

.....  
論 文  
.....

# 폐주물사의 용융공정에서의 물질 및 에너지 수지의 해석

정원섭, 민동준\*, 윤수종\*\*

## Analysis of Energy and Material Balance in Smelting Process of Waste Sand

Won-Sub Chung, Dong-Jun Min\* and Su-Jong Yoon\*\*

### Abstract

A computer simulation model of various smelting process for melting waste 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 major conclusions were as follows;

1. The most important variables for smelting process were high post-combustion ratio, high heat transfer efficiency and refractory protection technology.
2. For saving energy in this smelting process, selection of raw materials i.e coal, flux are very important, espacially using of low volatile coal is very profitable.
3. The treatment cost of waste sand is high and environmental restriction is severe, in this reason we must be concerned in the treatment of waste sand by smelting process.

(Received July 10, 1995)

### 1. 서 론

주물제조업은 자동차, 전기, 산업기계를 중심으로 하는 기반산업으로 성장을 해왔다. 이러한 발전과 함께 소비되는 주물사의 양도 증가하고 있기 때문에 버려지는 폐주물사(新砂, 再生砂를 불문하고 주조공장에서 배출되는 사용이 끝난 주물사를 총칭함)의 양도 증가하고 있다. 일반적으로 주물사의 구입량은 선철주물제품 톤당 0.33톤 정도가 된다고 보고하고 있는데[1] 우리나라의 경우는 아직 정확한 파악이 되어 있지 않지만 대략 연간 약 70-100만톤에 달하고 있다고 추정하고 있다. 이러한 사용 주물사의 약 60%는 매립처분

되고 있지만 환경규제가 점점 엄격해짐에 따라 처리비용도 높아져서 주물공장의 존속은 주물폐사를 중심으로 한 산업폐기물의 처리에 걸려있다고 해도 과언이 아니다.

폐주물사 처리에 대한 문제점은 다음과 같다. 폐주물사처리 비용이 점점 높아지고 있는데 특히 폐CO<sub>2</sub>, 주형사 및 폐Furan사의 처리비용이 매우 높게 유지되고 있다. 향후 몇년 이내에 매립지가 고갈되므로 매립 처리 방법은 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

부산대학교 공과대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National Univesity, Pusan, Korea)  
\*연세대학교 공과대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Yonsei Univesity, Seoul, Korea)  
\*\*밀양산업대학교 이공학부 재료공학과(Dept. of Materials Science & Engineering, Miryang Univesity, Miryang, Korea)

않을 경우가 있다.

대다수의 주물공장들은 원자재등의 보관으로 인하여 여유 공간이 부족하여 폐주물사의 보관공간이 부족하다. 이로 인하여 공장환경이 악화되고 먼지의 비산, 폐주물사에 의한 용출수등으로 주위 환경이 나쁘게 된다. 분리수거가 우선 되어야 하는데 현실적으로 많은 어려움이 있다.

기존의 폐주물사의 재생공정은 기계적인 힘이나 풍력을 이용하여 모래 알갱이에 충격을 가하여 표면을 청정화하는 건식법, 액체의 수류에너지를 이용하여 모래 알갱이의 표면을 세정하는 습식법, 유동배소로 내에서 폐주물사를 유동시키면서 600-900℃로 열을 가하여 유기물을 태워서 제거하고 냉각 후 건식법(Reclaimer)으로 모래입자의 표면에 부착된 이물질질을 제거하는 유동배소로법 등이 있다.

하지만 이러한 방법들은 설치면적 및 설치비용이 높고, 폐수에 의한 이차공해의 우려와 다량의 공업용수가 필요할 뿐아니라 폐주물사의 30-40% 정도만 처리가 가능하여 나머지 처리를 해야 하는 문제점이 있다.

이러한 폐주물사 처리의 문제점과 처리 방법의 한계점등을 해결할 수 있는 유일한 방법은 모든 폐기물을 하나의 용기내에서 녹이는 것이다.

이 방법을 채택할 경우 1)분리수거를 할 필요가 없으며 2)모든 폐기물을 가장 안정한 상으로 바꾸어 주기 때문에 매립이 안전하고 3)고체에서 액체로 변할시 부피감소가 다르기 때문에 전체의 부피비로 보면 약 50% 이상 감소하고 4)일반 폐주물사 뿐만아니라 폐CO<sub>2</sub> 주형사 및 폐Furan사의 처리도 가능하고 5)폐주물사중 구리, 납등의 유해금속을 함유한 특정폐기물의 처리도 가능하다는 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 용융에 따르는 에너지가 많이 든다는 것과 용융시 연소가스에 의한 2차 공해등의 단점을 가지고 있다.

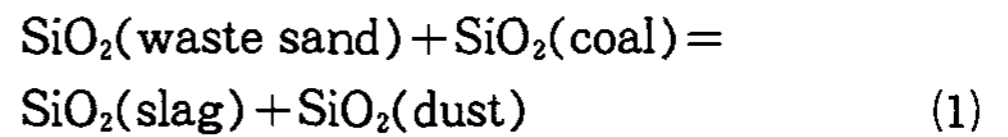
이에 대한 기존 연구는 수가 적고, 매우 단순한 가정과 반응계를 가정하거나[2,3], 일반적인 분석에 그치고 있어 현실적인 분석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다[4].

이러한 이유로 본 연구에서는 용융방법의 채택가능성을 타진하기 위하여 용융공정을 대상으로 물질 및 에너지 수지를 세워 계산한 결과를 보고

한다.

### 2. 계산방법

Fig. 1은 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 SiO<sub>2</sub>에 대한 물질수지는 다음과 같이 나타낼수있다.



이와같은 다중물질 수지관계를 타물질에도 적용 만족시킴으로써 폐주물사,생석회등의 소요량 및 발생슬라그량을 계산하였다. 반응계에서 연소에 의해 발생하는 배가스의 성분은 수성가스 반응 및 CO-CO<sub>2</sub>의 평형관계를 만족시키는 조건을 계산하고 그에 따른 배가스의 열용량과 발생량을 계산하였다. 발생가스의 온도는 가스의 조성,조업온도,열전달효율(Heat Transfer Efficiency, HTE), 이차연소율(Post Combustion Ratio, PCR)등의 함수로써 구하였다. HTE와 PCR는 다음과 같이 정의된다.

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

$$\text{PCR} = (\% \text{H}_2\text{O} + \% \text{CO}_2) / (\% \text{H}_2 + \% \text{H}_2\text{O} + \% \text{CO} + \% \text{CO}_2) \times 100 \tag{3}$$

이때 Qi는 발생 또는 용융물로 전달된 열량을 의미한다.본 연구에서는 연소제의 공급원으로써 산소 또는 공기의 소요도 동시에 계산하였다. 계산된 가스의 온도(Tg)를 가스평형 농도 계산에 사용된 온도(Tg°)와 비교하여 두온도간의 절대차이가 임의의 오차범위보다 작아지도록 계산을 반복한다. 예를들면 가스온도가 2600℃ 이상이 되면 열역학적으로 CO<sub>2</sub>의 열분해 반응을 고려할 필요가 있으므로 본 계산에서는 본 프로그램과 서브루틴에서 Two Division Iteration Method을 사용하였다. 이러한 반응계의 모든 물질수지 및 가스조성을 근거로 하여 반응계에 투입된 에너지 및 사용에너지를 비교하여 검토하였다. 모든 반

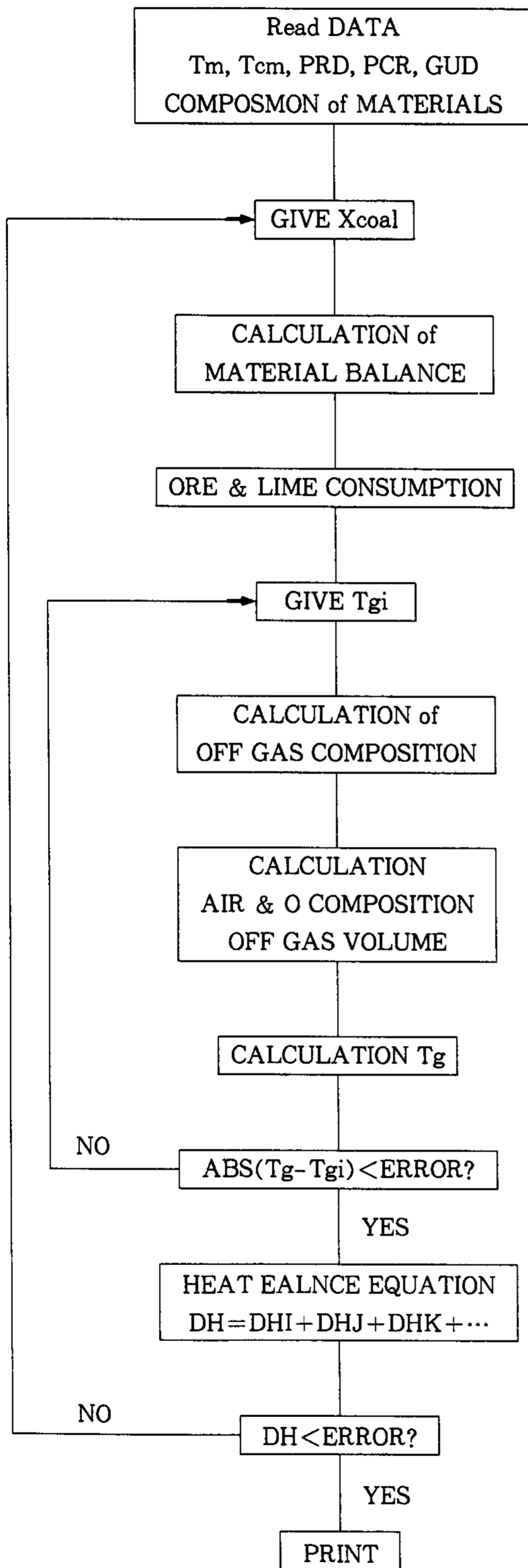


Fig. 1. Flow chart of computer program.

응물질에 관한 열역학적 자료는 참고문헌[5]에서 인용하였다. 만약 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. 지금까지 보고된 제철소 슬러지에 대한 시험 조업 결과[7]와 비교한 결과 가스발생량, 가스 조성, 온도 등이  $\pm 2\%$  정도의 오차를 나타내고 있으므로 본 전산모델의 폐주물사의 용융에 적용이 가능하다고 생각된다.

본 연구에서의 변수는 1) 석탄의 종류, 2) 이차연소율(Post-combustion ratio), 3) 열전달효율(Heat transfer efficiency), 4) 폐주물사 및 부원료의 예열온도, 5) CaO에 CaCO<sub>3</sub>의 첨가비율, 6) 열방산(Heat loss(%)) 등이다.

### 3. 장입원료의 선택

주요 에너지원인 석탄의 종류에 따라 연소열 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. 2에 폐주물사 및 부원료를 예열하지 않고 열전달 효율을 95% 그리고 염기도를 0.5로 두었을 때의 석탄종류와 이차연소율의 변화에 따른 석탄의 소요량을 나타낸 것이다. 그림으로 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. 이것은 이차연소율이 증가하면 불완전 연소인 경우보다 발열량이 약 3배 정도로 높기[5] 때문이다. 높은 이차연소율의 확보는 단순히 석탄소모량을 감소시킬 뿐만 아니라 조업 비용에 중요한 비율을 차지하는 부원료인 CaO

Table 1. Composition and heats of combustion of coal used in simulation.

wt%	Ash	C	H	N	O	S	$\Delta H(kcal/kg)$
Coal A	6.4	84.7	4.2	0.9	3.0	0.8	8090
Coal B	5.95	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

Ash Composition(wt%)

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

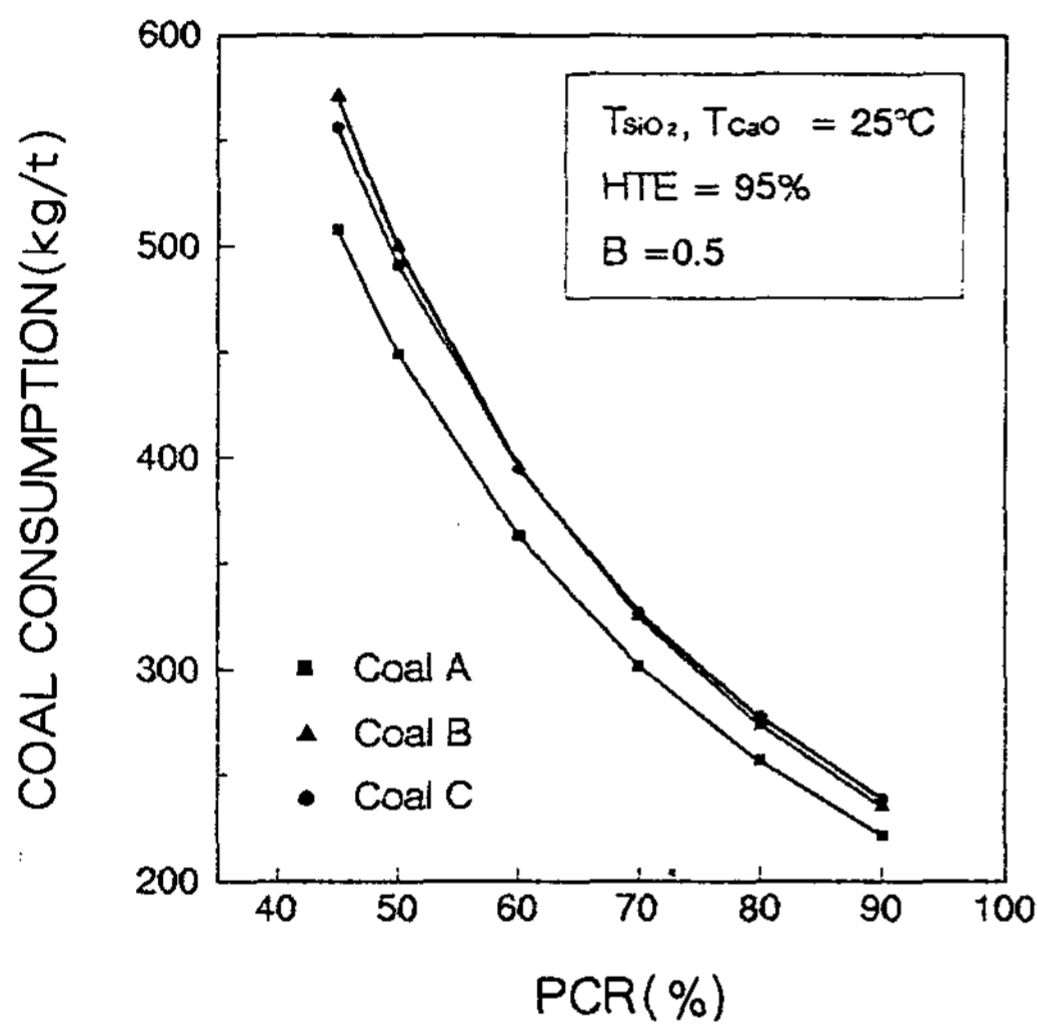


Fig. 2. Coal consumption as a function of PCR.

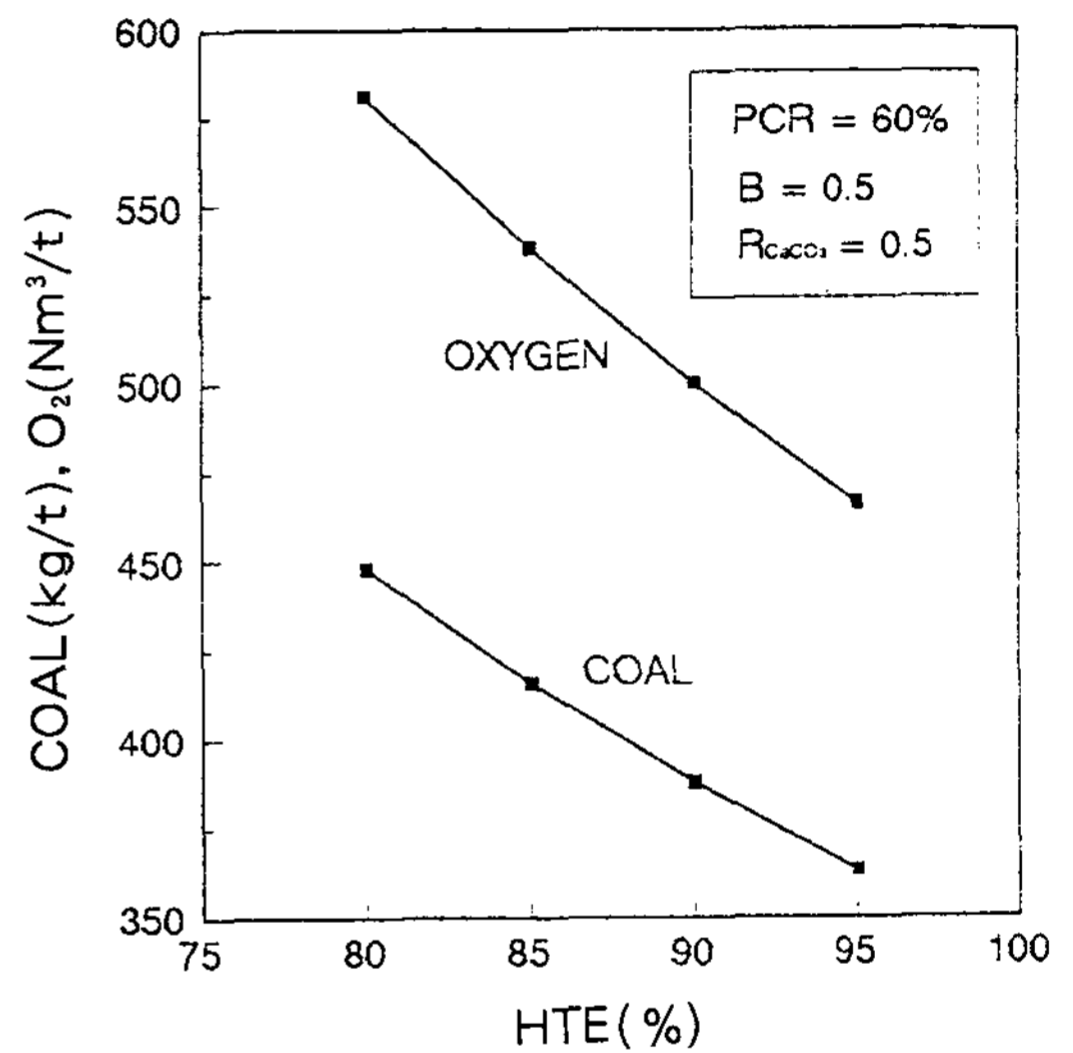


Fig. 3. Coal and oxygen consumption as a function of HTE.

및 산소의 소모량도 동시에 감소시킴으로써 전체 연료비를 낮출수 있다는 점에서 중요하다. 그러나 실제 상황에서는 이차연소율을 70% 이상 올리는 것은 불가능하다고 보고되어[6] 있다. 따라서 본연구에서는 이차연소율을 60%로 상정하여 에너지수지를 구했다.

Fig. 3에 이차연소율 60%, 열기도 0.5 그리고 열전달 효율에 따른 CaO와 CaCO<sub>3</sub> 비가 1:1이었을 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 약 75kg/ton 정도의 석탄의 절감과 약 75Nm<sup>3</sup>/ton 정도의 산소를 절감함을 알 수 있다. 이것은 이차연소에 의해서 확보된 열을 용융물내로 전달시키는 기술이 확보되어야 함을 알

려준다.

Fig. 4에 이차연소율 60%, 열기도 0.5, 열전달효율 95% 그리고 열전달 효율에 따른 CaO와 CaCO<sub>3</sub> 비가 1:1이었을 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 약 40kg/ton 정도의 석탄의 절감과 약 100Nm<sup>3</sup>/ton 정도의 산소를 절감할수 있음을 알 수 있다. 이것은 주물공장 옆에 폐주물사의 처리장치를 설치하여 주물공장의 폐열을 이용하면 에너지를 절약할 수 있다는 것을 나타내어 주고 있다.

CaO에 CaCO<sub>3</sub>의 첨가비가 증가함에 따라 석탄

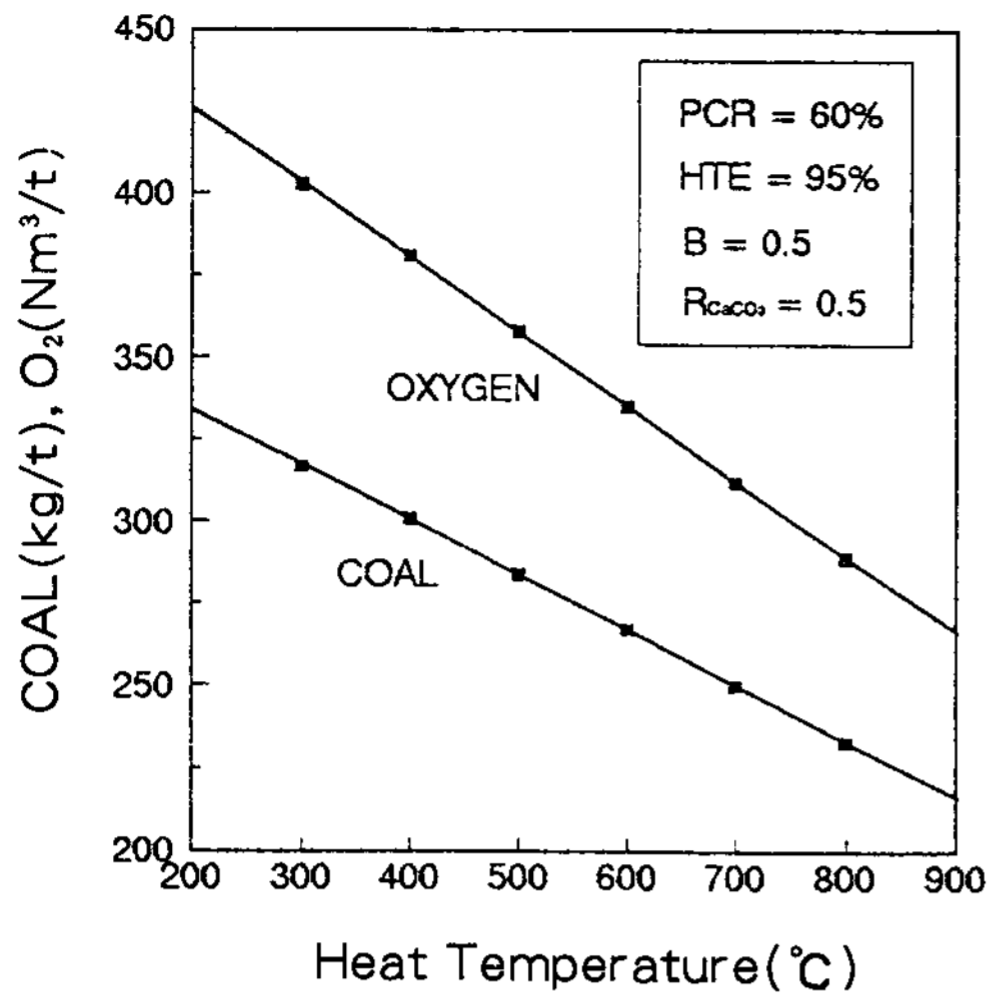


Fig. 4. Coal and oxygen consumption as a function of SiO<sub>2</sub> and CaO heating temperature.

및 산소소모량이 증가하는데 이것은 부원료로써 CaO를 사용하는 것이 CaCO<sub>3</sub> 보다 에너지적으로 유리하다는 것을 보여준다. 이는 CaCO<sub>3</sub>의 열분해 반응(4식)에 수반한 에너지 소요 증가에 기인하기 때문이다[5].

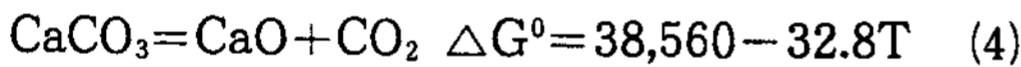


Fig. 5는 이차연소율 60%, 염기도 0.5, 열전달효율 95% 그리고 CaO와 CaCO<sub>3</sub> 비가 1:1이 있을 경우의 열손실(배가스에 의한 손실 및 노체로부터의 방산열) 변화에 따른 석탄 및 산소소모량을 나타내고 있다. 열손실이 많을수록 석탄 및 산소소모량이 증가하고 있다.

열손실이 20%에서 10%로 감소함에 따라 약 120kg/ton 정도의 석탄의 절감과 약 170Nm<sup>3</sup>/ton 정도의 산소를 절감할수 있음을 알 수 있다. 따라서 열손실에 의한 에너지를 감소시키기 위해서는 가능한 발생가스량을 줄이고 적절한 내화물 선택을 통하여 노체로부터의 방산되는 열을 줄여야 할 것이다.

Fig. 6은 조업온도를 1500°C로 가정할 경우 이차연소율의 변화에 따른 배가스의 체적과 배가스의 온도를 나타내고 있다. 그림으로부터 이차연소율이 60%에 달하면 배가스의 온도가 약 1650°C로 증가하고 배가스의 양도 1000Nm<sup>3</sup>/ton 정도로 나타나고 있음을 알 수 있다. 배가스의

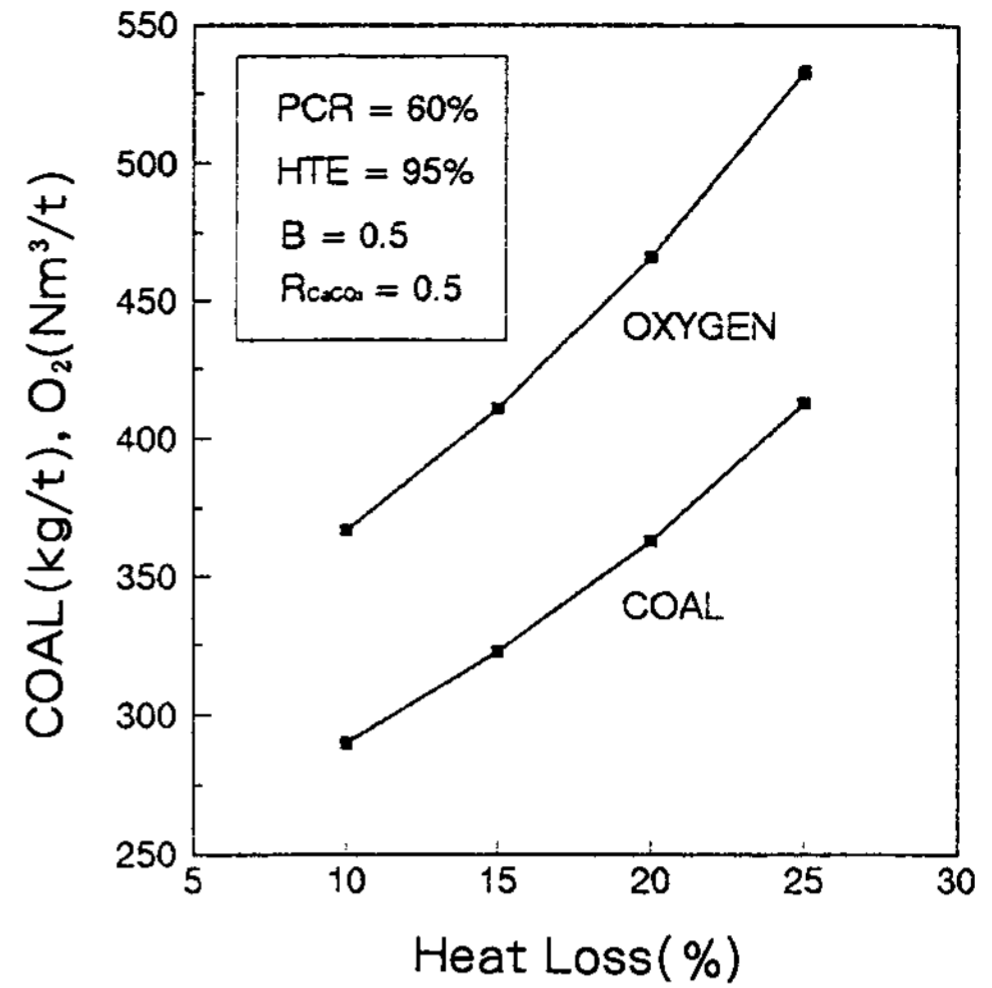


Fig. 5. Coal and oxygen consumption as a function of heat loss(%).

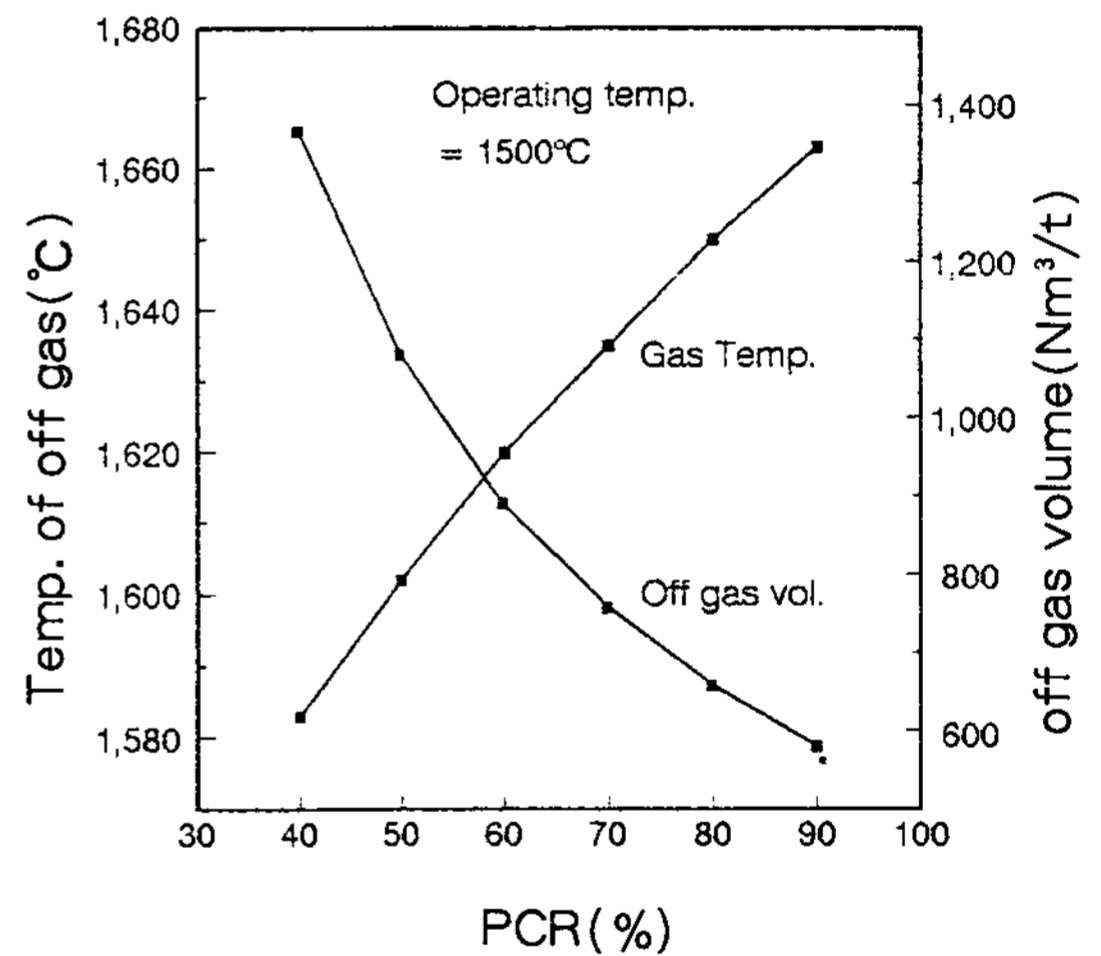


Fig. 6. Temperature and volume of off gas as a function of PCR(%).

온도를 낮추기 위해서는 이차연소율을 낮추면 되는데 이렇게 할 경우 석탄의 소비량이 증가하게 된다. 고온 배가스의 냉각방법의 하나로 공기-산소 혼합, 예열하여 공급하면 석탄소모량의 큰 증가없이 배가스의 온도를 낮출수 있다[8].

본 전산모델에 의한 폐주물사의 물질 및 에너지 수지에 관한 이상의 결과로부터 가장 적절한 조건은 다음과 같다. 폐주물사의 예열온도는 800°C, 석탄의 종류는 Coal A, 염기도 0.5, 열전달 효율 95% 그리고 CaO와 CaCO<sub>3</sub> 비가 1:1

이고 이차연소율이 60%였을 경우 약 180kg/ton 정도의 석탄과 약 220Nm<sup>3</sup>/ton 정도의 산소가 필요함을 알 수 있다. 그러나 CaCO<sub>3</sub> 100% 이차연소율 45%에서는 약 430kg/ton 정도의 석탄과 약 460Nm<sup>3</sup>/ton 정도의 산소가 다량으로 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 0.3Nm<sup>3</sup> 그리고 석회석은 약 0.5톤이 가장 적절한 값이다.
- 2) 폐주물사를 상온에서 용해하는 것보다 큐포라의 배기열등을 이용하여 예열하면 석탄의 원단위가 떨어지는 것을 알 수 있다. 그리고 용융형 공정의 경우 에너지 수지측면으로 부터 2차연소율의 향상과 열회수율의 향상 기술이 무엇보다도 중요한 것을 알 수 있다.
- 3) 이 공정에서 에너지 절감을 위해서는 원료 선택이 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(1993) 21
- [ 2 ] F.Oester and A.Saatic : Process Technology Proceedings of ISS, 6(1987) 1021
- [ 3 ] F.Oester and A.Saatic : Sthahl and Eisen Report, Mass and Heat Balances, Stahleisen mbH, Dusseldorf (1987)
- [ 4 ] M.Tokuda : Shengyang International Symposium on Smelting Reduction, Chinese Society of Metals, Sept. (1986) 22
- [ 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 (1987) 45
- [ 7 ] 박현서, 이환노, 변창수, 허남석, 반봉찬 : 제7회금속제련학술회의 (1994) 1
- [ 8 ] 민동준, 주상훈, 정원섭, 김태도, 이일욱 : 대한금속학회지, 30-10 (1992) 1185