

## 용강 중 AI 최대 농도에 대한 AI 드로스 장입 조건의 영향: 전기로 공정 내 화학 에너지 향상을 위한 기반 연구

김규완 · §김선중\*

조선대학교 첨단소재공학과, \*재료공학과

### Influence of Charging Condition of Al-dross on Maximum Concentration of Al in Molten Steel : Fundamental study for improvement of chemical energy in EAF process

Gyu-Wan Kim and §Sun-Joong Kim\*

*Dept. of Advanced Materials Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, KOREA*

*\*Dept. of Materials Engineering & Science, Chosun University, Gwangju 61452, KOREA*

#### 요 약

국내 전기로 공정에서 산화 반응열 및 탄소 연소열 등으로 인한 화학에너지는 전체 투입 에너지 대비 30% 정도로 알려져 있다. 전기로에서 CO<sub>2</sub>를 저감하기 위해서는 전기로 용해 구간 중에 사용되는 전력에너지를 줄이고 화학에너지 사용을 높여야 한다. 일반적으로 용강 중 탄소를 단독으로 투입할 경우, 탄소가 용강에 용해되기 전 낮은 밀도로 인해 슬래그 층으로 부유한다. 용강 중 탄소 농도가 높을 시 취입하는 산소와 용강 중 탄소의 연소반응으로 인해 전력에너지를 낮추며 화학에너지 사용량을 높일 수 있다. 따라서 탄소 연소열의 효율을 높이기 위해서는 용강 중 새로운 탄재 장입 조건이 필요하다. 한편, AI 제련 후의 부산물로 알려져 있는 AI 드로스는 금속성 AI를 25 mass% 이상 함유하고 있으며 AI은 탄소와 비교하여 높은 산화열을 가지고 있다. 그러나 AI 드로스는 재활용이 어려워 거의 매립하고 있으며, AI 드로스 내 AI의 산화열을 효과적으로 활용하기 위해서는 철강 공정 적용에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 화학 에너지의 활용 증대를 위한 기반연구로서, 분코크스와 AI 드로스를 화학에너지 연료로서 활용하여 다양한 배합비 및 반응 온도에서 용강 중 탄소 및 알루미늄의 용해 농도와 용해효율을 조사하였다.

주제어 : AI 드로스, 전기로, 화학에너지, 알루미늄 용해 효율

#### Abstract

In the electric arc furnace process, the chemical energy such as the heat of oxidation reaction and the heat of carbon combustion etc. is consumed as 30% of the total input energy. In order to reduce CO<sub>2</sub> emission in EAF, it is necessary to decrease the use of electric power energy during scrap melting stage and increase the use of chemical energy. In general, when the carbon materials is individually charged into the molten steel, the carbon materials floated to the slag layer due to low density before it is dissolved in molten steel. When the concentration of carbon in the molten steel is high, the combustion energy of carbon by oxygen injection can lower the electric power energy and improve the chemical energy consumption. Therefore, an efficient charging methods of carbon material is required to increase the efficiency of carbon combustion heat. On the other hand, Al-dross, which is known as a by-product after Al smelting, includes over 25 mass% of metallic Al, and the oxidation heats of Al

· Received : June 11, 2019 · Revised : July 22, 2019 · Accepted : July 29, 2019

§ Corresponding Author : Sun-Joong Kim (E-mail : ksjoong@chosun.ac.kr)

Department of Materials Engineering & Science, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

is larger than that of carbon. However, the recycling ratio of Al-dross was very low and is almost landfilled. In order to effectively utilize the heats of oxidation of Al in Al-dross, it is necessary to study the application of Al-dross in the steel process. In this study, the dissolution efficiency of carbon and aluminum in molten steel was investigated by varying the reaction temperature and the mixing ratios of coke and Al-dross.

**Key words :** Al-dross, EAF, Chemical energy, Al dissolution ratio

## 1. 서 론

국내 전기로 회사들은 끊임없는 기술개발로 세계 수준의 전력에너지 효율로 철강 제품을 생산하고 있으나, 최근 CO<sub>2</sub> 배출량의 문제와 함께 전력에너지 사용을 저감할 필요가 있다. 일반적으로 전기로는 전기에너지와 화학에너지를 열에너지로 전환하여 스크랩을 용해하고 정련하는 설비로서 전기에너지를 절감하기 위해서는 화학에너지의 이용효율을 향상할 필요가 있다. 또한, 전기로를 이용한 철강 제조비용 구성은 원료인 스크랩이 52~65%, 전력비 10~18%, 정비비 7~12% 기타 재료비 등으로 구성되어 있으며 전력에너지 절감이 생산 단가에 큰 영향을 미칠 수 있다<sup>1)</sup>. 따라서 전력에너지 절감, CO<sub>2</sub> 배출량 감축, 생산 단가 개선 등을 위하여 산소취입에 의한 산화 반응열을 활용한 화학에너지의 비중을 높일 필요가 있다.

전기로 공정에서 많이 쓰이고 있는 코크스는 80% 이상의 탄소를 함유하고 있다. 기존 전기로 조업에서 탄소 취입은 산소와의 반응으로 슬래그 포밍제로 주로 활용되고 있으며, 슬래그 포밍은 전기 아크에서 용강으로의 열전달을 향상한다. 반면, 전로 공정에서처럼 용강 내 탄소는 산소취입에 의해 발열 반응이 일어남으로서 용강 온도 상승에 효과가 있다. 그러나 탄소는 밀도가 낮고 용점이 매우 높아서 용해 속도가 느리기 때문에 전기로에 단독으로 투입할 경우, 미 반응 탄소가 대량으로 발생한다. 탄소를 효율적으로 용해시키기 위해 투입 방법 및 용해 효율 등에 대한 연구가 필요하다. Cham 등<sup>2)</sup> 보고에서 용강의 온도가 1723, 1823 K일 때, 용강과 코크스의 반응시간에 따른 용강 내 탄소의 농도 및 용해 속도에 대해 조사하였다. 반응 시간이 길어질수록 탄소의 농도가 증가하고 60분 이상이 되었을 때 탄소의 농도가 일정해짐을 보고하였다. Matoba 등<sup>3)</sup> 보고에서 탄소 도가니 내부에 전해철과 흑연을 장입하여 CO가스 분위기, 1609, 1696, 1773, 1863 K에서 각각 평형 실험을 진행하였다. 반응시간 50분 후에 각각 반응 온도에서 평형이 이루어졌음을 보였고, 반응 온

도의 상승과 함께 탄소의 용해도도 증가함을 보고하였다. Kim 등<sup>4)</sup> 보고에서 V, Mo 그리고 Ni를 포함한 용강에서의 탄소의 용해도를 조사하였다. 알루미늄 도가니 내부에 흑연 도가니를 장입하고 그 내부에 바나듐을 27 mass% 함유하고 있는 철을 장입하여 1873 K, 비활성 분위기에서 용융을 진행하였고, 반응 온도가 상승할수록 탄소의 용해도가 증가함을 보고하였다.

그러나 용강 온도를 높이기 위해 분코크스의 산화열만을 활용하면 최종적으로 CO<sub>2</sub> 발생량이 증가함으로써, 본 연구에서는 알루미늄의 산화열을 활용하기 위해 알루미늄 제련의 부산물인 Al 드로스를 주목하였다. Al 드로스의 국내 연간 발생량은 약 6만톤 정도이며, 미국에서는 연간 약 80만 톤 정도 발생된다<sup>5-7)</sup>. 그러나, Al 드로스의 효과적인 재활용 기술이 확립되지 않아서 처리 비용과 시간 때문에 주로 매립되고 있으며, 연간 발생량과 매립에 의한 환경 문제 등을 고려할 경우 많은 연구가 필요하다<sup>8)</sup>. 알루미늄 드로스 발생량의 증가 및 환경오염에 대한 규제가 심해질 것이 예상되기 때문에 국내에서도 알루미늄 드로스의 처리에 관한 연구가 필요하다. 한편, Al 드로스에는 금속성 Al이 약 27 mass% 정도 함유되어 있으며, 알루미늄은 탄소보다 약 3배 높은 산화열을 가지고 있다. Al 드로스 내 금속성 알루미늄의 산화열을 효과적으로 활용할 수 있으면 전기로의 전력에너지를 줄이고 화학에너지의 사용량을 높일 수 있다. 본 연구에서는 화학에너지의 활용 증대를 위한 기반연구로서, 분코크스와 Al 드로스를 혼합하여 다양한 배합 질량비와 반응 온도에 따른 용강 중 탄소 및 알루미늄의 용해 농도와 용해 효율을 조사하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 화학에너지 연료로서 사용하는 분코크스와 Al 제련 후의 부산물로 알려져 있는 Al 드로스를 공업 분석 및 C/S 분석, ICP 분석법을 이용하여 조성을 조사하였다. Table 1, 2에 분코크스와 Al 드로스의 조성을 나타내었다. 본 연구에서 분코크스와 Al 드로스

**Table 1.** Components of Cokes powder

Chemical composition (mass%)			
Moisture	Volatile	Fixed carbon	Ash
0.93	2.1	86.06	10.91

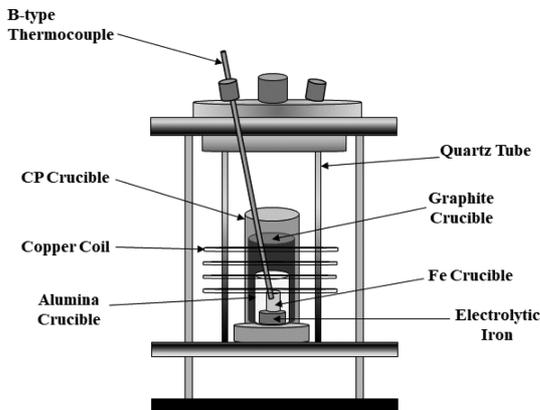
**Table 2.** Compositions of Al-dross through ICP analysis

Chemical composition (mass%)						
Fe	Sn	Al	Ni	Zn	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.156	0.006	27.02	0.002	0.029	7.000	65.783

**Table 3.** Alternative fuel ratio

Alternative fuel	Carbon : Al-dross		
	80 : 20	60 : 40	40 : 60
Ratio (%)			
C/Al	0.4	0.2	0.1

의 용해 실험 절차를 간략하게 소개한다. 화학에너지 연료의 투입 양은 실제 공정을 고려하여 철 스크랩 장입 질량 기준 5 mass%로 산정하였고, 화학에너지 연료의 혼합 비율은 Table 3에 나타내었다. 화학에너지 연료를 Fe 도가니 내에 장입 시, 분코크스의 부유를 고려하여 용해 효율을 높이기 위해 밀도가 낮은 순서대로 장입하였다. 본 연구에서 사용된 철을 용해시키기 위한 유도로는 Fig. 1에 보여주고 있다. 먼저, CP형 도가니 내부에 흑연 도가니를 투입한다. 그 후, 흑연 도가니 내부에 직경 35 mm 알루미늄 도가니를 투입한다. 알루미늄 도가니 하부에 전해철을 장입한 후, 전해철 위에 코크스와 Al 드로스가 장입된 직경 20 mm 철 도가니를 투입



**Fig. 1.** Experimental setup.

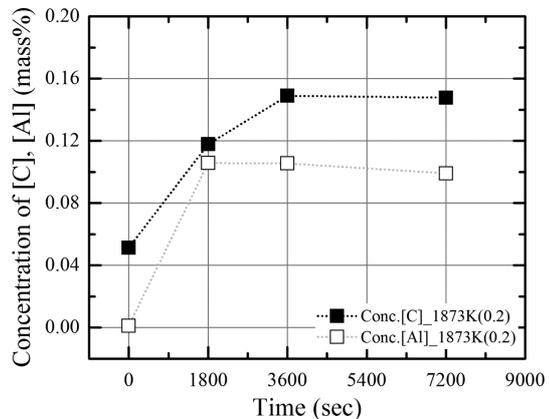
한다. 반응 전 철도가니와 전해철의 무게는 모든 실험에서 동일하게 90 g 정도로 유지하였다. 샘플의 무게를 포함한 알루미늄 도가니의 무게는 반응 전후에 거의 동일하였다. 도가니 및 샘플 장입이 끝난 후, CP 도가니 외부를 분위기 형성 및 승온을 위해 석영관으로 막아준다. 비활성 분위기를 형성하기 위해 석영관 내부를 진공상태로 만들고 Ar 가스 취입을 하는 과정을 총 3회 실시하였다. 반응 시간은 0 ~ 7200초로 진행을 하였고, 반응 온도는 1823, 1873, 1973 K으로 화학에너지 연료의 질량비(C/Al)에 따라 실험을 진행하였다. 실험 후 회수한 샘플은 C/S 분석기와 ICP 분석법을 통하여 용강 내 탄소와 알루미늄의 농도를 측정하고 용해 효율을 산출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 화학에너지의 연료 질량비(C/Al)가 0.2일 때, 용강 온도 1873 K에서 각 반응 시간에 따른 용강 내 탄소와 알루미늄의 농도를 나타냈다. 반응 시간이 증가함에 따라 탄소와 알루미늄의 농도도 증가하였다. 탄소는 3600초, 알루미늄은 1800초 이상이 되었을 때 농도가 일정함을 보였다. 따라서, 탄소와 알루미늄의 최대 용해 효율에 대한 반응 온도 및 배합비를 비교하기 위해서 3600초에서 얻어진 농도를 활용하였다. 용해 효율은 아래의 식으로 계산하였다.

Dissolution ratio of M(%) =

$$\frac{\text{mass\% M} \times \text{mass of Fe}}{\text{Initial mass of M}} \times 100 \quad (1)$$



**Fig. 2.** Concentration changes of C and Al in metal.

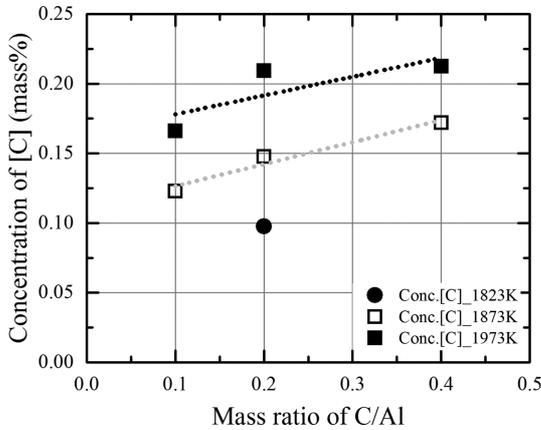


Fig. 3. Concentration changes of carbon in metal as a function of fuel mass ratio.

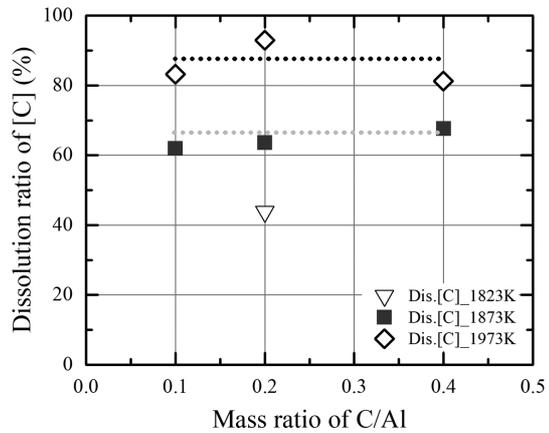


Fig. 5. Dissolution ratio of carbon in metal as a function of fuel mass ratio.

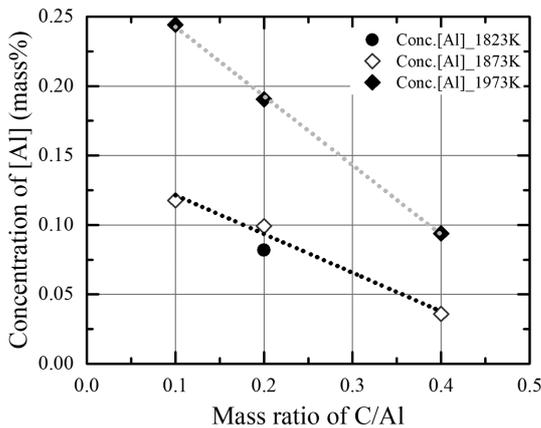


Fig. 4. Concentration changes of Al in metal as a function of fuel mass ratio.

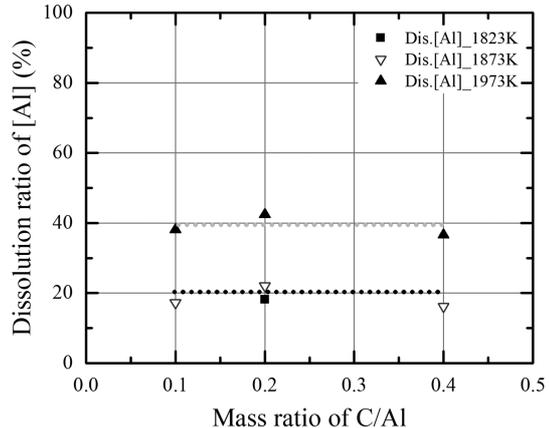


Fig. 6. Dissolution ratio of Al in metal as a function of fuel mass ratio.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 대체 연료내 배합 질량비(C/Al) 변화에 따른 용강 내 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농도를 나타냈다. 먼저, Fig. 3에서 배합 질량비(C/Al)가 증가할수록 탄소 농도가 증가하였다. 또한, 배합 질량비(C/Al)가 0.2일 때, 1823, 1873, 1973 K에서의 용강 내 최대 용해 탄소는 농도는 약 0.17, 0.22, 0.23 mass%로 증가하였다. Fig. 4에서 1873 K의 배합 질량비(C/Al)가 감소할수록 Al의 농도가 증가하였다. 따라서 최대 용해 농도는 장입하는 질량비에 비례함을 알 수 있었다. 또한 질량비(C/Al)가 0.2일 때, 온도가 높을수록 Al의 최대 용해 농도가 증가하였다. 따라서, 장입 화학에너지 연료의 질량비(C/Al)가 증가할수록 용강 내 탄소의 최대 용해 농도는 증가하고,

알루미늄의 최대 용해 농도는 감소함을 보여준다. 일정 온도일 때 질량비(C/Al)는 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농도에 큰 영향을 미친다.

Fig. 5와 Fig. 6은 화학에너지 연료의 배합 질량비(C/Al) 변화에 따른 탄소와 알루미늄의 최대 용해 효율을 각각 나타냈다. 먼저, Fig. 5에서 배합 질량비(C/Al)의 변화에 따른 1823~1973 K에서 탄소의 최대 용해 효율을 보여주나, Fig. 3의 최대 용해 농도와 비교하면, 배합 질량비(C/Al)의 영향은 매우 적으며 최대 용해 효율은 거의 일정하다. 또한, 1823, 1873, 1973 K일 때, 탄소의 최대 용해 효율은 약 42, 62, 85%를 보였다. Fig. 6에서 1873 K에서 알루미늄의 최대 용해 효율의 변화에 대한 배합 질량비(C/Al)의 영향은 거의 없으며,

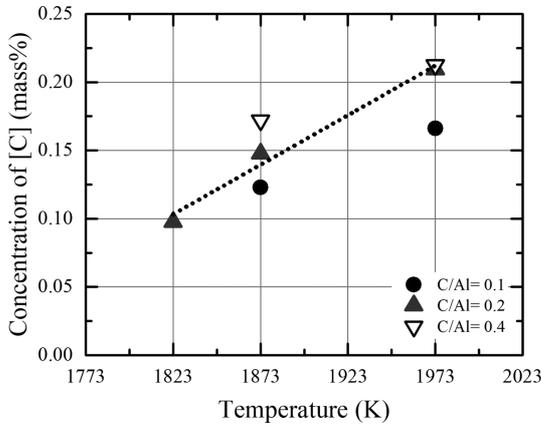


Fig. 7. Concentration changes of carbon in metal as a function of temperature.

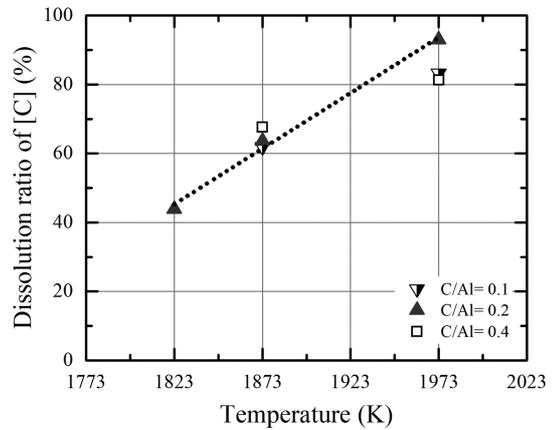


Fig. 9. Dissolution ratio of carbon in metal as a function of temperature.

일정 배합 질량비에서 탄소와 알루미늄의 최대 용해 효율에 미치는 온도는 큰 영향을 미친다고 판단된다.

일정 온도에서 배합 질량비(C/Al)의 변화에 따라 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농도는 변화하였으나, 최대 용해 효율은 거의 일정하였다. 반면에, 일정 배합비에서는 최대 용해 농도와 최대 용해 효율은 온도와 함께 증가하였다. 따라서 용강 내에 화학에너지의 연료의 용해 거동과 최대 용해 효율을 알아보기 위해서는 반응 온도와의 관계를 정리할 필요가 있다. 본 연구에서는 일정 배합 질량비(C/Al)에서 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농도와 효율에 미치는 영향을 Fig. 7~10처럼 평가하였다.

Fig. 7과 Fig. 8는 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농

도에 대한 온도의 영향을 각각 보여준다. 먼저, 일정 배합 질량비의 조건에서 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농도는 반응 온도가 높을수록 증가하며 비례관계를 갖는다. 일정 온도 조건에서 배합 질량비의 영향으로 변화하는 탄소의 최대 용해 농도와 비교하여, 배합 질량비가 0.2이하 일 때, 알루미늄의 최대 용해 농도는 거의 동일 하다고 판단된다. 따라서, 배합 질량비의 적절한 제어와 함께 반응 온도의 상승은 탄소와 알루미늄의 최대 용해 농도를 높일 수 있으며, 아래와 같이 반응 온도와 최대 용해 농도의 관계를 도출하였다.

$$[C\%] = -543.21 + 0.32 \times T(K) \quad (2)$$

$$[Al\%] = -288.19 + 0.17 \times T(K) \quad (3)$$

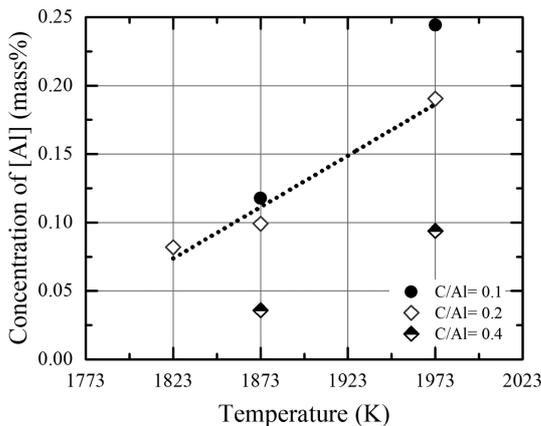


Fig. 8. Concentration changes of Al in metal as a function of temperature.

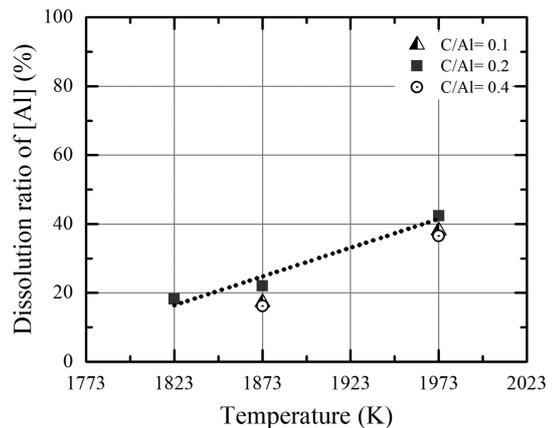


Fig. 10. Dissolution ratio of Al in metal as a function of temperature.

Fig. 9과 Fig. 10은 탄소와 AI의 최대 용해 효율에 대한 반응 온도의 영향을 각각 보여준다. 배합 질량비(C/AI)가 일정할 때, 탄소와 알루미늄의 최대 용해 효율은 온도와 함께 증가하였다. 특히, Fig. 9에서 배합 질량비(C/AI)가 0.2일 때, 탄소의 최대 용해 효율은 1973 K에서 약 85%이며, 다른 두 배합비에서의 최대 용해 효율보다 약 4% 정도 높았다. 1873 K에서는 배합비에 따른 최대 용해 효율의 차이는 약 2% 이하이며 최대 용해 효율이 거의 일정하다고 판단된다. Fig. 10에서처럼 알루미늄의 경우, 배합 질량비(C/AI)가 0.2일 때 1973 K에서 약 40%의 최대 용해 효율을 얻었다. 1873 K에서는 배합비 변화에 따른 최대 용해 효율의 차이는 약 2% 이하였으며 탄소와 동일한 경향을 보여준다. 따라서, 최대 용해 효율에 대한 배합비의 영향은 매우 적다고 판단되며, 아래의 식과 같이 최대 용해 효율과 온도의 관계를 얻었다.

$$\text{Dis rat of [C]} = -1.22 + 0.0007 \times T(K) \quad (4)$$

$$\text{Dis rat of [Al]} = -1.30 + 0.0008 \times T(K) \quad (5)$$

관계식 (4)와 (5)를 통해 1823 ~ 1973 K에서 분코크스 내 탄소 및 AI 드로스 내 알루미늄의 최대 용해 효율을 예측할 수 있으며, 본 연구의 온도 범위는 실 전기로 내의 온도 범위에 유사하다고 판단된다. 향후, 산소 취입 실험을 통해 용강에 함유된 탄소와 알루미늄의 산화열을 이용하여 용강의 온도 변화를 측정하여 전기로의 전력을 절감할 수 있는 연구도 기대할 수 있다.

#### 4. 결 론

AI 제조 부산물인 AI 드로스 내 AI의 산화에너지를 전기로의 화학에너지로서 활용하기 위해 AI 부산물과 분코크스의 혼합 연료를 제작하여 용강 내 용해 효율에 대한 온도와 배합질량비의 영향에 대하여 조사하였다. 용해 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 혼합 연료의 배합 질량비(C/AI)가 일정하고 비활성 분위기 및 1873 K에서 진행한 용해실험을 통하여 탄소 및 알루미늄의 용해 농도는 반응시간과 함께 증가하였으며, 각각 3600초와 1800초부터 일정해지는 것을 알았다.
2. 용해 온도가 일정할 때 혼합 연료의 배합 질량비(C/AI)가 증가할수록 탄소의 최대 용해 농도는 증가하

며 AI의 최대 용해 농도는 감소하였다. 반면에, 일정 용해 농도에서 탄소 및 AI의 최대 용해 효율에 대한 혼합 연료의 배합 질량비(C/AI)의 영향은 거의 없었다. 따라서 AI의 용해 효율은 온도가 높을수록 증가하며, AI의 용해 농도는 일정 온도에서 배합 질량비의 제어를 증가함을 알았다. 또한, 1823 ~ 1973 K에서 탄소 및 AI의 최대 용해 효율 및 최대 용해 농도에 대한 온도의 영향을 관계식을 도출하였다.

본 연구에서 얻어진 관계식으로부터 실제 전기로 내부연료의 장입 조건에서 온도에 따른 최대 용해 농도 및 용해 효율을 예측할 수 있으며, 산소 취입으로 발생하는 용해 탄소와 알루미늄의 산화열을 화학에너지로 활용하여 용강 온도 상승 및 전력에너지 저감을 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20172010106310). 본 연구는 한국중소벤처기업부 산학연협력기술개발사업(No. S2735075)의 지원을 받았습니다.

#### References

1. D.-W. Oh, H. Park, T. Park, and S.-K. Im, 2003 : The Korean institute of Electrical Engineers, 7, pp.71-73.
2. S. T. Cham, R. Sakurovs, H. Sun, and V. Sahajwalla, 2006 : ISIJ International, 46(5), pp.652-659.
3. S. Matoba and S. Ban-ya, 1957 : Testu-to-Hagane, 43(8), pp.790-796.
4. D.-H. Kim, M.-K. Paek, T.-J. Kim, S.-Y. Won, and J.-J. Pak, 2014 : The Japan Institute of Metals and Materials, 55(3), pp.610-615.
5. G. J. Kulik and J. C. Daley, 1990 : In Second International Symposium-Recycling of Metals and Engineered Materials, pp.427-438.
6. J. M. Cassells, P. A. Rusin, T. L. Young, and M. G. Greene, 1993 : LIGHT METALS-WARRENDALE-, pp.1075.
7. H. Park, H. Lee, and J. Lee, 2003 : Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 12(3), pp.46-53.
8. H. Park, H. Lee, J. Kim, and E. Yoon, 1996 : J. of Korean Institute of Resources Recycling, 5(1), pp.14-20.

## 김 규 완

- 조선대학교 재료공학과 공학사
- 조선대학교 첨단재료공학과 석사과정



## 김 선 중

- 일본 東北大學 공학연구과 석/박사
- 현재 조선대학교 재료공학과 조교수
- 당 학회지 제28권 3호 참조

《광 고》 本學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- \* EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원  
(The 2th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- \* 학회지 합본집 I~X 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)  
(I: 통권 제1호~제10호, II: 통권 제11호~제20호, III: 통권 제21호~제30호, IV: 통권 제31~제40호,  
V: 통권 제41호~제50호, VI: 통권 제51호~제62호, VII: 통권 제63호~제74호, VIII: 통권 제75호~제86호  
IX: 통권 제87호~제98호, X: 통권 제99호~제110호)
- \* 한·일자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- \* 한·미자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- \* 자원리사이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- \* '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價格 : 15,000원
- \* 日本의 리사이클링 産業(1998년 1월) 395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
- \* EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價格 : 100,000원  
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 오재현의 자동차 리사이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價格 : 15,000원, 발행처-文知社
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2004년) 578쪽, 價格 : 27,000원, 발행처-淸文閣
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2009년) 592쪽, 價格 : 30,000원, 발행처-淸文閣
- \* EARTH 2009 Proceeding (2009) 911쪽, 價格 : 100,000원  
(The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2014년) 435쪽, 價格 : 35,000원, 발행처-S&M미디어(주)