

주요 원유 현물가격간의 비선형 동적조정 에 관한 연구[†]

박해선* · 이상직**

요약 : 본 연구는 3가지 상태 threshold 벡터오차수정모형(three-regime threshold vector error correction model)을 활용하여 WTI, Brent, Dubai 등 세계 3대 마커(marker)원유의 현물 유가 간 비선형 동적조정 과정에 대해 분석하였다. 이를 위하여 2000년 1월 3일부터 2014년 12월 31일까지의 일별가격을 이용하였으며 WTI가 급격히 하락하기 시작한 2010년을 기준으로 전기와 후기로 구분하여 WTI-Brent와 WTI-Dubai 그리고 Brent-Dubai의 세 조합에 대해 실증분석하였다. 전기에는 세 조합 모두 양 시장 간 비선형적 동적조정이 이루어지고 있으나, 후기에서는 WTI-Brent를 제외한 WTI-Dubai 조합과 Brent-Dubai 조합에서만 비선형적 동적조정과정[†]이 이루어지고 있는 것이 관찰되었다. 또한 WTI-Dubai 조합과 Brent-Dubai 조합에 대해 전기와 후기의 거래비용 추정결과를 보면 후기에서 시장 간의 거래비용이 전기에 비해 축소되었음을 확인하였다.

주제어 : Threshold 벡터오차수정모형, WTI, Brent, Dubai, 비선형 동적조정

JEL 분류 : C3, D4, Q4

접수일(2015년 8월 24일), 수정일(2015년 9월 21일), 게재확정일(2015년 12월 4일)

[†] 본 논문의 교신저자는 2015년도 한국외국어대학교 교내연구비 지원을 받았음.

* 건국대학교 경영경제학부, 제1저자(e-mail: hspark@kku.ac.kr)

** 한국외국어대학교 경제학부, 교신저자(e-mail: slee@hufs.ac.kr)

A Study on Nonlinear Dynamic Adjustment of Spot Prices of Major Crude Oils

Haesun Park* and Sangjik Lee**

ABSTRACT : We employ a 3 regime-threshold vector error correction models (TVECM) to investigate the nonlinear dynamic adjustments of three marker crude oil prices such as WTI (West Texas Intermediate), Brent and Dubai. Especially we deal with 3 combinations of oil prices including WTI-Brent, WTI-Dubai and Brent-Dubai in order to analyze the dynamic adjustments of the prices based on the effects of the price spreads among these crude oil prices. Our daily spot prices data run from 2001.1.3 to 2014.12.31. We found that each combination is cointegrated over the period. WTI had dropped significantly in 2010 which had affected the movements of the spreads. To accomodate this fact, we divide the period into two sub-periods: 2000.1.3-2009.12.31 and 2010.1.1-2014.12.31. It is found that each combination is cointegrated in both sub-periods. Moreover, in the first sub-period, all three oil prices are shown to follow nonlinear dynamic adjustments. In the second sub-period, however, TVECM is better than VECM(vector error correction model) for WTI-Dubai and Brent-Dubai while VECM performs better for WTI-Brent. The transaction costs are estimated to be reduced for the second sub-period for WTI-Dubai and Brent-Dubai compared to the first sub-period.

Keywords : TVECM, WTI, Brent, Dubai, nonlinear dynamic adjustment

Received: August 24, 2015. Revised: September 21, 2015. Accepted: December 4, 2015.

* School of Business Administration and Economics, Konkuk University, 1st Author(e-mail: hspark@kku.ac.kr)

** Division of Economics, Hankuk University of Foreign Studies, Corresponding Author(e-mail: slee@hufs.ac.kr)

I. 서론

에너지 자원 중에 큰 비중을 차지하며 국제적으로 거래되는 원유는 사실상 매우 다양한 품질을 지닌 여러 종류로 구성된다. 그 중에서 상대적으로 품질이 우수한 유종인 미국의 서부텍사스원유(이하 WTI로 표기), 영국의 브렌트유(이하 Brent), 중동의 두바이유(이하 Dubai)¹⁾는 세계 3대 마커(marker)원유로서 미국, 유럽, 아시아 등 각 지역에서 거래되는 원유의 가격 결정에 기준이 되고 있다.²⁾ 이러한 마커원유들은 각각 주요 상품거래소에서 거래되고 있으며 유종 간의 유가 스프레드(spreads)에 대한 거래도 이루어지고 있다. 따라서 이들 세 유종의 가격관계를 분석하는 것은 원유의 가격발견(price discovery) 과정을 이해하고 예측하는 데 매우 중요한 이슈라고 할 수 있다. 본 논문에서는 WTI와 Brent 그리고 Dubai로 구성된 세 가지 조합인 WTI-Brent와 WTI-Dubai 그리고 Brent-Dubai를 대상으로 원유 현물가격의 장기균형에 대한 비선형 동적 조정과정의 존재 및 특성 등을 살펴본다.

원유 품질 차이와 각종 거래비용에 따라 서로 다른 원유 사이에 생기는 유가 스프레드는 자연스러운 현상이다. 그러나 유가 스프레드가 일정한 범위를 넘어서게 되면 차익거래(arbitrage transaction)를 유발하게 된다. 이로 인하여 유가 스프레드는 다시 일정한 범위 안으로 수렴하게 될 것이다. 이것은 일물일가법칙(law of one price)에 의한 결과로 해석할 수 있다. 또한 일물일가법칙에 의해 유가 사이에 공적분 관계를 예상할 수 있다. 관련 시계열간 선형관계를 의미하는 공적분 관계는 시계열 사이의 장기균형을 나타낸다. 서로 다른 유종은 대체재로 상호간 작용한다. 따라서 이들 유가 사이에는 일물일가법칙으로 인해 장기균형이 존재할 가능성이 높다. 유가 간 공적분 관계와 유가 스프레드의 존재를 반영하여 일물일가법칙의 작용을 확인함으로써 원유의 가격발견 과정을 분석하기 위해서 본 논문에서는 threshold 벡터오차수정모형(Threshold Vector Error Correction Model: 이하 TVECM)을 이용하

-
- 1) 이하에서 WTI, Brent, Dubai는 원유를 가리키기도 하고 유가를 지칭하기도 한다.
 - 2) WTI는 저유황 경질유로서 품질이 우수하고 뉴욕상품거래소(NYMEX)에서 거래되며 유동성이 가장 높다. Brent도 저유황 경질유이지만 WTI보다는 품질이 낮은 것으로 평가되며 런던의 국제상품거래소(ICE)에서 거래가 이루어지고 유동성이 높다. Dubai는 고유황 중질유로서 품질이 높지 않고 두바이상품거래소(DME)에서 거래되며 유동성이 상대적으로 낮다.

였다. TVECM에서는 관련 시계열 변수에 대하여 단일한 조정과정을 전제하지 않고 임계치와 오차수정항을 비교하여 복수의 조정과정을 따르도록 모형화하고 있다. 두 유종의 유가 스프레드를 이들 유종 가격 사이 공적분 관계에서 벗어난 오차로 파악하면 TVECM은 유가 조정과정이 복수로 이루어질 가능성을 허용하고 있다. 이는 오차의 크기나 부호에 따라 유가 조정과정이 다를 수 있음을 모형화한 것이다. 벡터 오차수정모형(Vector Error Correction Model: 이하 VECM)에서 모형화하고 있는 단일한 조정과정을 선형조정과정 또는 대칭 조정과정으로 볼 수 있다면 TVECM에서는 비선형조정과정 또는 비대칭 조정과정으로 이해할 수 있다. 본 연구에서는 3가지 조정과정을 담고 있는 3가지 상태 TVECM(three-regime TVECM)을 이용하였다.

유가의 조정과정에 관련한 기존 연구를 살펴보면 Gulen(1997, 1999)을 비롯한 다수의 연구에서 유가의 공적분이 성립하고 있음을 보여주고 있다. 다양한 유가 사이의 선형결합관계를 의미하는 공적분이 존재하면 이들 원유가격의 공동움직임(co-movement)을 설명할 수 있다. 유가의 공적분 관계 존재여부에 대한 관심은 현물가격사이 뿐만 아니라 현물가격과 선물가격까지 확대되어 원유의 가격발견과정을 설명하고 있다. 이와 관련한 기존 문헌으로는 박호정·윤원철(2006)과 홍정효(2011) 그리고 Berkios and Diks(2008)을 들 수 있다. 박호정·윤원철(2006)에서는 WTI와 Brent의 현물과 선물 그리고 Dubai 현물 등 총 5개 유가를 대상으로 VECM과 그래프이론을 이용하여 국제유가의 가격발견과정을 분석하였다. 구체적으로 이 논문에서는 Brent와 Dubai 그리고 Brent와 WTI 사이에는 통계적으로 유의미한 동시적 인과관계가 존재하나, Brent와 WTI사이에는 그러한 관계가 존재하지 않는 것으로 나타났다. 반면, 홍정효(2011)에서는 WTI의 현물가와 선물가에 VECM과 Granger 인과관계 분석을 적용하여 WTI현물시장과 선물시장 사이 피드백이 존재한다는 점과 선물시장의 가격발견기능이 유효함을 보였다. Berkios and Diks(2008)에서는 WTI 현물과 1개월 선물부터 4개월 선물 등 총 5가지 데이터를 VECM과 Granger인과관계 그리고 GARCH 필터링을 적용하여 현물가와 선물가 사이에 선형 및 비선형 인과관계가 존재하고 선물시장뿐만 아니라 현물시장도 가격발견에 중요한 기능을 수행하고 있음을 보여주었다.

한편, Heo and Seo(2002)에서는 원유가와 미국의 원유재고량 그리고 OPEC 생산

량을 대상으로 VECM을 적용하여 원유시장이 미국의 원유재고수준과 OPEC의 생산수준에 장단기에 걸쳐 어떻게 반응하는지 실증분석하였다. 이 논문에서는 원유가가 단기에서는 OPEC생산수준에 탄력적으로 반응하는 반면, 장기에서는 미국 원유재고량에 더 탄력적으로 반응하는 것으로 나타났다. Wlazlowski, Hagstromer and Giulietti(2011)은 공적분과 그랜저 인과관계 검정을 활용하여 32개 유종의 가격발견 과정에 대한 연구를 하였다. 연구결과에 따르면 기존의 마커원유인 WTI와 Brent는 여전히 가격결정자(price setter)로서 기능하고 있지만 Dubai는 그 기능을 뚜렷이 보여주지 못하고 있으며, 1990년대 후반부터 러시아 우랄 원유가 새로이 가격결정자로 부각하고 있다고 결론짓고 있다.

기존 문헌 가운데 threshold cointegration을 이용한 연구인 Ewing, Hammoudeh, and Tompson(2006)에서는 미국 시장의 원유 현물가격과 선물가격을 대상으로 M-TAR (momentum-threshold autogressive) 모형을 이용하여 이들 가격간 비대칭적 조정과정을 추정했다. 그리고 Hammoudeh, Ewing and Tompson(2008, 이하 Hammoudeh et al.)에서는 4가지 기준유가인 WTI, Brent, Dubai, Maya의 현물가격을 대상으로 가격조정과정을 분석하였다. 특히 이 논문에서는 WTI-Brent, WTI-Dubai, Brent-Dubai, WTI-Maya와 같은 네 가지 조합의 유가 스프레드에 대해 M-TAR 모형을 적용하여 현물 유가 사이의 공적분 관계 존재와 비대칭적 조정과정을 보였다.

본 연구는 가격발견과정에서 기존 마커원유의 현물가격 간 그리고 현물시장 간의 관계 분석에 초점을 두고 있다. 따라서 본 논문은 Hammoudeh et al.(2008)의 연구 방향과 궤를 같이 하면서도 최근의 데이터를 중심으로 Lo and Zivot(2001)에서 사용했던 TVECM 추정방식을 이용하여 그들의 연구를 확장한 시도이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서 계량분석모형에 대하여 서술한 후 제3절에서는 추정결과를 제시하며 마지막 제4절에서는 요약 및 결론을 기술한다.

II. 계량모형

본 연구에서 사용한 계량모형인 TVECM에 대하여 간단히 정리한다. 먼저 서로다른 두 종류의 원유인 1번 원유와 2번 원유를 가정하자. 이 원유 가격을 각각 p_1 과 p_2 로 나타내고 $X=(p_1, p_2)$ 라 하자. 또 t 기의 각 가격을 p_{1t} 와 p_{2t} 로 나타내면 $X_t=(p_{1t}, p_{2t})$ 가 된다. 그리고 p_1 과 p_2 의 시계열을 1계차분이 안정적인 $I(1)$ 인 시계열이라 하자. 여기서 $\beta'=(1, -1)$ 라 하고, $z_{t-1}=\beta'X_{t-1}$ 라 놓자. 이제 z_{t-1} 은 두 가격 차이를 표시하므로 $t-1$ 기의 유가 스프레드를 의미하며 이 시계열을 z 로 나타내자. 원유에 일물일가법칙(law of one price)이 성립한다면 X 의 조정과정이 z 에 영향을 받게 된다. 구체적으로 ΔX_t 가 z_{t-1} 의 값에 따라 다른 경로를 보이면 비선형 조정과정이라 말할 수 있다. 이러한 사정을 반영한 것이 아래 식 (1)의 TVECM이다.

$$\Delta X_t = \begin{cases} A_1 X_{t-1} + u_t^{(1)} & \text{if } z_{t-1} < C^{(1)} & \text{(상태1)} \\ A_2 X_{t-1} + u_t^{(2)} & \text{if } C^{(1)} \leq z_{t-1} \leq C^{(2)} & \text{(상태2)} \\ A_3 X_{t-1} + u_t^{(3)} & \text{if } C^{(2)} < z_{t-1} & \text{(상태3)} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $X_{t-1}=[1, z_{t-1}, \Delta X_{t-1}, \dots, \Delta X_{t-k}]$ 이고 A_j ($j=1, 2, 3$)는 $(k+2) \times 2$ 계수 행렬이며 $u_t^{(j)}$ ($j=1, 2, 3$)은 오차항으로서 계열상관이 없고 평균이 0이며 분산공분산행렬이 $\Sigma^{(j)}$ ($j=1, 2, 3$)이다. 그리고 $C^{(1)}$ 과 $C^{(2)}$ 는 임계치이다. 식 (1)은 시계열 X_t 가 3가지 상태 TVECM을 따르고 있음을 보여준다. 여기서 z_{t-1} 값에 따라 X_t 의 전개과정을 3가지 상태로 구분하고 있다. 만약 $z_{t-1} < C^{(1)}$ 이면 유가는 상태1에 해당하는 식에 따라 동적 반응을 전개할 것이고, $C^{(1)} \leq z_{t-1} \leq C^{(2)}$ 이면 상태2에 대응하는 식으로 유가의 동태적 움직임을 설명할 수 있고, $C^{(2)} < z_{t-1}$ 이면 상태3에 해당하는 식에 따라 유가의 동태적 전개과정을 분석할 수 있다.

거래비용과 품질차이 등으로 인하여 유가 스프레드가 일정한 규모 이상이 될 때 차익거래가 발생한다. 예를 들어 p_1 이 p_2 보다 높다고 하더라도 일정수준 이상으로

높을 때에만 2번 원유로 1번 원유를 대체하려는 차익거래가 발생할 것이다. 곧, $p_2 + \gamma_2 < p_1$ 이면 차익거래가 일어난다. 따라서 $p_2 + \gamma_2 \geq p_1 \Rightarrow p_1 - p_2 \leq \gamma_2$ 이면 차익거래가 일어나지 않는다. 동일한 논리로 $p_1 + \gamma_1 \geq p_2 \Rightarrow (-\gamma_1) \leq p_1 - p_2$ 이면 차익거래가 생기지 않는다. 결국 $(-\gamma_1) \leq p_1 - p_2 \leq \gamma_2$ 이 차익거래가 불가능한 조건이 된다. 이러한 측면은 $C^{(1)} = (-\gamma_1)$, $C^{(2)} = \gamma_2$ 로 놓으면 위의 식 (1)에 반영되어 있다. 상태1과 상태3에서는 차익거래가 발생하고 상태2에서는 차익거래가 일어나지 않는다. 상태1에서는 1번 원유에 대한 수요가 증가하는 방향으로 차익거래가 일어나 균형조정이 이루어질 것이고 상태3에서는 2번 원유에 대한 수요 상승이 실현되는 차익거래가 발생하여 균형조정이 될 것이다. 상태2에서는 차익거래가 생기지 않게 되며 이 영역은 원유의 품질차이와 각종 거래비용 등으로 인하여 생기는 가격 격차로 해석할 수 있다. 따라서 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 은 차익거래 불가능 영역의 폭을 보여주며 차익거래 불가능에 부합하는 거래비용에 대한 정보도 제공한다.

모형의 추정은 Balke and Fomby(1997)의 연구에서 제안한 바에 따라 두 단계를 거쳐 진행한다. 먼저 공적분(cointegration) 존재여부를 검정한다. 공적분 존재를 확인하고 나면 선형(linear) 공적분과 앞에서 언급한 3가지 상태 TVECM에 대하여 검정한다. 선형 공적분은 $\Delta X_t = \Gamma X_{t-1} + u_t$ 와 같은 VECM모형을 의미한다. 여기서 오차항 u_t 은 분산공분산행렬 Σ 을 취한다고 볼 수 있다. 이 검정을 위해서 Lo and Zivot(2001)의 연구와 같이 다음의 sup-LR (likelihood ratio) 통계량을 이용하였다.

$$\text{sup-LR} = T(\ln(\det \hat{\Sigma}) - \ln(\det \hat{\Sigma}_3(\hat{C}^{(j)})))$$

위의 통계량에서 T 는 데이터 수이고, $\hat{\Sigma}$ 와 $\hat{\Sigma}_3(\hat{C}^{(j)})$ ($j = 1, 2$)는 각각 VECM과 3가지 상태 TVECM의 잔차항 분산공분산 행렬식 추정치이다. 또 $\hat{C}^{(j)}$ 는 추정 임계치이다. 여기서 $C^{(1)}$ and $C^{(2)}$ 을 추정할 때 Lo and Zivot(2001)이 일반화한 부트스트랩을 이용하였다. 그리고 Hansen(1999)을 따라 각 상태별로 최소 10%의 데이터가 있도록 하는 제약을 가하여 두 임계치를 추정하였다. 이 제약은 $C^{(1)}$ 과 $C^{(2)}$ 사이에 놓이는 데이터는 최대 80%가 되도록 설정하는 것이다. 이 통계량에 대한 임계

치 Lo and Zivot (2001)에서 계산한 것을 이용하였다. 이렇게 해서 3가지 상태 TVECM이 채택되면, Lo and Zivot(2001)와 Enders and Chumrusphonlert(2004)를 따라 각 상태의 오차항 분산이 동일하도록 하는 곧, $var(u_t^{(1)}) = var(u_t^{(2)}) = var(u_t^{(3)})$ 이라는 조건을 적용하는 조건부 최소자승법을 이용하여 식 (1)의 A_j 를 추정하였다.

III. 실증분석 결과

이미 앞에서 언급한 것처럼 WTI-Brent와 WTI-Dubai 그리고 Brent-Dubai에 대하여 실증분석한다. 데이터는 블룸버그 자료에서 구한 일별 현물 유가로서 기간은 2000년 1월3일부터 2014년 12월31일까지이며, 데이터 수는 유가별로 각각 3,912개이다. 유가 데이터에 대한 기본정보는 <표 1>에 요약되어 있으며 <그림 1>은 유가의 추이를 보여주고 있다. <그림 2>는 본 논문에서 사용한 데이터에서 구한 세 가지 유종 간 유가 스프레드를 보여준다. 예를 들어 WTI-Brent의 그래프는 두 유가의 차이 곧, “WTI-Brent”로 계산한 결과를 연결한 선이다. 다른 두 그래프도 동일한 방식을 적용하여 도출하였다. 일반적으로 유종의 품질차이로 인하여 WTI > Brent > Dubai 순서로 유가가 형성되어 왔다. 따라서 WTI-Brent, WTI-Dubai, Brent-Dubai의 유가 스프레드는 양수로 실현되는 경우가 많을 것으로 예상할 수 있다. 그런데 <그림 2>에서 보듯이 2010년을 기준으로 WTI-Brent와 WTI-Dubai의 유가 스프레드가 음수를 보이고 있다. 이는 WTI의 하락으로 인한 것이다. 이러한 현상은 미국 국내의 원유공급과잉에 그 원인을 두고 있다.³⁾ 2010년 이전까지는 WTI가 Brent와 Dubai에 견주어 높은 가격을 형성하고 있는 기간이 상대적으로 길었던 것으로 보이나 2010년을 기점으로 역전현상이 나타나고 있다. 한편, Brent와 Dubai는 분석기간 전반에 걸쳐 Brent가 Dubai보다 높은 가격을 유지하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

이미 언급한 2010년 이후 WTI 현물가격이 다른 두 유가보다 급격하게 하락한 것은 WTI 현물시장의 개별적 충격요인에 의해 발생한 현상이다. 이 현상의 영향을 반

3) 미국 다우존스사에서 운영하는 인터넷뉴스사이트인 MarketWatch의 다음 기사에서 이러한 해석을 확인할 수 있다. <http://www.marketwatch.com/story/what-the-brentwti-oil-price-spread-tells-us-2013-02-01>

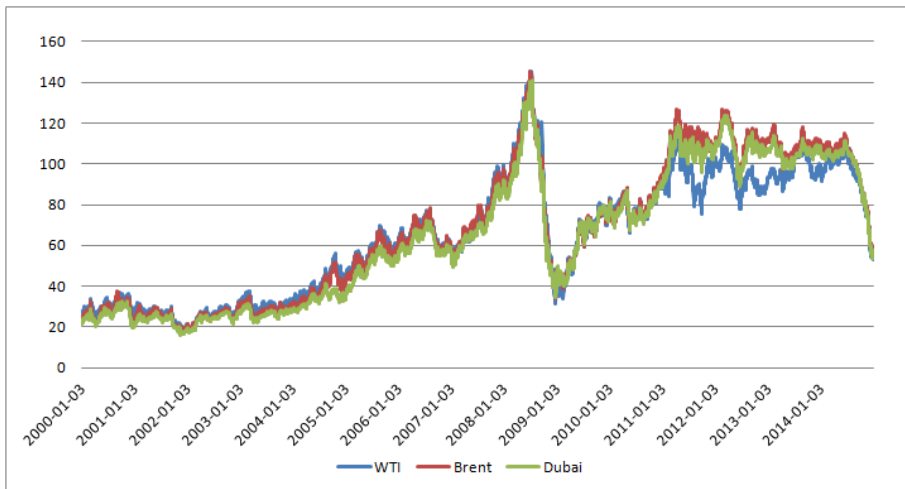
영하여 유종간의 비선형조정과정을 더욱 세밀하게 알아보기 위해 데이터 기간을 2010년 전후로 나누어 전기(2000.1.3-2009.12.31)와 후기(2010.1.1-2014.12.31)로 구분하였다. 전·후기 데이터의 기초통계량도 <표 1>에 정리하였다.

<표 1> 데이터의 기초통계량

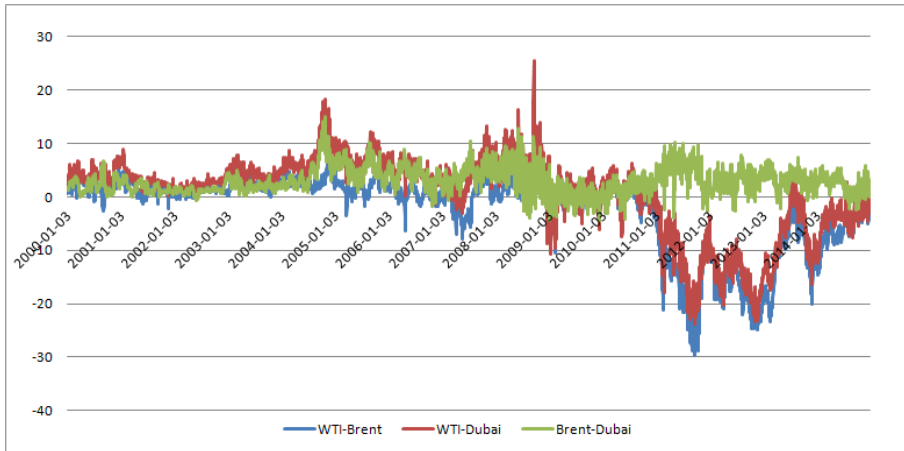
유종		최고가	최저가	평균	표준편차
WTI	전기간	145.29	17.45	64.74	29.20
	전기	145.29	17.45	51.14	28.84
	후기	113.93	53.27	91.96	10.63
Brent	전기간	145.66	16.62	67.17	33.71
	전기	145.66	16.62	49.72	26.03
	후기	126.74	55.76	102.12	14.98
Dubai	전기간	141.33	15.90	64.17	33.14
	전기	141.33	15.90	46.75	28.29
	후기	124.02	53.85	99.04	13.95

단위: 배럴당 US \$

<그림 1> 유종별의 현물가격 추이 (2000.1.3-2014.12.31)



〈그림 2〉 유종별 유가 스프레드 추이



유가 데이터의 안정성(stationarity)을 살펴보기 위해 단위근 검정을 하였다. 이를 위해 Augmented Dickey-Fuller(ADF) 테스트를 하였고 그 결과는 <표 2>에 있다.4) 이 결과를 보면 세 가지 유가가 실증분석에서 염두에 두고 있는 세 기간인 전기간, 전기, 후기의 모든 경우에 유의수준 5%에서 불안정(non-stationary)하고 일계차분은 안정적(stationary)인 $I(1)$ 시계열임을 확인할 수 있다.

〈표 2〉 단위근 검정 결과 (ADF 테스트)

	전기간	전기	후기
WTI	-1.7745	-1.3180	-1.3339
Brent	-1.5209	-1.2196	-0.8381
Dubai	-1.4523	-1.0547	-0.5465
△WTI	-46.104***	-54.0465***	-36.6349***
△Brent	-44.916***	-53.0118***	-37.9971***
△Dubai	-44.027***	-53.7360***	-37.2628***

주의: △는 차분을 표시함, ADF와 PP의 추정식에 절편은 포함하고 추세는 제외함. ADF의 귀무가설은 단위근이 존재한다는 내용이고 유의수준 1%의 임계치는 -3.4352, 5%의 임계치는 -2.8636, 10%의 임계치는 -2.5679임.

4) Phillips-Perron 테스트도 하였으나 결과가 ADF 테스트와 동일하여 본문에 포함하지 않았다.

먼저, 전기간을 대상으로 한 실증분석을 살펴본다. 적절한 분석모델을 찾기 위하여 최적시차와 공적분 벡터수에 대해 검정을 하였다. Wang and Bessler(2005)는 다변량분석에서 공적분 벡터수를 결정하는 방법의 대안으로 정보기준(Schwarz loss)을 사용하여 탐색하는 방안에 대하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 실시한 바 있다. 그들은 표본의 크기가 100 이상일 경우에 Schwarz loss를 통한 최적시차와 공적분 벡터수를 동시에 결정하는 방식이 Trace test에 의한 공적분 벡터수 결정방식에 비해 우월하다는 것을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 표본의 크기가 충분히 크므로 Wang and Bessler(2005)의 연구결과에 기초하여 Schwarz loss를 활용하여 최적시차와 공적분 벡터수를 동시에 찾는 방식을 채택하였다. <표 3>에는 이러한 방식을 따라 실시한 검정 결과가 있다.

<표 3> 최적시차 및 공적분 벡터수 결정을 위한 Schwarz loss metrics

(2000.1.3-2014.12.31)

유가 조합	rank	1-lag	2-lags	3-lags	4-lags	5-lags
WTI-Brent	1 rank	- 16.100	- 16.108*	- 16.102	- 16.095	- 16.089
	2 rank	- 16.097	- 16.105	- 16.099	- 16.091	- 16.085
WTI-Dubai	1 rank	- 15.376	- 15.628	- 15.638*	- 15.637	- 15.636
	2 rank	- 15.373	- 15.625	- 15.634	- 15.633	- 15.633
Brent-Dubai	1 rank	- 15.653	- 15.949	- 15.977	- 15.981	- 15.985*
	2 rank	- 15.649	- 15.946	- 15.973	- 15.978	- 15.982

“*”는 Schwarz loss의 최저값을 표시함.

<표 3>을 보면 WTI-Brent 모형의 최적시차는 2이고 공적분 벡터수는 1이며, WTI-Dubai 모형은 최적시차가 3이고 공적분 벡터수는 1이며, Brent-Dubai 모형은 최적시차가 5이고 공적분 벡터수는 1인 것으로 나타났다. 세 개의 모형에서 모두 공적분 벡터수가 1이라는 것은 공적분 관계가 이 모형들 모두 성립하고 있다는 것을 의미한다.

앞에서 서술한 것처럼 VECM은 오차수정항이 장기균형에 선형방식으로 수렴하는 것을 가정하고 있는 반면, TVECM은 비선형조정방식을 고려한 모형이라고 할

수 있다. 따라서 TVECM과 VECM 가운데 어느 모형이 더욱 적합한 모형인지를 판단하는 선형성 검정(test of linearity)을 해야 한다. 이 검정의 귀무가설은 VECM이 3가지 상태 TVECM보다 더 적합하다는 내용이다.

〈표 4〉 선형성 검정 (전기간)

유가 조합	sup-LR 통계량	p-값
WTI-Brent	164.56	0.00
WTI-Dubai	125.14	0.00
Brent-Dubai	152.24	0.00

<표 4>에 정리한 결과를 보면 WTI-Brent, WTI-Dubai, Brent-Dubai는 모두 유의 수준 5% 수준에서 귀무가설을 기각하여 3가지 상태 TVECM이 VECM보다 적합하다는 결과를 보여주고 있다.

전기간을 대상으로 한 임계치 $C^{(1)}$ 과 $C^{(2)}$ 의 추정결과는 <표 5>에 제시하였다. WTI-Brent를 보면 $C^{(1)}$ 은 0.32이고 $C^{(2)}$ 는 2.53으로 추정되었고 WTI-Dubai의 경우 $C^{(1)}$ 은 -8.54이고 $C^{(2)}$ 는 0.04로, Brent-Dubai의 경우에 $C^{(1)}$ 은 1.94이고 $C^{(2)}$ 는 5.13으로 각각 추정되었다.

〈표 5〉 임계치 추정결과 (전기간)

유가 조합	$C^{(1)}$	$C^{(2)}$	$C^{(2)} - C^{(1)}$
WTI-Brent	0.32	2.53	2.21
WTI-Dubai	-8.54	0.04	8.58
Brent-Dubai	1.94	5.13	3.19

<표 5>에 있는 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 를 보면 WTI-Brent 조합이 2.21로서 가장 작으며 WTI-Dubai의 경우가 가장 큰 8.58로 나타났다. 앞에서 언급하였듯이 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 는 차익 거래 불가능성 및 거래비용에 대한 정보를 담고 있다. WTI와 Brent는 저유황 경질 유로서 품질이 유사하고 활발한 거래로 인하여 유동성이 높아 유가 스프레드의 폭

에 따라 차익거래 발생가능성이 높다. 그러므로 차익거래 불가능 영역은 좁을 수밖에 없다. 이러한 특성으로 인하여 WTI-Brent 조합의 두 임계치 격차가 가장 작게 추정되었다. WTI-Dubai의 경우는 저유황 경질유와 고유황 중질유로 이루어진 조합이다. WTI의 높은 유동성에 비하여 Dubai는 상대적으로 유동성이 낮아 차익거래 가능성은 다른 유종의 조합보다는 떨어진다. 그러므로 차익거래 불가능 영역의 크기가 클 수밖에 없다. 특히 2010년 이후 WTI의 급격한 하락으로 인하여 $C^{(1)}$ 이 -8.54로 추정되어 상태2에 해당하는 영역이 확대되었음을 알 수 있다. 한편, Brent-Dubai의 경우도 저유황 경질유와 고유황 중질유의 조합이지만 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 은 3.19로 WTI-Dubai 조합보다 낮게 추정되었다. 이는 Brent가 WTI와 달리 급격한 하락을 보이지 않은 측면이 작용한 결과로 보인다. 물론 두 유종의 유동성 차이로 인하여 차익거래 가능성이 낮다는 점 때문에 WTI-Brent 경우보다는 두 임계치의 격차가 크게 나타났다.⁵⁾

<표 6> 각 상태별 데이터 수와 상대적 비중 (전기간)

유가 조합	상태1의 데이터 수	상태2의 데이터 수	상태3의 데이터 수
WTI-Brent	1,727(44.18%)	1,476(37.76%)	706(18.06%)
WTI-Dubai	548(14.02%)	679(17.38%)	2,681(68.60%)
Brent-Dubai	1,452(37.17%)	1,708(43.73%)	746(19.10%)

* 상대적 비중은 반올림으로 인하여 그 합이 100%와 일치하지 않을 수 있음.

TVECM의 각 상태에 속하는 데이터 수와 상대적 비중을 <표 6>에 제시하였다. 우선 WTI-Brent 조합을 보면 상태1과 상태2에 들어가는 데이터 수가 상태3의 데이

5) Hammoudeh et al.(2008)에서도 WTI-Brent, WTI-Dubai, Brent-Dubai에 대하여 유종별 품질 유사성 정도와 거래 유동성 차이에 따라 유가의 동태적 전개과정을 설명하고 있다. WTI-Brent 조합은 품질유사성과 높은 유동성을 언급하고 있으며 Brent의 미국 내 비중이 낮은 점 때문에 차익거래가능성이 높지 않다고 해석하고 있다. WTI-Dubai 조합은 Dubai의 거래빈도가 WTI에 비해 낮기 때문에 Dubai가 가격변동에 적극적으로 반응하지 못하고 있다고 평가하고 있다. Brent-Dubai 조합에 대해서도 WTI-Dubai와 유사하게 Brent의 높은 유동성과 Dubai의 낮은 유동성이 유가의 동태적 가격조정 특징이 되고 있다고 보고 있다. 현시점에서 볼 때 Hammoudeh et al.(2008)는 2010년 이후 전개된 WTI의 하락현상이 나타나기 이전의 분석이라는 한계가 있지만 각 유종의 특징을 유가의 동태적 조정과정과 연결하여 설명하고 있기 때문에 분석의 유용성은 여전히 있다고 볼 수 있다.

터 수보다 더 많다. 구체적으로 보면 상태3에 속하는 데이터는 전체 데이터의 18.06%에 해당하고 상태1과 상태2에 속하는 데이터가 대략 82%에 이른다. 상태 1에는 44.18%가 해당하고 상태2의 경우는 37.76%이다. <그림 2>에서 보듯이 2010년 이후 집중적으로 발생한 마이너스 스프레드, 즉 전통적으로 WTI 유종의 가격이 Brent 유종보다 높게 형성되어 오던 것의 역전현상이 발생하여 상태1에 속하는 데이터가 많이 생겼다. 이는 WTI의 급격한 하락이 원인인 것으로 보인다. 나머지 표본기간에서는 두 임계치 사이에 해당하는 상태2에 다수의 데이터가 해당하고 있으며 WTI가 Brent보다 매우 높은 가격을 유지하여 이들의 유가 스프레드가 상당히 크게 실현되는 상태3에 해당하는 데이터는 그 비중이 낮은 것으로 나타났다.

한편, WTI-Dubai에서는 68.60%에 이르는 데이터가 상태3에 속하는 반면 상태1은 14.02%이고 상태2는 17.38%에 해당한다. 이미 언급한 것처럼 2010년 이후 WTI의 하락으로 인하여 WTI-Dubai에서도 마이너스 스프레드가 생겼으며 이로 인하여 $C^{(1)}$ 은 -8.54 이고 $C^{(2)}$ 는 0.04 로 추정되었다. 이는 WTI-Dubai의 스프레드가 변화폭을 매우 크게 보이는 데 기인한 결과이다. <그림 2>를 보면 WTI-Dubai의 스프레드는 2008년 중반 이전에는 주로 양(+)¹⁾의 값을 보이고 있으나 그 이후 특히 2010년 이후에는 급격히 음(-)²⁾의 값을 보이고 있다. 일종의 양극화현상이 나타난 모습이다. 이와 같이 변화폭이 크게 실현됨으로써 스프레드의 최고치와 최저치 사이의 간극이 크게 나타나고 $C^{(1)}$ 와 $C^{(2)}$ 의 간격도 8.58에 이를 정도로 크게 추정되었다. 특히 $C^{(2)}$ 가 상당히 낮은 0.04 로 추정되어 절대다수의 데이터가 상태3에 속하게 되었다.

마지막으로, Brent-Dubai 조합의 경우에는 상태1에 속하는 데이터가 37.17%이고, 상태2에는 43.73%의 데이터가 속하는 것을 볼 수 있다. 또 상태3에는 19.10%의 데이터가 해당한다. 결국 Brent-Dubai 조합에서도 거래비용 이내의 가격차이를 보이는 경우가 43.73%에 해당하고 나머지는 거래비용 이상의 가격차이가 발생한 것으로 해석할 수 있다.

〈표 7〉 전·후기 시차 및 공적분 벡터수 결정을 위한 Schwarz loss metrics

전기 (2000.1.3-2009.12.31)						
유가 조합	rank	1-lag	2-lags	3-lags	4-lags	5-lags
WTI-Brent	1 rank	- 15.671*	- 15.670	- 15.660	- 15.649	- 15.641
	2 rank	- 15.666	- 15.665	- 15.655	- 15.644	- 15.636
WTI-Dubai	1 rank	- 14.954	- 15.165*	- 15.164	- 15.160	- 15.159
	2 rank	- 14.949	- 15.160	- 15.159	- 15.155	- 15.154
Brent-Dubai	1 rank	- 15.207	- 15.471	- 15.482*	- 15.481	- 15.482*
	2 rank	- 15.201	- 15.465	- 15.477	- 15.476	- 15.477
후기 (2010.1.1-2014.12.31)						
유가 조합	rank	1-lag	2-lags	3-lags	4-lags	5-lags
WTI-Brent	1 rank	- 17.481	- 17.487*	- 17.470	- 17.457	- 17.437
	2 rank	- 17.471	- 17.476	- 17.459	- 17.447	- 17.426
WTI-Dubai	1 rank	- 16.738	- 17.169	- 17.214*	- 17.198	- 17.175
	2 rank	- 16.727	- 17.158	- 17.204	- 17.188	- 17.165
Brent-Dubai	1 rank	- 17.338	- 17.692	- 17.802	- 17.813*	- 17.805
	2 rank	- 17.328	- 17.681	- 17.791	- 17.802	- 17.795

“*”는 Schwarz loss의 최저값을 표시함.

다음으로 2010년을 기준으로 WTI의 급격한 하락현상에 따른 가격발견과정을 살펴보기 위해 전기와 후기로 구분하여 실증분석하였다. 이를 위해 각 기간의 최적시차를 구하였다. <표 7>에서 전기의 WTI-Brent 조합은 최적시차가 1이고 공적분 벡터수는 1이며, WTI-Dubai 조합은 최적시차가 2이고 공적분 벡터수는 1이며, Brent-Dubai 조합은 최적시차가 5이고 공적분 벡터수는 1인 것을 알 수 있다.⁶⁾ 즉, 전기의 경우 세 개의 유가 조합에 대한 모형에서 모두 공적분 벡터수가 1이라는 것은 공적분 관계가 세 모형 모두에서 성립하고 있다는 것을 의미한다. 한편, 후기를 보면 WTI-Brent 조합은 최적시차가 2이고, WTI-Dubai 조합은 최적시차가 3이며, Brent-Dubai 조합은 최적시차가 4인 것으로 나타났다. 후기에도 세 조합 모두 공적분 벡터수가 1이므로 공적분 관계가 모든 조합에서 성립하고 있음을 알 수 있다.

6) 전기의 Brent-Dubai 조합은 시차5와 더불어 시차3도 최적시차로 추정되었으나 데이터수가 충분히 많기 때문에 실증분석에서는 시차5를 선택하여 과거치의 영향을 많이 반영하고자 하였다.

먼저, 전기에 대한 실증분석을 살펴보자. 선형성 검정 결과는 <표 8>에 요약하였다. 세 조합 모두 공적분 관계가 있는 가운데 선형성 검정은 3가지 상태 TVECM이 VECM보다 적합한 모형임을 보여주고 있다. 이러한 검정 결과를 바탕으로 추정된 임계치는 <표 9>에 있다. 모든 임계치는 양수로 추정되었다. 각 상태에 속하는 데이터의 수와 그 비중을 추정하여 <표 10>에 정리하였다. 이 표를 보면 WTI-Brent와 WTI-Dubai의 경우에는 상태2에 속하는 데이터 수가 60%이상으로 추정되었다. 상태3까지 함께 고려하면 이 기간에는 WTI가 Brent와 Dubai에 비하여 높은 수준으로 유지되는 시기가 길었다는 점을 알 수 있다. 또한, 상태2에 해당하는 데이터가 많다는 점은 전반적으로 일정한 범위 안에서 유가 스프레드가 지속되었다는 것을 확인할 수 있다. Brent-Dubai 조합은 상태2에 속하는 데이터가 70.38%에 해당하여 다른 두 상태보다 많은 것으로 나타났다. 이는 유가 스프레드가 차익거래 불가능 영역에 해당하는 경우의 비중이 높았다는 것을 보여준다.

<표 8> 선형성 검정 (전기)

유가 조합	sup-LR 통계량	<i>p</i> -값
WTI-Brent	168.40	0.00
WTI-Dubai	72.838	0.00
Brent-Dubai	191.72	0.00

<표 9> 임계치 추정결과 (전기)

유가 조합	$C^{(1)}$	$C^{(2)}$	$C^{(2)} - C^{(1)}$
WTI-Brent	0.21	3.13	2.92
WTI-Dubai	2.36	7.36	5.00
Brent-Dubai	0.80	5.85	5.05

<표 10> 각 상태별 데이터 수와 상대적 비중 (전기)

유가 조합	상태1	상태2	상태3
WTI-Brent	507(19.45%)	1,735(66.55%)	365(14.00%)
WTI-Dubai	584(22.41%)	1,633(62.66%)	389(14.93%)
Brent-Dubai	405(15.56%)	1,832(70.38%)	366(14.06%)

*상대적 비중은 반올림으로 인하여 그 합이 100%와 일치하지 않을 수 있음.

다음으로 후기에 대하여 살펴보자. 세 조합에 대한 선형성 검정결과가 있는 <표 11>을 보면 WTI-Brent 조합은 VECM이 더 적합한 추정 모형으로 판명되었다. 또 WTI-Dubai 조합의 경우에도 p -값이 0.06으로 추정되어 유의수준 5%에서는 귀무가설을 기각할 수 없으나 유의수준 10%에서는 이를 기각할 수 있다. Brent-Dubai는 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 수 있다. 이에 따라 WTI-Dubai 조합과 Brent-Dubai 조합에 대해서만 TVECM을 이용한 추정을 하였다. 이 두 조합에 대한 추정 임계치는 <표 12>에 있다. 후기의 WTI-Dubai를 보면 WTI의 급격한 하락으로 인하여 임계치가 모두 음수로 추정되어 $C^{(1)}$ 이 -16.41 이고 $C^{(2)}$ 는 -13.17 로 나타났다. 이는 WTI가 Dubai보다 더 낮은 가격으로 실현된 시기가 많고 두 가격의 격차도 매우 크다는 점을 의미한다. <표 13>에 정리한 상태별 데이터 수와 상대적 비중에서 WTI-Dubai의 경우를 상태별로 보면 상태3에 속하는 데이터가 76.67%에 이르고 상태1과 상태2에 속하는 데이터의 비중이 낮은 것으로 추정되었다. 이를 통해서 WTI-Dubai의 유가 스프레드가 WTI 역전현상으로 음(-)이 되었지만 $C^{(2)}$ 보다는 높게 실현된 기간이 길었다는 것을 알 수 있다. Brent-Dubai 조합은 $C^{(1)}$ 이 전기의 추정치인 0.80에서 상승하여 3.68로 나타났고 그 영향으로 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 는 전기의 5.05에서 1.89로 축소되었다. 또한 상태1의 비중이 62.33%로 다른 두 상태보다 높게 나타났다.

〈표 11〉 선형성 검정 (후기)

유가 조합	sup-LR 통계량	p-값
WTI-Brent	38.478	0.44
WTI-Dubai	66.147	0.06
Brent-Dubai	83.031	0.02

〈표 12〉 임계치 추정결과 (후기)

유가 조합	$C^{(1)}$	$C^{(2)}$	$C^{(2)} - C^{(1)}$
WTI-Dubai	- 16.41	- 13.17	3.24
Brent-Dubai	3.68	5.57	1.89

〈표 13〉 각 상태별 데이터 수와 상대적 비중 (후기)

유가 조합	상태1	상태2	상태3
WTI-Dubai	153(11.78%)	150(11.55%)	996(76.67%)
Brent-Dubai	809(62.33%)	310(23.88%)	179(13.79%)

* 상대적 비중은 반올림으로 인하여 그 합이 100%와 일치하지 않을 수 있음.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 주요 유종의 현물가격 간 장기균형에 대한 비선형 동적조정 과정의 존재 여부와 특성 및 현물시장 간의 관계 등을 밝히고자 하였다. 2000년부터 2014년까지의 일별 현물가격을 이용하여 WTI-Brent와 WTI-Dubai 그리고 Brent-Dubai의 조합에 대하여 TVECM을 추정하여 선형 공적분관계와 비선형적 동적 조정 관계의 존재여부에 대한 검정을 하였다. 일반적으로 WTI가 Brent와 Dubai에 비해 상대적으로 우수한 품질로 인해 가장 높은 가격을 형성하여 왔으나 2010년 이후부터 WTI 개별시장의 원유공급과잉이라는 요인에 의해 이러한 일반적인 가격서열의 역전현상이 발생하였다. 이 점을 고려하여 본 연구에서는 분석대상기간을 2000

년부터 2014년까지의 전기간과 함께 WTI의 현물가격이 Brent와 Dubai보다 낮아진 2010년을 중심으로 전·후기로 나누어 분석하였다.

세 유종의 현물가격 시계열의 안정성 검정을 실시한 결과를 보면 전기간 및 전기와 후기의 모든 경우에 $I(1)$ 시계열인 것으로 나타났다. 다음으로 이 세 기간에 대해 유가 간 공적분 검정하였으며 세 기간 모두에서 모든 유가 조합에 공적분 관계가 존재하는 것으로 나타났다. 이에 따라 유가 간 장기균형이 존재함을 확인하였다.

VECM과 TVECM 가운데 더욱 적합한 모형을 찾는 선형성 검정 결과는 기간과 유가 조합에 따라 조금 차이가 있었다. 전기간의 경우 세 유가 조합에 대하여 TVECM이 VECM보다 적합한 것으로 나타났다. TVECM을 적용하여 전기간을 대상으로 추정된 두 임계치 추정결과를 보면 차익거래의 불가능성 및 거래비용을 의미하는 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 가 WTI-Brent 조합에서 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 양 시장 간의 차익거래 불가능 영역이 좁다는 것을 의미하고 거래비용도 작다는 것을 의미한다. WTI-Brent의 경우 두 유종 모두 품질이 유사한 저유황 경질유로서 비교적 활발히 거래되는 유동성을 지닌 특징으로 인해 차익 거래 불가능 영역이 좁을 수밖에 없는 것으로 보인다. 한편, WTI-Dubai의 경우에는 저유황 경질유와 고유황 중질유라는 품질 차이와 더불어 Dubai의 상대적으로 낮은 유동성으로 인해 차익거래 불가능 영역이 클 수밖에 없는 것으로 해석된다. 2010년 이전 기간인 전기에 대한 선형성 검정 결과에 따르면 세 조합 모두에 대해 3가지 상태 TVECM모형이 VECM에 비해 적합한 것으로 나타났다. 따라서 전기에서는 세 조합 모두 비선형적 동적조정과정을 따르고 있음을 확인할 수 있다. 후기의 경우에는 WTI-Dubai 조합은 유의수준 10%에서, 그리고 Brent-Dubai 조합은 유의수준 5%에서 TVECM이 VECM보다 더 적합한 것으로 판명되었다. 그러나 흥미롭게도 WTI-Brent 조합에 대해서는 VECM이 TVECM보다 더 적합한 것으로 나타났다. 이는 WTI-Brent 조합은 비선형적 동적조정 과정을 따르지 않고 있다는 점을 시사한다. 2010년 이후 WTI와 Brent의 현물시장 간 차익거래 불가능 영역의 폭이 좁아져 선형성 검정에서 통계적으로 유의한 결과를 얻기에 충분치 않았던 것으로 해석된다. 이러한 현상을 보이는 이유를 본 연구의 범위에서 뚜렷이 제시하기는 어렵지만 WTI와 Brent 모두 거래가 활발하여 유동성이 높은 유종이라는 사실이 배경에 작용하는 것으로 보인다. 또한

WTI 개별시장의 요인에 의해 유가 스프레드의 역전현상이 발생하고 있다는 점과도 관련성이 높을 것으로 추정된다. 향후 이에 대한 심층적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

한편, 전기간을 대상으로 추정한 임계치 $C^{(1)}$ 과 $C^{(2)}$ 보다는 전기와 후기로 나누어 각 기간에 대하여 추정된 임계치 $C^{(1)}$ 과 $C^{(2)}$ 가 차익거래의 영역을 분석하고 거래비용을 추정하는 데 더욱 적합할 수 있다. 이 값들은 WTI의 급격한 하락이 미친 영향을 배제하거나 포함하여 유가 조정과정을 분석한 결과에서 나온 추정치이기 때문이다. 마지막으로, WTI-Brent 조합을 제외하고 전기와 후기의 추정된 임계치를 비교하면 WTI-Dubai의 경우 $C^{(2)} - C^{(1)}$ 가 전기의 5.00에서 후기에는 3.24로 낮아졌고, Brent-Dubai 조합의 경우에도 전기의 5.05에서 후기에 1.89로 낮아졌음을 알 수 있다. 따라서 전기에 비해 후기에 양 시장 간의 차익거래 가능성이 확대되고 시장 간 거래비용이 축소되었다는 점을 확인할 수 있다.

[References]

1. 박호정·윤원철, “오차수정모형과 그래프 이론을 이용한 국제유가의 동시 및 단기 가격발견과정에 관한 연구”, 「자원·환경경제연구」, 제15권, 제3호, 2006, pp. 479~504.
2. 홍정효, “원유 현선물시장 간의 가격발견기능에 관한 연구”, 「산업경제연구」, 제24권, 제3호, 2011, pp. 1265~1277.
3. Balke, N. S. and T. B. Fomby, “Threshold cointegration,” *International Economic Review*, Vol. 38, 1997, pp. 627~645.
4. Bekiros, S. D. and C. G. H. Diks, “The Relationship between Crude Oil Spot and Futures Prices: Cointegration, Linear and Nonlinear Causality,” *Energy Economics*, Vol. 30, 2008, pp. 2673~2685.
5. Enders, W. and K. Chumrusphonlert, “Threshold Cointegration and Purchasing Power Parity in the Pacific Nations,” *Applied Economics*, Vol. 36, 2004, pp. 889~896.
6. Ewing, B., S. Hammoudeh, and M. Thompson, “Examining Asymmetric Behavior in US Petroleum Futures and Spot Prices,” *The Energy Journal*, Vol. 27, 2006, pp. 9~23.

7. Gulen, S. G., "Regionalization in the World Crude Oil Market," *The Energy Journal*, Vol. 18, 1997, pp. 109~126.
8. Gulen, S. G., "Regionalization in the World Crude Oil Market: Further Evidence," *The Energy Journal*, Vol. 20, 1999, pp. 125~139.
9. Hammoudeh, S., B. Ewing and M. Thompson, "Threshold cointegration Analysis of Crude Oil Benchmarks," *The Energy Journal*, Vol. 29, 2008, pp. 79~95.
10. Heo, E. and S-J Seo, "Estimating Long-Run Relationship among Crude Oil Spot Prices, U.S. Inventory, and OPEC Production," *Geosystem Engineering*, Vol. 5, 2002, pp. 99~103.
11. Hansen, B., "Testing for Linearity," *Journal of Economic Surveys*, Vol. 13, 1999, pp. 551~576.
12. Lo, M. C. and E. Zivot, "Threshold Cointegration and Nonlinear Adjustment to the Law of One Price," *Macroeconomic Dynamics*, Vol. 5, 2001, pp. 533~576.
13. Wang, Z. and D. A. Bessler, "A Monte Carlo Study on the Selection of Cointegrating Rank Using Information Criteria," *Econometric Theory*, Vol. 21, 2005, pp. 593~620.
14. Wlazlowski, S., B. Hagstromer, and M. Giuliatti, "Causality in Crude Oil Prices," *Applied Economics*, Vol. 43, 2011, pp. 3337~3347.