

# 탄소세 부과에 따른 시멘트산업의 파급효과 분석

## - 시스템 다이내믹스 방법론으로 -

송재호\*, 정석재\*, 김경섭\*, 박진원\*\*

### The Ripple Effect of Cement Industry according to Carbon Tax Levy - Approach to System Dynamics -

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

#### Abstract

기후변화협약에 의해 탄소세가 부과될 경우 한국의 에너지 집약 산업에 어떠한 영향을 미치며 그에 대한 대응방안이 어떻게 마련되어야 하는지에 대한 관심이 증대되고 있다. 이에 본 연구에서는 탄소세가 부과됨으로 인하여 에너지 다소비 업종인 시멘트산업의 각 에너지원별 사용량에 미치는 파급효과를 시스템 다이내믹스 방법론에 의한 시뮬레이션 모델을 이용하여 분석하였다. 시뮬레이션 모델은 환경모델, 경제모델, 에너지모델로 구성하였고 모델의 예측력 검증을 위해 의태분석을 수행하였다. BAU 시나리오와 탄소세 부과 시나리오를 설정하여 각 시나리오의 총수요의 예측치, 이산화탄소 배출량의 추이, 에너지원의 사용변화를 분석하였다. 본 연구는 향후 기후변화협약의 부담이 큰 에너지 집약산업에 있어서 에너지원의 사용 및 수요를 예측하고 이를 평가하기 위한 지침을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

**Key Words:** System Dynamics, Carbon Tax, Scenario Analysis

\* 연세대학교 정보산업공학과

\*\* 연세대학교 화학공학과

본 연구는 차세대 핵심 환경기술사업에 의해 지원되었음

## 1. 서론

지구온난화는 이미 오래전부터 전 세계적인 문제로 부각되었고 지금도 여전히 그에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 지구온난화에 의해 세계 곳곳에서 기상이변이 빈번히 일어나고 그에 따른 피해가 더욱 심각해지고 있는 실정이다. 이에 따라 온실가스 감축을 위해 1992년 6월 리우회의에서 기후변화협약이 채택되고 한국도 그 이듬해 12월에 이 협약에 가입하였다. 또한 각 나라들은 온실가스 배출을 감소시키기 위해 다양한 환경적 규제들을 도입하고 있다[5]. 이러한 국제적 규제 중 환경세의 일종인 탄소세는 자주 거론되는 규제 중 하나이다. 탄소세는 지구의 온난화 방지를 위해 이산화탄소를 배출하는 석유, 석탄 등 각종 화석에너지 사용량에 따라 부과하는 세금으로 이미 몇몇 유럽국가에서 온실가스 배출을 감축하기 위해 보조적인 정책수단으로 사용되고 있으나 현재는 경제활동의 위축과 소비자 후생의 감소 가능성으로 인하여 적극적인 도입이 이루어지지 않고 있다[2]. 하지만 세계 각국에서 그에 대한 대책을 마련하고 적극적인 도입을 고려하고 있으므로 에너지를 전량 해외에 의존하고 수출의존도가 높으며 에너지 집약적인 산업구조를 가지고 있는 한국은 선진국의 이러한 행동을 묵시할 수 없을 것이다. 그러므로 탄소세가 부과될 경우 한국의 에너지 집약산업에 어떠한 영향을 미치며 그에 대한 대응방안이 어떻게 마련되어야 하는지에 대한 연구가 필요하다[2][4].

이에 본 연구에서는 탄소세가 부과됨으로 인하여 에너지 다소비 업종인 시멘트산업의 각 에너지원별 사용량에 미치는 파급효과를 시스템 다이내믹스(System Dynamics: SD) 방법

론에 의한 시뮬레이션 모델을 이용하여 분석하였다.

본 연구의 시뮬레이션 모델은 총 3개의 모듈(환경 모듈, 경제 모듈, 에너지 모듈)로 구성하였고 모델의 예측력을 검증을 위해 의태분석을 수행하였다.

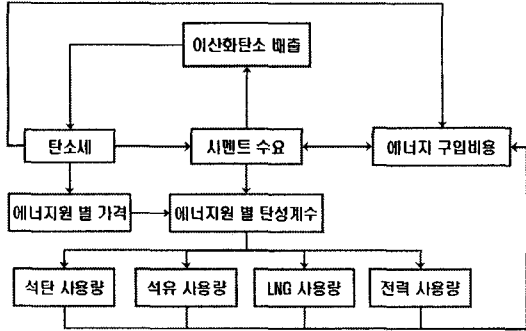
또한 시뮬레이션 분석을 위해 2가지 시나리오(BAU 시나리오, 탄소세부과 시나리오)를 설정하였다.

## 2. 연구내용

### 2.1 시뮬레이션 모형

본 연구는 모델링 기법으로 시스템 다이내믹스(SD)를 사용하였다. SD는 제시된 문제에 대하여 그와 직접 또는 간접적으로 관련된 변수들로 구성된 시스템을 정의하고 변수들 간의 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[1][7]. 본 연구에서는 SD 툴 중 잘 알려진 Vensim을 이용하여 탄소세를 고려한 시멘트산업의 에너지 흐름을 모델링하고 이를 분석하였다.

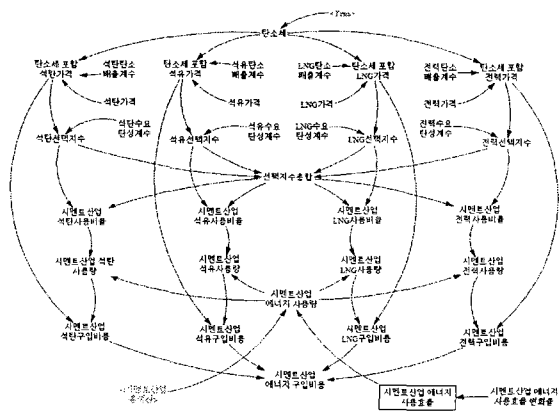
기존의 연구[3][6]는 탄소세가 부과됨으로써 에너지 가격이 영향을 받고 그로 인해 수요의 증감이 발생되며 이 수요에 따라 에너지 사용량을 산정하는 모형이 대부분이다. 하지만 본 연구에서는 <그림 1>과 같이 각 에너지원별에 탄성계수를 부여하여 탄소세가 부과되면



<그림 1> 시멘트산업 에너지 흐름도  
에너지원별 사용비율이 변동하도록 모델링하였다. <그림 1>은 시멘트산업의 에너지 흐름을 나타내고 있다. 시멘트의 생산에 의해 이산화탄소가 배출되고 그로 인하여 탄소세가 부과되며 이 탄소세는 에너지원별 가격에 영향을 주어 에너지 구입비용을 변동시킨다. 또한 각 에너지원 가격의 증감과 에너지원별 탄성계수에 따라 각 에너지원의 사용비율이 변동되어 그 비율에 따라 각 에너지원의 사용량이 정해진다.

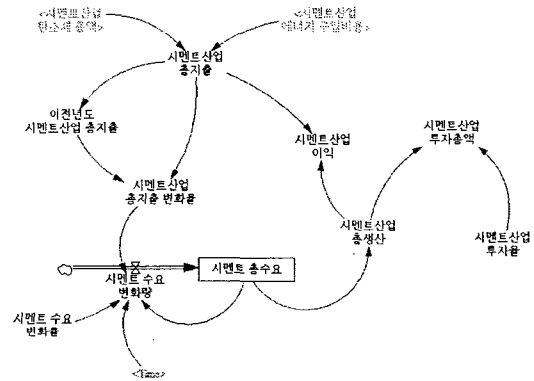
## 2.2 세부 모델

시멘트산업은 에너지모듈, 경제모듈, 그리고 환경모듈 3가지 형태로 구성된다.



<그림 2> 시멘트산업 에너지모듈

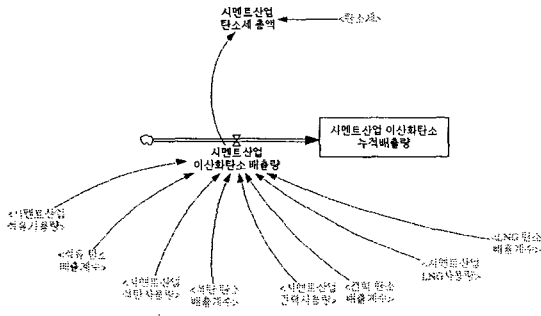
에너지모듈은 <그림 2>와 같다. 각 에너지원(석탄, 석유, LNG, 전력)은 탄소세가 부과될 경우 배출계수와 탄소세를 고려하여 새로운 가격을 가지게 된다. 또한 각 에너지원에 탄소세가 포함된 가격과 수요 탄성계수를 이용하여 탄소세가 부과되었을 경우 각 에너지원별 사용비율이 변화하도록 모델링하였다. 에너지원별 사용량은 시멘트산업의 총 에너지 사용량에서 각 에너지원별 사용비율을 곱하여 계산하였다. 그 사용량에 따라 시멘트산업의 에너지 구입비용이 결정된다.



<그림 3> 시멘트산업 경제 모듈

<그림 3>은 시멘트산업의 경제모듈을 설명하고 있다. 시멘트 수요는 수요 변화량과 시멘트산업 총지출의 변화율에 의하여 산출되도록 하였다. 또한 시멘트산업 총지출 변화율은 현재의 총지출과 이전년도 총지출의 변화량으로 나타내었다. 그리고 총지출은 시멘트산업에 부과되는 탄소세의 총액과 에너지모듈에서 산출된 에너지 구입비용에 의하여 결정되어진다.

<그림 4>는 시멘트산업의 환경모듈을 나타낸다. 환경모듈은 각 에너지원의 사용량과



<그림 4> 시멘트산업 환경모델 IPCC에서 정의한 탄소배출계수의 곱으로 시멘트산업의 이산화탄소 배출량을 산출하고 이 이산화탄소 배출량과 탄소세에 의하여 시멘트산업의 탄소세 총액이 결정된다.

### 3. 모델의 검정 및 추정

본 연구에서는 모델의 안정성 및 예측력을 평가하기 위하여 역태분석(Back-casting)을 수행하였다. 시뮬레이션 결과와 실제 데이터를 비교하여 모델의 예측력을 검정하는 방법으로 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 사용하였다. MAPE는 다음과 같이 계산된다.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i^P - y_i^A}{y_i^A} \right|}{N} \times 100$$

$y_i^P$ 는 표본기간에 대해 모델의 해에 의하여 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 없다고 보는 것이 일반적인 MAPE에 대한 해석이다.

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

출처 : 에너지관리공단, 한국양회공업협회 통계자료

<표 5> 주요 내생변수들의 MAPE

위의 <표 1>과 같이 본 연구의 주요 내생변수들은 예측력이 우수한 것으로 판단되었다. MAPE에 사용된 실측치는 1999년부터 2002년까지 총 4년간의 자료를 사용하였다. 또한 본 연구는 공정 중의 이산화탄소 배출량보다 에너지 사용으로 인하여 배출되는 이산화탄소에 초점을 맞추고 있으므로 이산화탄소 배출량의 실측치는 에너지원별 사용량에 각 에너지원의 탄소배출계수를 곱하여 구하였다.

### 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

#### 4.1 가정 사항

본 연구의 시뮬레이션 기간은 1995년부터 2025년으로 가정하였다. 1995년부터 2002년까지의 자료는 모델의 예측력을 검증하기 위하여 사용하였다. 따라서 예측을 위한 시뮬레이션 기준 년도는 2003년이다. 또한 생산설비의 용량은 수요를 만족시킬 수 있다고 가정하였으며 재고는 고려하지 않고 생산량과 수요량이 일치한다고 가정하였다. 시멘트산업에 있어 에너지원의 사용은 석탄, 석유, LNG, 전력을 사용하며 초기의 구입비용은 <표 2>와 같이 반영하였으며 탄소배출계수는 IPCC에서 정한 <표 3>의 계수를 사용하였다.

에너지원	가격	에너지원	가격
석탄	130000원	석유	166600원
LNG	277300원	전력	529000원

<표 6> 에너지원별 가격

에너지원	탄소배출계수	에너지원	탄소배출계수
석탄	1.059	석유	0.875
LNG	0.637	전력	1.302

<표 7> 에너지원별 탄소배출계수

## 4.2 시나리오

### 4.2.1 BAU(Business As Usual) 시나리오

시뮬레이션 기간인 1995년부터 2025년까지 시멘트의 수요가 현재의 추세대로 지속된다는 가정을 바탕으로 둔 시나리오이다. 이 시나리오에서는 2025년까지 기후변화협약을 대비하여 아무런 투자나 정책을 도입하지 않는다. 그러므로 시간의 경과에 따라 시멘트의 수요와 이산화탄소 배출량은 과거의 추세에 맞추어 증감하도록 하였다.

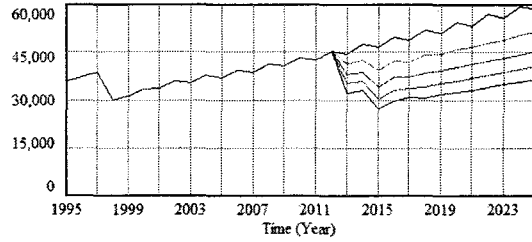
### 4.2.2 탄소세 부과 시나리오

탄소세의 부과가 2012년부터 시작된다는 가정으로 만들어진 시나리오이다. 탄소세는 3만원/TC(Ton Carbon)에서 12만원/TC까지 다양한 수준으로 부과하며 그에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

## 4.3 시나리오 분석 및 결과

본 연구의 시나리오 분석은 탄소세 부과에 따른 총수요, 이산화탄소 배출량, 에너지원 사용비율의 변화율의 관점에서 실시하였다.

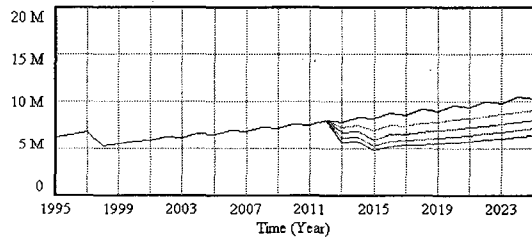
<그림 5>는 BAU 시나리오와 탄소세 부과 시나리오에 대한 시멘트 수요의 전망치를 보여준다. 앞서 말한 바와 같이 탄소세가 3만원에서 12만원까지 3만원 간격으로 부과됨에 따



시멘트 총수요 : BAU-120000  
 시멘트 총수요 : BAU-90000  
 시멘트 총수요 : BAU-60000  
 시멘트 총수요 : BAU-30000  
 시멘트 총수요 : BAU

<그림 6> 시멘트 총수요  
 른 민감도 분석을 수행하였다. 탄소세의 부과로 인해 2012년부터 에너지원의 가격이 높아지고 그에 따라 시멘트 가격이 상승하여 시멘트 총수요가 하락함을 볼 수 있다.

또한 <그림 6>에서 볼 수 있듯이 시멘트산업의 이산화탄소 배출량은 탄소세의 부과에 따라 줄어들고 있다. 이는 탄소세 부과에 대한 수요의 위축으로 인해 시멘트의 수요가 감



시멘트산업 이산화탄소 배출량 : BAU-120000  
 시멘트산업 이산화탄소 배출량 : BAU-90000  
 시멘트산업 이산화탄소 배출량 : BAU-60000  
 시멘트산업 이산화탄소 배출량 : BAU-30000  
 시멘트산업 이산화탄소 배출량 : BAU

<그림 5> 시멘트산업 이산화탄소 배출량  
 소하므로 이산화탄소를 배출하는 에너지원의 사용량이 줄어들기 때문에 나타나는 결과이다.

		2000	2012	2025
석탄	비율	63%	59%	54%
	사용량	3518	4530	3395
석유	비율	19%	20%	21%
	사용량	1087	1534	1273

LNG	비율	4%	5%	6%
	사용량	251	394	376
전력	비율	14%	16%	19%
	사용량	781	1213	1150

(사용량 단위 : 천TOE)

<표 8> BAU-120000 시나리오의 에너지원 사용 변화

<표 4>는 시뮬레이션 기간 동안 탄소세가 12만원이 부과되는 시나리오에서 각 에너지원의 사용비율과 사용량의 변동을 보여준다. 탄소세가 2012년에 부과되도록 모델링하였으므로 탄소세가 부과되지 않는 2000년에 비하여 2012년과 시뮬레이션 기간의 마지막인 2025년의 에너지원 사용 변화율이 나타난다. 현재의 사용비율에 비해 탄소배출계수가 높은 석탄과 석유는 사용비율이 줄어들고 있으며 탄소배출계수가 낮은 LNG는 사용량이 증가하고 있다. 또한 전력의 사용비율 역시 증가하고 있는데 이는 현재의 전력가격에 탄소세를 부과하더라도 다른 에너지원에 비해 가격 변화폭이 작기 때문에 나타나는 결과이다.

탄소세 부과 시나리오 분석 결과 탄소세를 12만원 부과할 경우 현재 시멘트산업에서 가장 많이 사용되어지는 에너지원인 석탄의 사용비율은 2000년 63%에서 2025년 54%로 9%가 감소하는 추세를 보였으며 다른 에너지원들은 에너지 사용비율이 상승하였다. 탄소세 부과 금액이 3만원, 6만원, 9만원인 시나리오에서도 이와 같은 추세를 보인다.

## 5. 결론

본 연구는 기후변화협약이 시멘트산업의 각 에너지원별 사용량에 미치는 영향을 시스템 다이내믹스 방법론에 의한 시뮬레이션 모델을 이용하여 분석하였다.

시멘트산업 시뮬레이션 모델은 환경 모듈, 경제 모듈, 에너지 모듈의 총 3가지 모듈로 구성하였고 모델의 검증에 위해 의태분석을 수행하여 예측력을 평가하였다.

시뮬레이션 분석은 BAU 시나리오와 탄소세 부과 시나리오에 대해 총수요의 예측치, 이산화탄소 배출량의 추이, 에너지원의 사용비율 변화를 중심으로 수행되었다.

수행결과 탄소세를 TC 당 12만원 부과한 경우 2000년 대비 2025년 시멘트의 총수요는 BAU 시나리오의 성장률인 76%에 비해 상당히 낮은 9%의 성장률을 보였다. 이산화탄소의 배출량의 증가율은 BAU 하의 87%보다 적은 17%로 나타났다. 또한 에너지 사용비율은 석탄의 사용비율이 9% 감소하였으며 석유와 LNG는 2% 상승하였고 전력의 사용비율은 5% 상승하였다. 이는 탄소세 부가가 에너지 집약산업에 있어서 총수요, 이산화탄소 배출량 및 에너지원 사용비율에 적지 않은 영향을 미치는 것을 보여준다.

본 연구는 향후 기후변화협약의 의무 부담이 큰 에너지 집약산업들에 있어서 에너지원의 사용 및 수요를 예측하고 이를 평가하기 위한 지침을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 과제로서 본 연구의 예측력과 정확성을 높이기 위해 에너지 집약 산업들에 대한 통합적인 모델을 구축하고 각 산업 모델에 산업별 에너지 절약기술, 이산화탄소 저감 기술 혹은 정책, 그리고 대체에너지 등을 함께 고려한 형태의 모델 개발이 이루어져야 할 것으로 본다.

## 참고문헌

[1] 김도훈 외, “시스템 다이내믹스”, 대영문화

- 사, 1999.
- [2] 박진원 외, “기후변화 원인물질 저감기술의 평가시스템 개발”, 환경부, 2004.
- [3] 부경진 외, “에너지·환경·경제 통합 계량경제 시뮬레이션 모형에 의한 온실가스 저감수단의 평가”, 에너지경제연구원, 2002.
- [4] 유동현, “시멘트산업의 이산화탄소 배출저감 방안”, 에너지경제연구원, 1995.
- [5] 임재규 외, “기후변화협약의 국내 산업구조 및 국제 경쟁력 파급효과”, 에너지경제연구원, 2000.
- [6] 정석재 외, “시스템 다이내믹스를 이용한 탄소세 부과가 철강 산업에 미치는 효과 분석”, 대한산업공학회 춘계학술대회 논문집, 2005.
- [7] John D. Sterman, “Business Dynamics”, Irwin McGraw-Hill, 2000.