비선형 모형을 이용한 천연가스 수요 전망

진정환¹⁾ · 김진수^{1)*}

Forecasting Natural Gas Demand Using Nonlinear Model

Junghwan Jin and Jinsoo Kim*

Abstract : Due to the development of unconventional gas and the Fukushima nuclear disaster, the importance of natural gas as a primary energy source is higher than before. Through nonlinear Weibull model, we analyzed the natural gas consumption to prepare the demand changes in the future. With the data from seven countries of OECD members, the energy-growth hypothesis (the relationship between energy consumption and economic growth can be represented by a S-shaped curve) for natural gas is tested. As results, natural gas consumption as well as total primary energy supply was well explained via S-shaped (Weibull) curve. However, the shape difference between countries was also existed. We thus drew the implications from the results based on the energy mix of each country.

Key words : Natural gas, Gas consumption, Weibull model

요 약 : 주요한 에너지원 중의 하나인 천연가스는 비전통 가스의 개발 및 후쿠시마 원전 사고로 인하여 앞으로 더욱 그 중요성이 커질 것으로 전망된다. 이러한 시점에서 앞으로의 천연가스 수요 전망에 활용하기 위하여, 본 연구에서는 비선형 모형 중 하나인 Weibull 모형을 이용하여 경제 성장에 따른 천연가스의 소비 형태를 분석하였다. 분석 대상으로는 OECD 7대 에너지 소비국을 선정하였으며 경제 성장에 따른 에너지 소비의 형태가 S형 곡선의 형태로 나타날 수 있다는 가설을 바탕으로 천연가스에 대해서도 가설이 성립되는지 분석해 보았다. 분석 결과, 1차 에너지 소비와 마찬가지로 천연가스 소비에 대해서도 Weibull 모형을 통한 모형화의 설명력이 매우 높은 것으로 나타났다. 그러나 국가 별 차이도 존재하는 것으로 분석되어 각 국가의 에너지 믹스를 중심으로 분석 결과에 대한 함의를 도출해 보았다.

주요어 : 천연가스, 가스소비, Weibull 모형

서 론

천연가스는 주요 1차 에너지원으로 난방과 전력 생산, 산업, 수송 부분에 활용되어 왔다. World Energy Outlook(IEA, 2011b)에 따르면 2030년까지 전 세계 1차 에너지 소비량 중 천연가스가 차지하는 비중은 22.5%로 여전히 주요한 역할을 수행할 것으로 예상된다. 또한 Eurogas(2013)에 따르면 유로 존 내의 에너지 소비 중 천연가스가 차지하는 비율이 2007년 24%에서 2030년에는 최대 28.7%까지 상승할 것이라고 예상하였다. 따

라서 다른 에너지원과 마찬가지로, 천연가스의 수요를 전망하는 것 또한 에너지 수요 연구의 주요 연구 주제로 여러 학자들에 의해 연구되어 왔다. 최근에는 북미에서 비전통가스 중 하나인 셰일가스가 본격적으로 상업 생산 되면서 향후 주요 에너지원으로서의 위치를 공고히 할 것으로 예상되며, 이에 따라 국내 외의 관심이 높아지고 있다(Kim *et al.*, 2011; Baek, 2011). 이러한 셰일가스 개발로 인하여 천연가스 시장 여건이 변화하여 천연가스 가격과 원유 가격의 탈동조화 현상이 관찰되는 등(Hwang *et al.*, 2012) 천연가스 시장에서도 기존과는 다른 양상이 나타나고 있다. 그런데 지금까지의 천연가스를 포함한 에너지 수요의 분석에서는 대부분 선형 회귀 분석 모형이 사용되어 왔다. 일례로 International Energy Outlook(EIA, 2009)에서는 2030년까지의 가스 소비량이 선형으로 증가할 것이라고 예측한 바 있다. 그러나 Kim 등(2010)이나 Kim(2010)은 경제 성장 단계에 따른 1차

2013년 3월 6일 접수, 2013년 6월 20일 심사완료

2013년 6월 20일 게재확정

1) 한양대학교 자원환경공학과

*Corresponding Author(김진수)

E-mail; jinsookim@hanyang.ac.kr

Address; Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

에너지 소비의 비 선형적 변화에 대하여 언급하고 있고, 특히 Gutiérrez 등(2005)는 S형 확산모형을 사용하여 천연가스 소비량을 분석하였다.

그런데 Gutiérrez 등(2005)의 연구에서는 분석의 범위를 스페인에 국한시켰으며 분석 모형의 적합성을 검토하는 것이 연구의 주 목적이었다. 또한 시간에 따른 소비형태의 변화를 나타냄으로써 경제 성장에 따른 에너지 소비의 변화는 논의하지 않았다. 이에 본 연구에서는 Gutiérrez 등(2005)의 논의를 바탕으로 분석의 범위를 우리나라를 포함한 OECD(Organization for Economic Cooperation and Development) 국가 7개로 확장시켰으며, 분석 모형의 적합성 검토뿐만 아니라 모형을 통해 연결시킬 수 있는 각 국가 별 소비 특징을 분석하였다. 또한 경제 성장과 에너지 소비의 관계가 S형 곡선의 형태로 나타날 수 있다는 Kim 등(2010), Kim(2010)의 가설에 입각하여 각 국가별 경제 성장에 따른 천연가스 소비량을 분석하였다. 이를 통해 기존의 경제 성장과 총 에너지 소비와의 관계가 천연가스의 경우에도 적용될 수 있는지 알아보았다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 다음 장에서는 기존에 수행되었던 가스 소비에 관련된 선행 연구들을 살펴 보았다. 다음으로 OECD국가 중 7개국을 선정하여 선정의 의미와 국가들의 특징을 정리하였으며, 연구에 사용한 생존분석(survival analysis)과 성장곡선(growth curve)에 대해서도 정리하였다. “분석 결과” 장에서 분석에 사용한 1차 에너지, 천연가스 소비 자료와 GDP(Gross Domestic Product)에 대하여 설명한 뒤, 마지막으로 분석 결과의 함의를 살펴보았다.

선행 연구

천연가스 수요와 관련하여 현재까지 이루어진 주요 연구는 다음과 같다. Giovanis와 Skiadas(1999)는 장기수요와 소비 등의 정확한 예측을 위하여 확률론적 개념을 적용시켜 확률론적 로지스틱 혁신 확산 모형(stochastic logistic innovation diffusion model)을 구축하였으며 이를 그리스와 미국의 전력 소비 형태 분석과 예측에 적용하였다. 전력 소비 자료는 그리스 국가 통계청(Greece National Statistic Association)을 통해 수집하였으며 그리스는 25년, 미국은 28년간의 자료를 이용하였고, 이후 6년간의 자료를 예측하였다. 분석 결과 두 국가 모두 결정론적 모형의 수렴 값이 확률론적 모형보다 더 크게 추정되었으며 결과적으로 결정론적 추정 모형을 통한 예측 값이 확률론적 추정 모형으로 추정한 예측 값보다 실제 값과 더 큰 차이를 보였다.

Siemek 등(2003)에서는 가능한 시나리오를 바탕으로

로지스틱 곡선을 이용하여 폴란드의 천연가스 소비에 대해 분석하였다. 이 연구는 EIA에서 발표한 가스 소비 증가율 예측치에 비해 동유럽 국가들의 가스 소비량이 매우 빠르게 증가하고 있다는 의문에서 시작되었다. 1970년에서 2001년 사이의 자료를 사용하여 모형을 추정하였으며, 폴란드의 현재 경제 성장 단계(1994년~2000년)의 자료와 추정치를 비교하였다. 비교 결과 실제 자료와 추정 모형의 값은 2%미만의 차이로 나타났으며, 이는 해당 기간의 소비 형태를 추정 모형이 잘 설명하고 있음을 의미한다. 추정된 모형은 예측에 있어 약 20% 가량의 오차를 보일 것이라 예상하였으며 장기 불경기나 가속화된 경제 발전 같은 비정상적인 사건이 발생할 시 약 30%까지 오차가 발생할 것이라 예측하였다.

Gutiérrez 등(2005)은 Gompertz 혁신 확산 과정(Gompertz innovation diffusion process)을 적용하여 스페인의 가스 소비를 예측하였다. 스페인 경제성(Ministry of Economics of Spain)에서 제공하는 자료를 이용하여 1973~2000년 사이의 자료 중 1990~2000년 사이의 소비량이 급격하게 증가하고 있음에 착안, S형 곡선을 이용하였다. 1973~1997년의 25개 자료를 모형화 하였으며 이를 통해 1998~2000년 사이의 단기 예측 결과에서 좋은 결과를 얻었다. 예측 모형은 경향 함수(trend function)와 조건부 경향 함수(conditional trend function), 두 가지의 경우로 나누어서 추정하였다.

Gutiérrez 등(2005)에서는 기존의 가스 연구에 사용된 logistic(확산-혁신) 모형과 lognormal(확산-비혁신) 모형의 결과를 Gompertz 모형과 비교하였다. 그 결과 Gompertz 모형이 다른 확률론적 확산 모형에 비해 좀 더 적절한 결과를 보인다고 주장하였다. 앞서 언급한 바와 같이 Gutiérrez 등(2005)의 연구는 스페인으로 분석 국가가 한정되어 있다. 이에 본 연구에서는 Gutiérrez 등(2005)의 논의를 바탕으로 분석 국가를 확장하였으며, Gompertz 모형 보다 사회과학 연구에서 더욱 보편적으로 사용되고 유연한 Weibull 모형을 사용하였다.

Yoo 등(2009)에서는 한국의 서울의 주거용 천연가스 수요 함수를 추정하였다. 천연가스를 전량 수입에 의존해야 하는 한국의 상황에 정확한 수요와 공급을 맞추기 위해서는 가정 부문의 수요가 특히 중요하며, 이를 정확히 예측하기 위하여 연구를 진행하였다. 사용된 자료들은 서울의 가정에서 설문을 통해 수집하였으며, 미반응 가구의 자료는 자료에 편향을 야기시킨다는 사실을 검토를 통해 알아내었고 횡단면(cross sectional) 자료를 이용하여 이변수 모형(bivariate model)을 만들어 수요함수를 추정하였다. 이 모형을 통하여 가스 수요는 가스 가격과 수입에 비탄력적이라는 결론을 얻었다. 즉, 가구의 수입

의 증가는 가스 수요의 충분한 증가를 가져오는 데에는 관련이 없는 것으로 분석되었다.

Kim(2010)은 에너지 소비량과 경제 성장간의 관계를 알아보기 위해 S형 곡선을 사용하였다. 이 연구에서는 경제 성장 초기에는 에너지 소비의 증가가 더디고, 산업화의 단계에서는 극적으로 증가하며, 마지막으로 탈 산업화 단계에서는 소비 증가가 다시 더디어지는 S형이 될 것이라고 주장하였다. 이를 분석하기 위하여 S형 성장 모형(sigmoid growth models)을 이용하였다. 111개 국가의 1인당 총 1차 에너지 공급과 GDP 자료를 바탕으로 가설을 검정하였으며, 분석 결과 많은 국가에서 S형 성장 형태가 관찰되는 것으로 나타났다.

Forouzanfar 등(2010)에서는 OPEC국가 중 하나인 이란의 가정과 상업 부문 가스 소비를 분석하였다. 이란은 석유가 가스 소비량 증감에 따라 정책을 변경하기 때문에 적절한 정책 수립을 위해 정확한 소비량을 분석할 필요가 있어 Forouzanfar 등(2010)이 본 연구를 시도하였다. 이란 국영 가스회사(National Iran Gas Company)에서 제공하는 1995~2005년도의 연간, 계절별 가스 소비 자료를 이용하여 연구를 진행하였으며, 이란의 가정과 상업 부문 가스 소비 양상은 로지스틱 곡선의 특징을 띠고 있다고 판별하였다. 이에 로지스틱 함수를 사용하여 이란의 기존 10년간의 가스 소비량 자료를 바탕으로 향후 3년간의 소비 형태를 예상하였다. 추정에는 비선형 계획법(nonlinear programming)과 유전적 알고리즘(genetic algorithm) 방법이 사용되었고, 오차율은 8.76%로 나타났다.

Kalashnikov 등(2010)에서는 가스 가격과 소비의 관계에 따라 비슷한 경제적 조건을 보이는 미국의 주를 분류하였다. 이러한 분류를 통해 소비 예측에 대한 시나리오 작성 시에 유용한 정보를 제공할 수 있다고 판단하였으며, 20년 간 미국 각 주의 가스 가격과 소비량을 통합 회귀분석(pooled regression)을 통해 추정하였을 경우 문제가 있기 때문에 계통 분류 방법(dendrogram grouping method)과 경험적 분류 알고리즘(heuristic grouping algorithm)을 사용하여 모형화 하였다. 계통 분류 방법은 회귀 식의 값이 비슷한 주들로 나누는 것을 기본으로 하고 있으며, 경험적 분류 알고리즘은 분류 후 그룹의 회귀 분석 결과, R^2 값이 제일 커질 수 있게 그룹을 만드는 점에 초점을 맞추는 방법론이다.

기존의 연구들을 살펴보면 가스 소비의 변화 또한 S형 곡선으로 모형화가 가능할 것이라는 예상을 해볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 대표적인 S형 곡선인 Weibull 모형을 가지고 OECD 7개국의 천연가스 소비 변화를 모형화 해 보았다.

분석 국가 선정

본 연구에서 선정한 OECD 7개 국가들은 독일, 프랑스, 일본, 한국, 영국, 미국, 캐나다이다. 이 국가들은 경제적 발전을 상당 수준까지 이룬 국가들 이기에 경제 성장의 궤적이 뚜렷하고 상대적으로 에너지 소비량이 많아 에너지 소비에 대한 모형화가 용이하다. 또한 해당 국가들은 특징적인 에너지 소비를 보이는 국가들이라고 볼 수 있다. 독일의 경우 수력을 제외한 신재생 에너지 사용 비율이 전 세계 1위인 국가이며, 미국은 GDP 1위 국가이자 최대 원전 보유국이며 에너지 소비량 1위 국가이다. 영국은 천연가스 소비의 비율 및 천연가스 발전 비율이 1위인 국가이며, 일본은 우리나라와 최근 국가이며 2011년 3월 후쿠시마 원전 사태로 에너지 믹스에 변화가 있을 것으로 예상된다. 프랑스는 미국에 이은 세계 2위의 원전 보유 국가이며 원자력 발전 비율이 세계 최고인 국가이다. 각 국가들의 에너지 소비 특징을 좀 더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

캐나다는 발전 원 별 비율에서 신재생 에너지가 60% 가량을 차지하고 이 중 수력 발전이 90%가 넘는다. 또한 IEA(2011b)에 따르면 미국과 중국에 이어 비전통 가스 생산의 주요국이 될 수 있는 가능성이 있는 나라이다. 캐나다의 연간 천연가스 생산량은 약 0.7%의 평균 증가율을 보이고 있다. 유럽 국가 중 에너지 소비량이 큰 국가 중 하나인 프랑스는 원자력 발전량으로는 미국에 이어 세계 2위이고 자국 내의 에너지 믹스와 발전 비율에서 원자력의 비율은 전 세계에서 가장 높은 수치를 보이고 있다. Hong(2011)에 따르면 프랑스의 경우 원자력 발전의 의존도가 매우 크기 때문에 후쿠시마 원전 사태 발생 후, 기존의 에너지 정책을 유지하면서 원자력 발전의 안정성과 운영상 투명성을 강화시키고 있다고 하였다. 독일은 신재생 에너지를 이용한 발전과 R&D 투자가 두드러지는 국가이다. IEA(2011a)를 보면 OECD 국가 중 가장 높은 비율의 신재생 에너지 발전 및 1차 에너지 공급 비율을 보이고 있다. 독일 정부가 2010년에 발표한 “Energy Concept”에 따르면 2009년 최종 에너지 공급 중 신재생 에너지의 비율은 10%를 상회하고 있으며 2030년에는 약 30%, 2050년에는 60% 가량을 신재생 에너지가 차지할 것이라 예측하였다.

IEA(2010)에 따르면 영국은 1970년도부터 거대한 연안 가스전을 개발하여 사용해왔고 자국의 개발된 가스전의 이점을 살리기 위해 석탄과 석유를 대체하여 산업 부문과 발전 부문에서의 가스 사용을 독려해 왔다. 그 결과 1990년부터 2008년까지 매년 평균 3% 정도의 수요가 증가하여 18년간 약 70% 가량 상승했다. 특징적인 점은

이 기간 동안 늘어난 천연가스의 대부분이 화력 발전을 위한 원료로 사용되었다는 점이다. 2010년 기준으로 영국은 천연가스의 41% 가량을 발전에 사용하였으며 발전 원 중 천연가스가 차지하는 비중은 46%에 달했다. 하지만 영국은 자국의 많은 가스전에도 불구하고 2005년을 기점으로 수입량이 생산량을 넘어섰으며 2020년이 되면 2010년의 절반 수준으로 생산량이 감소할 것이라 전망하고 있다. 영국은 자국의 주 연료인 천연가스의 안정적인 공급을 위하여 외국의 수입 인프라를 확충해왔고 이를 통해 현재는 감소한 자국 내 생산량을 보완할 수 있게 되었다.

세계 경제 규모 1위인 미국은 세계에서 가장 많은 원자력 발전소를 갖고 있는 국가이다. 또한 최근 비전통 가스 개발을 통해 향후 천연가스 수출국이 될 것이라는 전망을 갖고 있는 국가이기도 하다. IEA(2011a)에서는 미국을 세계에서 가장 많은 비전통 천연가스를 생산할 국가로 전망하고 있다. 현재 미국은 비전통 가스 중 셰일가스가 차지하는 비중이 50%가 넘으며 치밀가스가 약 20%, 석탄층 메탄가스(CBM)이 10%가량 된다. 미국은 생산뿐만이 아니라 천연가스의 수요 또한 증가할 것이라 예측되고 있다. 미국의 2010년 천연가스 소비량은 680

bcm(billion cubic meters)이었는데, 매년 0.8%씩 증가하여 2035년경에는 1,032 bcm의 천연가스를 필요로 할 것으로 전망되고 있다.

일본은 우리나라의 최인근 국가 중 하나이며 2009년 기준으로 원자력 발전을 통한 전력 소비가 아시아와 오세아니아의 전체 소비량 중 50%에 달하는 것으로 나타났다. 이번 후쿠시마 원전 사태로 인하여 직접적으로 큰 피해를 보았고 이에 따라 2012년 3월 일본은 54개의 원전 모두를 중단할 계획을 발표했지만 현재는 에너지 부족 현상 등의 문제로 이를 유보하고 원전 폐쇄 정책을 수정하여 원전을 재가동하고 있다. 2012년 8월 일본은 새로운 에너지 환경 정책을 발표 했으며 이에 원전에 대한 의존도를 줄일 것이라 하였다. Economist Intelligence Unit의 일본 보고서¹⁾에 따르면 일본은 2009년 에너지 믹스에서 29.2%를 차지하던 원자력 비율을 2020년에는 10.3%까지 줄이고 화석 에너지의 비율을 61.7%에서 81.5%로 늘릴 예정이다. 줄어들 원자력 에너지를 대체하기 위해 화석 연료가 많이 사용될 것이고 이로 인해 천연가스의 사용량이 증가할 것으로 전망된다. 선정한 국가의 에너지 믹스 및 에너지원 별 발전비율, 천연가스 용도별 비율을 Table 1과 2에 정리하였다.

Table 1. Energy mix and power generation ratio of selected countries (% , year 2010)

	Coal	Oil	Natural Gas	Nuclear	Renewable
Canada	8.95 (15.82)	35.93 (1.47)	30.19 (6.66)	8.34 (15.11)	16.57 (60.9)
France	4.56 (4.67)	29.55 (1.12)	16.21 (4.62)	41.31 (75.50)	8.38 (14.09)
Germany	23.05 (44.06)	31.80 (1.22)	23.13 (13.76)	11.56 (22.89)	10.45 (18.07)
Japan	23.36 (14.10)	40.85 (8.87)	17.37 (27.48)	15.18 (26.90)	3.24 (9.81)
Korea	29.36 (26.94)	38.18 (3.21)	15.19 (20.25)	14.05 (31.08)	3.22 (1.35)
UK	15.03 (29.03)	31.92 (0.89)	41.49 (46.43)	8.04 (16.43)	3.52 (7.21)
US	22.95 (45.99)	36.15 (1.11)	25.25 (23.31)	9.85 (19.34)	5.80 (10.25)

Source: IEA(2011a), power generation ratio is in the parenthesis.

Table 2. Gas consumption ratio by sector (year 2010)

	Residential	Industry	Power generation
Canada	40.46%	49.02%	10.51%
France	65.67%	17.71%	16.61%
Germany	57.52%	20.77%	21.71%
Japan	28.81%	11.96%	59.23%
Korea	41.53%	18.27%	40.20%
UK	44.01%	18.20%	37.79%
US	39.38%	28.37%	32.25%

Source: IEA(2011a)

1) <http://country.eiu.com/japan>

분석 방법론

Weibull 성장 곡선

성장 곡선(growth curve)의 유래는 생존 분석(survival analysis)에서 찾아볼 수 있다. 생존 분석은 생물의 죽음과 기술적 실패를 다루는 통계학의 한 분류(branch)이며, 시간에 대한 사건 자료의 모형화를 포함하고 있다. 일반적으로 한 개체의 죽음이나 기술적 실패는 초기에는 발생 빈도가 거의 없다가 어느 정도 시간이 지난 후 급격하게 빈도가 증가하며 좀 더 시간이 흐른 후에는 그 증가율이 감소하기 시작해 점점 발생 빈도가 줄어든다. 생존 개체 수를 도식화 한다면 시간이 지남에 따라 사건의 발생 빈도에 반비례하여 감소하는 형태의 곡선, 즉 S자를 거꾸로 놓은 것 같은 형상을 띤다. 성장 곡선은 생존 곡선을 다시 거꾸로 놓힌 형태를 띤 곡선이다. 즉 한 개체 또는 목적인 사건이 초기에는 미비한 증가를 보이다 다음 단계에서는 급격하게 증가하며 그 후 완만한 증가 후 일정 수준에서 수렴하게 된다. 이러한 성장 곡선은 장기적으로는 수렴할 것이라 판단되는 인구, 취업률, 인플레이션 등의 연구에 유용하다. 대표적인 성장 곡선으로는 지수(exponential) 모형, 로지스틱 모형, Gompertz 모형, Richards 모형, Weibull 모형 등이 있다. 이중 Weibull 모형과 Richards 모형이 상대적으로 유연한 모형으로 본 연구에서는 Weibull 모형을 사용하였다.

Weibull 모형은 1951년 Waloddi Weibull에 의해서 명명되었으며 통계학과 확률론에서 연속 확률 분포로 사용되고 있는 모형이다. 생존분석과 신뢰성 공학(reliability engineering)에서 널리 사용되고 있는 함수 중 하나로, 모수(parameter)의 개수가 1개에서 4개까지 다양하게 사용가능하며 성장 곡선에서는 4개의 모수를 포함하고 있는 모형을 사용한다. Weibull 모형은 기본적으로 로지스틱 모형이나 지수 모형 보다 더 많은 모수로 식이 이루어져 있어 좀 더 복잡한 형태의 곡선을 그릴 수 있다는 장점이 있다. 또한 Richards 모형과 마찬가지로 로지스틱 모형과 Gompertz 모형과는 다르게 변곡점의 위치가 특정한 위치에 고정되어 있지 않기 때문에 유연하다는 장점이 있다. Richards 모형이 갖고 있는 추정 시 수렴의 문제도 없어 좀 더 용이하게 적용할 수 있다. Kim(2010)에서는 GDP 증가에 따른 1차에너지 소비를 성장곡선으로 모형화한 결과 Weibull 모형의 오차(root mean squared error)가 가장 유연하다고 알려진 Richards 모형과 비슷한 수준인 것으로 나타났으며 미국과 같은 경우 Weibull 모형의 설명력이 6개의 비선형 모형 중에서 가장 높은 것으로 분석되었다. 이와 같은 장점 때문에 다양한 연구에 Weibull 모형이 사용되어 왔는데 대표적인 예로는

Maruyama 등(2001), Barton과 Infield (2004)가 있다. Weibull 모형은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\phi_1 + (\phi_2 - \phi_1) \exp[-\exp(\phi_3)x^{\phi_4}] \quad (1)$$

ϕ_1 는 상부 점근선

ϕ_2 는 하부 점근선

ϕ_3 는 형상모수(shape parameter)

ϕ_4 는 위치모수(location parameter)

ϕ_3 는 형상 모수로서 곡률과 연관이 되어 모형의 형태를 결정하는 역할을 하며, ϕ_4 는 점근선의 위치에 결정적으로 관여하는 모수이다. Weibull 모형의 변곡점 x좌표는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$I_x = \left(\frac{\phi_4 - 1}{\exp(\phi_3)\phi_4} \right)^{1/\phi_4} \quad (2)$$

변곡점이 전체 모형에서 고정된 위치에 존재하는 것이 아니기 때문에 대칭성이 존재하지 않으며 유연한 곡선을 그릴 수 있다. 변곡점은 특정 시점으로 표시될 때 유의미하며 경제 성장과 가스 소비와의 관계를 알아 보기 위한 본 연구에서는 모형의 변곡점이 나타나는 GDP 값은 큰 의미가 없을 것으로 판단하여 변곡점을 분석결과로 도출하지 않았다. 또한 천연가스의 소비를 시작하기 이전의 소비량은 “0”이기 때문에 식 (1)의 하부 점근선 모수인 ϕ_2 를 0으로 가정하여 식 (3)과 같은 형태로 변형하여 추정하였다.

$$\phi_1 + (0 - \phi_1) \exp[-\exp(\phi_3)x^{\phi_4}] \quad (3)$$

비선형 회귀분석(nonlinear regression)을 통하여 모수를 추정하였으며, 추정에는 R 프로그램을 사용하였다.

분석 결과

천연가스에 대한 Weibull 모형 추정 결과는 Fig. 1~7과 같다. 천연가스 소비량과 인구, GDP 자료는 IEA(2011a)에서 얻었으며, GDP는 실질 자료를 반영하기 위하여 미화(USD)로 표시된 2005년 구매력평가기준(purchasing power parity)GDP를 사용하였다. 미국의 경우 보다 많은 자료를 사용하기 위하여 EIA와 Penn World Table 자료를 사용하였다.

Fig. 1. Estimation result - Canada.

Fig. 2. Estimation result - France.

Fig. 3. Estimation result - Germany.

Fig. 4. Estimation result - Japan.

Fig. 5. Estimation result - U.K.

Fig. 6. Estimation result - the U.S.

Fig. 7. Estimation result - Korea.

캐나다는 1인당 에너지 소비량이 미국을 앞서는 최대 소비 국가로서 Table 3에서 볼 수 있듯이 천연가스 소비의 추정 포화 수준 또한 3.284 TOE(Tonne of Oil Equivalent)로 분석 국가들 중 두 번째로 크게 추정되었다. Table 4를 보면 모형의 모양을 결정 짓는 형상 모수의 값은 분석 국가들 중 가장 작게 나왔다. 이는 캐나다의 가스 소비 변화가 분석 국가들 중 가장 완만하게 이루어져 있음을 의미한다. 또한 Table 5의 위치 모수 추정 결과에서도 가장 작은 추정 값을 보여, 변곡점의 위치가 분석 국가 중 가장 먼저(낮은 GDP에서) 나타난 것으로 분석되었다. 프랑스의 경우는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 다소 느린 속도로 소비량이 증가해 왔다는 것을 알 수 있다. 프랑스의 1인당 가스 소비량의 추정 포화 값은 약 0.825 TOE로 분석 국가 중 가장 낮은 수준으로 추정되었으며 낮은 증가율 모수의 영향으로 포화 수준에 도달할 시점이 상당히 늦을 것으로 예측되었다. 독일의 경

Table 3. Estimation results of ϕ_1

	ϕ_1	Standard Error	t-value	P-value
Canada	3.2837	0.0546	60.09	0.000
France	0.8252	0.0351	23.49	0.000
Germany	1.1825	0.0257	45.99	0.000
Japan	5.0130	9.736	0.52	0.609
Korea	1.1173	0.1137	9.83	0.000
UK	1.8039	0.0526	34.29	0.000
US	2.8180	0.0455	61.94	0.000

Table 4. Estimation results of ϕ_3

	ϕ_3	Standard Error	t-value	P-value
Canada	-25.7734	1.1829	-21.79	0.000
France	-28.9090	2.0731	-13.95	0.000
Germany	-51.6391	5.2823	-9.78	0.000
Japan	-30.328	1.362	-22.26	0.000
Korea	-32.7618	1.9965	-16.41	0.000
UK	-40.7750	3.5034	-11.64	0.000
US	-56.7056	14.1525	-4.01	0.000

Table 5. Estimation results of ϕ_4

	ϕ_4	Standard Error	t-value	P-value
Canada	2.5967	0.1214	21.39	0.000
France	2.9072	0.2156	13.48	0.000
Germany	5.2335	0.5377	9.73	0.000
Japan	2.773	0.308	9.00	0.000
Korea	3.2612	0.2155	15.13	0.000
UK	4.1069	0.3575	11.49	0.000
US	5.8832	1.4648	4.02	0.000

우 1 인당 소비량은 약 1.183 TOE 수준에서 포화될 것으로 추정되었다. 독일은 GDP 수준이 약 \$30,000에 못 미치는 시점부터 포화수준에 다다랐는데 이는 분석 국가들 중에서 두 번째로 빠른 시점이다.

일본의 경우 다른 분석 국가들과는 다르게 천연가스 소비에 대한 포화(수렴)의 수준이 매우 높고, 증가 속도도 느린 것으로 분석되었다. Table 3의 추정된 포화 소비량의 수준은 5.013 TOE로 캐나다에 비해 1.5배 가량 큰 값으로 추정되었는데 10% 유의수준에서 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 그러나 형상 모수와 위치 모수는 프랑스의 경우와 매우 유사한 것으로 나타났으며, 추정 계수의 신뢰도 또한 높은 것으로 분석되었다. 영국의 추정 포화 수준은 1.827 TOE로 프랑스와 한국에 비해서는 높은 수준이다. 또한 GDP 기준 \$20,000 수준부터 증가량이 감소하다가 \$25,000 부근에서 다시 소비량이 증가하는 형태가 관찰되었다. 그러나 Weibull 모형을 통한 근사(모형화)는 전반적으로 유효한 것으로 나타났으며, Table 6을 보면 설명력도 0.922로 높은 수준인 것으로 분석되었다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 미국의 경우 GDP \$20,000 부근에서 1인당 가스 소비가 최고 수준을 기록한 뒤 감소하여 2.5~3.0 TOE 정도로 수렴한다. Weibull 모형의 설명력도 낮은 편으로, 분석 대상 국가 중 유일하게 0.9 이하인 것으로 분석되었다.

한국은 분석 국가들 중 가장 늦은 시기에 천연가스를 도입하였다. 그러나 시작 시점에 비해서 비교적 빠르게 소비량이 증가해 왔으며, 이는 형상 모수의 추정 결과에서도 확인할 수 있다. 한국의 추정된 포화 수준은 1.117 TOE로 프랑스, 독일에 이어 세 번째로 낮은 것으로 분석되었다. 형상 모수와 위치 모수는 일본이나 프랑스와 유사한 것으로 나타나 프랑스와 유사한 소비 변화 패턴을 보이는 것으로 판단된다. 모든 추정 계수는 1% 유의수준에서 신뢰할 수 있는 결과를 보이고 있으며, Weibull 모형의 설명력 또한 0.991로 분석 대상 국가들 중에서 가장 높았다.

일본이 천연가스 소비에 대한 포화 수준이 매우 높고, 통계적으로 유의하지 않은 원인을 살펴보기 위해서 분석 자료의 수를 변화시켜 가면서 Weibull 모형 추정을 수행해 보았다(Table 7). 그 결과 2006년까지의 자료를 가지고 추정했을 경우, 포화 수준은 독일이나 한국과 유사하고 5% 유의수준에서 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다. 그러나 2007년 이후의 자료가 추가되었을 경우 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으며, 통계적 유의성이 확보되지 않아 추정값에 대한 판단이 무의미하지만 포화 수준 또한 높아지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 2007년 서브프라임 모기지 사태와 2008년 유럽의 금융 위기를 겪으며 GDP가 상대적으로 크게 감

Table 6. Estimation results of R-Squared value for Weibull and linear model

R-squared value	Weibull	Linear
Canada	0.9743	0.900
France	0.9607	0.953
Germany	0.9201	0.889
Japan	0.9810	0.925
Korea	0.9910	0.978
UK	0.9205	0.878
US	0.6631	0.076

Table 7. Sequential estimation results for Japan

	Gas consumption per capita (TOE)	GDP per capita (2005 USD)	ϕ_1	P-value
2005	0.7658	33,457	1.3631	0.011
2006	0.8455	34,141	1.5896	0.024
2007	0.9229	34,947	2.3293	0.146
2008	0.9035	34,556	3.0237	0.279
2009	0.9005	32,424	3.2783	0.382
2010	0.9134	33,612	5.0130	0.609

소한 반면 천연가스 소비는 비탄력적으로 변화하여 나타난 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 앞으로의 천연가스 수요 전망에 활용하기 위하여 비선형 모형 중 하나인 Weibull 모형을 이용하여 경제 성장에 따른 천연가스의 소비 형태를 분석하였다. 캐나다와 프랑스, 독일, 일본, 영국, 미국 그리고 한국의 7개 OECD 국가를 대상으로, 경제 성장에 따른 에너지 소비의 형태가 S형 곡선의 형태로 나타날 수 있다는 가설을 바탕으로 천연가스에 대해서도 가설이 성립되는지 분석해 보았다. 이는 기존의 국내 연구 사례에는 찾아보기 어려운 접근 방식이며 분석 결과, 1차 에너지 소비와 마찬가지로 천연가스 소비에 대해서도 Weibull 모형을 통한 모형화의 설명력이 매우 높은 것으로 나타났다. 즉 1인당 천연가스 소비량도 1인당 GDP가 증가함에 따라 S형 곡선의 모양으로 증가하고, 궁극적으로는 소비량이 더 이상 증가하지 않는 상태에서 경제가 성장할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 분석 결과, 미국과 독일을 제외한 5개의 국가들은 아직까지 포화 시점에 다다르지 않아 현재 시점을 기준으로 향후 1인당 소비량이 증가할 것으로 추정되었다.

천연가스 생산과 공급 및 사용 인프라가 잘 갖추어져 있는 북미의 경우 1인당 천연가스 소비의 포화 수준이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 최근 비전통 가스의 본격적인 개발로 인하여 이러한 경향은 상당 기간 유지될 것으로 전망된다. 반면 다른 4개 국가는 1인당 소비량이 1~2 TOE 수준에 머무를 것으로 분석되었다. 일본의 경우가 독특한 경우라고 볼 수 있는데 분석 결과에서 살펴본 것과 같이 이는 2007년 이후 자료의 특이성으로 기인한 것으로 판단된다. 다른 분석 대상 국가도 서브프라임 모기지 사태와 유럽 금융 위기의 영향을 받았지만 일본의 경우 위치 모수에 비해 상대적으로 형상 모수의 절대값이 크기 때문에 충격에 더 민감하게 반응한 것으로 판단된다. Table 7의 결과로 미루어 보아 Weibull 모형을 사용한 수요 분석 시 표본의 수를 달리하여 추정 결과의 강건성(robustness)을 검토할 필요가 있음을 알 수 있다.

프랑스는 원자력 발전의 영향과 유럽 국가 중 낮은 인구 밀도와 가스 소비 인프라의 미비로 인하여 분석대상 국가 중 가장 낮은 포화 수준을 보이는 것으로 분석되었으며, 정책적으로도 발전 부분을 제외한 가정과 상업 부문에서는 오히려 가스 사용이 감소할 것으로 예상된다(IEA, 2009). 영국은 앞서 설명한 것과 같이 그 동안 정

책적으로 천연가스 소비를 권장해왔으며, 추정된 포화 수준은 높은 편이 아니지만 가스가 에너지 믹스에서 차지하는 비율이 41%로 다른 국가에 비해서 매우 높은 수준이다. 영국의 사례를 보다 자세히 살펴보면 영국은 자국의 가스 생산량이 감소하면서 그 부족량을 수입을 통해 충당해왔고 2005년을 기점으로 실질적 가스 수입국으로 전환됐다. 이에 따라 안정적인 공급을 위해 정책적으로 수입 인프라의 확대, 비용-효율 극대화, 탐사 지원 등의 활동을 진행해왔다(IEA, 2006; IEA, 2012). 1인당 천연가스 소비량도 2000년을 정점으로 다소 감소하여 일정 수준을 유지하고 있는데, 본 연구에 따르면 1.8039 TOE 수준에서 수렴이 이루어질 것으로 예상된다. 상부 점근선에 도달한 시점은 1인당 GDP 약 \$30,000 부근으로 1998년경이다. 영국의 지속적인 천연가스 사용 정책으로 인하여 본 연구에서 추정한 포화 수준은 상당 기간 유지될 것으로 보이며, 표본이 추가됨에 따라 하락세가 나타나는지 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.

일본이나 영국의 사례에서 알 수 있듯이 본 연구의 결과를 바탕으로 자료(표본)의 수를 변화시켜가면서 Weibull 모형 추정을 수행할 경우 각국의 천연가스 정책 현황과 결부하여 풍부한 정책적 함의를 도출할 수 있다. 그러나 본 연구의 목적과 의의를 1인당 천연가스 소비량이 특정 수준에 수렴하는 가를 확인하고, S-형 곡선을 사용하여 모형화 하는 것에 두고 있으므로, 상기 연구는 앞으로의 추가적인 과제로 남겨둔다. 또한 최근에는 Weibull 모형을 다변수 모형으로 확장하여 산업구조, 에너지 믹스에서의 비중 등 여러 설명변수를 추가한 모형에 대한 연구가 이루어지고 있기 때문에, 이를 반영한 후속 연구가 이루어진다면 천연가스 수요 전망에 많은 도움이 될 것이다. 본 연구에서 살펴본 바와 같이, 각 국가의 산업과 소비 특성이 모두 다르고, 정책적 의지도 다르지만 경제 성장에 따른 천연가스 소비 형태는 S형 곡선으로 비교적 잘 설명할 수 있다. 따라서 향후 천연가스의 수요를 전망하는데 있어서 기존의 모형과 함께 Weibull 모형과 같은 S형 성장 곡선을 적용하는 것을 적극적으로 검토할 필요가 있다. 셰일가스, 석탄층 메탄가스와 같은 비전통 가스의 개발로 인하여 하나의 전환점을 맞고 있는 천연가스 인 만큼, 수요 전망에 있어서도 지속적인 관심이 있어야 할 것이다.

사사

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2012T100201535)

References

- Baek, M., 2011, "Unconventional Gas Resources & KOGAS' Projects," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 4, pp. 524-538.
- Barton, J.P. and Infield, D.G., 2004, "Energy Storage and Its Use with Intermittent Renewable Energy," *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 19, No. 2, pp. 441-448.
- EIA, 2009, *International Energy Outlook*, Energy Information Administration, US Department of Energy, Washington DC.
- Eurogas, *Long Term Outlook for Gas Demand and Supply 2007-2030*. 2013.2.12, www.eurogas.org.
- Forouzanfar, M., Doustmohammadi, A., Menhaj, M.B. and Hasanazadeh, S., 2010, "Modeling and Estimation of the Natural Gas Consumption for Residential and Commercial Sectors in Iran," *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 268-274.
- Giovanis, A.N. and Skiadas, C.H., 1999, "A Stochastic Logistic Innovation Diffusion Model Studying the Electricity Consumption in Greece and the United States," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 61, No. 3, pp. 235-246.
- Gutiérrez, R., Nafidi, A. and Gutiérrez Sánchez, R., 2005, "Forecasting Total Natural-Gas Consumption in Spain by Using the Stochastic Gompertz Innovation Diffusion Model," *Applied Energy*, Vol. 80, No. 2, pp. 115-124.
- Hong, K.-W., 2011, "Enjeux politiques de la sécurité d'installations nucléaires en France : Débats dans les deux assemblées après la crise à Fukushima en mars 2011," *J. of Law & Economic Regulation*, Vol. 4, No. 2, pp. 91-104.
- Hwang, K., Kim, J., Hwang, Y. and Heo, E., 2012, "Decoupling of International Gas Prices from Crude Oil Prices," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 49, No. 3, pp. 338-349.
- IEA, 2006, *Energy Policies of IEA Countries - United Kingdom 2006 Review*, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2009, *Energy Policies of IEA Countries - France 2009 Review*, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2010, *Oil & Gas Security - Emergency Response of IEA Countries - United Kingdom*, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2011a, *Energy Balances of OECD Countries*, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2011b, *World Energy Outlook*, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2012, *Energy Policies of IEA Countries - United Kingdom 2012 Review*, International Energy Agency, Paris.
- Kalashnikov, V.V., Matis, T.I. and Pérez-Valdés, G.A., 2010, "Time Series Analysis Applied to Construct Us Natural Gas Price Functions for Groups of States," *Energy Economics*, Vol. 32, No. 4, pp. 887-900.
- Kim, J., 2010, *The Relationship between Energy Consumption and Economic Growth*, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul.
- Kim, T.-Y., Heshmati, A. and Park, J., 2010, "Decelerating Agricultural Society: Theoretical and Historical Perspectives," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 77, No. 3, pp. 479-499.
- Kim, Y.-S., Hwang, I.-G., Kim, H.-T., Lee, H.-S. and Lee, D.-S., 2011, "Geological Characteristics and Development Strategy of the Marcellus Shale," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 3, pp. 371-382.
- Maruyama, K., Vinyard, B., Akbar, M.K., Shafer, D.J. and Turk, C.M., 2001, "Growth Curve Analyses in Selected Duck Lines," *British Poultry Science*, Vol. 42, No. 5, pp. 574-582.
- Siemek, J., Nagy, S. and Rychlicki, S., 2003, "Estimation of Natural-Gas Consumption in Poland Based on the Logistic-Curve Interpretation," *Applied Energy*, Vol. 75, No. 1-2, pp. 1-7.
- Yoo, S.-H., Lim, H.-J. and Kwak, S.-J., 2009, "Estimating the Residential Demand Function for Natural Gas in Seoul with Correction for Sample Selection Bias", *Applied Energy*, Vol. 86, No. 4, pp. 460-465.

진 정 환

2012년 한양대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사

현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정
(E-mail: jhjin@hanyang.ac.kr)

김 진 수

2003년 서울대학교 지구환경시스템공학부
공학사
2005년 서울대학교 지구환경시스템공학부
공학석사
2010년 서울대학교 에너지시스템공학부
공학박사

현재 한양대학교 자원환경공학과 조교수
(E-mail: jinsookim@hanyang.ac.kr)