

날씨파생상품 시뮬레이션을 이용한 전력분야 하절기 기후변화 피해비용 추정*

Impact of Climate Change to the Summer Season Hedging Cost in
Electricity Sector: Using a Weather Derivatives Simulation Method

이강일** · 한택환***

Kangil Lee · Taek-Whan Han

요약: 본 연구는 기후변화에 따른 CDD(냉방도일지수; 冷房度日指數; Cooling Degree Day) 콜옵션 가격변화를 추정하여 기후변화의 비용 중 일부인 하절기 전력부하 헤징비용의 증대액을 계산하였다. 평균회귀모형에 의한 기온 프로세스를 추정하고 여기에 온도의 기대치와 표준편차 파라미터를 변경시켜서 새로운 기온프로세스를 생성하였다. 이 프로세스를 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 행한 후 이로부터 CDD 지수값을 생성하고 여기에 CDD 콜옵션 가격식을 적용하여 CDD 콜옵션 가격을 계산하였다. 이 CDD 콜옵션 가격의 변화율에 몇가지 가정을 적용하여 별도로 추정된 2017년 기준 잠재적인 CDD 콜옵션 거래액 규모를 적용하여 기후변화의 하절기 헤징비용 증대액을 추정하였다. 본 논문은 평균온도는 0~1.8도 상승하고, 표준편차는 1~2배 상승하는 12개의 시나리오를 상정하여 새로운 기온프로세스를 추정하였다. CDD 콜옵션가격의 변화율은 보면 650~5,000% 상승하는 것으로 추정되었다. 이를 금액기준으로 환산하여 보면 시나리오 II(평균기온 변화 없이 표준편차 1.5배로 상승)의 경우에 CDD 가격증가율은 655%였고 피해금액은 2조 2650억 원에 해당한다. 그리고 표준편차 변화 없이 평균기온이 0.8도 상승하는 시나리오(시나리오 IV)의 경우에는 증가율이 1510%이고 그 금액은 34조 8300억 원에 이른다.

핵심주제어: 기후변화의 비용, 날씨파생상품, CDD 콜옵션, 기온 프로세스, 평균회귀모형

Abstract: This study has estimated the CDD call option price change according to climate change and calculated the increase in hedging cost for the electricity sector in summer, which is part of the cost of climate change. A new temperature process was created by altering the mean temperature and standard deviation for the temperature process of Korea, which was estimated by applying a mean reversion model to Korea's past temperature data. Monte Carlo simulations were applied to the process, and CDD index values were generated from them. The expected CDD call option prices were computed using a simple CDD call option pricing formula. We estimated the increase in hedging costs for

* 본 논문은 한택환·이강일, “날씨파생상품 가격 데이터를 활용한 기후변화 영향평가 방안”, 한국환경정책학회 학술대회 논문집(2009) 및 이강일·한택환, “날씨파생상품 가격 데이터를 활용한 기후변화 영향평가”, 한국경영학회 통합학술발표 논문집(2009)의 내용과 관련이 있으며 이들을 전면적으로 개편, 업데이트하여 재작성한 논문이다.

** 주저자, 고려대학교 에너지환경대학원(그린스쿨) 연구교수

*** 교신저자, 서경대학교 금융경제학과 교수

temperature risk in summer by applying the rate of change of the CDD call option price to the potential CDD call option transaction value as of 2017, which was estimated separately with additional assumptions. In this paper, we construct twelve scenarios in which the average temperature rises by zero to 1.8 degrees and the standard deviation rises one-two-fold. The CDD call option price is estimated to rise by 650-5,000%, contingent upon each scenario. In terms of monetary value, if Scenario II (in which the standard deviation is increased 1.5-fold without changing the average temperature) is applied, the damage amounts to 2,266.5 billion KRW as the CDD price increase rate would be 655%. In Scenario IV, in which the average temperature rises by 0.8 degrees without changing the standard deviation, the increase rate is 1,510%, which is equivalent to 34.83 trillion KRW.

Key Words: Cost of Climate Change, Weather Derivatives, CDD Call Options, Temperature Process, Mean-Reversion Model

I. 서론

1. 연구의 배경

전 세계적으로 기상 이변에 의한 피해가 지속적으로 증가하고 있다. 기후변화로 인해 지구전체의 평균기온이 상승하고 기온과 여러 기상 요소들의 변동성(Volatility)이 증대되면서 가뭄, 폭풍우, 폭풍, 태풍 등과 같은 자연재해들의 빈도와 그 강도가 커지고 있는 것이다. 이와 같은 자연재해에 의한 피해액 규모는 꾸준히 증가 추세에 있다. 피해액을 살펴보면 전 세계 기준 1950년대 20억 달러 수준이었으나 1995년과 2005년에는 2,000억 달러를 넘어서기도 했다. 특히 2017년에는 미국에서 큰 피해를 준 대형 허리케인 하비(Harvey), 어마(Irma) 그리고 마리아(Maria) 등에 의해 역대 최대 규모의 피해액인 3,400억 달러를 기록하였다(Munich Re, 2018).

이와 같은 날씨위험을 헤징하기 위한 수단으로써 날씨보험(Weather Insurance), 재해 채권(Catastrophe Bonds), 그리고 날씨 파생상품(Weather Derivatives) 등이 있다. 먼저 날씨보험과 관련하여서는 농작물 재해보험, 재정손실에 대한 보상보험, 행사취소비용에 대한 보상보험 등의 상품을 들 수 있다. 재해 채권은 자연재해에 대한 위험을 헤징할 수 있는 보험 상품을 판매한 손해보험회사가 발행하는 채권으로 손해보험회사가 자본시장을 이용

하여 위험을 분산하는 헤징수단이다. 자연재해 손해보험 상품의 경우 보험금 지급액의 규모가 매우 커 재보험을 들기 힘들고, 경우에 따라서 파산의 위험이 있어 채권을 발행하여 헤징을 하는 것이다. 재해 채권은 보험사들이 추가 담보력을 확보할 수 있는 이점으로 있다는 이유로 선호하기 때문에 그 시장이 급속도로 성장하고 있다.¹⁾ 날씨파생상품은 날씨위험을 헤징하기 위한 파생금융상품으로써 이를 이용하면 날씨의 변동성에 기인하는 기업의 매출 이익의 감소를 보전할 수 있다.

기상의 변화로 인하여 경제적 피해나 비용이 증대하게 되면 그에 대비하기 위한 날씨보험의 보험료(Premium)가 증가할 것이며, 따라서 기상 관련 보험 상품의 보험요율 데이터를 통하여 기후변화로 인한 비용 증대의 크기를 추정해 볼 수 있다. 한편 날씨 파생상품의 가격도 일종의 보험료와 유사한 성격을 가지므로 이를 통하여서도 기온변동 등 기후변화의 비용을 추정할 수 있다. 기온의 상승과 변동성의 증대는 겨울의 난방 전력수요와 여름의 냉방전력수요의 증가를 견인한다. 이러한 전력수요의 규모와 변동성의 변화에 따라 발생하는 추가적인 비용 역시 기상조건의 변화에 따른 피해비용이라고 할 수 있다. 따라서 기상보험 외에도, 날씨 파생상품을 활용하여 기상 리스크의 증대에 따른 경제적 비용의 크기를 추정하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 냉난방 수요의 증대는 전력수요의 불확실성을 증대시키며, 이는 냉난방 전력수요의 위험을 헤징하기 위하여 발전업체가 구매하는 HDD 및 CDD 콜옵션의 가격을 상승시킬 것이다.²⁾ 이러한 관계를 바탕으로 날씨의 변화가 날씨 옵션상품의 거래규모에 가져오는 변화를 추정한다면 날씨 파라미터의 변화가 가져오는 경제적 비용을 계산해낼 수 있을 것이다.

2. 연구목적 및 범위

기후변화에는 여러 측면이 있다. 그러나 가장 기본적인 기후변화의 속

1) USGAO(2002).

2) HDD 및 CDD 콜옵션의 내용과 성격은 다음 절에서 상술하였다.

성 중 하나는 평균기온의 상승과 기온변동성의 증가이다. 즉, 평균기온 및 기온의 표준편차와 같은 날씨 파라미터가 항구적으로 변화한다면 이는 “기후변화(climate change)”의 하나로 간주될 수 있다. 이러한 기후변화는 여러 가지 비용을 발생시키는데 그중 하나가 동절기와 하절기의 발전 비용 증대이다. 여름이나 겨울의 냉방 및 난방 전력수요의 증대와 기온변동성의 증대는 예상치 못한 전력수요의 증대로 발전사의 비용을 급증시킬 수 있다. 미국 등 주요국의 발전사들은 예상치 못한 전력수요의 급증 위험에 대비하는 방법의 하나로 날씨 파생상품의 거래를 통하여 위험을 헤징하고 있다. 미국 등에서는 발전사들이 날씨파생상품(HDD 및 CDD 옵션)을 구입하여 기온변동에 따른 위험을 헤징하고 있다. 날씨 파생상품의 균형가격은 이러한 날씨의 변동성에 따른 비용의 크기에 상응할 것이기 때문에 기후변화 전후의 날씨파생상품 가격을 비교하면 이로부터 기후변화에 따른 기온수준 및 기온변동성의 변화에 따른 헤징 비용의 증감을 계산할 수 있다.

그러나 우리나라에서는 날씨 파생상품 시장이 개설되어 있지 않으므로 실제의 가격데이터를 통한 기후변화의 비용을 추정하기는 어렵다. 그러므로 그 대안으로서 기온 과정(Temperature Process)을 추정하고 여기에 온도의 기대치와 표준편차 파라미터를 변경시켜서 새로운 날씨과정을 생성하여 이를 시뮬레이션하고 이로부터 날씨파생상품의 가격을 계산해내는 방식으로 기후변화의 영향평가를 분석하였다. 본 논문은 날씨파생상품 가격모형에 우리나라 기상데이터를 적용하고 여기에 연구기관에서 예측된 파라미터를 적용하여 기후변화가 진행된 상황에서의 기온 수준과 기온변동성 파라미터를 적용하여 평균온도는 0~1.8도 상승하고, 표준편차는 1~2배 상승하는 12개의 시나리오를 상정하였다. 본 연구에서는 날씨파생상품의 가격이 기후위험의 시장가치를 반영한다는 점을 활용하여 기후변화의 영향평가를 시도한다. 다시 말해서 기후변화 전의 날씨파생상품 가격과 기후변화 후의 날씨파생상품 가격의 변화를 파생상품 거래액에 곱해 주면 이는 기후변화에 의한 기상요건의 변화에 따른 위험요인에 대한 헤

징 비용의 증감이라고 할 수 있다.

본 연구에서 추정하는 기후변화의 비용은 기후변화에 의해 발생하는 전체 비용이 결코 아니다. 또한 기후변화가 전력부문에 미치는 피해비용의 전부를 추정한 것도 아니다. 본 연구의 범위는 날씨파생상품의 가격 시뮬레이션을 통하여 평균기온과 변동성이 변화할 때의 추가적인 헤징비용을 계산하여 전력부문의 기온위험증대로 인한 피해비용을 추정하는 것으로 국한되어 있다.

II. 날씨 파생상품의 이해와 시장현황

산업의 많은 부분(예를 들어, 농업, 에너지, 엔터테인먼트, 건설, 여행 등)의 수익성과 수익이 온도, 강우 및 폭풍 등의 변동성과 밀접한 관련이 있다. 1998년 미국 의회 증언에서 전 상무부 장관인 윌리엄 데일리는 미국 경제에서 1 조 달러 정도가 날씨에 민감하게 의존한다고 증언한 바 있다(Investopedia, 2019). 따라서 날씨로부터의 위험을 헤징하는 것은 사회 후생을 대폭 증가시킬 수 있는 주요한 혁신이라고 볼 수 있다.

최근까지 기상위험을 헤징하기 위한 주된 도구는 보험이었다. 그러나 보험은 치명적인 피해에만 적용되며, 예상보다 따뜻하거나 추운 날씨로 인한 수익감소에 대한 보험상품같은 것은 없다. 대규모 피해가 아닌 평균에서 어느 정도 벗어난 날씨에 대한 헤징 방안으로서 1990년대 후반부터 월별 또는 계절별 평균기온을 바탕으로 개발된 지수 값에 금액을 대응시킴으로써 날씨를 적절하게 "패키지"화하여 거래하는 기법이 대두되었다. 이에 따라 주가지수, 통화, 금리 및 농산물 거래 등의 기존 금융상품과 유사하다고 할 수 있는 날씨 파생금융상품이 거래 가능한 상품으로서 정립되게 되었다(Investopedia, 2019).

날씨파생상품이란 기온이나 강우량, 적설량, 서리, 태풍 등의 날씨 현상과 관련된 자료를 수치화해 이를 바탕으로 거래자들 간에 미래 일정 시점

에 금전을 수수할 것을 약속하는 계약이다.³⁾ 날씨 파생상품은 미 행정부의 에너지부문에 대한 규제 완화(전력회사간 경쟁체제의 도입으로 날씨위험을 가격인상으로 전가하지 못하는 것에 대한 대책)와 엘니뇨(El Nino) 현상의 심화와 병행하여 등장하였으며, 1996년 8월에 첫 거래 계약이 있었다. 시장 초기단계에는 장외시장을 통해 거래되다가, 미국에서는 1999년에 시카고 상품거래소(Chicago Mercantile Exchange, CME), 유럽에서는 2001년에 런던국제선물거래소(London International Financial Futures and Options Exchange, LIFFE)를 통해 거래소 중심으로 날씨 파생상품이 거래되기 시작했다.

날씨 파생상품의 구매자는 이상기온에 영향을 받는 산업이다. 날씨 파생상품 중에서 온도 파생상품은 주 수요자인 에너지회사의 요구에 맞게 디자인되어 있다. 시카고상품거래소(CME)에서 거래되고 있는 상품은 냉방도일지수(Cooling Degree Day: CDD)와 난방도일지수(Heating Degree Day: HDD)를 주요 지수로 사용하며⁴⁾, 런던국제금융선물거래소(LIFFE)에서 거래되고 있는 상품은 일 평균기온(Daily Average Temperature: DAT)를 이용한 월간지수(Monthly Index)와, 겨울 지수(Winter Season Index)를 사용한다.⁵⁾

날씨위험을 통해 발생하는 위험을 회피하기를 원하는 상품의 매입자가 매도자에게 프리미엄(파생상품의 가격)을 지급하고 파생상품을 구매한다.

3) 연합인포맥스, 2011.1.11., “[시사금융용어] 날씨파생상품,” (<http://www.einfomax.com/xen/>).

4) 미래 T₁시점에서 T₂ 시점까지의 CDD 및 HDD 지수는 다음의 정의에 의해 계산된다.

$$CDD(T_1, T_2) = \sum_{r=T_1}^{T_2} \max(Y_r - 18, 0); HDD(T_1, T_2) = \sum_{r=T_1}^{T_2} \max(18 - Y_r, 0)$$

위 식에서 18은 섭씨 18도, Y는 온도를 각각 의미한다. 위의 식에서 알 수 있듯이 CDD 지수가 높을수록 날씨가 더운 것을 의미하며, HDD 지수는 높을수록 날씨가 추운 것을 의미한다. CDD 지수는 하절기에 사용되며, HDD 지수는 동절기에 사용된다(CME Group, 2016).

5) DAT, MI, WSI 지수들을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$DAT = (T_{max} + T_{min})/2$$

$$MI = 100 + DAT(\text{Mean})1, n \text{ (n = number of days in calendar month)}$$

$$WSI = 100 + DAT(\text{Mean})1, n \text{ (n = number of days in the winter season period)}.$$

이후 이상기온이 발생할 경우 파생상품의 매입자는 매도자에 대해 콜옵션을 행사함으로써 매출에서 이상기온에 의해 발생하는 피해 부분을 보전한다. 반대로 이상기온이 발생하지 않을 경우에는 날씨에 의한 매출의 피해는 발생하지 않으며, 날씨 파생상품을 구입한 금액은 이상기온에 의해 영향받는 매출의 리스크를 헤지(Hedge)하는 프리미엄(비용)이 되는 것이다. 날씨파생상품 중 콜옵션에 대한 대략적인 설명은 <표 1>에 나타나 있다.

<표 1> 상품의 개요 (Call Option)

구분	매입자	매도자
거래성사 요인	상품매입자가 매도자에게 날씨위험을 전가시켜 위험을 최소화하려고 할 때 계약 성립	
목적	매도자에게 프리미엄을 지급하고 위험전가	매입자로부터 위험을 전가 받는 대신 프리미엄 수령
이상기온 발생시	매도자로부터 계약에 따른 일정액 수령, 매출 피해 최소화	매입자에게 계약에 따른 일정액 지급
이상기온 미발생시	날씨로부터 피해 없음, 상품매입에 따른 이익 이 발생하지 않음	프리미엄이 이익이 됨

자료: 박선동(2003)

실제 시장에서 날씨 파생상품이 어떻게 실행되고 있는지를 HDD 콜옵션의 경우를 예를 들어서 살펴보면 다음과 같다. HDD 콜옵션이란 일정시점 T1과 T2 사이에 겨울철에 난방이 필요한 수준으로 온도가 하강하는 난방도일지수(HDD)의 크기가 미리 정하여 놓은 행사지수(Exercise index)보다 크면 옵션의 만기일에 그 차이에 HDD 가격을 곱한 만큼을 옵션보유자가 옵션 발행자로부터 수령하는 계약이다. 만약 만기일의 실제 HDD 지수가 행사지수보다 낮으면 HDD 콜옵션의 가치는 0이 된다. 여기서 HDD 단위당 20달러, 혹은 10만 원 등과 같이 날씨파생상품 거래시장 별로 가격을 정해놓고 있다. HDD 가격은 시장에서 결정되는 것이 아니라 단위당 얼마로 미리 제도적으로 정해놓았다는 점에서 일반 재화나 여타 금융상품의 가격과 다르다.

구체적인 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 전력업체가 HDD 콜옵션을 구매한 경우, 겨울철 날씨가 예상보다 추워져서 난방용 전력수요가 과다하

여 추가적인 전력 생산비용이 발생할 때 난방도일지수(HDD)가 상승하고 따라서 HDD와 행사가격의 차이에 단위당 가격을 곱한 금액인 콜옵션의 가치가 증대함에 따른 수익을 통해 겨울철 이상저온으로부터의 위험이 헤징된다. 만약 실제의 HDD가 행사가격 이하일 경우는 저온으로 인한 전력 업체의 위험이 거의 없으며, 또한 HDD 콜옵션의 가치도 0이 될 것이다.

풋옵션(Put Option)의 경우, 콜옵션과는 반대로 여름의 고온 혹은 겨울의 저온 현상을 예상(선호)하는 업체(예를 들어, 음료회사 혹은 스키 리조트 등)들이 주로 구매하게 된다. 이 상품의 경우 CDD 및 HDD 등의 지수가 행사가격 이하일 때 옵션의 매도자가 옵션의 매입자에게 보상을 지급한다. 즉, 풋옵션은 콜옵션과 반대로 해당 업체의 매출에 도움이 되는 극단적 기후가 유지되지 못하는 것에 대한 위험을 헤징을 하는 상품이다.

시카고 상품거래소의 날씨 파생상품거래는 초기(2003년까지)에는 거래 규모가 크지 않았으며, 이후 거래소에서 거래에 대한 청산 서비스를 제공한 이후 거래량이 증가하기 시작하여 2006년에는 798,000건의 거래가 성사되었고, 2007년에는 약 1백만 거래가 거래되어 거래규모는 180억 달러를 기록하였다. 2008년 1월~11월 사이 거래는 737,506건의 거래가 일어나 전년 동기기간보다 16% 감소하였으나, 이는 2008년 금융위기 시기의 다른 선물 상품의 거래규모 감소보다는 감소 폭이 작은 수준이다(Morrison, 2009).

날씨위험관리협회(WRMA)의 조사결과에 따르면, 날씨파생상품 거래는 2008년경 글로벌 금융위기의 여파로 감소하였으나 2010년 이후 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 2011년 시장규모는 118억 달러를 기록하였는데, 이는 전년도 대비 약 18% 증가한 것이며, 2001년과 비교해서는 약 4.7배에 이르는 것이었다(김흥기, 2013). 그러나 이는 거래규모가 최고조에 이르렀던 2005/6년의 450억 달러에는 크게 못 미치는 수준이다.⁶⁾ 또한 Thind(2014)는 2013년에는 날씨파생상품의 거래가 거래소 중심에서 장외거래 중심으로 그 축이 이동하였다고 보고하였다. 큰 기대를 가지고

6) Thind(2014).

출범하였던 거래소 거래는 2010년 이후 크게 감소하였고 전체 시장에서의 비중도 미미하게 되었다.⁷⁾

이처럼 현재 날씨파생상품은 금융위기 이전에 비하면 시장은 크게 위축되었고, 전체 규모나 현황을 파악하는 것이 매우 어렵다. 그러나 날씨의 위험은 여전히 세계경제의 위험요인이며, 날씨의 위험을 헤징하는 것은 경제적으로 중요한 효율성 향상의 도구라는 점에 대하여서는 이론의 여지가 없다. 그러므로 금융시장의 신뢰가 완전히 회복되면 날씨파생상품 시장도 다시 성장할 것으로 전망할 수 있다.⁸⁾ 또한, 본 연구의 목적은 효율적인 시장이 존재한다는 것을 가상하여 기후(기온)변화의 전력시장에 대한 비용을 추정하는 것이므로 현실적인 시장이 부진하다고 하여도 연구의 의미가 줄어드는 것은 아닐 것이다.

III. 선행연구

우리나라의 기후변화 피해비용에 관한 연구로서 환경부(2011)는 여러 부문에서의 적응비용(Adaptation Cost)을 추정하였다. 이에 따르면 우리나라는 2050년 이후 기후변화에 따른 피해비용이 급증하여 2100년 누적 피해비용은 약 2,800조원에 이를 것으로 추정되었다. 추정대상 부문은 수자원 부문, 산림생태계 부문, 식량 부문, 건강 부문, 연안부문 등이며, 본

7) 강우량, 강설량 및 기온에 관한 옵션 등 60종의 날씨파생상품을 거래하는 시카고상품거래소(CME)는 세계 최대의 날씨파생상품 거래소이다. 여기에서의 날씨파생상품거래량은 2013년에 167,396 계약 건으로서 전년대비 16% 감소하였다. 2013년에는 대설이 있었음에도 시카고상품거래소에서의 강설량 파생상품의 거래는 없었으며 유럽에서의 달러표시 허리케인 파생상품시장의 거래도 없었다. 거래소에서 거래량이 상당한 수준으로 이루어지는 분야는 주간 기온 상품으로서 2012년의 10,100 계약 건에서 2013년에는 4,250 계약 건으로 두 배 증가하였다(Thind, 2014).

8) 예를 들면, Hoornaert(2018)는 벨기에의 맥주회사인 AB InBev의 경우 기온의 위험에 대한 날씨파생상품에 대한 헤징을 통하여 당회사의 시장가치-장부가치 비율을 6% 증대시킴을 보여주었다. 이는 날씨파생상품시장의 성장 잠재성을 보여주는 것이라 할 수 있다.

연구에서 다르고 있는 평균기온과 기온 변동성의 증대에 따른 에너지부분의 비용은 포함되지 않았다. 따라서 본 연구는 환경부(2011)와 같은 유형의 연구에서 보완적 내용으로 추가될 수 있을 것으로 판단된다.

Cao and Wei(2004)는 기온 파생상품에 대한 평가 프레임워크를 제안하고 날씨 위험의 시장가격을 추정하는 방법을 제시하였다. You(2004)는 미국의 기온 데이터를 이용하여 날씨 전망 프로세스를 사용한 몬테카를로 시뮬레이션을 실행하였고 이를 날씨파생상품(CDD) 가격모형으로부터의 추정결과와 비교하여 유사한 결과를 나타냄을 보여주었다. 또한, 이 결과로부터 위험의 시장가격은 날씨 파생상품의 가격을 결정하는데 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

이준행(2002)은 날씨 옵션상품의 가격을 결정하는 모형을 소개하고 실제 우리나라의 날씨에 대한 모형을 추정하고 이를 바탕으로 CDD/HDD지수의 옵션가격을 계산하였다. 이를 위해서 몬테카를로 시뮬레이션과 Burn-Rate방법을⁹⁾ 통해 가상적으로 서울 지역 온도에 대한 CDD 및 HDD 옵션의 가치를 계산하였다. 이 밖에도 김지민(2004) 그리고 정진희(2008) 등에서도 국내의 날씨 데이터를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 날씨 파생상품의 가격에 대한 연구를 진행하였다. 이 연구들은 그러나 날씨 프로세스의 파라미터가 변화할 때 날씨 옵션가격이 어떻게 변화할 것인가를 분석하지는 않았다.

손동희·임형준·전용일(2012)은 몇 가지 날씨모형을 적용하여 가상적으로 CDD 및 HDD 콜옵션의 가격을 시산하였다. 오차항의 주기성 모형여부에 따라 구분하여 분석한 결과, CDD 콜옵션과 HDD 풋옵션의 위험중립가치가 시간이 지남에 따라 상승한 것으로 나타나 기온상승의 추세를 금융시장에서 정량적으로 파악할 수 있는 것으로 나타났다. 손동희·임형준·전

9) Burn-Rate 방법은 옵션의 매입자가 이 상품을 보유하고 있을 때 과거의 날씨가 그대로 재현된다면 얼마나 가치를 가질 것인가의 관점에서 계산하는 방법이다. 이 방법은 과거 자료의 기간을 얼마나 이용하는가에 따라 가치평가가 크게 달라질 뿐만 아니라 옵션의 행사가격을 어떻게 설정하는가에 따라라도 결과가 달라지는 문제점이 발생한다(이준행, 2002).

용일(2012)은 CDD 콜옵션 가치의 변화율을 시뮬레이션을 통하여 추정하였으며, Vasicek모형에 기반한 CDD 콜옵션 가치분석에서 특정 행사가격 이상에서 옵션의 가치가 존재하여 기온상승 위험 회피를 위한 금융상품으로써 활용이 가능하다고 평가하였다. 손동희·임형준·전용일(2012)는 CDD 콜옵션의 가치가 대안적인 날씨 프로세스 상황 하에서 어떻게 달라지는지를 보여주었다. 그러나 날씨의 변화가 날씨파생상품의 가치를 변화시킨다는 점을 보여준 것임에도 불구하고 이것이 기후변화나 날씨변동의 경제적 가치일 수 있다는 점을 언급하지는 않았다.

최창희·신동훈·김창기(2012)는 날씨파생상품의 경제적 의미를 보다 구체적으로 분석하였다. 이 논문은 효용무차별가치평가(Utility Indifference Pricing) 개념을 적용하여 날씨파생상품의 가격을 도출하고, 우리나라의 도시가스산업에서 날씨파생상품(HDD 콜옵션)을 동절기에 판매하여 기온에 따른 변동성으로부터의 위험을 관리하는 방안을 보여주고 그로부터의 수익성 증대가 가능함을 실험을 통하여 보여주었다. 이 연구에서는 날씨파생상품을 적용하지 않았을 때의 기업의 부(富)의 최적화 문제의 해와 날씨파생상품이 적용되었을 때의 부(富)의 최적화 문제를 주어진 파라미터를 가정하여 해를 구하고 이 둘을 비교하였다. 이 연구는 날씨파생상품 도입으로 기업의 위험관리를 통하여 수익성이 증대하고 도시가스업체의 부가 증대된다는 것을 보여주었으나 기후변화의 피해비용에 대한 힌트를 주지는 않고 있다. 이상립(2013)은 전력시장에서의 날씨 예측의 재무적 가치를 추정하였다. 전력거래소의 발전계획은 날씨 예측에 근거하므로 예측에 오차가 발생하면 이는 비용으로 귀결된다. 따라서 날씨의 변동성이 증가하면 예측 위험을 증가시키고 이는 전력기업의 기업가치 하락으로 나타날 것이다. 2009~2013기간 동안 하절기 1도 예측오차에 따른 손실금액을 추정하였다. 그러나 동 연구는 날씨파생상품에 대한 분석이나 기후변화의 비용을 추정을 시도하지는 않았다.

최창희·신동훈·김창기(2012)와 유사한 성격의 연구로, Hoornaert(2018)는 벨기에의 맥주회사인 AB InBev가 날씨파생상품에 대한 헤징을 통하여 당회사

의 시장가치-장부가치 비율을 6% 증대시킴을 보여주었다. Hoornaert(2018)는 단지 낱씨파생상품을 이용한 헤징을 통하여 기업가치가 증대된다는 가능성만을 보여준 것이 아니고 세계최대의 맥주회사인 AB InBev의 매출 위험을 낱씨파생상품 헤징을 통해 줄임으로써 기업가치지표인 시장가치-장부가치 비율을 6% 증대시킴을 보여주었다. 이 연구에서 낱씨는 런던 히드로의 실제 기온데이터를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 생성하였고 여기에 적절한 낱씨파생상품 전략을 적용하여 수십 년간 적용한 결과 이윤이 증대함을 보여주었다.

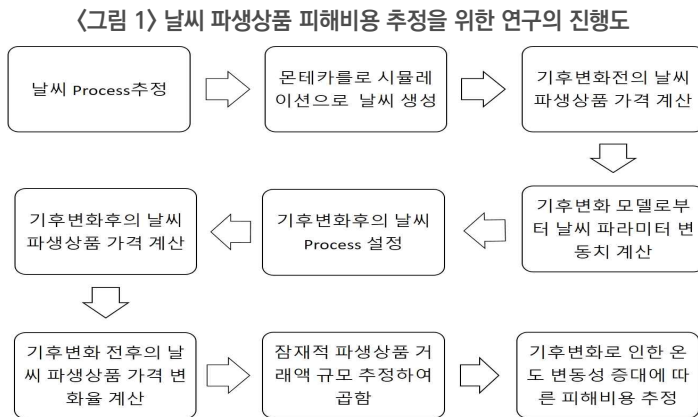
이처럼 낱씨프로세스를 추정하고 이로부터 낱씨파생상품의 가격을 계산하거나 낱씨파생상품 도입에 따른 기업가치나 후생증대의 크기를 추정하는 연구들은 다수 있다. 그러나 기존 연구들은 기온 파라미터의 변화, 즉 기후변화에 따른 낱씨파생상품가격변화로부터 기후변화의 비용을 추정하고자 시도하지는 않았다.

IV. 연구방법론

1. 연구 구조와 가정

본 연구의 주된 목적은 평균기온과 기온의 변동성이 변화할 때, 즉 기후변화가 발생하였을 때의 낱씨 파생상품의 가격변화를 시뮬레이션을 통해 추정하고 이로부터 기후변화의 피해비용을 추정하는 것이다. 낱씨 파생상품의 가격변화를 통해 기후변화의 영향의 경제적 가치추정을 시도하려면 우선 우리나라의 낱씨(기온) 프로세스를 추정하여야 한다. 그리고 기존의 기후변화 전망 연구를 활용하여 미래의 평균온도와 기온 표준편차에 대해 전망을 하여야 한다. 이러한 기후변화 이전과 기후변화 이후의 파라미터 변화를 전제로 각각의 파라미터에 기반한 낱씨를 시뮬레이션하여 그로부터 낱씨파생상품의 가격변화율을 계산하고 이로부터 낱씨파생상품 총가치의 변화액을 구한다.

그런데 날씨파생상품의 가치는 날씨 위험이 클수록 커진다. 날씨 위험이 클수록 이 위험을 헤징하는 파생상품의 가치는 커지기 때문이다. 따라서 날씨파생상품의 가치총액 변화는 기온 패턴 변화(즉 기후변화의 일부)로 인한 피해비용의 간접적 추정액의 하나로 간주될 수 있다. 이러한 일련의 추정 과정을 도식화하면 다음의 <그림 1>과 같이 정리될 수 있다.



먼저 첫 번째 단계에서는 과거 데이터를 이용하여 평균회귀 방법 등을 이용하여 날씨 프로세스를 추정하며, 이때 파라미터 값이 결정된다. 두 번째 단계에서는 이 추정된 날씨(본 논문에서는 기온) 프로세스의 파라미터를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 미래의 날씨를 생성한다. 세 번째 단계에서는 생성된 미래 날씨로부터 CDD, HDD 옵션에 대한 가치평가식을 이용하여 CDD, HDD 옵션 가격을 계산하는 단계이며, 이때 계산된 옵션 가격은 기후변화가 일어나기 전의 날씨 파생상품의 가격이다. 네 번째 단계에서는 기후변화 모델로부터 날씨 파라미터 변동치를 계산한다. 다섯 번째 단계에서는 기후변화 모델 등에 의하여 예측된 기후데이터를 근거로 미래 날씨 프로세스를 추정하고, 여섯 번째 단계에서는 추정된 기후변화 이후의 날씨 프로세스를 근거로 CDD, HDD의 가치평가식을 이용하여 CDD, HDD 가격을 계산한다. 이는 기후변화 이후의 날씨 파

생상품의 가격이다. 일곱 번째 단계에서는 앞서 구한 기후변화 전의 파생상품 가격과 기후변화 이후의 파생상품의 가격의 변화율을 계산한다. 여덟 번째 단계에서는 별도의 분석을 통하여 우리나라의 잠재적인 날씨파생상품 거래액 규모를 추정한다. 마지막 단계에서는 계산된 기후변화 이전과 이후의 날씨파생상품 가격변화율에 파생상품 거래액 규모를 곱함으로써 기후변화로 인한 헤징비용의 변화금액이 계산될 수 있다. 이렇게 계산된 비용은 기후변화로 인한 헤징비용의 변화액이다.

우리나라의 경우 날씨파생상품 시장이 존재하지 않으므로 가상의 잠재 거래규모를 추정하여 사용한다. 2007년 미국에서는 약 1백만 건이 거래되었고 거래액 규모는 180억 달러를 기록(Morrison, 2009)하였다. 그 이전인 2005/2006년에는 약 450억달러의 거래를 기록하여 최고치를 기록하였다(Thind, 2014). 그리고 2011년에는 118억달러의 거래액을 기록하였다(김흥기, 2013). 이 세건의 데이터 중 중간 값인 2007년의 값이 평균적인 규모라고 가정하고 우리나라의 잠재적인 날씨파생상품 시장규모를 우리나라와 미국의 상대 GDP 규모를 적용하여 추정하면 다음과 같다. 2017년 우리나라 명목 GDP는 1,529,756백만 달러였으며 2007년의 미국의 명목 GDP는 14,451,900백만 달러였다. 이 비율을 근거로 우리나라의 2017년 날씨파생상품의 잠재적 규모가 2007년 미국의 10%라고 가정하자. 이 10%의 비율을 적용하면 우리나라는 2017년 현재 경사가격 기준으로 약 10만건, 18억달러 정도, 즉 개략적으로 2조원 정도의 날씨 파생상품 거래가 있을 것으로 가정할 수 있다. 기온 파생상품은 CDD 콜옵션, HDD 콜옵션, CDD 풋옵션, HDD 풋옵션 등이 대표적이며 대체로 전력업체의 수요가 많은 것으로 알려져 있다. CDD 콜옵션이 $\frac{1}{4}$ (=25%) 이라고 가정하고 이중 약 20% 정도가 전력업체가 거래한 CDD 콜옵션이라고 가정하면 약 4천억 원 정도의 전력부문 CDD 콜옵션 거래액이 있었을 것으로 상정할 수 있다. 이것이 기준 시나리오 하의, 즉 정상적인 날씨 프로세스 하에서의 평균적인 CDD 콜옵션 거래액이라고 볼 수 있다.

한편 민경욱(2010)은 전력산업의 날씨파생상품 잠재수요를 추정하였는

데 산정기준은 잉여전력×평균판매단가를 날씨파생상품의 잠재수요 시장 규모로 간주하는 방식이다.¹⁰⁾ 잉여전력이란 총발전량과 전력수요의 차이로 정의된다. 민경욱(2010)은 이 값을 2015년에 3321억 원 정도인 것으로 추정하였다. 전력부문의 날씨파생상품 수요는 대부분 CDD 콜옵션일 것으로 추정되므로 2015년 기준 3000억 원 정도의 CDD 콜옵션 수요가 있다고 볼 수 있다.

이 두 가지 정보를 감안하여 2018년 기준으로 적어도 3000억 정도의 CDD 콜옵션 수요가 잠재적으로 있다고 보면 큰 무리가 없어 보인다.

미국에서 CDD 거래에서 적용된 행사가격의 수준은 대체로 화씨 65도 기준으로 계산된 CDD를 적용하고 있으며 CDD를 계산하는 기간도 상품별로 상이하며 행사가격 역시 계약에 따라 그리고 지역별로 상이하다. 따라서 본 연구에서 행사가격을 설정함에 있어서 준거가 되는 행사가격을 찾기는 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 행사가격을 과거의 평균기온과 평균기온에 표준편차를 더한 것의 두 가지의 경우로 설정하여 분석하고자 한다.

2. 날씨 프로세스의 추정

날씨 파생상품의 가격을 추정하기에 앞서 살펴본 것과 같이 먼저 날씨 프로세스와 파라미터의 추정이 필요하다. 날씨 프로세스를 추정하는 시계열 모형에는 평균회귀(mean-reversion)모형¹¹⁾과 Cao-Wei 모형,¹²⁾ 등 여러 모형이 있다. 본 연구에서는 평균회귀 모형을 채택하였다.¹³⁾ 장기평균

10) 이 방식은 잉여전력을 날씨변화에 대한 위험에 대한 보험적 성격으로 간주하였다. 만약에 날씨가 정확하게 예측된다면 잉여전력은 거의 불필요하다고 간주한다면 추가적인 잉여전력 생산원가만큼의 추가적인 비용이 발생하는 것이다. 따라서 이 위험을 헤징하기 위한 최대지불의사는 이 잉여전력 생산비용으로 간주할 수 있다.

11) 금융시장에 적용한 Vasicek(1977)의 모형을 차용한 이준행(2002)의 연구 등이 있으며, 파라미터의 변동성을 고려한 보다 일관적인 모형은 Dornier and Queruel(2000)이 있다.

12) Cao and Wei(2000).

13) Cao-Wei 모형이나 여타 다른 모형을 사용한 날씨프로세스에 기반을 둔 기후변화 추

기온이 시간에 걸쳐서 변화할 수 있다는 가정하의 평균회귀모형은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁴⁾

$$Y_t - Y_{t-1} = \theta_t - \theta_{t-1} + \alpha(\theta_{t-1} - Y_{t-1}) + \sigma\eta_t \quad (1)$$

여기서, Y 는 온도, θ 는 장기평균온도, α 는 평균회귀계수(mean-reversion factor), σ 는 표준편차, 그리고 η 는 표준 가우스 잡음(Standard Gaussian noise)을 각각 나타낸다. 위의 식 (1)을 통해 날씨의 파라미터를 추정할 수 있으며, 이 추정된 파라미터 값을 이용하여 정규분포를 가정하여 기후데이터를 생성할 수 있다. 그리고 생성된 기후데이터에 근거하여 HDD 및 CDD 옵션의 가격을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 식 (1)의 보다 더 단순화된 모형으로서 Vasicek(1997)과 이준행(2002)이 사용한 식인 식 (2)에¹⁵⁾ 추세성과 계절성을 반영하기 위한 식인 식 (3)을 결합하여 사용하기로 한다.¹⁶⁾ 추정하기 위한 데이터는 기상

정은 분명히 중요한 연구과제이다. 그러나 이와 같은 유형의 연구로서 첫 시도라고 할 수 있는 본 연구에서는 평균회귀모형만을 다루었으며 여타 모형의 결과와의 비교는 추후의 연구과제로 남겨놓기로 하였다.

14) 이러한 유형의 평균회귀모형 추정식은 Dornier and Queruel(2000)이 개발한 것이다.

15) 식 (1)은 장기 평균기온 파라미터 θ 가 시간에 걸쳐 변화할 수 있다는 모형이며, 식 (2)는 평균기온 파라미터 θ 가 시간에 걸쳐 고정되어 있다는 모형이다. 본 연구는 평균기온 파라미터가 시간에 걸쳐서 변동되는 것으로 전제하지 않고 고정된 평균기온 파라미터 θ 가 기후변화로 인하여 외생적으로 변화하였을 때의 날씨 파생상품 가격변화를 시뮬레이션으로 추정하고자 하는 의도로 수행되고 있다. 따라서 시간에 걸쳐서 파라미터가 변화하는 식 (1)은 본 연구의 목적상 적절하지 않으며 θ 가 고정된 보다 단순화된 형태의 식 (2)를 사용하였다. 본 연구에서 식 (3)은 θ 가 t 의 함수임을 보여주고 있으나 이것은 장기적 추세가 아니라 단지 계절변동만을 보여주기 위한 t 이다. 또한 이준행(2002)은 식 (1)의 추정식과 식 (2)의 추정식을 사용하였을 때 그 추정결과가 거의 차이가 없다고 하였다. 따라서 복잡하고 본연구의 전제와 모순될 수 있는 식 (1)이 아닌 식 (2)를 추정식으로 사용하였다.

16) 이준행(2002)은 추세성과 계절성을 반영하기 위한 식, 즉 $\theta_t = S \cdot t + C + E \cdot \sin(\frac{2\pi}{365}t)$

을 반영하여야 한다고 하였으나, 실제로는 이 식을 사용하지 않고 특정 일자에 대한 45년 동안의 평균온도를 사용하여 계절성을 추정하고, 추세는 연평균 온도의 추세를 반영하였다고 하였다. 그러나 본 논문에서는 $Y_t - Y_{t-1} = \alpha(\theta - Y_{t-1}) + \sigma\eta_t$ 식의 θ 에

청의 일별 평균기온 데이터의 1973년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지의 데이터를 사용하였다.¹⁷⁾

$$Y_t - Y_{t-1} = \alpha(\theta - Y_{t-1}) + \sigma\eta_t \quad (2)$$

$$\theta_t = S \cdot t + C + E \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}t\right) \quad (3)$$

추정하는 과정은 식 (2)와 식 (3)을 연립방정식으로 보고 2단계 최소자승 추정법을 통해 추정하였다. 최종적으로 추정되는 추정식의 형태는 다음의 식 (4)가 될 것이다.

$$Y_t - Y_{t-1} = \alpha(C + E \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}t\right) - Y_{t-1}) + \sigma\eta_t \quad (4)$$

평균온도의 추세변화는 기후변화의 추세로서 존재할 것이며, S는 평균온도의 추세변화를 나타내는 파라미터이다. 본 연구에서는 S=0으로 가정하였다. 그 이유는 다음과 같다. 본 연구는 날씨 프로세스를 생성한 후 주요 파라미터인 표준편차(σ)와 평균기온(μ)에 충격을 주어 그로부터 새로운 날씨 프로세스를 생성하는 시뮬레이션을 행할 것이다. 그러므로 충격과 무관하게 추세적으로 평균기온이 변화하는 설정인 $S \neq 0$ 항의 존재는 충격을 주는 과정과 중복된다. 따라서 본 연구에서는 S=0으로 놓고 추정하

$\theta_t = S \cdot t + C + E \sin\left(\frac{2\pi}{365}t\right)$ 을 대입한 추정식으로 α , S, C, E 등을 직접 추정하는 방식을 취하였다. 다만 계절적 순환을 보여주는 sine 함수상 t의 출발점을 정하기 위하여 추정 대상이 된 45년간 일평균온도 데이터는 1월~19일~1월 25일 사이에 최저 일평균온도를 기록한다. 이를 고려하여 최저 일평균온도를 1월 22일 시점에 맞추도록 t에 (t-113)의 날짜를 할당하여 추정하였다. 이 싸인함수의 순환에 대한 그림을 부록의 <부-그림 1>에서 확인할 수 있다. 다만 S 값은 평균온도 파라미터의 변화에 따른 CDD 가격변화를 추정하는 본 연구의 목적상 추세변화가 없는 상황 즉, S=0으로 놓았다.

17) 기상청의 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr/stcs/grnd/grndTaList.do?pgmNo=70>)로부터 데이터를 획득하였다.

는 것이 타당하다.

S^*_t 항을 제거하고 추정한 식 (3)의 추정결과는 다음 식 (5)와 같다. 평균 기온은 다음 식 (5)의 절편인 12.564도이다.

$$\theta_t = 12.564 + 12.905 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}(t-113)\right) \quad R^2 = 0.918 \quad (5)$$

($t = 590.65$) ($t = 428.99$)

한편 식 (3)으로부터의 $\hat{\theta}$ 을 사용하여 2단계최소자승법으로 추정한 식 (2)의 추정식은 다음과 같다. σ 의 추정값은 식 (4)의 추정 결과에서 나타난 평균잔차자승의 제곱근(RMSE: Root Mean Squared Error)을 사용하였다.

$$Y_t - Y_{t-1} = 0.223(\theta - Y_{t-1}) + 1.715\eta_t \quad (6)$$

두 식을 결합하여 추정된 날씨 프로세스는 다음과 같다.

$$Y_t - Y_{t-1} = 2.803 + 2.880 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}(t-113)\right) - 0.223 Y_{t-1} + 1.715\eta_t \quad (7)$$

이와 같이 추정된 평균회귀계수는 0.223이었으며, 변동성을 나타내는 표준편차는 1.715였다. 이 값을 이준행(2002) 및 You(2004)에서 추정한 세계 주요 도시들의 날씨 파라미터 값과 비교한 것이 다음 표 2에 나타나 있다. 본 연구의 추정결과는 기존 추정값들과 비교하여 큰 차이가 없었다. 이를 이준행(2002)의 서울 지역 기온에 대한 추정치와 비교하면 평균회귀 계수가 약간 작았고 변동성도 작았다. 미국 동부의 주요도시들과 비교하면 변동성과 평균회귀계수가 우리나라보다 미국 동부의 주요 도시들이 상당히 큰 것으로 나타나고 있다.

〈표 2〉 추정된 날씨 파라미터의 선행연구와의 비교

	한국평균 ^a	서울 ^b	보스톤 ^c	뉴욕 ^c	필라델피아 ^c	워싱턴 ^c
평균회귀계수(α)	0.223	0.265	0.3892	0.345	0.3203	0.3085
변동성(σ)	1.715	2.169	4.8397	4.1014	3.9391	3.6815

주: a) 본 연구의 추정결과; b) 이준행(2002); c) You(2004)

3. 기후변화에 따른 날씨 파라미터의 변화 설정

위에서 추정된 날씨 프로세스는 지난 45년간(1973~2017)의 데이터로부터 추정된 프로세스이다. 본 연구에서는 연평균 기온과 표준편차와 같은 파라미터의 변화가 없다면 앞으로도 이러한 프로세스가 유지될 것으로 가정하였다. 물론 이 가정은 현실에서 벗어나 있다. 실제로 과거 45년간의 일평균온도는 상승하였다. 그러나 본 연구의 목적은 평균온도의 상승을 예측하는 것이 아니라 향후 기후변화로 인하여 평균기온이 상승하거나 변동성이 변화할 때의 날씨 프로세스를 생성하여 그로 인한 날씨파생상품의 가격변화를 추정하고 그로부터 기후변화의 피해액 일부를 추정하는 것이다. 따라서 기온의 상승추세는 없는 것으로 간주하고 시나리오에서 기온 상승을 충격으로 주어 그 효과를 추정하기로 한다.

이러한 가정에 입각하여 평균기온은 식 (5)에서의 절편 값에 평균기온 변화 값을 더해주는 방식을 취하였고 기온의 변동성은 σ 값에 변화를 주는 방식을 취하였다.

4. 날씨 파생상품 가격의 추정

증권시장에서의 옵션가격결정모형은 Black-Scholes 모형이 가격결정모형으로 보편적으로 받아들여지고 있다. 그러나, 날씨 파생상품의 가격결정과 관련하여서는 Black-Scholes 옵션모형을 활용하는 것은 적절하지 않다. 그 이유는 날씨파생상품은 기초 자산(underlying asset)의 거래가 없어 기초상품과 파생상품을 이용한 위험 중립적 포트폴리오를 구성할 수 없기 때문이다. 더구나 날씨는 주식옵션의 기초자산인 주식과는 전혀 다른 음

직임을 보이고 있기도 하다. 또한, 날씨 파생상품의 닫힌 해(Closed-form solution)를 구하는 식은 매우 어려우며 신뢰성도 떨어지기 때문에 시장참여자들이 수급할 수 있는 날씨 파생상품의 가격결정 이론 및 모형은 아직 정립되지 못한 상황이다.¹⁸⁾

따라서 날씨상품 가격결정에 관한 연구는 주로 시뮬레이션을 이용하는 방식이 보편적으로 이용되고 있다. 많은 연구들에서 몬테카를로 시뮬레이션의 결과는 실제 CDD, HDD지수에 근사하게 나오는 것을 보여주고 있어서 이러한 방식의 채용이 타당함을 보여주고 있다. 본 논문은 다수의 선행 연구(이준행, 2002; You, 2004; 정진희, 2008 등)에서 사용한 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 차용했다. 본 연구는 하절기의 CDD 상품을 중심으로 분석하였다. 이처럼 날씨 프로세스를 이용하여 CDD지수가 생성되면 이로부터 CDD 콜옵션 등 기온파생상품의 가치를 계산할 수 있다. 기온 파생상품의 가치 산정식은 이준행(2002)에 의하면 다음과 같다.¹⁹⁾

CDD 콜옵션:

$$C_{CDD}(t, T_1, T_2, X) = e^{-r(T_2-t)} E_t[\max(CDD(T_1, T_2) - X, 0)] \quad (8-1)$$

CDD 풋옵션:

$$P_{CDD}(t, T_1, T_2, X) = e^{-r(T_2-t)} E_t[\max(X - CDD(T_1, T_2), 0)] \quad (8-2)$$

여기서, t 는 현재시점을 의미하며, T_1 은 옵션에서 정의되는 기간의 첫 번째 날, T_2 는 옵션에서 정의되는 기간의 마지막 날, X 는 옵션의 행사가격, 그리고 r 은 무위험 이자율을 각각 나타낸다. 이것은 수학적 해에 의한 방식이 아니라 사후적으로 CDD 지수가 알려졌을 때, 확률분포를 고려하지 않은 상태에서의 CDD 콜옵션과 CDD풋옵션의 가치 산정식으로서 지극

18) 이준행(2002)과 Jewson and Brix(2005) 참조.

19) HDD의 콜옵션 및 풋옵션은 동일한 식에 각각 CDD 지수 대신 HDD지수를 대입하면 각각 가격을 구할 수 있다.

히 단순한 계산식이다. 본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 100번의 시뮬레이션을 통하여 CDD 값을 생성하여 이 값을 이용하여 CDD 콜옵션의 평균값을 구하는 방식으로 CDD 콜옵션의 기대가격을 구하였다.²⁰⁾

본 연구에서는 기후변화에 의한 날씨 변동의 위험을 헤징하기 위한 비용을 CDD 콜옵션 만기일 기준의 콜옵션 가격으로 상정하여²¹⁾ 식 (2)의 가치계산식을 이용하여 산정하도록 한다. 본 연구의 시뮬레이션에서의 CDD는 여름기간 150일(5월 1일~9월 30일) 동안 섭씨 18도를 초과할 경우의 초과온도를 합한 숫자이다.²²⁾ 또한 행사가격(exercise price)에서 비록 가격이라는 표현이 사용되지만 이는 CDD 지수의 크기를 의미한다. 실제의 CDD 1 단위당 가치는 20 USD, 혹은 10만 원 등으로 금액 단위로 호칭될 수 있다.²³⁾

V. 추정결과

앞 절에서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 우리나라의 날씨 데이터로부터 평균회귀모형을 이용하여 날씨 프로세스를 추정하였으며 이를 바탕으로 날씨파생상품을 가격을 계산하기 위해 여름철 150일(5월 1일~9월

20) 여기서 콜옵션의 기대가격은 CDD 단위로 즉, CDD 지수의 크기로 나타나는 것이며 화폐단위의 가격은 아니다.

21) 식 (8-1)의 콜옵션 가격 계산식에 의하면, 옵션 만기일 시점의 CDD 콜옵션 가격은: $C_{CDD}(t = T_2, T_1, T_2, X) = e^{-r(T_2 - T_1)} E_{\max}(CDD(T_1, T_2) - X, 0) = \max(CDD(T_1, T_2) - X, 0)$ 이다. 그러나 이 식은 실제로 옵션만기시의 CDD 콜옵션 가격을 잔여기간에 해당하는 만큼 무위험이자율로 할인하여 주는 것이다. 본 논문은 기후변화 이후의 CDD 콜옵션 가격의 변화율을 계산하고 있으므로 할인을 부분은 무시하여도 된다.

22) CDD 콜옵션은 냉방지수가 일정수준을 초과하면 이 옵션을 특정 행사가격에 판매할 수 있는 권리를 말한다.

23) 이는 계약에 따라 달라질 수 있으며, 가격이 큰 의미는 없다. 단위당 1달러, 100달러, 혹은 10만 원으로 정하는 것은 계약방식에 따라 달라질 수 있다. 미국의 경우 관행적으로 CDD 1단위당 100달러로 되어 있다. 그러므로 진정한 CDD 단위당 가격을 알려면 미국의 날씨파생상품시장에서의 거래량과 거래액을 알아야 한다. 미국의 경우 2007년의 거래액은 180억 달러였으며 이를 경제 규모 등을 감안하여 2019년의 한국에 적용하면 개략적으로 2조원 정도의 날씨 파생상품 거래가 있을 것으로 가정하였다.

30일) 기간의 CDD 누적 지수를 계산하기 위한 몬테카를로 시뮬레이션을 하였다. 기후변화 전과 기후변화가 일어난 것을 가정하여 평균기온과 편차가 증가하는 12가지 시나리오를 상정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산한 CDD 지수를 바탕으로 날씨파생상품 가격을 계산하였다.

기후변화가 나타나는 상황에서의 CDD 지수의 변화를 시뮬레이션하기 위해 본 연구는 평균기온이 증가하는 상황을 시나리오에 고려하였다. 또한, 기후변화의 진행은 평균기온의 상승뿐만 아니라 평균기온 변화의 변동(Volatility)이 함께 나타나게 되므로, 평균회귀 모형을 통한 기온 생성과정에서 표준편차 파라미터 크기의 변동을 통해 이를 시나리오에 고려하였다. 평균기온의 변화에 대한 예측은 기상청(2019)에서 전망한 자료를 활용하였고, 평균기온의 변화의 변동요인인 표준편차의 경우 Homes et al (2016)에서 참고하였다. 구체적으로는 다음의 과정에 따라서 시나리오를 구성하였다. 먼저 기후변화가 없는 상황을 베이스라인으로 상정하며, 1973년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지의 대한민국의 전체 평균온도 데이터를 바탕으로 평균회귀모형을 적용하여 추정한 값인 평균온도(섭씨 12.564도)와 표준편차(1.715)를 베이스라인 시나리오의 파라미터에 적용하였다.

기상청(2019)은 제5차 IPCC의 기후변화 평가기준에서 새롭게 업데이트된 온실가스 증가 시나리오와 1 km 공간해상도의 상세 지역기후 자료를 이용하여 중장기 한반도 기후변화를 전망하였다. 4가지 시나리오(RCP2.6/4.5/6.0/8.5)별 분석결과 평균온도 증가가 21세기 전반기(2021~2040)에는 0.8도에서 1.5도, 21세기 중반기(2041~2070)에는 1.6도에서 2.8도, 그리고 21세기 후반기(2071~2100)에는 1.8도에서 4.7도까지 증가하는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 본 논문은 0.8도~1.8도의 평균온도 상승하는 세 가지 경우를 시나리오에 고려하였다. 먼저 현재 수준에서 평균기온의 변화가 없는 것을 베이스라인으로 하여 각각 0.8도가 상승하는 경우, 1.3도가 상승하는 경우, 1.8도가 상승하는 경우이다. 한편 평균온도 변화의 변동성을 평균회귀 모형에 고려하기 위한 표준편차 파라미터는 Homes et

al.(2016)에서 제시하고 있는 값인 0.5~3배의 변동 범위를 참조하여, 베이스라인(표준편차 변화 없음, 1.71) 기준 1.5배(2.57), 2배(3.43) 등 세 가지 상황을 시나리오에 고려하였다. 이상의 내용을 바탕으로 구성한 12가지 시나리오 구성은 다음의 표에 요약되어 있다.²⁴⁾

〈표 3〉 12가지 케이스 시나리오 구성

시나리오	평균기온 변화	표준편차 변화
I	없음	없음 (1배)
II	없음	1.5배
III	없음	2배
IV	0.8도 상승	없음 (1배)
V	1.3도 상승	1.5배
VI	1.8도 상승	2배
VII	0.8도 상승	없음 (1배)
VIII	1.3도 상승	1.5배
IX	1.8도 상승	2배
X	0.8도 상승	없음 (1배)
XI	1.3도 상승	1.5배
XII	1.8도 상승	2배

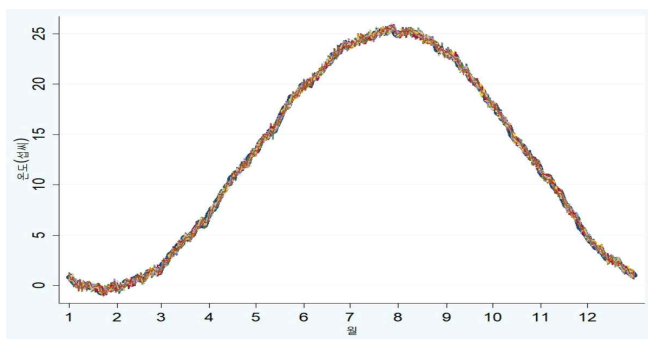
이상의 12가지 시나리오별 평균기온 및 변동성 변화 조건을 평균회귀 모형에 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 100년에 걸쳐서 시행하는 작업을 100회 시행하였다. 100년이라는 장기간에 걸쳐서 시뮬레이션을 수행하는 이유는 다음과 같다. 평균회귀 모형은 평균기온 등 파라미터의 충격이 주어지면 시뮬레이션을 장기간에 걸쳐 하여야만 안정적으로 수렴하는 성질을 가지며, 이를 보장하기 위하여 시나리오별로 100년에 걸쳐서 행하는 시뮬레이션을 행한 것이다. 이것은 실제로 100년이 경과하였다는

24) 본 연구는 장기적인 온도의 예측을 시도하거나 장기 평균온도 파라미터의 변화를 포함한 모형을 사용하지 않고 있다. 본 연구에서 장기평균온도 등의 파라미터는 외생적으로 주어졌었고 여기에 충격을 가하여 장기평균온도의 변화가 가져오는 전력시장 날씨위험의 가치를 추정하고 있다. RCP시나리오는 여기에 주는 기온 충격의 숫자를 자의적으로 부여하지 않고 의미있는 기존연구의 수치를 사용하고자 하는 의도에서 사용된 것이다.

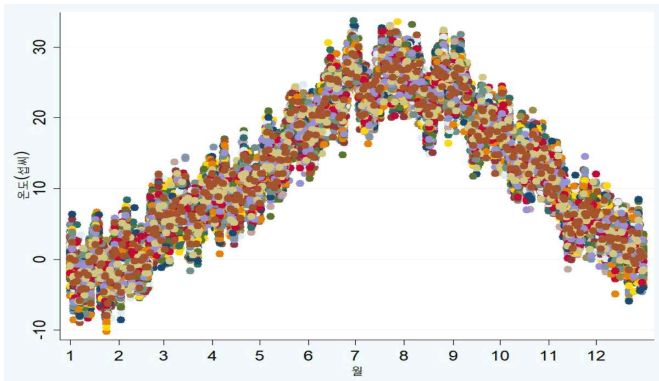
의미로 사용한 것은 아니며 파라미터가 변화하여 새로운 정상상태로 변환된 상태라는 개념으로 이해하여야 할 것이다. 이런 방식으로 100년에 걸쳐 행한 시뮬레이션의 최종년도 결과를 평균기온 및 기온변동성 변화에 따라 생성된 기온, 즉 기후변화로 인한 날씨 파라미터의 변동 충격 이후의 새로운 일 년간의 일평균 기온 예측치로 간주하였다. 이러한 시뮬레이션 각회의 CDD를 계산하고 행사가격과 CDD옵션가격 공식을 적용하여 행사 일 기준의 CDD 옵션가격을 계산하고, 이를 100회에 걸쳐 반복하여 평균값을 구하여 이를 CDD 옵션가격의 기대치로 간주하였다.

평균회귀모형을 이용한 날씨 프로세스를 시뮬레이션한 결과는 다음의 <그림 2>와 <그림 3>에 나타나 있다. 두 그림 모두 베이스라인(시나리오 I)의 경우를 보여주고 있는데, <그림 2>는 각 100회 시뮬레이션을 시행하면서 날짜별(1월 1일~12월 31일) 일평균기온의 100년 평균값들을 그래프로 그린 것이며, 그림3은 각 100회의 개별 시뮬레이션의 마지막 연도(100년째)의 일평균온도 값 전체를 그래프로 나타낸 것이다.

<그림 2> 시나리오 I : 100년간 일평균기온의 100회 전체 플롯



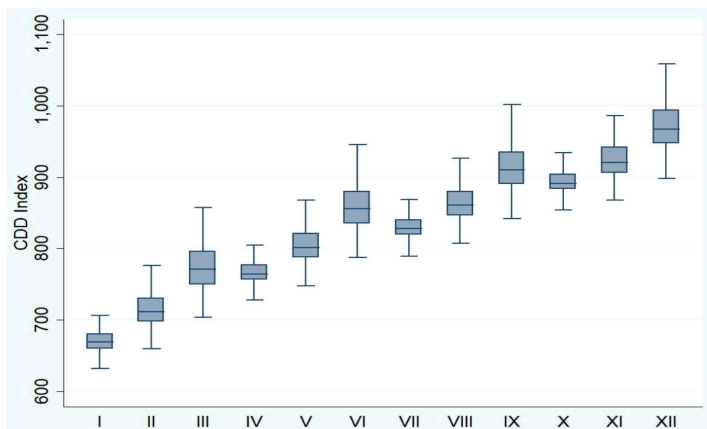
〈그림 3〉 시나리오 I : 100년째 일평균기온은 100회 전체 플롯



이상과 같은 전제하에 일평균기온의 연간기대값(μ) 및 변동성(표준편차, σ)의 변화에 따른 12가지 시나리오에 대해 CDD 가격변화 결과를 시뮬레이션한 결과는 〈표 3〉에 나타나 있다. 본 시뮬레이션에서의 CDD(냉방지수: Cooling Degree Day)는 다음과 같이 일정기간(여름 153일 기간) 동안 섭씨 18도를 초과할 경우의 초과온도를 합한 숫자로 정의하였다. CDD 콜옵션은 냉방지수가 일정수준을 초과하면 이 옵션을 특정행사가격에 판매할 수 있는 권리를 말한다.

평균기온(μ) 및 변동성(σ)의 변화에 따른 CDD 지수변화를 식 (8)을 적용하여 계산한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 앞서 시뮬레이션 결과 중 시나리오 I 즉, 기대치 변화 없음($\mu=12.56$), 표준편차 변화 없음($\sigma=1.715$)일 때의 CDD 지수 평균값은 669.07이었으며, 기대치 변화 없음, 표준편차 1.5배($\sigma=2.57$)일 때 (시나리오 II)는 CDD 지수의 평균값은 714.36으로 증가한다. 시나리오 IX (기댓값: $\mu+1.8=14.6$, 표준편차: $2\sigma=3.43$)에서는 CDD 지수의 평균값은 913.75로서 36.6% 증가하고 있다. 즉, 기온의 변동성이 커짐으로써 CDD 지수가 증가하고 있다. CDD지수의 시뮬레이션한 결과의 분포도는 다음 〈그림 4〉와 같으며, 평균값은 〈표 4〉에 나타나 있다.

〈그림 4〉 시나리오별 CDD 값의 분포



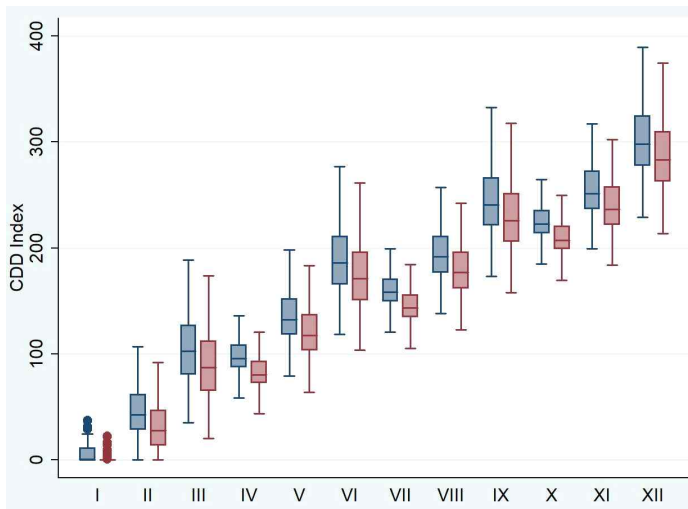
- 주: 1. 가장 아래의 선은 최솟값으로써, 제 1사분위에서 1.5 IQR(사분위간 범위)을 뺀 위치이다
 2. 박스의 하한은 제 1사분위(Q1)를 가리키며, 25%의 위치를 의미한다
 3. 박스의 중간 선은 제 2사분위(Q2)를 가리키며, 50%의 위치로 중앙값(median)을 의미한다
 4. 박스의 상한은 제 3사분위(Q3)를 가리키며, 75%의 위치를 의미한다
 5. 가장 위의 선은 최댓값으로써, 제 3사분위에서 1.5 IQR을 더한 위치이다

그러나 CDD 지수의 변화율은 기후변화로 인한 피해액을 나타내는 경제적 가치의 변화율은 아니다. 만기가 도래하기 이전의 CDD 콜옵션 가격은 만기 시의 CDD 콜옵션 가격 기대치의 현재가치이므로 분석을 단순화하기 위하여 만기 시의 CDD 콜옵션 가격 기대치를 기준으로 CDD 콜옵션 가격을 평가하기로 하자. 본 연구에서 100회의 시뮬레이션을 행하여 그로부터 만기시의 CDD 콜옵션 가격을 구하여 이를 평균한 값은 CDD 콜옵션의 기대치이다. 즉 CDD 콜옵션의 100회 평균값의 변화율을 그대로 CDD 콜옵션 가격 변화율로 보면 되는 것이다.

CDD 콜옵션 가격은 행사가격에 따라 크게 달라진다. 기준 시나리오(시나리오 I)는 지난 40년간의 일평균 온도 프로세스를 그대로 재현한 것이므로 현재 상태라고 볼 수 있다. CDD 행사가격은 상품별로 정하기 나름이다. CDD 콜옵션은 더위가 장기간 지속되어 냉방수요가 전력 공급능력을 초과할 위험성을 대비하기 위한 보험적 성격의 기온파생상품이다. 따라서 고유한 고정된 행사가격은 존재하지 않으며, 평균적인 CDD보다 약간 높은 수준을 행사가격으로 정하면 합리적일 것이다. 여기서 행사가격

을 자의적으로 정하여도 되지만 약간의 표준적 성격을 부여하기 위하여 하절기 평균 CDD 값을 행사가격으로 정한 설정과 하절기 평균 CDD 값에 표준편차를 더한 값을 행사가격으로 정한 설정의 두 가지를 살펴보았다. 이때 콜옵션의 가격은 이 행사가격보다 콜옵션가격이 높을 때의 그 차액의 값을 평균한 값(즉, 기대값)이 될 것이다. CDD 행사가격이 평균보다 높다고 하여서 CDD 콜옵션의 기댓값이 0이 되는 것은 아니다. 왜냐하면, 100번의 몬테카를로 시뮬레이션 중 한 번이라도 CDD 행사가격보다 높은 결과가 있으면 0보다 커지기 때문이다. 시나리오별 행사가격 설정별 콜옵션가격의 분포는 다음 <그림 5>에 나타나 있으며, 콜옵션가격의 기대치와 베이스라인 시나리오대비 증가율은 <표 4>에 나타나 있다.

<그림 5> 시나리오별 행사가격 CDD 옵션가격의 분포



- 주: 1. 파란색(왼쪽) 박스는 행사가격을 CDD 지수의 평균을 기준으로 하여 계산한 CDD 옵션가격의 분포를 나타내며, 빨간색(오른쪽) 박스는 행사가격을 CDD 지수의 평균에 표준편차를 더한 값을 기준으로 계산한 CDD 옵션가격의 분포를 나타낸다
2. 가장 아래의 선은 최솟값으로써, 제 1사분위에서 1.5 IQR(사분위간 범위)을 뺀 위치이다
3. 박스의 하한은 제 1사분위(Q1)를 가리키며, 25%의 위치를 의미한다
4. 박스의 중간 선은 제 2사분위(Q2)를 가리키며, 50%의 위치로 중앙값(median)을 의미한다
5. 박스의 상한은 제 3사분위(Q3)를 가리키며, 75%의 위치를 의미한다
6. 가장 위의 선은 최댓값으로써, 제 3사분위에서 1.5 IQR을 더한 위치이다
7. 최솟값과 최댓값을 넘어가는 이상치(Outlier)는 점으로 표시되어 있다

〈표 4〉의 날씨 위험피해 증가율 시뮬레이션 결과를 보면 평균기온의 상승과 기온변동성의 상승에 대하여 CDD 콜옵션가격이 상당히 민감함을 보여주고 있다.

행사가격을 CDD 평균치로 설정하였을 때의 CDD 콜옵션 가격상승율을 보자. 시나리오 II(표준편차 1.5배로 상승)의 경우에 CDD 가격증가율이 655%였으며, 표준편차 변화 없이 평균기온이 0.8도 상승하는 시나리오(시나리오 IV)의 경우에는 증가율이 1511%였다. 이러한 증가율 수치는 행사가격의 설정에 대하여 민감하게 변한다. 행사가격을 CDD평균치에 CDD 표준편차를 더한 값으로 설정하면 시나리오 II(표준편차 1.5배로 상승)의 경우에 CDD 가격증가율이 2219%였으며, 표준편차 변화 없이 평균기온이 0.8도 상승하는 시나리오(시나리오 IV)의 경우에는 증가율이 6065%였다.

〈표 4〉 시나리오별 CDD 콜옵션 가격 기대치

시나리오	평균 온도	표준 편차	CDD 평균값		콜옵션 가격 (행사가격을 CDD 평균 값인 669.07로 설정시)		콜옵션 가격 (행사가격을 CDD평균값 에 표준편차를 더한 값인 684.15로 설정시)	
				증가율		증가율		증가율
I	없음	없음	669.07	0	6.01	0%	1.33	0%
II	없음	1.5 배	714.36	6.8%	45.38	655%	30.75	2219%
III	없음	2 배	773.87	15.7%	104.80	1644%	89.72	6666%
IV	+0.8	없음	765.90	14.5%	96.82	1511%	81.75	6065%
V	+0.8	1.5 배	804.51	20.2%	135.44	2154%	120.36	8978%
VI	+0.8	2 배	858.62	28.3%	189.54	3054%	174.47	13058%
VII	+1.3	없음	828.93	23.9%	159.85	2560%	144.78	10819%
VIII	+1.3	1.5 배	863.36	29.0%	194.28	3133%	179.21	13415%
IX	+1.3	2 배	913.75	36.6%	244.68	3971%	229.60	17216%
X	+1.8	없음	893.69	33.6%	224.62	3637%	209.55	15703%
XI	+1.8	1.5 배	924.06	38.1%	254.98	4143%	239.91	17993%
XII	+1.8	2 배	970.59	45.1%	301.52	4917%	286.44	21502%

행사가격을 CDD 평균값으로 정한 설정을 따르면 그때 계산되는 CDD 옵션 가격증가율은 기후변화에 따른 CDD 옵션 가격증가율의 하한이라고 보아야 할 것이다. 본 연구에서는 CDD 평균값을 행사가격으로 설정하의 CDD 옵션가격 증가율을 계산하여 이를 기준으로 분석하기로 하자.

위험 증가 피해액 산정을 위해서는 현재 (2017년 기준) 우리나라에 CDD 콜옵션 등 날씨파생상품이 도입되어 시장이 효율적으로 운영되고 있다고 가정하여야 한다. 이를 전제로 2017년 기준의 가상의 CDD 콜옵션 시장규모를 추정하고 여기에 위에서 계산된 CDD 가격증가율을 적용하면 이로부터 평균기온과 변동성 변화로 인한 전력 부문 해징 비용의 증가액을 계산할 수 있다.

전술한 바와 같이 우리나라의 가상의 2017년 하절기 전력 기온파생상품수요액은 3000억 원 정도로 추정되며²⁵⁾, 시나리오 II(표준편차 1.5배로 상승)의 경우에 이를 적용하면 피해금액은 CDD 가격증가율이 65%이므로 무려 2조 2650억 원에 해당한다. 그리고 표준편차 변화 없이 평균기온이 0.8도 상승하는 시나리오 (시나리오 IV)의 경우에는 증가율이 1510%이고 그 금액은 4조 8300억 원에 이른다. 그러나 이 금액을 최근의 우리나라에서 블랙아웃 예방비용을 사용한 금액과 비교해보면 과대평가라고 보기는 어렵다. 중앙일보 기사에²⁶⁾ 의하면 2011년 9월~2013년 8월의 2년 기간 중 블랙아웃 방지비용으로 6조원을 지출한 것으로 나타나고 있다. 또한 2011년의 단 하루 동안의 순환정전사태의 피해비용으로 690억 원이 발생한 것으로 보고되었다.²⁷⁾

25) 산출근거는 IV장 1절에서 상세히 설명하였다.

26) 중앙일보, 2013.10.14., “2년에 6조원…블랙아웃 예방비용 ‘눈덩이’”.

27) 비즈니스위치, 2013.6.4., “[블랙아웃 공포]③재작년 순환정전 620억 피해”.

VI. 결론 및 시사점

우리나라를 비롯한 각국은 기후변화의 비용을 추정하는 연구를 수행하고 있다. 이 연구는 피해비용의 추정 연구이자 동시에 적응비용의 최대치를 추정하는 작업이기도 하므로 매우 중요한 분석이다. 기존의 연구에서는 기온의 상승과 변동성의 증대로 인한 전력 등 에너지 부문의 위험비용은 고려되지 않는 경우가 많았다. 본 연구를 통하여 이러한 비용이 기후변화의 비용에 추가되어 보다 합리적인 의사결정을 수행하는 데에 본 논문이 기여할 수 있으리라고 생각된다.

본 논문의 주된 메시지는 다음과 같다. CDD 콜옵션의 가격 상승은 여름의 날씨가 일정 수준 이상 올라갔을 때 보상받는 보험의 보험료(premium)의 상승과 동일한 의미로서 기온상승에 대한 전력업체 과부하 리스크 헤징 비용이 상승한 것으로 해석할 수 있다. 과부하 리스크가 0이면 CDD 콜옵션 가격은 0으로 될 것이며, 과부하 리스크가 증대하면 그에 상응하여 콜옵션 가격이 상승하게 되는데, 이러한 가격 상승율에 거래금액 규모를 곱하면 날씨 위험상승으로 인하여 증가된 비용의 총가치라고 간주할 수 있을 것이다.

본 연구는 이러한 방식으로 날씨파생상품 시뮬레이션 방법을 이용하여 기후변화의 사회적비용의 ‘일부’를 추정한 연구이다. 본 연구는 기온 프로세스를 추정하여 기온을 몬테카를로 방식으로 생성하고 이로부터 CDD 콜옵션 가격의 변화율을 추정하여 그로부터 피해비용을 화폐화하는 과정을 보여주었다. 이러한 방식으로 계산된 기후변화(평균기온 및 변동성 변화) 시나리오 하에서 하절기 전력 부하 위험 증가의 비용은 시나리오 II(표준편차 1.5배로 상승)의 경우 본 논문에서 적용한 가정하에서 적어도 2조원에 달하는 것으로 추정되고 있다.

기후변화의 사회적비용의 ‘일부’를 추정하였다는 표현의 의미는 본 연구에서 추정한 비용은 전력부문에서의 하절기 기온위험의 헤징비용에 한정된다는 것이다. 날씨(기온) 위험비용 중에서도 동절기 날씨 변화에 대한

부분은 포함되어 있지 않다. 또한, 극심한 기상변화에 따른 기상재해에 대한 직접적인 피해비용 역시 포함되지 않는다. 이러한 비용은 기상보험을 이용하여 평가하거나, 기상재해에 따른 직접적인 피해비용을 함께 고려하는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

한편, 본 연구는 우리나라에 날씨파생상품시장이 존재하지 않음에도 불구하고 미국의 과거 날씨 파생상품시장의 데이터를 적용하여 우리나라의 날씨파생상품 시장이 개설되어 효율적으로 운영되었을 상황 하에서의 가상적인 거래액을 단순한 가정을 적용하여 추정하여 사용하였다는 점에서 근본적인 한계가 있다. 추후 이점에 관한 보완 연구가 필요하다고 생각된다. 또한 본 연구에서는 단순한 형태의 평균회귀모형을 사용하였으나 장기평균기온 파라미터의 변동성을 허용하는 Dornier and Queruel(2000)의 모형이나 Cao-Wei 모형 등 다른 날씨 프로세스 추정 모형을 사용하여 그 결과를 비교하여야 연구의 결과의 신뢰성을 강화할 수 있을 것이지만 이는 추후연구과제로 남겨놓기로 한다.

■ 참고문헌 ■

- 기상청, 2019, 『한반도 기후변화 전망분석서』, 서울: 기상청.
- 김지민, 2004, “날씨옵션 가격결정에 관한 논문: 기상요소별 옵션상품개발에 대한 고찰,” 석사학위논문, 부산대학교, 부산.
- 김흥기, 2013, “날씨파생상품의 도입 및 운용방안에 관한 연구,” 『증권법연구』, 13(3), pp.165-196.
- 민경옥, 2010, “기후변화 관련 신상품의 도입검토,” 『KRX Market』, 60, pp.7-64.
- 박선동, 2003, “날씨파생상품 시장현황과 잠재수요분석,” 석사학위논문, 고려대학교, 서울.
- 비즈니스워치, 2013.6.4., “[블랙아웃 공포] ③재작년 순환정전 620억 피해”.
- 손동희·임형준·전용일, 2012, “기후변화의 위험헷지와 기온파생상품,” 『자원·환경경제연구』, 21(3), pp.465-471.
- 연합인포맥스, 2011.1.11., “[시사금융용어] 날씨파생상품,” <https://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=101&oid=013&aid=0002022054>.
- 이상립, 2013, 『전력시장에서의 날씨위험 추정 연구』, (수시연구보고서; 13-12), 의왕: 에너지경제연구원.

- 이준행, 2002, 날씨옵션상품의 가격결정에 대한 연구: CDD/HDD 지수 옵션을 중심으로, 『한국증권학회지』, 31(1), pp.229-255.
- 정진희, 2008, “날씨 파생상품 가격 결정 모형 연구,” 석사학위논문, KAIST, 대전.
- 중앙일보, 2013.10.14., “2년에 6조원…블랙아웃 예방비용 ‘눈덩이’”.
- 최창희·신동훈·김창기, 2012, “날씨파생상품을 이용한 국내 도시가스 산업의 날씨 위험 관리,” 『선물연구』, 20(4), pp.451-481.
- 환경부, 2011, 『우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II)』, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- You, S. Y., 2004, “Weather derivatives and seasonal forecasts,” 『한국증권학회지』, 33(4), pp.213-246.
- Cao, M. and J. Wei, 2000, “Pricing the weather,” *Risk*, 13(5), pp.67~70.
- _____, 2004, “Weather derivatives valuation and market price of weather risk,” *Journal of Futures Markets*, 24, pp.1065~1089.
- Dornier, F. and M. Queruel, 2000, “Weather derivatives pricing: Caution to the wind,” *Energy and Power Risk Management Weather Risk Special Report*, pp.30-32.
- Homes, C. R., T. Woollings, E. Hawkins, and H. De Bries, 2016, “Robust future changes in temperature variability under greenhouse gas forcing and the relationship with thermal advection,” *Journal of Climate*, 29(6), pp.2221-2236, DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00735.1.
- Hoornaert, A., 2018, “Hedging weather risk using weather derivatives: Overview & case study AB InBev,” Master’s dissertation, University of Ghent.
- Jewson, S. and A. Brix, 2005, *Weather derivative valuation: The meteorological, statistical, financial and mathematical foundations*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Morrison, J., 2009, “Managing weather risk - Will derivatives use rise?,” *Future Industry*, pp.26-29.
- Munich Re, 2018, *A stormy year-Natural catastrophes 2017*, Munich: Munich Re.
- Thind, S., 2014, “As temperatures tumble in North America, weather derivatives warm up,” *Institutional Investor*, <https://www.institutionalinvestor.com/article/b14zbksjmn4504/as-temperatures-tumble-in-north-america-weather-derivatives-warm-up#%2F.VjzJLyvYHR8>.
- USGAO, 2002, *Catastrophe insurance risks: The role of risk-linked securities and factors affecting their use*, (GAO-02-941), Washington, D.C.: USGAO.
- Vasicek, O. A., 1977, “An equilibrium characterisation of the term structure,” *Journal of Financial Economics*, 5 pp.177-188, DOI: 10.1016/0304-405X(77)90016-2.
- 기상청, “기상자료 개방포털,” <https://data.kma.go.kr/stcs/grnd/grndTaList.do?pgmNo=>

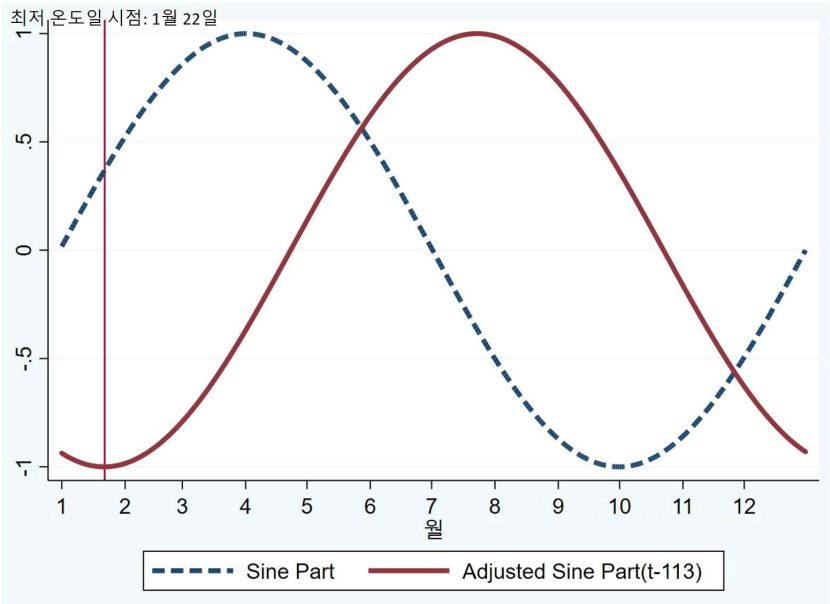
70, [2018.11.22]

CME Group, 2016, "Weather options overview," <https://www.cmegroup.com/education/articles-and-reports/weather-options-overview.html>, [2019.8.29]

Investopedia, 2019, "Market Futures: Introduction to weather derivatives," <https://www.investopedia.com/trading/market-futures-introduction-to-weather-derivatives/>, [2019.8.29]

<부록>

<부-그림 1> 기온추정 평균회귀모형의 싸인함수부분에서 t-113을 한 이유에 대한 부가설명



주: Sine Part는 평균회귀모형에서 계절순환을 모형화한 부분인 싸인함($\frac{2\pi}{365} \cdot t$)을 그래프로 그린 것이며, Adjusted Sine Part는 이를 최저온도일에 맞추기 위해 수정한 싸인함($\frac{2\pi}{365} \cdot (t - 113)$)을 그래프로 그린 것이다

<부 - 표 1> 우리나라 45년간 일평균 온도 및 일간편차의 표준편차

연도	평균 온도	일간 편차의 표준편차	연도	평균 온도	일간 편차의 표준편차	연도	평균 온도	일간 편차의 표준편차	연도	평균 온도	일간 편차의 표준편차
1973	12.47	1.727	1985	12.19	1.763	1997	12.77	1.720	2009	13.05	1.764
1974	11.42	1.741	1986	11.61	1.670	1998	13.54	1.747	2010	12.71	1.977
1975	12.66	1.370	1987	12.31	1.844	1999	12.85	1.727	2011	12.45	1.697
1976	11.68	1.760	1988	12.13	1.736	2000	12.52	1.693	2012	12.37	1.739
1977	12.39	1.814	1989	12.83	1.615	2001	12.72	1.624	2013	12.96	1.800
1978	12.88	1.625	1990	13.11	1.771	2002	12.63	1.841	2014	13.15	1.707
1979	12.67	1.757	1991	12.30	1.578	2003	12.50	1.665	2015	13.47	1.636
1980	11.25	1.908	1992	12.47	1.596	2004	13.21	1.674	2016	13.62	1.860
1981	11.49	1.726	1993	11.83	1.657	2005	12.40	1.720	2017	13.12	1.746
1982	12.48	1.685	1994	13.28	1.704	2006	12.95	1.848			
1983	12.38	1.735	1995	12.10	1.540	2007	13.29	1.524			
1984	11.80	1.650	1996	12.10	1.710	2008	12.99	1.623			

<부 - 표 2> 우리나라 일평균 온도의 45년간 평균과 표준편차

일평균온도 전년도 평균	일평균온도 전년도 표준편차
12.59	9.54

이강일: Oklahoma State University에서 농업경제학 박사학위를 취득하고, 현재 고려대학교 에너지환경대학원(그린스쿨)에서 연구교수로 재직 중이다. 에너지·환경 정책관련 주제에 대해 실증계량분석 및 행위자기반모형(Agent-Based Model and Simulation)을 활용하여 연구하고 있다(kangil_lee@korea.ac.kr).

한택환: 미국 University of Utah에서 경제학 박사학위를 취득하고 현재 서경대학교에 교수로 재직 중이다. 환경경제학과 환경정책의 다양한 주제들을 연구하여왔으며 통합적인 관점에서 환경과 경제를 분석하는 데에 주력하고 있다. 대외경제정책연구원, 산업연구원, 한국환경정책평가연구원, 한화경제연구원 등에 재직한 바 있으며, World Bank, ESCAP, 환경부 등의 다양한 연구 과제를 수행한 바 있다(twhan@skuniv.ac.kr).

투 고 일: 2019년 11월 03일
심 사 일: 2019년 11월 18일
게재확정일: 2019년 11월 24일