

시멘트산업의 순환자원 활용

Beneficial Use of Alternative Materials in the Cement Industry



임채용 Chae-Yong Lim
쌍용양회공업(주) 기술연구소
시멘트·콘크리트팀장
E-mail : limdrn@ssyc.co.kr



정연식 Youn-Shik Chung
쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장
E-mail : cyss@ssyc.co.kr



김경수 Kyung-Su Kim
쌍용양회공업(주) 기술연구소 연구원
E-mail : kskim@ssyc.co.kr

1. 서언

시멘트는 인간 생활에 필요한 주택, 도로, 공항, 항만, 댐 등을 사회 기반시설을 건설하는데 필수적인 재료로서, 문명의 발달과 함께 소비량이 크게 증가해 왔다. 2016년 기준 전 세계 시멘트 생산량은 약 46억 톤이며, 1위 생산국인 중국은 약 24억 톤을 생산하여 50% 이상의 점유율을 기록하고 있다. 우리나라는 연도별 경제 상황에 따라 변동은 있으나, 2010년 이후 연간 생산량은 47~63백만 톤 수준으로, 세계 10위권의 생산량을 기록하고 있다.

시멘트 산업은 국가 기간산업으로서 경제발전에 크게 기여하여 왔으나, 다른 한편으로 다량의 광물자원과 연료를 소비하며, 다량의 온실가스를 배출함으로써 환경을 훼손하는 산업으로 인식되어 왔다. 그러나, 최근 천연자원을 각종 순환자원으로 대체함으로써 폐기물 매립 및 소각에 따른 환경오염을 해소하면서, 천연자원의 소비를 줄이는 환경 친화적인 산업으로 탈바꿈하고 있다.

[표 1] 2016년 세계 주요국가의 시멘트 생산량(단위: 백만 톤)

Country	2001	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
China	661	1,882	2,063	2,137	2,420	2,480	2,350	2,410
India	103	220	240	270	280	260	270	290
EU28	226	192	192	173	167	167	167	169
USA	89	65	69	75	77	83	83	86
Turkey	30	63	63	64	73	71	71	75
Indonesia	31	40	45	32	56	65	65	63
Saudi Arabia	20	43	48	50	57	55	55	61
Brazil	39	59	63	69	70	72	72	60
Russian Federation	29	50	56	53	72	68	69	56
Japan	80	57	56	51	57	54	55	56
South Korea	52	47	48	48	47	63	63	55
Mexico	33	35	35	35	35	35	40	41

[표 2] 연도별 국내 클링커 및 시멘트 생산량(단위: 천 톤)

구분	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
클링커	44,853	45,281	45,155	44,382	44,816	47,015	56,507	48,657

[표 3] 연도별 폐기물 발생 현황(단위: 천 톤/일)

구분	'11(a)	'12	'13	'14	'15	'16	'17(b)	b/a
총계	373	382	381	388	405	415	415	111%
생활계 ^{주1)}	49	49	49	50	51	54	53	109%
사업장 배출시설계 ^{주2)}	138	146	148	153	155	162	165	120%
건설	186	187	184	185	198	199	196	105%

주1) 생활폐기물과 사업장생활계폐기물의 합
주2) 지정폐기물 미포함

[표 4] 연도별 폐기물의 처리방법 (단위: 천 톤/일)³⁾

구분	'11(a)	'12	'13	'14	'15	'16	'17(b)	b/a
계	373.31	382.01	380.71	388.49	404.81	415.35	414.63	111.1%
매립	34.03	33.70	35.60	35.38	35.13	35.03	32.27	94.8%
소각	20.90	22.85	22.92	22.42	23.90	24.14	24.04	115.0%
재활용	312.52	322.42	319.58	329.27	345.11	356.09	358.27	114.6%
해역배출	5.87	3.04	2.61	1.42	0.66	0.09	0.05	0.8%

본고에서는 국내의 문헌을 바탕으로 폐기물 발생 및 처리 현황을 살펴보고, 시멘트산업에서의 순환자원 사용 현황 및 향후 전망에 대해 기술하고자 한다.

2. 국내 폐기물 발생 및 처리 현황

일반폐기물은 가정에서 발생하는 생활폐기물과 사업장생활폐기물, 사업장배출시설계 폐기물 및 건설폐기물로 구분되며, 2017년 기준 폐기물 발생량은 [표 3]에 나타난 바와 같이 일간 총 415천 톤이다. 종류별로는 건설폐기물이 196천 톤/일(47.3%), 사업장배출시설계폐기물이 165천 톤/일(39.8%), 생활계폐기물이 53천 톤/일(12.9%)을 차지하고 있다. 이는 2011년 대비 총 발생량이 11% 증가한 것으로, 종류별로는 건설폐기물이 5%, 생활계폐기물이 9% 증가한 것에 비해 사업장배출시설계 폐기물은 20% 증가하여 가장 큰 폭의 증가를

나타내고 있다.

[표 4]는 연도별 폐기물의 처리방법별 처리량을 나타낸 것으로, 재활용 및 소각은 증가하고, 매립 및 해역배출은 감소하는 경향을 나타내었다. 2017년에는 2011년 대비 소각과 재활용이 각각 약 15% 증가하였고, 매립은 약 5% 감소하였다. 특히, 해역배출은 약 99% 이상 대폭 감소하였는데, 이는 2006년부터 단계적으로 폐기물 해양배출 감축정책을 실시하고, 2016년부터는 국제협약에서 허용한 일부 물질을 제외한 모든 폐기물의 해양배출을 금지한 조치 때문이다.

[표 5]는 지정폐기물 발생량 및 방법별 처리량을 나타낸 것으로, 발생량은 2010년 이후 지속적으로 증가하여, 2016년에는 2010년 대비 약 45% 증가한 것으로 나타났다. 처리방법별로 구분하면 매립은 발생량 증가율 대비 14% 높은 값을 나타내었고, 소각은 8% 낮은 수준이며, 재활용은 발생량 증가와 동일한 수준으로 증가하였다.

[표 5] 지정폐기물 발생 및 처리 현황(단위 : 톤/일)

구분	'11(a)	'12	'13	'14	'15	'16	'17(b)	b/a
합계	10,021	12,487	12,407	13,172	13,402	13,783	14,905	149%
재활용	5,717	6,788	7,331	7,547	7,710	7,714	8,379	147%
소각	1,819	2,037	2,123	2,103	2,180	2,315	2,252	124%
매립	1,875	2,874	2,370	2,531	2,668	2,910	3,255	174%
기타	611	788	583	991	844	844	1,019	167%

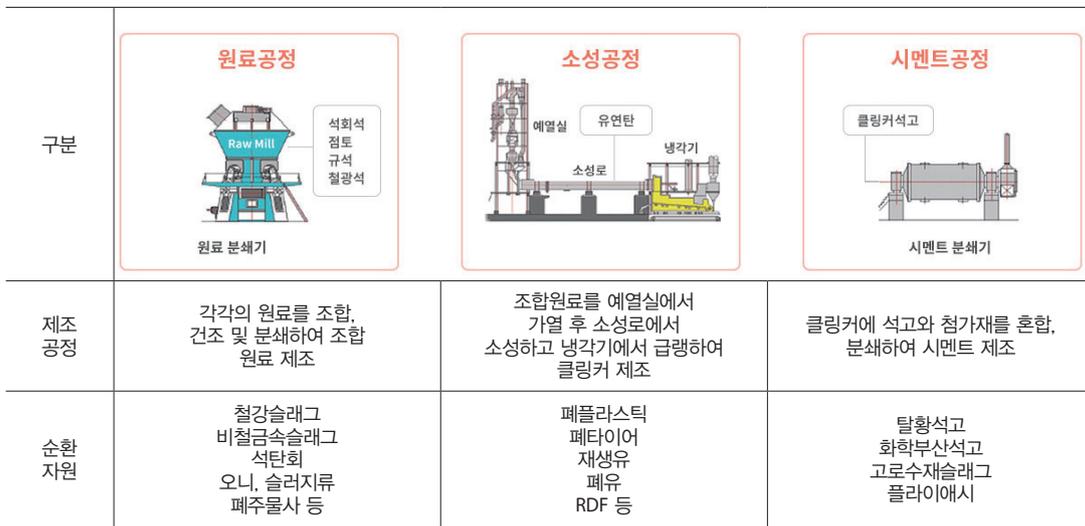


그림 1. 시멘트 제조과정별 순환자원 활용⁵⁾

3. 시멘트산업과 순환자원 재활용

3.1 시멘트 제조 공정별 순환자원 활용

시멘트는 CaO, SiO₂, Al₂O₃ 및 Fe₂O₃을 주성분으로 하는 석회질, 규산질, 알루미늄질 및 철질 원료를 분쇄기에서 적정한 비율로 혼합, 분쇄하여 조합원료를 제조하고, 이를 소성로에서 고온으로 가열하여 제조한 클링커에 응결조절제인 석고와 첨가재인 석회석, 고로수재슬래그 및 플라이애시를 첨가하여 미세한 분말로 분쇄하여 제조한다. 이 과정에서 <그림 1>에서 보는 바와 같이 공정별로 다양한 순환자원을 활용하여 천연자원을 대체하고 있다.

① 원료계 순환자원

시멘트 클링커 광물을 구성하는 주요 원소인 산소(O), 규소

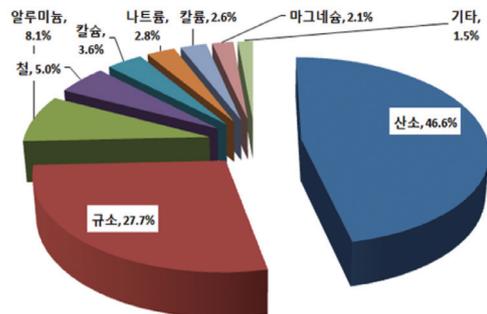


그림 2. 지각의 8대 구성원소

[표 6] 시멘트용 천연연료와 순환자원의 주요 구성성분⁶⁾

구분		주요 구성 성분(%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
포틀랜드시멘트		20~23	3.8~5.8	2.5~3.6	63~65
천연원료	석회석	~4	~2	~2	47~55
	점토	45~	10~30	3~10	~5
	규석	70~95	2~10	~5	~2
	철광석	20~30	~10	30~55	10~15
순환자원	석탄회	40~65	10~30	3~10	5~20
	폐주물사	50~80	5~15	5~15	~5
	정수오니	20~50	20~50	5~15	5~30
	제강슬래그	5~15	5~10	30~45	30~40
	고로슬래그	20~45	10~20	~5	30~60

(Si), 철(Fe), 알루미늄(Al) 및 칼슘(Ca)은 <그림 2>와 같이 지각을 구성하는 8대 원소로서, 천연자원뿐만 아니라 [표 6]과 같이 다양한 순환자원에도 포함되어 있다. 따라서 이러한 순환자원을 조합하여 사용하면, 천연자원과 동일한 형태의 클링커를 제조할 수 있다.

전 세계적으로 시멘트산업은 순환자원의 재활용을 통한 천연자원의 보존과 매립으로 인한 환경훼손의 방지를 위해 순환자원 재활용을 적극 추진해 오고 있다. 철강산업에서 발생하는 각종 슬래그와 석탄화력발전소의 석탄회, 수처리 시설에서 발생하는 각종 오니 등이 그 대표적인 예이다. 시멘트업계에서는 환경과 시멘트 품질에 미치는 영향을 고려하여 순환자원에 대한 관리기준을 설정하고, 품질 기준을 만족하는 물질만을 반입하여 원료 제조공정에 투입하고 있다. 이러한 원료는 1450℃ 이상(화염의 온도는 2000℃ 이상)의 고온에서 각각의 원소로 분해 및 재결합하여 천연자원을 사용하여 만들어지는 물질과 동일한 클링커 광물(C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF)을 생성하게 된다.

② 시멘트 첨가제

시멘트 분쇄 공정에서는 시멘트 응결조절을 위해 사용되는 천연석고를 대체하여 화력발전소에서 발생하는 탈황석고와

화학공정에서 발생하는 부산석고를 사용함으로써 천연자원이 보존 및 매립에 따른 환경훼손 방지에 기여하고 있다. 또한 시멘트 품질에 영향을 미치지 않는 수준에서 클링커의 일부를 석회석과 순환자원인 고로수재슬래그 및 플라이애시로 대체함으로써 클링커 생산량을 줄이기 위한 노력도 병행하고 있다.

3.2 시멘트산업 순환자원 활용과 친환경성

시멘트산업에서는 순환자원을 활용함으로써 천연자원의 보존, 매립장의 수명연장, 오염물질의 제거 등 친환경적인 역할을 수행하고 있다.

① 천연자원 보존

일반적으로 클링커 1톤을 제조하기 위해서는 약 1.5톤의 천연자원(석회석, 규석, 철광석 및 점토 등)이 필요하다. 이는 원료로 사용되는 석회석이나 점토광물 등에서 이산화탄소, 결정수 등이 분해되어 빠져나가기 때문이다. 이를 2017년 국내 클링커 생산량인 약 4,900백만 톤으로 환산하면, 약 7,350만 톤의 원료가 필요하며, 이는 25톤 덤프트럭 기준으로 294만대에 이르는 막대한 양이다. 한편, 각 원료가 분해된 후 다시 결합하여 물과 수화반응을 하는 클링커 광물(C₃S, C₂S, C₃A,

[표 7] 시멘트 소성로와 소각로의 특성 비교⁷⁾

구분	시멘트 소성로	폐기물 소각로
최고 가스 온도	2200 °C 이상	1480 °C 이하
최고 고형물질 온도	1420~1480 °C	750 °C 이하
가스 체류시간	6~10초	0~3초
고형물질 체류시간	20~30분	2~20분

C₄AF)을 생성하기 위해서는 1450 °C 이상의 고온에서 반응하여야 하는데, 이를 위해서는 다량의 연료가 필요하다. 만약 유연탄만을 연료로 사용하는 경우 클링커 1톤 생산에 약 120kg이 소요되므로, 2017년 기준 약 588만 톤의 유연탄을 사용하게 된다. 시멘트산업에서는 이러한 원료 및 연료로 사용되는 천연자원에 대한 순환자원 대체율을 증대함으로써 자원보존 및 환경보호에 기여하고 있다.

② 안정적 무해화 처리

시멘트 제조공정에서는 각종 원료 및 연료계 순환자원이 매우 높은 온도의 소성로에서 장시간 체류하기 때문에 유기성 물질은 분해되고, 무기성 물질은 새로운 형태의 클링커 광물로 전환되어 안정적으로 순환자원을 재활용할 수 있다([표 7]). 해외 선진국에서는 이러한 고온 특성을 활용하여 프레온 가스, 육불화황, 석면 함유 물질, 동물성 잔재물, 폐산, 폐알칼리, PCB 등 인체나 환경에 유해한 지정폐기물의 무해화 처리에도 소성로를 활용하고 있다.

③ 2차 폐기물의 미발생

시멘트 제조공정에 사용되는 순환자원은 원료계뿐만 아니라 연료계 순환자원의 잔재물도 모두 클링커 광물의 생성에 이용되므로, 완벽한 재활용이 가능하다. 소각장이나 발전소 등의 경우 연소 후 잔재물이 폐기물로 발생하기 때문에 다시 이를 재활용하거나, 재활용이 불가능한 경우 매립하여야 한다. 이로 인해 매립장을 확보하여야 할뿐만 아니라, 경우에 따라서는 토양 및 수질 오염을 일으키는 원인이 될 수 있다. 시멘트산업에서는 이러한 소각 잔재물도 시멘트 원료로 사용함으로써 폐기물 매립 감소에도 크게 기여하고 있다.

④ 온실가스 감축

가연성 폐기물을 연료를 단순하게 소각 처리하지 않고, 시멘트산업이나 발전산업 등에서 연료계 순환자원으로 재활용하면 천연 화석연료의 사용을 절감함으로써 소각 과정에서 발생하는 이산화탄소의 발생을 저감할 수 있다. 또한, 시멘트산업에서는 석회석의 분해시 발생하는 이산화탄소가 전체 이산화탄소 발생량의 약 60%를 차지하는데, 이미 탈탄산반응이 이루어진 CaO를 함유한 슬래그, 석탄회 등의 원료를 사용하여 석회석 사용량을 줄임으로써 이산화탄소 발생을 줄일 수 있다.

2015년 우리나라는 UN에 2030년 배출전망(BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축(국외감축 포함)목표를 제출하였으며, 산업계를 포함하여 국가적인 노력을 기울이고 있다. 시멘트 산업에서의 연료계 및 원료계 순환자원 활용 증대는 국가적인 온실가스 감축 목표 달성뿐만 아니라 전 세계적인 지구온난화의 대응을 위해서도 필수적이다.

3.3 시멘트산업의 순환자원 활용 현황 및 전망

국내 시멘트업계에서는 1990년대 이후 적극적인 노력을 통해 다양한 산업계 및 생활계 순환자원을 재활용하고 있으며, 이를 위해 자체적인 연구개발 및 공정개선 투자와 함께 관련 업계 및 정부와의 적극적인 협력을 추진해 오고 있다.

이러한 노력의 성과로 순환자원 사용량은 [표 8]과 같이 매년 증가하는 추세이며, 2018년을 기준으로 원료계 597만 톤, 연료계 132만 톤으로 총 730만 톤의 순환자원을 사용하고 있다. 이는 25톤 덤프트럭을 기준으로 29만 2천대에 이르는 막대한 양으로, 이러한 순환자원 사용을 통해 매립이나 소각에 따른 환경부담 및 환경오염을 경감하고, 천연자원의 보존 및 자연보호에 크게 기여하고 있다.

한편, 해외 선진국의 시멘트산업에서는 이미 수 십년 전부터 다양한 순환자원을 시멘트 원료로 활용하려는 노력을 기울여 왔으며, 특히 일본은 <그림 3>과 같이 2013년 기준 시멘트 1톤당 486kg의 순환자원을 사용하여, 국내에 비해 약 124kg의 순환자원을 더 많이 사용하고 있다.

[표 8] 국내 시멘트산업의 순환자원 사용량(단위: 천 톤)⁹⁾

용도	종류	'14년	'15년	'16년	'17년	'18년	
원료	점토질	Flyash	2,711	2,637	2,708	2,804	3,140
		오니(유기성)	399	510	356	328	434
		오니(무기성)	473	1,173	1,586	1,755	1,616
		기타(광미등)	498	232	279	190	220
	규산질	폐주물사	529	560	573	654	562
	소계	4,610	5,112	5,502	5,731	5,972	
연료		962	1,030	1,150	1,266	1,324	
합계		5,572	6,142	6,652	6,997	7,296	

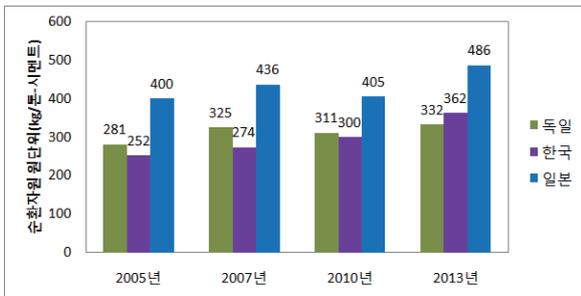


그림 3. 시멘트 1톤당 순환자원 사용량⁹⁾

이상과 같이 국내 시멘트산업에서의 순환자원 활용은 그 동안 업계의 많은 투자와 노력을 통해 순환자원 사용량을 꾸준히 증대하여 왔음에도 불구하고 일본, 미국, 유럽 등 해외 선진국에 비해서는 여전히 낮은 수준이다. 따라서, 앞으로도 시멘트의 업계의 지속적인 노력과 함께 관련 산업의 협력 및 정부의 순환자원 활용 촉진 정책 등을 통해서 더 많은 순환자원을 활용할 수 있는 여건을 마련해 나가야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

2018년 전 세계 폐기물의 절반 이상을 수입하는 중국이 재활용 폐기물 수입금지 품목을 확대하면서 수도권 아파트단지에 폐비닐과 스티로폼 등 재활용 폐기물 수거 중단이 큰 이슈가 된 적이 있다. 향후 이러한 중국의 조치는 더욱 확대될 것

으로 예고되어 있으며, 전 세계적으로 그 영향이 점점 더 확대될 것이다. 특히, 1992년부터 운영되어 온 수도권매립지가 향후 7년이 지나면 수명을 다 할 것으로 전망하고 있으나, 이를 대체할 부지를 확보하지 못하고 있는 우리나라로서는 더욱 극심한 쓰레기 대란이 현실화할 것으로 우려된다.

2015년 발표한 제4차 국가환경종합계획(2016~2035년)에 의하면 자원순환 경제의 정착 및 고도화의 일환으로 직매립 “0”화를 추진하여, 2015년 9.6%인 폐기물 매립 비율을 2025년 2.5%, 2035년 1.0%로 감소시키고자 하는 목표를 설정하였으며, 이를 위해서는 년 평균 약 0.5%의 매립비율 감소가 필요한 실정이다. 이러한 노력의 일환으로 정부에서는 2016년 ‘자원순환기본법’을 제정 및 공포하고(2018년 1월 1일 시행), ‘폐기물관리법’을 개정하여 순환자원 재활용률을 높이려 하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 2018년 1월 1일 이후 폐기물을 소각 또는 매립의 방법으로 처분하는 하는 경우 폐기물처분부담금을 부과·징수하고 있으며, 각 매립장에서는 폐기물 처리 수수료를 인상하는 등 각종 대책을 마련하여 시행하고 있다. 또한 ‘폐기물관리법’을 각 단계별로 준수하여야 할 기준을 설정하고 기준에 적합하게 관리하도록 규정하는 포지티브 방식(허용행위 열거방식)에서 재활용을 원칙적으로 모두 허용하고 환경이나 건강에 위해한 것만 불허하는 네거티브 방식(제한행위 열거방식)으로 개정하여 분야별로 시행을 추진 중이다.

전술한 바와 같이 시멘트산업에서의 순환자원 재활용은 고

은 소성에 의한 유해물질의 무해화, 무기물 및 연소 잔재물의 클링커 원료로의 전환에 따른 2차 폐기물의 미발생, 천연 원료 및 연료자원의 대체에 따른 환경보호, 순환자원의 원료 및 연료로서의 유효 활용 등, 다른 폐기물 처리방법에 비해 매우 큰 장점을 가지고 있다. 향후 시멘트산업은 이러한 특성을 활용하여 기존에 매립, 소각되는 폐기물을 적극적으로 재활용함

으로써 자원순환형 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

이를 위해서는 시멘트업계와 관련 산업의 기술 개발 및 투자와 함께, ‘자원순환기본법’의 제정 및 ‘폐기물관리법’의 개정 취지에 부합하는 중앙정부와 지방자치단체의 과감한 지원과 규제 해소 및 시민사회의 적극적인 협력이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Activity Report, CEMBUREAU, 2017
2. 한국시멘트협회, <http://www.cement.or.kr/>
3. 전국 폐기물 발생 및 처리 현황, 환경부 / 한국환경공단, 2018
4. 2017년도 기준 지정폐기물 발생 및 처리 현황, 환경부 / 한국환경공단, 2018
5. 한국시멘트협회 자원순환센터, <http://recycling.cement.or.kr>
6. 시멘트산업에서의 순환자원 재활용에 대한 올바른 이해, 차춘수; 이종열, 시멘트, No.174, pp.6-16, 2007년 3월
7. Cement Production Technology: Principles and Practice, Anjan Kumar Chatterjee, CRC Press, 2018
8. 시멘트산업에서의 자원재활용, 오재현, 세라미스트 제20권 제1호, 2017년 3월

담당 편집위원 : 민태범(성신양회(주))

●● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하니 관심 있는 특별회원사는 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진포함 가능)

3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 과장(E-mail : rkr@rcr.or.kr, Tel.02-552-4728)