

자동차 폐차잔재(ASR)의 시멘트제조 열원활용을 위한 연구

오 세천¹⁾, 권 우택²⁾, 김 수룡³⁾, 김 영희⁴⁾, 홍 준희⁵⁾, 진 철민⁶⁾

A Study on the Application of Automobile Shredder Residue for Heat Source of Cement Manufacturing

Sea Cheon Oh, Woo-Teck Kwon, Soo-Ryong Kim, Yonghee Kim, John Hee Hong, Cheol Min Jin

Key words : Automobile Shredder Residue(폐차잔재), Cement Manufacturing(시멘트제조), Heat Source(열원), Computational Fluid Dynamic(전산유체)

Abstract : 폐차잔재를 시멘트제조공정의 열원으로 활용하기 위해서는 연료로 사용하기 위한 경제성과 더불어 시멘트제조공정 및 품질 그리고 환경기준을 만족해야 한다. 따라서 폐차잔재의 최적투입방법과 폐차잔재의 연소시 염소물질의 거동특성에 대한 연구가 선행되어야만 한다. 본 연구에서는 이러한 폐차잔재의 시멘트 킬른 현장적용에 따른 위험요소와 시행착오를 최소화하기 위하여 최적 연료화 조건에 대한 전산모사 연구를 하였으며 전산모사의 대상공정으로는 폐차잔재가 투입될 Precalciner와 염소제어를 위하여 Bypass unit가 설치될 Precalciner의 하단부 그리고 Cyclone을 선정하여 입자 및 가스상의 거동특성을 고찰하였다. 본 연구로부터 폐차잔재의 투입위치로는 현재의 석탄 투입위치를 활용하는 것이 효과적일 것으로 판단되었으며 Precalciner의 하단부에 대한 가스상 및 입자상의 거동특성을 활용하여 Bypass unit를 설치할 최적의 위치를 선정할 수 있었다. 또한 Cyclone의 입자 거동특성 결과로부터 염소제어를 위한 각 Cyclone의 입자회수율에 대한 정보 및 공정의 개선 가능성을 확인할 수 있었다.

Nomenclature

C_D : drag coefficient
 c_p : heat capacity of particle, J/kg K
 D_p : particle diameter, m
 F_D : drag force, N
 F_x : virtual mass force, N
 g_x : gravitational acceleration, m/s²
 h_{fg} : latent heat of volatiles, J/kg
 h_{pyrol} : pyrolysis heat of volatiles, J/kg
 m_p' : mass flow rate of particle, kg/s
 m_p'' : average mass flow rate of particle, kg/s
 m_{p0} : initial mass flow of particle, kg/s
 p : static pressure, Pa
 T_p : particle temperature, K
 u : gas velocity, m/s
 u_p : particle velocity, m/s
 μ : molecular viscosity, kg/m s

ρ : gas density, kg/m³
 ρ_p : particle density, kg/m³
 τ : stress tensor, kg/m s²

-
- 1) 공주대학교
E-mail : ohsec@kongju.ac.kr
Tel : (041)550-0394 Fax : (041)552-0380
 - 2) 요업기술원
E-mail : wtkwon@kicet.re.kr
Tel : (02)3282-2425 Fax : (02)3282-2430
 - 3) 요업기술원
E-mail : srkim@kicet.re.kr
Tel : (02)3282-2474 Fax : (02)3282-2430
 - 4) 요업기술원
E-mail : yhkim@kicet.re.kr
Tel : (02)3282-2472 Fax : (02)3282-2430
 - 5) 현대자동차
E-mail : johnny@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3050 Fax : (031)899-3333
 - 6) 현대자동차
E-mail : skydome@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3058 Fax : (031)899-3333

1. 서론

자동차 산업은 2만 여개의 부품을 조립하여 완성하는 기술 복합체로서 우리경제의 발전과 성장을 주도하는 견인차 역할을 수행해오고 있다. 산업의 특성상 국가 경제에 미치는 파급효과가 매우 크기 때문에 선진 각국은 자동차 산업의 유치와 발전에 각종지원을 아끼지 않고 있으며, 최근 들어서는 독일을 중심으로 한 유럽연합이 자국의 우수한 환경기술을 앞세워 자동차 시장의 진입을 억제하고 있는 실정으로서 국내 자동차 산업의 지속적인 성장과 대외 경쟁력을 강화하기 위해서는 환경기술에 대한 능동적이고 적극적인 대응이 필요하다. 현재 폐자동차의 금속성분은 자동차 해체공정을 통하여 대부분 회수되어 재활용되고 있다.¹⁾ 그러나 자동차의 총량기준으로 약 20~25%에 이르는 폐차잔재(Automobile Shredder Residue, ASR)는 플라스틱, 고무, 종이 및 섬유류 등 상당량의 유기성분으로 이뤄져 있어 에너지원으로의 활용 가능성이 높음에도 불구하고 폐차잔재에 함유된 염소성분이나 고함량의 회분으로 인하여 소각을 통한 에너지회수는 거의 이뤄지지 못하고 있다. 또한 폐차잔재는 여러 가지의 물질로 복잡한 구성물을 이루고 있어²⁻³⁾ 물질회수가 거의 불가능하며 따라서 대부분 매립에 의하여 처분되고 있다.⁴⁻⁵⁾

시멘트제조 공정의 로터리 킬른은 가연성 폐기물로부터 에너지를 회수하기 위한 적용성이 매우 좋은 것으로 알려져 있으며 현재 일부 가연성 폐기물의 경우 본격적으로 시멘트제조 열원으로 활용되고 있다. 따라서 현재 환경적인 측면에서 뿐만 아니라 에너지회수측면에서 폐차잔재의 시멘트제조 열원활용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁷⁾ 그러나 폐차잔재의 경우 구성성분이 매우 복잡하며 특히 시멘트 제조 공정과 품질에 영향을 주는 염소성분이 다량 함유되어 있어 폐차잔재를 시멘트제조 열원으로 활용하기 위해서는 폐차잔재의 성상에 따른 최적의 투입기술 및 염소성분의 제어 그리고 시멘트제조 열원사용을 위한 폐차잔재의 기준 설정 등 다양한 기술개발이 선행되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 전산유체(Computational Fluid Dynamic, CFD)의 해석방법을 활용하여 폐차잔재의 시멘트제조 열원 활용을 위한 시멘트 제조공정의 최적화 연구를 수행하였다.

2. CFD 모델

본 연구에서는 시멘트제조 공정에 있어서 폐차잔재의 투입대상공정인 Precaliner와 염소제어를 위하여 Bypass unit를 설치할 킬른과 연결된 Precaliner의 하단부 그리고 Bypass unit와 연결된 Cyclone을 대상으로 입자의 거동특성을 고찰하였으며 전산모사 Code로는 시멘트제조 공정의 석탄연소 및 입자거동 특성연구⁸⁾에 효과적으로 활용될 수 있음이 확인된 상용화 CFD code인 Fluent를 이용하였다. 공정에서의 가스상 및 입자상의 거동은 다음과 같은 Force balance로부터 계산된다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

또한 가스상에 대해서는 다음과 같은 Continuity 및 Momentum식을 이용하여 계산된다.

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

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

식(2)와 (3)에서 S_m 는 폐차잔재의 연소반응에 의한 가스상으로 유입질량을 그리고 F 는 입자상과 가스상의 상호작용에 의한 External body force를 각각 나타낸다. 또한 Momentum, Heat 및 Mass에 대한 입자상과 가스상의 상호작용은 다음과 같은 식을 이용하여 계산된다.

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

$$Q = \left[\frac{m_p}{m_{p0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} (-h_{fg} + h_{pyrol} + \int_{T_{ref}}^{T_p} c_{p,i} dT) \right] m_{p0}' \quad (5)$$

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} m_{p0}' \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 폐차잔재 투입 대상공정으로 Precaliner를 선정하여 폐차잔재의 투입거동 특성을 고찰하였으며 투입위치로는 현재의 석탄 투입 위치를 기준으로 4가지의 높이에 따른 서로 다른 가상의 투입위치와 각 투입높이에서 8가지의 수평 방향으로의 투입위치를 선정하였다. 또한 폐차잔재의 투입직경으로는 5가지의 경우를 선정하여 거동특성을 고찰하였으며 이로부터 최적의 투입위치 및 입자크기를 선정하였다. 그림 1에 본 연구에 적용된 폐차잔재의 투입위치를 나타내었다.

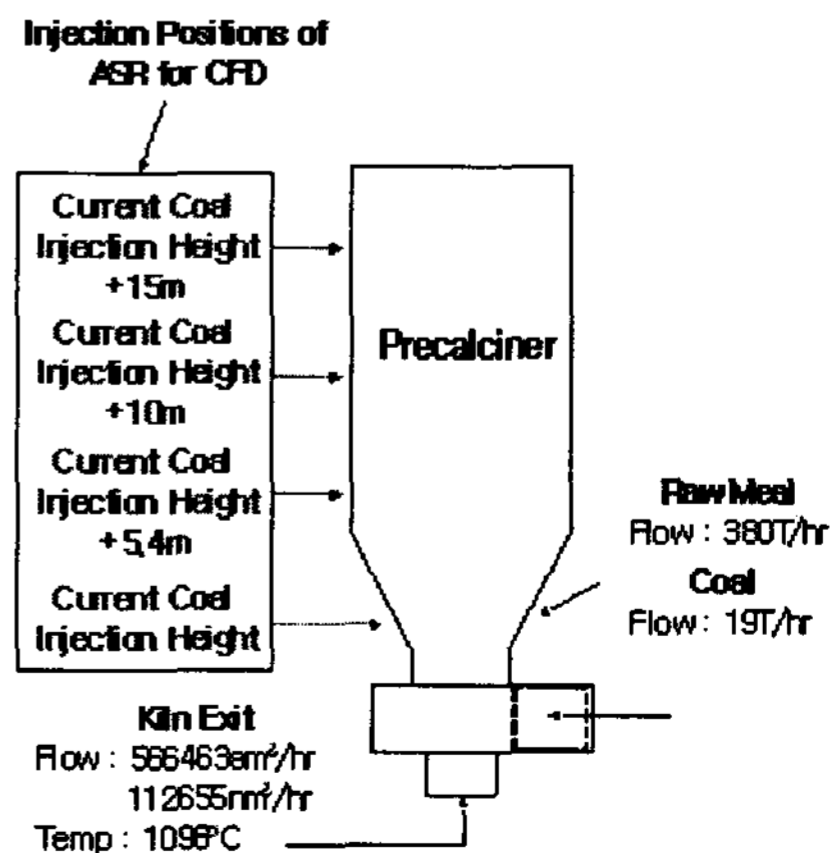


Fig. 1 The precaliner and simulation conditions

본 연구에서는 각 투입조건에 대한 모든 경우의 전산모사결과를 비교하여 Precaliner에서 폐차잔재의 연소에 필요한 가장 최적의 체류시간을 보장하는 경우와 또한 공정의 안정적인 조업을 위하여 폐차잔재의 투입시 공정의 영향을 최소화할 수 있는 경우를 기준으로 최적의 투입조건을 선정하였다. 따라서 그림 1에 나타난 각 투입위치에 따른 전산모사결과로부터 폐차잔재의 투입 위치가 높을수록 체류시간은 약간 증가하였으나 이 경우 미 연소된 폐차잔재가 Precaliner의 상단부를 통하여 배출되는 경우의 수가 증가하여 공정에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 폐차잔재의 투입 위치는 현재의 석탄 투입 높이가 가장 합리적일 것으로 판단되었으며 수평 방향에 따른 폐차잔재의 투입 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 폐차잔재의 투입 직경에 따른 영향은 투입 직경이 작은 경우(5~10cm) 순환거동을 하며 일부 Precaliner 상단부를 통하여 배출되는 것으로 나타났으며 보다 큰 투입 직경(12~15cm)의 경우 대부분 킬른으로 배출되는 현상이 나타났다. 따라서 폐차잔재의 연소시간 확보 측면에서는 투입 직경이 작을수록 유리하였으나 너무 직경이 작을 경우 Precaliner 상단부를 통한 배출로 인하여 공정에 영향을 미칠 수 있으므로 폐차잔재의 투입 직경 선정에 있어서는 신중함을 기해야 할 것으로 판단된다. 그림 2에 현재의 석탄 투입 위치에 대한 7.5 및 12cm 입자 크기의 폐차잔재의 입자 거동 특성 결과를 대표적으로 나타내었다.

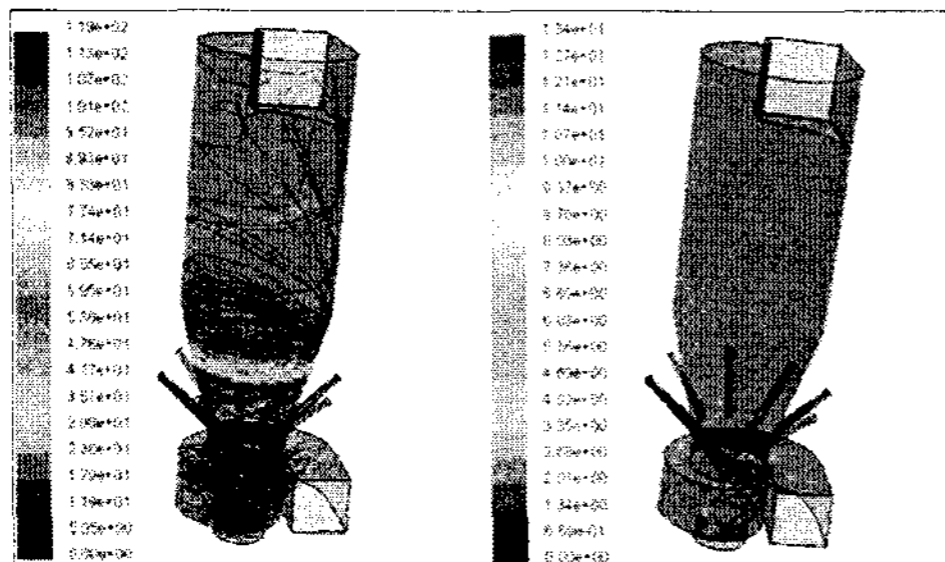


Fig. 2 The trajectory of ASR chips in precalciner for current coal injection height

또한 본 연구에서는 폐차잔재의 투입에 따른 염소성분의 제어를 위하여 설치할 Bypass unit의 최적 위치를 선정하고자 Precaliner 하단부의 단 위장치에 대한 입자 및 가스상의 거동 특성을 분석하였으며 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)로부터 킬른으로부터 유입되는 가스의 속도 벡터를 보면 가스상의 유입면에 비하여 반대면으로의 유속이 강하게 형성됨을 알 수 있으며 따라서 입자상의 유동이 가스상의 흐름에 직접적으로 영향을 받는다는 점을 고려할 경우 장치 내부에서의 입자상의 유동은 킬른 유입면의 반대면에 치우쳐 Precaliner로 유입될 것으로 예측할 수 있으며 이는 그림 3(b)의 입자상의 거동 특성으로부터 또한 확인할 수 있었다. 또한 다른 단면에서의 가스상의 거동 특성으로부터 가스상의 유속이 장치의 양 측면에서 강하게 형성됨을 확인할 수 있었다. 따라서 그림 3에 나타난 지점이

Bypass unit의 최적의 설치 지점일 것으로 판단된다.

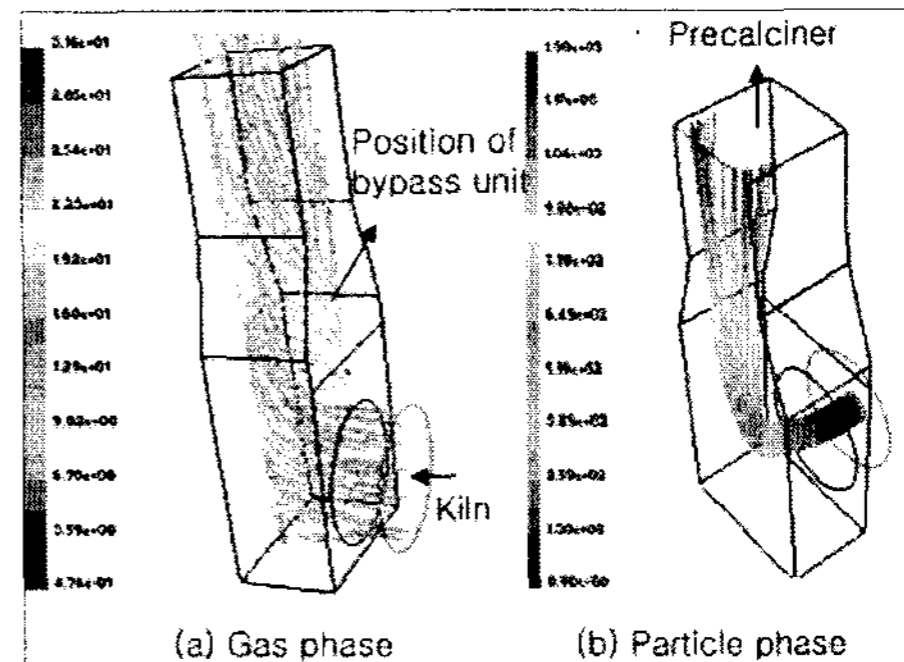


Fig. 3 The fluid dynamic of gas and particle phase in precalciner downstream unit

염소성분의 제어를 위하여 설치될 Bypass unit로부터 유출되는 입자는 Cyclone을 통하여 포집된다. 따라서 본 연구에서는 폐차잔재의 투입으로 인한 Cyclone으로의 유입 속도 변화에 따른 Cyclone에서의 입자의 포집 효율을 전산모사를 통하여 계산하였으며 유입 속도가 3m/sec인 경우의 대표적인 결과를 표 1에 나타내었다. 표 1로부터 Cyclone으로의 유입 속도가 3m/sec인 경우 1단 Cyclone의 하단부를 통하여 유입 입자의 약 42.9%가 포집됨을 확인할 수 있으며 또한 2단 Cyclone의 하단부를 통하여 총 유입 입자의 52.6%가 포집될 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 1. The Behavior of particle in cyclones

Positions	Number	%
1st cyclone bottom	1686	4.5
2nd cyclone up	178	42.9
2nd cyclone bottom	2069	52.6
Total	3933	100

4. 결론

본 연구로부터 폐차잔재의 시멘트제조 열원 활용에 있어서 최적의 투입조건 및 공정의 최적 운전 조건에 대한 정보를 얻을 수 있었으며 Precaliner로의 폐차잔재의 투입에 있어서는 현재의 석탄 투입 위치와 같은 높이에서 폐차잔재를 투입하는 것이 가장 효율적임을 확인할 수 있었다. 또한 너무 작은 크기의 폐차잔재 투입은 연소 효율면에서는 유리할 수 있으나 Precaliner의 상단부를 통하여 유출될 가능성 있어 신중함을 기해야 할 것으로 판단되었다.

염소제어를 위하여 설치할 Bypass unit의 최적의 위치 선정을 위한 가스 및 입자상의 거동 특성에 대한 전산모사의 결과로부터 공정의 변화에 가장 안정적일 수 있는 Bypass unit의 설치 위치를 확인할 수 있었으며 또한 Bypass unit로부터 유출되는 입자의 포집을 위한 Cyclone에서의 입자 거동 특성 결과로부터 Cyclone으로의 유입 속도

가 3m/sec인 경우 총 유입량 기준으로 약 42.9%가 1단 Cyclone의 하단부를 통하여 그리고 52.6%가 2단 Cyclone의 하단부를 통하여 포집될 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 청정생산기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Das, S., Curlee, T.R., Rizey, D.G., Schexnayder, S.M., 1995, "Automobile recycling in the United States: energy impacts and waste generation," *Resour Conserv Recycl*, Vol. 14, pp. 265-284.
- [2] Day, M., Graham, J., Lachmansin호, R., Chen, E., 1993, "Characterization of auto shredder residue-a Canadian perspective," *Resour Conserv Recycl*, Vol. 9, pp. 255-279.
- [3] Lanoir, D., Trouve, G., Delfosse, L., Froelich, D., Kassamaly, A., 1997, "A Physical and chemical characterization of automobile shredder residues," *Waste Manag Res*, Vol. 15, pp. 267-276.
- [4] Day, M., 1997, "Auto shredder residue. Reuse, recycling and recovery options," *Solid Waste Manag*, Vol. 3, pp. 47-49.
- [5] Roy, C., Chala, A., 2001, "Vacuum pyrolysis of automobile shredder residues," *Resour Conserv Recycl*, Vol. 32, pp. 1-27.
- [6] Caputo, D.L., 1995, "Automobile shredder residue: options and implications," *J. Environ Permits*, Vol. 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*, Vol. 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.