

혼합정수계획법을 이용한 천연가스(LNG) 산업의 자가발전소 건설에 대한 경제성 분석†

이정동¹ · 변상규² · 김태유³

¹서울대학교 공과대학 / ²한국전자통신연구원 정보통신기술경영연구소 / ³서울대학교 공과대학

Economics of Self-Generation by Natural Gas Industry Using the Mixed Integer Program

Jeong-Dong Lee¹ · Sang-Kyu Byun² · Tai-Yoo Kim³

Seasonal variation of natural gas demand coupled with rigid and stable import pattern of gas represents the characteristic feature of the Korean Liquefied Natural Gas(LNG) industry. This attribute has required a huge amount of investment for the construction of storage facility. Thus, to minimize the supply cost, it is legitimate to reduce storage requirement itself. In this study, we combine three alternative methods to deal with the storage requirement to minimize the supply cost. Those are (1) adding additional storage tanks, (2) inducing large firm customers, and (3) constructing gas-turbine self generation facilities.

Methodologically, we employ the mixed integer program (MIP) to optimize the system. The model also consider demand and price-setting scheme in separate modules. From the results, it is shown that if alternatives are combined optimally, a number of storage tanks can be reduced substantially compared with the original capacity plan set by the industry authorities. We perform various sensitivity analyses to check the robustness of the results. The methodology presented in this study can be applied to the other physical network industry, such as hydraulics. The empirical results will shed some light on the rationalization of capacity planning of the Korean natural gas industry.

1. 서론

우리나라는 국내 천연가스 수요를 전량 외국에서 LNG 형태로 도입하여 충당하고 있다. 그런데 장기 위주의 도입계약과 TOP (take or pay) 조항에 의한 항차조절의 제약 등의 요인으로 인하여 도입패턴이 매우 비탄력적으로 설정되어 있다. 반면 천연가스의 수요는 계절간 심한 기온편차에 의해 유발되는 난방용 물량의 수요변화로 인하여, 동절기에 수요가 집중되고 하절기에 감소하는 동고하저형의 패턴을 보이고 있다.

이러한 도입과 수요 사이의 불균형은 저장시설에 과도한 투

자를 요구하게 된다. 저장탱크의 건설에는 높은 투자비용과 장기간의 공기가 요구되고, 그로 인한 비용이 천연가스산업 전체의 공급비용에서 상당부분을 차지하고 있는 실정이며, 투자재원의 조달이 중대한 관심사가 되어 왔다. 또한 연중 특정한 시기에 집중되는 수요를 처리하기 위하여 기화, 송출 및 배관관련 설비에 대해서도 필요 이상의 시설투자가 요구되는 반면, 나머지 기간에는 거의 활용되지 않으므로 설비의 이용효율이 매우 낮아지는 문제를 야기시키게 된다.

그간 국내 천연가스산업에서는 과도한 저장설비 증설의 문제를 회피하기 위하여, 전력과 천연가스의 수요형태가 계절적으로 상호 보완성을 가짐에 착안하여 전력산업을 스빙소비자

† 본 연구는 한국가스공사의 연구지원(번호 98-CA-EE-수시-293-21)에 의하여 수행된 연구결과와 일부분으로서, 저자들은 한국가스공사의 재정적, 기술적 지원에 감사하고 있다. 본 연구에서 제시된 결과는 저자들의 의견이며 한국가스공사와 무관하다.

(swing consumer)로서 활용하여 왔다. 그러나 배관망의 확충에 따른 도시가스 수요의 증가로 인하여 전력산업에서 소비하는 물량의 비중이 점차 감소하고 있으며, 타 연료와의 경쟁, 에너지 산업의 구조조정 등으로 말미암아 향후의 전력부문 천연가스 수요에 대해 불확실성이 증가하고 있는 실정이다.

이와 같은 상황에서 향후 도시가스와 보완적인 수요패턴을 가진 새로운 대량수요처를 개발하고, 수요의 변화폭을 감소시키는 방향으로 소비자들의 수요패턴을 유인하는 등 저장시설의 절대적 규모를 감소시키고, 공급에 소요되는 총비용을 최소화시킬 수 있는 전략이 절실한 시점이다.

본 연구에서는 국내 천연가스산업을 대상으로, 수급의 특수성으로 인해 발생하는 계절간 잉여물량을 보다 저렴하고 안정적으로 처리할 수 있는 새로운 대안으로서 천연가스산업이 자체적으로 운영하는 자가발전을 고려하고, 그 효과를 평가하였다. 이를 바탕으로 향후 최소비용으로 천연가스를 공급하기 위한 정책대응방안을 도출하고자 하였다.

이하의 2절에서는 기존의 관련 연구사례를 간략히 정리한다. 3절에서는 잉여물량의 처리를 위한 여러 가지 대안들을 살펴보고, 연구의 방향을 제시한다. 4절에서는 연구를 위하여 개발된 모형의 수리적 구조를 설명한다. 5절에서는 본 모형을 국내 천연가스산업에 적용하여 실증분석한 결과를 요약, 제시한다. 6절에서는 조건 및 주요 변수값들의 변화에 대한 민감도분석을 통하여 최적해의 변화를 살펴봄으로써, 각종 변수들의 변화가 경영전략에 미치는 영향을 분석하고 7절에서 결론 및 정책시사점을 도출한다.

2. 기존 연구사례

본 연구에서의 문제의식과 유사한 것으로서 천연가스 공급자가 활용 가능한 각종 선택대안들을 조합하여 공급비용을 최소화하는 방안에 대한 연구들은 다수 찾아볼 수 있다(Guldman, 1986; Lyon and Schlesinger, 1988; Avery *et al.*, 1992; Guldman and Wang, 1999). 이 연구들에서는 천연가스산업의 프로세스를 선형계획모형으로 묘사하고, 개발된 모형들을 이용하여 공급비용을 최소화하기 위한 대안의 최적조합을 산정하였다. 그러나 이들 연구는 소매공급자인 LDC(local distribution company)가 생산자 또는 상위 단계의 도매 공급자로부터 공급받는 물량에 대한 계약기간, 가격 등의 다양한 공급조건들을 고려하여 공급자 및 저장설비들의 조합, 즉 공급측 믹스(supply mix)를 최적화시키는 데 초점을 두고 있으며, 도입이 비탄력적으로 주어져 있는 우리 상황에서는 현실적 시사점이 적다고 할 수 있다.

한편 LDC의 공급활동을 최소의 비용으로 달성하기 위하여 기존의 전력산업에서 활용되어 오던 심사곡선법(screening curve method)을 활용할 수 있음을 보여주는 연구들도 있다(Stoll, 1989; Goldman *et al.*, 1993). 그러나 심사곡선법은 특정한 기간에 대해 적용되는 정태적 방법이라는 한계를 지니고 있다.

국내에서는 항차조절과 발전용 물량의 월별 조절을 통하여 저장시설의 요구량을 최소화시키는 연구가 최근 수행된 바 있다(정용현 등, 1997). 이 연구는 국내천연가스산업의 저장비용 최소화문제를 최적화의 관점에서 다룬 거의 유일한 연구로서 가치가 있으나, 전력사업자의 연간 발전용 수요를 외생적으로 간주하고 있으며, 발전용수요 자체의 월별 공급패턴을 천연가스 사업자가 임의적으로 조절할 수 있다는 비현실적인 강한 가정이 내포되어 있다. 한편, 천연가스 사업자의 자가발전소 건설에 관한 경제성을 엔지니어링의 관점에서 제시한 연구(현대엔지니어링(주), 1998)도 찾아볼 수 있는데, 전력부문에 판매되는 전력총량, 건설해야 하는 발전소의 기수 및 건설시기 등이 외생적으로 주어진 상태에서 소요되는 비용을 추정하고 있어 시설계획에 최적화의 개념을 활용하지 못하고 있다는 단점을 가지고 있다.

이상의 연구들과 비교할 때 본 연구의 이론적, 실증적 특징은 첫째 도입의 비탄력성을 비롯한 국내 천연가스산업의 특수성을 고려하여 최근 당면한 전략적 문제를 다루고 있으며, 둘째 다기간에 걸쳐 시설계획의 최적화라는 개념을 핵심적으로 사용하고 있고, 셋째 대량수요자라는 수요측 대안의 거동을 해석에 고려하고 있는 것으로 요약할 수 있다.

3. 모형설정을 위한 중요 고려사항

3.1 잉여물량 처리를 위한 대안별 특성

본 연구에서는 도입물량에서 우선적으로 공급하여야 하는 도시가스 수요를 뺀 물량을 '잉여물량'으로 정의하였다. 이는 효율적인 경영을 위하여 자의적으로 처리가 가능한 물량의 범위를 설정한 것으로 본 연구의 대상이 되는 부문이기도 하다. 잉여물량을 처리하는 방안으로서는 아래와 같이 세 가지 대안이 있을 수 있다. 이 가운데 저장탱크건설과 대량 스윙소비자의 개발은 전통적으로 천연가스산업에서 사용되어 오던 방법이며, 가스발전소 건설운영의 경우에는 본 연구에서 추가로 고려하는 대안이다. 각 대안의 특성은 다음과 같다.

첫째, LNG 저장탱크를 건설하여 운영하는 대안의 경우, 계절적 요인으로부터 유발되는 변동성을 가진 수요와 경직적으로 고정된 도입패턴간의 불균형을 해소하기 위하여 최후의 수단으로서 사용되어 온 방법이다. 신뢰성이 매우 높은 대안이지만 막대한 투자재원과 운영비용이 소요되므로 잉여물량을 줄여 저장시설의 필요용량 자체를 최소화시키는 노력이 필요하다.

둘째, 대량수요자에 대한 판매의 증가는 에너지부문에서의 시장원리 확대에 따라 그 중요성이 더욱 커지고 있는 대안이다. 대량수요자는 천연가스의 부하조절이 비교적 용이하고 구매물량 단위가 커서 스윙소비자 역할을 할 수 있는 수요자들을 의미하며, 현재의 전력산업이나 향후의 대형 산업용수요가

등이 대표적인 예가 될 수 있다. 이 소비자 그룹은 향후 연료원 간 경쟁의 격화, 전력산업 구조변화 등과 관련하여 천연가스 산업의 경영전반에 미치는 영향이 저대할 것으로 예상되고 있다. 그러나 하절기에 공사가 판매하고자 하는 물량이 대량수요자의 구매희망 물량을 초과하는 경우에는 판매량 증대를 위하여 경제적 유인(economic incentive)을 제공하여야 한다는 문제가 있을 수 있다.

셋째, 천연가스 사업자 스스로가 가스발전소를 건설하여 주로 하절기에 가동률을 높임으로써 잉여물량의 규모를 줄이고, 발전으로부터의 수익을 얻는 대안이다. 이 대안은 하절기에 발생하는 잉여물량을 줄임으로써 저장설비의 절대필요량을 감소시켜 건설투자비를 줄이는 한편, 대량수요자의 스윙역할을 축소시킬 수 있기 때문에 유인제공에 소요되는 비용을 절감할 수 있다. 또한 냉방용 전력수요에 의하여 하절기에 전력 피크가 발생하므로 이 기간 동안에 전력을 발전하여 판매하는 편이 현재 보급이 미진한 가스냉방을 통한 천연가스 판매보다 용이하고, 발전에 소요된 비용을 모두 회수할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 그러나 가스발전소는 저장시설보다 훨씬 높은 건설비용과 운영비를 요구하는 단점이 있다.

3.2 의사결정의 흐름

잉여물량을 처리하기 위한 세 가지 방안은 비용측면에서 볼 때 각각 장단점을 가지고 있으므로, 어느 한 가지 대안만이 일방적으로 선택될 수 없다. 한편, 대형수요자에게 제공되는 경제적 유인은 실제로는 할인의 형태로 실현될 수 있다. 이는 천연가스산업의 입장에서 마땅히 얻어야 할 수익의 희생으로서, 실질적인 금전거래라기보다 잠재적 수익의 손실분으로서 이해될 수 있기 때문에, 공급자 측면의 비용과 수요자 측면의 편익이 동시에 계산될 때만이 비로소 파악되는 값이기도 하다. 따라서, 잉여물량의 처리는 단순히 비용최소화를 위한 대안의 조합이라는 단선적 논리를 확장하여, 조합선택의 결과로 소요되는 비용을 요금으로 고시하고, 이 요금수준과 소비자가 지불하고자 하는 의사액의 차이만큼을 할인비용으로 인식하여 다시 조합을 선택하는 반복연산의 과정을 요하게 된다. 이상의 개념을 수요, 시설계획 및 요금설정이 결합되어 있다는 의미로 통합모형이라 칭하고 이를 흐름도로 제시하면 <그림 1>과 같다.

외생변수가 주어진 상태에서 최소의 공급비용을 소요하는 각 대안별 물량배분의 조합, 즉 저장탱크에 저장되는 양(X_{1it}), 자가발전소가 소비하는 양(X_{2it}), 대량수요자에 의해 소비되는 양(X_{3it})을 산정하고 나면, 이를 위해 필요한 시설(Z_{1t} , Z_{2t})을 산정하고, 이 시설의 건설 및 운영유지에 소요되는 총비용을 계산하게 된다. 또한 설비와 소비량의 규모를 바탕으로 이에 기반한 요금수준을 계산할 수 있다.

한편 천연가스에 대한 대량수요자의 수요곡선을 이용하여 대량수요자의 배분된 물량에 대해 지불하고자 하는 최대의사

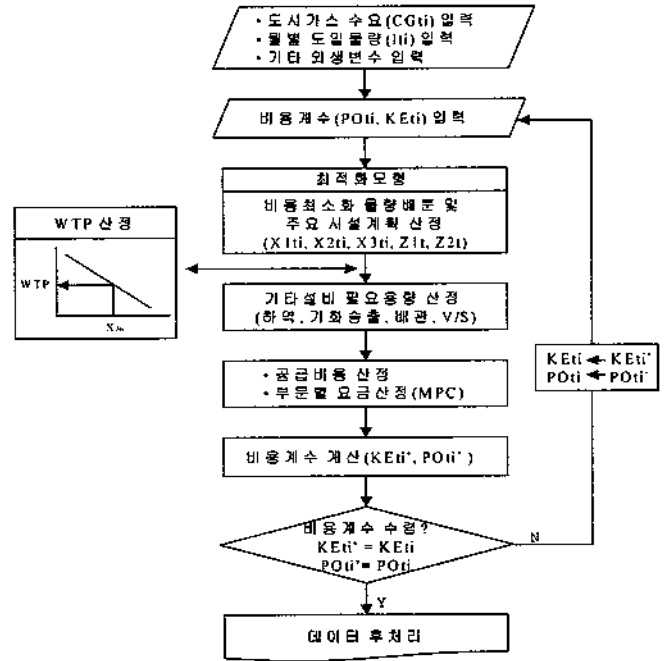


그림 1. 통합모형의 구조 및 의사결정 과정.

액인 WTP(willingness to pay)를 구하고, 이를 이용하여 새로운 비용계수로서 대량수요자에 대한 공급비용(KE_{it})을 구할 수 있다. 이는 이전단계의 반복연산에서 도출된 값(KE_{it})과 비교되어 정해진 범위 내로 수렴할 때까지 반복연산을 수행하게 되며, 공급비용을 최소화시키는 최적의 대안별 물량배분을 산정하게 된다.

한편 통합모형 내에 주어진 환경에서 공급비용을 최소화시키는 대안별 물량배분의 조합을 선택하는 부분이 있게 되는데, '최적화 모형'이라 한다. 통합모형 내에서 가장 핵심적인 역할을 수행하는 이 부분의 자세한 내용에 대해서는 다음 장에서 상술한다.

4. 모형의 상세구조

4.1 비용최소화 조합선택을 위한 최적화 모형

최적화 모형은 월별 도입물량과 도시가스 수요량을 비교하여 발생하는 잉여 또는 부족물량을 ① 저장, ② 자가발전 그리고 ③ 대량수요자에 대한 판매의 세 가지 대안들을 통해 최소의 비용으로 처리하는 모형이다. 본 연구에서는 천연가스산업이 이윤극대화를 목표로 행동한다기보다 최소의 비용으로 수급균형을 달성하는 데 목표가 있다고 가정한다. 이 가정은 현재 국내의 천연가스산업에서 도매부문은 공기업인 한국가스공사가 담당하고 있고, 소매부문의 지역 도시가스회사들도 요금설정 및 기타 행태에서 정부의 직·간접적 규제하에 있다는 사실에 근거할 때 현실적인 가정으로 판단된다.

본 모형에서는 계획기간 동안 각 대안별로 소요되는 건설비

용과 운영비용, 그리고 할인비용 등을 현가화하여 합산하고, 이를 최소화할 수 있는 부문별 물량배분을 산정하며, 이를 근거로 시설계획을 수립한다. 이 때 저장탱크 및 발전소의 건설 기수 등은 정수로 구해지므로 최적화 모형은 '혼합정수계획(mixed integer program; MIP) 모형'의 형태를 띠게 된다.

최적화 모형의 목적함수는 아래의 수식으로 표현될 수 있다.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^T \frac{\sum_{t=1}^I (SOX_{1it} + PO_{it}X_{2it} + KE_{it}X_{3it})}{(1+r)^t} + \sum_{i=1}^T \frac{S_i(Z_{1i} - Z_{10}) + P_i(Z_{2i} - Z_{20}) + \alpha(Z_{1i} - Z_{10}) + PT \times \beta \times (Z_{2i} - Z_{20})}{(1+r)^t}$$

여기서,

i : 월($i=1, \dots, 12$), t : 연($t=0, 1, \dots, T$), r : 할인율

X_{1it} : t 년도 i 월에 저장탱크에 남아 있는 양

X_{2it} : t 년도 i 월에 자가발전소로 보내지는 양

X_{3it} : t 년도 i 월에 대량수요자에게 판매하는 양

Z_{1t} : t 년도에 필요한 저장탱크의 기수

Z_{10} : 초기 저장탱크 기수

Z_{2t} : t 년도에 필요한 자가발전소의 기수

Z_{20} : 초기 발전소 기수

S_i : 저장탱크 건설비의 연간등가

α : 저장탱크 1기당 연간 운영비용

SO : 단위 저장물량에 대한 재고비용

PT : 발전소 총건설비

P_i : 발전소 건설비의 연간등가

β : 발전소의 연간고정 운영비용이 총투자비에서 차지하는 비율

PO_{it} : 자가발전 전력판매의 할인비용

KE_{it} : 대량수요자에 대한 천연가스 판매에 소요되는 비용

목적함수의 첫번째 항은 물량의 크기에 비례하여 증가하는 가변비용을, 두 번째 항은 건설비용과 고정운영비용을 나타내고 있다. 최적화 모형에서 구한 해의 신뢰성을 향상시키고 천연가스산업의 기술적 특성을 고려하기 위하여 다음의 제약조건들을 사용하였다.

① $X_{1it} - X_{1,t,i-1} + X_{2it} + X_{3it} = I_{it} - CG_{it}$

$X_{10} = X_{1,t-1,t} (t=2, \dots, T)$,

$X_{1it} \geq 0, X_{2it} \geq 0, X_{3it} \geq 0$

② $\max_{0 \leq i \leq I} \{X_{1it}\} \leq Z_{1t} \times ca_1, Z_{1t} \geq Z_{1,t-1}$

③ $\max_{1 \leq i \leq I} \{X_{2it}\} \leq Z_{2t} \times ca_2, Z_{2t} \geq Z_{2,t-1}$

④ $b \sum_{i=1}^I X_{3it} + a \leq \min_{1 \leq i \leq I} X_{3it}$

⑤ $X_{1it} \geq s/31 \times (CG_{it} + X_{2it} + X_{3it})$

⑥ $ca_1 \times Z_{1t} - X_{1it} \geq \text{ship} \times \text{term}, \text{if } t < \text{tong}, \text{term} = 2, \text{else term} = 3$

⑦ $Z_{1t} - Z_{1,t-1} \leq TM$

⑧ $Z_{21} = Z_{22} = Z_{23} = Z_{24} = 0$

여기서,

I_{it} : 월별 천연가스 도입량

CG_{it} : 월별 도시가스 소비량

ca_1 : 저장탱크 1기의 용량

ca_2 : 발전소 1기가 월별로 처리할 수 있는 가스용량

a, b : 대량수요자용 최소물량 계수

s : 긴급대응분 계수

ship: LNG 수송선 1척의 용량

term: 도입용 해양 터미널의 기수

tong: 새로운 인수기지가 건설, 가동되는 해

TM: 연간 건설 가능한 저장탱크의 최대기수

①, ②, ③의 제약식은 수요와 공급의 일치, 그리고 이를 위하여 필요한 저장탱크 및 발전소 건설기수를 산정하는 내용을 담고 있다. ④는 단위기간당 공급물량이 최고치를 보이는 동절기에 천연가스 공급자가 대량수요자에 대한 판매를 회피하려는 유인을 가지고 있으나, 이 기간 동안 대량수요자도 열병합발전 등을 위한 최소한의 천연가스 수요가 현실적으로 존재하므로 이를 모형에 고려하는 내용이다. 여기서 회귀계수 a 와 b 는 대량수요자의 최소월 사용량을 그 해의 총 공급물량에 회귀시켜 추정한다.

LNG는 도입시 장거리 해상 수송을 통해야 하므로 천재지변과 가스생산국 사정에 의한 선박의 도착 지연에 대비하여 비상물량에 대한 최소필요량을 저장탱크 재고로 유지하여야 하는데, 제약식 ⑤에서 현재 국내 천연가스산업 도입부문에서 준수되고 있는 규정에 따라 3월의 수요를 기준으로 최소 재고물량을 정의하였다. LNG 수송선이 해양 터미널에 접안시 즉시 하역이 가능하도록 하기 위하여 각 기지별로 최소한 LNG 수송선 1척에 해당하는 용량만큼 저장탱크가 비워져 있어야 하는데, ⑥에서 이를 고려하고 있으며, 현재 통영에 추가로 건설중인 인수기지도 고려하고 있다.

⑦은 저장탱크의 건설에 막대한 투자비가 소요되므로 공급자의 역량에 따라 매년 건설 가능한 기수의 상한이 존재함을 보이고 있다. ⑧에서는 발전소의 건설에 평균적으로 4년이 소요되므로, 시설계획을 수립한 시점으로부터 이 기간이 지난 후에야 발전소의 가동이 가능함을 나타내고 있다.

4.2 대량수요자의 천연가스 수요곡선의 도입 및 활용

앞서의 최적화 모형에 의해 최적조합이 선택되면 저장관련 비용 및 물량비례 공급비용이 산정되고, 이에 근거하여 도시가스용 요금 및 대량수요자용 요금이 설정될 수 있다. 이 요금은 공급비용을 회수하기 위해 요구되는 요구수익(revenue requirement)에 기반한 요금으로서 천연가스 공급자가 받고자 원하는 가격(minimum price based on cost; MPC)으로 생각할 수

있다. 한편 연료원 대체가능성이 낮아 가격탄력성이 극히 작은 도시가스 소비자들은 이 요금을 받아들이 수밖에 없으며, 요금수준이 달라진다고 하더라도 낮은 가격탄력성으로 인하여 수요량이 변화하지 않는 것으로 가정할 수 있다. 그러나 대체가능연료가 항상 존재하고, 경제적 원리에 입각하여 천연가스를 원료로 사용하는 대량수요자의 입장에서는 이렇게 고시된 요금이 자신의 수요곡선상의 가격보다 높을 경우 사용량을 대폭 줄이는 반응을 보이게 될 것이다. 따라서, 동일한 물량에 대하여 천연가스 공급자가 받고자 원하는 가격(MPC)과 대량수요자가 최대지불하고자 하는 가격(WTP) 간에 격차가 발생하게 되는데, 이 차이가 존재하는 한 수급계획상의 오차는 불가피하게 발생하게 된다. 본 연구에서는 MPC와 WTP간의 차이를 천연가스 공급자가 부담하게 되는 경제적 유인으로 정의하고, 이를 반복 연산을 통해 계산하는 과정을 포함하였다.

이를 보다 구체적으로 살펴보면, 대량수요자의 수요곡선은 <그림 2>에 나타난 바와 같이 가격상한선과 수요곡선의 두 부분으로 나눌 수 있는데, 두 선이 만나는 점(Q^*)에서 굴절된 형태로 주어지게 된다. 물량이 Q^* 보다 큰 경우는 수요곡선에 따라 WTP를 산정하며, Q^* 보다 작은 경우에는 가격상한선으로 WTP를 산정한다. 가격상한의 존재로 말미암아 수요곡선상의 굴절이 존재하는 것은 경쟁원료의 가격과 비교하여 천연가스 요금이 일정 수준 이상으로 상승하면 대량수요자가 천연가스 사용을 포기하고 경쟁원료로 대체할 유인이 있음을 의미하는 것으로서, 천연가스산업을 둘러싼 에너지 환경을 고려할 때 현실적인 가정이라 할 수 있다. 가격상한은 경쟁원료의 가격과 LNG의 편리성 및 환경친화성 등을 종합적으로 고려하여 결정된다.

하절기에는 대량수요자, 특히 전력사업자에 의한 천연가스 수요가 증가하므로 연평균수요곡선보다 상향 이동된 수요곡선이 적용되고, 동절기에는 연평균보다 하향 이동된 수요곡선을 적용한다. 한편 자가발전소에 의해 발전된 전력을 소비자에게 판매하는 경우에도 동일한 과정을 거쳐 소요되는 비용을 산정하게 된다.

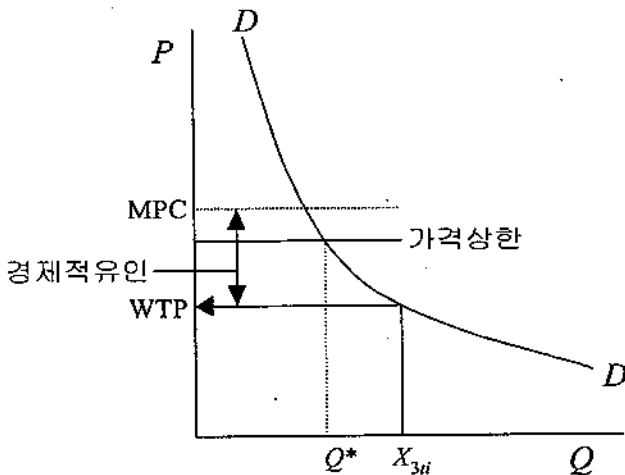


그림 2. 대형수요자의 천연가스 수요곡선과 경제적 유인.

4.3 주요 비용계수의 산정

최적화 모형에서 비용을 최소화시키는 물량배분을 구하기 위해서는 각 대안별로 소요되는 비용에 관한 계수들을 목적함수에 입력하여야 한다. 대량수요자용 판매물량의 경우 단위물량을 공급하는 데 소요되는 비용계수 KE_{it} 를 입력하여야 하는데, 이 값은 단위물량의 공급에 소요되는 공급비용과 유인 제공에 소요되는 할인비용의 합으로 구성된다. 이는 물량의 총량 및 수요패턴에 따라 크기가 변하는 가변적인 비용항목이므로 사전에 알 수가 없다. 그러므로 해석 초기에는 임의값을 대입하여 최적화 모형을 구동시키고, 여기서 구한 월별 판매물량(X_{3it})을 대량수요자의 수요곡선에 대입하여 WTP를 구한다. 한편 요금모형에서는 공급자의 MPC를 구할 수 있으므로, MPC와 WTP의 차로 정의되는 할인비용을 구하고, 요금모형에서 구한 공급비용을 여기에 합산하여 새로운 비용계수 KE_{it}' 를 구할 수 있다.

KE_{it}' 를 해석 초기에 입력한 KE_{it} 와 비교하여 그 값이 다를 경우 반복계산을 통해 새로운 최적-물량배분을 구하게 되며, 마침내 두 값이 정하여진 수렴범위 내에서 일치하면, 그 때의 대량수요자에 대한 물량과 가격을 최종 해로서 구하게 된다. 전력을 판매하는 경우의 할인비용(PO_{it})도 동일한 과정을 거쳐 최종해를 구한다.

5. 한국의 천연가스산업에 대한 기초해석

최적화 모형을 한국의 천연가스산업에 대하여 적용하여 천연가스산업의 자가발전에 대한 경제성을 분석하였다. 여기서 MIP 형태인 최적화 모형을 해석하기 위하여 MOMIP을 솔버(solver)로 활용하였다. 입력정보들은 각종 관련 통계자료, 한국가스공사의 예측자료 및 규정 등 신뢰도가 높은 자료들을 엄선하여 활용하였으며, 이 자료에 의한 해석을 '기초해석'으로 명명하여 다음 절의 민감도분석을 위한 해석들과 구분하였다.

5.1 입력자료

해석은 1999년에서 2010년까지의 12년을 대상으로 수행되었다. 모든 비용자료는 1998년 말 기준 현가로 환산되었다. 자본의 시간에 대한 선호를 나타내는 할인율(r)은 평균 물가상승률과 시중은행 대출금리 등을 종합, 9%의 실질할인율을 적용하였다(한국은행, 1999).

저장탱크 및 발전소의 건설비는 수명기간 동안 연간등가의 형태로 매년 지불되는 것으로 간주하였다. 저장탱크는 10만 kL 용량을 기준으로 총건설비가 84,415,300,000원이며, 경제수명은 30년을 적용하였다. 본 모형에 고려된 가스발전소는 450 MW급의 복합화력 발전소로서, 총 건설비용은 2800억 원, 경제수명은 25년을 적용하였다(산업자원부, 1998). 가스발전소

의 최대가동률은 60%를 가정하였는데, 이는 전력수요에 대한 제약과 발전소의 유지, 보수에 소요되는 물리적인 제약 등을 고려하여 설정된 것이다.

한 해에 준공이 가능한 최대 탱크기수(TM)는 천연가스산업의 현실을 고려하여 4기 이하로 설정되었으며, 2004년까지는 3월 수요의 3일치를, 2005년부터는 5일치를 긴급대응분으로 비축하도록 하였다. 회귀분석을 통하여 구한 겨울철 대량수요자에 대한 최소공급물량 계수는 $a = -11156.8$, $b = 0.062071$ 을 적용하였다(한국가스공사, 1999). LNG 수송선 1척의 용량(ship)은 56,000톤을 적용하였고, 2002년에 통영에 세 번째의 인수기지가 완공되기 전에는 2척분을, 완공 후에는 3척분의 저장여유를 항상 보유하도록 하였다.

LNG의 연간 도입 및 도시가스 수요는 천연가스산업 수급 계획에 근거하였는데(산업자원부, 1999), 도입은 하절기(4~10월)와 동절기(11~3월)에 각각 총 도입량의 50%씩을 월별로 균일하게 도입하는 것으로 가정하였다.

5.2 기초해석

해석을 통하여 우리는 각 대안에 대한 최적의 공급물량 조합과 이에 요구되는 설비의 용량을 구하였으며, 이러한 자료들을 활용하여 다음과 같이 분석하였다.

해석에서 구한 연간 최적 물량배분 패턴은 해석기간 동안 비슷한 모습을 보이고 있는데, <그림 3>에서는 2005년의 경우를 예로 도시하고 있다. 도시가스 수요는 '동고하저'형 분포가 확연하게 나타나 있다. 반면 대량수요자에게 하절기(6~9월)에 최대물량을 공급하고 있어 도시가스 수요와 보완성을 가짐을 알 수 있다.

저장탱크에는 평소 긴급대응분에 해당되는 최소물량만 비축하고 있다가 8월부터 대량수요자에 대한 공급물량을 줄이고 저장물량을 증가시키기 시작한다. 11월에는 저장물량이 최고가 되며, 12월부터는 도시가스 수요의 급격한 증가에 따른 부족분을 충당하기 위하여 저장물량을 방출하기 시작하여 이듬해 1월 말경에 재고물량을 거의 소진한다. 이러한 물량배분

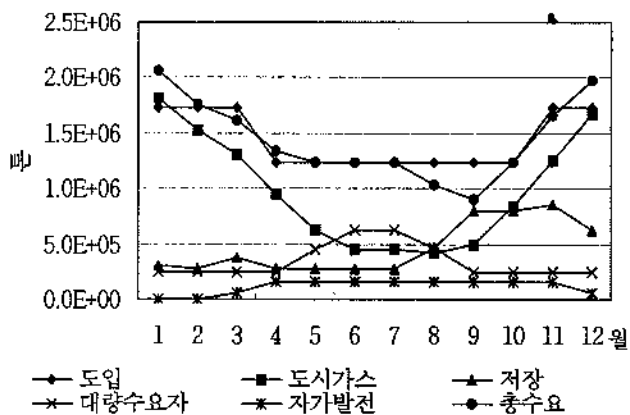


그림 3. 연간 부분별 물량배분 결과(2005년).

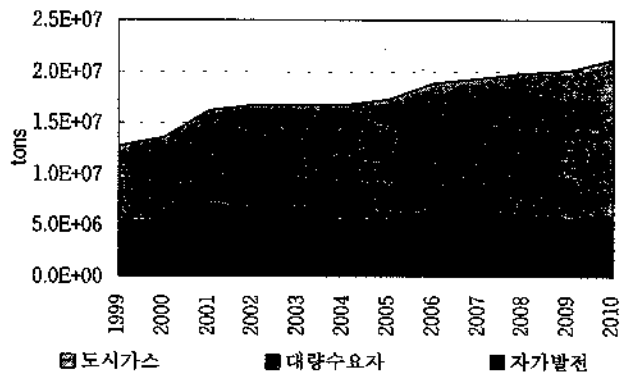


그림 4. 연도별 최적 물량구성.

은 현재 한국가스공사의 물량공급 패턴과 유사한 경향을 보이고 있다.

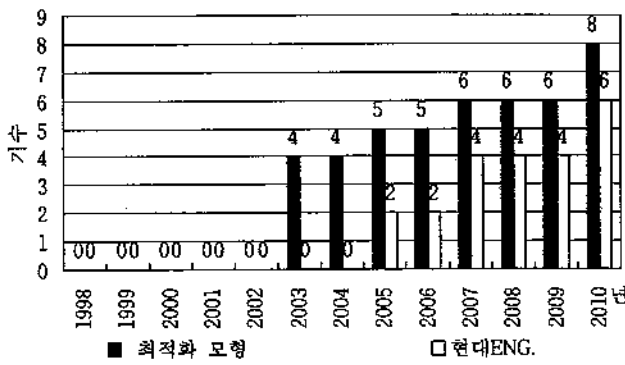
한편 자가발전소는 하절기에 가동률을 최대로 높여 비수기 잉여물량을 감소시키고, 반면 도시가스 수요가 최고조에 달하는 겨울철(12~3월)에는 가동을 하지 않거나 가동규모를 현저하게 줄임으로써 수요의 평탄화에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 부문별로 상호 보완적인 수요패턴은 연간 총 수요패턴을 균등화시키는 데 기여하게 된다.

총수요를 구성하는 각 부문별 연간 물량구성은 <그림 4>에 나타나 있다. 해석기간 동안 도시가스 물량은 총수요의 58%에서 71%로 구성비가 증가하며, 대량수요자용 물량은 42%에서 18%로 비중이 급감한다. 그리고 자가발전 물량은 2010년에는 총수요의 11%를 차지할 정도로 성장한다. 이는 한국의 천연가스 배관망이 전국적으로 확충되면서 도시가스 수용가수의 증가로 인한 도시가스 수요의 증가와, 대량수요자에 대한 판매 물량 감소분이 자가발전 물량으로 대체되고 있음을 보여주고 있다.

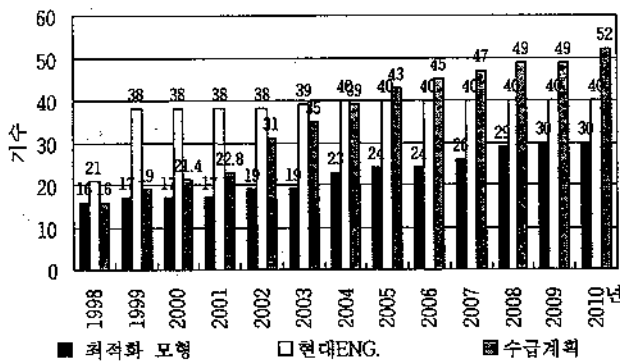
이상의 물량배분을 처리하기 위한 필요시설의 용량은 <그림 5>에 나타나 있다. 가스발전소는 2010년까지 총 8기를 건설하는 것으로 나타났는데, 이는 자가발전소의 건설을 엔지니어링의 관점에서 고려한 연구(현대엔지니어링, 1998)의 6기보다 2기가 많은 것이다.

저장탱크는 1998년의 16기로 시작하여 점차로 증가하다가 2010년에는 30기를 보유하는 것으로 나타났다. 한편 엔지니어링의 관점에서 분석된 기존 결과에 의할 경우 2010년에 저장탱크가 총 40기가 필요한 것으로 나타났으며, 천연가스 수급계획(산업자원부, 1999)에서는 52기를 건설하는 것으로 나타났다. 이는 최적화 모형보다 각각 10기, 22기가 많은 것으로, 저장탱크 1기에 투자되는 건설비가 상당한 액수임을 고려할 때 이러한 차이는 한국가스공사의 경영에 심대한 영향을 미칠 것으로 생각된다.

각 경우에 대하여 실질적으로 소요되는 비용은 시설투자비와 고정성 운영비를 중심으로 볼 때 <표 1>과 같이 나타날 수 있다. 목적함수를 구성하고 있는 모든 비용이 본 해석을 통하여 산출되었으나, 비교가 되는 다른 대안들, 즉 공학적 접근법



(a) 가스발전소 건설기수(450 MW 기준)



(b) 저장탱크 건설기수(10만 kL 기준)

그림 5. 최적화 모형으로부터 구한 주요 시설의 연도별 누적 기수.

표 1. 제시된 대안별 투자비 및 고정운영비의 비교(단위: 억원)

대안	건설투자비	고정운영비	합계
최적화 모형 (본모형)	9,159	3,087	12,246
공학적 접근법 ¹⁾	16,190	6,383	22,573
기존 수급계획안 ²⁾	10,779	4,460	15,239

1) 현대엔지니어링(1998)

2) 산업자원부(1999)

에 의한 분석결과나 기존 수급계획안의 재고비용, 유인비용 및 공급비용 등의 가변운영비용들을 구하기가 곤란하여 위 두 가지 항목만 비교하였다. 최적화 모형으로부터 구한 결과가 가장 적은 투자 및 운영비용을 소요하는 것으로 나타나고 있으며, 다른 비교 대안들과는 최소 24.4%에서 최대 84.3%까지 차이가 남을 알 수 있다.

발전소 건설 운영의 가장 큰 효과는 동고하저형 수요형태를 보다 평활하도록 유도하여 저장설비 필요량을 경감시키는 데 있다. 수요형태가 평활한 정도는 TDR(top-down ratio), 즉 순간 최고피크수요량과 최저수요량의 비율로써 표현될 수 있다. <그림 6>에서는 연도별 TDR의 수준이 나타나 있는데, 전반적으로 기존 수급계획안보다 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이

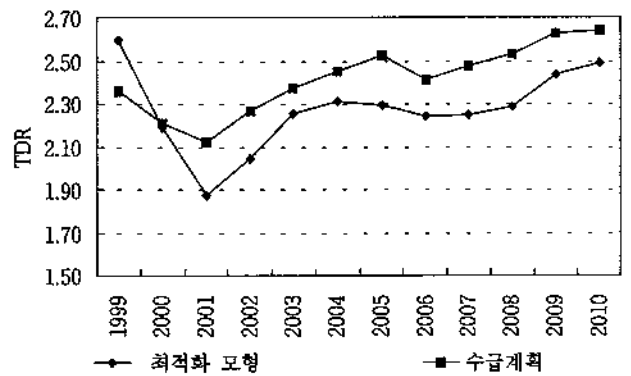


그림 6. 총수요의 TDR 비교.

는 도서가스 수요와 보완적인 방향으로 대량수요자 구매패턴을 개선시키고, 하절기 자가발전을 통해 잉여물량을 처리한 데 기인한다. TDR의 감소는 시설 이용효율의 증가를 의미하므로 천연가스산업 전반의 경영효율이 자가발전을 통해 증진될 수 있음을 보인 것으로 해석할 수 있다.

6. 민감도분석

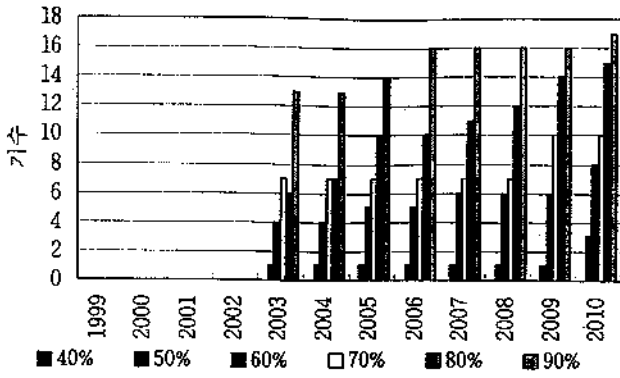
모형에 입력된 조건 및 변수값들이 변화하면 해석의 결과도 달라질 것이 예상된다. 그러므로 현실에서 발생 가능한 범위 내에서 주요 변수들을 변화시켜 해석을 수행하고, 기초해석의 결과와 비교함으로써 이러한 변화가 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 본 장에서는 민감도분석을 통하여 주요 조건들의 변화가 시설투자 및 운영에 소요되는 비용에 미치는 영향들을 중심으로 해의 변화에 미치는 영향들에 대한 이해를 넓히고자 한다.

6.1 가스발전소 가동률의 변화

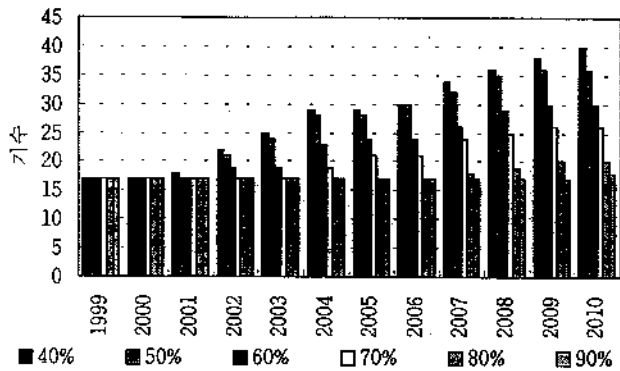
기초해석에서는 가스발전소의 최대가동률을 60%로 가정하였으나, 전력시장의 수급상황 변화 및 기술의 발전 등에 따라 다른 값이 적용될 확률은 매우 높다. 그러므로 발전소의 월평균 가동률을 40%에서 90%까지 10%씩 증가시켜 가며 해석을 수행하였다.

<그림 7>에서 가동률 40%에서는 발전소를 건설하지 않다가 가동률이 점차 상승할수록 건설기수를 증대시킬 수 있음을 알 수 있다. 이는 발전소의 시설투자비가 막대하지만 가동률이 높아질수록 발전물량 한 단위에 부과되는 시설투자비가 낮아지므로 다른 대안들에 비해 경쟁력을 가지기 때문으로 판단된다. 반면 발전소의 건설이 증가하면 하절기 잉여물량이 감소하여, 저장탱크 건설기수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

<표 2>에는 가동률의 변화에 따른 현가화된 투자비와 고정운영비의 변화를 비교하여 나타내고 있다. 가동률이 증가할수록 발전소 건설이 증가하므로 건설투자비 및 고정운영비가



(a) 발전소 보유기수의 변화



(b) 저장탱크 보유기수의 변화

그림 7. 가동률 변화에 따른 주요시설 보유기수의 변화.

표 2. 가동률에 따른 투자비 및 고정운영비의 변화(단위: 억원)

가동률	건설투자비	고정운영비	합계
40%	5,677	2,349	8,026
50%	6,437	2,506	8,944
60%	9,159	3,087	12,246
70%	10,583	3,371	13,954
80%	12,126	3,678	15,804
90%	17,225	5,149	22,374

증가하는 경향을 보이고 있다. 한편 표에서는 제시되어 있지 않으나 가동률이 증가하면서 대량수요자에 대한 판매물량이 감소하여 유인비용 등 가변비용이 절감되므로 전체적인 비용은 완만한 감소세를 나타낸다.

총수요의 TDR은 가동률이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 2010년의 경우에 가동률 90%에서는 1.85, 80%에서는 1.98, 70%에서는 2.14, 60%에서는 2.27, 50%에서는 2.43, 그리고 40%에서는 2.51로 나타났다. 이는 발전소 가동률이 증가할수록 하절기의 수요물량이 증가함에 기인하며, 시설의 효율적인 활용이 이루어짐을 알 수 있다.

6.2 도입패턴의 변화가 시설계획에 미치는 영향

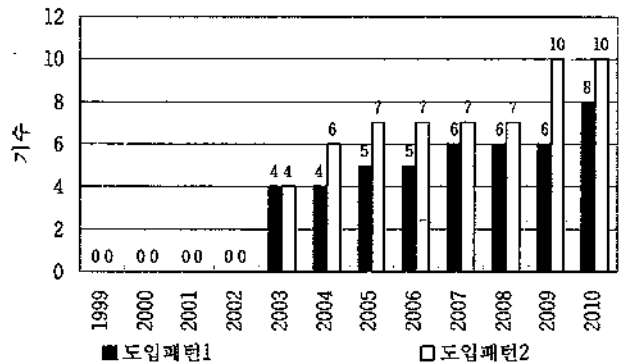
도입패턴은 천연가스산업의 공급비용을 결정하는 중요한

표 3. 해외요인에 의한 하절기 도입비율의 변화(단위: %)

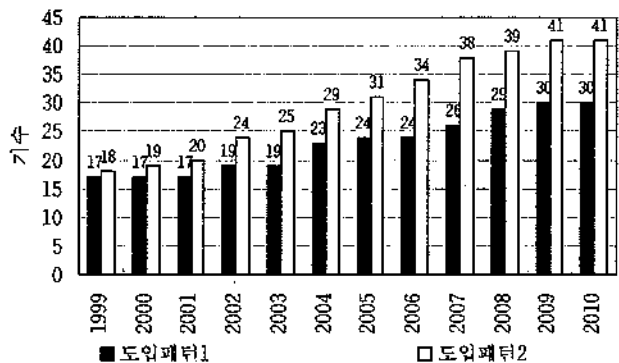
연도	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007~2010년
도입패턴1	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
도입패턴2	50.5	51.0	51.5	52.0	52.5	53.0	53.5	54.0	54.5

요소로서, 유연성이 커질수록 비용이 낮아질 수 있는 가능성을 가지고 있다. 본 연구에서는 기초해석에서 사용한 도입패턴을 '도입패턴1'로 정의하고, 이와는 별도로 '99년 이후 하절기 LNG 도입비율을 단계적으로 증가시키는 패턴을 가정하였다. 이는 향후 현물(spot) 물량의 점차적인 감소에 따라 항차조절이 점차 어려워지는 경우를 상정한 것으로, 이때 예상되는 연도별 하절기 도입비율은 <표 3>에 나타나 있으며, 이를 '도입패턴2'라 부르기로 한다.

분석의 결과 직관적 예상과 같이 하절기의 항차조절이 어려워질수록 발전소 및 저장탱크 건설이 증가하는 것을 <그림 8>로부터 알 수 있다. 도입패턴이 1에서 2로 변화하면 동절기에는 수요량보다 도입량의 부족분이 증가하며, 하절기에는 잉여물량이 증가한다. 동절기 물량부족의 심화는 저장탱크의 증가를 요구하게 되며, 하절기 잉여물량의 증가는 발전소의 증가를 필요로 하게 된다. 그러므로 도입패턴이 변함에 따라 두 시설 모두가 증가하는 경향을 나타내며, 이는 <표 4>에서 보여지는 바와 같이 59.9%의 투자비 증가를 유발한다.



(a) 발전소 보유기수의 변화



(b) 저장탱크 보유기수의 변화

그림 8. 도입패턴의 변화에 따른 주요시설 보유기수의 변화.

표 4. 도입패턴의 변화가 투자비 및 고정운영비에 미치는 영향
(단위: 억원)

	건설투자비	고정성 운영비	합 계
도입패턴1	9,159	3,087	12,246
도입패턴2	14,500	5,080	19,580

7. 결론

본 연구에서는 한국 천연가스산업의 공급환경을 고려하여 공급비용을 최소화시키고 경제적 효율성을 높일 수 있는 방안을 모색하며, 정책시사점을 도출하고자 하였다. 혼합정수계획법을 이용하여 개발된 최적화 모형은 동태적인 관점에서 최적의 물량배분과 시설계획을 산출하였다. 그 과정에 대량수요자의 수요곡선을 도입하고 반복연산을 통하여 공급자와 수요자의 의사를 수렴시키는 알고리즘을 채택함으로써 해석의 신뢰성을 제고시켰다.

기초해석에서 각 부문별 물량공급이 도시가스의 수요와 보완적인 패턴을 갖는 것으로 나타났으며, 이는 대량수요자 구매패턴의 개선과 하절기 자가발전물량 수요에 기인하고 있다. 이러한 수요패턴의 개선은 설비의 이용효율을 증진시키고, 설비 필요용량을 감소시켜 공급비용의 최소화에 기여하고 천연가스산업의 효율성을 증가시킨 것으로 이해할 수 있다.

대량수요자에게 판매하는 물량은 점차 감소하였고, 장기적으로는 자가발전 물량이 대량수요자에 대한 공급물량을 대체해 나가는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 대량수요자에 대한 물량의 경우 물량의 크기보다는 수요패턴의 개선이 공급비용 최소화에도 더 큰 영향을 미침을 알 수 있으며, 향후에는 대량수요자와의 협상에서 판매물량의 증대보다는 수요패턴을 도시가스와 보완적인 형태로 유인하는 방향으로 주력해야 함을 유추할 수 있다. 이를 위하여 필요한 경우 계절별 차등요금의 확대 및 유인제공 등을 적극 고려할 수 있을 것이다.

한편 최적 물량배분에 따른 시설계획은 현재 계획보다 저장탱크의 기수를 획기적으로 감소시켜 건설투자비 및 고정운영비를 절감할 수 있는 것으로 나타나 자가발전의 경제성을 확인할 수 있었다. 또한 엔지니어링의 관점에서 수행된 연구결

과보다도 훨씬 적은 시설비용을 요구하고 있어 최적화의 우월성을 확인할 수 있었다.

민감도분석을 통하여 가스발전소의 가동률을 증가시킬수록 발전소의 건설은 증가하고 저장탱크는 감소함을 알 수 있었으며, 이는 시설비용의 증가를 초래하였다. 그러나 잉여물량이 감소하여 대량수요자에 대한 공급비용이 감소하므로 전체비용은 오히려 절감되었다. 그러므로 전력시장의 공급범위 내에서 발전소의 가동률을 높이는 것이 공급비용 최소화에 기여함을 알 수 있다.

하절기 도입량을 증가시키는 방향으로 도입패턴이 바뀌면 저장탱크와 발전소의 건설기수가 모두 증가하였으며, 역시 시설비용의 증가를 초래하였다. 그러므로 추후 도입계약시에 한차조절의 유연성을 최대한 확보하는 것이 국내 천연가스산업의 전반적인 공급비용 절감에 중요한 역할을 수행함을 알 수 있다.

참고문헌

- 산업자원부 (1998), 제 4차 장기전력 공급계획.
 산업자원부 (1999), 장기천연가스 공급계획 검토서.
 정용현, 김수덕 (1997), 계절별 도시가스 수요관리와 적정 LNG 저장시설 선정 연구, 에너지경제연구원.
 한국가스공사 (1999), 경영통계.
 한국은행 (1999), 경제통계연보.
 현대엔지니어링(주) (1998), 수급조절용 발전사업 예비타당성 조사보고서.
 Avery, W., Brown, G. G., Rosenkranz, J. A. and Wood, R. K. (1992), Optimization of Purchase, Storage and Transmission Contracts for Natural Gas Utilities, *Operations Research*, 40(3), 446-462.
 Goldman, C., Connes, G. A., Busch, J., and Wiel, S. (1993), Primer on Gas Integrated Resource Planning, Energy & Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, U.C. Berkeley.
 Guldmann, J. M. (1986), A Marginal-Cost Pricing Model for Gas Distribution Utilities, *Operations Research*, 34(6), 851-863.
 Guldmann, J. M., and Wang, F. (1999), Optimizing the Natural Gas Supply Mix of Local Distribution Utilities, *European Journal of Operational Research*, 112(3), 598-612.
 Lyon, T. P., and Schlesinger, B. (1988), Gas Utility Supply Planning: Risk Management and Regulatory Oversight, *The Energy Journal*, 9(3), 153-160.
 Stoll, H. G. (1989), *Least-Cost Electric Utility Planning*, John Wiley & Sons, New York.



이정동

서울대학교 자원공학과 학사
 서울대학교 자원공학과 석사
 서울대학교 자원공학과 박사
 현재: 서울대학교 기술정책대학원과정 조교수
 관심분야: 생산성분석 및 응용, 네트워크산업
 정책분석(전력, 가스, 통신 등)



변상규

부산대학교 항공우주공학과 학사
 부산대학교 항공우주공학과 석사
 서울대학교 기술정책대학원과정 박사수료
 현재: 한국전자통신연구원 정보통신기술경영
 연구소 무선산업팀 연구원
 관심분야: 정보통신산업 정책분석, 첨단기술
 의 가치평가



김 태 유

서울대학교 자원공학과 학사

서울대학교 자원공학과 석사

미국 West Virginia 대학 경제학 석사

미국 Colorado School of Mines 경제학 박사

현재: 서울대학교 기술정책대학원과정 주임교수

관심분야: 기술경제정책, 산업기술정책, 과학
기술정책 등