



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

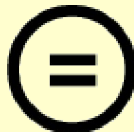
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

생태수문변화지표를 이용한 낙동강
유역의 기후변화 영향 분석



2011年 6月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

李 雅 姸

工學碩士 學位論文

생태수문변화지표를 이용한 낙동강
유역의 기후변화 영향 분석

指導教授 金 上 旦

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2011年 6月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

李 雅 姸

李雅婷의 工學碩士 學位論文을 認准함

2011年 6月



主 審 工學博士

이병헌



委 員 工學博士

강임석



委 員 工學博士

김상단



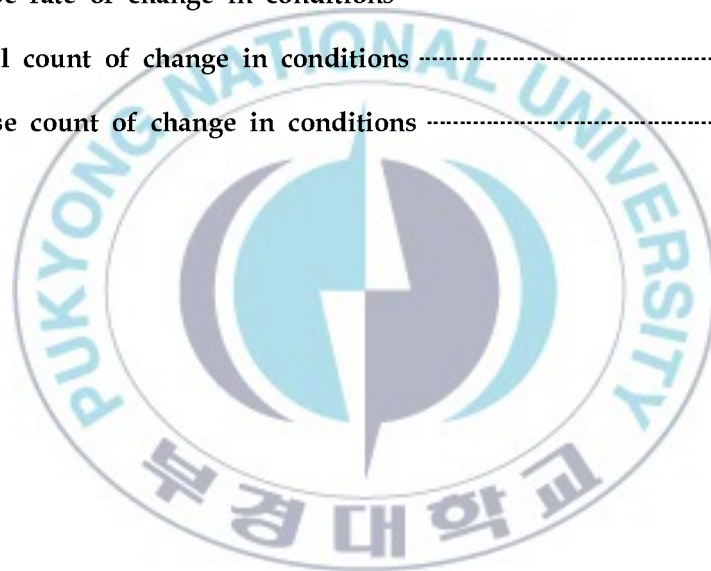
목차

I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구내용	3
3. 연구동향	7
가. 최적 GCMs의 선정	7
나. GCMs의 규모상세화(Downscaling)	7
다. 기후변화에 따른 유량 변동 영향 분석	8
II. 연구 방법	10
1. 미래기후정보의 구성	10
2. 일 하천유량 모의	17
3. 생태수문변화 지표 산정	20
III. 결과 및 고찰	27
1. 강우-유출 모형의 적용	27
2. 기후변화 시나리오의 적용	34
3. 생태수문변화 지표 산정	47
IV. 결론	66
참고문헌	69

List of Figures

Fig. 1. Representing of Land/Ocean	11
Fig. 2. Observation locations (24 sites)	13
Fig. 3. Future climate projections	14
Fig. 4. Down-scaling procedure	16
Fig. 5. Schematic diagram of TANK model	18
Fig. 6. Study area and locations of calibration catchments	28
Fig. 7. Subbasins for TANK-Nakdong river model	29
Fig. 8. Stream flow simulation results	32
Fig. 9. Percent change in modeled future monthly precipitation using future climate series informed by 4 global climate models with SRES A2 greenhouse emission scenario	35
Fig. 10. Difference (°C) change in modeled future monthly air temperature using future climate series informed by 4 global climate models with SRES B1 greenhouse emission scenario	37
Fig. 11. Natural and GCM-based monthly flow for 1980-2009	40
Fig. 12. Monthly river flow projections	43
Fig. 13. Mean value of July (cms)	48
Fig. 14. Mean value of December (cms)	49
Fig. 15. Annual minima 7-day (cms)	51
Fig. 16. Annual maxima 7-day (cms)	52
Fig. 17. Julian date of annual minimum	54

Fig. 18. Julian date of annual maximum	55
Fig. 19. Low pulse count	57
Fig. 20. High pulse count	58
Fig. 21. Low pulse duration	59
Fig. 22. High pulse duration	60
Fig. 23. Fall rate of change in conditions	62
Fig. 24. Rise rate of change in conditions	63
Fig. 25. Fall count of change in conditions	64
Fig. 26. Rise count of change in conditions	65



List of Tables

Table 1. Summary of hydrologic parameters used in IEHA and their characteristics(Richter et al., 1996)	22
Table 2. Scenarios of Climate Change	29



생태수문변화지표를 이용한 낙동강 유역의 기후변화 영향 분석

이 아 연

환경공학과, 석사과정,
부경대학교

요 지

최근 기후변화 현실화로 강우 발생 시기와 패턴이 변화하면서 유역에 따라 유황이 변화하고 있는 실정이다. 이에 본 논문은 기후변화가 향후 하천 유황과 수생태계에 미치는 영향을 분석하기 위하여 낙동강 유역을 대상유역으로 선정하고 개념적인 강우-유출모형인 TANK 모형을 이용하여 기후변화의 영향을 생태수문변화지수를 이용하여 하천 유황변화에 따른 수생태계에 미치는 영향을 정량화하였다. 그리고 TANK 모형으로부터 유출 변화를 모의한 후 생태수문변화지표(Indicator of EcoHydrologic Alteration, IEHA)를 이용하여 기후변화에 따른 하천 유황과 수생태계에 미치는 영향을 정량화하였다. 모형 구동을 위해 필요한 미래 기후 시계열은 4개 전구

기후모형의 3개 온실가스 배출시나리오를 바탕으로, 시간적 공간적 상관성을 현실성 있게 모의하고자 시공간적 규모내림기법에 의해 획득되었다. 강수량과 일평균기온에 대한 미래 기후 시계열은 적용된 전구기후모형 및 시나리오에 따라 현재 상태와 다양한 편차가 존재하며, 그 범위는 기준으로 연강수량의 경우 현재 대비 +0.59~+28.06%의 변화가 있었으며 일평균기온의 경우 +1.59~+3.58℃의 변화가 있을 것으로 예측되었다. 가장 주목할 만한 모형의 결과로서, 미래 한반도 동남부의 하천 유량은 증가할 가능성이 가장 큰 것으로 분석되었다. 또한 IEHA를 이용하여 미래 수생태계를 평가한 결과, 미래로 갈수록 낙동강 유역의 서식 공간 가용성은 여름철과 겨울철에는 증가할 것으로 보이며, 극한 유량 상태(최소 유량, 최대 유량)에서 수생태계가 받는 스트레스도 증가할 것으로 나타났다. 또한 유량 급증 및 급 감소로 인한 생태계 스트레스도 증가할 것으로 예상된다.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

물 환경 자원의 계획과 관리에 종사하는 전문가에게 직면한 도전과제들 중 하나는 물 환경 자원의 계획과 관리의 의사결정과정에서 어떻게 기후변화의 영향을 고려할 것인가 일 것이다. 기온 상승과 강수패턴의 변화로 야기되는 미래 하천유량의 불확실성은 하천유량의 자연적인 변동성에 덧붙여져 문제를 더욱 복잡하게 만들고 있다(California Climate Change Center, 2009). 특히 우리나라의 경우 주요한 식수원을 4대 대형 하천으로부터 거의 전량 취수하고 있는 실정이며, 이에 따라 4개 대형 하천의 수량 및 수질, 생태 상태에 보다 큰 관심이 집중될 수밖에 없는 처지에 놓여있다. 또한 하천 생태계에서 유량 변화는 하천의 모든 생물의 서식 및 하천의 이용에 큰 영향을 미치게 될 것이다. 우리나라의 이와 같은 물 환경 자원의 현황을 고려할 때, 기후변화에 따른 물 환경 자원의 영향을 살펴보기 위해서는 대형 하천 분류 유량의 변화에 대한 분석이 수행되어야 할 것이다.

일반적으로 물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석할 때 가장 중요한 것은 미래의 기후정보를 어떻게 확보할 수 있을 것인가 일 것이다. 현재까지의 세계적인 추세는 이에 대한 해답을 전구기후모형(General Circulation Models, GCMs)에서 찾고자 하고 있다. 그러나 GCMs는 지구를 보통 3° 내외의 격자단위로 나누어 모의를 하고 있으며, 한반도 전체가 서너 개의 격자로 표현되기 때문에, 물 환경 자원에 대한 계획 수립 시 일상적으로 접하

고 있는 유역의 공간적 범위와는 많은 차이가 있어 이의 직접적인 사용이 곤란하다는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 기후자료의 시공간적 변동성이 가능한 보존되면서도 비교적 간단한 통계학적 규모내림기법을 개발이 필요하다.

물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석할 때 제기되는 다른 한 가지 문제는 어떠한 GCMs의 미래기후정보를 이용할 것인가 일 것이다. GCMs마다 서로 다른 변화량, 심지어는 서로 반대되는 경향성을 가진 미래기후정보를 생산하고 있기 때문에 경우에 따라서는 적용되는 GCMs이 무엇인가에 따라 전혀 상반된 적응전략이 도출될 가능성도 엄존하고 있는 실정이다.

본 연구에서 살펴보고자한 물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향 분석에서 제기되는 마지막 문제는 미래기후정보에 따른 물 환경 자원의 변동양이 하천 생태계에 어떠한 영향을 미칠 것인가 하는 사항이다. 하천 생태계 관리의 목적은 하천에 서식하는 모든 생물들의 다양성과 그들의 생태기작이 보전되고 복원되는 것에 있다. 효과적인 관리를 위해서는 현재의 하천 생태계와 관리 목표에 따라 요구되는 하천 생태계의 구조, 기능, 다양성 등을 명쾌하게 풀어낼 수 있는 도구가 필요하다(Keddy et al., 1993; Ritcher et al., 1993).

본 논문에서는 다양한 GCMs 및 다양한 온실가스 배출시나리오에 따른 미래기후정보를 반영한 낙동강 본류 유량을 산정하고, 더 나아가 유량 변화의 영향을 생태수문변화지표 개념을 도입하여 통계학적으로 분석하고 생태계에 미치는 영향 평가해보고자 한다.

2. 연구내용

일반적으로 물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석할 때 가장 중요한 것은 미래의 기후정보의 확보현재까지의 세계적인 추세는 이에 대한 해답을 GCMs는 지구를 보통 3° 내외의 격자단위로 나누어 모의를 하고 있으며, 한반도 전체가 서너 개의 격자로 표현되기 때문에, 물 환경 자원에 대한 계획 수립 시 일상적으로 접하고 있는 유역의 공간적 범위와는 많은 차이가 있어 이의 직접적인 사용이 곤란하다는 문제점을 안고 있다. 특히, 강수량이 여름철에 집중되고 강수의 공간적 변동성이 매우 큰 몬순기후에 속한 우리나라의 경우에는 GCMs의 결과를 물 환경 자원에 대한 계획 수립에 직접적으로 적용하기에는 많은 무리가 따르게 된다. 이러한 문제점을 극복하고자 GCMs의 결과를 공간적으로 축소하기 위한 규모내림기법을 적용하고자 하였다. 국내의 경우 GCMs로부터 규모내림기법으로 도출된 미래지역기후자료들 사이의 공간적인 상관성(특히, 강수량의 경우)이 올바르게 재현되고 있지 못하기 때문에 기후자료의 공간적 상관성이 매우 중요한 의미를 가지게 되는 대형 하천 분류에서 물 환경 자원의 기후변화에 대한 영향평가가 적절하게 이루어지지 못하고, 기후자료의 공간적 균질성이 상대적으로 중요한 의미를 갖지 않는 중소하천에서의 영향평가가 수행되어 오고 있는 실정이다. 그러나 상기 언급한 바와 같이 우리나라 물 환경 자원의 관리 및 이용 특성을 고려할 때, 한강, 낙동강, 금강, 영산강과 같은 대형 하천의 분류유량에 대한 기후변화의 영향을 살펴보지 못한다면 근본적인 적응대책의 수립에 한계를 가질 수밖에 없을 것이다. 이에 본 연구에서는 기후자료의 시공간적 변동성이 가능한 보존되면서도 비교적 간단한 통계학적 규모내림기법을 개발하여

기후변화가 낙동강 본류 하천유량에 미치는 영향에 대하여 분석을 실시하고자 하였다.

물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 분석할 때 제기되는 다른 한 가지 문제는 어떠한 GCMs의 미래기후정보를 이용할 것인가 일 것이다. GCMs마다 서로 다른 변화량, 심지어는 서로 반대되는 경향성을 가진 미래기후정보를 생산하고 있기 때문에 경우에 따라서는 적용되는 GCMs이 무엇인가에 따라 전혀 상반된 적응전략이 도출될 가능성도 엄존하고 있는 실정이다. 이에 최대규 등(2010)에서는 총 17개 GCMs를 대상으로 우리나라의 기후를 가장 잘 표현하는 GCMs를 살펴보려는 연구를 시도한 바 있다. 그들의 연구에 따르면 우리나라 지형을 적절히 표현한 일부 고해상도 GCMs이 비교적 우리나라 기후를 잘 재현하고 있음을 살펴볼 수 있었다. 이에 본 연구에서는 그들의 연구에서 추천한 고해상도 GCMs 중 주요 IPCC 온실가스 배출시나리오인 SRES A1B, A2, B2에 관한 미래기후정보를 모두 제공하고 있는 GCMs인 CGCM3.1-T63, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, ECHAM5/MPI-OM를 대상으로 하여 미래기후정보를 추출하여 기후변화가 낙동강 본류 하천유량에 미치는 영향에 대하여 분석을 실시하고자 하였다.

기후변화가 고려된 낙동강 본류 하천유량 산정을 위해서 본 연구에서는 개념적 장기유출 모형인 TANK 모형을 적용하였다. TANK 모형이란 대상 유역을 오리피스형의 유출공을 가진 몇 개의 저류형의 가상용기를 조합하여 유량을 유량으로 변환하는 유출계산법으로 장기유출해석에서 비교적 높은 평가를 받고 있는 모형 중 하나이며, 강수량과 잠재증발산량이 입력 자료로 사용되므로 기후변화에 의한 유량변동의 영향 분석이 가능하다. TANK 모형의 적용에서 가장 어려운 점들 중 하나는 모형 매개변수의 수가 많고, 이들을 시행착오에 의해서 결정하므로 매개변수 산정이 까다로우나 계산법이 명확하고 유출기구가 수문현상을 잘 재현한다는 점에서 모형의 객관성을 인

정받고 있다. 본 연구에서 적용한 강우-유출모형은 김재철과 김상단(2007)에 의해 개발된 수정 TANK 모형으로 기존의 TANK 모형에 하도추적기능을 추가하여 대유역의 유출모의에 적용이 용이한 장점을 가지고 있다. 하도 추적기능이 추가된 수정 TANK 모형은 하천 유량에 대한 기후변화의 영향평가(김문성 등, 2009) 및 각종 물 환경 계획의 수립(김재철과 김상단, 2007; 한수희 등, 2007)을 위하여 우리나라 낙동강 유역에 성공적으로 적용되어온 모형이다.

본 연구에서 살펴보고자한 물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향 분석에서 제기되는 마지막 문제는 미래기후정보에 따른 물 환경 자원의 변동양이 하천 생태계에 어떠한 영향을 미칠 것인가 하는 사항이다. 하천 생태계 관리를 위해서는 하천에 서식하는 모든 생물들의 다양성과 그들의 생태기작이 보전 및 복원되어야 한다. 효과적인 관리를 위해서는 현재의 하천 생태계와 관리 목표에 따라 요구되는 하천 생태계의 구조, 기능, 다양성 등을 명쾌하게 풀어낼 수 있는 도구가 필요하다(Keddy et al., 1993; Ritcher et al., 1993). 그리하여 도출된 개념이 생태학적 수문변화지표(Ritcher et al., 1996)이다. 수문변화지표(Indicator of Hydrologic Alteration, IHA)은 미국자연보호협회(Nature Conservancy)에서 개발하였으며, 댐, 도수, 지하수 등 수자원의 인위적인 이용에 따른 유량변화의 영향을 통계학적으로 분석하며 수문학적 연구, 생태학적 연구, 환경유량 연구 등의 다양한 분야에 적용할 수 있다. 이 방법은 생물학적 관점에서 수공 시설물의 설치로 인한 유황과 자연 유량의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 많이 적용되어 왔으며, 총 32개의 수문학적 특성지표로 구성되어 있으며, 하천유량, 수위, 지하수위나 저수지 수위 등 일 수문량 자료가 입력 자료로 이용된다. 수문학적 특성지표는 크기(Magnitude), 시기(Timing), 빈도(Frequency), 기간(Duration), 변화율(Rate of change)의 5가지 항목을 통하여 수문변화에 대한 정보를 제공한다.

본 연구에서는 생태학적으로 연관된 수문변화지표 개념을 적용하여 미래 물 환경 자원 변동양의 유의성 여부를 분석하였다. 즉, 다양한 GCMs 및 다양한 온실가스 배출시나리오에 따른 미래기후정보를 반영한 낙동강 본류 유량 TANK 모형을 통하여 산정하고, 이를 생태수문변화지표를 산정하기 위한 입력 자료로 사용하여 유량변화의 영향을 통계학적으로 분석하고 생태계에 미치는 영향 평가해보고자 하였다.



3. 연구동향

본 연구에서는 크게 최적 GCMs의 선정, GCMs의 규모상세화, 기후변화에 따른 유량 변동 영향분석에 대한 국내외 연구동향을 살펴보고자 한다.

가. 최적 GCMs의 선정

Intergovernmental Panel on Climate Change(이하 IPCC) 4차 보고서(Fourth Assessment Report, AR4)에서는 유럽, 미국을 비롯한 전 세계 여러 국가에서 개발된 23개의 GCMs를 제시하고 있으며 Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison(이하 PCMDI)에서는 추가적으로 2개의 GCMs를 제시하여 총 25개의 공인된 GCMs가 존재한다.

Climate Impacts Groups(2009)에서는 미래기후에 따른 수자원변화 분석에 앞서 미국 워싱턴 주를 대상으로 1970~1999년 기간 동안의 관측 자료를 바탕으로 여러 GCMs에 대한 연평균 편차를 제시하고 월별 평균 강수량, 기온을 비교하였다. 또한 Taylor diagram(Taylor, 2001)을 이용하여 현재 기후 재현성이 우수한 GCMs를 선택하고자 하였다.

국내에서는 최대규 등(2010)에서 총 17개 GCMs를 대상으로 우리나라의 기후를 가장 잘 표현하는 GCMs를 살펴보려는 연구를 시도한 바 있다.

나. GCM의 규모상세화(Downscaling)

GCMs의 결과를 공간적으로 축소하기 위한 규모내림기법(downscaling)이 전 세계적으로 많은 연구자들에 의해 개발되어 왔다(Giorgi and Mearns,

1991; Wilby and Wigley, 1997), 이러한 규모내림기법을 기반으로 세계 각국은 자국의 물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 다양한 각도로 분석하고 있으며(Najjar, 1999; Stonefelt et al., 2000; Varanou et al., 2002; Han et al., 2009; Choi et al., 2010;), 우리나라에서도 기후변화와 관련된 연구가 최근 활발히 진행되고 있으나(김문성 등, 2009; 최대규 등, 2009; 최대규 등, 2010; 한수희 등, 2009), 국내의 경우 GCMs로부터 규모내림기법으로 도출된 미래지역기후자료들 사이의 공간적인 상관성(특히, 강수량의 경우)이 올바르게 재현되고 있지 못하기 때문에 기후자료의 공간적 상관성이 매우 중요한 의미를 가지게 되는 대형 하천 본류에서 물 환경 자원의 기후변화에 대한 영향평가가 적절하게 이루어지지 못하고, 기후자료의 공간적 균질성이 상대적으로 중요한 의미를 갖지 않는 중소하천에서의 영향평가가 수행되어 오고 있는 실정이다.

다. 기후변화에 따른 유량 변동 영향분석

수문분야에서 기후변화에 대한 영향을 파악하기 위하여 연구된 외국의 연구 경향을 살펴보면 단일 혹은 여러 GCMs로부터의 미래기후정보를 바탕으로 이를 직접적으로 사용하거나 적절한 기법을 통하여 규모상세화한 결과를 강우-유출모형에 적용하여 유역의 유출반응을 살펴보는 방향을 취하는 것이 일반적이다(Hanratty and Stefan, 1998; Stonefelt, 2000; Gosain et al., 2006; Jha et al., 2006; Githui et al., 2008).

국내에서는 김문성 등(2009)은 장기유출해석에서 비교적 높은 평가를 받고 있는 TANK 모형을 이용하여 낙동강 유역의 기후변화에 따른 유량변동 평가를 하였으며, 최대규 등(2009)은 기후변화에 따른 병성천 유역의 수문 및

수질반응에 미치는 영향을 분석하였다.



II. 연구 방법

1. 미래기후정보의 구성

전술한 바와 같이 본 연구에서는 다양한 GCMs의 적용에 따른 미래 물 환경 자원의 변화를 살펴보기 위하여 네 가지 GCMs를 적용하였다. 첫 번째 GCM은 CCCma(Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis)에서 제공하는 CGCM3.1이다. CGCM3.1은 T47과 T63의 해상도에서 실행되는데, 본 연구에서는 지표면 해상도 $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$, 해양 해상도 $0.9^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ 인 T63이 적용되었다(이후 CT63). 두 번째 GCM은 프랑스 CNRM(Centre National de Recherches Meteorologiques)에서 제공하는 CNRM-CM3이다(이후 CNCM). CNCM 또한 CT63과 같은 정도의 해상도에서 실행된다. 세 번째 GCM은 호주 CSIRO(the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)에서 개발한 CSIRO-MK3.0이다(이후 CSMK). CSMK의 공간적인 해상도는 지표면 $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$, 해양 $0.8^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ 이다. 마지막으로 적용된 GCM으로는 ECHAM5/MPI-OM이며(이후 MPEH), 이는 독일 MPIMET(Max Planck Institut for Meteorologie)에서 개발되었는데, 지표면 해상도 $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$, 해양 해상도 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 가 적용되었다. Fig. 1에 이들 GCMs의 동아시아 지역 육지 표현능력을 도시하였다.

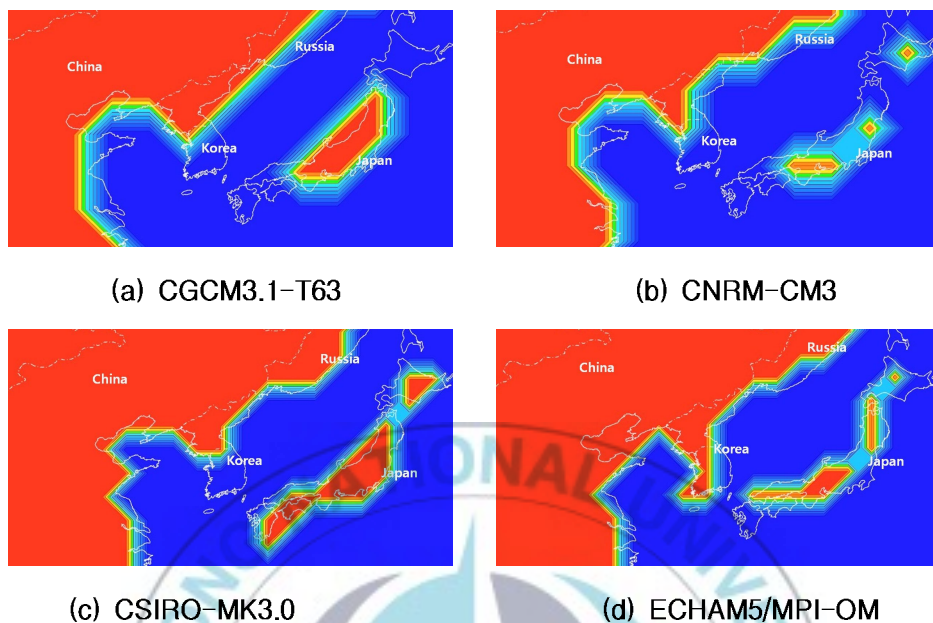


Fig. 1. Representing of Land/Ocean.

또한, 본 연구에서는 IPCC에서 제공하는 SRES A1B, A2 그리고 B2 온실 가스 배출시나리오를 모두 분석 대상으로 하였으며, 또한 시간적 그룹으로는 2011~2040년, 2041~2070년, 2070~2100년으로 구분된 미래에 대하여 1971~2000년의 현재 그룹의 모의 결과와의 비교를 수행하였다.

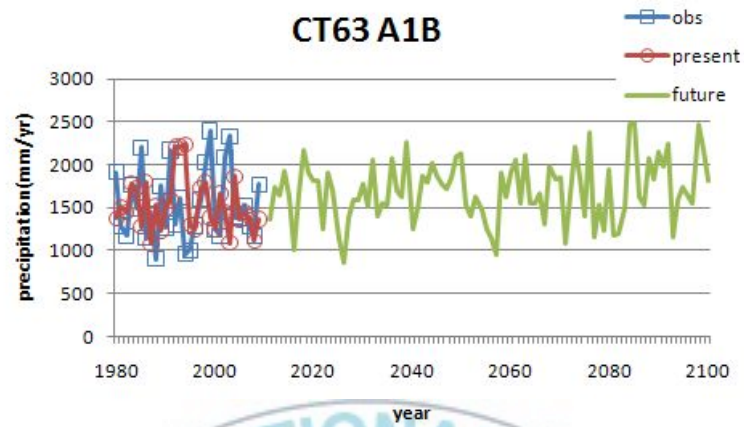
상기와 같이 GCMs로부터 획득한 큰 해상도의 미래기후정보는 본 연구에서 개발한 시공간적 변화인자기법(Spatio-Temporal Changing Factor Method, STCFM)을 적용하여 통계학적으로 한반도 남동부에 위치한 19개 기상 관측지점에 규모내림되어졌다. 본 연구에서 적용한 STCFM은 미래 강수량과 평균기온을 모의하기 위하여, 우리나라 기상청 24개 지점(Fig. 2)의 월 강수량 및 월 평균기온에 근거한 비교적 간단한 통계학적 규모내림기법이라 할 수 있다. GCMs에서 월단위로 제공되는 변수 중 pr를 월강수량으로, tave를 월 평균기온이라 가정하였으며, 먼저 GCMs에서 제공되는 1971~2000년

의 월 평균기온과 월 강수량 자료를 동 기간 24개 지점 공간평균자료와 일치시키기 위한 편의보정을 시도하였다. 편의보정은 월별로 수행되었으며, GCMs별 모의결과의 누가확률밀도함수를 관측된 공간평균자료의 누가확률밀도함수에 Quantile mapping하는 방법을 취하였다. 예를 들어 설명하면, MPEH에서 모의된 1971~2000년 1월 강수량과 1971~2000년 24개 지점 공간평균 1월 관측 강수량의 확률밀도함수를 서로 mapping 시키는 과정을 취하였음을 의미한다. 즉, 1월 관측 자료 x_o 에 대한 누가확률밀도함수를 $F_o(x_o)$ 라 하고 1월 현재 모의 자료 x_g 에 대한 누가확률밀도함수를 $F_g(x_g)$ 라 할 때, 1월 현재 모의 자료 x_g 에 대한 편의 보정된 값 x_g' 은 $F_o^{-1}(F_g(x_g))$ 로 구해질 수 있다. 여기서 F_o^{-1} 은 F_o 의 역함수를 의미한다. 이 때, 누가확률밀도함수는 Kernel smoothing 기법을 이용하여 결정하였다. 참고로 본 연구에서는 M-ATLAB의 ksdensity 함수를 이용하여 수행하였는데, ksdensity 함수는 정규 분포를 추정하기 위해 가장 최적인 주파수 대역폭을 sample 자료로부터 자동적으로 제공하는 장점이 있다. 보다 상세한 사항은 MathWorks 사의 관련 웹페이지(<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/stats/ksdensity.html>) 및 그에 따른 참고문헌을 참조할 수 있다. 미래 자료 또한 위와 같은 방법으로 산출되었는데, 예를 들어 설명하면 MPEH에서 모의된 미래 어떤 해의 1월 강수량 X_g 에 대응하는 현재 모의 자료로부터 구한 누가확률밀도함수에서의 누가확률 $F_g(X_g)$ 값을 구한 후, 이를 관측된 자료로부터 구한 누가확률밀도함수의 역함수에 적용하여 보정된 미래 어떤 해의 1월 강수량 $X_g' = F_o^{-1}(F_g(X_g))$ 을 구하게 된다. Fig. 3은 편의보정과정을 거친 A1B 온실가스 배출시나리오에 따른 CT63의 연 강수량과 CSMK의 연 평균기온 시계열의 예측결과를 나타내고 있다. 2071~2100년의 경우, CT63은 현재 대비 연강수량이 14%정도의 증가를 예측하고 있으며, CSMK에 따르면 2.4℃

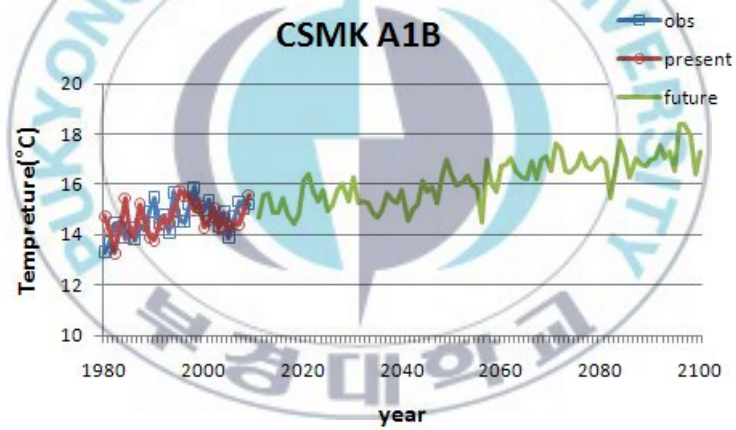
정도의 기온 증가가 예측되고 있음을 살펴볼 수 있다. Fig. 3에서 obs는 24개 지점 공간평균 관측 자료이며, present와 future는 GCMs로부터 편의보정 과정을 거쳐 획득된 현재 및 미래 강수량 및 평균기온 모의자료를 각각 의미한다.



Fig. 2. Observation locations (24 sites).



(a) CGCM3.1-T63 A1B(precipitation)



(b) CSIRO-MK3.0 A1B (temperature)

Fig. 3. Future climate projections.

위와 같은 산출한 미래 월 강수량 및 평균기온 자료(2011~2100년)는 각각 과거 30년 평균 월 강수량자료에 대한 백분율 및 월 평균기온 자료의 편차로 나타낼 수 있으며, 이러한 백분율 또는 편차 자료는 지점별 미래 일 강수량 및 일 평균기온을 산출하는데 사용된다. 강수량을 기준으로 절차를 요약하면 아래와 같다. 강수량과 평균기온의 규모내림에 있어서의 차이는 강수량의 경우는 백분율을 기준으로 적용한다는 것과 평균기온의 경우는 편차를 기준으로 적용하는 것이 다르며, 그 외는 모두 동일한 절차를 거쳐 지점별로 규모 내림되어진다.

- 1) 지점별 과거 관측 30년 자료의 공간평균 월 기상자료(이 경우에는 낙동강 19개 기상관측소 1980~2009년 자료 적용)에 예측된 백분율을 적용하여 미래 공간평균 월 기상자료(2011~2040년)를 산출,
 - 2) 미래 공간평균 30년 자료를 내림차순으로 정렬하고, 과거 관측 공간평균자료도 내림차순으로 정렬,
 - 3) 상기 정렬된 미래 공간평균 자료의 순위에 해당하는 과거 관측 공간평균자료의 공간분포 비율(= 지점 월 강수량자료 / 공간평균 월 강수량자료)을 미래 공간평균 자료에 적용하여 미래 지점별 일 기상자료 생성,
 - 4) 2041~2070년, 2071~2100년 자료도 같은 방법으로 과거 관측 자료의 공간분포를 반영하여 미래 지점별 일 강수량자료 생성
- 상기 규모내림절차를 보다 간략하게 도식화하여 나타내면 Fig. 4와 같다.

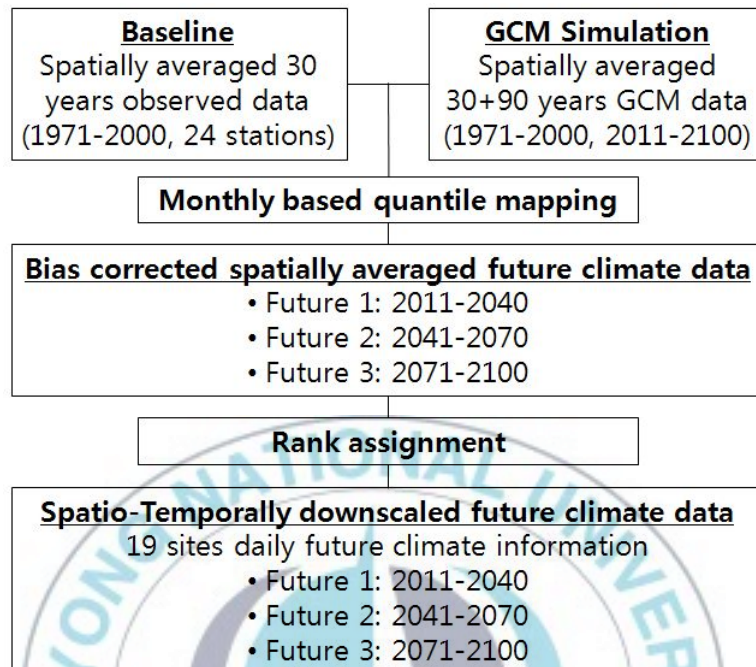


Fig. 4. Down-scaling procedure.

2. 일 하천유량 모의

Muskingum 하도 추적기능이 추가된 개념적인 강우-유출모형인 TANK 모형이 한반도 남동부에 위치한 낙동강 유역의 일 하천유량을 모의하기 위하여 적용되었다. TANK 모형이란 대상 유역을 오리피스형의 유출공을 가진 몇 개의 저류형의 가상용기(TANK)를 조합하여 우량을 유량으로 변환하는 유출계산법으로 장기유출해석에서 비교적 높은 평가를 받고 있는 모형 중 하나이다. TANK 모형의 적용에서 가장 어려운 점들 중 하나는 모형 매개변수의 수가 많고, 이들을 시행착오에 의해서 결정하므로 직감과 경험에 의존할 수밖에 없다는 것이나, 반면에 계산법이 명확하고, 유출기구가 수문 현상을 잘 재현한다는 점에서 모형의 객관성을 인정받고 있다.

강우-유출 과정을 모형화하기 위해 적용된 TANK 모형의 구조를 Fig. 5에 도시하였다. 하도 추적기능이 추가된 수정 TANK 모형은 하천 유량에 대한 기후변화의 영향평가(김문성 등, 2009) 및 각종 물 환경 계획의 수립(김재철과 김상단, 2007; 한수희 등, 2007)을 위하여 우리나라 낙동강 유역에 성공적으로 적용되어온 모형이다.

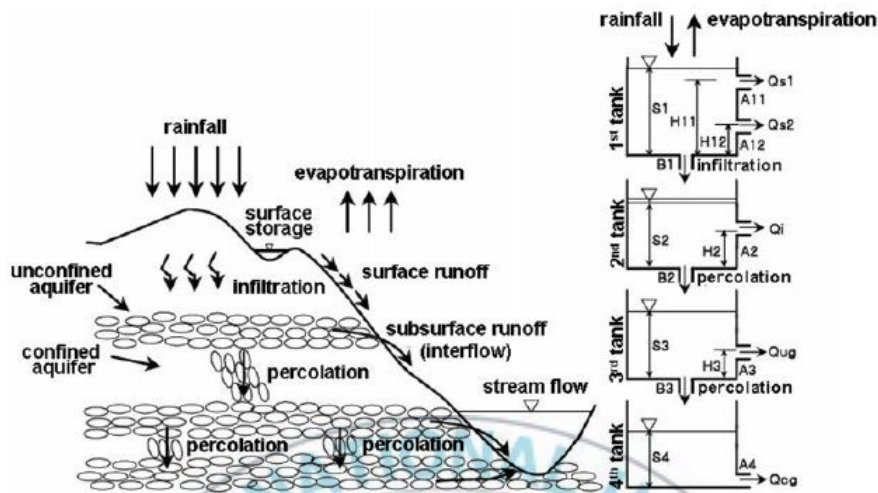


Fig. 5. Schematic diagram of TANK model

본 연구에서 사용한 TANK 모형은 하도추적 기능이 추가된 4단 TANK 모형이다. 하도추적 기능의 추가로 예를 들어 단위유역 낙분B의 유출을 모의하고자 할 경우, 낙분A에서 모의된 유량은 낙분B 상류의 Head water로 입력되어 낙분B 하도구간을 따라 추적된 후, 낙분B에서 자체 발생된 유량과 합산되어 이를 낙분B 출구에서 흐르는 유량으로 모의하게 된다. 이 때 낙분 B 단위유역 자체에서 발생된 유량은 기존에 구축된 TANK 모형과 같은 방법으로 모의를 수행하게 된다. 사용된 하도추적기법은 현재 가장 일반적으로 쓰이고 있는 Muskingum의 홍수추적방법을 적용하였다.

한반도 남동부 19개 기상관측지점에서 관측한 일 강수량, 평균기온, 상대 습도, 풍속, 일사량, 일조시간 등이 TANK 모형의 구동을 위해 사용되었다. 이들 자료들은 한국 기상청 홈페이지에서 획득할 수 있다(www.kma.go.kr). TANK 모형 구동을 위해 필요한 잠재증발산량은 Penman 방법에 의해 사전에 계산하여 모형에 입력하였다.

상기 모형으로부터 도출된 장기간의 일 하천유량 모의자료로부터 하천 주

요 지점별로 유황곡선을 작성할 수 있는데, 유황곡선은 연중 지속일수 또는 순위백분율에 따른 유량의 규모를 나타내는 수단으로서 하천의 전체적인 유량조건을 확률적으로 파악하기 위한 방법이다(Dingman, 2002; Vogel et al., 1994). 이 곡선을 작성하기 위해서는 보유하고 있는 전 기간의 일 유량자료를 내림차순으로 정렬하여 순위를 정한 후 그 비초과확률(non-exceedance probability)을 백분율로 나타내는 방법을 취한다. 유황곡선은 해당지점의 흐름특성을 나타내는 모든 성분들로 구성된 일종의 스펙트럼(spectrum)으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 자연유량의 유황에 주목하여 기후변화 영향에 따른 유량 변동을 고려하고자 하였다. 여기서 자연유량이란 인위적인 조절을 받지 않은 하천의 흐름특성을 의미하는 것으로, 상류 댐 방류의 영향 및 하천 취수, 환경기초시설 방류량 등의 영향을 배제한 상태의 유량을 의미한다. 이를 통해 인위적인 조절에 따른 유량 변동은 배제하고 기후변화 영향에만 집중하고자 하였다.

3. 생태수문변화 지표 산정

수문변화지표(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)는 미국자연 보호 협회(Nature Conservancy)에서 개발하였으며 댐, 도수, 지하수 등 수자원의 인위적인 이용에 따른 유량변화의 영향을 통계학적으로 분석하며 수문학적 연구, 생태학적 연구, 환경유량 연구 등의 분야에 적용할 수 있다.

이 방법은 일반적으로 생태학적 관점에서 수공 시설물의 설치로 인한 수문 변화와 환경 유량의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 사용된다. 이 중 수문학적 특성 지표를 나타내는 매개변수는 32개로 구성되며 하천유량, 수위, 지하수위나 저수지 수위 등 일 수문량 자료가 입력 자료로 이용된다.

수문변화지표를 적용하는 단계는 다음과 같이 크게 4가지로 (1) 연구 대상 지역의 수문변화 전·후의 자료 분석, (2) 유황이 미치는 영향 분석을 위한 지표 산정(32개 매개변수 분석), (3) 앞서 획득한 지표에 대한 연간 통계특성 분석, (4) 연간 통계특성에 대한 수문변화 전·후의 영향 비교·분석으로 구성되며 이를 통해 댐, 저수지 건설을 포함하여 넓게는 인간 활동으로 인한 토지이용 변화 전·후 효과를 정량적으로 비교할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Richter et al.(1996)이 제안한 IHA 개념에 기반 하는 생태수문변화지표(Indicators of EcoHydrologic Alteration, IEHA)를 이용하여 기후변화 영향에 따른 유량변화를 통계학적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 TANK 모형을 통하여 산정된 1980년~2009년 사이의 자연유량(Obs)과 같은 시기에 4개의 GCMs으로부터 산정된 현재유량(Pre), 4개의 GCMs별 3개의 시나리오별로 산정된 미래 유량을 시기별로 2011~2040년(F1), 2041~2070년(F2), 2071~2100년(F3)로 나누어 분석하고자 하였다.

IEHA는 (1) 크기(Magnitude), (2) 시기(Timing), (3) 빈도(Frequency), (4) 기간(Duration), (5) 변화율(Rate of change)의 5가지 Regime characteristics를 통하여 수문변화에 대한 정보를 제공하며, (1) 월별 수문 상태 크기, (2) 극한 사상 크기와 지속 기간, (3) 극한 사상 발생 시기, (4) 홍수량과 저유량의 빈도와 주기, (5) 유황변화 비율과 빈도의 5가지 IEHA statistics group으로 분류된다. 이를 Table. 1에 나타냈다.



Table 1. Summary of hydrologic parameters used in the IEHA and their characteristics

(a) Group 1

IEHA statistics group	Regime characteristics	Hydrologic parameters	Ecosystem Influences
Group 1 : Magnitude of monthly water conditions	Magnitude Timing	Mean value for each calendar month	▷ Habitat availability for aquatic organisms ▷ Soil moisture availability for plants ▷ Availability of water for terrestrial animals ▷ Availability of food/cover for fur-bearing mammals ▷ Reliability of water supplies for terrestrial animals ▷ Access by predators to nesting sites ▷ Influences water temperature, oxygen levels, photosynthesis in water column

(b) Group 2

IEHA statistics group	Regime characteristics	Hydrologic parameters	Ecosystem Influences
Group 2 : Magnitude and duration of annual extreme water conditions	Magnitude Duration	Annual minima 1-day means Annual maxima 1-day means Annual minima 3-day means Annual maxima 3-day means Annual minima 7-day means Annual maxima 7-day means Annual minima 30-day means Annual maxima 30-day means Annual minima 90-day means Annual maxima 90-day means	▷ Balance of competitive, ruderal, and stress-tolerant organisms ▷ Creation of sites for plant colonization ▷ Structuring of aquatic ecosystems by abiotic vs. biotic factors ▷ Structuring of river channel morphology and physical habitat conditions ▷ Soil moisture stress in plants ▷ Dehydration in animals ▷ Anaerobic stress in plants ▷ Volume of nutrient exchanges between rivers and flood plains ▷ Duration of stressful conditions such as low oxygen and concentrated chemicals in aquatic environments ▷ Distribution of plants communities in lakes, ponds, flood plains ▷ Duration of high flows for waste disposal, aeration of spawning beds in channel sediments

(c) Group 3

IEHA statistics group	Regime characteristics	Hydrologic parameters	Ecosystem Influences
Group 3 : Timing of annual extreme water conditions	Timing	Julian date of each annual 1 day maximum Julian date of each annual 1 day minimum	▷ Compatibility with life cycles of organisms ▷ Predictability/avoidability of stress for organisms ▷ Access to special habitats during reproduction or to avoid predation ▷ Spawning cues for migratory fish ▷ Evolution of life history strategies, behavioral mechanisms

(d) Group 4

IEHA statistics group	Regime characteristics	Hydrologic parameters	Ecosystem Influences
Group 4 : Frequency and duration of high and low pulse	Magnitude Frequency Duration	No. of high pulses each year No. of low pulses each year Mean duration of high pulses within each year Mean duration of low pulses within each year	▷ Frequency and magnitude of soil moisture stress for plants ▷ Frequency and duration of anaerobic stress for plants ▷ Availability of flood plain habitats for aquatic organisms ▷ Nutrient and organic matter exchanges between river and flood plain ▷ Soil mineral availability ▷ Access for water birds to feeding, resting, reproduction sites ▷ Influences bed load transport, channel sediment textures, and duration of substrate disturbance (high pulses)

(e) Group 5

IEHA statistics group	Regime characteristics	Hydrologic parameters	Ecosystem Influences
Group 5 : Rate and frequency of water condition changes	Frequency Rate of change	Means of all positive differences between consecutive daily means means of all negative differences between consecutive daily means No. of rises No. of falls	▷ Drought stress on plants (falling levels) ▷ Entrapment of organisms on islands, flood plains rising levels ▷ Desiccation stress on low-mobility streamedge (varial zone) organisms

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 강우-유출 모형의 적용

강우-유출 모형은 우리나라 낙동강 유역 44개 지점에서 2004~2009년까지 관측한 8일 간격 하천유량자료를 이용하여 보정되었다. 우리나라 환경부에서는 수질오염총량관리 기본방침에 따라 수질오염총량관리 단위유역 말단부에 대한 수질·유량조사를 8일 간격으로 실시하고 있다. 수질·유량측정망 등 DB 및 웹 시스템은 이러한 수질·유량 측정망 조사결과를 현장에서 PDA를 이용하여 DB로 구축하고 Web을 통해서 데이터를 관리 및 조회하는 정보시스템이다. 유역 구분은 수질오염총량관리계획에 의거하여 분할하였는데, 우리나라 낙동강 유역의 오염총량관리 단위유역은 모두 41개로 구분되어 있다. 그러나 낙동강 수계의 4개 대형 다목적 댐인 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐이 존재하는 단위유역의 경우 댐의 영향을 고려하여 댐 상류 및 하류 유역으로 다시 재분할하였다. 그리고 유역 출구에 위치한 단위유역인 낙본 N의 경우 낙동강 분류에서 서 낙동강으로 분기되는 유역으로 홍수기를 제외한 나머지 기간 동안에는 하천 유량이 인위적으로 조절되는 유역임에 따라 본 연구에서는 대상에서 제외하였다. Fig. 6에 40개 단위유역의 수질·유량 관측 지점과 4개 다목적댐의 위치를 도시하였다. 결과적으로 총 44개의 소유역으로 낙동강 유역을 분할하여 분석을 수행하였으며, 이를 Fig. 7에 도시하였다.

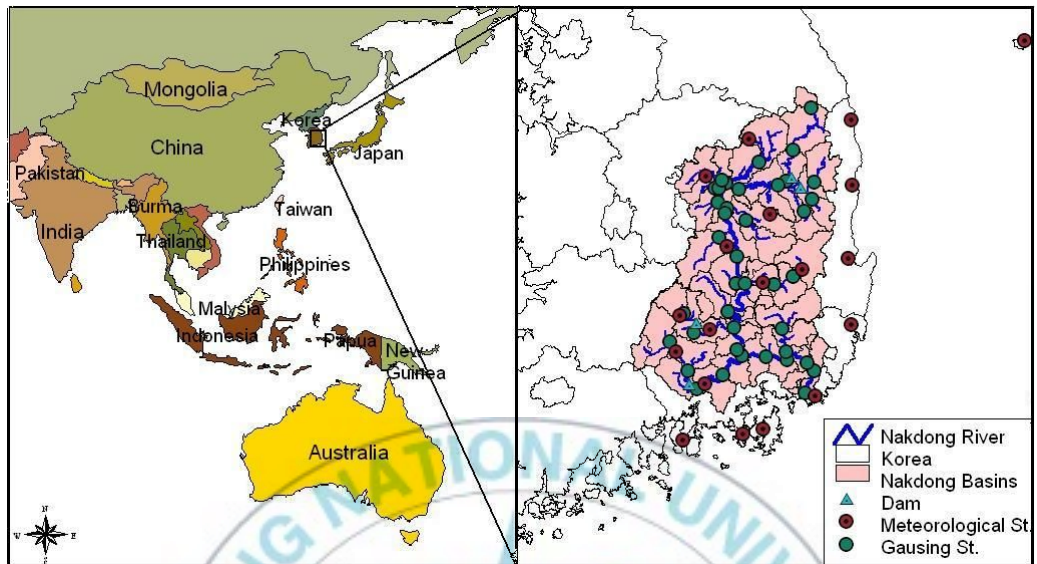


Fig. 6. Study area and locations of calibration catchments.

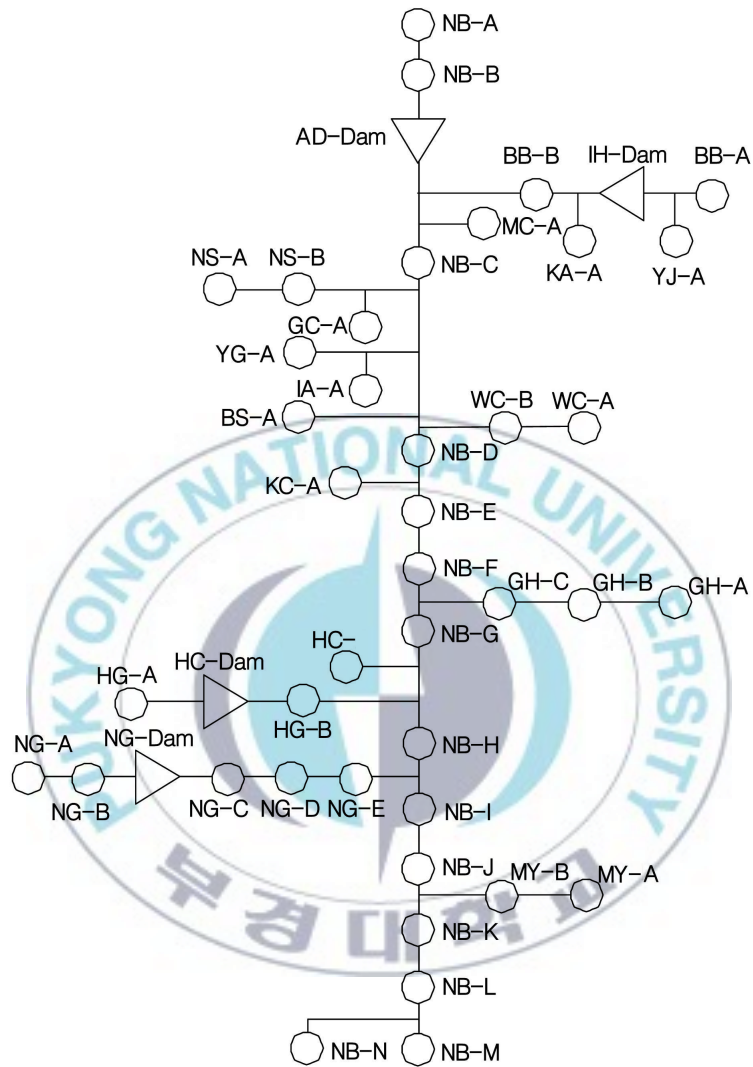


Fig. 7. Subbasins for TANK-Nakdong river model.

모형의 매개변수 추정을 위하여 낙동강 유역 44개 소유역 별 면적, 일 강수량, 일 잠재증발산량 및 취수량, 환경기초시설 방류량 자료를 구축하였다. TANK 모형의 보정은 상류유역부터 하류유역으로 하도추적과 병행하여 점차적으로 이루어졌다. 관측 자료의 재현 여부를 보다 정량적으로 판단하기 위하여 모의자료와 관측자료 사이의 통계적 상관성을 관측 자료와 모의 자료 사이의 회귀분석 결과 도출된 결정계수(R^2)와 Nash and Sutcliffe (1970)에 의해 제안된 모형 효율계수(ME)를 통하여 살펴본 결과 평균적으로 결정계수는 0.85, 모형 효율계수는 0.79로 비교적 우수하게 관측유량자료를 재현하고 있음을 확인할 수 있었다. 그 결과를 정리하여 Table 2.에 나타내었다.

Table 2. Results of TNAK model

Unit watershed	R^2	ME	Unit watershed	R^2	ME
NakbonA	0.86	0.80	GeumhoA	0.91	0.71
NakbonB	0.73	0.73	GeumhoB	0.91	0.59
Andong-Dam	0.42	0.32	GeumhoC	0.94	0.94
BanbyeonA	0.98	0.67	NakbonG	0.88	0.84
YongjeonA	0.95	0.75	HoicheonA	0.82	0.78
Imha-Dam	0.72	0.67	HwanggangA	0.94	0.77
KilanA	0.79	0.70	Hapcheon-Dam	0.86	0.86
BanbyeonB	0.96	0.92	HwanggangB	0.92	0.86
MicheonA	0.99	0.96	NakbonH	0.97	0.96
NakbonC	0.90	0.84	NamgangA	0.97	0.74
NaeseongA	0.89	0.84	NamgangB	0.97	0.83
NaeseongB	0.76	0.72	Namgang-Dam	0.82	0.81
GeumcheonA	0.72	0.71	NamgangC	0.58	0.53
YeonggangA	0.66	0.65	NamgangD	0.73	0.61
IanA	0.66	0.65	NamgangE	0.76	0.65
ByeongseongA	0.87	0.86	NakbonI	0.97	0.97
WecheonA	0.98	0.67	NakbonJ	0.97	0.97
WecheonB	0.90	0.90	MilyangA	0.68	0.50
NakbonD	0.92	0.92	MilyangB	0.87	0.85
KamcheonA	0.93	0.92	NakbonK	0.91	0.90
NakbonE	0.85	0.83	NakbonL	0.91	0.90
NakbonF	0.93	0.92	NakbonM	0.83	0.66

Fig. 8에 모의결과의 예로서, 병성천 유역과 낙동강 본류 I지점의 관측유량과 모의유량을 도시하였다. 각각의 그림에서 첫 번째 그림의 실선은 일 강수량, 두 번째 그림에서 점선은 잠재증발산량이고 실선은 실제증발산량이다. 세 번째 그림에서 실선은 모의된 일 유량이며, 점은 관측유량이다.



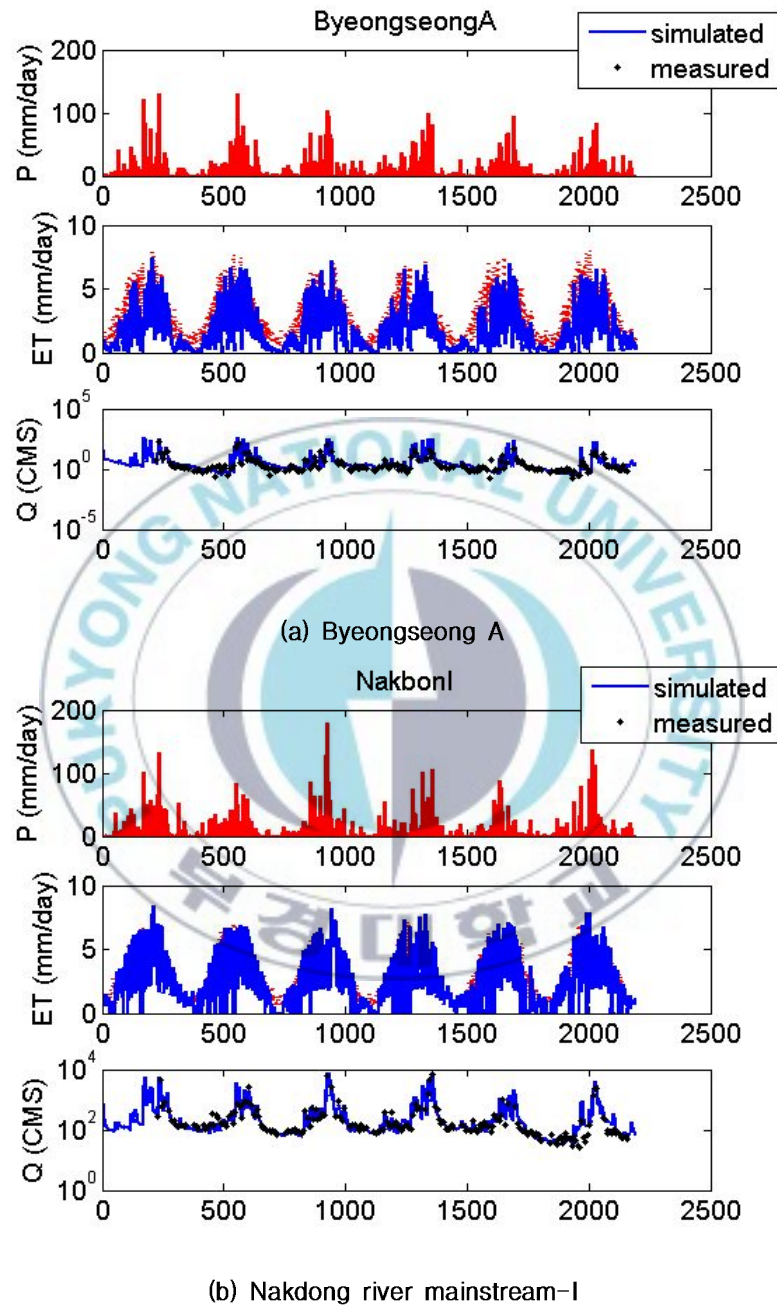


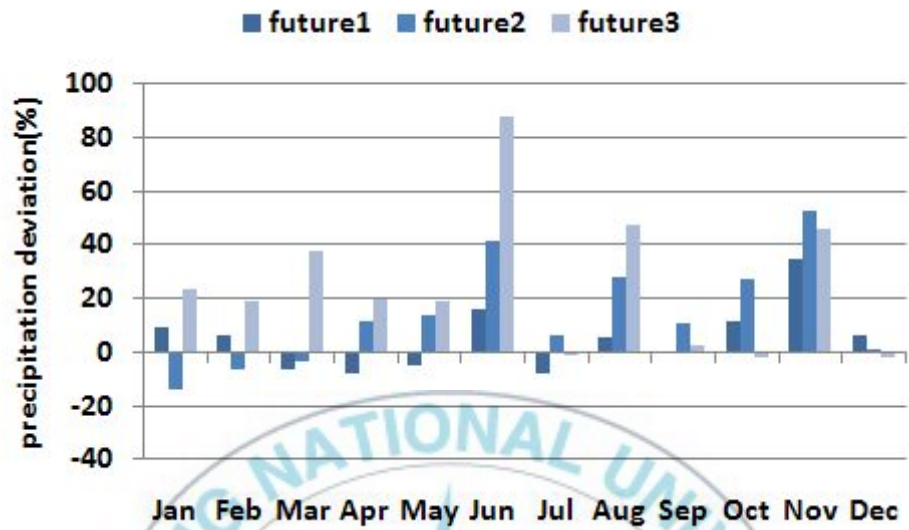
Fig. 8. Stream flow simulation results.

구축된 모형을 이용하여 자연유량조건 시나리오(댐 방류량 효과 및 환경기초시설 방류량과 취수량 효과 제거)에 따라 최근 30년간(1980~2009년) 일 자연유량을 산정하였으며, 이를 기준으로 각 단위유역별 환경유황곡선을 작성하였다. 본 연구에서는 낙동강 본류를 중심으로 최상류인 A지점부터 최하류인 M지점에 해당하는 유역을 중점적으로 분석하였다.

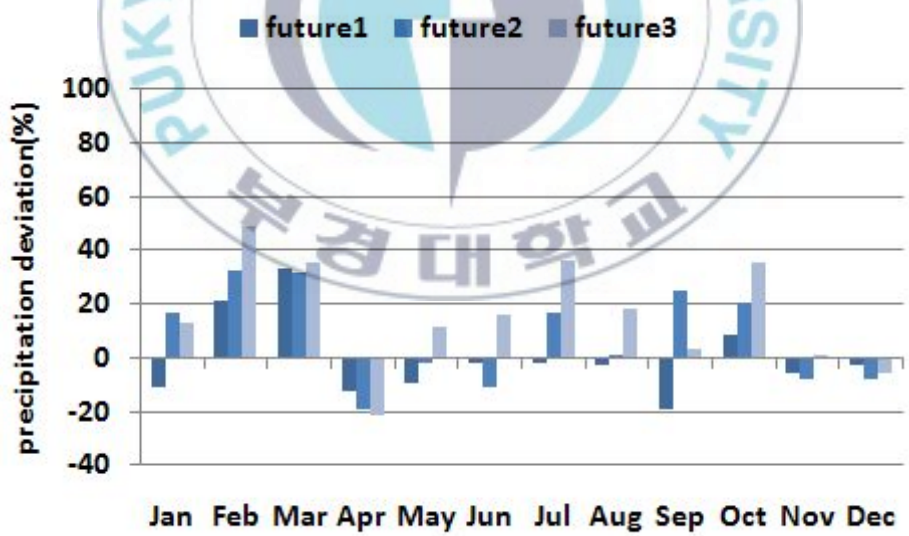


2. 기후변화 시나리오의 적용

1971-2100년까지 일 강수량과 일 평균기온을 산출하기 위한 통계학적 규모내림기법이 적용되었다. 일 강수량과 일 평균기온은 한반도 남동부 19개 기상청 관측지점을 대상으로 4개 GCMs(CT63, CNCM, CSMK, MPEH)와 3개 온실가스 배출시나리오(SRES A2, A1B, A2)를 바탕으로 산출되었다. 시간적으로는 2011~2040년, 2041~2070년, 2070~2100년으로 구분하여 기후변화에 대한 영향을 분석하였다. Fig. 9에 SRES A2 온실가스 배출시나리오를 기준으로 현재 대비 월별 미래 강수량의 편차(%)를 도시하였으며, Fig. 10에 SRES B1 온실가스 배출시나리오를 기준으로 현재 대비 월별 미래 일평균기온의 편차(°C)를 각각 도시하였다. 그림에서 F1은 2011~2040년 기간 동안의 결과를 의미하며, F2는 2041~2070년, F3는 2071~2100년 기간 동안의 결과를 각각 의미한다. 일평균기온의 경우에는 GCMs에 상관없이 강수량에 비하여 상대적으로 일관성 있는 상승추세를 보여주고 있으나, 강수량의 경우에는 적용되는 GCMs에 따라 계절별 편차가 매우 상이함을 살펴볼 수 있다.



(a) CGCM3.1-T63



(b) CNCM

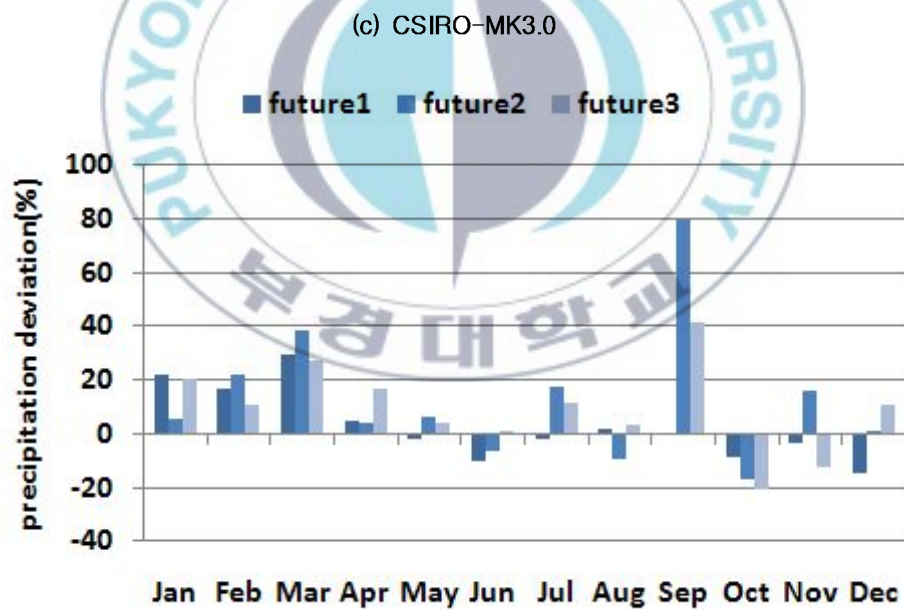
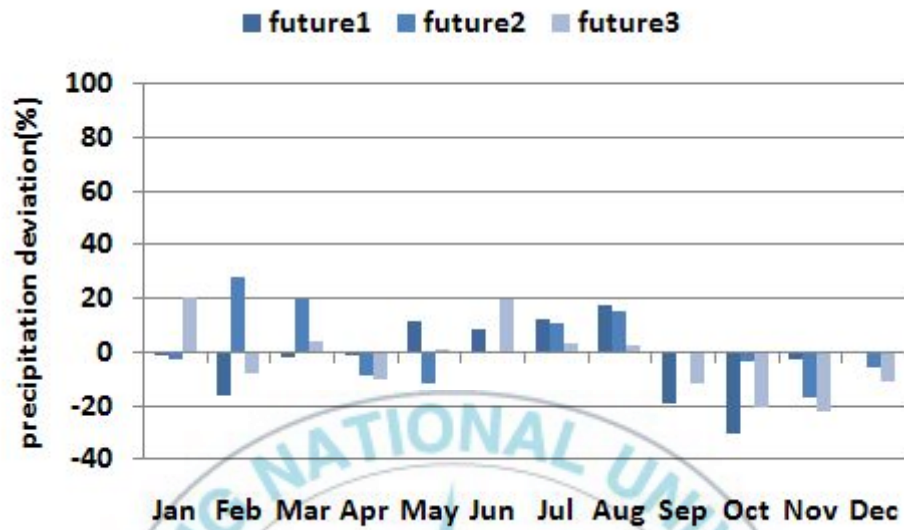
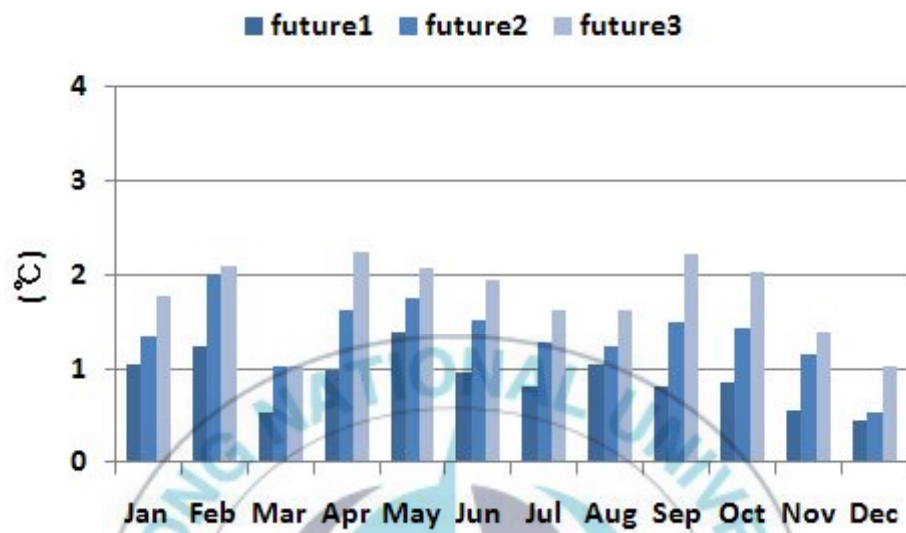
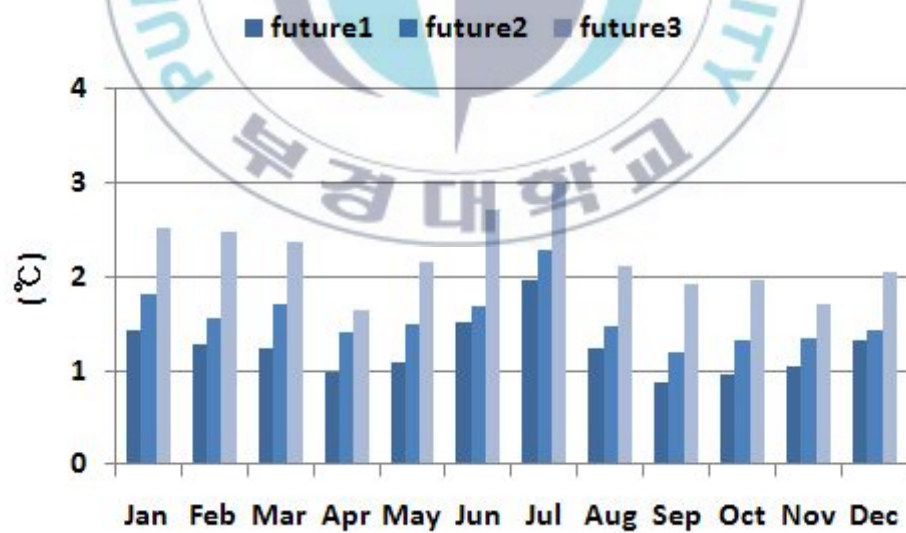


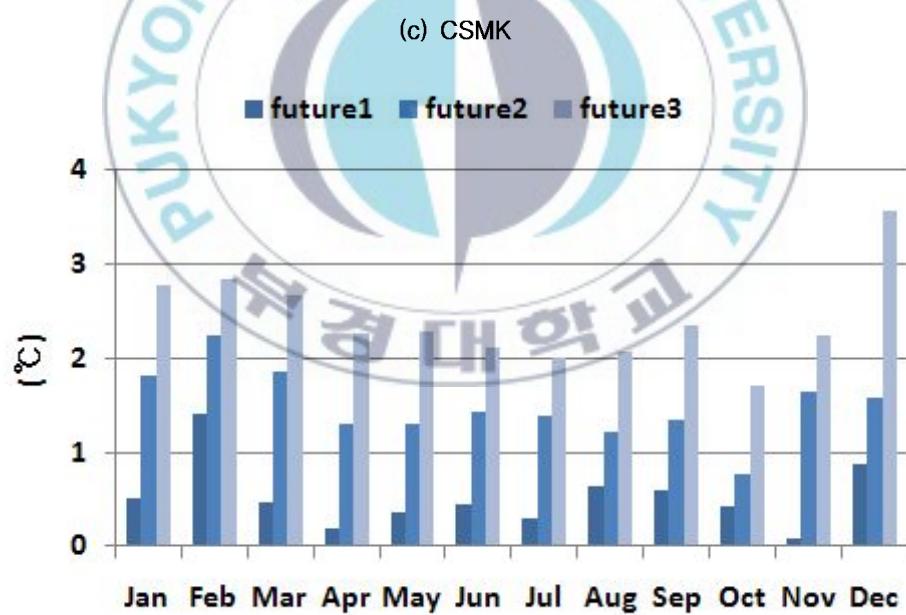
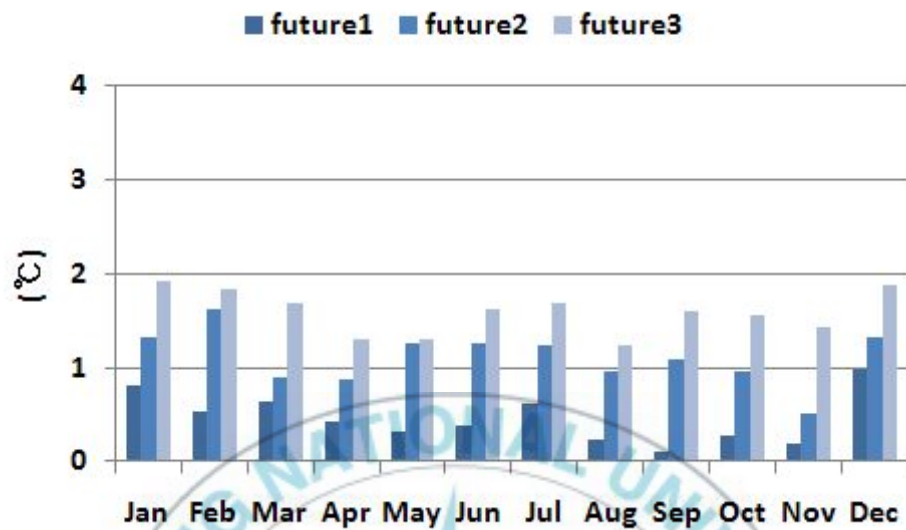
Fig. 9. Percent change in modeled future monthly precipitation using future climate series informed by 4 global climate models with SRES A2 greenhouse emission scenario.



(a) CT63



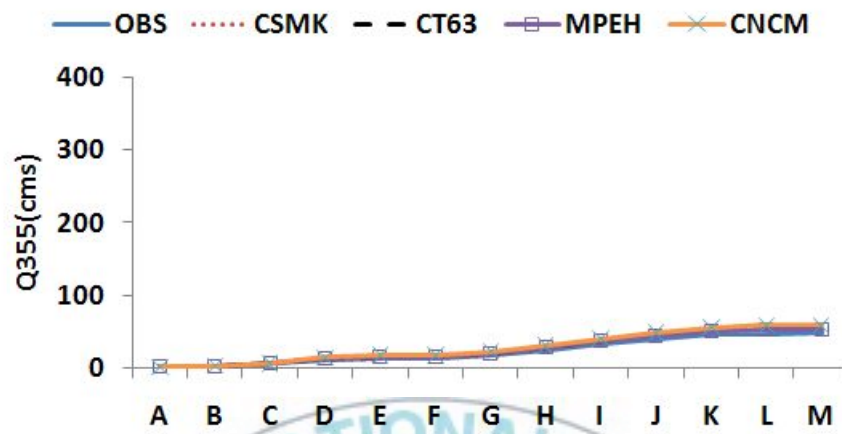
(b) CNCM



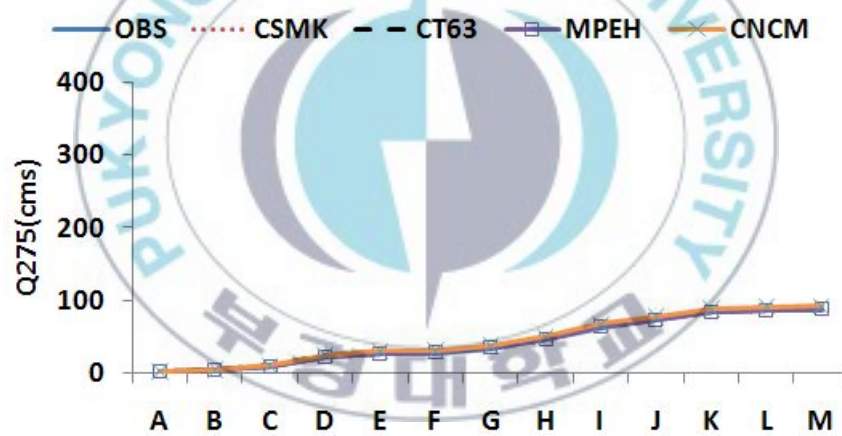
(d) MPEH

Fig. 10. Difference (°C) change in modeled future monthly air temperature using future climate series informed by 4 global climate models with SRES B1 greenhouse emission scenario.

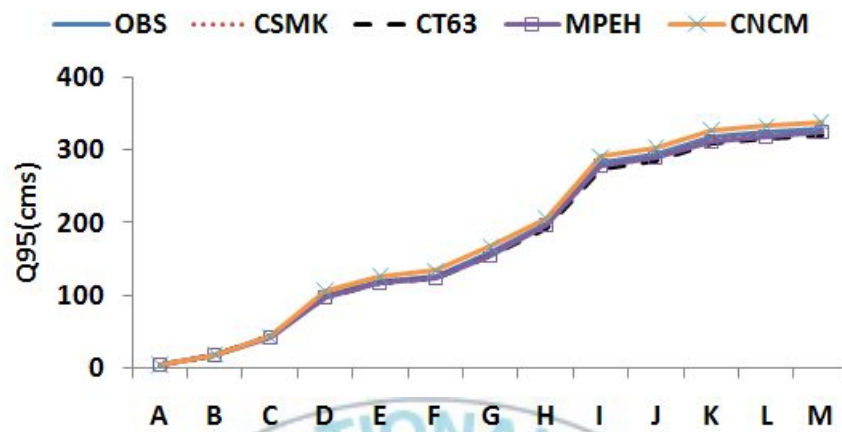
미래 하천유량의 경우 본 연구에서와 같이 GCMs의 미래기후정보로부터 규모내림기법을 통한 세부적인 기후시나리오를 도출하는 경우 강우-유출모형의 적용에 덧붙여서 입력자료 자체로 인한 불확실성이 가중된다고 할 수 있다. 특히 미래 유량의 경우 이러한 기후 요소의 변동뿐만 아니라 인간 활동 변화에 의한 인위적 요소 또한 영향을 미치기 때문에 불확실성이 더욱 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 주어진 한계 내에서 미래 유황모의의 불확실성을 보다 감소시키고 기후변화의 영향으로 인한 잠재적 유황 변동성을 평가하기 위하여 자연유량 개념을 도입하여 분석을 실시하였다. 여기서 자연유량이란 현재 유역의 수문조건하에 다목적 댐의 방류량 효과와 유역의 물이용을 배제하였을 때의 유량으로 정의된다. 기후변화의 영향을 분석하기에 앞서 각각의 GCMs에서 현재 기간(즉, 1980~2009년)의 자료를 규모내림하여 도출된 현재기후자료와 동 기간 관측 기후자료를 TANK 모형에 입력하여 자연유량을 모의·비교하였으며, 이로부터 본 연구에서 적용한 통계학적 규모내림방법의 적절성을 여부를 간접적으로 판단하고자 하였다. 4개 GCMs로부터 모의된 기후자료로부터 도출된 자연유량(pre)과 관측된 기후자료로부터 도출된 자연유량(obs) 중 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량을 낙동강 분류를 따라 Fig. 11에 도시하였다. 여기서 갈수량은 연간 일 유량 중 355번째로 큰 유량(즉, Q355)을 의미하며, 저수량은 275번째(즉, Q275), 평수량은 185번째(즉, Q185), 풍수량은 95번째로 큰 유량(즉, Q95)을 각각 의미한다. 4대 주요유황이 모두 양호하게 현재 유황을 재현하고 있는 것으로 나타남에 따라 우리나라 유량의 계절성이 우수하게 재현되고 있음을 알 수 있으며, 낙동강 상·하류 유량이 모두 우수하게 재현되고 있음에 따라 유량의 공간적 변화도 잘 재현하고 있음을 아울러 살펴볼 수 있다.



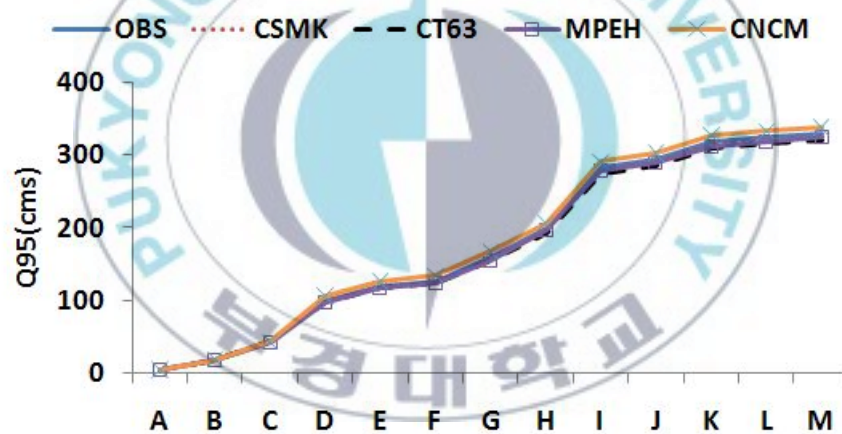
(a) Drought flow condition (Q355)



(b) Low flow condition (Q275)



(c) Median flow condition (Q185)

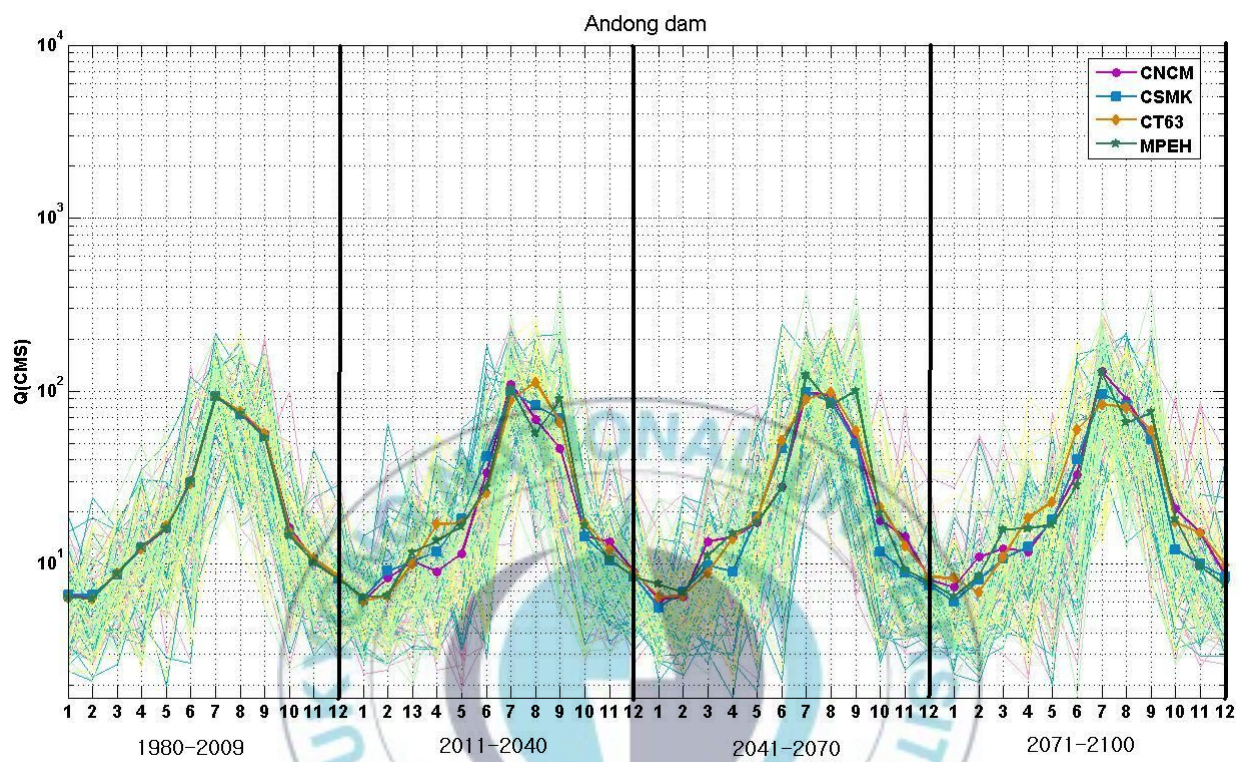


(d) High flow condition (Q95)

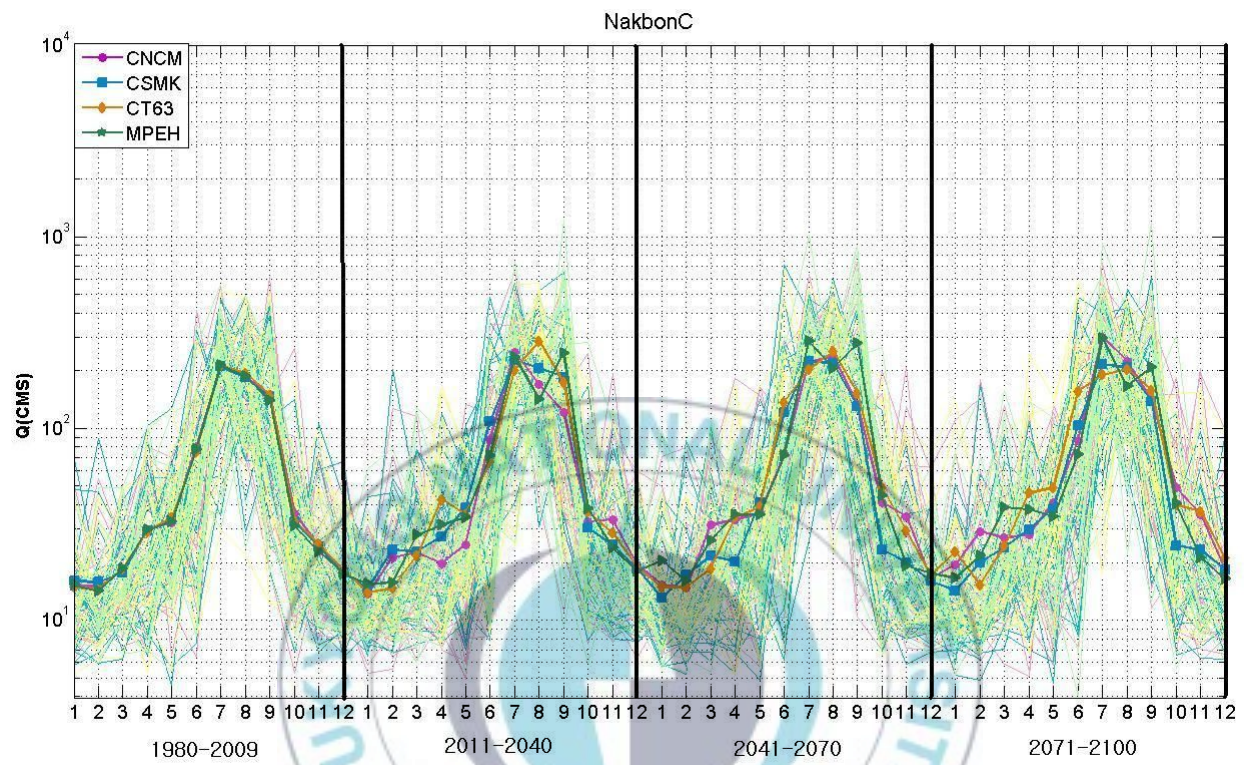
Fig. 11. Natural and GCM-based monthly flow for 1980–2009.

Fig. 12는 낙동강 분류 주요 지점을 기준으로 기후변화 시나리오에 따른 미래 월별 유량의 변화를 보여주고 있다. 1980~2009년의 경우, 적용된 4개 GCMs을 통해 산출된 각 30년의 월별 평균유량이 도시된 것이다(4개 GCMs $\times$ 30년 월별 평균유량 = 120개 월평균유량곡선). 미래의 세 가지 그룹의 경우, 적용된 4개 GCMs에 3개 온실가스 배출 시나리오가 적용된 각 30년의 월별 평균유량이 도시된 것이다(4개 GCMs $\times$ 3개 시나리오 $\times$ 30년 월별 평균유량 = 360개 월평균유량곡선).

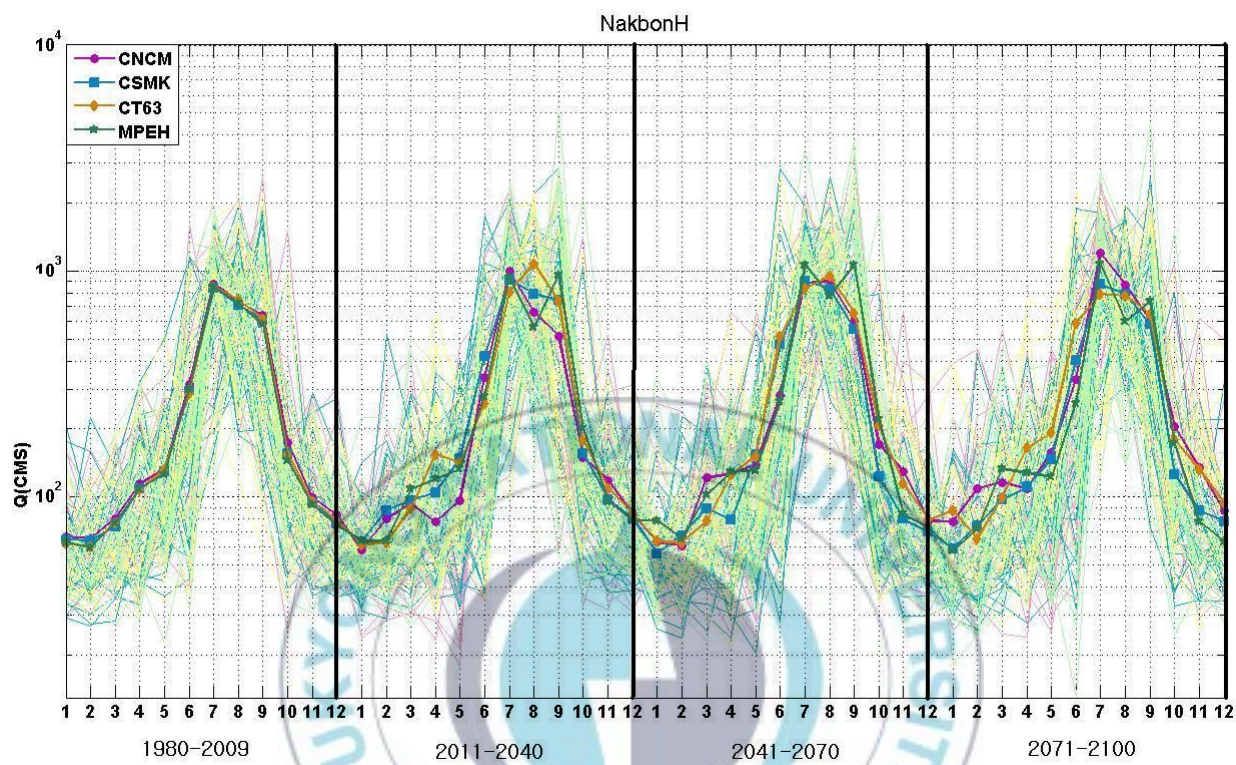
이와 함께 각각의 경우에 대한 평균값을 나타내었다. 적용된 GCMs별 온실가스 배출시나리오별 편차가 존재하고 있으나, 대체적으로 현재와 비교하여 여름철에는 하천 유량이 증가되고, 겨울철에는 유량 변화가 크지 않을 것임을 살펴볼 수 있다. 봄·가을철의 경우에는 적용된 GCMs별 온실가스 배출시나리오별로 하천 유량의 예측결과가 증가 또는 감소로 서로 상반되는 결과를 나타내고 있다.



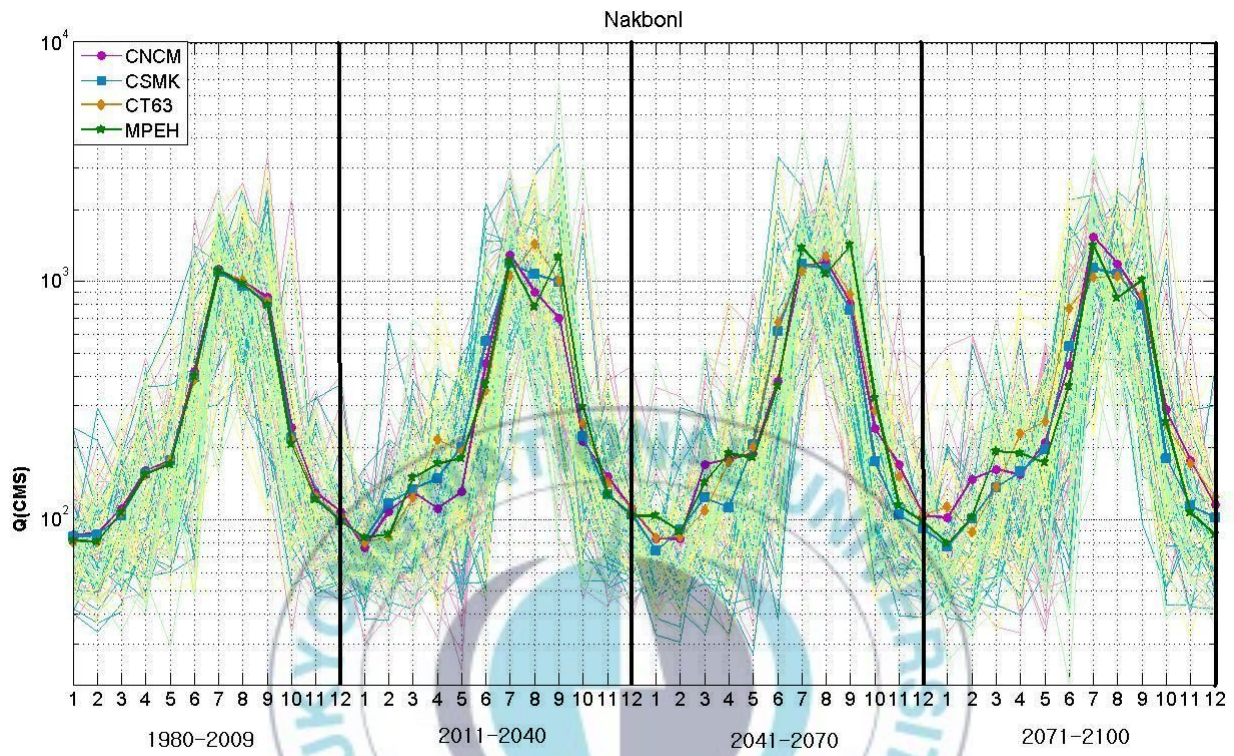
(a) Andong-Dam



(b) Nakdong river mainstream-C



(c) Nakdong river mainstream-H



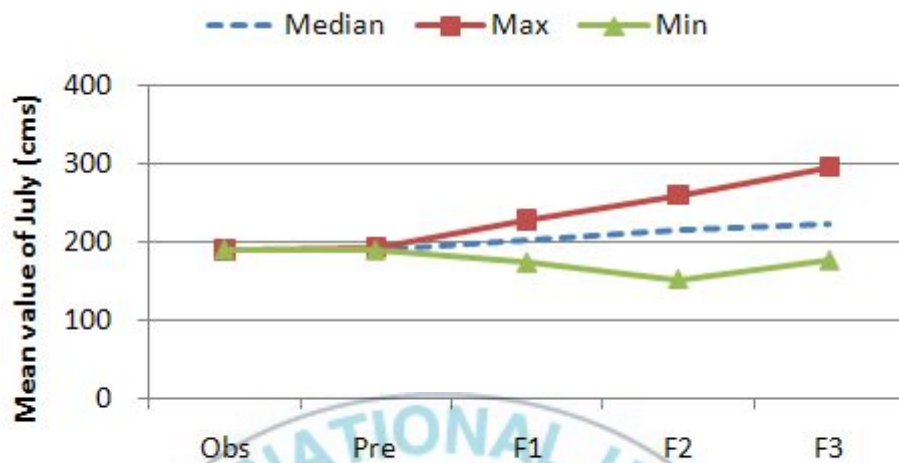
(d) Nakdong river mainstream-I

Fig. 12. Monthly river flow projections.

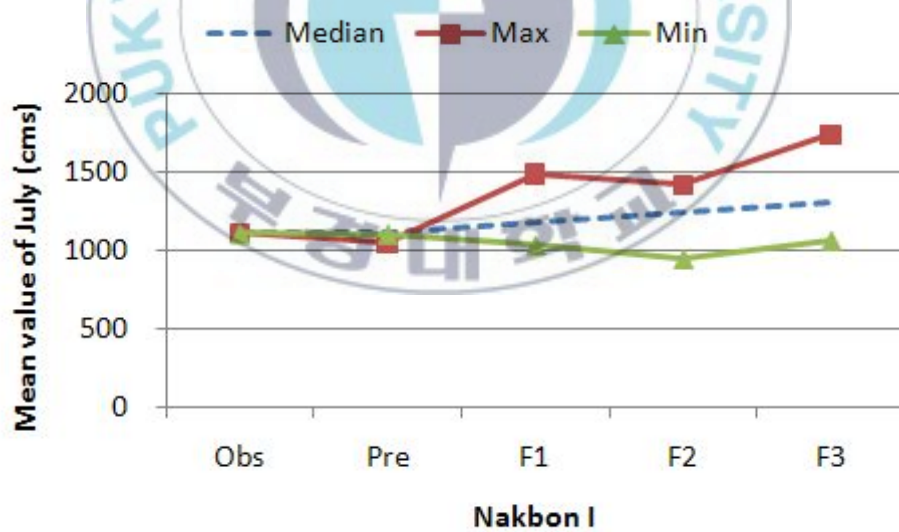
3. 생태수문변화 지표 산정

본 연구에서는 IEHA를 이용하여 기후변화 영향에 따른 유량변화를 통계학적으로 분석하고자 하기 위하여 총 5개의 그룹으로 분류하였다. TANK 모형을 통하여 산정된 1980년에서부터 2009년 사이의 자연유량(Obs)과 같은 시기에 4개의 GCMs로부터 산정된 현재유량(Pre), 4개의 GCMs별 3개의 시나리오별로 산정된 미래 유량을 시기별로 2011~2040년(F1), 2041~2070년(F2), 2071~2100년(F3)로 나누어 낙동강 본류를 중심으로 각각 그룹의 생태수문변화 특성 지표를 산출하였으며 그 중에서도 낙본C와 낙본I 단위유역을 중심으로 분석을 실시하였다.

첫 번째 IEHA statistics group은 월별 평균 일 유량을 나타내는 것으로 Fig. 13~14에 결과 중 일부를 도시하였다. 유량이 많은 시기인 여름철(6월~9월)에서는 유량 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 또한 유량이 작은 시기인 겨울철(12월~3월)에서도 유량 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 미래의 여름철 및 겨울철의 서식 공간 가용성이 증가하는 것을 의미한다.

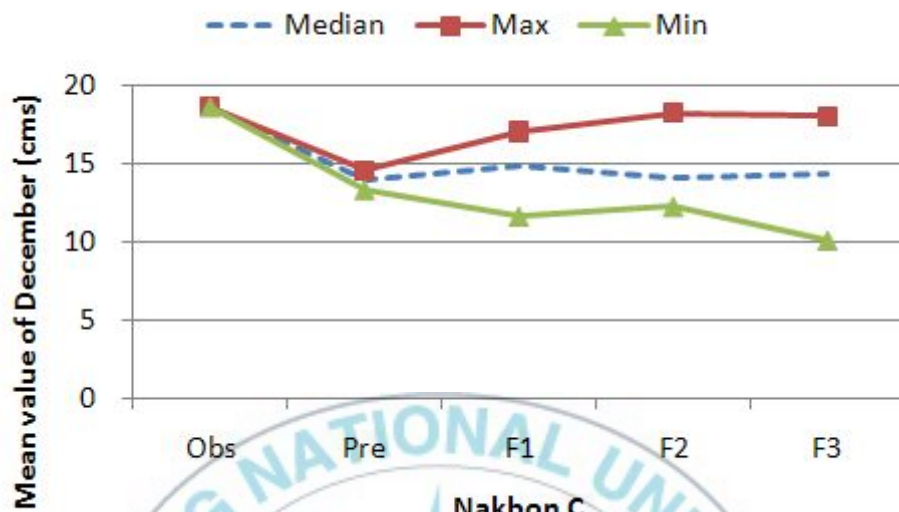


(a) Nakdong river mainstream-C

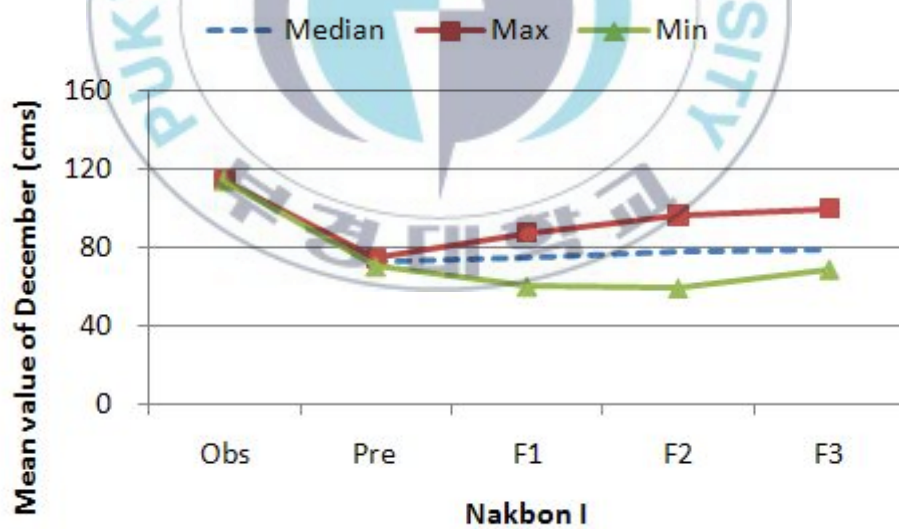


(b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 13 Mean value of July (cms)



(a) Nakdong river mainstream-C

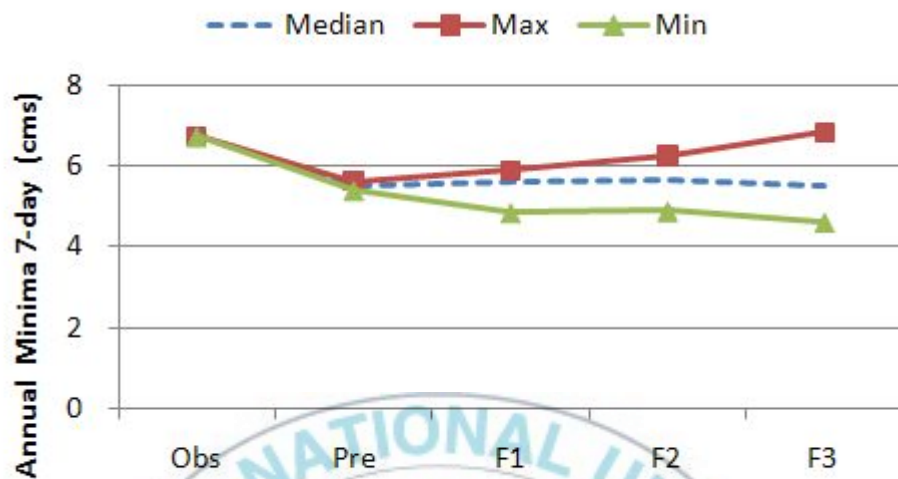


(b) Nakdong river mainstream-I

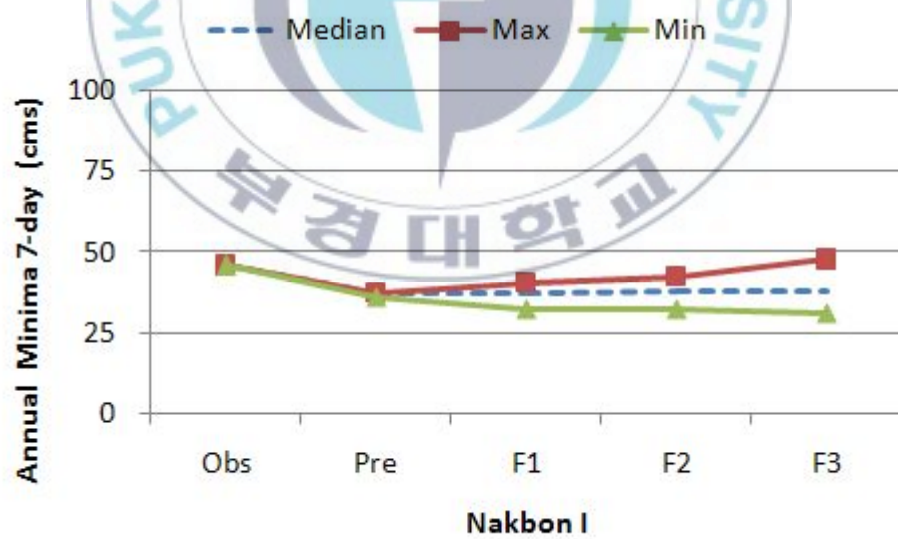
Fig. 14 Mean value of December (cms)

두 번째 IEHA statistics group은 극한 유량의 크기 및 지속시간을 나타내는 것으로 Fig. 15~16에 지속기간 7일을 갖는 일평균 유량의 최대 극한값과 최소 극한값 크기 변화를 도시하였다. 최소 극한 사상의 경우는, 미래로 갈수록 그 크기가 미약하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 미래의 최소 극한 사상 발생으로 인한 수생태계의 스트레스가 미약하게 감소할 것이라는 예측을 할 수 있다. 그리고 최대 극한 사상의 경우는 미래로 갈수록 그 크기 증가추세가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 미래에는 최대 극한 사상의 발생으로 인한 수생태계 스트레스가 증가할 것이라 예측할 수 있다.



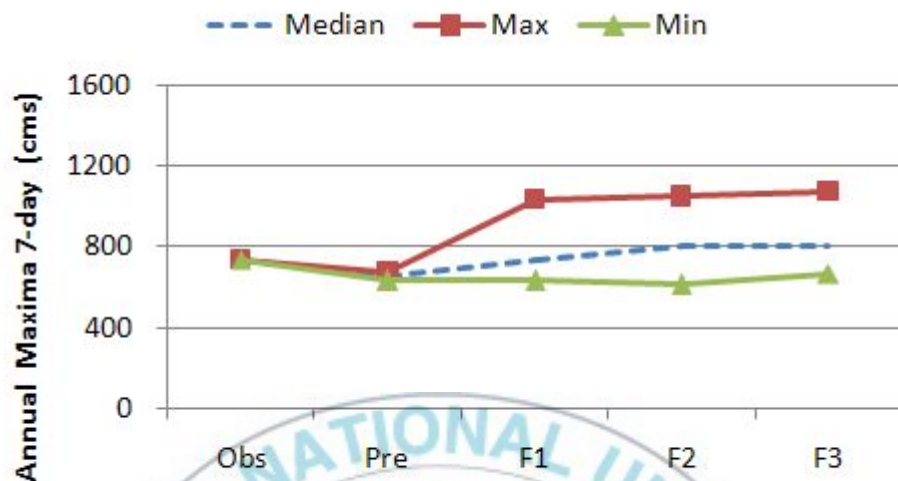


(a) Nakdong river mainstream-C

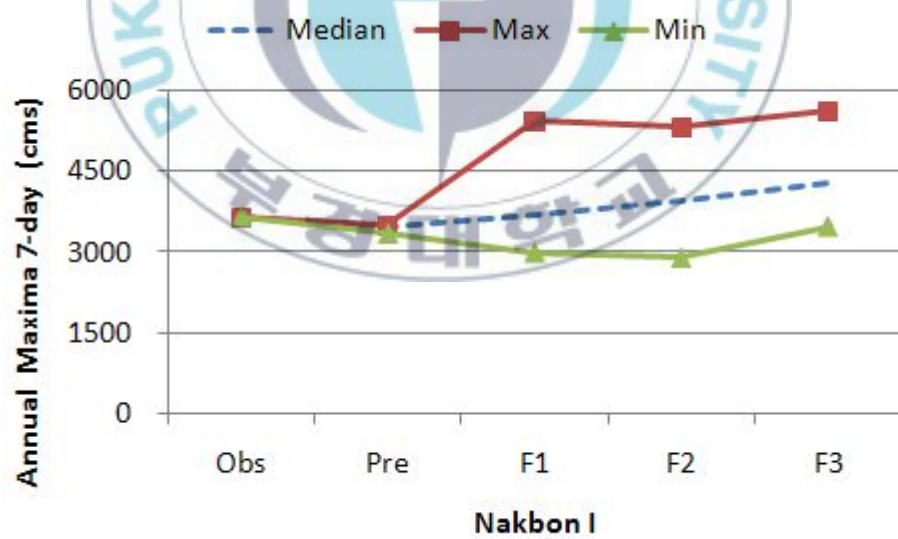


(b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 15 Annual minima 7-day (cms)



(a) Nakdong river mainstream-C

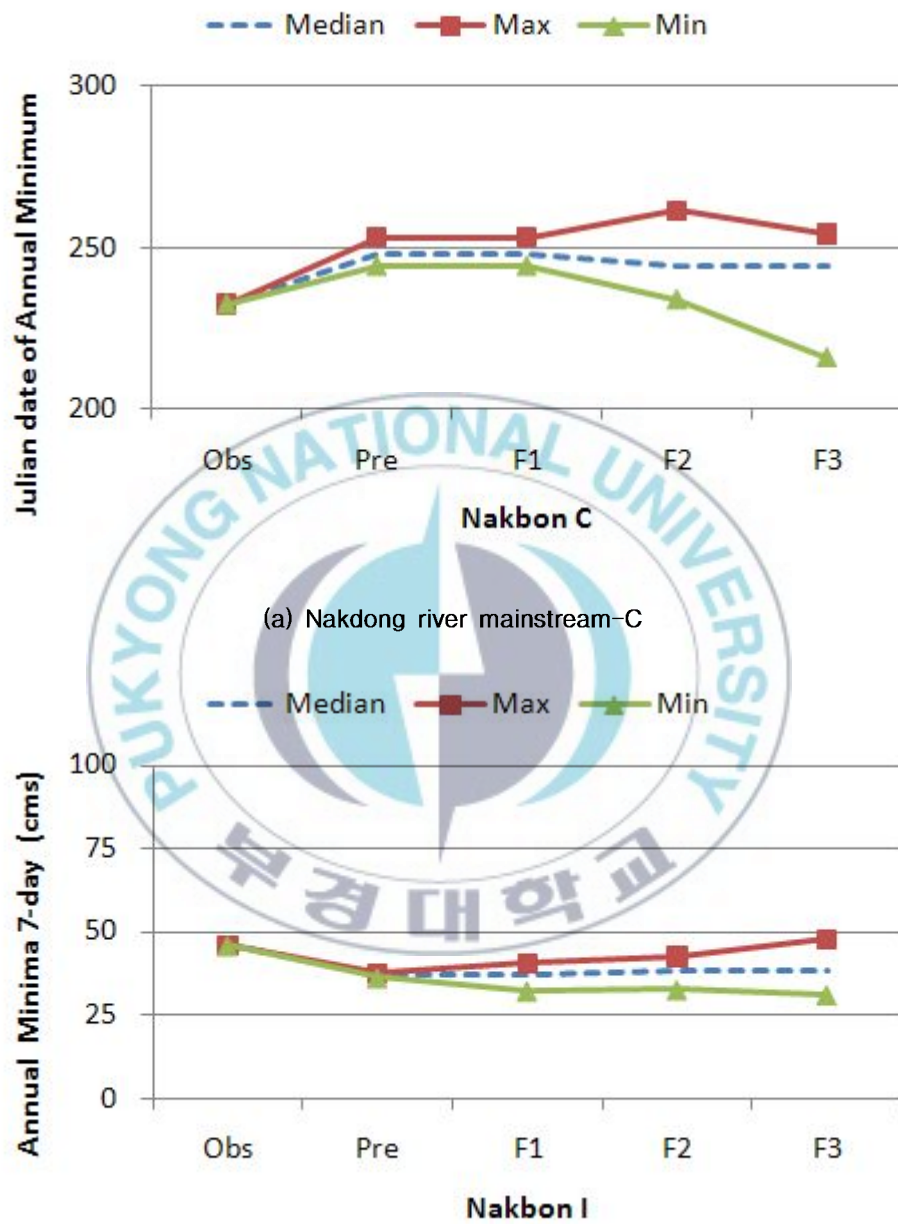


(b) Nakdong river mainstream-I

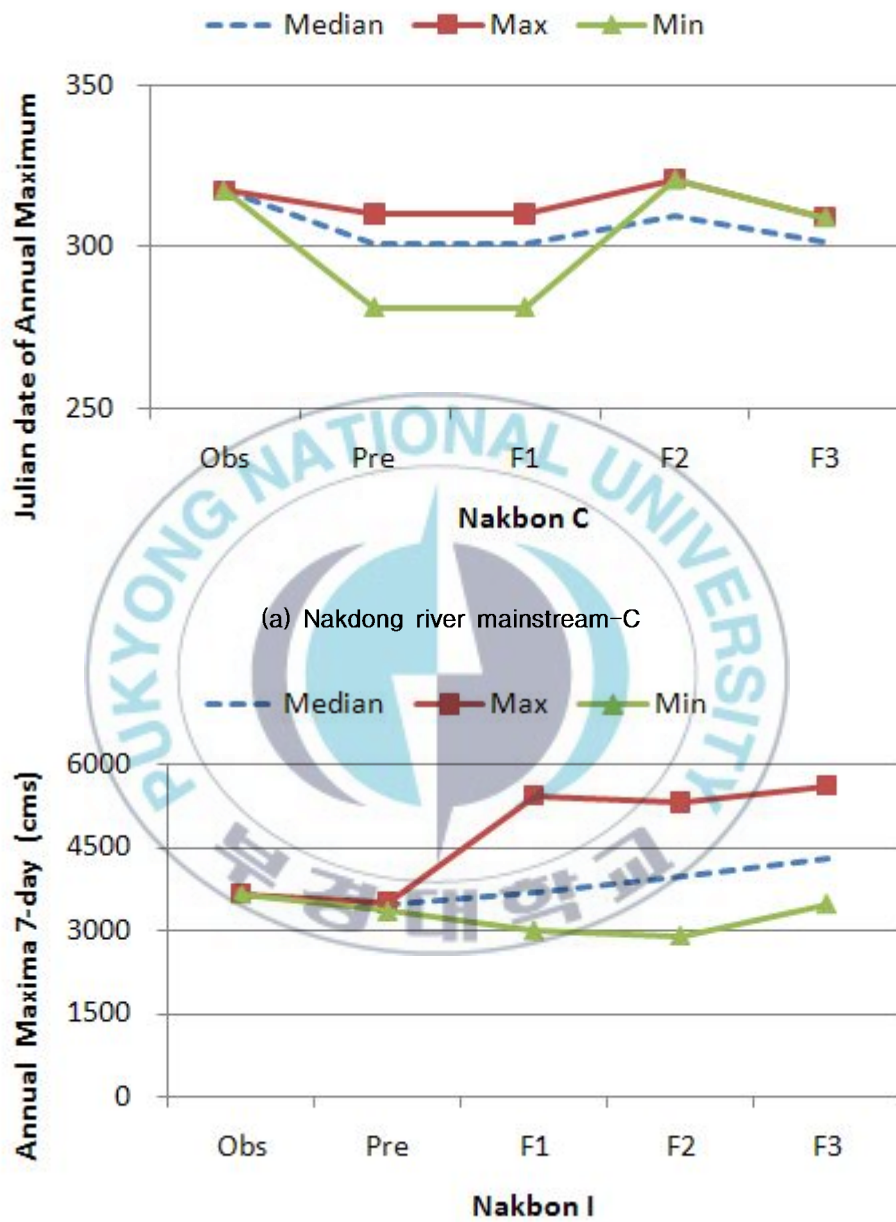
Fig. 16 Annual Maxima 7-day (cms)

다음은 극한 유량 사상의 발생 시기를 나타내는 세 번째 IEHA statistics group으로 연중 최대 및 최소 유량 값이 나타나는 날짜를 율리안 날짜(Julian date)로 표시하며 10월 1일이 1일이 되며, 9월 30일이 365일이 된다. 그 결과 현재의 극한 사상의 발생 시기와 미래 극한 사상의 발생 시기에는 큰 변화가 없었다. 즉, 현재의 수생태계 Life cycle이 미래에도 유사하게 진행될 것으로 보인다. Fig. 17~18에 결과 중 일부를 도시하였다.





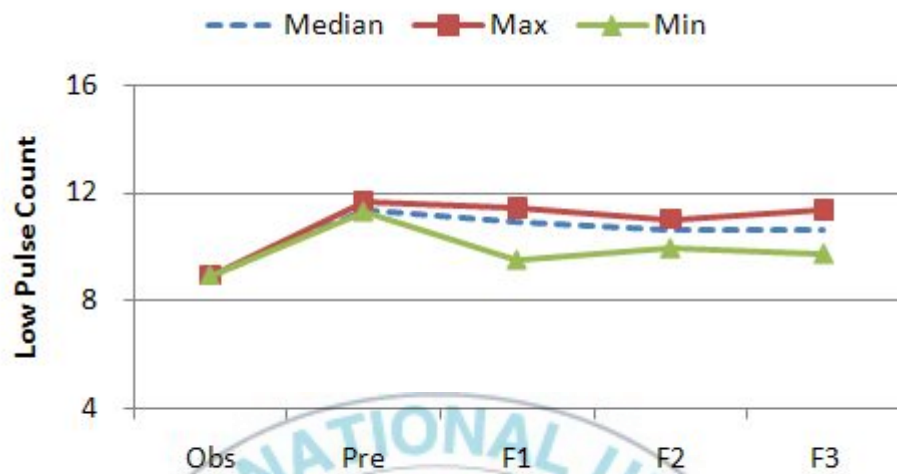
(b) Nakdong river mainstream-I
Fig. 17 Julian date of annual minimum



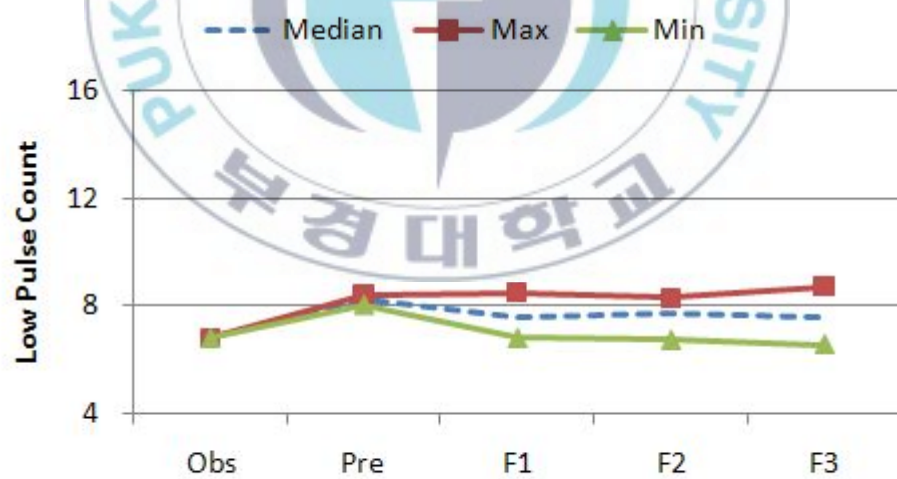
(b) Nakdong river mainstream-I
Fig. 18 Julian date of Annual Maximum

다음은 홍수 및 갈수 사상의 빈도 및 지속시간을 나타내는 IEHA statistics group으로 분석 결과를 Fig. 19~22에 도시하였다. 낙동강 본류 단위유역 전반적으로 홍수 및 갈수 사상 발생 빈도와 지속시간은 미래에 큰 변화가 없을 것으로 보인다. 즉, 홍수 및 갈수 사상의 발생으로 수생태계가 받게 될 스트레스의 빈도나 지속시간은 현재와 유사하다고 볼 수 있겠다.





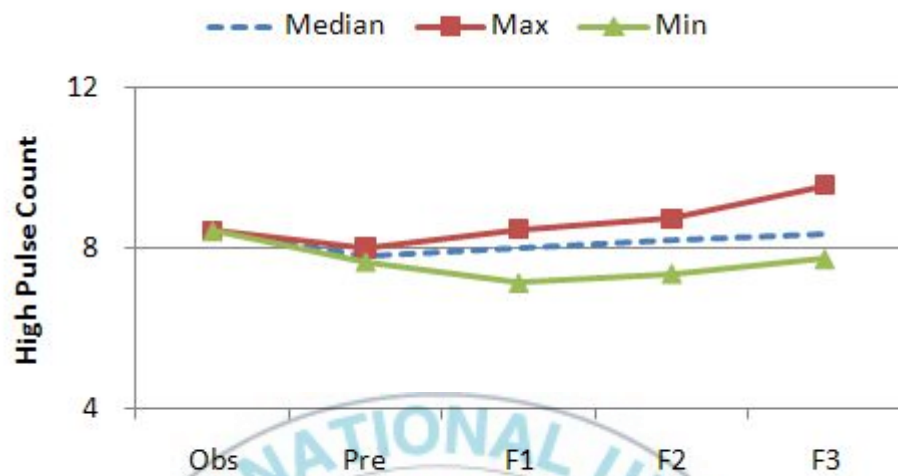
(a) Nakdong river mainstream-C



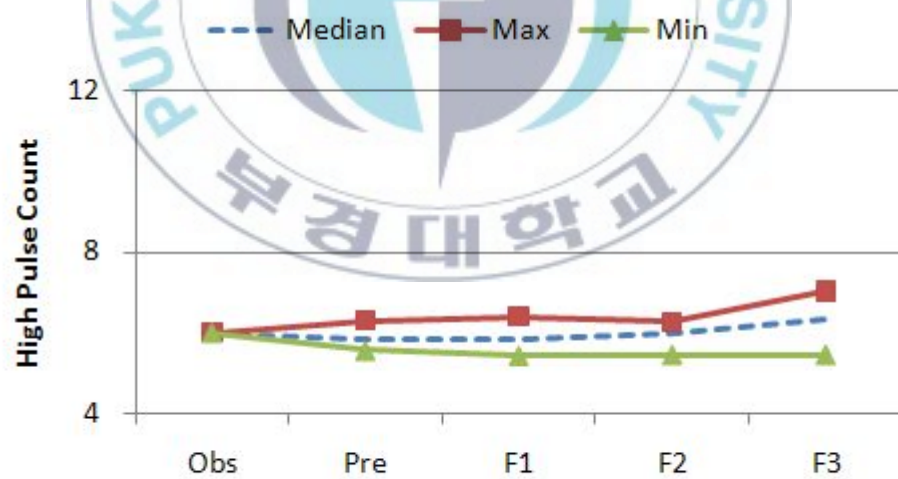
Nakbon I

(b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 19 Low pulse count



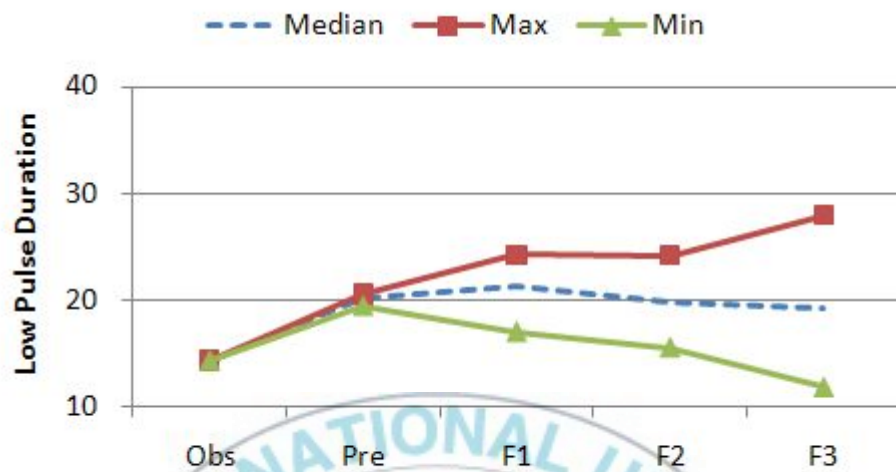
(a) Nakdong river mainstream-C



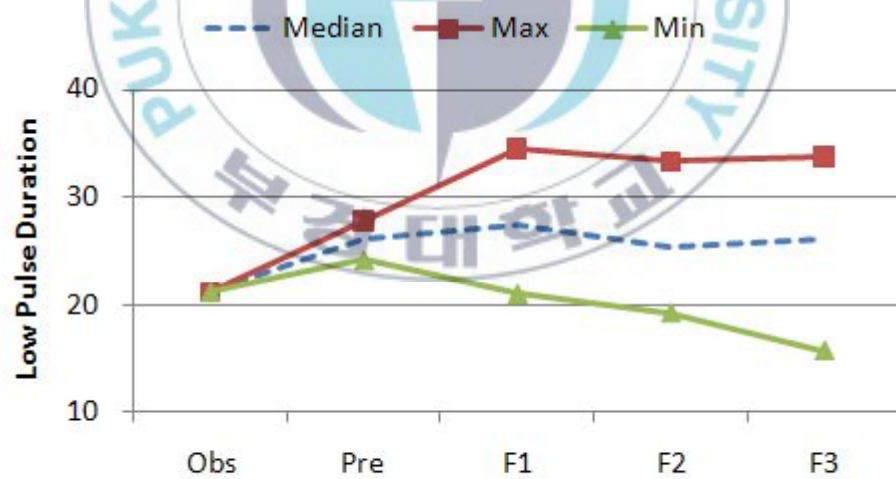
Nakbon I

(b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 20 High pulse count



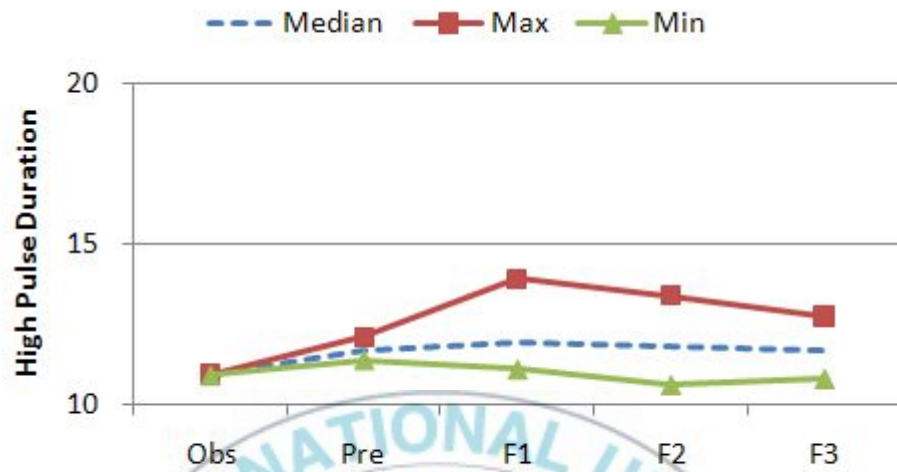
(a) Nakdong river mainstream-C



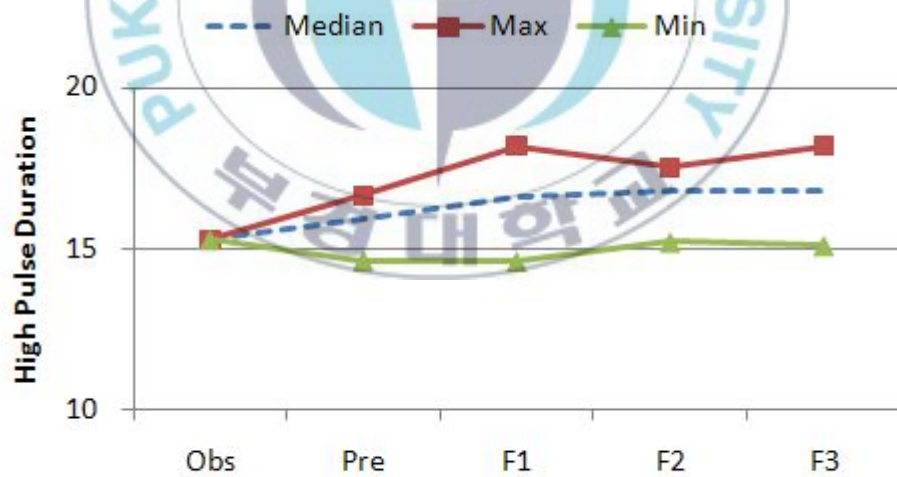
Nakbon I

(b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 21 Low pulse duration



(a) Nakdong river mainstream-C



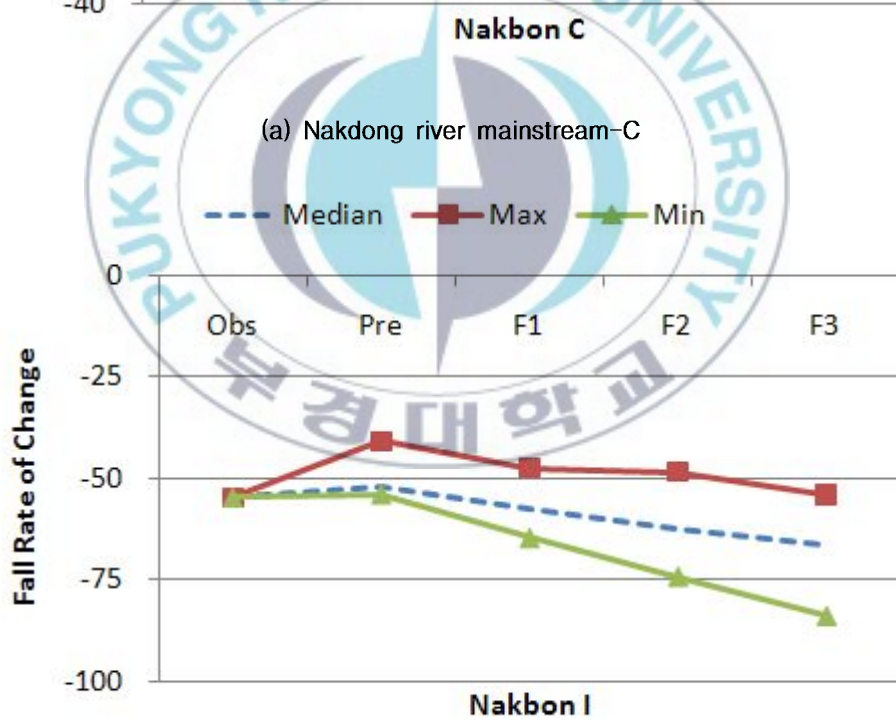
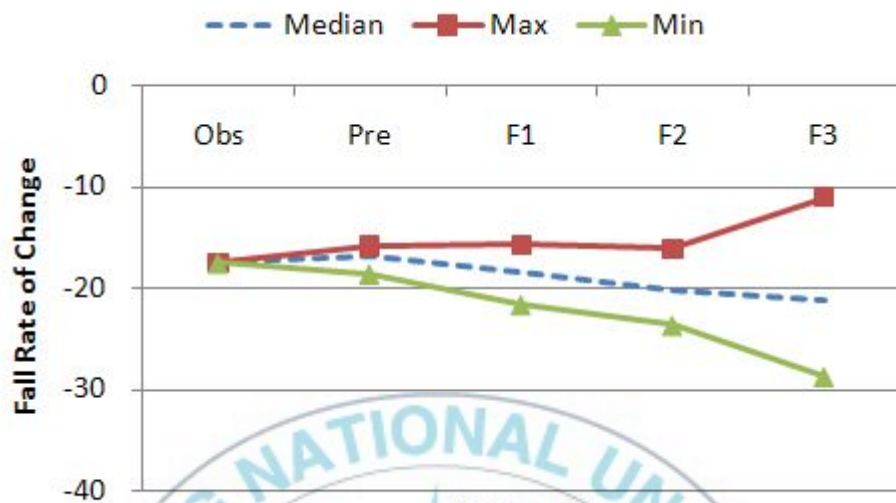
Nakbon I

(b) Nakdong river mainstream-I

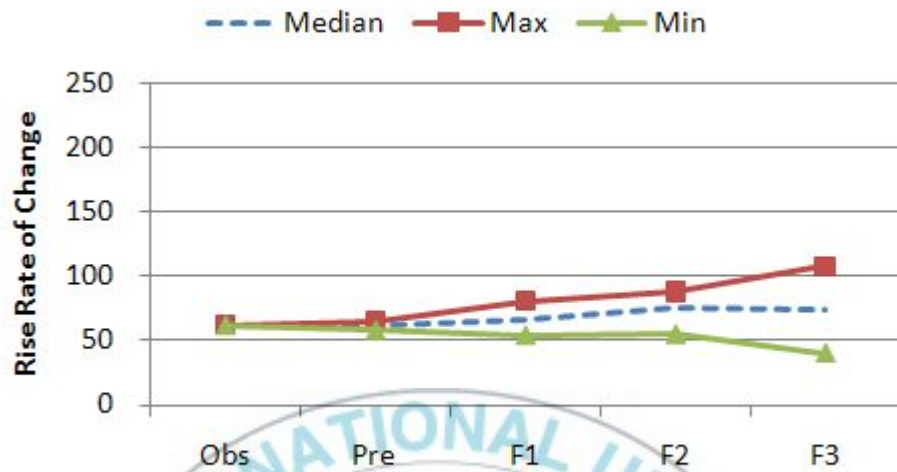
Fig. 22 High pulse duration

마지막 IEHA statistics group은 유량의 일간 변동성을 나타내는 매개변수로 구성되어 있으며, 유량의 급 증가 및 급 감소 변화율로 인한 수생태계 스트레스 및 빈도를 나타낸다. 그 결과, 유량 증가 및 감소의 경우 모두 변동률의 크기가 증가하는 경향을 확인 할 수 있으며, 또한 분류 말단부로 갈수록 증가폭이 큰 것을 알 수 있다. 한편 유량 변동 횟수는 자연유량과 비교하였을 때 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이 결과 중 일부를 Fig. 23~26에 도시하였다.

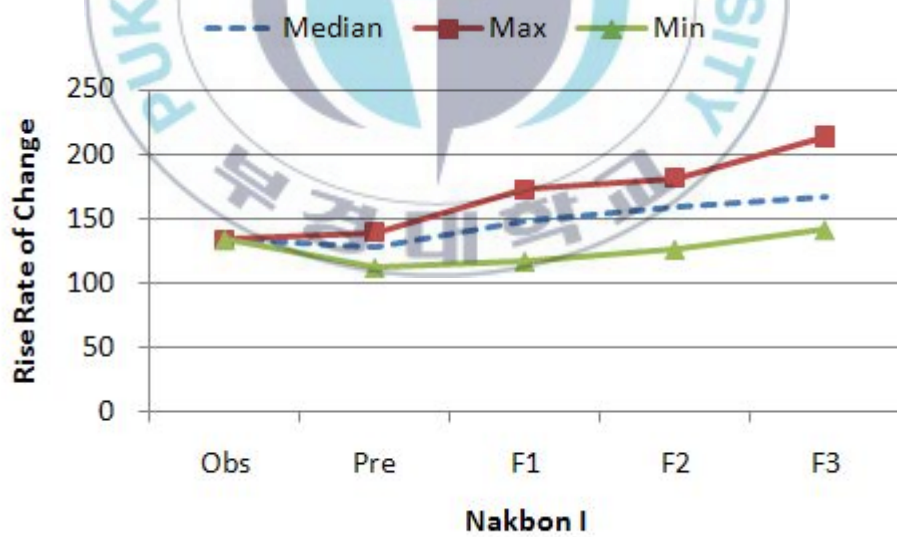




(a) Nakdong river mainstream-C
(b) Nakdong river mainstream-I
Fig. 23 Fall rate of change in conditions

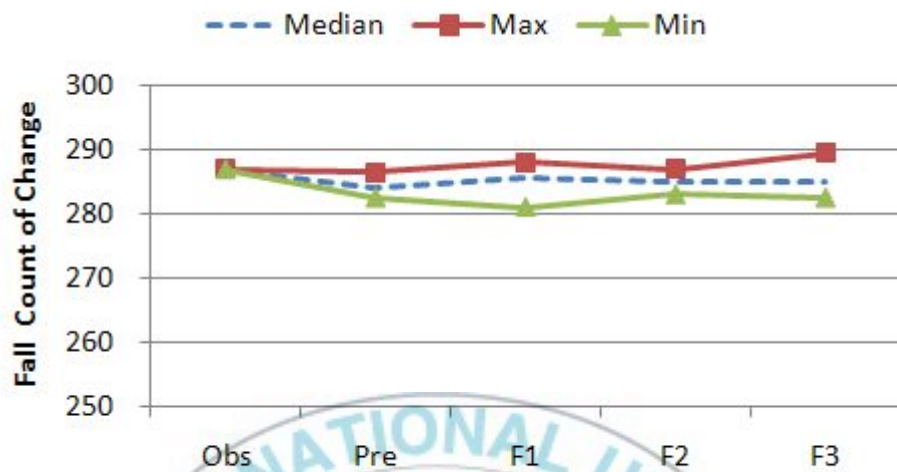


(a) Nakdong river mainstream-C

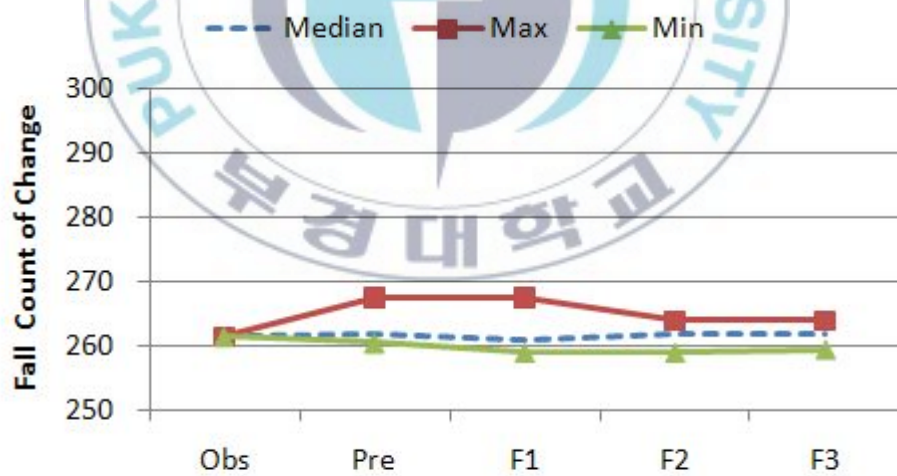


(b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 24 Rise rate of change in conditions



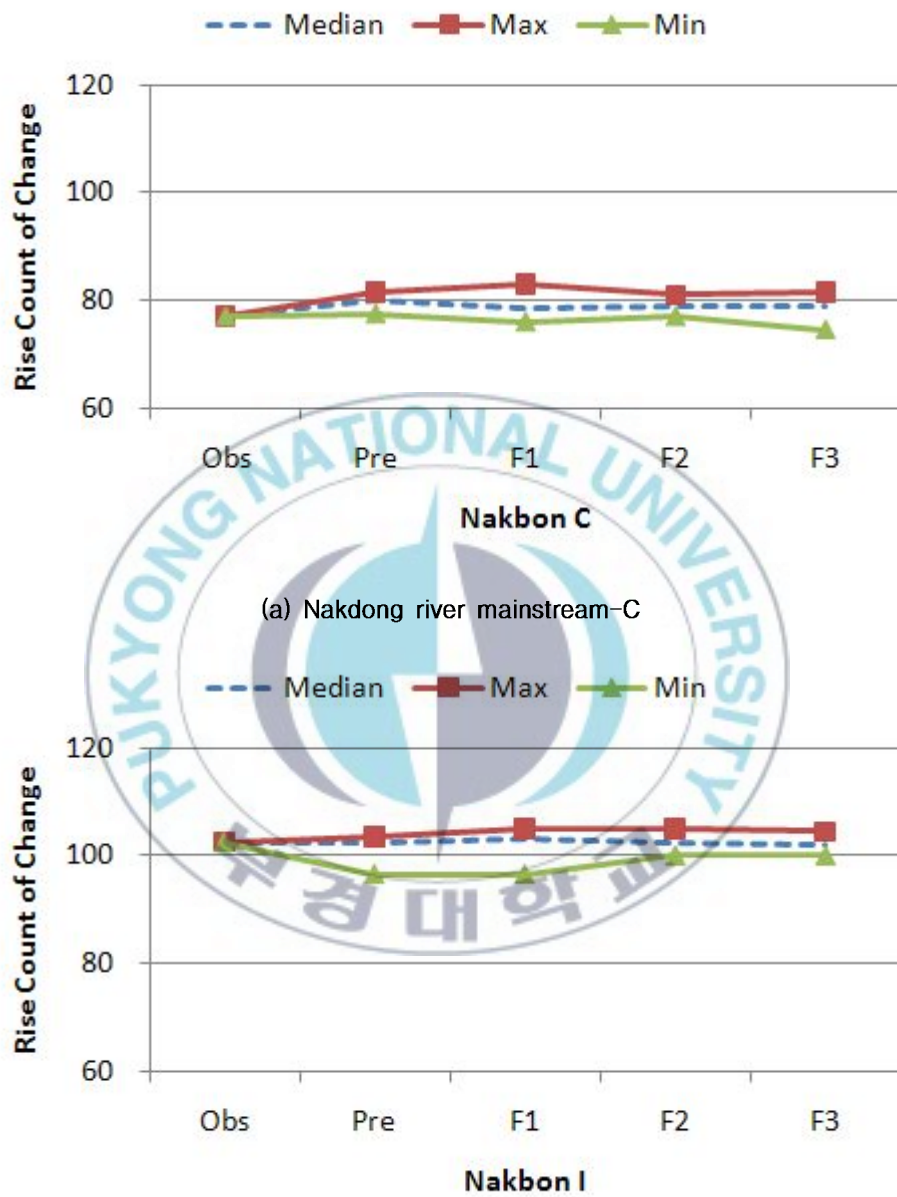
(a) Nakdong river mainstream-C



Nakbon I

b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 25 Fall count of change in conditions



b) Nakdong river mainstream-I

Fig. 26 Rise count of change in conditions

IV. 결론

총 본 연구에서는 개념적인 강우-유출모형인 TANK 모형을 이용하여 한반도 남동쪽에 위치한 낙동강 유역 본류에 대한 기후변화의 영향을 환경유량의 개념을 도입하여 살펴보고자 하였다. 모형 구동을 위해 필요한 미래 기후 시계열은 4개 GCMs(CT63, CNCM, CSMK, MPEH)와 3개 온실가스 배출시나리오(SRES A1B, A2, B2)를 바탕으로, 시간적 공간적 상관성을 현실성 있게 모의하고자 시공간적 규모내림기법에 의해 획득되었다. 강수량과 일평균기온에 대한 미래 기후 시계열은 적용된 전구기후모형 및 시나리오에 따라 현재 상태와 다양한 편차가 존재하며, 그 범위는 2071~2100년 기준으로 연강수량의 경우 현재 대비 +3.55~+33.44%의 변화가 있었으며 일평균기온의 경우 +1.59~+3.58℃의 변화가 있을 것으로 예측되었다.

가장 주목할 만한 모형의 결과로서, 미래 한반도 동남부의 하천 유량은 증가할 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 하지만 적용 시나리오에 따라 2071~20100년 기준으로 연평균유량은 지역적으로 52.8% 증가에서 4.2% 감소까지의 불확실성이 존재하였다. 또한 본 연구에서는 Ritcher et al.(1996)이 제안한 수문학적 특성 지표 개념을 기반으로 우리나라 낙동강 유역을 대상으로 기후변화에 따른 유량 변동 영향을 통계학적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 4개의 GCMs별 3개의 시나리오별 미래 기후 시계열이 반영된 유량을 1980~2009년(Pre), 2011~2040년(F1), 2041년~2070년(F2), 2071~2100년(F3)의 4그룹으로 기간별로 분류하여 자연유량과 비교분석하였다. 그 결과 공통적으로 나타나는 특징은 현재유량이 자연유량보다 다소 작게 산정된 것을 확인할 수 있었다. 특히 이러한 경향은 본류 상류부에서 뚜렷하게 확인

이 되었다.

IEHA는 총 5개의 statistics groups로 분류되어 있으며 총 32개의 매개변수 산정이 요구된다. group 1은 월별 유량 크기를 나타내는 12개의 매개변수로 구성되어 있으며, 수생태계의 서식 공간 가용성을 살펴보기 위한 도구로 사용된다. 본 연구 결과에 따르면, 미래의 월별 유량은 여름철과 겨울철 모두 증가하는 경향이 나타났다. 이는 여름철 및 겨울철의 낙동강 수생태계 서식 공간 가용성이 증가할 것을 의미한다. group 2는 극한 유량의 크기 및 지속 시간 특성을 나타내는 도구로, 지속시간별 극한값의 크기를 나타내는 10개의 매개변수로 구성되어 있다. 그 결과 최소 극한 사상의 크기는 현재보다 미래에 다소 증가하여 수생태계에 스트레스가 감소될 것으로 보이지만, 최대 극한 사상의 크기는 현재보다 증가하여 스트레스가 증가할 것으로 보인다. group 3는 극한 유량의 발생 시기를 울리안 데이트로 나타내는 2개의 매개변수로 구성되어 있으며, 10월 1일을 시작일로 본다. 그 결과 최소 극한 사상과 최대 극한 사상은 그 발생 시기가 현재와 미래가 유사하여 수생태계의 생활 주기 패턴에는 큰 차이가 없을 것으로 보인다. group 4는 홍수 및 갈수 사상의 발생 빈도와 지속시간을 나타내는 4개의 매개변수로 구성되어 있으며 수생태계의 스트레스 빈도와 지속시간을 살펴보기 위한 도구로 사용된다. 그 결과 현재와 미래의 빈도와 지속시간이 유사하게 나타났으며, 홍수 및 갈수 사상의 발생으로 인한 스트레스의 빈도와 지속시간은 현재와 유사할 것으로 보인다. 마지막으로 group 5는 유량의 일간 변동성을 알아보기 위한 4개의 매개변수로 구성되어 있으며 유량의 증가와 감소에 대한 변화율 및 변동 횟수를 나타낸다. 그 결과 미래의 유량 변동 영향으로 유량의 증가율 및 감소율 모두 그 크기가 증가할 것으로 나타났으며, 분류 말단부로 갈수록 그 경향이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 변동횟수를 나타내는 매개변수는 자연유량과 현재유량 및 미래유량 모두 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

즉 미래의 수생태계는 유량 변동의 발생 횟수는 현재와 유사하지만 급 변화율의 증가로 수생태계에 스트레스도 증가할 것으로 보인다. 마지막으로 미래 하천유량은 미래로 갈수록 적용 시나리오에 따른 편차가 커지고 있으므로 이러한 불확실성을 기후변화에 따른 물 환경 적응 정책에 반드시 고려해야 하며, 앞서 언급된 낙동강 본류 상단부의 미래유량 과소 산정에 대한 원인을 분석하고 해결하는 추가적인 연구가 이루어 져야 할 것이다.



참고문헌

- California Climate Change Center. (2009). "Using future climate projections to support water resources decision making in California." California Department of Water Resources.
- Choi, D., Jun, H., Shin, H., Yoon, Y. and Kim, S. (2010). "The effect of climate change on Byeongseong stream's water quantity and quality." Desalination and Water Treatment, pp. 105-112.
- Climate Impacts Groups, M. McGuire Elsner, J. Littell, and L. Whitely Binder (eds) (2009). "The Washington Climate Change Impacts Assessment." Center for Science in the Earth System, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Oceans, University of Washington, Seattle, Washington.
- Giorgi, F. and Mearns. L. (1991). "Approaches to the simulation of regional climate change: a review." Reviews of Geophysics, pp. 191-216.
- Githui, F., Gitau, W., Mutua, F. and Bauwens, W. (2008) "Climate change impact on SWAT simulated stream flow in western Kenya." International Journal of Climatology. Wiley interScience, DOI. 10.1002.

Gosain, A.K., Rao, S. and Basuray, D. (2006). "Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins." Current Science Association, Bangalore, INDE, pp. 346-353.

Han, S., Shin, H., and Kim, S. (2009). "Temporal downscal for hourly rainfall time series using correlated Neyman-Scott rectangular pulse point rainfall model." KSCE Journal of Civil Engineering, pp. 463-469.

Hanratty, M. and Stefan, H. (1998). "Simulating climate change effects in a Minnesota agricultural watershed." Journal of Environmental Quality, pp. 1524-1532.

IPCC (2007). "Climate change 2007: Physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press, UK

Jha, M., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Giorgi, F. and Gu, R. (2006). "Climate changes sensitivity assessment on upper Mississippi River basin stream flows using SWAT." Journal of the American Water Resources Association, American Water Resources Association, pp. 997-1015

Keddy, P., Lee H., and Wisheu, I. (1993). " Choosing indicators of ecosystem integrity: Wet lands as a model system." pp. 61-79 in Ecological integrity and the management of ecosystems.

Najjar, R. (1999). "The Water Balance of the Susquehanna River Basin and Its Response to Climate Change", Journal of Hydrology, pp. 7-19.

Ritcher, B. (1993). "Altered hydrologic regimes and implications for bottomland hardwoods along the Roanoke River." pp. 21-22 in Proceedings of the Roanoke River wildlife management workshop, August 10-12. U.S. Fish and Wildlife Service, Raleigh, North Carolina.

Ritcher, B., Baumgartner, J. and Brun, D. (1996). "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems." Conservation Biology, pp. 1163-1174.

Stonefelt, M., Fontaine, T., Hotchkiss, R. (2000). "Impacts of climate change on water yield in the upper wind river basin." Journal of American Water Resources Association, pp. 321-336.

Taylor, K. E.(2001) "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram." Journal of Geophysical Research, pp. 7183-7192.

Varanou, E., Ckouvatsou, E. and Mimikou, M. (2002). "Quantity and quality intergrated catchment modeling under climatic change with use of soil and water assessment tool model." Journal of Hydrology. ENG. pp. 228-244.

Wilby, R. and Wigley, T. (1997). "Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations." Progress in Physical Geography, pp. 530-548.

김문성, 고익환, 김상단. (2009). "CGCM의 미래 기후 정보를 이용한 기후 변화가 낙동강 유역 유황에 미치는 영향 분석." 수질보전 물환경학회지, pp. 863-871.

김재철, 김상단. (2007). "오염총량관리 유량측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석." 수질보전 한국물환경학회지, pp. 332-338.

최대규, 김문성, 김남원, 김상단. (2009). "CGCM 미래기후정보를 이용한 기후변화가 병성천 유역 수문 및 수질반응에 미치는 영향분석." 한국수자원학회논문집, pp. 921-931.

최대규, 이진희, 조덕준, 김상단. (2010). "우리나라 기후 재현성을 중심으로 한 GCMs 평가." 수질보전 한국물환경학회지, pp. 482-490.

한수희, 신현석, 김상단. (2007). "낙동강 유역관리를 위한 부하량 유황곡선

의 적용 가능성.” 수질보전 한국물환경학회지, pp. 620-627.

한수희, 유가영, 김상단. (2009). “식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향.” 수질보전 한국물환경학회지, pp. 375-385.

