

廢鑄物사의 熔融處理에 관한 Computer Simulation

鄭元燮 · 閔東駿* · 金容河**

釜山大學校 金屬工學科, *延世大學校 金屬工學科, **釜慶大學校 化學工學科

Computer Simulation for Smelting Treatment of Waste Casting Sand

Won Sub Chung, Dong Jun Min* and Yong Ha Kim**

Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National University Pusan, Korea

*Dept. of Metallurgical Engineering, Yonsei University Seoul, Korea

**Dept. of Chemical Engineering, National Fisheries University of Pusan, Pusan, Korea

요 약

철강주물 생산량의 증가로 인하여 폐주물사의 발생량도 급격히 증가하고 있다. 1980년에 약 23만톤의 폐주물사 발생이 1993년도에는 약 48만톤으로 증가했다. 폐주물사의 처리는 대부분 매립에 의존하고 있으며 일부 건식법, 습식법 그리고 유동베소로브에 의한 처리가 행해지고 있지만 그 처리량은 미미한 상태이다. 폐주물사의 처리비용이 높아지고 환경규제가 심해지고 있기 때문에 용융에 의한 폐주물사의 처리에 관심을 가져야 한다. 본 연구에서는 국내의 주물생산량 및 폐주물사의 발생현황을 추적해 보고 용융방법의 채택 가능성을 검토하기 위하여 용융공정을 대상으로 물질 및 에너지 수지를 세워 계산하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 폐주물사를 상온에서 용해하는 것보다 큐포라의 배기열등을 이용하여 예열하면 석탄의 원단위가 떨어지는 것을 알 수 있다. 그리고 용융 공정의 경우 에너지 수지측면에서 2차연소율의 향상과 열회수율의 향상 기술이 무엇보다도 중요한 것을 알 수 있었다. 용융공정에서 에너지 절감을 위해서는 연료선택이 중요하며, 특히 휘발분이 낮은 석탄을 사용하는 것이 유리하다.

ABSTRACT

The computer simulation model in various smelting process for melting waste casting sand was developed by using energy and material balance concept. This model can predict the coal, flux and oxygen consumption and the volume and temperature of off-gas. The major critical variables for smelting process can be explained by using the analysis of energy and material balance. The most important variables for smelting process were high post-combustion ratio, high heat transfer efficiency and refractory protection technology. For saving energy in this smelting process, selection of raw materials i.e. coal, flux was important, especially using of low volatile coal was profitable.

1. 서 론

주물제조업은 공작기계, 내연기관, 산업기계, 철도차량, 화공기계장치, 자동차 부품, 선박부품등을 중심으로 하는 기반산업으로 성장을 해왔다. 이러한 발전과 함께 소비되는鑄物砂의 양도 증가하고 있기 때문에 버려지는 폐주물사(新砂, 再生砂를 불문하고 주조공장에서 사용이 끝나 배출되는 주물사를 총칭함)의 양도 증가하고 있다. 폐주물사는

주물제조업의 제품조형 공정에서 사용되고 조형물 탈사과정에서 발생되는 것으로 주요성분은 대부분 SiO_2 로 구성되어 있으며 pH는 약 9~10을 나타낸다. 폐사의 발생량은 각종 주물에서 生型法이 과반수를 점하고 있으며 주철주물의 경우 생산량의 82%가 生型法이며 11%가 有機自硬性法에 의해 생산되고 있기 때문에 폐사의 90%가 이들에 의한 제품생산시 발생되고 있다.

이러한 사용 주물사의 약 60%는 매립처분되고 있지만 환

경규제가 점점 엄격해짐에 따라 처리비용도 높아져서 주물공장의 존속은 주물폐사를 중심으로 한 산업폐기물의 처리에 달려있다고 해도 과언이 아니다.

폐주물사 처리에 대한 문제점은 다음과 같다. 폐주물사처리 비용이 점점 높아지고 있는데 특히 폐CO₂ 주형사 및 폐Furan사의 처리비용이 매우 높게 유지되고 있다. 향후 몇년 이내에 매립지가 고갈되므로 매립 처리는 점차 어렵게 된다. 폐주물사 처리업체의 영세성으로 인하여 매립지 확보, 매립장비의 확보, 관리인원의 부족등으로 불법 투기등의 우려가 있으며 보관기일을 120일 초과할 수 없음에도 불구하고 적기에 처리되지 않을 경우가 있다. 대다수의 주물공장들은 원자재등의 보관으로 여유 공간이 부족하여 폐주물사의 보관공간이 부족하다. 이로 인하여 공장환경이 악화되고 먼지의 비산, 폐주물사에 의한 용출수등으로 주위 환경이 나빠게 된다.

기존의 폐주물사의 재생공정은 기계적인 힘이나 풍력을 이용하여 모래 알갱이에 충격을 가하여 표면을 청정화하는 건식법, 액체의 수류에너지를 이용하여 모래 알갱이의 표면을 세정하는 습식법, 유동베스로 내에서 폐주물사를 유동시키면서 600~900°C로 열을 가하여 유기물을 태워서 제거하고 냉각 후 건식법(Reclaimer)으로 모래입자의 표면에 부착된 이물질 제거하는 유동베소로법 등³⁾이 있다.

그러나, 위에 언급한 방법들은 설치면적 및 설치비용이 높고, 폐수에 의한 이차공해의 우려와 다량의 공업용수가 필요할 뿐아니라 폐주물사의 30~40% 정도만 처리가 가능하여 나머지를 또다른 방법으로 처리 해야하는 문제점이 있다.

이러한 폐주물사 처리의 문제점과 처리 방법의 한계점등을 해결할 수 있는 방법은 모든 폐기물을 하나의 용기내에서 용융하여 처리하는 방법이다.

이 방법을 채택할 경우 1)분리수거를 할 필요가 없으며 2)모든 폐기물을 가장 안전한 용융용상으로 바꾸어 주기 때문에 매립이 안전하고 3)고체에서 액체로 변할시 부피감소가 따르기 때문에 전체의 부피비로 보면 약 50% 이상 감소하고 4)일반 폐주물사 뿐만아니라 폐CO₂ 주형사 및 폐Furan사의 처리도 가능하고 5)폐주물사중 구리,납등의 유해금속을 함유한 특정폐기물의 처리도 가능하다는 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 용융에 따르는 에너지 소모가 크다는 것과 용융시 연소가스에 의한 2차 공해등의 단점을 가지고 있다.

고형 폐기물의 용융처리에 관한 에너지 및 물질수지에 대한 연구는 매우 단순한 가정과 반응계를 가정하거나²⁾, 일반적인 분석에 그치고 있어 현실적인 분석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.⁴⁾

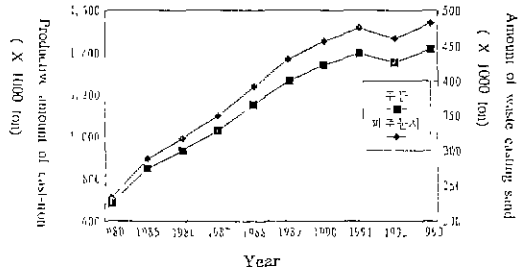


Fig. 1. The production of cast-iron and the estimated amount of waste foundry sand in 1980-1993.

이러한 이유로 본 연구에서는 국내의 주물생산량 및 폐주물사의 발생현황을 살펴보고 용융방법의 채택 가능성을 검토하기 위하여 용융공정을 대상으로 물질 및 에너지 수지를 세워 계산한 결과를 보고한다

2. 국내의 주물생산량 및 폐주물사의 발생현황

1993년 현재 전국의 주물공장은 약 520여개가 있으며 지역별 분포상황은 서울, 인천, 경기지방이 181개업체(전체의 34.7%)로 가장 많고 부산, 경남지방에 145개업체(27.8%)이고 대구, 경북지방에 82개업체(15.7%), 광주, 전남북 지방에 82개업체(15.7%), 대전, 충청 남북도 지방에 29개업체(5.6%) 그리고 강원도 지방에 3개업체(0.6%)로 분포되어 있다.

재질별로 보면 크게 철강주물과 비철주물로 나뉘는데 철강주물공장이 1993년도에 약 71%를 차지하고 비철주물공장이 약 29%를 차지한다. 그리고 전체에 대한 각 재질별 주물생산량은 회주철이 58.7%로 가장 많고, 구상흑연주철이 26.2%, 주강이 8.6%, 비철주물이 3.7% 그리고 가단주철이 2.8%를 차지한다.

Fig. 1은 년도별 철강주물생산량의 변화를 나타내었다. 그림으로 부터 알 수 있듯이 1980년도에 총생산량이 68만톤 정도였으나 급격한 산업의 발전 특히 자동차와 조선산업의 발전으로 인하여 1993년도에는 142만톤으로 증가했다. 이러한 철강주물 생산량의 증가로 인하여 폐주물사의 양도 급격히 증가하고 있다. 현재 폐주물사의 처리는 주로 매립에 의존하고 있는 현실정에서 보면 환경오염의 심각성과 처리비용의 증가로 인하여 주물제품의 단가에 차지하는 비용이 점점 높아지고 있는 실정이다. 그러나 우리나라의 경우는 폐주물사의 발생량이 아직 정확히 파악되어 있지 않고 있다.

Fig 1의 연도별 철강주물의 생산량의 변화와 주물사의 구입량이 주물제품 Ton당 0.34정도가 된다는 보고⁵⁾로 부터

우리나라의 폐주물사의 발생추이를 유추했다. 이 결과를 Fig. 1에 철강주물의 생산량의 변화와 함께 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 1980년에 약 23만톤의 폐주물사가 1993년도에는 약 48만톤으로 증가했다. 폐주물사의 발생 내역은 일반폐기물이 약 98%에 달하는 47만톤이고 구리와 납등을 함유한 특정폐기물이 약 2%에 달하는 일반톤 정도가 된다.

폐주물사는 현행 폐기물관리법상 납, 구리 등 유해물질을 함유한 것은 특정폐기물로 기타 유해물을 함유하지 않은 것은 일반폐기물로 규정하고 그 보관, 처리, 처분방법을 정하여 적정하게 관리하도록 하고 있다.

3. 계산방법

Fig. 2는 본연구에 이용된 전산 모델의 개략도이다. 본 전산 모델은 주어진 조업 및 원료 조건에 대하여 처리되는 폐기물 1톤을 처리하는데 필요한 일반탄과 산소소비량을 계산하였다. 주어진 초기조업 조건에 따른 다중물질 수지관계를 만족하는 조건을 산출한다. 예를들어 반응계에 있어서 SiO₂에 대한 물질수지는 다음과 같이 나타낼수있다.

$$SiO_2(waste\ sand) + SiO_2(coal) = SiO_2(slag) + SiO_2(dust) \quad (1)$$

이와같은 다중물질 수지관계를 타물질에도 적용 만족시킴으로써 폐주물사, 생석회 등의 소요량 및 발생슬라그량을 계산하였다. 반응계에서 연소에 의해 발생하는 배가스의 성분은 수성가스 반응 및 CO-CO₂의 평형관계를 만족시키는 조건을 계산하고 그에 따른 배가스의 열용량과 발생량을 계산하였다. 발생가스의 온도는 가스의 조성, 조업온도, 열전달효율(Heat Transfer Efficient, HTE), 이차연소율(Post Combustion Ratio, PCR) 등의 함수로써 구하였다. HTE와 PCR는 다음과 같이 정의된다.

$$HTE = (Q_{transfer\ to\ bath} / Q_{generated\ by\ PC}) \times 100 \quad (2)$$

$$PCR = (\%H_2O + \%CO_2) / (\%H_2 + \%H_2O + \%CO + \%CO_2) \times 100 \quad (3)$$

Q_{transfer to bath}, Q_{generated by PC}는 발생 또는 용융물로 전달된 열량을, 그리고 PC는 이차연소율 의미한다. 본 연구에서는 연소재의 공급원으로써 산소 또는 공기의 필요량도 동시에 계산하였다. 계산된 가스의 온도(T_g)를 가스평형 농도 계산에 사용된 온도(T_g)와 비교하여 두온도간의 절대차이가 임의의 오차범위보다 작아지도록 계산을 반복한다. 예를들면 가스온도가 2600°C 이상이 되면 열역학적으로 CO₂의 열분해 반응을 고려할 필요가 있으므로 본 계산에서는 본 프로그램과 서브루틴에서 Two Division Iteration Method을 사

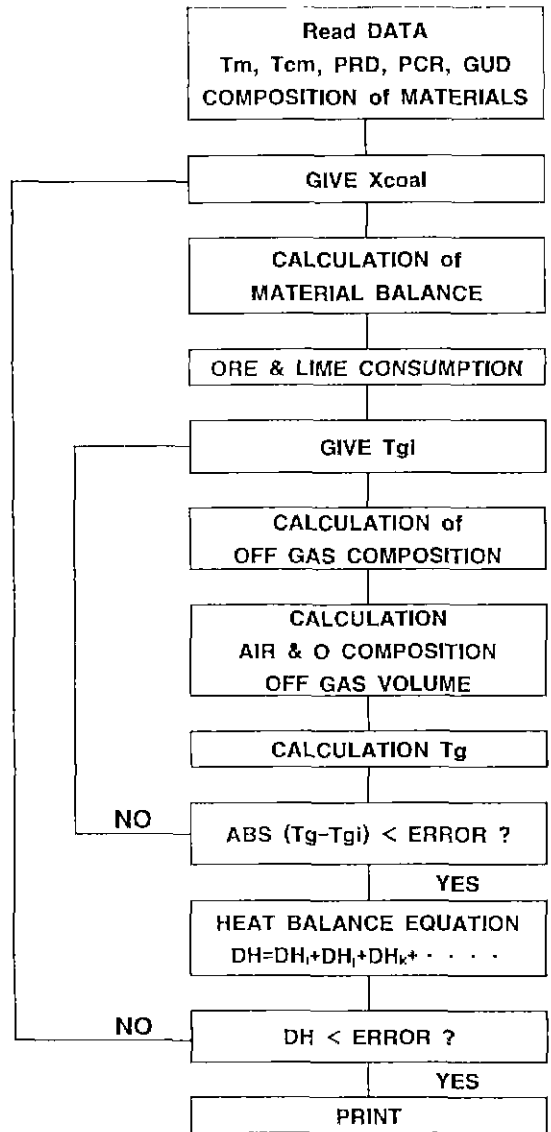


Fig. 2. Flow chart of computer program.

용하였다. 이러한 반응계의 모든 물질수지 및 가스조성을 근거로 하여 반응계에 투입된 에너지 및 사용에너지를 비교하여 검토하였다. 모든 반응물질에 관한 열역학적 자료는 참고문헌³⁾에서 인용하였다. 만일 투입에너지가 소요열량보다 많다면 소요 석탄량은 감소하여 계산을 반복하며 반대의 경우는 소요석탄량을 증가시킴으로써 계산을 진행한다. 이러한 계산은 석탄소모량이 일정한 오차보다 적어질 때까지 반복한다. 본 전산 모델은 단순한 경우의 수계산을 행하여 검증하였다.

Table 1. Compositions and calorific values of coals used in computer simulation

wt%	Ash	C	H	N	O	S	$\Delta H(\text{kcal/kg})$
Coal A	6.4	84.7	4.2	0.9	3.0	0.8	8090
Coal B	6.0	79.5	5.2	1.5	6.5	1.3	7920
Coal C	4.9	73.9	5.0	1.5	14	0.5	7512

Table 2. Ash compositions of coals used in computer simulation

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
A and B	55	32	1	1	6
C	40	30	20	5	4

지금까지 보고된 제철소 슬러지에 대한 시험조업과⁷⁾ 비교한 결과 가스발생량, 가스조성, 온도 등이 $\pm 2\%$ 정도의 오차를 나타내고 있으므로 폐주물사의 용융에 본 전산모델의 적용이 가능하다고 생각된다.

본연구에서의 변수는 1)석탄의 종류, 2)이차연소율(Post-combustion ratio), 3)열전달효율(Heat transfer efficiency), 4) 폐주물사 및 부원료의 예열온도, 5)CaO에 CaCO₃의 첨가비율($R_{CaCO_3} = \text{CaCO}_3 \text{wt}\% / (\text{CaCO}_3 \text{wt}\% + \text{CaOwt}\%)$), 6)열방산(Heat loss) 등이다.

주요 에너지원인 석탄의 종류에 따라 열량 및 휘발성분이 다르므로 본 연구에서는 Table 1에 나타난 것과 같이 Metallurgical coal(이하 Coal A로 약칭), High volatile coal(이하 Coal B로 약칭), 미국산의 Western coal(이하 Coal C로 약칭)등의 대표적인 일반탄을 선택하여 조사하였다.

4. 계산결과 및 고찰

Fig 3에 폐주물사 및 부원료를 예열하지 않고 열전달 효율을 95% 그리고 염기도를 0.5로 두었을 때의 석탄종류와 이차연소율의 변화에 따른 석탄의 소요량을 나타낸 것이다. Fig 4에는 석탄 A, 열전달 효율을 95% 그리고 염기도를 0.5 그리고 CaO와 CaCO₃ 비가 1 : 1이었을 경우의 이차연소율의 변화에 따른 석탄과 산소의 소요량을 나타낸 것이다. 그럼으로 부터 알 수 있듯이 고정탄소비가 높은 Coal A의 경우가 석탄소요량이 가장 적고 회분의 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 석탄의 종류에 관계없이 이차연소율이 증가함에 따라 석탄소요량은 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 이차연소

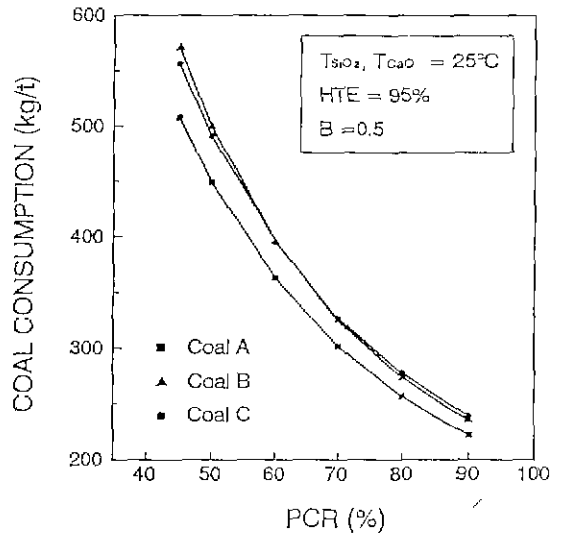


Fig. 3. Coal consumption as a function of post combustion ratio (PCR).

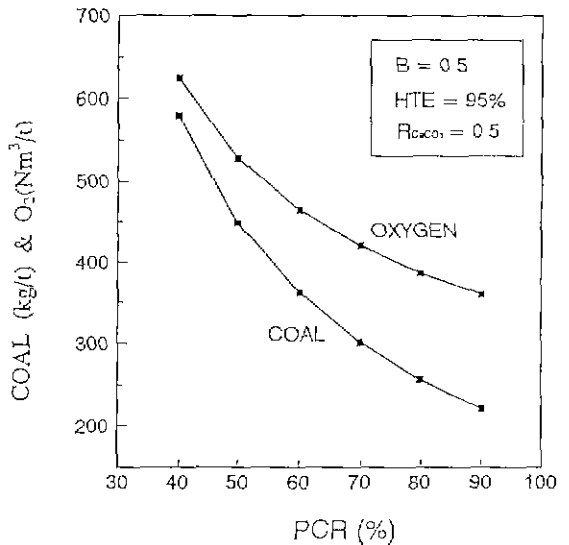


Fig. 4 Coal and oxygen consumptions as a function of post combustion ratio (PCR).

율이 증가하면 불완전 연소인 경우보다 발열량이 약 3배 정도로 높기⁹⁾ 때문이다. 높은 이차연소율의 확보는 단순히 석탄소모량을 감소시킬 뿐만아니라 조업비용에 중요한 비율을 차지하는 부원료인 CaO 및 산소의 소모량도 동시에 감소시킴으로써 전체 연료비를 낮출수 있다는 점에서 중요하다. 그러나 실제 상황에서는 이차연소율을 70% 이상 올리는 것은 불가능하다고 보고되어 있다⁹⁾. 따라서 본연구에서는 이차연

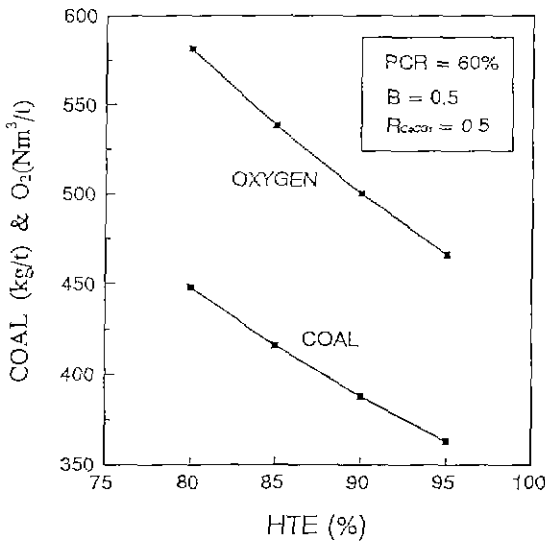


Fig. 5. Coal and oxygen consumptions as a function of heat transfer efficiency (HTE).

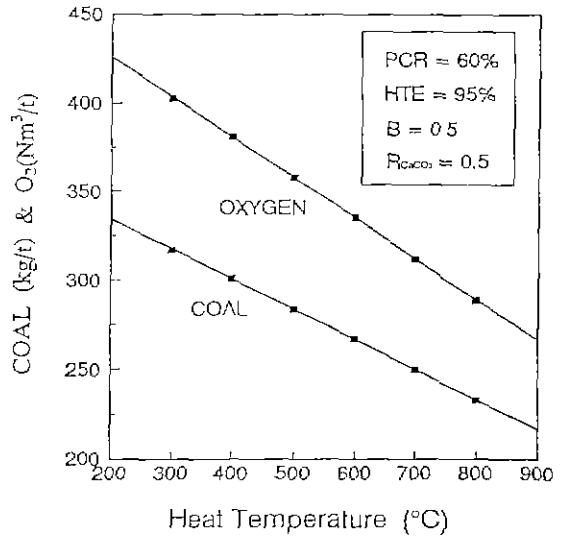


Fig. 6. Coal and oxygen consumptions as a function of SiO₂ and CaO heating temperature.

소율을 60%로 상정하여 에너지수지를 구했다

Fig. 5에 이차연소를 60%, 염기도 0.5 그리고 열전달 효율에 따른 CaO와 CaCO₃ 비가 1 : 1 이었을 경우의 열전달 효율 변화에 따른 석탄 및 산소소모량을 나타내고 있다. 열전달 효율이 증가함에 따라 석탄 및 산소소모량 모두 감소함을 알 수 있다. 열전달 효율이 80%에서 90%로 증가함에 따라 석탄 약 75 Kg/ton 절감과 산소 약 75 Nm³/ton 정도 절감을 알 수 있다. 이것은 이차연소에 의해서 확보된 열을 용융물내로 전달시키는 기술이 확보되어야 함을 알려준다.

Fig. 6에 이차연소를 60%, 염기도 0.5, 열전달효율 95% 그리고 열전달 효율에 따른 CaO와 CaCO₃ 비가 1 : 1인 경우의 석탄 및 부원료의 예열에 따른 석탄 및 산소소모량을 나타내고 있다. 석탄 및 부원료의 예열온도가 높아질수록 석탄 및 산소소모량이 감소함을 알 수 있다. 예열온도가 300°C에서 800°C로 예열됨에 따라 석탄 약 40 kg/ton 정도 절감과 산소 약 100 Nm³/ton 정도 절감할수 있음을 알 수 있다 이것은 주물공장 옆에 폐주물사의 처리장치를 설치하여 주물공장의 폐열을 이용하면 에너지를 절약할 수 있다는 것을 나타내주고 있다

Fig. 7에 이차연소를 60%, 염기도 0.5, 열전달효율 95% 일 경우, CaO에 CaCO₃ 첨가비에 따른 석탄 및 산소소모량을 나타내고 있다. CaO에 CaCO₃의 첨가비가 증가함에 따라 석탄 및 산소소모량이 증가하는데 이것은 부원료로써 CaO를 사용하는 것이 CaCO₃ 보다 에너지적으로 유리하다는 것을 보여준다. 이는 CaCO₃의 열분해 반응(4식)에 수반

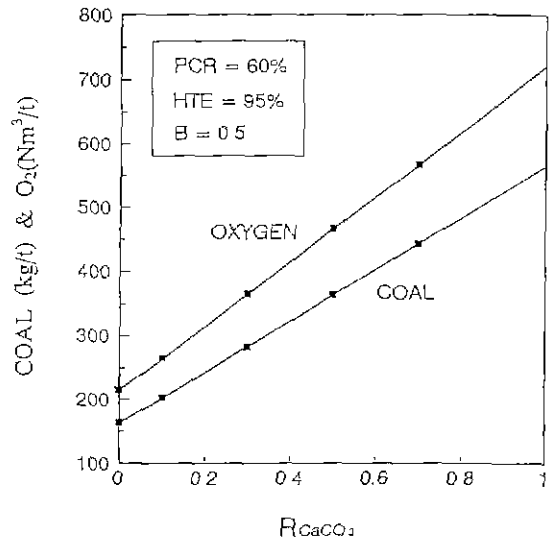


Fig. 7. Coal and oxygen consumptions as a function of CaCO₃ addition ratio to CaO (R_{CaCO₃}).

한 에너지 소요 증가에 기인하기 때문이다.⁹⁾

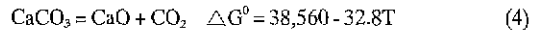


Fig. 8은 이차연소를 60%, 염기도 0.5, 열전달효율 95% 그리고 CaO와 CaCO₃ 비가 1 : 1인 경우의 열손실(배가스에 의한 손실 및 노체로 부터의 방산열) 변화에 따른 석탄 및 산소소모량을 나타내고 있다. 열손실이 많을수록 석탄

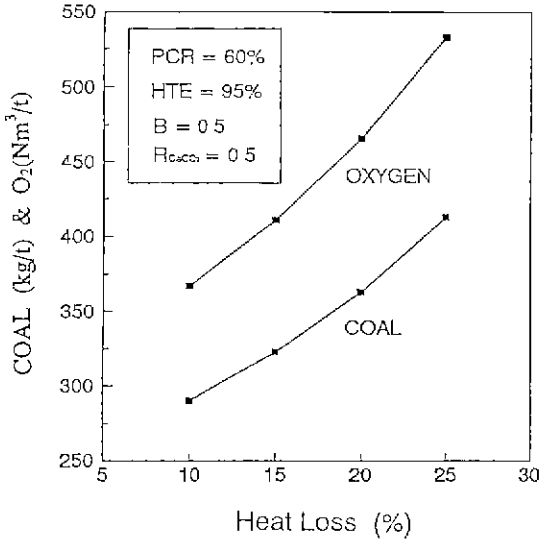


Fig. 8. Coal and oxygen consumptions as a function of heat loss (%).

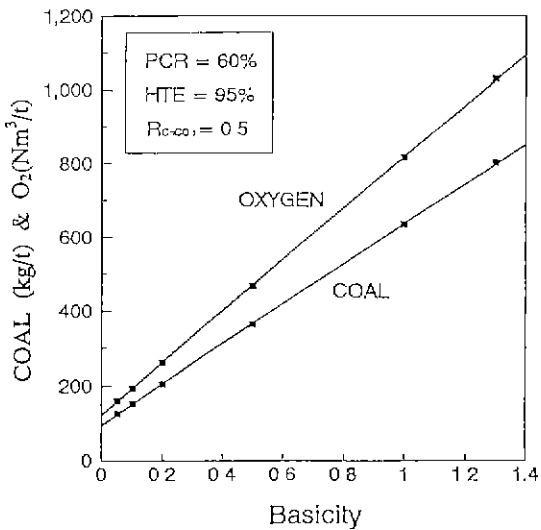


Fig. 9. Coal and oxygen consumptions as a function of basicity.

및 산소소모량이 증가하고 있다.

열손실율이 20%에서 10%로 감소함에 따라 석탄 약 120 kg/ton 정도 절감과 산소 약 170 Nm³/ton 정도 절감할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 열손실에 의한 에너지를 감소시키기 위해서는 가능한 가스발생량을 줄이고 적절한 내화물 선택을 통하여 노체로 부터의 방산되는 열을 줄여야 할 것이다.

Fig 9는 이차연소율 60%, 열전달효율 95% 그리고 CaO와

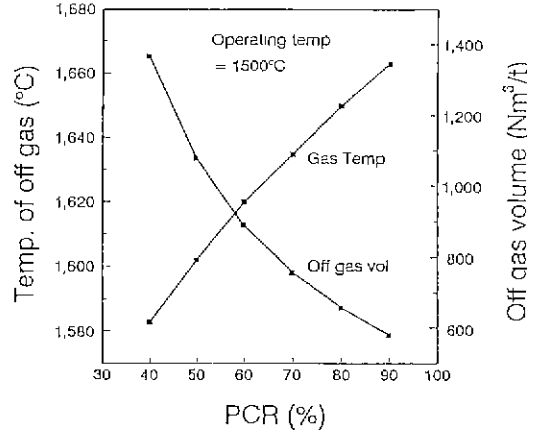


Fig. 10. Temperature and volume of off-gas as a function of post combustion ratio (PCR).

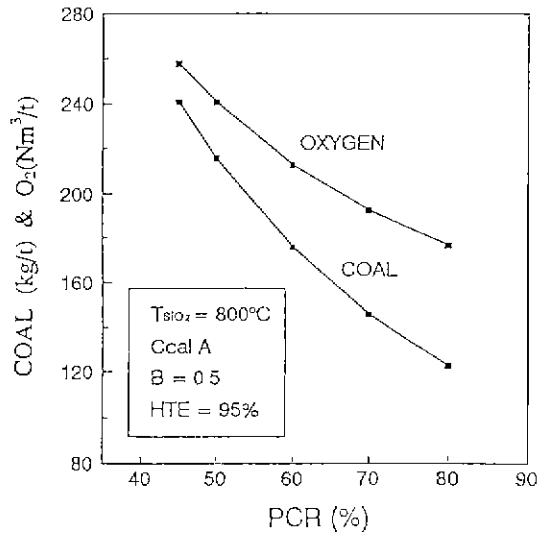


Fig. 11. Amount of coal and oxygen required at optimum condition with 1 : 1 CaO and CaCO₃ ratio

CaCO₃ 비가 1 : 1이었을 경우의 염기도 변화에 따른 석탄 및 산소소모량을 나타내고 있다. 염기도가 작을수록 즉 CaO 첨가량이 작을수록 석탄 및 산소소모량은 감소하지만, 극단적으로 작았을 때는 용점이 높아져서 조업이 불가능해진다. 적정 염기도 변화는 0.5에서 1.3정도로 보고되어 있다.⁷⁾

Fig. 10은 조업온도가 1500°C로 가정할 경우 이차연소율의 변화에 따른 배가스의 체적과 배가스의 온도를 나타내고 있다 그림으로 부터 이차연소율이 60%에 달하면 배가스의 온도가 약 1650°C로 증가하고 배가스의 양도 1000 Nm³/ton 정도로 나타나고 있음을 알 수 있다. 배가스의 온

도를 낮추기 위해서는 이차연소율을 낮추면 되는데 이렇게 할 경우 석탄의 소비량이 증가하게 된다. 고온 배가스의 냉각방법의 하나로 공기-산소 혼합, 예열하여 공급하면 석탄 소모량의 큰 증가없이 배가스의 온도를 낮출수 있다.⁹⁾

Fig. 11은 본용융 공정에 의한 폐주물사의 물질 및 에너지 수지에 관한 전산모델을 수립하여 검토한 결과 가장 적절한 조건을 나타낸 것이다. 폐주물사의 예열온도는 800°C, 석탄의 종류는 Coal A, 염기도 0.5, 열전달 효율 95% 그리고 CaO 와 CaCO₃ 비가 1 : 1이고 이차연소율이 60%였을 경우 약 180 kg/ton 정도의 석탄과 약 220 Nm³/ton 정도의 산소가 필요함을 알 수 있다. 그러나 CaCO₃ 100% 이차연소율 45%에서는 약 430 kg/ton 정도의 석탄과 약 4600 Nm³/ton 정도의 산소가 필요함을 알 수 있다.

5. 결 론

용융공정에 의한 폐주물사의 물질 및 에너지 수지에 관한 전산모델을 수립하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용융공정에 의한 폐주물사의 처리시 석탄은 폐주물사 톤당 약 0.3톤, 산소는 약 0.3 Nm³ 그리고 석회석은 약 0.5톤이 가장 적절한 값이다.
- 2) 폐주물사를 상온에서 용해하는 것보다 큐포라의 배기 열등을 이용하여 예열하면 석탄의 원단위가 떨어지는 것을 알 수 있다. 그리고 용융공정의 경우 에너지 수지측면으로부터 2차연소율의 향상과 열회수율의 향상 기술이 무엇보

다도 중요한 것을 알 수 있다.

- 3) 용융공정에서 에너지 절감을 위해서는 연료선택이 중요하며, 특히 휘발분이 낮은 석탄을 사용하는 것이 유리하다.
- 4) 폐주물사의 처리비용이 높아지고 환경규제가 심해지고 있기 때문에 용융에 의한 폐주물사의 처리에 관심을 가져야 한다.

참고문헌

1. 青木 正 : JACT NEWS 2 21 (1993)
2. F. Oester and A. Saatic : Process Technology Proceedings of ISS, 6 1021 (1987).
3. F. Oester and A. Saatic : Sthahl and Eisen Report, Mass and Heat Balances, Stahlleisen mbH, Dusseldorf (1987)
4. M. Tokuda Shengyang International Symposium on Smelting Reduction, Chinese Society of Metals, Sept. 22 (1986)
5. O. Kubaschewski and C. B. Alcock : Metallurgical Thermochemistry, 5th Ed, Pergamon Press. (1979).
6. D. Vensel, H. Henein and P. H. Dauby : Transactions of the ISS 45 (1987).
7. 박현서, 이환노, 변창수, 허남석, 반봉찬 : 제7회금속제련 학술회의 1 (1994).
8. 민동준, 주상훈, 정원섭, 김태도, 이일옥 : 대한금속학회지, 30-10 1185 (1992)
9. 趙在撰, 李相和, 崔昌鉦 : 자원리싸이클링학회지, 제 2권 1호 11 (1993).