

System Dynamics를 이용한 시멘트 산업에 탄소세 부과가 미치는 영향 분석

신승복¹, 전수영¹, 박종진¹, 박진원^{1,*}, Dal Chand Spah^{1,2}, 채윤근³, 신호철⁴
¹연세대학교 화학공학과, ²Department of chemistry, Government College, Gohana, Maharishi Dayanand University Rohtak, ³동경공업대학교 화학공학과, ⁴에너지관리공단
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

The Effect of the Carbon Tax on Cement Manufacturing Industry using System Dynamics

Seungbok Shin¹, Sooyoung Jun¹, Jong Jin Park¹, Jin-Won Park^{1,*},
 Dal Chand Spah^{1,2}, Yoon-Keun Chae^{3,4}, Hocheol Shin⁴
¹Department of Chemical Engineering, Yonsei University,
²Department of chemistry, Government College, Gohana, Maharishi Dayanand
 University Rohtak,
³Department of Chemical Engineering, Tokyo institute of Technology,
⁴Korea Energy Management Corporation
 (jwpark@yonsei.ac.kr*)

서론

2004년 11월 러시아의 교토의정서 비준으로 2005년 2월 교토의정서가 정식으로 발효됨에 따라 전 세계가 지구온난화에 대해 본격적인 대응에 들어가게 되었다. Non-Annex I 국가인 우리나라는 온실가스 저감 의무를 당장 지지는 않지만 지난 기후변화협약 13차 당사국총회 결과로 나온 'Bali Action Plan'으로 보듯이 2013년 이후에는 어떤 형태로든 온실가스 감축 참여가 불가피할 것으로 전망된다. 이에 대응하기 위하여 탄소세 부과가 정책대안으로 제시되고 있다. 이는 기업이 이산화탄소를 배출할 때 그 양에 따라 세금을 부과하는 제도이다. 탄소세 부과는 기업과 국가 경제에 부담을 줄 수 있으므로 이에 대하여 본 연구에서는 탄소세를 부과하는 정책이 국가 거시경제에 미치는 영향을 측정하여 탄소세 부과 도입에 따른 파급효과를 분석하였다.

특히, 본 연구는 전 세계 온실가스 배출량이 1.4 GtCO₂eq.이고 전체 배출량의 약 3.18%를 차지하고 있는 시멘트 산업에 탄소세를 부과하여 경제, 에너지 및 환경지표에 미치는 효과를 시스템 다이내믹스 모델을 이용하여 경제, 에너지 및 환경 시스템의 상호연관성을 파악하고 동태적으로 분석하였다[6].

시뮬레이션 모델의 구축 및 검증

본 연구에서는 전체 시스템 관점에서 시스템의 동태적인 형태와 시스템 내의 피드백 구조를 반영하는데 효율적인 시스템 다이내믹스 방법론을 사용하고 변수들 간의 상호연관성을 관계식을 통해 정량적으로 표현하는데 계량경제학에서 적용함으로써 시스템 다이내믹스 - 계량경제 혼합 모델의 접근 방법을 통해 합리적인 결과를 도출할 수 있도록 모델을 구축하도록 하였다[1]. 모델을 구축하기 위하여 시스템 다이내믹스 툴로 잘 알려진 Vensim을 이용하여 시멘트 산업의 세부 모듈을 경제, 환경, 에너지 모듈로 설계하였다.

시멘트 수요를 결정하는 경제 모듈은 Fig 1.과 같다. 시멘트 수요는 수요 증가율과 생산비용 증감에 따라 결정되며 총지출은 에너지 구입비용과 탄소세 총액으로 한정하였고 전년도 총지출과의 차이를 통해 총지출 변화율을 산정하고 총지출의 변화에 따라 수요가 변동하도록 모델링하였다. 시멘트 산업 수요 변화량은 일정한 추세를 따르는 수요 변화율과 총지출 변화율을 고려하였다. 시멘트 총수요는 수요 변화량의 값의 누적으로 계산

되며 총수요량과 총생산량은 동일하도록 한정하였다.

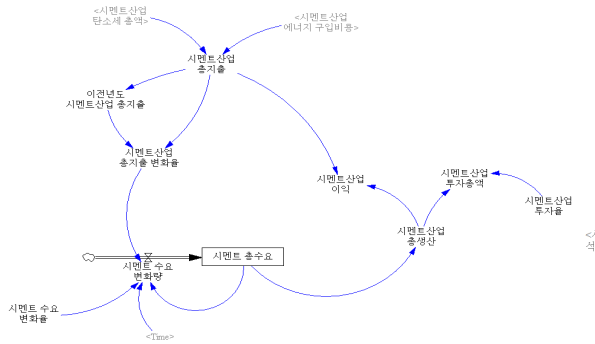


Fig 1. 시멘트 산업 경제 모듈

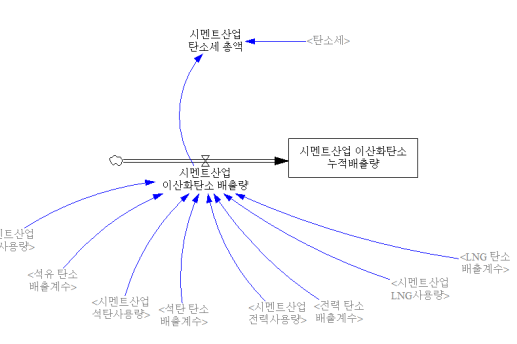


Fig 2. 시멘트 산업 환경 모듈

에너지 구입비용은 석탄, 석유, LNG, 전력 사용량에 의해 결정되며 에너지가격 상승을 함께 고려하였다. 탄소세는 각 공정별 배출되는 이산화탄소 배출량에 단위당 탄소세의 곱으로 계산하였다. 또한 시멘트산업 총지출 변화율은 현재의 총지출과 이전년도 총지출의 변화량으로 나타내었고 총지출은 시멘트산업에 부과되는 탄소세의 총액과 에너지 모듈에서 산출된 에너지 구입비용에 의하여 결정되어진다.

시멘트 산업의 환경 모듈을 Fig 2.와 같이 나타내었다. 실제 환경에 영향을 미치는 오염물질은 다양하게 존재하지만 본 연구는 시간이 변화함에 따라 이산화탄소 배출량의 추이를 분석하는 것이 목적이므로 환경 모듈에는 온실가스 배출량과 관련된 변수들만 나타내었다. 시멘트산업 이산화탄소 배출량은 전체 에너지 사용량에 비례하므로 IPCC 배출계수를 이용하여 각 에너지원별 이산화탄소 배출계수에 각 에너지원별 사용량을 곱하여 전체 이산화탄소 배출량을 계산할 수 있다. 또한 탄소세 총액은 이산화탄소 배출량과 단위당 탄소세에 의해 산출되도록 모델링하였다.

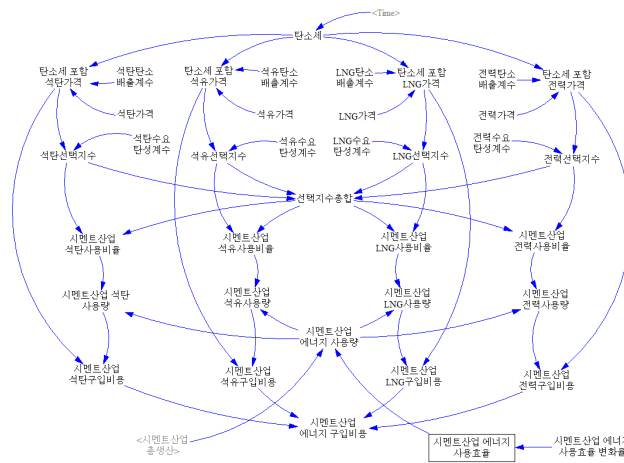


Fig 3. 시멘트 산업 에너지 모듈

시멘트 산업 에너지 모듈은 Fig 3.과 같이 각 에너지원 별 사용량을 계산하여 시멘트 산업 에너지 구입비용을 계산하는 역할을 한다. 각 에너지원(석탄, 석유, LNG 및 전력) 별로 탄소세가 부과될 경우 배출계수와 부과된 탄소세를 고려하여 탄소세가 부과된 에너지원 가격을 결정하게 되고 각 에너지원에 탄소세가 포함된 가격과 수요탄성계수를 이용

하여 탄소세가 부과에 따라 각 에너지원별 사용 비율이 조정되도록 반영하였다. 에너지원별 사용량의 경우 총에너지 사용량에서 각 에너지원별 사용비율을 곱하여 계산하였다. 에너지 구입비용은 에너지 사용량과 탄소세가 부과된 에너지원별 가격의 곱으로 산정하도록 모델링하였다.

본 연구는 의태분석(Back-Casting)을 이용하여 모델의 안정 및 예측력을 평가하였다. 모델의 예측력을 검증하기 위해 MAPEs(Mean Absolute Percentage Errors) 기준을 채택하였다. 예측력은 MAPE가 3%이하면 뛰어나고 5%이하면 우수하며 8%이상이면 그 모델은 받아들일 수 없는 것이 일반적이다.

Table 1. 주요 내생변수들의 MAPE

변수명	MAPE	변수명	MAPE
시멘트수요	0.02 %	LNG사용량	3.92 %
석탄사용량	0.14 %	전력사용량	1.26 %
석유사용량	5.18 %	CO ₂ 배출량	1.14 %

출처: 에너지관리공단, 한국양회공업협회 통계자료[3,5]

시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 기간은 1995년부터 2025년으로 가정하였다. 1995년부터 2002년까지의 자료는 모델의 예측력을 검증하기 위하여 사용하였다. 또한 생산설비의 용량은 수요를 만족시킬 수 있으며 재고는 고려하지 않고 생산량과 수요량이 일치한다고 가정하였다. 또한 연구에 필요한 입력 자료는 에너지경제연구원 보고서를 참고하였다[2,4].

시뮬레이션 분석을 위한 시나리오는 BAU(Business As Usual)와 탄소세 부과를 2012년부터 3만원/TC에서 12만원/TC까지 다양한 수준과 단계별로 민감도 분석을 실시하였다. 시나리오 분석은 탄소세 부과에 따른 시멘트 산업의 총수요, CO₂ 배출량, 에너지원별 사용비율의 변화율을 중심으로 연구하였다.

Fig 4.는 탄소세가 3만원에서 12만원까지 부과됨에 따른 시멘트 산업의 수요의 민감한 정도를 분석한 결과이다. 탄소세의 부가가 수요 위축에 미치는 영향이 큰 것으로 보아 적정 탄소세를 결정하는 것이 산업의 발전에 매우 중요한 항목임을 알 수 있다.

Fig 5.에서 볼 수 있듯이 시멘트산업의 이산화탄소 배출량은 탄소세의 부과에 따라 줄어들고 있다. 이는 탄소세 부과에 대한 수요의 위축으로 인해 시멘트의 수요가 감소하므로 이산화탄소를 배출하는 에너지원의 사용량이 줄어들기 때문이다.

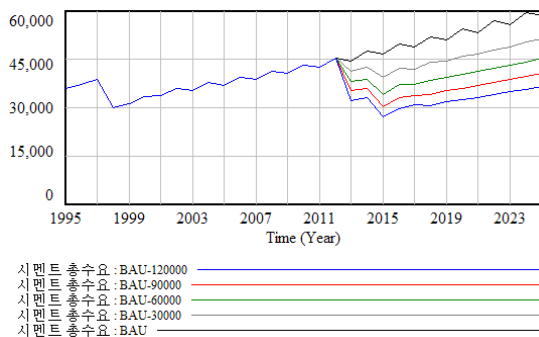


Fig 4. 시멘트 총수요

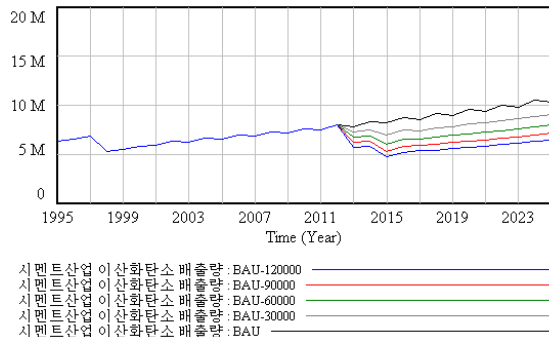


Fig 5. 시멘트산업 이산화탄소 배출량

Table 2.는 시뮬레이션 기간 동안 탄소세가 12만원이 부과되는 시나리오에서 각 에너지원의 사용비율과 사용량의 변동을 보여준다. 특히 석탄의 사용비율이 2000년 63%에서

2025년 54%로 9%가 감소하였고 반면 다른 에너지원의 비율은 증가하였다. 이는 에너지원별 Product Mix에서 시간의 경과에 따라 점차 탄소배출계수가 높은 석탄과 석유는 사용비율이 줄어들고 있으며 탄소배출계수가 낮은 LNG는 사용량이 증가한 것이다. 또한 전력 사용비율이 증가하는데 이는 전력에너지의 특성상 탄소세가 부과되더라도 다른 에너지원에 비해 가격변화폭이 작기 때문이다. 이는 향후 탄소 배출계수가 낮은 에너지원의 대체가 활발히 이루어질 것을 예상할 수 있으며 국내 실정에 맞는 각 에너지원별 탄소 배출계수를 산정하는 것이 필요함을 보여주고 있다.

Table 2. 에너지원 사용 변화 (탄소세가 12만원일 경우)

(단위: 천TOE)

		2000	2012	2025
석탄	비율	63%	59%	54%
	사용량	3,518	4,530	3,395
석유	비율	19%	20%	21%
	사용량	1,087	1,534	1,273
LNG	비율	4%	5%	6%
	사용량	251	394	376
전력	비율	14%	16%	19%
	사용량	781	1,213	1,150

결론

본 연구는 시스템 다이내믹스 모형을 이용하여 탄소세 부과가 우리나라 시멘트산업에 미치는 영향을 분석하였다. 시나리오분석 결과, 탄소세 부과가 수요 위축에 큰 영향을 주므로 적정 탄소세의 결정이 산업에 중요한 항목임을 알 수 있었고 탄소세부과로 시멘트 수요 감소로 이산화탄소 배출량이 감소함을 볼 수 있었다. 또한 시간의 경과에 따라 탄소세 부과로 인해 탄소배출계수가 높은 석탄과 석유의 사용량은 줄고 LNG와 전력의 사용 비율이 증가함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김도훈 외, 시스템 다이내믹스, 대영문화사(1999)
2. 부경진 외, “에너지·환경·경제 통합 계량경제 시뮬레이션 모형에 의한 온실가스 저감 수단의 평가”, 에너지경제연구원 (2002)
3. 에너지관리공단, www.kemco.or.kr
4. 임재규 외, “기후변화협약의 국내 산업구조 및 국제 경쟁력 파급효과”, 에너지경제연구원 (2000)
5. 한국양회공업협회, www.cement.or.kr
6. R. Rehan, M. Nehdi, "Carbon Dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry", Environmental Science & Policy, **8**,105-114 (2005)