

구리 자용제련 공정의 최적화에 관한 연구

서경원 · 조석연

아주대학교 공과대학 화학공학과

A Study on the Optimization of a Flash Smelting Process for Copper Production

Kyung Won Seo and Seok Yean Cho

Department of Chemical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749

요 약

전식 제련법에 의한 자용제련 공정에 대하여 공정비용을 최소화시키고 최적 조업조건을 제시할 수 있는 최적화 모델을 개발하였다. 본 모델은 Outokumpu 공정을 기본으로 하여 물질 및 에너지 수지식과 비용 방정식을 포함하였으며 주어진 공정조건에서 공업용 산소량, 탄화수소 연료량, 원료 정광의 구리함량, matte의 구리함량 및 전기료등이 공정비용에 미치는 영향을 계산할 수 있었다. 모델에 의한 계산결과 25% 구리정광을 원료로 하여 자용제련을 할 경우 matte의 최적 구리함량은 65%, 산화용 가스의 최적 산소함량은 53.4%, 최소 공정비용은 \$9.22/ton정광이었다.

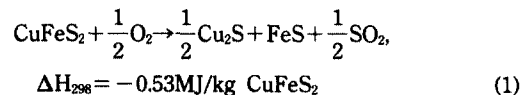
Abstract—For the flash-smelting process for copper production, a fundamental optimization model predicting the minimum operating cost and optimum operating conditions was developed. The model is based on the Outokumpu process, which includes mass and heat balances with energy and cost equation. The effects of the amount of industrial oxygen input, hydrocarbon fuel, the percentage of copper in concentrates, the matte grade, and the cost of electricity on the operating cost can be determined from the model. The model predictions showed that for the flash-smelting of 25%Cu concentrates the minimum operating cost is \$9.22/(ton concentrate) with the optimum matte grade of 65%Cu, and with the optimum concentration of 53.4% O₂ of the blast.

1. 서 론

과량의 에너지를 사용하는 자용(flash-smelting)공정은 오래 전부터 구리의 전식 제련법에 널리 이용되고 있으나 최적의 생산성을 얻기위한 공정조건이 확립되어 있지 않으며 경험적 지식과 고정된 운전 조건만을 토대로 공정이 운전되고 있다. 특히 Outokumpu공정은 현재 세계에서 가장 널리 이용되는 자용공정법¹⁾으로 우리 나라에서도 온산 동제련소에 채택되어 가동되고 있다. 본 연구에서는 Outokumpu공정을 기본 모델로 하여 온산 동제련소의 조업 데이터로부터 구리 자용공정의 최적조업조건을 도출하기 위한 최적화 모델을 개발하고자 한다.

2. 구리 자용제련

자용 제련로에 들어가는 주요 원료는 건조된 구리정광(concentrate), 실리카 flux 및 기체의 산소원등이며, 경우에 따라 열을 보충하기 위하여 탄화수소 원료를 공급하기도 한다. 구리정광은 산소와 발열반응을 일으켜 액체 matte상과 슬래그상 및 기상의 고농도 이산화황을 생성한다. 자용제련로 안의 구리정광중 주요성분인 chalcopyrite(CuFeS₂)는 다음과 같이 산화반응한다²⁾.



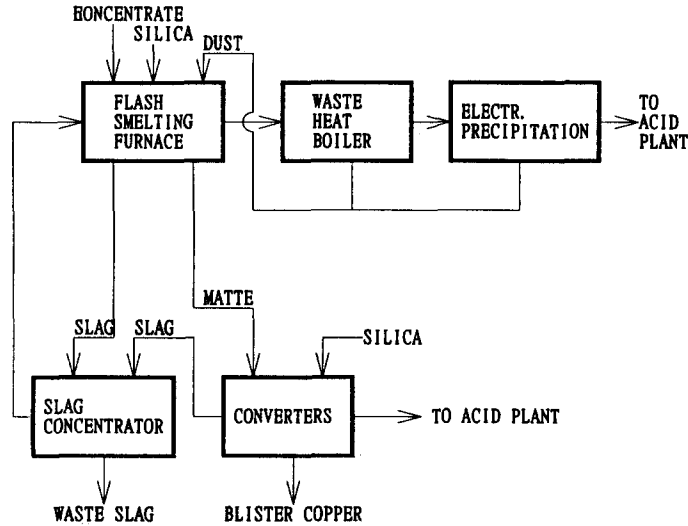
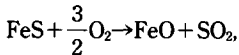
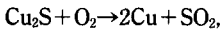


Fig. 1. Flow sheet of flash smelting³⁾.



$$\Delta H_{298} = -5.33\text{MJ/kg CuFeS} \quad (2)$$

위의 발열반응은 자용제련 생성물의 용융에 필요한 충분한 열 에너지를 제공한다. 자용 제련로안에서 Cu_2S 와 미 반응의 FeS 는 완전히 섞여 액체 matte상을 형성하며, 대부분의 FeS 는 주입된 산소와 반응하여 FeOX 로 산화되어 실리카 flux와 결합하여 슬래그를 형성한다. 생성된 matte는 전환로(converter)로 주입되며 전환공정에 의해 잔여 FeS 는 식 (2)와 같은 반응에 의해 슬래그로 제거되고 Cu_2S 는 다음 (3)의 반응에 의해 구리로 유리된다.



$$\Delta H_{298} = -1.36\text{MJ/kg Cu}_2\text{S} \quad (3)$$

식 (3)은 구리상의 황의 함량이 약 1%정도 남을 때까지 반응이 진행되며 이후 생성된 구리는 음극로에서 정제되어 제품으로 생산된다. 또한 자용제련 공정과 전환공정에서 생성된 가스는 SO_2 , N_2 , CO_2 , 및 H_2O 를 포함하며 산처리 공정으로 넘어가 가스중의 황은 산(H_2SO_4) 혹은 유리 황(elemental sulfur)의 형태로 회수된다. 자용제련 공정을 이용한 구리 생산의 공정도는 Fig. 1에 보인 바와 같다.

3. 최적화 모델

최적화 모델은 일반화된 Outokumpu 공정을 기본 모델로 하였으며, 온산 동제련소의 조업조건에 맞는

Table 1. The temperatures of feeds and products (K)^{2,3)}.

Concentrate	298
Flux	298
Recycle dust	298
Matte	1,500
Slag	1,550
Off-gas	1,600
Dust out	1,600

선형의 물질·에너지 수지 및 비용 방정식과 목적함수 (total costs)를 포함하고 있다. 여러 조업조건에 따른 구성 방정식들의 계수 값 변화에 따라 최적 조업조건을 도출할 수 있는 선형 프로그램을 모델의 바탕으로 하였다.

3-1. 기본 가정 및 규정

3-1-1. 원료와 생성물의 규정

원료 정광은 chalcopyrite와 pyrite의 혼합물로 Cu , Fe 와 S 가 각각 31.4%, 27.9%, 33.6% 및 7.1%의 SiO_2 를 포함하고 있다. 대개 모든 상업적인 정광은 SiO_2 이외에 Al_2O_3 , CaO 및 미량의 Zn , Pb , Si , As 등의 불순물을 포함하고 있으나 최적화 모델에서는 순수한 SiO_2 만을 포함한다고 가정하였다²⁾.

자용반응의 엔탈피 요구량 일부를 공급하는 탄화수소 연료로는 0.6 MJ/kg 인 잔유를 사용한다. 생성물의 구성물질은 matte, 슬래그와 생성가스이다. Matte는 Cu_2

Table 2. The compositions of dusts.

	dust leaving furnace	dust recycled to furnace
% Cu	50 (as Cu ₂ O)	25 (as CuSO ₄)
% Fe	16 (as Fe ₃ O ₄)	8 (as Fe ₂ (SO ₄) ₃)
% S	-	19
% SiO ₂	20	10
% O(not as SiO ₂)	14	38

S와 FeS의 이상용액으로 그 조성을 간단히 하였다. 생성된 가스는 이산화황과 질소이고 이산화 탄소와 물은 탄화수소 연료(잔유)가 사용될 경우만 존재한다고 가정하였다. 원료와 생성물의 온도는 Table 1에 보인 바와 같이 가정하였다.

비발동반된 분진의 조성은 원료의 조성과 자용로가 작동하는 조건에 의하여 변한다. 전형적으로 1.0 kg off-gas에 대해 0.1 kg의 분진이 자용로에 회수되어지며, 0.05 kg의 분진이 재생성된다고 가정하였다. 분진의 조성은 Table 2에 보인 바와 같다³⁴⁾.

앞의 Table 2에 보여진 값들은 Outokumpu형 자용재련 공정의 전형적인 조업 데이터이다.

3-1-2. 자용로의 열손실

자용로에서는 전도·대류 및 복사에 의해 로 바깥표면에서 대기로 열손실이 일어나며 경험적으로 로의 열손실은 off-gas의 무게와 함수관계가 있는 것으로 알려져 있다⁵⁾.

$$\text{열손실} = 250 + 0.15 \cdot (\text{off-gas}) \quad (4)$$

여기서 열손실의 단위는 MJ/ton conc.이고 off-gas의 단위는 kg/ton conc.이다.

3-1-3. 주입가스의 엔탈피

자용로에 유입되는 산화용 가스는 예열이 필요하다. 예열의 정도는 로의 반응조건과 가스 유입로의 재질에 따라 다소 차이가 나지만 800K를 상한선으로 하고 있으며, 경험적으로 0.5 MJ/kg로 가정하여 사용한다⁵⁾.

3-1-4. Off-gas에서 회수되는 열량

모든 Outokumpu 자용로는 로의 가스 off-take에 부설된 보일러를 가지고 있으며, 650K로 가스를 냉각시키면서 65 atm의 포화증기를 생성한다³⁴⁾. 그러므로 off-gas로부터 회수되는 열량은 자용로를 나가는 off-gas의 엔탈피와 보일러를 나가는 off-gas의 엔탈피의 차이로 계산되며 이는 Table 3에 보인 바와 같다.

회수된 열은 증기 터어빈을 이용하여 전기 에너지로 회수되므로 전환 효율을 감안하여 0.2 MJ/MJ회수된 열의 비율로 최종적으로 회수되는 것으로 가정하였다.

Table 3. Recoverable heat in Off-gas(MJ/kg).

Compound	SO ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
Enthalpy	0.8	1.1	1.2	2.3
(1,600K-650K)				

3-1-5. 전환기의 열손실

Batch로 조업되는 전환기의 열손실은 자용로에서와는 다소 다른 개념에서 계산되어지나 경험적으로 Pierce-Smith 전환기를 사용하는 경우 0.2 MJ/kg 산화용 가스의 열량손실이 있는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 그러나 다른 종류의 전환기를 사용할 때는 다른 열량 손실값을 사용해야 한다.

3-1-6. Reverts 형성

전환로에 유입되는 matte, 전환로에서 나오는 슬래그 및 조동의 경우 수송과정에서 발생하는 결빙(freezing) 현상 때문에 이를 다시 녹이기 위한 에너지가 추가적으로 요구된다. 이와 같이 결빙에 의해서 생성되는 물질을 reverts라 한다. Johnson⁷⁾의 연구결과로 부터 matte의 1ton당 0.4 ton의 reverts가 전환로에서 재처리되며, 1 kg의 reverts당 0.1 MJ의 반응열이 필요한 것으로 알려져 있다.

3-1-7. 산 생성에 필요한 에너지

최적화 모델은 제련공정내에서 생성된 모든 SO₂가 황산으로 전환되는 것으로 가정한다. 산생성에 필요한 에너지 요구량과 산처리 공정으로 유입되는 기체의 SO₂ 농도사이의 상관관계는 Kellog와 Henderson⁸⁾이 제안한 식을 변형하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{산생성에 필요한 에너지 요구량} \\ = 0.0122 \cdot (\text{off-gas}) + 0.085 \cdot (\text{SO}_2) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 에너지 요구량의 단위는 MJ/ton conc.이고 off-gas와 SO₂의 단위는 kg/ton conc.이다.

3-2. 최적화 모델 설정

최적화 모델은 정상상태의 물질 수지식과 엔탈피 수지식들을 이용하여 선형 방정식으로 표현이 가능하다. 즉

$$\text{들어오는 질량} = \text{나가는 질량} \quad (6)$$

$$\text{들어오는 엔탈피} = \text{나가는 엔탈피} \quad (7)$$

또한 물리적·화학적 제한조건과 조업조건에 따라 물질 수지 혹은 에너지수지의 부등식을 유도하여 선형방정식의 부등식으로 사용한다. 자용공정, 전환공정, 산처리 공정과 에너지 재활용 공정등은 46개의 선형등식과 11

개의 선형 부등식 및 1개의 총괄 비용방정식으로 표시된다. 모든 식들을 언급하고 각각의 계수와 기호 및 상수들의 단위와 의미를 설명하기에는 논문지면의 제약이 따르므로 본 논문에서는 중요한 식들에 대한 개념적인 설명만을 하고자 한다. 제안된 식들의 단위는 물질 수지식의 변수에 대해서는 kg/ton정광이며, 에너지 수지식의 변수에 대해서는 MJ/kg정광이다. 또한 제안된 식에 포함된 변수들의 출처는 최적화 프로그램에서 사용된 출처를 그대로 이용하였다.

3-2-1. 자용로의 모델 설정

1) 정광과 재순환된 분진으로 유입되는 구리의 양은 matte와 생성된 분진으로 자용로를 나가는 구리의 양과 같다.

2) 정광과 재순환된 분진으로 유입되는 철의 양은 matte, 슬래그 및 생성된 분진으로 자용로를 나가는 철의 양과 같다.

3) 정광과 재순환된 분진으로 유입되는 황의 양은 matte, off-gas 및 생성된 분진으로 자용로를 나가는 황의 양과 같다.

4) 산화용 유입가스와 재순환된 분진의 철과 구리의 산화물에 포함되어 있는 산소의 양은 슬래그 안의 철 산화물, off-gas의 SO₂, CO₂와 H₂O 및 생성된 분진내의 철과 구리의 산화물의 양과 같다.

5) Flux와 정광 및 재순환된 분진으로 유입되는 실리카는 슬래그와 생성된 분진내의 실리카 양과 같다.

6) matte의 무게는 Cu₂S와 FeS의 무게의 합과 같다. 또한 matte의 최소 구리함량은 40%이고 최대 구리함량은 80%이다.

7) 슬래그의 질량은 FeO와 SiO₂ 질량의 합과 같으며 슬래그의 SiO₂ 함량은 최대 35%이다.

8) 연료로 자용로안으로 들어오는 탄소와 수소는 연소 생성물로 나가는 CO₂와 H₂O로 제한된다. 또한 연료의 양은 항상 양의 값을 갖는다.

9) 유입가스에 포함된 질소는 모두 반응없이 유출되며 유입가스중의 질소와 산소의 질량비가 3.29일 때가 최대이고 0.22일 때를 최소로 한다.(80% 산소 농축가스를 사용하면 질소와 산소의 질량비가 0.22이다)

10) Off-gas의 총량은 자용로에서 유출되는 질소, SO₂, CO₂ 및 H₂O의 합과 같으며 주변에서 off-gas로 유입되는 공기의 양은 off-gas의 약 20%로 가정한다.

11) 농축용 산소는 95 질량%로 가정한다.

12) 열 수지 방정식을 유도하기 위한 가정 및 제한 조건은 3.1에 언급한 바와 같으며 이들로 부터 총괄 엔탈피 수지식을 유도하면 다음과 같다.

$$0.26X_1 + 0.12X_2 - 2.44X_4 - 13.56X_5 + 15.12X_7 + 6.3X_8 - 3.5X_9 + 1.48X_{12} - 3.57X_{13} - 7.44X_{14} - 10.52X_{15}$$

$$- 0.6X_{16} - X_{17} + X_{18} = -1989.4 \tag{8}$$

또한 off-gas로부터 회수된 열은 다음과 같이 정리된다.

$$1.1X_2 + 0.8X_{13} + 1.2X_4 + 2.3X_{15} = X_{22} \tag{9}$$

여기서 X₁=Cu₂S in matte

X₂=FeS in matte

X₄=FeO in slag

X₅=SiO₂ in slag

X₇=SiO₂ in Flux

X₈=recycle dust into furnace

X₉=dust leaving furnace

X₁₂=mass of exiting nitrogen

X₁₃=SO₂ in flash furnace off-gas

X₁₄=CO₂ in flash furnace off-gas

X₁₅=H₂O in flash furnace off-gas

X₁₆=the enthalpy of the incoming blast

X₁₇=furnace heat loss

X₁₈=mass of fuel entering the furnace

X₂₂=recoverable heat in off-gas

3-2-2. 전환로의 모델 선정

1) 전환로의 주된 반응물은 자용로에 의해 만들어진 matte, 슬래그를 형성하기 위해 첨가되는 실리카 flux 및 공기 또는 미량의 산소가 농축된 가스이며 주된 생성물은 조동(blister copper), 슬래그 및 전환로 off-gas이다.

2) matte로 들어온 구리는 모두 조동으로 생성된다.

3) matte로 들어온 철은 모두 FeO로 산화된다.

4) matte안의 들어온 황은 모두 SO₂로 산화된다.

5) 황과 철을 산화시키기 위한 양만큼의 산소가 공급된다.

6) 질소의 양은 공기의 질소 함유량에 의해 한정된 상한값을 갖으며, 24% O₂(부피)를 갖는 경우가 하한값에 해당된다.

7) 전환로로 유입되는 산화용 가스의 질량은 O₂와 N₂의 질량의 합이다.

8) 전환로의 off-gas의 질량은 생성된 SO₂와 N₂의 질량의 합이다.

9) 주변에서 전환로로 유입되는 가스의 양은 off-gas양의 2배로 가정한다.

10) 전환로에 들어가는 실리카의 양은 20% SiO₂와 72% FeO를 함유한 슬래그를 만들기 위한 양과 같으며 이는 전환로를 나가는 실리카의 양과 동일하다.

11) 전환로의 공기의 질을 높이기 위해 공급되는 공업용 산소의 농도는 95%(질량)이다.

12) 전환로와 자용로에서 사용되는 공업용 산소의

합이 전체공정에서 사용되는 공업용 산소의 총량이며 공급할 수 있는 최대한으로 사용할 수 있다고 가정한다.

13) 전환로의 열손실은 자용로에서와 같이 0.2 MJ/kg 전환로 주입가스 이다.

14) 1 MJ의 에너지로 1 kg의 reverts를 녹일 수 있으며 생성된 모든 reverts는 전환로에서 모두 녹여진다.

15) 자용로의 엔탈피 수지에 대해 제시되었던 가정과 지침은 전환로 엔탈피 수지에 대해서도 적용이 가능하며 이들로 부터 다음과 같은 엔탈피 수지식을 얻을 수 있다.

$$0.26X_1 + 0.12X_2 - 0.74X_{23} + 2.44X_{24} - 15.12X_{25} + 13.56X_{26} + 3.57X_{28} - 1.48X_{29} - X_{33} - X_{35} = 0 \quad (10)$$

여기서, X_{23} =Cu leaving the converter

X_{24} =mass of FeO generated in the converter

X_{25} =mass of the silica entering the converter

X_{26} =mass of the silica leaving the converter

X_{28} =O₂ entering the converter

X_{29} =N₂ entering the converter

X_{33} =converter heat loss

X_{35} =heat generated in converter and available to melt reverts

3-2-3. 에너지 요구량과 비용

본 연구의 최적화 모델은 자용 제련공정에 의존하는 비용만을 대상으로 하였으며 농축물의 건조와 처리, 순동 생산을 위한 음극정제 주조 비용 등은 포함되지 않았다. 자용 제련공정에 의존하는 비용으로는 공업용 산소의 생산, 전환로용 압축공기의 생산, off-gas의 정제와 수송 및 황산의 생산등에 필요한 에너지 비용이 있다.

1) 95% 순도를 갖는 공업용 산소의 생산에 필요한 전기 에너지는 0.35 kwh/kg O₂이다.

2) 전환로용 압축공기는 1.2 atm의 게이지 압력을 갖으며 0.05 kwh/kg N₂의 전기 에너지를 필요로 한다.

3) 자용로와 전환로부터 나온 off-gas는 정전기적 침전기(electrostatic precipitator)에 의해 정제되어진 후 산처리 공정으로 보내진다. 정제와 수송에 필요한 에너지는 다음식으로 표현된다.

$$0.006(X_{20} + X_{21} + X_{31} + X_{32}) = X_{45} \quad (11)$$

여기서, X_{20} =flash furnace off-gas

X_{21} =flash furnace infiltration

X_{31} =converter off-gas

X_{32} =converter infiltration

X_{45} =the energy required to clean the off-gas

and move to the acid plant

4) 산 생산을 위한 에너지 비용은 3.1에 언급한 바와 같으며 이로부터 다음식을 얻을 수 있다.

$$0.085X_{13} + 0.085X_{28} + 0.022X_{40} = X_{46} \quad (12)$$

여기서, X_{40} =total off-gas processed in the acid plant, including acid plant air addition

X_{46} =the amount of kwh required to produce and from the off-gas

5) 전체 전기 요구량은 앞의 1)에서 4)까지 계산된 전기 에너지량의 합으로 계산된다.

$$X_{47} = X_{43} + X_{44} + X_{45} + X_{46} \quad (13)$$

여기서, X_{43} =kwh required to produce converter air

X_{44} =kwh required to produce industrial oxygen

X_{47} =kwh purchased electricity without applying any credit for internally generated electricity

3-3. 비용 방정식

총괄적인 비용방정식은 연료비용, 공기를 예열하는데 드는 비용과 총괄 전기비용으로 구성되어 진다.

1) 연료비용

연료로 사용되는 잔유의 1994년 가격은 약 \$ 28.5/barrel로서 이는 0.18 \$/kg에 해당하며 에너지 가격으로는 0.0043 \$/MJ이다.

$$X_{49} = 0.18X_{16} \quad (14)$$

여기서, X_{49} =the price of fuel, \$/ton 정광

2) 공기를 예열하는 데 드는 비용

잔유를 태우는 예열기를 사용하여 공기를 예열한다고 가정한다. 75%의 열효율을 갖는 예열기를 이용하였을 경우 1MJ의 에너지를 얻기 위해서 약 0.006 \$의 비용이 필요하다.

$$X_{50} = 0.006X_{17} \quad (15)$$

여기서, X_{50} =the cost of preheating blast(\$/ton 정광)

3) 총괄 전기비용

1994년도 기준 전기비용은 약 \$ 0.05/kwh이며 이로부터 총괄 전기비용은

$$X_{48} = 0.05X_{47} \quad (16)$$

여기서, X_{48} =the cost of purchased electricity(\$/ton

정광)

그 외에 전환로에서 용융되지 않는 reverts가 존재할 경우에는 새로운 에너지 비용이 추가되며 그 비용은 0.05 \$/kg reverts로 가정한다. 앞의 식들로부터 총괄 비용방정식은 다음과 같이 된다.

$$X_{52} = X_{48} + X_{49} + X_{50} + X_{51} \quad (17)$$

여기서, X_{51} = 새로운 에너지 비용(\$/ton 정광)

X_{52} = 총괄 에너지 비용(\$/ton 정광)

한편 내부적으로 생성된 전기에 의해서 이용될 수 있는 이득은 식 (17)에는 포함되지 않았다. 즉 off-gas로부터 회수된 에너지를 직접적으로 공정에 이용한다면 MJ의 회수 에너지당 \$0.004의 이득을 얻을 수 있다 하므로⁵⁾ 총괄 비용(total costs) 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\text{Total cost} = X_{52} - 0.004X_{22} \quad (18)$$

4. 모사 결과 및 토론

4-1. 최적화 모델의 선형 대수식

3장에서 언급한 최적화 모델에 대한 선형 대수식들을 개념적으로 정리하여 표시하면 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 식 (18)의 총괄 비용 방정식을 목적함수로 하고 이를 최소화하기 위한 자용로의 물질·에너지 수지식, 전환로의 물질·에너지 수지식과 에너지 손실·이득 및

보상 비용등을 제한하는 선형 대수 방정식의 행렬로 구성됨을 알 수 있다. 그러나 식 (18)이 노동비, 자본비용, 간접비와 세금 및 앞에서 언급했던 독립적인 조작비용 (건조비, 전기 제련비 등) 등을 포함하지 않은 순수한 자용 제련공정을 위한 경비만을 나타내는 식이지만 이러한 비용들은 최적 조업조건을 도출하는 데는 커다란 영향을 미치지 않는다. 그러므로 Fig. 2에 제시된 여러 선형 대수식과 목적함수로부터 일정량의 구리함량을 갖는 정광에서 조동을 생산하는데 필요한 공정비용 (processing costs)을 계산할 수 있으며 이 값을 최소화시키는 공정변수들로부터 최적화된 제련공정 조건을 얻을 수 있다.

4-2. 모사결과

최적화 모델을 이용하여 25% 구리함량을 갖는 정광 1 ton으로부터 자용로에서 65% Cu의 matte를 생산하고 전환로에서 250 kg의 조동을 생산할 때 드는 최소 공정비용과 이에 상당하는 최적 조업변수들에 대한 계산 결과를 표 4에 제시하였다. 표 4에 제시된 결과로부터 보조연료를 사용하지 않은 순수한 자용공정에 의한 제련 (CSTFUL=0)과 전환로에서 보조연료를 이용하여 녹여지는 reverts가 없는 경우(CSTREV=0)에 최소 공정비용이 \$9.22/ton 정광(COST=9.22)임을 알 수 있다. 배출가스로부터 열을 회수하지 않을 경우에는 \$11.72 /ton 정광(CSTTOT=11.72)임을 알 수 있다.

자용로에서 생산되는 matte의 구리함량 변화에 대한 최소 공정비용의 변화를 Fig. 3에 보였다. Fig. 3은 배출

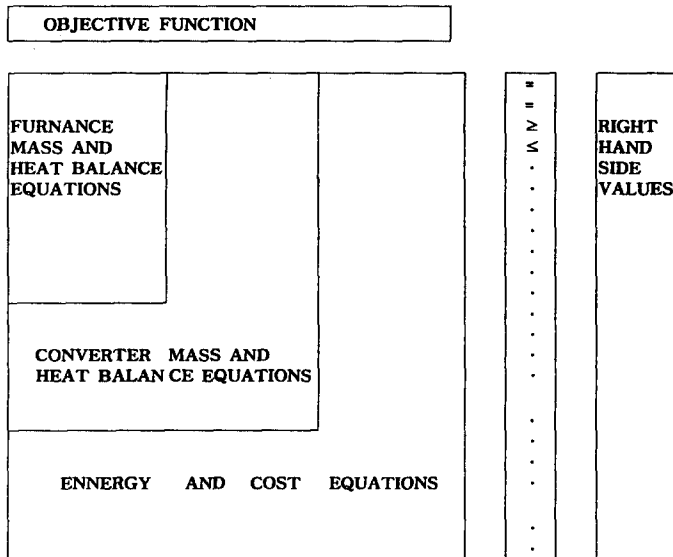


Fig. 2. Conceptual structure of the optimization model⁵⁾.

Table 4. The example of optimum condition obtained by the optimization model.

Variable	Value (1/ton concentrate)	Variable	Value(1/ton concentrate)
Cu ₂ S	392.50 kg	FeS	90.31 kg
MATTE	482.81 kg	FEO	284.75 kg
SISLG	153.33 kg	SLAG	438.07 kg
SIFLX	82.33 kg	DUSTIN	69.07 kg
DUSTOUT	34.53 kg	FFO ₂	278.44 kg
FFN ₂ IN	242.52 kg	FFN ₂ OUT	242.52 kg
FFSO ₂	448.17 kg	CO ₂	0.00 kg
H ₂ O	0.00 MJ	FUEL	0.00 kg
HBLAST	0.00 MJ	FFHL	353.60 kg
FFIND	219.11 MJ	FFOG	690.68 kg
FFINF	172.67 MJ	OGHEAT	625.30 kg
CVCU	314.00 MJ	CVFEO	74.06 kg
CVSIIN	28.90 MJ	CVSIOT	28.90 kg
CVO ₂	128.17 MJ	CVSO ₂	223.83 kg
CVN ₂	355.04 MJ	CVBLST	483.21 kg
CVOG	578.87 MJ	CVINF	1157.14 kg
CVHL	96.64 MJ	REVTO	193.13 kg
CVMJRV	193.13 MJ	CVREV	193.13 kg
EXREV	0.00 MJ	CVIND	21.76 kg
TOTIN	240.87 MJ	TOTOG	2711.61 kg
O ₂ OG	336.00 MJ	AIRADD	111.65 kg
KWHO ₂	84.30 kwh	KWHCV	17.75 kwh
KWHESP	15.60 kwh	KWHACD	116.78 kwh
KWHTOT	234.43 kwh	CSTKWH	11.72 \$
CSTFUL	0.00 \$	CSTBST	0.00 \$
CSTREV	0.00 \$	CSTTOT	11.72 \$
COST	9.22 \$		

가스로부터 열을 회수하여 전기 에너지로 재생산하는 경우에 대한 결과를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 matte의 구리함량이 65%일때 최소 공정비용이 들며 자용료에서 생산되는 matte의 구리함량을 65%보다 더 높이거나 낮추면 오히려 자용제련의 공정비용이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4에는 공업용 산소의 양이 공정비용에 미치는 영향을 도시하였다. 공업용 산소의 사용량의 변화는 자용료에서 생산되는 matte의 구리함량과 전환률에 주입되는 산화용 가스의 양에 직접적인 영향을 주고 결

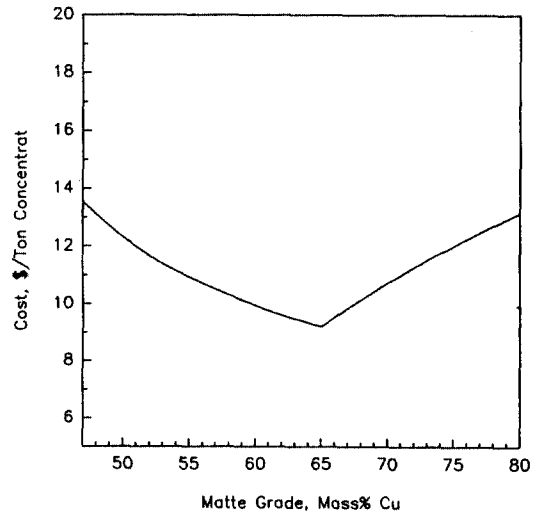


Fig. 3. The effect of matte grade on the processing costs.

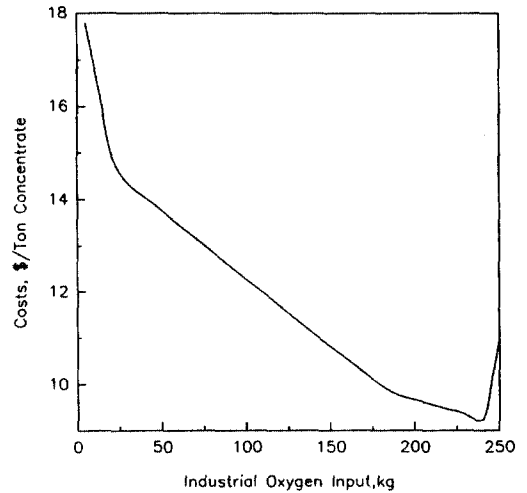


Fig. 4. Effects of the industrial oxygen on the processing costs.

과적으로 공정비용에 영향을 미친다. Fig. 4의 결과에서 최소 공정비용의 왼쪽의 가파른 기울기 지역은 공업용 산소의 사용이 전환률에 미치는 영향 때문이다. 즉 공업용 산소의 증가가 제련로에 들어가는 산화용 가스의 양을 상대적으로 줄여 주기 때문에 공정비용의 감소를 유도하나, 지나친 사용은 공업용 산소의 생산비용 증가와 off-gas에서의 회수할 수 있는 열량의 감소를 유발하며 나아가서 에너지 수지를 맞추기 위하여 자용료에서 생산되는 matte의 구리함량을 낮추게 되어 전체

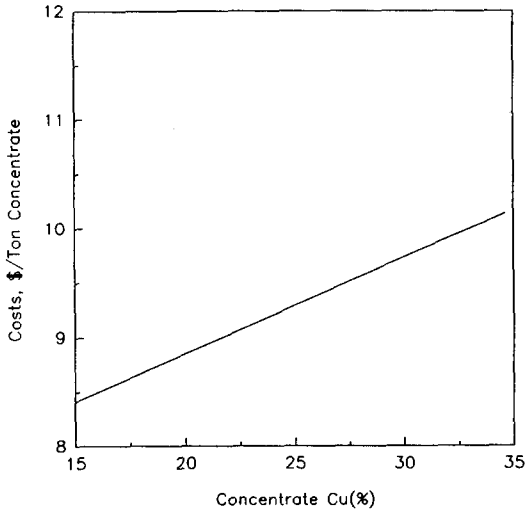


Fig. 5. Effects of the Cu% in concentrate on the processing costs.

적인 공정비용 증가를 유발시키기 때문이다.

Fig. 5에는 원료 정광의 구리함량이 공정비용에 미치는 영향을 도시하였다. 일반적으로 예상할 수 있듯이 원료 정광의 구리함량이 증가할 수록 공정비용은 감소한다. 최적화 모델에 의한 모사결과 원료 정광의 구리함량과 공업용 산소의 사용량은 반비례함을 알 수 있었으나 이에 대한 결과 도시는 생략하기로 한다.

Fig. 6에는 원료 정광의 구리함량이 25%이고 자용로에서 나오는 matte의 구리함량이 65%인 조업조건에 대해서 공업용 산소의 사용이 에너지 보상을 위한 탄화수소 연료의 필요량에 미치는 영향을 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 공업용 산소의 사용이 증가하면 연료의 사용이 감소하며, 공업용 산소의 사용량이 189 kg/ton정광 이상이면 연료 사용이 필요없는 자용공정 (autogenous process)이 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

연구의 결과 순수한 공정비용만을 최소화할 수 있는 자용 제련공정의 최적화 모델로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 25% 구리정광을 원료로 하여 자용제련을 할 경우 자용로에서 얻을 수 있는 matte의 최적 구리함량은 65%이다.
- 2) 위 경우에 대하여 예열된 산소없이 자용로가 운영되며 이때 산화용 주입가스의 산소함량은 53.4%이다.
- 3) 전환로의 산소농축은 최적화 모델에서 인정되어진

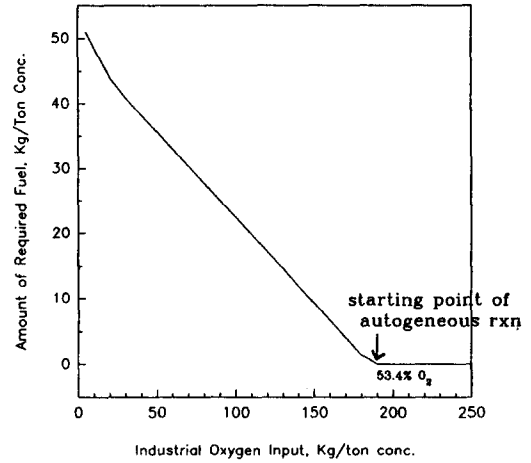


Fig. 6. Effects of industrial oxygen input on the fuel consumption.

24 부피% O₂이고, 모든 reverts는 전환로에서 녹는다.

4) 위 경우에 대해서 최소 공정비용은 \$9.22/ton 정광이다. 단 off-gas로부터 열을 회수하지 않는 경우에는 \$2.1/ton정광의 추가비용이 들어간다.

전식 제련법에 의한 자용 제련공정에 대한 최적 조업조건을 제시할 수 있는 최적화 모델을 개발함으로써 에너지 절감과 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대하며 나아가서 니켈, 아연 및 납 등을 생산하는 유사 자용공정에 대해서도 본 연구의 결과를 응용하여 각 경우에 맞는 최적화 모델을 개발할 수 있을 것이다.

감 사

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Chaubal, P.C.: Ph.D. Dissertation, University of Utah, SLC, Utah (1986).
2. Seo, K.W.: Ph.D. Dissertation, University of Utah, SLC, Utah (1990).
3. Asteljoki, J.A. and Anjala, Y.E.: "Flash Converting", 5th Int. Flash Smelting Congress, Helsinki, Finland (1986).
4. 온산 동제련소 Raw Data, 럭키금속 (1992).
5. Davenport, W.G. and Partelpoeg, E.H.: "Flash Smelting Analysis, Control and Optimization", Perga-

- mon press, N. Y. (1987).
6. Antonioni, T.N., Church, A.D., Landolt, C. and Partelpeog, E.H.: "Operation of the INCO Flash Smelting Furnace with Recycle of Converter Slags", presented at the 18th annual conference of metallurgists, sponsored by CIM, Sudbury (1979).
 7. Johnson, R.E.: "Copper and Nickel Converters", Proc. of a Symp. on Converter Operating Practices, TMS-AIME at the 108th AIME annual meeting, New Orleans, La. (1979).
 8. Kellogg, H.H. and Henderson, J.M.: "Energy Use in Sulfide Smelting of Copper", Extractive Metallurgy of Copper, Int. Symp. on Copper Extraction and Refining, pp. 373-415 (1976).