

상향식 모형(MARKAL)을 이용한 시멘트산업의 에너지 절약 및 온실가스 감축 잠재량 추정



노 동 운
에너지경제연구원 연구위원

〈 목 차 〉

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| I. 시멘트산업의 에너지 소비 및 온실가스 배출 추이 | IV. 에너지 절약 및 온실가스 감축 잠재량 |
| II. 시멘트 제조과정 및 에너지 흐름도 | V. 결론 |
| III. 분석 모형 | 참고문헌 |

우리나라는 교토의정서 기간(2008-2012년)에 온실가스를 의무적으로 감축해야 할 필요는 없으나 온실가스 배출 증가속도나 온실가스 배출량이 높은 수준임을 고려할 때 2012년 이후에는 세계적인 온실가스 감축노력에 동참해야 한다는 압력을 받고 있다. 이러한 상황에서 국내의 온실가스 감축 잠재력을 파악한다면 향후 국제적인 협상이나 우리나라의 에너지 절약 및 온실가스 감축 정책수립에 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구의 목적은 상향식 최적화(bottom-up optimization) 모형인 MARKAL을 이용하여 시멘트산업의 에너지 절약 잠재량과 온실가스 감축 잠재량을 추정하는 것이다.

I. 시멘트산업의 에너지 소비 및 온실가스 배출 추이

1. 에너지 소비 추이

우리나라 시멘트 생산 및 소비는 1980년대의 올림픽 특수와 신도시 개발, 1990년대의 도시건설, 주택건설과 도로공사 등 사회간접자본 확충사업으로 인해 지속적인 증가세를 나타내고 있다. 시멘트 생산량은 1991년 38,335천 톤에서 2003년 59,194천 톤으로 연평균 3.69%, 시멘트 소비량 역시 1991년 37,115천 톤에서 2003년 58,302천톤으로 연평균 3.84% 증가했다. 1998년에는 금융위기의 영향으로, 2004년에는 경

〈표 1〉 우리나라 시멘트 수급 추이(천톤)

	1991년	1995년	2000년	2003년	2004년	증가율('91-'04)
시멘트 생산	38,335	55,130	51,255	59,194	54,330	2.7%
-슬래그 시멘트	1,710 (4.5%)	3,609 (6.5%)	5,074 (9.9%)	7,847 (13.3%)	8,736 (16.1%)	13.4%
-클링커 생산	34,999	51,894	45,719	51,575	48,251	2.5%
시멘트 수출	1,228	966	3,945	2,612	2,641	9.6%
시멘트 수입	7,160	2,082	518	1,809	3,398	9.4%
시멘트 국내소비	37,115	56,502	48,000	58,302	54,942	3.1%

자료 : 한국양회공업협회, 시멘트통계연보, 2003, 2004

〈표 2〉 시멘트산업의 에너지 소비 추이(천TOE, %)

	1990년	1995년	2000년	2003년	증가율('90-'03)
B-C	67(2.4%)	220(4.9%)	41(1.1%)	29(0.7%)	-6.24%
유연탄	2,450(86.5%)	3,797(83.7%)	3,175(86.1%)	3,502(86.3%)	2.79%
전력	314(11.1%)	521(11.5%)	471(12.8%)	527(13.0%)	4.06%
계	2,831	4,538	3,687	4,058	2.81%

자료 : 한국양회공업협회, 시멘트 통계연보

기하락으로 생산과 소비가 큰 폭으로 감소한 바 있다.

생산비 절감 및 이산화탄소 감축 기술의 하나로 1978년에 처음 도입된 고로 슬래그 시멘트 생산이 빠르게 증가하고 있다. 2003년 고로 슬래그 시멘트 생산량은 7,847천 톤에 이르러 1991년(생산량 1,710천 톤) 이후 연평균 13.5%의 높은 증가세를 나타내고 있다. 슬래그 시멘트가 전체 시멘트 생산량에서 차지하는 비중은 1991년의 4.5%에서 2003년에는 13.3%로 급상승했으며 시멘트 생산 및 소비가 감소한 2004년에도 슬래그 시멘트 생산량은 증가세를 나타내고 있다.

현재 시멘트산업에서 소비되고 있는 에너지는 중유(B-C), 유연탄, 전력 및 대체에너지(AFR : Alternative Fuel and Raw Materials)이며 이중에서

중유와 유연탄 및 전력이 에너지 소비량의 대부분을 차지하고 있다. 중유와 유연탄은 모두 직접가열용(주로 길른 연료용)으로 사용되고 있으며 전력은 동력용(주로 분쇄용, 혼합용)으로 사용되고 있다. 이들 연료 이외에 휘발유, 등유, 경유 및 도시가스가 사용되고 있으나 그 소비량은 전체 에너지 소비량에 비하면 극히 미미한 수준이며¹⁾ 시멘트 생산 공정에 직접적으로 사용되기 보다는 난방, 조명 및 기타용으로 사용되고 있다.

우리나라 시멘트산업의 2003년 에너지 소비(4,058천TOE)는 1990년(2,831천TOE) 이후 연평균 2.8%의 속도로 증가했다. 중유 소비는 1994년을 정점으로 감소하여 연평균 -6.24% 감소한 반면 전력소비는 4.06%, 유연탄 소비도 2.79%의 속도로 증가했다. 시

1) 2002년의 에너지 총조사에 의하면 이들 세 연료를 제외한 나머지 연료의 소비량은 시멘트 제조업에 사용된 에너지 소비량(4,146천TOE)의 2.5%에 불과한 것으로 나타나고 있다.

이슈 진단

멘트 산업이 석유위기를 계기로 중유를 가격, 공급 안정성 및 원료 확보가 유리한 유연탄으로 대체한 노력이 연료별 소비추이를 결정하는 한 요인으로 작용하고 있다.

2003년의 경우 에너지 소비량의 86.3%는 유연탄이, 전력은 13.0%, 나머지 0.7%는 중유가 차지하고 있어 유연탄이 시멘트산업의 주요 에너지임을 알 수 있다. 1990년과 비교하면 유연탄의 비중은 소폭 하락, 중유는 상당폭 하락, 전력은 상승했으며 전력의 비중 상승은 전력이 유연탄과 중유, 특히 중유의 소비를 대체한 것에서 기인하고 있다.

시멘트 생산량을 기준으로 한 에너지 소비 원단위는 지속적으로 개선되고 있는 추이를 나타내고 있다. 에너지소비/시멘트 생산량 원단위(TOE/톤)는 1990년의 0.084에서 지속적으로 하락하여 2003년에는 0.069에

이르렀다. 또한 클링커 생산량을 기준으로 한 에너지소비/클링커생산 원단위(TOE/톤) 역시 1990년의 0.097에서 2003년에는 0.079로 개선되었다.

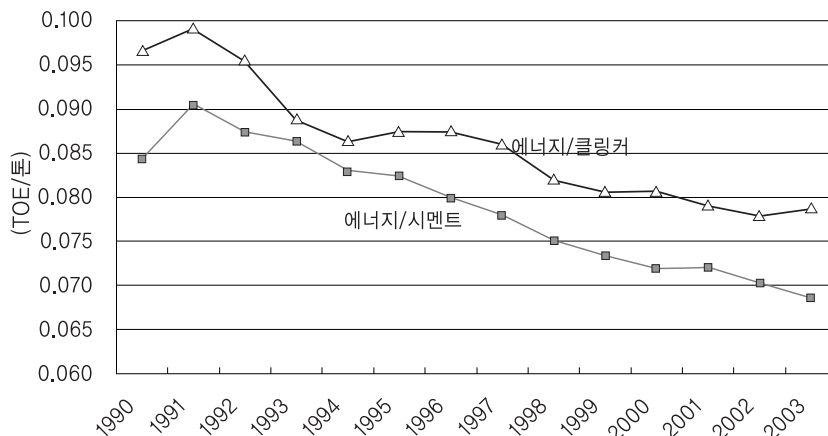
에너지 소비 원단위 개선은 그동안 시멘트 산업이 지속적으로 추진했던 에너지 절약 대책의 결과로 풀이된다. 소성공정(kiln)에서 반건조식 Lepol 및 4단 SP 공정이 건조식 NSP 공정으로 개체되었으며 분쇄 공정에서는 볼 밀(ball mill)이 롤러 밀(roller mill)로 교체되었으며 슬래그 시멘트 생산량이 확대된 것도 한 요인이다²⁾.

2. 온실가스 배출 추이

연료연소에 의한 시멘트산업의 CO₂ 배출량은 2003년에 4,570천TC로서 1990년(3,053천TC) 이후 연평

〈그림 1〉 시멘트 및 클링커 대비 에너지소비 원단위 추이

에너지소비/시멘트, 클링커 원단위 추이



2) 슬래그 시멘트의 석회석 사용량은 포틀랜드 시멘트에 비해 42% 낮은 수준이며 유연탄 소비량도 42% 낮고 전력 역시 14% 낮게 소비되는 것으로 나타나고 있다.

균 3.2% 증가했다. 전력소비에 의한 CO₂ 배출은 연평균 5.9%, 유연탄은 2.8%, 중유에 의한 온실가스 배출은 감소했다. 특징적인 점은 전력소비에 의한 CO₂ 배출량 증가속도(연평균 5.9%)가 전력소비 증가율(4.06%)보다 높다는 점인데 이는 유연탄 화력발전소의 증설로 인해 전력생산의 온실가스 배출계수가 상승했기 때문이다. 전력생산에 의한 온실가스 배출계수는 1990년의 1.273TC/TOE에서 1997년에는 1.744에 도달한 이후 하락하기 시작하여 2003년에는 1.587에 이르고 있다.

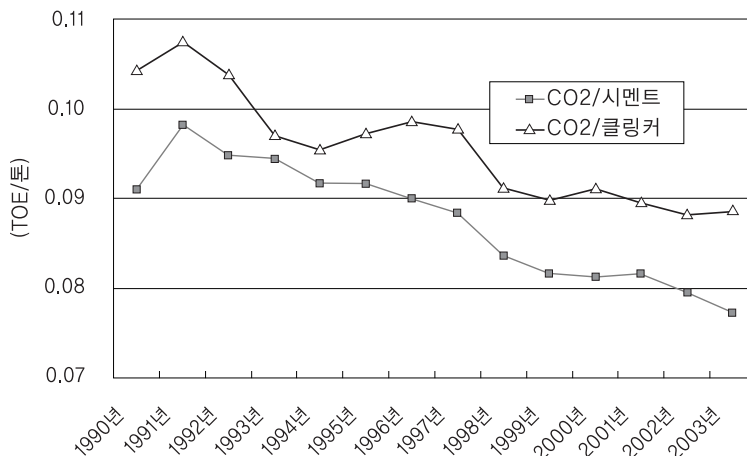
온실가스/에너지소비 원단위는 1990년의 1.078(TC/TOE)에서 지속적으로 상승하여 2003년에는 1.126에 이르러 1990년 원단위 대비 4.5% 악화되었다. 원단위 악화는 에너지 소비의 구성비 변화와 전원 구성의 변화에 의한 것으로 풀이된다. 에너지 소비량 구성비에 있어서 중유의 비중은 감소하고 유연탄과 전력의 비중은 상승했으나 특히 전력의 비중이 가장 빠르

게 상승했다. 여기에 전력생산의 온실가스 배출계수가 유연탄에 비해 15%에서 최고 75%정도 높게 나타나고 있다. 1990년의 전력생산 온실가스 배출계수는 유연탄의 배출계수(1.059TC)에 비해 약 25% 정도 높은 수준이며 1997년에는 75% 정도 높은 수준을 나타냈다. 이는 1988년 이후 증설된 유연탄 화력발전소에서 기인하고 있다.

시멘트 및 클링커 생산량 기준 온실가스 배출 원단위는 지속적으로 개선되고 있다. 시멘트 생산량당 배출된 온실가스는 1990년의 0.091(CO₂톤/시멘트톤)에서 2003년에는 0.077로 하락하여 1990년 원단위 대비 15.5% 개선되었으며 클링커 생산량당 CO₂ 배출량 역시 1990년의 0.104(CO₂톤/클링커톤)에서 2003년에는 0.089에 이르러 1990년 대비 14.4% 개선되었다. 이와 같이 시멘트 생산량과 클링커 생산량 기준의 온실가스 원단위가 개선된 것은 시멘트산업의 에너지 절약 대책의 효과로 풀이된다.

〈그림 2〉 시멘트 및 클링커 생산량 기준 CO₂배출 원단위 추이

온실가스/시멘트, 클링커 원단위 추이



이슈 진단

석회석 사용에 의한 온실가스 배출은 석회석의 성분 구성비에 의한 배출계수 차이가 발생할 수 있으나 그 차이는 미미한 수준인 것으로 알려지고 있다(WBCSD, 2002). 우리나라의 경우 석회석의 석회 성분비(fraction of CaO)는 평균 64.6%이므로 클링커 기준 CO₂ 배출계수는 클링커 톤당 0.5068 CO₂톤에 이르는 것으로 나타나고 있다(WBCSD, 2002, 유동현, 1995). 우리나라 시멘트산업의 석회석 하소에서 발생한 이산화탄소 배출량은 1990년의 4,047천톤에서 2003년의 7,129천톤으로 증가하여 연평균 4.45%의 속도로 증가했다.

II. 시멘트 제조과정 및 에너지 흐름도

1. 제조과정 및 에너지 사용

시멘트산업은 주 원료인 석회석과 기타 점토질 광물 등을 혼합 분쇄하여 1,400℃ 이상의 고온에서 소성시켜 시멘트를 제조하는 산업이다. 석회질 원료와 점토질 원료를 분쇄 혼합하여, 킬른에서 가열(소성)해서 단단한 괴상의 클링커를 만들고 냉각된 클링커를 석고(CaCO₃ · 2H₂O)와 혼합, 분쇄하면 시멘트가 만들어진다. 시멘트 제조공정은 크게 석회석 채광, 원료가공, 연료가공, 열처리 및 제품화 등 5개 공정으로 구분된다.

우리나라에서 현재 주로 생산, 사용되고 있는 시멘트는 포틀랜드 시멘트와 제철공정에서 생산된 부산물인 고로슬래그를 클링커와 혼합해서 만들어지는 슬래그 시멘트로 구분된다³⁾. 석회석을 소성시켜 클링커를 제조한 이후에 클링커에 석고와 석회석을 첨가하면 포

틀랜드 시멘트가 제조되고 클링커에 슬래그를 혼합하면 슬래그 시멘트가 제조된다.

시멘트 제조공정은 석회석 채광공정에서 시작된다. 석회석 채광 공정에서는 전력과 경유가 사용되며 전력보다는 경유 사용이 절대적으로 많은 편이다. 석회석 조쇄공정에서는 채광공정에서 채광된 석회석이 분쇄되며 에너지로는 전력이 사용되고 있다.

사전혼합 및 저장 공정에서는 원료의 성상을 균일하게 조절한 후 원료 적치장에 저장하며 에너지로는 전력이 사용되고 있다. 원료분쇄 공정에서는 사전혼합 및 저장단계에서 제조된 석회석에 철질, 점토질, 규산질과 기타 부원료를 혼합하여 분쇄하며 동 공정에서는 전력이 사용되며 예열 및 소성 공정에서 회수된 부생 에너지가 사용되기도 한다.

원료혼합 및 저장 공정에서는 전력을 사용하여 이들 원료를 혼합하여 저장하게 되는데 여기에서 사용된 전력의 양은 그렇게 많은 편은 아니다. 고체연료 분쇄 공정에서는 전력을 사용하여 유연탄을 분쇄하는데 동 공정에서는 유연탄이 물질로 사용되며 에너지로는 전력이 사용되고 예열 및 소성 공정과 클링커 냉각 공정에서 발생된 부생 에너지가 사용되고 있다.

예열 및 소성 공정은 석회석을 예열시킨 뒤 킬른에서 1,450℃의 고온으로 소성시키는 공정으로서 시멘트 산업에서 사용되고 있는 대부분의 유연탄이 동 공정에서 사용되고 있다. 동 공정에서는 유연탄과 B-C유, pet coke, 타이어, 재활용 석유가 사용되고 있으며 시멘트산업에서 사용된 에너지의 대부분이 동 공정에서 사용되고 있다.

킬른에서 소성된 석회석을 200℃로 급속 냉각시키

3) 슬래그 시멘트는 혼합시멘트의 한 종류이지만 우리나라에서는 슬래그 시멘트만 생산되고 있기 때문에 본 연구에서는 혼합 시멘트 대신 슬래그 시멘트로 통일하기로 한다.

는 냉각 공정에서는 전력이 사용되고 있다. 냉각 과정에서 발생된 열은 회수되어 다른 공정(예열 및 소성, 고체연료 분쇄, 시멘트 분쇄)의 부생 에너지로 사용되며 일부는 전력을 생산하는데 사용되기도 한다. 다음 단계인 클링커 저장 공정에서는 전력을 사용하여 클링커를 저장하며 전력의 사용은 적은 규모에 그치고 있다.

시멘트 분쇄 공정에서는 클링커 저장시설에서 배출된 클링커가 석고와 석회석, 회분, 슬래그 및 기타 물질과 혼합되어 분쇄되는 공정으로서 상당량의 전력이 사용되고 있다. 동 공정에서는 석고를 제외한 혼합재의 양은 5% 이내로 규정되어 있다. 시멘트 분쇄 공정 이후의 공정인 포틀랜드 시멘트 저장 공정에서는 소량의 전력이 사용되고 있다. 포틀랜드 시멘트 제조 공정의 마지막 단계인 포틀랜드 시멘트 포장 공정에서는 전력이 사용되고 있다.

슬래그 시멘트 제조 공정은 크게 슬래그 분쇄, 슬래그 시멘트 혼합, 출하 등 세 공정으로 구분된다. 석회석 대신 클링커와 슬래그의 비율을 55:45로 혼합하여 분쇄하는 슬래그 분쇄공정에서는 상당량의 전력이 사용되고 있으며 슬래그를 건조시키기 위해 고온의 가스(hot gas)를 생산하는 시설(hot gas generator)에서는 B-C유, 코크스, 재활용 석유와 전력이 사용되고 있다. 다음 공정인 슬래그시멘트 혼합공정에서는 분쇄된 슬래그에 클링커를 혼합하여 슬래그 시멘트를 제조하게 되며 소량의 전력이 사용되고 있다. 슬래그 시멘트 제조의 마지막 공정인 출하 공정에서는 소량의 전력이 사용되고 있다.

2. 기준 에너지 시스템(RES)

기준 에너지 시스템(Reference Energy System)은

분석대상 에너지 시스템을 에너지 공급에서 최종 소비까지의 에너지 및 물질의 흐름을 나타내는 흐름도(network diagram)로 정의될 수 있다. 기준 에너지 시스템은 물질과 에너지와의 기술적인 관계가 명확하게 정의되어야 하기 때문에 물질이나 에너지 흐름 위주의 어느 방법으로 작성 가능하다. 기준 에너지 시스템은 수요(demand), 에너지 공급원(energy source), 흡수(sinks), 기술(technologies) 및 재화(commodities)로 구성되어 있다.

수요는 에너지 시스템에서 충족되어야 할 에너지 서비스(energy service)로서 난방면적, 수송거리, 철강 생산량, 시멘트 생산량 등이 이에 해당된다. 에너지 공급원은 다양한 에너지 운반체(energy carrier)를 확보하는 방법을 나타내는 것으로서 에너지 채광(mining)이나 에너지 수입이 여기에 해당된다. 흡수는 에너지 수출을 의미하며 기술은 에너지 운반체를 다른 형태의 에너지 운반체로 변형시키거나 유효에너지 서비스(useful energy service)로 변형시키는 기술로서 자원기술(resource technology), 전환기술(conversion technology), 변환기술(transform technology), 가공기술(process technology), 수요 기술(demand technology) 등이 해당된다. 재화는 에너지원, 흡수, 기술 및 수요에서 사용되거나 생산되는 에너지 운반체, 에너지 서비스, 물질 및 오염물질을 의미한다.

포틀랜드 및 슬래그 시멘트 1톤을 생산하는데 소요되는 에너지 및 물질의 흐름을 표현하는 우리나라 시멘트산업의 기준 에너지 시스템(RES)은 다음 표와 같이 표현될 수 있다. 기준 에너지 시스템은 통상 최종 수요를 생산하기 위한 에너지 및 물질사용의 원단위로 표현하는 것이 효율적이다.

이슈 진단

〈표 3〉 시멘트산업의 기준 에너지 시스템(RES)

공정	세부공정	에너지(Mcal/톤)		물질 흐름(톤/톤)		
		종류	투입량	물질	투입량	산출량
채광	석회석 채광	전력 경유	0.53 50.88	석회석	1.98	1.86
원료가공	석회석 조쇄/사전혼합 및 저장	전력	2.76	석회석	1.86	1.86
	원료분쇄/원료혼합 및 저장	전력	26.65	석회석 철질 점토질 규산질 기타	1.86 0.02 0.1097 0.0208 0.0100	1.62
연료가공	고체연료(유연탄)분쇄	전력	3.76	유연탄	0.13	0.13
열처리	예열 및 소성	유연탄 B-C유 pet coke 타이어 정제유 재활용 연료	629.52 2.90 0.03 25.73 0.41 15.81	석회석	1.62	1.5
	냉각/클링커 저장	전력	22.72	클링커	1.5	1.5
제품화	포틀랜드 시멘트분쇄/저장	전력	32.33	클링커 석고 석회석 회분 슬래그 기타	1.5 0.0308 0.0089 0.0005 0.0203 0.0009	1.02
	시멘트 포장	전력	2.94	시멘트	1.02	1.0
슬래그 분쇄	hot gas 발생기	전력 B-C 유 코크스 정제유	0.003 888.015 5.696 14094.99	hot gas	1.0	1.0
	슬래그 분쇄	전력	30.330	클링커 슬래그 석고 회분 STS 슬러지 기타	0.544 0.466 0.046 0.005 0.004 0.001	슬래그 시멘트 0.828
슬래그 시멘트 혼합	슬래그 시멘트 혼합	전력	0.670	슬래그시멘트 클링커	0.828 0.189	슬래그시멘트 1.0
포장	슬래그시멘트 포장			슬래그시멘트	1.0	1.0

우리나라 시멘트산업에서 운영되고 있는 세부공정에는 17개로 분류되어 있다(2001년 기준)⁴⁾.
별 기존기술의 설비는 34개로 분류되어 있으며 신기술

4) 세부 기술목록은 에너지관리공단(2004.6)과 에너지경제연구원(2005)을 참조할 것

III. 분석 모형

1. 분석 모형

온실가스 감축 잠재량 및 에너지 절약 잠재량을 추정하기 위해 본 연구에서는 상향식 최적화 모형(bottom-up optimization model)인 MARKAL이 사용되었다. MARKAL(MARKet ALlocation)은 에너지 관련 수급 및 환경 관련 제약조건에서 최종수요를 충족시키는 최소비용의 에너지 시스템을 선택하는 모형이다. MARKAL은 동적 선형계획 모형(dynamic linear programming model)으로서 부분균형 접근방법에 해당된다⁵⁾.

목적함수에는 비용함수가 사용되고 있으며 비용함수는 기술의 투자비, 고정유지비용과 연료비용, 잔존가치 등을 포함하고 있다. 제약조건으로는 전력, 열 및 모든 에너지의 수급 균형, 부하, 오염물질 배출에 관한 제약 등이 있다. 모형에서 결정되는 변수(decision variables)는 1차 에너지의 수출입 및 국내 생산량(공급량), 각종 기술(자원기술, 전환기술, 가공기술, 수요기술 등)의 투자 규모와 설비용량 및 활동 수준, 오염물질 배출량 등이다⁶⁾.

MARKAL에서는 수요와 공급이 일치하는 점에서 균형 가격이 결정되며 따라서 각 재화의 균형가격은 재화의 시스템 한계가치(marginal system value)와 일치하게 된다. MARKAL에서는 목적함수가 비용함수로

정의되기 때문에 각 제약조건에는 쌍대변수(dual variable)가 존재하게 되며 균형가격에서 이러한 쌍대변수를 잠재가격(shadow price)⁷⁾으로 정의하고 있다. 즉, 잠재가격은 한 재화에 대한 제약조건의 우변항(righthand-side) 값을 한 단위 완화(증가 혹은 감소)시킬 경우 목적함수인 비용함수의 한계변화가 곧 해당 재화의 잠재가격이라고 할 수 있다.

2. 기준 에너지 시스템 구성 요소

실제 모형에서 사용된 기준 에너지 시스템의 구성요소는 다음과 같다. 수요(demand)는 시멘트 생산량이 사용되며 재화(commodity)중에서 에너지원은 전력, 유연탄, B-C유 이외에 경유, 석유코크스, 코크스 뿐만 아니라 페타이어, 재활용 석유, 재활용 연료(합성수지 포함)와 같은 대체에너지도 포함되어 있다. 재화중에서 물질은 클링커와 시멘트 뿐만 아니라 석회석, 석회, 점토질, 철질, 규산질, 슬래그, 석탄회, 슬러지 등이 해당되며 오염물질은 이산화탄소(CO₂)가 이에 해당된다.

화석연료는 수입되는 것으로 가정했으며 본 연구에서는 전력생산부문을 고려하지 않았기 때문에 전력 역시 수입하는 것으로 가정했다. 국내채광은 없으며 따라서 에너지 공급원(energy source)은 수입으로 국한된다. 일부 시멘트 생산시설에서는 폐열을 회수하여 전력을 생산하고 잉여 전력을 판매하고 있으나 본 연구에서는 폐열발전을 고려하지 않았기 때문에 흡수(sinks)는

5) MARKAL은 1979년에 개발되어 현재까지 IEA의 ETSAP(Energy Technology Systems Analysis Programme)에 의해 지속적인 모형의 개발 및 확장이 이루어지고 있으며 현재 50여 개국 이상에서 사용되고 있다. 거시경제분석기법을 결합시킨 MARKAL-MACRO, 지역간 교역을 반영한 다지역 모형(multi-region model) 등 수많은 다양한 모듈이 개발되어 있으며 이러한 다양한 모델은 MARKAL Family라고 불리우고 있다.

6) MARKAL 모형에 관한 보다 상세한 내용은 에너지경제연구원(노동운, 2005)을 참조할 것

7) 잠재가격은 규제를 받고 있는 산업이나 소비자 및 생산자가 시장 지배력을 행사하는 경우에 형성되는 가격과 시장균형가격(competitive market price)을 구별하기 위해 사용되는 경우도 있다. 즉, 규제된 산업에서 실제 경제주체가 지불하거나 받고자 하는 가격을 잠재가격으로 정의하는 경우가 이에 해당된다.

이슈 진단

〈표 4〉 시멘트산업 기준 에너지 시스템(RES)의 구성 요소

구성요소		세부 항목
수요		시멘트 생산량 전망
재화	에너지	전력, 유연탄, B-C, 경유, 코크스, 석유코크스, 페타이어, 재활용 석유, 재활용 연료
	물질	시멘트, 클링커, 석회석, 석회, 점토질, 철질, 규산질, 슬래그, 석탄회, 슬러지
	오염물질	온실가스(CO ₂)
에너지 공급원	국내 채광	해당사항 없음
	수입	전력을 포함한 모든 연료의 수입
기술	자원기술	각 에너지원에 대한 수입자원기술
	전환기술	해당사항 없음
	변환기술	해당사항 없음
	가공기술	시멘트 제조공정별 기술
	수요기술	해당사항 없음
합수		해당사항 없음

없는 것으로 가정한다.

전력은 수입되는 것으로 가정했고 열은 사용되지 않기 때문에 기술(technology)중에서 전환기술(conversion technology)이나 변환기술(transform technology)은 사용되지 않는 것으로 가정한다. 모든 에너지원은 수입하는 것으로 가정했기 때문에 각 에너지원에 대한 자원기술(resource technology)은 수입자원기술(import resource technology)로 정의되며 시멘트 제조공정의 각 기술은 가공기술(process technology)로 정의된다. 기준에너지 시스템 작성에 물질수지가 사용되었기 때문에 수요기술(demand technology)은 존재하지 않는 것으로 가정한다. 따라서 기술에는 자원기술과 가공기술만 존재하는 것으로 가정한다.

3. 자료

본 연구의 분석대상 기간은 2001년부터 2041년까지 40년이며 40년은 9개의 구간(period)으로 분할되고 각 구간은 5년 단위로 분할되어 있다. 에너지 수요와 물질 수요는 서로 기술적인 함수관계를 갖고 있기 때문에 어느 한 종류의 수요를 에너지 서비스 수요로 사용한다 할지라도 기술적인 관계에 의해 다른 수요가 추정될 수 있는 장점이 있다⁸⁾. 본 연구대상은 시멘트산업이기 때문에 시멘트 산업의 에너지 수요보다는 시멘트 생산량을 에너지 서비스 수요로 사용하도록 한다.

본 분석에서 사용되고 있는 모형(MARKAL)은 단일 지역(single region)을 상정하고 있기 때문에 최종 에

8) 예를 들면 시멘트 1톤 생산시 0.08TOE의 에너지가 사용될 경우 시멘트 생산량을 수요로 정의하면 시멘트 생산시의 에너지 소비 원단위가 변하지 않는다면 시멘트 생산량에 의한 에너지 소비량이 쉽게 추정될 수 있다. 반대로 에너지 수요 전망치를 수요로 사용할 경우 시멘트 생산량을 계산할 수 있다.

〈표 5〉 시멘트 생산량 전망(천톤)

	2001	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
시멘트 계	58,040	59,593	64,322	68,725	70,266	70,869	71,477	72,086	72,695
- 포틀랜드	51,250	51,846	55,317	59,104	59,726	60,239	61,020	61,273	61,791
- 슬래그시멘트	6,790	7,747	9,005	9,622	10,540	10,630	10,722	10,813	10,904

주 : 2001년은 실적치임

너지 서비스 수요는 시멘트 산업이 생산할 시멘트 생산량으로 정의된다. 시멘트 생산량이 시멘트산업의 부가가치와 일정한 기술적인 관계를 갖게 될 것이라는 가정에서 시멘트산업의 부가가치를 기준으로 시멘트 생산량을 전망하기로 한다. 즉, 시멘트 생산량은 시멘트산업의 부가가치에 부가가치당 시멘트 생산량 계수를 곱하는 형식으로 이루어지게 된다. 시멘트산업의 부가가치 전망치는 에너지경제연구원의 장기수요 전망(에너지경제연구원, 2005.8)에서 사용된 수치를 사용하며 부가가치당 시멘트 생산량은 1990년부터 2003년까지의 기간 평균 시멘트 생산/부가가치 원단위(15.9톤/백만원)를 사용하기로 한다. 슬래그 시멘트 생산량 비중은 전문가들의 판단에 의해 2030년에 15%에 이를 것으로 가정한다. 이와 같은 전망방법에 의하면 우리나라의 시멘트 생산은 2041년까지 연평균 0.56% 증가할 것으로 전망된다.

에너지원별 발열량은 산업자원부의 고시 발열량을 사용했으며 재활용석유의 경우에는 원유에 준해서 발열량을 계산했고 유연탄은 발전용 유연탄의 발열량을, 페타이어의 발열량은 7,500kcal/kg으로 계산했다(에너지관리공단, 2005). 에너지원별 가격은 국내 공급가격을 적용했으나 석유코크스는 수출가격을, 유연탄은

발전용 유연탄 국내 공급가격을, 코크스는 유연탄 가격을 준용했으며 페타이어는 원유 수입가격을 적용했다.

온실가스 배출계수는 IPCC의 배출계수를 사용했으며 전력은 2001년 우리나라 전력부문의 온실가스 발생량과 에너지 소비량 실적치에 근거한 배출계수를 사용했다⁹⁾. 재활용 석유와 페타이어는 원유와 동일한 배출계수를 적용했다. 대체연료(AFR)의 온실가스 배출계수는 현재 IPCC나 우리나라에서 일반적으로 정의된 기준이 없기 때문에 WBCSD(World Business Council for Sustainable Development)에서 시멘트산업의 온실가스 배출계수로 권고하고 있는 배출계수를 적용했다. pet coke 가격은 B-C유 가격의 85~90%를, 열량은 7,000Kcal/톤을 적용했으며 페타이어 가격은 톤당 1만원(mn\$0.2413/PJ)으로 계산했다. 재활용유 가격은 석유 코크스 가격과 동일하게 적용하기로 한다.

원료가격은 시멘트협회의 비공식자료를 인용하여 석회석은 톤당 약 4,500원(추정치는 4,000~5,000원/톤), 클링커는 20,000원, 포틀랜드 시멘트 완성품의 공장도 가격은 50,000원, 슬래그 시멘트 가격 역시 포틀랜드 시멘트와 동일한 가격을 적용했다. 모형에 적용되는 할인율은 7%이며 가격은 2001년도 불변가격(대미환율 1,326원/달러 적용)으로 환산했다.

9) 발전부문의 온실가스 배출계수는 발전단의 발전량을 기초로 계산했다. 따라서 소비자가 소비하는 단계의 전력 소요량을 기준으로 배출계수를 계산하기 위해서는 발전단 배출계수에 약 10%에 이르는 송·배전 손실을 감안해서 배출계수를 산출하는 것이 보다 정확한 계산방법이라고 할 수 있다.

이슈진단

〈표 6〉 에너지원별 온실가스 발열량, 배출계수 및 가격

	발열량		배출계수		가격	
중유(B-C유)	(kcal/l)	9,900	(천톤/PJ)	21.1	(mn\$/PJ)	5.64
경유	(kcal/l)	9,200	(천톤/PJ)	20.2	(mn\$/PJ)	12.62
석유코크스	(kcal/l)	10,800	(천톤/PJ)	27.5	(mn\$/PJ)	4.79
재활용석유	(kcal/l)	10,000	(천톤/PJ)	21.8	(mn\$/PJ)	4.37
석탄(유연탄)	(kcal/kg)	6,600	(천톤/PJ)	25.8	(mn\$/PJ)	1.48
코크스	(kcal/kg)	6,500	(천톤/PJ)	29.5	(mn\$/PJ)	1.48
전력	(kcal/kwh)	860	(천톤/PJ)	34.1	(mn\$/PJ)	16.14
타이어	(kcal/kg)	7,500	(천톤/PJ)	23.2	(mn\$/PJ)	0.231

자료 : 에너지관리공단, 에너지부문 온실가스 배출 감축 잠재력 시범분석, 2005. 7

4. 시나리오 설정

본 연구에서는 몇 가지의 시나리오를 설정했는데 이러한 시나리오는 온실가스 감축 정책의 대안으로 활용 가능한 경우를 상정한 것이다.

기준 시나리오(baseline)는 온실가스 의무부담이 없는 현재의 상태가 지속되며 또한 기준년도인 2001년 현재 시멘트산업의 기술구성이 분석대상 기간(2001-2041년)에 지속된다는 가정에서 출발하고 있다. 즉, 기준년도의 각 기술의 생산능력이 2021년까지 최소한 10%를 유지한다는 가정을 설정한 시나리오이다. 시멘트산업에서 사용되고 있는 대부분의 기술 수명이 30년에서 50년에 이르고 있다는 점과 현재의 생산시설이 1970년대에 건설되어 1990년대에는 신기술로 대체되었다는 점을 감안하면 합리적인 시나리오로 평가할 수 있다.

신기술도입 시나리오는 기준년도인 2001년 현재 파악된 신기술이 시멘트산업에 도입될 수 있다는 가정을 전제로 한 시나리오이다. 파악된 17개의 신기술중에서 자료이용 가능성 및 도입 가능성을 고려하여 5 개의 신

기술을 분석 대상으로 선정했다. 예열 및 소성공정에서는 태양열 소성(solar lime kiln)과 킬른 연소용 버너 팁 개선(advanced burner tip for kiln), 시멘트분쇄에서는 예비분쇄장치(polycom roller mill), 호로밀(horo mill) 및 고효율 분급기(high performance separator)가 신기술로 모형에 반영되었다.

슬래그 시멘트 비율 확대 시나리오는 슬래그 시멘트의 비율을 2021년 이전까지는 14%에서 18%로 상향 조정하고 2021년 이후에는 15%에서 20%로 상향 조정하는 시나리오이다. 이는 기존의 포틀랜드 시멘트를 슬래그 시멘트가 대체하는 경우를 상정한 시나리오로서 일본과 같이 정부가 온실가스 감축 및 에너지 절약을 위해 혼합시멘트의 비율을 확대하는 규제를 도입하거나 이를 촉진하는 경우를 상정한 시나리오로 해석할 수 있다.

페타이어 사용 확대 시나리오는 페타이어가 유연탄 소비를 대체(10%, 20%, 30%, 40% 대체)하는 시나리오이다. 유연탄은 소성공정의 NSP 킬른에서 대부분 소비되고 있기 때문에 페타이어는 소성공정의 NSP 킬른에서 유연탄을 대체하는 것으로 가정한다.

〈표 7〉 탄소세 부과시 에너지 가격 상승

	배출계수 (천TC/PJ)	가격 (mn\$/PJ)	열량 환산 탄소세 수준(\$/TC)				
			(\$10)	(\$100)	(\$200)	(\$300)	
						가격	상승율
B-C유	21.1	5.64	0.211	2.11	4.22	6.33	112%
경유	20.2	12.62	0.202	2.02	4.04	6.06	48%
석유코크스	27.5	4.794	0.275	2.75	5.5	8.25	172%
재활용석유	21.8	4.37	0.218	2.18	4.36	6.54	150%
전력	34.1	16.14	0.341	3.41	6.82	10.23	63%
유연탄	25.8	1.48	0.258	2.58	5.16	7.74	523%
코크스	29.5	1.48	0.295	2.95	5.9	8.85	598%

〈표 8〉 에너지세 부과시 에너지 가격 상승

	발열량 (Kcal/l)	가격 (mn\$/PJ)	열량 환산 에너지세 수준(\$/TOE)				
			(\$10)	(\$100)	(\$200)	(\$300)	
						가격	상승율
B-C유	9,900	5.64	0.239	2.389	4.778	7.167	127%
경유	9,200	12.62	0.239	2.389	4.778	7.167	57%
석유코크스	10,800	4.79	0.239	2.389	4.778	7.167	149%
재활용석유	10,000	4.37	0.239	2.389	4.778	7.167	164%
전력	860	16.14	0.239	2.389	4.778	7.167	44%
유연탄	6,600	1.48	0.239	2.389	4.778	7.167	484%
코크스	6,500	1.48	0.239	2.389	4.778	7.167	484%

탄소세 도입 시나리오는 2011년부터 탄소톤(TC)당 \$10-\$1,000의 이산화탄소세를 부과하는 경우를 상정한 것으로 온실가스 감축과 에너지 절약 및 저탄소 에너지로의 전환 가능성을 분석하기 위한 시나리오이다. 탄소톤당 \$300의 탄소세를 부과할 경우 기준가격에 비해 가격이 가장 큰 폭으로 상승하는 에너지는 전력(mn\$10.2/PJ의 가격 상승)이며 다음으로는 코크스(mn\$8.85/PJ), 석유코크스(mn\$8.25/PJ) 순으로 되어 있다. 이러한 가격 상승 수준은 에너지 열량당 온실가스 배출계수와 직접적으로 상관관계가 있다. 가격 상

승비율에서는 코크스가 가장 높게 상승(598%)하고 다음으로는 유연탄(523%), 석유코크스(172%)순으로 가격 상승이 클 것으로 예상된다.

에너지세 도입 시나리오는 2011년부터 에너지 열량(TOE)당 \$10-\$1,000/TOE의 에너지세를 부과하는 경우이다. 에너지세는 에너지 소비를 억제시키거나 에너지 소비 원단위가 낮은 기술의 선택을 촉진시킬 것으로 예상된다. 또한 에너지세는 에너지원별 가격이 상이하게 상승하기 때문에 에너지원간 대체를 촉진시킬 것으로 예상된다. \$300/TOE의 에너지세를 부과할 경우 가

이슈 진단

격이 가장 큰 폭으로 상승하는 에너지는 유연탄과 코크스(484% 상승)이며 재활용 석유와 석유코크스(각각 164%, 149%), B-C유(127%)순으로 상승할 전망이다. 반면 기준가격이 높게 형성되어 있는 경유와 전력의 가격 상승폭은 각각 57%, 44%에 그칠 것으로 예상된다.

연료가격 상승 시나리오는 현재 시멘트산업에서 사용되고 있는 석유, 석탄 및 전력의 가격이 상승하는 경우를 상정함으로써 연료간 대체 가능성과 온실가스 감축 및 에너지 절약 효과뿐만 아니라 연료가격 상승이 시멘트산업의 경영에 미칠 영향을 분석하기 위한 것이다. 여기에는 석유류 가격이 상승하는 고유가 시나리오, 석탄가격 및 전력 가격 상승 시나리오로 구분된다.

IV. 에너지 절약 및 온실가스 감축 잠재량

상향식 최적화 모형인 MARKAL을 이용한 우리나라 시멘트산업의 온실가스 감축 및 에너지 절약 잠재량 분석 결과는 분석기간(2001~2041년)을 5년 단위로 분할되어 서술했다. 기준년도인 2001년의 경우는 분석결과가기 보다는 모형의 현실화를 위한 조정으로 해석하

는 것이 바람직할 것이다.

시나리오의 효과는 탄소세 \$300/TC, 에너지세 \$300/TOE, 페타이어 사용확대 30%, 연료가격 100% 상승을 기준으로 서술하기로 한다.

1. 에너지 절약 잠재량

1) 에너지 소비량 전망

시멘트산업의 에너지 소비는 2001년의 168.3PJ(4,039천TOE)에서 지속적으로 증가하기 시작하여 2041년에 205.2PJ(4,925천TOE)에 이르러 연평균 0.5% 증가할 것으로 전망된다. 에너지 소비는 기본적으로 시멘트 소비전망에 의해 좌우되는 것이 본 분석 모형의 특징이다. 유연탄의 소비량은 2001년의 124.9PJ(2,995천 TOE)에서 2041년에는 155.0PJ(3,720천TOE)에 이르러 연평균 0.5%의 속도로 증가할 것이며 전력의 소비량은 2001년의 24.4PJ(586천TOE)에서 2041년에는 26.5PJ(636천 TOE)로 증가하여 연평균 0.2% 증가할 것으로 전망된다. 유연탄의 소비 비중은 2001년의 74.2%에서 2041

〈표 9〉 기준안의 에너지원별 수요 전망(단위 : PJ)

	2001	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
중유	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
경유	5.5	5.5	5.9	6.3	6	6	6.1	6.3	6.5
석유코크스	4.3	4.3	4.6	4.9	5	5	5.1	5.2	5.4
유연탄	124.8	124	132.3	141.4	142.9	144.1	146	150.4	155
코크스	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
전력	24.4	23.8	24.4	24.9	24.6	24.7	25.1	25.8	26.5
재활용유	4.8	5.2	5.5	5.9	6	6	6.1	6.3	6.5
재활석유	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
페타이어	3.7	3.2	3.5	3.7	3.7	3.8	3.8	3.9	4
합계	168.3	167	177.3	188.3	189.4	190.9	193.4	199.2	205.2

년에는 75.5%로 상승하지만 전력의 소비 비중은 2001년의 14.5%에서 2041년에는 12.9%로 낮아질 전망이다. 따라서 2041년까지 유연탄은 전체 에너지 소비의 가장 큰 비중을 차지함에 따라 향후에도 주종 에너지로서의 위치를 유지할 것으로 전망된다. 전력은 유연탄 다음의 높은 비중을 유지할 것으로 예상 된다.

2) 시나리오별 에너지 절약 잠재량

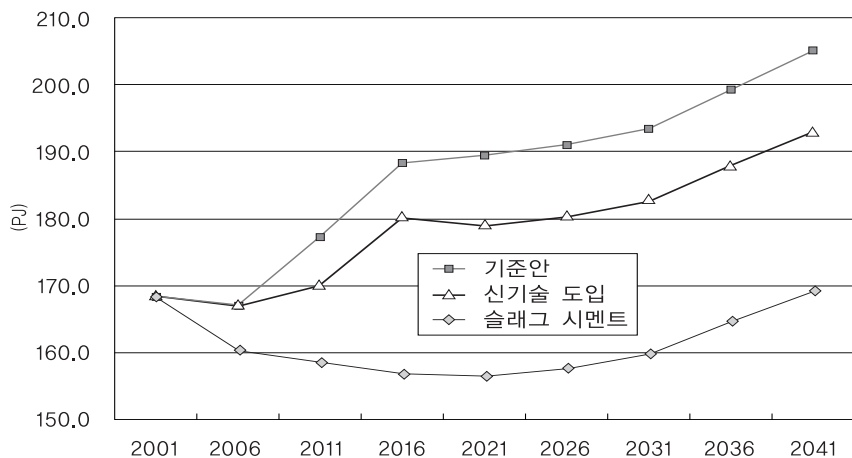
시나리오중에서 신기술 도입 시나리오가 가장 큰 에너지 절약 잠재량을 갖고 있는 것으로 나타났다. 신기술 도입시 에너지 소비는 기준안에 비해 최고 16.5% 감축될 것으로 전망되며 에너지 절약 잠재량은 33.9PJ(814천TOE)에 이를 것을 분석된다. 이는 에너지 사용 원단위가 낮은 두 기술(킬른용 버너팁 개선, 태

〈표 10〉 시나리오별 에너지 절약 잠재량(단위 : PJ, %)

	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
신기술 도입-감축량	-2.7	-7.5	-12.6	-17.5	-18.7	-24.7	-31.6	-33.9
-감축율	-1.6%	-4.2%	-6.7%	-9.2%	-9.8%	-12.8%	-15.9%	-16.5%
슬래그시멘트-감축량	0.0	-7.5	-8.1	-10.4	-10.5	-10.7	-11.5	-12.4
-감축율	0.0%	-4.2%	-4.3%	-5.5%	-5.5%	-5.5%	-5.8%	-6.0%
탄소세, 에너지세-감축량	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1
-감축율	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
석유/석탄가격 상승-감축량	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-감축율	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
전력가격 상승-감축량	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1
-감축율	0.0%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%	0.0%

〈그림 3〉 에너지 수요 전망 및 에너지 절약 잠재량

에너지 수요 및 절약 잠재량



이슈 진단

양열 소성)이 도입되기 때문이다.

슬래그 시멘트 생산비용이 확대되는 경우 에너지 절약 잠재량은 최고 6%에 이를 것으로 분석된다. \$300/TC의 탄소세나 \$300/TOE의 에너지세 부과시 에너지 절약 잠재량은 미미한 수준(0.1%)에 그치고 있다. 연료 가격 상승 시나리오중에서 석유가격과 석탄가격의 상승은 에너지 절약에 전혀 기여하지 못하는 반면 전력가격 상승은 미미한 수준(0.1%)이나마 기여하고 있는 것으로 분석된다. 따라서 세제 도입 및 에너지 가격 인상 정책은 에너지 절약에 기여하지 못할 뿐만 아니라 시멘트산업에 대한 비용부담으로 작용할 것으로 예상된다.

3) 에너지 원별 절약 잠재량

신기술 도입의 경우 에너지 절약 잠재량이 가장 큰 규모(감축량 기준)로 이루어지는 에너지는 석탄(유연탄)이며 다음으로는 전력에서 발생할 것으로 분석된다. 이는 유연탄 사용량이 가장 높고 다음으로는 전력이 많이 사용되기 때문이다. 감축율로 살펴보면 폐타이어의 감축율이 가장 높고 다음으로 유연탄과 전력순으로 나타나고 있다.

신기술 도입의 경우 에너지 절약 잠재량(최고

16.5%)이 온실가스 감축 잠재량(최고 6.7%)에 비해 큰 폭으로 나타나는 원인은 대체되는 기술의 온실가스 배출계수 차이에서 발생하고 있는 것으로 분석된다. 즉, 예열 및 소성공정의 신기술인 킬른용 버너팁 개선(advanced burner tip)과 태양열 소성 기술(solar lime kiln)이 온실가스 배출계수가 높은 전력(34.1천톤/PJ)의 소비량보다는 온실가스 배출계수가 낮은 유연탄(25.8천톤/PJ)의 소비량을 더욱 큰 폭으로 감소시키기 때문이다.

슬래그 시멘트 확대시 에너지 절약 잠재량은 대부분의 에너지원에서 발생하고 있다. 슬래그 시멘트 제조에는 클링커의 혼합비율이 55%에 이르기 때문에 포틀랜드 시멘트에 비하면 최고 45%의 클링커 대체효과가 발생한다고 할 수 있다. 따라서 45%의 클링커 사용축소에 의한 에너지 소비 절감이 발생하며 클링커 생산은 포틀랜드 시멘트 제조공정에서 생산되기 때문에 포틀랜드 시멘트 제조공정에서 사용되는 모든 에너지에서 절감이 발생한다고 할 수 있다.

탄소세 도입이나 에너지세 도입, 그리고 에너지 가격 변화 시나리오는 모두 에너지 가격인상을 가정한 시나리오이지만 이러한 정책수단이 에너지원별 수요에 미치는 영향은 상이할 것으로 예상된다. 그러나 예상과

〈표 11〉 신기술 도입시 에너지원별 절약 감축율

	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
B-C	-	-	-	-	-	-	-	-
유연탄	-1.1%	-3.1%	-5.0%	-7.0%	-7.8%	-12.4%	-17.2%	-17.9%
코크스	-	-	-	-	-	-	-	-
경유	-	-	-	-	-	-	-	-
전력	-0.4%	-1.2%	-1.6%	-2.8%	-3.2%	-4.8%	-6.2%	-7.9%
pet.coke	0.0%	0.0%	0.0%	-24.0%	-20.0%	-13.7%	-3.8%	-3.7%
타이어	0.0%	0.0%	0.0%	-2.7%	-5.3%	-15.8%	-28.2%	-27.5%
합계	-1.6%	-4.2%	-6.7%	-9.2%	-9.8%	-12.8%	-15.9%	-16.5%

달리 탄소톤당 \$300의 탄소세를 도입하는 경우와 \$300/TOE의 에너지세를 도입하는 경우, 그리고 전력 가격을 두 배로 인상한 경우 모두 동일하게 전력 소비만 2021년과 2026년에 소폭(0.1%) 감소할 뿐 다른 에너지원의 수요에는 변화가 나타나지 않는 것으로 분석된다. 따라서 이러한 시나리오는 에너지원간 대체에 영향을 미치지 못하는 것으로 분석된다. 에너지 절약에 전혀 기여하지 못하는 고유가 시나리오와 석탄가격 상승 시나리오 역시 에너지원간 대체에 영향을 미치지 못할 뿐만 아니라 에너지 소비감소에도 기여하지 못하는 것으로 나타났다.

페타이어 사용 확대 시나리오는 에너지 절약보다는 자원절약에 기여하는 시나리오이다. 페타이어 사용량이 유연탄 사용량의 30%를 대체할 경우 2011년에 약 43.2PJ의 유연탄 소비량이 페타이어로 대체될 것으로 분석된다.

4) 신기술 도입에 대한 세제 및 가격 상승 효과

앞에서 분석된 탄소세와 에너지세 및 연료가격 상승 시나리오는 기준안을 비교 대상으로 하여 이들 시나리오의 에너지 절약 효과를 추정했다. 이는 연료가격에 영향을 미치는 탄소세 및 에너지세 도입이나 연료 가격 상승 시나리오를 신기술 도입이나 페타이어 사용 확대, 슬래그 시멘트 확대와 같은 여러 가지 정책수단의 하나로 취급하여 이들 수단의 에너지 절약 효과를 상호 비

교하기 위한 분석이다.

세제도입 및 연료가격 상승은 가격 변화를 통한 에너지 절약 및 온실가스 감축을 발생시킬 수 있다는 점에서 경제적인 수단으로 분류될 수 있다. 반면 신기술 도입이나 페타이어 사용 확대 및 슬래그 시멘트 확대는 새로운 기술의 도입에 의한 에너지 절약 및 온실가스 감축을 발생시킬 수 있다는 점에서 기술적인 수단으로 분류될 수 있다. 경제적인 수단과 기술적인 수단은 경쟁적인 수단이기도 하지만 상호 보완적으로 사용될 수 있기 때문에 세제도입은 신기술 도입이나 페타이어 및 슬래그 시멘트 확대를 촉진시킬 수 있는 보완수단으로 사용될 수 있다.

신기술 도입 시나리오에 탄소세(\$300/TC)와 에너지세(\$300/TOE)를 부과하고 석유(B-C), 석탄(유연탄), 전력의 가격이 각각 100% 상승할 경우 탄소세, 에너지세, 전력가격 상승 및 석탄가격 상승은 모두 신기술 도입 대비 최고 1.9%의 에너지 절약 잠재량을 갖고 있는 것으로 나타났다.

기준안과 비교하면 탄소세 및 에너지세와 연료가격 상승은 신기술 도입을 촉진시켜 에너지 절약 잠재량을 상승시키는 효과가 발생하지만 잠재량은 극히 낮은 수준에 그치고 있다. 이러한 분석을 통해서 세제도입이나 연료가격 상승을 통한 에너지 절약의 잠재량은 극히 제한적이라는 점을 확인할 수 있다. 또한 이들 시나리오가 시멘트산업의 비용 상승에 미칠 영향은 막대할 것이

〈표 12〉 신기술 도입 대비 시나리오별 에너지절약 효과(PJ, %)

	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
탄소세, 에너지세 -감축량	0.0	-0.1	-1.0	-3.2	-3.1	-3.1	-2.2
-감축율	0.0%	-0.1%	-0.6%	-1.9%	-1.8%	-1.8%	-1.3%
전력/석탄가격 상승-감축량	-0.1	-0.1	-1.0	-3.2	-3.2	-3.1	-2.2
-감축율	-0.1%	-0.1%	-0.6%	-1.9%	-1.9%	-1.8%	-1.3%

이슈 진단

라는 점을 고려하면 정책 유용성으로서의 활용성은 낮을 것으로 보인다.

5) 결론

종합적으로 판단하면 신기술 도입과 슬래그 시멘트 확대 시나리오는 기준안 대비 에너지 소비 감소를 통해서 에너지 절약에 상당한 기여를 할 것으로 분석된다. 반면 탄소세, 에너지세 및 전력 가격 인상 시나리오는 극히 제한적인 기간(2021~2026년)에 소폭의 전력소비 감소(0.1%)를 통해 에너지 절약에 미미하게 기여할 것으로 분석된다. 반면 석유류 가격 인상과 석탄가격 인상 시나리오는 에너지 절약에 전혀 기여하지 못한 것으로 나타났다. 신기술 도입과 비교해도 세제도입이나 연료가격 상승이 에너지 절약에 기여할 수 있는 잠재량은 극히 제한적인 것으로 나타나고 있다. 따라서 가격정책(탄소세, 에너지세, 에너지 가격 인상)을 통한 에너지 절약 유도는 그 효과가 낮으며 도입시 산업계의 비용부담으로 직결될 것으로 예상된다. 반면 신기술 도입과 슬래그 시멘트 확대는 에너지 절약 잠재량에 대한 기여가 높은 것으로 분석된다.

2. 온실가스 감축 잠재량

1) 온실가스 배출량 전망

시멘트산업의 온실가스 배출량은 2001년의 10,490천톤에서 2041년에는 13,030천톤으로 증가하여 향후 40년 동안 연평균 0.54% 증가할 것으로 전망된다. 클링커 생산에 의한 온실가스 배출량은 2001년에 6,021천톤에서 증가하기 시작하여 2041년에는 7,610천톤에 이르러 시멘트 산업 온실가스 배출량의 58.4%를 차지할 것으로 전망된다(2001년에는 57.4%). 전력소비에 의한 온실가스 배출을 제외할 경우 시멘트산업의 온실가스 배출량은 기준안의 배출량에 비해 최저 6.9%에서 최고 8.0%까지 낮아질 것으로 전망된다.

2) 온실가스 감축 잠재량

온실가스 감축 잠재량 역시 에너지 절약 잠재량의 경우와 같이 기준안 대비 잠재량과 신기술 도입 대비 잠재량으로 구분하여 설명하기로 한다.

가. 기준안 대비 잠재량

신기술을 도입하는 시나리오의 경우 온실가스 배출

〈표 13〉 시멘트산업의 온실가스 배출량 전망(천톤)

	2001	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
기준안	10,490	10,521	11,194	11,921	12,019	12,119	12,278	12,649	13,030
-클링커	6,021	6,091	6,499	6,944	7,017	7,077	7,168	7,386	7,610
(비율)	57.4%	57.9%	58.1%	58.2%	58.4%	58.4%	58.4%	58.4%	58.4%
전력소비	834	811	833	850	838	842	856	882	905
-감소율	-8.0%	-7.7%	-7.4%	-7.1%	-7.0%	-6.9%	-7.0%	-7.0%	-6.9%

주 : 전력소비에 의한 온실가스 배출량 감소율은 기준안 대비 전력소비에 의한 온실가스 배출량을 기준안의 온실가스 배출량에서 차감시킬 경우 기준안의 온실가스 배출량 대비 감소율을 의미함

량은 기준안에 비해 최고 6.7% 감소할 것으로 분석되며 이는 최고 872천톤의 온실가스 감축 잠재량에 해당되는 규모이다. 온실가스 배출량은 2006년에 0.6% 감소하여 분석기간중에서 가장 낮은 수준의 감소가 이루어지지만 감소폭은 점차 확대되어 2041년에는 감소폭이 6.7%에 이를 것으로 전망된다. 이러한 최고 감소폭은 기준 시나리오에 비해 온실가스 배출량이 최소 872천톤 감소하는 수준에 해당된다. 이는 신기술 도입에 의한 효과에서 기인하고 있다.

슬래그 시멘트 비율 확대시 온실가스 배출량은 기준안에 비해 최고 6.3% 감소될 것으로 전망된다. 온실가스 감축 잠재량은 2011년의 4.4%에서 기간이 지날수록 점차 확대되어 최고 감소폭(6.3%)은 2041년에 나타날 것으로 예상된다. 슬래그 시멘트 확대에 따른 온실가스 감축은 궁극적으로 포틀랜드 시멘트 생산에 투입될 클링커의 생산량이 감소하고 클링커 대신 슬래그를 비롯한 혼합재의 사용이 증대됨에 따라 나타나는 결과이다.

페타이어 사용 비율을 유연탄 소비량의 30%까지 확대할 경우 온실가스 배출량은 기준안 대비 1.2% 감축할 것으로 전망된다. 이러한 감축은 규모면에서 2011년에 129.6천TC 감축에서 점차 확대되어 2041년에는 최고 151.7천TC의 감축에 이를 것으로 분석된다.

반면 \$300/TC의 탄소세를 부과하는 경우와 \$300/TOE의 에너지세를 부과하는 경우 온실가스 배출량은 기준안에 비해 최고 0.01%의 감소에 그칠 것으로 전망된다. 이러한 온실가스 감축은 전력만 사용하는 공정(원료 혼합 및 저장 공정과 냉각 공정)에서 발생하고 있다. 즉, 이들 세제도입이 전력을 많이 사용하는 기술의 경쟁력을 약화시키는 대신 전력사용 원단위가 낮은 기술의 경쟁력을 강화시키기 때문이다. 따라서 이들 기술의 생산량 증감에 의한 전력 사용 원단위 개선이 소폭의 온실가스 감축에 영향을 미친 것으로 분석된다.

연료 가격 상승 시나리오의 경우에는 석탄가격이나 석유가격은 온실가스 감축에 전혀 기여하지 못하는 반면 전력가격 상승은 온실가스 감축에 소폭(0.02% 감

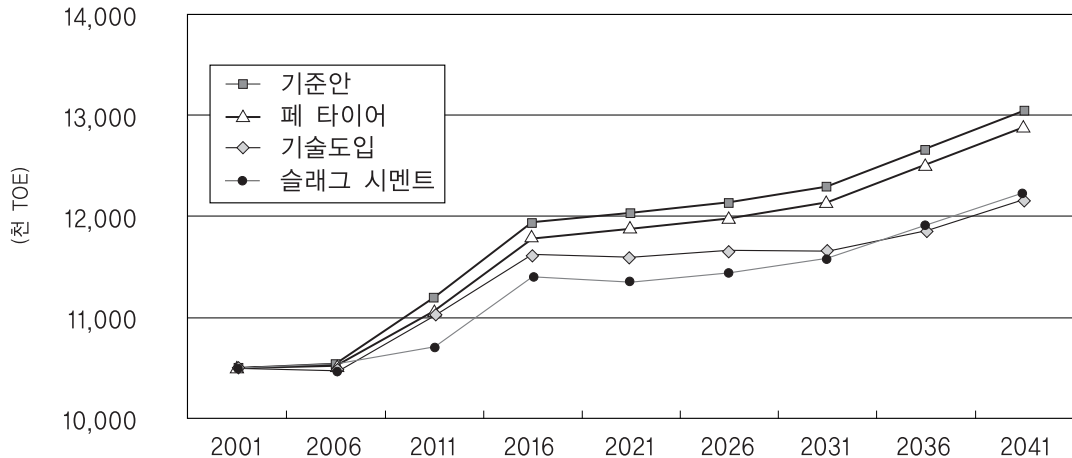
(표 14) 기준안 대비 시나리오별 온실가스 감축 잠재량(천톤, %)

	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
신기술 도입-감축량	-65	-182	-305	-431	-463	-625	-810	-872
-감축율	-0.6%	-1.6%	-2.6%	-3.6%	-3.8%	-5.1%	-6.4%	-6.7%
슬래그시멘트-감축량	0.0	-498	-533	-681	-689	-706	-762	-817
-감축율	0.0%	-4.4%	-4.5%	-5.7%	-5.7%	-5.8%	-6.0%	-6.3%
페타이어 확대-감축량	10.4	-130	-138	-140	-141	-143	-147	-152
-감축율	0.1%	-1.2%	-1.2%	-1.2%	-1.2%	-1.2%	-1.2%	-1.2%
탄소세, 에너지세-감축량	0.0	-1.1	-1.3	-1.3	-1.4	-1.0	-1.1	-1.0
-감축율	0.0%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%
석유/석탄가격 상승-감축량	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-감축율	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
전력가격 상승-감축량	0.0	-1.8	-2.0	-2.1	-2.1	-1.8	-1.4	-1.2
-감축율	0.0%	-0.02%	-0.02%	-0.02%	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.01%

이슈 진단

〈그림 4〉 온실가스 배출량 및 감축 잠재량

온실가스 배출전망 및 감축 잠재량



축) 기여하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 시나리오 역시 탄소세나 에너지세 부과와 같이 전력만 사용하는 공정(원료 혼합 및 저장 공정과 냉각 공정)에서 발생하고 있다. 온실가스 감축폭이 탄소세나 에너지세 도입에 비해 약간 높게 나타나는 것은 동 공정에서의 기술간 경쟁력 차이가 더욱 크게 발생하기 때문인 것으로 분석된다.

따라서 탄소세 도입이나 에너지세 도입은 온실가스 감축에 별다른 기여를 하지 못할 뿐만 아니라 도입시 산업계에 큰 부담으로 작용할 것으로 예상된다. 전력 가격이 상승하는 경우의 온실가스 감축 잠재량 역시 극히 소폭에 그치며 석유가격이나 석탄가격 상승의 경우에는 온실가스 감축 효과가 전혀 나타나지 않고 있다는 점을 고려하면 이들 연료 가격 상승은 산업계의 비용 부담으로 직결될 것으로 예상된다. 반면 신기술 도입과 슬래그 시멘트 확대는 온실가스 감축에 기여할 수 있을

것으로 예상된다. 결론적으로 탄소세나 에너지세 도입 및 연료가격 상승은 저탄소 연료로의 전환이나 에너지 절약 및 연료간 대체효과를 거의 발생시키지 못할 것으로 분석된다.

나. 신기술 대비 잠재량

탄소세, 에너지세, 연료가격 상승이 신기술 도입 시나리오와 비교하여 온실가스를 추가적으로 감축할 수 있는 잠재량은 최고 0.7%에 이를 것으로 분석된다. 이들 가격정책 시나리오의 온실가스 감축효과는 기준 대비 이들 수단의 감축효과에 비하면 큰 폭으로 증가한 수준이다. 즉, 탄소세 및 에너지세와 전력가격 상승 시나리오의 기준 대비 온실가스 감축효과는 0.01%에 불과한 반면 이들 시나리오의 신기술 도입 시나리오 대비 온실가스 감축효과는 최고 0.7%에 이르고 있다는 점이다. 그러나 기본적으로 온실가스 감축 잠재량 규모

〈표 15〉 신기술 도입 대비 시나리오별 온실가스 감축 잠재량(천톤, %)

	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
탄소/에너지세-감축량	-1.1	-1.3	-27.0	-85.7	-85.4	-85.4	-59.7
-감축율	0.0%	0.0%	-0.2%	-0.7%	-0.7%	-0.7%	-0.5%
석유가격 상승-감축량	0.0	0.0	0.0	0.0	14.3	14.3	14.3
-감축율	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%
전력가격 상승-감축량	-1.8	-2.0	-27.7	-86.4	-86.1	-85.7	-59.9
-감축율	0.0%	0.0%	-0.2%	-0.7%	-0.7%	-0.7%	-0.5%
석탄가격 상승-감축량	0.0	0.0	-25.7	-84.3	-84.3	-84.3	-58.6
-감축율	0.0%	0.0%	-0.2%	-0.7%	-0.7%	-0.7%	-0.5%

가 낮은 수준에 머물고 있기 때문에 온실가스의 추가 감축규모는 미미한 수준에 불과할 것으로 분석된다. 고 유가의 경우에는 오히려 온실가스 배출량이 최고 0.1% 증가할 것으로 분석된다. 따라서 기준안 대비의 경우와 같이 신기술 도입을 대비한 경우에도 이들 세제도입과 연료가격 상승은 온실가스 감축에 별다른 기여를 하지 못할 것으로 분석된다.

3. 에너지 소비 및 온실가스 배출 원단위 전망

1) 에너지 소비 원단위 전망

기준안의 경우 우리나라 시멘트 산업의 에너지/시멘트 원단위는 2001년의 0.07(TOE/톤)에서 지속적으로 개선되어 2041년에는 0.065에 이르러 분석기간에 6.5% 개선될 것으로 전망된다. 에너지 원별 원단위에서는 에너지 소비량이 가장 많은 유연탄의 경우 원단위는 2001년의 0.052에서 지속적으로 개선되어 2041년에는 0.049에 이르러 4.8% 개선될 것으로 전망된다. 다음으로 소비량이 많은 전력의 원단위는 2001년의 0.01에서 2041년에는 0.008에 이르러 기간 평균 16.7% 개선될 것으로 전망된다. 나머지 에너지의 원단

위 역시 모두 개선될 것으로 전망된다.

시멘트 생산시 소비된 에너지를 기준으로 할 경우 우리나라의 에너지 소비 효율은 일본보다 높은 것으로 나타나고 있다. 일본의 시멘트 생산시 소비된 에너지(시멘트 제조용 에너지 소비, 자가발전에서 생산된 전력 소비량 및 구입 전력 포함)는 1990년에 0.0856TOE/톤(3,586MJ/시멘트톤)이었으며 2003년에는 0.0821TOE/톤(3,438MJ/톤)을 기록했다. 일본 시멘트산업이 1996년 12월에 설정한 2010년의 에너지 소비 원단위 목표는 1990년에 비해 약 3% 정도 낮은 0.0824TOE/톤(3,451MJ/톤)이었으나 장기 목표는 이미 2003년도에 초과 달성한 상황이다. 우리나라가 달성한 2001년의 에너지 소비 효율수준(0.07TOE/톤)은 일본의 2001년 효율 수준(0.0836TOE/톤(3,499MJ/톤)에 비해 16% 높은 수준이며 일본의 2010년 장기 원단위 목표(0.0824TOE/톤=3,451MJ/톤) 보다 15% 높은 효율 수준을 나타내고 있다.

2) 온실가스 배출 원단위 전망

시멘트산업의 연료연소와 석회석 하소에서 발생한 온실가스를 모두 포함한 시멘트산업의 온실가스 집약

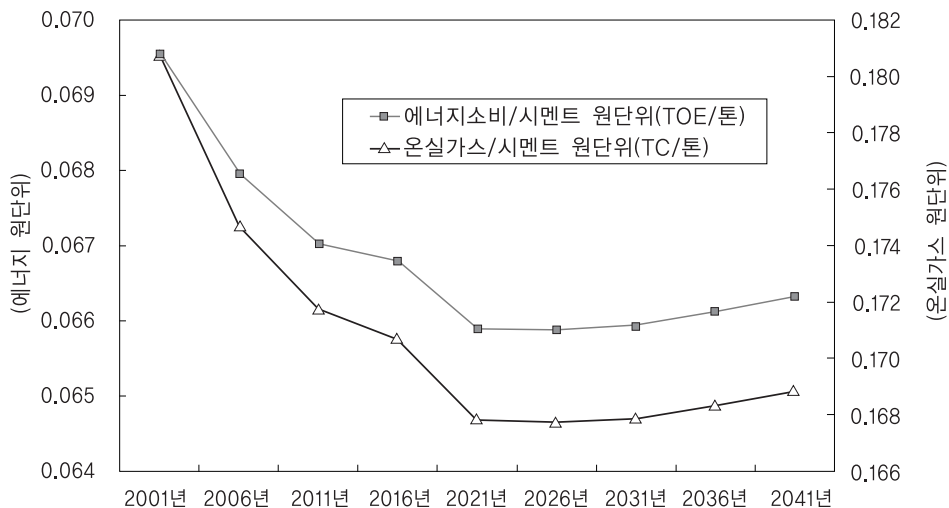
이슈진단

〈표 16〉 기준안의 온실가스/시멘트 원단위 전망(TC/톤)

	2001	2006	2011	2016	2021	2026	2031	2036	2041
시멘트	0.181	0.177	0.174	0.173	0.171	0.171	0.171	0.172	0.172
-연료연소	0.077	0.074	0.073	0.072	0.071	0.071	0.071	0.071	0.072
-클링커	0.104	0.102	0.101	0.101	0.100	0.100	0.100	0.100	0.101

〈그림 5〉 시멘트산업의 에너지 및 온실가스 원단위 전망

시멘트산업의 에너지 및 온실가스 원단위 전망



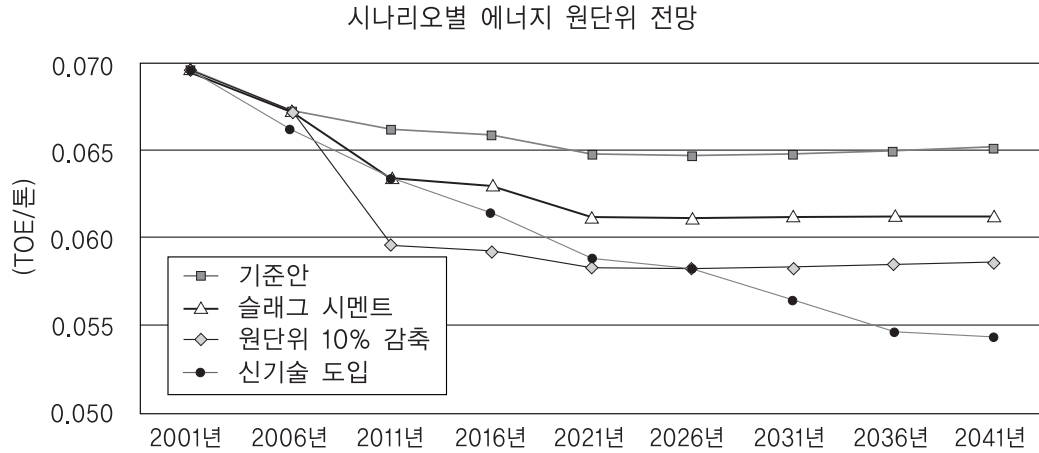
도(온실가스 배출량/시멘트 생산량)는 2001년의 0.181(톤/톤)에서 지속적으로 개선되어 2041년에는 0.171에 이르러 분석기간에 3.1% 개선될 것으로 전망된다. 온실가스 배출량을 연료연소와 클링커 생산에서 발생하는 온실가스로 구분할 경우 연료연소에서 발생한 온실가스/시멘트 원단위는 2001년의 0.077에서 2041년에는 0.072에 이르러 기간에 7.0% 개선될 전망이다. 클링커 생산에서 발생한 온실가스/시멘트 원단위는 2001년의 0.104에서 2041년에는 0.101에 이르러 3.1% 개선될 것으로 전망된다.

3) 시나리오별 원단위 전망

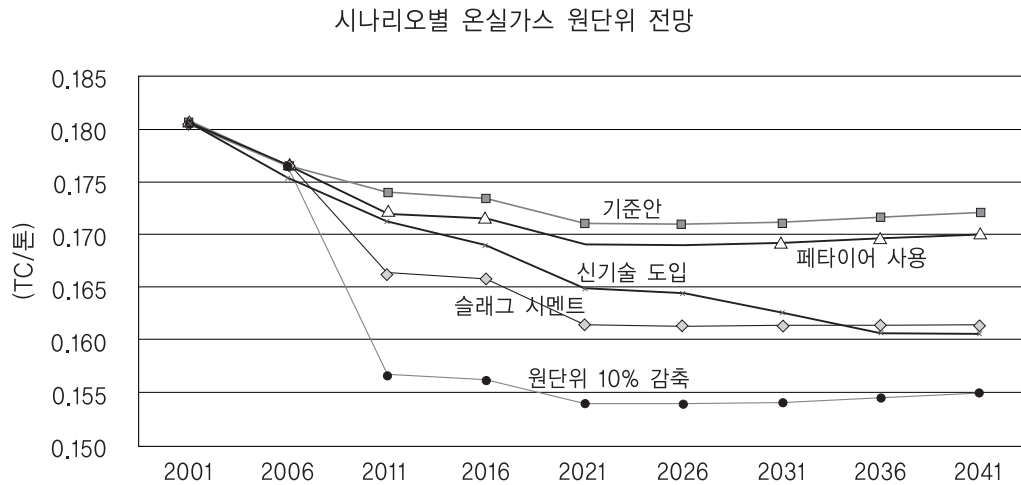
앞에서 분석된 다양한 시나리오의 에너지 소비 원단위는 이들 시나리오가 에너지 절약 잠재량에 미치는 영향만큼 기준안의 원단위에도 영향을 미치게 된다. 예를 들면 신기술 도입 시나ριο는 기준안에 비해 최고 16.5%의 에너지 절약 잠재량(2041년)을 나타냄으로써 에너지소비/시멘트 생산 원단위 역시 기준안의 에너지 원단위에 비해 최고 16.5% 낮은 수준을 나타낼 것으로 예상된다.

다양한 시나리오의 온실가스 원단위 역시 이들 시나리오가 온실가스 감축 잠재량에 미치는 영향만큼 온실

〈그림 6〉 시나리오별 에너지 소비 원단위 전망



〈그림 7〉 시나리오별 온실가스 원단위 전망



가스 원단위에도 영향을 미치게 된다. 신기술 도입 시나리오의 경우 기준안 대비 최고 6.7%의 온실가스 감축 잠재량을 갖고 있는 것으로 분석되었으며 따라서 신기술 도입 시나리오의 온실가스 원단위 역시 기준안 대비 6.7% 낮아질 것으로 예상된다. 페타이어 사용 확대

시나리오의 온실가스 원단위가 기준안 다음으로 낮고 신기술 도입의 원단위가 다음으로 낮으며 슬래그 시멘트 확대의 원단위가 가장 낮은 수준을 나타내고 있다.

시나리오의 온실가스 감축 잠재량이 10% 미만에서 그치는 것으로 나타남에 따라 시멘트산업의 온실가스배

이슈 진단

출/시멘트생산 원단위를 2011년부터 기준안 대비 10% 감축하는 가상적인 원단위 감축목표를 설정할 경우 대부분의 시나리오가 감축목표를 달성하지 못할 것으로 예상된다.

기준안 이외에 슬래그 시멘트 확대, 신기술 도입 및 페타이어 사용 확대 시나리오의 온실가스 원단위는 모두 기준안의 원단위보다 낮은 수준에 이를 전망이다. 이중에서 원단위가 가장 낮을 것으로 전망되는 슬래그 시멘트 확대 시나리오의 경우 2011년의 원단위(0.166)는 2001년의 원단위에 비해 8.0% 낮은 수준이다. 슬래그 시멘트 시나리오의 2021년의 원단위(0.161)는 2001년 원단위에 비해 무려 16.1% 낮은 수준이다.

이와 같은 분석은 시멘트산업의 온실가스 감축목표를 원단위로 설정할 경우 2011년의 경우 2001년의 원단위에 비해 3.7% 개선은 아무런 노력없이 달성 가능할 수 있으며(기준안의 경우) 슬래그 시멘트 확대를 추진하면 2001년 원단위에 비해 2011년에는 8.0%의 원단위 개선목표를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

시멘트산업의 에너지 소비량은 2001년의 168.3PJ에서 2041년에 205.2PJ에 이르러 연평균 0.5% 증가하며 유연탄의 소비 비중은 2001년의 74.2%에서 2041년에는 75.5%로 상승하지만 전력의 소비 비중은 2001년의 14.5%에서 2041년에는 12.9%로 낮아질 전망이다. 따라서 2041년까지 유연탄은 주종 에너지로서의 위치를 유지할 것으로 전망된다.

신기술 도입시 에너지 절약 잠재량은 최고 16.5%(33.9PJ=814천TOE)에 이르며 유연탄과 전력의 소비절약이 가장 큰 폭으로 이루어질 전망이다. 슬래그

시멘트의 생산비율 확대시 에너지 절약 잠재량은 최고 6%에 이르며 절약은 모든 에너지원에서 발생될 것으로 전망된다. 탄소세나 에너지세 도입시 에너지 절약 잠재량은 극히 미미한 수준(0.1%)에 그치며 에너지 가격 변화 시나리오중에서 석유가격과 석탄가격 상승은 에너지 절약에 기여하지 못하는 반면 전력가격 상승은 미미한 수준(0.1%)이나마 기여할 것으로 분석된다. 따라서 가격정책을 통한 에너지 절약은 시멘트산업계의 비용부담으로 작용할 것으로 예상된다.

시멘트산업의 온실가스 배출량은 2001년의 10,490천톤에서 지속적으로 증가하여 2041년에는 13,030천톤으로 증가하여 연평균 0.54% 증가할 것으로 전망된다. 전력소비에 의한 온실가스 배출량을 제외할 경우 시멘트산업의 온실가스 배출량은 기준안의 배출량에 비해 최저 6.9%에서 최고 8.0%까지 낮아질 것으로 전망된다.

신기술을 도입할 경우 온실가스 배출량은 기준안에 비해 최고 6.7%(872천톤) 감소할 것으로 전망된다. 신기술 도입의 에너지 절약 및 온실가스 감축은 예열 및 소성공정의 버너연소 개선(advanced burner tip)과 태양열 소성 킬른(solar lime kiln)의 도입에 의한 효과에서 기인한 것으로 해석된다.

슬래그 시멘트 비율 확대시 온실가스 배출량은 기준안에 비해 최고 6.3%(817천TC) 감소될 것으로 전망된다. 이는 포틀랜드 시멘트 생산에 투입될 클링커의 생산량이 감소하고 대신 슬래그를 비롯한 혼합재의 사용이 증대되기 때문이다. 유연탄 소비량의 30%를 페타이어 사용으로 대체할 경우 온실가스 배출량은 기준안 대비 1.2% 감축할 것으로 전망된다.

\$300/TC의 탄소세와 \$300/TOE의 에너지세를 부과하는 경우 모두 온실가스 배출량은 기준안에 비해 최

고 0.01%(1천TC)의 감소에 그칠 것으로 전망된다. 이러한 온실가스 감축은 탄소세나 에너지세 부과에 의한 에너지 가격 상승이 원료 혼합 및 저장 공정과 냉각 공정에서 에너지(전력)를 많이 사용하는 기술의 경쟁력을 약화시키기 때문이다. 석탄가격이나 석유가격은 온실가스 감축에 전혀 기여하지 못하는 반면 전력가격 상승은 온실가스 감축에 소폭(0.02% 감축) 기여하는 것으로 나타나고 있다.

우리나라 시멘트 산업의 에너지/시멘트 원단위는 2001년의 0.07(TOE/톤)에서 2041년에는 0.065에 이르러 6.5% 개선될 전망이다. 온실가스 집약도(온실가스 배출량/시멘트 생산량) 역시 2001년의 0.181(톤/톤)에서 2041년에는 0.171에 이르러 3.1% 개선될 것으로 전망된다.

에너지와 자본과의 분리가 극히 제한적이기 때문에 에너지원간 대체 역시 극히 제한적인 것으로 나타났다. 가격정책에 의한 에너지 절약 및 온실가스 감축 잠재량이 낮게 분석된 것은 가격정책이 기술개발을 유도할 수 있는 장기적인 효과가 누락되었기 때문이다. 따라서 향후 연구에서는 이들 효과에 대한 분석이 추가되는 것이 바람직할 것이다.

〈참고문헌〉

에너지경제연구원, 기후변화협약대응을 위한 중장기

정책 및 전략수립에 관한 연구(제1차년도), 2004.6
에너지경제연구원, 기후변화협약대응을 위한 중장기
정책 및 전략수립에 관한 연구(제2차년도) - 장기
온실가스 배출 전망 및 저감 시나리오 분석, 2005.8
에너지경제연구원, 기후변화협약대응을 위한 중장기
정책 및 전략수립에 관한 연구(제2차년도) - 기후변
화협약 대응을 위한 교토메카니즘 기반구축과 정책
및 조치, 2005.8
에너지관리공단, 에너지부문 온실가스 배출 감축 잠재
력 시범분석, 2005.8.27
에너지관리공단, 에너지 기술DB 구축사업, 2004.6
에너지기술연구원, 온실가스 감축수단 조사사업(시멘
트 분야), 2005.8
유동현, 산업공정부문 온실가스 배출전망, 기본연구보
고서 04-21, 에너지경제연구원, 2004.12
유동현, 시멘트산업의 이산화탄소 저감방안, 정책연구
자료 95-01, 에너지경제연구원, 1995
한국양회협회, 2004년, 2005년 시멘트 통계연보
한국양회협회, 시멘트, 2004.9
WBCSD(2001), Calculating CO2 process emis-
sions from Cement Production(Cement-based
Methodology), October 2001
IEA ETSAP, Documentation for the MARKAL
Family of Models, October 2004
일본 시멘트협회, Cement Handbook, 2005