

비용최소화와 환경영향을 고려한 철강기술 평가에 관한 연구 : MARKAL 모형의 응용

김종욱 · 홍종철 · 이장우 · 신희성 · 손재익 · 최기련*

한국에너지기술연구소, *아주대학교 에너지학과

A Study on the Model for Iron and Steel Technology Assessment Considering Cost Minimization and Environmental Effects : An Application of MARKAL Model

Jongwook Kim, Jongchul Hong, Jangwoo Lee, Heesung Shin,
Jaek Son and Giryun Choi*

Korea Institute of Energy Research, *Department of Energy, Ajou University

요 약

1992년을 기준으로 2032년을 목표년도로 한 철강기술의 비용경쟁력과 환경영향을 평가하기 위해 MARKAL(MARKet ALlocation)모형을 적용 하였다. 철강부문의 에너지, 재료, 그리고 기술에 대한 분석을 통해 기준 철강시스템을 설계 하였으며, 특히 국내 철강산업에 대한 분석에 초점을 두었다. 기술 평가는 크게 비용최소화와 환경제약 두 측면을 고려하여 수행 하였으며, 환경제약을 위해서는 3개의 CO₂배출량 규제, 2개의 SO_x비용화 제약방법을 사용하였다. 주어진 비용과 환경 제약하에서 각 철강기술의 경쟁력을 평가 하였으며, 이를 통하여 비용 및 환경영향을 고려한 철강기술 평가에 MARKAL모형의 적용 가능성을 확인하였다.

Abstracts— MARKAL model was applied for assessment of iron and steel technology for the year of 2032 considering cost and environmental effects based on 1992. Technology, energy and material flows were analyzed in iron and steel sector. Reference iron and steel system was designed according to this analysis. Six scenarios were developed considering cost and environmental limitations such as CO₂ emission control and SO_x reduction cost. Competitiveness of technologies in iron and steel sector was assessed under different environmental limitations with cost minimization. Through this study, it was confirmed that MARKAL model can be applied to technology assessment in the field of iron and steel industry.

1. 서 론

기술평가는 기술 수요처에서의 현재 사용기술 분석, 신기술의 도입 타당성 분석을 위해서는 물론, 국가 및 단위산업 차원의 기술개발계획과 특정 현안에 대비한 대응방안 수립 등 광범위한 적용분야를 갖고 있다. 따라서 모든 기술관련 산업 및 정책 수립활동에 있어서 어떠한 형태로든 기술평가가 이루어져 왔으며, 보다 객관적이고 신뢰성이 높은 평가가 가능토록 하기위한 기술

평가모형의 개발이 지속적으로 추진되어 왔다.

특히 에너지기술은 대규모 설비투자를 필요로 하는 것이 많기 때문에 기술의 선택에 따른 위험부담이 타 분야에 비해 상대적으로 크며, 이에 따라 기술선택 및 국가차원의 최적 기술시스템 구축에 적용이 가능한 기술평가모형 개발 노력이 활발 하였다. 한편, 기술평가는 그동안 비용최소화에 주 목적을 두어왔으나, 최근 에너지 사용으로 인한 환경문제가 국내외적으로 크게 부각됨에 따라 기술의 환경영향 평가 측면이 점차 비중을

더해가고 있다.

날로 심화되고 있는 국내의 환경 규제하에서 세계 6위 규모의 생산능력을 갖고있는 우리나라 철강산업은 대표적인 에너지집약 산업 중의 하나로서 규제에 많은 영향을 받을 것이며, 따라서 환경과 비용문제를 만족 시킬 수 있는 중장기 기술선택 대안에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 우리나라 철강부분의 비용과 환경제약을 고려한 중장기 기술선택 대안 분석을 위해 최근 에너지기술평가를 위해 세계적으로 가장 널리 활용되고 있는 모형 중의 하나인 MARKAL모형을 적용 하였다. 철강부분 에너지, 재료, 기술과 이의 상호관계를 상세히 분석하여 기준 철강시스템을 설계하고, 이를 기술평가의 기본으로 활용 하였다. 비용최소화와 환경 제약하에서 철강기술의 경쟁력을 평가 하였으며, 각 제약을 만족시킬 수 있는 최적 기술의 조합을 도출 하였다. 환경계약으로는 CO₂와 SO_x계약이 고려 되었다. 이는 주어진 다양한 조건, 특히 환경 제약하에서의 최적 철강기술 선택을 위한 의사결정을 지원 할 수 있는 기술평가모형과 적용결과를 제시함으로써, 향후 철강분야의 에너지 및 환경 관련 문제 해결에 동 모형의 구체적인 적용 가능성을 검토해보기 위한 것이다.

2. 기술평가모형(MARKAL)

2-1. MARKAL모형의 개요

본 논문에서 철강부분 기술평가를 위해 적용한 MARKAL(MARKet ALlocation)모형은 중장기 기술의 선택, 오염원 배출계약, 기타 에너지정책 대안 도출 등을 위한 최소비용 에너지-환경시스템 계획 모형 이다. 일반적으로 시스템모형은 서로 다른 시나리오 가정하에서 에너지시스템내의 최적 에너지기술의 조합을 계산하기 위해 사용되며, 최적기술의 조합을 도출함에 있어 기술평가를 근본으로 하기 때문에 보통 기술평가모형으로 불리어 진다.

MARKAL모형은 1970년대 후반 IEA주도로 개발 되었다. 이후 현재까지 IEA의 ETSAP(Energy Technology Systems Analysis Programme)을 통해 국제적인 보급 및 추가 개발을 지속하여 현재 34개국 57개 기관 이상에서 활용하고 있으며, 우리나라도 1996년에 ETSAP에 공식 가입하여 동 모형의 활용을 적극 추진 중에 있다. 최근 들어 MARKAL모형은 서로 다른 에너지 정책들의 환경영향을 조사하기위해, 일정부분 또는 전체 에너지 부문에 대한 환경배출의 감소와 전체 배출계약 달성을 위한 정책대안의 검증에 위해 보다 폭 넓게 사용되고 있다.

2-2. MARKAL모형의 특징 및 구조

MARKAL모형은 주어진 수요를 바탕으로 한 일반화된 에너지시스템의 다 주기 선형계획모형(Multi-Time Period Linear Programming Model) 이다. 이는 선택된 목적함수에 대해 최적화(즉, 최대화 또는 최소화)를 의미한다.

MARKAL의 가장 큰 특징이자 장점은 총 시스템할인비용함수(Total System Discounted Function)와 이산화탄소 배출과 같은 환경적도에 기반을 둔 환경함수(Environmental Function), 그리고 안전도함수(Security Function)와 같은 다목적함수(Multi Objective Functions)를 사용할 수 있는 것이며¹⁾, 이외에 최근 탄소세, 정부 보조금 등의 영향을 다양하게 분석 할 수 있는 기능이 추가 되었다. 본 논문의 기술평가를 위해서는 총 시스템 할인비용의 최소화가 사용되었다.

MARKAL은 선형의 다목적함수(Multiple Linear Objective Functions)와 제약식을 갖고며, 하나의 목적함수와 이에 대한 제약식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z &= \sum_{j=1}^n C_j X_j \\ \text{Subject to } \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j &\leq b_i \quad i=1, \dots, m \\ u_j \geq x_j &\geq l_j \geq 0 \quad j=1, \dots, n \end{aligned}$$

여기서 c_j , a_{ij} 는 각각 목적함수와 제약조건에서의 계수 들이고, b_i (RHS)는 각각의 제약식에서의 계수 및 상수의 값으로써 사용자에게 의해 입력으로 정의되는 것들이며, 해로서 구하고자 하는 것은 x_j 의 값이다.

MARKAL은 기술중심모형(Technology-Oriented Model)이며, 에너지원의 공급은 주어진 가격에서 이용 가능한 자원을 나타내는 공급곡선에 의해 표현된다. 주요 기술입력자료는 사용 및/또는 생산된 연료, 투자, 고정 및 변동운영비, 효율과 이용률 같은 기술특성데이터, 그리고 시장침투율, 오염원 배출계수 및 토지사용과 같은 환경지수 등이며, 이들은 목적에 따라 사용자에게 의해 선택적으로 정의된다.

MARKAL모형의 결과로는 1차에너지의 조합(mix), 연료의 조합, 기술의 조합(각 기술의 용량 및 이용률), 모든 직접투자, 운영 및 연료비용, 그리고 각 기술, 연료, 환경계약의 한계비용 등이 도출된다.

MARKAL모형은 신기술의 조사 및 평가, 투자에 대한 잠재회수(재정 및 환경적 측면) 결정, 국가, 지역 또는 특정 목적을 위한 에너지기술시스템 구축계획 수립, 기술개발계획 수립 및 투자비용, 에너지사용패턴의 전환 결정을 위한 다양한 에너지관련 환경제어 정책(예, 탄소세) 수립, 온실가스 배출 저감을 위한 비용효과적인

방법 도출, 수송방법의 변경, 산업부문 에너지조합의 변화, 에너지절약기술의 채택, 새로운 에너지사용과 같은 에너지사용 패턴의 잠재적변화 결과를 기술적, 경제적 및 환경적 측면에서 예측화 같은 분야에 적용 또는 응용될 수 있다.

3. 철강시스템 분석 및 기준철강시스템 설계

기술평가를 위하여 일반적인 철강공정 및 기술, 우리나라 철강시스템에 대한 분석을 수행 하였다. 세계적인 철강기술 이용 및 개발 현황과 우리나라의 경우를 분석 하였으며, 각 기술에 대한 특성분석을 아울러 포함 하였다. 또한 우리나라 철강산업의 설비능력 및 생산실적을 기술을 중심으로 분석 하였으며, 사용 에너지와 재료의 종류 및 수급, 그리고 주요 생산품, 에너지, 재료의 가격 동향을 파악 하였다.

우리나라 철강시스템 분석은 1992년을 기준으로 수행 되었으며, 이는 에너지총조사 등 에너지관련 통계의 이용성에 따라 결정 되었다. 우리나라의 1992년 총 조강생산 설비능력은 32,155천톤 이었으며, 전로 20,500천톤과 전기로 11,655천톤으로 구성 되었다. 생산은 전로 19,587천톤, 전기로 8,467천톤, 총 28,054천톤 이었다²³⁾. 1992년도 기준 철강부문의 에너지소비는 332.52PJ로 분석 되었다⁹⁾. 주요 재료로 1992년에 철광석 2,900만톤, 고철 11,949천톤, 합금철 477천톤이 공급 되었다²³⁾.

철강기술 분석 결과를 토대로 평가대상기술을 3가지 유형으로 분류 하였다. 첫번째는 우리나라에서 현재 사

용하고 있는 기술(1992년 기준), 두번째는 현재 이용 가능하나 우리나라에서는 아직 채택하고 있지 않은 기술, 세번째는 현재 개발 중으로 머지 않은 장래에 이용 가능한 신기술이다. 이는 기술평가에 있어서 새로운 기술의 투입시점이 매우 중요한 점을 고려한 것이다. 또한 기술분류상의 명확성을 위해 각각의 기술유형을 전처리, 제선, 제강, 주조, 압연기술로 다시 분류하였다. Table 1은 평가대상기술을 나타낸 것이다⁵⁻¹⁰⁾.

철강시스템 분석 결과를 토대로 기준철강시스템을 설계 하였다(Fig. 1). 이는 평가의 범위와 평가요소를 결정 함으로써 기술평가의 기본모형을 정의하기 위한 것이다. 따라서 기준철강시스템은 에너지, 재료, 기술 등 평가의 모든 요소와 이들 사이의 관계를 모델링 측면에서 재 분석하여 종합 정의한 것이다.

일반적인 에너지시스템의 최종 수요는 에너지이나, 철강시스템에서는 수요를 제품으로 정의 하였다. 철강시스템 분석결과 철강부문의 수요는 어느 시점에 얼마만큼의 철강제품이 필요 할 것인가의 형태로 나타나며, 따라서 제품을 수요로 정의함이 타당하다고 판단 하였다.

기준철강시스템에 정의된 기술은 Table 1의 분석결과에 따른 것이며, 여기에 실제 공정의 구성을 반영하여 설계 하였다. 주조기술 중 연속주조는 고품질과 저 품질 제품 생산 기술로 구분 되었으며, 이는 연속주조기술이 고품질의 제품을 생산하는 고로와 전로로 이어지는 일관제철 공정에서는 물론 일반적으로 저 품질의 제품이 생산되는 고철을 이용한 전기로공정에서도 사용되기 때문에 각각의 공정에 맞는 주조기술의 정의를 위한 것이

Table 1. Selection of iron and steel technologies for assessment.

	Technology I	Technology II	Technology III
Pre-processing Technology	- Sintering - Pelletizing - Coking - Oxygen Enrichment		
Ironmaking Technology	- Conventional Blast Furnace - Blast Furnace with Coal Injection	- COREX - Coal-based Direct Reduction - Gas-based Direct Reduction	- Blast Furnace with Plasma Injection
Steel making Technology	- Basic Oxygen Furnace - Electric Arc Furnace (Scrap Based)	- Coal-based Direct Reduction Iron/EAF - Gas-based DRI/EAF	
Casting Technology	- Continuous Casting - Thin Slab Casting		- Near Net Shape Casting
Rolling Technology	- Hot Rolling - Cold Rolling		

주) - Technology I: 현재 우리나라에서 사용기술
 - Technology II: 현재 이용가능하나, 우리나라에서 사용하지 않는 기술
 - Technology III: 현재 개발중인 신기술

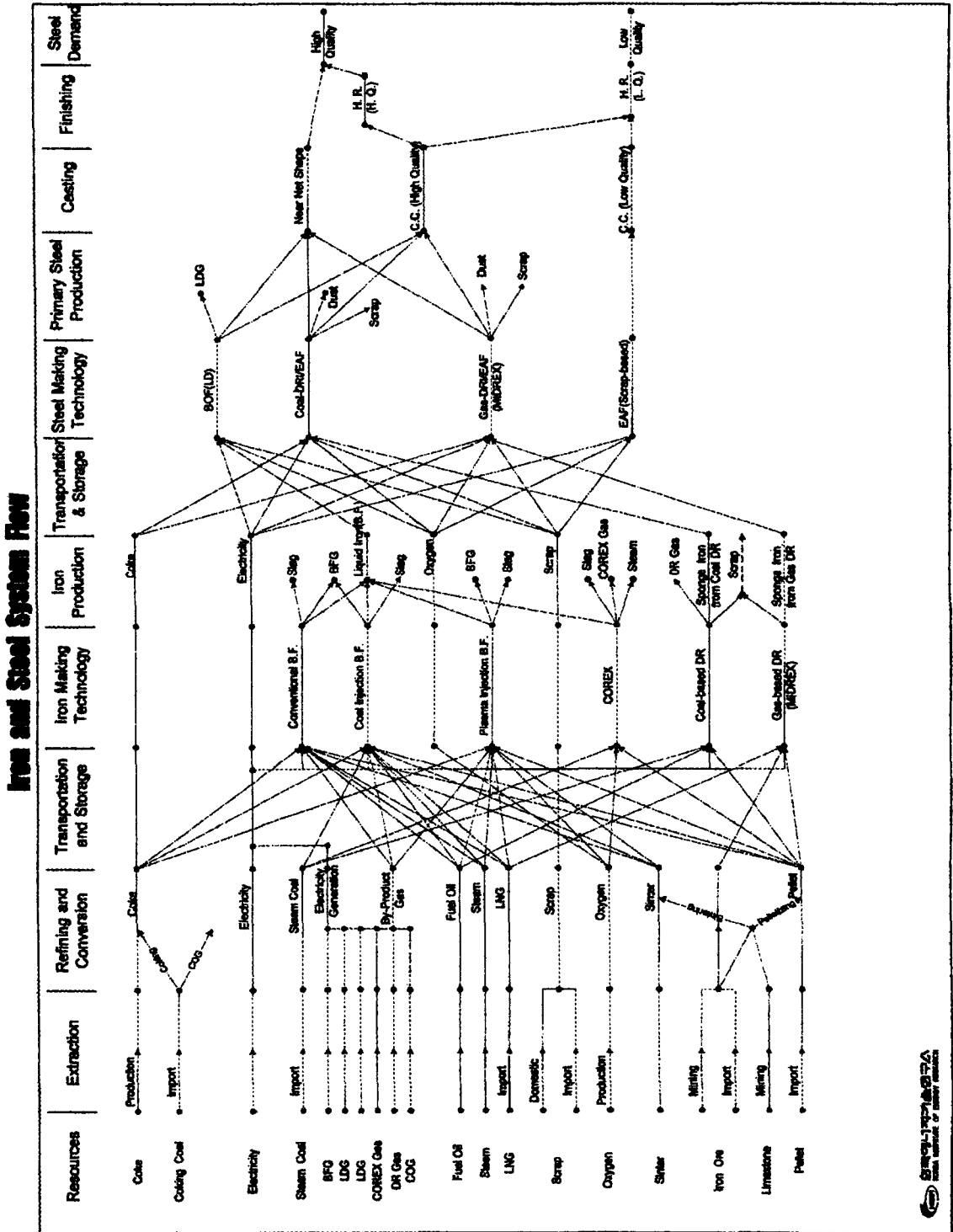


Fig. 1. Reference iron and steel system.

다. 따라서 압연도 고품질과 저 품질 압연기술로 구분되었으며, 고품질 압연기술은 고품질 연속주조기술로부터의 제품만을 저 품질 압연기술은 저 품질은 물론 고품질 연속주조기술로부터의 제품도 이용가능토록 설계하였다.

철강부문에서 사용되는 에너지로는 유연탄(연료탄, 원료탄), 코크스, 전기, 연료유, 천연가스, 스팀, 그리고 공정기술로부터의 부생가스등이 정의 되었으며, 부생가스는 COG(Coke Oven Gas), BFG(Blast Furnace Gas), LDG(LD Gas), COREX Gas, DR(Direct Reduction) Gas로 구분하였다. 에너지 중 유연탄, LNG, 연료유는 수입 공급, 기타는 국내공급 및 자체생산 공급으로 정의 하였다.

철강을 생산하기 위해 직접 사용되는 원료 및 중간생산물 모두를 포함하여 재료로 정의 하였으며, 공정에서 부생 되는 부산물 역시 포함 하였다. 재료의 종류로는 철광석, 고철, 석회석, 산소, sinter, pellet, 선철, sponge iron, 철, 슬래그 등이 정의 되었다. 이중 철광석, 고철, pellet은 국내생산과 수입 모두를 통해 공급 될 수 있는 재료로 정의 하였으며, 나머지는 모두 국내공급이나 자체생산이 가능한 것으로 정의 하였다.

4. 철강기술 평가

4-1. 기술평가 방법

기술평가는 철강시스템 분석 결과와 기준철강시스템을 기본으로 하여 수행 되었으며, MARKAL모형이 적용 되었다. 따라서 모든 분석 및 정의 내용은 MARKAL모형을 이용하여 구현 되었다.

MARKAL모형을 이용한 기술평가는 사용자에게 의해 기술용도별(예, 제강 부문)로 정의된 수요를 역시 주어진 목적함수와 제약하에서 만족시킬 수 있는 철강시스템 설계를 통해서 이루어지며, 이 과정에서 최적 철강기술의 조합이 도출된다. 최적 철강시스템의 설계는 기본적으로 기술들 사이의 경쟁에 바탕을 두고 있으며, 경쟁은 동일한 기술용도에 속하는 기술들 사이에서 이루어진다. 즉, BOF, EAF가 제강 기술로 정의되었다면, 주어진 강 제품 수요는 이들 기술에 의해서만 충족될 수 있으며, 어떤 기술이 수요 충족을 위해 많이 이용 되는가에 따라 기술의 경쟁력이 평가된다. 기술의 경쟁력 평가를 위해 기술별로 기술 및 비용 특성자료가 요구되며, 비용최소화가 목적일 경우 가장 싸게 수요를 만족시킬 수 있는 기술의 점유율이 가장 클 것이다. 이 과정에서 시스템 비용을 최소화 할 수 있는 기술의 조합이 선택된다.

신기술의 경우 신기술의 미래 경쟁력을 예측 평가하기 위해 예측 가능한 기술 및 비용특성자료를 이용 하였

으며, 현재 기존기술의 조합으로 구성되어있는 시스템에 동일 기술용도로 사용될 수 있는 신기술을 투입하여 주어진 조건하에서 모형을 통해 평가해봄으로써, 신기술의 경쟁력이 평가 될 수 있도록 하였다.

또한 기술에 의해 사용되는 에너지원별로 오염물질 배출계수를 정의 하고, 전체 배출 총량 또는 이를 비용화 제약하는 방법을 사용하여 각 기술의 주어진 환경제약 하에서의 경쟁력을 평가 하였다. CO₂의 경우 강제적으로 일정한 수준의 규제 목표치를 설정하여, 최소비용으로 규제를 만족시킬 수 있는 기술의 조합을 도출함으로써 경쟁력이 평가 될 수 있도록 하였으며, SO_x는 제거비용을 비용화 하여 제약할 경우 기술의 경쟁력 변화를 평가 할 수 있도록 하였다.

4-2. 기술평가 시나리오

4-2-1. 기준 시나리오

미래의 평가기간 동안에도 에너지가격, 수요, 공급안정도 등의 측면에서 특별한 상황변화 없이 현재의 여건이 지속된다는 가정하에 에너지시스템비용의 최소화를 목적으로 한 시나리오이다.

4-2-2. 환경제약 시나리오

- CO₂ 배출제약 시나리오: 주어진 규제 수준에 따라 국가 배출 총량을 제약하는 방법을 사용 하였다.
- CO₂-2000년 수준: 우리나라가 1996년에 OECD에 가입 하였지만, 2000년까지 CO₂ 배출량 제약을 유예 받을 경우 가정-기후변화협약 국가보고서¹⁾의 2000년 배출량 예측치 적용
- CO₂-1997년 수준: 우리나라가 OECD에 가입한 1996년을 기준으로 배출량을 제약할 경우-1996년 배출 실적 산출에 어려움이 있어, 1997년 모형 결과를 적용
- CO₂-1990년 수준: 우리나라도 다른 선진 OECD국가들과 같이 1990년 기준의 배출제약을 적용 받을 경우-기후변화협약 국가보고서¹⁾의 1990년 배출 실적치 적용
- SO_x 배출제약 시나리오: 모든 SO_x배출기술에 배출량에 따라 탈황비용을 부가 함으로써, 비용제약 효과를 얻을 수 있도록 하였으며, 저 비용과 고 비용 두 가지 경우를 가정 하였다.
- SO_x-Low Cost: 탈황비용으로 \$ 930/SO_x톤 적용
- SO_x-High Cost: 탈황비용으로 \$ 1,520/SO_x톤 적용

4-3. 평가의 주요 전제사항

4-3-1. 평가기간

평가는 1992년을 기준으로 2032년까지 5년 단위로 수행 하였으며, 따라서 전체 평가기간은 5년 단위의

Table 2. Price of energy and material.

	Energy & Material	Price		Energy & Material	Price
	Anthracite Coal	\$41.53/ton		Asphalt	\$26.59/bbl
	Coking Coal	\$57.29/ton		Steam Coal	\$46.03/ton
	Bunker-A	\$26.88/bbl		Bunker-B	\$26.88/bbl
	Bunker-C	\$15.54/bbl		Butane	\$15.6/bbl
Import	Diesel	\$25.46/bbl	Import	Jet Oil	\$28.0/bbl
	Kerosene	\$27.11/bbl		Crude Oil	\$18.54/bbl
	LNG	\$184.6/ton		Naphtha	\$22.0/bbl
	Propane	\$14.8/bbl		Uraium	0.73 Mio
	Scrap	\$125/ton		Iron Ore	\$24.86/ton
Mining	Anthracite Coal	\$97.44/ton	Mining	Scrap	\$100/ton
	Bunker-A	\$26.88/bbl		Bunker-B	\$26.88/bbl
	Bunker-C	\$13.3/bbl		Butane	\$18.0/bbl
Export	Propane	\$15.8/bbl	Export	Diesel	\$25.4/bbl
	Jet Oil	\$27.6/bbl		Naphtha	\$20.7/bbl
	Solvent	\$28.1/bbl			

9개 시간주기(Time Period)로 구분 된다. 또한 기술평가에서 평가년도는 각 시간주기의 중심년도를 의미한다(1992년은 주기 1의 중간년도).

4-3-2. 할인율

일반적으로 전원계획 수립등에 적용되는 8%를 적용하였다.

4-3-3. 에너지 및 재료 가격

1992년도의 에너지 및 재료의 실제 가격자료를 조사하여 기준으로 적용 하였다(Table 2).

4-3-4. 자원 이용에 관한 주요 제약

- 철광석 생산: 계획기간 동안 1992년 생산량 보다 지속적으로 감소
- 고철 생산: 가격은 상승하나 국내 생산 공급량은 꾸준히 증가

4-3-5. 오염물질 배출계수

Table 3 참고

Table 4 참고

4-3-6. 조강수요 정의

1992년 우리나라 조강생산량을 기준으로 2032년까지 미래 계획기간 동안의 수요를 정의 하였다. 여기서 수요

Table 3. SOx emission coefficient by each emission source.
(unit: thousand ton SOx/PJ)

Energy Source	Emission	Energy Source	Emission
Anthracite Coal	0.64	Bituminous Coal	0.35
Crude Oil	0.47	Petroleum Products	0.47

Table 4. CO₂ emission coefficient by each emission source.
(unit: thousand ton C/PJ, ton/ ton*)

Energy Source	Coefficient	Energy Source	Coefficient
Anthracite Coal	25.8	Bituminous	25.8
Crude Oil	20.0	Gasoline	18.9
Bunker-A	21.2	Bunker-C	21.2
Bunker-B	21.1	Diesel	20.2
Jet Oil	19.5	Naphtha	20.2
Asphalt	20.0	Solvent	20.0
Butane	17.2	Propane	17.2
LNG	15.8	Firewood	29.9
Iron Ore*	0.4		

Table 5. Define of future steel demand.
(unit: million tons)

	1992	1997	2002	2012	2032
Demand	28.05	42.24	45.0	60.0	80.0

는 국내 최종소비 수요가 아니고 생산량을 의미한다. 2010년까지는 철강관련기관이 발표한 자료¹⁸⁾의 전망치를 준용 하였고, 이후는 수요증가 추세가 향후에도 지속된다는 가정하에 수요를 정의 하였다(Table 5).

4-3-7. 고철가격

고철은 제강 부문에서 중요한 영역을 차지하고 있으며, 또한 이 역할이 계속 증대 될 것으로 전망된다. 따라서 이의 수급에 따른 가격은 평가에서 중요변수가 되므로

특히 다양한 가격 시나리오를 구성하여 정의 하였다.

고철의 공급 경로는 크게 국내와 수입공급으로 구분할 수 있으며, 이를 가격시나리오 설정에 반영 하였다. 단, 국내공급의 경우 철강업 자체의 자가발생 고철의 경우는 자체공정에서 소비되기 때문에 의미가 없으므로 고려하지 않았다.

1992년도 고철 공급량은 수입고철 3,132천톤, 국내고철이 6,250천톤이었으며, 수입고철 가격은 124달러/톤, 국내고철은 104달러/톤이었다⁹⁾. 고철의 가격시나리오는 이를 기준으로 설정 되었으며, 아울러 1992년 이후의 가격 실적자료도 참고 되었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 설정된 수입 및 국내고철의 수요에 따른 가격 시나리오를 나타낸 것이다. 가격은 수요가 9, 5, 15, 25, 45백만톤, 그리고 45백만톤 이상일 경우로 나누어 정의 되었으며, 이는 2032년의 조강생산량 전망치가 80백만톤인 점을 고려한 것이다.

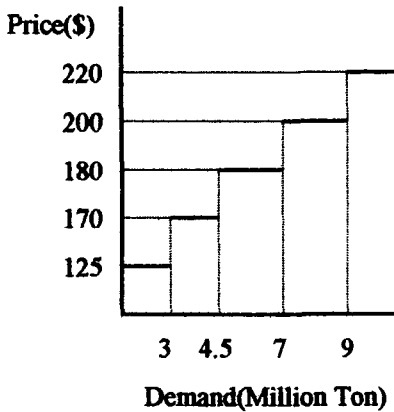


Fig. 2. Price scenario of import scrap.

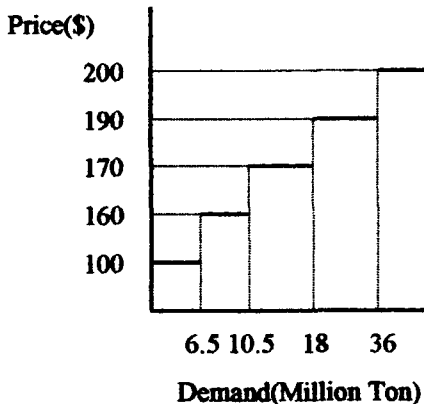


Fig. 3. Price scenario of domestic scrap.

가격의 범위는 수입고철의 경우 125달러/톤에서 220달러/톤, 국내고철의 경우 100달러/톤에서 200달러/톤까지로 하였으며, 수입의존율은 수요가 9.5백만톤일때 33%에서 45백만톤일 경우 25%까지 점차 감소하는 것으로 정의 하였다.

5. 주요 평가결과 및 고찰

5-1. 제선기술

제선 기술에는 전통적인 고로(BF-Conventional), 석탄취입 고로(BF-Coal Injection), 플라즈마 이용 고로(BF-Plasma Injection), COREX, 직접환원-석탄(DR-Coal Based), 직접환원-가스(DR-Gas Based, MIDREX)기술이 평가에 포함 되었다.

기준 시나리오하에서는 제선 기술 중 BF-Coal Injection기술의 경쟁력이 가장 높은 것으로 평가 되었다. 현재 사용되고 있는 BF-Conventional기술은 Coal-Injection기술에 비해 경쟁력이 낮은 것으로 나타났다. COREX기술은 약간의 경쟁력을 갖는 것으로 평가 되었으나, 이는 현재 가지고 있는 설비에 의한 영향이며, 신규 COREX설비의 경쟁력은 상당히 낮게 평가 되었다. 직접환원기술은 비용면에서 모두 경쟁력이 없는 것으로 평가 되었다(Fig. 4).

CO₂제약하에서 제선 기술 평가의 가장 큰 특징은 제선 기술에 의한 철 생산량이 큰 폭으로 감소한 것이다. 이는 제선 기술에 의한 CO₂배출이 많으므로 다른 공정 루트로부터의 철 공급이 CO₂제약에 적합함을 의미한다. CO₂제약 시 모든 제선 기술의 경쟁력은 제약의 커질수록 낮아졌으며, 기술들 사이의 경쟁력은 기준 시나리오하에서와 동일한 흐름을 보였고, BF-Coal Injection의 경쟁력이 가장 높았다(Fig. 5).

SO_x제약하에서의 제선 기술은 기준 시나리오하에서

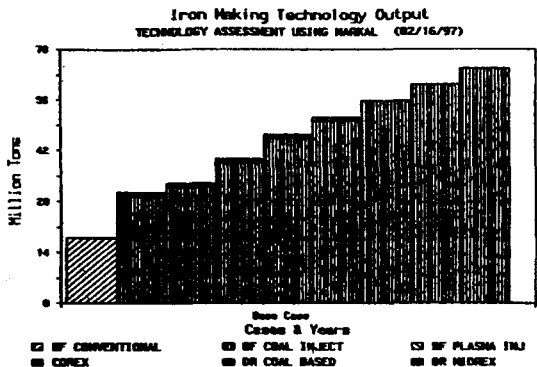


Fig. 4. Ironmaking technology-base case.

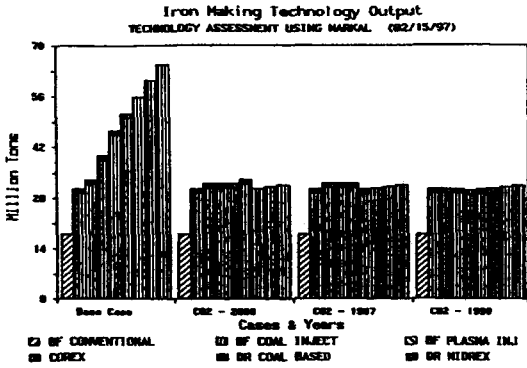


Fig. 5. Ironmaking technology-CO₂ case.

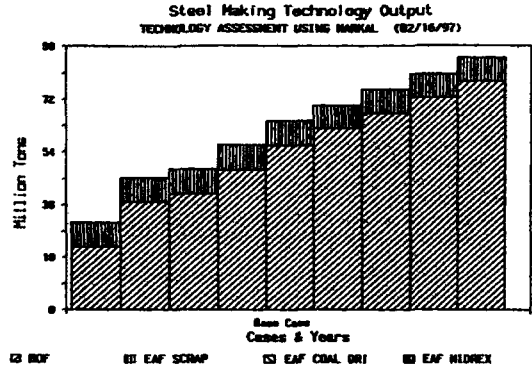


Fig. 7. Steelmaking technology-base case.

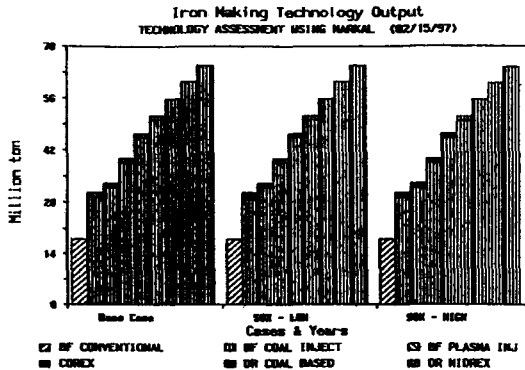


Fig. 6. Ironmaking technology-SO_x case.

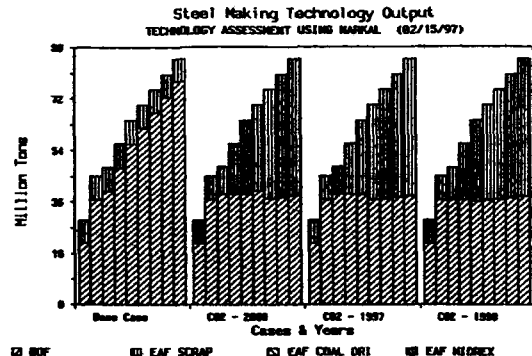


Fig. 8. Steelmaking technology-CO₂ case.

의 거의 동일한 결과를 나타냈다. 제선 기술에 의한 생산량이 약간 감소하는 것으로 나타났으나, 이는 아주 미미하여 무시 할만한 수준 이었다. 기술별 경쟁력 역시 BF-Coal Injection이 가장 우수한 것으로 평가 되었다. 따라서 주어진 SO_x제약 비용 수준은 제선 기술의 선택에 별다른 영향을 미치지 못하는 것으로 평가 되었다(Fig. 6).

5-2. 제강 기술

평가에 포함된 제강 기술은 크게 전로(BOF)와 전기로(EAF)로 구분 할 수 있으며, 전기로에는 고철이용 전기로(EAF-Scrap), 직접환원철(석탄) 이용 전기로(EAF-Coal DRI), 그리고 직접환원철(가스) 이용 전기로(EAF-Gas DRI, MIDREX)가 있다.

기준 시나리오하에서는 제선 공정기술에서 생산된 철을 이용하는 연계 공정 기술인 BOF의 경쟁력이 가장 높은 것으로 나타났으며, 고철이용 전기로의 비용 경쟁력은 낮은 것으로는 평가 되었다. 기타 DRI이용 전기로 기술은 직접환원공정의 경쟁력이 낮음에 따라 역시 경쟁력이 없는 것으로 나타났다(Fig. 7).

CO₂제약하에서는 제강기술 중 EAF-Scrap의 경쟁력이

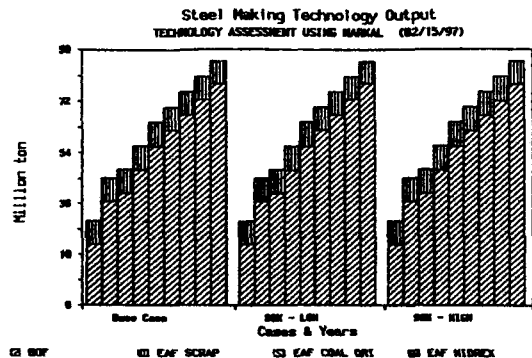


Fig. 9. Steelmaking technology-SO_x case.

가장 뛰어난 것으로 평가 되었다. 이는 동 기술이 전처리 및 제선 공정을 필요로 하지 않으며, 이에 따라 CO₂발생이 가장 적기 때문으로 분석된다. BOF 역시 기준 시나리오하에서 보다는 낮지만 꾸준한 경쟁력을 갖고 있었다(Fig. 8). 제강기술의 경쟁력은 제선 기술과 마찬가지로 SO_x제약하에서 기준 시나리오에서의 거의 같은 결과를

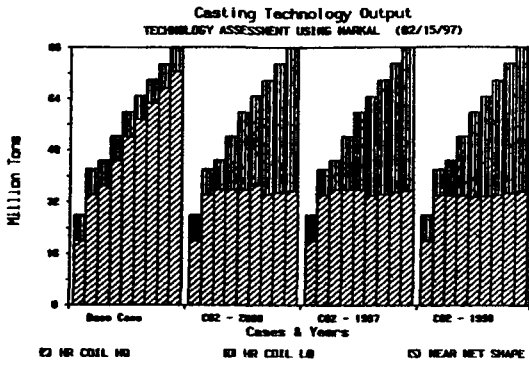


Fig. 10. Casting technology-base case and CO₂ case.

나타냈다. 기준 시나리오에 비해 미미하게 경쟁력이 약화되는 경향이 있었으나, 큰 의미는 없었다(Fig. 9).

5-3. 주조기술

주조기술에는 열연(HR)과 Near Net Shape기술이 포함되었으며, HR은 고품질(High Quality, HQ)과 저품질(Low Quality, LQ)으로 구분 하였다.

기준 시나리오하에서는 고로, 전로와 연계공정 기술인 HR-HQ기술이 가장 경쟁력이 높은 것으로 평가되었다. 고철이용 전기로와 연계된 HR-LQ기술도 비교적 낮지만 꾸준한 경쟁력을 지속 하였다. Near Net Shape 기술은 현재의 개발 수준으로는 경쟁력이 없는 것으로 평가 되었다(Fig. 10).

CO₂제약하에서는 고철이용 전기로(EAF-Scrap)와 연계된 HR-LQ의 경쟁력이 우수한 것으로 평가 되었으며, BOF와 연계된 HR-HQ기술은 기준 시나리오하에서 경쟁력이 낮은 것으로 나타났다. Near Net Shape기술은 기준 시나리오하에서와 같이 경쟁력이 없는 것으로 평가 되었다(Fig. 10). SO_x비용제약은 주조기술의 선택에 전혀 영향을 미치지 못하였으며, 기술의 경쟁력 및 이용정도는 기준 시나리오하에서와 동일한 결과를 나타냈다.

6. 결 론

본 논문에서는 철강기술의 비용경쟁력과 환경영향 평가에 MARKAL모형을 적용 하였으며, 평가를 위해 철강시스템에 대한 분석을 수행 하였다. 적용결과 주어진 목적함수와 제약조건, 그리고 각 시나리오를 만족시키는 해를 산출 하였다. 결과분석을 통해 동 모형과 사용된 기술평가방법이 철강분야의 비용최소화와 환경문제를 고려한 제반 기술선택 의사결정에 많은 기여를 할 수 있으며, 특히 기술별 또는 각종 환경정책대안의 효과 및 영향을 평가해볼 수 있는 아주 적절한 수단이 될 수

있을 것으로 판단 된다.

그러나 현재로서는 기술평가, 대규모 에너지계획 모델링에 따르는 자료선정의 객관성 및 신뢰성, 특히 신기술에 대한 불확실성 문제에 대해 완전하지는 못한 상태이고, 모델링 범위 또한 에너지와 관련이 많은 주요 공정기술 위주로 제한되어 있으며, 이는 계속 연구 보완해 나가야 할 과제이다. 앞으로 보다 다양한 기술개발 시나리오의 설정, 현실적인 제약조건 추가, 기술자료의 신뢰도 증진을 통하여, 본 논문에서 제시한 평가방법이 철강부문의 비용 및 환경문제등에 대비한 기술평가, 중장기 기술개발계획 수립 등에 유용하게 적용 될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 통상산업부 출연 연구 사업인 "지구환경을 고려한 에너지자원 기술정책방향" 연구의 일환으로 수행된 것으로 통상산업부 관계자 여러분께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1. 신희성의: "CO₂ 배출량 저감을 고려한 국내 에너지 공급시스템 분석: 시장배분모형(MARKAL)의 응용", 한국경영과학회지, 18(1), pp. 79-95 (1993).
2. "철강연감", 한국철강협회 (1995).
3. "철강기초지식", 철강신문사 (1996).
4. "에너지총조사 보고서", 상공자원부 (1993).
5. "Energy Efficiency Improvement Utilizing High Technology, An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings, Report & Case Studies", World Energy Council (1995).
6. "Technoeconomic Assessment of Electric Steel-making through the Year 2000", EPRI (1987).
7. "Energy Audit Series, No. 16, Energy Consumption and Conservation in the Iron and Steel Industry", UK Department of Energy and Department of Industry (1982).
8. "Energy and the Steel Industry", International Iron and Steel Institute (1982).
9. "Steel Product Quality and Maximum Utilization of Scrap", UN (1992).
10. Future Iron Making Processes Proceedings", Steltech (1990).
11. J.C. Ho and S.K. Chou: "Energy Audit of a Steel Mill", Energy, 16(7), pp. 1021-1029 (1991).
12. John Olof Edstrom, "The Balanced Oxygen Blast Furnace Compared with other alternatives for Hot

- Metal production", Scandinavian Journal of Metallurgy (1993).
13. C.M. Van Aswegen: "The Latest Development in COREX production and maintenance performance", 1995 Iron making Conference Proceedings, pp. 513-520 (1995).
 14. Alim Ullah: "Technical, Financial, and Managerial Considerations in the production of DRI", 1995 Iron making Conference Proceedings, pp. 459-465 (1995).
 15. R. Henstra: "The Blast Furnace in 21st century", 1994 Iron making Conference Proceedings, pp. 197-201 (1994).
 16. Rolf Stiffen, "Direct Reduction and Smelting Reduction-an overview", Steel Research (1989).
 17. "기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구", 에너지경제연구원 (1994).
 18. "Projection of CO₂ Emissions for Steel Industry in Korea-Asia Integrated Model for Korea", Proceedings of International Workshop on Response Strategies to Climate Change in the Steel Industry, KEEI, POSRI (June 15, 1995)