

기후변화를 고려한 홍수방재시설물의 경제성분석 : 임진강 유역사례

김경석* · 오승익¹

¹연세대학교 토목환경공학과

Economic Assessment for Flood Control Infrastructure under Climate Change : A Case Study of Imjin River Basin

Kim, Kyeongseok* · Oh, Seungik¹

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University

Abstract : In Imjin River basin, three floods occurred between 1996 and 1999, causing many casualties and economic losses of 900 billion won. In Korea, flood damage is expected to increase in the future due to climate change. This study used the climate scenarios to estimate future flood damage costs and suggested a real options-based economic assessment method. Using proposed method, the flood control infrastructures in Imjin River basin were selected as a case study site to analyze the economic feasibility of the investment. Using RCP (Representative Concentration Pathway) climate scenarios, the future flood damage costs were estimated through simulated rainfall data. This study analyzed the flood reduction benefits through investment in the flood control infrastructures. The volatility of flood damage reduction benefits were estimated assuming that the RCP8.5 and RCP4.5 climate scenarios would be realized in the future. In 2071, the project option value would be determined by applying an extension option to invest in an upgrading that would allow the project to adapt to the flood of the 200-year return period. The results of the option values show that the two investment scenarios are economically feasible and the project under RCP8.5 climate scenario has more flood damage reduction benefits than RCP4.5. This study will help government decision makers to consider the uncertainty of climate change in the economic assessment of flood control infrastructures using real options analysis. We also proposed a method to quantify climate risk factors into economic values by using rainfall data provided by climate scenarios.

Keywords : Climate Change, Real Options, Economic Assessment, Flood, Uncertainty

1. 서론

기후변화의 영향으로 인해 집중호우, 홍수, 해수면 상승과 가뭄 등에 의한 재해위험이 커지고 있는 추세이다(IPCC, 2014). 국지적으로 급격한 폭우가 내리거나 심한 가뭄이 오는 등 강우량의 변동성(Volatility)은 증가하고 있기 때문에 미래 기후 패턴을 예측하는 일이 쉽지 않다. 특히 우리나라의 경우, 자연재해에 의해 매년 연평균 6천억원의 피해가 발생하고, 피해 복구비로 연평균 1조 2천억원을 쓰고 있다(국민안전

처, 2015). 증가하는 기후영향으로 인한 위험에 선제적으로 대응하기 위하여 홍수방재시설의 투자 결정은 매우 중요하다. 그러므로 효과적인 홍수방재시설 투자를 위하여 경제적 요소들과 더불어 해당 지역의 기후변화 추세의 변동성을 고려한 투자의사 결정이 필요하다.

기후변화의 불확실성(Uncertainty)을 고려한 홍수 방재시설의 경제성분석을 위해서 본 연구에서는 실물옵션분석(Real Options Analysis : ROA)을 활용한 경제성분석 방법을 제시하였으며, 사례연구로 임진강유역에 방법론을 적용했다. 본 연구의 목적은 두 가지로 나뉜다. 첫째는 미래 기후시나리오를 활용하여 미래홍수로 인한 피해액을 산정하는 것이고, 둘째는 실물옵션 기반의 경제성평가방법을 이용하여 홍수방재시설물 투자사업을 평가하는 방법을 제시하는 것이다.

본 연구는 기후변화의 변동성을 계산하기 위해서 미래 발생 가능한 홍수 피해액을 불확실성 요소로 선정한다. 다음으로 투자사업에 적용 가능한 옵션모형을 결정하고, 실물옵션분석을

* Corresponding author: Kim, Kyeongseok, Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03277, Korea
E-mail: kim.ks@yonsei.ac.kr
Received January 31, 2017; revised -
accepted February 22, 2017

통해 옵션가치를 계산하여 경제성을 평가하게 된다. 본 연구에서 제안한 방법론은 홍수방재시설의 투자 주체인 정부의 의사결정자가 기후변화로 인한 불확실성을 고려하여 홍수 방재시설물의 가치를 평가할 수 있도록 돕는다. 경제성 평가를 위하여 제시된 실물옵션기반 방법은 계획단계에서 홍수 방재시설물의 기후적응전략 수립에 효과적인 도구가 될 것이다.

2. 연구의 이론적 고찰

지금까지 홍수 방재시설물 사업에 대한 경제성 분석에 관련하여 많은 연구가 이루어졌다(Table 1). Kim et al. (2012)는 낙동강 유역을 대상으로 하천제방 신축사업과 주민 이주사업의 경제성을 순현재가치법(Net Present Value)을 이용하여 분석하였다. Choi & Ahn (2007)은 홍수 발생 시 예상침수지역을 시뮬레이션하여 하천 제방에 대한 경제성을 평가하였다. Choi & Ahn (2008)은 GIS (Geographic Information System)기법을 이용하여 연안지역인 마산만의 방재언덕에 대한 다차원홍수피해 산정방법을 활용한 경제성 분석을 수행하였다. Choi et al. (2013)은 홍수피해 방지를 위한 댐 증고사업을 대상으로 경제성을 분석하여, 최적의 댐 증고높이를 결정하였다. Heo et al. (2013)은 최근 10년간 우심피해 발생빈도가 높은 8개 지역에 대하여 재해위험지구 정비사업의 비용편익비(Benefit/Cost) 분석을 통해 투자의 경제성을 확인하였다. Seo & Shin (2013)은 조건부 가치측정법과 다차원홍수피해 산정방법을 이용하여 항만에서 발생하는 재난 방재시설의 경제성을 분석하였다. 언급한 연구들은 방재시설의

경제성분석을 위해 전통적 방법인 순현재가치법(NPV)과 비용편익비(B/C) 분석 등을 활용하였다. 그러나 이러한 전통적 분석방법은 과거의 자료를 기반으로 투자전략을 마련하는 것으로서 미래기후변화로 인한 재해 크기와 빈도의 변동성을 고려하지 못한다.

실물옵션분석방법은 기존 방법론과는 달리 불확실성을 고려할 수 없다는 단점을 보완한다. 그리고 실물옵션분석은 금융옵션 가치평가 방법을 기반으로 전통적인 가치평가 방식에서 고려하지 못하는 경영적 유연성(Management Flexibility)을 프로젝트의 가치에 반영하여 평가하는 방법이다(Trigeorgis, 1996). Amram & Kulatilaka (1999)은 불확실성이 높은 대규모 투자가 필요한 사업인 천연자원과 통신, 제약, 반도체사업 등에 적용하여 실물옵션방법의 적용범위를 확장하였다.

최근 기후변화의 불확실성을 고려하여 홍수 방재시설물의 실물옵션방법을 적용하는 연구가 진행되었다. Park et al. (2014)은 연기옵션(Deferral Option)을 이용하여 기후변화의 영향을 고려한 하수관거 확장사업의 적정 투자 용량 및 시점을 제안하는 프레임워크를 제시하였다. Kim et al. (2017)은 선택옵션(Chooser Option)을 적용하여 도시지역의 기후변화적용 프로젝트의 경제성을 평가하는 의사결정모델을 제안하고, 서울 우면산 산사태의 미래피해액을 계산하여 10,000년 빈도의 홍수방재시설물이 필요하다는 투자전략을 제시하였다. Woodward et al. (2014)은 해수면상승의 변동성을 고려하여 적절한 홍수 저감시설용량과 설치시기 결정을 위한 의사결정방법을 제시하였다. 실물옵션분석 및 다목적 유전자

Table 1. Literature of economic assessment for flood prevention facilities

Authors	Type	Case study facility	Uncertainties
Kim et al. 2012	NPV	River levee	-
Choi & Ahn 2007	NPV, B/C, IRR	River levee	-
Choi & Ahn 2008	B/C	Disaster prevention hill	-
Choi et al. 2013	NPV, B/C	Dam height raise project for flood damage reduction	-
Heo et al. 2013	B/C	Disaster mitigation projects in hazardous area	-
Seo & Shin 2013	NPV	Port disaster prevention facility	-
Park et al. 2014.	ROA	Urban drainage system	historical flood damage cost
Gersonius et al. 2013	ROA	Urban drainage infrastructure	future rainfall intensity
Kim et al. 2017	ROA	Landslide / Debris flow prevention facilities	potential damage reduction cost
Woodward et al. 2014	ROA	Flood intervention	sea level rise
Jeuland & Whittington 2014	ROA	Multi - purpose dams	runoff
Kontogianni et al. 2014	ROA	Beach nourishment / groins	sea level rise

Table 2. Literature of domestic studies for real options analysis

Authors	Application	Case study facility	Uncertainties
Jang et al. 2015	Binomial lattice	Office building development	Commercial estate index
Jun et al. 2011	Binomial lattice	BOT road project	Project cash flow
Kim & Kim 2016	Binomial lattice	Solar cell	DSSC soundproof panel price
Lim et al. 2006	Binomial lattice	Next generation telecommunication service	Share price of business participants
Kim & Kwon 2007	Black-Scholes, Binomial lattice, Monte-Carlo Simulation	High-speed train	Average revenue of railway vehicle manufacturing industries
Jeong et al. 2015	Black-Scholes	Budget of the United States Forces Korea	Korea Stock Price Index (KOSPI 200)
Jang et al. 2011	Black-Scholes	Renewable energy R&D	Fossil energy price
Jeong et al. 2014	Binomial lattice	Water supply services	Future water price

알고리즘을 활용하여 영국 템즈강 유역 홍수위험을 평가하였다. Gersonius et al. (2013)은 실물옵션분석방법을 적용하여 영국 도시지역의 홍수에 대비한 적응전략을 도출하는 방안을 제시하였고, 다양한 기후시나리오 상황을 가정하여 기후조건에 따른 최적의 적응대안을 제시하기 위해 미래 강우강도의 변동성을 사용하였다. Jeuland & Whittington (2014)은 실물옵션분석방법으로 기후변화 하에서의 유출량의 변동성을 활용하여 다목적댐 건설에 대한 투자 의사결정 프레임워크를 제시하였다. Kontogianni et al. (2014)는 그리스 연안지역에서 해수면 상승의 위험을 관리하기 위한 옵션기반 분석방법을 통해 2100년까지 해수면 상승시나리오 4가지에 대해 적응전략을 제시하였다.

국내에서도 몇몇 연구자들이 실물옵션분석을 활용하여 다양한 종류의 프로젝트의 가치를 평가하였다(Table 2). Jang et al. (2015)은 다중실물옵션분석기법을 활용하여 부동산개발사업에 대하여 복합옵션(Compound Option)과 미국형 옵션(American Option)을 이용하여 평가하였다. Jun et al. (2011)은 옵션가격결정 및 금융·경제이론을 토대로 BOT(Build-Operate-Transfer)프로젝트에 대해 채무불이행위험 완화효과 평가방안을 제시하였다. Kim & Kim (2016)은 태양전지 구매 사례를 바탕으로 옵션분석 프레임워크를 제시하고 건설사의 전략적 의사결정을 위해 연기옵션을 적용하였다. Lim et al. (2006)은 미국형 연기옵션과 복합옵션을 적용하여 차세대 이동통신 사업의 가치 및 최적 투자 의사결정 시기를 평가하였다. Kim & Kwon (2007)은 블랙-숄츠모형, 이항격자모형과 몬테카를로시뮬레이션 기법을 활용하여 G7고속전철사업 기술개발사업의 경제성을 평가하였다. Jeong et al. (2015)은 주한미군 주둔의 전략적 가치를 추정하고 대한민국이 지급하는 방위비 분담금의 적정 규모와 미군 증원전력의 가치를 실물옵션방법으로 분석하였다. Jang et al. (2011)은 국내 신재생에너지 R&D의 경제성을 확보하기 위해 화석 에너지의 손익분기 단가를 불확실성으로 정의하여 실물옵션분석을 하였다. Jeong et al. (2014)은 수도권급의 변동성을 통해 확장 및 포기옵션적용으로 지자체 상수도 위·수탁 사업의 가치가 상승한다는 것을 밝혔다.

하지만, 우리나라에서는 홍수방재시설에 대해 실물옵션을 적용한 연구가 거의 없으며, 기후시나리오를 활용한 사례도 많지 않다. 따라서 본 연구는 우리나라 지역에서의 적용 가능한 기후변화를 고려한 홍수방재시설 실물옵션기반 경제성평가 방법을 제시하고자 한다. 제안된 방법은 기후변화로 인해 미래에 발생이 예상되는 홍수피해금액을 예측하기 위해 기상청에서 제공하는 우리나라 지역 기후시나리오를 사용하였으며, 이를 통하여 홍수방재시설물 투자사업에 대한 경제적 가치를 산출하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 임진강 유역의 홍수방재시설물을 사례연구 대상으로 선정하였다. 본 연

구의 연구방법론에서 기후시나리오를 활용하여 실물옵션 기반의 홍수방재시설물 투자사업에 대한 경제성분석 방법을 제시하는 것이며, 결론에서는 연구의 시사점과 기후변화를 고려한 실물옵션 기반 홍수방재 투자전략을 논하였다.

3. 연구방법론

3.1 미래 홍수피해 저감이익의 산정

홍수피해 저감을 목적으로 수공구조물의 설계 및 하천기본계획 수립 등에서 가장 중요한 기준은 해당 지역의 확률 강우량을 결정하는 것이다(국토교통부, 2011). 확률강우량은 국토교통부(2011)가 과거 자료를 이용하여 지속기간별 시계열 자료를 구축한 것으로 사용하였다.

본 연구에서 홍수피해 저감이익은 홍수방재시설에 투자하여 미래에 예상되는 홍수피해를 막음으로써 얻을 수 있는 피해저감 이익으로 정의한다. Kim et al. (2017)은 극한기후사상의 피해액과 강수량의 재현기간이 로그선형(Log-linear)의 관계가 있다는 모델을 제시하여 미래의 홍수피해액을 계산하였다. 과거의 강수량과 피해액 관계를 바탕으로 미래 피해액은 동일한 강수량이 발생하면 그 피해액은 과거와 같다는 가정 하에 임의의 시점에서 홍수피해액은 식(1)을 이용하여 예측할 수 있다(Kim et al., 2017).

$$D_i = a \times \ln(R) \times (1 + r^{n-1}) \quad (1)$$

여기서 D_i 는 i 년도의 홍수의 피해액(원)이며, a 는 상수이고, R 은 당시 강수량의 재현기간(년), r 는 물가상승률(%)이다.

3.2 실물옵션 기반 경제성 평가

실물옵션방법은 자연재해와 같이 예측이 어렵고, 변동성이 큰 기후변화 관련 재해방지 시설물 투자에 대한 경제성을 분석하는 데에 활용할 수 있다(Kim et al., 2017). 홍수방재시설의 경제성분석을 적용하기 위해서는 미래에 예상되는 피해액을 예측하고, 홍수피해를 막기 위한 방재시설물의 투자비를 산정해야 한다. 그리고 실물옵션방법에 적용할 옵션의 종류를 선택하고, 투자로 인해 발생하는 홍수저감 이익의 변동성을 예측해야 한다.

실물옵션 기반 경제성평가방법은 프로젝트의 불확실성을 줄이기 위해서 경영적 유연성을 사용하는 것이다(Mayer et al., 2017). 경영적 유연성은 투자 프로젝트의 투자자에게 유리한 옵션을 행사할 수 있는 권리를 소유하는 것이다. 만약 기후변화로 인해서 미래의 홍수피해가 더 심해질 것이라고 예상된다면 투자자는 홍수방재시설물에 대한 임의시점에 확장옵션(Expansion Option)을 보유하고 필요시 행사할 수 있다.

변동성은 기후시나리오에서 미래 기후자료를 기반으로 산정된 미래 홍수피해 저감이익의 시계열 자료를 활용하여

로그현금흐름이익방법(Logarithmic Cash Flow Returns Approach)으로 식(2)와 같이 변동성(σ)을 구할 수 있다 (Mun, 2002).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

여기서 n 은 사업기간 내 현금흐름 연대출의 개수이고, x_i 는 i 번째 현금흐름의 매출, 그리고 \bar{x} 는 x_i 의 평균값이다. 특정지역의 홍수로 인한 피해는 대해 발생하는 것은 아니기 때문에 10년 단위로 묶어서 계산하는 것이 합리적이다.

실물옵션을 적용하기 위해서 본 연구는 실물옵션방법에서 흔히 쓰이는 이항격자모형(Binomial Lattice Model)을 사용하고자 한다. 이항격자모형은 옵션적용을 효과적으로 시각화할 수 있는 효과적인 방법이며, Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다 (Mun, 2002).

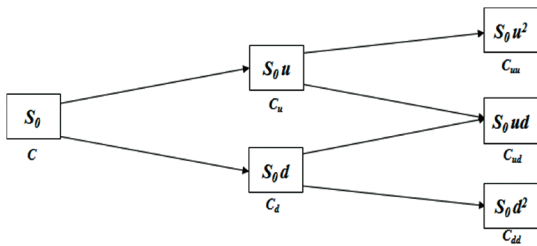


Fig. 1. Binomial lattice model

여기서, 홍수방재시설물의 기초자산가치(S_0)는 아래 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \frac{D_i - M_i}{(1+r)^{i-1}} \quad (3)$$

여기서, D_i 는 i 년도의 홍수의 피해액(원)으로 식(1)로 계산되며, M_i 는 홍수피해가 발생했을 때의 유지보수비용(원), r 는 물가상승률(%)이다. 상승지수(Up Movement) $u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$, 하락지수(Down Movement) $d = \frac{1}{u}$, 그리고 위험중립확률(Risk-neutral Probability) $q = \frac{(e^{r_f \Delta t} - d)}{u - d}$ 을 사용하여 옵션값(Option Value) C 는 식(4)와 같이 구할 수 있다 (Copeland & Antikarov, 2003).

$$C = e^{-r_f \Delta t} [qC_u + (1-q)C_d] \quad (4)$$

여기서, r_f 는 무위험이자율(%), C_u 는 가격 상승시의 옵션기대값, C_d 는 가격 하락시의 옵션기대값이다. 전체 사업기간은 시간단계(Δt)로 세분할 수 있다.

4. 사례연구: 임진강유역 홍수피해

4.1 대상지역 과거 홍수피해자료

임진강과 한탄강유역은 1996년 7월 26일부터 28일까지, 1998년 8월 3일부터 8일까지 그리고 1999년 7월 31일부터 8월 3일까지 세 번의 대규모 홍수피해가 발생하였다. Table 3은 2일강우량과 피해현황을 보여준다. 세 번의 홍수로 인해 총 116명이 사망하고, 31,439명의 이재민과 약 9천억원의 경제적 손실이 발생했다(감사원, 2005).

피해 발생 후 1999년에 대통령은 한탄강홍수조절댐 건설 등 이 지역에 종합치수대책을 시행하도록 지시하였다. 정부는 건설비 약 1조 8천억원을 들여 한탄강댐, 군남홍수조절지, 제방, 천벌저류지, 배수펌프장 건설 등을 시행하였다. 본 사례연구의 건설비 1조8천억원은 사업기간 동안 물가상승률을 고려한 가정된 수치이다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 사례 대상지역내 군남홍수조절지와 한탄강홍수조절댐 등 주요시설물들은 대한민국 최북단에 위치하고 있다. 임진강과 한탄강의 상류는 군사분계선 위쪽에 위치하고 있기 때문에 호우 발생 시 집수 지역의 상황을 정확하게 파악하기 힘든 실정이다. 가장 많은 예산이 투입된 댐건설은 수몰지역 주민과 환경단체의 반대로 늦어져 2011년에 군남홍수조절지, 2016년에는 한탄강홍수조절댐이 완공되었다.

Table 3. Historical flood damage in case study site

Year of flood event	1996	1998	1999
Rainfall (mm/2days)	557.7	541.0	622.1
Death tolls (person)	18	86	12
Flooded area (km ²)	131.30	35.22	116.85
Flood victims (person)	14,776	7,510	9,153
Damage cost (million Won)	310,538	201,934	388,177

4.2 기후시나리오에 의한 강수량 모의

RCP (Representative Concentration Pathway)시나리오는 온실가스(Greenhouse Gas)를 산업혁명 이전으로 억제할 경우를 기후변화 시나리오인 RCP2.6로 정하고, 현재 추세로 저감노력 없이 온실가스가 배출되는 경우를 RCP8.5로, 그리고 그 사이의 중간 시나리오 RCP4.5와 RCP6.0로 구성되어 있다(IPCC, 2014).

우리나라 기상청은 RCP 기후시나리오로부터 각 행정구역별로 2100년까지 기온, 강수량 등 예측기상자료를 제공한다. 본 연구에서는 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 RCP4.5 시나리오와 현재 추세 그대로 저감 노력이 없는 상황인 RCP8.5 시나리오를 적용하여 철원군 지역의 일별 강수량자료를 활용하였다(기상청, 2017).



Fig. 2. Location of the project area (NGII, 2016)

4.3 미래 홍수피해 저감이익 산정

국토교통부(2011)가 제공하는 철원지역의 강우량-재현주기 관계 그래프는 아래 Fig. 3과 같다. 그래프를 활용하여 미래의 강우별 재현주기를 알 수 있다. 여기서 강우량은 댐과 하천기본계획에서 활용한 2일 지속시간이며, 재현주기의 단위는 년이다.

미래 홍수피해 저감이익을 계산하기 위해서 국민안전처가 발행한 재해연보 1971년부터 2014년까지의 사례연구 대상지역의 과거 강수량과 피해액 자료를 활용하였다(국민안전처, 2015). Fig. 4는 과거 홍수 피해액 자료 중 물가상승률을 고려했을 때 가장 큰 피해를 초래한 1999년의 홍수피해의 재현주기와 피해액을 로그선형(Log-linear)으로 그 관계를 보여준다. 미래 피해액은 기본식(1)을 변형시킨 식(5)로 예측가능하다.

$$D_i = 189,301,891.0815 \times \ln(R) \times (1 + r^{n-1}) \quad (5)$$

여기서, 물가상승률(r)은 한국은행에서 제공하는 연평균 소비자 물가상승률을 적용한다.

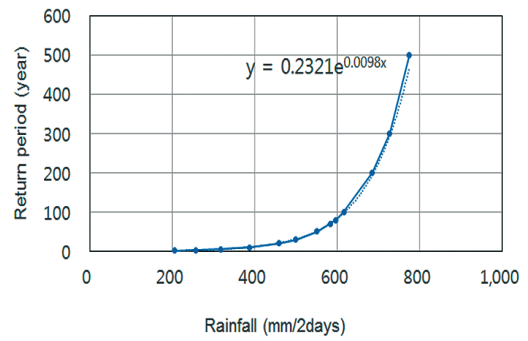


Fig. 3. Relationship of rainfall and return period

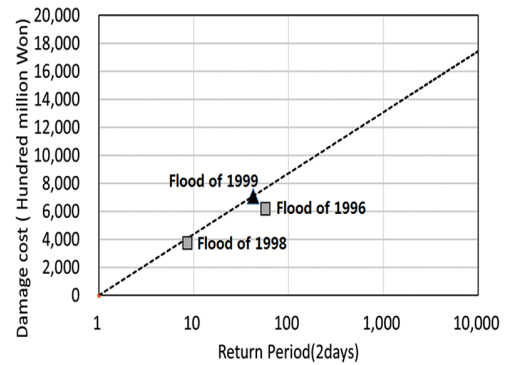


Fig. 4. Relationship of historical damage cost and return period

사례연구의 사업기간은 2021년부터 2100년으로 한정을 했다. 홍수피해를 예측하기 위해서 홍수방재시설 설계에 기준이 되는 2일 강우량을 기준으로 식(5)를 이용하여 매 10년 동안의 피해액을 계산하였다(Fig. 5). 본 그래프에서 주목해야 할 것은 2081년부터 2090년 사이에 RCP8.5시나리오가 실현된다면 재현주기 100년이 넘는 홍수가 발생하여 약1조 7천억원의 큰 피해가 예상된다는 것이다. 하지만 대상지역의 홍수방재시설을 확장한다면 그 피해액을 막을 수 있어 저감이익으로 전환시킬 수 있다.

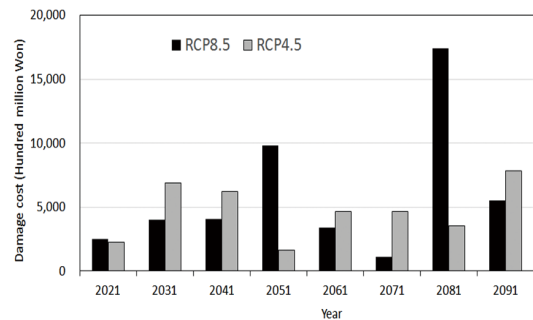


Fig. 5. Damage costs between 2021 and 2100

4.4 대상지역의 실물옵션 기반 경제성 평가

실물옵션 기반 경제성 평가를 위해서는 투자결정에 영향을 주는 경제적인 요소들과 기술적인 요소들의 정의가 필요하다(Table 4). 경제적인 요소들은 물가상승률과 무위험이자율이며, 과거자료에서 그 값들을 구했다. 무위험이자율(Risk-free Rate)은 통상적으로 미국 재무부 장기채권의 이자율로 결정하는데 본 연구에서는 2001년부터 2015년까지 연평균 이자율 4.0%로 결정하였다. 물가상승률은 한국은행에서 제공하는 소비자물가 상승률로 1994년부터 2014년까지의 연평균 인플레이션 값인 3.4%를 적용한다.

Table 4. Economic and technical parameter of case study

Parameter	Value
Risk-free rate	4.0%/year
Inflation rate	3.4%/year
O&M cost with a disaster in a year	3.0% of the damage
Initial investment costs	18,000 hundred million won
Capacity of existing facility	497 mm in 2days (30-year return period)
Investment cost for expansion in 2071	104,208 hundred million won
Capacity of expansion facility	685 mm in 2days (200-year return period)
Project period	80 years (2021-2100)
Option type	Expansion option

본 연구에서 사용되는 기술적인 요소들은 시설물의 유지관리비용, 기 설치된 시설물의 설계용량, 초기투자비용, 확장비용, 사업기간과 적용 옵션 종류 등이다(Table 4). RCP8.5 시나리오에 의하면 2081년 이후에 강우강도 100년을 넘는 홍수피해를 예상하기 때문에 투자자는 200년 재현주기의 용량으로의 확장옵션을 갖고, 공사기간을 고려하여 옵션의 행사시점은 2071년으로 가정했다. 또한 홍수방지시설의 확장비용은 2071년까지의 물가상승률을 고려하여 약10조 4천억원으로 가정하였다.

2006년 설계당시 200년 재현기간에 해당하는 시설물로 설계를 하였다. 그러나 국토교통부에 의해 2011년 확률강우량이 상향조정 되었고 현재 설계되어 있는 시설물은 현재기준으로 산정하면 30년 재현주기의 확률강우에 대비한 시설물에 불과하다. 따라서 미래의 홍수방재를 위해서는 시설물의 확장이 필요하다.

5. 경제성 평가결과

5.1 기후시나리오별 옵션가치

기후시나리오 RCP8.5와 4.5가 실현된다는 가정하에 식(2)~(4)에 의해 2021년부터 2100년까지 기간동안 홍수피해

저감이익의 변동성, 옵션값 그리고 순현재가치(NPV)를 구했다(Table 5). RCP8.5 시나리오의 경우는 RCP4.5에 비해서 기후변화가 심하고 많은 경우에 의해 홍수피해액의 변동성도 크다. 미래 기후변화에 대처하기 위해서 2071년에 확장을 한다고 가정하여 2100년까지 80년간의 NPV는 -264억원이 된다. 하지만 기후변화의 변동성과 확장옵션을 고려한 실물옵션방법을 적용하면 이 프로젝트의 옵션가치는 약 3조원이 된다. RCP4.5의 경우엔 NPV가 -7,976억원으로 손실이 예상되지만, 확장옵션을 적용한 실물옵션분석 방법으로는 옵션가치는 약 1조 9천억원으로 상승하게 된다(Table 5).

Table 5. Results of real options analysis (in hundred million Won)

Climate Scenario	RCP8.5	RCP4.5
Volatility for 10years	143%	87%
NPV	-264	-7,976
Option Value	30,131	19,051

5.2 기후시나리오별 투자전략

RCP8.5 기후시나리오가 실현을 가정하면, 사업지역의 기초자산가치는 3조 1천억원이 되고, 옵션가치는 3조원이 된다. 옵션값이 초기투자비(1조 8천억원)보다 많은 값이므로, 프로젝트는 경제성이 확보했다고 할 수 있다. 프로젝트는 분석기간 2021년부터 2100년까지 80년 동안의 홍수피해 저감이익이 계산된 가치이다. 정부가 홍수방재시설의 용량을 재현기간 200년으로 확장하는 옵션을 행사하여 2071년 10조 4천억을 투자한다면 미래에 발생하는 홍수피해를 막을 수 있는 경제성을 가진 프로젝트로 판단된다. Fig. 6은 이항격자 모형으로 매 10년별 자산가치와 옵션가치를 표시한 것이며, 2071년의 확장옵션을 보유하고 있는 경우에 대한 투자전략을 보여준다. 만약 기후시나리오와 다르게 기후변화로 인한 홍수피해 저감이익이 예상보다 적어지게 되는 경우 확장옵션을 행사하지 않는 것이 낫고, 그 시점은 옵션가치를 0으로 표시했다. Fig. 6의 이항격자모형은 각 시기별 또는 상황별의 전략을 시각적으로 제공하고 있다.

만약 RCP4.5 기후시나리오가 실현된다고 가정하면, 이 프로젝트 계획단계에서 기초자산은 2조 3천억원이고 옵션가치는 1조 9천억원이 된다. 옵션가치가 RCP8.5 보다 작은 값을 갖는 이유는 사업기간 동안 홍수피해와 변동성이 상대적으로 작기 때문이다.

두 가지 기후시나리오의 경우 확장옵션을 적용했을 때 경제적 가치가 높아진다. 특히 기후변화의 변동성을 고려하지 않는 전통적 투자방법인 NPV는 모든 시나리오에서 음수가 나와 프로젝트의 경제성이 없는 것으로 평가된다. 하지만, 확장옵션을 적용하여 실물옵션분석으로 평가하면 사업의 가치

RCP8.5

ROA of the case study project (in Hundred Million KRW)

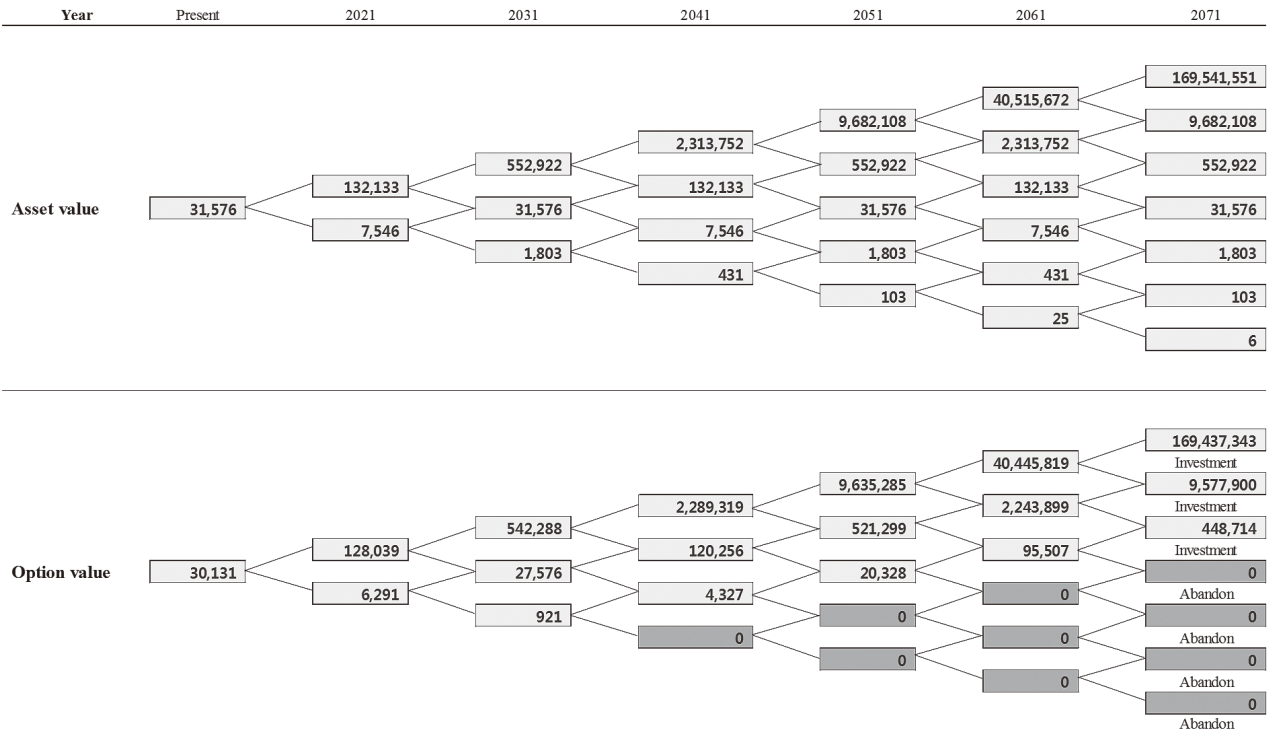


Fig. 6. Binomial Lattice under RCP8.5

RCP4.5

ROA of the case study project (in Hundred Million KRW)

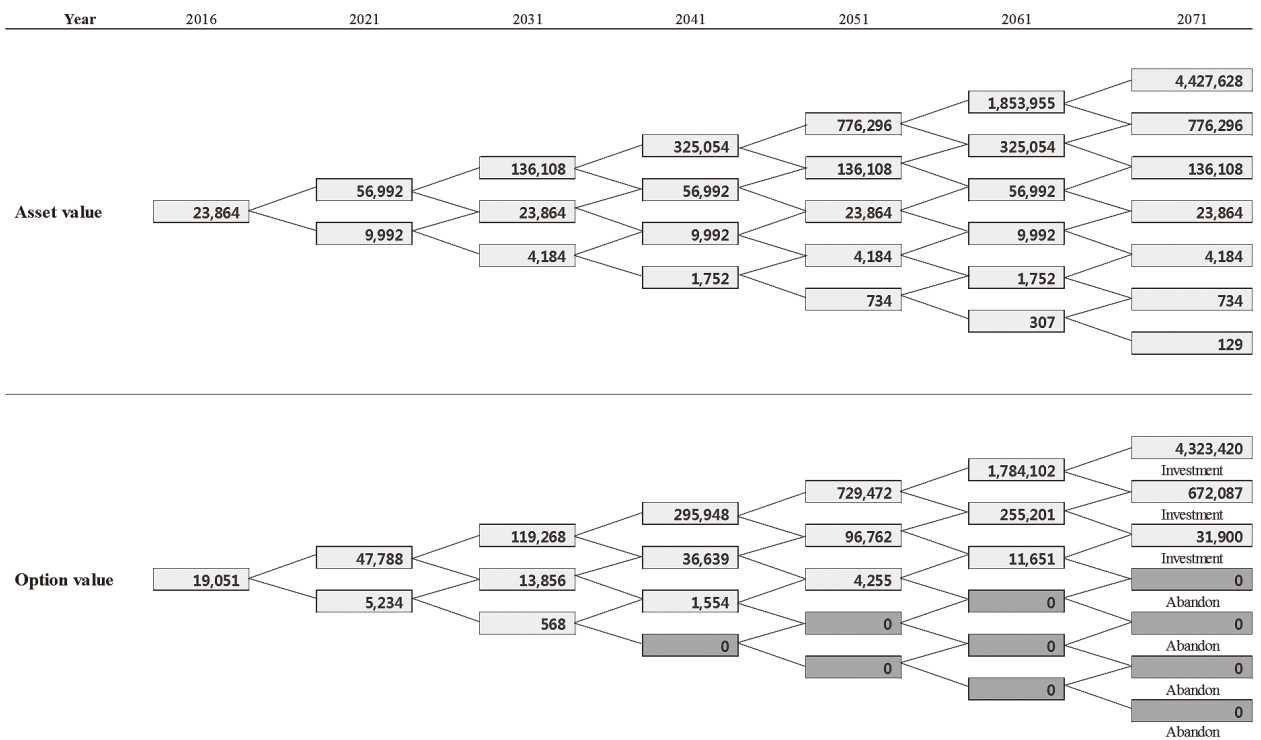


Fig. 7. Binomial Lattice under RCP4.5

가 크게 상승하고 프로젝트의 경제성이 확보된다. 즉, 실물옵션분석 방법으로 경영적 유연성을 적용한다면 이 프로젝트의 경제성을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 연구는 기후시나리오를 활용하여 홍수방재시설물 프로젝트의 홍수피해 저감이익의 변동성을 계산하고, 실물옵션기반 경제성분석 방법을 제시하였다. 국내외의 홍수방재시설물의 경제성분석과 관련된 연구 문헌을 검토하였고, 실물옵션기반의 경제성분석 방법을 구체적으로 제시하였다. 제안된 방법은 임진강 유역의 홍수방재시설물 사례에 적용하여 경제성분석을 실시하였다. 경제성분석에 필요한 경제적, 기술적 요소들은 과거자료를 기반으로 가정하였다. RCP 기후시나리오에서 모의된 강수량 자료를 활용하여 홍수피해액을 계산하고, 홍수방재시설물에 의한 저감이익을 계산하였다. RCP8.5와 4.5 기후시나리오가 실현되는 조건을 가정하여 2071년에 200년 재현주기에 적용하도록 하는 확장을 위한 투자를 할 수 있는 권리를 가지는 확장옵션을 적용하여 프로젝트의 옵션가치를 계산하였다. 옵션가치 분석결과 두 가지 시나리오 하에서 경제성을 확보하고 있음을 확인하였고, RCP8.5 기후시나리오가 실현될 때가 RCP4.5의 경우보다 홍수피해 저감이익이 더 많이 발생하였다. 따라서 본 연구는 확장옵션이 본 사업의 가치를 더 증가시킴을 확인했다.

본 연구는 두 가지의 학문적 가치를 갖는다. 첫째, 정부의 의사결정권자는 본 연구에서 제시된 실물옵션분석방법을 활용하여 홍수방재시설물의 경제성분석에 기후변화의 불확실성을 고려할 수 있다. 둘째, 기후시나리오에서 제공하는 기상 자료를 활용하여 기후위험의 크기를 경제적 가치로 정량화하는 방법을 제시하였다.

하지만 본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 경제적 요소들의 변동성은 충분히 고려하지 못하였다. 무위험이자율과 물가상승률은 경제성 투자분석에 매우 중요한 요소이지만 본 연구에서는 과거의 자료의 평균값을 이용하여 사업기간동안 고정된 값을 사용하였다. 둘째, 미래기상조건을 예측하는 데 기후변화시나리오 RCP8.5와 4.5를 사용하였다. 기후시나리오의 정확도가 미래 피해를 예측하는 중요한 요소이다. RCP 시나리오가 현재 시점에서 가장 진보된 예측 기법이지만 그 정확도를 파악하기는 쉽지 않다. 향후 더 정밀한 기후시나리오가 개발된다면 홍수피해 정량화 결과의 정확도를 더 높일 수 있을 것으로 기대된다.

사례 연구에서 살펴보았듯이 미래의 기후양상은 변동성이 매우 클 것으로 예상된다. 따라서 과거 기후자료에 기반하여 미래의 불확실성을 고려하지 못하는 기존의 전통적인 경제성 분석방법은 기후변화가 심해지는 이 시대에 더 이상 유효하

지 않다. 실물옵션기반의 경제성분석을 통해서 미래 기후의 변동성을 고려하여 홍수방재시설물의 계획 수립에 전략적인 접근이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.2011-0030040, NRF-2014R1A2A1A11052499).

References

- Amram, M., and Kulatilaka, N. (1999). "Real options." *Harvard Business School Press*, Boston, Massachusetts.
- Choi, C. K., Kim, G. H., Yeo, K. D., Shim, M. P., and Choi, Y. S. (2013). "Optimal Size Determination of Flood Mitigation Facilities in a Watershed Using Geo-Spatial Information System and Economic Analysis: Focused on Dam Height Raise Project." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, KAGIS*, 16(4), pp. 64-78.
- Choi, H., and Ahn, C. H. (2007). "Economic Analysis of Floodplain Forecast using GIS and MD-FDA." *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 25(6-2), pp. 599-611.
- Choi, H., and Ahn, C. H. (2008). "Economic Analysis of Typhoon Surge Floodplain that Using GIS and MD-FDA from Masan Bay, South Korea." *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 12(4), pp. 724-729.
- Copeland, T. E., and Antikarov, V. (2003). "Real options: A practitioner's guide." *Cengage Learning*, NY, NY.
- Gersonius, B., Ashley, R., Pathirana, A., and Zevenbergen, C. (2013). "Climate change uncertainty: building flexibility into water and flood risk infrastructure." *Climatic change*, 116(2), pp. 411-423.
- Heo, B. Y., Yu, S., and Kim, S. W. (2013). "Economic Impact Analysis of Disaster Mitigation Projects in Hazardous Areas." *Economic and Environmental Geology*, 46(3), pp. 247-256.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

- (2014). "Climate change 2014: Synthesis report." *IPCC*, Geneva, Swiss.
- Jang, M., Ku, Y., Choi, H., Kwon, T. H., Kim, J., and Kim, J. (2015). "A study on the Multiple Real Option Model for Evaluating Values based on Real Estate Development Scenario." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 16(5), pp. 114–122.
- Jang, Y., Lee, D., and Oh, H. (2011). "Valuation of Renewable Energy using Real Options Analysis." *Proceedings of Korean Institute of Industrial Engineers*, pp. 549–554.
- Jeong, I. C., Kim, J. H., and Kim, S. K. (2014). "An Evaluation of the Economic Value of Outsourcing of Water Supply Services Considering Uncertainty of Water Price." *Korean Management Science Review*, 31(3), pp. 95–111.
- Jeong, W. Y., Chae, W. Y., and Choi, M. S. (2015). "A Real Options Approach to Testing the Validity of Contribution to the Budget of the United States Forces Korea." *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 41(3), pp. 287–295.
- Jeuland, M., and Whittington, D. (2014). "Water resources planning under climate change: Assessing the robustness of real options for the Blue Nile." *Water Resources Research*, 50(3), pp. 2086–2107.
- Jun, J. B., Lee, J. S., and Lee, S. S. (2011). "Default Risk Mitigation Effect of Financial Structure and Characteristic in BOT Project Finance." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(2), pp. 76–82.
- Kim, B., and Kim, C. (2016). "A Real Option Perspective to Evaluate Purchase Decisions of Construction Materials with High Price Volatility." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 17(1), pp. 121–132.
- Kim, G., Choi, C., Yi, C., and Lee, J. (2012). "Cost-Effective Analysis for Evaluating Utility of River Levee in Policy Aspects." *Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, 12, pp. 247–254.
- Kim, K., Ha, S., and Kim, H. (2017). "Using real options for urban infrastructure adaptation under climate change." *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 40–50.
- Kim, S. M., and Kwon, Y. J. (2007). "Dynamic Valuation of the G7-HSR350X Using Real Option Model." *Journal of the Korean society for railway*, 10(2), pp. 137–145.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2017). "Climate Scenarios of Korea." <www.climate.go.kr> (Jan. 15, 2017).
- Kontogianni, A., Tourkolias, C. H., Damigos, D., and Skourtos, M. (2014). "Assessing sea level rise costs and adaptation benefits under uncertainty in Greece." *Environmental Science & Policy*, 37, pp. 61–78.
- Lim, K. S., Lee, D. J., Kim, K. H., and Oh, H. S. (2006). "Valuation and Optimal Timing of the Investment in Next Generation Telecommunication Service Using Real Options." *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, KIIIE, 32(3), pp. 180–190.
- Mayer, C., Breun, P., and Schultmann, F. (2017). "Considering risks in early stage investment planning for emission abatement technologies in large combustion plants." *Journal of cleaner production*, 142, pp. 133–144.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2011). "Study for Improvement and Supplementation of Design Rainfall." *MOLIT*, Sejong, Korea.
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS) (2015). "2014 Disaster Annual Report." *MPSS*, Sejong, Korea.
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS) (2015). "2015 Ministry of Public Safety and Security Statistics Annual Report." *MPSS*, Sejong, Korea.
- Mun, J. (2002). "Real options analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions." *John Wiley & Sons*, Hoboken, NJ.
- Park, T., Kim, C., and Kim, H. (2014). "Valuation of drainage infrastructure improvement under climate change using real options." *Water resources management*, 28(2), pp. 445–457.
- Seo, I., and Shin, S. (2013). "Estimation and Comparison of Benefits of Disaster Prevention Facilities at the Masan Port with CVM and MD-FDA." *Journal of Korea Port Economic Association*, 29(4), pp. 289–323.
- The Board of Audit and Inspection of Korea (BAI) (2005). "Construction Project of Hantan River Dam." *BAI*, Seoul, Korea.
- Trigeorgis, L. (1996). "Real options: Managerial flexibility

and strategy in resource allocation.” *MIT Press*, Cambridge, MA.

Woodward, M., Kapelan, Z., and Gouldby, B. (2014). "Adaptive flood risk management under climate change uncertainty using real options and optimization.” *Risk Analysis*, 34(1), pp. 75–92.

요약 : 임진강 유역은 1996년부터 1999년까지 3번의 대규모 홍수가 발생하여 많은 인명피해와 9천억원의 재산피해를 입었다. 우리나라는 기후변화로 인하여 홍수피해가 앞으로 증가할 것으로 예상된다. 본 연구는 기후시나리오를 활용하여 미래의 홍수피해를 예측하고, 실물옵션 기반 경제성분석 방법을 제시하였으며, 임진강유역의 홍수방지시설물 투자사업의 사례연구를 통해 경제성분석을 실시하였다. RCP (Representative Concentration Pathway) 기후시나리오에서 모의된 강수량 자료를 활용하여 홍수피해액을 계산하고, 홍수방지시설물 투자에 의한 저감이익을 분석하였다. 향후 RCP8.5와 RCP4.5 기후시나리오가 실현되는 조건을 가정하여 홍수피해 저감이익의 변동성을 구하고, 2071년에 200년 재현주기에 적응하도록 하는 확장을 위한 투자를 할 수 있는 확장옵션을 적용하여 프로젝트의 옵션가치를 구했다. 옵션가치 분석결과, 두 가지 시나리오 하에서 경제성을 확보하고 있음을 확인하였고, RCP8.5 기후시나리오가 실현될 때가 RCP4.5의 경우보다 홍수피해 저감이익이 더 많이 발생하였다. 본 연구는 정부 의사결정권자가 실물옵션분석방법을 활용하여 홍수방재시설물의 경제성분석에 기후변화 불확실성을 고려할 수 있도록 도와줄 것으로 기대되며, 기후시나리오에서 제공하는 강우자료를 활용하여 기후위험요소를 경제적 가치로 정량화하는 방법을 제시하였다.

키워드 : 기후변화, 실물옵션, 경제성분석, 홍수, 불확실성
