

# 자동차 폐차잔재(ASR)의 시멘트제조 열원활용공정의 최적화

오세천\*, 권우택, 김수룡

## Optimization of Cement Manufacturing Process for Heat Source Application of Automobile Shredder Residue

Sea Cheon Oh\*, Woo-Teck Kwon and Soo-Ryong Kim

### Abstract

Rotary kiln in cement work has been evaluated for a wide variety of organic wastes such as wood, used tyres, plastic wastes and automobile shredder residue (ASR). However the presence of chlorine hampers the use of ASR as fuel in rotary kiln. Therefore, the behavior characteristics of chlorine components in rotary kiln should be considered to develop an effective method for ASR treatment to recovery energy resources. The aim of this paper is to present the chlorine control system applied to a cement manufacturing process for ASR use as an alternative fuel. In this work, the simulation of bypass unit and cyclones for chlorine control in rotary kiln has been studied and compared with the operation results of field test.

### Key words

Automobile Shredder Residue(폐차잔재), Cement Manufacturing Process(시멘트제조공정), Heat Source(열원), Optimization(최적화)

(접수일 2008. 6. 5, 수정일 2008. 6. 15, 게재확정일 2008. 6. 19)

\* 공주대학교 환경공학과

■ E-mail : ohsec@kongju.ac.kr ■ Tel : (041)550-0394 ■ Fax : (041)552-0380

## 1. 서론

자동차 산업은 2만 여개의 부품을 조립하여 완성하는 기술 복합체로서 우리경제의 발전과 성장을 주도하는 견인차 역할을 수행해오고 있으며 또한 산업의 특성상 국가 경제에 미치는 파급효과가 매우 크기 때문에 선진 각국은 자동차 산업의 유치와 발전에 각종지원을 아끼지 않고 있다. 그러나 최근 들어서 독일을 중심으로 한 유럽연합이 자국의 우수한 환경기술을 앞세워 자동차 시장의 진입을 억제하고 있는 실정에 있

어 환경보존 및 자원활용 뿐만 아니라 국내 자동차 산업의 지속적인 성장과 대외 경쟁력을 강화하기 위하여 폐자동차 처리 시 발생하는 폐차잔재(Automobile Shredder Residue, ASR)의 재자원화 필요성이 점차 확대되고 있다.

이러한 폐차잔재는 현재 자동차의 총량기준으로 약 20~25%에 이르고 있으며 특히 플라스틱, 고무, 종이 및 섬유류 등 상당량의 유기성분으로 이뤄져 있어 에너지원으로서의 활용 가능성이 높음에도 불구하고 폐차잔재에 함유된 염소성분으로 인하여 연소를 통한 에너지회수에 있어서 많은 어려움을

야기 시키고 있다. 또한 폐차잔재는 여러 가지의 물질로 복잡한 구성물을 이루고 있어 물질회수가 거의 불가능하며 따라서 대부분 매립에 의하여 처분되고 있다.<sup>(1-4)</sup>

시멘트 제조공정은 화염온도가 2000℃에 이르고 1200℃ 이상에서의 체류시간도 3초 이상이며 로터리 킬른을 통과하는 물질의 체류시간도 30분 이상으로 거의 대부분의 폐기물을 안정적으로 자원화 할 수 있다.<sup>(5)</sup> 특히 별도의 대규모 설비투자 없이 플라스틱이나 고무류 및 섬유류 등의 가연성 물질이 가지고 있는 높은 발열량을 산업체 열원으로 이용할 수 있어 유럽 및 일본 등의 외국 시멘트 업체에서는 10~20년 전부터 가연성 폐기물을 시멘트 제조공정의 열원으로 활용하는 연구가 시작되어 현재 본격적으로 활용하고 있다. 그러나 폐차잔재물의 경우 다양한 종류의 가연성 성분이 혼합되어 있을 뿐만 아니라 킬른 공정에 악영향을 주는 염소성분이 다량 함유되어 있어 폐차잔재물을 시멘트 제조공정의 열원으로 활용하기 위해서는 이에 대한 적절한 기술개발이 요구된다.<sup>(6-8)</sup> 따라서 본 연구에서는 이러한 폐차잔재물의 시멘트 제조공정에 대한 열원활용의 최적조건을 도출하고자 현장적용 전 킬른내 염소성분의 제어를 위한 bypass unit의 cyclone에 대한 전산모사연구를 수행하였으며 이러한 전산모사결과를 바탕으로 실제 시멘트 제조공정에 대한 폐차잔재물의 현장적용 실험을 수행하였다.

## 2. 전산모사

본 연구에서는 폐차잔재물 투입시 염소제어를 위한 bypass unit와 연결된 cyclone을 그림 1과 같이 개조하기 위하여 cyclone내에서 다량의 염소성분을 함유하고 있는 입자의 거동특성을 고찰하고자 상용화 CFD code인 Fluent를 이용하여 폐차잔재물의 현장적용 전 전산모사를 수행하였다. 공정에서의 가스상 및 입자상의 거동은 다음과 같은 force balance로부터 계산된다.

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + g_x \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F}_x \quad (1)$$

또한 가스상에 대해서는 다음과 같은 continuity 및 momentum식을 이용하여 계산된다.

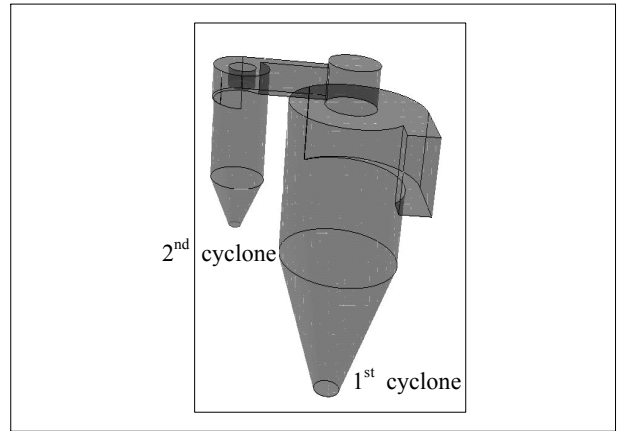


Fig. 1 Cyclone used in this work.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\mathbf{F}$ 는 입자상과 가스상의 상호작용에 의한 external body force를 각각 나타낸다. 또한 momentum 및 mass에 대한 입자상과 가스상의 상호작용은 다음과 같은 식을 이용하여 계산된다.

$$F = \sum \left[ \frac{18\mu C_D R_e}{\rho_p D_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right] m_p' \Delta t \quad (4)$$

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} m_{p0}' \quad (5)$$

## 3. 현장적용실험

그림 2에 자동차의 폐차처리공정에서 발생하는 폐차잔재물의 평균적인 물질조성을 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 물질회수가 가능한 철 성분을 제외하고 대부분의 성분을 light fluff가 차지하고 있음을 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 시멘트 제조공정의 열원활용을 위하여 폐차처리공정에서 폐차잔재물 중 약 26%이상을 차지하는 light fluff를 대상으로 하였으며 대표시료의 물리적 조성을 조사하기 위하여 12종으로 분류한 후 각 조성에 대한 비율 및

발열량과 염소함량을 분석하여 표 1에 나타내었다.

표 1로부터 각 조성별 발열량의 차이가 크게 존재함을 알 수 있으며 그 중 플라스틱류의 발열량이 가장 큼을 알 수 있다. 또한 염소함량에 있어서 전선 및 종이·목재류와 그리고 얇은 플라스틱류에서 100,000ppm 이상의 높은 염소함량 결과가 나타났으며 따라서 표 1과 같은 폐차잔재물을 시멘트 제조공정의 열원으로 활용하기 위해서는 킬른내에서의 염소제어와 관련된 기술의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 대상시료의 성분분석 및 염소함량 등의 특성분석을 토대로 현장적용하기에 앞서 시멘트 킬른 내부에서의 염소함량 순환거동을 검토하였다. 이를 바탕으로 염소제어설비의 안정적 조업범위 및 에너지 최적화를 위하여 개조된 cyclone에서의 입자제거율에 대한 현장실험을 하였으며 그림 3에 본 연구에서 검토한 순환물질의 킬른내 거동

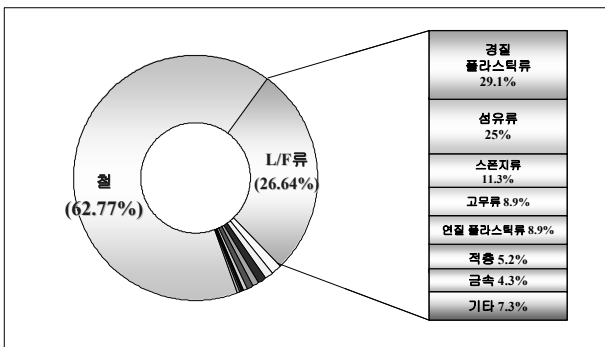


Fig. 2 Components of Automobile Shredder Residue.

Table 1. Properties of light fluff

구분	조성 (wt.%)	발열량 (kcal/kg)	염소함량 (ppm)
스폰지류	18.6	4,981	1,700
섬유류	30.6	6,714	6,100
전선류	2.7	2,824	170,500
비닐류	1.1	9,254	4,800
금속류	1.6	-	-
종이목재류	1.6	4,654	300,260
시트류	8.0	3,256	6,300
더스트류	1.9	5,226	5,100
플라스틱류(흰색)	2.7	10,853	285
플라스틱류(검정색)	18.8	8,023	186
얇은 플라스틱류	2.1	6,672	160,260
고무류	10.3	5,771	730
합계	100	6,129	15,441

특성을 나타내었다.

또한 본 연구에서는 추가로 투입되는 폐차잔재물의 염소함량에 따른 hot meal과 clinker에서의 염소함량을 그림 3에 나타난 순환물질의 거동특성 모델을 활용하여 예측하였으며 그 결과를 표 2와 3에 각각 나타내었다.

표 2와 3으로부터 추가의 폐차잔재물을 시멘트 제조공정의 열원으로 투입하고자 하는 경우 현재의 염소함량에 대한 운전조건을 바탕으로 bypass unit를 통한 가스의 bypass가 필요함을 알 수 있으며 특히 폐차잔재물 중 염소성분이 약

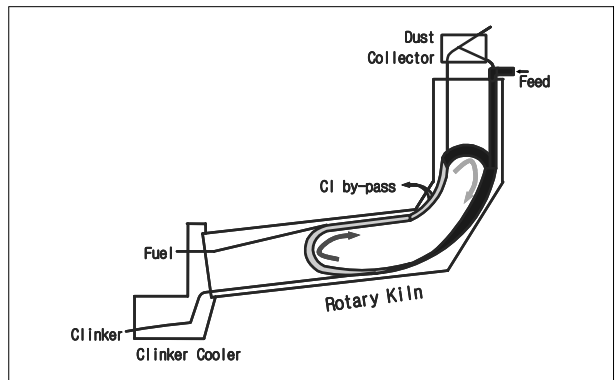


Fig. 3 Circulation characteristics of particle in kiln.

Table 2. Prediction of chlorine in hot meal

구분	폐차잔재물 중의 염소함량(ppm)					
	0	5,000	10,000	20,000	40,000	
Bypass 율	0%	23,267*	25,365	27,577	31,999	40,834
	1%	13,241	14,426	15,677	18,177	23,174
	2%	9,226	10,078	10,946	12,681	16,150
	3%	7,116	7,743	8,405	9,729	12,376
	4%	5,780	6,286	6,820	7,887	10,020
	5%	4,867	5,290	5,736	6,627	8,410

\* 현재의 운전조건

Table 3. Prediction of chlorine in clinker

구분	폐차잔재물 중의 염소함량(ppm)					
	0	5,000	10,000	20,000	40,000	
Bypass 율	0%	345*	376	409	474	604
	1%	197	214	233	270	344
	2%	138	150	163	189	240
	3%	106	116	125	145	184
	4%	87	94	102	118	149
	5%	73	79	86	99	126

\* 현재의 운전조건

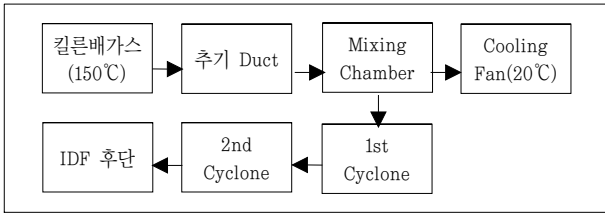


Fig. 4 Chlorine control unit in cement Manufacturing Process.

40,000ppm 함유되어 있을 경우 1% 이상의 bypass가 이뤄져야 함을 알 수 있다. 또한 이와 같은 현장 적용 전 사전연구 결과를 바탕으로 다음 그림 4와 같은 설비를 활용하여 폐차잔재물에 대한 현장 투입실험을 진행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

현재 기존의 시멘트 제조공정의 경우 그림 5와 같이 시멘트 제조공정의 하소로 하단부에 염소제어용 bypass unit를 설치하여 운영하고 있으며 그 후단부에 1단 cyclone을 통하여 입자성분을 포집하고 있다. 그림 5에 나타낸 bypass unit의 최적의 설치위치는 이전의 연구를 통하여 발표한 사례가 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 표 1에 나타낸 바와 같이 다량의 염소성분을 함유하고 있는 폐차잔재물을 추가로 투입할 경우 bypass량의 증가를 필요로 하게 되며 따라서 에너지효율적인 측면에서 본 연구에서는 현재의 1단 cyclone에 추가의 cyclone을 설치하여 그림 1에 나타난 것과 같은 입자의 포집공정을 개선하고자 하였다. 이와 같은 현장의 공정개선을 위하여 새로이 설치될 multi cyclone에 대한 전산모사를 수행하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4로부터 2단 cyclone의 현장 적용 타당성 검토를 위하여 검토된 초기모델의 경우 입자의 포집효율이 1단 cyclone의 경우 약 40% 그리고 2단 cyclone의 경우 약 70%인 것으로 나타났으며 따라서 현장 적용이 충분히 가능할 것으로 검토되었다. 이러한 사전연구를 통하여 폐차잔재물의 투입시 염소성분의 제어를 위하여 추가로 bypass unit에 2nd cyclone을 설치하였으며 이렇게 개조된 2nd cyclone에 대한 포집효율을 측정하여 그 결과를 표 5에 나타내었다.

표 4로부터 전산모사결과와 비교하여 약 70%이상의 포집효율을 나타내었으나 표 5의 현장 적용결과 최대 35%의 포집효율을

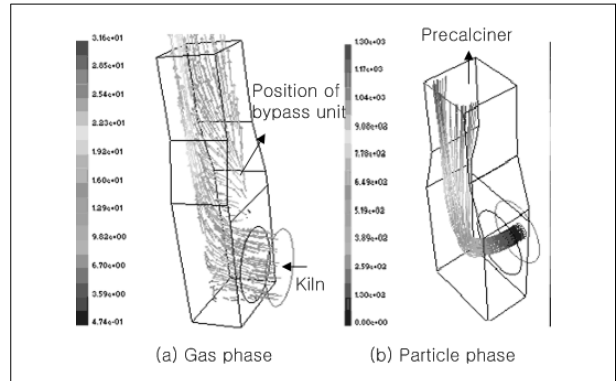


Fig. 5 The fluid dynamic of gas and particle phase in precalciner downstream unit.

Table 4. Simulation results for multi cyclone

구분	유입유속(m/sec)		
	12	15	18
1st cyclone(기존)	42,2%	45,6%	41,8%
2nd cyclone(설계용)	70,3%	70,6%	70,8%

Table 5. Field test results for 2nd cyclone

구분	1차 측정	2차 측정
전단풍량(Sm <sup>3</sup> /min)	88,9	107,4
전단풍량(Sm <sup>3</sup> /min)	82,1	86,1
Dust load (Sm <sup>3</sup> /min)	Cyclone 전	77,172
	Cyclone 후	58,967
	차이	18,205
Cyclone 포집효율(%)	23,6	35,4

Table 6. Additional Simulation results for multi cyclone

구분	유입유속(m/sec)		
	12	15	18
1st cyclone(하단부개조)	55,9%	57,0%	58,6%
2nd cyclone(신규설치)*	70,9%	70,3%	69,9%
2nd cyclone(하단부개조)	76,7%	74,7%	74,1%
2nd cyclone(유입부개조)	75,6%	76,0%	76,9%
2nd cyclone(하단유입부개조)	75,8%	75,9%	76,2%

\* 현재 현장에 설치된 cyclone

결과가 나타나 전산모사와의 오차가 상당히 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 오차의 원인 규명과 cyclone의 개조를 통한 포집효율 증가의 가능성을 확인하기 위하여 여러 가지 경우의 개조된 cyclone에 대하여 전산모사를 하였으며 그 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6으로부터 1st cyclone 및 2nd cyclone 모두 개조를 할

지라도 포집효율이 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서 전산모사결과와 현장적용의 오차발생은 cyclone의 설계에 의한 오차는 아닐 것으로 판단되며 따라서 현장의 조업조건에 따른 포집효율의 변화를 확인하기 위하여 각 cyclone으로의 유입유속 변화에 대한 입자의 포집효율 변화에 대한 동적모사를 수행하였으며 그 결과를 그림 6과 7에 각각 나타내었다. 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 입자의 포집효율이 cyclone으로의 유입유속에 따라 크게 변화함을 알 수 있으며 실제 현장의 시멘트 제조공정의 경우에 있어서도 유입유속이 적지 않게 변화하고 있어 이러한 현장의 조업조건에 의하여 cyclone의 포집효율이 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 현장의 유입유속변화가 실제 cyclone의 포집효율에 영향을 미칠 수 있다 할지라도 여전히 이론적인 포집효율과 현장의 실제적인 포집효율에 있어서는 적지 않은 오차가 있음을 확인할 수 있으며 따라서 이러한 오차는 현장의 조업조건 변화

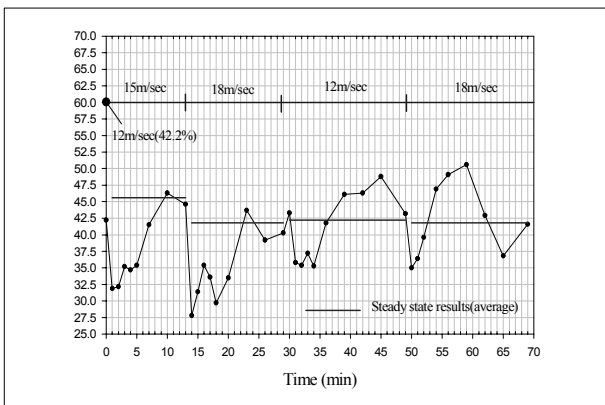


Fig. 6 Dynamic simulation for 1st cyclone.

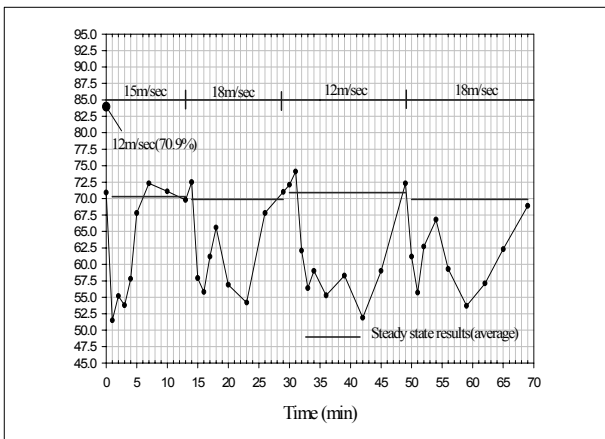


Fig. 7 Dynamic simulation for 2nd cyclone.

에 대한 정확한 고려를 하지 못한 점과 함께 실제 cyclone으로 유입되는 입자의 bulk density 등과 같은 물성 값에 있어서 보다 실질적인 반영이 이루어지지 못한데서 발생한 것으로 판단된다. 그러나 비록 2단 cyclone의 성능에 있어서 사전연구결과와 현장실험의 결과에 있어서 오차가 발생하였으나 염소제어설비의 성능은 비교적 안정적으로 운전되고 있음을 확인하였으며 따라서 폐차잔재물의 시멘트 제조공정의 열원으로서의 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 폐차처리공정에서 발생하는 폐차잔재물 중 약 26%이상을 차지하는 light fluff를 대상으로 시멘트 제조공정의 열원활용을 위한 사전연구 및 현장적용 실험을 수행하였다. 폐차잔재물의 현장적용 실험에 앞서 light fluff시료의 물리적 특성조사 및 킬른내 순환물질의 거동특성에 대한 연구를 통하여 폐차잔재물을 시멘트 제조공정의 열원으로 활용하기 위해서는 킬른내에서의 염소제어와 관련된 기술의 적용이 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 염소제어설비를 현장에 적용하는데 있어서 열원활용의 최적화를 위하여 cyclone을 개조하고자 하였으며 이러한 염소제어설비의 개조를 위하여 현장적용 전 multi cyclone에서의 입자포집효율에 대한 전산모사연구를 수행하였다. 이러한 전산모사결과를 바탕으로 염소제어설비를 개조하여 현장적용 실험을 하였으며 이를 전산모사의 결과와 비교평가하였다. 그러나 전산모사의 결과와 현장적용 실험결과에 있어서는 적지 않은 오차가 발생하였으며 이는 현장의 조업조건 변화와 실제 cyclone으로 유입되는 입자의 물성 값의 적용에 있어서 현실적인 상황을 반영하지 못한데서 발생한 것으로 판단되었다. 그러나 비록 multi cyclone의 성능에 있어서 만족할 만한 결과를 얻을 수는 없었으나 현장에 설치된 염소제어설비를 통하여 폐차잔재물의 시멘트제조 열원활용의 가능성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 청정생산기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Day, M., Graham, J., Lachmansingh, R., Chen, E., 1993, "Characterization of auto shredder residue—a Canadian perspective", Resour Conserv Recycl, Vo1. 9, pp. 255–279.
- [2] Lanoir, D., Trouve, G., Delfosse, L., Froelich, D., Kassamaly, A., 1997, "A Physical and chemical characterization of automobile shredder residues", Waste Manag Res, Vo1. 15, pp. 267–276.
- [3] Day, M., 1997, "Auto shredder residue. Reuse, recycling and recovery options", Solid Waste Manag, Vol. 3, pp. 47–49.
- [4] Roy, C., Chaala, A., 2001, "Vacuum pyrolysis of automobile shredder residues", Resour Conserv Recycl, Vo1. 32, pp. 1–27.
- [5] 권유택, 김수룡, 김영희, 고대영, 심종우, 배성열, 2005, "폐차잔재물의 특성분석 및 시멘트 킬른 적용에 대한 영 예측", 폐기물학회춘계발표.
- [6] Caputo, D.L., 1995, "Automobile shredder residue: options and implications", J. Environ Permits, Vo1. 4, pp. 51–58.
- [7] Oh, S.C., Jin, C.M., Hong, J.H., Kwon, W.T., Kim, S.R., 2007, "The behavior of automobile shredder residue chips in a precalciner for cement manufacturing process", Materials Science Forum, Vo1. 544, pp. 885–888.
- [8] Oh, S.C., Kim, D.W., Yoon, J.Y., Byun, S.J., Kwon, W.T., Kim, S.R., Kim, H.T., 2004, "Numerical analysis of turbulent gas–particle flow and coal combustion in a fluidized–bed calciner", J. Ind. Eng. Chem., Vol. 10, pp. 208–214.
- [9] 오세천, 권유택, 김수룡, 김영희, 홍준희, 진철민, 2007, "자동차 폐차잔재(ASR)의 시멘트제조 열원활용을 위한 연구", 한국신재생에너지학회춘계발표.

오 세 천



1987년 한양대학교 화학공학과 공학사  
 1989년 한양대학교 화학공학과 공학석사  
 1997년 한양대학교 화학공학과 공학박사

현재 공주대학교 환경공학과 부교수  
 (E-mail : ohsec@kongju.ac.kr)

권 우 택



1985년 아주대학교 화학공학과 공학사  
 1987년 한양대학교 화학공학과 공학석사

현재 요업기술원 환경재료팀 책임연구원  
 (E-mail : wtkwon@kicet.re.kr)

김 수 룡



1979년 한양대학교 요업공학과 공학사  
 1981년 서울대학교 요업공학과 공학석사  
 1990년 서울대학교 무기재료공학과 공학박사

현재 요업기술원 세라믹건재본부 환경재료팀장  
 (E-mail : srkim@kicet.re.kr)