

시스템 다이내믹스를 이용한 탄소세 부과가 철강 산업에 미치는 효과 분석

정석재, 김경섭, 박진원^{1,*}
 연세대학교 정보산업공학과, ¹연세대학교 화학공학과
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

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

Suk Jae Jeong, Kyung Sup Kim, Jin Won Park^{1,*}
 Department of Industrial & Information Engineering, Yonsei University,
¹Department of Chemical Engineering, Yonsei University
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

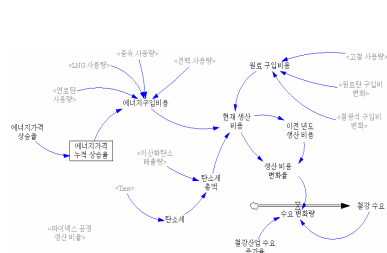
서론

본 연구에서는 철강 산업의 과급효과를 분석하기 위해서, 시스템 다이내믹스(SD) 방법론을 이용하였다. SD는 철강 산업과 같이 복잡한 공정에 의해 원료를 수급하고 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 검증에 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 신기술 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.

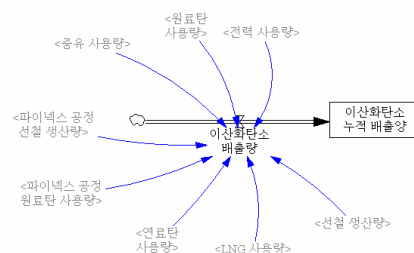
시뮬레이션 모델 개발 및 검증

본 연구에서는 SD 모델링 기법이 사용되었다. SD는 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 SD 툴로 잘 알려진 Vensim을 이용하여 환경 규제를 고려한 철강 산업의 원료·제품 흐름을 모델링하고 이를 분석하였다.

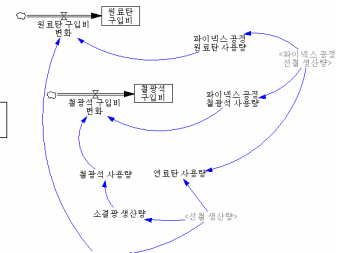
철강 수요에 대한 모듈은 <그림 1>와 같다. 철강수요는 수요 증가율과 생산비용 증감을 고려하여 결정하였으며, 생산비용 변화율은 현재 생산비용과 이전 년도 생산비용의 변화량으로 나타내었다. 생산비용은 원료구입비용과 에너지 구입비용, 그리고 탄소세에 의해 결정되며, 원료구입비용은 다양한 원료들을 고려할 수 있지만, 본 연구에서는 고철, 원료탄, 철광석만 고려한다. 한편, 에너지 구입비용은 연료탄, LNG, 중유, 전력 사용량에 의해 결정되며, 에너지가격 상승률을 함께 고려하였다. 탄소세는 각 공정별 배출되는 이산화탄소 배출량에 단위당 탄소세를 통해 계산되며 <그림 2>에서 이를 보여주고 있다. 이산화탄소 배출량은 중유, 원료탄, 전력, 연료탄, LNG 및 선철의 생산량에 의해 결정되며, 파이넥스 공정이 도입된 경우도 함께 고려하였다.



<그림 1> 철강 수요 모듈

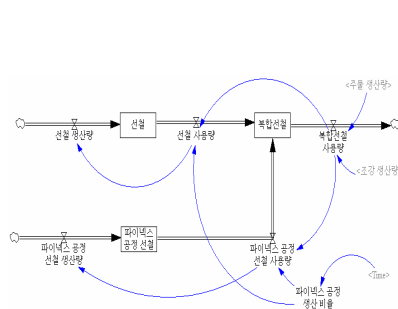


<그림 2> 이산화탄소 배출량 모듈

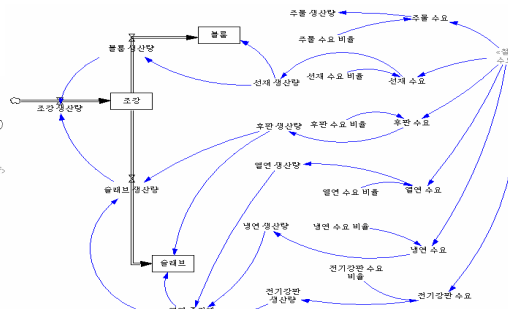


<그림 3> 원료탄 및 철광석 모듈

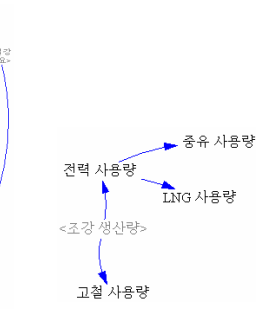
원료탄 및 철광석 사용량에 대한 세부적인 모델은 <그림 3>에서 설명하고 있다. 원료탄 및 철광석 사용량은 선철 생산량에 의해 결정되며, 파이넥스 공정이 도입된 경우를 모델에 반영하였다.



<그림 4> 제선 공정 모듈



<그림 5> 최종제품 모듈



<그림 6> 전력 및 고철 모듈

<그림 4>에서 선철사용량은 기존 제선 공정과 새롭게 도입되는 파이넥스 공정을 함께 고려하여 모델링하였다. 파이넥스 공정의 경우, 현재 도입단계로서, 2007년부터 매년 10% 포인트씩 기존 선철공정을 대체하여 2016년에는 기존 제선 공정을 완전히 대체하는 것으로 가정하였다. 이 가정은 시뮬레이션 결과를 분석할 때, TECH 시나리오에 적용하였다. 최종 제품 수요는 <그림 5>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 6>과 같이 전력은 중유와 LNG를 사용하여 생산하도록 하였다. 반면, 고철은 조강을 생산하는 데 사용되므로, 고철 사용량은 조강 생산량에 의해 구해진다.

본 연구에서는 모델 추정기간에 대하여 모델의 안정성 및 예측력, 즉 로바스트니스(robustness)를 평가하기 위하여 의태분석(Back-casting)을 수행하였다. 시뮬레이션 결과가 실제 데이터를 비교함으로써, 모델의 예측력을 검증하기 위해 MAPEs(Mean Absolute Percentage Errors)와 같은 기준들이 모델의 채택여부를 결정하는데 사용된다. 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 1] 주요 내생변수들의 MAPE (2000년 기준)

변수명	실측치	예측치	MAPE	연료탄 사용량	2550	2606	2.20%
철강 수요	24937063	25260674	2.38%	CO ₂ 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%

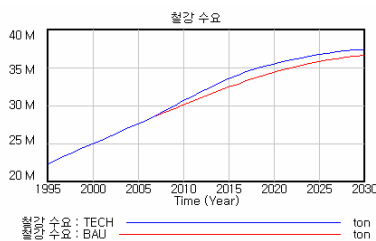
출처 : 에너지경제연구원 2000년 10월 보고서[5]

시뮬레이션 결과 및 분석

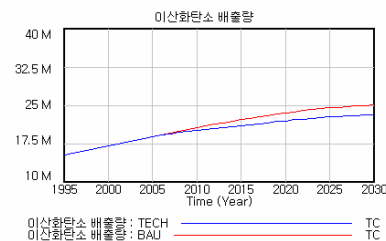
본 연구의 시뮬레이션 기간은 1995년부터 2030년까지로 가정하였고, 1995년부터 2000년까지는 모델의 예측력을 검증하기 위해 역태분석 (Back-casting)을 수행하기 위해 사용하였다. 시뮬레이션 분석에 사용된 모델의 기본적인 가정사항은 다음과 같다. 생산설비의 용량은 수요를 만족하기에 충분하다고 가정하였으며, 제품별 생산시간은 모든 제품에 동일한 것으로 처리하였다. 철강 수요의 경우, 철강제품 생산비용과 수요 증가율이 결정요인이며, 수요 증가율은 과거 데이터의 추세를 분석한 결과, 매년 5%의 증가하는 것으로 설정하였다. 생산비용은 원료구입비용과 에너지 구입비용, 탄소세로 구성하였다. 원료구입비용은 철광석, 원료탄, 고철 구입비용으로 국한하였으며, 에너지 구입비용은 연료탄, LNG, 전력, 증유를 고려하였다. 실험을 위한 입력 데이터는 에너지 경제연구원 보고서 [3,5]을 인용하였다.

시뮬레이션 분석을 위해 크게 3가지 형태의 시나리오를 설정하였다. 철강 수요가 지금의 추세대로 지속된다고 설정한 BAU 시나리오와 파이넥스 공정 도입을 고려한 TECH 시나리오, 그리고 2012년부터 탄소세가 부과되는 탄소세 부과 시나리오를 고려하였다.

시뮬레이션 분석결과로서 우선 신기술 도입에 따른 파급효과를 살펴보았다. <그림 7>에서는 BAU시나리오와 TECH(파이넥스 공정의 점차적인 도입)에 대한 철강수요의 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 발생하지만, 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 8>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.



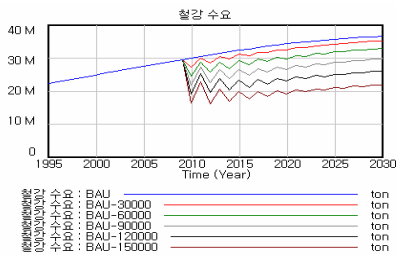
<그림 8> 철강수요 (BAU와 TECH 비교)



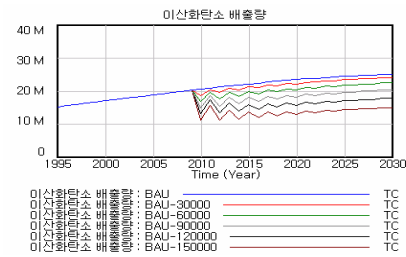
<그림 9> 이산화탄소 배출량 (BAU와 TECH 비교)

본 연구에서 가장 주안점을 두는 것은 탄소세의 부과에 따른 이산화탄소 배출량의 저감효과를 분석하는 것이다. 우선, BAU 시나리오에서 탄소세 부과에 따른 효과를 분석하고, TECH 시나리오 상에서 탄소세 부과 효과를 확인하였다. <그림 9>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 10>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.

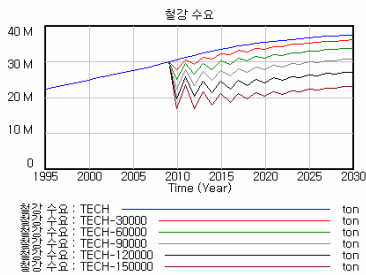


<그림 9> 철강수요 (BAU에 대한 탄소세 부과)

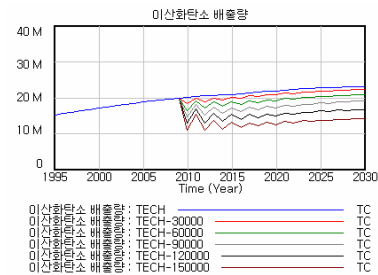


<그림 10> 이산화탄소 배출량 (BAU에 대한 탄소세 부과)

<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. 그 밖의 연구 결과는 지면상 생략하도록 한다.



<그림 12> 철강수요 (TECH에 대한 탄소세 부과)



<그림 13> 이산화탄소 배출량 (TECH에 대한 탄소세 부과)

결론

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

참고문헌

1. 김도훈 외, *시스템 다이내믹스*, 대영문화사(1999).
2. 박진원 외, “기후변화 원인물질 저감기술의 평가시스템 개발”, 환경부 보고서(2004).
3. 부경진 외, “에너지·환경·경제 통합 계량경제 시뮬레이션 모형에 의한 온실가스 저감 수단의 평가”, 에너지경제연구원(2002).
4. 조경엽 외, “21세기 환경변화에 대한 철강산업의 대응방안”, 에너지경제연구원(2000).
5. 임재규 외, “기후변화협약의 국내 산업구조 및 국제 경쟁력 과급효과”, 에너지경제연구원(2000).
6. 홍종철 외, “철강부문 기술분석 및 온실가스 저감 잠재력 평가”, 에너지기술연구원(2001).
7. John D. Sterman., *Business Dynamics*, McGraw-Hill, New York(2000)