

# 미래 기후변화에 대한 용담댐 치수안전도 분석

## A Flood Mitigation Safety Analysis for Yongdam Dam against the Future Climate Change

강부식\*, 김영오\*\*, 이승종\*\*\*, 강동현\*\*\*\*

Young-Oh Kim, Boosik Kang, Seung-Jong Lee, Dong-Hyun Kang

---

### 요 지

지역규모의 기후변화 모의결과를 이용하여 금강유역 용담댐의 홍수기 치수안전도에 대한 민감도분석을 수행하였다. 기후변화 모의에 사용된 SNURCM(Seoul National University Regional Climate Model)은 미국 National Center for Atmospheric Research의 Community Climate System Model의 전지구모형을 기반으로 spectral nudging 기법을 사용한 공간해상도 30 km, 연직 21층의 지역기후모형이다. 기후변화 시나리오로는 SRES "B1"이 사용되었으며 과거 control run에 대한 기후모의 정확도 분석을 통하여 SNURCM 기상자료를 관측치와 비교한 결과 면적강우량을 다소 과소추정하였고 이점을 감안하여 SNURCM의 일 모의결과에 보정 계수를 적용하였다.

하천유출량은 SSARR 모형을 이용하여 SNURCM 모의가 수행된 전체기간을 1980~1999년과 2000~2019년으로 20년씩 나누어 용담댐 일 유입량을 산정하여 통계분석을 실시하였고 과거와 미래 20년 동안을 비교하여 본 결과 (1) 유량의 평균보다는 분산이 미래 20년 동안 증가하여 가뭄과 홍수에 대한 위험도가 증가함을 알 수 있었고, (2) 특히 연최대유량 또한 미래 20년 동안 상당히 증가하여 홍수기 치수대책이 더욱 중요해질 것으로 판단되었다.

마지막으로 용담댐 운영은 범용 시스템분석 도구인 STELLA(System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation) 상에서 GUI로 구현하여 유입량 변화에 따른 용담댐 치수안전도 변화를 모의해 보았다. 용담댐의 홍수기 운영은 저수지 수위가 제한수위를 초과하기 시작하면 Rigid ROM 발효하여 방류량을 결정하도록 구성하였고, 무효방류(spill)가 일어나는 현상을 실제로 가정하여 이에 대한 신뢰도(reliability), 회복도(resiliency), 그리고 심도(vulnerability)를 치수안전도 지표로 계산하였다. 전체기간을 1980년~1999년, 2000년~2019년, 2000년~2009년, 그리고 2010년~2019년까지 총 4구간으로 나누어 결과를 도출하였으며 예상한 바와 같이 후반기 20년 동안에 세 가지 지표가 취약해 지는 것을 확인할 수 있었고, 특히 2000년부터 2009년까지 10년 동안에는 더욱 취약해짐을 확인할 수 있었다.

**핵심용어: 기후변화, CCSM, SNURCM, SSARR, STELLA, 용담댐, 치수안전도**

---

### 1. 서 론

매년 반복되는 홍수나 태풍, 가뭄, 황사 등의 자연재해가 기후변화와 밀접한 관련이 있다는 데는 이미 충분한 사회적 공감대가 형성되어 있다. 이미 2005년부터는 기후변화협약인 교토의정서가 정식으로 발효됨에 따라 온실가스 발생규모로 세계 9위인 우리나라는 대책을 마련하지 않을 수 없는 상황이며, 기후변화가 산업

---

\* 정회원·단국대학교 토목환경시스템전공 조교수·공학박사·E-mail: [bskang@dankook.ac.kr](mailto:bskang@dankook.ac.kr)

\*\* 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수·공학박사·E-mail: [yokim05@snu.ac.kr](mailto:yokim05@snu.ac.kr)

\*\*\* 정회원·서울대학교 공학연구소 연구원·공학석사·E-mail: [bunker2@snu.ac.kr](mailto:bunker2@snu.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부·석사과정 · E-mail: [tntor99@snu.ac.kr](mailto:tntor99@snu.ac.kr)

과 경제에 미치는 영향은 물론 국토환경 및 수자원 분야 등에 미치는 영향에 대한 종합적인 검토는 대단히 시급한 과제임에 틀림없다. 기후변화가 한반도 수자원에 미치는 연구는 1990년대 후반부터 그 필요성이 제기되어(서용원과 김영오, 2000) 수차례의 연구가 산발적으로 수행되었으나, 각양각색의 연구결과를 보이고 있는 실정이다. 더욱이 과거 대부분의 연구가 유량변화의 모의 정도에 그 연구결과가 그치고 있어, 기후변화에 따른 수자원시스템의 민감도에 대한 분석이나 이를 예방하기 위한 수자원시스템의 운영전략은 물론, 더 나아가 국가 수자원계획시 기후변화의 고려방안 등에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구는 SRES "B1" 기후시나리오를 이용하여 CCSM의 전지구모형을 기반으로 SNURCM 모형을 통해 2019년까지 강우와 기온을 모의하였고 SSARR 모형을 통해 유출량을 모의하여 용담댐 유역의 미래 홍수기 치수안전도를 검토하였다.

## 2. 기후변화 모의

### 2.1 CCSM

#### 2.1.1 모형의 개요

본 연구에 사용한 전지구모형은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)가 주관되어 여러 연구기관에서 공동으로 개발한 CCSM(Community Climate System Model)이다. CCSM은 기후계를 모의하기 위해 개발된 집합 대순환 모형으로 대기, 해양, 해빙, 그리고 지면을 모사하는 네 개의 성분 모형과 하나의 속접합자(flux coupler)로 구성되어 있다.

#### 2.1.2 모형의 정확도 분석

전지구모형이 일반적으로 강우값을 과소추정한다는 경향이 있다는 것은 알려진 사실이다. CCSM 모의자료에 대해서도 관측강우와의 비교를 통해 이를 확인할 수 있었다. 1980년부터 2005년까지의 reference scenario를 통해 강우모의를 수행하였고, 이를 용담댐 유역의 면적강우로 환산하여 동기간의 관측강우와 비교하였다. 용담댐 유역 주변의 CCSM격자는 표 1에 제시한 바와 같이 동서로 126 km내외, 남북으로 155 km 내외로 이격되어 있으며, 그림 1에 도시되어 있는 바와 같다.

표 1 용담댐유역 주변의 CCSM격자의 TM 및 위경도 좌표

위치	TM_X	TM_Y	위도	경도
A	160157.3	247041.4	35.7195	126.5625
B	287383.7	247382.0	35.7195	127.9688
C	160866.5	402464.3	37.1203	126.5625
D	285828.0	402810.1	37.1203	127.9688

2004년과 2005년 홍수기(6월20일~9월20일)에 대한 일강우의 CCSM 모의강우와 관측치를 비교하여 본 결과 대체적으로 CCSM 강우는 관측치에 비하여 과소추정되어 있고, 1:1 상관도 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 전구 모형강우예측에서 과소추정현상은 흔히 발생하고 있으며 이 경우 관측치와의 비교는 각 시간대에서의 1:1 비교는 의미가 없고, 연시계열에서의 통계적 특성을 비교하는 것이 필요하다. 이를 위하여 1980년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지의 일 모의자료와 관측강우자료를 통한 개별강우사상의 총강우량과 일 최대강우를 이용하여 각각 26개년도의 연시계열 자료를 통해 정규분포 적합도 검정을 실시하였다(그림 2, 그림 3). 그림 2에서 볼 수 있듯이 CCSM에 모의된 강우의 분포는 정규분포에서 벗어난 양상을 보이고 있으며 표준편차는 비슷하지만 평균값은 159.24 mm와 221.67 mm로 CCSM이 관측강우에 비하여 약 28% 과소추정하고 있는 것으로 분석되었다. 이런 과소추정은 그림 3에서 보듯이 연최대일강우 분석에서 더욱 두드러지며 약 47.1% 정도 과소추정하고 있는 것으로 나타났다. 이 결과를 통해 현재로서는 강우모의의 시간적 분해능이 미흡한 것으로 분석된다.

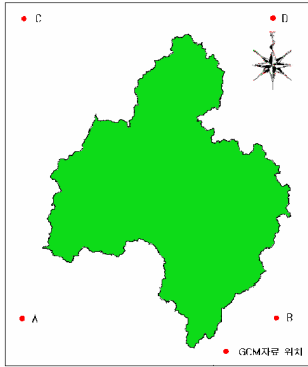


그림 1. CCSM격자의 위치

## 2.2 SNURCM

### 2.2.1 모형의 개요

SNURCM(Seoul National University Regional Climate Model)은 비정역학 방정식계를 사용하는 중규모 수치예보 모형(PSU/NCAR MM5)에 복잡하고 정교한 지면 모형(NCAR/LSM)을 접합하여 개발한 지역기후모형으로서(Lee and Kang, 1999) 동아시아와 같이 복잡한 지형과 지면 특성을 가지는 지역에 적합하며, 나아가 향후 공간 분해능이 수 km 이하로 높아질 경우에도 모형 역학 과정의 수정없이 사용할 수 있다는 장점이 있다.

### 2.2.2 모형의 정확도 분석

SNURCM은 CCSM을 모격자로 하여 경계조건을 삼고, 아격자계에 등지격자체계를 구성하여 지역화 모의를 수행하는 일종의 역학적 상세화모형이므로 SNURCM이 CCSM의 모의 정확도를 개선할 수 없으며, CCSM의 오차가 SNURCM에 전파되는 현상을 피할 수 없다는 단점이 있다.

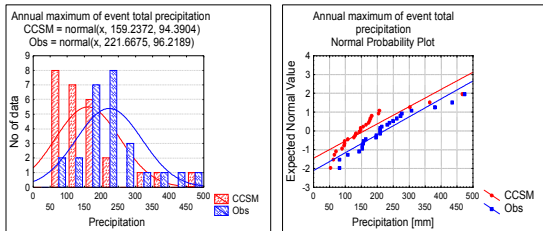


그림 2. Reference Scenario하에서 CCSM 모의강우 (1980~2005)에 대한 개별사상 총강우량의 연최대값 통계분석

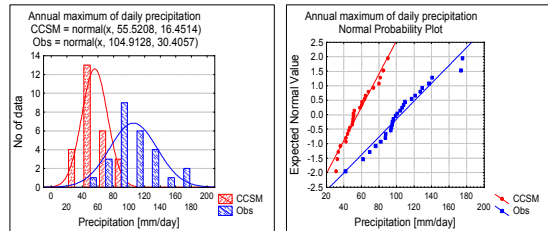


그림 3. Reference Scenario하에서 CCSM 모의강우 (1980~2005)에 대한 일강우량의 연최대값 통계분석

하지만 1:1 상관보다는 전반적인 통계거동에 의미를 두는 기후모형에서는 RCM 모형을 통한 지역화 또는 상세화가 상세지형 효과 등을 통하여 모격자의 강우통계를 실제 강우에 가깝게 효과적으로 개선시킬 수 있다. 그림 4와 5에서는 reference scenario하에서의 SNURCM 모의강우와 관측강우간의 개별사상 총강우량의 연최대치를 보여주고 있는데 이 경우 SNURCM과 관측강우량의 표준편차와 평균은 CCSM에 비하면 상당히 개선되었음을 알 수 있고 일강우년최대치 또한 CCSM의 표준편차와 평균에 비해 개선되었음을 알 수 있다.

SNURCM자체가 CCSM의 정확도를 근본적으로 개선시키지는 못하기 때문에 일 강우 비교를 한다면 상관성을 산정하기가 무의미할 정도로 낮은 수준을 보이지만 시 구간을 일에서 월 또는 년으로 확장하면 좀 더 뚜렷한 상관성을 볼 수 있다. SNURCM에 대한 월 강우 산포도(scatter plot)를 통한 결정계수( $R^2$ )값은 0.2119로 높지 않지만 일 강우에 비하면 상대적으로 뚜렷한 상관성을 확인할 수 있다.

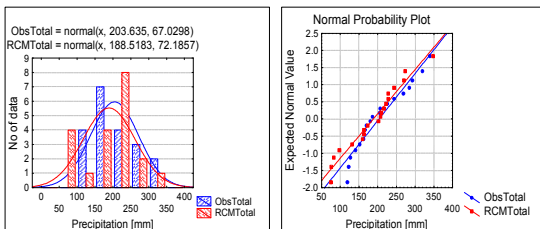


그림 4. Reference Scenario하에서 SNURCM 모의강우 (1980~1999)에 대한 개별사상 총강우량의 연최대값 통계분석

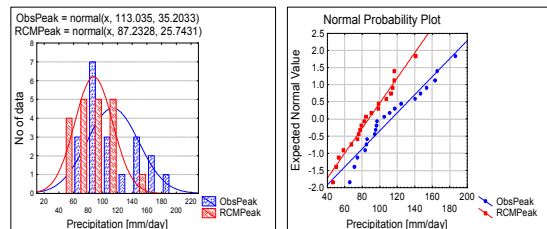


그림 5. Reference Scenario하에서 SNURCM 모의강우 (1980~1999)에 대한 일강우량의 연최대값 통계분석

### 3. 대상구역

본 연구에서는 용담댐 유역을 적용구역으로 선정하였고 북위 36°00'~35°35', 동경 127°20'~127°45'에 해당하며 금강 유역의 최상류 지역에 위치한다. 유역면적은 930 km<sup>2</sup>으로 금강 유역면적의 9.5%에 해당되고 총 저수용량은 8억 1천 5백만 m<sup>3</sup>이며, 홍수조절용량이 1억 3천 7백만 m<sup>3</sup>으로 비교적 수자원이 풍부하다. 연평균기온은 10.4℃, 일 최고기온은 34.7℃, 일 최저기온은 -25.8℃이며 유역평균 연강수량은 1,168.5 mm이다.

### 4. 유출모의

SSARR모형의 매개변수 보정을 위하여 용담댐의 준공(2000)이후 유입량자료가 가용한 2001년~2004년 자료를 이용하여 수행하였다. SSARR 모형은 장기유출모형이기 때문에 시간적으로 일 단위 모의를 수행하였을 경우 홍수시 첨두홍수량을 쉽게 따라갈 수 없다. 그러나 첨두홍수발생시각 및 전체적인 추세는 관측값을 잘 모의하고 있다고 판단되며 그림 6과 같이 2001~2004년의 관측유량과 SSARR 모의유량을 비교해 본 결과 결정계수가 0.82로서 비교적 높은 수준임을 알 수 있었다.

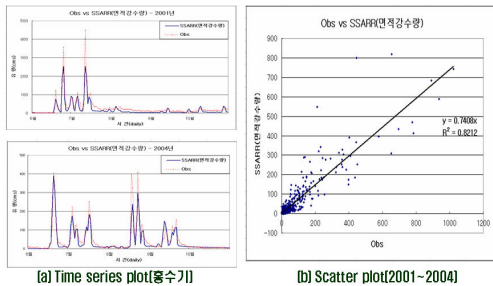


그림 6. SNURCM 강우모의를 이용한 SSARR유출모의결과(2001-2004)

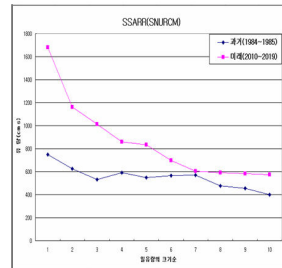


그림 7. 과거(1984-1993) 및 미래구간(2010-2019)에 대한 SSARR 모의결과 비교

	과거 (1984-1993)	미래 (2010-2019)
샘플 수	3653.00	3652.00
평균(cms)	20.80	28.85
분산(cms)	2745.29	6909.17
표준편차(cms)	52.40	83.42
변동계수	2.52	2.88
왜도	176.67	206.30
첨도	805.76	1245.30
중앙값(cms)	7.07	8.17
최대값(cms)	748.68	1679.16
최소값(cms)	1.33	1.97
범위	747.35	1677.19

SNURCM 강우모의에 대해서도 reference scenario에 의한 2001년~2004년의 강우모의를 바탕으로 SSARR 유출모의를 수행한 결과 유출량에서도 1:1의 상관성은 매우 떨어지는 것으로 확인되었다. 다만 관측 강우를 사용해 추정된 매개변수들을 통해 과거(1984년~1994년)와 미래(2010년~2019년)의 SNURCM 모의강우에 대한 유출 모의결과를 수행하면 미래의 일 유량 최대값은 과거에 비하여 크게 증가함을 알 수 있다(그림 7). 평균유량은 미래에 37.7% 증가하는데 비하여, 최대유량은 124.2%나 증가하는 것으로 나타났다. 변동계수는 12.5% 증가로 평균유량의 증가에 비하여 상대적으로 낮은 수준을 보여주었다. 이결과를 놓고 본다면 유출량의 변동성은 현재보다 높은 수준은 유지하되, 최대유량은 크게 증가하여 여름철 이상홍수 등의 발생확률이 더욱 높아질 것으로 예상할 수 있다.

### 5. 치수안전도 분석

#### 5.1 치수안전도 개념

본 연구에서는 무효방류(spill)에 대한 신뢰도(reliability), 회복도(resiliency), 그리고 심도(vulnerability) 세 가지 지표를 사용하여 홍수에 대한 민감도 분석을 실시하였다(Hashimoto 등, 1982). 신뢰도는 무효방류가 일어나지 않는 경우를 S, 그렇지 않을 경우를 F라고 정의하여 총 운영기간에 대하여 무효방류가 발생하지 않은 횟수의 비율을 뜻하고, 회복도는 무효방류가 발생한 후 얼마나 빨리 회복할 수 있는가에 대한 지표를 나타낸다. 그리고 심도는 무효방류가 한번 발생할 때의 평균적인 양을 나타낸다. 신뢰도와 회복도는 0에서부터 1까지이며 높을수록 무효방류가 일어나지 않은 비율이 높고 무효방류가 발생한 후 회복하는데 걸리는 시간

이 짧음을 의미한다. 그리고 심도는 낮을수록 무효방류의 양이 적음을 뜻한다.

## 5.2 STELLA

본 연구에서는 객체지향적 프로그램 중 사용이 간편하며, 기존의 기후변화 연구(한국건설기술연구원, 2000)에서 금강 유역에 적용되었던 STELLA(System Thinking Experimental Learning with Animation) 모형을 이용하여 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 수행하기로 결정하였다.

치수안전도 분석을 위하여 SSARR 모형을 통하여 산출된 총 40년간의 일 자료를 사용하였으며 이수기 운영은 규정곡선(rule curve)을 이용하여 방류량을 결정하고 홍수기 운영은 이수기와 동일하게 운영을 실시하다가 저수지 수위가 홍수기제한수위를 초과하면 유입량의 크기를 고려하여 방류량을 결정하는 Rigid ROM(Reservoir Operation Method)으로 규정하였다.

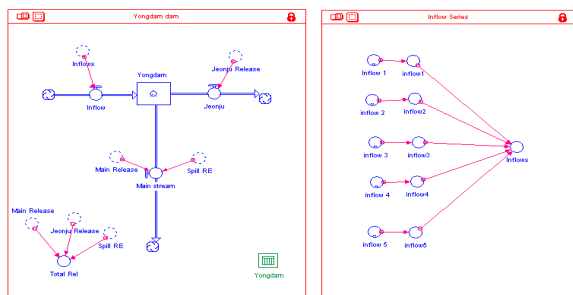


그림 7 치수안전도 분석을 위한 STELLA 모형의 구성

## 5.3 분석결과

미래 치수안전도의 효과적인 분석을 위하여 총 40년의 기간을 기간 I(1980년~1999년), 기간 II(2000년~2019년), 기간 III(2000년~2009년), 기간 IV(2010년~2019년)까지 총 4구간으로 나누어 결과를 도출하였으며 아래의 그림8~10에 나타낼 수 있다.

기간별로 치수안전도 분석을 실시한 결과 신뢰도에서는 과거 20년(기간 I)과 미래 20년(기간 II)사이에서 뚜렷한 차이를 찾아보기는 어려우나 회복도와

심도는 미래 20년에 대하여 취약해지고 있음을 알 수 있다. 특히 기간 III의 회복도와 취약도가 다른 기간에 비해 상당히 취약한 모습을 보였고 기간 IV에서의 회복도 및 취약도는 기간 III에 비해 향상된 모습을 볼 수 있는데 이는 기간 III의 유입량이(평균 23.5 cms) 기간 IV의 유입량(평균 19.5 cms)보다 많은 데서 이유를 찾을 수 있다.

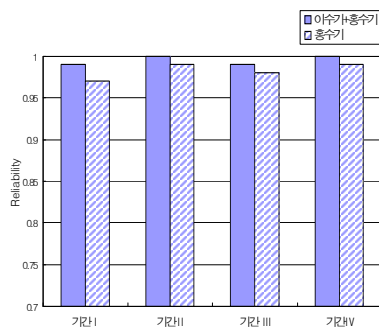


그림 8. 신뢰도

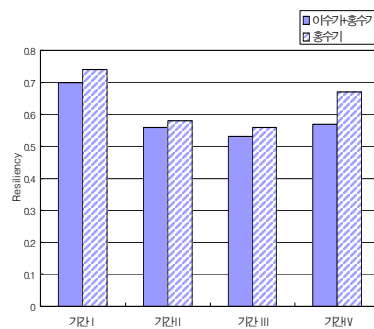


그림 9. 회복도

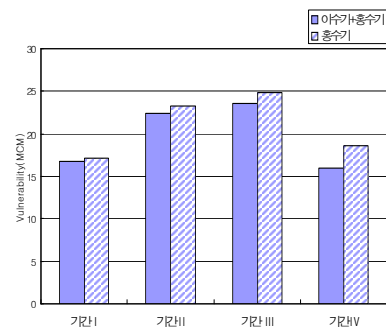


그림 10. 심도

## 6. 결론 및 향후계획

SNURCM 모의상수와 기운을 이용하여 SSARR 모형을 통해 유출량을 산정한 결과 유량의 평균보다는 분산이 미래 20년 동안 증가하여 가뭄과 홍수에 대한 위험도가 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 연최대유량 또한 미래 20년 동안 상당히 증가하여 홍수기 치수대책이 더욱 중요해질 것임을 알 수 있었다. STELLA를 통해 치수안전도 분석한 결과 과거 20년에 비해 미래 20년의 치수안전도가 취약해지고 있음을 확인할 수 있

있고 본 연구는 예비적인 평가작업이며, 이러한 모형과 기법의 발전에 따라 본 연구의 결과도 더욱 향상될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국제수문개발계획(IHP) 연구과업에 의해 수행되었으며 이와 관련된 관계자 분들께 감사드리고 한국환경기술진흥원에서 주관하는 차세대핵심환경기술개발사업을 통해 SNURCM의 자료를 제공해주신 서울대학교 지구환경과학부 이동규 교수님과 차동현 박사과정께도 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 서용원, 김영오 (2000). “선진국의 기후변화 연구동향(I): 유출에 대한 영향을 중심으로” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 22-31.
2. 한국건설기술연구원 (2000). **수자원계획의 최적화 연구(IV)**. 한국수자원공사.
3. Hasimoto, T. (1982). "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation." *Water Resource Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
4. Lee, D.-K. and H.-S. Kang (1999). "Coupling of the NCAR./LSM into the MM5 and Its Application for the East Asian Summer Monsoon." *Preprints of the Ninth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop*, Boulder, CO., pp. 201-203.