

기후변화와 사회경제요인 변화에 따른 4대강의 물부족 피해 추정*

이 윤**

Climate Change and Socioeconomic Change Effects
on the Four Major Rivers: An Economic Appraisal

Yoon Lee**

한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

제출 : 2012년 6월 22일 수정 : 2012년 11월 6일 승인 : 2012년 12월 11일

국문 요약

본 논문은 한반도의 기후변화 영향이 수자원에 미치는 영향을 물부족과 가뭄을 중심으로 분석하였고 대상지역은 4대 하천이 중심이 되었다. 물론 기후변화의 영향은 강수량의 증가로 인한 홍수피해의 증가와 온도 상승 및 강수량의 감소로 인한 가뭄의 증가로 구분되어 설명해야 한다. 하지만 본 논문에서는 자료의 한계와 홍수피해를 산정하기 위한 우리나라의 침수피해모형이 존재하지 않기 때문에 기후변화의 영향이 가뭄피해에 국한되어 연구의 한계점을 가지고 있다. 또한 기후변화가 수자원에 영향을 주는 것을 확률적으로 분석할 필요성이 있으나 본 논문에서는 gamma function을 이용하여 실패확률 5% 이내에서 추산하였기 때문에 다양한 확률모형으로 연구의 분석 방법을 확장할 수 있다. 정제된 분석을 위해서 할인율은 단기, 중기, 장기로 구분하여 각각 2.76%, 1.45%, 0.62%로 가정하여 분석하였다. 전체적인 한강수계를 제외하고는 단기에 피해비용이 발생하지 않는 것으로 나타난다. 한강의 경우는 생활용수의 급격한 증가로 인하여 물 수요가 증가하는 것이 초기에 물 부족 현상으로 인하여 지속적인 피해를 발생시키는 것으로 나타났다.

【주제어】 기후변화, 수자원 영향, 경제적 비용, RESCON 모형

Abstract

Economic analysis of climate change in the Korean peninsula has been conducted in the four major river basins. Although climate change impacts can vary in many terms, typically flood damages from the increase of precipitation and drought from rainless, this research only focused on effects of altering precipitation due to the lack of information and depth-damage functional form in Korea. This research also considered a gamma function of 5 % failure to deal with uncertainty issues in water resources. For the detailed analysis, time different discount rates have been used for short, mid, and long period, viz., 2.76%, 1.45%, and 0.62%, respectively. Over all effects of climate change on four major river

* 본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 수탁과제 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석 II」의 일환으로 수행된 것임.

** E-mail : ylee@kei.re.kr

basins can be summarized as no short period damage except the Han river basin. In the Han river basin, rapid increases of residential water use lead short term water shortage.

▣ **Keywords** ▣ Climate Change, Water Resources, Economic Damage, RESCON

I. 서론

하천은 인류의 문명이 발생하고 농업사회의 근간을 이루었던 중요한 자원이지만 불과 50년 전만 하더라도 하천이나 물이 자원으로 인식되지는 않았다. 통상적으로 수자원이라고 하면 지구상에 있는 자연수 중에서 인간이 자원으로 사용할 수 있는 물을 의미하며 여기에는 지하수와 지표수가 모두 포함된다. 하지만 실제로 인간이 사용할 수 있는 수자원은 지구의 물 중에서 불과 0.0075%에 불과하여 매우 희소한 자원이라고 할 수 있다. 또한 인류 문명이 발달함에 따라서 물의 사용이 급격하게 증가하고 있고 산업화 이후에는 자연적으로 생산되는 물보다 그 소비량이 커졌기 때문에 물은 재생불가능한 자원으로 인식되고 있다. 수자원 사용과 활용의 문제점이 발생하는 것은 약 60억의 인구가 이와 같은 부존하고 희소한 자원을 사용하여 생활을 영위해가고 있으나 물의 특성상 지역적인 분포와 계절적인 영향에 의해서 균등한 공급 또한 이루어지지 않는 경향이 강하기 때문이다. 이를 해결하기 위해서 인류는 댐 등의 인공구조물을 통하여 물을 모아서 계절적인 요인을 상쇄하려는 노력을 지속적으로 해왔고 관로 등을 이용하여 지역적인 제약 요인을 해결해왔다.

그러나 반복적인 화석연료 사용이 급증하고 있고 지구의 온도가 지속적으로 상승하는 기후변화 요인으로 인하여, 물 순환 과정에서 우기에 지표로 내려오는 물이 지표수가 되고 지하수로 저장되고 다시 기화하는 순환 고리가 파괴되고 있는 실정이다. 예를 들어서 호주의 퀸즈랜드 주 경우는 기후변화에 따른 기상이변으로 인하여 1999년 이후 지속적인 가뭄이 발생하여 기존 댐 수위율이 18%로 저하되어 수자원이 고갈될 위기에 직면하고 있고, 중국의 운남성의 경우는 100년 만의 대가뭄으로 인하여 식수고갈로 인한 물과의 전쟁을 경험하고 있다. 한편 중국의 산시성의 경우는 계속되는 폭우로 인하여 10여 년 만의 최악의 물난리를 겪고 있고, 독일과 폴란드 사이를 흐르는 나이세 강이 범람하여 츠고르첼레크와 괴를리치 시내의 상당 부분이 침수되고 재산피해가 급증하고 있는 실정이다.

이처럼 기후변화가 수자원에 미치는 영향은 극대 가뭄과 극대 강우로 나타날 수 있는데 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서에 따르면 기후 시스템의 온난화로 인해 기온이 매년 약 0.74°C 씩 증가하여 이러한 현상을 증가시킬 수 있다고 한다. 우리나라의 경우도 예외는 아닐 것으로 보고 있어 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 다각도로 살펴볼 필요성이 증대되고 있는 것이 현실이다. 하지만 Stern 보고서에서는 기후변화에 따른 수자원의 영향을 정성적으로만 분석하고 있어 아직까지 정량적 분석을 통한 기후변화에 따른 수자원 전반의 피해 비용 산정 등의 경제학적 분석이 이루어지지 않고 있는 실정이다. Stern 보고서가 정성적으로 분석한 기후변화에 따른 수자원의 경제적 피해를 살펴보면, 지구의 기온이 화석연료의 지속적인 사용으로 인하여 상승한다고 가정할 때 우선 약 1°C 가량 상승할 때 산들의 만년설이 사라질 것으로 예상하고 있고, 2°C 가량 상승할 때는 천만 이상의 인구가 물 부족에 시달릴 것으로 예측되며 지중해와 남부 아프리카 지역에서는 30% 이상의 물 유출량이 감소할 것으로 보고 있다. 또한 5°C 가량 상승한다고 가정하면 런던과 상하이뿐만 아니라 많은 해안 도시들이 해수면 상승으로 사라질 것으로 분석하고 있다(Stern, 2006). 국내의 경우 우리나라 전 해안에 대한 평균 후퇴율은 38cm 해수면 상승은 43.7%로 나타났다(전성우 외, 2009). 두 연구들은 모두 기후변화에 의한 수자원 혹은 해수면의 변화를 분석하는 중요한 연구이나 이에 따른 피해가 얼마나 될지에 대한 정량적인 분석을 포함하고 있지 않고 아직까지 국내외에 소개된 논문이나 연구보고서들 중에서 기후변화에 따른 수자원분야의 경제적 피해 규모가 산정된 연구는 존재하지 않는다.

하지만 유사한 연구 중에는 수자원의 가치를 평가한 연구나 하천 유역과 다목적 댐 등을 평가한 연구들은 다수 존재한다. 우선 기후변화에 따른 수자원 분야의 경제적 영향을 분석하기 위해서는 기후변화 모형이 근간이 되는 것은 당연하고 수자원을 경제학적으로 변환시키는 노력이 동반되어야 한다. 대표적인 사례로는 세계은행의 보고서에서 언급하고 있듯이 하천의 유입수에 따른 이용 가능한 수량에 대한 관계를 Gamma 분포를 이용하여 분석하고 있다(Palmieri et al., 2003). 이 모형은 하천의 유입수가 변화할 때 이용 가능한 물량을 도출하고 물 가격에 따라 물 관리 주체가 최종적으로 얻을 수 있는 화폐적 가치를 환산하는 방법으로 저수용량이 지속적으로 감소할 경우 최적의 저수용량 확보 방법으로 사용되었다. 이 모형은 다목적 댐 설계에 있어 저수용량이 정해지고 시간이 경과함에 따라 저수용량이 변화가 있을 경우에 주로 사용될 수 있다. 하지만 홍수나 수력발전 등이 부가적인 편익을 포함하지 않은 한계를 가지고 있다.

이에 홍수조절 능력과 유역관리 모형을 혼합한 통합적 관리 모형을 Pattanapanchai(2005)가 개발하여 중국의 양쯔 강 유역과 산세 댐(Three Gorges Dam)을 중심으로 분석하여 그 경제적 가치를 약 1,200억 달러로 추산하였다. 또한 인도네시아의 우노기리 댐(Wonogiri Dam)의 경우는 약 2,570억 달러로 그 가치를 추산하였다. 하지만 이모형은 하천에 다목적 댐이 여러 개가 동시에 존재하는 경우는 설명하지 못하는 한계를 가지고 있다. Kawashima(2007)은 긴 하천에 여러 개의 댐들이 존재할 경우 하천 본류 구간의 가치를 다목적 댐들의 가치의 합으로 구하는 방법론을 World Bank의 RESCON 방법론에 근간을 두어 개발하였다. 이를 통해서 스리랑카에 있는 마하웰리(Mahaweli) 강의 가치를 60억 달러로 추산하였다. 수자원의 경제적 가치를 구하기 위한 기본 모형으로 γ 분포를 가정하여 유입된 물의 양을 부피로 환산하여 사용 가능한 물량을 나타내는 Gloud- γ function이 사용되었다. 그러나 스리랑카의 수자원은 기후변화에 민감하게 반응할 수 있고 사용된 모형에서 하천의 유입량을 고정으로 하여 분석했기 때문에 미래 기후변화에 대한 적응력이 떨어지는 것으로 보인다.

기후변화가 수자원에 영향을 주는 것 중에 증발산량의 변화에 관한 연구로는 Payne et al.(2004)이 있으며 이 연구에서는 기후변화에 따라서 콜로라도 강의 글렌 캐년 댐(Glen Canyon Dam)의 수력발전 부분에서의 영향을 분석하였다. 또한 Conway and Hulme(1996)에서는 평균기온이 1°C 상승하면 저수지나 호소에서 4% 정도의 증발산량이 증가하는 것으로 보고되고 있어 지속적인 기후변화로 인하여 평균기온이 상승하게 되면 하천이나 호소의 물 양이 점진적으로 감소할 것으로 판단하였다. 하지만 위의 연구는 기후변화의 영향이 수자원이나 하천에 미치는 피해를 공학적인 접근으로 분석한 한계를 가지고 있다. 또한 국내 연구는 아직까지 SRES A2 시나리오의 GCM 결과를 바탕으로 공간적 해상도를 다운스케일하여 국내 하천 및 유역의 기후변화 영향을 분석하는 수준에 있어, 아직까지 수자원과 경제학이라는 두 분야에서 기후변화의 영향을 정량적으로 다룬 연구는 존재하지 않는다.

따라서 본 연구의 목적은 기후변화가 국내 수자원에 미치는 영향을 경제학적으로 분석하고 기후변화 적응에 능동적으로 대처한다는 관점에서, 기후변화에 따른 강수량 변화가 우리나라의 4대 하천의 수자원 가용량에 미치는 변화를 분석하고, 미래 환경 변화에 따른 물 수요 변화를 고려하여 기후변화에 따른 우리나라 4대 하천의 피해비용을 산정하는 데 있다.

본 연구에서는 아래와 같이 크게 세 가지의 세부내용을 포함하고 있다. 첫째, 기후변

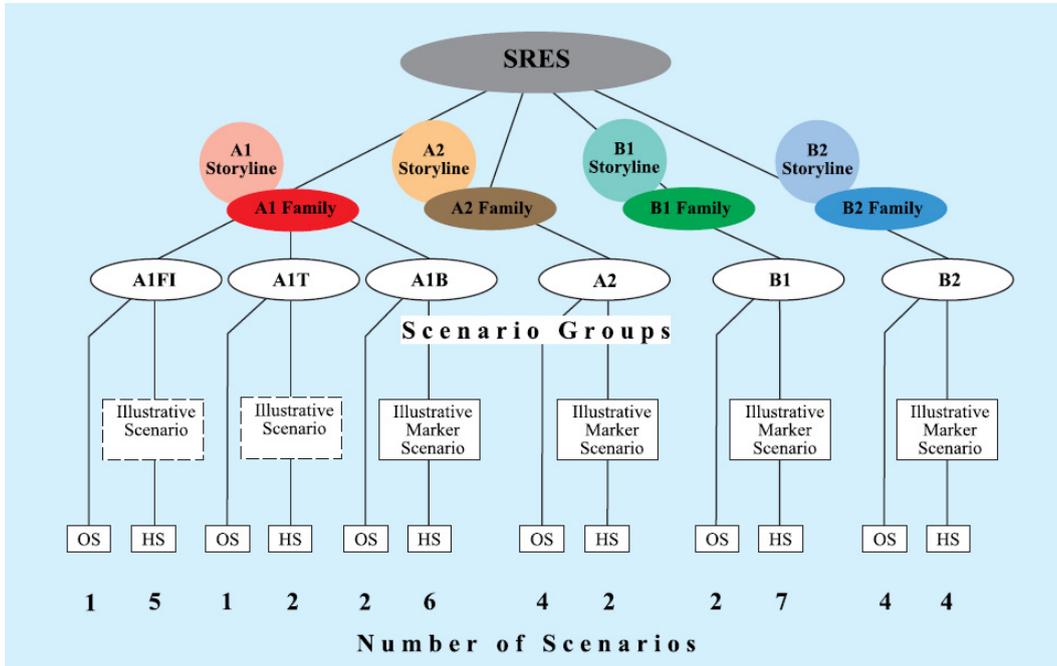
화 시뮬레이션 모형을 통해서 얻어진 영향평가 자료를 바탕으로 기후변화와 수자원 간의 경제적 연관성을 분석하기에 적합한 모형을 제시하고 이는 기존 수자원의 경제적 분석의 문헌을 중심으로 한다. 둘째, 우리나라 실정에 알맞은 계량분석 모형을 설정하여 2100년까지의 기후변화 시나리오를 바탕으로 수자원 분야의 기후변화에 따른 피해 비용을 산정한다. 마지막으로, 도출된 시나리오를 바탕으로 미래 환경의 변화에 대응하는 관점에서 수자원 분야의 개선방향과 대응정책을 도출한다. 본 연구에서 대상으로 하는 수자원 분야는 우리나라의 4대 하천, 즉 금강, 영산강, 낙동강, 한강을 중심으로 하천의 수자원 이용량을 산정하여 기후변화에 따른 증발산량의 변화와 강우량의 변화에 따른 지속적인 이용 가능량을 산정하는 것을 근간으로 한다. 이를 위해서 II장에서는 A2 기후변화 시나리오에 의해서 도출된 강우 자료를 설명하고, III장에서는 기후변화 시나리오 A2에 의해서 도출된 강우량과 증발산량의 변화를 모형에 맞게 정리하고 설명한다. 또한 4대 하천의 수자원 이용량을 정리하여 미래 기후변화 시나리오와의 차이를 설명한다. IV장에서는 실증모형을 바탕으로 우리나라의 기후변화에 따른 수자원 분야의 경제학적 피해 규모를 산정한다. 마지막으로 V장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 실증분석 모형의 한계에 대하여 논의한다.

II. 자료의 설명

본 연구는 2100년까지 이산화탄소 배출량을 근거로 한 기후변화 시나리오에 기반을 두고 있다. 사용된 시나리오는 IPCC AR4에서 제시하고 있는 A2 시나리오로서 지속적으로 인구가 증가할 것과 지역 단위의 경제활동이 활성화될 것이라는 기본 가정을 채택하고 있다. 구체적으로 A2 시나리오는 이질적인 세상을 전제로 하고 있으며 사회가 회복능력을 가지고 있고 지역 고유 특색을 보존한다는 것을 전제로 하고 있다. 전 세계 인구는 아주 천천히 수렴하여 결과적으로는 지속적인 인구 증가를 가정하고 있다. 이는 물 수요를 파악하는 데 같은 조건으로 활용되어 지속적으로 물 수요가 인구 증가로 인하여 증가할 것이라는 기본 가정을 만든다. 하지만 우리나라의 경우 이러한 지속적인 인구증가가 올바른 가정인지는 고려해 볼 필요성이 있다. 통계청에서 추계하고 있는 우리나라의 인구증가 추이는 2030년까지 자연증가율¹⁾은 지속적으로 증가할

1) 자연증가율은 출생자수에서 사망자수를 뺀 값이다.

것으로 보고 있으나 2060년을 기점으로 점차 감소할 것으로 보고 있다. 이는 A2 시나리오에서 전망하고 있는 인구증가와와는 상이한 예측이나 궁극적으로 물 수요가 증가할 것이라는 것에는 서로 이견이 있을 수는 없다.



자료: IPCC Special Report: Emissions Scenarios.

유역별 월 강수량의 변화를 살펴보면 연 강수량은 4대강 유역이 전반적으로 증가하지만 여름철 강수량은 전반적으로 감소하는 경향이 있다. 낙동강 유역을 살펴보면 6월에서 8월 사이의 홍수기에 강수량이 감소하는 경향을 보이고 있고 갈수기에는 강수량이 늘어나 전반적으로 변동량이 한강유역에 비해서 큰 것으로 나타난다. 금강유역은 낙동강유역이나 한강유역과는 다르게 3월에 강수량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 다른 유역과 마찬가지로 6월에서 8월 사이에 강수량이 줄어드는 것도 비슷한 양상이다. 4대강 유역은 전반적으로 연 강수량이 증가하지만 여름철 강수량이 전반적으로 감소함에 따라 유출량의 계절적 패턴의 변화가 발생함과 동시에 유출량의 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 유출량은 cms로 산정되었기 때문에 물 양으로 환산하기 위해서 연단위로 변화하여야 한다. 유출량을 식 (4)에 대입하면 통계적으로 5%의 실패확률의 이용 가능

한 수량이 도출된다. 하지만 기후변화에 따른 피해를 추산하기 위해서는 물 수요를 파악하는 것이 필요하다. 물 수요를 파악하기 위해서는 국토부에서 조사하고 있는 수자원장기종합계획을 바탕으로 농업용수와 생활 및 공업용수의 수요를 파악할 수 있다. 본 연구는 2100년까지의 수자원 부문에 대한 기후변화의 영향을 파악하는 것이 목적으로 장기의 관측 자료와 미래의 시나리오 자료가 필요한 것이 사실이나 수자원장기종합계획²⁾에서는 2007년까지의 자료만을 공개하고 있는 실정이어서 2100년까지의 물 수요를 파악하는 것은 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 물 공급과 수요 파악을 위해서 모형에 이용한 추정을 사용한다. 물 공급 능력을 위해서는 건설기술연구원의 기후변화를 고려한 4대강 유역의 증발산량과 유입량을 고려하여 2100년까지 각 유역별 유입량을 추산한다. 이는 기후변화 시나리오를 기반으로 하고 있기 때문에 유역별로 불투수층 증가에 따른 유량 감소를 고려하고 있다. 또한 하천을 대상으로 하고 있기 때문에 홍수위와 갈수위의 차이를 고려하지 않고 평균저수용량을 고려한 연평균으로 매크로한 분석을 하기로 한다.

표 1 기후변화에 따른 월평균 강수량 변동성-한강유역

(단위: mm)

월	현재	2001~2030	변동량	2031~2060	변동량	2061~2090	변동량
1월	17.4	71.3	53.9	78.5	61.1	73.0	55.6
2월	22.8	61.0	38.2	68.6	45.8	64.5	41.7
3월	39.5	67.5	28.0	75.3	35.8	73.7	34.2
4월	68.0	66.2	-1.8	71.8	3.8	69.3	1.3
5월	87.5	68.6	-18.9	75.1	-12.4	71.4	-16.1
6월	122.5	65.3	-57.2	73.6	-48.9	70.1	-52.4
7월	286.0	218.9	-67.1	222.9	-63.1	242.8	-43.2
8월	255.0	222.6	-32.4	222.9	-32.1	242.9	-12.1
9월	132.2	213.4	81.2	214.9	82.7	233.5	101.3
10월	39.4	40.3	0.9	37.2	-2.2	42.0	2.6
11월	37.0	37.3	0.3	34.5	-2.5	40.0	3.0
12월	19.1	38.0	18.9	34.9	15.8	40.7	21.6
합계	1126.4	1170.5	44.1	1210.1	83.7	1264.0	137.6

자료: 채여라 외(2011).

2) 수자원장기종합계획은 미래의 수자원 비전 및 전략을 제시하기 위해서 1965년에 최초로 수립된 이후 지난 40년간 미래 수자원 목표 및 추진전략을 제시하고 있으며 국가 경제발전과 국민복지 향상에 기여하는 국가 최상위 수자원 계획이다.

표 2 기후변화에 따른 월평균 강수량 변동성-낙동강유역

(단위: mm)

월	현재	2001~2030	변동량	2031~2060	변동량	2061~2090	변동량
1월	19.7	44.7	25.0	43.5	23.8	43.1	23.4
2월	26.9	39.5	12.6	38.3	11.4	37.2	10.3
3월	50.5	41.5	-9.0	40.1	-10.4	39.6	-10.9
4월	89.0	125.1	36.1	128.8	39.8	118.2	29.2
5월	97.9	124.1	26.2	126.6	28.7	118.5	20.6
6월	155.0	118.5	-36.5	121.6	-33.4	112.7	-42.3
7월	250.6	221.0	-29.6	201.2	-49.4	236.2	-14.4
8월	231.7	217.5	-14.2	200.0	-31.7	230.1	-1.6
9월	131.3	214.4	83.1	194.9	63.6	228.3	97.0
10월	38.0	39.6	1.6	41.1	3.1	41.8	3.8
11월	30.5	33.6	3.1	35.3	4.8	38.6	8.1
12월	14.4	35.4	21.0	36.0	21.6	38.4	24.0
합계	1135.5	1255.0	119.5	1207.2	71.7	1282.7	147.2

자료: 채여라 외(2011).

표 3 기후변화에 따른 월평균 강수량 변동성-금강유역

(단위: mm)

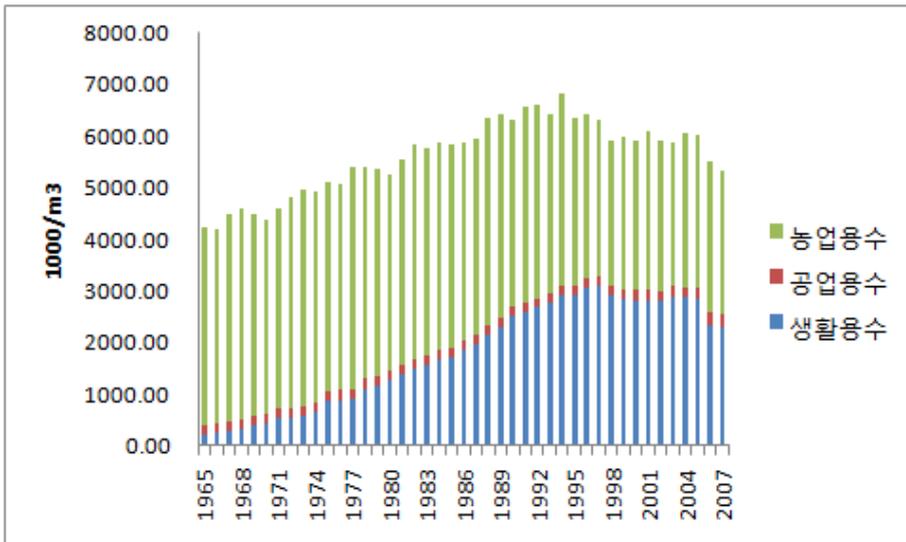
월	현재	2001~2030	변동량	2031~2060	변동량	2061~2090	변동량
1월	21.8	39.9	18.1	37.7	15.9	39.5	17.7
2월	28.5	34.1	5.6	32.2	3.7	34.3	5.8
3월	45.5	37.5	-8.0	34.4	-11.1	36.8	-8.7
4월	71.8	107.9	36.1	112.9	41.1	108.8	37.0
5월	90.5	108.3	17.8	114.3	23.8	112.6	22.1
6월	140.5	110.5	-30.0	116.1	-24.4	111.3	-29.2
7월	264.5	218.7	-45.8	210.0	-54.5	224.6	-39.9
8월	239.3	213.7	-25.6	206.5	-32.8	222.1	-17.2
9월	125.0	212.3	87.3	199.3	74.3	213.3	88.3
10월	41.4	45.6	4.2	44.7	3.3	49.3	7.9
11월	39.5	43.9	4.4	42.3	2.8	46.2	6.7
12월	27.0	44.7	17.7	44.9	17.9	48.9	21.9
합계	1135.3	1217.1	81.8	1195.3	60.0	1247.8	112.5

자료: 채여라 외(2011).

수자원장기종합계획에서 밝히고 있는 한강 수계의 물 수요의 경우는 농업용수와 생공용수의 비율이 대략 5:5인 것으로 나타났다. 농업용수의 경우는 한강수계의 농지 면적 및 농업 인구 감소와 토지 이용 패턴의 변화 등에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 생공용수의 경우는 반대 급부로 인하여 지속적으로 증가하고 있고 1997년 최고치를 기록한 이래 2003년을 기점으로 농업용수 수요를 추월한 상황이다.

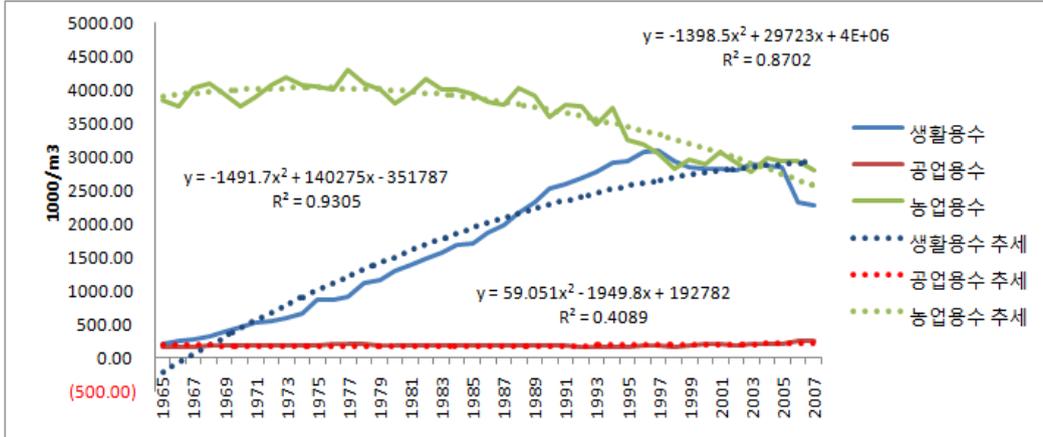
물 수요를 추계하기 위해서는 농업, 공업, 생활용수로 구분되는 물 수요 패턴의 현재 관측치를 바탕으로 한 계량경제모형이 필요하다. 일반적으로 모형을 바탕으로 할 때, 시계열 자료를 이용하여 미래치를 추산한다. 시계열 자료 이용 시 lag값을 이용하는 경우나 시간변화에 따른 패턴 변화를 살펴보면 방정식 등으로 나누어 살펴 볼 수 있다. 본 연구에서는 물 수요 패턴 변화를 추계하기 위해서 종속변수를 각각의 물 수요로 놓고 독립변수를 시간으로 설정한 방정식을 사용한다. 이때, 물 수요 패턴 변화는 1차 함수식을 갖기 보다는 2차 방정식의 형태를 취하는 것이 과거의 물 수요 패턴을 표현하는 설명력이 가장 높다고 할 수 있다. 이를 그림으로 표현하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

그림 1 한강 수계의 물 수요 현황



자료: WAMIS database.

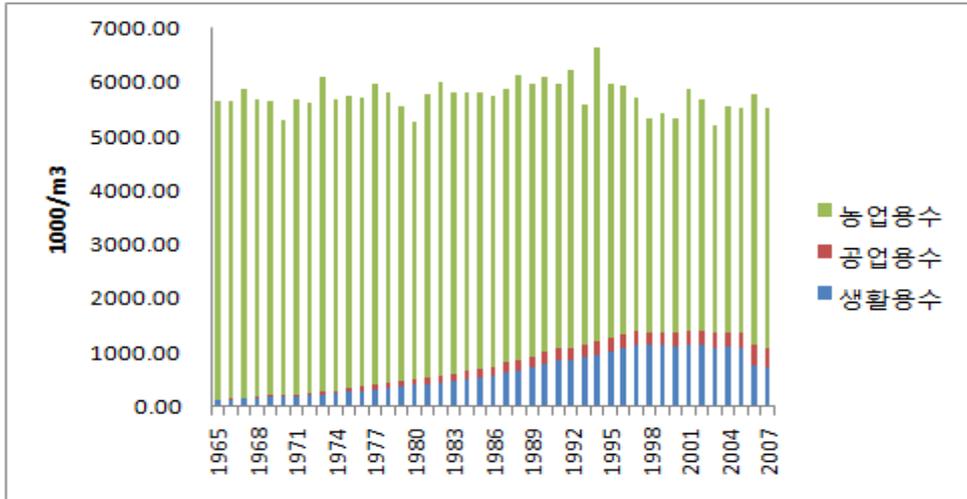
그림 2 한강 수계의 물 수요 추계



자료: WAMIS database.

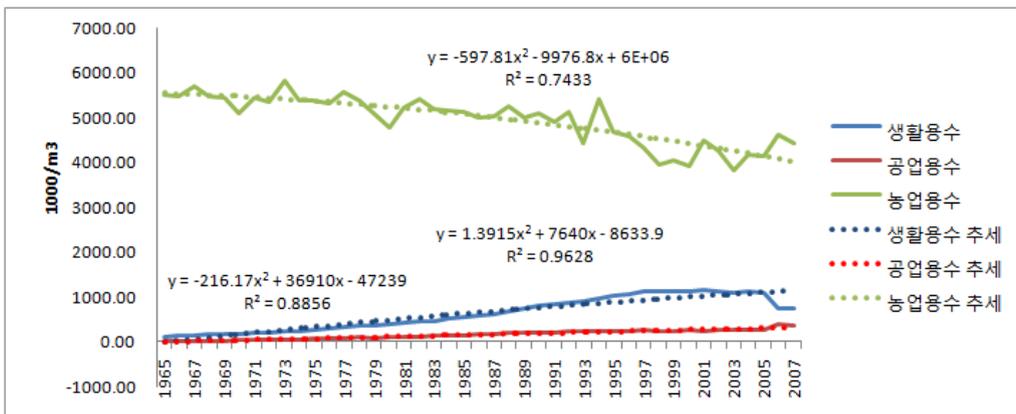
한강수계의 물 수요를 추계해 볼 때, 농업용수의 수요는 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있고 공업용수의 경우는 수요가 상당히 일정한 것을 알 수 있다. 하지만 생활용수의 경우는 지속적인 증가 추세를 극명하게 보이고 있어 향후 물 수요 관리 정책에서 생활용수 수요 관리가 필요할 것으로 보인다. 낙동강 수계의 경우를 살펴보면, 산업화 이전 단계에서는 농업용수의 수요가 절대적으로 높은 비중을 차지하고 있다가 80년대 이후 생활용수의 수요가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 높은 비중을 차지하고 있던 농업용수 수요는 점진적으로 감소하는 추세를 확인할 수 있다.

그림 3 낙동강 수계의 물 수요 현황



자료: WAMIS database.

그림 4 낙동강 수계의 물 수요 추계

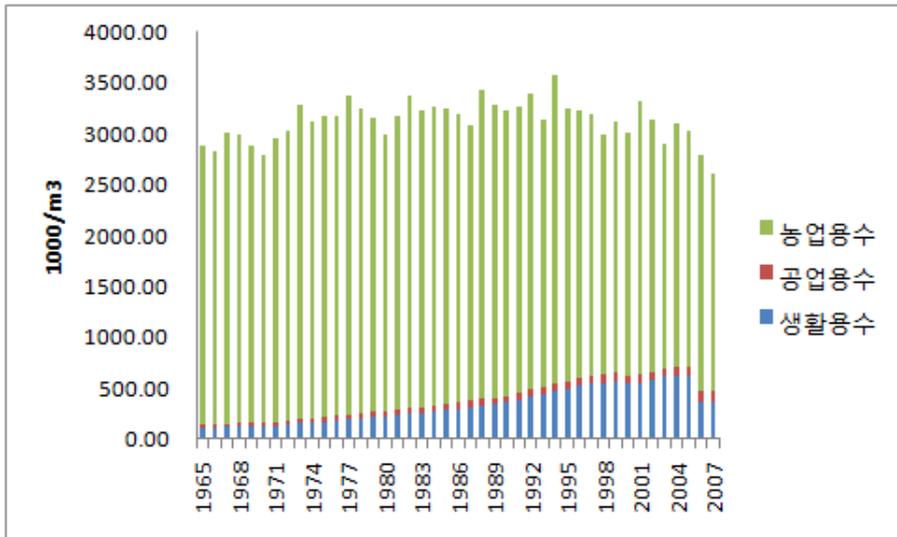


자료: WAMIS database.

금강 수계를 보면 낙동강 수계와 마찬가지로 산업화 이전 단계에서는 농업용수의 물 수요가 절대적인 비중을 차지하고 있었으나 산업화 이후 생공용수의 수요가 증가하는 경향을 보여준다. 또한 추세를 살펴보면, 상당히 유의한 모형의 설명력을 보여주고 있고 농업용수의 경우는 지속적인 감소 경향을 나타내고 있다. 한강 및 낙동강 수계와는

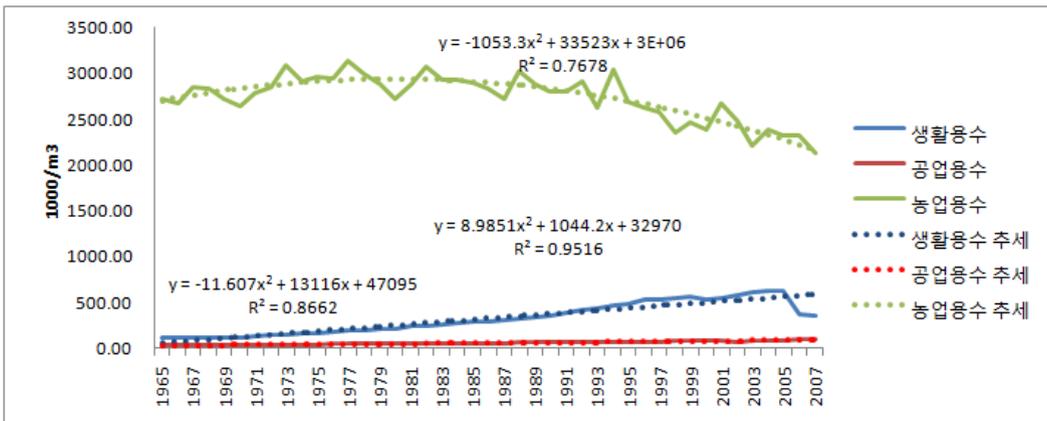
상반되게 공업용수의 물 수요가 증가하는 것을 미미하게나마 보여주고 있다. 또한 생활용수는 지속적인 증가 추세를 보인다. 물론 한강 수계와 비교하면 그 증가추세가 크지는 않지만 향후 물 수요 관리를 위해서 생활용수 수요 관리가 필요한 실정이다.

그림 5 금강 수계의 물 수요 현황



자료: WAMIS database.

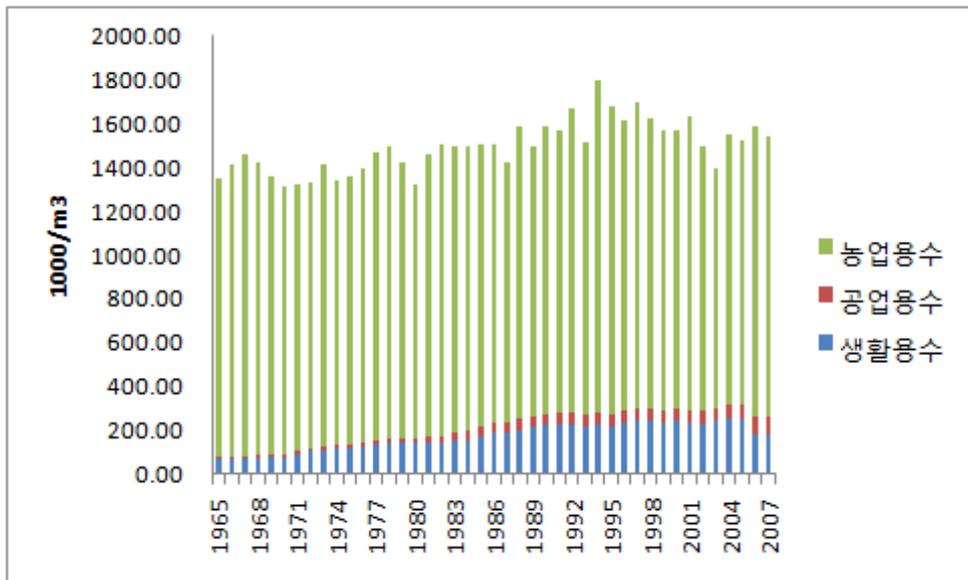
그림 6 금강 수계의 물 수요 추세



자료: WAMIS database.

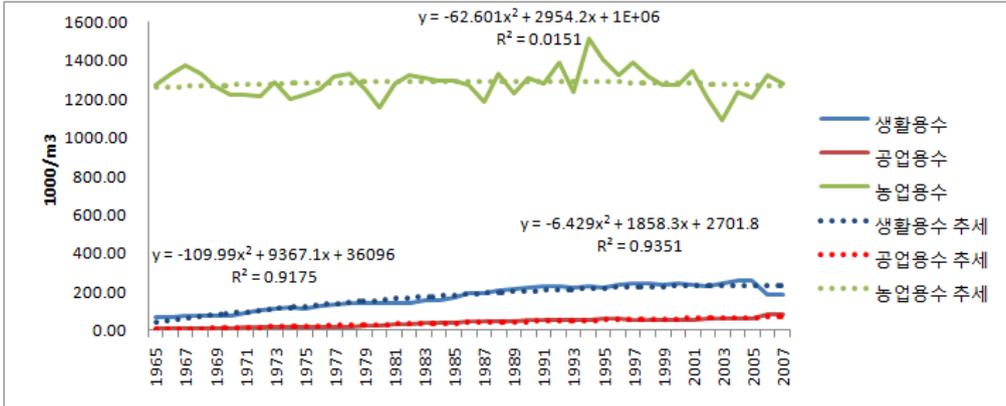
마지막으로 영산강 수계를 살펴보면, 농업용수의 수요는 기간상의 편차는 존재하고 있으나 상당히 균일한 수요를 보여주고 있다. 생활용수의 수요는 지속적인 증가 추세를 보이고 있고 공업용수의 수요 역시 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 공업용수의 증가 추세는 영산강 수계가 가장 가파른 상승세를 보이고 있으며 4대 하천 중에서 가장 높은 상승세를 보여주고 있다. 그러나 전체 물 수요에서 공업용수의 비중이 미미하기 때문에 수요관리의 효과는 미미할 것이다. 영산강 수계를 보더라도 생활용수의 수요관리가 미래 환경변화에 대응하기 위해서 필수적이라 할 수 있다.

그림 7 영산강 수계의 물 수요 현황



자료: WAMIS database.

그림 8 영산강 수계의 물 수요 추계



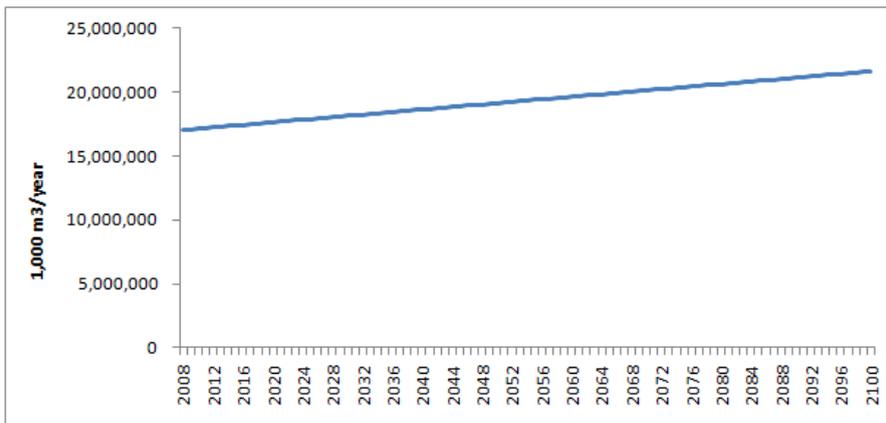
자료: WAMIS database.

WAMIS에서 제공되고 있는 물 수요를 종합하여 추세를 분석해 보면 물 수요는 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 2100년까지 모의하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\text{물 수요} = -8.3 \times 10^{10} + 49,824,322$$

이를 그래프로 표현하면 아래와 같은 점진적으로 증가하는 물 수요 패턴을 알 수 있다.

그림 9 물 수요 추계



III. 모형의 설명

댐이 존재하는 하천의 경우, 기후변화 등으로 인한 평균 기온상승에 따른 수자원 부분의 영향은 미미할 것으로 보인다. 하지만 하천이 지표에 노출되기 때문에 증발산량이 증가할 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 중요한 다섯 가지의 가정에 의해서 모형을 설정한다.

① 모형에서는 증발산량과 유입량을 동시에 고려한다.

또한 계절적인 요인이 작용할 수 있으나 연중으로 보면 하천에서 이용 가능한 물 양이 존재하므로 계절적 요인은 배제하도록 한다. 이는 본 연구의 목적이 2100년까지의 영향을 분석하는 데 있기 때문에 장시간의 예측이 필요하여 편차가 발생하는 계절적 요인은 최소화하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

② 하천의 이용 가능한 물 양 산정 시 월 평균을 사용하되 연계절적 요인에서 오는 변화를 최소화하기 위해서 우기와 건기로만 구분하기로 한다.

수자원의 가치를 산정하기 위해서는 수자원의 시장가격이 필요하다. 하지만 우리나라의 경우 농업용수는 무료로 제공되고 있고 댐용수 등은 총괄원가하에서 원가회수가 안되고 있는 실정이다. 따라서 농업용수의 경우는 시장이 경쟁상태에 있다는 것을 가정으로 shadow price를 이용하여 농업용수의 가격을 산정한 기존 연구를 활용하고 생공용수의 경우는 시장가격과 한계비용이 일치하는 점에서 공급이 되는 것이 경제 논리로 바람직하기 때문에 생공용수의 시장가격은 원가회수가 일어나는 시점으로 가정한다.

③ 농업용수의 경우는 농업용수의 경제적 가치를 추산한 기존연구를 바탕으로 설정한다.

④ 댐 용수의 경우는 원가회수율을 고려하여 시장가치주의에 입각하여 댐 용수 가격이 한계비용과 일치한다고 가정하여 경쟁가격하의 가격을 사용한다.

하천의 용수는 관개용수와 상수도 공급 용수 외에도 하천의 고유한 생태적 기능을 유지하기 위한 환경용수 등이 존재하나 환경용수의 경제적 가치를 산정하기 위해서는 조건부가치측정방법 등이 사용되어야 한다.

⑤ 기후변화에 따른 지하수의 물리적 영향 등 자료의 부족으로 인하여 본 모형에서는 지하수 부문은 제외하도록 한다.

기후변화에 따른 하천의 피해비용을 산정하기 위해서 World Bank의 RESCON 모형과 Kawashima(2006)의 모형을 기반으로 기후변화에 따른 유입량의 변화와 하천의 증발산량의 변화를 동시에 고려할 수 있는 모형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_t(S_t, \varphi_t) = \frac{4(1 - \varphi_t)S_t V_{in} - Zpr^2sd^2 + 4Gdsd^2}{4\left((1 - \varphi_t)S_t + \frac{Gd}{V_{in}}sd^2\right)} \dots\dots\dots\text{식 (1)}$$

여기에서 S_t : 하천의 연평균 유출량(댐 방류량을 포함)
 V_{in} : 하천 연 유출량
 φ_t : 하천의 연평균 증발산량

이는 RESCON 모형에서 S_t 를 댐의 저수용량으로 하나 하천의 경우는 저수용량의 개념을 도입하는 것에 무리가 있다. 하천의 저수용량은 하천에 있는 물의 양을 총합으로 할 경우 댐에서 방류되는 물 양도 포함될 수 있다. 또한 기존 모형에서는 댐으로 유입되는 양을 사용하여 연중 사용가능한 물량을 계산하였으나 하천에 그대로 적용하는 것은 무리가 있다. 따라서 댐에서 방류되는 물 양이 기후변화에 영향을 최소화하는 것으로 보면 연 강수량을 유입량으로 보는 것이 적당할 것으로 보인다.

현실적으로 하천의 초기 저수용량을 계산하려면 하천 구간별 단면적에 전체 길이를 곱하는 형태가 되어야 한다. 하지만 단면적을 구하는 것이 홍수위와 갈수위 때가 상이하므로 분석의 편의를 위하여 연평균 유출량을 통하여 구한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cms_i / 31,536,000) \dots\dots\dots\text{식 (2)}$$

2100년까지의 기후변화에 따른 하천의 피해비용을 산정하기 위해서 다음과 같은 수식을 사용한다.

$$\Pi_{w/c} = \sum_{t=2010}^{2100} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \left[\{P_i \beta_i W_{j,t}(S_{j,t}, \varphi_{j,t}) - OMC_j\} e^{-rt} \right] \dots \dots \dots \text{식 (3)}$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^2 \beta_i = 1$$

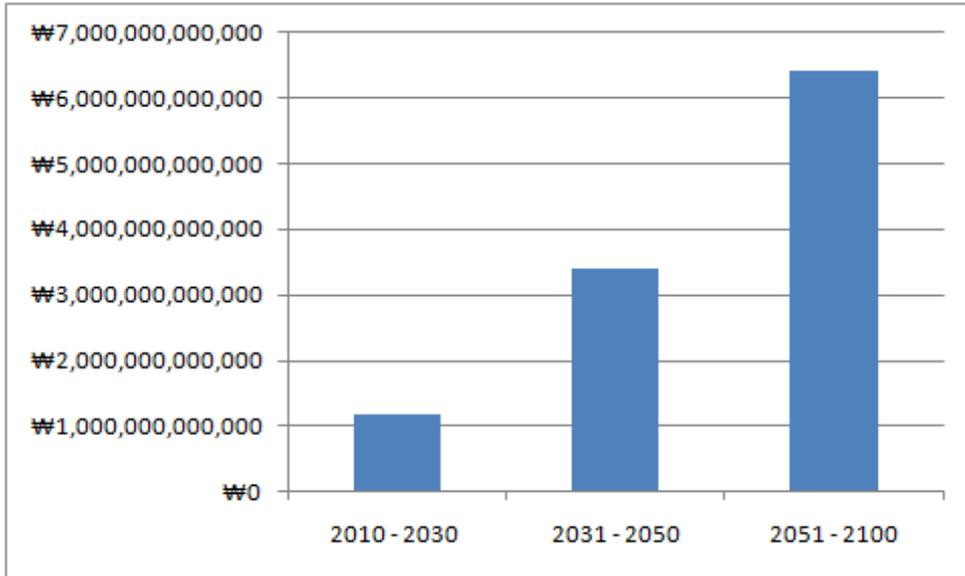
IV. 분석 결과

정리한 분석을 위해서 할인율은 단기, 중기, 장기로 구분하여 각각 2.76%, 1.45%, 0.62%로 가정하여 분석하였다.³⁾ 전체적인 한강수계를 제외하고는 단기에 피해비용이 발생하지 않는 것으로 나타난다. 한강의 경우는 생활용수의 급격한 증가로 인하여 물 수요가 증가하는 것이 초기에 물 부족 현상으로 인하여 지속적인 피해를 발생시키는 것으로 나타났다. 하지만 중기 이후의 시점에서는 각 연도별로 살펴보면 기후변화의 영향에 따른 물 부족 현상은 여전히 발생하고 있으나 이용 가능한 수량이 증가함에 따라서 물 부족이 완화되는 경향이 있으므로 그 피해비용은 감소하는 것으로 나타났다. 물론 총 피해비용을 살펴보면 단기보다는 중기가 높고 장기의 경우가 가장 높은 것으로 나타나는데 이는 중기와 장기가 시간이 가장 길어 피해비용을 합산하면 가장 크게 나오는 것으로 보인다.

총 피해비용을 보면 약 11조 원의 피해가 발생하는 것으로 나타났다. 이를 연간으로 보면 약 1,200억 원으로 추산된다. 단기의 경우를 보면 약 1조 1,000억 원 정도의 피해가 기후변화에 따른 영향으로 발생하는 것으로 나타났고 중기의 경우는 약 3조 3억 원 정도의 피해가 발생하는 것으로 분석되었다. 장기의 경우를 보면 상당히 긴 시간의 분석이 필요하여 상당히 정치하지 못한 결과일 수는 있지만 약 6조 정도의 피해가 발생하는 것으로 나타났다. 이를 그래프로 표현하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

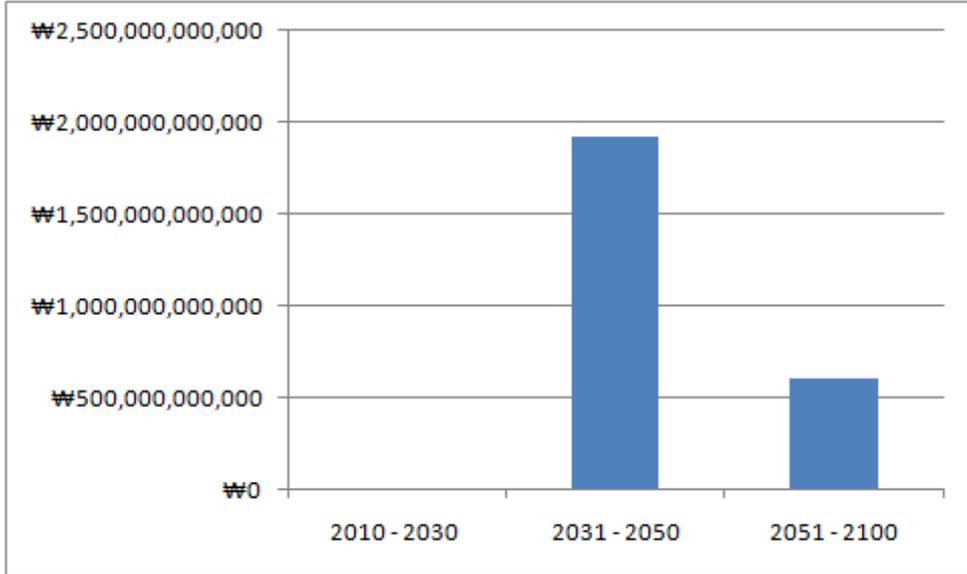
3) 할인율 적용에 관해서는 상당히 다른 의견이 있을 수 있으나, 장기적으로는 우리나라의 경제 성장률이 낮아질 것을 가정한다면 장기로 갈수록 할인율은 작아져야 할 것이다. Stern 보고서에서 사용된 할인율과 다른 기후변화 관련 논문들에서 사용된 할인율을 바탕으로 채여라 외(2011)에서는 위와 같은 할인율을 우리나라 기후변화 연구에 적용하였다.

그림 10 기후변화에 따른 한강수계의 단계별 피해비용



낙동강 수계를 모의한 결과, 단기에는 유출량 증가로 인하여 물 부족이 일어나지 않아 미래 기후변화에 따른 피해가 발생하지 않는 것으로 분석되었고 중기의 경우는 강우량 및 유출량 변화로 인하여 약 1조 9,000억 원 정도의 경제적 피해가 발생하는 것으로 나타났다. 마지막으로 장기의 경우, 약 6,000억 원 정도의 피해가 발생하였고 이는 강우패턴의 변화가 일어나서 발생하는 것으로 분석되었다. 단계별로 미래 기후변화에 따른 경제적 피해비용을 살펴보면 총 2조 5,000억 원 정도의 피해가 발생하였고 단기의 경우 피해비용이 발생하지 않았고 중기와 장기의 경우를 종합적으로 살펴보면 연간 약 67억 정도의 피해가 발생하는 것으로 나타났다.

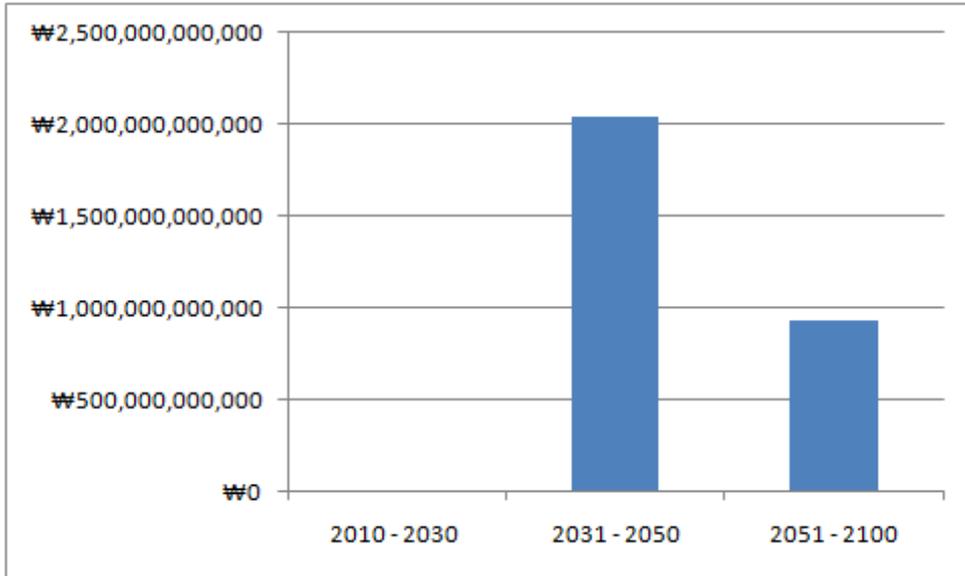
그림 11 기후변화에 따른 낙동강수계의 단계별 피해비용



금강 수계를 모의한 결과, 연간 약 1,000억 원의 피해가 발생되는 것으로 나타났지만 낙동강 수계와 마찬가지로 단기에는 피해가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 금강은 단기에 하천의 변동성이 예측되지만 물 수요가 크지 않기 때문에 전반적으로 단기에는 물 부족 현상이 일어나지 않는 것으로 분석되었다.

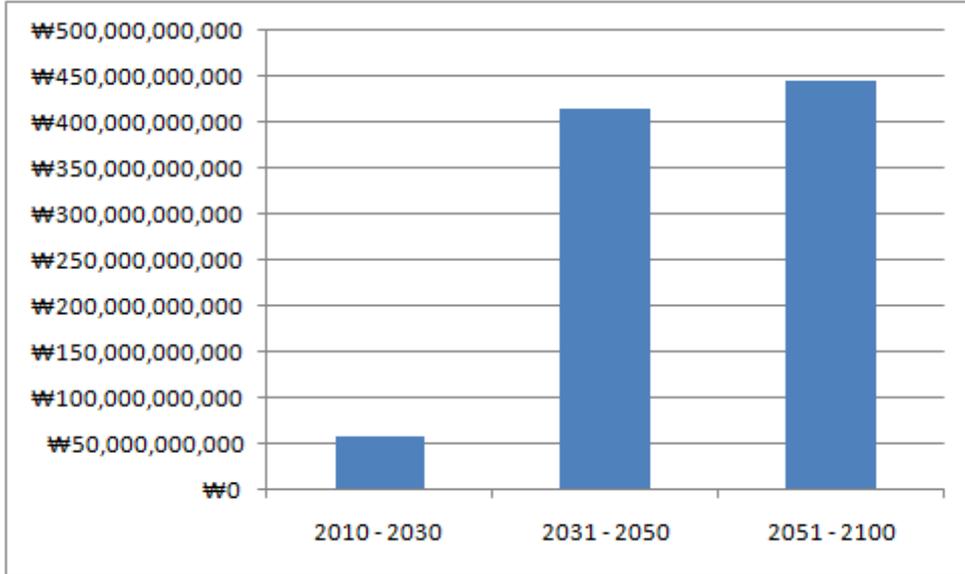
미래 기후변화에 따른 금강 수계의 경제적 피해비용을 기간별로 살펴보면 단기에는 피해가 발생하지 않지만 중기에 수자원의 가용성의 변화와 물 수요 증가에 따라서 극심한 물 부족으로 인한 피해가 발생하고 이는 약 2조 원 정도로 추산된다. 장기로 가면 피해 비용이 감소하는데 이는 물 수요 증가세가 둔화되고 하천의 물 이용성이 중기에 비해 호전되기 때문인 것으로 파악된다.

그림 12 기후변화에 따른 금강수계의 단계별 피해비용



마지막으로 영산강 수계를 모의한 결과, 모든 기간에 피해가 발생하는 것을 알 수 있다. 미래 기후변화에 따른 영산강 수계의 경제적 피해비용은 연간 약 50억 원 정도가 발생하는 것으로 나타났고 종합적으로는 약 9,000억 원으로 모의되었다. 기간별로 살펴보면 단기의 경우는 유출량 및 강수량 감소에 따른 물 이용성이 감소하고 지속적인 물 수요 증가로 인하여 약 580억 원 정도의 피해가 발생되었고 중기의 경우도 단기와 마찬가지로 물 이용성이 감소됨에 따라 약 4,000억 원 정도의 피해가 발생하였다. 장기 경우는 물 이용성은 개선되지만 물 수요가 영산강의 물 공급 능력을 초과함에 따라 약 4,500억 원의 피해가 발생하는 것으로 모의되었다.

그림 13 기후변화에 따른 영산강수계의 단계별 피해비용



V. 결론 및 시사점

본 연구는 한반도의 기후변화 영향이 수자원에 미치는 영향을 홍수위험을 제외하고 제한적으로 4대 하천을 중심으로 분석하였다. 물론 기후변화의 영향은 강수량의 증가로 인한 홍수피해의 증가와 온도 상승 및 강수량의 감소로 인한 가뭄의 증가로 구분되어 설명해야 한다. 하지만 본 연구에서는 자료의 한계와 홍수피해를 산정하기 위한 우리나라의 침수피해모형이 존재하지 않기 때문에 기후변화의 영향이 가뭄피해에 국한되어 연구의 한계점을 가지고 있다. 또한 기후변화가 수자원에 영향을 주는 것을 확률적으로 분석할 필요성이 있으나 본 연구에서는 γ function을 이용하여 실패확률 5% 이내에서 추산하였기 때문에 다양한 확률모형으로 연구의 분석 방법을 확장할 수 있다. 마지막으로 기후변화에 따른 가뭄피해를 산정하기 위해서는 수자원의 시장 가치를 파악할 수 있는 proxy가 존재하여야 하고 이는 시장상황에 따라 변화하는 것이 합리적이다. 하지만 본 연구에서는 농업용수와 공업용수 그리고 생활용수의 시장 가격에 대한 정보가 모두 존재하지 않아 농업용수의 경우는 shadow price를 사용하여 완전경쟁시장하의 시장가격을 추출하였다. 또한 시장가격은 내생변수로 다루어져야 정치한

분석이 가능함에도 불구하고 시장 상황을 예측하기 위해서는 CGE와 같은 모형으로 분석해야 하지만 본 연구에서는 시장가격을 현재 상황에서 맞추어 시뮬레이션 한 값을 사용하여 향후 이 부분을 보완하여 보다 정직한 분석결과를 얻을 수 있을 것이다.

위와 같은 연구의 한계점에도 불구하고 정책적인 함의는 본 연구의 분석 방법에서도 찾을 수 있다. 우선 4대강의 분석결과에서 알 수 있듯이 한강을 제외하고는 현 시점의 피해보다는 중기나 장기에서 가뭄의 피해가 발생할 가능성이 높다. 또한 장기보다는 중기에 가뭄의 피해가 좀 더 많이 나타나고 있기 때문에 이를 완화할 수 있는 물 관리 정책이 필요하다. 이는 물 수요 감소를 위한 정책적인 노력이 지금보다 더 많이 필요하다고 말할 수 있다. 이를 위해서 물 가격을 시장 상황을 반영하는 현실적인 가격으로 올리는 것이 기후변화에 적응하기 위한 적극적인 방안이 될 수 있다. 또한 물 수요를 줄이기 위한 제도적인 장치가 마련되어야 한다. 물 사용에 따른 차등 요금과 구간별 요금의 격차를 넓게 하여 물 수요를 줄이는 유인책이 있어야 할 것이다. 또한 농업용수와 같이 무상으로 공급되고 있는 부문을 점진적으로 시장가격을 반영될 수 있게 하는 제도가 필요할 것이다. 이는 현재 농민들에게 무상으로 농업용수를 공급하고 있는 것을 소득 보전 보조금을 대체하고 물 사용량을 정확하게 파악할 수 있는 모니터링 시스템을 갖추는 것이 필요하다. 이를 통해서 실질적으로 사용되는 물에 대해서는 가격을 부과하고 이를 다른 종류의 소득으로 보전해 주는 것이 물 수요를 줄일 수 있는 방안이 될 것이다. 마지막으로 물 부족이 예상되는 가까운 미래를 대비하기 위해서 물 공급을 늘릴 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 현재 수자원 이용 및 개발 추세를 반영하여 댐 등의 인공구조물을 하천에 개발하는 것은 더 이상 힘들 것이다. 따라서 물 공급을 늘릴 수 있는 방안으로는 하수 재이용이나 해안과 발전시설이 가까운 지역에 담수화 시설을 늘리는 것도 고려되어야 한다. 그리고 적극적인 지하수 이용 방안이 필요할 것이다. 지하수는 지표수와는 다르게 안정적인 수질을 제공할 수 있는 이점이 있고 함양량을 기준으로 관리하게 되면 지속가능하게 이용할 수 있는 부분이 있다. 이를 적극적으로 활용하는 것이 미래 기후변화의 영향에서 수자원 분야를 지속가능하게 이용할 수 있는 방안이 될 것이다.

현재 우리나라에서 실행하고 있는 4대강사업의 총 사업비가 현재까지 18조 원이 투입되었다. 기후변화와 물 수요 증가를 동시에 고려하더라도 2100년까지 4대강 유역의 물 부족으로 인한 경제적 피해비용은 본 연구의 모형을 기반으로 할 때 약 11조 원으로 추산되어 약 7조 원의 혈세가 하천으로 사라지고 있다. 물론 본 연구에서 사용된

모형이나 분석결과가 현실을 100% 반영하였다고는 할 수 없다. 또한 연구의 한계점에서도 언급하고 있듯이 물 수요가 시장가격에 기반을 두고 있지 않기 때문에 물 요금의 현실화된다면 물 부족에 따른 피해비용은 더 커질 수 있고 이로 인한 4대강 사업의 효과는 본 연구의 분석결과와 상반되게 나올 수도 있다. 본 연구의 학술적 기여로는 아직까지 수자원을 기반으로 한 경제학적 접근이 우리나라에서는 이루어지지 않았기 때문에 4대강 사업에 대한 학술적 고찰이 지속적으로 이루어질 수 있게 한 첫 번째 연구라는 것을 들 수 있다.

참고문헌

- 채여라 외. 2011. 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석 II」. 한국환경정책·평가연구원.
- Conway, D., and M. Hulme. 1996. "The Impacts of Climate Variability and Future Climate Change in the Nile Basin on Water Resources in Egypt". *Water Resources Development*, 12(3): 277-296.
- Kawashima, S. 2004. *Management Decisions for Sustainable Use of Dam*. Agricultural and Resource Economics, University of Connecticut, Storrs.
- Kawashima, S., T. B. Johndrow, G. Annandale, and F. Shah. 2003. *Reservoir Conservation: Volume II- RESCON Model and User Manual*. Washington, DC.: World Bank.
- Palmieri, A., F. Shah, G. W. Annandale, and A. Dinar. 2003. *Reservoir Conservation: The RESCON Approach*, Volume 1. Washington, DC.: The World Bank.
- Palmieri, A., F. Shah, and A. Dinar. 2001. "Economics of Reservoir Sedimentation and Sustainable Management of Dams". *Journal of Environmental Management*, 61(2): 149-163.
- Pattanapanchai, M. 2005. *Economics of Renewable Resource Management: An Application to Multipurpose dams*. Department of Agricultural and Resource economics, University of Connecticut, Storrs.
- Pattanapanchai, M., F. Shah, and G. Annandale. 2002. *Sediment Management in Flood Control Dams*. Paper read at American Agricultural Economics Association Annual Meeting 2002, July 27-31, 2002, at Long Beach, California.
- Payne, J. T., A. W. Wood, A. F. Hamlet, R. N. Palmer, and D. P. Lettenmaier. 2004. "Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River basin". *Climatic Change*, 62(1): 233-256.