

시스템다이내믹스를 이용한 탄소세 부과가 철강 산업에 미치는 효과 분석

The Effect of the Carbon Tax on Steel Industry using System Dynamics

정석재* · 송재호** · 김경섭*** · 박진원****

Jeong Suk Jae* · Song, Jae-Ho** · Kim Kyung Sup*** · Park Jin Won****

Abstract

Changes in material use, energy use and emissions profiles of steel industry are the result of complex interrelationships among a multitude of technological and economic drivers. To better understand and guide such changes requires that attention is paid to the time-varying consequences that technology and economic influences have on an industry's choice of inputs and its associated outputs.

We briefly review the range of policy issues in our paper and assess the impact that climate-change policies may have on energy use and carbon emissions in Korea steel industry. We then present the models of Korea steel industry's energy and product flow regarding environmental regulations by using system dynamics simulation methodology(SD). Time series data and engineering information are combined to endogenously specify changes in technologies, fuel mix, and production processes within dynamic simulation model. Through a various scenario, ramifications that the convention of climate change would to steel industry is analyzed, and based on the study results, strategies against environment changes is contemplated in various perspectives to contribute to minimize the risks concerning the uncertain future and to be conducive to Korea steel industry's sustainable development.

Keywords : Steel Industry, Convention of Climate Change, Simulation Modeling, System Dynamics

* 연세대학교 정보산업공학과 박사과정(jae7811@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 정보산업공학과 박사과정(marl7@yonsei.ac.kr)

*** 연세대학교 정보산업공학과 교수(kyungkim@yonsei.ac.kr)

**** 연세대학교 화학공학과 교수(jwpark@yonsei.ac.kr)

I. 서론

끊임없는 변화와 발전을 통해 우리 철강산업은 세계수준의 철강산업으로서의 입지를 확고히 다져왔다. 그러나 새로운 세기에 접어들면서 국내외의 거대한 변화의 물결은 피할 수 없는 커다란 도전으로 다가오고 있어 우리의 철강산업은 이에 걸맞게 변화하지 않으면 도태될 수 밖에 없다는 우려의 목소리가 높아지고 있다.

21세기에 철강산업에 크게 영향을 미칠 것으로 예측되는 대내외 환경변화로는 기후변화협약의 등장과 시장경쟁질서가 중요시되는 새로운 패러다임으로의 전환을 꼽을 수 있을 것이다. 대내외적으로 외환위기를 거치면서 우리사회는 급속한 시장경제로의 패러다임 변화가 이루어지고 있으며, 공기업 체제의 산업조직은 민영화 및 경쟁체제를 중심으로 재편되어가고 있다. 우리의 고질적인 병폐로 지적되는 에너지 다소비 경제·사회구조와 원유가격의 폭등으로 인해 국제수지가 악화되고 국내 경기가 매우 흔들리는 현상을 보이고 있다. 이에 대한 근본 원인은 에너지 가격이 선진국에 비해 낮기 때문인 것으로 분석되며, 특히 석탄 및 증유를 포함한 석유류의 에너지 가격은 철강의 생산 및 소비 패턴에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

대외적인 환경변화로는 지구온실가스 배출로 인한 자연피해를 최소화하자는 국제적 노력의 일환으로 등장한 기후변화협약을 꼽을 수 있다. 아직 가시화되지는 않았지만, 우리나라도 가까운 시일 내에 이러한 국제적 노력에 동참할 수 밖에 없을 것으로 판단되며, 포스코와 같은 철강회사의 경우, 주원료인 석탄이 온실가스 배출기여도가 타 연료에 비해 매우 높기 때문에 기후변화협약이 현실화될 경우, 회사 운영에 막대한 영향을 받을 수 밖에 없다. 더욱이 선진국이 기후변화협약을 무역장벽의 도구로 사용하려는 움직임이 보이고 있어 이에 대한 철저한 준비가 없으면 철강 산업의 지속적인 성장은 기대하기 어려울 것이다.

또한, 전문가들의 지적에 따르면, 기후변화협약은 에너지 다소비 경제와 원유가격 폭등에 더욱 더 가속을 붙일 것으로 전망하고 있다. 기후변화의 대표적 원인으로 지목 받고 있는 이산화탄소 배출규제를 포함해서 대기환경오염을 일으키는 온실가스의 배출가스 규제 등이 이미 표면화되고 있으며, 향후 점점 더 강화될 예정이다. 이러한 환경중시 패러다임은 포스코의 환경정책에도 큰 영향을 미칠 것으로 전망된다.

이에 본 연구에서는 환경규제를 고려한 포스코의 에너지·제품 흐름을 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 시뮬레이션 기법으로 모델링하고, 시나리오를 설정하여 기후변화 협약이 포스코에 가져올 과급효과를 분석하였으며, 이상의 연구결과를 바탕으로 환경변화에 대한 대응전략을 다양한 각도에서 조명함으로써 미래의 불확실성에 따른 위험을 최소화하고 포스코의 지속적 발전에 도움이 되고자 한다.

논문의 내용을 간략히 소개하면 다음과 같다. 우선 2장에서는 기존 연구 고찰로써 연구의 방법론을 소개하고, 기존 연구와의 차별성을 살펴보았다. 본 연구에서 이용한 시스템 다이나믹스 시뮬레이션 구조 및 모델을 3장에서 설명하였으며, 4장에서는 제시한 모델의 타당성을 검증하였다. 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과는 5장에서 분석하였으며, 이상의 분석을 통해 6장에서 결론 및 향후 연구 진행 방향을 제시하였다.

II. 기존 연구

지난 수십 여 년간 에너지, 환경부문의 상호연관성을 모델화하기 위한 다양한 시뮬레이션 방법론이 개발, 이용되어 왔다. 주요 방법론은 투입-산출(I-O) 모델, 계량 경제(Economic model) 모델, 연산가능 일반균형 (CGE) 모델 및 최근 각광을 받고 있는 시스템 다이나믹스 (System-Dynamics) 모델이 바로 그것들이다. 이하에서는 위에서 언급한 주요 모델 기법에 대해서 소개하기로 한다.

Leontief(1951)에 의해 개발된 투입-산출(I-O) 모델은 산업간의 관계를 선형으로 표현하는 방법으로, 때때로 최적화 문제에 대한 해답을 제시하는 수리적 프로그래밍의 한 형태로 간주되기도 한다. 투입-산출 모델은 일정기간 중 생산된 모든 재화와 용역의 각 산업간 거래, 최종수요부문과 산업간의 거래, 투입요소부문과 산업간의 거래를 일정한 기록원칙에 따라 행렬 형식으로 기록, 분석하는 도구로 많이 이용되고 있다.

경제의 일반균형적인 성격을 묘사한다는 의미에서 투입-산출 모델과 유사하다. 대규모의 거시경제학적 방정식 체계를 사용하는 계량경제 모델은 에너지·경제·환경부문의 상호작용을 보다 광범위하게 표현할 수 있으며, 내생적으로 수요 수준 및 가격을 결정할 수 있다. 계량경제 모델에서의 모형 설계는 기존 경제이론에 기초하고 있으며, 대개 종속변수와 독립변수들의 함수형태로 표현된다.

최근에는 연산가능일반균형(CGЕ) 모델이 국내 경제학자들 가운데 상당히 인기를 모으고 있으며, 이와 관련된 여러 연구사례들이 있다. CGE모델의 큰 장점은 외생적인 변화의 효과가 적어도 원칙적으로 전체 시스템을 통하여 추적될 수 있다는 것이다. 모델에 규정되는 모든 시장에 대한 수요 및 공급방정식을 설정하면 이 모델은 가격, 수요 및 자원 대체등을 내생적으로 결정한다. 따라서 본 모델은 미래의 사회-경제-환경적 시나리오에 대한 장기적인 분석에 유용하다.

본 연구에서 채택한 방법인 시스템 다이나믹스 접근법은 하나의 시스템을 여러 작은 부분으로 분리하는 다른 방법론과는 달리 전체론적 관점을 채택하고 있다. 이러한 방법론의

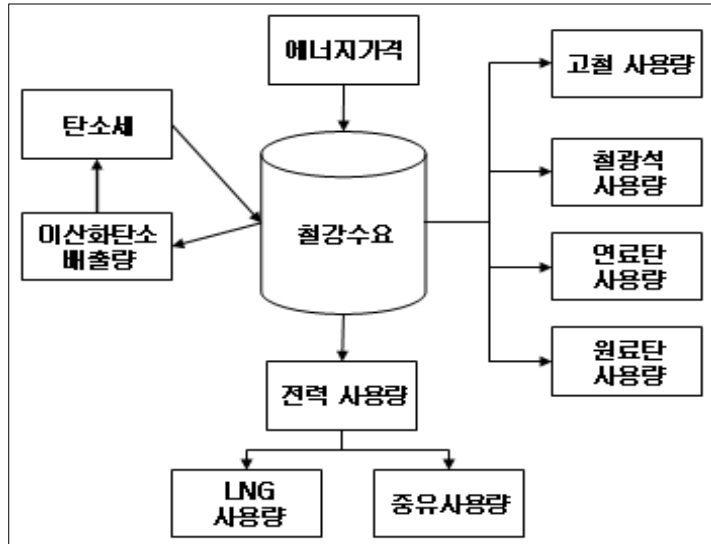
핵심은 한 시스템내의 모든 요소들이 상호간에 어떻게 작용을 하는가를 이해하는 것이다. 다시 말해서, 시스템의 기본 구조를 이해하고, 한 변수의 변화는 시간에 따라 다른 변수에 영향을 주고 다른 변수는 다시 최초의 변화가 일어난 변수에 영향을 미치게 되는 것이다. 복잡다단한 특성 때문에 시스템 다이내믹스 모델은 대개 컴퓨터 모델로서 구축되며, 다른 모델에 비해서 훨씬 더 복잡하며 동시적인 계산을 행할 수 있다는 측면에서 장점을 갖는다.

Ⅲ. 시뮬레이션 모형의 구조

1. 모델의 구조

본 연구에서는 시스템 다이내믹스 모델링 기법이 선택되었다. 시스템 다이내믹스는 제시된 문제에 대하여 그와 직접 또는 간접적으로 관련된 변수들로 구성된 시스템을 정의하고, 변수들간의 관계를 정량적으로 분석하여 모델화한 후, 시뮬레이션을 통하여 시스템의 동적 특성을 밝혀내 문제를 해결하는 시뮬레이션 방법론 중의 하나이다. 즉, 시스템 행동을 세밀하게 분석하는 것 보다는 총괄적으로 어떻게 영위되는가를 분석하는 전체적, 최적지향이라 할 수 있으므로, 문제와 그 해결방안을 모색하는데 이상적이라고 판단된다. 본 연구에서는 시스템 다이내믹스 툴로 잘 알려진 Vensim을 이용하여 환경 규제를 고려한 포스코의 원료·제품 흐름을 모델링하고 이를 분석하였다.

아래의 <그림 1>은 본 연구에서 평가한 모델의 범위를 도식화한 것이다. 이 그림은 모델의 주요한 요소들과 요소들이 서로 어떻게 영향을 주고 받는지를 보여주고 있다.



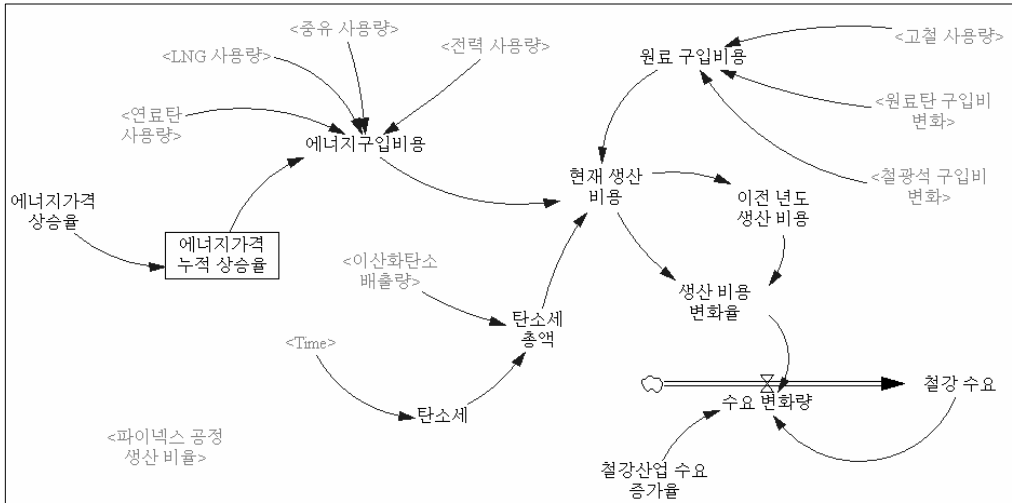
〈그림 22〉 철강 산업 원료 / 제품 흐름도

여러 개의 다른 형태의 변수와 또는 흐름이 모델의 전체 시스템의 구조를 특성화하기 위해 사용되었다. 각 변수들은 내부적으로 하위 변수들을 포함하고 있으며, 이에 대한 내용은 2절 모델 설명에서 상세히 기술하였다.

모델에서 외생변수는 시스템에 직접적이며 일방향적인 영향을 미치는 외부적인 힘으로 설명된다. 반면에 내생변수들은 시스템 내에서 결정되며, 외부 및 내부적인 변수 모두로부터 영향을 받게 된다. 시차변수는 외생 또는 내생변수가 1기 또는 그 이상의 기간의 시차를 가지는 변수로서, 이러한 시차변수들이 모델 내에 존재하게 됨으로써 시스템은 동태적인 성격을 갖게 된다.

2. 세부 모델 설명

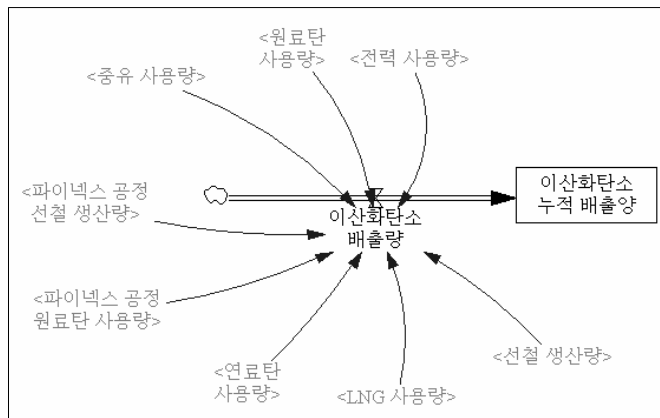
철강 수요에 대한 모델은 <그림-2>와 같다. 철강수요는 수요 증가율과 생산비용 증가를 고려하여 결정하였으며, 생산비용 변화율은 현재 생산비용과 이전 년도 생산비용의 변화량으로 나타내었다. 생산비용은 원료구입비용과 에너지 구입비용, 그리고 탄소세에 의해 결정되며, 원료구입비용은 다양한 원료들을 고려할 수 있지만, 본 연구에서는 고철, 원료탄, 철광석만 고려하여 결정하였다.



<그림 23> 철강 수요 모듈

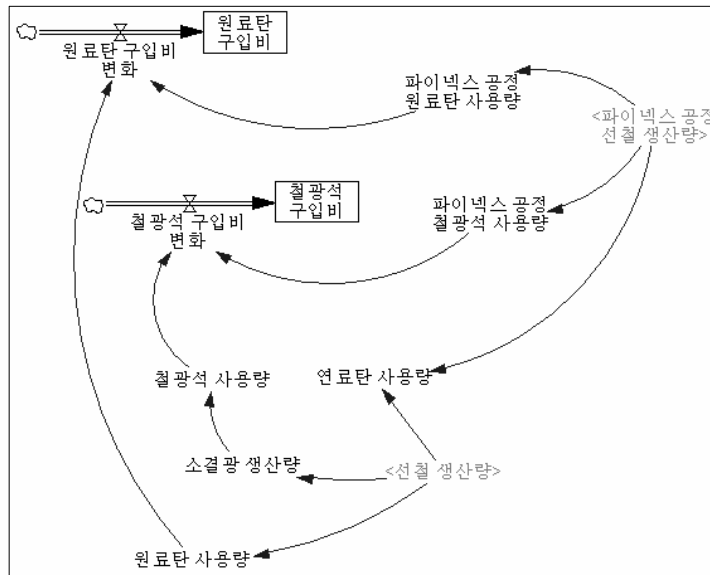
한편, 에너지 구입비용은 연료탄, LNG, 중유, 전력 사용량에 의해 결정되며, 에너지가격 상승률을 함께 고려하였다. 탄소세는 각 공정별 배출되는 이산화탄소 배출량에 단위당 탄소세의 곱으로 계산하였다.

<그림-3>은 이산화탄소 배출량에 대한 세부 모듈을 설명하고 있다. 이산화탄소 배출량은 중유, 원료탄, 전력, 연료탄, LNG 및 선철의 생산량에 의해 결정되며, 파이넥스 공정이 도입된 경우도 함께 고려하였다.

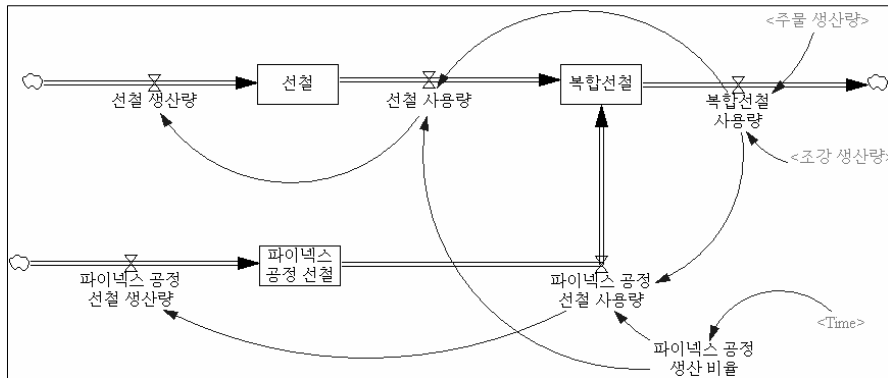


<그림 24> 이산화탄소 배출량 모듈

원료탄 및 철광석 사용량에 대한 세부적인 모델은 <그림-4>에서 설명하고 있다. 원료탄 및 철광석 사용량은 선철 생산량에 의해 결정된다. 파이넥스 공정이 도입된 경우에는 철광석 구입비용이 20% 절감되고, 원료탄 사용량은 15% 감소하도록 모델링 하였다. 이로 인해, 이산화탄소 배출량도 15% 저감되는 것으로 간주하였다.

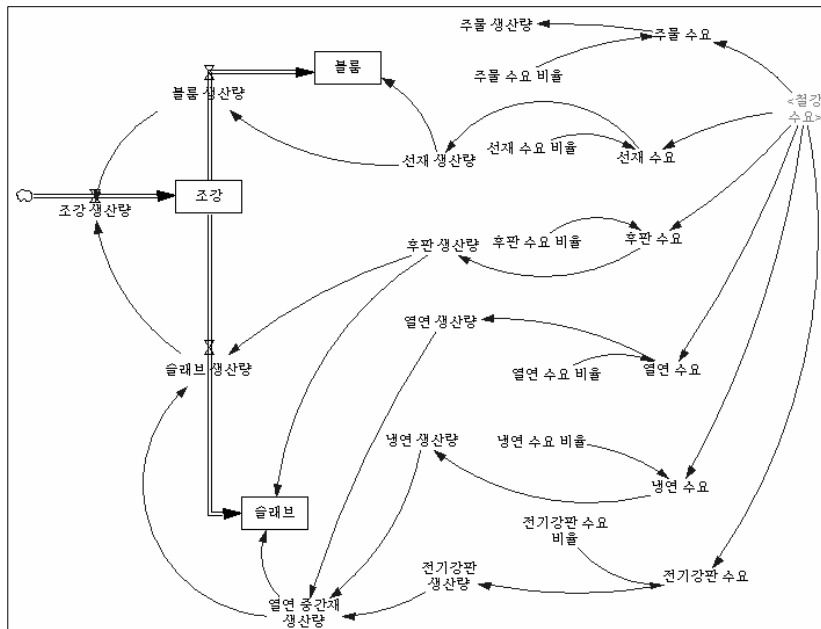


<그림 25> 원료탄 및 철광석 처리 모듈



<그림 26> 제선 공정 모듈

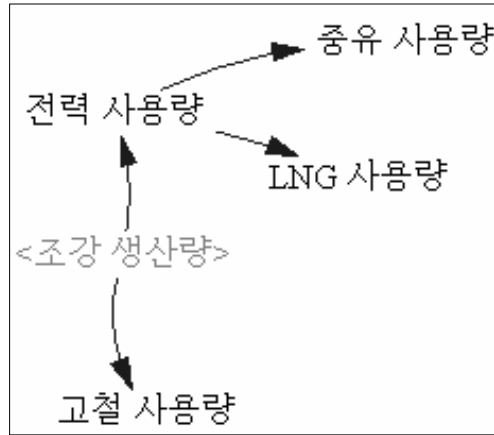
<그림-5>에서 선철사용량은 기존 제선 공정과 새롭게 도입되는 파이넥스 공정을 함께 고려하여 모델링 하였다. 파이넥스 공정의 경우, 현재 도입단계에 있기 때문에 본 연구에서는 2007년부터 매년 10% 포인트씩 기존 선철공정을 대체하여 2016년에는 기존 제선 공정을 완전히 대체하는 것으로 가정하였다. 이 가정은 시뮬레이션 결과를 분석할 때, TECH 시나리오에 적용하였다.



<그림 27> 최종 제품 모듈

본 연구에서 고려한 최종 제품 수요는 <그림-6>과 같이 총 6가지, 주물, 선재, 후판, 열연, 냉연 및 전기강판이다. 철강 수요를 이루고 있는 각 제품들의 구성비는 2000년을 기준으로 2030년까지 고정된 값으로 간주하였다.

<그림-7>과 같이 전력은 중유와 LNG를 사용하여 생산하도록 하였다. 반면, 고철은 조강을 생산하는 데 사용되므로, 고철 사용량은 조강 생산량에 의해 구해진다.



〈그림 28〉 전력 및 고철 모듈

IV. 모델 검증 및 추정

본 연구에서는 모델 추정기간에 대하여 모델의 안정성 및 예측력, 즉 로바스트니스(robustness)를 평가하기 위하여 의태분석(Back-casting)을 수행하였다. 시물레이션 결과가 실제 데이터를 비교함으로써, 모델의 예측력을 검증하기 위해 MAPEs(Mean Absolute Percentage Errors)와 같은 기준들이 모델의 채택여부를 결정하는데 사용된다. MAPE 추정치는 일반적으로 다음과 같이 계산된다.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|y_i^p - y_i^a|}{y_i^a}}{N} \times 100$$

여기서 y_i^p 는 표본기간에 대해 모델의 해에 의해 예측되는 i 번째 내생변수이며, y_i^a 는 i 번째 내생변수의 실제 값이다. 그리고 N 은 관측치의 수를 의미한다. MAPE가 3%이하이면 예측력이 뛰어나고, 5%이하이면 우수하며, 8%이상이면 그 모델의 예측력은 받아들일 수 없는 것으로 보는 것이 일반적인 MAPE에 대한 해석이다. <표 1>은 본 연구의 MAPEs의 대부분이 채택가능 범위 내에 존재하는 것을 보여주고 있다.

〈표 6〉 주요 내생 변수들의 MAPE (2000년 기준)

| 변수명 | 실측치 | 예측치 | MAPE | 변수명 | 실측치 | 예측치 | MAPE |
|---------|----------|----------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 철강 수요 | 24937063 | 25260674 | 2.38% | CO2 배출량 | 16825 | 17290 | 2.76% |
| 철광석 수요량 | 37707344 | 37707344 | 2.70% | 원료탄 사용량 | 9770 | 10000 | 2.35% |
| 전력 사용량 | 15423 | 15769 | 2.24% | 중유 사용량 | 439 | 449 | 2.28% |
| LNG 사용량 | 17 | 17 | 0% | 고철 사용량 | 5633 | 5771 | 2.44% |
| 연료탄 사용량 | 2550 | 2606 | 2.20% | | | | |

출처 : 에너지경제연구원 2000년 10월 보고서

V. 실험 결과 및 분석

1. 주요 전제 사항

본 연구의 시뮬레이션 기간은 1995년부터 2030년까지로 가정하였고, 1995년부터 2000년까지는 모델의 예측력을 검증하기 위해 의태분석(Back-casting)을 수행하기 위해 사용하였다. 검증을 위한 실제 데이터는 현 시점인 2003년까지를 수집하여 분석하여야 하지만, 데이터 수집의 어려움으로 2000년까지를 과거 데이터로 사용하였다. 따라서, 예측을 위한 시뮬레이션의 기준 년도는 2001년으로 하였다.

한편, 시뮬레이션 분석에 사용된 모델의 기본적인 가정사항은 다음과 같다. 생산설비의 용량은 수요를 만족하기에 충분하다고 가정하였으며, 제품별 생산시간은 모든 제품에 동일한 것으로 처리하였다. 또한, 재고는 고려되지 않았다. 철강 수요의 경우, 철강제품 생산비용과 수요 증가율이 결정요인이며, 수요 증가율은 과거 데이터의 추세를 분석한 결과, 매년 5%의 증가하는 것으로 설정하였다. 생산비용은 원료구입비용과 에너지 구입비용, 탄소세로 구성하였다. 원료구입비용은 철광석, 원료탄, 고철 구입비용으로 국한하였으며, 에너지 구입비용은 연료탄, LNG, 전력, 중유를 고려하였다. 실험을 위한 입력 데이터는 다음의 <표 2>와 <표 3>과 같다.

〈표 7〉 에너지 및 원료 가격

(단위 : 에너지\$/GJ, 원료: \$/ton)

| 에너지 / 원료 | 가격 | 에너지 / 원료 | 가격 |
|----------|------|----------|-------|
| 원료탄 | 2.0 | 연료탄 | 1.6 |
| 무연탄 | 1.1 | 중유 | 2.8 |
| LNG | 6.7 | 전력 | 17.16 |
| 고철 | 16.0 | | |

출처 : 한국에너지 기술연구원 2001년 8월 보고서

〈표 8〉 이산화탄소 배출 계수

(단위: kg · C / GJ)

| 에너지원 | 배출계수 | 에너지원 | 배출계수 |
|------|------|------|------|
| 원료탄 | 25.8 | 연료탄 | 25.8 |
| 중유 | 21.2 | 전력 | 31.4 |
| LNG | 15.8 | | |

출처 : 한국에너지 기술연구원 2001년 8월 보고서

2. 평가 시나리오

시물레이션 분석을 위해 크게 3가지 형태의 시나리오를 설정하였다. 기존의 다른 연구보고서에는 에너지 소비세나 탄소세 등을 제시하였지만, 본 연구에서는 BAU 시나리오와 TECH시나리오에 대하여 탄소세 부과 금액과 부과 방식을 다양하게 조합하여 다양한 실험을 수행하였다. 각 시나리오에 대한 기본적인 내용은 다음과 같다.

시물레이션 분석을 위해 크게 3가지 형태의 시나리오를 설정하였다. 기존의 다른 연구보고서에는 에너지 소비세나 탄소세 등을 제시하였지만, 본 연구에서는 BAU 시나리오와 TECH시나리오에 대하여 탄소세 부과 금액과 부과 방식을 다양하게 조합하여 다양한 실험을 수행하였다. 각 시나리오에 대한 기본적인 내용은 다음과 같다.

1) BAU(Business As Usual) 시나리오

전체 평가기간인 1995년에서 2030년까지 철강 수요의 지금까지의 추세가 지속된다는 가정을 바탕으로 설정된 시나리오로서, 2030년까지 기후변화협약에 대비한 어떠한 투자나 정책도 도입하지 않는 시나리오를 의미한다. 즉, 시간이 지남에 따라 철강 수요와 이산화탄소 배출량의 변동은 과거 데이터의 추세에 맞추어 증감되도록 처리하였으며, 제품별 원료 사용량은 구성비에 비례한다.

2) TECH 시나리오

신기술 도입에 따른 기존 철강 공정이 대체된다는 가정하에서 그 효과를 보기 위해 도입한 시나리오으로써, 기존 연구에 여러 형태의 기술 대안들이 이용가능한 것으로 정의되어 있지만, 현재 철강 산업에서 가장 큰 이슈가 되고 있는 파이넥스 공정의 도입을 TECH 시나리오 설정하였다. 철강 산업에서 2007년부터 부분적인 도입이 시작되고, 매년 10%의 대체가 이루어져서 2016년 이후에 기존 고로 공정을 완전히 대체하는 것으로 가정하였다.

3) 탄소세 부과 시나리오

미래에 이산화탄소 배출에 따른 탄소세 비용이 부과될 경우를 가정하여 BAU 시나리오와 TECH 시나리오에 저감잠재력을 평가하기 위한 시나리오으로써, 탄소세 비용은 3만원/TC에서 15만원/TC까지 다양한 수준과 단계별로 민감도분석을 실시하였다.

또한, 탄소세 부과방식에 따른 시나리오를 구성하였다. 책정된 탄소세에 대해 일정한 유예기간이 있다는 가정하에서, 유예기간 초기에 한번 부과하는 방식과 유예기간 말기에 한번 부과하는 방식, 그리고 기간 내에 균등하게 증액하여 부과하는 방식을 고려하였다.

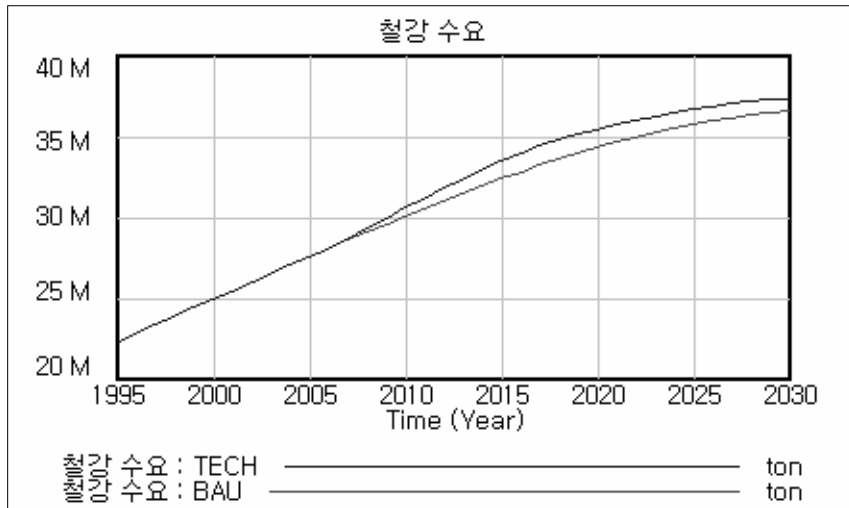
3. 시뮬레이션 분석 결과

1) 신기술 도입에 따른 파급 효과

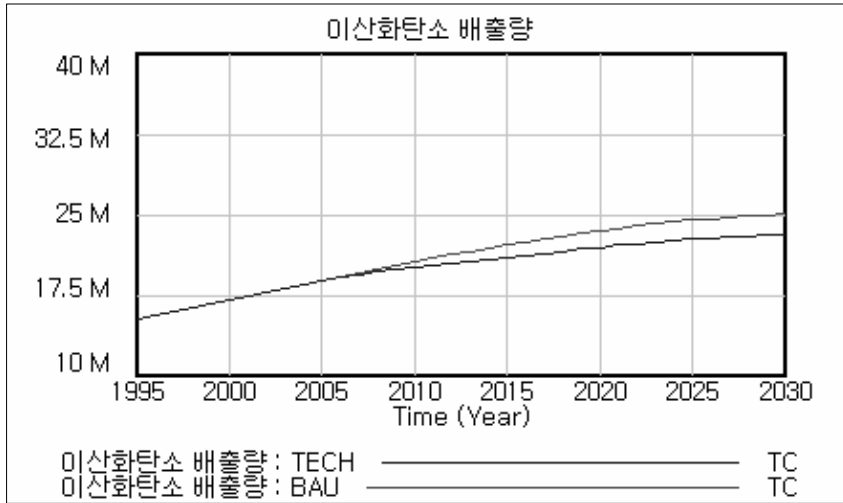
<그림 8>에서는 BAU시나리오와 TECH(파이넥스 공정의 점차적인 도입)에 대한 철강 수요의 전망치를 보여주고 있다. 파이넥스 공정의 도입으로 2007년부터 생산원가 절감 효과가 발생하고, 이를 바탕으로 BAU 시나리오에 비해 가격 경쟁력에서 우위를 확보하게 되었다. 따라서, 가격에 영향을 받는 철강수요가 TECH 시나리오에서 2007년부터 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 시간이 경과함에 따라, 각 시나리오 별 수요의 차이가 점차 줄어들고 있다. 이는, 파이넥스 공정으로 도입으로 원료비 절감 효과가 발생하지

만, 이로 인해 수요가 증가하므로, 수요 증가로 인한 원료비가 다시 상승하는 피드백 구조 (시스템 내의 두 개 이상의 내생변수가 상호 영향을 미치는 구조) 생기게 된다. 이로 인해, BAU 시나리오 대비 수요의 차이가 점차 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

<그림 9>는 각 공정에서 발생하는 이산화탄소 배출량의 합계를 보여주고 있다. TECH 시나리오에서 2007년부터 신기술이 도입됨에 따라 이산화탄소 배출 저감효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 기술 도입의 효과는 2007년에 BAU 대비 1%(BAU: 19.57M TC, TECH: 19.39M TC) 의 전체 이산화탄소 배출량 저감에서 2030년 8%(BAU: 25.07M TC, TECH: 23.14M TC) 의 효과로 점차 증가하였다.



<그림 29> 철강 수요(BAU와 TECH 비교)



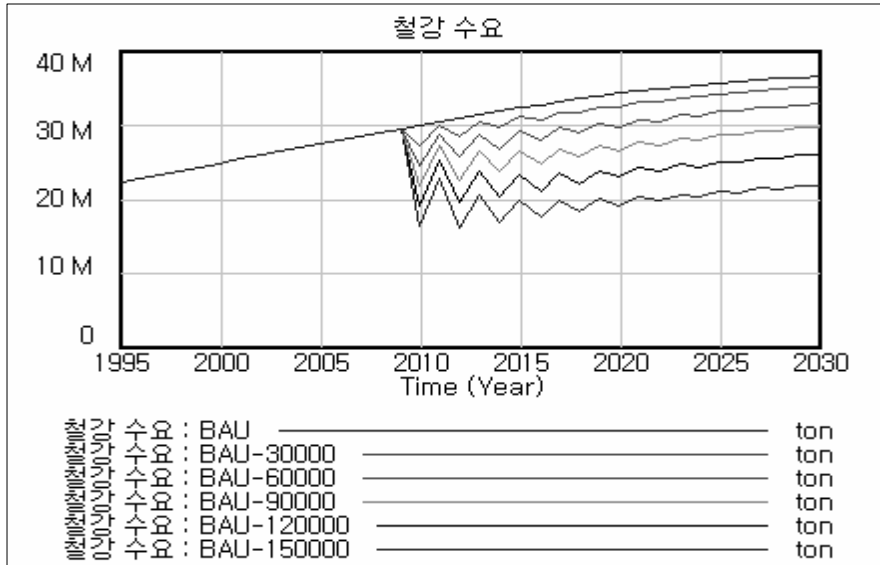
<그림 30> 이산화탄소 배출량(BAU와 TECH 비교)

2) 탄소세 부과에 따른 BAU 시나리오 민감도분석

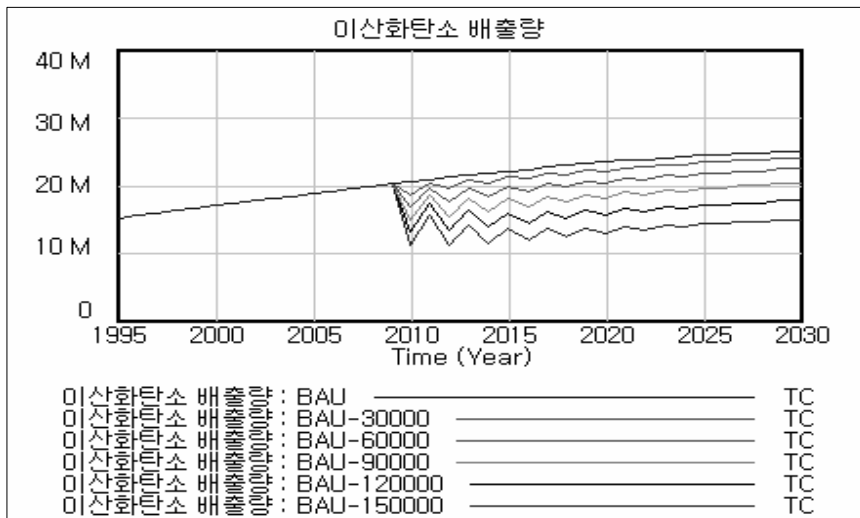
본 연구에서 가장 주안점을 두는 것은 탄소세의 부과에 따른 이산화탄소 배출량의 저감 효과를 분석하는 것이다. 우선, BAU 시나리오에서 탄소세 부과에 따른 효과를 분석하고, TECH 시나리오상에서 탄소세 부과 효과를 확인하였다. 그리고, 탄소세 부과에 따른 두 시나리오의 비교 분석을 수행하였다.

<그림 10>은 시뮬레이션 기간 동안 탄소세의 부과에 따른 철강 수요의 변화를 보여주고 있다. 시나리오에서 언급한 바와 같이, 탄소세가 TC당 3만원에서 15만원까지 3만원 간격으로 부과됨에 따른 민감도 분석(Sensitive Analysis)을 수행하였다. 2025년을 기준으로 볼 때, 철강 수요는 BAU대비 3만원/TC는 4.1%, 6만원/TC는 10.7%, 9만원/TC는 19.4%, 12만원/TC는 29.6%, 15만원/TC는 40.9%의 감소효과가 나타났다.

<그림 11>은 탄소세 부과에 따른 이산화탄소 배출량 감소효과를 나타내고 있다. 탄소세 부과와 이산화탄소 배출량의 관계는 탄소세가 부과됨에 따라 철강 가격이 상승하고, 가격 상승으로 인한 수요 감소 효과가 이산화탄소 배출량의 감소로 이어지는 것이다. 따라서, <표-4>와 같이 2025년을 기준으로 이산화탄소 배출량의 저감효과는 철강수요의 감소효과와 동일하게 나타난다.



〈그림 31〉 철강 수요(BAU에 대한 탄소세 부과)



〈그림 32〉 이산화탄소 배출량 (BAU에 대한 탄소세 부과)

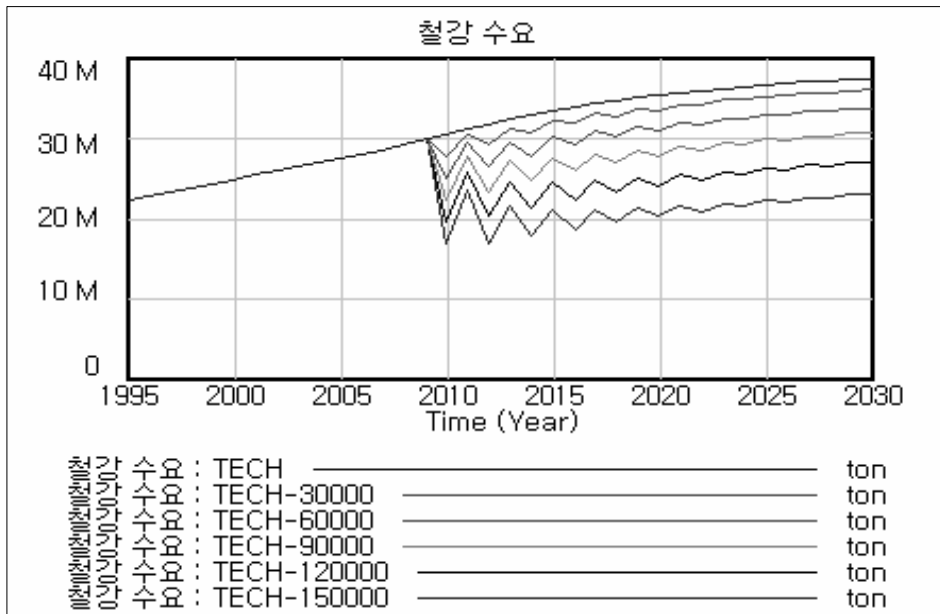
〈표 9〉 탄소세의 철강 수요 및 이산화탄소 배출량 감소 효과(BAU 대비)

| 2025년 기준 | BAU | BAU-30000 | BAU-60000 | BAU-90000 | BAU-120000 | BAU-150000 |
|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| 철강 수요(Ton) | 35747756 | 34294716 | 31929732 | 28822410 | 25158476 | 21133890 |
| CO2 배출량(TC) | 24469296 | 23474688 | 21855864 | 19728902 | 17220948 | 14466121 |
| BAU 대비 감소율 | 0% | 4.1% | 10.7% | 19.4% | 29.6% | 40.9% |

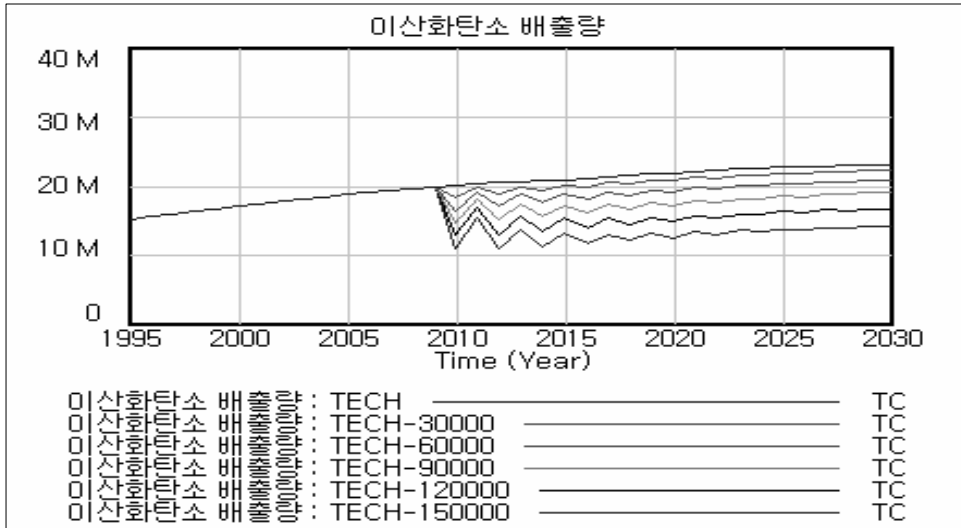
3) 탄소세 부과에 따른 TECH 시나리오 민감도분석

<그림 12 & 13>은 파이넥스 공정이 도입된 상황하에, 탄소세 부과에 따른 철강수요와 이산화탄소 배출량 감소 효과를 보여주고 있다.

BAU 시나리오와 마찬가지로, 2025년 기준으로 볼 때, 철강 수요와 이산화탄소 배출량은 [표 5]과 같다. 철강수요의 경우, 기준 TECH시나리오(탄소세가 전혀 부과되지 않은 상황에서 기술만 도입) 대비 감소효과가 3만원/TC의 경우 3.8%에서 부과되는 가격이 점차 증가하여, 15만원/TC가 부과될 경우, 39.2%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다.



〈그림 33〉 철강수요 (TECH에 대한 탄소세 부과)



<그림 34> 이산화탄소 배출량 (TECH에 대한 탄소세 부과)

<표 10> 탄소세의 철강 수요 및 이산화탄소 배출량 감소 효과 (TECH 대비)

| 2025년 기준 | TECH | TECH | | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 3만원 | 6만원 | 9만원 | 12만원 | 15만원 |
| 철강수요 (Ton) | 36704052 | 35301328 | 32992920 | 29939626 | 26316482 | 22308252 |
| CO2배출량 (TC) | 22733888 | 21865066 | 20435274 | 18544114 | 16299998 | 13817366 |
| TECH 대비 감소율 | 0% | 3.8% | 10.1% | 18.4% | 28.3% | 39.2% |

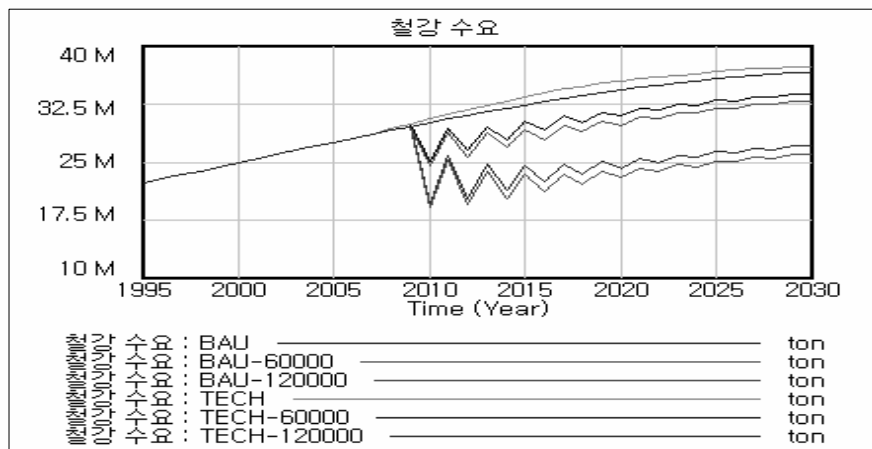
4) 탄소세 부과에 따른 BAU와 TECH 시나리오 비교 분석

앞서, 탄소세 부과에 따른 민감도 분석을 BAU 시나리오와 TECH시나리오에 대하여 실시하였다. 그러나, 탄소세 부과가 두 시나리오에 미치는 영향을 보기 위해서는, 각 시나리오 별로 동일한 금액의 탄소세 부과에 따라 철강수요와 이산화탄소 배출량을 분석해 볼 필요가 있다.

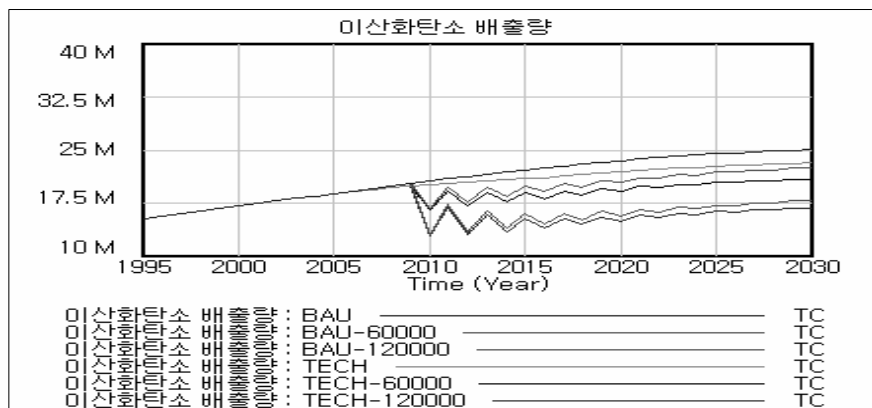
<그림 14 & 15>는 탄소세가 6만원/TC, 12만원/TC로 부과되었을 때, 각 시나리오 별로 철강수요 및 이산화탄소 배출량의 변화를 보여주고 있다. 2025년을 기준으로 볼 때, BAU

시나리오에 탄소세를 부과한 경우가 TECH 시나리오에 탄소세를 부과한 경우보다 철강수요 및 이산화탄소 배출량의 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 신기술 도입이 탄소세 부과 정책에 대응방안으로 모색될 수 있을 것으로 기대된다.

표 6와 같이, 톤당 부과되는 탄소세가 6만원일 때(BAU-6만원, TECH-6만원)와 12만원일 경우(BAU-12만원, TECH-12만원)를 비교해 보면, 탄소세 6만원/TC 부과일 경우는 TECH가 BAU 대비 3%의 개선된 효과를 보였으나, 12만원/TC 부과일 경우는 3.2%의 향상된 효과를 타냈다. 따라서, 톤당 탄소세액이 커짐에 따라 신기술 도입 효과가 미미하나마 점차 커지는 것으로 나타났다.



〈그림 35〉 철강 수요(BAU와 TECH에 대한 탄소세 효과 비교)



〈그림 36〉 이산화탄소 배출량 (BAU와 TECH에 대한 탄소세 효과비교)

〈표 11〉 탄소세 부과에 따른 충격 효과 비교

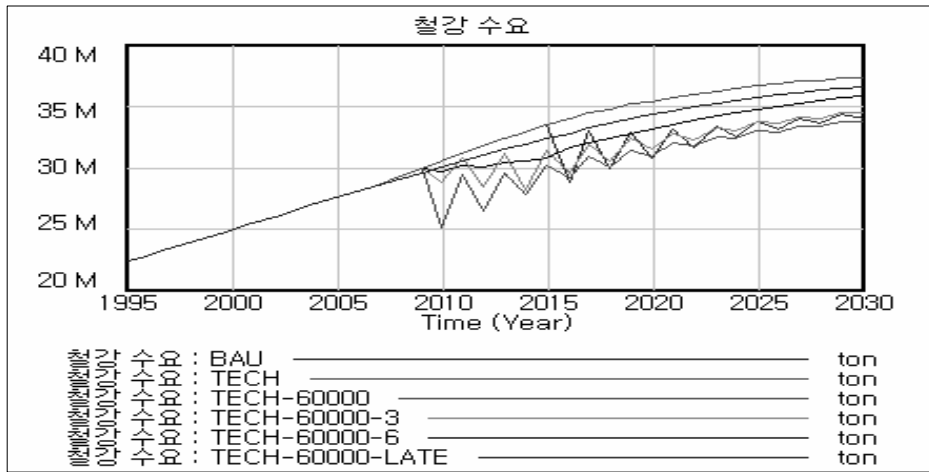
| 2025년 기준 | BAU | BAU | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 3만원 | 6만원 | 9만원 | 12만원 |
| 철강 수요 (Ton) | 35747756 | 31929732 | 25158476 | 32992920 | 26316482 |
| CO2 배출량(TC) | 24469296 | 21855864 | 17220948 | 20435274 | 16299998 |
| BAU 대비 감소율 | 0% | 10.7% | 29.6% | 7.7% | 26.4% |

5) 탄소세 부과 방식에 따른 TECH 시나리오 민감도 분석

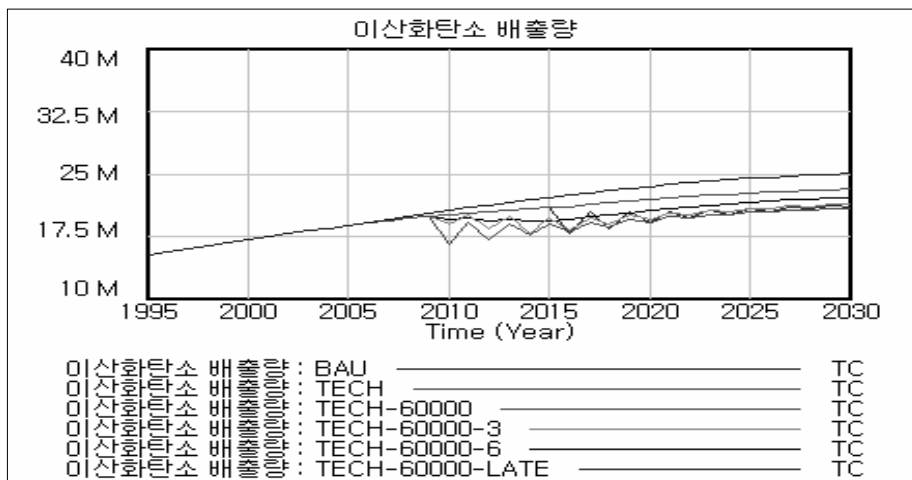
지금까지의 시나리오에서 사용한 탄소세 부과방식은 2009년(현시점부터 5년 후에 부과 되는 것으로 가정)에 탄소세가 한번 부과되는 방법을 채택하였다. 이는 탄소세 부과방식에서 가장 기본적인 방법이다. 하지만, 본 연구에서는 실제 탄소세 부과방식이 여러 형태를 가질 수 있을 것으로 가정하였다. 그래서, 탄소세 부과방식을 4가지 형태로 구분하여 실험한 결과는 그림 16과 17에 나타나 있다.

부과방식은 탄소세가 6만원/TC으로 책정되어 있고 탄소세 부과 유예기간을 2009년에서 2014년까지라고 할 때, 2009년 6만원을 한번에 부과하는 방식(TECH-6만원), 2009년부터 2년 간격으로 2만원씩 균등하게 누적하여 부과하는 방식(TECH-6만원-3), 2009년부터 1년 간격으로 1만원씩 균등하게 누적하여 부과하는 방식(TECH-6만원-6), 2014년에 6만원을 한번에 부과하는 방식(TECH-6만원-LATE) 등으로 구분하였다.

이 분석을 BAU 시나리오와 TECH 시나리오에 각각 적용할 수 있으나, 이미 철강 산업에서는 올해부터 파이넥스 공정이라는 신기술 도입 중에 있으므로, TECH 시나리오에 대해서만 분석하였다.



〈그림 37〉 탄소세 부과 방식에 따른 철강 수요



〈그림 38〉 탄소세 부과 방식에 따른 이산화탄소 배출량

탄소세 부과 방식에 따른 실험 결과는 [표-7]에서와 같다. TECH 시나리오 대비 철강 수요 감소폭은 TECH-6만원-6이 4.2%로 가장 적고, TECH -6만원-3, TECH -6만원 -LATE, TECH-6만원 순으로 작은 값을 보였다. 이는 탄소세를 균등하게 누적하여 부과하는 방식이 한번에 책정된 금액을 부과하는 방식보다 철강 수요 감소폭이 작게 나타남을 알 수 있다. 또한, 한번에 책정된 금액을 반드시 부과해야 할 경우라면, 그 시기를 최대한 늦추는 것이

철강 수요 감소를 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

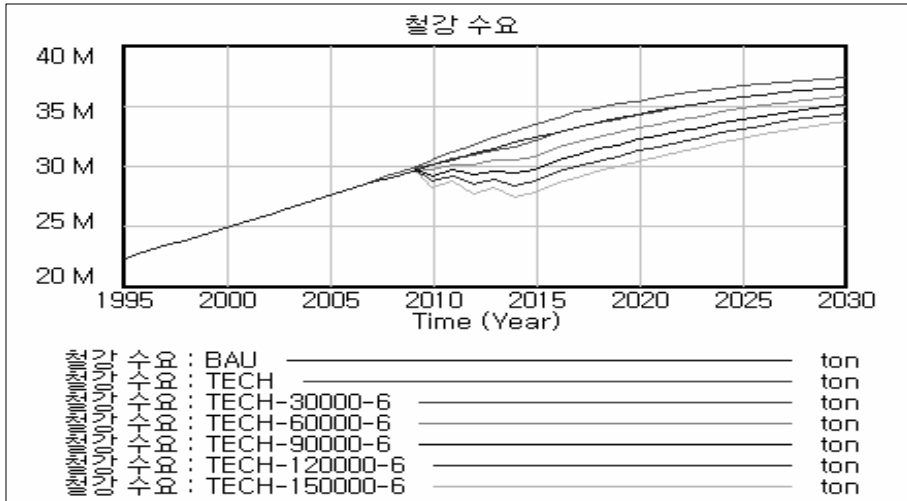
〈표 12〉 탄소세 부과방식에 따른 총격 효과 비교

| 2030년 기준 | TECH | TECH | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|------------|
| | | 60000 | 60000-3 | 60000-6 | 60000-LATE |
| 철강수요 (Ton) | 37332764 | 33768962 | 34485368 | 35780290 | 34194250 |
| CO2 배출량(TC) | 23123303 | 20915940 | 21359672 | 22161725 | 21179358 |
| TECH 대비 감소율 | 0% | 9.5% | 7.6% | 4.2% | 8.4% |

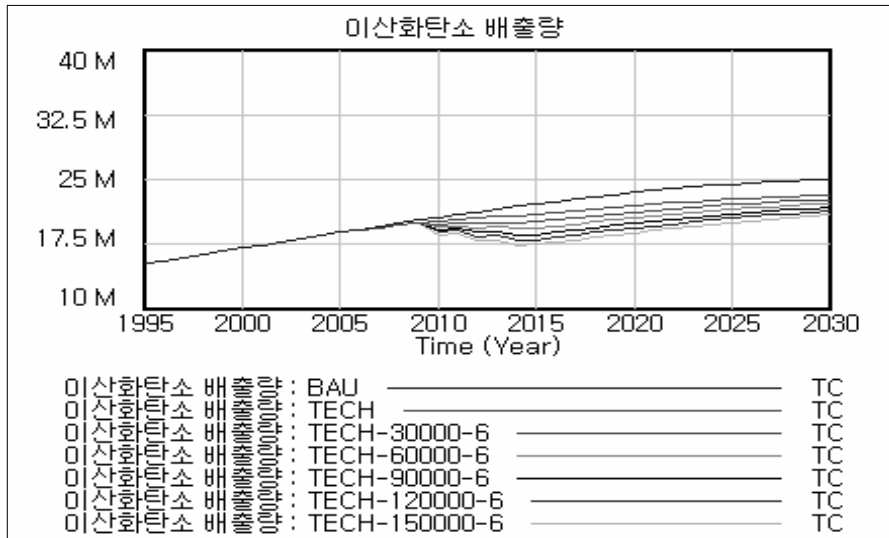
6) 탄소세 부과금액에 따른 균등 증액 부과방식의 파급효과

앞선 결과에서 탄소세 부과방식 가운데, 한번에 책정된 금액을 부과하는 것보다 여러 번에 나누어서 증액하는 방법이 효과적이라는 것이 나타났으므로, 본 실험에서는 6년 동안 균등 증액 부과방식 하에서 탄소세 부과 금액에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 3만원부터(TECH-3만원-6), 6만원(TECH-6만원-6), 9만원(TECH-9만원-6), 12만원(TECH-12만원-6), 15만원(TECH-15만원-6)까지 3만원 간격으로 수행하였으며, 그 결과는 그림 18과 19와 같다.

또한, 탄소세 부과 금액이 클수록, 여러 번에 나누어서 증액하는 방법이 효과가 있는 것으로 표 8에 나타나 있다. 그러나, 그 효과가 크지 않는 것으로 보아, 균등 증액 부과 방식의 TECH 시나리오 하에서는 탄소세 부과 금액의 차이로 인한 철강 수요 및 이산화탄소 배출량은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



〈그림 39〉 탄소세 부과 금액에 따른 철강 수요 (균등 증액 부과)



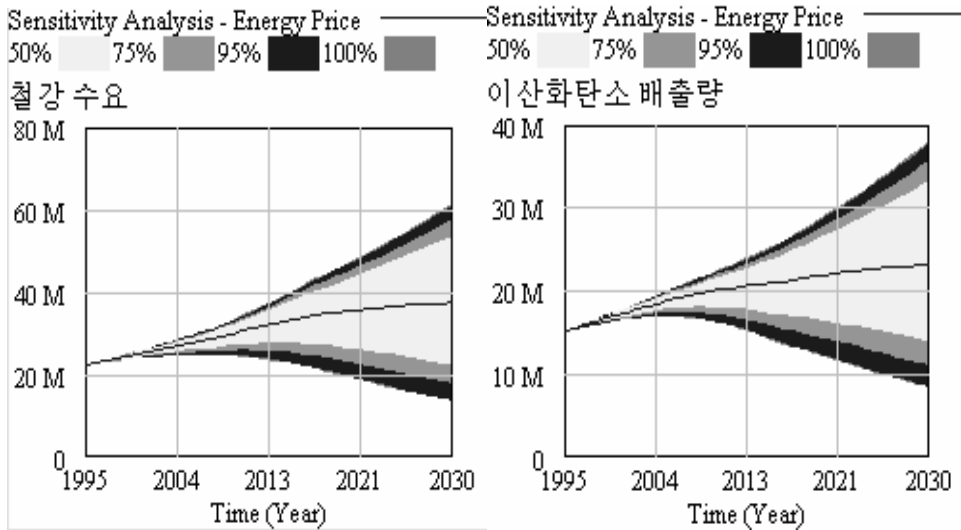
〈그림 40〉 탄소세 부과 금액에 따른 CO2 배출량 (균등 증액 부과 방식)

〈표 13〉 탄소세 부과 금액에 따른 민감도 분석 (균등 증액 부과 방식)

| 2025년 기준 | TECH | TECH | | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 3만원 | 6만원 | 9만원 | 12만원 | 15만원 |
| 철강수요 (Ton) | 37374344 | 36608352 | 35867652 | 35151312 | 34457028 | 33781796 |
| CO2 배출량(TC) | 23149058 | 22674612 | 22215836 | 21772144 | 21342118 | 20923892 |
| TECH대비 감소율 | 0% | 2.1% | 4.0% | 5.9% | 7.8% | 9.6% |

7) 에너지 가격 변화율에 대한 민감도분석

지금까지의 분석은 탄소세 부과에 따른 철강 수요와 이산화탄소 배출량 변화에 주안점을 두었다. 하지만, 이들에 영향을 미치는 요인에는 탄소세뿐만 아니라, 에너지 가격도 큰 비중을 차지한다. 따라서, 에너지 가격 변화율에 따른 철강 수요와 이산화탄소 배출량 변화의 민감도 분석을 수행하였다. 에너지 가격 증가율의 변화폭을 0%부터 +16%까지로 가정하고, 200번의 시뮬레이션을 수행한 결과는 Figure20I에 나타난 바와 같다. 철강 수요의 경우, 에너지 가격이 증가할수록 그 값이 감소하므로, 2030년에는 에너지 가격 증가율이 0%일 때는 최대 6000만ton에서 16%일 때는 최소 1500만ton 값을 나타내고 있다. 이는 에너지 가격 변화가 철강 수요에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 이산화탄소 배출량도 에너지 가격 증가율에 따라 최대 3700만TC에서 최소 800만TC의 값으로 크게 변화하는 것으로 나타났다.



〈그림 41〉 에너지 가격 변화율에 대한 철강 수요와 이산화탄소 배출량

VI. 결 론

본 연구는 기후변화협약이 철강 산업에 미치는 과급효과를 분석하기 위해 SD 방법론을 이용하였다. 시스템 다이내믹스는 철강 산업과 같이 복잡한 공정에 의해 원료를 공급하고 제품을 생산하며, 환경변화에 민감한 에너지 집약 산업을 분석하는데 효율적인 도구라고 할 수 있다.

시뮬레이션 모델은 총 6개의 모듈(철강 수요 모듈, 이산화탄소 배출량 모듈, 원료탄 및 철광석 처리 모듈, 제선 공정 모듈, 최종 제품 모듈, 전력 및 고철 모듈)로 구성하였으며, 모델의 검증을 위해 의태분석을 수행하였다. 각 변수들에 대해 의태분석을 수행한 결과, 모두 MAPE가 3%안에 들어가는 것으로 나타나 모델의 예측력이 있는 것으로 나타났다.

분석을 위해 크게 3가지의 시나리오(BAU 시나리오, TECH 시나리오, 탄소세 부과 시나리오)를 설정하였으며, 특히 TECH 시나리오의 경우, 현재 철강 산업에서 도입 중인 파이프스 공정을 고려하였다. 탄소세 부과 시나리오의 경우, 탄소세 부과 금액에 대한 민감도 분석뿐만 아니라, 탄소세 부과 방식(한번 부과, 분할 증액 부과) 등을 고려하여 다양한 상황을 분석하였다.

실험을 수행한 결과는 다음과 같다. 첫째, 신기술 도입의 효과는 2030년 BAU 시나리오 대비 이산화탄소 배출량이 8%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 둘째, BAU와 TECH

시나리오에 각각 탄소세를 6만원/TC 부과했을 경우, 철강수요가 탄소세를 부과하지 않은 경우에 비해 각각 2025년 기준으로 10.7%, 10.1%의 감소가 있을 것으로 예상된다. 그런데, 이를 BAU 시나리오와 TECH에 탄소세 6만원/TC를 부과한 경우를 비교해 보면 7.7%의 철강 수요의 감소 효과가 나타났다. 이는 신기술을 도입하지 않는 상황에서 탄소세를 부과했을 경우인 10.7%보다 3% 포인트 낮은 값으로 그만큼 신기술 도입이 탄소세 부과에 좋은 대안으로 판단된다. 셋째, 탄소세 부과방식에 따른 민감도 분석 결과 한번에 부과하는 방식보다 점차 증액하여 부과하는 방식이 탄소세에 의한 철강수요 감소폭이 적은 것으로 나타났다. 끝으로, 에너지 가격 변화율(0%-16%)에 대한 민감도 분석 결과, 2030년 기준으로 철강 수요가 최대 6000만톤(0%의 변화율 적용)에서 최소 1500만톤(16%의 변화율 적용)으로 나타났다. 이는 에너지 가격 변화가 철강 수요에 미치는 영향이 적지 않음을 의미한다.

따라서, 본 연구의 수행결과는 향후 기후변화협약이 철강 산업에 미치는 파급효과를 분석하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

【참고문헌】

- 김도훈 외, [시스템 다이내믹스], 대영문화사, 1999.
- 박진원 외, [기후변화 원인물질 저감기술의 평가시스템 개발], 환경부, 2004.
- 부경진 외, [에너지·환경·경제 통합 계량경제 시뮬레이션 모형에 의한 온실가스 저감수단의 평가], 에너지경제연구원, 2002.
- 정석재 외, "환경요소를 고려한 발전설비 경제성 평가", [한국시뮬레이션학회지], 제13권 2호 (2004), pp. 35-44
- 조경엽 외, [21세기 환경변화에 대한 철강산업의 대응방안], 포항중합제철주식회사, 에너지경제연구원, 2000.
- 임재규 외, [기후변화협약의 국내 산업구조 및 국제 경쟁력 파급효과], 에너지경제연구원, 2000.
- 홍종철 외, [철강부문 기술분석 및 온실가스 저감 잠재력 평가], 한국에너지기술연구원, 2001.
- John D. Sterman, [Business Dynamics], Irwin McGraw-Hill, 2000.