한 홍수조건에 대한 모의와 댐 붕괴 홍수발생 후의 위험인구의 개별적 행동에 초점을 두고 있다. Utah State University는 댐 붕괴 홍수에 대한 인명손실 추정을 위해 정량적 해석기법을 적용하여 LIFESim 모형을 개발하였다(McClelland and Bowles, 1999, 2002; Aboelata et al., 2003; Aboelata and Bowles, 2005). 본 모형은 홍수 및 유역특성, 경보 및 대피, 그리고 위험에 처한 인구 등을 나타내는 변수들에 대해 7가지 범주를 고려하여 사망률을 산정하였다. Jonkman (2007)은 기왕의 홍수사상을 분석하여 홍수방어시설의 파제로 발생하는 저지대 홍수로 인한 인명피해 추정 및 위험도 정량화에 대한 접근법을 제시하였다. 한편 국내의 경우, 다차원 홍수피해산정법(Ministry of Construction and Transportation, 2004)을 이용한 자산피해 중심으로 홍수피해 예측이 수행되어져 왔으며(Lee et al., 2006; Park et al., 2010; Lee et al., 2010), Lee and Noh (2003)는 수리학적 모형을 이용하여 예측된 홍수심에 의한 피해율의 불확실성을 고려하여 경제적 피해에 대한 불확실도를 검토하였다. 그러나 대부분의 홍수위험도에 대한 연구들이 정

제적 자산피해 중심으로 평가가 이루어져 왔으며 직접적 피해항목 중 인명피해추정은 과거 홍수피해 자료를 바탕으로 침수지역에 대한 단위면적당 인명손실율을 이용하여 사망자와 부상자를 개략적으로 산정하는데 그치고 있다. 또한 인명피해 규모에 직접적인 영향을 미치는 인구 밀도나 경보 및 대피효과를 고려한 실제적인 인명피해를 예측한 사례는 국내에 전무하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 미국의 HEC-FIA (USACE, 2012) 모형에 탑재된 단순화된 LIFESim 모듈에 적용된 인명손실(LOL: Loss of Life) 추정기법과 유럽연합에서 제시한 제방붕괴 홍수류에 따른 사망률 함수에 의한 인명손실 추정기법을 제시하고 국내 유역에 적용한 후 실무에 널리 이용되고 있는 다차원 홍수피해산정법(MD-FDA)의 결과와 비교하여 그 적용가능성을 검토하였다. 또한 보다 정확한 방법론 적용을 위해 GIS를 활용하여 홍수피해의 공간적 분포를 고려한 정량적인 접근법을 제시하고자 하였다.

## 2. 댐 붕괴 홍수파에 의한 인명피해 예측기법

### 2.1 인명손실의 결정요인

홍수발생에 의한 인명손실을 추정하기 위해서는 인명손실을 결정하는 인자들을 분석할 필요가 있다. 홍수의 시간적 지리적 상황의 차이에도 불구하고 기왕의 홍수사상에서 인명피해를 결정하는 주요인자들은 대체로 유사한 것으로 나타났다. 이에 이전 홍수피해 분석결과(Tsuchiya and Yasuda, 1980; Bern et al., 1993; McClelland and Bowles, 2002; Ramsbottom et al., 2003)에 근거하여 사망자수에 영향을 미치는 주요 인자들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 가장 많은 인명손실을 야기한 홍수사상은 효과적인 경보시스템이 없는 경우에 주로 발생한 것으로 나타났다. 많은 사상자를 발생시킨 홍수사상은 주로 야간에 발생하였으며 피해지역 인명에 대한 통보나 경보가 어려운 상황이었다.
- 2) 시기적절한 경보(warning) 및 대피(evacuation)는 인명손실을 줄이는 중요한 인자라는 것이 증명되었다.
- 3) 피난처의 가능성은 인명손실 규모를 결정하는 매우 중요한 요소이며 건물은 피난처로써 중요한 기능을 가지지만 피난처에 도달할 수 있는 가능성은 경보수준, 홍수심 및 수위상승률에 좌우된다.
- 4) 수심은 일종의 중요한 매개변수이며 수심이 증가함으로써 피난처의 가능성은 감소하고 저지대와 인구 밀집 지역의 위험도가 가장 크게 나타난다.

5) 깊은 수심과 빠른 수위상승율의 조합은 특히 위험한 요소이며 이러한 경우 건물의 더 높은 층과 피난처에 도달할 수 있는 시간이 짧고 건물내부에 고립될 수 있는 가능성이 있다.

6) 높은 유속은 건물의 붕괴와 심리적 불안감을 가져올 수 있다. 기왕의 홍수피해 사례(Waarts, 1992; Tsuchiya and Yasuda, 1980)에서 보듯이 많은 사상자가 유속이 빠를 때 제방 파제부나 붕괴된 방파제 뒤에서 발생하였다.

상기에 언급한 인자들은 인명손실의 중요한 결정요소이며 이러한 인자들의 국지적 변동은 단일 홍수사상내에서 상이한 위치에 따라 사망자수의 차이를 가져올 수 있다. 특히 상기 인자들의 부적절한 조합은 많은 사상자 발생에 기여할 수 있는 바 홍수발생 지역에서 사망률이 홍수특성과 경보 및 대피에 대한 가능성과 직결된다고 할 수 있다.

## 2.2 LIFESim 모형의 인명손실 모듈에 의한 방법

단순화된 LIFESim 방법론은 미육군공병단(USACE)의 홍수영향평가 모형인 HEC-FIA에 탑재된 인명손실 계산모듈으로써 댐 붕괴 위험도 평가에 널리 적용되고 있으며 계산절차는 경보시스템의 효율, 경보에 대한 반응, 그리고 대규모 인구대피에 대한 고려를 포함하고 있다. 본 모듈은 홍수발생후 안전한 장소로 대피하기 위해 개별 건물의 거주자에게 요구되는 시간을 제공하거나 침수구역별로 위험경계에 대한 정보를 제공한다. 이러한 정보를 바탕으로 건물에서부터 위험경계까지 최단 직선거리를 결정하며 대피하는데 소요되는 시간을 추정하기 위해 직선에 따른 공칭대피속도(nominal evacuation speed)를 적용하여 대피효율을 고려한다. 또한 건물까지의 홍수와 도달 시간은 1차원 수리해석 모형을 이용하여 예측된 단면별 수문곡선으로부터 근사화하여 산정될 수 있다. 주요 입력 변수인 경보발령시간(warning issuance time)은 공식 대피명령이 전파되는데 소요되는 시간으로 정의되며 월류나 파이핑과 같은 댐 붕괴모드에 따라 초기 붕괴부가 형성된 시점에 위험인구에 대한 대피경보가 발령되는 시간으로 나타낼 수 있다.

한편, 단순화된 LIFESim 모듈에서는 과거 홍수자료를 바탕으로 피난처의 가용성과 국지적 홍수심 및 유속간의 상호작용에 의해 인명손실율이 뚜렷이 다른 물리적인 홍수환경을 고려하여 가능지대(Chance Zone), 완충지대(Compromised Zone) 및 안전지대(Safe Zone)로 구분한 3개의 치사율 지대(lethality zone)로 정의하였으며(McClelland and Bowles, 2002) 지대별 확률적 분포에 근거한 사망률

을 이용하여 인명손실을 추정할 수 있도록 하였다.

이와같이 해당 건물에서 홍수위험인구(Population at Risk: PAR)의 대피결과에 따른 특정 치사율 지대의 지정은 그 건물에서의 최종 홍수심과 건물높이(FH)에 전적으로 근거하고 있다(Fig. 1). 이러한 건물의 높이를 포함함으로써 수직대피의 현저한 영향이 본 방법론에서 고려되었으며 추정과정을 단계별로 요약하면 다음과 같다.

- 1) 침수지역의 건물 인벤토리를 구축하고 건물별 거주인구를 추정한다.
- 2) 개별 건물에 대한 홍수와 도달시간을 수리학적 홍수 추적 모의결과를 이용하여 산정한다.
- 3) 댐 붕괴 홍수와 도달시간과 경보발령 시간간의 차이로부터 각 건물에 대한 경보시간을 계산한다. 이러한 경보시간은 개별 건물의 인구가 경보를 인지하고 이동하는데 소요되는 시간을 나타낸다.
- 4) 개별 건물로부터 홍수위험인구가 대피하는데 요구되는 시간을 계산하며 이것은 해당 건물로부터 안전한 경계지점(침수심 2ft 이하)까지의 거리를 공칭 대피속도로 나눔으로써 추정된다.
- 5) 경보반응곡선(Warning response curve)과 이동곡선(Mobilization curve)을 이용하여 홍수위험인구로부터 경보를 인식하고 대피하는 인구를 추정한다(Figs. 2 and 3).
- 6) 대피결과로부터 각 건물에 남아있는 잔류인구를 추정하고 건물높이와 예측된 홍수위를 고려하여 치사율 지대를 지정한다.
- 7) 개별 건물의 대피결과에 대한 사망률을 합산함으로써 각 건물의 잔류인구에 대한 전체 사망률을 계산한다.
- 8) 각 건물의 잔류인구에 각각의 사망률을 곱하여 개별 건물에 대한 인명손실 추정치를 계산하고 이를 합산함으로써 총 사망자수를 계산한다.

## 2.3 사망률 함수에 의한 인명손실 추정기법

홍수에 기인한 인명손실을 평가하기 위해서는 홍수의

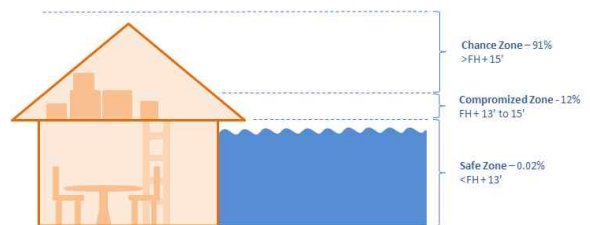


Fig. 1. Lethality Zone Based on Structure and Flood Depth (USACE, 2012)

수리학적 특성을 이해해야 할 필요가 있는데 이들은 소위 홍수시나리오에 의해 결정된다. 이러한 홍수시나리오는 홍수특성을 포함하여 홍수방어시스템에서의 단일 파제부 및 다중 파제부와 홍수가 발생한 양상과 관련된다. 인명 손실 추정을 위한 홍수특성들은 홍수심, 홍수위상승률, 유속 및 홍수도달시간 등을 포함한다. 여기서 홍수위 상승률은 시간에 따른 홍수심의 발달로부터 유도될 수 있으며 인명손실 추정과 관련하여 수심 1.5m까지 홍수발단 위치에서 평균 수위상승률 추정하는 것이 제시되었다. 홍수특성과 대피결과에 대한 분석 후에 홍수에 노출된 인구에 대한 사망률(mortality)을 결정하기 위해 사망률 함수( $F_D$ )를 도입하였으며 이것은 제방붕괴 홍수류로 인한 침수발생 지역에서 구분된 위험지구(hazard zone)에 따라 다르게 나타난다. 과거 홍수사상과 이전 연구(Waarts, 1992)의 결과에 근거하여 제방 붕괴부 후면과 수위급상승 지역에서 많은 인명피해가 발생하였다는 사실을 발견하였다.

Jonkman (2007)은 저지대를 보호하는 홍수방어시설의 붕괴부에 대해 전형적인 세 위험구역인 붕괴부 지구(breach zone), 수위급상승 지구(rapidly rising waters zone), 그리고 잔여침수지구(remaining zone)로 구분하였다(Fig. 4).

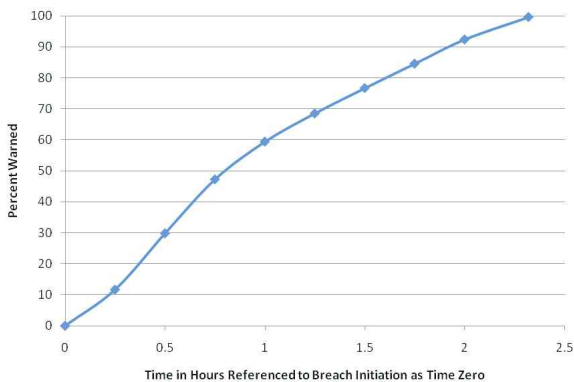


Fig. 2. Warning Response Curve (USACE, 2001)

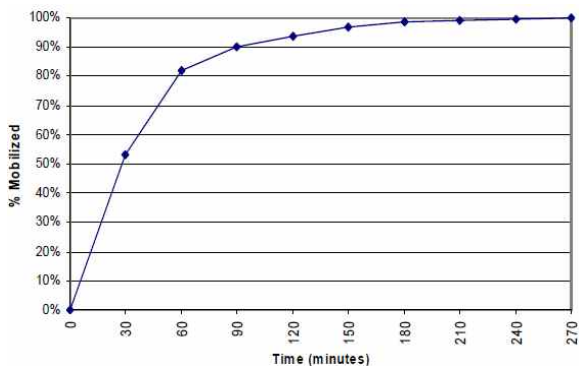


Fig. 3. Mobilization Curve (Duclos et al., 1989)

Fig. 5에서 나타난 바와 같이 구분된 위험지구는 홍수특성(수심, 수위상승률, 유속 등)과 유역특성(피난처 유무)이 상대적으로 균일하게 가정될 수 있는 지역으로 정의되었으며 위험지구별 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 붕괴부 지구: 홍수방어시설의 붕괴부를 통한 홍수류 유입으로 빠른 유속이 일반적으로 붕괴부 후면에 발생하며 건물의 붕괴와 흐름에 저항하는 위험인구의 불안정 상태를 야기시킴.
- 2) 수위급상승 지구: 빠르게 상승하는 홍수위로 위험인구는 더 높은 지대나 고층의 피난처에 도달할 수 없으며 더 깊은 수심과의 조합으로 건물내 인구의 위험도가 증가함.
- 3) 잔여침수지구: 보다 상시적인 홍수조건으로 위험인구가 피난처를 찾을 가능성이 증가하며 사망자는 피난처를 찾지 못하거나 위험인구의 건강상태에 의해 발생할 수 있음.

이러한 위험지구의 상황 및 해당면적은 홍수형태별로 상이하게 나타날 수 있으며 좁은 협곡에서의 댐 붕괴 홍수파의 경우, 높은 유속과 관련된 위험지구는 훨씬 넓게 나타날 수 있다.

붕괴부 지구에 대한 사망률과 국지적 홍수특성간의 경험적 상관관계를 나타내는 자료는 아직까지 유용하지 않다. 일반적으로 위험인구의 심리적 불안정 상태와 건물에

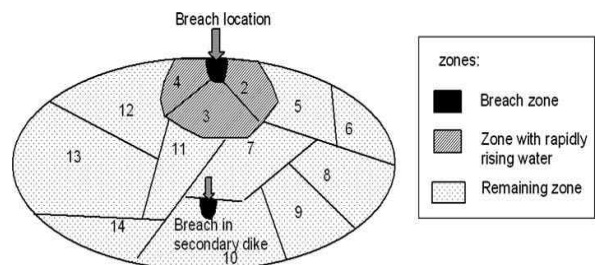


Fig. 4. Hazard Zones in Mortality Estimation (Jonkman, 2007)

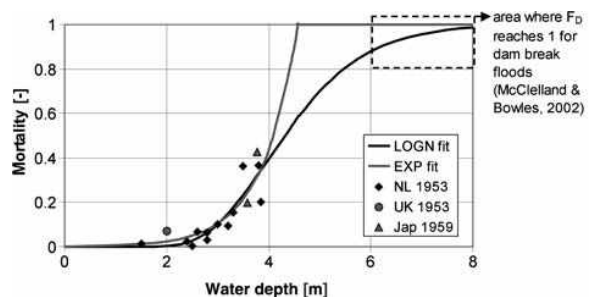


Fig. 5. Mortality Function for the Zone with Rapidly Rising Water (Jonkman, 2007)

대한 피해는 모두 수심-유속의 곱에 대한 함수로써 추정될 수 있다. Clausen (1989)은 흐름조건에서 건물의 피해에 대한 기준을 제시하였으며 건물의 붕괴는 다음의 기준을 초과할 경우에 발생한다고 가정하였다.

$$hv \geq 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{and} \quad v \geq 2 \text{ m/s} \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 홍수심,  $v$ 는 유속을 나타낸다. 홍수기간 동안 대부분의 위험인구가 건물 내부에 남아있고 건물붕괴시 생존가능성이 없다고 가정하면 붕괴부 지구에서의 사망률은  $F_D=1$ 과 같다고 가정할 수 있다.

수위급상승 지구는 홍수위상승률( $\omega$ )이  $0.5 \text{ m/h}$  이상으로 나타나고 Fig. 5에서와 같이 기왕의 유럽 및 일본에서 발생한 대표적인 홍수사상에 대한 수심과 사망률간의 상관관계로부터 Eq. (2)와 같은 대수정규분포 형태의 함수로 유도될 수 있으며 이때 홍수조건 범위는 Fig. 7에서 제시된 바와 같이 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다.

$$F_D(h) = \Phi_N \left( \frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 1.46 \quad \sigma_N = 0.28 \quad (2)$$

$$(h \geq 2.1 \text{ m} \quad \text{and} \quad \omega \geq 0.5 \text{ m/h}) \quad \text{and} \quad (hv < 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{or} \quad v < 2 \text{ m/s}) \quad (3)$$

여기서,  $\Phi_N$ 는 누가정규분포,  $\mu_N$ 은 정규분포의 평균이며  $\sigma_N$ 은 정규분포의 표준편차를 나타낸다.

한편, 잔여침수지구는 붕괴부 지구 및 수위급상승 지구 외부의 사망지수를 고려하여 구분되며 수위상승률은  $0.5 \text{ m/h}$  이하로 나타난다. Fig. 6과 같이 일본(1934, 1950, 1959), 네덜란드(1959) 및 영국(1953), 미국(1965)에서 발생하였던 기왕의 6개 홍수사상에 대한 수심과 사망률간의 상관관계로부터 Eq. (4)와 같이 대수정규분포의 형태로

사망률 함수가 유도되었으며 이때 홍수조건 범위는 Fig. 7에서 제시된 바와 같이 Eq. (5)로 나타낼 수 있다.

$$F_D(h) = \Phi_N \left( \frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 7.60 \quad \sigma_N = 2.76 \quad (4)$$

$$\omega < 0.5 \text{ m/h} \quad \text{or} \quad (\omega \geq 0.5 \text{ m/h} \quad \text{and} \quad h < 2.1 \text{ m}) \quad \text{and} \quad (hv < 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{or} \quad v < 2 \text{ m/s}) \quad (5)$$

### 3. 인명피해 예측기법의 적용

#### 3.1 댐 붕괴 홍수파의 하류부 홍수추적

가상의 댐 붕괴 시나리오하에서 하류부 대상지점의 수심, 유속 및 홍수도달시간 등과 같은 홍수특성치를 예측하기 위해 1차원 수리학적 모형인 FLDWAV (Fread and Lewis, 1998)를 이용하여 국내 댐 유역에 대한 모의를 수행하였다. 대상 댐의 제원은 높이 123m, 길이 530m의 중심코

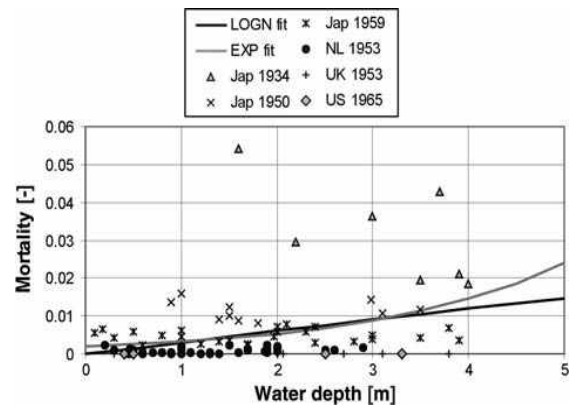


Fig. 6. Mortality Function for the Remaining Zone (Jonkman, 2007)

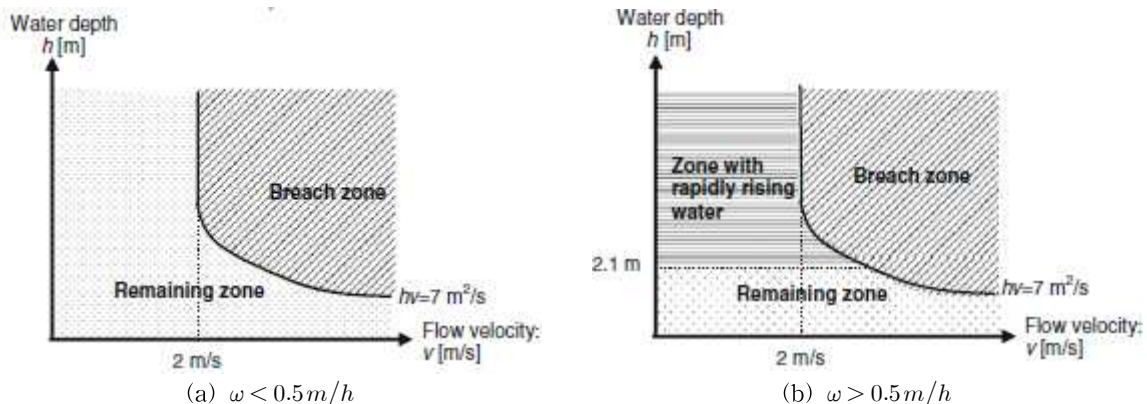


Fig. 7. Area of Application of Mortality Functions for Flood Condition (Kok et al., 2005)

어형 사력댐으로 댐 유역면적은 2,703 km<sup>2</sup>, 총 저수용량은 2,900백만m<sup>3</sup>이다. 본 연구에서는 댐 붕괴의 다양한 시나리오 가운데 극한홍수조건(PMF)하에서 월류로 인한 제체 파괴를 고려하였으며 붕괴조건은 기존 연구결과(USACE, 2007; Park et al., 2013)를 토대로 붕괴부 폭, 붕괴부 측벽면 경사 및 붕괴지속시간의 변화를 고려하여 대표적인 단일 시나리오로 가정하였다. 즉, 붕괴부 평균 폭을 제체 높이와 동일하게 설정하고 붕괴지속시간은 0.5시간, 붕괴부 측벽면 경사를 1.0으로 가정하여 댐 붕괴모의를 수행하였다. 또한 댐 붕괴 홍수파의 하류부 홍수추적을 위해 댐으로부터 하류부 20.51 km 하도구간에 대한 단면을 구성하여 모의에 적용하였다(Fig. 8). 이는 대상구간 하류단 인근에 홍수조절용 댐이 위치하고 있어 해당 저수지의 계획홍수위 영향을 받는 구간이므로 이를 하류단 경계로 설정하였다. 대상구간의 총 하도단면수는 37개로 단면간의 평균거리는 0.5km이며 입력 하도단면은 하천정비기본계획(Ministry of Construction and Transportation, 2002)상의 횡단자료에 근거하여 주하도 뿐만 아니라 좌우 홍수터까지 고려하여 주수로, 홍수터, 저류부 및 사수역 부분을 추출하여 계산 하도단면으로 구성하였다. 또한 계산시간 간격은 0.1시간, 전체 모의시간은 90시간으로 수행되었다.

상류단 경계조건은 댐 상류 저수지의 유입수문곡선(PMF)을 적용하였고(Fig. 9) 하류단 경계조건으로는 하천정비 기본계획상의 적용 설계빈도인 최대 500년 빈도의 계획홍수위를 적용하였다. 여기서 합류부 상류의 분류유량은 댐 붕괴 홍수량 규모에 비해 상대적으로 작은 유량이므로 본 모의수행에서는 무시하였다.

극한홍수조건(PMF) 시나리오하에서 댐 붕괴 모의수행 결과, 저수지 홍수추적 후 유도된 댐 지점에서의 붕괴유출 수문곡선은 Fig. 10에 나타내었고 하류부 홍수추적 결과로써 주요 지점별 유량수문곡선과 최고수위의 변화양상은 Figs. 11 and 12에 각각 나타내었다. 대상구간의 침투 유량은 댐 직하류부에서 169,578 cms, 댐 하류부 도심지(NO. 24)에서는 145,610 cms, 대상 하도구간 하류단(NO. 36) 부근은 143,290 cms로 각각 나타났으며 이때 최고홍수위는 댐 직하류부에서 EL. 123.55 m, 댐 하류부 도심지는 EL. 86.25 m, 대상 하도구간 하류단은 EL. 75.33 m로 각각 산정되었다. 또한 댐 붕괴시 하류부 도심지(NO. 24)까지 홍수파 도달시간은 약 2.0시간 이내이며 대상 하도구간 하류단(NO. 36)까지는 2.4시간 정도가 소요되는 것으로 나타났다. 이러한 수리학적 모형의 모의결과로부터 하류부 제방월류 지점을 분석한 후 GIS 기법을 이용하여 홍수범람

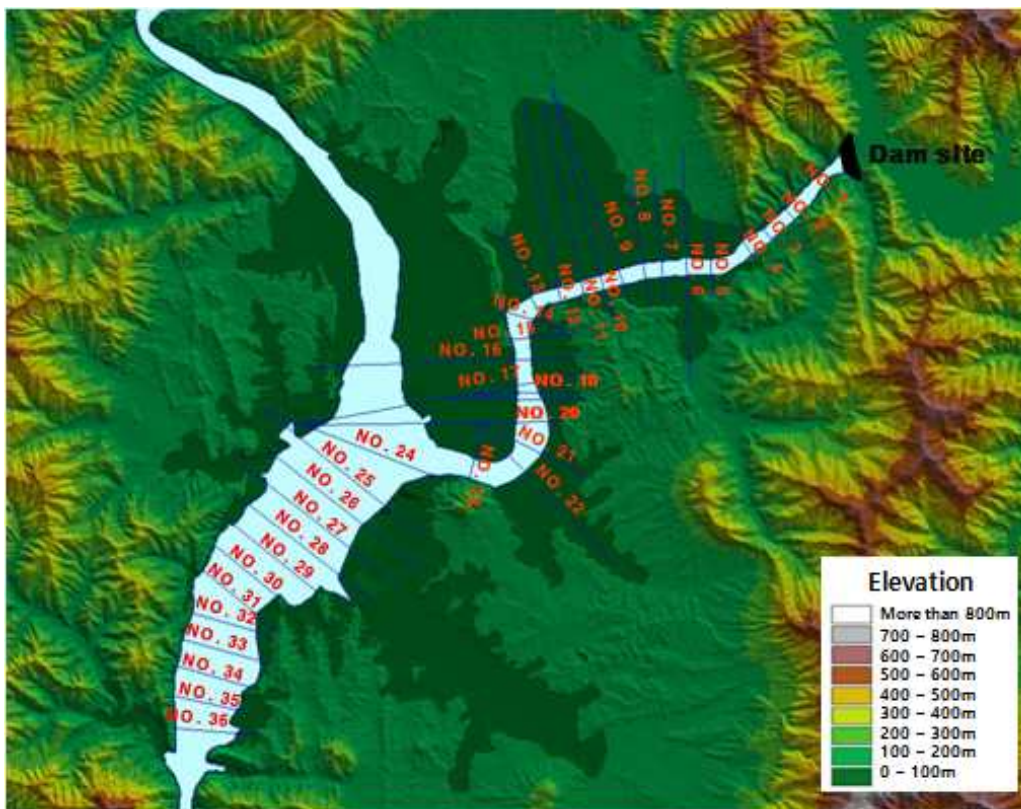


Fig. 8. Cross Sections of the Study Reach

도를 작성함으로써 홍수취약지역을 예측할 수 있었다(Fig. 13). Fig. 13에서와 같이 댐 붕괴 홍수로 인한 범람지역을 행정구역별로 A~H까지 구분하여 침수구역별로 홍수특성

치를 예측하였으며 이를 하도단면을 기준으로 해당지역의 수리특성치를 보간 추출하였다.

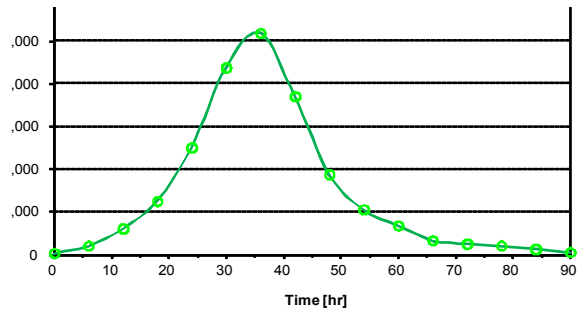


Fig. 9. Inflow Hydrograph

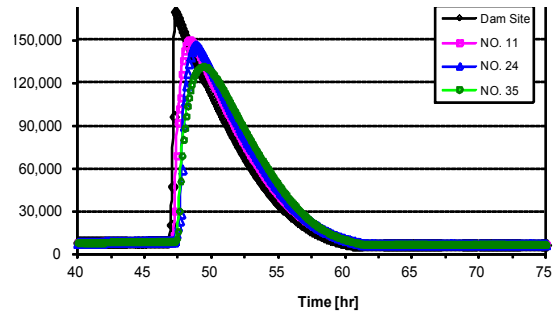


Fig. 11. The Simulated Discharge Hydrograph

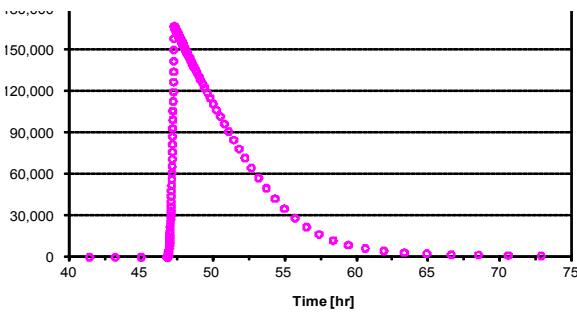


Fig. 10. Breach Outflow Hydrograph

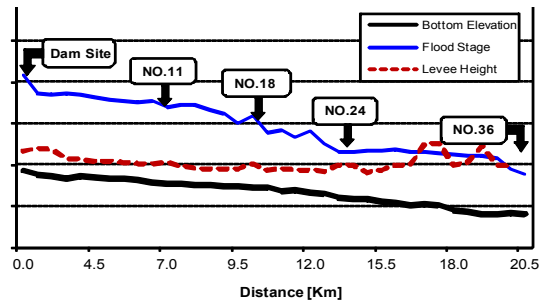


Fig. 12. The Simulated Maximum Water Elevation Profile

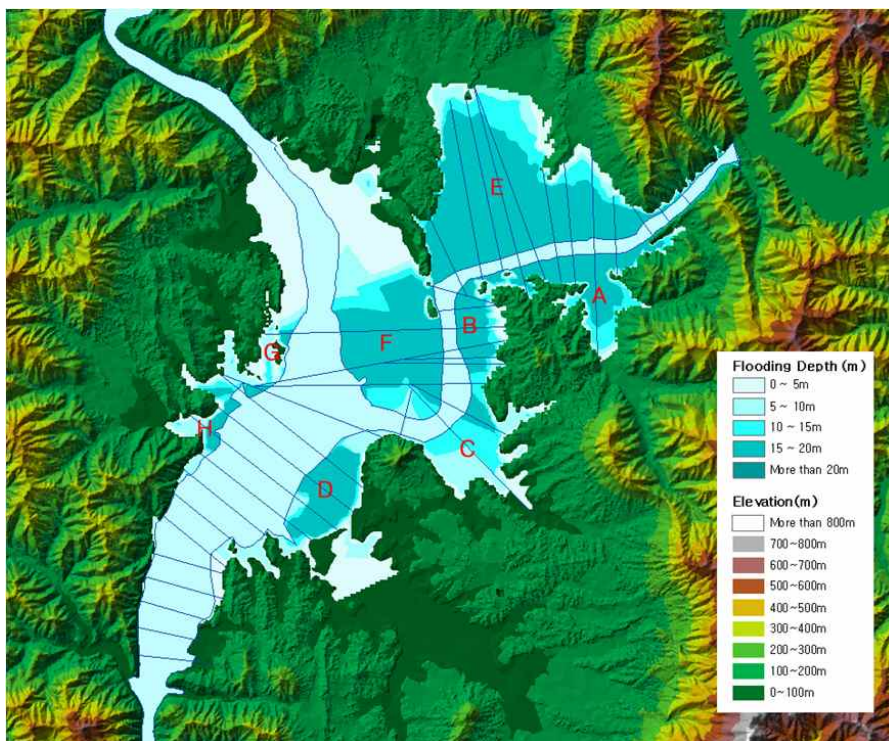


Fig. 13. Flood Inundation Map

### 3.2 댐 붕괴 홍수파에 따른 하류부 인명피해 예측

1차원 수리학적 모형으로부터 예측된 홍수특성치와 홍수범람도를 바탕으로 해당 침수지역의 인명피해를 추정하기 위해 미국의 단순화된 LIFESim 모듈에 적용된 인명손실 추정기법과 유럽연합에서 제시된 사망률 함수에 의한 인명손실 추정기법을 적용하였다. 침수지역의 홍수위협인구(PAR)를 추정하기 위해 지리정보시스템을 이용하여 읍면동 단위의 주택 및 인구통계자료(Statistics Korea, 2010)를 바탕으로 건물형태(주택, 상가, 아파트 등)별로 인벤토리를 구축하여 건물별 평균 거주인구를 추정한 후 수리학적 모형으로 예측된 홍수특성치(수심, 유속, 홍수도달시간 등)를 바탕으로 경보, 대피 및 피난처에 대한 가능성을 고려함으로써 홍수위협에 노출된 인구수를 추정하였다. 또한 FLDWAV 모형으로부터 예측된 댐 붕괴가 시작되는 시간(46.84 hr)을 경보발령시각으로 가정하여 지점별 홍수도달시간과의 차이를 경보시간으로 설정하였다. HEC-FIA 모형에서 설정된 바와 같이 최대 침수심이 0.6 m (2ft) 이하인 지역을 안전한 위치로 가정하여 건물 인벤토리별 안전경계거리를 각각 산정하였으며 대피속도를 노약자의 평균도보속도(0.47 m/s)로 가정(Hong et al., 2010)하여 나뉘므로써 대피소요시간을 산정하였다. 또한 경보 및 대피효율을 고려하기 위해 경보시간에서 실제 대피소요시간을 뺀 유효시간별 경보반응률 및 대피율을 Figs. 2 and 3으로부터 각각 산정하고 홍수발생 후 건물에 남아있는 잔류인구를 추정하였다. 여기서 5층 이상의 고층아파트인 경우, 수직대피속도가 빠른 점을 감안하여 대피효율을 100%로 가정하였다.

단순화된 LIFESim 알고리즘을 적용하여 홍수발생 후

이러한 잔류인구로부터 사망률을 추정하기 위해 홍수위협지역을 행정구역별로 총 8개의 소유역(A~H)으로 그룹화하였으며 침수지역별 건물의 평균높이와 최종 침수심을 기준으로 치사율 지대를 설정하여 지대별 사망률을 건물형태별 대피결과를 고려하여 결정한 후, 행정구역별로 그룹화하여 최종 사망자수를 추정하였다. 한편, 사망률 함수에 의한 인명추정기법의 경우, 구간별로 예측된 홍수특성치(홍수심, 수위상승률 및 유속 등)를 바탕으로 홍수위협지역을 상대적으로 균일하게 가정될 수 있는 지구로 세분하여 지구별 사망률 함수를 결정하였으며 경보 및 대피효율을 고려한 홍수위협지역의 잔류인구를 추정하고 이로부터 최종적인 사망자수를 예측하였다. Table 1은 홍수위협지역의 위험인구 및 잔류인구에 대한 현황과 모의된 홍수조건에 의해 분류된 치사율 지대 및 위험지구를 나타낸다. 대상구간의 전체 홍수위협인구는 53,809명이며 경보 및 대피의 효과를 고려한 건물 내의 최종 잔류인구는 3,375명인 것으로 예측되었다.

한편, Table 2는 인명손실 추정기법의 모의결과를 나타내었으며 국내의 홍수피해 산정시 널리 적용되고 있는 다차원 홍수피해산정법(MD-FDA)의 결과와 비교하였다. 다차원 홍수피해산정법은 직접피해 항목 중 인명피해(사망자수)를 산정하기 위해 홍수피해주기를 중소도시의 경우인 1.73년(National Emergency Management Agency, 2010)을 적용하고 침수면적에 대한 단위면적당 인명손실값을 적용하였다.

Table 2에서 나타난 바와 같이 미국의 LIFESim 모듈에 의한 인명손실 추정기법과 유럽연합의 사망률함수에 의한 인명손실 추정기법으로부터 예측된 홍수위협지역의 총사망자수는 각각 2,586명, 2,790명으로 나타나 유사

Table 1. The Flood Hazard Zone due to Dam Break

Inundation Area	PAR (Population at Risk)	Stayed People	Flood Depth (m)	Velocity (m/s)	Water Rise Rate (m/h)	Flood Arrival Time (hr)	Zone Classification	
							Lethality Zone	Hazard Zone
A	628	252	10.0-20.0	5.70-10.31	3.1-18.7	0.30-0.95	Chance	Breach-Rising
B	3,032	533	5.1-10.0	6.00-10.79	0.9-17.8	1.0-1.62	Chance	Rising
C	10,275	184	3.7-7.1	3.40-7.84	0.2-4.1	1.70-1.85	Chance	Rising-Remaining
D	8,339	189	1.8-6.1	1.21-5.07	0.3-3.6	1.85-2.05	Compromised	Remaining-Rising
E	7,391	1,063	15.0-20.0	6.04-10.26	1.7-21.3	0.40-1.10	Chance	Breach-Rising
F	21,034	1,045	5.2-10.5	4.65-10.59	0.6-7.4	1.20-1.85	Chance	Rising
G	622	33	2.0-8.3	1.86-6.64	0.2-2.8	1.35-1.85	Compromised	Remaining
H	2,488	76	1.8-7.5	1.32-3.71	0.2-5.4	1.91-2.0	Compromised	Rising-Remaining
Sum	53,809	3,375						



Table 2. The Estimation of Loss of Life at Downstream of the Dam

Inundation Area	Distance to Safe Boundary (m)	Evacuation Time (hr)	Warning Time (hr)	Warning Response Rate (%)	Mobilization Rate (%)	Loss of Life		
						LIFESim	Mortality Function	MD-FDA
A	210-374	0.20-0.22	1.14-1.21	65.0-67.5	77.3-82.4	125	137	9
B	86-605	0.03-0.35	1.46-2.30	75.3-98.5	90.0-95.1	389	489	6
C	102-480	0.07-0.12	2.34-2.38	99.2	94.8-95.3	156	121	9
D	64-781	0.02-0.32	2.41-2.60	100.0	95.2-97.5	53	37	7
E	245-1,195	0.07-0.71	1.01-1.66	60.1-81.0	64.3-87.5	888	976	32
F	618-1,764	0.18-1.04	1.76-2.41	84.7-100.0	83.5-93.5	950	1,013	24
G	205-566	0.12-0.33	2.41-2.47	100.0	93.8-95.6	4	1	5
H	61-226	0.05-0.12	2.51-2.61	100.0	96.5-97.6	21	16	3
Sum						2,586	2,790	95

한 결과를 얻을 수 있었으며 경보 및 대피의 효과를 고려한 사망자수의 공간적 분포를 예측하였다. 그 결과 댐에서 가까운 상류부 주거지(E 유역)의 사망자수가 크게 나타났으며 이는 하도폭이 좁아 홍수저류의 효과가 적고 댐 붕괴로 인한 홍수도달시간이 짧은 반면, 주거지로부터 피난처까지의 거리가 멀어 대피효율이 떨어지는 것으로 판단되었다. 특히 인구밀도가 높은 하류부 도심지의 경우(F 유역), 고층아파트의 대피효율이 높은 점을 감안하더라도 상대적으로 많은 사상자수가 발생하였으며 주로 하도 합류부의 제내지에 집중된 것으로 나타났다. 이는 주택 및 상가를 포함한 일반건물로부터 피난처까지의 거리가 멀어 대피소요시간이 길어져 홍수노출인구가 경보에 대응할 시간이 부족하기 때문인 것으로 판단되었다. 또한 기존의 다차원법에 의한 인명피해 예측치와 비교한 결과 다차원법의 사망자 추정치가 과소하게 나타나고 있는 바, 이러한 결과는 다차원법이 침수면적과 홍수피해주기, 단위면적당 인명손실(과거 30년 자료이용)에 의해 개략적으로 산정되므로 침수지역별 인구밀도 및 극한홍수자료가 제대로 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 댐 붕괴에 따른 하류부 인명피해를 정량적으로 예측하기 위해 인명손실 추정기법들을 제시하고 국내 댐 붕괴 홍수시나리오에 적용하였다. 제시된 방법론들은 미국의 HEC-FIA 모형에 탑재된 LIFESim 모듈과 유럽연합의 사망률함수에 의한 인명손실 추정기법이며 1차원 수리학적 모형을 이용한 극한홍수조건하의

댐 붕괴 홍수추적 모의를 통해 댐 하류부 구간의 홍수특성치와 제방고를 월류하는 홍수범람지역들을 예측하였다. 이를 바탕으로 읍면동 단위의 주택 및 인구통계자료를 활용하여 건물인벤토리를 구축하고 홍수취약지역의 위험인구를 산정한 후 경보 및 대피의 효과를 고려한 인벤토리별 잔류인구를 추정하여 사망자수의 공간적 분포를 정량적으로 예측하였다. 이로부터 인구밀도 및 홍수예경보의 효과를 고려한 실제적인 인명피해를 추정할 수 있었으며 GIS를 활용하여 잔류인구 및 대피효율과 같은 위험지역내의 대피결과를 예측할 수 있었다. 그 결과, 인구밀도가 높은 하류부 도심지의 사망자수가 크게 발생하였으며(최대 1,013명) 하천 합류부의 제내지에 집중된 것으로 나타났다. 이는 고층아파트의 높은 대피효율에도 불구하고 일반 건물로부터 피난처까지의 대피소요시간이 길어져(최대 1.04시간) 홍수노출인구가 경보에 대응할 시간이 부족한 것으로 판단된다. 아울러 상류부 주거지에서도 많은 사상자(최대 976명)가 발생하는 것으로 나타나 이는 하도폭이 좁아 홍수저류의 효과가 적고 댐 붕괴로 인한 홍수도달시간이 0.4~1.1 시간으로 짧은 반면, 대피소요시간(최대 0.71시간)이 길어 경보시간(1.01~1.66시간)이 짧아지므로 최종적으로 홍수에 노출되는 인구가 증가하기 때문인 것으로 판단되었다.

또한 국내의 기존 홍수피해 분석기법인 다차원법과 비교한 결과, 주거지역의 인구 및 건물의 밀도가 고려되지 않고 극한홍수사상이 반영되지 않은 홍수피해주기를 이용하는 한계로 인해 다차원법의 사망자 추정치는 총 93명으로 과소하게 나타남을 알 수 있었으며 LIFESim 모듈과 사망률 함수에 의한 인명피해 모의결과는 각각 2,586명과

2,790명으로 서로 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 이는 제시된 방법론들이 댐 붕괴에 따른 하류부 범람지역의 홍수특성치와 인구밀도 및 대피효과를 고려한 실질적인 인명피해 추정에 따른 결과이며 극한홍수사상을 반영한 합리적인 홍수위험도의 결과라고 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제시된 홍수피해 예측기법은 기존의 치수경제성 분석이나 비상대처계획(EAP) 수립시보다 효과적이고 정확한 인명피해 예측과 정량적인 홍수위험도 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며 향후, 확률론적 홍수 시나리오를 적용하여 댐 하류부의 홍수위험도를 정량적으로 평가하고 홍수저감 대책을 수립하는데 필요한 근거 자료로 제시될 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C02)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### References

- Aboelata, M.A., and Bowles, D.S. (2005). *LIFESim: A Model for Estimating Dam Failure Life Loss. Institute for Dam Safety Risk Management*. Utah State University, Logan, Utah.
- Aboelata, M.A., Bowles, D.S., and McClelland, D. (2003). *A model for estimating dam failure life loss*. Launceston, Tasmania, Australia.
- Bern, C., Sniesek, J., Mathbor, G.M., Siddiqi, M.S., Ronsmans, C., Chowdhury, A.M.R., Choudhury, A.E., Islam, K., Bennish, M., Noji, E., and Glass, R.I. (1993). "Risk factors for mortality in the Bangladesh cyclone of 1991." *Bull WHO* Vol. 71, pp. 73-78.
- Brown, C.A., and Graham, W.J. (1988). "Assessing the threat to life from dam failure." *Water Resour Bull*, Vol. 24, No. 6, pp. 1303-1309.
- Clausen, L.K. (1989). *Potential dam failure: estimation of consequences, and implications for planning*. Unpublished M. Phil. thesis at the School of Geography and Planning at Middlesex Polytechnic collaborating with Binnie and Partners, Redhill.
- DeKay, M.L., and McClelland, G.H. (1993). "Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood." *Risk Anal*, Vol. 13, No. 2, pp. 193-205.
- Duclos, P., Binder, S., and Riester, R. (1989). "Community evacuation following the Spencer Metal Processing Plant fire." *Nanticoke, Pennsylvania. Journal of Hazardous Materials*, Vol. 22, pp. 1-11.
- Fread, D.L., and Lewis, J.M. (1998). *NWS FLDWAV Model*. NWS Report, Hydrological Research Laboratory, NWS Office of Hydrology, NWA, Silver Spring, MD.
- Hong, H.R., Kim, D.E., Seo, D.G., Hwang, H.B., and Kwon, Y.J. (2010). *A Study on the Horizontality Walking Speed of Community for Safe Evacuation of the Aged*. Proceedings of 2010 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 311-316.
- Jonkman, S.N. (2007). *Loss of life estimation in flood risk assessment-theory and applications*. Ph.D. thesis, Delft University.
- Kok, M., Huizinga, H.J., Vrouwenvelder, A.C.W.M., and van den Braak, W.E.W. (2005). *Standaardmethode 2005 schade en slachtoffers als gevolg van overstroomingen*. HKV report PR999.10.
- Lee, C.S., Lee, H.G., Jang, S.P., and Kim, J.B. (2010). "Levee Overflow Risk based Flood Damage Analysis using Bayesian MCMC." *Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 10, pp. 55-61.
- Lee, J.S., and Noh, J.W. (2003). "The Impact of Uncertainty in the Predicted Dam Breach Floods on Economic Damage Estimation." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 343-350.
- Lee, K.H., Choi, S.A., Kim, H.S., and Shim, M.P. (2006). "Application of Multi-Dimensional Flood Damage Analysis." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 4B, pp. 363-369.
- McClelland, D.M., and Bowles, D.S. (1999). *Life-loss estimation: what can we learn from case histories*. In: Proceedings of the Australian committee on large dams (ANCOLD) annual meeting. Jindabyne, November 1999.
- McClelland, D.M., and Bowles, D.S. (2002). *Estimating life loss for dam safety risk assessment-A review and new approach*. IWR report 02-R-3.
- Ministry of Construction and Transportation (2002). The basic plan of stream-improvement for Bukhan River

- watershed.
- Ministry of Construction and Transportation (2004). A study on methodology of economic analysis for the flood control project.
- National Emergency Management Agency (2010). Natural disaster prone areas administrative guideline.
- Park, J.Y., Joh, H.G., Jung, I.K., Jung, K.S., Lee, J.H., Kang, B.S., Yoon, C.J., and Kim, S.J. (2010). "Modeling Downstream Flood Damage Prediction Followed by Dam-Break of Small Agricultural Reservoir." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 6, pp. 63-73, November.
- 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.
- Ramsbottom, D., Floyd, P., and Penning-Rowsell, E. (2003). *Flood risks to people-phase 1*. R&D Technical report FD2317TR.
- Statistics Korea (2010). 2010 Population and Housing Census.
- Tsuchiya, Y., and Yasuda, T. (1980). "High tide and life risk, refuge warning in relation to the Ise Bay Typhoon." *J Nat Disaster Sci* Vol. 2, No. 2, pp. 27-60.
- USACE (2007). *Risk Assessment for Dam Safety*. Dam Failure Analysis Toolbox, September.
- USACE (2012). *HEC-FIA, Flood Impact Analysis User's Manual-Version 2.2*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Waarts, P. (1992). *Methode voor de bepaling van het aantal doden als gevolg van inundatie*. Report TNO B-91-1099.

논문번호: 14-056	접수: 2014.07.03
수정일자: 2014.09.05/09.22	심사완료: 2014.09.22