

# 아시아 주식시장의 전이 네트워크의 특성 분석\*

고희운\*\*, 강상훈\*\*\*

## <요약>

본 연구는 미국을 포함한 아시아 주식시장 10개국(미국, 중국, 대만, 태국, 싱가포르, 필리핀, 한국, 일본, 인도, 인도네시아)의 변동성 전이의 존재를 파악하고 변동성 전이의 특성과 전파경로를 분석하였다. 이를 위해 시간척도별로 분해된 수익률 시계열을 이변량 GARCH-BEKK 모형을 사용하여 변동성 전이의 정보를 추출하여 네트워크를 구성하였다.

주요 실증분석의 결과는 다음과 같다. 첫째, GARCH-BEKK 모형을 통해 시간척도별로 변동성 전이효과의 존재를 살펴본 결과 아시아 주식시장에서 변동성 전이효과가 존재하며 시간 종속적 속성을 가진다. 시간척도에 따라 변동성 전이를 주도하는 시장과 종속되는 시장이 일정하지 않고 달라지면서 변동성 전이 흐름이 변하는 것을 확인하였다. 둘째, 장기 변동으로 갈수록 전이 관계가 강해지며 동시에 상호의존적 특성도 증가함으로써 아시아 주식시장의 변동성 전이 관계가 장기적으로 시장의 통합의 형태로 변하는 것을 발견하였다. 셋째, 아시아 주식시장의 변동성 전이 네트워크의 대표적인 전달자는 싱가포르이며, 태국이 수신자로서 외부 충격에 가장 민감한 시장으로 나타났다.

본 연구의 전이 네트워크 분석을 통해 발견된 변동성 전이의 주요 노드와 전파경로는 투자자들이 국제 포트폴리오를 구성할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이며 외부 충격에 따른 변동성 확대에 대한 완충장치를 마련할 수 있을 것이다.

\* 이 논문은 2016년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016S1A5A2A03926111).

\*\* 주저자, 대학원생, 경영학과, 부산대학교, E-mail : cloud3817@naver.com

\*\*\* 교신저자, 부산대학교 경영학과 부교수, +82-51-510-2558, E-mail: sanghoonkang@pusan.ac.kr

## I 서론

전이효과는 금융시장 간의 정보의 전이를 말하며 금융시장을 연구하는데 상당한 역할을 한다. 이러한 현상은 시장 간의 위험전가에서 비롯되는데 한 시장에서의 변동성이 자기 자신의 과거 변동뿐만 아니라 다른 시장으로부터 오는 변동에서도 영향을 받는다는 것이다. 이처럼 시장 간의 변동성이 전염되는 것을 이르러 변동성 전이효과라고 한다(Nazlioglu et al., 2015; Liu et al., 2017).

국제자본시장의 통합은 금융시장의 디지털화, 증권화, 세계화 등이 원인으로 작용하여 시장 간 연계성이 점차 높아졌으며, 이는 시장 간의 투자흐름뿐만 아니라 변동성의 상호의존성을 상승시켰다(Bekaert and Harvey, 1995). 최근 발생한 2007년 서브프라임 모기지, 2008년 리먼브라더스 파산 사태 그리고 2012년 유럽발 금융위기와 같은 글로벌 금융위기는 그 진원지에 머무르지 않고 전 세계적으로 퍼져 시장붕괴상황을 초래하였다. 특히, 아시아의 경우 미국의 서브프라임 모기지의 지역적 성격의 적은 노출에도 신용스프레드가 눈에 띄게 증가하는 모습을 보였다(Brana and Laget, 2010). Zhang et al.(2010)은 아시아 시장은 여전히 글로벌 금융 및 경제 통합으로 인해 전염효과(contagious effect)가 나타나고 있는 것으로 보인다고 하였다.

많은 연구자들이 글로벌 금융시장들 간의 변동성 전이현상에 대해 관심을 보였고 다양한 경제모형과 방법론을 통해 분석하고 증명하였다. 하지만 복잡한 금융시스템 안에서 경제모형만을 사용하여 상호작용을 분석한다는 것은 상당히 어려운 일이기 때문에 글로벌 금융 시스템의 구조적 특징을 함께 연구해야 한다(Newman, 2003; Liu et al., 2017). 이를 위해 복잡계 네트워크 이론은 효율적인 방법을 제공한다. 복잡계 네트워크 이론은 Erdős and Rényi(1960)의 무작위 그래프 이론(random graph theory)에서 유래된 이후, 통계물리학, 컴퓨터공학, 사회학, 경제학 등에 다양하게 적용되었는데 최근 금융시장을 연구하는데 폭넓게 활용되고 있다(Caraiani, 2012; Djauhari and Gan, 2015; Nobi et al., 2014; Sensoy and Tabak, 2014; Yang et al., 2014; Brida et al., 2015; Kydros and Oumbailis, 2015; Majapa and Gossel, 2016:). 예를 들어 각 시장들을 지칭하는 노드(nodes)와 시장들 간의 연계를 표현하는 엣지(edges)로 구성하여 시장 간의 연계성을 분석할 수 있다.

본 연구는 아시아 주식시장의 변동성 전이효과를 복잡계 네트워크 분석을 통해 전파되는 경로를 살펴본다. 단기변동과 장기변동의 시간척도에 따라 변동성 전이효과의 움직임이 어떻게 달라지는지 살펴보기 위해 웨이블릿 분석법(wavelet analysis method)을 이용하였다. 이 분석법을 이용하여 각 시간척도별로 수익률을 분해(decomposition)하였고 이를 GARCH-BEKK 모형에 적용하여 변동성 전이효과를 분석한다. 분석 모형은 변수 간의 조건부 상관관계에 대한 제약이 없기 때문에 시장 간의 변동성 효과를 추정하는데 매우 유용하여 변동성 전이효과 분석에 널리 이용되고 있다. 그 다음 분석 모형을 통해 나타난 시장 간 전이효과의 관계를 노드(아시아 주식시장의 각 나라들)와 엣지(시장 간의 연계관계)로 나누어 전이 네트워크를 만들어서 주요 노드와 전파경로를 살펴본다.

본 연구는 2가지 관점에 초점을 둔다. 첫째, 아시아 주식시장 간의 변동성 전이효과를 이용하여 변동성 전이 네트워크를 구성할 수 있다. 둘째, 변동성 전이 네트워크의 주요 노드를 발견할 수 있으며 이를 통해 변동성이 전이되는 전파경로를 확인할 수 있다.

연구의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 선행연구를 살펴보고 제Ⅲ장은 연구에서 사용되는 연구모형에 관해 살펴볼 것이다. 제Ⅳ장은 분석자료 및 기초통계량 조사를 포함하여 실증

분석의 결과를 제시하고 제V장은 결론과 시사점을 제언하였다.

## II 선행연구

변동성 전이효과에 관한 연구는 학계에서 많은 관심을 가지는 분야로써 다양한 주제와 접근법을 활용한 수많은 연구들이 존재한다. 그중 주식시장 간의 변동성 전이효과에 관련된 연구들도 활발하게 진행되고 있다.

Kang and Yoon(2011)은 아시아 주식시장(한국, 중국, 홍콩, 싱가포르, 대만)을 대상으로 2008년 글로벌 금융위기가 변동성 전이에 미치는 영향을 VAR(1)모형과 이변량 GARCH 모형을 이용하여 분석하였다. 글로벌 금융위기 이후 중국과 아시아 이머징시장 4개국 간에 변동성 전이가 강하게 나타나 시장의 통합이 강해졌음을 발견하였다.

Allen et al.(2017)은 호주의 주요 무역대상국인 중국, 일본, 한국, 미국을 대상으로 호주와의 변동성 전이 관계를 전이지수모형을 통해 알아보는데 분석 대상 중 중국은 상하이종합지수와 홍콩의 항셱지수를 함께 사용하여 분석하였다. 분석결과, 미국과 홍콩이 호주에게 가장 영향을 많이 주는 것으로 나타났다.

Gamba-Santamaria et al.(2017)은 라틴 아메리카(브라질, 칠레, 콜롬비아, 멕시코, 미국) 주식시장을 대상으로 변동성 전이효과를 전이지수모형으로 분석한 결과, 브라질이 변동성 순 전달자이며, 칠레, 콜롬비아, 멕시코는 순 수신자로 나타났다. 또한 미국으로부터 라틴아메리카에 전해지는 충격의 전이는 리먼브라더스 파산 사태 기간에 상당히 증가하는 것을 발견하였다.

변동성 전이효과에 관련된 연구는 비단 주식시장에만 한정된 것이 아니라 환율, 원자재 등 다양하게 연구되어지고 있다.

Li(2015)는 중국의 CSI300 선물시장에 현물시장의 안정적인 가격변동이 효율적으로 반영이 되어 있는지를 살펴보기 위해 이산적 웨이블릿 변환과 VAR-BEKK-GARCH 모형을 통해 변동성 전이효과를 분석하였다. 선물과 현물시장 간의 양방향 변동성 전이가 존재하며 CSI300 선물이 주식시장의 안정화에 기여하는 것으로 나타났다.

Boubaker and Raza(2017)은 유가와 BRICS 주식시장 간의 변동성 전이를 살펴보기 위해 웨이블릿 분석법을 이변량 ARMA-GARCH 모형을 결합하여 분석하였다. 분석 결과, 유가와 주식시장의 가격이 그들 자신의 뉴스와 변동성에 의해 직접적인 영향을 받으며 다른 시장의 가격과 웨이블릿의 척도에는 간접적인 영향을 받는 것으로 나타났다.

Liu et al.(2017)은 유가와 주식시장(미국, 러시아) 사이의 전이효과를 살펴보기 위해 웨이블릿을 기반으로 한 GARCH-BEKK 모형을 사용하였는데 웨이블릿 척도에 따라 전이 규모와 방향이 다양한 것으로 나타났다. 유가와 미국 주식시장 간의 연계는 장기변동에서 약화되었고 유가와 러시아 주식시장은 모든 시간척도에서 연계성이 강해지는 것을 확인하였다.

최근에는 변동성 전이를 복잡계 네트워크 이론에 적용하여 전이되는 정도와 방향성을 직관적으로 볼 수 있는 네트워크를 사용하는 연구들이 나타나기 시작하였다.

Diebold and Yilmaz(2014)는 변동성 전이효과를 예측오차 분산분해 모형을 사용하여 얻어진 연결 관계를 나타낸 행렬 표와 전이지수를 제시함으로써 미국 금융기관의 변동성 전이현상이 시간가변적인 움직임이며 전이되는 정도와 방향성을 확인하였다. 이를 바탕으로 리먼브라더스 파산기간동안 미국 금융기관의 변동성 전이경로를 직관적으로 확인할 수 있었다.

Liu et al.(2017)은 G20국가들의 주식시장 간의 변동성 전이효과를 살펴보았다. GARCH-BEKK 모형에 복잡계 네트워크 이론을 적용하여 전이 네트워크를 만들었다. 실증분석 결과, G20국가들의 주식시장 간의 변동성 전이는 전체적으로 관련된 네트워크를 구성하였으며, 장기로 보면 한국이 가장 큰 전달자 역할을 하고 브라질이 가장 큰 수신자 역할을 하는 것으로 분석되었다.

Long et al.(2017)은 중국의 18개 산업섹터 사이의 변동성 전이효과를 살펴보기 위해 GARCH-BEKK 모형을 사용하여 충격 네트워크와 분산 네트워크를 각각 구성하여 분석하였다. 전이효과와 네트워크 구조는 기간에 따라 변하는 것을 확인할 수 있었다.

### III 연구 방법론

#### 3.1. The Haar à trous wavelet(HTW) transform<sup>1)</sup>

웨이블릿 분석(wavelet analysis)은 시간 영역에서 시그널(signal)의 시간-주파수기법(time-frequency representation)을 제공하는 파워풀한 수학적 방법이다. 이 분석법은 안정적이지 않은 시계열(non-stationary time series)을 분석하는데 사용할 수 있어서 경제·금융 분야에서 흔히 사용하고 있다. 웨이블릿은 각기 다른 주파수 계열 간의 상호관계를 연구하는데 직관적인 방법을 제공한다. 또한 웨이블릿은 소파동(small wave)이라고 불리며 제한된 기간 내에서 상승과 하락을 반복한다. 웨이블릿 변환(wavelet transform)은 father wavelet,  $\phi(t)$ 과 mother wavelet,  $\psi(t)$ 의 두 함수를 기반으로 이뤄진다. mother wavelet을 기반으로 daughter wavelet의 집합,  $\psi_{u,s}(t)$ 는 단순히  $\psi$ 를 이전(translating)과 척도조정(scaling)을 통해 생성할 수 있다.

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (1)$$

위 식에서  $s$ 는 웨이블릿의 길이를 조절하는 팽창요인(scaling or dilation parameter)이고,  $u$ 는 시간 내에서 웨이블릿의 위치를 나타내는 위치요인(location parameter)이다. 웨이블릿 변환은 두 가지 유형이 존재하는데, 하나는 연속적 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform : CWT)이고 다른 하나는 이산적 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform : DWT)이다. CWT는 시간 내 모든 가능한 척도와 위치에서 작용하는 반면 DWT는 이산적 척도 및 위치 값의 특정 하위집합을 사용한다. DWT는 연속 함수를 이산적 상태로 변환함으로써 구현하기에 더욱 적은 계산시간(computational time)과 재료(resources)가 필요하기 때문에 두 변환 중 가장 일반적으로 사용된다.

본 연구에 사용되는 HTW 변환은 Murtagh et al.(2004)가 개발하였다. 이 웨이블릿 함수는 데시메이션되지 않은 웨이블릿 변환(redundant or non-decimated wavelet transform)의 한 유형인 'à trous wavelet'과 가장 단순한 웨이블릿 중 하나인 'Haar wavelet'이 결합된

1) 방법론의 상세한 설명은 Starck and Murtagh(2001), Murtagh et al.(2004)에서 볼 수 있으며, Jammazi(2012), Aloui and Jammazi(2015), Jammazi et al.(2017) 등이 활용하였다.

것이다. HTW 변환은 기존의 웨이블릿 함수의 결합에 대해 해결이 가능하다. 첫째, MODWT는 경계문제(boundary problems)에 영향을 받으며, 효율적이기 위한 각 척도에 편향된 웨이블릿 계수들을 제거해야하는데, 이에 반해 HTW는 경계효과(boundary effects)에 영향을 받지 않으므로 원시계열에 포함된 전체 정보의 보전을 보장한다. 둘째, HTW 변환은 많은 경제 및 금융 시계열에서 전형적으로 나타나는 비선형 및 혼돈역학(chaotic dynamics)을 정확하게 포착할 만큼 충분히 유연하다. 셋째,  $\hat{a}$  trous 웨이블릿 함수에 내재된 중복(redundancy)은 모든 웨이블릿 요소가 원 시계열과 길이가 같기 때문에 동일한 시점에 각 해상도 척도(resolution scale)에서 정보를 쉽게 연관시킬 수 있음을 의미한다. 이러한 중복의 특성은 HTW가 시프트불변성(shift-invariant)임을 의미한다. 즉 결과가 출발점의 선택에 민감하지 않다는 것이다.

HTW 변환의 구조는 주어진 척도  $j$ 와 위치  $t$ 에서 신호  $x(t)$ 의 평탄해진 버전(smoothed version)  $S_j(t)$ 은 중첩 적분(convolution)을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_j(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h(l)S_{j-1}(t+2^{j-1} \times l) \quad (2)$$

여기서  $h = (1/2, 1/2)$ 는 HTW와 관련된 척도조정 저역 통과 필터(low-pass filter)이다. 결국, 원시계열을 나타내는  $S_0$ 가 가장 우수한 척도이다.

상세 요소(detail component)  $d_j(t)$ 는 척도  $j$ 에 신호  $x(t)$ 의 상세 특징을 포착하는데, 두 연속적인 해상도 수준(consecutive resolution levels)에서 두 평탄해진 버전 간의 차이에서 이끌어 낼 수 있다.

$$d_j(t) = S_{j-1}(t) - S_j(t) \quad (3)$$

집합  $\{d_1(t), d_2(t), \dots, d_J(t), S_J(t)\}$ 은 척도  $J$ 까지의 신호의 웨이블릿 변환을 나타내며 원 신호는 웨이블릿 계수와 척도조정 계수의 합으로 재구성될 수 있다.

$$x(t) = S_J(t) + \sum_{j=1}^J d_j(t) \quad (4)$$

여기서  $J$ 는 척도 혹은 해상도 수준의 개수이다.

### 3.2. GARCH-BEKK 모형

네트워크를 구축하는데 토대가 되는 전이효과는 GARCH-BEKK 모형을 이용하여 알 수 있다. Engle and Kroner(1995)은 GARCH-BEKK 모형을 시장 간의 변동성 전이현상을 알아보기 위해 제안하였다. BEKK는 변수 간의 상관관계 구조에 제한이 없다는 뛰어난 장점을 가진다. 또한 Bollerslev et al.(1992)에 의하면, GARCH(1,1)은 금융 시계열의 변동성 동학을 알아보는데 충분하다. 본 연구는 이변량(bivariate) GARCH-BEKK 모형을 사용하여 시장 간의

변동성 전이효과를 살펴본다. GARCH-BEKK 모형은 평균과 분산의 식으로 표현할 수 있다.

$$R(t) = \begin{bmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1(t) \\ \mu_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(t-1) \\ R_2(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1(t) \\ \epsilon_2(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H(t) = C' C + A' \epsilon_{t-1} \epsilon_{t-1}' A + B' H_{t-1} B \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$R(t)$ 는 시점  $t$ 에서 시장 1과 2에 대한 수익률의  $(2 \times 1)$  벡터이다.  $\mu_1(t)$ 와  $\mu_2(t)$ 는 장기추 세계수(long-term drift coefficients)를 나타내며,  $\epsilon_1(t)$ 와  $\epsilon_2(t)$ 는 랜덤오차(random errors)의  $(2 \times 1)$  벡터이다.  $H(t)$ 는 시점  $t$ 에서의  $(2 \times 2)$  조건부 분산-공분산 행렬이고  $C$ 는 상수 계수로 이뤄진 하-삼각행렬(lower triangular matrix),  $A$ 는 조건부 잔차 행렬의 계수,  $B$ 는 조건부 공분산 행렬의 계수이다.

이 모형의 모수는 BHHH(Berndt, Hall, Hall and Hausman) 알고리즘으로 최적화된 최대 우도추정법(maximum likelihood estimate method)을 통해 추정할 수 있다. 조건부 대수우도함수(conditional log likelihood function)  $L(\theta)$ 은 다음과 같다.

$$L(\theta) = -T \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T [\ln |H_t(\theta)| + \epsilon_t(\theta)' H_t^{-1} \epsilon_t(\theta)] \quad (8)$$

여기서  $T$ 는 관측개수이고  $\theta$ 는 추정될 수 있는 모수의 벡터이다.

위 식(6)과 (7)에서  $A$ 와  $B$  행렬의 비대각요소(off-diagonal elements)인  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ 과  $b_{12}$ ,  $b_{21}$ 은 각각 충격과 변동성이 전이하는 방향을 설명한다. 한편, Liu et al.(2017)는 변동성 전이효과는  $A$ 와  $B$  행렬의 비대각요소들의 합으로 간주할 수 있다고 하였고 다음과 같은 식으로 정의하였다.

$$e_{1,2} = |a_{1,2}| + |b_{1,2}| \quad (9)$$

$a_{1,2}$ 는  $A$  행렬의 비대각모수이고,  $b_{1,2}$ 는  $B$  행렬의 비대각모수이다. 또한  $e_{1,2}$ 는 시장 1과 시장 2 사이의 변동성 전이효과의 크기를 나타낸다.

### 3.3. 복잡계 네트워크

#### 3.3.1. 전이 네트워크 설계

복잡계 네트워크는 네트워크의 특징들을 밝혀낼 수 있는 이론적 접근법을 제공한다. 이 이론은 네트워크로써 실제 복잡계 시스템의 다양한 부분들에 대한 관계들을 고려해야한다. 복잡계 네트워크는 노드와 노드의 연계를 나타내는 엣지로 구성되는데 다음의 식(10)과 같다.

$$G = (N, E) \quad (10)$$

여기서  $G$ 는 복잡계 네트워크를 나타내고  $N$ 은 노드들의 집합,  $E$ 는 엣지들의 집합을 나타낸다. 네트워크 노드를 나타내는  $i, j$ 와 예를 들어  $i$ 에서  $j$ 로의 연계가 이뤄졌을 때  $e_{i,j}$ 로 나타낸다. 엣지  $E$ 의 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$E = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n,1} & \cdots & e_{n,n} \end{bmatrix} (n \in N) \quad (11)$$

본 연구에서 노드들은 각 국가들을 의미하며, 엣지인 GARCH-BEKK 모형을 통해 추출된  $e$ 는 변동성 전이효과를 의미한다. 또한 전이 방향은 엣지의 방향을 의미하고 전이의 정도(크기)는 전이 네트워크의 엣지의 가중치(weight)를 의미한다. 시장 간의 전이관계를 지정하는데 있어서 유의수준이 너무 작으면 몇몇 중요한 전이 정보를 잃을 수 있으므로 GARCH-BEKK 모형에서 추출된 전이 관계 모수들 중 10%에서 유의한 관계들을 엣지로 사용하였다.

### 3.3.2. 노드의 가중치

전이 네트워크의 가중되는 정도는 전이효과들의 개수뿐만 아니라 강도로도 표현된다. 특히 가중치가 큰 노드일수록 전이효과의 영향을 많이 받는다. 가중치는 주는 정도와 받는 정도로 나뉘지는데 이것은 다음과 같이 표현된다.

$$d_i^{out} = \sum_{j=1}^n e_{ij} \quad (12)$$

$$d_i^{in} = \sum_{j=1}^m e_{ji} \quad (13)$$

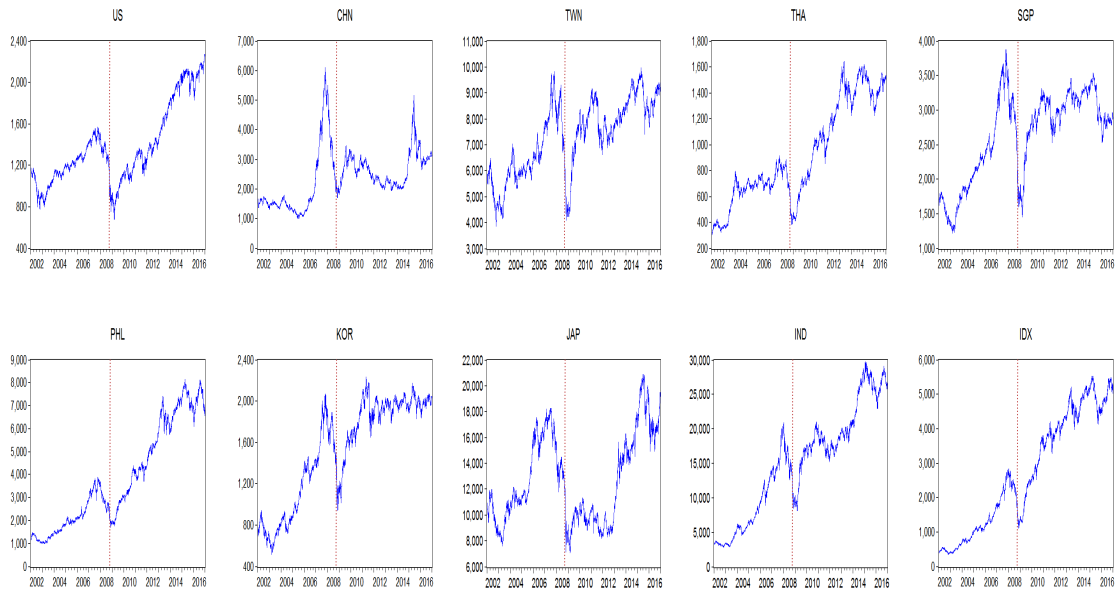
$d_i^{out}$ 과  $d_i^{in}$ 은 각각 영향을 주는 정도의 가중치와 영향을 받는 정도의 가중치이다. 즉 각 노드들의 전이 관계에서 전달하는 정도와 수신하는 정도를 의미한다.  $e_{ij}$ 는 노드  $i$ 부터 노드  $j$ 까지의 변동성 전이의 총합을 의미하며  $e_{ji}$ 는 반대로 노드  $j$ 부터 노드  $i$ 까지의 변동성 전이의 총합이다.  $e$ 는 식(9)에 의해 얻어진 것이다. 노드의 가중치가 크면 클수록 변동성 전이 관계가 강한 것을 의미한다.

## IV 실증분석

### 4.1. 분석자료 및 기초통계량

본 연구는 미국을 포함한 아시아 주식시장 10개국(미국(US), 중국(CHN), 대만(TWN), 태국(THA), 싱가포르(SGP), 필리핀(PHL), 한국(KOR), 일본(JAP), 인도(IND), 인도네시아(IDX))을 대상으로 분석을 실시하였다. 2002년 1월부터 2016년 12월까지의 각 시장대표지수(S&P500, 상해종합, 대만가권, SET, STI, PSE, KOSPI, NIKKEI225, SENSEX, JKSE)의 일별 자료, 총 3914개의 표본을 이용하였다. 일별 자료는 로그수익률로 변환하여 분석에 이용하였으며, 로그수익률은  $X_{i,t} = \ln(P_{i,t}/P_{i,t-1}) \times 100$ 이다. 여기서  $X_{i,t}$ 는 시점  $t$ 에 각 시장  $i$ 의 수익률이며,  $P_{i,t}$ 는 시점  $t$ 에 각 시장  $i$ 의 지수를 의미한다. 데이터는 에프앤가이드(fnguide)를 통해 수집하였다.

[그림 1]은 각 시장의 일별 주가지수 추이를 보여준다. 미국금융위기 기간인 2008-2009년 동안 모든 시장에서 크게 변동하는 모습을 볼 수 있다. 또한 이를 기준으로 주가지수의 움직임이 중국을 제외하고 대부분 우상향으로 비슷하게 함께 움직이는 것을 볼 수 있다.



[그림 1] 일별 주가지수 추이

<표 1>은 아시아 주식시장의 각 대표지수의 수익률의 기초통계량을 보여준다. 모두 양(+)의 평균수익률을 보이며 가장 높은 평균수익률을 보인 나라는 인도네시아(0.067%)이고 가장 낮은 평균수익률을 보인 나라는 태국(0.013%)이다. 본 연구의 표본 기간에 2008-2009년 미국금융위기와 2012년 유럽재정위기 기간이 포함되어 있어서 최대값과 최소값에서 보는 바와 같이 수익률 분포의 양쪽 꼬리부분에 해당하는 극단치가 존재하며 아시아 주식시장의 외부충격에 따른 여파가 적지 않았음을 알 수 있다.



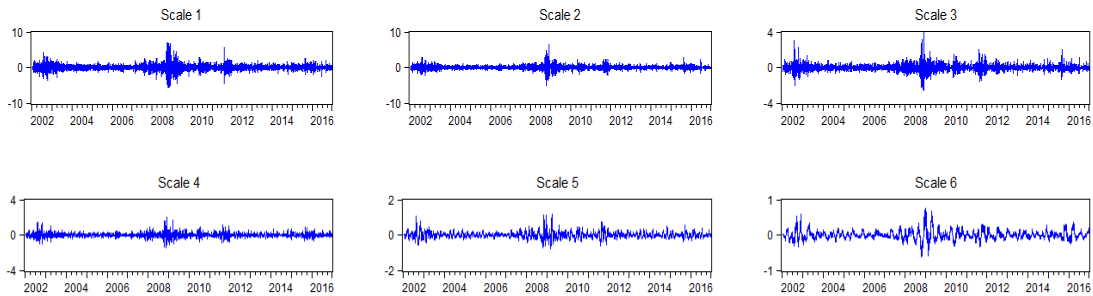
<표 1> 수익률의 기초통계량

본 연구의 표본은 미국(US)과 아시아 주식시장(중국(CHN), 대만(TWN), 태국(THA), 싱가포르(SGP), 필리핀(PHL), 한국(KOR), 일본(JAP), 인도(IND), 인도네시아(IDX))을 대상으로 2002년 1월부터 2016년 12월까지의 일별 자료를 사용하였다. Jarque-Bera test는 수익률 시계열 분포의 정규성을 검정한 것이다. Ljung-Box 통계량  $Q(10)$ 과  $Q^2(10)$ 은 잔차와 잔차제곱의 20번째 시차의 자기상관성의 존재를 검정한 것이다. \*\*\*, \*\*, \*는 각각 1%, 5%, 10% 수준에서 유의함을 나타낸다.

	평균	중앙값	최대값	최소값	표준 편차	왜도	첨도	Jarque-Bera	$Q(10)$	$Q^2(10)$
US	0.017	0.027	10.957	-9.470	1.204	-0.230	12.946	16168.84***	25.30***	3426.8***
CHN	0.016	0.000	9.034	-9.256	1.607	-0.423	7.709	3733.46***	28.34***	738.5***
TWN	0.013	0.000	6.525	-6.912	1.241	-0.304	6.493	2050.57***	24.44***	910.1***
THA	0.042	0.003	10.577	-16.063	1.261	-0.820	16.014	28057.92***	32.47***	609.6***
SGP	0.015	0.000	7.531	-8.696	1.085	-0.152	9.239	6363.22***	21.40**	3020.6***
PHL	0.045	0.000	9.365	-13.089	1.230	-0.604	10.833	10244.54***	20.79**	693.8***
KOR	0.027	0.015	11.284	-11.172	1.355	-0.444	9.513	7047.05***	16.34*	2048.2***
JAP	0.015	0.000	13.235	-12.111	1.494	-0.458	10.385	9030.44***	8.24	2905.5***
IND	0.054	0.027	15.990	-11.809	1.418	-0.085	12.584	14985.89***	44.65***	986.9***
IDX	0.067	0.061	7.623	-10.954	1.342	-0.712	10.705	10012.34***	12.67	758.6***

왜도(skewness)는 모든 주식시장에서 음(-)의 값을 보이며, 첨도(kurtosis)는 정규분포에 비해 매우 높은 수치를 보인다. 이를 통해 분석 대상 국가들의 주식시장 수익률 분포가 꼬리(tails)가 두텁고 봉우리(peaks)가 높은 과첨(leptokurtic)분포를 따르는 경향이 있다. 또한 수익률 시계열 분포의 정규성을 검정한 Jarque-Bera test에서 정규성을 따른다는 귀무가설을 기각하는 것으로 나타났다. 그리고 수익률 시계열의 자기상관성을 살펴보기 위해 Ljung-Box 통계량  $Q(10)$ ,  $Q^2(10)$ 을 이용한 결과, 수익률 제곱 시계열의 자기상관성 검정에서 모두 수익률 제곱 시계열에 자기상관성이 존재하지 않는다는 귀무가설을 기각하였다. 이는 변동성 군집성을 포착할 수 있는 GARCH 타입 모형을 사용하는 것이 적절함을 의미한다.

본 연구에서는 시간척도에 따른 전이효과를 살펴보기 위해 웨이블릿 분석법을 적용하여 수익률을 분해하였다. HTW 변환을 사용하여 각 시장의 일별 수익률 시계열을 6개의 척도(scale1, scale2, scale3, scale4, scale5, scale6)로 분해하였다. scale1은 2-4일의 시간대에 발생한 충격으로 인한 시장 간의 단기 변동을 나타내며, scale2부터 scale6까지 각각 4-8, 8-16, 16-32, 32-64, 64-128일의 시간척도별 시간대가 부여된다. [그림 2]에서 미국 주식시장의 수익률을 분해한 결과를 보여주고 있다.



[그림 2] 미국(S&P500) 주가지수 수익률의 웨이블릿 분해 결과

#### 4.2. 실증분석 결과

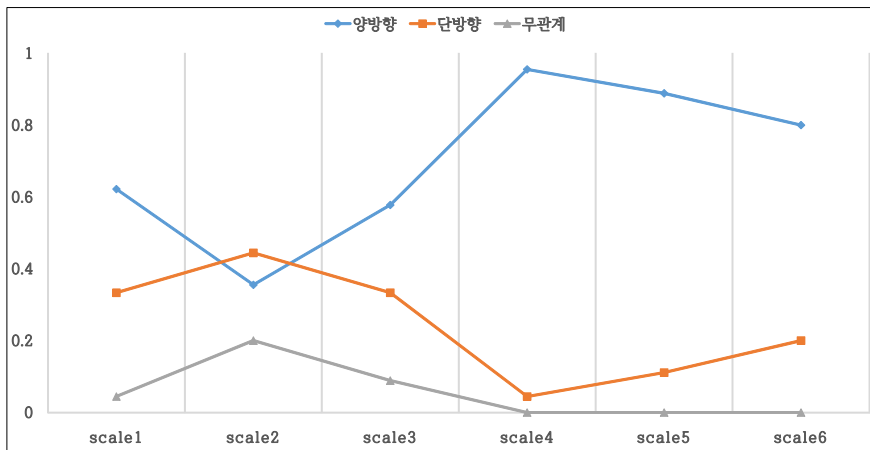
이 장에서는 웨이블릿 시계열을 기반으로 시간척도별로 구분된 아시아 주식시장 간의 변동성 전이현상을 살펴보고자 한다. 아시아 주식시장 간의 전이효과를 분석하기 위해 이변량 GARCH-BEKK 모형을 사용하였다. 모형을 통해 추정된 변동성 전이효과를 나타내는 계수 값들 중 10% 수준에서 유의한 값들을 추려내어 살펴본 결과, 대부분 10% 수준에서 유의한 것으로 나타남으로써 아시아 주식시장 간의 변동성 전이현상이 존재함을 발견하였다. 추출된 변동성 전이 계수 값은 3.2장에서 언급한 방법을 통해 정리하면 총 90개의 전이 관계로 나타낼 수 있다. 이를 각 시간척도별로 살펴보면 scale1부터 scale6까지 각각 71, 52, 67, 88, 85, 81개의 전이 관계가 추출되었다. 이러한 결과는 <표 2>에 정리하였다.

<표 2>에서 보는 바와 같이 scale1을 단기변동, scale2와 scale3을 중기변동, 나머지는 장기변동으로 구분하여 분석을 하였다. 전체적으로 살펴보면 아시아 주식시장에서의 전이효과는 단기변동에서 장기변동으로 갈수록 전이 관계 비율이 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 장기변동에서의 전이 관계 비율의 평균이 대략 94%를 보이는데, 이는 장기변동으로 갈수록 변동성 전이효과가 아시아 주식시장 전역에 걸쳐 영향을 미치며 서로 유기적인 관계를 장기간 이어나가는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 관계를 좀 더 자세히 알아보기 위해 [그림 3]과 같이 시간척도별 변동성 전이의 흐름을 분석하였다.<sup>2)</sup> 이것은 시간척도에 따른 변동성 전이의 흐름의 변화를 직관적으로 살펴볼 수 있다. 시간척도별로 양방향( $X \leftrightarrow Y$ ), 단방향( $X \rightarrow Y$  혹은  $X \leftarrow Y$ ), 무관계를 보여주고 있으며, 각각 마름모형, 사각형, 삼각형으로 표시되어 있다. 단방향과 무관계는 시간척도가 증가함에 따라 감소하고 있는 반면 양방향은 시간척도가 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 단기변동에서 장기변동으로 갈수록 양방향의 관계가 증가한다는 것이다. 단기변동에서는 변동성 전이를 주도하는 일부 국가의 영향이 상대적으로 많이 작용하였으나 장기변동으로 갈수록 아시아 주식시장의 지역적 관계의 영향이 강해지며 상호의존적(interdependence)이고 각 시장의 통합(integration)의 형태로 변하는 것을 알 수 있다.

<표 2> 시간척도별 시간대와 전이관계

	scale1	scale2	scale3	scale4	scale5	scale6
시간척도별 시간대						
간격(일)	2-4	4-8	8-16	16-32	32-64	64-128
변동범위	단기	중기			장기	
전이 관계						
총 개수	90					
추정된 개수	71	52	67	88	85	81
비율(%)	78.89	57.78	74.44	97.78	94.44	90.00

2) 이 분석은 빈도비율(Frequency ratio : FR) 분석법을 활용하였다. 식은  $FR = F_q / N(N-1)2$ 이며,  $F_q$ 는 두 변수간의 그랜저인과관계분석을 통해 나타난 각각의 양방향, 단방향, 무관계에 대한 유의한 관계 빈도수를 나타낸다. 본 연구에서는 그랜저인과관계분석 대신에 본 연구의 모형인 GARCH-BEKK 모형에서 통계적으로 유의한 값들을 이용하여 FR 분석법을 사용하였다. Eom et al.(2008)은 FR 분석법을 금융시장의 유의미한 정보흐름(significant information flow)이 시간 의존적 속성(time dependency property)을 가지는지를 확인하기 위한 방법으로 사용하였으며, 시간척도(time scale)별로 분석하였다.



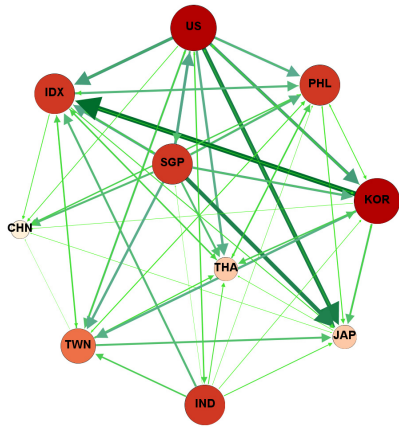
[그림 3] 변동성 전이 흐름

아시아 주식시장에서의 변동성 전이를 주도하는 시장과 종속되는 시장을 찾고 시장 간의 연결 관계를 알아보기 위해 전이 네트워크를 구축하였다. 그 결과를 [그림 4]에서 각 시간척도별 변동성 전이 네트워크를 보여주고 있다. 전이 네트워크는 각 시장(노드)과 연결망(엣지)을 통해 시장 간의 변동성 전이 관계를 직관적으로 볼 수 있는데, 전이되는 정도와 방향성을 동시에 식별이 가능하다. 노드(nodes)의 크기와 색은 변동성 전이효과를 전달하는 정도이며 노드가 크고 붉은색이 진할수록 다른 시장에 많은 변동성을 보내는 것을 나타낸다. 화살표는 전이효과의 방향을 보여주는 것이고 선의 굵기와 색은 전이 관계의 강도를 나타낸다.

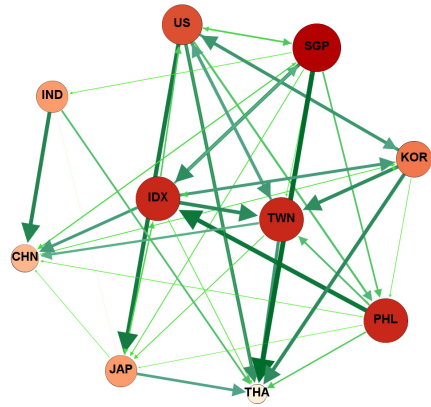
[그림 4]은 아시아 주식시장의 전이 네트워크를 나타낸 것이고 <표 3>과 <표 4>는 각각 전이 네트워크 전달자와 수신자의 순위를 나타낸다. 전이 네트워크의 전달자 및 수신자의 순위는 다른 나라에게 영향을 많이 주는 순서이며 서로 영향을 주는 개수가 같을 경우에는 다른 나라에게 영향을 주는 규모를 모두 합한 값이 큰 순서로 구성하였다. 그리고 표의 맨 오른쪽 2열 중 avg.rank는 각 나라의 scale1부터 scale6까지의 평균 순위를 나타내며, Std.Dev는 각 나라의 전이 네트워크 순위의 표준편차를 나타낸다.

먼저 [그림 4]를 살펴보면 총 6개의 시간척도별로 구성된 전이 네트워크는 모든 시간척도에서 변동성 전이현상이 존재하는 것으로 나타났다. 그리고 시간척도에 따라 변동성 전이를 주도하는 시장과 종속되는 시장이 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 앞서 살펴본 [그림 3]에서 시간척도에 따라 변동성 전이 흐름이 변하는 것과 함께 고려해 보면 변동성 전이현상은 시간 종속적임을 의미한다.

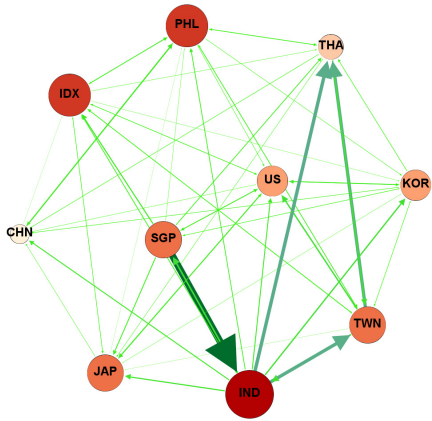
각 노드들은 변동성 전이 전달자로 볼 수 있는데 단기변동에서는 몇몇 주요 국가들이 변동성 전이를 주도하며 충격을 전달하는 것으로 보이지만 장기변동으로 갈수록 국가들 간의 상호 의존성이 강해지며 시장 통합의 모습이 나타나고 있다. 단기변동(scale1)에는 미국, 한국, 싱가포르의 영향이 큰 것으로 나타나지만 중기변동(scale2와 scale3)에는 싱가포르는 여전히 많은 영향을 주고 있는 반면에 미국과 한국의 영향은 점차 감소하는 것으로 나타났다. 장기변동의 scale4에서는 미국과 한국이 아시아 주식시장에서의 변동성 전이 영향력이 거의 없었지만 한 달 이상의 장기변동(scale5와 scale6)에서는 미국과 한국뿐만 아니라 시장 전반에서 서로 영향을 주고받는 시장 통합의 네트워크를 보여준다.



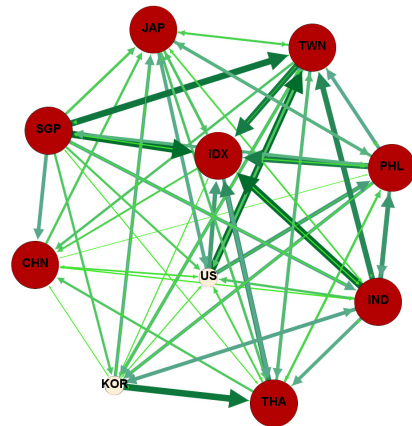
(a) scale1



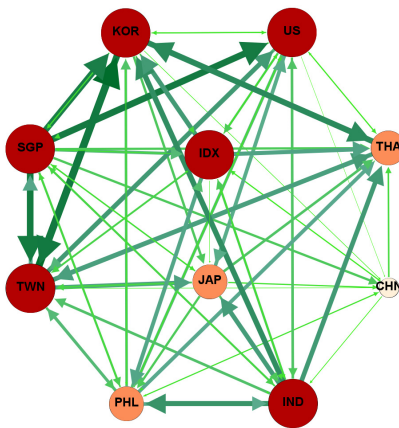
(b) scale2



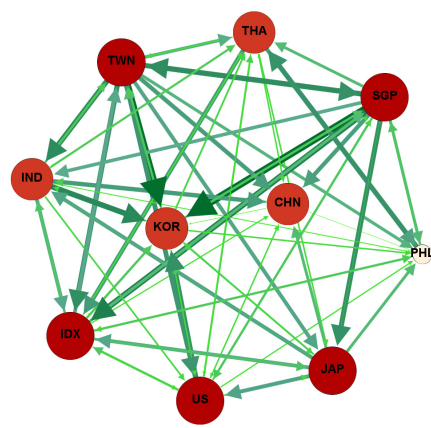
(c) scale3



(d) scale4



(e) scale5



(f) scale6

[그림 4] 변동성 전이 네트워크

<표 3> 전이 네트워크 전달자 순위

	scale1	scale2	scale3	scale4	scale5	scale6	avg.rank	Std.Dev
CHN	10	9	10	8	10	9	10	0.82
US	1	5	7	9	6	5	6	2.66
TWN	7	3	5	4	3	1	3	2.04
THA	8	10	9	5	9	7	9	1.79
SGP	3	1	4	1	1	2	1	1.26
PHL	6	4	2	3	7	10	5	2.94
KOR	2	6	8	10	4	8	7	2.94
JAP	9	8	6	6	8	4	8	1.83
IND	5	7	1	2	2	6	2	2.48
IDX	4	2	3	7	5	3	4	1.79

<표 4> 전이 네트워크 수신자 순위

	scale1	scale2	scale3	scale4	scale5	scale6	avg.rank	Std.Dev
CHN	8	3	9	9	9	9	10	2.40
US	6	4	1	8	8	7	6	2.73
TWN	7	6	8	2	2	6	5	2.56
THA	4	1	2	3	1	2	1	1.17
SGP	9	5	7	10	6	8	8	1.87
PHL	2	7	4	5	3	3	3	1.79
KOR	5	9	6	7	7	4	7	1.75
JAP	1	2	3	4	10	10	4	4.00
IND	10	10	10	6	5	5	9	2.58
IDX	3	8	5	1	4	1	2	2.66

좀 더 자세히 살펴보면 scale1에서는 미국, 한국, 싱가포르가 아시아 주식시장의 변동성 전이의 주요 전달자로 해석할 수 있으며 이 나라들이 <표 3>의 전이 네트워크의 전달자 순위에서 1, 2, 3위로 분류되어 있다. 즉 미국, 한국, 싱가포르가 아시아 주식시장의 다른 나라들에게 가장 많은 단기변동의 영향을 주고 있음을 의미한다. 하지만 scale2에서 미국은 5위로, 한국은 6위로 순위가 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이처럼 순위가 항상 고정되어 있지는 않다. 그래서 순위의 평균을 산출하였으며 표준편차는 0.82~2.94사이로 나타났는데 평균 10위 중국이 가장 낮은 표준편차(0.82)를 보였다. 그리고 싱가포르는 평균 1위로 표준편차는 중국에 이어 두 번째로 낮은 표준편차(1.79)를 보인다. 아시아 금융시장의 대표적인 허브로 잘 알려진 싱가포르는 금융뿐만 아니라 세계적인 교통·물류, 오일 거래의 중심지로서 아시아 대표적인 물류허브이다. 특히 외환거래량이 아시아-태평양지역에서 1위이며 전세계에서 런던과 뉴욕에 이어 3위인 금융 중심지로서 아시아 금융시장에 대한 영향력은 상당할 것이다. 이런 싱가포르 시장에 어떤 충격이 발생하면 정상적이던 자본의 흐름에 변화가 일어날 것이며, 이러한 자본 시장의 혼란이 대규모 자본의 유입 및 유출을 야기할 것이고 이를 통해 아시아의 다른 나라들에게 변동성이 전이되는 것으로 판단된다.

수신자 측면에서 살펴보면 <표 4>에서 전이 네트워크 수신자 순위는 시간척도별로 다르게 나타나는 시간의존적인 속성을 볼 수 있으며 표준편차는 1.17~4.00사이로 나타났다. 태국은 평균 수신자 순위에서 1위로 나타났으며 표준편차도 가장 적은 1.17로 분석되었다. 이러한 사실은 [그림 4]에서 볼 수 있듯이 크고 작은 화살표가 태국을 향해 많이 있는 것을 많이 볼 수

있으며 노드의 크기도 대부분 비교적 작은 것을 확인할 수 있다.

변동성 전이 네트워크에서 수신되는 정도는 외부 충격 전이에 대해 한 국가의 민감도를 반영한 것이라고 해석할 수 있다. 즉 태국과 다른 나라들 사이에 전이효과가 존재하는데 외부 충격에 가장 민감한 나라가 바로 태국임을 시사한다. 태국은 수출이 국내총생산(GDP)의 대략 70%를 차지하고 있으며 외국 자본의 유치를 통한 경제개발정책으로 인해 외국기업에 대한 의존도가 크다. 따라서 태국은 아시아를 비롯한 세계 시장의 경기에 영향을 많이 받으므로 아시아 주식시장의 발생한 작은 충격에도 태국 주식시장은 크게 변동한다는 결론을 이끌어 낼 수 있다.

종합적으로 살펴보면 아시아 주식시장에서 변동성 전이효과가 발생하는 것을 알 수 있었으며 이러한 현상은 시간 종속적 속성을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 변동성 전이 네트워크에서는 시간적도별로 단기변동에서 장기변동으로 갈수록 변동성 전이 관계가 상호의존적이고 시장의 통합의 형태로 변하는 것을 발견하였다. 선행연구에 따르면 변동성 전이의 주요 전파경로는 선진시장에서 이머징시장으로 영향을 준다(Yang et al., 2014; Liu et al., 2017). 하지만 아시아 주식시장의 경우는 조금 달랐다. 단기변동에는 미국의 영향이 크게 작용하였으나 장기변동으로 갈수록 미국과 아시아 주식시장 전반에서 상호의존적 관계가 강해지는 것을 발견할 수 있었다. 그 중 싱가포르가 대표적인 아시아 주식시장의 전달자이며, 태국이 수신자로서 외부 충격에 가장 민감한 것으로 나타났다.

## V 결론

전세계 금융시장에서 발생하는 충격들은 진원지에 머무르지 않고 다른 시장으로 퍼지는 변동성 전이효과를 야기한다. 본 연구는 이러한 변동성 전이효과를 미국을 포함한 아시아 주식시장 10개국을 대상으로 그 존재를 살펴보고 변동성 전이 관계의 특성을 복잡계 네트워크를 통해 알아보았다.

주요 실증분석의 결과는 다음과 같다. 첫째, GARCH-BEKK 모형을 통해 시간적도별로 변동성 전이효과 존재를 살펴본 결과 아시아 주식시장에서 변동성 전이효과가 존재하며 시간 종속적 속성을 가진다. 시간적도에 따라 변동성 전이를 주도하는 시장과 종속되는 시장이 일정하지 않고 달라지면서 변동성 전이 흐름이 변하는 것을 확인하였다. 둘째, 장기변동으로 갈수록 전이 관계가 강해지며 동시에 상호의존적 특성도 증가함으로써 아시아 주식시장의 변동성 전이 관계가 장기적으로 시장의 통합의 형태로 변하는 것을 발견하였다. 셋째, 아시아 주식시장의 변동성 전이 네트워크의 대표적인 전달자는 싱가포르이며, 태국이 수신자로서 외부 충격에 가장 민감한 시장으로 나타났다.

아시아 주식시장은 지정학적뿐만 아니라 정치·금융경제 및 무역·교통에도 밀접한 관계를 가지고 있다. 그렇기 때문에 외부 충격이나 정보흐름에 민감하게 반응하며 상호의존적인 모습을 보이는데 이는 금융위기 이후 시장 통합의 양상이 뚜렷해졌음을 선행연구에서도 많이 실증하였다. 본 연구는 이러한 관계를 전이 네트워크를 통해 복잡한 전이 관계를 직관적이고 단순하게 특성 분석이 가능하였다. 따라서 본 연구의 전이 네트워크 분석을 통해 발견된 변동성 전이의 주요 노드와 전파경로는 투자자들이 국제 포트폴리오를 구성할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 예를 들어, 대표적인 전달자인 싱가포르를 벤치마크하고 수신자인 태국과 같은 비교적 외부 충격에 민감한 자본시장의 포트폴리오를 구성하여 전략적 투자를 함으로써 투자

자 입장에서 주식시장의 통합으로 인해 발생하는 국제 분산투자의 이익실현의 가능성이 줄어드는 것을 보완할 수 있다. 또한 네트워크의 전파경로와 전이 정도를 예측 분석하여 외부 충격에 따른 변동성 확대에 대한 완충장치를 마련할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Allen, D.E., M. McAleer, R.J. Powell and A.K. Singh, 2017, "Volatility Spillovers from Australia's major trading partners across the GFC," *International Review of Economics and Finance*, 47, 159-175.
- Aloui, C. and R. Jammazi, 2015, "Dependence and risk assessment for oil prices and exchange rate portfolios: A wavelet based approach," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 436, 62-86.
- Bekaert, G., and C.R. Harvey, 1995, "Time-varying world market integration," *The Journal of Finance*, 50(2), 403-444.
- Bollerslev, T., R.Y. Chou and K.F. Kroner, 1992, "ARCH modeling in finance: A review of the theory and empirical evidence," *Journal of Econometrics*, 52, 5-59.
- Boubaker, H. and S.A. Raza, 2017, "A wavelet analysis of mean and volatility spillovers between oil and BRICS stock markets," *Energy Economics*, 64, 105-117.
- Brana, S., and D. Lahet, 2010, "Determinants of capital inflows into Asia: the relevance of contagion effects as push factors," *Emerging Market Review*, 11(3), 273-284.
- Brida, J.G , D. Matesanz and M.N. Seijas, 2015, "Network analysis of returns and volume trading in stock markets: the Euro Stoxx case," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 444, 751-764.
- Caraiani, P., 2012, "Characterizing emerging European stock markets through complex networks: from local properties to self-similar characteristics," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 391(13), 3629-3637.
- Diebold, F.X. and K. Yilmaz, 2014, "On the network topology of variance decompositions: Measuring the connectedness of financial firms," *Journal of Econometrics*, 182, 119-134.
- Djauhari, M.A and S.L. Gan, 2015, "Optimality problem of network topology in stocks market analysis," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 419, 108-114.
- Engle, R.F. and K.F. Kroner, 1995, "Multivariate simultaneous generalized ARCH," *Econometric Theory*, 11, 122-150.
- Eom, C., W.S. Jung, S. Choi, G. Oh and S. Kim, 2008, "Effects of time dependency and efficiency on information flow in financial markets," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 387, 5219-5224.
- Erdős, P. and A. Rényi, 1960, "On the evolution of random graphs," *Publications of*

- the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, 5(1), 17-61.
- Gamba-Santamaria, S., J.E. Gomez-Gonzalez, J.L. Hurtado-Guarin and L.F. Melo-Velandia, 2017, "Stock market volatility spillovers: Evidence for Latin America," *Finance Research Letters*, 20, 207-216.
- Jammazi, R., 2012, "Cross dynamics of oil-stock interactions: A redundant wavelet analysis," *Energy*, 44, 750-777.
- Jammazi, R., R. Ferrer, F. Jareño and S.J.H. Shahzad, 2017, "Time-varying causality between crude oil and stock markets: What can we learn from a multiscale perspective?," *International Review of Economics and Finance*, *In press*.
- Kang, S.H. and S.M. Yoon, 2011, "The Global Financial Crisis and the Integration of Emerging Stock Markets in Asia," *Journal of East Asian Economic Integration*, 15(4), 49-73.
- Kydros, D. and V. Oumbailis, 2015, "A network analysis of the Greek stock market," *Procedia Economics and Finance*, 33, 340-349.
- Li, S., 2015, "Volatility Spillovers in the CSI300 Futures and Spot Markets in China: Empirical Study Based On Discrete Wavelet Transform and VAR-BEKK-bivariate GARCH Model," *Procedia Computer Science*, 55, 380-387.
- Liu, X., H. An, S. Huang and S. Wen, 2017, "The evolution of spillover effects between oil and stock markets across multi-scales using a wavelet-based GARCH-BEKK model," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 465, 374-383.
- Liu, X., H. An, H. Li, Z. Chen, S. Feng and S. Wen, 2017, "Features of spillover networks in international financial markets: Evidence from the G20 countries," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 479, 265-278.
- Long, W., L. Guan, J. Shen, L. Song and L. Cui, 2017, "A complex network for studying the transmission mechanisms in stock market," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, *In Press*.
- Majapa, M. and S.J. Gossel, 2016, "Topology of the South African stock market network across the 2008 financial crisis," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 445, 35-47.
- Murtagh, F., J.L. Starck, and O. Renaud, 2004, "On neuro-wavelet modeling," *Decision Support Systems*, 37, 475-484.
- Nazlioglu, S., U. Soytaş and R. Gupta, 2015, "Oil prices and financial stress: A volatility spillover analysis," *Energy Police*, 82, 278-288.
- Newman, M.E.J., "The structure and function of complex networks," *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 45(2), 167-256.
- Nobi, A., S.E. Maeng, G.G. Ha and J.W. Lee, 2014, "Effects of global financial crisis on network structure in a local stock market," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 407, 135-143.
- Sensoy, A. and B.M. Tabak, 2014, "Dynamic spanning trees in stock market networks: the case of Asia-Pacific," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*,



414, 387-402.

- Starck, J.L. and F. Murtagh, 2001, "Multiresolution Analysis of Time Series," *CEA*, 1-27
- Yang, C , Y. Chen, L. Niu and Q. Li, 2014, "Cointegration analysis and influence rank - A network approach to global stock markets," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 400, 168-185.
- Zhang, W., Z. Zhang and G. Han, 2010, "How does the US credit crisis affect the Asia-Pacific economies? Analysis based on a general equilibrium model," *Journal of Asian Economics*, 21(3), 280-292.