

침적 Lance를 이용한 가스 injection시 ladle내 액체의攪拌特性 연구

*朴 賢 緒

全州大學校 環境科學科

The Mixing Characteristics of Melt during the Injection of Gas into a Ladle through an Immersed Lance

*Hyun Seo Park

Dept. of Environmental Science and Technology, Jeonju University

ABSTRACT

There has been an increasing demand over the years for steels with lower [s] content. For the purpose of improving the efficiency of desulphurization in the powder injection process of ladle, experimental studies were carried out by using cold model to optimize the lance configuration, gas flow rate, immersion depth of lance nozzle, position of lance nozzle relative to the ladle and the effect with slag, etc. As the results of this study, it was made clear that 2-hole nozzle lance (C, E type) placed in an asymmetric position gives the shortest mixing times.

Key words: gas injection, desulphurization, lance, nozzle

1. 서 론

최근, 각 제철소에서는 제강취련의 전처리공정으로 ladle을 이용한 용선예비처리가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 따라서 ladle 본래의 기능인 용선의 수송은 물론 반응 용기로서의 중요성이 대두되고 있으며, 정련효과를 높이기 위한 연구가 다수 발표되고 있다.³⁻¹⁰⁾

그러나 용선탈황처리 ladle은 구조적 특성 때문에 침적 lance를 통해 욕중에 투입되는 Flux의 효율이 비교적 낮다. 따라서 정련효율을 높이기 위해서는 투입된 기체 또는 분체의 거동과 욕의 유동을 이해하는 것이 중요하지만 실제 조업에서는 직접 관찰하는 것이 불가능하기 때문에 실온에서 취급과 관찰이 용이한 Model 실험을 통해 실제조업에서의 상황을 유추하는 방법이 널리 활용되고 있다. Gas 투입에 따른 욕의 교반강도는 반응효율과 직접적인 관계가 있기 때문에 많은 연구자들^{4,11,12)}에 의해 욕 교반특성에 대한 Gas 투입조건에 영

향이 조사되어 왔다. 그러나 용기의 형상이 특이하고 작업조건에 따라 욕내의 교반특성이 상이하므로 이에 대한 data는 극히 미흡한 실정이다. 따라서, Ladle의 모형을 제작하여 욕의 교반특성에 미치는 주요인자들, 즉 gas유량, Lance침적깊이와 위치, Nozzle 형상, Slag 등의 영향을 Model 실험을 통해 검토하였으며, Model 실험에서 얻어진 최적의 작업조건을 실제의 경우와 비교하여 탈S 효율의 향상효과를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 액체내부의 유동의 관찰이 가능하도록 아크릴수지로 실제크기의 1/6 축소모델로 제작하였다. Ladle 모형의 중심축에는 상하, 좌우이동이 가능한 gas 투입 lance를 설치하였으며, Lance의 선단부에 Fig. 2와 같은 Nozzle을 제작하여 실험에 사용하였다.

Ladle의 장축 끝에 전극으로써 열전대용 백금선(0.5

* 2002년 3월 2일 접수, 2002년 6월 4일 수리

* E-mail: hnsepark@unitel.co.kr

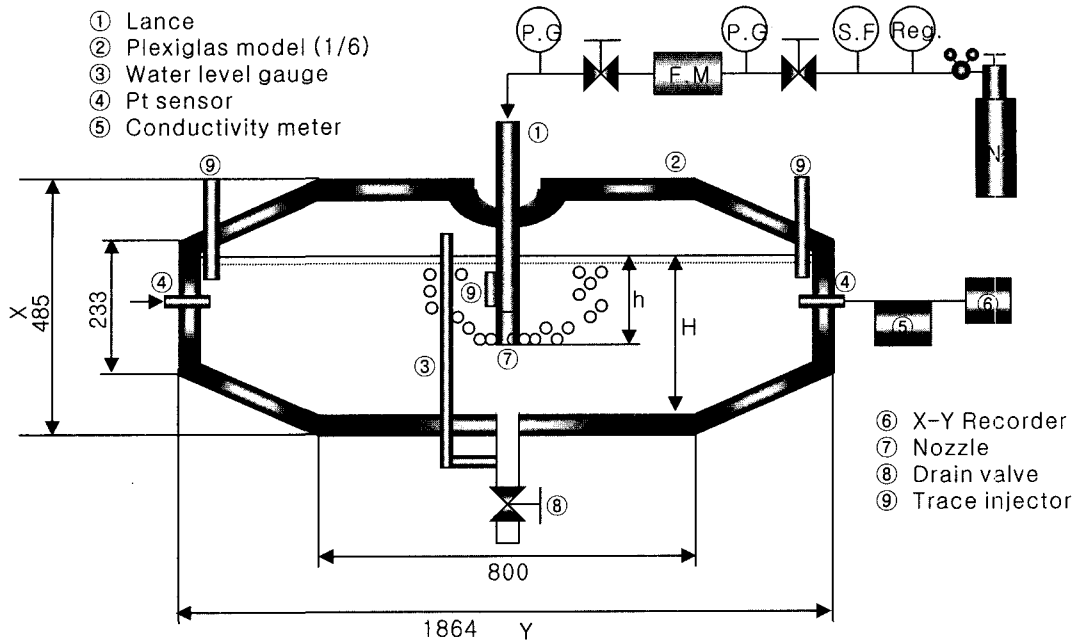


Fig. 1. schematic diagram of test ladle model (1/6).

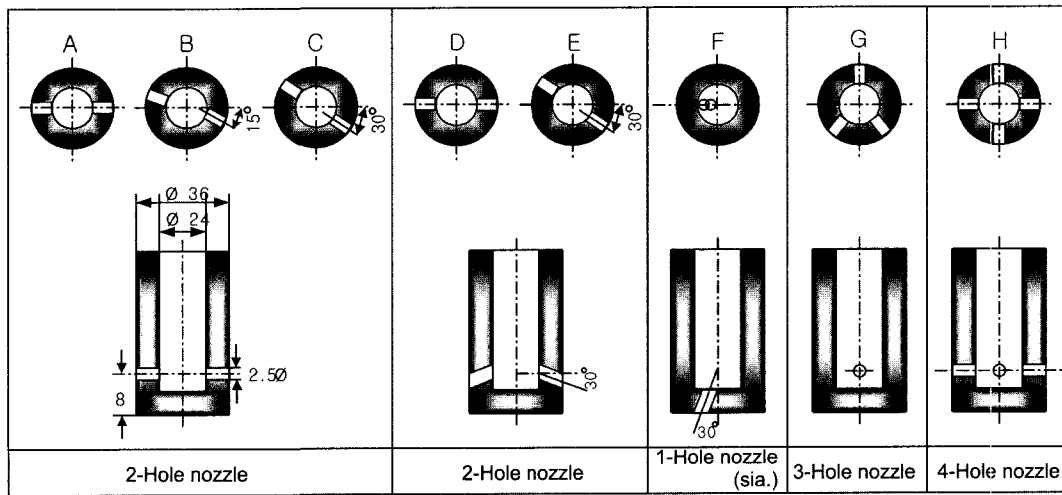


Fig. 2. Schematic diagram of test nozzle.

mmΦ)을 0.2 mm 두께의 판상으로 압연하여 부착하였으며, 욕내의 물의 유량을 측정하기 위하여 Water level gauge를 욕기중심부에 설치하였다. 취입가스로는 N₂ Gas를 사용하였으며, 유량은 Rota meter로 측정하였다.

Rota meter 전후에 압력 및 유량조절 valve를 설치하고 Gas의 유량을 조절하였다.

또한 Fig. 3 과 같은 1/10 축소 2차원 용기를 제작하여 Lance nozzle tip에서의 Gas의 분출거동 및 욕의 유동상황을 관찰하였다.

2.2. 실험방법

Gas취입에 따른 욕의 교반강도는 Tracer(3M HCl, 50 ml)을 주입 후, Tracer가 욕내에서 균일한 농도가

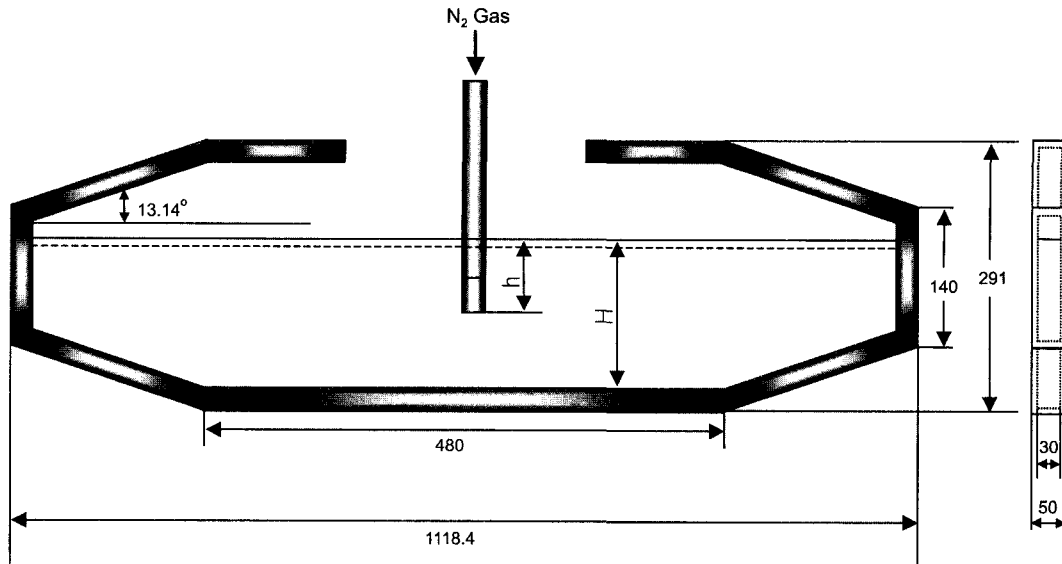


Fig. 3. Schematic diagram of test ladle model (1/10).

되는데 요하는 시간, 즉 균일혼합시간을 측정하였다.

Injector를 이용하여 3M HCl 50 ml를 침적 nozzle 직상에 주입하였다. 이때 Tracer가 첨가되는데 요하는 시간은 2 sec이하로 하였다. 욱의 균일혼합시간은 ladle에 부착된 Pt sensor를 wheatston bridge에 연결하고 욱의 혼합에 따른 전위차 변화를 recorder에 기록하여 측정하였다. 1회 사용한 물은 전기전도도의 변화를 고려하여 배수하고 재사용하지 않았다. 또한 Gas를 취입하지 않은 상태에서 Tracer를 주입한 결과 약 8시간이상이 경과하여서야 전기회로내의 전위차 변화가 감지되었으므로 측정결과에 대한 Traces의 분자확산영향을 무시하였다. 동일조건하에서의 균일혼합시간 측정시의 재현성은 ±5초 정도였다.

또한 slag 대응으로는 액체 파라핀을 이용하였다.

2.3. 실험조건

Gas취입조건은 상사조건으로 수정 Froude number⁵⁾(식 1)를 선택하고 실제 ladle에서의 탈 S조업과 비교하여 Table 1 과 같이 유량을 변화시켰다.

$$N'_{Fr} = \frac{\rho_g V^2}{(\rho_l - \rho_g)g \cdot L} \quad (1)$$

또한 Gas취입에 따른 욱의 교반효과는 단위시간당 액체에 공급한 일, 즉 교반동력의 함수로써 평가하였다. 일반적으로 액체에 대하여 Gas가 한 일은 Nozzle tip

Table 1. Gas flow rates for injection experiment in model

| N ₂ in 320t ladle, Nm ³ /min | N ₂ in model, × 10 ³ Nm ³ /min |
|--|---|
| 1.5 | 6.8 |
| 2.5 | 11.0 |
| 4.0 | 17.5 |
| 5.4 | 24.0 |
| 7.2 | 30.0 |

근처에서 Gas의 온도 및 압력변화에 따른 팽창에 의한 일, 부력, Gas jet의 운동 energy가 고려되고 있다. 그러나 본 연구에서의 교반동력평가는 취입된 gas의 온도는 액체의 온도와 동일하다고 보고 열대류의 영향은 무시하였으며, 취입된 gas jet의 운동에너지 역시 액체의 교반에 대한 기여도가 작은 것으로 보고 취입된 gas jet의 압력변화에 따른 동력도 Nozzle부근에서 대부분 소모되므로 전체 교반동력은 부력만을 고려하여 다음과 같이 산출하였다.

$$W = \int_0^b V \rho_l g \, dh = - \int_{P_1}^{P_2} \frac{nRT_0}{P} \, dh = nRT_0 \ln(1 + \rho_l g h P_2) \quad (2)$$

따라서 취입된 기체의 교반동력 W는 다음과 같다.

$$W = \frac{Q}{V_0} RT_0 \ln(1 + \rho_l g h P_2) \quad (3)$$

욕의 단위질량당 교반동력 M 은

$$\dot{\epsilon}_M = \frac{W}{M_1} = \frac{Q}{M_1 V_0} RT_0 \ln(1 + \rho_1 gh/P_2) \quad (4)$$

로 된다.

한편, 정련용기 중에 투입된 gas jet의 형상 또는 침입깊이를 아는 것은 용기의 형상에 따른 gas 투입조건을 검토하는데 중요하다.¹³⁻¹⁷⁾ 따라서 본 연구에서도 ladle 용기내의 투입가스거동을 Themelis에 의해¹⁸⁾ 제시된(식 5)을 Runge-Kutta method로 풀어 가스취입각도변화에 따른 gas jet의 거동을 조사하여 검토하였다.

$$\frac{d^2 y_r}{dx_r} = 4N_{Fr}^{-1} \left[\frac{\tan^2(\theta_c/2)}{\cos\theta_0} \right] \left[1 + \left(\frac{dy_r}{dx_r} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot x_{r-c} \quad (5)$$

Boundary condition :

$$y_r = 0, \text{ at } x_r = \frac{1}{2 \tan(\theta_c/2)}$$

$$\frac{dy_r}{dx_r} = \tan\theta_0, \text{ at } x_r = \frac{1}{2 \tan(\theta_c/2)}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 균일혼합시간

3.1.1. Lance침적깊이와 가스유량의 영향

Lance침적깊이(h)와 가스유량(Q)이 균일혼합시간에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 이때 Lance침적깊이(h/H)는 0.66, 0.77, 0.83으로 변화시켰으며, 가스취입 nozzle는 Fig. 1의 X-Y축과 Fig. 2의 nozzle 중심축 X'-Y'를 일치시킨 2공 A type을 사용하였다.

그림에서 $T\sqrt{gL}$ 과 $Q\sqrt{gL^5}$ 은 각각 균일혼합시간과 가스유량에 대한 무차원항으로 L 은 용기특성에 따른 대표길이이다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 Lance침적깊이와 가스유량의 증가에 따라 균일혼합시간이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Lance 침적깊이와 가스유량증가에 따라 식 (4)에 표시된 교반동력이 증가하는 것으로부터 용이하게 해석 가능하다. 또한 Lance 침적깊이(h/H)가 0.66에서 0.83으로 증가함에 따라 가스유량증가에 따른 균일혼합시간 감소경향이 현저해짐을 알 수 있다. 이것은 식(4)를 전미분함으로써 해석 가능하다.

$$d\epsilon_M = \frac{RT_0}{M_1 V_0} \ln \left(1 + \frac{\rho_1 gh}{P_2} \right) dQ + \frac{QRT_0}{M_1 V_0} \frac{\rho_1 g}{P_2 + \rho_1 gh} dh \quad (6)$$

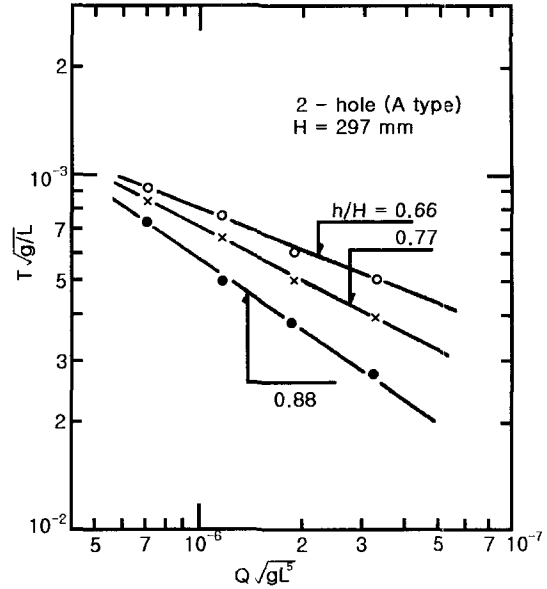


Fig. 4. Relation between non-dimensional mixing time and Fr number.

(6)식에 나타난바와 같이 유량(Q)의 증가에 따라 교반동력의 증가량은 h 가 크게 되는 쪽이 크기 때문인 것으로 사료된다.^{6,19)} 成田進等⁴⁾의 1/10축소 model실험에 의하면 침적깊이의 비(h/H)가 0.63이하에서는 교반효과가 현저하게 나빠지며, 이것은 욕의 표면부위만 유동하게 되어 욕전체의 교반이 불충분하기 때문인 것으로 사료되고 있다.

3.1.2. Nozzle 위치의 영향

2공 노즐과 1공노즐을 사용하여 노즐의 위치변화에 따른 욕내의 균일혼합시간을 측정하였다. Fig. 5, 6에서 nozzle의 형상과 상대적 위치는 다음과 같이 구분된다. 즉, A, D type은 ladle 중심축 X-Y와 노즐 중심축 X'-Y'를 일치시킨 경우이고, B, C, E는 노즐을 Z축 방향으로 각각 15°, 30°, 30° 회전시켰으며, F는 단공 노즐을 사용한 경우로서 ladle 중심에서 Y 방향으로 Lance 각도는 21°, 노즐각도는 30° 변화시킨 경우이다. 이때 Lance 침적비(h/H)는 0.83으로 고정하였으며, Gas 유량은 6.8~30 NL/min 범위내에서 변화시켰다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 유량이 낮은 영역에서는 균일혼합시간이 190~210 sec범위로 노즐의 각도변화에 따라 큰차이가 나타나지 않았으나 유량이 증가함에 따라 균일혼합시간에 많은 차이를 보여 노즐각도를 30°로 변화시킨 c type의 경우에 균일혼합시간이 가장 짧게 나

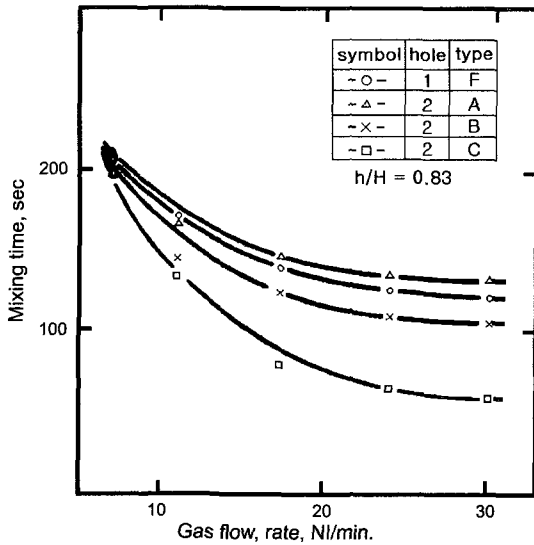


Fig. 5. Mixing time as function of gas flow-rate for 1- and 2-hole lance.

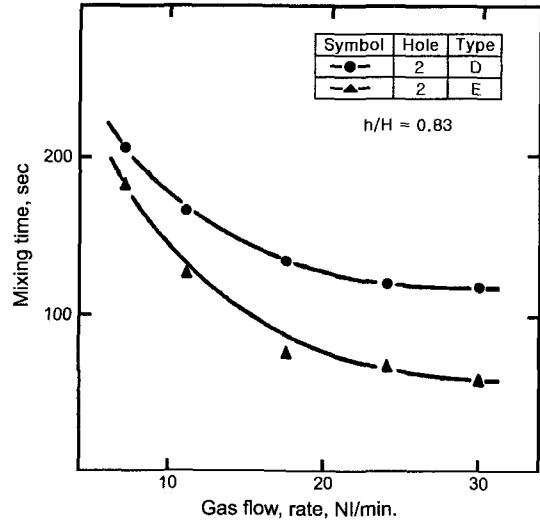


Fig. 6. Mixing time as function of gas flow-rate for 2-hole lance.

타났다. 이와 같이 노즐의 각도를 변화시킴에 따라 욕의 균일혼합시간이 짧아지는 원인은 아직 분명치 않으며 계속적인 검토가 요구된다.

상기와 같은 수직2공 노즐의 경우 가스유량증가에 따른 용탕의 비산현상이 심하기 때문에 가스유량이 제한되고 있다. 따라서 본 실험에서도 유량변화가 용이한 경사 lance(F type)와 2공수직 lance노즐을 비교하여 보았다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 lance각도를 21°, 노즐 취입각도를 30° 변화시켰을 경우 균일혼합시간이 2공노즐(A형)과 거의 비슷한 경향을 보였으며, 경사 lance의 경우에 약간 좋은 결과를 얻었다. 山岐勳等²⁰⁾의 실험결과에 의하면 A형 노즐보다 경사 lance경우가 유량조절이 가능하여 로구에서 메탈의 비산방지는 물론 용선처리량 및 흡입속도의 증대가 가능하고 또한 탈 S 반응 효율면에서는 거의 같지만 내화물의 침식은 2공 노즐의 경우가 큰 것으로 보고하고 있다.

Fig. 6은 2공노즐의 취입각도를 하향으로 30° 변화시킨 D, E형을 사용하여 유량변화에 따른 균일혼합시간 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 노즐의 가스취입각도를 변화시킴에 따라 노즐 A, C형보다 균일혼합시간이 약간 짧아지는 경향을 보였다. 또한 취입각도변화에 따른 가스의 Trajectory를 (5)식을 이용하여 계산해본 결과 Fig. 7과 같이 나타났다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일 유량조건(17.5

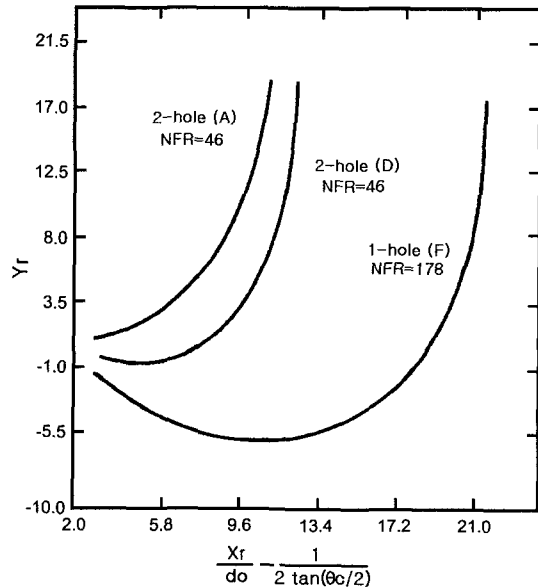


Fig. 7. Gas trajectory.

NI)에서 노즐각도를 0°에서 30°로 변화시킴에 따라 가스 trajectory의 깊이가 약 30% 정도 증가되었다. F형의 노즐에서는 단공이므로 동일유량에서의 침투깊이는 깊지만 양쪽 대칭인 2공 노즐과 비교할 때 기포가 부상하는 교반 zone은 거의 같게 된다.

3.1.3. 노즐공수의 영향

Ladle의 장축과 평행한 nozzle type(A, F, G, H)을 이

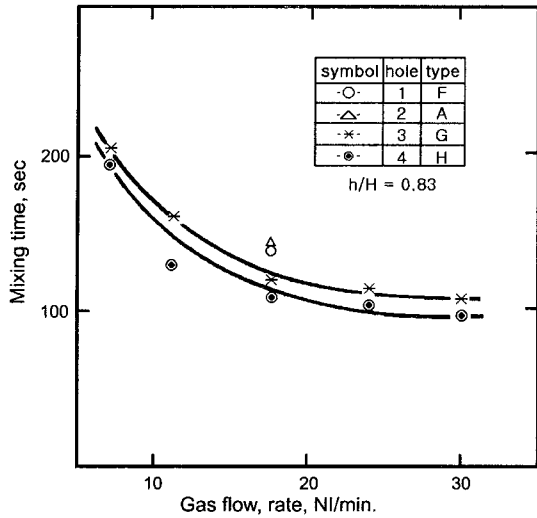


Fig. 8. Effects of number of nozzle orifices on mixing time.

용하여 노즐공수에 따른 욕의 균일혼합시간의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이때 Lance 침적깊이(h/H)는 0.83으로 일정하게 고정하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 노즐공수의 증가에 따라 균일혼합시간이 짧아지는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 노즐공수의 증가에 따라 기포수가 증가하여 기-액 계면적을 증가시키기 때문인 것으로 사료된다.^{4,6,21)}

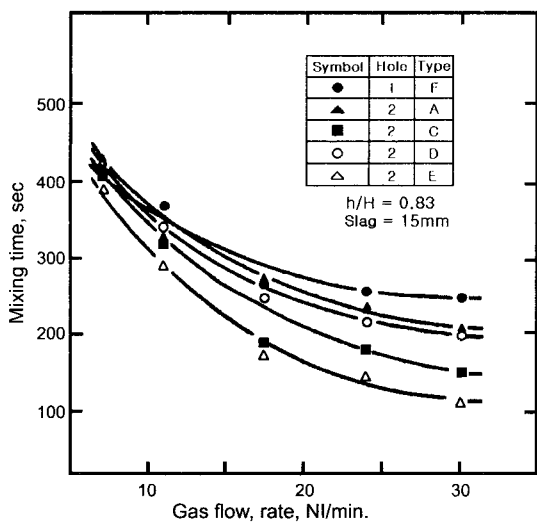


Fig. 9. Mixing time as function of gas flow rate for 1- and 2-hole lance.

3.2. Slag의 영향

고로에서 출선된 용선을 ladle내에 수선중에 slag의 상당량이 혼입된다. 일반적으로 slag는 용선에 비해 점도가 높기 때문에 용선의 유동현상에 대한 slag의 영향이 클 것으로 예상할 수 있다. Fig. 9는 모뎀실험에서 slag대용으로 액체과라핀을 15mm두께로 유지하고 Lance의 침적깊이(h/H)를 0.83으로 일정하게 유지하였을 경우의 노즐형태별 가스유량과 균일혼합시간의 관계를 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 가스유량이 낮은 경우에는 균일혼합시간에 대한 노즐형태의 영향이 현저해짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 slag가 없을 경우와 거의 유사하지만 균일혼합시간은 Fig. 5와 비교하면 slag의 존재에 따라 약 2배 이상 길어짐을 알 수 있다.

3.3. 가스취입에 따른 교반동력

욕의 균일혼합시간과 욕에 가해진 교반동력의 상관관계를 Fig. 10, 11에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 균일혼합시간의 교반동력에 대한 의존성은 노즐구조에 따라 현저하게 다르게 나타나며 분석결과 지수 n의 값은 0.32~0.80 범위 내에서 변화함을 알 수 있었다. Lehner⁴⁾ 등은 균일 혼합시간과 교반동력의 관계를 (7)식으로 표현하고 있다.

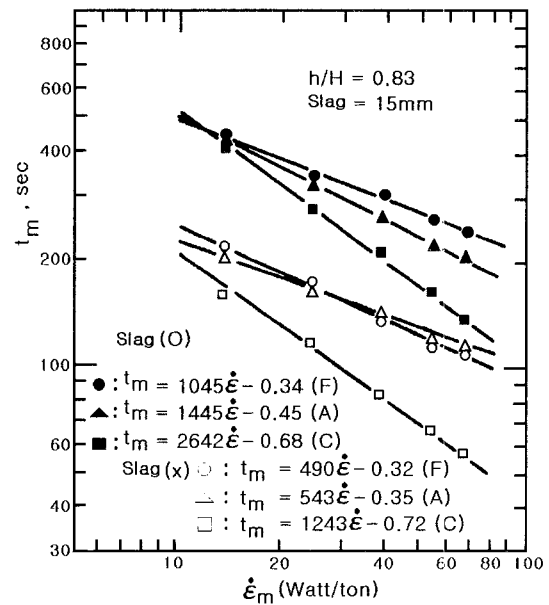


Fig. 10. Relation between mixing time and stirring power of gas.

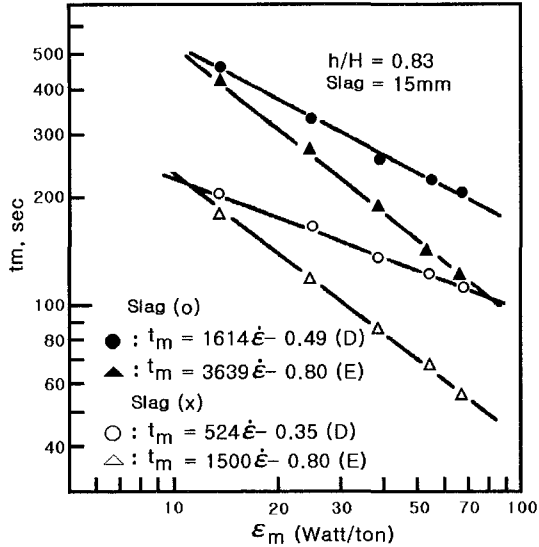


Fig. 11. Relation between mixing time and stirring power of gas.

즉 균일혼합시간은 교반동력의 1/3 곱에 비례한다고 보고하고 있으나 본 실험결과와 비교하여 보면 몇 가지 유사한 경우가 있긴 하나 전반적으로 장치적 인자(노즐 구조, Lance침적깊이)의 영향이 현저하므로 균일혼합시간을 예측하기 위한 관계식도출에는 상술한 인자 외에도 용기의 형상과 크기, 액체의 물리적 특성 등을 포함한 많은 인자들을 충분히 고려해야 할 것으로 사료된다.^{4,13)}

$$t_m \propto L^{\frac{2}{3}} \cdot \epsilon_m^{-\frac{1}{3}} \propto \left[\frac{M_1}{\rho_1} \right]^{\frac{2}{3}} / \epsilon_m^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

3.4. 현장 실험

상기의 수 모델 실험결과 중 비교적 교반특성이 우수 하면서 장치변경이 용이한 (C)형노즐을 현장에서 직접 적용하여 탈황효율에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 12는 평균 [S] ($=([S]_i + [S]_f)/2$)에 대한 탈S 반응에 대한 CaO의 이용효율

$$\left(= 1000 \times 1.75 \times \frac{\Delta[S]}{W} \right)$$

의 변화를 나타낸 것이다.

이때 실험조건은 lance 침적깊이(h/H)는 0.83±0.02로 하였으며 가스유량은 1.5~2 Nm³/min, 탈황제 취입속도는 78~85 kg/min로 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 기존조업(A형)보다 노즐각도를 수평방향으로 30° 회전

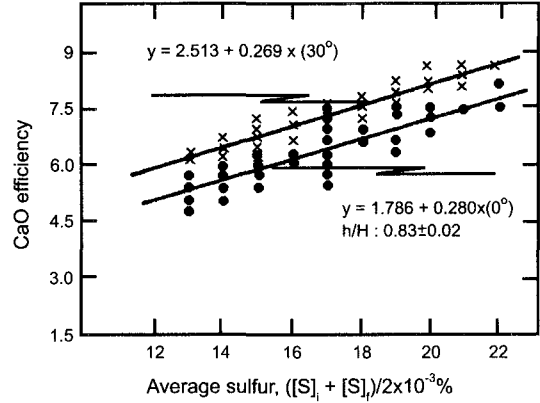


Fig. 12. Relation between CaO efficiency and [S] in pig iron

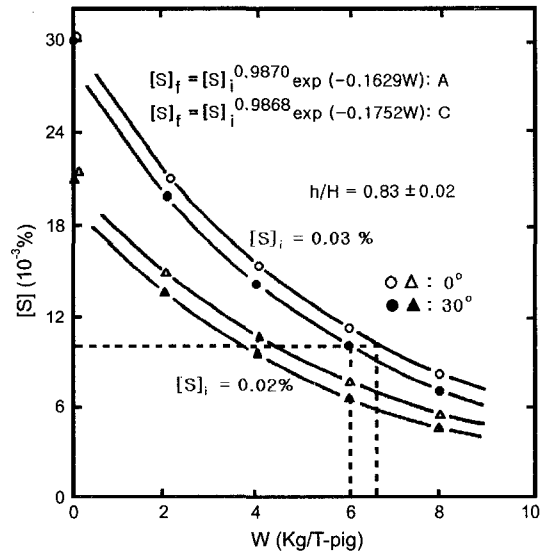


Fig. 13. CaO consumption for desulphurization at different nozzle type.

시킨 경우 (C형)에 탈황반응에 대한 탈황제(CaO)의 이용 효율이 평균 12%정도 향상되는 것으로 나타났다. 일반적으로 용선탈[S]에 영향을 미치는 주요 인자로서는 용선온도(T), [S], [Si]_i, [Mn]_i, 탈황제 원단위(W), 침적비(h/H), 固氣比, flux조성, 고로 slag혼입량 등으로 알려져 있으나 W와 [S]_i에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 이와 같은 것을 고려하여 $[S]_f = [S]_i \cdot \exp(-kW)$ 의 관계식으로부터 초기 [S]_i가 0.02%와 0.03%인 경우만을 이용하여 기울기값을 분석해본 결과 Fig. 13과 같이 나타났다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 A, C형에서의 k값은 각각 0.1629와 0.1752

로 나타났다. 따라서 [S]를 0.01%까지 낮추기 위해서 필요한 CaO의 원단위는 기존 A 형에 비해 C 형의 경우가 약 0.45 kg/T-pig 정도 절감되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 C형의 경우에 CaO 반응효율이 향상되는 현상은 앞장에서 설명된 모델실험 결과와 잘 일치하였다.

4. 결 론

수모델실험과 그 결과를 이용한 현장적용실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ladle내 욕의 균일혼합시간은 Lance 침적깊이와 유량을 증가시키므로써 단축되었으며 lance 침적비 (h/H)를 0.67 이상으로 유지하는 것이 요망된다.
2. Ladle과 lance 노즐과의 상대적인 위치를 비대칭으로 해줌으로써 욕의 균일 혼합시간이 단축되었으며 ladle 중심축에서 수평각도 30° 회전시킨 2공 노즐(C 형)과 하향 30° 노즐을 수평각도 30° 회전시킨 2공 노즐(E 형)의 경우가 가장 우수한 결과를 보였다.
3. 노즐 공수의 증가에 따라 균일혼합시간이 단축되었다.
4. Slag가 욕면에 존재할 경우 균일혼합시간이 2배 이상 길게 나타났다.
5. 교반동력($\dot{\epsilon}_M$)과 균일혼합시간 (t_m)의 상관관계는 nozzle 구조와 slag의 존재여부에 따라 많은 영향이 있는 것으로 나타났다.
6. C형 노즐에 대한 현장적용시험결과 탈황에 대한 기울기가 0.1752로 기존 노즐 A형보다 약 0.12증가하였고, 반응효율이 12% 향상되었다.

사용부호

- C : 가스의 부피분율
 g : 중력가속도
 h : Lance의 침적깊이 [m]
 H : 욕의 깊이 [m]
 L : Ladle 모형 장축 [m]
 M_l : 액체의 질량 [ton]
 n : 기체의 몰수
 N_{Fr} : Froude No.
 P_1 : 취입출구에서의 정압 [atm]
 P_2 : 대기압[atm]
 Q : 취입기체의 체적유량 [Nm^3/sec]

- R : 기체정수 [=8,314.3 j/kmol K]
 V_0 : 기체표준 몰체적 [$22.4 Nm^3/kmol$]
 t_m : 균일혼합시간 [sec]
 $\dot{\epsilon}_M$: 교반동력 [watt/ton]
 ρ_g : 기체밀도 [kg/m^3]
 ρ_l : 액체밀도 [kg/m^3]
 T_0 : 액체의 온도 [K]
 v : 취입기체의 유속 [m/sec]
 X_r : dimensionless horizontal length
 y_r : dimensionless vertical length
 θ_c : jet의 cone 각도
 θ_0 : jet축과의 경사각도

참고문헌

1. 拜田 等 : “川崎製鐵技報” p.1 (1982).
2. 水木榮夫 等 : “製鐵研究” 291, p.1 (1977).
3. Oesters F.: Arch Zisenhutten. 44, p.727 (1973).
4. 森一美 等 : 鐵と鋼 67, p.24 (1981).
5. Carlsson G : Ironmaking & Steelmaking 11(2), p.2 (1984).
6. 松永成徳 等 : 鐵と鋼 69, p.24 (1983).
7. 佐野正道 等 : 鐵と鋼 69, p.24 (1983).
8. 成田 等 : 鐵と鋼 S.125 (1984).
9. 野島二 等 : 鐵と鋼 S.957 (1983).
10. 福次章 等 : 鐵と鋼 S.645 (1979).
11. Bird R.D. : “Transport Phenomena”, p.3 (1960).
12. 淺井滋生 : “西山記念 100, 101回”, p.65 (1981).
13. SANO, M : Trans. ISIJ 23, p.169 (1983).
14. Engh, T.A : Scand. J. Met. 1, p.103 (1972).
15. Szekely, J : “Process Metallurgy”, p.5 (1970).
16. Brimacombe, J.K. : Met. Trans. 5(3), p.763 (1973).
17. Basil, U.N. : Met. Trans, 4(8), p.1887 (1973).
18. Themelis, N.J : Trans. AIME 245(11), p.2425 (1969).
19. 佐野正道 等 : 鐵と鋼 63, p.42 (1977).
20. 山崎勳 等 : 鐵と鋼 S.946 (1983).
21. 金龍植 等 : “研究記報” 7(2), p.197 (1985).
22. 平岡正勝 : “移動 現象論”, p.21 (1970).



朴賢緒

- 1987년 POSCO 기술연구소
- 1992년 독일 Aachen 공대 박사
- 2000년 삼성중공업 중앙연구소 수석연구원
- 현재 전주대학교 환경과학과 교수