

## 국제 탄소배출권 가격의 동태적 조건부 상관관계 분석

나단단 이은화  
동국대학교 국제통상학과 석사수료 동국대학교 국제통상학과 조교수

# An Analysis of Dynamic Conditional Correlation among International Carbon Emission Trading Prices

Dan-Dan Luo<sup>a</sup>, Yin-Hua Li<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of International Trade, Dongguk University, South Korea

<sup>b</sup>Department of International Trade, Dongguk University, South Korea

Received 15 January 2022, Revised 25 January 2022, Accepted 26 February 2022

### Abstract

This paper analyzed the dynamic conditional correlation between the carbon emission trading prices of Korea, China, EU, New Zealand. This paper was analyzed using the daily data of carbon emission trading prices of each country from January 12, 2015 to January 13, 2021 using the DCC-GARCH model. Summarizing the research results, first, the dynamic conditional correlation between carbon emission trading prices in the EU, Korea, and China, excluding New Zealand, was strong, indicating that there was a co-movement phenomenon. Second, it was found that carbon emission trading prices in major countries have a stronger tendency to co-movement due to global shocks. Third, it appears that the dynamic conditional correlation between the carbon emission trading prices of Korea and China is gradually strengthening. This study confirmed that the co-movement between carbon emission trading prices in Korea and other countries gradually intensified as time passed. In particular, it is meaningful in suggesting the implication that the phenomenon of co-movement between carbon emission trading prices in Korea and China is gradually intensifying.

**Keywords:** Carbon Emission Trading Prices, DCC-GARCH Model, Dynamic Conditional Correlation, Market Consolidation

**JEL Classifications:** C32, C58, Q54

<sup>a</sup> First Author, E-mail: korealdd@sina.com

<sup>b</sup> Corresponding Author, E-mail: liyinhua1619@dongguk.edu

© 2022 The Korea Trade Research Institute. All rights reserved.

## I. 서론

2005년 교토의정서가 공식적으로 발효됨에 따라 유럽연합(EU)을 비롯한 미국과 중국 등 여러 국가에서 탄소배출권 거래제(Emission Trading Scheme, ETS)가 시행 및 확장되고 있다(Aldy et al., 2010)<sup>1)</sup>. 2020년 12월 기준으로 전 세계에서 운행 중인 탄소배출권 시장이 총 24개 있으며, 이 중 대표적인 시장으로 유럽연합, 뉴질랜드, 미국, 한국, 중국 등을 꼽을 수 있다(ICAP, 2020).

유럽연합에서는 2005년 1월에 EU 탄소배출권 거래제(European Union Emissions Trading Scheme, EU ETS)를 중심으로 탄소배출권 시장이 형성되었다(Aatola and Toppinen, 2013). 시범단계인 탄소배출권 거래제 1기(2005-2007년)를 통하여 탄소배출권 시장을 형성했고, 이어 2008-2012년 2기와 2013-2020년 3기를 지나 4기제를 맞으면서 시장규모가 지속적으로 성장하고 있다(ICAP, 2020).

뉴질랜드에서는 2008년 1월에 최초로 임업 부문에서 탄소배출권 거래제를 시행하고, 적응 기간을 거쳐 단계적으로 전 산업에 적용하고 있다. 뉴질랜드 경제의 주요 부문에서 2013년 말까지 모두 참여하였다(Ivan and Daniel, 2018).

미국은 지역온실가스조치(Regional Greenhouse Gas Initiative, RGGI), 시카고기후거래소(Chicago Climate Exchange, CCX), 서부기후조치(Western Climate Initiative, WCI), 기후행동보호구역(Climate Action Reserve, CAR) 등 총 4곳의 탄소배출권 거래소가 운행 중이다. 이 중 RGGI를 제외한 기타 3곳은 탄소배출권의 거래실적이 미미하다. RGGI는 2009년부터 운영하여 현재 미국 12개 주가 공동으로 참여하고 있으며 각 주가 발전분야를 대상으로 탄소배출 허용량을 설정하고 있다(Kim Man-Keun and Lee Kang-il, 2015)<sup>2)</sup>.

한국은 교토의정서가 발효될 당시 개발도상국으로 분류되어 온실가스 감축 의무가 부과되지 않았다. 하지만 2015년 파리협약 이후 신기후체제가 출범함에 따라 한국도 대상국가로 감축의무가 부과되었다. 한국은 배출 전망치(Business as Usual, BAU)를 기준으로 2030년 대비 37% 감축하겠다는 목표를 세우고, 2015년 1월에 탄소배출권 거래제가 도입되었다. 2015-2017년 1기, 2018-2020년 2기를 거쳐 2021-2025년으로 현재 3기가 진행 중이다(Korea Ministry of Economy and Finance and Korea Ministry of Environment, 2019).

중국은 2013년 6월에 선전(深圳)을 시작으로 베이징(北京), 상하이(上海), 광둥(廣東), 텐진(天津), 후베이(湖北), 충칭(重慶), 푸젠(福建) 등 8개 지역에서 점진적으로 탄소배출권 거래 시범사업을 추진하고 있다. 2021년부터 전국적인 탄소배출권 거래소를 개장하여 운영하고 있다. 이들 시범사업 지역은 중국 전체 인구의 19%, 총 GDP의 27%, 전국 에너지소비량의 24%, 국가 배출량의 11% 이상을 차지함에 따라 규모 면에서 상당한 수준에 이른다(Ewing and Shin, 2017).

이처럼 각 지역의 탄소배출권 시장은 서로 다른 제도 및 거래소를 가지고 분리되어 운영되어 있다. 일몰일가 법칙에 따라 거래비용이 완전히 제거된다면 국제 탄소배출권 시장 간의 가격은 장기적으로 동조화할 것이다(Mo Jung-Youn, Yang Seung-Ryong and Cho Yong-Sung, 2005). 동조화 현상은 탄소배출권 가격의 예측과 탄소배출권 시장의 발전방향을 제정하는데 중요한 의미를 갖는다(Kim Ki-Jin, Won Doo-Hwan and Jung Su-Kwan, 2019).

2005년 EU의 탄소배출권 시장이 개장된 이후 탄소배출권에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 탄소배출권에 관한 대다수의 연구는 탄소배출권 가격의 변동성, 탄소배출권 가격의 영향요인, 탄소배출권 시장의 통합에 관한 연구 등이 있다.

1) 탄소배출권 거래제는 오염 배출권 거래의 개념으로 글로벌 환경경제정책의 중요한 일환이다. 오염 배출권은 일정 지역 내에서 배출할 수 있는 오염의 총량이 정해지면 오염물질을 배출하는 해당 지역의 기업이나 단체 등이 일정 규모씩 배당받는 권리이다.

2) 미국의 탄소배출권 거래는 주로 RGGI에서 거래되는데, RGGI의 탄소배출권 거래가 주로 경매로 거래되는 점과 발전분야만 포함된다는 점을 감안해 본 논문은 미국을 분석대상에서 제외하였다.

탄소배출권 가격의 변동성에 관한 연구로 Paoletta and Taschini (2008), Cong Rong-Gang and Wei Yi-Ming (2010), Yang Chen, Yang Yu and Yang Tao (2015), Fu Jing-Yan and Feng Hui-Fang (2015) 등이 있다. 이들 연구들은 주로 탄소배출권 가격의 변동성 추이, 탄소배출권 가격의 변동성과 환율 변동과의 관계, 탄소배출권 가격의 변동성이 제조업에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

탄소배출권 가격의 영향요인에 관한 연구로 Derek and Carlo (2007), Emilie, Julien and Benoit (2008), Gao Ying and Guo Kun (2012), Park Soon-Chul and Cho Yong-Sung (2014), Tan Xue-Ping and Wang Xin-Yu (2017), Wu Hui-Juan and Zhang Zhi-Guang (2021) 등이 있다. 이들 연구들은 탄소배출권 가격의 영향요인으로 에너지 가격, 전기 가격, 이상 기후, 주가, 산업발전수준, 거시경제변수 등 변수들을 사용하여 분석하였다.

탄소배출권 시장의 통합에 관한 국내 연구로 Mo Jung-Youn, Yang Seung-Ryong and Cho Yong-Sung (2005), Han Taek-Whan and Kim Suh-Kyong (2007), Kim Ki-Jin, Won Doo-Hwan and Jung Su-Kwan (2019) 등 상대적으로 적은 편이다. Mo Jung-Youn, Yang Seung-Ryong and Cho Yong-Sung (2005)은 공적분 검정과 Granger 인과검정을 사용하여 EU-ETS와 Nord Pool의 탄소배출권 가격 간 일물일가 법칙의 만족 여부를 검정하였다. 공적분 검정 결과, 두 시장의 탄소배출권 가격 간 장기균형 관계가 존재하는 것으로 나타나, EUA 가격 간 일물일가의 법칙이 성립함을 확인하였다. 또한, Granger 인과검정을 통하여 EU 탄소배출권 시장이 Nord Pool 탄소배출권 시장을 선도하는 것을 확인하였다.

Han Taek-Whan and Kim Suh-Kyong (2007)도 공적분 검정과 Granger 인과검정을 사용하여 ECX(European Climate Exchange), NordPool 및 미국 CCX(Chicago Climate Exchange)의 탄소배출권 가격 간 동조화에 대해 분석하였다. 분석결과, ECX와 NordPool의 탄소배출권 가격 간에 강한 공적분 관계가 있고, ECX와 CCX 간에는 미약한 공적분 관계가

존재하지만, NordPool과 CCX 간에는 공적분 관계가 없는 것을 확인하였다.

Kim Ki-Jin, Won Doo-Hwan and Jung Su-Kwan (2019)은 공적분 검정, 벡터오차수정(Vector Error Correction Model, VECM)모형 및 Granger 인과검증을 통해 한국, 유럽연합, 뉴질랜드의 탄소배출권 시장 간의 동조화에 대해 분석하였다. 공적분 검정결과, 3개 국의 탄소배출권 시장 간에 공적분 관계가 존재하여 동조화하는 것으로 나타났다. Granger 인과검정에서는 탄소배출권 시장 사이에 단기적인 인과관계가 없지만, 장기적으로는 강한 인과관계가 존재하는 것으로 나타났다.

한편 탄소배출권 시장의 통합에 관한 해외연구로 Mizrach (2012), Wang Xiao-Yu, Luo Dong-Kun and Jie Gui-Xin (2017) 등의 연구를 들 수 있다.

Mizrach (2012)는 ARIMA모형으로 유럽연합의 EUA 가격과 미국 RGGI 탄소배출권 가격 간 동조화를 분석하였다. 분석결과, EUA 가격과 RGGI 가격 간 공적분 관계가 존재하여 동조화 현상이 있는 것으로 나타났다.

Wang Xiao-Yu, Luo Dong-Kun and Jie Gui-Xin (2017)은 DCC-GARCH 모형으로 중국과 유럽연합의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계를 분석하였다. 분석결과, 중국의 지역별 탄소배출권 가격과 유럽연합의 탄소배출권 가격 간에 동태적 상관관계가 크지 않은 것으로 나타났다.

이처럼 상기 선행연구들은 주로 공적분 검정과 Granger 인과검정방법으로 탄소배출권 가격 간의 동조화에 대해 분석하였다. 공적분 검정방법은 탄소배출권 시장 간 동조화의 유무 정보를 파악할 수 있지만, 동조화 수준이나 탄소배출권 시장 간의 영향 방향을 파악하지 못하는 한계점이 있다. 이를 보완하기 위하여 Granger 인과검정방법을 활용할 수 있는데, Granger 인과검정은 VECM모형을 사용하여 장·단기 인과관계를 분석할 수 있다.

공적분 검정과 Granger 인과검정방법은 모두 시간을 고정시켜 시간 불변적이라고 가정하여 모형화하고 있다. 이러한 방법은 시간의 흐름에 따라 두 가격 간의 상관관계의 변화를 세

부적으로 해석할 수 없는 한계가 있다.

Engle (2002)은 변수들 간의 상관관계가 시간 가변적이라는 현실적인 가정을 모형에 포함시켜 다변량 DCC-GARCH 모형을 제안하였다. DCC-GARCH 모형은 주식시장의 동태적 상관관계를 분석하는데 주로 사용해 왔는데, 최근에 탄소배출권 시장에 대한 연구에서도 일부 적용되고 있다(Wang Xiao-Yu, Luo Dong-Kun and Jie Gui-Xin, 2017). 본 연구에서는 탄소배출권 가격의 불안정성을 고려하여 DCC-GARCH 모형을 사용하여 분석하고자 한다.

Kim Ki-Jin, Won Doo-Hwan and Jung Su-Kwan (2019)의 논문은 한국, 유럽연합, 뉴질랜드만 분석하였으나, 본 논문은 주요 탄소배출국인 중국을 추가하였다. 또한 탄소배출권 가격의 불안정성을 고려하여 DCC-GARCH 모형을 사용하여 주요 국들의 탄소배출권 가격 간 관계를 동태적으로 검토할 수 있는 점이 선행연구와의 가장 큰 차이점이라고 할 수 있다.

각 국의 탄소배출권 시장은 분리되어 운영되고 있어 탄소배출권 가격에 대한 예측이 어려운 상황이다. 각 국의 탄소배출권 시장 간 동조화 현상을 시간의 흐름에 따라 분석할 수 있다면 탄소배출권 가격의 변동성 특징을 파악할 수 있다.

본 연구에서는 DCC-GARCH 모형을 사용하여 국제 탄소배출권 가격 간의 동태적 조건부 상관관계를 분석하고자 한다. 분석대상은 한국, 중국, 유럽연합, 뉴질랜드의 탄소배출권 가격이다. 우선 ADF 검정을 통해 탄소배출권 가격의 시계열 안정성 여부를 판단하고, 다음으로 시계열 변수들이 GARCH 모형의 구축 조건을 만족하면 GARCH 모형으로 표준화된 잔차를 구한 후, DCC-GARCH 모형을 수립하여 시계열의 동태적 조건부 상관관계를 추정한다.

본 연구의 I 장에서는 연구 배경, 연구 목적 및 선행연구에 대해 살펴본다. II 장에서는 분석에 사용된 연구모형을 소개한 후, III 장에서는 국제 탄소배출권 가격 간의 동태적 조건부 상관관계에 대해 실증분석한다. IV 장에서는 연구결과를 요약하고 국제 탄소배출권 시장의 발전에 대해 정책적 시사점을 제시한다.

## II. 연구모형

Engle (2002)은 시계열 변수들 간의 상관관계가 시간 가변적이라는 현실적인 가정을 연구모형에 포함시켜 다변량 DCC-GARCH (Dynamic Conditional Correlation Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) 모형을 제안하였다. DCC-GARCH 모형의 추정에는 두 가지 절차가 필요하다. 우선 개별 변수들의 수익률로 GARCH(1,1) 모형을 추정하여 표준화 잔차를 구하고, 다음으로 표준화 잔차행렬로 DCC(1,1)-GARCH(1,1) 모형을 추정하여 변수들 간의 동태적 상관관계를 분석한다.

### 1. GARCH 모형

Bollerslev (1990)는 ARCH모형을 확장하여 GARCH(Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity)모형을 제안한 것으로, 이 모형의 분산 방정식은 다음과 같다(Jun Chi-Hyuck, 2020).

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \beta_1 \sigma_{t-1}^2 + \dots + \beta_p \sigma_{t-p}^2 + \alpha_1 u_{t-1}^2 + \dots + \alpha_q u_{t-q}^2 \quad (1)$$

여기서  $u_t$ 는 평균 방정식의 오차항이며, 기댓값은  $E[u_t] = 0$ 이고, 분산은  $Var[u_t] = \sigma_u^2$ 이다. 이때 오차항이 GARCH(q, p)모형을 따른다고 한다. 즉, ARCH모형에 과거 시차의 조건부 분산항이 추가된 것이다. (q, p)는 GARCH 모형의 차수(order)이며 가장 일반적인 차수는 GARCH(1,1)이다. Bollerslev (1990)는 GARCH(1,1) 모형으로 수익률의 변동성을 추정할 수 있다고 밝혔다. 관측 값의 평균 방정식이 수평적이라고 가정한다면 GARCH(1,1) 모형의 형태는 다음과 같다.

$$Y_t = c + u_t \quad (2)$$

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha u_{t-1}^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 \quad (3)$$

시점 T에서 1단계 이후 예측 값은

$f_{T,1} = E[(Y_{T+1}|Y_{T,\dots})] = c$ 이라고 표시할 수 있다. 이때 예측오차 분산은 아래와 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} v_{T,1} &= \text{Var}(Y_{T+1}|Y_{T,\dots}) \\ &= \text{Var}(u_{T+1}|Y_{T,\dots}) \\ &= E(\sigma_{T+1}^2|Y_{T,\dots}) \end{aligned} \quad (4)$$

즉 예측오차의 분산이 변동성과 관련 있는 것을 알 수 있다.

## 2. DCC-GARCH 모형

다변량 GARCH 모형은 변수가 늘어날수록 추정해야 할 모수의 수가 급증하기 때문에 추정이 상당히 어려워지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Bollerslev (1990)는 CCC-GARCH (Constant Conditional Correlation Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) 모형을 제안하였다. 하지만 CCC-GARCH 모형은 조건부 상관관계 행렬이 일정하다는 가정으로 시간의 흐름에 따라 상관관계가 변화할 수 있다는 현실적인 문제점에 대해 고려하지 못하였다(Acatrinei, Gorun and Marcu, 2013).

Engle (2002)가 제시한 DCC-GARCH 모형은 CCC-GARCH 모형의 문제점을 극복하고 동태적 조건부 상관관계를 추정할 수 있다. DCC-GARCH 모형은 조건부 공분산행렬을 다변량 GARCH 모형으로 표준화 잔차를 구한 후, 조건부 상관관계를 모형화한다. DCC-GARCH 모형의 식은 다음과 같다.

$$r_t = \mu_t + \epsilon_t, \quad \epsilon_t | \Omega_{t-1} \sim N(0, H_t) \quad (5)$$

$$H_t = D_t R_t D_t = (p_{ij,t} \sqrt{h_{ii,t} h_{jj,t}}) \quad (6)$$

$$h_{ii,t} = \omega_i + \alpha_i \epsilon_{i,t-1}^2 + \beta_i h_{ii,t-1} \quad (7)$$

$$u_t = \frac{\epsilon_t}{\sqrt{h_{ii,t}}} = D_t^{-1} \epsilon_t \sim iid.N(0, I_N) \quad (8)$$

여기서  $r_t$ 는  $N \times 1$  자산수익률 벡터이고,  $\Omega_{t-1}$ 은  $\bar{t}$  기까지의 정보 집합이다.  $H_t$ 는

조건부 공분산 행렬이고,  $D_t$ 는 조건부 분산의  $N \times N$  대각행렬이며,  $R_t$ 는  $N \times N$  동태적 조건부 상관관계수행렬이다.  $h_{ii,t}$ 는  $t$  시점 개별 변수의 조건부 분산이며, 단변량 GARCH(1,1)모형을 사용하여 계산할 수 있다.  $u_t$ 는 표준화 잔차로  $N \times N$  대각행렬이고,  $I_N$ 은  $N$ 차 항등행렬이다.

DCC-GARCH 모형의 상관관계수의 동태적 특성은 다음과 같은 방법으로 정의한다.

$$\begin{aligned} R_t &= \text{diag} \left( \frac{1}{\sqrt{q_{ii,t}}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{q_{jj,t}}} \right) \\ Q_t &= \text{diag} \left( \frac{1}{\sqrt{q_{ii,t}}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{q_{jj,t}}} \right), \\ Q_t &= (q_{ij,t}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$Q_t = (1 - \alpha - \beta) \bar{Q} + \alpha u_{t-1} u_{t-1}' + \beta Q_{t-1} \quad (10)$$

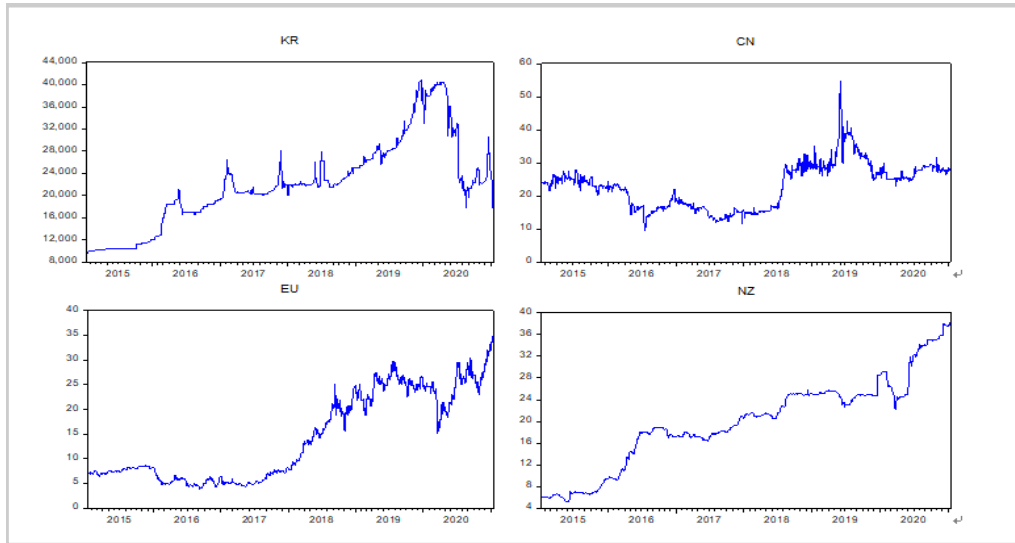
$$q_{ij,t} = (1 - \alpha - \beta) \bar{p}_{ij} + \alpha u_{i,t-1} u_{j,t-1}' + \beta q_{ij,t-1} \quad (11)$$

$$p_{ij,t} = q_{ij,t} / \sqrt{q_{ii,t} q_{jj,t}} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} L_t(\theta, \phi) &= -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^T [k \log(2\pi) + 2 \log |D_t| \\ &\quad + \log |H_t + u_t' R_t^{-1} u_t|] \end{aligned} \quad (13)$$

$Q_t = (q_{ij,t})$ 는  $N \times N$  표준화 잔차의 시간 가변적 공분산 행렬,  $\bar{Q} = E[u_t u_t']$ 는  $N \times N$  표준화 잔차의 비조건부 분산행렬이다. 양정부호행렬인  $Q_t$ 와 회귀모형의 안정성 조건을 충족하기 위해서 비음(Non-Negative)인 스칼라 모수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는  $\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \alpha + \beta < 1$ 의 조건을 만족시켜야 한다.  $\alpha$ 는 충격의 강도가 클수록 시간 가변적 상관관계의 분산이 커진다.  $\beta$ 는 충격효과가 소멸되는 데 소요되는 시간인 평균 회귀속도(Mean Reversion Speed)이며,  $\alpha + \beta$ 는 상관관계의 지속성을 나타낸다.  $p_{ij,t}$ 는 DCC-GARCH 모형의 동태적 상관관계수를 나타낸다. DCC-GARCH 모형은 최대우도추정(Maximum Likelihood Estimation) 방법을 통해서 2단계로 추정한다. 정규분포를 가정하고 있는 조건부 대수 우도함수(Conditional Log-Likelihood Function)  $L_t(\theta, \phi)$ 는  $D_t$ 와 관련된 단변량 GARCH 추정

Fig. 1. The Carbon Emission Trading Prices in Major Countries



Notes: EU and New Zealand: \$/T; Korea: ₩/Т; China: ¥/T.

Sources: ICAP (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13).

치들의 합인 변동성 부분( $\theta$ )과  $R_t$ 와 관련된 상관관계 부분( $\phi$ )을 분리한 2단계 절차(Separate Two Step Procedure)로 최대화하여 모수를 추정한다(Lee Ki-Seong and Ryou Jai-Won, 2012).

### III. 실증분석

#### 1. 분석자료 및 기초통계량

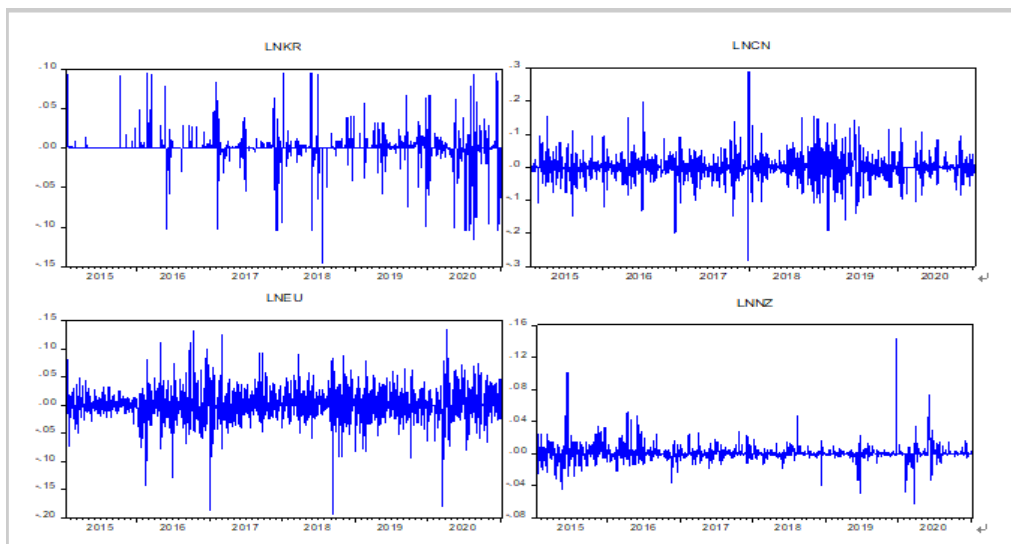
본 연구는 한국(KR), 중국(CN), 유럽연합(EU), 뉴질랜드(NZ)의 탄소배출권 가격을 분석 대상으로 하였다<sup>3)</sup>. 각 국가의 탄소배출권 가격자료는 2015년 1월 12일부터 2021년 1월 13일까지 일별 자료이며<sup>4)</sup>, 시계열자료의 총 관측치

수는 1,568개이다. 시계열자료 중 중국의 데이터는 Wind Database, 기타 3국의 데이터는 ICAP(International Carbon Action Partnership)의 통계자료이다.

한국, 중국, 유럽연합, 뉴질랜드의 탄소배출권 가격 추이는 <Fig. 1>과 같다. 한국, 유럽연합 및 뉴질랜드의 탄소배출권 가격은 2016년과 2017년에 약 보합세를 보인 후, 지속적인 상승세로 나타났다. 단, 한국의 탄소배출권 가격은 2019년 말부터 2021년 초까지 일시적인 하락세로 나타났다. 이는 코로나 팬데믹으로 한국 경제가 침체되어 전력 및 에너지 수요의 급감이 탄소배출권 잉여로 이어지면서 수급불균형을 초래했기 때문이다. 한편 중국의 탄소배출권 거래가격은 2019년에 일시적인 상승세를 보였지만 전반적으로 보합세를 유지하였다. 이는 중국 정부가 탄소배출권 가격을 일정한 수준에서 통제하고 있음을 알 수 있다.

3) 중국의 전국적인 탄소배출권거래소가 2021년에 설립된 관계로 본 논문에서 사용한 중국의 탄소배출권 가격은 중국에서 가장 대표성이 있는 후베이성의 탄소배출권 가격이다. 후베이지역은 중국에서 탄소배출권 거래량이 가장 많고 가장 안정적인 탄소배출권 거래시장이다. Li Ke-Long and Xie Chi (2020)의 연구에서도 후베이지역의 탄소배출권 가격을 사용하여 EU의 탄소배출권 가격과의 상관관계를 분석하였다.

4) 각 국가 탄소배출권 거래 일자의 차이 문제는 한국을 기준으로 수정하였으며, 이에 따른 결여자료는 전일 자료를 연장하여 사용하였다.

**Fig. 2.** The Carbon Emission Trading Prices Earnings Rate in Major Countries

Sources: ICAP (2015. 01. 12 – 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 – 2021. 01. 13).

**Table 1.** Basic Statistics of Carbon Emission Trading Prices Earnings Rate in Major Countries

Variables	Average	Minimum value	Maximum value	Standard Deviation	Kurtosis	Jarque-Bera
LNKR ALL	0.001	0.095	-0.145	0.018	20.313	19,980.220***
LNKR I	0.001	0.095	-0.103	0.012	45.911	41,131.520***
LNKR II	0.001	0.095	-0.145	0.018	24.081	9,894.505***
LNKR III	-0.001	0.095	-0.116	0.024	11.567	1,798.687***
LNCN ALL	0.001	0.290	-0.282	0.037	11.155	4,343.683***
LNCN I	-0.001	0.199	-0.198	0.035	9.777	999.102***
LNCN II	0.001	0.290	-0.282	0.039	14.984	3,124.211***
LNCN III	-0.001	0.143	-0.194	0.038	7.173	380.881***
LNEU ALL	0.001	0.134	-0.194	0.028	8.584	2090.230***
LNEU I	-0.001	0.112	-0.128	0.027	6.146	215.706***
LNEU II	0.003	0.126	-0.194	0.028	8.004	561.007***
LNEU III	0.001	0.128	-0.180	0.029	6.796	323.348***
LNNZ ALL	0.001	0.143	-0.062	0.010	41.788	100788.800***
LNNZ I	0.002	0.102	-0.044	0.013	14.729	3289.623***
LNNZ II	0.001	0.047	-0.039	0.006	17.329	4548.461***
LNNZ III	0.001	0.143	-0.062	0.010	78.568	126359.200***

Notes: 1. \* $\rho < 0.1$ , \*\* $\rho < 0.05$ , \*\*\* $\rho < 0.001$ .

2. ALL Step: 2015. 01. 12 – 2021. 01. 13; Step I: 2015. 01. 12 – 2017. 01. 11; Step II: 2017. 01. 12 – 2019. 01. 11; Step III: 2019. 01. 14 – 2021. 01. 13.

Sources: ICAP (2015. 01. 12 – 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 – 2021. 01. 13).

Table 2. ADF Test Results of Time Series Data

Variables	Level Variable	Difference Variable
LNKR ALL	-0.736	-20.142***
LNKR I	-1.682	-19.712***
LNKR II	-3.731	-20.588***
LNKR III	-1.064	-10.657***
LNCN ALL	-1.732	-15.063***
LNCN I	-2.080	-9.496***
LNCN II	-1.644	-8.571***
LNCN III	-2.869	-9.709***
LNEU ALL	-1.941	-14.786***
LNEU I	-2.319	-11.379***
LNEU II	-3.031	-23.333***
LNEU III	-2.109	-10.148***
LNNZ ALL	-1.759	-16.016***
LNNZ I	-1.828	-8.757***
LNNZ II	-2.306	-14.022***
LNNZ III	-1.612	-18.504***

Notes: \* $\rho < 0.1$ , \*\* $\rho < 0.05$ , \*\*\* $\rho < 0.001$ .

Sources: ICAP (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13).

〈Fig. 2〉는 연속 수익률로 변환한 주요 국들의 탄소배출권 가격 수익률 추이를 보여주고 있다<sup>5)</sup>. 여기서 LNKR, LNCN, LNEU, LNNZ은 각각 한국, 중국, 유럽연합, 뉴질랜드의 탄소배출권 가격의 수익률을 표시한다. 〈Fig. 2〉에서 볼 수 있는 바와 같이 샘플기간 동안 한국, 중국, 유럽연합의 시계열 변동성이 큰 반면, 뉴질랜드는 상대적으로 안정세로 나타났다. 특히 한국과 유럽연합의 시계열 변동성은 증가하는 형태가 유사하게 나타났다.

〈Table 1〉은 각 국의 일일 탄소배출권 가격 수익률의 통계적 특성을 나타내고 있다. 각 국의 탄소배출권 가격 수익률은 0에 가깝고, 표준편차의 경우도 비슷하게 나타나고 있다. 첨도

는 정규분포인 3보다 현저히 큰 값을 가지고 있으며, Jarque-Bera 통계량은 전부 1%의 유의수준에서 탄소배출권 가격 수익률의 분포가 정규분포한다는 귀무가설을 기각하고 있다.

시계열 변수들은 대부분 불안정성을 가지고 있으므로 안정성을 검토해야 한다. 본 연구에서는 ADF(Augmented Dickey-Fuller) 검정을 실시하여 시계열 변수들의 안정성을 검증하였다. ADF 검정결과는 〈Table 2〉와 같다. 검정결과, 모든 변수들은 1% 유의수준에서 단위근이 존재하여 불안정한 시계열로 확인되었다. 다음으로 시계열 변수들을 1차 차분한 후 ADF 검정을 실시하였다. 1차 차분한 모든 변수들은 1% 유의수준에서 단위근이 존재하지 않는 안정적인 시계열로 나타났다.

5) 시장수익률은  $R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$ 로 표시한다.

이 중  $P_t$ 는 t일 가격,  $P_{t-1}$ 은 t-1일 가격이다.



Table 3. Estimation Result of Parameters Using DCC(1,1)-GARCH(1,1) Model

Variables	Estimate	ALL	I	II	III
KR-CN	$\alpha$	0.009***	0.009***	0.014***	0.012***
	$\beta$	0.977***	0.990***	0.984***	0.987***
	$\alpha + \beta$	0.986***	0.999***	0.997***	0.999***
KR-EU	$\alpha$	0.007***	0.007***	0.015***	0.013***
	$\beta$	0.828***	0.790***	0.910***	0.623***
	$\alpha + \beta$	0.835***	0.797***	0.926***	0.637***
KR-NZ	$\alpha$	0.082***	0.086***	0.013***	0.103***
	$\beta$	0.239***	0.811***	0.899***	0.034***
	$\alpha + \beta$	0.321***	0.897***	0.913***	0.137***
CN-EU	$\alpha$	0.009***	0.006***	0.011***	0.047***
	$\beta$	0.918***	0.934***	0.767***	0.698***
	$\alpha + \beta$	0.927***	0.939***	0.778***	0.746***
CN-NZ	$\alpha$	0.003***	0.017***	0.008***	0.069***
	$\beta$	0.781***	0.734***	0.128***	0.637***
	$\alpha + \beta$	0.784***	0.751***	0.136***	0.707***
EU-NZ	$\alpha$	0.003***	0.030***	0.012***	0.017***
	$\beta$	0.787***	0.952***	0.203***	0.688***
	$\alpha + \beta$	0.789***	0.982***	0.215***	0.706***

Notes: \* $\rho < 0.1$ , \*\* $\rho < 0.05$ , \*\*\* $\rho < 0.001$ .

Sources: ICAP (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13).

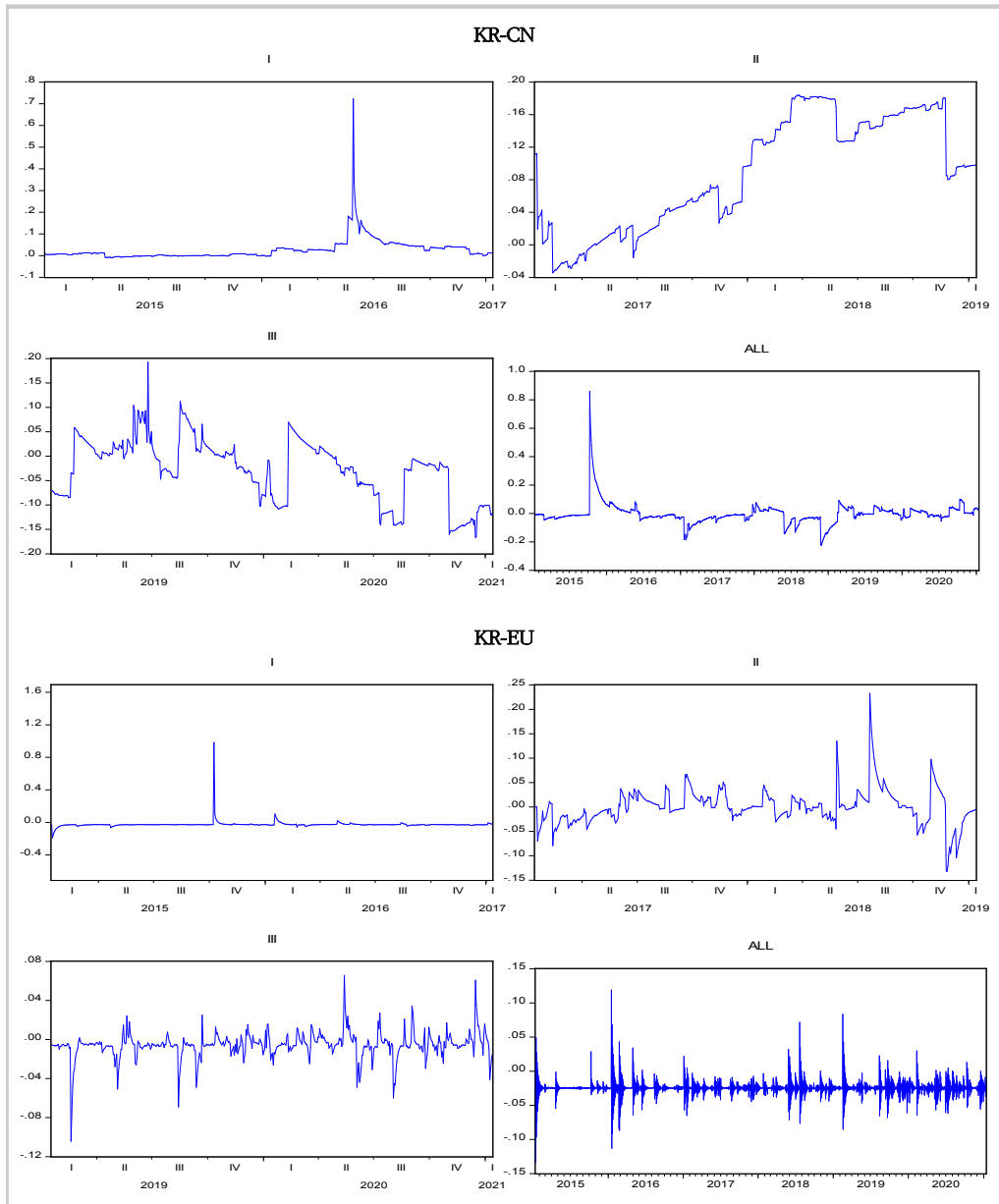
## 2. DCC-GARCH 모형 분석결과

본 연구는 DCC-GARCH 모형을 이용하여 주요국의 탄소배출권 가격의 동태적 조건부 상관관계를 분석하고자 한다. 연구모형은 DCC(1,1)-GARCH(1,1) 모형으로 설정하고, 분석모형으로는 이변량 DCC-GARCH 모형을 사용하여 모수를 추정하였다.

(Table 3)의 모수 추정결과를 살펴보면 모든 모수들이 1% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다. 그리고 모든  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 정(+)의 값이며, 동태적 조건부 상관관계의 평균 회귀속도를 나타내는  $\beta$ 의 값들은 최소 0.239에서 최대

0.986으로 나타나고 있다. 또한  $\alpha + \beta < 1$ 의 조건을 모두 만족시키고 있어 탄소배출권 가격 수익률 변수가 안정적인 것을 확인할 수 있다. 이는 충격의 장기지속성을 나타내는  $\alpha + \beta$ 의 값이 1에 근접하여 변동성 집중현상(Volatility Clustering)이 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 중국과 한국의  $\alpha + \beta$  값이 0.986으로 가장 높은 것으로 나타나 양국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 높다는 것을 알 수 있다. 반면, 한국과 뉴질랜드의  $\alpha + \beta$  값은 0.321로 가장 낮은 것으로 나타나 양국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 낮다는 것을 확인하였다.

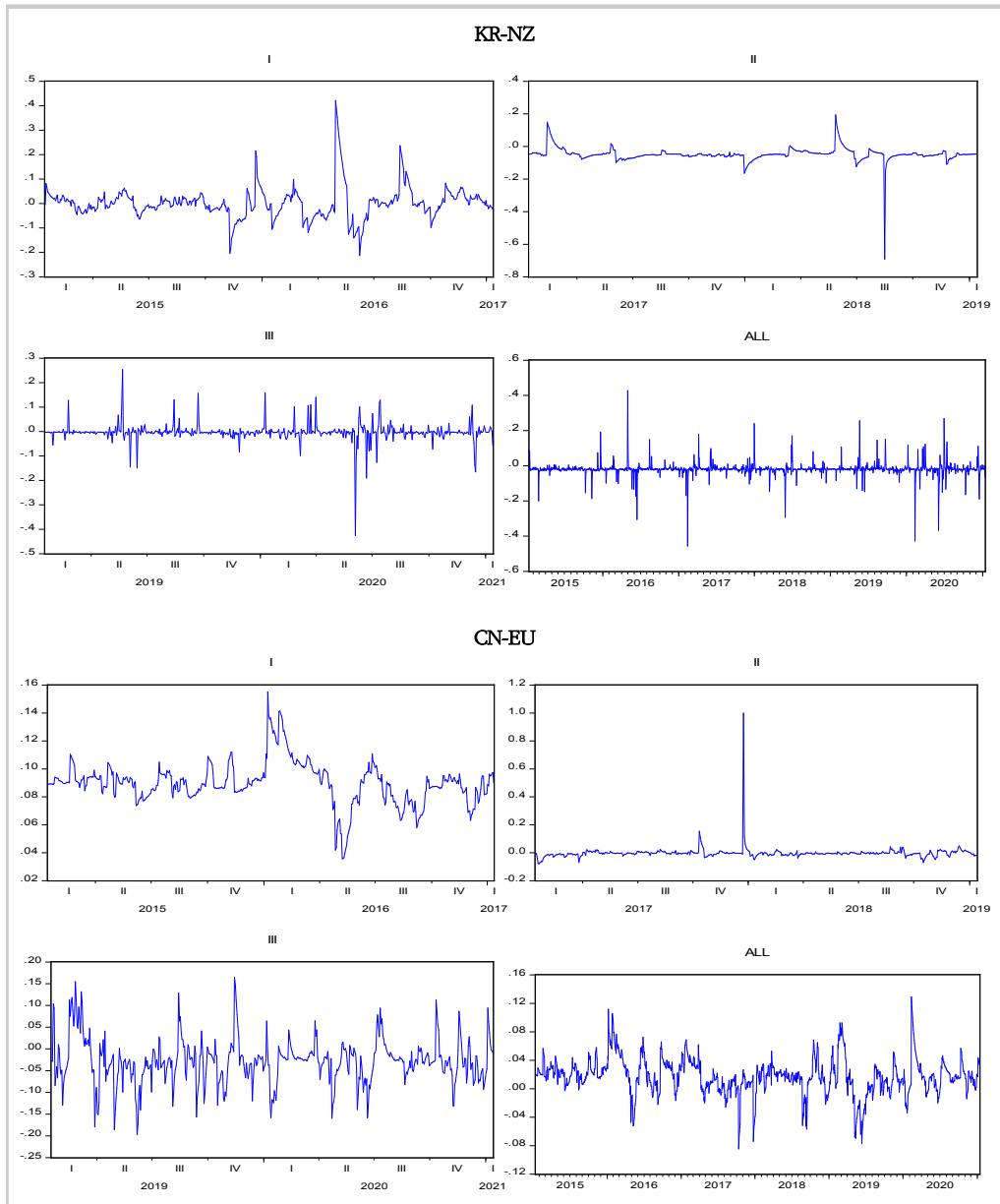
**Fig. 3-1.** The Dynamic Conditional Correlation among Carbon Emission Trading Prices in Major Countries



Notes: ALL Step: 2015. 01. 12 – 2021. 01. 13; Step I : 2015. 01. 12 – 2017. 01. 11; Step II: 2017. 01. 12 – 2019. 01. 11; Step III: 2019. 01. 14 – 2021. 01. 13.

Sources: ICAP (2015. 01. 12 – 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 – 2021. 01. 13).

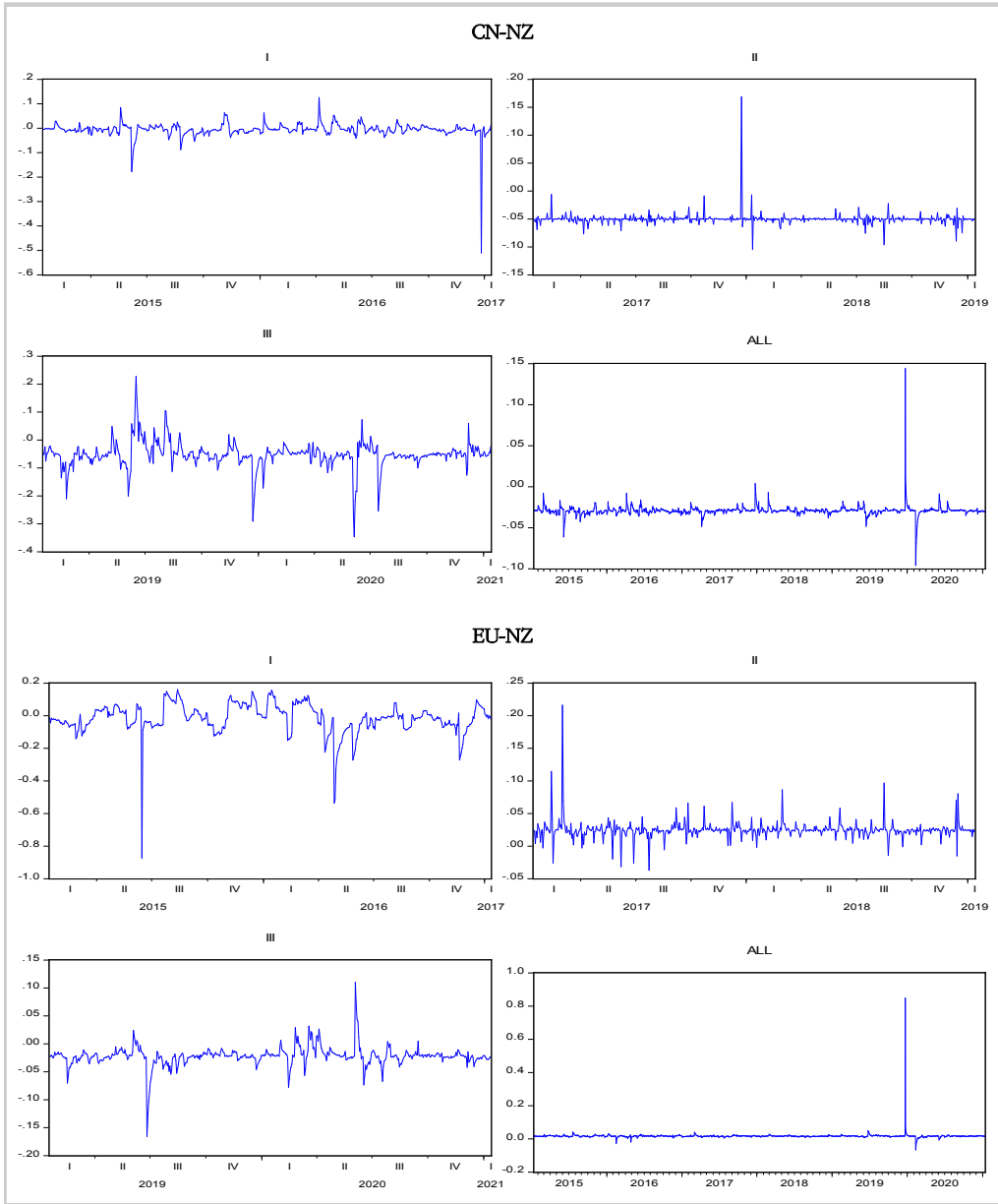
**Fig. 3-2.** The Dynamic Conditional Correlation among Carbon Emission Trading Prices in Major Countries



Notes: ALL Step: 2015. 01. 12 - 2021. 01. 13; Step I : 2015. 01. 12 - 2017. 01. 11; Step II: 2017. 01. 12 - 2019. 01. 11; Step III: 2019. 01. 14 - 2021. 01. 13.

Sources: ICAP (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13).

**Fig. 3-3.** The Dynamic Conditional Correlation among Carbon Emission Trading Prices in Major Countries



Notes: ALL Step: 2015. 01. 12 - 2021. 01. 13; Step I : 2015. 01. 12 - 2017. 01. 11; Step II: 2017. 01. 12 - 2019. 01. 11; Step III: 2019. 01. 14 - 2021. 01. 13.

Sources: ICAP (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13), Wind (2015. 01. 12 - 2021. 01. 13).

(Fig. 3-1), (Fig. 3-2), (Fig. 3-3)은 한국, 중국, 유럽연합, 뉴질랜드 등 주요 국들의 탄소배출권 가격 간 동태적 조건부 상관관계의 추이를 보여주고 있다.

한국과 중국(KR-CN)의 탄소배출권 가격은 전체 기간(ALL)동안 동태적 상관관계가 강하지 않고, 2015년 말에 일시적인 충격반응이 발생한 것으로 나타났다. 단계별로 보면, I 단계에서 동태적 상관관계가 매우 약했으며, II·III 단계에서는 동태적 상관관계가 점차 강화되었다. 이러한 현상이 나타난 원인은 I 단계에서 한국의 탄소배출권 시장이 설립 초기이므로 중국의 탄소배출권 시장과 상관관계가 약하게 나타난 것으로 풀이된다. 그 후 한국의 탄소배출권 시장이 성숙해지면서 중국의 탄소배출권 시장과 서로 영향을 미치는 것으로 해석된다.

한국과 유럽연합(KR-EU)의 탄소배출권 가격은 전체 기간(ALL)동안 동태적 상관관계가 비교적 강하게 나타나, 양국의 탄소배출권 시장이 동조화 현상이 있는 것으로 판단된다. 단계별로 보면, I 단계에서는 동태적 상관관계가 매우 작은 것으로 나타났으며, II·III 단계에서는 상관관계가 점차 강화된 것으로 나타났다.

한국과 뉴질랜드(KR-NZ)의 탄소배출권 가격은 전체 기간(ALL)동안 동태적 상관관계가 비교적 약하게 나타났다. 단계별로 보면, 각 단계에서 일시적인 충격반응이 있었지만, 동태적 상관관계가 비교적 약한 것으로 나타났다.

중국과 유럽연합(CN-EU)의 탄소배출권 가격은 전체 기간(ALL)동안 동태적 상관관계가 매우 강하게 나타나, 양국의 탄소배출권 시장이 동조화 현상이 있는 것으로 판단된다. 단계별로 보면, I 단계에서는 정(+)의 상관관계로 나타났는데, 이는 EU 탄소배출권시장이 중국 탄소배출권시장보다 체계적이고 성숙된 시장이므로 주로 EU 시장이 중국 시장에 영향을 미치는 것으로 해석된다. II 단계에서는 글로벌 경제가 침체에 처해 두 시장의 상관관계가 전반적으로 보합세로 나타났다. III 단계에서는 두 시장의 상관관계가 가장 강한 것으로 나타났는데, 이는 중국 시장이 체계화되면서 EU 시장과 서로 반응하는 것으로 해석된다.

중국과 뉴질랜드(CN-NZ)의 탄소배출권 가

격은 일시적인 충격반응이 있었으나, 전반적으로 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 단계별로 보면, I 단계와 II 단계의 동태적 상관관계가 약하고, III 단계에서 두 시장의 상관관계가 상대적으로 강하게 나타났다.

유럽연합과 뉴질랜드(EU-NZ)의 탄소배출권 가격도 일시적인 충격반응이 있었으나, 전체 기간(ALL)동안 동태적 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 단계별로 보면, I 단계와 II 단계의 동태적 상관관계가 약하고, III 단계가 가장 강한 것으로 나타났다.

이상 주요 국들의 탄소배출권 가격 간 동태적 조건부 상관관계를 종합하면 다음과 같은 특징이 있다.

첫째, 주요 국들의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 점차 강화되고 있는 것으로 나타났다. 각 국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계는 대체적으로 I 단계와 II 단계에서 약한 상관관계를 보이다가 III 단계에서 강한 상관관계로 나타났다.

둘째, 주요 국들의 탄소배출권 시장은 글로벌 충격을 받아 동태적 상관관계가 강화되었다. 특히 III 단계인 2020년 상반기에 코로나19의 확산으로 인해 각 국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 강하게 나타났다.

셋째, 한국, 중국, 유럽연합 등 3국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 강한 것으로 나타났다. 유럽연합은 최초로 탄소배출권 거래제를 도입한 국가로서 국제 탄소배출권 시장에서 주도적 지위에 있으므로, 한·중 양국의 탄소배출권 가격에 영향을 미치는 것으로 해석된다.

넷째, 한국과 중국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계도 점차 강화되고 있는 것으로 나타났다. 선행연구(Mo Jung-Youn, Yang Seung-Ryong and Cho Yong-Sung, 2005, Han Taek-Whan and Kim Suh-Kyong, 2007, Kim Ki-Jin, Won Doo-Hwan and Jung Su-Kwan, 2019)에서 대상국들의 탄소배출권 가격 간에 동조화 현상이 있는 것으로 확인되었다. 따라서 한국과 중국의 탄소배출권 시장도 동조화 현상이 있는 것으로 판단된다.

다섯째, 뉴질랜드의 탄소배출권 가격은 한국, 중국, 유럽연합의 탄소배출권 가격과 동태

적 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 농업생산이 중심인 뉴질랜드는 농업을 토대로 국제경쟁력을 갖춘 산업화 시장경제로 성공적으로 전환하였다. 또한 산림면적이 810만 ha로 전국토지면적의 30%에 달해 자연 공기 정화 조건이 양호하다. 뉴질랜드는 한국, 중국, 유럽연합과 산업구조 측면에서 상이하여 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 약한 것으로 풀이된다.

#### IV. 결론 및 시사점

2015년 파리협정(Paris Agreement) 이후 탄소배출권 시장의 메커니즘에 관한 국제사회의 논의가 진행 중이다. 한국 정부도 이러한 국제사회의 논의에 발맞추어 “국제 탄소시장과의 연계를 고려하여 국제기준에 부합”하도록 배출권거래제를 운영하고 있다. 이러한 배경 하에 한국의 탄소배출권 시장과 다른 국가의 탄소배출권 시장의 동조화를 분석하는 것은 유의미하다고 본다.

본 연구의 목적은 국제 탄소배출권 시장 간의 상관관계를 동태적으로 살펴보는 데 있다. 본 연구는 Engle(2002)의 DCC-GARCH 모형을 사용하여 2015년 1월 12일부터 2021년 1월 13일까지 일별 자료를 이용하여 한국, 중국, 유럽연합, 뉴질랜드 등 국가들의 탄소배출권 시장 간 정보이전효과를 동태적으로 분석하였다.

본 논문의 연구결과를 종합하면, 첫째, 뉴질랜드를 제외한 한국, 중국, 유럽연합의 탄소배출권 가격 간 동태적 조건부 상관관계가 강한 것으로 나타나 동조화 현상이 있는 것으로 나타났다. 또한 한국, 중국, 유럽연합의 탄소배출권 시장 간 동조화 경향은 시간이 지날수록 점차 강화되고 있는 것을 확인하였다.

둘째, 각국의 탄소배출권 시장은 글로벌 충격을 받아 동조화 경향이 더 강화되고 있는 것으로 나타났다. 특히 2019년 말에 코로나19의 확산으로 인해 각국의 탄소배출권 가격 간 동조화 현상이 강화된 것으로 나타났다.

셋째, 한국과 중국의 탄소배출권 가격 간 동태적 상관관계가 점차 강화되고 있는 것으로 나타났다.

상기 연구결과를 종합하여 다음과 같은 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

첫째, 한국, 중국, 유럽연합의 탄소배출권 시장 간 동조화 현상이 강화되고 있다. 따라서 현재 독자적으로 운영되고 있는 각국의 탄소배출권 시장은 장기적으로 통합할 가능성이 있음을 시사하고 있다. 특히 배출권 수급 불균형으로 어려움을 겪고 있는 한국 탄소배출권 시장에서 탄소배출권 시장의 국제 연계는 시장의 규모화를 통한 거래 활성화 및 국내 기업 감축비용 완화를 위한 매력적인 대안으로 거론되고 있다.

둘째, 한국과 중국의 탄소배출권 시장 간 연계 및 통합에 대해 검토할 필요가 있다. 양국의 탄소배출권 시장을 연계 및 통합하기 위해서는 두 시장의 다양한 설계요소들에 대한 조율이 필수적이다. 감축목표 강도, 할당방식, 이월·차입·상쇄 등 유연성 기제, 배출권 가격 및 공급량 관리제도, 페널티 제도 등이 고려해야 할 주요 설계요소들이다(Shim Seong-Hee, Kim Hyun-Suk and Park Soon-Chul, 2019).

셋째, 국제탄소배출권 거래 메커니즘을 구축할 필요가 있다. 탄소배출권 가격은 거시경제 변수, 에너지 가격, 기후 변화 및 금융시장 등 복합적인 요인의 영향을 받아 변동성이 심하여 탄소배출권 시장의 장기적 안정과 건전한 발전에 불리하다. 따라서 각국은 탄소배출권 거래제도 및 거래가격에 대해 국제 기준에 부합하도록 조정한 후, 통일된 국제 탄소배출권 거래 메커니즘을 구축할 것을 검토해야 한다.

본 연구는 한국과 다른 국가의 탄소배출권 가격 간 동조화 현상이 시간이 지날수록 점차 강화되는 것을 확인하였다. 특히 한국과 중국의 탄소배출권 가격 간 동조화 현상도 점차 강화되고 있다는 시사점을 제시한 의의가 있다.

그러나 중국의 통계자료는 전국적으로 통일된 가격자료가 아닌 후베이지역의 탄소배출권 가격을 사용하였기 때문에 중국의 탄소배출권 가격을 온전히 반영하지 못한 한계점이 있다. 또한 탄소 배출이 많은 국가인 미국을 포함하지 못한 한계점도 있다. 따라서 향후 중국의 통일된 탄소배출권 가격자료와 미국의 통계자료까지 확보하여 추가적인 연구를 할 필요가 있다.

본 연구는 국제 탄소배출권 시장 간 동조화 현상에 대해 분석하였을 뿐, 탄소배출권 가격의 결정 요인에 대해 제시하지 못하였다. 따라

서 향후 탄소배출권 가격 결정요인에 대한 더욱 엄밀한 연구모형을 개발하여 면밀한 연구를 수행해야 한다.

## References

- Aatola, P., M., Ollikainen and A. Toppinen (2013), "Price Determination in the EU ETS Market: Theory and Econometric Analysis with Market Fundamentals", *Energy Economics*, 36, 380-395.
- Acatrinei, M., A. Gorun and N. Marcu (2013), "A DCC-GARCH Model to Estimate the Risk to the Capital Market in Romania", *Romanian Journal of Economic Forecasting*, 1, 136-148.
- Aldy, J., A. Krupnick, R. Newell, I. Parry and W. Pizer (2010), "Designing Climate Mitigation Policy", *Journal of Economic Literature*, 48(4), 903-934.
- Bollerslev, T. (1990), "Modelling the Coherence in Short-Run Nominal Exchange Rates: A Multivariate Generalized ARCH Model", *Review of Economics and Statistics*, 72(3), 498-505.
- Cong, Rong-Gang and Yi-Ming Wei (2010), "Potential Impact of (CET) Carbon Emissions Trading on China's Power Sector: A Perspective from Different Allowance Allocation Options", *Energy*, 35, 3921-3931.
- Derek, W. B. and F. Carlo (2007), *Interaction of European Carbon Trading and Energy Price*, Fondazione Eni Enrico Mattei. Working Papers, 9-14.
- Emilie, A., C. Julien and C. Benoit (2008), "Price Drivers and Structural Breaks in European Carbon Prices 2005—2007", *Energy Policy*, 36, 787-797.
- Engle, R. F. (2002), "Dynamic Conditional Correlation: A Simple Class of Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Models," *Journal of Business and Economic Statistics*, 20(3), 339-350.
- Ewing, J. and Min-Young Shin (2017), *Northeast Asia and the Next Generation of Carbon Market Cooperation*, An Asia Society Policy Institute Report, 8-10.
- Fu, Jing-Yan and Hui-Fang Feng (2015), "Analysis of Effects of Carbon Price Impact on China's Manufacturing Industry Development — Empirical Research Based on Sub Industrial Panel Data", *Industrial Economic Review*, 6(1), 5-15.
- Gao, Ying and Kun Guo (2012), "Global Carbon Trading Market Structure and its Price Characteristics-Take the European Climate Trading System as an Example", *Studies of International Finance*, 12, 82-88.
- Han, Taek-Whan and Suh-Kyong Kim (2007), "A Test on the Integration among Greenhouse Gas Emission Trading Exchanges - Comparison among CCX, ECX and Nord Pool Exchanges", *Korea Trade Review*, 32(4), 57-75.
- Ivan, D. R. and J. T. Daniel (2018), "Carbon pricing and system linking: Lessons from the New Zealand Emissions Trading Scheme", *Energy Economics*, 73, 66-79.
- ICAP (2020), *Emissions Trading Worldwide*, Status Report, 11-23.
- Jun, Chi-Hyuck (2020), *Time Series Analysis and Application*, Paju, Gyeonggi-Do, Free academy.

- Kim, Ki-Jin, Doo-Hwan Won and Su-Kwan Jung (2019), "An Empirical Analysis on the Co-Movement between International Carbon Emission Trading Prices", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 27(3), 1-20.
- Kim, Man-Keun and Kang-il Lee (2015), "Dynamic Interactions between Carbon and Energy Prices in the U.S. Regional Greenhouse Gas Initiative", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(2), 494-501.
- Korea Ministry of Economy and Finance and Korea Ministry of Environment (2019), *The 3rd Emissions Trading System Basic Plan*, Working Papers, 1-15.
- Lee, Ki-Seong and Jai-Won Ryou (2012), "Analysis of Dynamic Conditional Correlation among Northeast Asian Stock Markets", *Journal of Northeast Asian Economic Studies*, 24(3), 1-24.
- Li, Ke-Long and Chi Xie (2020), "Correlation between EU and Hubei Carbon Trading Market", *Journal of Zhongnan University of Economics and Law*, 1, 114-126.
- Mizrach, B. (2012), "Integration of the Global Carbon Markets", *Energy Economics*, 34(1), 335-349.
- Mo, Jung-Youn, Seung-Ryong Yang and Yong-Sung Cho (2005), "The Law of One Price and Dynamic Relationship between EU ETS and Nord Pool Carbon Prices", *Environmental and Resource Economics Review*, 14(3), 569-593.
- Paoletta, M. S. and L. Taschini (2008), "An Econometric Analysis of Emission Allowance Prices", *Journal of Banking and Finance*, 32, 2008, 2022-2032.
- Park, Soon-Chul and Yong-Sung Cho (2014), "Analysis on Price Driver of Spread and Different Patterns of EUA and sCER", *Environmental and Resource Economics Review*, 22(4), 759-784.
- Shim, Seong-Hee, Hyun-Suk Kim and Soon-Chul Park (2019), *Latest Discussion Trends and Implications in Linking the Emissions Trading Market*, Korea Energy Economics Institute Report, 87-88.
- Tan, Xue-Ping and Xin-Yu Wang (2017), "Dependence Changes between the Carbon Price and its Fundamentals: A Quantile Regression Approach", *Applied Energy*, 190, 306-325.
- Wang, Xiao-Yu, Dong-Kun Luo and Gui-Xin Jie (2017), "An Analysis of the Linkage between Chinese and International Carbon Trading Market", *Ecological Economy*, 33(8), 48-51.
- Wu, Hui-Juan and Zhi-Guang Zhang (2021), "A Theoretical Model of the Spatial and Temporal Characteristics of Urban Carbon Price and its Formation Mechanism: Price Data Based on Eight Regional Carbon Trading Pilot Projects", *Modern Urban Research*, 19, 19-24.
- Yang, Chen, Yu Yang and Tao Yang (2015), "The Integrated Measurement about Carbon Finance Market Risk of Commercial Banks Based on Copula Model", *Chinese Journal of Management Science*, 23(4), 61-69.