

홍수량-초과확률 함수의 불확실성을 고려한 금호강 유역의 연피해기대치 계산에 대한 연구

○남우성¹⁾, 허준행²⁾

1. 서 론

홍수 피해의 영향을 나타내는 데 가장 널리 이용되는 지표는 연피해기대치(expected annual damage)이다. 연피해기대치는 여러 해에 걸쳐 발생한 홍수피해의 평균값으로 정의되며, 피해-초과확률 함수를 수치 적분함으로써 얻을 수 있다. 피해-초과확률 함수를 구하기 위해서는 홍수량-초과확률 함수, 수위-유량 관계곡선, 수위-피해 함수가 필요하다. 위의 세 함수를 바탕으로 피해-초과확률 함수를 유도하고 이를 수치 적분함으로써 연피해기대치를 구하게 되는 것이다.

하지만 이 세 가지 함수를 유도하는 과정에는 수리, 수문, 경제적 불확실성이 내포되어 있어 연피해기대치를 계산하기 위한 피해-초과확률 함수 역시 불확실성을 갖게 되며, 연피해기대치 역시 부정확한 값으로 표현된다. 미국의 경우 홍수량 추정에는 log-Pearson type III 분포를 사용하며, 홍수량-초과확률 함수의 불확실성을 설명하기 위해서 비중앙 t 오차분포를 사용한다. 하지만 LPIII 분포는 미국의 지역적·수문학적 특성에 의해 결정된 것으로서 지역적·수문학적 특성이 상이한 지역에 그대로 적용하는 것은 문제가 있다. 따라서 대상유역의 특성이 반영된 강우량, 수위자료에 의한 홍수량 자료 또는 실측에 의한 홍수량 자료 등의 수문자료를 바탕으로 빈도해석을 통해 그 유역의 홍수 발생 특성에 적합한 확률분포형을 선정할 필요가 있다. 또한 불확실성을 설명하기 위해, 선정된 확률분포함수에 적합한 표본분포의 선정도 이 과정에 포함되어야 한다.

본 연구는 세 가지 함수 가운데 홍수량-초과확률 함수의 불확실성이 고려된 연피해기대치를 산정하여 함수의 불확실성이 연피해기대치 산정에 미치는 영향을 검토하기 위해 대상 유역의 홍수량 자료에 적합한 확률분포형과 확률분포형에 적합한 표본분포를 선정하여 연피해기대치를 산정하는 절차를 제시한다.

2. 연구방법

홍수량 자료에 대한 빈도해석을 실시하여 적합한 확률분포형을 선정하였다. 빈도해석 시 홍수량 자료의 무작위성 검사를 실시하고, 13 개의 확률분포형을 적용하였다. 매개변수를 추정하기 위해 확률가중모멘트법을 사용하였다.

연피해기대치를 계산하기 위해서는 피해-초과확률 함수(damage-probability function) 또는 피해-빈도 함수를 구해야 하지만 통상적으로 이런 함수를 식으로 나타내기는 힘들다. 따라서 연피해기대치를 산정하기 위해서는 다른 접근방법이 필요하며, 본 연구에서는 Monte Carlo 모의 기법을 이용하여 연피해기대치를 계산하였다. 빈도해석을 통해 구한 홍수량-초과확률 함수의 불확실성을 고려하기 위해 선정된 확률분포형에 대한 표본분포(sampling distribution)를 구하였다. 표본분포(sampling distribution)는 Monte Carlo 모의 기법을

1) 연세대학교 토목공학과 연구원

2) 연세대학교 토목공학과 교수

이용하여 발생시킨 자료들을 바탕으로 각 재현기간에 대한 자료들에 대해 빈도해석을 수행하여 선정했다.

선정된 확률분포형에 적합한 자료를 발생시키기 위하여 확률분포형별 난수발생 부프로그램들을 사용하였고, 자료의 동질성을 확보하기 위해 발생된 자료에 χ^2 -검정방법을 적용하여 적합한 자료만을 추출했다.

선정된 여러 확률분포형의 매개변수를 이용하여 Monte Carlo 모의를 수행하여 확률분포형에 따른 연피해기대치 계산 결과를 검토하였고, Monte Carlo 모의 기법을 이용해 발생시킨 자료의 개수를 변화시킴으로써 홍수량 자료의 개수가 연피해기대치 계산에 미치는 영향을 검토하였다.

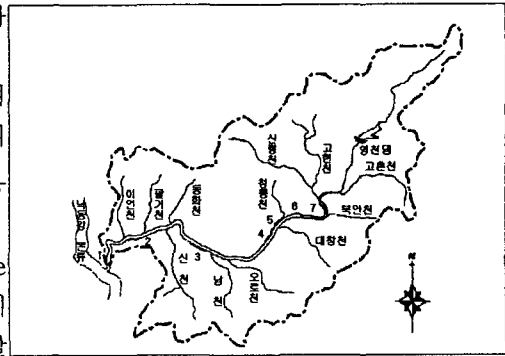


그림 1 금호강 유역

3. 이론적 배경

연피해기대치는 연피해에 대한 누가분포함수를 적분함으로써 얻을 수 있다. 만약 누가분포함수를 하나의 방정식으로 표현할 수 있다면, 적분이 가능하지만 사실상 연피해에 대한 누가분포함수를 어떤 식으로 표현하는 것은 기대하기 어렵다. 연피해기대치를 계산하기 위하여 피해-초과확률함수가 필요한데 통상적으로 이런 함수를 식으로 나타낼 수는 없기 때문이다. 이론적으로 피해-초과확률함수는 시간에 따른 연피해 자료를 수집하여 적정 통계학적 모형에 적합시킴으로써 유도할 수 있다. 그러나 대부분의 경우 신뢰할 만한 자료를 얻는다는 것은 쉬운 일이 아니다.

따라서 피해-초과확률함수는 사용 가능한 수리학적, 수문학적, 경제적인 정보를 이용하여 계산할 수 있다. 즉, 유량-초과확률 함수를 구하고, 수위와 유량의 관계를 나타내는 수위-유량 관계곡선과 수위에 따른 피해를 나타내는 수위-피해 함수를 이용해서 얻는다.

여기에서 수위-초과확률 함수는 유량-초과확률 함수로부터 변환하여 얻을 수 있다. 이는 유량 Q 에 대응하는 수위 S 를 초과할 확률은 Q 를 초과할 확률과 같다는 것을 의미한다. 만약 수위와 피해에 대한 관계를 표현할 수 있다면 수위-피해 함수를 개발할 수 있고, 수위-초과확률 함수를 변환함으로써 피해-초과확률 함수를 만들 수 있다. 마지막으로 연피해기대치는 수치기법을 이용하여 피해-초과확률 함수를 적분함으로써 계산할 수 있다.

다음으로 각 함수들로부터 표본추출한 자료를 가지고 연피해기대치를 구한다. 즉, Monte Carlo 모의 기법을 통하여 연피해기대치를 얻는 것이다. 우선 연최대 홍수량을 모의발생하기 위해 연최대유량분포를 무작위로 표본추출하고 이로부터 실험대상이 되는 해에 대한 연최대유량을 얻는다. 연피해는 수위-유량 관계곡선과 수위-피해 함수를 변환함으로써 구할 수 있다. 모의 실험을 통하여 얻은 연피해치들의 평균이 일정 오차 범위 내에 들어올 때까지 모의를 반복함으로써 표본추출로부터 얻은 모든 연피해치들의 평균치 또는 기대치가 얻어진다.

4. 불확실성을 고려한 연피해기대치 계산 결과

낙동강 유역의 동촌(그림 1의 2번 지점) 지점의 63개 연최대 수위 자료와 성서(그림 1의 1번 지점) 지점의 33개 연최대 수위 자료에 수위-유량 관계를 적용하여 홍수량 자료를 구축하였다. 계산된 홍수량 자료에 대한 빈도해석을 실시하여 지점별로 적합한 홍수량의 확률분포형을 선정하였다. 연피해기대치를 계산하기 위해서는

피해-초과확률 함수 또는 피해-빈도 함수가 필요하지만 피해-초과확률 함수를 식으로 나타내는 것은 쉽지 않다. 따라서 Monte Carlo 기법을 이용하여 연피해기대치를 산정하고자 한다.

선정된 확률분포함수를 바탕으로 역누가분포함수 방법을 이용하여 난수를 발생시켰으며, 자료의 개수의 영향을 검토하기 위해 각각 10, 20, 30, 50, 80, 100 개의 자료를 발생시켰다. 그리고 매개변수의 불확실성을 반영하기 위해 모의 결과 나온 각 재현기간별 홍수량 자료에 대한 빈도해석을 실시하여 적합한 표본분포를 찾았다. 이를 바탕으로 불확실성이 반영된 연피해기대치를 계산하였다.

4.1 홍수빈도해석

관측소 두 곳의 홍수량 자료를 바탕으로 확률가중모멘트법에 근거해 매개변수를 추정했을 경우 적합도 검정을 통과하고 도시적 해석을 통해 선정된 확률분포형은 표 1과 같다.

표 1에서 볼 수 있듯이 미국에서 사용하고 있는 LPⅢ 분포는 국내 유역의 지역적·수문학적 특성을 반영하지 못한다. 무조건 적용하는 것은 적절하지 못하며, 각 지점의 수문자료를 바탕으로 빈도해석을 실시하여 적합한 확률분포를 선정하는 것이 타당하다.

표 1 빈도해석 결과 선정된 확률분포형 (확률가중모멘트법)

관측지점	확률분포형
동촌	2변수 gamma, GEV, Gumbel, 2변수 Weibull, 3변수 Weibull
성서	2변수 gamma, GEV, Gumbel, 2변수 Weibull, 3변수 Weibull

4.2 불확실성이 고려된 연피해기대치 산정

각 확률분포형에 대한 표본분포를 산정한 결과는 표 3과 같다. 여기서 LN2는 2변수 lognormal 분포형, LN3는 3변수 lognormal 분포형을 가리킨다.

표 2 확률분포형별 표본분포

지점 분포형	동촌	성서
GAM2	GEV, GUM	LN2, LN3, WBU3
GEV	GEV, GUM, LN2, LN3, WBU3	LN2
GUM	GUM, LN2, LN3, WBU2, WBU3	GUM, LN2, LN3, WBU3
WBU2	GUM, LN2, WBU2	GUM, LN2, LN3, WBU3
WBU3	LN2, WBU2, WBU3	WBU3

이를 바탕으로 불확실성이 고려된 연피해기대치를 산정한 결과는 다음과 같다. 각 확률분포형별로 선정된 표본분포를 이용하여 불확실성이 고려된 연피해기대치를 산정한 결과와 불확실성을 고려하지 않은 연피해기대치를 도시한 결과는 그림 3 ~ 그림 12와 같다. 그림 3과 4는 2변수 gamma 분포, 그림 5와 6은 GEV 분포, 그림 7과 8은 Gumbel 분포, 그림 9와 10은 2변수 Weibull 분포, 그림 11과 12는 3변수 Weibull 분포에 대한, 동촌과 성서 지점의 연피해기대치 계산 결과이다.

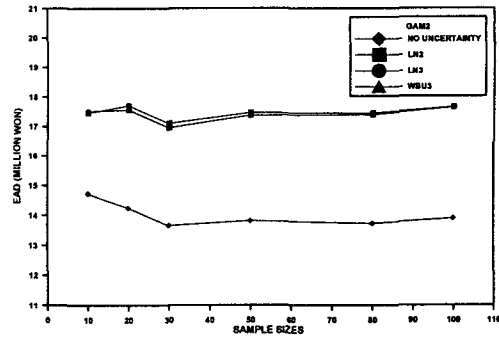
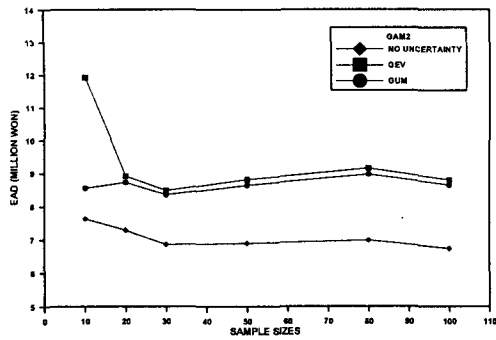


그림 3 불확실성이 고려된 연피해기대치 (동춘, GAM2) 그림 4 불확실성이 고려된 연피해기대치 (성서, GAM2)

그림 3은 동춘 지점의 홍수량-초과확률 함수가 2변수 gamma로 선정되었을 때 표본분포로서 GEV와 Gumbel 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 자료의 개수가 10개인 경우의 연피해기대치가 GEV 분포에서 과대 추정되는 현상을 볼 수 있다. 이는 자료의 개수가 적을 경우 연피해기대치 추정 결과의 정도가 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4는 성서 지점의 홍수량-초과확률 함수가 2변수 gamma로 선정되었을 때 표본분포로서 2변수 lognormal, 3변수 lognormal, 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 표본분포로서 2변수 gamma 분포, 3변수 lognormal 분포, 3변수 Weibull 분포를 사용한 경우 모두 비슷한 결과를 나타내고 있다. 또한 발생시킨 자료의 개수가 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴함을 볼 수 있다.

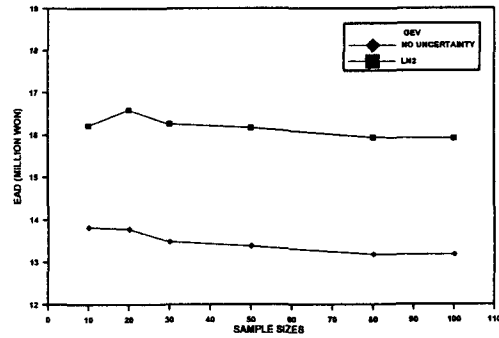
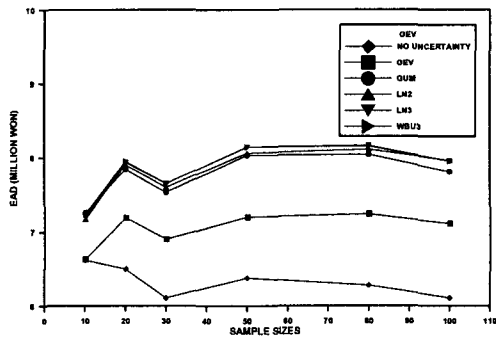


그림 5 불확실성이 고려된 연피해기대치 (동춘, GEV) 그림 6 불확실성이 고려된 연피해기대치 (성서, GEV)

그림 5는 동춘 지점의 홍수량-초과확률 함수가 GEV 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 GEV, Gumbel, 2변수 lognormal, 3변수 lognormal, 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. GEV 분포가 다른 분포형에 비해 연피해기대치를 과소 추정함을 볼 수 있다. GEV 분포를 제외한 분포형들에 대해서는 비슷한 연피해기대치가 산정되었다. 그림 6은 성서 지점의 홍수량-초과확률 함수가 GEV 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 2변수 lognormal 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다.

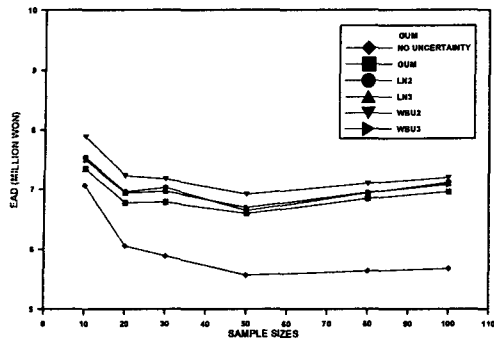


그림 7 불확실성이 고려된 연피해기대치 (동촌, GUM)

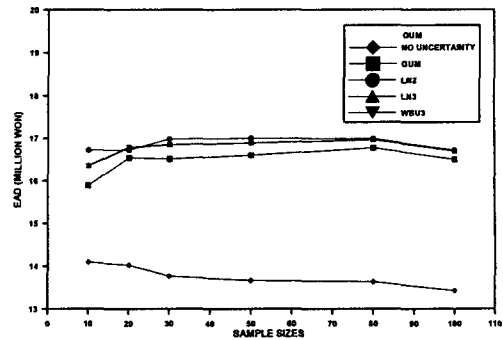


그림 8 불확실성이 고려된 연피해기대치 (성서, GUM)

그림 7은 동촌 지점의 홍수량-초과확률 함수가 Gumbel 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 Gumbel, 2변수 lognormal, 3변수 lognormal, 2변수 Weibull, 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 선정된 표본분포의 종류와 무관하게 거의 유사한 연피해기대치를 산정함을 볼 수 있다. 하지만 자료의 개수가 적을 경우 불확실성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 산정된 연피해기대치의 차이가 적음을 볼 수 있다. 그림 8은 성서 지점의 홍수량-초과확률 함수가 Gumbel 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 Gumbel, 2변수 lognormal, 3변수 lognormal, 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 선정된 표본분포형 모두 유사한 연피해기대치 계산 결과가 산출됨을 확인할 수 있다.

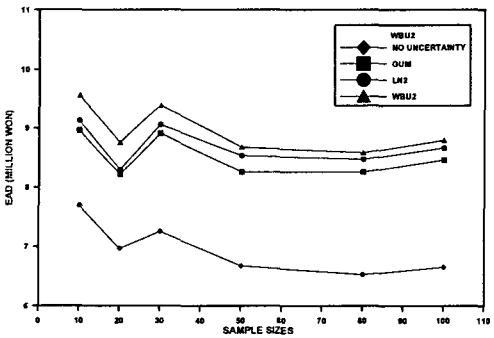


그림 4.9 불확실성이 고려된 연피해기대치 (동촌, WBU2)

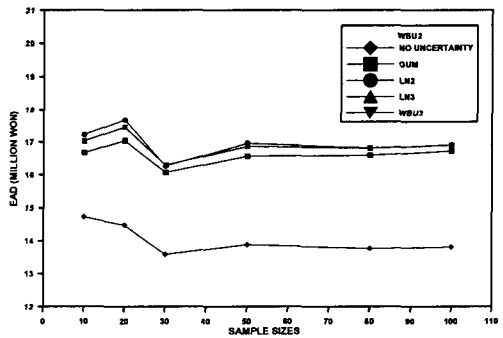


그림 4.10 불확실성이 고려된 연피해기대치 (성서, WBU2)

그림 9는 동촌 지점의 홍수량-초과확률 함수가 2변수 Weibull 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 Gumbel, 2변수 lognormal, 2변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 선정된 표본분포형 모두 비슷한 연피해기대치 산정 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 자료의 개수가 적을 때 연피해기대치의 변동폭이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 자료의 개수가 적을 때 연피해기대치 산정의 정도가 낮기 때문인 것으로 판단된다. 그림 10은 성서 지점의 홍수량-초과확률 함수가 2변수 Weibull로 선정되었을 때 표본분포로서 Gumbel, 2변수 lognormal, 3변수 lognormal, 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 선정된 표본분포형 모두 비슷한 연피해기대치 산정 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 자료의 개수가 적을 때 연피해기대치 산정결과의 변동폭이 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 자료의 개수가 적을 때 연피해기대치 산정의 정도가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

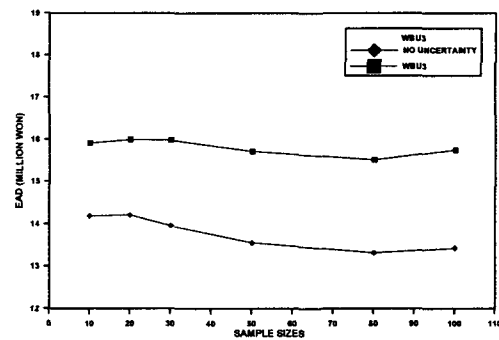
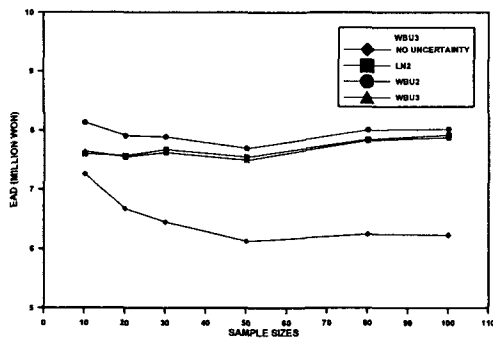


그림 11 불확실성이 고려된 연피해기대치 (동춘, WBU3) 그림 12 불확실성이 고려된 연피해기대치 (성서, WBU3)

그림 11은 동춘 지점의 홍수량-초과확률 함수가 3변수 Weibull 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 2변수 lognormal, 2변수 Weibull, 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다. 선정된 표본분포형 모두 유사한 연피해기대치를 산정하나 자료의 개수가 적은 경우 불확실성이 고려된 연피해기대치 결과간에 약간의 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 그리고 자료의 개수가 적은 경우 불확실성이 고려되지 않은 경우와 고려된 경우 2변수 lognormal과 3변수 Weibull 표본분포의 경우 연피해기대치의 차이가 적게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 제한된 자료 개수의 영향으로 판단된다. 그림 12는 성서 지점의 홍수량-초과확률 함수가 3변수 Weibull 분포로 선정되었을 때 표본분포로서 3변수 Weibull 분포를 사용하여 불확실성이 반영된 연피해기대치를 산정한 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 금호강 유역의 동춘과 성서 지점의 홍수량 자료를 바탕으로 홍수량-초과확률 함수의 불확실성을 표본분포를 통해 고려함으로써 연피해기대치를 산정하였다. 홍수량-초과확률 함수의 불확실성이 고려된 연피해기대치를 산정한 결과 얻게 된 결론은 다음과 같다.

1. 금호강 유역의 동춘과 성서 지점의 홍수량 자료에 대해 빈도해석을 실시한 결과 이 유역의 홍수량 자료에 2변수 gamma, GEV, Gumbel, 2변수 Weibull, 3변수 Weibull 분포형이 적합한 것으로 나타났다.
2. 홍수량-초과확률 함수의 불확실성을 고려하기 위해 확률분포형별로 표본분포를 선정한 결과 각 지점별로 그리고 선정된 확률분포형별로 다양한 표본분포를 갖는 것으로 나타났다.
3. 금호강 유역 홍수량 자료에 대한 표본분포로서 lognormal 분포와 Weibull 분포를 사용할 경우, 연피해기대치 산정에 있어 유사한 결과를 나타내며, Gumbel 분포를 사용할 경우, 연피해기대치는 작게, 2변수 Weibull 분포를 사용할 경우 연피해기대치는 크게 추정됨을 알 수 있다.

참고문헌

1. 건설교통부 부산지방국토관리청 (1997). 금호강 하천정비기본계획(보완)
2. 김문모 (1994). "신뢰도 분석기법을 이용한 우수관개의 안전성 해석", 연세대학교 대학원 토목공학과 박사학위 논문.
3. Bao, Y., Tung, Y.,K. and Hasfurther, V.R. (1987). "Evaluation of Uncertainty in Flood Magnitude Estimator on Annual Expected Damage Costs of Hydraulic Structures", Water Resources Research, Vol. 23, No. 11, pp. 2023-2029.
4. USACE(1996), Engineering and Design Risk-based Analysis for Flood Damage Reductions Studies, EM 1110-2-1619