

국제 탄소배출권 가격의 동조화 현상에 관한 분석*

An Empirical Analysis on the Co-Movement between International Carbon Emission Trading Prices

김기진** · 원두환*** · 정수관****

Kijin Kim · DooHwan Won · Sukwan Jung

요약: 본 연구는 우리나라를 포함한 유럽연합, 뉴질랜드 탄소배출권 가격 간 동조화 현상을 분석하였다. 탄소배출권 가격 간 공적분 관계와 VECM(vector error correction model)을 통해 Granger 인과관계가 검토되었고, 충격반응함수를 통해 시장 간 파급경로가 분석되었다. 분석 결과 세 시장의 배출권 가격 간 공적분 관계가 존재하여 동조화된다는 것을 확인하였다. 배출권 가격 사이에 단기 인과관계는 없지만, 장기 인과관계가 존재하여 배출권 가격 간 강 인과관계가 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 배출권 가격 간 상호 파급효과가 큰 것으로 나타났다. 본 연구는 우리나라 탄소배출권 가격과 다른 국가의 탄소배출권 가격 간 동조화 현상과 동태적 인과성 및 파급경로를 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

핵심주제어: 탄소배출권 시장, 동조화, 시장통합, 공적분, 인과성 검증

Abstract: In this study, we analyzed the co-movement between the carbon emission trading prices in South Korea, the European Union, and New Zealand. We examined the co-integration relationship and the Granger causality between the carbon emission prices and analyzed the transmission path through the impulse response function. Consequently, we found a co-integration relationship between them. Although no short-term causality between the prices existed, a long-term causal relationship did exist, which contributed to a strong mutually causal relationship. The impulse response function also revealed the transmission path between the carbon emission prices. It is meaningful for analyzing the causality between the South Korean carbon market and other countries' carbon emission markets through the Granger causality test, which fully exploits long-term stable relationships.

Key Words: Carbon Emissions Trading Market, Co-Movement, Co-Integration, Granger Causality Test

* 이 논문 또는 저서는 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017S1A5B8057488).

** 주저자, 부산대학교 일반대학원 경제학과 박사과정

*** 공동저자, 부산대학교 경제학부 교수

**** 교신저자, 창원대학교 경영대학 글로벌비즈니스학부 조교수

I. 서론

1997년 교토의정서 상 온실가스 감축 의무 이행을 위한 경제적 유인책의 하나로써 탄소배출권 거래제(ETS, Emission Trading Scheme)가 도입되었다. 이후, 2005년 유럽연합을 시작으로 세계 각지에서 탄소배출권 거래소가 설립되어 운영 중이다. 대다수의 배출권 거래시장은 상호 연계되지 않고 서로 상이한 제도와 거래소를 가지고 운영되고 있다. 유럽연합의 배출권 시장의 경우 개설 초창기에 배출권의 초과공급으로 2010년대 중반까지 배출권 가격이 지속적으로 하락하였지만, 우리나라의 배출권 시장의 경우 배출권 수급의 불확실성이 높아 배출권이 과소 공급되어 가격이 급등하였다. 이처럼 각 지역의 배출권 시장은 분리되어 운영되어 배출권이 상호 호환되지 않기에 시장 간 가격 격차가 어느 정도 발생하고 있다.¹⁾

효율시장가설(efficient market hypothesis)에 따르면 개별 배출권 가격은 경제 현실과 합리적으로 연계되어 있기 때문에 시장에서 이용 가능한 모든 정보를 포함 한다(Seifert et al., 2008). 탄소배출권 가격은 임의보행(random walk)하기 때문에 탄소배출권 가격 하나만으로 향후 움직임을 예측하기는 어렵다. 일물일가 법칙(law of one price)에 의해 거래비용을 제외한다면 동일한 탄소배출권을 거래하는 시장 간 가격은 장기적으로 동조화한다(모정운 등, 2005; 한택환·김서경, 2007; 박순철·조용성, 2017). 개별 탄소배출권 가격의 예측은 어렵더라도, 탄소배출권 시장의 가격 간 동조화 현상을 통해 시장의 예측이 가능해지기 때문에 동조화 현상은 탄소배출권 시장을 예측하거나 정책을 수립하는데 상당히 중요한 의미를 갖는다.

탄소배출권을 포함한 원유 등 상품 가격 간 동조화 여부로 시장통합을 판단하는데 공적분 분석과 Granger 인과관계 분석이 많이 활용되고 있다. 배출권 가격의 동조화를 분석한 연구로 모정운 등(2005), 한택환·김서경

1) 배출권 시장이 지역별 분리되어 운영되더라도 기후협정에 대한 전망, 국제적 여론, 기후변화의 진행 정도, 에너지 가격 및 수급을 포함한 여러 영향으로 배출권 가격은 동조화할 가능성이 있다(한택환·김서경, 2007).

(2007), Mizrach(2012), 박순철·조용성(2017) 등이 있다. 공적분 분석은 배출권 가격 간 동조화 현상의 유무를 파악하는 데 유용하지만, 동조화의 정도나 배출권 가격 간 상호 영향의 방향에 관한 정보를 제공하지 못하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 Granger(1969) 인과성 검정이 활용되고 있다. 통상적인 Granger 인과성은 장기균형관계에 관한 정보를 활용하지 못하는 한계가 있어 벡터오차수정모형(VECM, Vector Error Correction Model)을 통해 장·단기 Granger 인과성을 분석하는 확장된 방법의 사용이 권장되고 있다. VECM을 통한 장단기 인과성을 분석한 연구는 에너지 소비와 경제성장(Oh and Lee, 2004; Ruhul et al., 2008), 국제원유시장의 통합(Wilmot, 2013; Ji and Fan, 2015; 김진수 등, 2007; 박호정·윤원철, 2006) 등 자원 및 환경 분야에서 사용 중이지만, 탄소배출권 시장 특히 우리나라 탄소배출권 시장을 대상으로 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 탄소배출권 가격의 불안정성을 고려하여 탄소배출권 가격 간 공적분 관계를 확인하고, VECM을 통해 탄소배출권 가격 간 장단기 인과성을 검토한다. 그런 연후에 충격반응함수를 통해 한 시장에 가해진 충격이 다른 시장에 파급되는 경로를 분석할 것이다. 분석 대상은 우리나라를 포함한 유럽연합과 뉴질랜드 배출권 가격이다.²⁾ 우리나라 탄소배출권 시장이 개설된 지 얼마 되지 않아 이에 대한 실증연구가 미흡한 상황에서 다른 지역 배출권 시장과의 연계와 통합의 가능성에 관한 연구는 배출권 시장 운영의 효율성과 안정성을 제고하는 데 있어 유용한 정보와 시사점을 제공할 수 있을 것이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서 배출권 가격에 대한 기존 연구를 살펴본다. 이후 제Ⅲ장에서 분석에 사용된 실증 모형을 소개한 후 제Ⅳ장에서 분석에 사용된 자료와 추정 결과를 살펴본다. 마지막으로 제

2) IEA(International Energy Agency)에 의하면 2016년 기준 전 세계 이산화탄소 배출량의 60.5%가 에너지 생산(전기 및 열에너지)과 산업 분야에서 발생하였다. 현재 국가 혹은 초국가적(super national) 단위로 배출권 거래제도를 시행하고 있는 지역 중 우리나라와 유럽연합, 뉴질랜드 세 지역만이 에너지 생산과 산업 분야를 모두 포함하여 배출권 거래제도를 시행하고 있다(ICAP, 2019).

V장에서 본 연구의 결과를 요약하고 시사점을 제시한다.

II. 선행연구

2005년 유럽연합의 탄소배출권 시장이 개장된 이후 배출권 시장에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 배출권 시장에 대한 연구는 가격을 중심으로 이루어지고 있다. 배출권 가격에 관한 대다수의 연구는 배출권 가격의 변동성, 배출권 가격의 결정요인, 배출권 시장의 통합에 관한 연구에 초점을 두고 있다.³⁾ 배출권 시장의 통합에 관한 연구는 모정윤 등(2005), 한택환·김서경(2007), Mizrach(2012), 박순철·조용성(2017) 등 상대적으로 적은 편이다. 이들은 동일한 지역 내 서로 다른 거래소의 배출권 가격 혹은 멀리 떨어져 있는 지역의 배출권 가격 간 동조화를 검증하여 시장의 통합 여부를 판단하고 있다.

모정윤 등(2005)은 공적분 검정을 바탕으로 유럽의 할당 탄소배출권(EUA, European Union Allowances)을 거래하는 지역 내 서로 다른 거래소인 EU-ETS와 Nord Pool의 배출권 가격 간 일물일가 법칙의 성립 여부를 분석하였다. 분석 결과, 두 거래소의 EUA 가격 간 장기균형관계가 존재하여 시장 간 가격 격차는 일정한 수준으로 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 EUA 가격 간 일물일가의 법칙이 성립하며, 두 시장은 하나의 시장을 형성함을 확인하였다. 또한, Granger 인과성 검정을 통하여 규모가 더 큰 EU-ETS가 Nord Pool 시장을 선도(leads) 하는 것으로 나타났다.

한택환·김서경(2007), Mizrach(2012)는 서로 다른 지역의 배출권 시장을 대상으로 시장 통합의 가능성을 분석하였다. 한택환·김서경(2007)은 유럽연합 내 EUA를 거래하는 ECX(European Climate Exchange), NordPool과 배출권 감축 의무가 없는 미국 내에서 자발적으로 운영되는 CCX(Chicago Climate

3) 탄소배출권 가격의 결정요인에 대해 실증 분석한 국내 연구로 홍이슬 등(2016), 박순철·조용성(2017), 정수관(2018) 등이 있다. 홍이슬 등(2016), 정수관(2018)은 유럽을 대상으로, 박순철·조용성(2017)은 우리나라를 대상으로 분석하였다.

Exchange)의 할당 배출권 선물 가격을 대상으로 분석을 진행하였다. 분석 결과 세 시장 가격 간에는 장기균형관계가 존재하는 것으로 나타났다. 두 거래소씩 쌍을 이루어 분석한 결과에서 EUA 선물 가격과 CCX의 선물 가격 간에는 동조화 현상이 존재함을 확인하였다. VAR(Vector Autoregressive)를 통한 Granger 인과관계 분석에서 EUA를 거래하는 유럽의 두 거래소 배출권 가격 간에는 선도-지연 효과가 존재하지만, 유럽의 ECX, NordPool 배출권 가격과 지리적으로 떨어져 있는 미국 CCX 가격 사이에는 선도-지연 효과는 없다는 것을 발견하였다.

Mizrach(2012)는 유럽연합의 EUA 현물 가격과 미국 북동부 지역의 RGGI(Regional Greenhouse Gas Initiative) 배출권 현물 가격의 연계성을 분석하였다. RGGI 가격과 EUA 가격 간 공적분 관계가 존재하고, RGGI 가격에 \$0.10 충격을 가하면 EUA 가격이 한 달에 \$0.64 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 미국에서 배출 총량거래제(cap and trade)가 도입되면서 두 시장 간 장기균형관계가 사라졌다.

박순철·조용성(2017)은 우리나라 탄소배출권 시장의 할당배출권(KAU, Korea Allowance Unit)과 상쇄배출권(KCU, Korea Credit Unit) 간 공적분 관계를 분석하였다. 우리나라 탄소배출권 시장이 개설된 후 일정 기간(2015년 1월~2016년 6월)을 대상으로 분석한 결과, 두 가격 간 공적분 관계가 존재하였다. 그러나, 실제 거래가 발생하지 않은 2015년 9월까지의 자료를 제외하고 분석한 결과 두 가격 간 장기균형관계가 없는 것으로 나타났다.

선행연구를 살펴보면 배출권 시장의 통합을 분석하는 대부분의 연구(모정운 등, 2005; 한택환·김서경, 2007; Mizrach, 2012)는 유럽연합의 할당 배출권 가격 간 혹은 유럽연합의 배출권 가격과 북미지역 배출권 가격 간 동조화 여부를 확인하기 위해 공적분 분석을 활용하고 있다. 공적분 관계는 배출권 가격 간 동조화를 통한 시장통합 여부를 파악하는 데 유용하지만, 배출권 가격 간 상호관계의 방향성이나 동조화 정도에 관한 정보를 제공하지 못하는 한계가 있어 Granger 인과성 분석이 보완적으로 활용되

고 있다. 한편, 기존연구의 분석 대상은 유럽 지역의 배출권 시장과 북미 지역의 배출권 시장에 한정되어 있고, 우리나라의 배출권 시장에 대한 연구(박순철·조용성, 2017)는 상대적으로 미미하다. 박순철·조용성(2017)은 할당배출권과 상쇄배출권 가격 간 동조화를 분석하지만, 우리나라 배출권 시장과 다른 지역의 배출권 시장의 연계 가능성을 분석한 것은 아니다. 이처럼 국내 배출권 시장과 다른 지역의 배출권 시장의 통합에 관한 연구가 부재한 이유는 우리나라 배출권 시장이 개설된 지 4년 남짓하여 실제 배출권 가격을 활용한 연구가 어려운 점이 있었기 때문이다.

이에 본 연구에서는 우리나라, 유럽연합, 뉴질랜드의 할당배출권 가격 간 동조화 여부를 분석하기 위해 공적분 분석과 VECM을 통한 장단기 Granger 인과성 검정을 시행한다. VECM에 기반한 Granger 인과성 검정은 장기균형관계의 중요한 정보를 고려함으로써 표준 Granger 인과성 검정이 가질 수 있는 모형 설정의 오류를 피할 수 있다는 장점이 있다.

III. 실증모형

본 연구에서는 탄소배출권 가격 간 상호연관성 혹은 통합 여부를 분석하기 위해 공적분 관계와 VECM을 통한 Granger 인과성을 분석한다. 먼저 공적분 관계를 파악하기 위해 VAR 모형을 통한 Johansen(1991) 공적분 검정 방법이 사용되었다. Johansen(1991) 방법은 VAR 모형을 활용해 공적분 관계를 검정하기 때문에 단일방정식에 근거한 Engle and Granger(1987)의 공적분 검정 방법에서 종속변수의 선택에 따라 결과가 달라질 수 있는 문제를 보완해 준다.

공적분 관계가 존재한다는 것을 확인하면, 배출권 가격 간 Granger 인과관계를 분석하기 위해 배출권 가격 간 장기균형관계를 활용한 VECM이 이용된다(Masih and Masih, 1998; Oh and Lee, 2004). Granger(1969) 인과성 검정은 배출권 가격 간 시간상 인과관계를 분석하는 방법으로, 어떤

배출권 가격의 원인이 다른 배출권 가격에 미치는 효과에 대해 시간상 선행 혹은 후행하는 것을 의미한다. 배출권 가격 간 공적분 관계의 존재 유무에 따라 VAR 혹은 VECM이 이용될 수 있다. Granger 인과성 검정은 시계열 변수 간 예측 가능성을 검정하기 때문에 배출권 가격 혹은 배출권 가격 간 관계의 안정성을 전제한다. 따라서 배출권 가격이 불안정할 때 공적분 관계가 없으면 차분 후 VAR가 이용된다. 공적분 관계가 있으면 장기균형관계를 포함한 VECM이 이용된다. 공적분 관계가 존재함에도 불구하고, VAR가 이용된다면 장기균형관계에 관한 중요한 정보를 배제하기 때문에 모형 설정의 오류가 발생할 수 있다(Enders, 2008). 이러한 점에서 공적분 관계가 존재하면 VECM을 통한 인과성 검정이 표준 Granger 인과성 검정보다 강건하다고 볼 수 있다.

불안정한 배출권 가격 간 공적분 관계가 존재하면 VAR모형을 식 (1)과 같은 VECM으로 변환할 수 있다(Johansen, 1991).

$$\Delta Y_t = \Pi Y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta Y_{t-i} + \epsilon_t \quad (1)$$

여기서 Δ 는 차분 연산자이고, $Y_t = (\ln EU_t, \ln New_t, \ln Kor_t)'$ 는 t 시점에서 유럽연합, 뉴질랜드, 우리나라의 할당배출권 가격의 로그를 취한 값의 $k \times 1$ 벡터이다. 탄소배출권 가격의 변화는 단기 동학(Γ_i)과 장기 균형의 조정(Π)으로 설명된다. $\Pi = 0$ 이면 공적분 관계가 없기 때문에 차분변수를 활용한 VAR가 사용되고, $\Pi \neq 0$ 이면 공적분 관계가 존재하기 때문에 VECM이 적절한 추정 방법이다.

위의 식에서 $\Pi = \alpha \beta'$ 로 나타낼 수 있는데 여기서 β' 은 행렬 Π 의 행 혹은 열에서 r 개의 선형독립의 최대 수로 공적분 벡터(cointegration vector)를 나타내고, α 는 행렬 Π 에 있는 선형독립의 결합 관계로 표현하는 데 필요한 모수로 조정계수벡터(adjustment coefficient vector)를 나타낸다. 행렬 Π 의 위수(rank)는 공적분 벡터의 수와 같다. Johansen(1991, 1995)의 공적분

검정 방법은 MLE(Maximum Likelihood Estimator)를 통해 Π 의 추정과 위수의 개수를 검정한다.

VECM을 통한 Granger 인과성 검정은 차분변수와 장기균형관계의 계수값의 유의성을 검정하는 방법이다. 차분변수 계수값의 유의성은 단기 인과성 혹은 약(weak) 인과성을 나타내고, 오차수정항의 계수값의 유의성은 장기 인과성을 나타낸다. 단기 인과성과 장기 인과성을 결합적으로 만족하는 경우 강(strong) 인과성이 존재하는 것을 의미한다(Masih and Masih, 1996; Oh and Lee, 2004). 식 (1)에서 $H_0 : \Gamma_1 = \Gamma_2 = \dots \Gamma_{p-1} = 0$ 에 대해 귀무가설이 기각하면 단기 인과관계가 성립하고, 그렇지 않으면 단기 인과관계가 없다는 것을 의미한다. $H_0 : \Pi = 0$ 에 대해 귀무가설이 기각하면 장기 인과관계가 성립하고, 그렇지 않으면 장기 인과관계가 없다는 것을 나타낸다. 결합적으로 $H_0 : \Gamma_1 = \Gamma_2 = \dots \Gamma_{p-1} = 0 \ \& \ \Pi = 0$ 에 대해 귀무가설이 기각하면 강 인과관계가 성립한다는 것을 의미한다.

IV. 분석 결과

1. 자료

본 연구는 ICAP(International Carbon Action Partnership)에서 제공하는 유럽연합, 뉴질랜드 그리고 우리나라의 2016년 1월 5일에서 2018년 12월 29일까지의 연결현물가격(continuous spot price) 일별(daily) 자료를 사용하였다.⁴⁾ ICAP는 유럽연합의 EU-ETS, 뉴질랜드의 NZ-ETS, 대한민국의 K-ETS 등 국가 단위로 배출권 거래제도가 시행되고 있는 시장의 배출권 가격뿐만 아니라 미국의 RGGI, WCI와 중국(7개 지역) 등 지역 단위로 시행되는 배출권의 현물 및 경매 가격을 종합적으로 제공한다.

탄소 배출권 거래제는 효율적인 운영을 위하여 3~10년 사이의 계획 기

4) <https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices>.

간(phase)을 가지고 운영된다. 시장에서 거래되는 배출권 상품은 계획 기간별 목표 달성을 위하여 추가로 설정되는 이행연도에 맞추어 구분하여 거래한다. 우리나라 할당 배출권인 KAU의 경우 계획 기간이 시작되는 해의 최초 매매 거래일로부터 해당 이행연도 다음 해의 6월 30일(공휴일 또는 토요일인 경우에는 다음 매매 거래일)까지 거래된다(한국거래소, 2017). 배출권 상품의 거래 기간이 이행연도에 맞추어 정해지기 때문에, 배출권 가격 현물 자료는 통상적으로 시계열이 짧은 특성이 있다. 그러나 ICAP는 계획 기간과 이행 연도가 다르더라도 연결현물가격의 형태로 탄소배출권 상품의 가격 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 ICAP의 자료를 이용하여 다른 연구에서 사용된 자료보다 상대적으로 긴 시계열을 확보할 수 있었다. 이에 우리나라 배출권 시장과 다른 지역의 배출권 시장을 연계해서 분석할 수 있었다.

〈표 1〉은 분석하는데 사용한 배출권 가격 원자료의 기초통계량을 나타낸다. 비교의 일관성을 위해 배출권 가격의 화폐단위는 유로(Euro)로 통일하였다.⁵⁾

〈표 1〉 기초통계량

변수명	관측치	평균	표준편차	최소값	최대값
EU	690	8.8848	5.4776	3.9100	25.1900
New	690	11.4339	2.1389	5.4712	15.5222
Kor	690	15.8919	2.3253	9.1791	21.8779

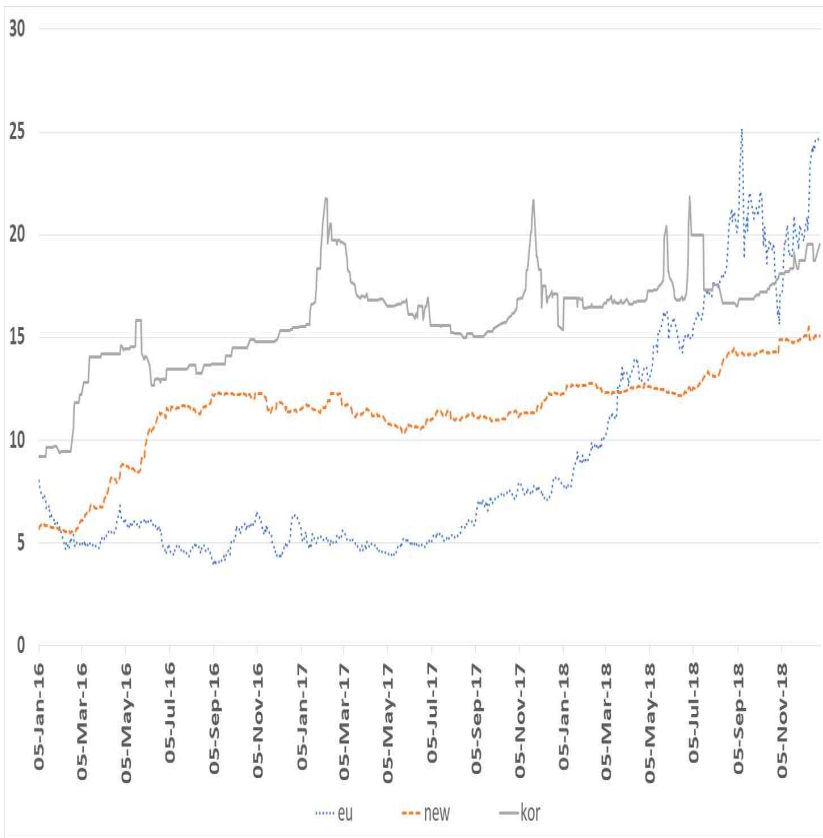
주 : 배출권 가격의 화폐단위는 유로(Euro)이다

〈그림 1〉은 분석의 대상인 유럽연합(EU), 뉴질랜드(New), 우리나라(Kor)의 할당 배출권 가격 추이를 보여준다. 우리나라와 뉴질랜드의 배출권 가격은 비교적 일정한 간격을 두고 비슷한 움직임을 보이지만, EU ETS 가격은 다소 차이를 보였다. 그러나 시간이 지남에 따라 그 가격 차이는

5) ICAP는 자국 화폐단위의 가격 자료와 IMF(International Monetary Fund)의 월평균 환율 자료를 사용하여 구축한 달러 및 유로 단위의 배출권 가격 자료를 함께 제공하고 있다.

줄어들고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 세 시장의 배출권 가격이 동조화하여 움직이고 있음을 간접적으로 보여준다.

〈그림 1〉 분석 기간의 할당 배출권 가격 추이



2. 추정 결과

분석에 앞서 배출권 가격의 안정성을 확인하기 위해 단위근 검정을 실행하였다. 오차항의 자기상관과 이분산성을 완화한 PP(Phillips and Perron, 1988) 검정과 소표본과 구조변화 등에 있어서 PP 단위근 검정보다 강건한 Elliott et al.(1996)의 DF-GLS(Dickey Fuller Generalized Least Squares) 검정을 사용하였다. 단위근을 갖는다는 귀무가설에 대해 검정한 결과는 〈표

2)와 같다.

단위근 검정 결과 유럽연합 배출권 가격의 수준변수는 PP 검정과 DF-GLS 검정에서 귀무가설이 기각되지 않지만, 1차 차분하면 귀무가설이 기각되는 것으로 나타났다. 따라서 유럽연합의 배출권 가격은 I(1)이라는 것을 확인할 수 있다. 뉴질랜드 배출권 가격과 우리나라의 배출권 가격의 수준변수는 PP 검정과 DF-GLS 검정에서 다소 차이가 있다. PP 검정은 5% 유의수준에서 뉴질랜드와 우리나라 배출권 가격의 수준변수에 대해 귀무가설을 기각하여 I(0)라고 볼 수 있지만, 1% 유의수준으로 강화하면 귀무가설을 기각하지 못해 I(1)인 것으로 나타났다. DF-GLS 검정 결과 뉴질랜드 및 우리나라 배출권 가격은 5% 및 1% 유의수준에서 I(1)임을 확인할 수 있다. DF-GLS 검정은 PP 검정보다 구조변화나 소표본에서 강건한 것으로 알려져 있다(Cook, 2004; Vougas, 2007). 따라서 세 가격 변수 모두 I(1)으로 전제하고 향후 분석을 진행할 것이다.

〈표 2〉 단위근 검정 결과

검정방법	EU		New Zealand		Korea	
	수준변수	차분변수	수준변수	차분변수	수준변수	차분변수
PP	0.6950	-25.5790***	-3.2900**	-22.0590***	-3.1360**	-22.8150***
DF-GLS	0.4050	-2.8390***	1.603	-2.8420***	0.2870	-16.7840***

주 : 1) 시차는 AIC 기준으로 선택된 최적시차를 사용함

2) ***, **,은 1%, 5% 수준에서 유의함

탄소배출권 가격 간 장기균형관계가 존재하는지 확인하기 위해 Johansen 공적분 검정을 실행하였다. 특정한 추세가 없어서 추세는 포함하지 않았고, AIC 및 SBIC 기준으로 최적시차는 1 또는 2로 두고 검정하였다. 분석 결과는 〈표 3〉과 같다. 공적분 위수(rank)가 0이라는 귀무가설에 대해 트레이스 통계량(41.006, 37.580)이 5% 수준의 임계값(29.680)보다 커서 귀무가설이 기각되었다. 그러나 공적분 위수가 적어도 1개라는 귀무가설에 대해 트레이스 통계량(12.549, 13.418)이 5% 수준의 임계값(15.41)보다 작아서 귀무가설을 기각할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 세 시장의 배출권 가격 간 1개

의 공적분 관계가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 세 시장의 배출권 가격 간 공적분 관계가 존재한다는 것은 배출권 시장 간 일시적으로 가격의 움직임이 다를 수 있지만, 장기적으로 세 시장의 가격은 동조화하여 움직인다는 것을 의미한다.

상호 호환성을 가지지 않는 세 시장의 배출권 가격이 동조화 현상을 보이는 것은 배출권 시장에 동일하게 작용하는 공통된 요인들의 영향으로 보인다. 한택환·김서경(2007)은 정책 및 규제, 에너지 가격 등은 배출권 시장에 동일한 영향변수로 작용하여 상이한 배출권 가격 간 동조화 요인으로 작용할 수 있다고 밝혔다. 파리기후변화 협정의 발효 등 온실가스 배출에 대한 규제 강화와 분석 기간 동안의 유가 상승은 배출권 수요를 증가시키는 공통요인으로 작용하여 배출권 가격 간 동조화 현상을 유발하였을 가능성이 크다.⁶⁾

〈표 3〉 Johansen 공적분 검정 결과

Johansen Cointegration Test (p=1)			
Rank	Eigenvalue	Trace Statistics	5% Critical Value
None	.	41.0067	29.6800
At most 1	0.0405	12.5496**	15.4100
At most 2	0.0558	0.0558	3.7600
At most 3	0.0179		
Johansen Cointegration Test (p=2)			
Rank	Eigenvalue	Trace Statistics	5% Critical Value
None	.	37.5803	29.6800
At most 1	0.0345	13.4181**	15.4100
At most 2	0.0192	0.0756	3.7600
At most 3	0.0001		

주 : 1) p는 AIC 혹은 SBIC 기준에 따라 선택된 최적시차를 의미한다

2) **는 5% 수준에서 유의함

6) Chevallier(2011), 홍이슬 등(2016), 정수관(2018) 등 배출권 가격 결정요인을 분석한 다수의 연구에 따르면 화석 연료의 가격은 배출권 수요를 결정하는 중요한 요인이다. 배출권에 대한 수요가 많은 발전 부문에서 석유와 천연가스는 탄소 함유량이 높은 석탄과 대체 관계를 가진다. 유가 상승으로 인한 석탄으로의 대체 수요 증가는 탄소배출권의 수요 증가와 가격 상승으로 이어질 수 있다.

공적분 검정은 세 시장의 가격 간 공적분 관계의 존재 여부를 판단할 수 있지만, 배출권 가격 간 동조화 혹은 통합의 정도와 인과관계의 방향에 대한 정보를 제공하지 않는다. 따라서 이를 보완하기 위해 VECM이 사용되었고 추정한 결과는 <표 4>와 같다.

오차수정항의 계수는 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타나 세 시장의 배출권 가격 간 공적분 관계가 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 배출권 가격 변동은 자기 시차변수에만 유의한 영향을 받고, 다른 배출권 가격 변동에 유의한 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 VECM에서 배출권 가격의 변동을 예측할 때 자체 과거 변동과 장기균형관계의 정보가 중요하다라는 것을 의미한다.

<표 4> 벡터오차수정모형 추정 결과

	$\Delta \ln Kor_t$	$\Delta \ln EU_t$	$\Delta \ln New_t$
$\Delta \ln Kor_{t-1}$	0.1315*** (0.0378)	0.1204 (0.0646)	-0.0161 (0.0189)
$\Delta \ln EU_{t-1}$	-0.0018 (0.0223)	0.0179*** (0.0381)	0.0057 (0.0111)
$\Delta \ln New_{t-1}$	-0.0451 (0.0753)	-0.0590 (0.1287)	0.1578*** (0.0376)
ECT_{t-1}	-0.0050*** (0.0018)	0.0082*** (0.0031)	-0.0029*** (0.0010)
<i>Constant</i>	0.0013*** (0.0004)	0.0012 (0.0013)	0.0013*** (0.0004)

$$ECT_{t-1} = \ln Kor_{t-1} + 1.5171 \ln New_{t-1} - 0.3374 \ln EU_{t-1} - 5.6855$$

주 : 1) 시차는 SBIC 기준으로 선택된 최적시차를 사용함

2) ***는 1% 수준에서 유의함

VECM을 통해 Granger 인과성을 검정한 결과는 <표 5>와 같다. 앞서 VECM 추정결과에서 예상하였듯이 단기 인과관계 검정결과 5% 유의수준에서 세 시장의 배출권가격 간 단기 Granger 인과성이 성립하지 않았다. 그러나 세 시장의 배출권가격 간 상호 장기 Granger 인과관계가 성립하는 것으로 나타났다. 이러한 장기 인과관계로 인해 세 시장 가격 간 상호 강

(strong) Granger 인과관계가 성립하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 배출권 시장이 상호 영향을 주며 배출권가격이 동조화하여 움직여 하나의 통합된 시장으로 볼 수 있다는 것을 의미한다.

〈표 5〉 VECM에 기반한 Granger 인과성 검정 결과

	단기 인과관계	장기 인과관계	강 인과관계
NZ-ETS가 EU-ETS를 인과하지 않음	0.2100	7.0800***	7.6200**
K-ETS가 EU-ETS를 인과하지 않음	3.4800	7.0800***	10.0400***
EU-ETS가 NZ-ETS를 인과하지 않음	0.2600	10.0300***	10.1000***
K-ETS가 NZ-ETS를 인과하지 않음	0.7300	10.0300***	7.9800**
EU-ETS가 K-ETS를 인과하지 않음	0.0100	7.2600***	7.3400**
NZ-ETS가 K-ETS를 인과하지 않음	0.3600	7.2600***	7.3700**

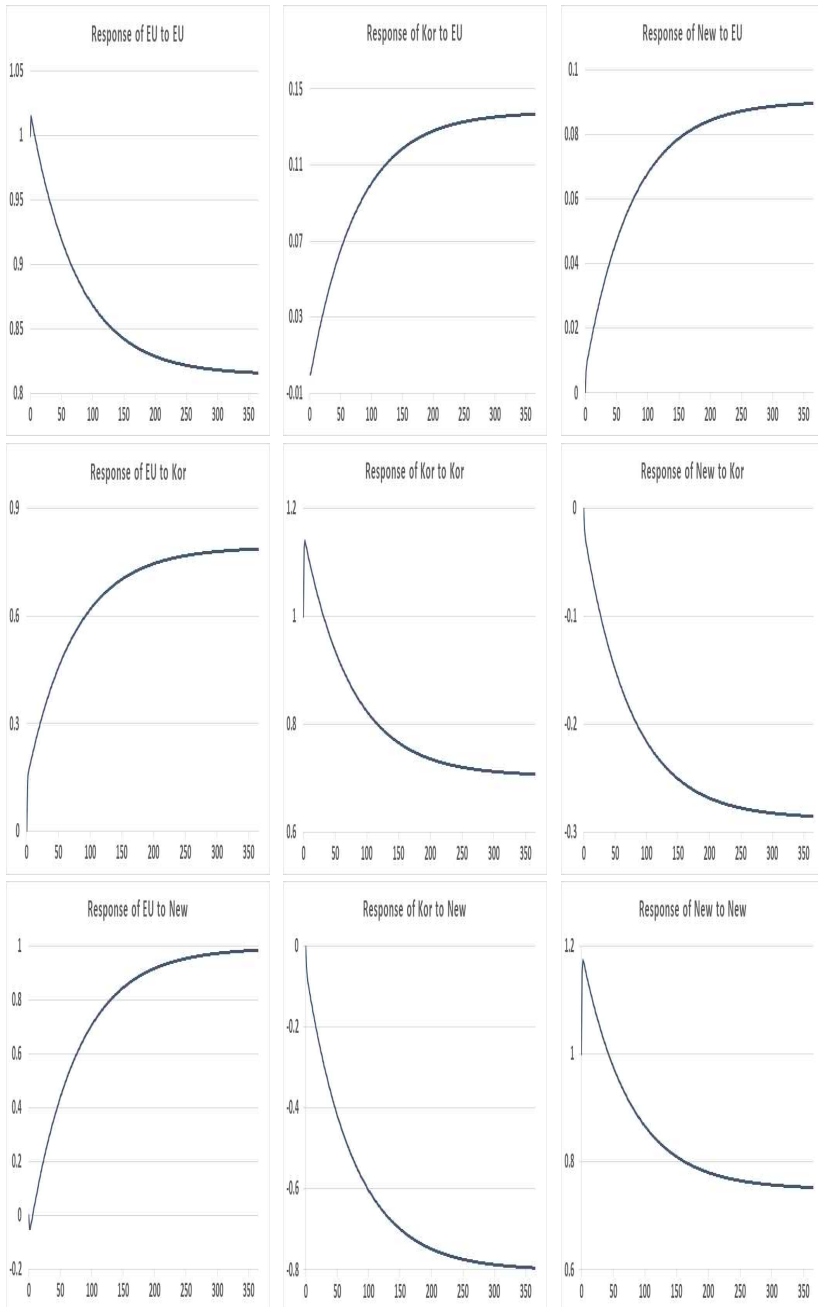
주 : ***, **, *은 1%, 5% 수준에서 유의함

지금까지의 VECM을 통한 Granger 인과성 검정은 배출권 시장에서의 충격의 지속성이나 한 시장에 가해진 충격이 다른 시장에 미치는 영향에 대한 파급효과를 분석하지 못한다. 이를 보완하기 위해 충격-반응(impulse-response) 분석을 이용하였다. 충격반응함수(Impulse Response Function: IRF)는 t 시점에 특정 내생변수에 가해진 표준편차 한 단위의 확률충격이 VAR 혹은 VECM 내의 자신 및 다른 변수에 미치는 동태적 영향을 보여준다(Ruhul et al., 2008).

〈그림 2〉는 충격반응함수의 결과를 보여준다. 배출권 시장을 주도하고 있는 유럽 배출권 시장에 가해진 충격의 영향이 가장 크고 지속적인 것으로 나타났다. 유럽 배출권 시장의 충격에 대해 뉴질랜드와 우리나라 배출권 가격은 양(+)의 영향을 받고, 그 충격의 영향은 지속하여 남아있다는 것을 확인할 수 있다.

뉴질랜드 시장에 발생한 충격은 유럽 시장에 지속적인 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 우리나라 배출권 가격은 음(-)의 영향을 받고 충격의 영향은 장기적으로 지속하는 것으로 나타났다.

〈그림 2〉 충격반응함수



우리나라 배출권 시장에 가해진 충격은 유럽 배출권 시장에 양(+)의 영향을 미치고, 충격의 영향은 지속하여 커지는 것으로 나타났다. 그러나 뉴질랜드 배출권 가격은 음(-)의 영향을 받고, 충격의 영향도 지속되는 것으로 나타났다.

한 시장에 발생한 충격이 다른 시장에 영향을 미치고, 충격의 영향이 지속한다는 사실은 앞선 인과관계 검정의 결과와 부합한다.

V. 결론

우리나라의 탄소배출권 시장은 개설된 지 얼마 되지 않아 이에 관한 정보나 연구가 미진한 실정이다. 최근 지역별로 분리된 탄소배출권 시장의 연계와 통합이 중요한 화두로 제시되고 있는 상황에서 우리나라 배출권 시장과 다른 국가의 배출권 시장의 연계성을 분석하는 것은 의미가 있다고 본다.

분석 결과, 첫째, 세 시장 가격 간에는 공적분 관계가 존재하여 가격 동조화 현상이 존재하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 국제 탄소배출권 시장의 연계 및 통합의 가능성이 존재함을 확인하였다.

둘째, VECM을 통한 인과성 검정 결과 배출권 가격 간 상호 단기 인과성은 성립하지 않지만, 장기 인과성이 성립하여 강 인과관계가 존재하는 것으로 나타났다. 이는 배출권 가격들의 상호 영향과 장기균형관계를 활용한 VECM을 적용한 인과성 분석의 유용성을 보여준다.

셋째, 충격반응함수의 결과 한 시장에서 발생한 충격은 다른 시장에 영향을 미치고, 충격의 영향은 지속하였다. 이는 VECM을 통한 인과관계의 결과와 부합한다.

현재 각 배출권 시장은 서로 다른 시장 구조와 제도하에서 독자적으로 운영되기에 단기적으로 지역 간 배출권 수급 불균형과 가격 격차가 나타날 수 있다. 그러나 세 시장의 배출권 가격은 장기적으로 동조화 현상을

보여 국제적인 탄소배출권 시장의 연계와 통합의 가능성이 높다는 것을 암시한다. 이는 다른 국가의 배출권 시장의 정보를 통해 우리나라의 배출권 시장을 예측할 수 있기 때문에 제도 및 정책을 구상할 때 중요한 의미를 갖는다.

한편, 효율적인 시장 연계 및 통합을 위해서는 일정 수준의 제도적 통합이 필요하다. 효율적인 시장 운영을 위한 공통의 규칙과 제도가 뒷받침된다면 배출권 시장의 연계와 통합은 한층 용이해질 것이다. 따라서 배출권 시장의 제도적 통합을 위한 국제적 차원의 논의와 이행은 배출권 시장의 연계성을 한층 강화할 수 있을 것으로 본다.

본 연구는 우리나라, EU, 뉴질랜드 시장을 대상으로 분석을 진행하였다. 그러나 자료의 제약으로 인하여 주요 온실가스 배출국이자 국제 탄소배출권 시장에서 큰 비중을 차지하는 미국과 중국을 분석에 포함하지 못하였다. 미국과 중국의 배출권 시장은 지역 단위의 배출권 시장 운영과 에너지 자원에 대한 높은 접근성으로 인하여 제도 및 제반 여건에서 다른 배출권 시장과 구분되는 특징을 가진다. 따라서 미국과 중국의 배출권 가격을 포함하여 분석을 진행할 경우 동일한 연구일지라도 다른 결과가 나타날 가능성이 있다. 이에 미국과 중국의 배출권 시장으로 분석의 범위와 대상을 확대하여 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

또한, 본 연구를 포함하여 상호 호환되지 않는 배출권 가격 간 동조화 현상에 관하여 분석한 연구들은 유가 등 배출권 시장에 공통적으로 영향을 미치는 요인을 이용하여 대략적인 동조화 현상의 발생 원인을 제시할 뿐 이를 실증적으로 엄밀하게 분석하지 못하였다. 따라서 배출권 가격 결정요인과 동조화 현상을 동시에 고려하는 연구를 진행하여 동조화 원인을 구체적이고 실증적으로 파악할 필요가 있다. 이를 통하여 배출권 시장 간 연계성을 높이기 위한 시장 설계에 참고할 중요한 기준을 제시할 수 있을 것이라고 기대된다.

■ 참고문헌 ■

- 김진수·허은녕·김연배, 2007, “공적분과 인과관계 분석을 통한 국제원유시장의 지역화 연구,” 『자원·환경경제연구』, 16(2), pp.213-239.
- 모정운·양승룡·조용성, 2005, “국제 탄소배출권 가격의 일물일가 검증 및 동태적 분석,” 『자원·환경경제연구』, 14(3), pp.569-593.
- 박호정·윤원철, 2006, “오차수정모형과 그래프 이론을 이용한 국제유가의 동시 및 단기 가격발견과정에 관한 연구,” 『자원·환경경제연구』, 15(3), pp.479-504.
- 박순철·조용성, 2017, “한국 탄소배출권 거래시장 일물일가 검증 및 가격 결정요인 분석,” 『한국환경경제학회 하계학술대회 논문집』, 인하대학교 정석학술정보관, pp.67-85.
- 정수관, 2018, “에너지가격이 탄소배출권가격에 미치는 영향에 대한 분석,” 『산업연구』, 2(2), pp.36-62.
- 한국거래소, 2017, 『KRX 배출권 시장 안내』, 부산: 한국거래소.
- 한택환·김서경, 2007, “온실가스 배출권거래소 간의 동조성(integration) 검증 - CCX, ECX 및 Nord Pool의 비교,” 『무역학회지』, 32(4), pp.57-75.
- 홍이슬·오형나·홍종호, 2016, “EU-ETS 배출권가격 결정요인 분석: 과잉할당량을 중심으로,” 『경제학연구』, 64(3), pp.91-123.
- Chevallier, J., 2011, *Econometric analysis of carbon markets: The European Union emissions trading scheme and the clean development mechanism*, New York: Springer Science & Business Media.
- Cook, S., 2004, “Finite-sample properties of the GLS-based Dickey-Fuller test in the presence of breaks in innovation variance,” *Austrian Journal of Statistics*, 33(3), pp.305-314, DOI: 10.17713/ajs.v33i3.444.
- Elliott, G., T. J. Rothenberg, and H. S. James, 1996, “Efficient tests for an autoregressive unit root,” *Econometrica*, 64(4), pp.813-836, DOI: 10.2307/2171846.
- Enders, W., 2008, *Applied econometric time series*, (4th ed.), New Jersey: John Wiley & Sons.
- Engle, R. F. and C. W. J. Granger, 1987, “Cointegration and error-correction: Representation, estimation and testing,” *Econometrica*, 55, pp.251~276, DOI: 10.2307/1913236.
- Granger, C. W., 1969, “Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods,” *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 37(3), pp.424-438, DOI: 10.2307/1912791.
- International Carbon Action Partnership, 2019, *Emissions trading worldwide: Status*

- report 2019*, Berlin: Germany.
- Ji, Q. and Y. Fan, 2015, "Dynamic integration of world oil prices: A reinvestigation of globalisation vs. regionalisation," *Applied Energy*, 155, pp.171-180, DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.117.
- Johansen, S., 1991, "Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models," *Econometrica*, 59(6), pp. 1551-1580, DOI: 10.2307/2938278.
- _____, 1995, *Likelihood-based inference in cointegrated vector autoregressive models*, NewYork: Oxford University Press.
- Masih, A. M. and R. Masih, 1996, "Energy consumption, real income and temporal causality: Results from a multi-country study based on cointegration and error-correction modelling techniques," *Energy Economics*, 18(3), pp. 165-183, DOI: 10.1016/0140-9883(96)00009-6.
- _____, 1998, "A multivariate cointegrated modelling approach in testing temporal causality between energy consumption, real income and prices with an application to two Asian LDCs," *Applied Economics*, 30(10), pp.1287-1298, DOI: 10.1080/000368498324904.
- Mizrach, B., 2012, "Integration of the global carbon markets," *Energy Economics*, 34(1), pp.335-349, DOI: 10.1016/j.eneco.2011.10.011.
- Oh, W. and K. Lee, 2004, "Causal relationship between energy consumption and GDP revisited: The case of Korea 1970-1999," *Energy Economics*, 26(1), pp.51-59, DOI: 10.1016/S0140-9883(03)00030-6.
- Phillips, P. C. and P. Perron, 1988, "Testing for a unit root in time series regression," *Biometrika*, 75(2), pp.335-346, DOI: 10.1093/biomet/75.2.335.
- Ruhul, S., S. Rafiq, and A. K. Hassan, 2008, "Causality and dynamics of energy consumption and output: Evidence from non-OECD asian countries," *Journal of Economic Development*, 33(2), pp.1-26, DOI: 10.35866/caujed.2008.33.2.001.
- Seifert, J., M. Uhrig-Homburg, and M. Wagner, 2008, "Dynamic behavior of CO₂ spot prices," *Journal of Environmental Economics and Management*, 56(2), pp.180-194, DOI: 10.1016/j.jeem.2008.03.003.
- Vougas, D. V., 2007, "GLS detrending and unit root testing," *Economics Letters*, 97(3), pp.222-229, DOI: 10.1016/j.econlet.2007.03.016.
- Wilmot, N. A., 2013, "Cointegration in the oil market among regional blends," *International Journal of Energy Econimcs and Policy*, 3(4), pp.424-433.

ICAP(International Carbon Action Partnership), <https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices>.
International Energy Agency, <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>.

김기진: 부산대학교 경제학과 대학원 과정에서 경제학 석사학위를 취득 후, 동 대학원 박사과정에 재학 중이다. 환경, 자원, 에너지 문제와 산업구조에 관해 관심을 두고 연구 중이다(dominico0623@gmail.com).

원두환: 일리노이주립대에서 박사학위를 취득 후 부산대학교 경제학부에 재직 중이다. 자원 환경 정책 개발 및 경제분석에 관한 연구 등을 수행하고 있다(doohwan@pusan.ac.kr).

정수관: 하와이주립대 자원환경 경제학 박사학위를 취득한 후 창원대학교 교수로 재직 중이다. 에너지·자원·환경 경제분석과 정책개발에 관한 연구를 수행 중이다(sukwan@changwon.ac.kr).

투 고 일: 2019년 07월 23일
심 사 일: 2019년 07월 25일
게재확정일: 2019년 08월 16일