

시멘트산업의 온실가스 배출저감 시나리오 분석

Analysis of the Green House Gas Reduction Scenarios in the Cement Manufacturing Industry

김 현 석 · 강 희 정*

건국대학교 산업공학과

(2006년 10월 13일 접수, 2006년 11월 28일 채택)

Hyun-Suk Kim and Hee-Jung Kang*

Department of Industrial Engineering Konkuk University

(Received 13 October 2006, accepted 28 November 2006)

Abstract

This study examines greenhouse gas reduction potentials in cement manufacturing industry of Korea. An energy system model in the MARKAL (MARKet ALlocation) modeling framework was used in order to identify appropriate energy technologies and to quantify their possible implications in terms of greenhouse gas reduction. The model is characterized as mathematical tool for the long term energy system analysis provides an useful informations on technical assessment. Four scenarios are developed that covers the time span from 2000 to 2020.

Being technology as a fundamental driving factor of the evolution of energy systems, it is essential to study the basic mechanisms of technological change and its role in developing more efficient, productive and clean energy systems. For this reasons, the learning curves on technologies for greenhouse gas reduction is specially considered.

The analysis in this study shows that it is not easy to mitigate greenhouse gas with low cost in cement manufacturing industry under the current cap and trade method of Kyoto protocol.

Key words : Cement manufacturing, Greenhouse gas, Energy system model, Technology evaluation

1. 서 론

2005년 2월 러시아의 교토의정서가 발효됨에 따라 기후변화협약에 대한 우리의 협상력 및 내부능력 강화가 요구되어지고 있다. 특히 향후 중요 협상의제(Post-2012) 중 하나는 우리나라와 중국, 멕시코, 인도와 같은 선발 개도국의 의무부담 문제일 것으로 대

부분의 전문가들은 예측하고 있다. 이러한 현실에서 저감의무에 대응하기 위해 우선적으로 온실가스 배출원의 대부분을 차지하는 에너지소비 부문에 대한 온실가스 저감잠재량을 파악하는 일은 매우 중요하다. 온실가스 배출저감 가능량의 파악은 곧 국가적인 저감목표 설정의 중요 요소이며 기후변화협약에의 대처와 온실가스 저감대책의 수립에 매우 중요한 기초 자료이기 때문이다. 또한 기후변화협약 이해관계자(기업 등)의 대응목표 및 노력에 대한 불확실성을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 에너지 수요관리 정

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-450-3200, E-mail : kanghi@konkuk.ac.kr

책수립 즉, 국내 온실가스 배출의 80% 이상을 차지하는 에너지부문의 효과적인 온실가스 저감정책 수립과도 밀접하게 연관성을 갖고 있기 때문이다.

온실가스 저감가능량은 매년의 에너지소비량, 저감 수단 및 기술의 채택, 외부 시장변화에 따라 달라질 수 있기 때문에 주요 국가 및 국제기관(국제에너지기구, 국제원자력기구 등)에서는 국가 온실가스 저감 잠재량 분석을 위한 기반 정비 즉, 에너지소비 및 온실가스 배출 특성 파악, 관련 통계 및 기술 특성치 파악, 저감잠재량 분석 도구 개발 및 운영 등에 노력하고 있다. 온실가스 저감량 산정을 위한 평가체계의 구축을 위해서는 기본적으로 다음과 같은 정보의 구성요소 간 유기적 결합이 필요하다. 첫째, 에너지공급 및 수요(소비), 배출원에 대한 통계자료, 둘째 온실가스 저감수단(행동, 설비투자, 기술의 적용 등)에 대한 시장자료 즉, 수단의 채택에 대한 초기 자본비용, 고정 및 변동운영비, 제도적 측면 등에 대한 정보, 그리고 온실가스 저감수단을 평가하기 위한 적절한 분석 도구의 마련이다.

시멘트산업은 전형적인 에너지다소비 업종의 하나로 분류되지만 지금까지 시멘트 제조기술(기존기술 뿐만 아니라 신기술까지 포함)별 온실가스 저감량에 대한 국내의 연구는 체계적으로 수행된 바가 거의 없다. 이에 본 연구에서는 상향식 접근방법(bottom-up approach)을 이용하는 시장분배모형(Market Allocation : MARKAL)을 사용하여 대표적인 국내 시멘트산업을 대상으로 각 온실가스 저감수단(기술)의 평가를 수행하고 이에 따른 온실가스 저감잠재량을 분석하고자 한다. 적절한 여건변화를 반영하기 위하여 4개의 시나리오를 설정하였으며 특히 미래 기술발전을 정량적으로 표현하는 학습효과(learning effects)도 고려하는 시나리오를 설정하였다. 온실가스 저감수단의 범위는 시멘트 제조기술로 한정하였다.

2. 분석모형

본 연구에서 사용하는 MARKAL모형은 국제에너지기구(International Energy Agency : IEA)의 주도로 다국가 간 협동프로젝트의 하나로 에너지/환경시스템 분석을 위하여 개발되기 시작하였다. 현재 에너지 및 기후변화협약 관련 국제기구를 비롯하여 35개국

75개 이상의 기관에서 온실가스 저감과 관련된 정책 분석을 위해 적절히 자국 실정에 맞도록 변형하여 사용하고 있다. 국제에너지기구의 에너지기술평가그룹(ETSAP)에서도 본 모형을 공식적으로 채택하고 있어, 국가 간 온실가스 저감 관련 비교 연구를 위해서는 이 모형의 적절한 활용이 필수적이라 판단된다. 그러나 MARKAL모형의 국내 적용은 아직 기본적인 단계에 불과하다. 본 연구에서는 우리가 보유하고 있는 에너지소비통계, 온실가스 저감기술의 특성치 등의 한계를 감안하여 적절한 모형을 구축하였다.

MARKAL모형은 장기간의 광범위한 에너지 및 환경정책 평가에 대한 기본적인 구조를 제공하기 위해 설계된 선형프로그램 모형이며, 국가 단위나 특정 지역단위 등에 적용할 수 있는 유연한 분석도구이다. 주로 에너지시스템의 복잡한 상호관계를 추적하거나 에너지자원, 에너지변환, 에너지기술 평가를 하는데 유용하게 이용된다(Kram and Hill, 1996). 온실가스 저감량을 산정하기 위해서는 온실가스 저감정책에 대한 시나리오를 설정하여 분석하게 된다. MARKAL 모형은 다주기 선형계획모형(multi-period linear programming model)으로 목적함수는 분석기간 동안 할인율을 고려한 총 시스템 비용의 최소화이다. 모형의 최적화는 분석기간 전체의 에너지서비스나 수요를 만족시키면서 연도별 에너지 공급비용의 합계가 최소로 되도록 결정하는 동적 선형계획모형(dynamic linear programming model)으로도 특징지을 수 있다.

모형 운영을 위한 입력자료는 기술(설비, 기기 등)의 투자비용, 운영비용, 기술 특성치 뿐만 아니라 상당히 세부적인 에너지소비 특성, 에너지 효율 등 매우 미시적인 데이터를 필요로 한다. 이를 토대로 효과적인 온실가스 저감방안 수립을 위한 기술적, 경제적인 측면의 분석이 가능하다. 여기에는 에너지전환(conversion)기술의 활동(activity)과 규모(capacity), 에너지사용기술(설비)의 규모, 온실가스 배출량, 각 기술의 조합에 따른 온실가스 배출특성 등이 포함된다. 특히 기술은 에너지전환, 이용설비, 최종 사용설비로 크게 구분되는데 전환기술은 발전이나 열을 생산하는 기술이고, 이용설비는 부하와는 별도로 에너지로 전환시키는 공정기술이며, 에너지 사용설비는 최종에너지 소비기술을 나타낸다. 이와 같이 MARKAL은 기술평가에 대한 분석기능이 세분화되어 있다. 모형의 전체 분석기간은 일정한 기간의 주기(period)로

나눌 수 있으며 모형 사용자의 분석 목적에 따라 설정된다. 분석기간 동안 연간 총 비용은 투자비용, 변동 및 고정비용, 연료비용, 환경배출에 관한 환경세 등이 포함된다. 모형의 목적함수는 연간 발생하는 총 비용(annual cost : ANNCOST)을 분석기간 초기년도의 현재가치로 환산하고 난 후, 각 주기(t)를 시간범위의 초기년도로 환산한다. 모형의 목적함수는 다음과 같이 표현된다(Loulou *et al.*, 2004).

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^{t=NPER} (1+d)^{NYRS(1-t)} \times ANNCOST(r, t) \times (1+(1+d)^{-1} + (1+d)^{-2} + \dots + (1+d)^{1-NYRS})$$

여기에서,

NPV : 총 비용의 순 현재가치(Net present value)

ANNCOST(r, t) : r지역(국가)에서 t기간 동안 에너지비용, 에너지공급, 전환, 소비에 필요한 투자 및 운영비용, 세금 등을 포함

NPER : 분석기간 동안의 주기(period) 수

NYRS : 각 주기(period) t에서 연도 수 이다.

기술평가는 목적함수인 총에너지시스템비용을 최소화하는 기술들의 조합을 통해 이루어진다. 온실가스 저감수단의 선택은 요구되는 미래의 저감량수준(시나리오에 의하여 설정)에 따라 결정된다. MARKAL모형에서 에너지소비 과정(공급에서 최종소비 단계까지)은 네트워크 형태로 표시되는데 에너지공급, 에너지 전환과 처리(발전소 등), 최종수요(예: 보일러, 시멘트 제조공정 등)의 3단계로 구분된다. 이와 같은 네트워크를 기준에너지시스템(Reference Energy System: RES)이라고 한다. 에너지원은 에너지 최종사용

이 아닌 에너지공급에 필요한 생산을 위해 설비에 이용되거나 소비되는 자원의 추출·채광, 수출, 수입의 모두를 의미하며, 경우에 따라 태양광, 풍력 등의 신재생에너지원도 포함된다.

3. 시멘트업종의 에너지시스템 분석

시멘트제조업의 에너지소비는 2002년 기준 산업부문 전체 에너지소비의 약 5.1%에 달한다. 또한 온실가스 배출은 6,922천T-C으로 우리나라 에너지소비에 의한 이산화탄소배출량 127,146천T-C의 5.4%를 차지하고 있다(산업자원부, 2002). 국내 시멘트산업은 1980년대와 90년대 중반까지 사회간접자본 확충 및 대규모 주택건설 등에 따라 연평균 9.4%의 생산량 증가율을 기록하였으나 90년대 중반 이후 지금까지 생산량은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 2004년 기준 총 생산량은 54,330천 톤에 이르고 있다. 제품 구성을 보면 전통적인 포틀랜드 시멘트 이외에 철강슬래그 등 부산물을 이용한 슬래그 시멘트의 비중이 꾸준히 증가하여 2004년 기준 전체 시멘트 생산량의 약 16%에 이르는 8,736천 톤에 달하는 생산실적을 보이고 있다.

시멘트 생산공정은 크게 원료 채광, 원료 가공, 열처리(소성), 그리고 제품화 공정으로 구분할 수 있으며, 그림 1은 시멘트 생산 공정의 구성과 흐름을 나타낸 것이다(에너지경제연구원, 2004). 국내 시멘트 분야 에너지소비 및 기술 채택현황을 살펴보면, 시멘트 공정에서 절대적인 에너지 소비비중을 차지하고 있는 소성공정의 경우 이미 1980년 초부터 기존 열

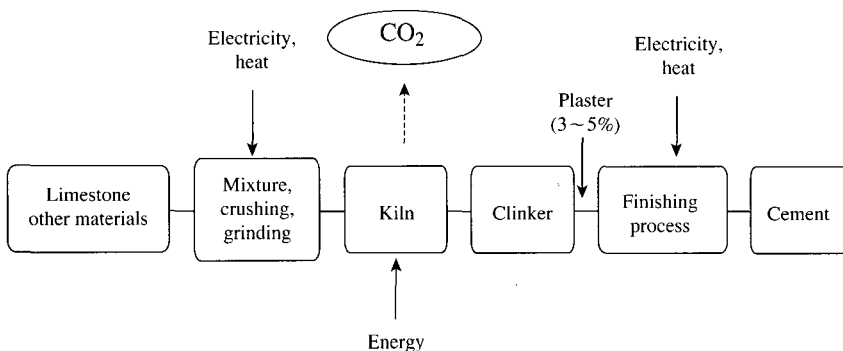


Fig. 1. Cement manufacturing process.

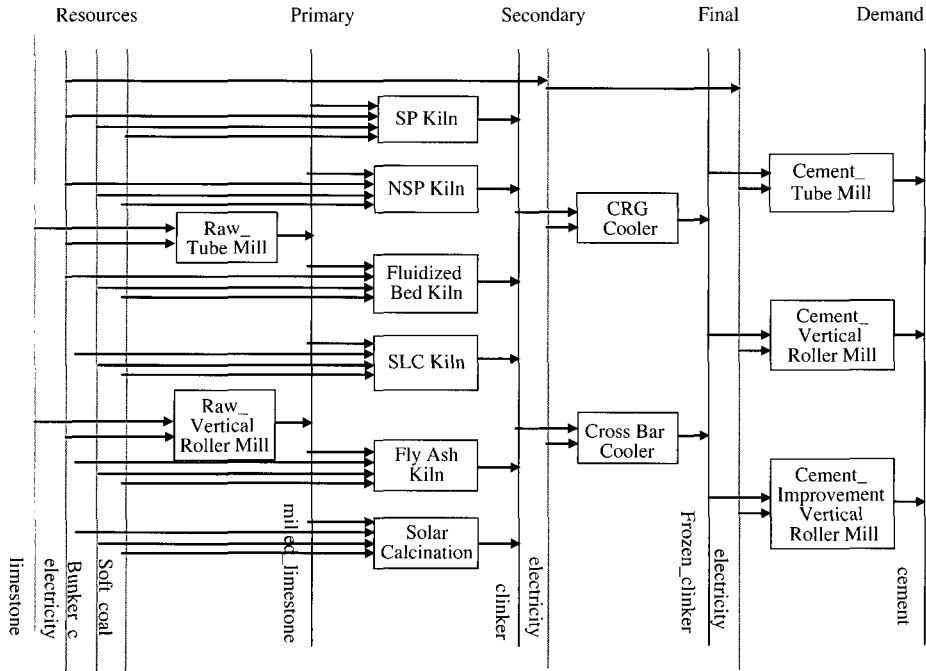


Fig. 2. Reference energy system (RES) of cement manufacturing industry.

Table 1. Technology lists of cement manufacturing.

Notation	Technology
MILL1	Tube Mill (Ball Mill)-Raw Mill
MILL2	Vertical Roller Mill (VRM)-Raw Mill
KILN1	SP Kiln
KILN2	NSP Kiln
KILN3	Pulverized
KILN4	SLC (Separate Line Calciner) Kiln
KILN5	Clinker manufacturing by ash
KILN6	Solar Calcination
COOLER1	Conventional Reciprocating Grate Cooler
COOLER2	Cross Bar Cooler
CMILL1	Tube Mill (Ball Mill)-Cement Mill
CMILL2	Vertical Roller Mill (VRM)-Cement Mill
CMILL3	Improvement Vertical Roller Mill-Cement Mill

효율이 낮은 반건조식 Lepol 공정 및 4단 SP 공정을 건조식 NSP 공정으로 활발히 대체해 왔으며, 이러한 노력의 결과로 현재 시멘트 소성공정 중 NSP 공정의 비중이 일본의 83%보다 높은 95% 수준에 이르고 있다(Conway and Schultz, 2002). 또한 분쇄공정에서는 구형 볼 밀(ball mill)에서 롤러 밀(roller

mill)로 교체가 이루어지고 있으며, 롤러 밀은 분쇄 효율이 높아 전력소비가 적고 분쇄·분급·건조를 동시에 함으로써 설비가 간소화된다는 이점이 있다. 또한, 분쇄자동화 시스템 및 고효율 분리기기의 도입도 확대해 나가고 있다. 이에 힘입어 세계적으로 최신 설비를 갖추고 있으며, 이에 따라 에너지 원단위도 상당히 우수한 수준에 위치해 있다. 그만큼 온실가스 저감의 한계비용도 높다는 의미이다.

시멘트 제조 공정도를 기본으로 하여 국내 기준에 너지시스템(RES)을 나타내면 그림 2와 같다.

4. 온실가스 저감잠재량 분석

4.1 분석의 조건 및 입력자료

본 연구에서 설정한 기본 전제로써 우선 2020년까지를 분석기간으로 설정하였으며 할인율은 7%를 적용하였다. 시멘트제조업의 신기술 범위는 에너지기술 DB(에너지관리공단, 2005, 2004; 산업자원부, 2004)의 시멘트분야 온실가스 저감 옵션자료에 나타난 기

Table 2. CO₂ Emission Coefficient of technology.

Technology	MILL1	MILL2	KILN1	KILN2	KILN3	KILN4	KILN5	KILN6	COOLER 1	COOLER 2	CMILL 1	CMILL 2	CMILL 3
Emission coeff. (kt-C/ million ton)	1.00	0.73	79.80	63.10	53.90	60.20	56.69	50.98	0.41	0.35	1.73	1.36	1.29

술을 근거로 모형운영에 필요한 데이터를 작성하였으며 2000년을 기준으로 기 설치되어 있는 공정기술(기술이 적용된 설비)을 기존기술로 분류하였다(표 1). 표 1에서 KILN3~6, COOLER2, CMILL3이 신기술 즉, 온실가스 저감옵션으로 분류될 수 있다.

분석기간인 2020년까지 시멘트 수요는 2000년을 기준으로 년 평균 2.6% 증가하는 것으로 가정하였다(에너지경제연구원, 2004). 한편 각 시멘트 제조기술(KILN 공정)의 이산화탄소 배출계수는 표 2와 같다(산업자원부, 2004).

4.2 시나리오 설정

기술의 선택, 에너지원의 조합 및 조건 등 아무런 제약 조건이 없는 시나리오를 기준시나리오(Baseline)로 설정하였다. 여기에 현실적인 제약조건을 추가, 저감옵션을 투입한 저감옵션투입시나리오(S_Baseline)를 구성하였다. 이 S_Baseline은 현실적인 베이스라인으로 여러 가지 탄소제약 시나리오의 기본이 되는 시나리오이다. S_Baseline을 기본으로 하여 시멘트 제조기술의 기술진보를 표현하는 학습곡선(learning curve)(Gomez, 2001)을 적용한 학습곡선적용 시나리오(LC)를 설정하고, 학습곡선적용 시나리오에서 온실가스 저감잠재량을 평가할 수 있는 학습곡선과 탄소제약 시나리오(LC_CO₂)도 설정하였다. 즉, 이산화탄소 배출량을 제약조건으로 설정하여 그 제약조건 하에서 최적해를 구하였다. 온실가스 저감옵션 투입으로 인한 추가 투자비용 등도 중요한 정보이기 때문이다. 각 시나리오의 내용(story line)은 다음과 같다.

4.2.1 시나리오 1: 기준시나리오(Baseline)

에너지기술DB의 2000년 기준 투입되어 있는 기술을 대상으로 시나리오를 구성하였다. 2000년 이후에 투입될 옵션 기술은 고려하지 않고 기존 기술로만 2020년까지 시멘트 수요예측에 맞춰 시멘트를 생

산하도록 시나리오를 설정하였다.

4.2.2 시나리오 2: 저감옵션투입시나리오(S_Baseline)

기준시나리오에서 신규 옵션기술을 투입한 시나리오이다. 에너지기술DB에서 고려하고 있는 모든 시멘트 옵션기술을 도입하고 옵션의 투입시기와 필요한 자료를 입력하여 기존 기술과의 경쟁력을 분석할 수 있는 시나리오이다.

4.2.3 시나리오 3: 학습곡선적용시나리오(LC)

저감옵션 투입시나리오에서 신기술에 대한 기술진보, 즉 학습효과로 인한 투자비용 감소 등을 고려한 시나리오로 신기술 투입용량이 증가함에 따른 기술변화를 살펴보는 시나리오이다.

4.2.4 시나리오 4: 학습곡선과 탄소제약시나리오(LC_CO₂, CO₂_005)

학습곡선적용시나리오에 이산화탄소 총 배출량을 5%를 저감하도록 탄소제약을 가한 시나리오이다. 2000년부터 2020년까지 배출한 이산화탄소의 양에서 각 주기마다 5%를 저감하도록 상한치(upper bound)를 설정한 시나리오이다.

4.3 분석결과

4.3.1 시나리오별 기술의 경쟁력

새로운 온실가스 저감 옵션기술을 투입하지 않고 기존기술로만 구성된 Baseline 시나리오에서는 MILL 공정은 MILL2기술이, KILN 공정은 KILN2, COOLER는 COOLER1, CMILL은 CMILL1이 가장 경쟁력 있는 기술(투입되는 용량 규모가 큼)로 나타나고 있다. 그림 3은 기술별 용량규모, 즉 각 기술을 채택하고 있는 설비의 생산용량을 나타낸다. 온실가스 저감 옵션을 투입한 S_Baseline 시나리오에서는 새로운 옵션이 투입되고 있다. MILL 공정은 옵션이 없으므로 Baseline 시나리오와 동등한 결과를 보여주고 있

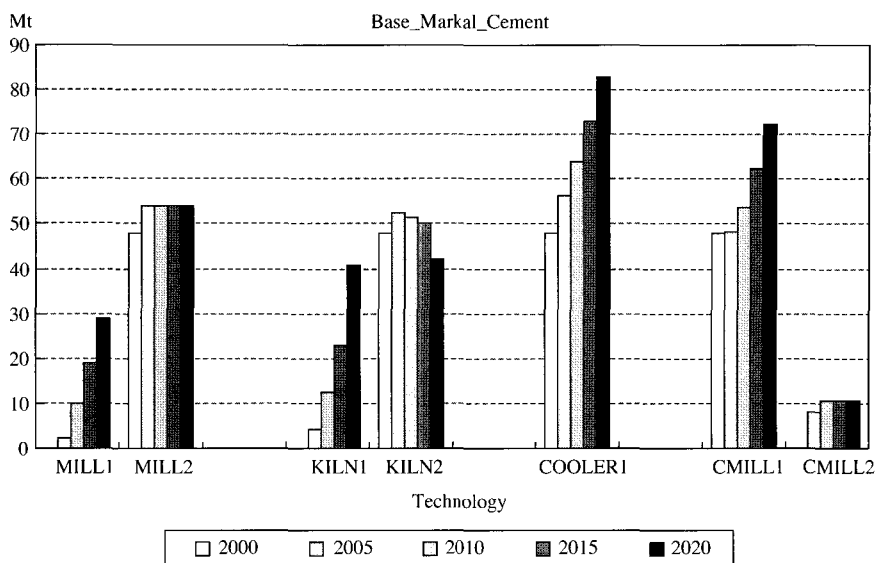


Fig. 3. Technology mix of scenario 1.

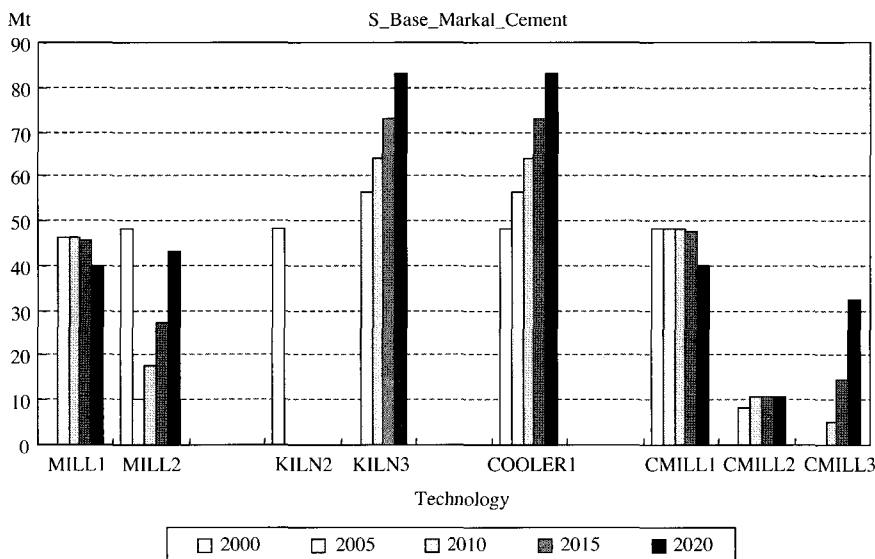


Fig. 4. Technology mix of scenario 2.

다. KILN 공정은 옵션인 KILN3이 가장 경쟁력 있는 기술로 나타나고 있다. COOLER 공정의 기술인 COOLER2는 S_Baseline에서는 기존 기술보다 경쟁력이 없는 것으로 나타나고 있다. CMILL 공정의 경우 기존의 CMILL1 기술이 설계수명을 다하는 분석

기간 후반기로 갈수록 CMILL3 기술로 대체되는 것을 알 수 있다(그림 4).

학습곡선을 적용할 경우 저감옵션투입 시나리오에 비해 KILN 옵션 기술이 경쟁력을 확보하면서 투입되는 것을 볼 수 있다. 이는 이른바 ‘Learning by

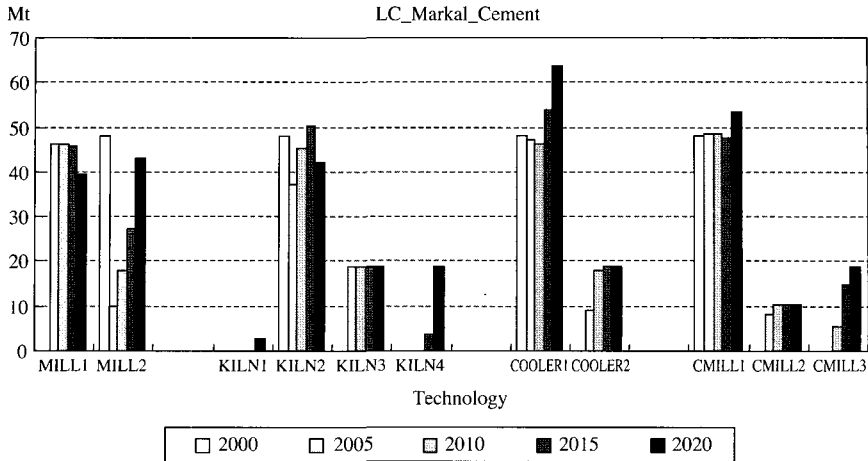


Fig. 5. Technology mix of scenario 3.

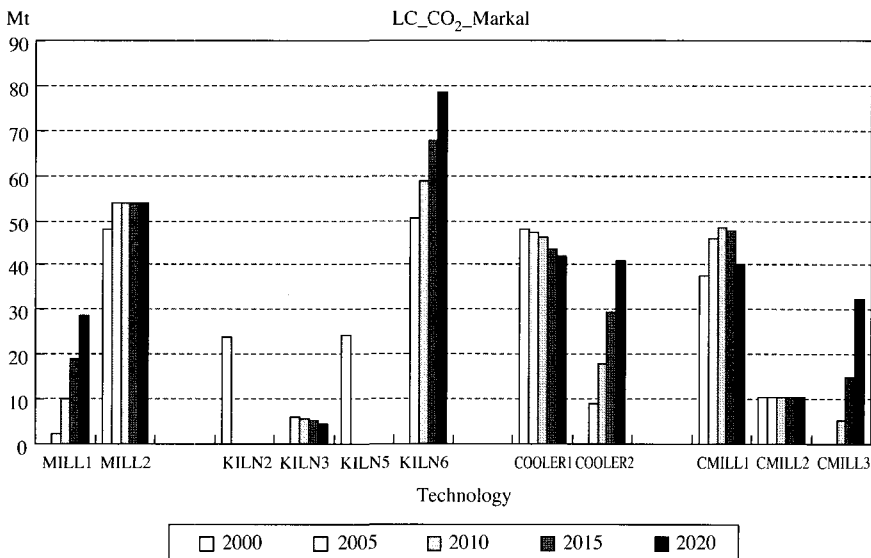


Fig. 6. Technology mix of scenario 4.

doing/using'에 의한 학습효과로 옵션기술의 투자비가 줄어들면서 옵션기술이 경쟁력을 가진 것에 기인한다(그림 5). 학습곡선과 탄소제약 시나리오(LC_CO₂, CO₂_005)의 경우 즉, 이산화탄소 배출량의 5%를 저감하도록 탄소제약을 가한 시나리오에서는 이산화탄소를 주로 배출하는 KILN 공정 기술이 많이 바뀌고 있음을 알 수 있다. KILN 공정에서는 KILN6 기술이 주로 투입되고 있는데 이 기술은 태

양열 소성기술로 다른 KILN 기술보다 투자비, 변동비, 고정비 등의 비용이 높지만 상대적으로 이산화탄소를 적게 배출하는 기술이기 때문이다(그림 6).

4. 3. 2 이산화탄소 배출과 총 비용

이산화탄소 배출량을 보면 물론 온실가스 옵션투입이 되지 않은 기준시나리오에서 가장 많은 배출량을 보였고 저감옵션을 투입한 시나리오에서 조건에

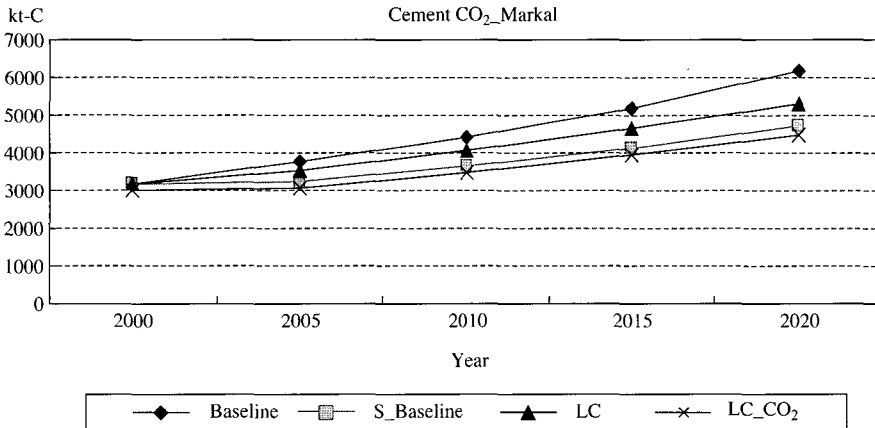


Fig. 7. Comparison of CO₂ emission by scenarios.

따라 최대 30%의 저감비율을 보이고 있다(그림 7). 본 연구에서의 온실가스 저감옵션이 대부분 기술적인 옵션으로 구성되어 있고 시멘트 제조산업이 전형적인 장치산업으로 기술발전 속도가 빠르지 않다는 점을 고려하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

첫째, 시멘트 생산량이 향후 완만하게 증가된다는 점에서 지금과 같이 교토의정서에서 규정하고 있는 국가별 절대적인 총량규제방식이 그대로 시멘트산업에 적용되는 경우 1995년, 2000년 등의 특정년도를 기준으로 한 대폭적인 온실가스 저감은 거의 불가능하다. 그림 7에서 보듯이 시멘트생산량 증가와 더불어 온실가스 배출도 증가하기 때문이다. 둘째, 시나리오별 온실가스 배출량은 큰 차이를 보이고 있다. 2020년 기준 베이스라인 시나리오와 가장 온실가스를 적게 배출하는 시나리오간의 온실가스 배출량 차이는 약 30%에 이른다. 다음으로 온실가스 저감옵션을 투입하여 온실가스 배출량을 저감하더라도 여기에는 추가적인 설비투자비, 운영비가 소요될 수 있다.

총 비용을 나타내는 목적함수 값은 탄소제약 시나리오가 가장 높고 기준시나리오, 저감옵션투입 시나리오의 순으로 낮게 나타나고 있다. 옵션을 투입하면 총 시스템 비용은 기준시나리오 대비 9.1%가 감소되는 결과가 나타났는데, 이는 옵션 기술이 기존 기술보다 가격 경쟁력이 앞서는 것으로 해석할 수 있다. 학습곡선적용시나리오에서 MARKAL의 목적함수는 4.6% 감소하였고, 학습곡선과 탄소제약시나리

오에서는 기준시나리오대비 22.6% 증가하였다. 이는 탄소제약으로 인해 저감옵션투입 시나리오보다 온실가스를 5% 저감하였으나, 목적함수 값은 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다.

각 기술에 대한 설비용량에 대한 특별한 제약조건이 없는 상태에서는 목적함수 값만 최소화 되도록 최적화가 됨으로 각 기술에 대한 한계비용은 큰 의미가 없다. 단지 각 기술간의 상대적 비교만을 해보면 MILL공정의 경우 MILL2 기술이 한계비용이 높게 나타나는데 이는 MILL1 기술이 더 경쟁력(최소비용)을 갖고 있음을 의미한다. KILN 공정의 경우에도 KILN1 공정이 더 경쟁력을 가지고 있다.

KILN3~6, COOLER2, CMILL3의 저감옵션을 투입한 저감옵션투입시나리오의 투자 한계비용을 살펴보면 MILL 공정은 기준시나리오와 동일하고 여러 옵션이 투입된 KILN 공정에서 투입되지 못하는 KILN 공정들이 한계비용이 높게 나타나고 있다. KILN 공정에서 가장 경쟁력을 보이는 기술은 KILN3 기술이다. 최적해에 포함되지 못한 기술들은 대체로 높게 나타나고 있다.

학습곡선을 적용한 시나리오에서는 시간이 경과함에 따라 전체적인 한계비용이 줄어들고 있음을 발견할 수 있는데 이는 내생적인 학습곡선의 적용으로 용량이 증가하면서 비용이 감소되는 학습효과에 기인한다. 또한 혼합정수계획을 사용하여 최적해를 도출하는 학습곡선적용 시나리오와 학습곡선과 탄소제약 시나리오에서는 기준시나리오와 저감옵션투입시

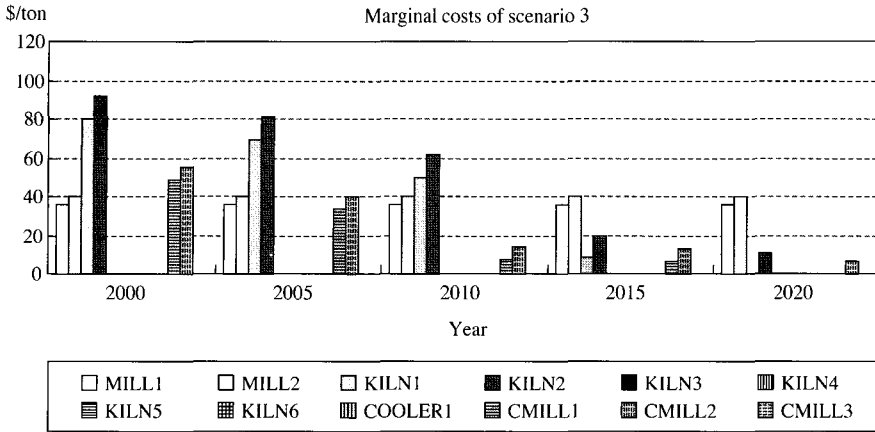


Fig. 8. Marginal costs of scenario 3.

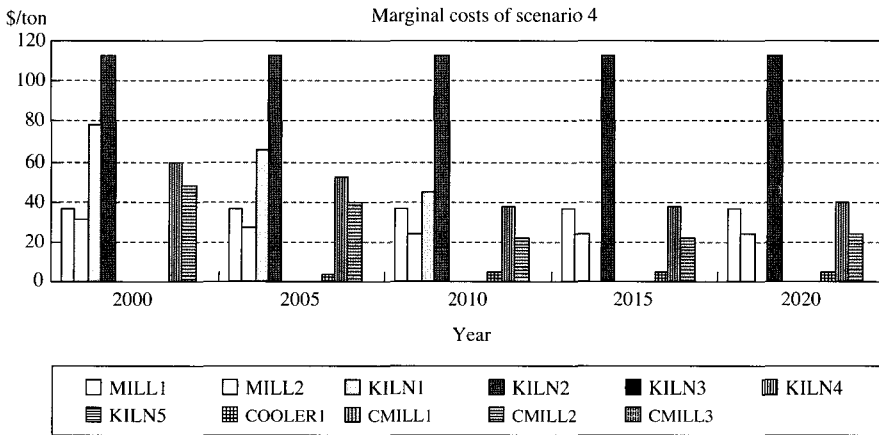


Fig. 9. Marginal costs of scenario 4.

나리오의 한계비용과는 차이를 보이고 있다(그림 8). 학습곡선과 탄소제약 시나리오에서는 탄소제약으로 인해 KILN6 기술이 가장 경쟁력이 높고 최적해에 포함되면서 한계비용이 전 기간에 걸쳐 0으로 나타나고 있다. 한계비용이 가장 높은 기술은 KILN2 기술이다. 배출계수가 가장 높은 기술은 KILN1 공정이고 두 번째로 KILN2 공정이 높으나 KILN2 공정은 투자비, 변동비, 고정비 모두에서 KILN1 공정보다 높기 때문에 KILN2의 한계비용이 가장 높게 나타나고 있는 것이다(그림 9).

5. 결 론

본 연구에서는 MARKAL모형을 사용하여 우리나라의 시멘트산업에 대한 온실가스 저감효과를 분석하였다. 특히 기술개발에 따른 비용감소효과를 나타낸 학습곡선을 시나리오에 반영하여 향후 온실가스 저감 신기술에 대한 평가를 수행하였다. 이러한 온실가스 저감 신기술의 기여도 평가는 향후 기술시장의 분석에 유용한 정보를 제공해 줄 수 있는데, 기술평가 작업은 국가적으로도 중요한 의미를 지니고 있다. 기술평가는 다양한 요소평가 결과를 하나의 통일된

지수로 변환하는 과정이며 기술개발의 우선순위 설정을 위한 의사결정과정이기 때문이다. 즉, 에너지부문으로 부터의 온실가스 저감도 공급부문, 수요부문 별로 그 적용기술이 다양해 온실가스 배출원 특성에 적합한 수많은 기술이 존재함으로 어떤 기술을 개발할 것인가가 중요하기 때문이다. 온실가스 저감능력이나 장래의 시장 환경 등을 고려한 기술의 선택/조합(포트폴리오)은 기후변화 대응 국가 기술개발체계의 핵심내용으로 이를 통하여 기술개발 자금이나 인적, 물적 자원의 최적 배분기준이 설정되어지기 때문이다.

대표적인 에너지다소비 업종인 시멘트 제조부문에서의 온실가스 저감은 쉽지 않음을 알 수 있다. 경제발전, 산업 활동 증가로 시멘트 소비가 계속 완만히 증가됨에 비하여 온실가스 저감을 획기적으로 가져올 수 있으며 시장지배력 까지 갖춘 신기술이 개발되지 않은 상황에서 온실가스 배출은 총량적으로 증가될수 밖에 없다. 그러나 현재 활용 가능한 신기술로 적지 않은 온실가스를 저감시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉, 현재의 교토의정서에서 규정하고 있는 국가별 절대적인 총량규제방식(cap and trade)이 시멘트 산업에 적용되는 경우 향후 온실가스배출의 큰 저감은 거의 불가능하다는 점이다. 앞에서 지적한 바와 같이 시멘트생산량 증가와 더불어 온실가스 배출도 증가하는 국내의 상황 역시 온실가스배출 저감을 총량적으로 줄이는 데는 한계성을 더해주는 요인이다. 시나리오별 온실가스배출량은 큰 차이를 보이고 있어 결국 시멘트산업에서의 온실가스 배출 저감은 신기술이 채택된 설비가 얼마만큼 보급되는가에 달려 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서 적용한 신기술은 향후 연구 개발되어

상용화될 수 있는 모든 신기술을 포함하지는 못하였다. 시멘트제조에 많은 옵션기술들이 거론되고는 있으나 아직 모형에서 활용될 수 있는 구체적인 특성치 조사가 어렵기 때문이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 신기술에 대한 신뢰할 만하고 정확한 우리나라의 기술DB 구축이 반드시 필요하다. 기술 분석, 에너지수요 및 가격전망, 향후 기후변화협약의 진전에 대한 대응시나리오 설정 등 보다 더 신뢰할 수 있고 활용도가 높은 분석결과와 도출도 필요한 부분이다.

참 고 문 헌

산업자원부(2002) 에너지 총 조사보고서.
 산업자원부(2004) 에너지기술DB 구축사업.
 에너지관리공단(2004) 산업부문의 온실가스 감축옵션 조사 및 분석연구.
 에너지관리공단(2005) 에너지부문 온실가스 배출 감축잠재력 시범분석.
 에너지경제연구원(2004) 산업공정부문 온실가스 배출전망.
 Conway, R.W. and A. Jr. Schultz (2002) The Manufacturing Progress Functions, *Journal of Industrial Engineering*, 10, 38-44.
 Gomez, T. (2001) *Technology Learning in Energy Optimization Models and Deployment of Emerging Technologies*, Doctoral thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 68-86.
 Kram, T. and D. Hill (1996) A multinational model for CO₂ reduction. *Defining boundaries of future CO₂ emissions in nine countries*, *Energy Policy*, 24(1), 39-51.
 Loulou, R., G. Goldstein, and K. Noble (2004) *Documentation for the MARKAL Family of Models*, ETSAP, 65-73, 332-358.