

## HEC-FDA 모형을 이용한 홍수피해 저감계획

이종소 · 김덕환 · 김정욱 · 한대건 · 김형수<sup>†</sup>

인하대학교 토목공학과

### Flood Damage Reduction Plan Using HEC-FDA Model

Jongso Lee · Duckhwan Kim · Jungwook Kim · Daegun Han · Hung Soo Kim<sup>†</sup>

Department of Civil Engineering, Inha University

(Received: 27 May 2015, Revised: 22 July 2015, Accepted: 22 July 2015)

#### 요약

본 연구에서는 홍수량과 홍수위 산정 및 치수경계성 분석을 함께 있어 본질적으로 내재되어 있는 불확실성에 대한 고려를 분석에 포함하여 피해발생확률을 추정하고자 하였다. 이를 위하여 섬강유역을 대상유역으로 선정하였고 각 홍수량 산정지점에서의 빈도별로 임계지속시간 개념을 사용하여 빈도별 확률강우량을 산정하였다. 유역내 8개구간을 대상으로 연 피해 기대치, 연 초과확률, 장기간 위험도, 조건부 비초과확률 등을 계산하기 위해 HEC-FDA를 이용하여 유량-빈도, 수위-유량, 침수심-피해액 함수를 구축 하였으며 불확실성이 고려된 함수들로부터 500,000번 이상의 모의발생을 통하여 표본 추출한 자료를 바탕으로 연 피해 기대치를 구하였다. 여러 가지 설계빈도의 제방을 계획하여 이에 대한 평가를 수행하여 적정 빈도나 투자우선순위에 대한 결과를 산정하였다. 분석결과 불확실성을 고려할 경우 B/C값이 12%정도 증가됨을 알 수 있었으며, 적정 빈도나 투자우선순위 등도 바뀔 가능성이 있었다. 실제 홍수피해 저감계획시 경제적인 분석이외에 정치적, 사회적인 분석을 함께 수행한다면 보다 합리적인 결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : HEC-FDA, 홍수피해, 비용-편익비, 불확실성

#### Abstract

This study is estimated the flood damage probability of the flood discharge, the flood stage estimation and Economic Analysis for Flood Control about considering of uncertainty. Sum River Basin has chosen and the probability precipitation is estimated by using the concept of critical rainfall duration depending on the frequency of each flood stage estimation point. For calculating the expected annual damage, the functions of long term hazard, discharge-frequency, stage-discharge and depth-damage are established for 8 areas in Sum River Basin. The expected annual damaged is obtained which is based on the sampling informations through more than 500,000 simulation from the functions of considered uncertainty. The result about the optimum frequency and Investment Priorities are estimated by conducting the evaluation about planning the levee of various of Design Frequency. In analysis result, 12% of B/C value has increased if the uncertainty has concerned. Also the optimum frequency or Investment Priorities are possible to be changed. If the political and social analysis perform together it would be helpful to have a reasonable decision other than only the economical analysis as actual Flood damaged reduction planning.

Key words : HEC-FDA, Flood Damage, B/C, Uncertainty

## 1. 서 론

최근 기후변화 영향에 따라 대규모 인명피해 및 재산피해를 유발하는 자연재난이 지속적으로 증가 하는 추세에 있으며 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제 4차 평가보고서(2007) 에 따르면 우리나라의 경우, 기후변화로 인한 극한 기상의 발생패턴이 변화하게 되

어 홍수, 폭염, 폭한등의 기상이변이 앞으로 더욱 심각해질 것으로 예상하고 있다. 이와 같은 상황에서 현재와 장래의 상황을 정확히 예측하여 홍수에 대하여 계획하고 설계한다는 것은 쉬운일이 아닐 것이다. 이는 현재와 장래에 대한 여러 가지 복합적인 불확실성이 존재하기 때문이다.

홍수방어를 위한 대책을 수립할 때 불확실성에 대한 고려는 통상적으로 경험적인 방법에 의존하여 왔다. 즉, 홍수위를 계산하고 여기에 경험적인 안전율인 여유고를 부여함으로써 불확실성을 고려한 제방의 높이를 결정하였던 것이다. 그러나 1990년대 들면서 불확실성에 대한 이론과 컴퓨

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
Department of civil engineering, Inha University  
E-mail: sookim.inha.ac.kr

터의 발달로 수리-수문학적 혹은 경제학적 불확실성 및 모형이나 확률분포형의 매개변수에 관한 불확실성 등을 설명할 수 있게 되었다. Binley et al. (1991)은 물리적 기반 모델의 불확실성평가를 수문학에 적용을 하였고, Davis(1991)은 위험과 불확실성을 제방에 적용하여 연구를 진행하였다. US Army Corps of Engineers (1996)에서는 HEC-FDA (Flood Damage Analysis)라는 프로그램을 이용해 불확실성을 고려한 홍수피해 분석을 수행하여 홍수피해 경감 대책을 수립하였으며, Clarke (1999)는 불확실성을 고려한 연평균 강우량을 추정하여 rating-curve에 적용을 하였다. 또한 National Research Council (2000)에서 불확실성을 고려한 홍수피해액에 대한 연구가 수행되는 등 불확실성을 고려한 연구가 활발히 이루어 졌다.

국내에서는 Kim et al. (2003)이 Monte Carlo 기법에 의해 함수들의 불확실성을 고려함으로써 각종 불확실성을 고려한 연피해 기대치 산정을 수행하였고, Lee (2011)는 안양천유역에 대해 기후변화와 불확실성을 고려한 확률강우량을 산정하여 이에 따른 예상홍수피해액을 산정하였다. 이에 본 연구에서는 하천제방과 같은 홍수피해 저감대책을 분석할 때 불확실성에 대한 고려를 하기 위해 HEC-FDA를 사용하여 불확실성 분석에 의한 설계 제방의 위험도를 추정하고 그 결과를 이용하여 적정 제방을 계획하여 보고자한다.

## 2. HEC-FDA 모형의 불확실성 분석

US Army Corps of Engineer에 의해 개발된 HEC-FDA는 홍수피해 저감 대안들에 대한 계획을 세우고 이를 평가하기 위해 수행하는 수문 및 경제성 분석을 수행할 수 있는 프로그램이다. 홍수피해 저감 대책으로 하천제방을 축조하기로 하였다면 치수경제성분석을 수행하기 위하여 연평균 피해액을 구해야한다. HEC-FDA는 연피해 기대치(Expected Annual Damage, EAD) 즉, 연평균 피해액을 구하는 것이다. 연피해 기대치를 구하는 과정에는 유량-빈도, 수위-유량, 수위-피해 관계 곡선(또는 함수)들이 필요하며, 이들 관계 곡선들의 불확실성을 고려하여 연피해 기대치를 산정하는 것이다. 그리고 불확실성 분석은 Monte Carlo 기법에 의하여 수행한다.

### 2.1 유량-빈도함수의 불확실성

유량-빈도함수는 홍수피해 저감계획에 있어서 대단히 중요한 역할을 한다. 피해분석의 목적에서 보면 유출자료를 이용하여 빈도해석을 하는 것이 보다 실질적이나 해당 피해지구에서 장기간의 유출자료를 획득한다는 것은 거의 불가능한 실정이므로 강우량을 기준으로 빈도분석을 실시한 후 이로부터 강우-유출모형을 통하여 빈도별 유량을 산정할 수 있다. 유도된 유량-빈도함수의 불확실성은 Morgan and Henrion(1990)에 의해 제안된 순서 통계학(order statistics)적인 방법으로 계산할 수 있다.

### 2.2 수위-유량함수의 불확실성

수위-유량 관계의 불확실성을 정의하는 방법은 표준편차이다. 불확실성을 계산하기 위한 자료는 수위오차(관측 수위값과 작성된 수위-유량함수 사이의 편차)로부터 구할 수 있다. 일반적으로 저수위에 대한 수위자료는 홍수피해분석의 관심에서 벗어나기 때문에 이러한 수위자료는 표준편차 계산에서 제외한다. 수위오차는 수위-유량 관계의 불확실성을 특성화시키기 위하여 확률분포 개념을 도입한다. 오차의 표준편차(the standard deviation of error)는 식 (1)과 같다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - M_i)^2}{N-1}} \quad (1)$$

여기서,  $X_i$ 는 유량  $Q_i$ 에 대응하는 관측 수위값이며,  $M_i$ 은 유량  $Q_i$ 에 대응하는 수위-유량함수에서의 수위값이고,  $N$ 은 표준편차를 구하는데 사용된 자료의 개수이다. 이 때, 표준편차를 계산하는데 사용되는 자료로는 일평균유량의 0.2 초과확률 이상의 유량에 대한 자료를 사용하면 무난할 것으로 알려져 있다. US Army Corps of Engineers (1996)은 연홍수량 계열에서 1.5년 빈도 이상의 자료를 사용하도록 추천하고 있으며, Freeman et al. (1996)에 의하면 모든 범위의 유량을 사용한 자료와 0.2 초과확률 이상의 자료들 사이에 많은 편차가 있음이 조사하였다. 상기한 방법으로 기준 유량(혹은 수위) 이상에서 오차의 표준편차를 구할 수 있으며, 기준 유량 이하의 오차의 경우 HEC-FDA에서 자동적으로 내삽되어 계산되어진다.

### 2.3 침수심-피해함수의 불확실성

침수심-피해 관계의 불확실성을 정의하는 방법은 앞서 수위-유량관계와 마찬가지로 피해오차(해당 수위에 대한 최적 침수심-피해 곡선 사이에서의 편차)의 표준편차를 사용한다. 피해오차는 확률분포 개념을 도입하여 오차의 표준편차를 다음과 같이 정의하였다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - M_i)^2}{N-1}} \quad (2)$$

여기서,  $X_i$ 는 침수심  $H_i$ 에 대응하는 피해액이며,  $M_i$ 은 침수심  $H_i$ 에 대응하는 최적 침수심-피해 관계곡선에서의 피해액이다.  $N$ 은 표준편차를 구하는데 사용된 자료의 개수이다. 최적 침수심-피해 관계곡선으로부터의 오차분포는 유역마다 매우 다양하게 분포될 수 있으나 적절한 연구 결과가 없으므로 본 연구에서는 정규분포형으로 가정하였다.

## 3. 적용결과

### 3.1 홍수량 및 홍수위 산정

대상유역은 섬강 유역(Fig 1)이며, 원주, 간현, 횡성, 청

일, 양동관측소와 인접구역의 서석, 홍천, 연평, 청운관측소 등 9개 관측소의 강우량을 이용하였다. 각 홍수량 산정지점에서의 빈도별로 임계지속시간 개념을 사용하여 빈도별 확률강우량을 산정하였다. 강우분포는 원주지역의 분위별 적정 무차원 누가우량 시간분포(Huff, 50%)를 사용하였으며, 유효우량은 SCS방법으로 산정하였다. 홍수량 산정방법은 Clark의 유역추적법을 사용하였다. 빈도별 홍수위는 표준축차계산법을 이용하여 계산하였다.

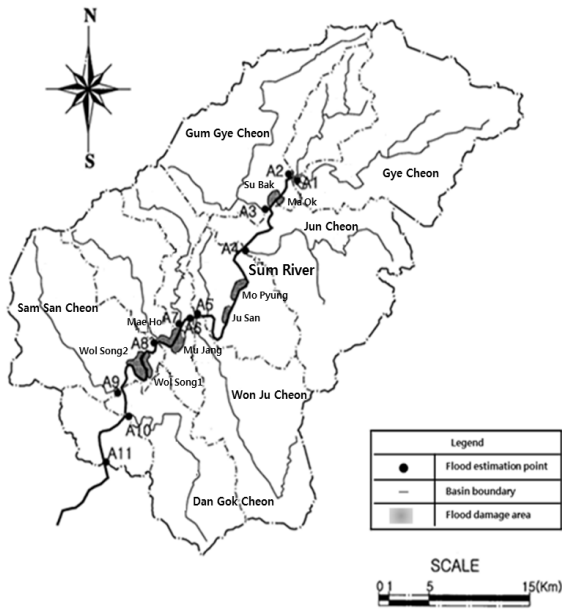


Fig 1. Sum River Basin.

### 3.2 불확실성 분석을 고려한 홍수피해 저감계획

#### 3.2.1 불확실성분석을 위한 관계 함수들의 구축

유역 내 8개구간을 대상으로 피해지구 및 입안된 홍수피해 저감계획을 Table 1에 나타내었다.

섬강 유역에서의 홍수피해 저감대책을 통해 발생하는 편익을 계산하고 평가하기 위한 기준은 계획을 실행하기 전의 상태이다. 이러한 기준을 마련하기 위해 현재 상황에 대한 연 피해 기대치, 연 초과확률, 장기간 위험도, 조건부 비초과확률 등을 계산하여야 한다. 이들을 계산하기 위해 유량-빈도, 수위-유량, 침수심-피해액 함수를 구축하여야 하며, 각각의 경우에 있어 이들간의 관계에서 오는 불확실성의 특성은 전술한 통계학적 오차 모형을 통해 설명할 수 있다.

Table 1. Damage Area and Flood damage reduction plan

Basin	Damage Area	Flod Damage Reduction Plan
Sum River	Wol Song1, Wol Song2, Mae Ho, Mu Jang, Mo Pyung, Dae Duk, Ma Ok, Su Bak	No Plan 30y, 50y, 80y, 100y, 200y

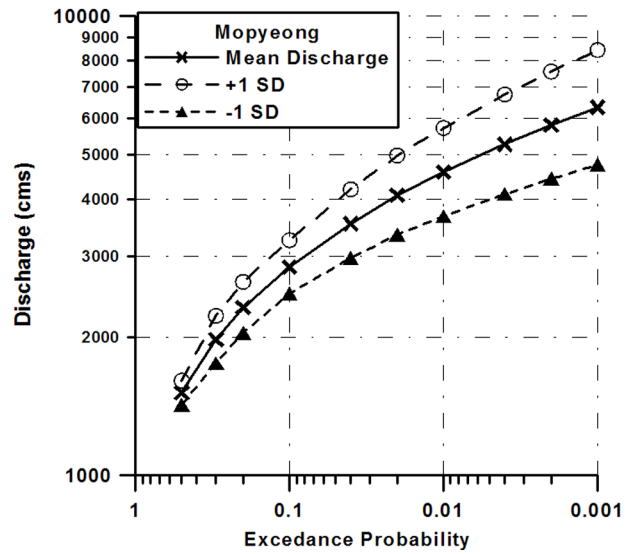


Fig. 2 Discharge-Exceedance Probability Function (Mo Pyung).

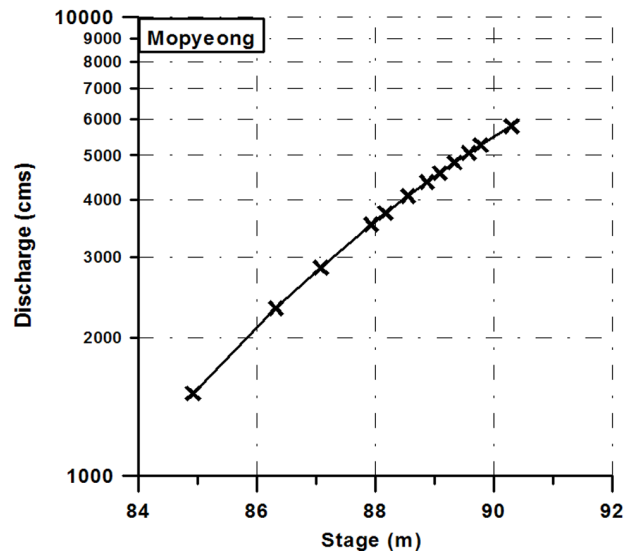


Fig. 3 Stage-Discharge Function (rating curve, Mo Pyung).

현재 상태에서의 유량-빈도함수는 각 피해지구별 연 최대 유량 자료로부터 구해진다. 또한, 각각의 해당 유역별 피해지구별로 인명, 농작물, 가옥, 농경지, 공공시설물, 기타 및 간접 피해액을 작성한 후, 그에 대한 침수심-피해액 관계를 결정한다. 피해액 산정을 위하여 원단위법을 적용하였다. 섬강 유역의 모핑지구에 대한 불확실성을 고려한 유량-빈도함수는 Fig. 2와 같으며, 해당 지구에 대한 수위-유량함수는 Fig. 3과 같다. 침수심-피해액 함수는 Fig. 4에 나타내었다.

#### 3.2.2 연 피해 기대치의 계산

연 피해 기대치는 연 피해에 대한 누가분포함수를 적분함으로써 얻을 수 있으나, 연 피해에 대한 누가분포함수를 식의 형태로 표현하는 것은 현실적으로 기대하기 어렵다. 연 피해 기대치를 계산하기 위하여 피해-빈도함수가 필요한데 이러한 함수를 식으로 나타낼 수 없기 때문이다. 이론적으로 피해-빈도함수는 시간에 따른 연 피해 자료를 수집하여 적정 통계학적

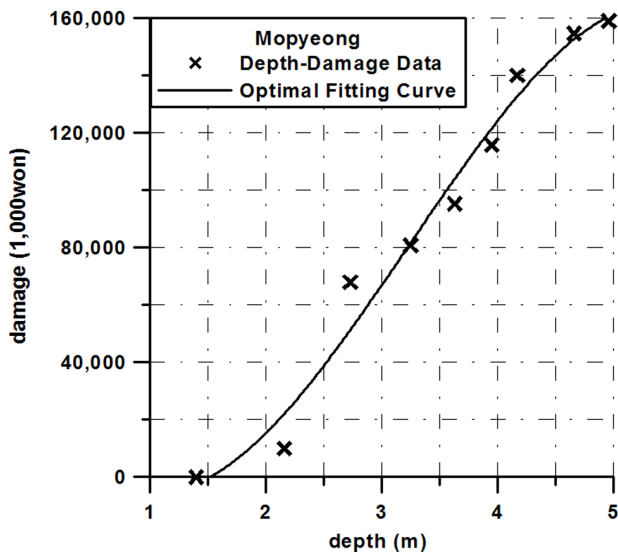


Fig. 4 Depth-Damage Function (Mo Pying).

모형에 적합시킴으로서 유도할 수 있으나 대부분의 경우 신뢰할 만한 자료를 얻는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서, 본 연구에서는 앞서 구한 불확실성이 고려된 유량-빈도함수, 수위-유량함수, 침수심-피해함수로부터 500,000번 이상의 모의발생을 통하여 표본 추출한 자료를 바탕으로 연 피해 기대치를 구하는 방법을 취하였다. 우선 연 홍수량 자료를 모의 발생하기 위해 연 최대 유량 분포를 무작위하게 발생시킨 후, 연 피해는 수위-유량함수 및 침수심-피해액 함수를 변환함에 의해서 계산할 수 있다. 계산된 연 피해 값들의 평균이 어느 정도 수렴(1%이내)될 때까지 모의발생 및 앞의 계산과정을 반복함으로써 연 피해 기대치를 구할 수 있으며, 피해지구별 계산결과를 Table 2에 유량규모별 피해액과 함께 표시하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 불확실성을 고려하였을 경우가 고려하지 않았을 경우 보다 연 피해 기대치가 더 크게 계산되고 있음을 알 수 있다.

3.2.3 홍수피해 저감계획(제방 축조)

앞서 나타난 바와 같이 다섯 개의 제방이 계획되었고 제방 축조 효과는 침수심-피해액 함수를 수정함으로써 설명된다. 제방이 축조된 후에 피해를 주는 최초의 수위는 제방고와 같은 크기를 갖는 수위일 것이다. 따라서, 설계빈도 50년의 제방의 경우 Fig. 4의 현재 무계획 침수심-피해액 함수는 Fig. 5로 수정될 수 있다. 본 연구에서는 범람 시 해당

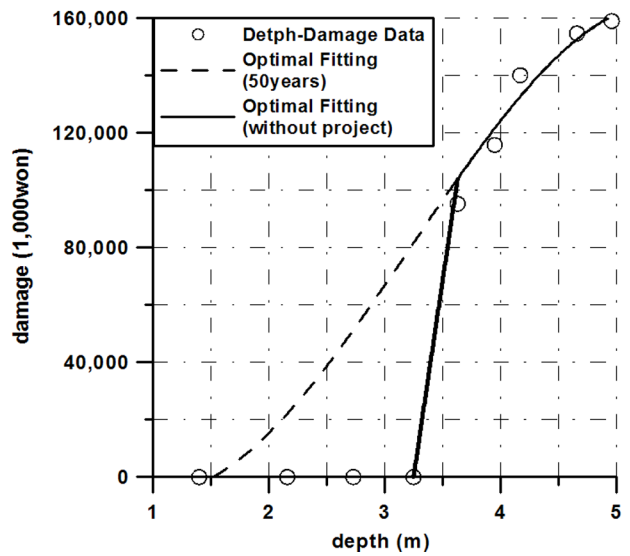


Fig. 5. Depth-Damage Function (Levee construction in 50y Design frequency, Mo Pyung)

구역의 내수위와 외수위가 같다고 가정하여 제방이 넘쳤을 때 발생하는 피해는 제방이 없을 때와 같은 것으로 가정하였다. 사실 내수위가 제방을 범람했을 때 외수위는 그와 같지 않을 것이므로 보다 정확한 분석을 위해서는 내수위와 외수위 사이의 관계를 여러 가지 수리학적 분석절차를 통하여 규명하여야 하지만 본 연구의 범위에서는 제외하였다.

3.3 경제성 분석

각 제방계획에 대한 경제적인 효율성은 각 대안에 대해 수정된 수위-피해함수를 적절히 사용한 표본추출을 통해 평가한다. 해당 구역의 피해지구에 대한 편익과 비용의 비(B/C)를 산정한 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타난 바와 같이 피해지구별 제방의 B/C분석을 통한 최적 빈도는 월송1지구 100년, 월송2지구 100년, 매호 100년, 무장 200년, 모평 100년, 대덕 100년, 마옥 50년, 수백 50년으로 결정되었으며, 피해지구별 투자우선순위는 B/C값이 높은 값을 주는 순위대로 하여 수백, 무장, 월송2, 월송1, 모평, 매호, 대덕, 마옥 순으로 결정할 수 있다. 또한, 불확실성으로 인한 편익 증감을 비교하기 위하여 유량-빈도, 수위-유량, 수위-피해함수에서 불확실성을 포함하지 않고 계산한 B/C결과를 함께 나타내었다.

Table 2. Damage according to the design frequency

(Unit : 1000 Won)

River	Area	Design Frequency					Expected Annual Damage Estimation	
		50y	80y	100y	150y	200y	Contain Uncertainty Analysis	No Uncertainty Analysis
Sum River	W.S1	275,880	325,637	356,801	383,422	419,734	24,376	19,746
	W.S2	223,501	264,227	351,422	373,944	405,345	21,048	17,271
	M.H	249,347	281,310	319,355	351,473	391,731	20,067	17,407
	M.J	357,354	464,390	527,198	568,257	714,420	24,319	20,784
	D.D	67,833	79,639	89,200	99,973	116,086	6,018	5,410
	M.P	80,807	95,298	115,816	140,120	154,712	8,543	7,446
	M.O	77,928	90,920	105,526	113,886	126,562	6,525	5,641
	S.B	202,259	292,827	379,959	431,930	475,278	37,272	28,074

### 3.4 불확실성을 고려한 위험도 분석

목표 수위에 대한 연 초과확률과 장기간 위험도 및 조건부 비초과확률을 Table 4와 5에 나타내었다. 목표수위 연 초과확률 기대값은 특정 제방고를 초과하는 확률로서 오차를 고려한 값이다. 예를 들어, 섬강 유역 모평지구의 설계빈도 50년 제방에서 오차를 포함한 모의 수위는 50,000번 반복과정에서 제방고를 1,250번 초과한다. 따라서 연 초과확률은  $1,250/50,000=0.025$ 이다. 유량과 수위에서의 오차의 반복 때문에 목표수위 연 초과확률에서의 중앙치 초과확률과 다른 값을 나타낸다. 장기간의 위험도는 10년, 25년, 50년 기간 동안 적어도 한번 제방을 범람할 확률을 보여준다. 이 값은 목표수위 연 초과확률 기대값을 사용하여 계산된다. 모평지구의 설계빈도 50년 제방의 경우 10년에 한번 초과할 확률은 20%정도이며, 50년에 한번 초과할 확률은 70% 정도이다.

또한, 6개의 특정 사상에 대한 제방계획의 조건부 비초과확률을 Table 5에 표시하였다. 각각의 값들은 각각의 사상에서 제방을 초과하지 않을 확률들이다. 모평지구의 경우 설계빈도 80년 제방에서 0.02 초과확률사상에 대한 조건부 비초과확률은 0.6381이다. 이것은 50년 빈도의 홍수사상이 발생하였을 때 제방을 초과하지 않을 확률이 0.6381임을 의미한다. 이것은 표본추출을 통한 0.02 초과확률사상의 모의를 통해 계산되며, 각각의 표본추출 시에 유량과 수위에서의 불확실성이 고려되어진다. 표본추출을 통한 조건부 비초과확률 산정은 0.02 초과확률사상에 대해 50,000번의 모의발생에서 모평지구의 설계빈도 80년 제방이 31,905번 초과하지 않았으므로 63.81% 또는 0.6381의 확률로 산정된다. Fig. 6은 섬강 유역 모평지구의 제안된 계획에 대한 조건부 비초과확률을 보여주고 있다.

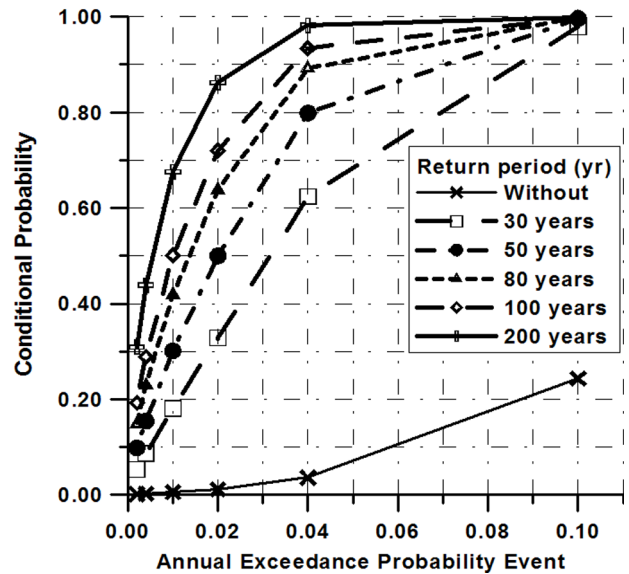


Fig. 6. Annual Exceedance probability - Conditional Probability (Mo Pyung).

### 4. 결과 및 분석

본 연구에서는 분석에 필요한 다양한 입력자료에 대한 불확실성을 치수사업의 결정에 포함하여 고려하였으며 이를 Table 6에 정리하였다. Table 6에 나타난 바와 같이 섬강 유역의 모평지구의 경우 불확실성 분석을 고려하지 않을 경우 B/C값이 빈도 80년에서 최대 0.7756 정도의 값으로 계산되지만, 불확실성 분석을 고려할 경우 0.8277 정도로 계산되는 등 불확실성 분석을 수행함에 따라 약 12% 정도의 B/C값 상승 효과가 나타나는 것으로 계산되었다. 즉, 불

Table 3. Result of B/C Considering Uncertainty.

Area	Frequency	B/C		Area	Frequency	B/C	
		Contain Uncertainty Analysis	No Uncertainty Analysis			Contain Uncertainty Analysis	No Uncertainty Analysis
Wol Song1	30	0.8218	0.5655	Mo Pyung	30	0.6943	0.5929
	50	0.9640	0.7844		50	0.7882	0.7245
	80	1.0169	0.8664		80	0.8184	0.7756
	100	1.0274	0.8602		100	0.8277	0.7668
	200	1.0183	0.8572		200	0.7551	0.6936
Wol Song2	30	0.9335	0.6941	Dae Duk	30	0.5555	0.5030
	50	1.0747	0.9049		50	0.6351	0.6234
	80	1.1168	0.9852		80	0.6378	0.6430
	100	1.1188	0.9666		100	0.6504	0.6371
	200	1.0981	0.9499		200	0.5250	0.5049
Mae Ho	30	0.5456	0.4383	Ma Ok	30	0.4125	0.3543
	50	0.6867	0.6285		50	0.5862	0.5633
	80	0.7088	0.6757		80	0.5464	0.5409
	100	0.7204	0.6702		100	0.5648	0.5367
	200	0.7104	0.6523		200	0.5732	0.5289
Mu Jang	30	0.4259	0.3154	Su Bak	30	1.1147	0.8833
	50	0.9833	0.9762		50	1.2355	1.0371
	80	1.1613	1.2043		80	1.1807	1.0153
	100	1.2092	1.1958		100	1.1892	1.0072
	200	1.2211	1.1665		200	1.1834	0.9949

확실성 분석의 고려 여부에 따라 투자우선순위 및 빈도년의 결정, B/C값 등이 다르게 산출됨을 알 수 있다.

그러나, B/C에 의한 적정빈도는 경제성 측면에서의 빈도이며, 설계빈도를 채택할 때는 제방의 홍수방어능력을 평가할 수 있는 공학적 지표들과 하천설계기준(2009)에서 고시하고 있는 설계기준을 참고하여야 한다. 본 연구에서 다른 하천은 지방하천으로 하천설계기준(2009)에 의하면 하천제방의 설계빈도가 80년에서 100년빈도로 고시되어 있으며,

불확실성을 고려한 B/C결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 무장지구가 200년, 마옥과 수백지구는 50년, 타 지구에서는 100년 빈도를 적정 빈도로 제시하고 있다. 이는 지방하천중의 동일하천에서 사업지구 지역 상하류의 하천특성과 관련이 있을 것으로 판단된다.

장기간 위험도에 대하여 Table 4에 나타난 바와 같이 모든 제방에서 합리적인 결과를 갖는다. 또한, 하천제방의 수명이 50년 정도라고 가정하고 조건부 비초과확률을 보면

**Table 4.** Annual Exceedance probability and Long term hazard

River	Frequency	Area	Target Water Level	Annual exceedance probability of Target Water Level		Risk		
				Median	Expected value	10y	25y	50y
Sum River	No Design Frequency	W.S1	65.68	0.1280	0.1360	0.7682	0.9741	0.9993
		W.S2	65.80	0.1080	0.1160	0.7102	0.9548	0.9980
		M.J	79.87	0.0560	0.0620	0.4728	0.7982	0.9593
		M.H	79.37	0.1010	0.1070	0.6765	0.9405	0.9965
		M.P	86.72	0.1390	0.1450	0.7911	0.9800	0.9996
		D.D	86.68	0.1440	0.1490	0.8000	0.9821	0.9997
		S.B	121.58	0.2060	0.2060	0.8998	0.9968	1.0000
		M.O	121.90	0.1410	0.1440	0.7883	0.9794	0.9996
	Design Frequency 30y	W.S1	Levee H	0.0330	0.0370	0.3172	0.6147	0.8516
		W.S2	Levee H	0.0330	0.0370	0.3172	0.6147	0.8516
		M.J	Levee H	0.0330	0.0360	0.3095	0.6038	0.8431
		M.H	Levee H	0.0330	0.0360	0.3092	0.6034	0.8427
		M.P	Levee H	0.0330	0.0360	0.3084	0.6023	0.8418
		D.D	Levee H	0.0330	0.0360	0.3081	0.6018	0.8415
		S.B	Levee H	0.0330	0.0380	0.3182	0.6165	0.8529
		M.O	Levee H	0.0330	0.0380	0.3182	0.6162	0.8527
	Design Frequency 50y	W.S1	Levee H	0.0200	0.0260	0.2298	0.4794	0.7290
		W.S2	Levee H	0.0200	0.0260	0.2282	0.4767	0.7261
		M.J	Levee H	0.0200	0.0250	0.2221	0.4663	0.7152
		M.H	Levee H	0.0200	0.0250	0.2221	0.4663	0.7152
		M.P	Levee H	0.0200	0.0250	0.2217	0.4656	0.7145
		D.D	Levee H	0.0200	0.0250	0.2217	0.4656	0.7145
		S.B	Levee H	0.0200	0.0260	0.2330	0.4848	0.7346
		M.O	Levee H	0.0200	0.0260	0.2328	0.4845	0.7342
	Design Frequency 80y	W.S1	Levee H	0.0120	0.0190	0.1715	0.3753	0.6097
		W.S2	Levee H	0.0120	0.0190	0.1715	0.3752	0.6097
		M.J	Levee H	0.0120	0.0180	0.1675	0.3676	0.6001
		M.H	Levee H	0.0120	0.0180	0.1675	0.3676	0.6001
		M.P	Levee H	0.0120	0.0180	0.1670	0.3668	0.5990
		D.D	Levee H	0.0120	0.0180	0.1671	0.3668	0.5990
		S.B	Levee H	0.0120	0.0190	0.1781	0.3876	0.6250
		M.O	Levee H	0.0120	0.0190	0.1781	0.3876	0.6250
	Design Frequency 100y	W.S1	Levee H	0.0100	0.0150	0.1411	0.3164	0.5327
		W.S2	Levee H	0.0100	0.0150	0.1411	0.3164	0.5327
		M.J	Levee H	0.0100	0.0150	0.1363	0.3067	0.5193
		M.H	Levee H	0.0100	0.0150	0.1363	0.3067	0.5193
M.P		Levee H	0.0100	0.0150	0.1367	0.3075	0.5204	
D.D		Levee H	0.0100	0.0150	0.1367	0.3075	0.5204	
S.B		Levee H	0.0100	0.0160	0.1476	0.3291	0.5499	
M.O		Levee H	0.0100	0.0160	0.1476	0.3291	0.5499	
Design Frequency 200y	W.S1	Levee H	0.0050	0.0090	0.0822	0.1931	0.3489	
	W.S2	Levee H	0.0050	0.0090	0.0822	0.1931	0.3489	
	M.J	Levee H	0.0050	0.0080	0.0818	0.1921	0.3473	
	M.H	Levee H	0.0050	0.0080	0.0813	0.1911	0.3457	
	M.P	Levee H	0.0050	0.0080	0.0791	0.1861	0.3375	
	D.D	Levee H	0.0050	0.0080	0.0791	0.1861	0.3375	
	S.B	Levee H	0.0050	0.0100	0.0919	0.2141	0.3823	
	M.O	Levee H	0.0050	0.0100	0.0919	0.2141	0.3823	

즉, 50년 빈도의 홍수사상이 발생하였을 때 설계빈도에 따른 하천제방의 조건부 비초과확률을 비교하면, 설계빈도 80년과 100년 제방에 대한 조건부 비초과확률은 대략 0.6~0.7의 확률을 보이고 있다. 그러나, B/C분석 시 마옥과 수백지구에 있어 적정빈도로 50년이 선정되었는데 50년 빈도의 홍수사상에 대한 조건부 비초과확률은 각 지구에 대하여 약 0.5정도이다(Table 5). 이는 50년 빈도의 홍수사상에 의해 제방이 월류할 가능성이 50% 이라는 것이므로 50년 빈도로 제방을 설계할 것인가에 대해 결정이 다소 어려울 것으

로 판단된다. 무장지구는 Table 3의 B/C값 계산에 의해 200년의 적정빈도가 산출되었으나 설계빈도 80년과 100년에 대해서도 B/C가 1을 넘고 있고 조건부 비초과확률이 있어서도 0.6에서 0.7의 확률을 보이고 있다. 분석한 내용을 종합적으로 판단하면 경제성 분석 결과와는 달리 동일하천에서 같은 빈도의 하천제방의 설계빈도를 결정하기로 한다면, 그리고 하천설계기준(2009)을 고려하면 섬강 유역에서의 제방에 대한 설계빈도는 역시 80년이나 100년이 타당할 것으로 판단된다.

**Table 5.** Annual Exceedance probability and Conditional non-exceedance probability

River	Frequency	Area	Target Water Level	Annual exceedance probability of Target Water Level		Conditional Nonexceedance Probability					
				Median	Expected value	10.0%	4.0%	2.0%	1.0%	0.4%	0.2%
Sum River	No Design Frequency	W.S1	65.68	0.1280	0.1360	0.3265	0.0601	0.0209	0.0095	0.0043	0.0028
		W.S2	65.80	0.1080	0.1160	0.4407	0.0977	0.0347	0.0162	0.0073	0.0044
		M.J	79.87	0.0560	0.0620	0.8489	0.3239	0.1369	0.0667	0.0291	0.0182
		M.H	79.37	0.1010	0.1070	0.4896	0.1030	0.0350	0.0162	0.0074	0.0045
		M.P	86.72	0.1390	0.1450	0.2434	0.0362	0.0118	0.0057	0.0026	0.0018
		D.D	86.68	0.1440	0.1490	0.2256	0.0339	0.0117	0.0056	0.0027	0.0019
		S.B	121.58	0.2060	0.2060	0.0786	0.0149	0.0060	0.0036	0.0023	0.0018
		M.O	121.90	0.1410	0.1440	0.2605	0.0555	0.0224	0.0120	0.0065	0.0045
	Design Frequency 30y	W.S1	Levee H	0.0330	0.0370	0.9666	0.6146	0.3339	0.1858	0.0898	0.0550
		W.S2	Levee H	0.0330	0.0370	0.9666	0.6146	0.3339	0.1858	0.0898	0.0550
		M.J	Levee H	0.0330	0.0360	0.9781	0.6221	0.3270	0.1805	0.0863	0.0531
		M.H	Levee H	0.0330	0.0360	0.9781	0.6220	0.3267	0.1812	0.0873	0.0536
		M.P	Levee H	0.0330	0.0360	0.9790	0.6242	0.3284	0.1807	0.0866	0.0531
		D.D	Levee H	0.0330	0.0360	0.9790	0.6244	0.3276	0.1816	0.0876	0.0536
		S.B	Levee H	0.0330	0.0380	0.9602	0.6084	0.3486	0.2100	0.1154	0.0779
		M.O	Levee H	0.0330	0.0380	0.9602	0.6084	0.3486	0.2100	0.1154	0.0779
	Design Frequency 50y	W.S1	Levee H	0.0200	0.0260	0.9931	0.7824	0.5000	0.3064	0.1588	0.1013
		W.S2	Levee H	0.0200	0.0260	0.9931	0.7824	0.5000	0.3064	0.1588	0.1013
		M.J	Levee H	0.0200	0.0250	0.9961	0.7975	0.4996	0.3011	0.1548	0.0992
		M.H	Levee H	0.0200	0.0250	0.9961	0.7975	0.4996	0.3011	0.1548	0.0992
		M.P	Levee H	0.0200	0.0250	0.9962	0.7986	0.5000	0.3012	0.1541	0.0983
		D.D	Levee H	0.0200	0.0250	0.9962	0.7986	0.5000	0.3012	0.1541	0.0983
		S.B	Levee H	0.0200	0.0260	0.9899	0.7668	0.4994	0.3220	0.1849	0.1279
		M.O	Levee H	0.0200	0.0260	0.9899	0.7668	0.4994	0.3220	0.1849	0.1279
	Design Frequency 80y	W.S1	Levee H	0.0120	0.0190	0.9985	0.8791	0.6331	0.4220	0.2330	0.1525
		W.S2	Levee H	0.0120	0.0190	0.9985	0.8791	0.6331	0.4220	0.2330	0.1525
		M.J	Levee H	0.0120	0.0180	0.9986	0.8915	0.6371	0.4188	0.2295	0.1499
		M.H	Levee H	0.0120	0.0180	0.9986	0.8915	0.6371	0.4188	0.2295	0.1499
M.P		Levee H	0.0120	0.0180	0.9984	0.8921	0.6381	0.4191	0.2294	0.1485	
D.D		Levee H	0.0120	0.0180	0.9984	0.8921	0.6381	0.4191	0.2294	0.1485	
S.B		Levee H	0.0120	0.0190	0.9974	0.8628	0.6249	0.4304	0.2594	0.1827	
M.O		Levee H	0.0120	0.0190	0.9974	0.8628	0.6249	0.4304	0.2594	0.1827	
Design Frequency 100y	W.S1	Levee H	0.0100	0.0150	0.9996	0.9226	0.7122	0.4987	0.2891	0.1935	
	W.S2	Levee H	0.0100	0.0150	0.9996	0.9226	0.7122	0.4987	0.2891	0.1935	
	M.J	Levee H	0.0100	0.0150	0.9986	0.9348	0.7211	0.5033	0.2903	0.1949	
	M.H	Levee H	0.0100	0.0150	0.9986	0.9348	0.7211	0.5033	0.2903	0.1949	
	M.P	Levee H	0.0100	0.0150	0.9984	0.9342	0.7204	0.5012	0.2890	0.1926	
	D.D	Levee H	0.0100	0.0150	0.9984	0.9342	0.7204	0.5012	0.2890	0.1926	
	S.B	Levee H	0.0100	0.0160	0.9988	0.9066	0.6963	0.5010	0.3121	0.2239	
	M.O	Levee H	0.0100	0.0160	0.9988	0.9066	0.6963	0.5010	0.3121	0.2239	
Design Frequency 200y	W.S1	Levee H	0.0050	0.0090	0.9999	0.9767	0.8505	0.6642	0.4289	0.3025	
	W.S2	Levee H	0.0050	0.0090	0.9999	0.9767	0.8505	0.6642	0.4289	0.3025	
	M.J	Levee H	0.0050	0.0080	0.9985	0.9815	0.8609	0.6744	0.4375	0.3095	
	M.H	Levee H	0.0050	0.0080	0.9985	0.9815	0.8608	0.6744	0.4376	0.3096	
	M.P	Levee H	0.0050	0.0080	0.9983	0.9818	0.8620	0.6755	0.4384	0.3093	
	D.D	Levee H	0.0050	0.0080	0.9983	0.9818	0.8620	0.6755	0.4384	0.3093	
	S.B	Levee H	0.0050	0.0100	0.9987	0.9670	0.8308	0.6552	0.4477	0.3335	
	M.O	Levee H	0.0050	0.0100	0.9987	0.9670	0.8308	0.6552	0.4477	0.3335	



**Table 6.** Comparison of flood damage reduction plan with B / C

River	Damage Area	Contain Uncertainty Analysis			No Uncertainty Analysis		
		B/C	Frequency	Determination of Investment Priorities	B/C	Frequency	Determination of Investment Priorities
Sum River	W.S1	1.0274	100년	(4)	0.8664	80년	(4)
	W.S2	1.1188	100년	(3)	0.9852	80년	(3)
	M.H	0.7204	100년	(6)	0.6757	80년	(6)
	M.J	1.2211	200년	(2)	1.2043	80년	(1)
	M.P	0.8277	100년	(5)	0.7756	80년	(5)
	D.D	0.6504	100년	(7)	0.6430	80년	(7)
	M.O	0.5862	50년	(8)	0.5633	50년	(8)
	S.B	1.2355	50년	(1)	1.0371	50년	(2)

### 5. 결 론

본 연구에서는 홍수량과 홍수위 산정 및 치수경제성 분석을 함께 있어 본질적으로 내재되어 있는 불확실성에 대한 고려를 분석에 포함시켜 피해발생 확률을 추정하였다. HEC-FDA를 이용한 위험도 분석에 기초하여 불확실성을 고려한 유량-빈도, 수위-유량, 수위-피해간의 관계를 구축한 후, 현재 및 장래의 상황에 대한 연간 피해규모, 연 초과확률, 장기간 위험도, 조건부 비초과 확률 등을 계산하였으며, 홍수방어계획으로 여러 가지 설계빈도의 제방(예를 들어, 재현기간 50년, 80년, 100년, 150년, 200년)을 계획하여 이에 대한 평가를 수행하였다. 계산 결과 불확실성 분석을 포함할 경우 B/C값이 12%정도 증가됨을 알 수 있었으며, 적정 빈도나 투자우선순위 등도 바뀔 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 그러나, 이러한 분석은 단지 경제적인 분석 수행의 결과이며, 실제 홍수피해 저감계획 시에는 경제적인 분석이외에 정치적, 사회적인 분석이 함께 이루어져하고, 이러한 점을 고려하여 불확실성 해석을 통한 위험도 분석 결과는 보다 합리적인 결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

This research was supported by the Disaster Safety Technology Development & Infrastructure Construction Program funded by the Ministry of Public Safety and Security(NEMA-기반-2014-114)

### References

Binley, AM, Beven, KJ, Calver A and Watts, LG (1991), Changing Responses in Hydrology : Assessing the uncertainty in Physically Based model prediction, Water Resources Research, Vol.27(16), pp. 1253-1261.

Clarke, RT (1999) Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve indefintion, J. of hydrology, Vol.222, pp. 185-190.

Davis, DW (1991) A risk and uncertainty based concept for sizing levee project, Proc. of a Hydrology and Hydraulics Workshop on Riverine Levee Freeboard, U.S. Army Corps of Engineering Center, pp. 231-249.

Freeman, Gray E., Copeland, Ronald R., and Cowan, Mark A. (1996), Uncertainty in Stage-Discharge Relationships, Proceedings, 7th IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics, Mackay, Queensland, Australia, IAHR.

IPCC(2007). Climate Change 2007, The Fourth Assessment Report (AR4) of The Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kim, HS, Kim, YS and Lee, JW (2003). Expected annual damage estimation with uncertainty, J. of Wetlands Research, 5(1) pp. 41-52 [Korean Literature]

Lee, KH (2011). Estimation of expected flood damage considering uncertainty and under climate change, Ph.D Dissertation, Inha University, Incheon, Korea [Korean Literature]

Ministry of Construction & Transportation. (2000). Analysis of temporal variations for determining the local design storms [Korean Literature]

Ministry of Land Transport and Maritime Affairs. (2009). River design criteria [Korean Literature]

Morgan, G. and Henrion, M. (1990), Uncertainty, a Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis, Cambridge University Press, New York, NY.

National Research Council (2000), Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies, National Academy of Science. pp. 1-202

US Army Corps of Engineers (1996), Engineering and Design: Risk-based Analysis for Flood Damage Reduction Studies.

US Army Corps of Engineers (2008), HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis.