

북미 천연가스 현물시장간의 가격발견과 동태적 상호의존성에 대한 연구*

박 해 선**

〈차 례〉

- | | |
|----------|-------------|
| I. 서 론 | III. 실증분석 |
| II. 분석모형 | IV. 요약 및 결론 |

I. 서 론

1938년 천연가스법(Natural Gas Act)에 의해 천연가스산업이 연방정부의 직접적인 규제를 받게 된 이후 미국에 있어 천연가스산업은 가장 심하게 규제를 받아온 산업 중 하나이다. 동법의 시행으로 인해 연방에너지규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission)의 전신인 연방전력위원회(Federal Power Commission)는 주간 천연가스거래를 규제하기 시작하였다(U.S. Department

* 익명의 두 분 심사위원의 유익한 논평에 감사드립니다.

** 한국수출입은행 해외경제연구소 선임조사역.

of Energy, 2006). 그러나 1970년대 들어 만성적인 천연가스 공급의 부족에 직면하게 됨에 따라 천연가스정책법(Natural Gas Policy Act)을 시작으로 탈규제 정책이 시행되기 시작하였다. 특히 1984년과 1985년에 마련된 연방에너지규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission)의 명령 380과 436은 지역 천연가스 분배회사가 규제가격 대신 시장가격으로 천연가스를 구매할 수 있도록 허용하는 등 천연가스산업에 있어 경쟁을 통한 효율성 제고를 위한 탈규제화 정책은 보다 본격화되기 시작하였다(Leitzinger and Collette, 2002; Kleit, 1998; U.S. Department of Energy, 2006). 이러한 탈규제화 추세로 인해 천연가스 현물시장으로 역할을 맡게 되는 시장센터와 허브(market centers and hubs)가 발달하기 시작하였다. 이러한 현물시장은 미국의 주요 천연가스 생산 지역과 파이프라인 시스템의 교차지역에 주로 위치하고 있으며, 2003년 기준으로 미국과 캐나다에 약 37개의 시장이 운영되고 있는 것으로 조사되고 있다(U.S. Department of Energy, 2004).

본 연구는 주요한 북미 천연가스 현물시장간의 동적 상호작용의 특징과 가격 발견과정에 있어 개별 시장의 역할에 대해 분석하고자 한다. 북미의 천연가스 시장에 대한 통합에 관한 연구로는 DeVany and Walls (1993)를 들 수 있다. DeVany and Walls (1993)는 1987년부터 1991년간의 일일가격을 데이터로 활용하고 Engle and Granger (1987)의 공적분(Cointegration) 기법을 이용하여 천연가스 현물시장간의 통합에 대해 분석하였다. DeVany and Walls (1993)는 1987년에 대부분의 시장간 공적분 관계가 존재하지 않았으나, 1991년에는 과반수 이상의 시장에서 시장간 공적분 관계가 존재하는 것으로 보고하고 있다. DeVany and Walls (1994)는 1988년부터 1990년간의 25개 현물시장의 주간가격을 활용하여 시장가격간의 상관관계를 분석한 결과, 1985년에 시행된 일련의 탈규제 정책 이후 현물시장가격간의 상관관계가 커지고 있다고 주장하였다. King and Cuc (1996)은 1986년부터 1995년 사이의 월간 가격데이터를 활용하여 북미지역의 17개 현물시장간의 공적분 관계를 분석하였는데 1985년 가격 탈규제조치 이후 천연가스시장간의 가격수렴현상이 크게 증대되고 있으나 북미

천연가스 시장의 동서지역간의 분리현상이 존재하고 있음을 지적하였다. Serletis (1997)는 1990년부터 1995년 사이의 월간 가격데이터를 활용하여 Johansen (1995)의 최우량접근법(maximum likelihood approach)을 통해 8개 시장가격을 분석한 결과, King and Cuc (1996)이 주장한 것처럼 동서지역의 시장간 분리현상이 존재하지 않는다고 주장하였다. Serletis and Rangel-Ruiz (2004)는 북미 천연가스 시장의 상호연관성 연구에서 루이지애나의 Henry Hub 이 북미 천연가스 가격을 주도해 왔다고 주장하였다. 이 외에도 북미 천연가스 시장간의 통합에 대한 연구로 Cuddington and Wang (2006)을 들 수 있다. King and Cuc (1996)의 연구결과와 유사하게 Cuddington and Wang (2006)의 연구결과에 따르면 미국 서부지역 시장이 동부 및 중부 지역 시장과의 통합 정도가 약한 것으로 나타났다.

본 연구는 벡터오차수정 모형과 인과관계분석 기법인 그래프 이론을 결합하여 북미 천연가스 시장간의 동시적, 단기, 장기의 동적인 상호관계를 처음으로 분석하였다는 점에서 기존의 연구와 차이가 있다. 본 연구는 방향지시 비순환성 그래프(directed acyclic graph)에 기초한 동시적 인과흐름(contemporaneous causal flows)과 예측오차분산분해(forecast error variance decomposition)의 기법을 통해 동태적인 가격 발전과정을 살펴보고자 한다. 본 연구의 두 번째 특징으로 기존의 연구에서 다루지 않은 광범위한 지역 시장을 이변량 분석(bivariate analysis)이 아닌 다변량(multivariate) 분석의 틀을 활용하여 분석한 점을 들 수 있다. 마지막으로 기존의 연구와 달리 본 연구는 천연가스 시장에 대한 시계열분석에서 고려하지 않았던 기후변수를 외생변수로 오차수정모형에 포함시켜 기후변화에 따른 계절적 영향을 제거하여 분석의 정확성을 제고하고자 하였다.

본 연구에서 다루는 미국 국내 천연가스 가격동향과 상호연관관계를 파악하는 것은 미국이 최대 천연가스 소비국이고 향후 북미지역의 매장 천연가스의 고갈로 인해 LNG시장으로 진입할 것이 예상되며, 또한 현재 건설중인 서부 캘리포니아 지역의 LNG 터미널이 완성될 경우 한국의 LNG 도입과 경쟁관계에

놓일 수 있다는 점을 고려할 때 한국의 에너지 시장에 있어 중요한 시사점을 줄 수 있을 것으로 보인다.

논문은 다음과 같이 구성된다. 제Ⅱ장에서는 분석모형인 오차수정모형과 DAG를 소개하고, 제Ⅲ장에서는 단위근 검정, 공적분 검정 결과 및 벡터오차수정모형의 추정 결과 등 실증분석결과를 제시하며, 제Ⅳ장에서 실증분석결과에 대해 정리하고 요약하고자 한다.

Ⅱ. 분석모형

시계열분석에 있어 다변량 모형으로 시계열의 안정성 여부에 따라 벡터자기회귀(Vector Autoregressive: VAR) 모형이나 벡터오차수정 모형(Vector Error Correction Model: VECM)이 주로 활용되고 있다. 본 연구에서는 나중에 제시될 시계열의 안정성 검증 결과를 기초로 천연가스가격이 I(1)인 점을 고려하여 VECM을 활용해서 현물시장간의 동태적 상호관계를 분석하고자 한다.

1. VECM

$k-1$ 시차를 가진 벡터오차수정모형(Vector Error Correction Model: VECM)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= \mu + \Pi P_{t-1} + \sum_{i=1}^{k-1} \Gamma_i \Delta P_{t-i} + \Psi Z_t + e_t & (1) \\ &(t = 1, \dots, T) \\ e_t &\sim Niid(0, \Sigma) \end{aligned}$$

위 식에서 P_t 는 시점 t 에 있어 8개 시장의 비안정성 시계열을 포함하는 벡터를 의미하며, ΔP_t 는 일차차분을, 그리고 μ 는 상수항 벡터를 의미한다. P_t

의 단기 및 장기 조정은 각기 Γ_i 와 Π 에 의해 설명되어진다. $\Pi \neq 0$ 이고 행렬이 최대계수(full rank) 미만일 경우 $\Pi = \alpha\beta'$ 로 표시될 수 있다. 이 때 α 와 β 는 $m \times r$ 행렬이며, r 은 공적분 벡터의 개수를 의미한다(Hansen and Juselius, 1995). 시장의 상호의존성에 대한 장기 구조는 β 에 의한 공적분 검정을 통해서 설명되고, 단기구조는 Γ_i 와 α 의 추정을 통해 설명되어지는데, 즉 단기 조정과정을 설명해 주는 Γ_i 와 α 의 추정을 통해 장기균형에 대한 조정속도를 파악할 수 있다(Johansen, 1995). 관측된 확률충격, $\hat{\epsilon}_t$ 의 상관계수행렬을 이용한 방향지시 비순환성 그래프(Directed Acyclic Graph) 분석을 통해 동시적(contemporaneous) 구조가 파악될 수 있다(Spirtes, Glymour and Scheines, 2000).

천연가스시장의 장기 구조를 파악하기 위하여 우선 Π 행렬의 계수(r), 즉 공적분 벡터의 개수에 대한 분석이 이루어져야 한다. 본 논문은 Phillips (1996)와 Wang and Bessler (2005)의 연구에서처럼 SC(Schwarz Criterion)를 활용하여 최적시차와 공적분 계수를 동시에 결정하는 방법을 따른다. 어떤 시장이 파악된 장기 관계에서 배제되는지의 여부를 판단하기 위해 배제성(exclusivity) 검정이 행해진다. 배제성 검정의 귀무가설은 특정 시장이 공적분 공간에 포함되지 않는다는 것이며 이러한 귀무가설 하에서의 우도비(likelihood ratio) 검정은 공적분 벡터의 개수와 동일한 자유도를 가진 Chi-squared 분포를 따르게 된다(Hansen and Juselius, 1995). 가격의 상호의존성에 대한 단기 동태적 구조를 파악하기 위해 α 에 대해 약외생성(weak exogeneity) 검정이 실시되었다. 약외생성 검정은 장기적인 관계에서의 이탈에 대해 한 시장이 단기적인 조정을 보여주는지의 여부를 검정하게 된다(Johansen, 1991). 이 경우 귀무가설은 개별 시장이 공적분 공간에서의 변동에 반응하지 않는다는 것으로 귀무가설 하에서 우도비(likelihood ratio) 검정은 배제성 검정에서와 같이 공적분 벡터의 개수와 동일한 자유도를 가진 Chi-squared 분포를 따르게 된다. VECM의 추정 파라미터의 개수가 많고 추정 파라미터를 통해 직관적인 정보를 얻는 데는 통상 어

려움이 따르기 때문에 주로 충격반응함수와 예측오차분산분해를 활용하여 변수 간의 동태적인 구조를 설명하게 된다. 식 (1)의 VECM은 Johansen (1995)의 maximum likelihood 방법을 통해 추정되며 이렇게 추정된 VECM은 식 (2)의 자기회귀(VAR) 모형으로 변환되어진 후 충격반응함수와 예측오차분산분해가 실시된다.

$$\begin{aligned}
 P_t &= \mu + (1 + \Pi + \Gamma_1)P_{t-1} - \sum_{i=1}^{k-2} (\Gamma_i - \Gamma_{i+1})P_{t-i-1} \\
 &\quad - \Gamma_k P_{t-k-1} + \Psi Z_t + e_t \\
 &\quad (t = 1, \dots, T) \\
 &\quad e_t \sim Niid(0, \Sigma)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

그러나 이러한 방법을 활용하는데 있어 경제 통계자료에서 흔히 발견되는 오차항간의 이분산 문제, 즉 오차항간에 서로 동시 상관하지 않도록 오차항의 동시적 구조(contemporaneous structure)가 독립적(직교)이어야 한다는 점을 해결하기 위해 소위 출레스키 분해(Choleski decomposition)가 이용된다. 일반적으로 오차항의 이분산 문제의 해결은 다음과 같은 방법으로 이루어진다. 직교잔차항 벡터를 $e_t = A^{-1}\varepsilon_t$ 로 정의할 경우, ε_t 는 직교화된 잔차항 벡터를 의미하고, A 행렬은 비직교 잔차항 (e_t)이 직교화된 잔차항과 어떤 관계를 갖고 있는가를 보여주고 있다고 볼 수 있다. 행렬 A를 식 (2)의 VAR모형에 곱함으로써 직교화된 오차항 벡터를 구하는 것이다. 즉, 식으로 표현하면 $Ae_t = \varepsilon_t$ 와 같다. 출레스키 분해의 경우 A행렬은 역행렬이 존재하는 하방삼각행렬로서 대각행렬원소가 1로 이루어진다. 출레스키 분해 방법이 활용될 경우, A행렬의 상위에 위치한 원소의 변수가 아래에 위치한 원소의 변수를 인과하는 인과구조를 갖게 된다. 따라서 이 방법은 변수의 나열순서에 따라 충격반응 및 예측오차 분산분해의 결과가 달라지는 문제점을 안고 있는 한계가 있는 것으로 알려지고 있다.

이러한 변수의 임의나열 문제를 해결하기 위해 Sims (1986)와 Bernanke

(1986)는 VAR 모형의 확률오차를 구조적으로 식별하기 위한 구조 VAR 모형 (Structural VAR model)을 제시한 바 있다. 구조 VAR 모형은 통계적으로 검증하고자 하는 경제이론이 잘 갖추어진 분야에서 매우 유용한 방법으로 활용될 수 있다. 하지만 상이한 경제이론이 존재하거나 연구자의 주관적인 경험과 판단이 일치하지 않을 경우, 적용되는 인과순위가 연구자에 따라 달라질 수 있으며 이에 따라 상이한 충격반응 분석결과를 낳는 한계를 여전히 갖고 있다.

Swanson and Granger (1997)는 VAR 모형의 식별과정에서 변수의 임의적인 나열의 문제점과 구조 VAR 모형이 갖고 있는 한계점을 극복하기 위한 방법으로 그래프 이론이 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다. Swanson and Granger (1997)는 VAR 모형내의 동시적 인과순위에 관한 유용한 정보가 VAR 모형의 잔차항의 공분산행렬에 담겨져 있다고 보고 방향지시 비순환성 그래프 (directed acyclic graph)를 활용하여 Bernanke (1986)가 제시한 구조 모형의 인과순위를 제공할 수 있다는 것을 보여주었다. 또한 Hoover (2005)는 VAR 모형의 동시적 인과순위를 파악하는데 있어 그래프 이론을 활용한 방법이 몇몇 문제점에도 불구하고 유용한 접근법이 될 수 있다고 주장하고 있다. 그래프 이론을 활용한 인과순위 결정방법은 특히 사전적으로 뚜렷한 인과관계를 정하기 어려운 경우, 인과관계 설정은 연구자의 주관적인 판단에 의존할 수밖에 없다는 문제점을 통계자료에 근거하여 동시적 인과순위(causal ordering)를 해결할 수 있기 때문에 분석의 객관성을 제고할 수 있다는 측면에서 최근 시계열 분석에 도입되기 시작하여 활발히 연구가 진행되고 있다.

2. 그래프 이론: 방향지시 비순환성 그래프

1) 방향지시 비순환성 그래프(Directed Acyclic Graphs)

그래프 이론의 기본적인 개념을 소개하는 차원에서 본 절에서 간략히 설명하고자 한다. 간단히 말하자면, 방향지시 그래프는 변수들간의 인과흐름(causal

flow)을 나타내주는 그림이라고 할 수 있다. 화살표는 그러한 흐름을 표시하는 것으로 사용된다. 방향지시 화살표는 연결선 또는 모서리(edge)라고 부르며 한 연결선을 두고 연결된 변수는 인접(adjacent)하고 있다고 말한다. 예를 들어 간단한 방향지시 그래프(directed graph)인 $X \rightarrow Y$ “변수 X 는 변수 Y 를 인과한다(cause)”라는 것을 의미한다. 만약 두 변수가 $W-X$ 같이 연결되어 있을 경우에는 W 와 X 는 정보흐름(information flow)에 의해 연결되어 있다고 할 수 있다. 그러나 방향지시 화살표(arrow)가 아닌 선분으로 연결된 위의 경우, W 변수가 X 변수를 인과하는지 그 반대인지가 구별되지 않음을 의미한다. 방향지시 비순환성 그래프(Directed Acyclic Graphs: DAG)에서는 $W \rightarrow X \rightarrow Y \rightarrow W$ 와 같은 변수(W)에서 생성된 정보(information)가 다른 변수 (X, Y)를 거쳐 결국 변수 W 로 돌아오는 순환성 체계는 포함되지 않는다.

만약 두 변수(예를 들어, A 시장과 B 시장의 확률충격)가 상관관계에 있다면 A 가 B 를 인과하는지 B 가 A 를 인과하는지 또는 제3의 변수 C 에 의해 두 변수 (A, B)가 인과되는지에 대해 구별할 수 없다. 이러한 인과흐름을 파악하기 위한 시도는 3개 이상의 변수간에 인과관계(causal relationships)가 조건부 독립 조건(conditional independence conditions)의 활용에 의해 밝혀질 수 있다는 것으로부터 출발한다.

예를 들어, 그래프 $A \leftarrow B \rightarrow C$ 를 고려해 보자. 이 그래프는 B 가 A 와 C 에 대한 공통원인(common cause)이 되는 경우를 표시한다. 이 경우 두 변수 A 와 C 간의 무조건부 연관성(unconditional association)은 0이 아니다. 그러나 B 라는 공통원인에 대한 정보 또는 지식이 주어졌다면 A 와 C 의 조건부 관계는 0이 된다. Pearl (2000)은 이러한 구조를 특히 ‘인과분기(causal fork)’라고 언급하고 있으며 이 경우 공통원인이 A 와 C 변수간의 연관성을 ‘차단(screen-off)’하고 있다고 말한다. ‘차단’은 변수간의 인과흐름을 결정짓는데 중요한 역할을 하는 개념으로 이용되고 있다. 다른 유사한 차단조건이 존재하는 경우로 ‘인과사슬(causal chain)’ 관계, 즉 $D \rightarrow E \rightarrow F$ 의 예를 고려해 보기로 하자. 이 경우 D 와 F 변수간의 무조건부 연관성은 0이 아니지만 만약 중간에 위치한 E 의 정보가 주

어진다면 D와 F 간의 조건부 연관성은 0이 된다. 왜냐하면 인과사슬의 중간변수에 대한 정보가 다른 두 변수간의 연관성을 '차단'하기 때문이다.

다음으로 변수 G, H와 I 간의 인과관계가 $G \rightarrow H \leftarrow I$ 로 설정되어 있는 경우를 고려해 볼 수 있다. Pearl (2000)은 이 경우를 특히 '인과역분기(causal inverted fork)'라고 언급하고 있다. 이 경우 H는 충돌부(collider)로 불리며 G와 I의 공통효과(common effect)라고 할 수 있다. 이 경우는 앞서의 두 예와 달리 무조건부 연관성은 0이나 만약 H의 정보 또는 지식이 주어질 경우 G와 I의 연관성은 0이 되지 않는다. 즉, 공통결과에 대한 정보는 다른 두 변수(G,I)간의 연관성을 '차단'하지 못한다.

요약하면 인과분기와 인과사슬은 중간 변수가 양쪽 끝 두 변수간의 연관성을 차단한다는 측면에서 동일한 독립적 구조를 지니고 있다고 할 수 있지만, 인과역분기의 경우에는 중간변수가 다른 두 변수간의 연관성을 차단하지 않는다. 이러한 인과역분기의 존재는 연구자로 하여금 이론적으로 관련성이 있는 변수들간의 독립성 또는 조건부 독립성을 활용하여 인과구조를 파악하는 것을 가능하게 해준다는 것이다.

이러한 공통원인, 인과사슬, 공통효과와 관련된 '차단'현상은 오래 전부터 문헌에서 인식되어져 왔다(Orcutt, 1952; Reichenbach, 1956). 그러나 차단개념이 3개 이상의 변수들간의 인과흐름을 파악하는데 본격적으로 활용되기 시작한 것은 비교적 최근 들어 Pearl (2000)과 Spirtes, Glymour and Scheines (2000)에 의해 이루어졌다. Pearl과 몇몇 연구자들은 차단 개념을 인과흐름과 확률표현(Probability representation) 간의 관계를 설정하는 d -분리(d -separation) 개념을 활용하여 일반화하였다. Pearl (2000)은 두 변수 A와 C 간의 모든 경로를 B가 차단하면 "B는 A와 C를 d -분리한다"고 정의한다.

2) 탐욕동급검색 알고리즘(Greedy Equivalence Search Algorithm)

방향지시 비순환성 그래프를 찾기 위한 탐색 알고리즘은 Pearl (2000)과 Spirtes, Glymour and Scheines (2000)에서 몇 가지 방법이 소개되고 있는데,

그 중 가장 널리 활용되는 알고리즘으로 PC 알고리즘과 GES 알고리즘을 들 수 있다. Park, Mjelde and Bessler (2006)와 박호정·윤원철 (2003, 2006)은 PC 알고리즘을 활용한 방향지시 비순환성 그래프를 연구에서 활용하였다. PC 알고리즘은 세 가지 가정, 즉 인과충분성(causal sufficiency) 조건, 마야코프(Markov) 조건 및 진정성(faithfulness) 조건이 충족된다는 가정 하에 앞서 언급한 d -분리의 개념을 활용하여 변수간의 상관계수와 편상관계수(partial correlation)를 이용하여 변수들간의 인과관계를 나타내는 방향지시 비순환성 그래프를 찾게 된다. PC 알고리즘에 대한 보다 자세한 논의는 Pearl (2000), Spirtes, Glymour and Scheines (2000), Park, Mjelde and Bessler (2006)와 박호정·윤원철 (2003, 2006)을 참조하기 바란다.

그러나 실제의 많은 연구에 있어서 고려할 수 있는 변수가 충분치 않은 경우가 많은데 이러한 경우, “분석에 포함된 2개 이상의 변수를 초래하는 변수는 반드시 분석에 포함되어야 한다”는 충분성 조건은 현실적으로 PC 알고리즘을 적용하는데 제약이 될 수 있다. 또한 PC 알고리즘은 표준적인 Neyman-Pearson 가설검정에 기초하고 있기 때문에 유의수준(significance level)이 적절히 선택되어야 한다. 유의수준의 선택에 따라 DAG의 결과도 달라지기 때문이다. GES 알고리즘은 PC 알고리즘과 같이 엄격한 가정을 필요로 하지 않을 뿐 아니라 베이저안 평가점수에 의해 DAG를 탐색하게 되므로 적절한 유의수준의 선택이라는 문제에서 자유로울 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 Meek (1997)에 의해 제시되고 Chickering (2002)에 의해 보다 구체화된 베이저안 검색 알고리즘인 탐욕동급검색 알고리즘(Greedy Equivalence search Algorithm)에 대해 간략히 소개하는 차원에서 설명하기로 한다.

탐욕동급검색 알고리즘은 간단히 베이저안 평가기준(Bayesian scoring criterion)을 활용하여 가능한 방향지시 비순환성 그래프들을 평가하는 방법이라고 할 수 있다. 베이저안 평가기준(Bayesian scoring criterion)의 근사치는 다음과 같이 표시된다.

$$S(D^k, D) = \ln p(D | \hat{\phi}, G^k) + \frac{d}{2} \ln T \quad (3)$$

위 식에서 p 는 D 로 표시되는 통계자료를 생성하는 확률분포를 의미하고, $\hat{\phi}$ 은 알려지지 않은 모수의 최우도(maximum-likelihood) 추정치를 의미하며, d 는 그래프 G^k 의 자유 모수(free parameters)의 개수를, 그리고 T 는 관측치의 개수를 의미한다. 함수 S 는 $\ln p(D | \hat{\phi}, G^k)$ 항으로 표시되는 적합도(fit)와 $\frac{d}{2} \ln T$ 로 표시되는 자유모수의 최소성 간의 trade-off관계를 보여주고 있다.

탐욕동급검색 알고리즘을 설명하기 위해 먼저 동급(equivalence class) 개념을 이해할 필요가 있다. 만약 2개의 방향지시 비순환성 그래프가 서로 동일한 골격(skeleton)과 동일한 v -구조(structure)를 갖고 있으면 이들 두 방향지시 비순환성 그래프는 동일한 동급에 속한다고 할 수 있다. 여기서 골격이란 방향성을 무시한 변수간의 연결성만을 의미하며, v -구조는 2개의 변수가 한 다른 변수를 초래하는 구조, 즉 앞서 언급한 인과역분기의 구조를 의미한다. 예를 들어 다음의 방향지시 비순환성 그래프들을 생각해 보자.

- (D.1) $A \leftarrow B \rightarrow C$, (D.2) $A \leftarrow B \leftarrow C$, (D.3) $A \rightarrow B \rightarrow C$,
 (D.4) $A \rightarrow B \leftarrow C$, (D.5) $A \leftarrow C \rightarrow B$

(D.1), (D.2) 및 (D.3)은 동급에 속한다고 할 수 있다. 골격이 서로 동일하며 v -구조에 있어 인과역분기가 전혀 없다는 점에서 동일한 v -구조를 갖고 있기 때문이다. 이에 반해 (D.4)는 이들과 동일한 골격은 갖고 있으나 하나의 인과역분기를 갖고 있는 다른 v -구조를 보이고 있기 때문에 (D.1), (D.2) 및 (D.3)와 함께 동급에 속하지 않는다. 한편, (D.5)는 (D.1), (D.2) 및 (D.3)와 같이 인과역분기가 전혀 없는 v -구조를 갖고 있으나 골격에서 다른 차이를 보이고 있으므로 (D.1), (D.2) 및 (D.3)와 같은 동급에 속하지 못한다. 즉, 다른 동급에 속한다고 할 수 있다.

GES 알고리즘은 어느 한 동급(equivalence class)에 속한 방향지시 비순환성 그래프들과 다른 동급에 속한 방향지시 비순환성 그래프들을 단계적으로

(stepwise) 비교 검색하게 된다. 그러나 GES 알고리즘은 같은 동급에 속해 있는 방향지시 비순환성 그래프들에 대해서는 평가의 우열을 구분하지 않는다.

GES 알고리즘은 두 단계로 나뉘는데, 첫 번째 단계에서는 먼저 모든 변수들 간의 모서리(edge)가 없는(모든 변수들이 상호 독립적인) 상태에서 출발하여 모서리를 추가하고 방향지시 화살표의 방향을 변경해 가면서 베이지안 사후적 평가점수(Bayesian posterior score)가 이러한 변화에 따라 개선되어 가는지를 살펴 피게 된다. 이러한 과정에서 알고리즘은 변수간 모서리의 추가 또는 화살표 방향의 변화에 따라 베이지안 평가점수(Bayesian score)를 가장 많이 증가시키는 변화를 선택하게 되는데, 첫 번째 단계는 더 이상 모서리의 추가나 화살표 방향의 변화가 베이지안 사후적 평가점수를 개선시키지 못할 때 종료된다. 이로부터 출발하여 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구해진 방향지시 비순환성 그래프 후보로부터 모서리를 하나씩 제거하고 화살표의 방향을 역으로 변화시키는 방법을 순차적으로 적용하여 베이지안 사후적 평가점수를 가장 많이 증가시키는 방향으로의 변화를 선택하는 식으로 알고리즘이 작동된다. 두 번째 단계에서 첫 번째 단계와 마찬가지로 알고리즘은 더 이상 베이지안 사후적 평가점수를 개선시킬 수 없을 때 중단되고, 이 때의 방향지시 비순환성 그래프가 최종적으로 탐색검색알고리즘으로 탐색된 최적 방향지시 비순환성 그래프라고 할 수 있다. 이상의 GES 알고리즘은 PC 알고리즘과 같이 Spirtes를 비롯한 연구진들이 개발한 소프트웨어 TETRAD IV에 의해 간단히 수행된다.

Ⅲ. 실증분석

1. 데이터

실증분석은 지역적 분산과 통계데이터의 가용성 등을 고려하여 <그림 1>에

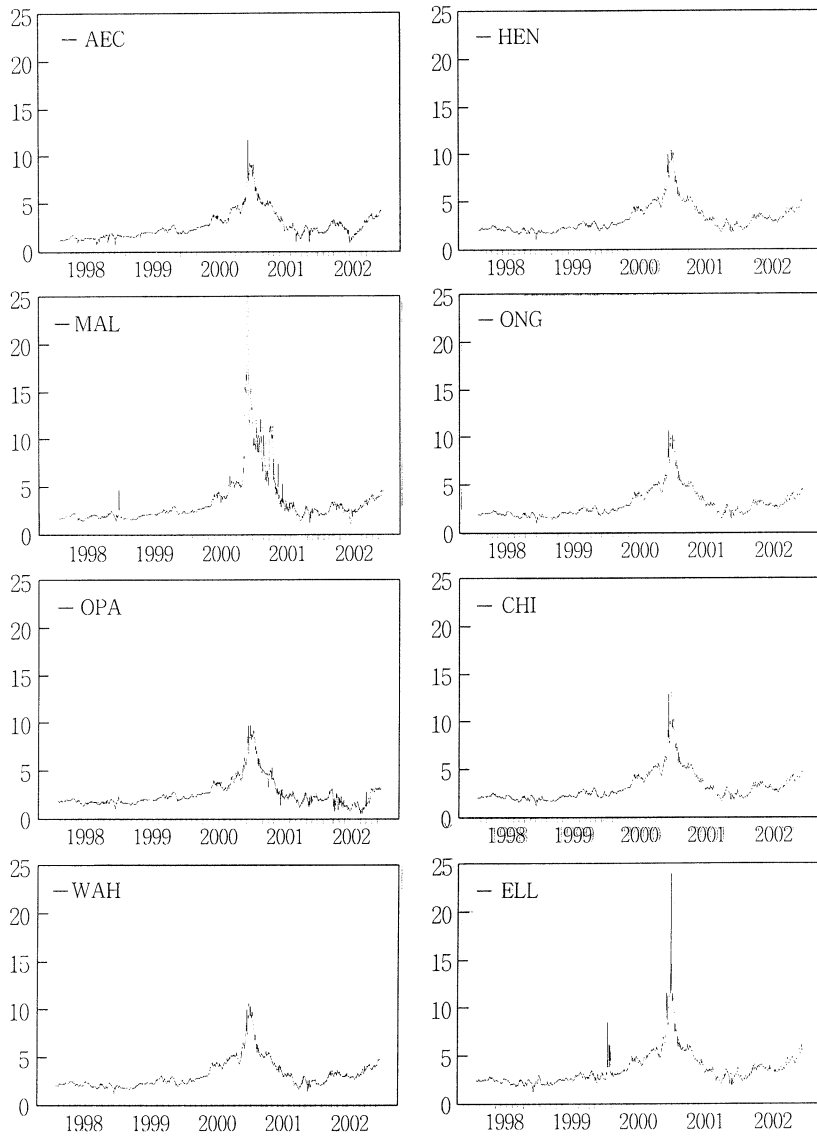
<그림 1> 8개 북미 천연가스 현물시장과 미국의 23개 도시



서 보여지는 것처럼 미국과 캐나다의 주요 8개 천연가스 현물시장의 가격 시계열 자료를 활용하였다. 즉, 8개 시장은 텍사스 주의 Waha Hub(WAH), 루이지애나 주의 Henry Hub(HEN), 오클라호마 주의 Oklahoma(ONG), 와이오밍 주의 Opal Hub(OPA), 일리노이 주의 Chicago Hub(CHI), 펜실바니아 주의 Ellisburg-Leidy Hub(ELL), 오레건 주의 Malin Hub(MAL), 그리고 캐나다 알버타의 AECO Hub(AEC)이다.

1998년 1월 12일부터 2002년 12월 20일까지 기간의 Bloomberg Energy Service가 제공하는 일일가격을 활용하였다. 동 가격은 익일에 공급되는 가스의 MMBtu당 달러를 의미하며 거래량에 가중평균한 값이다. 가격 시계열은 각각 총 1,290개의 관측치를 포함하고 있으며 거래가 없는 토요일과 일요일은 제외되었다. 공휴일을 포함한 총 분실 데이터는 8개 시계열에서 총 400개이며 각각의 전일 가격이 해당 분실 데이터로 대응되었다. <그림 2>는 각 시장의 가격 시계열 그래프를 보여준다.

〈그림 2〉 8개 북미 천연가스 현물시장의 일일 가격 시계열
(1998. 1. 12~2002. 12. 20)



천연가스 가격에 대한 일일 기후효과를 반영하기 위하여 전일의 cooling degree-days(CDD)와 heating degree-days(HDD)가 각각 벡터오차수정모형의 외생변수로 활용되었다. CDD와 HDD는 미국 전역의 23개 도시의 일일 degree-days를 각 도시의 인구수에 가중평균한 값을 사용하였다.¹⁾ <그림 1>은 CDD와 HDD의 계산에 사용된 23개 도시들을 보여준다.

2. 단위근 검정 및 모형설정

ADF(Augmented Dickey-Fuller) 검정(Fuller, 1976)을 실시한 결과 5% 유

<표 1> 공적분 계수와 시차 조합에 대해 계산된 Schwarz loss 값

시차	공적분 벡터의 개수 (공적분 계수)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-50.8174	-50.9284	-51.0279	-51.0968	-51.1087	-51.1240*	-51.1181	-51.1003
2	-50.9306	-50.9718	-51.0066	-51.0462	-51.0448	-51.0396	-51.0281	-51.0106
3	-50.8556	-50.8783	-50.9001	-50.9254	-50.9176	-50.8992	-50.8780	-50.8602
4	-50.5958	-50.6317	-50.6518	-50.6571	-50.6459	-50.6230	-50.5983	-50.5802
5	-50.3851	-50.4143	-50.4275	-50.4212	-50.4016	-50.3796	-50.3539	-50.3355
6	-50.1437	-50.1504	-50.1511	-50.1467	-50.1323	-50.1070	-50.0845	-50.0662
7	-49.8847	-49.8833	-49.8839	-49.8744	-49.8535	-49.8263	-49.8026	-49.7836
8	-49.6520	-49.6364	-49.6284	-49.6167	-49.5977	-49.5690	-49.5434	-49.5243
9	-49.3470	-49.3417	-49.3205	-49.3047	-49.2835	-49.2541	-49.2292	-49.2099
10	-49.0151	-49.0006	-48.9811	-48.9558	-48.9321	-48.9016	-48.8769	-48.8577

주: Schwarz loss 값은 식 $SL = \log(|Z| + (K)(\log T)/T$ 에 의해 구해지며, Z 는 각 식에서 K 개의 모수를 갖는 경우의 추정된 오차항의 분산-공분산 행렬이다. T 는 총관측치 개수를, 그리고 $| \cdot |$ 는 행렬식을 각각 의미함.

1) 지역별 기후차이에서 오는 특수성을 감안, 미국 전역을 Köppen 기후분류에 따라 4개 지역으로 구분하여 각각의 지역에 있어 HDD와 CDD를 구하였으나 상호간 매우 높은 상관관계로 활용의 실익이 없다고 판단, 본 연구에서는 단일의 CDD와 HDD를 활용하였다. 그러나 단일의 CDD와 HDD를 활용함으로써 특정지역시장에서 가격이 기상의 변동에 과잉 또는 과소 반응을 보일 수 있는 가능성이 있음을 유의하기 바란다.

의수준에서 8개 시계열이 모두 비정상성의 귀무가설을 기각할 수 없어 단위근을 가진 것으로 나타났다. 분석에서 HDD와 CDD를 제외하고 자연대수를 취한 값을 활용하였다. 또한 추정에 있어 <그림 2>에서 보여지는 것처럼 각 가격 시계열은 이분산성을 가지는 것으로 판단되어 White/Hansen 공분산 수정(covariance correction) 방법이 활용되었다.²⁾ <표 1>은 최적 시차와 공적분 계수에 대한 추정 결과를 보여준다. Schwarz loss 값이 6의 공적분 계수와 시차가 1일 때 최소화됨을 알 수 있다.

3. 배제성 및 약외생성 검정: 장기 구조 분석

<표 2>는 배제성(exclusivity) 검정에 있어 8개 시계열 모두 귀무가설이 기각된 것을 보여준다. 이는 8개 시계열 모두가 공적분 공간(cointegrating

<표 2> 배제성 및 약외생성 검정 결과

변 수	배제성 검정		약외생성 검정	
	Chi-Squared	p-value	Chi-Squared	p-value
AEC	68.43	.00	67.47	.00
MAL	58.61	.00	26.24	.00
OPA	76.25	.00	35.68	.00
WAH	318.76	.00	79.86	.00
HEN	212.06	.00	65.25	.00
ONG	343.41	.00	100.02	.00
CHI	193.90	.00	101.39	.00
ELL	169.45	.00	131.47	.00
HDD	24.00	.00	-	-
CDD	44.00	.00	-	-

2) 이분산성과 함께 변동성(volatility)의 가능성을 고려하여 ARCH나 GARCH 추정방법을 적용하는 시도도 향후 하나의 흥미로운 연구과제가 될 것으로 보인다.

space)에 포함되는 것을 의미한다. 나아가 외생변수인 HDD와 CDD 변수도 장기 균형관계에서 배제되지 않음을 보여준다. 약외생성(weak exogeneity) 검정에서 모든 시계열에 대해 귀무가설이 기각되었다. 이는 8개의 시장이 모두 장기 균형관계에서의 변동에 반응하는 것을 의미한다.

4. 동시적(contemporaneous) 구조 분석

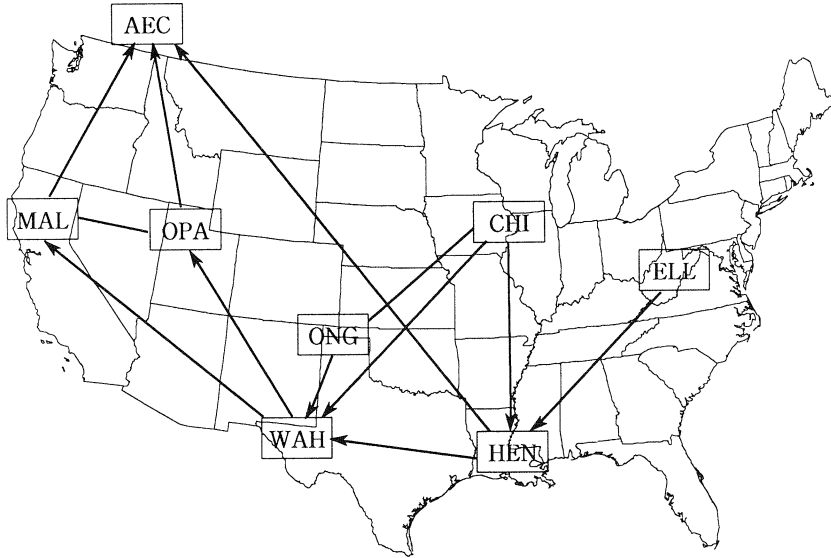
<표 3>은 추정된 벡터오차수정모형으로부터 구해진 확률충격(innovation)의 상관계수 행렬을 보여준다.

WAH, HEN 그리고 ONG 등 3개의 남부지역에 위치한 시장으로부터의 확률충격(innovation)은 상호간 그리고 이들 시장과 CHI 간에 있어 큰 상관관계를 보여주는 반면, 북미의 다른 시장과는 작은 상관관계를 보여준다. 동부에 위치한 시장인 ELL로부터의 확률충격은 다른 나머지 시장과의 상관관계가 매우 작은 것으로 나타났다. 서부의 3개 시장, AEC, MAL 그리고 OPA로부터의 확률충격은 상호간 그리고 ELL을 제외한 다른 지역 시장과 약간의 상관관계가 있음을 보여준다. 이러한 모든 시장간의 확률충격간에 양의 상관관계가 존재한다는 것은 천연가스가격이 시장간 활발한 차익거래를 통해 동조화되는 현상이

<표 3> 추정 확률충격의 상관계수 행렬

	AEC	MAL	OPA	WAH	HEN	ONG	CHI	ELL
AEC	1.00							
MAL	0.32	1.00						
OPA	0.30	0.40	1.00					
WAH	0.46	0.53	0.47	1.00				
HEN	0.48	0.46	0.41	0.89	1.00			
ONG	0.46	0.49	0.42	0.92	0.90	1.00		
CHI	0.45	0.45	0.41	0.89	0.90	0.89	1.00	
ELL	0.02	0.03	0.02	0.05	0.07	0.04	0.03	1.00

<그림 3> TETRAD IV에 의해 구해진 동시적 인과구조



나타나고 있음을 시사한다고 할 수 있다.

<그림 3>은 <표 3>의 상관계수행렬에 기초하여 GES 알고리즘이 제시한 인과흐름을 보여준다. WAH가 MAL과 OPA를 인과하고 이들 두 시장은 AEC를 인과하는 것으로 나타나 AEC가 정보의 흡수원(sink)으로 나타났다.

CHI는 WAH와 HEN을 인과하고 ELL 또한 HEN을 인과하고 있다. HEN은 WAH와 AEC를 인과하고 ONG는 WAH와 HEN을 인과하는 구조를 보여준다. ELL을 인과하는 시장이 없기 때문에 ELL은 동시적 구조에서 외생적인 것으로 나타났다. 또한 CHI와 ONG는 CHI와 ONG 간의 방향성이 결정되지 않은 모서리의 방향성에 따라 외생성이 결정된다. GES 알고리즘은 MAL과 OPA, 그리고 CHI와 ONG 간의 모서리의 방향성을 제시하지 못하고 있다. GES에 의해 방향성이 제시되지 못한 모서리에 대해 가능한 네 가지 경우를 생각해 볼 수 있다. 즉, ① OPA←MAL, CHI←ONG, ② OPA←MAL, CHI→ONG, ③ OPA→MAL, CHI←ONG, ④ OPA→MAL, CHI→ONG이다. MAL과 OPA 간의 방향

성의 차이는 Park (2005)에서 보여지는 것처럼 결과에서 큰 차이를 초래하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 OPA←MAL을 가정하기로 한다. 그러나 CHI와 ONG 간의 방향성은 어떻게 결정되느냐에 따라 중요한 결과의 차이를 가져온다. 즉 CHI→ONG의 경우 CHI가 중요한 시장으로서 역할을 수행하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 초과수요시장인 CHI로부터 초과공급시장인 ONG로 인과흐름이 있는 것으로 가정하기로 하는데 이는 GES 알고리즘에 의해 구해진 초과수요시장에서 초과공급시장으로의 인과흐름과 일치하는 것으로 타당한 가정이라고 볼 수 있다. 따라서 위에서 언급한 네 가지 경우 중 ② OPA←MAL, CHI→ONG의 경우를 가정하기로 한다. Park (2005)은 네 가지 경우 전부의 결과를 보여준다.³⁾

5. 예측오차 분산분해

<표 4>는 예측오차 분산분해의 결과를 보여준다. 예측오차 분산분해는 동태적으로 개별 변수의 외생성 또는 내생성을 식별하는데 유용한 정보를 제공해준다. <표 4>는 OPA←MAL, CHI→ONG의 동시적 인과관계를 가정한 후 시차 0, 1 그리고 30의 경우에 대해 살펴보기로 한다.

시차 0의 경우 AEC의 가격변동 또는 예측오차에 대해 자체 가격변수(AEC)에 의해 75.0%가 설명되고, CHI가 19.6%를 설명한다. 시차 1의 경우에는 시차 0의 경우와 거의 비슷하나 시차 30의 경우에는 AEC의 가격변동에 대해 자체 변수인 AEC가 33.9%, MAL이 21.1%, WAH가 6.4%, CHI가 20.9%, 그리고 ELL이 10.1%를 설명하는 것으로 나타났다. MAL의 예측오차에 대해 시차 0에 있어 MAL(72.2%)과 CHI(22.1%)가 대부분을 설명하고 있으나 시차 30의 경우에는 AEC(8.2%), MAL(50.6%), WAH(9.0%), CHI(21.1%), 그리고 ELL(5.3%)

3) Park (2005)은 네 가지 모든 경우의 예측오차 분산분해의 결과를 보여준다. 결과에 따르면 CHI와 ONG 간의 모서리의 방향성이 CHI→ONG에서 CHI←ONG로 변경될 경우, ONG가 중요한 시장으로 CHI의 역할을 담당하고 있음을 알 수 있다.

박 해 선

〈표 4〉 예측오차 분산분해 결과

시차		AEC	MAL	OPA	WAH	HEN	ONG	CHI	ELL
AEC	0	74.97	1.11	0.67	0.13	2.42	1.14	19.54	0.02
	1	73.12	1.93	0.90	0.48	3.43	0.98	18.65	0.52
	30	33.90	21.07	2.83	6.35	4.41	0.54	20.89	10.11
MAL	0	0.00	72.17	0.00	3.54	0.19	1.96	22.14	0.00
	1	0.05	71.24	0.02	4.68	0.37	1.73	21.82	0.08
	30	8.22	50.64	3.04	9.04	1.78	0.91	21.14	5.25
OPA	0	0.00	3.17	75.01	2.77	0.15	1.54	17.36	0.00
	1	0.13	3.95	74.03	2.74	0.08	1.99	17.02	0.06
	30	11.30	28.98	39.96	6.92	0.09	1.57	10.14	1.04
WAH	0	0.00	0.00	0.00	12.71	0.67	7.04	79.57	0.01
	1	0.02	0.07	0.00	10.69	1.29	7.43	79.77	0.73
	30	2.37	4.01	2.08	4.86	6.99	2.37	55.32	22.01
HEN	0	0.00	0.00	0.00	0.00	14.16	4.20	81.50	0.14
	1	0.01	0.01	0.05	0.07	13.92	4.34	80.23	1.37
	30	1.23	1.35	5.14	2.31	9.69	1.52	54.43	24.33
ONG	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.02	79.98	0.00
	1	0.00	0.07	0.00	0.33	0.53	17.87	80.66	0.54
	30	1.97	3.48	2.52	3.43	7.07	3.60	55.97	21.96
CHI	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	1	0.00	0.08	0.01	0.01	0.27	0.25	98.56	0.83
	30	1.72	3.26	3.02	2.89	6.79	1.04	58.40	22.89
ELL	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	1	0.01	0.00	0.05	0.31	0.03	0.05	0.93	98.64
	30	1.19	1.44	4.40	2.45	5.41	0.38	35.05	49.68

에 의해 설명된다. 시차 30의 경우에도 MAL과 CHI가 MAL의 시장에 있어 여전히 중요한 시장으로 역할을 하고 있음을 보여준다. OPA의 예측오차에 대해 시차 0의 경우, 자체 변수인 OPA(75.0%)와 CHI(17.4%)가 각각 설명하고 있으며 시차 1의 경우 거의 시차 0과 유사한 형태를 보여준다. 시차 30의 경우에는 AEC(11.3%), MAL(29.0%), OPA(40.0%), WAH(6.95), 그리고 CHI(10.1%)가 각각 OPA의 예측오차를 설명하고 있다.

CHI와 ELL은 모두 단기에 있어 외생적인 것으로 나타났으나 시간이 경과됨에 따라 외생성이 약화되어감을 보이고 있다. 즉, 시차 30에 있어 HEN(6.8%), CHI(58.4%), 그리고 ELL(22.9%)이 CHI의 예측 오차를 대부분 설명하고 있으며 시차 30에 있어 HEN(5.4%), CHI(35.0%), 그리고 ELL(49.7%)이 ELL의 예측오차를 대부분 설명하고 있다.

CHI 시장은 단기에 있어 WAH, HEN, ONG, 그리고 자체 CHI 시장의 예측오차의 75% 이상을, 그리고 AEC, MAL, 그리고 OPA의 예측오차의 15% 이상을 설명하는 중요한 시장인 것으로 나타났다. WAH, HEN, ONG, 그리고 CHI에 있어 CHI 시장의 중요성은 시간이 경과됨에 따라 감소하지만 시차 30의 경우 여전히 WAH, HEN, ONG, 그리고 CHI에 있어서의 예측오차의 50% 이상을 설명하고 있으며, AEC, MAL, 그리고 ELL의 예측오차 약 20% 이상을 설명하고 있다.

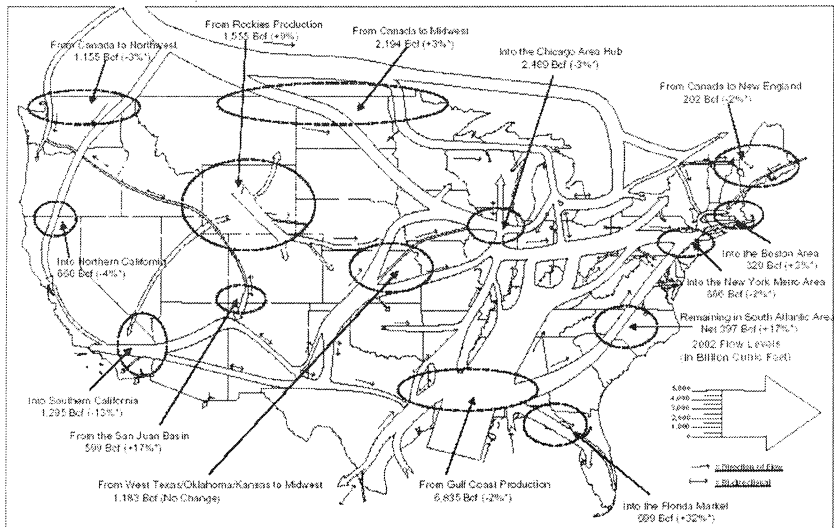
ELL은 단기에 있어 외생적이거나 시차 30의 경우 CHI에 의해 예측오차가 35% 설명된다. ELL은 단기에 있어 다른 시장을 거의 설명하지 않으나 시차 30의 경우에는 OPA 시장을 제외한 다른 시장의 예측오차의 약 5% 이상을 설명하는 것으로 나타났다. 시차 30의 경우, WAH는 서부지역 시장의 예측오차의 6% 이상을 설명하지만 서부지역 이외의 시장의 예측오차에 대해서는 5% 미만을 설명한다. HEN은 서부지역 시장의 예측오차에 대해 5% 미만을 그리고 서부지역 이외의 시장에 대해 5% 이상을 설명하고 있는데, 이러한 결과는 WAH가 서부지역 시장에 더욱 영향력이 크고 HEN은 서부지역 이외의 시장에 대해 더욱 영향력이 큰 것으로 해석된다.

IV. 요약 및 결론

북미지역의 8개 천연가스 현물시장의 가격 시계열은 6개의 장기적인 공적분 관계에 의해 함께 움직이는 것으로 나타났다. 배제성과 약외생성 검정에서 8개 시장은 모두 장기적인 관계에 있으며 장기적인 공적분 관계의 변동에 대하여 적응하는 것으로 나타났다. 또한 CDD와 HDD의 외생변수가 공적분 벡터에서 배제되지 않는 것은 장기관계에 있어서 계절적 차이가 있음을 의미한다. 천연가스는 산업적 활용 이외에 겨울철에 난방과 전력생산에, 그리고 여름철에는 전력생산에 주로 사용되고 있으므로 천연가스 가격의 계절적 변동성은 타당한 것으로 판단된다.

동시적 인과흐름은 <그림 4>에서 나타난 것처럼 북미지역의 주요 천연가스 운송 시스템을 반영하고 있음을 알 수 있다.

<그림 4> 북미지역의 주요 천연가스 생산지역 및 운송 현황



자료: U.S. Department of Energy http://tonto.eia.doe.gov/dnav/ng/ng_sum_analysis.asp.

가격정보의 인과흐름은 초과수요시장으로부터 초과공급시장으로 전달되는 경향이 있음을 알 수 있다. 즉, 모든 인과흐름이 일치하는 것은 아니지만 MAL→AEC, OPA→AEC, CHI→HEN, 그리고 ELL→HEN의 인과흐름은 천연가스 수송의 반대방향과 일치한다. GES 알고리즘에 의해 Henry Hub과 Waha Hub 사이의 인과흐름은 HEN→WAH인 것으로 나타났는데 대부분의 천연가스가 Waha Hub으로부터 Henry Hub로 수송되고 있음을 고려할 때 타당한 결과인 것으로 판단된다(U.S. Department of Energy, 2003).

미국의 천연가스시장은 크게 6개 주요 지역, 즉 중부(Central), 중서부(Midwest), 북동(Northeast), 남동(Southeast), 남서(Southwest), 그리고 서부(West)로 크게 나뉜다(U.S. Department of Energy, 1998). 시카고를 포함하는 중서부지역은 미국에 있어 남서지역에 이어 두 번째로 큰 시장인 동시에 중부에 이어 두 번째로 추운 지역이다. 또한 6개 지역 중 중서부지역은 천연가스 소비에 비해 생산의 비율이 가장 낮은 지역이기 때문에 중서부지역은 지역의 천연가스 수요를 충족시키기 위해 타 지역으로부터 가스의 수입에 의존하고 있다(U.S. Department of Energy, 1998). 중서부지역이 대부분의 가스를 타지역으로부터 수입한다는 사실은 시카고 시장(CHI)이 초과수요시장으로서 북미지역의 가격발견과정에 있어 중요한 시장인 것을 뒷받침하고 있다.

동시적 인과흐름과 예측오차 분산분해의 결과는 King and Cuc (1996)과 Cuddington and Wang (2006)이 주장하는 것과 같은 엄밀한 북미지역의 동서간의 분리 현상은 보여주지 않는다. 또한 모든 시장들이 장기적인 공적분 관계에 있다는 것은 한 시장에서의 새로운 가격 정보가 장기적으로 시장간 차익거래행위를 통해 다른 시장으로 전달되며 이는 또한 단기적으로 시장간 가격이 움직임을 달리할 수 있으나 이러한 차익거래등을 통해 장기적으로 이들 시장에서의 가격이 함께 움직임을 의미한다. 이러한 실증분석 결과 역시 동서지역간의 분리 현상이 존재하지 않는다는 것을 뒷받침하고 있으며 또한 Serletis (1997)의 연구결과와 일치하는 것이다. 북미지역의 동서간의 분리현상에 대한 기존의 연구결과가 차이를 보이는 것은 분석기간이 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다.

King and Cuc (1996)과 Cuddington and Wang (2006)은 천연가스 산업의 탈규제화가 시작된 직후의 기간을 대상으로 분석한 반면 Serletis (1997)와 본 논문은 탈규제화가 상당히 진행된 이후의 기간을 대상으로 분석하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 연구결과들은 북미의 천연가스시장이 산업의 탈규제화 이후 하나의 통합된 시장으로 발전되어 가고 있음을 보여준다고 할 수 있다.

예측오차 분산분해의 결과는 CHI 시장이 ELL을 제외한 모든 시장에서 전시장에 걸쳐 상당한 부분의 예측오차를 설명해주고 있음을 보여준다. ELL에 있어 CHI의 영향은 장기의 경우에만 나타나고 있는데 이는 중서부 지역과 같이 ELL시장이 위치한 지역은 타 지역에 비해 상대적으로 많은 지하저장시설이 있기 때문인 것으로 판단된다(U.S. Department of Energy, 2002). 저장시설로부터 추출된 가스는 단기에 있어 다른 시장의 가격충격을 완화하는데 기여하는 것으로 판단된다. 이는 동부소비지역(미시시피강 동쪽의 대부분의 주들을 의미)의 난방용을 비롯한 총수요를 충족시키기 위해 필요한 상당부분의 공급이 천연가스 저장시설로부터의 추출에 의해 이루어지고 있다⁴⁾는 사실에 의해 뒷받침된다.

기존 연구에서 Henry Hub이 북미 천연가스 시장에 있어 거래규모면에서 가장 활발한 시장으로 주목을 받아왔다(U.S. Department of Energy, 2003). 180개 이상의 시장 참여자들이 14개 파이프라인 시스템과 저장시설을 활용하여 Henry Hub에서 거래를 하고 있고, 또한 Henry Hub은 뉴욕상품거래소의 상품인도 지점이기도 하며, 동부소비지역으로 향한 가스수송의 상당부분이 Henry Hub에 의해 이루어지고 있다. 북미 천연가스시장에서 Henry Hub이 차지하는 중요한 지위에도 불구하고 본 연구에서는 Henry Hub이 가격발견과정에서 중요한 역할을 담당하지는 않으며 오히려 Chicago 시장이 가격발견에 있어 주도적인 역할을 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Henry Hub이 포함된 남서부 지역은 Chicago와 달리 가스의 소비도 많지만 생산도 타 지역에 비해 많기 때문에 Henry Hub이 가격을 끌어올리는 역할을 담당하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

4) Herbert, Thompson and Todaro (1997)를 참조하십시오.

본 연구에서는 벡터오차수정모형의 외생변수로 기온(temperature)만을 고려하였다. 그러나 Herbert, Thompson and Todaro (1997)가 저장시설이 가스가격 결정에 중요하다고 지적한 것처럼 저장시설을 비롯한 선물시장 등의 요인을 함께 모형에 고려한 연구도 향후의 연구과제로 고려해 볼 수 있을 것 같다. 아울러 에너지시장에서의 전력시장의 중요성을 고려하여 전력시장과 천연가스시장간의 상호의존성에 대한 연구도 향후 유익한 연구과제가 될 것으로 보인다.

◎ 참고 문헌 ◎

1. 박호정 · 윤원철, “VAR와 그래프 이론을 이용한 시계열의 인과성 분석”, 「자원 · 환경경제연구」, 2003, 제12권, 제4호, pp. 687~708.
2. _____, “오차수정모형과 그래프 이론을 이용한 국제유가의 동시 및 단기 가격발견 과정에 관한 연구”, 「자원 · 환경경제연구」, 2006, 제15권, 제3호, pp. 479~504.
3. Bernanke, B. S., “Alternative Explanations of the Money-Income Correlation.” *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 25, 1986, pp. 49~99.
4. Bessler, D. A. and S. Lee, “Money and Prices: U.S. Data 1869~1914(A study with Directed Graphs),” *Empirical Economics* 27, 2002, pp. 427~446.
5. Chickering, D. M., “Optimal Structure Identification with Greedy Search,” *Journal of Machine Learning Research* 3, 2002, pp. 507~554.
6. Cuddington, J. T. and Z. Wang, “Assessing the Integration of U.S. Natural Gas Spot Markets: Evidence from Daily Price Data,” *Journal of Regulatory Economics* 29, 2006, pp. 195~210.
7. DeVany, A. S. and W. D. Walls, “Pipeline Access and Market Integration in the Natural Gas Industry: Evidence from Cointegration Tests,” *Energy Journal* 14, 1993, pp. 1~19.
8. _____, “Open Access and the Emergence of a Competitive Natural Gas Market,” *Contemporary Economic Policy* 12, 1994, pp. 77~96.

9. Engle, R. and C. W. J. Granger, "Cointegration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing," *Econometrica* 55, 1987, pp. 251~276.
10. Fuller, W., *Introduction to Statistical Time Series*, John Wiley and Sons: New York, NY, 1976.
11. Hansen, H. and K. Juselius, *CATS in RATS: Cointegration Analysis of Time Series*, Estima: Evanston, IL, 1995.
12. Herbert, J., J. Thompson and J. Todaro, "Recent Trends in Natural Gas Spot Prices," Washington D.C.: Energy Information Administration, U.S. Department of Energy. *Natural Gas Monthly*, (December.), 1997, pp. vii~xxiii. http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/natural_gas/data_publications/natural_gas_monthly/historical/1997/1997_12/pdf/ngm9712.pdf
13. Hoover, R., "Automatic Inference of the Contemporaneous Causal Order of a System of Equations," *Econometric Theory* 21, 2005, pp. 69~77.
14. Johansen, S., "Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models," *Econometrica* 59, 1991, pp. 1551~1580.
15. _____, *Likelihood-Based Inference on Cointegrated Vector Autoregressive Models*, Oxford University Press: New York, NY, 1995.
16. King, M. and M. Cuc, "Price Convergence in North American Natural Gas Spot Markets," *Energy Journal* 17, 1996, pp. 17~42.
17. Kleit, A. N., "Did Open Access Integrate Natural Gas Markets? An Arbitrage Cost Approach," *Journal of Regulatory Economics* 14, 1998, pp. 19~33.
18. Leitzinger, J. and M. Collette, "A Retrospective Look at Wholesale Gas: Industry Restructuring," *Journal of Regulatory Economics* 21, 2002, pp. 79~101.
19. Meek, C., "Graphical Models: Selecting Causal and Statistical Models," Ph. D. Dissertation, Carnegie Mellon University, 1997.
20. Orcutt, G., "Toward a Partial Redirection of Econometrics," *Review of Economics and Statistics*, 1952, 34, pp. 195~213.
21. Park, H., "Price Dynamics Among Electricity and Natural Gas Spot Markets in North America," Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 2005.
22. Park, Haesun, James W. Mjelde and David A. Bessler, "Price Dynamics Among U.S.

- Electricity Spot Markets” *Energy Economics*, 2006, Vol. 28, pp. 81~101.
23. Pearl, J., *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, Cambridge Press: Cambridge, UK, 2000.
 24. Phillips, P. C. B., “Econometric Model Determination,” *Econometrica* 64, 1996, pp. 763~812.
 25. Reichenbach, H., *The Direction of Time*, Berkeley, CA: University of California Press, 1956.
 26. Serletis, A., “Is There an East-West Split in North American Natural Gas Markets?” *Energy Journal* 18, 1997, pp. 47~62.
 27. _____ and Rangel-Ruiz, R., “Testing for Common Features in North American Energy Markets,” *Energy Economics* 26, 2004, pp. 401~414.
 28. Sims, C., “Are Forecasting Models Usable for Policy Analysis?,” *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review* 10, 1986, pp. 2~15.
 29. Spirtes P., C. Glymour and R. Scheines, *Causation, Prediction, and Search*, MIT Press: Cambridge, MA, 2000.
 30. Swanson, N. R. and C. W. J. Granger, “Impulse Response Functions Based on a Causal Approach to Residual Orthogonalization in Vector Autoregressions,” *Journal American Statistical Association* 92, 1997, pp. 357~367.
 31. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, “Deliverability on the Interstate Natural Gas Pipeline System,” 1998, http://www.eia.doe.gov/oil_gas/natural_gas/analysis_publications/deliverability/deliver.html. Accessed November 2004.
 32. _____, “Derivatives and Risk Management in the Petroleum, Natural Gas, and Electricity Industries,” Report SR/SMG/2002-01, 2002, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/servicerpt/derivative/index.html>. Accessed November 2004.
 33. _____, “Natural Gas Market Centers and Hubs: A 2003 Update,” 2003. http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/natural_gas/feature_articles/2003/market_hubs/mkthubsweb.html. Accessed November 2004.
 34. _____, “The Natural Gas Industry and Markets in 2002,” 2004, http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/natural_gas/feature_articles/2004/ngmarkets/ngmarkets.pdf.

Accessed November 2004.

35. _____, "Natural Gas Major Legislative and Regulatory Actions 1935~2004," 2006, http://www.eia.doe.gov/oil_gas/natural_gas/analysis_publications/ngmajorleg/ngmajorleg.html
Accessed August 2006.
36. Wang, Z. and D. A. Bessler, "A Monte Carlo Study on the Selection of Cointegrating Rank Using Information Criteria," *Econometric Theory* 21, 2005, pp. 593~620.

북미 천연가스 현물시장간의 가격발견과
동태적 상호의존성에 대한 연구

박 해 선

본 연구에서는 시계열분석기법과 그래프 이론을 활용하여 8개의 북미천연가스 현물시장간의 관계를 분석하였다. 벡터오차수정모형과 탐욕동급검색 알고리즘(Greedy Equivalence Search Algorithm)을 활용한 그래프 이론을 통해 시장간의 관계를 분석한 결과, 가격발견과정은 초과수요지역에서 발생하여 초과공급지역으로 진행되는 것으로 나타났다. 북미 천연가스 현물시장 중에서 시카고로 대표되는 미국의 중서부지역이 가격발견과정에 있어 가장 중요한 시장인 것으로 나타났으며 미국 동부지역에 있어 펜실바니아의 Ellisburg-Leidy Hub이, 그리고 미국서부지역에 있어서는 Malin Hub이 가격발견과정에 있어 중요한 시장인 것으로 나타났다.

주제어 : 벡터오차수정모형, 천연가스가격, DAG, 예측오차분산분해, GES

A Study on Price Discovery and Interactions Among
Natural Gas Spot Markets in North America

Haesun Park

Combining recent advances in causal flows with time series analysis, relationships among eight North American natural gas spot market prices are examined. Results indicate that price discovery tends to occur in excess demand regions and move to excess supply regions. Across North America, the U.S. Midwest region represented by Chicago spot market is the most important market for price discovery. The Ellisburg-Leidy Hub in Pennsylvania is important in price discovery, especially for markets in the eastern two-thirds of the U.S. Malin Hub in Oregon is important for the western markets including the AECO Hub in Alberta, Canada.

Keywords : Vector Error Correction, Natural Gas Pricing, DAG,
Forecast Error Variance Decomposition, GES