



## Re-evaluation of comprehensive flood management plan for the Yeongsan river basin using Robust Decision Making

Kang, Dong-Heon<sup>a</sup> · Kim, Young-Oh<sup>b\*</sup> · Park, Junehyeong<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Dong Myeong Engineering Consultant

<sup>b</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>c</sup>National Institute of Meteorological Research

Paper number: 16-034

Received: 27 March 2016; Revised: 08 December 2016 / 15 January 2017; Accepted: 15 January 2017

### Abstract

This research adopted a Robust Decision Making framework to re-evaluate four alternative strategies proposed by the Comprehensive Flood Management Plan for the Yeongsan River Basin report (MLTM, 2005) considering uncertainties of future floods under condition of climate change. To reflect the uncertainties, multiple sets of future flood scenarios were used with three uncertainty factors: the change in rainfall intensity based on the RCP climate change scenarios and the changes in the temporal and the spatial flood distributions. With combinations of these factors, 216 plausible flood scenario sets were generated and the performances of the four alternatives under different future states were evaluated. From the results, the most robust alternative among the strategies was identified. Moreover, the key factors which made the tested alternatives poor were discovered through assessment of the uncertainty factors. This information can provide detailed insights to decision makers and can be utilized to overcome alternatives' potential vulnerabilities by modifying the strategy to be more robust.

**Keywords:** Climate change, Robust Decision Making (RDM), Uncertainty, Comprehensive flood management, Yeongsan river basin

## 로버스트 의사결정을 이용한 영산강유역 종합치수계획 재평가

강동현<sup>a</sup> · 김영오<sup>b\*</sup> · 박준형<sup>c</sup>

<sup>a</sup>동명기술공단종합건축사사무소, <sup>b</sup>서울대학교 건설환경공학부, <sup>c</sup>기상청 국립기상과학원

### 요 지

본 연구에서는 미래 기후변화로 인한 미래 홍수의 불확실성을 고려하여 영산강유역 종합치수계획 보고서(MLTM, 2005)에서 제시한 4가지 홍수방어대안들을 재평가하였다. 불확실성을 반영하기 위해 미래 RCP 기후 시나리오에 따른 확률강우량 값의 변화, 홍수의 시간적 분포, 그리고 공간적 분포 등 세가지 불확실성 요소를 고려하였다. 이 요소들의 조합을 통해 각기 다른 특성을 갖는 216개의 홍수 시나리오가 생성되었으며 생성된 홍수 시나리오 하에서 대안들의 수행능력이 평가되었다. 평가 결과를 통해 4개의 대안들 중 가장 로버스트한(혹은 강건한) 대안이 선별되었다. 또한, 불확실성 요소 평가를 통해 대안들이 좋지 못한 수행능력을 보이게 하는 주 원인 요소를 파악하였다. 이러한 정보는 의사결정자에게 대안들에 대한 더 상세한 통찰력을 제공하며 이후 선정된 대안의 로버스트함을 증대시키는데 있어 중요한 단서로 활용될 수 있다.

**핵심용어:** 기후변화, 로버스트 의사결정(RDM), 불확실성, 유역종합치수계획, 영산강유역

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-880-8916  
E-mail: yokim05@snu.ac.kr (Y.-O. Kim)

## 1. 서론

우리 나라 기후변화 연구는 약 20년 전쯤 시작되었으나 대부분 미래 취약성 평가(vulnerability assessment)에 그치고 있어 적응 계획(adaptation plan) 수립에 관한 연구가 필요한 시점이다. ‘기후변화 적응’이란 기후변화의 영향으로 발생하는 손실을 최소화하고 오히려 이를 기회로 삼기 위해 행해지는 자연과 인간의 조정(adjustment) 행위 모두를 포함한다(IPCC, 2001). 수자원 분야에서도 다양한 적응 계획이 있을 수 있는데, 이수안전도의 재설정, 제방의增高, 홍수취약지역 가구의 이주 등이 여기에 포함될 수 있다. 이러한 적응 계획들을 수립하는 과정 속에서 우리는 수없이 많은 의사결정(decision making)을 내려야 하지만, 기후변화의 ‘비정상성(non-stationarity)’과 깊은 불확실성(deep uncertainty) 때문에 어려움에 봉착하게 된다. 비정상성이란 어떤 변수의 주요 통계값이 시간에 따라 변하는 것을 의미하고, 반면 ‘깊은 불확실성’이란 미래에 어떤 사건이 일어날 지 불확실한 것은 물론 이것의 대한 발생 가능성조차 알려지지 않은 상황을 말하는 데(Lempert *et al.*, 2003), 본 연구에서는 이 중 깊은 불확실성 하에서의 의사결정에 대해 논하고자 한다. 보통의 경우 의사결정은 발생 가능성이 가장 높은 시나리오를 대상으로 손해를 최소화(또는 이득을 최대) 하는 최적(optimal) 대안으로 내려지지만, 깊은 불확실성을 가진 상황에서는 폭넓은 시나리오 전반에 대해 준수한(satisfactory) 결과를 가져오는 강건한(robust) 대안을 찾아야 한다. Lempert and Collins (2007)에 따르면 로버스트함은 (1) 최적의 수행능력을 포기하는 대신 예상치 못한 상황에 있어 둔감성을 갖는 것, (2) 넓은 범위의 미래 상황에서 준수한 수행능력을 가지는 것, (3) 선택의 여지를 남겨두는 것으로 정의된다. 이러한 맥락에서 본 연구에서는 수자원 계획 수립을 위한 로버스트 의사결정(Robust Decision Making; RDM) (Lempert *et al.*, 2003) 기법을 연구하였고, 이를 기존 영산강 유역종합치수계획에서의 의사결정 과정에 적용하고자 한다. 영산강유역 종합치수계획은 영산강 수계 국가하천 및 지방하천에 대한 종합치수 방안을 수립 및 평가하여 최적의 홍수방어 계획을 수립하는 계획인데, 여기에 RDM의 적용을 통해 수행하려는 연구목적은 두 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 기존 영산강유역 종합치수계획에서 선정한 최적 대안이 미래 기후변화로 인한 깊은 불확실성 상황 속에서도 여전히 최선의 대안인지를 평가한다. 두 번째로는 다양한 미래 불확실성에 대한 안정성을 기준으로 선별한 대안의 잠재적 취약성을 파악한다. 이는 어떠한 상황에서 대안의 수행능력이 급격히 떨어지는지를 확인하는 것으로, 그

‘어떠한 상황’에 해당하는 시나리오들을 분석하여 대안이 안 좋은 결과를 창출하게 만드는 요소가 무엇인지를 찾아내어 대비하기 위함이라 할 수 있다.

## 2. 대상유역 및 종합치수계획

영산강유역 종합치수계획은 영산강수계 국가하천 5개소 및 지방 1급 하천 2개소에 대한 종합치수방안을 수립하는 계획이다. RDM 적용을 위한 과정에서 유출매개변수, 강우자료, 홍수방어대안 등은 MLTM (2005)에 제시된 자료 값들을 대부분 그대로 참고하였다.

영산강은 우리나라 5대강 중 하나로 한반도 남서부 전라도에 위치하며, 유역면적은 3,455 km<sup>2</sup>, 유로연장은 129.5 km이다. 유역의 평균폭은 26.7 km, 유역형태는 직사각형 형태의 하천이다. 영산강유역은 유역평균경사가 19.5%로 비교적 완만한 유역이고, 하천에 인접하여 농경지가 발달해 있다. 영산강 중·상류부에는 광주광역시와 나주시 등의 도심지 및 인구 밀집지역이 위치하고 있고, 전체 유역면적 중 도시지역이 7%, 임야와 농경지가 전체의 85%를 점유하고 있다.

영산강유역 종합치수계획 보고서(이하 MLTM, 2005)에서는 여러 개의 홍수방어대안으로 구성된 4가지의 종합계획안을 제시하고 이들을 평가하여 최적의 대안을 선정하는 과정이 기술되어있다. 영산강유역 종합치수계획에서 제시한 4가지 대안들은 각각 여러 방어대안의 조합으로 구성되어 있다(Table 1). 영산강유역 종합치수계획에서는 중·상류와 하류, 배수펌프장의 치수능력 확충을 모두 고려하지만 본 연구에서는 홍수의 크기와 형태 변화에 따른 종합치수계획안들의 우선 순위 변동을 파악하는 것이 목표이므로, 모든 계획안에 같은 영향을 주는 하류부 홍수방어 대안들은 배제하고 중·상류부 대안들만을 고려한다. 각각의 종합치수계획안들은 치수적 측면에서 상이한 특징을 가지고 있어 홍수의 형태와 크기에 따라 가변적인 홍수저감능력을 보일 것으로 예상된다.

## 3. 로버스트 의사결정

### 3.1 방법론

#### 3.1.1 개념 및 특징

RDM은 불확실성 하에서의 장기적 정책분석을 돕기 위해 2003년 미국 RAND Corporation에서 개발된 시나리오 기반의 정량적 의사결정기법이다. 일반적 의사결정의 목표가 가

**Table 1.** Four alternatives of the Comprehensive Flood Mitigation Plan for the Yeongsan River Basin Report (MLTM, 2005)

Components		Alternatives		Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
Mid-Upper Stream	Raise Dam Height +Auto ROM	Jang Sung Dam	+2.0 m	●			
		Na Ju Dam	+2.0 m	●			
		GwangJu Dam	+1.0 m	●			
		Ham Dong Dam	+2.0 m	●			
	Raise Dam Height +Rigid ROM	Jang Sung Dam	+1.5 m		●		
		Na Ju Dam	+1.5 m		●		
		GwangJu Dam	+1.0 m		●		
		Ham Dong Dam	+1.0 m		●		
	Lower Restricted Water Level	Jang Sung Dam	-1.0 m			●	
		Na Ju Dam	-1.0 m			●	
	Construct a New Dam	O Rye Dam			●		
	Construct Washlands	Yeong San2					●
		Yeong San7		●	●	●	●
		Hwang Yong1					●
		Hwang Yong2					●
Ji Suk1					●		
Ji Suk2					●		
Construct Flood Detention Pond	Dam Yang		●		●	●	
	Hwang Yong				●	●	
	Ji Suk		●	●	●	●	
Down Stream	Construct Yeong-San Lake Sea dike Sluice	Gate expansion		●	●	●	●
	Utilize Yeong-Am Lake Storage space	Etc		●	●	●	●

장 실현 가능성이 높은 하나의 미래상황을 전망하고 그에 대한 최적의 대안을 선별하는 것이라면, RDM은 우선 일어날 수 있는(plausible) 다양하고 넓은 범위의 미래 상황을 가중치 없이 고려하고, 각 대안들을 이 다양한 미래 상황 등에 대해 각각 평가한다. 그리고 후보 대안들 중 상대적으로 미래 불확실성에 대해 둔감(Insensitive)하면서도 준수한 결과를 보이는 유연한 대안을 선별하는 것을 목적으로 한다.

3.1.2 적용과정

RDM 기법은 적용 분야나 정책의 목적 범위에 따라 그 방법에 있어 차이가 있지만, 기본적으로 4단계의 분석과정을 거친다.

(1) 문제의 구체화

첫 단계에서는 의사결정 문제를 구체화(structure problem) 시킨다. Lempert et al. (2003)은 문제를 구체화 시키는데 있어 가장 핵심적인 4가지 요소들을 XLRM이라 묶어 명명하였다.

여기서 XLRM은 외생 불확실성(exogenous uncertainties), 정책 전략(policy Levers), 모형 관계식(modeling Relationships), 수행능력 평가지표(performance Metrics)를 나타낸다. 이는 RDM과정이 포함하는 핵심적인 구성요소들을 직관적이고 시각적으로 표현한 것이라 할 수 있다.

(2) 대안의 평가

각 대안들을 넓은 범위의 미래 상황에 대하여 평가한다. 이를 위해 다량의 정량적 시나리오들을 생성해야 하나 그 특성은 RDM의 적용 분야에 따라 차이가 있다. 본 연구에서는 단기적인 시간 내에 발생하는 홍수의 특성상 미래에 발생 가능한 다양한 단기 사상들의 홍수 시나리오들을 모의하는데 중점을 두었다.

시나리오가 생성된 이후에는 대안들의 거동을 모의할 모형이 구축되며, 거동을 평가하기 위해 수행능력 평가지표(performance index)를 설정한다. 대안들간의 효과적인 상대

비교를 위해, 수행능력 평가지표는 종종 후회도(regret) 라는 지표로 환산된다(Lempert et al., 2003; Savage, 1954). 여기서, 후회도는 하나의 시나리오( $f$ ) 하에서 고려하는 대안( $s$ )의 수행능력(예: Eq. (1)에서의 Gain 함수)이 그 시나리오에서의 최적 대안( $s^*$ )이 창출하는 결과와 얼마나 차이를 나타내는지를 표현하는 지표이다(Eq. (1)).

$$\text{Regret}(s, f) = \max_{s^*} [\text{Gain}(s^*, f)] - \text{Gain}(s, f) \quad (1)$$

후회도 값은 모든 시나리오에 대하여 각각 계산되며 평균적으로 가장 낮은 후회도 값을 갖는 대안이 미래 시나리오에 상관없이 평균적으로 우수한 모습을 보인다고 할 수 있다.

기존의 RDM을 적용한 연구들(Lempert et al., 2003, 2006)에서는 평균적으로 우수한 결과와 더불어 상대적으로 취약한 모습을 보일 때(즉, 높은 후회도 값을 보일 때)에도 다른 대안들에 비해 현저히 떨어지지 않는 결과를 보이는(즉, 강건한) 대안의 선별을 위해 대안의 상위 사분위( $Q_{75}$ ) 후회도 값을 평가 지표로 사용한 바 있다. 이는 최대손실이 가장 작은(minimax) 안정적인 대안을 선택하기 위한 보수적인 방법이라 할 수 있으며 본 연구에서도 역시 대안의  $Q_{75}$  후회도 값을 대안 평가 기준으로 사용하였다.

(3) 대안의 잠재적 취약성 파악

앞 단계에서 생성한 홍수 시나리오들을 같은 불확실성 요소를 갖는 시나리오들끼리 분류하여 군집화(cluster)한다. 이후 대안들을 각각의 군집화된 시나리오 세트들에 대하여 평가하여 가장 지배적인 영향을 미치는 요소(홍수를 유발한 강우의 공간적 분포, 시간적 분포, 총 강우량 등)가 무엇인지, 그리고 그 요소가 어떤 범위의 값을 가질 때 대안들이 상대적으로 좋지 못한 모습을 보이는지에 대한 정보를 파악한다. 이처럼 대안들이 좋지 못한 결과를 보이게 하는 범위의 요소 값들을 대안의 잠재적 취약성(potential vulnerability)이라고 정의한다. 그다음, 대안의 보완이 필요하다고 판단할 시 기존 대안에 추가 정책을 시행하거나 대안자체를 수정하여 RDM 과정을 다시 반복한다.

(4) 대안들 간의 트레이드 오프 분석

마지막으로, 앞서 파악한 대안의 취약성 정보를 정리하고, 각 대안들간의 트레이드오프(trade-off)에 대한 정보를 파악한다. 즉 각 대안을 택함으로써 발생하는 기회비용과 이점에 대한 정보를 정량적으로 분석한다.

본 연구에서는 앞의 (1)~(3) 과정을 통해 대안을 선별하고 이에 대한 취약성 파악과 대안의 개선방향 모색까지의 과정을 포함한다.

3.2 적용 및 결과

유역종합치수계획에 RDM을 적용하기 위해 우선 XLRM 프레임워크를 이용하여 의사결정 문제를 구체화 시켰다(Table 2). 이후 HEC-HMS를 이용하여 3가지 불확실성 요소를 포함한 216개의 홍수 시나리오를 생성하였으며 이 시나리오들에 대하여 각 대안들의 거동을 분석하였다.

3.2.1 모의모형 구축

본 연구에서는 홍수 모의와 홍수 저감량 모의를 위해 기존 영산강유역 종합치수계획에서 사용된 HEC-HMS와 HEC-ResSim을 연동하여 사용하였다(Fig. 1). HEC-HMS는 미공병단에서(The US Army Corps of Engineers)에서 유역의 홍수모의를 위해 개발한 프로그램으로 유역면적, 연장, 하상계수 등의 계수를 바탕으로 강우량을 입력하면 그로 인해 발생하는 홍수량을 산정할 수 있는 모의 프로그램이다. HEC-ResSim은 역시 미공병단에서 개발한 프로그램으로, 저수지 운영을 모의하기 위해 개발되었으며, 각 저수지들의 재원, 운영방식, 유입유량 등을 입력했을 때 각 저수지에서의 방류량, 안정성 등을 출력할 수 있다. 모형을 구축하는데 있어 필요한 유출매개변수는 MLTM (2005)의 자료를 참고하였으며, 입력자료인 미래 확률강우량 및 시공간분포는 3.2의 과정을 통해 산정하였다.

3.2.2 미래홍수 시나리오의 발생

(1) RCP에 따른 홍수의 크기 변화

기후변화 시나리오에 따른 영산강유역 확률홍수량 산정

Table 2. XLRM framework for this study

Exogenous Uncertainties (X)	Policy strategies (L)	Modeling relationships (R)	Performance Metrics (M)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Future probable precipitation</li> <li>• Temporal distribution of future rainfall</li> <li>• Spatial distribution of future rainfall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Four alternatives proposed by the Comprehensive Flood Management Plan for Yeong San River Basin (2005)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HEC-HMS (rainfall-runoff)</li> <li>• HEC-ResSim (reservoir network)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economic benefits by reducing damage divided by cost</li> </ul>

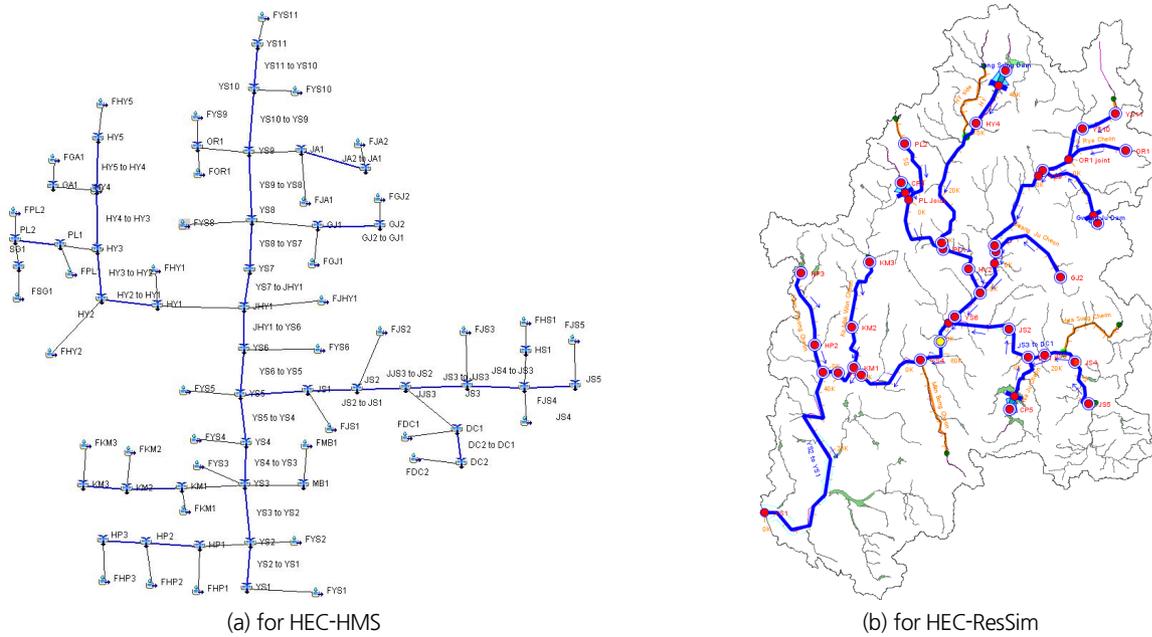


Fig. 1. Basin configuration

을 위하여 유역 내 6개 강우관측소(북이, 광주, 능주, 삼서, 함평, 목포)에서의 미래 기간(2016~2100년)에 대해 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 하에서의 강우량 변화 추세를 추정하였다. 여기서, RCP4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우를 가정한 미래 기후시나리오이며, RCP8.5는 현재 추세로 저감없이 온실가스 배출되는 시나리오이다. 기상청에서는 기상청 산하 73개 강우 관측소에 한하여 미래 지점강우량을 제공하지만, 본 연구에서 고려하는 6개의 강우관측소 중 광주와 목포를 제외한 4개 관측소는 국토교통부 소속으로 따로 미래 지점 강우량 자료를 제공 받을 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 수계 중유역 면적평균 일강우량과 지점 강우량-면적평균강우량의 관계(Eq. (2))를 이용하여 유역 내 관측소의 지점 강우량을 추정하는 방식으로 접근하였다.

$$P_{m,i} = \sum_{k=1}^6 \theta_{m,i}^k \cdot P_k \cdot ARF \quad (2)$$

여기서,

$P_{m,i}$  : 중유역  $i$ 에서의 면적평균강우량

$P_k$  : 강우관측소  $k$ 에서의 지점강우량

$\theta_{m,i}^k$  : 중유역  $i$ 에서의 강우관측소  $k$ 의 티센 계수

$ARF$ 는 면적우량감소계수(Areal Reduction Factor)를 뜻하며 지점강우량을 이용하여 면적평균강우량을 산정하는 과

정에서 유역면적이 증가함에 따라 가중되는 오차를 보정하기 위해 적용하는 계수이다. 면적우량감소계수 산정을 위해서 Lee et al. (2006)에서 영산강유역을 대상으로 제시한 면적우량감소 계수 회귀식을 사용하였다. 비정상성 가정 하에서 과거 지점강우량-면적강우량의 관계 또한 가변적일 수 있으나, 본 연구에서는 RCP 시나리오에 따른 영향에 따른 강수량 변화에 초점을 맞추었기에 지점강우량과 면적강우량 간의 관계는 일정하다 가정하였다.

관측소 지점 강우량 산정 후에는 이를 이용하여 확률강우량을 산정하였다. 확률강우량은 RCP4.5, RCP8.5 시나리오 하에서의 일 최대강우량 자료를 빈도해석하여 1일 최대 및 2일 최대 확률강우량을 산정하였고, 이를 기존 과거 자료와 비교하여 과거대비 미래확률강우량의 증가율을 산정하였다. 빈도해석에는 기존 MLTM (2005)에서도 활용된 바 있는 빈도 해석 프로그램 FARD2006 (National Disaster Management Institute)에서 개발 및 배포한 을 활용하여 20년빈도부터 500년빈도까지 총 8개의 빈도별 강우량을 산정하였다. 강우량 산정을 위해 상기의 RCP4.5, RCP8.5 시나리오 하에서의 미래 확률강우량을 적용하였고, MLTM (2005)와의 일관성 있는 비교를 위해 해당 연구에서 사용했던 Gumbel 분포와 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정하였다.

Fig. 2는 과거 자료를 기반으로 산정한 확률강우량 대비 RCP4.5와 RCP8.5에서의 확률강우량 증가율을 나타낸 값이다. 이를 살펴보면 RCP4.5 시나리오 하에서는 능주를 제외한

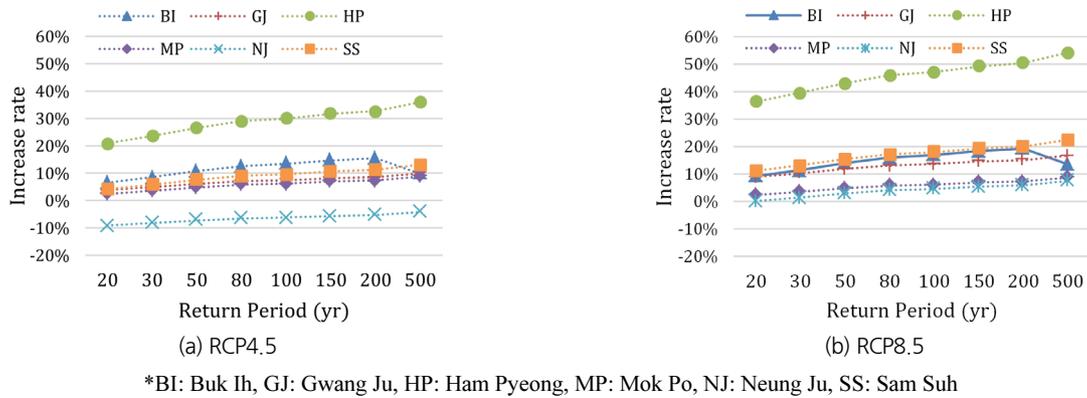


Fig. 2. Increase rate of future rainfall for RCP4.5 and RCP8.5

모든 지역에서 동일빈도에 대한 확률강우량이 증가하는 추세를 보였고, RCP8.5에서는 능주를 포함해 모든 지역에서 동일 빈도에 대한 확률강우량이 증가함을 확인할 수 있었다.

(2) 홍수의 시간분포 변화

강우의 시간분포는 수문곡선의 모양뿐만 아니라 첨두홍수량의 크기에 큰 영향을 미친다. MLTM (2005)에서는 강우의 시간분포를 위해 Huff 분위법을 사용하였으며 광주와 목포 기상대에서의 강우 기록을 분석하여 이 중 호우들의 최빈 분포인 Huff 2분위를 설계 시간분포로 채택하였다. 또한, 유역의 대표성을 고려하여 광주관측소의 강우 시간분포를 대표 분포로 선정하였다. 이처럼 기존 연구에서는 과거 최빈사상의 시간분포를 설계 시간분포로 사용하였으나, 본 연구는 기후변화시나리오 하에서 강수량의 비정상성을 전제로 하기에 과거의 최빈 시간분포인 2분위를 사용하는 것은 무의미하다 판단하였고, 그 대신 1~4 분위의 분포를 모두 사용 각각의 경우에 대한 결과를 분석하였다. 여기서, 미래에 강우의 시간분포 형태가 Huff의 4개 분포를 따를 것이라 가정하는 것 자체가 비정상성 가정과 배치될 수 있으나, 이는 미래 강우 자료의 구체적인 예측을 위함이 아닌, 다양한 시간분포에 대한 각 대안들의 저감효과 차이를 비교하기 위해 강우의 가장 대표적인 시간분포를 차용하였다 할 수 있다. 또한 기존의 영산강유역 종합치수계획과의 비교를 위해 기존 연구에서 사용한 Huff 시간분포를 차용하는 것이 타당하다 판단하였기에 Huff 1~4분위를 사용하여 홍수를 모의하였다. 시간분포는 TD (time distribution)라 표기하였으며, TD01~TD04는 각각 Huff 1분위~4분위의 강우로 인해 발생한 홍수를 의미한다. Huff 시간분포의 각 분위별 누가우량 최적화 상수는 MLTM (2005)에서 산정한 값들을 사용하였으며 최적화 상수를 이용하여 산정한 분위별 분포우량은 Fig. 3과 같다.

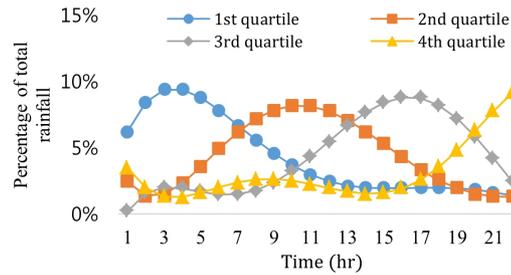


Fig. 3. Temporal distribution of rainfall for each Huff's quartile

(3) 홍수의 공간분포 변화

MLTM (2005)에서 제시한 4가지 대안은 각기 다른 공간적 배치를 갖는 치수구조물들을 포함하고 있으며 홍수의 공간적 분포에 따라 그 수행능력에 차이가 있을 것이라 판단하였다. 즉, 전유역에 걸쳐 200년 빈도의 홍수가 발생할 경우와, 국지성 호우로 인해 특정 지역에 홍수가 집중될 경우의 최선의 대안은 각각 다를 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 전역적 및 국지적인 홍수에 대해 전반적으로 우수할 능력을 보이는 대안 선정을 위해 총 18개의 공간분포(SD 1~18)를 고려하였다. 공간분포를 고려하기 위해 유역 내 6개 관측소 별 발생하는 확률강우의 재현기간에 차이를 주었으며, 편의상 재현기간 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 500년의 확률강우를 차례로 Grade 1~10으로 표기하였다 (Table 3). 목포의 경우, 피해우심지인 나주수위표 지역에 미치는 영향이 미미하여 따로 강우강도의 변화를 고려하지 않았다. 이와 같은 18개의 분포를 통해 강우의 공간적 분포와 불균등 정도에 따른 대안들의 수행능력 차이를 확인할 수 있을 것이다.

(1)~(3)에서 고려한 3가지 요소들의 조합을 통해 총 216개의 홍수 시나리오를 생성하였으며 각 홍수에 대하여 대안들의 효과를 분석하였다.

**Table 3.** Grade variations over gauge stations for each spatial distribution setting number

SD No.	Grade						SD No.	Grade					
	BI	GJ	HP	MP	NJ	SS		BI	GJ	HP	MP	NJ	SS
1	9	9	9	9	9	9	10	5	9	5	5	5	9
2	8	8	6	6	6	8	11	5	9	5	5	9	5
3	8	8	6	6	8	6	12	5	5	9	5	5	9
4	8	6	8	6	6	8	13	9	9	5	5	5	5
5	6	8	6	6	8	8	14	10	4	4	4	4	4
6	6	6	8	6	8	8	15	4	4	4	4	4	10
7	6	8	8	6	8	6	16	4	10	4	4	4	4
8	5	9	5	5	9	5	17	4	4	4	4	10	4
9	9	5	5	5	5	9	18	4	4	10	4	4	4

\*Grade 1~10 indicate the return periods of 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 500 years, respectively

3.2.3 결과 및 분석

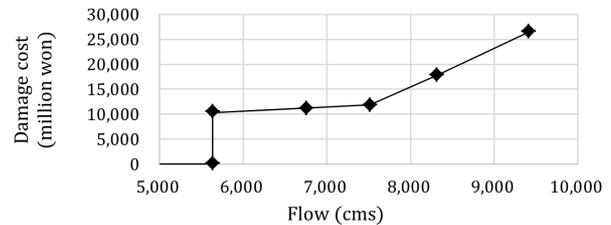
(1) 대안 평가지표 설정

대안을 평가하기 위한 지표는 MLTM (2005)에서도 치수 경제성을 평가하기 위해 활용한 바 있는 비용편익비를 사용한다. 비용편익비(B/C) (Eq. (3))는 투자하고자 하는 사업에서 소요되는 비용대비 얻을 수 있는 편익을 나타내는 지표로 값이 높을수록 경제적으로 타당한 사업이라 볼 수 있다.

$$B/C = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{B_k}{(1+r)^k}}{\sum_{k=1}^n \frac{C_k}{(1+r)^k}} \quad (3)$$

여기서,  $B_k$ 는  $k$ 년 차에 발생하는 편익을 뜻하며  $C_k$ 는  $k$ 년 차에 소요되는 비용을 의미한다.

치수구조물 경제성분석에서는 발생할 수 있는 피해를 방지함으로써 경감하는 액수를 편익으로 간주한다. 편익을 산출하기 위해 대안별 각 시나리오 하에서의 침투홍수저감량을 구한 뒤, 이로 인한 홍수피해 경감액을 산출한다. 저감량에 따른 경감액 산출을 위해 Yi et al. (2010)에서 다차원 홍수피해 산정법(Ministry of Construction & Transportation, 2004)을 이용하여 산정한 지점유량-피해액 관계를 이용하였다(Fig. 4). 지점유량-피해액 관계 파악을 위한 유량지점으로는 수계 하류부에 위치하고 유량이 많아 홍수방어대안들의 영향을 확인하기 용이한 나주수위표 지점으로 선정하였다. 주의할 점은 대안을 평가하는데 있어 모든 시나리오가 계산과정에 포함하지는 않는다는 것이다. Fig. 4를 보면 일정량 이하의 유량에 대해서는 홍수피해가 거의 발생하지 않고, 이러한 경우 대안들간의 홍수저감능력을 비교할 수 없다. 따라서, 앞서 생성한 216개의 시나리오 중 홍수피해가 발생하지 않거나, 모든 대안이 피해액을 완전히 경감시킬 수 있을 정도의 경미한 홍수 시



**Fig. 4.** Flow discharge-damage cost relation at the Naju station (Yi et al., 2010)

**Table 4.** Total annual cost of each alternative (MLTM, 2005)

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Total annual cost (million won)	600,130	600,330	981,068	1,156,646

나리오들은 계산에서 제외하였다.

비용의 경우 MLTM (2005)에서 산정한 공사비, 보상비, 잔존가치, 유지관리비를 이용하여 계산한 연 평균비용 값을 사용하였으며 각 대안별 연 평균비용은 Table 4와 같다. 연 평균비용 산출시 비용과 편익을 동일한 관점으로 비교하기 위해 MLTM (2005)에서는 할인율 6.0%를 적용하였고, 분석기간(내구연한)은 50년으로 설정하였다.

위에서 산정한 편익을 비용으로 나누어 비용편익비를 산출하고 이를 각 시나리오에서 대안들이 보이는 수행능력의 평가지표로 사용하였다. 여기서 산출한 비용편익비는 투자사업의 경제적 타당성을 확보하기 위함이 아닌 여러 시나리오 하에서 대안들 간 수행능력의 우선순위의 변동성을 알아보기 위해서 사용한 값임을 미리 밝혀둔다.

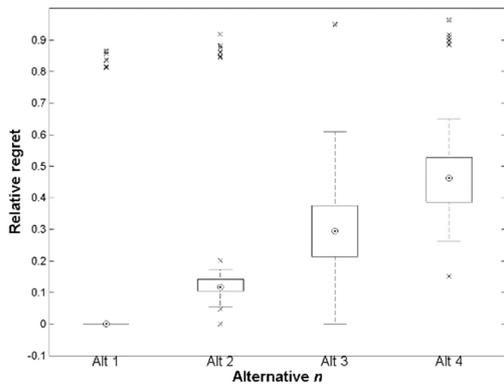


Fig. 5. Regret of each alternative over all (216) scenario combinations

(2) 대안효과 평가 및 분석

앞서 생성한 216개의 홍수 시나리오에 대하여 각 대안들의 수행능력을 평가하고 이를 후회도 값으로 환산한 결과 대부분의 시나리오 하에서 Alt 1이 최고의 수행능력을 보였고(Fig. 5) 이는 MLTM (2005)에서 최종적으로 선정한 결과와도 같았다.

Alt 1이 어떠한 경우 취약한 모습을 보이는지를 평가하기 위해 균집화된 시나리오 세트들에 대해 대안들을 평가한 결과는 다음과 같다.

Fig. 6은 미래 홍수의 크기에 따라 균집화한 시나리오 세트 PR01~PR03(Fig. 6(a)~(c))에 대해 대안들을 분석한 결과로 홍수 크기의 차이로 인한 양상의 변화를 보이지는 않았다. 여

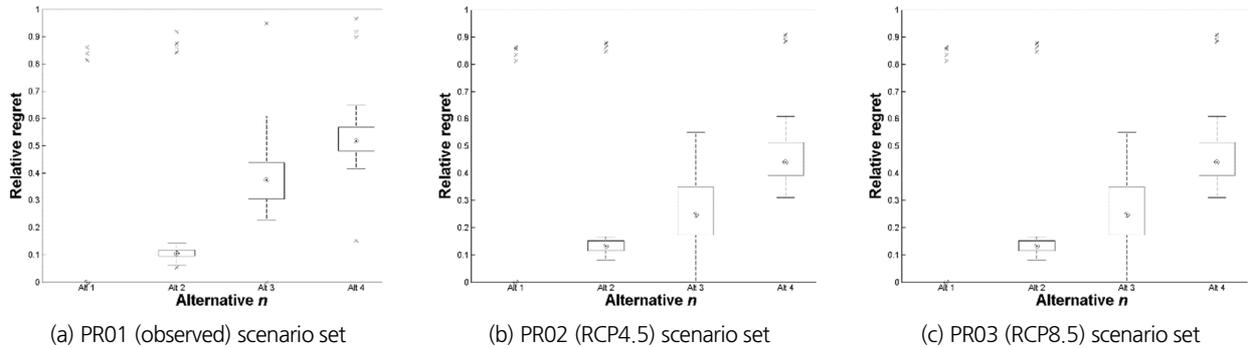


Fig. 6. Regrets of alternatives by flood amount

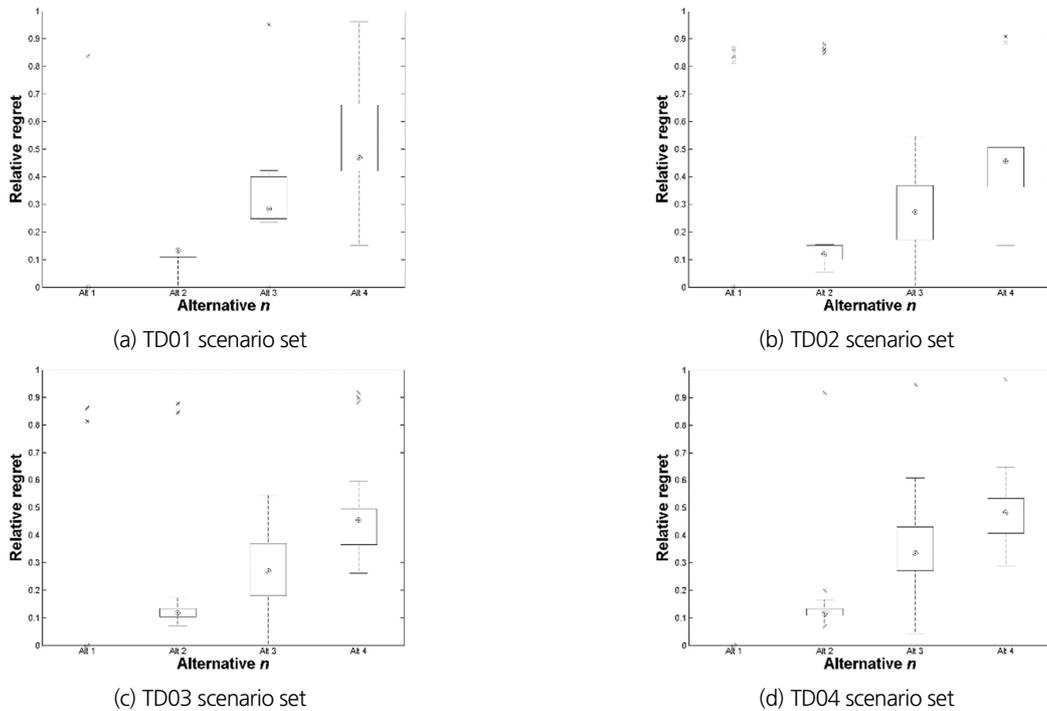


Fig. 7. Regrets of alternatives by temporal distribution

기서 PR01, PR02, PR03은 각각 과거, RCP4.5, RCP8.5에서의 확률강우량을 나타낸다.

Fig. 7은 각각의 시간분포에 따라 군집화한 시나리오 세트 TD01~TD04 (Fig. 7(a)~(d))에 대해 대안들을 분석한 결과, 대안들의 우선순위 역전이 일어날 정도의 변화 양상을 보이지는 않았다. 하지만, Fig. 7을 보면 Alt 1의 이상치가 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이상치가 많이 발생한다는 것은 Alt 1이 이 시간분포들에 대한 취약성을 가진다기 보다는, 동일한 상황이라면 이상치가 거의 발생하지 않는 TD01, TD04 보다는 TD02와 TD03의 시간분포가 취약한 모습을 유발하는데 조금 더 큰 영향을 미친다는 정도로 해석할 수 있다.

Fig. 8은 각각의 공간분포에 따라 군집화한 시나리오 세트 SD01~SD18 (Fig. 8 (a)~(r))에 대해 대안들을 분석한 결과로,

전반적으로 Alt 1이 가장 우수한 모습을 보였으나 SD09, SD14, SD15에서 그 수준의 변동이 나타났다. 이는 앞서 살펴본 PR, TD와는 달리 SD는 대안들간의 우선순위에 변동을 줄 수 있는 지배적인 요소라 해석할 수 있고, SD09, SD14, SD15의 공간분포에서 높은 확률로 Alt 1이 취약한 모습을 보임을 뜻한다. 이 분포들에서는 Alt 3이 대부분 Alt 1보다 더 우수한 모습을 보이는 것을 확인할 수 있다.

정리하자면 Alt 1은 강우가 황룡강유역에 집중되었을 때 우선순위가 현저히 떨어지며 이 경우 Alt 3가 최고의 수행능력을 보인다. 이는 Alt 3의 구성요소 중 평림천과 황룡강의 합류지점에 위치한 황룡 홍수조절지로 인한 차이라 추측할 수 있고, 이에 대해서는 결론에서 자세히 다룬다.

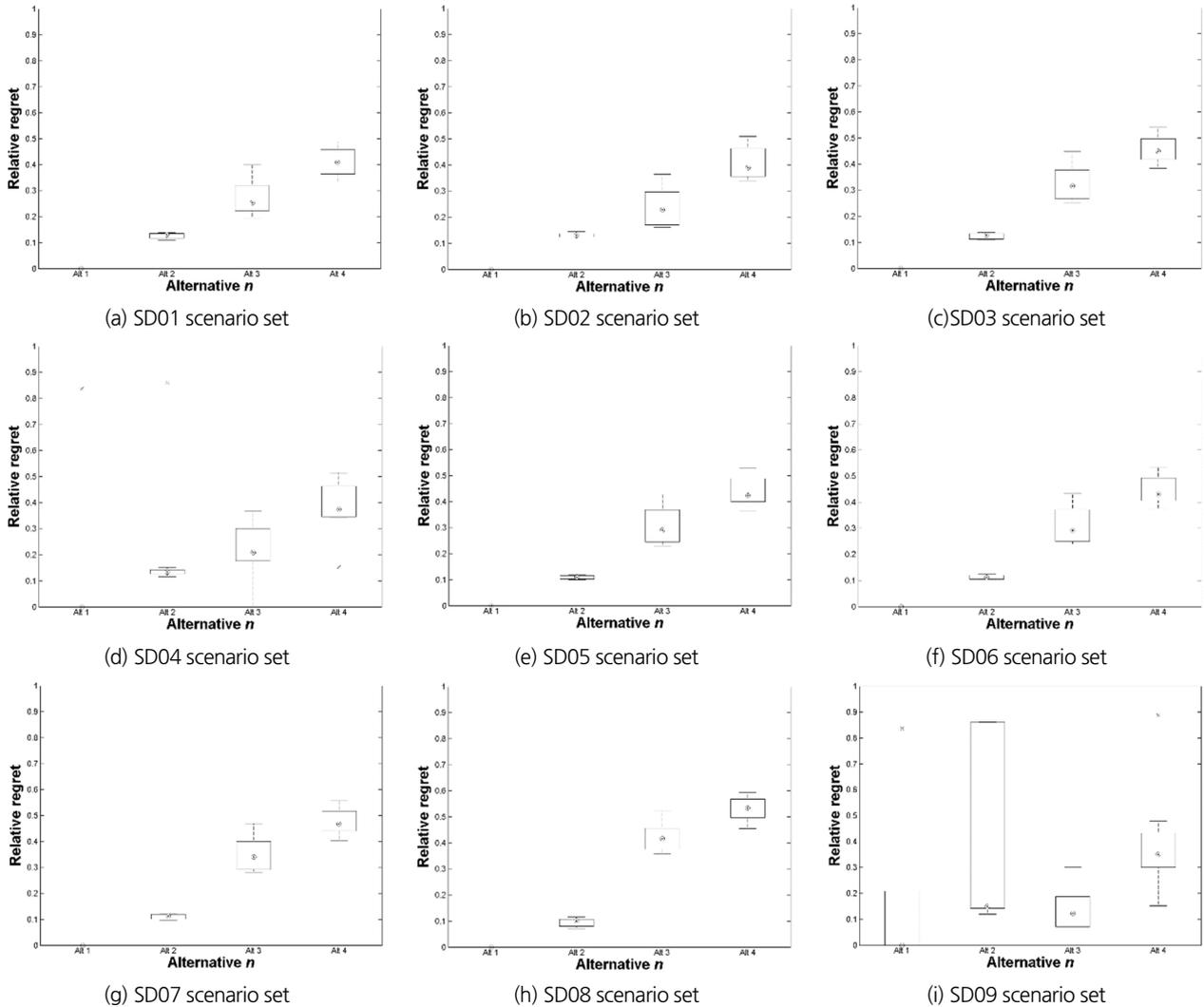


Fig. 8. Regrets of alternatives by spatial distribution

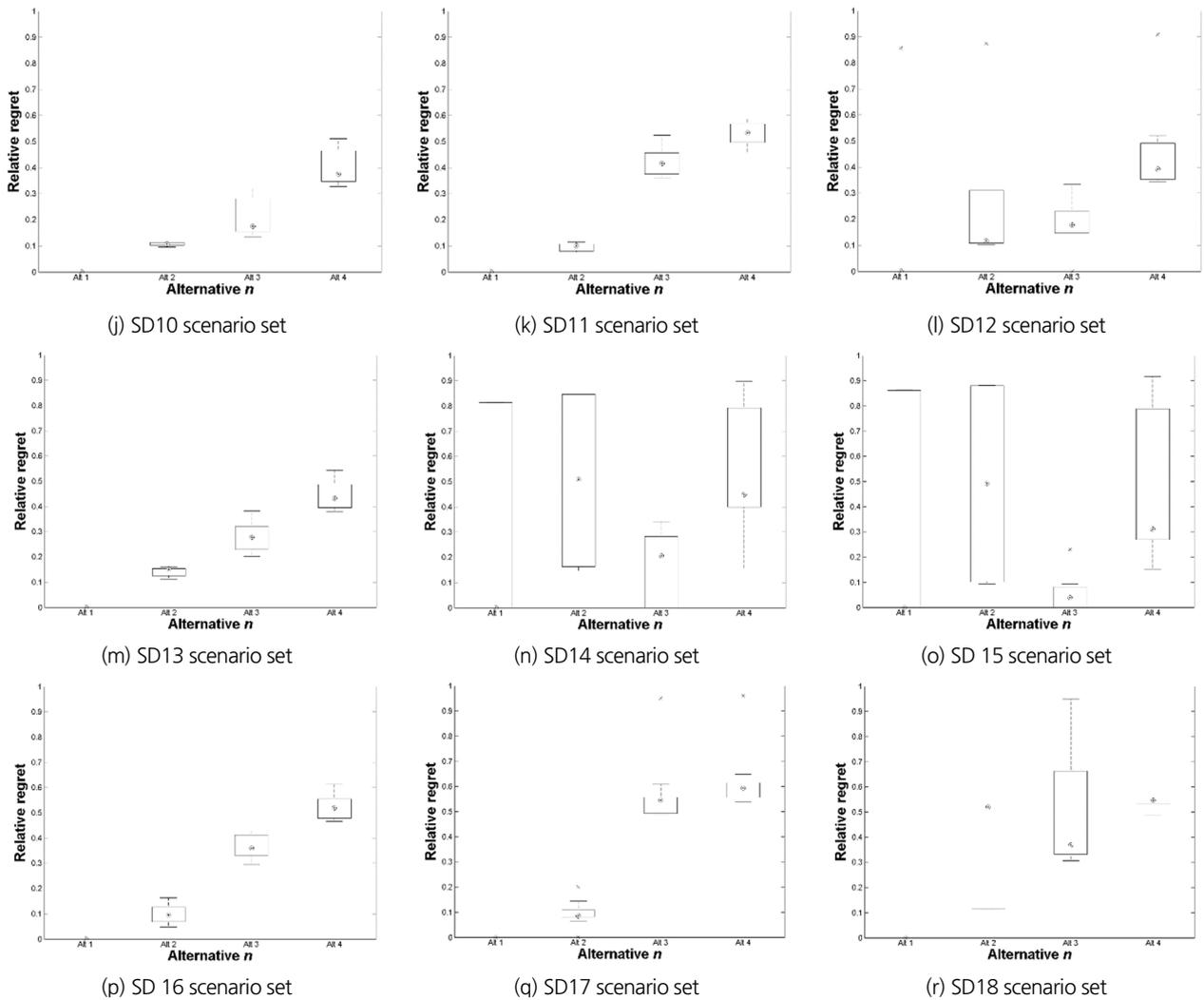


Fig. 8. Regrets of alternatives by spatial distribution (Continue)

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 영산강유역 종합치수계획(MLTM, 2005)에서 제시한 4가지 홍수방어 대안들을 RDM 분석과정을 통해 재평가하였다. 미래의 불확실성을 반영하기 위해 3가지 불확실성 요소를 갖는 홍수 시나리오들을 생성하였으며 홍수의 크기, 홍수의 시간분포 그리고 공간분포가 이에 해당한다. 홍수의 크기는 RCP4.5, RCP8.5, 그리고 과거의 기후가 반복되는 3가지 상황을 고려하였고, 시간분포는 Huff 1~4분위 강우로 인해 발생하는 4가지 시간분포 홍수를, 공간분포는 유역 내 어느 지점에 강우가 집중되었는지에 따른 18가지 경우를 고려하였다. 이 세가지 요소를 조합하여 총 216개의 홍수 시나리오를 생성하였다.

이 시나리오들에 대하여 위의 4가지 대안들의 수행능력을

분석하였으며 결과에 따르면 전체 홍수 시나리오에 대하여 전반적으로 가장 안정적인 대안은 Alt 1이었다. 이는 간략화된 비용편익비를 평가지표로 하여 얻은 결과로 MLTM (2005)에서의 비용편익비 분석 결과와도 동일했다. 다음으로, 앞서 선정된 Alt 1이 상대적으로 취약한 모습을 유발하는 요인이 무엇인지를 파악하였다. 위의 결과로부터 도출한 연구의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) MLTM (2005)에서 단일 미래 시나리오에 대해 최적의 결과를 보인 Alt 1은 더 다양한 크기와 형태의 홍수들에 대해서도 대체적으로 가장 우수한 결과를 보였다.
- 2) 대안들의 수행능력은 홍수의 공간적 분포에 가장 지배적인 영향을 받았다. 또한, 공간분포만큼은 아니지만, 시간 분포 역시 영향을 미쳤으며 홍수 크기에 의한 영향은 상대

적으로 미미했다.

- 3) Alt 1은 홍수가 황룡강유역에 집중되는 경우, 그리고 동시에 강우가 전체시간 중 중반에 많이 집중 됐을 때 발생하는 홍수에 대하여 취약한 모습을 보였다. 이러한 경우 Alt 3이 절대적으로 우수한 모습을 보였고 이는 황룡 홍수조절지의 영향 혹은 장성, 나주 댐의 수위조절의 영향이라 예상된다. 이후 Alt 1의 취약성을 보완하기 위해 앞서 언급한 Alt 3의 구성 요소들을 추가하는 방향을 고려해볼 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기존 연구에 RDM 방법론을 적용하고 의사결정에 있어 기존의 방식과의 차이를 비교하여 RDM 방법론의 적용성에 대하여 검토하였다. 기존 연구와의 통일성을 위해 동일한 방식으로 면적-지점 관계식을 이용한 각 강우관측소의 지점별 강우량을 산정하였다. 하지만 비정상성을 기반으로 하는 기후변화 연구에서 미래에도 면적강우량과 지점강우량의 관계가 일정할 것이라 가정하는 것에는 논란이 있을 수 있고 추후 연구에서는 좀 더 효과적으로 미래 기후 비정상성을 감안할 수 있는 지점강우량 산정방식에 대해 고려할 필요가 있다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2073677).

## References

- Fischbach, J. R. (2013). *Managing New Orleans Flood Risk in an Uncertain Future Using Non-Structural Risk Mitigation*. (Doctor), RAND Pardee Graduate School.
- Groves, D. G., Lempert, R. J., Knopman, D., and Berry, S. H. (2008). *Preparing for an Uncertain Future Climate in the inland Empire: Identifying Robust Water-Management Strategies*.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Summary for Policy Makers. World Meteorological Organisation, Switzerland.
- IPCC. (2013). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY, USA.
- Lee, J. H., Kim, D. G., Koh, W. J., and Lee, Y. Y. (2006). "Estimation of Areal Reduction Factors for The Youngsan River Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 10, pp. 813-822.
- Lempert, R. J., and Collins, M. T. (2007). "Managing the Risk of Uncertain Threshold Responses: Comparison of Robust, Optimum, and Precautionary Approaches." *Risk Analysis*, Vol. 27, No. 4, pp. 1009-1026.
- Lempert, R. J., Groves, D. G., Popper, S. W., and Bankes, S. C. (2006). "A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios." *Management Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 514-528. doi: 10.1287/mnsc.1050.0472
- Lempert, R. J., Popper, S. W., and Bankes, S. C. (2003). *Shaping the next one hundred years: New method for quantitative, long-term policy analysis*. Santa Monica, CA: RAND.
- Ministry of Construction and Transportation. (2004). *A Study on the Economic Analysis in Flood Control Projects: Multi-Dimensional Analysis*.
- Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2005). *Comprehensive Flood Management Plan in Yeong San River Basin*.
- Savage, L. J. (1954). *The Foundations of Statistics*.
- Walker, W. E., Rahman, S. A., and Cave, J. (2001). "Adaptive Policies, Policy Analysis, and Policy-Making." *European Journal of Operational Research*, Vol. 128, pp. 282-289.
- Yi, C. S., Shim, M. P., and Lee, S. W. (2010). "Alternatives Development for Basin-wide Flood Mitigation Planning: A Case Study of Yeongsan River Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No.6, pp.507-516.