

## AOD공정으로 재활용된 니켈합금의 산소주입량에 따른 조직과 기계적 성질 변화

이덕희 · \*우기도\* · 강황진\*\* · \*윤진호

고등기술연구원 신소재공정센터, \*전북대학교 신소재공학부, \*\* (주)NIB

### Effect of Oxygen Injection on Microstructure and Mechanical Properties of Ni-based Superalloy Recycled by AOD Process

Duk-Hee Lee, \*Kee-Do Woo\*, Whang-Jin Kang\*\* and \*Jin-Ho Yoon

Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, Gyeonggi-do 449-863, Korea  
\*Division of Advanced Materials Engineering & RCAMD, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea.  
\*\*NIB Materials Co. Ltd., Jeonbuk 561-330, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 Inconel 713C 스크랩을 원료로 아르곤-산소 탈탄 공정을 이용하여 니켈계 초내열합금을 재활용 하였다. 아르곤-산소 탈탄 공정에서 아르곤은 1,000 sccm으로 지속적으로 주입되었고 산소는 100, 250, 500 sccm의 유량으로 10, 20, 30 분씩 주입되었다. 산소 주입 초기 단계에서는 산소 양이 증가하면서 Al, Cr, 및 Mo 함량은 증가하였고 탄소 함량은 감소하였다. 그리고 Al 함유량은 탄소의 반응이 끝난 후 Al, Cr 등의 원소와 산화가 일어났기 때문에 첨가원소와 탄소의 반응에 의해 감소하였다. 결과적으로, Al 함유량이 감소하였기 때문에  $\gamma'$ 상이 줄어들었으며 이는 Al이  $\gamma'$ 을 형성하는 주요 원소이기 때문이다. 또한, 탄소의 양이 줄어들면서 탄화물도 줄어들었으며 산소가 과잉 공급된 시료의 기계적인 물성(강도, 경도 등)은 감소하게 된다.

**주제어** : 니켈계 초내열 합금, 스크랩, 재활용, AOD 공정, 산소 주입

#### Abstract

In this study, the Ni base superalloy was recycled by Argon oxygen decarburization(AOD) process using an inconel 713C scrap. During AOD process, argon gas was continuously injected 1,000 sccm and oxygen gas was injected into 10, 20 and 30 minutes of 100, 250 and 500 sccm.. In early stage of oxygen injection, the oxygen dose increased with increasing Al, Cr, and Mo content and decreasing C content. And Al content was decreased by carburization with added elements in late stage Because of oxidation was occurred with Al, Cr etc. after the reaction of carbon has been finished. From the results, the ratio of  $\gamma'$  phase reduced due to decreasing of Al content for that reason Al is the main element to form the  $\gamma'$  phase. Also carbide reduced owing to decreasing of C content so the mechanical properties of the specimens excessively injected by excess  $O_2$  gas were decreased.

**Key words** : Ni base superalloy, scrap, recycle, AOD process, oxygen injection

· Received : January 22, 2016 · Revised : February 22, 2016 · Accepted : March 9, 2016

\*Corresponding Author : Jin-Ho Yoon (E-mail : yjh6373@iae.re.kr) / Kee-Do Woo (E-mail : kdwoo@jbnu.ac.kr)

Department of Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, 51 Goan-ro, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Youngin-si, Gyeonggi-do, 17180, Korea / Division of Advanced Materials Engineering & RCAMD, Chonbuk National University, 567, Baekje-daro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54896, 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.

## 1. 서 론

현재 자동차 터보차저의 터빈휠, 웨이스트 게이트 벨트, 가스터빈, 항공기 엔진 등의 핵심 부품으로 이용되는 니켈계 초내열 합금에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다. 그러나, 수요가 증가한 만큼 발생하는 폐기물 및 스크랩이 많이 발생하고 있고 기본 소재인 니켈합금은 대부분 수입에 의해 공급되고 있어 자원 재활용에 대한 관심과 필요성이 커지고 있다<sup>1-5)</sup>.

일반적으로 니켈계 초내열 합금은 모상인  $\gamma$ 상, 석출상인  $\gamma'$ 상, 탄화물의 분율 및 분포에 의해 기계적 성질을 좌우된다<sup>6,7)</sup>. 이러한 탄화물과  $\gamma'$ 상의 분율은 C와  $\gamma'$ 을 구성하는 Al의 조성에 의하여 결정되며 MC,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  등이 주요 탄화물로 알려져 있다. 이러한 탄화물은 결정립계에 석출하게 되어 결정립계의 sliding을 억제하고 고온 크리프(creep) 특성을 비롯한 기계적 특성을 개선하지만 용접이나 기타 열처리에 의해 탄화물 양이 증가하거나 결정립계가 연속적으로 생성되었을 경우 균열이 쉽게 발생하게 된다<sup>8)</sup>. 이러한 원인을 해결하기 위해서는 적정량의 탄소첨가 및 Ni base superalloy의 기계적 성질을 좌우하는  $\gamma'$ 상의 구성이 필요하다<sup>3,9)</sup>.

주로, 산소분위기에서 실시하는 주조공법은 일정한 탄소 양을 가지는 제품의 제조가 어렵기 때문에 많은 연구자들은 산소와의 반응을 최소화하기 위하여 vacuum oxygen decarburization(VOD) 공정으로 니켈계 초내열 합금을 제조하여 그에 따른 특성 및 석출물의 거동을 분석 및 확인하고 있다. 하지만 VOD 공법은 물질의 산화를 억제하기에는 용이하나 다량의 첨가물이 혼입되거나 기계적 특성에 악영향을 끼치는 불순물이 다량 첨가된 경우에는 이들의 제거가 어려운 단점이 있다. 현재, 주조 후 제거되는 런너(Runner)나 재사용된 제품(scrap)을 활용하고 불순물 제거 및 조성을 조절하기 위하여 argon oxygen decarburization (AOD) 공정으로 제조한 니켈계 초내열 합금에 대한 연구도 이루어지고 있다<sup>10)</sup>. 그러나 산소( $O_2$ ) 및 합금 성분 반응에 따른 석출물의 거동에 대한 연구는 매우 적은 실정이다.

본 연구에서는 Inconel 713C 니켈 합금 스크랩을 원료로 하고 AOD 공정으로 재활용된 시편의  $\gamma'$  석출상의 분석 및 각 시편의 위치별 원소 분석을 통해 주입된 산소의 영향을 조사하였으며, 경도 및 강도 측정을 통하여 산소 주입량에 따른 제조된 시편의 기계적 성질을 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

Fig. 1는 용해로의 모식도를 나타내고 있다. Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 2중의 도가니 중 흑연도가니는 유도코일에 의해 가열되고 열에 의한 C가 시료 쪽으로 확산을 억제하기 위하여 내부에 알루미늄 도가니를 사용하여 스크랩을 용융시켰으며 산소를 공급시키는 주입장치(lancing port)를 용탕 내부에 설치하여  $O_2$ 를 주입하였다. 300 g의 터빈휠 스크랩을 전처리 공정을 통해 스크랩 표면에 존재하는 불순물을 제거하였으며 건조된 스크랩은 도가니에 장입하였다. 유도 가열로를 이용한 열처리 순서는 10 kW에서 10 분간 예비 가열하여 도가니의 열충격을 방지하고자 하였으며, 20 kW에서 20 분간 가열하여 스크랩을 용해시켰는데 이때 챔버에 Ar을 1,000 sccm 지속적으로 주입하면서  $O_2$ 의 주입량과 시간을 변화시키면서 용해 반응을 진행하였다. 실험에서 주입한 산소의 양은 100, 250, 500 sccm이었으며 주입시간은 각각의 주입량에서 10, 20 30 분 동안 주입하였다. 이와 같이 AOD 공법으로 재활용된 니켈계 합금은 중심부에서 시편을 채취하여 XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF-1800, Shimadzu), 탄소분석기(Leco-CS600), 산소분석기(Leco-ONH836)를 이용한 물성을 분석을 진행하였다. 미세조직을 관찰하기 위하여 기계적인 연마( $0.04 \mu m$  실리카)를 실시하고 Marble's reagent (Distilled water + HCl +  $CuSO_4$  powder)용액을 이용한 화학적 부식을 실시한 다음에 10 V, 2 A의 전해 조건에서 전해연마(전해액:  $C_2H_5OH + C_2H_5COOH + HNO_3$ )를 실시하였다. 또한 시편들의 기계적 성질을 분석하기 위하여 로크웰 경도기와 인장시험기를 이용하여 경도 및 강도를 측정하였다.

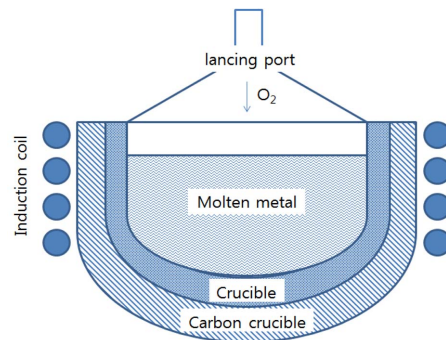


Fig. 1. Schematic illustration of AOD melting furnace.

**Table 1.** The chemical compositions of IN 713C ingot manufactured by AOD method

	Ar (1,000)	Ar+O <sub>2</sub> (100-10)	Ar+O <sub>2</sub> (100-20)	Ar+O <sub>2</sub> (100-30)	Ar+O <sub>2</sub> (250-10)	Ar+O <sub>2</sub> (250-20)	Ar+O <sub>2</sub> (250-30)	Ar+O <sub>2</sub> (500-10)	Ar+O <sub>2</sub> (500-20)	Ar+O <sub>2</sub> (500-30)
Ni	68.375	67.900	67.612	67.231	68.977	69.015	69.208	68.733	69.121	69.930
Cr	15.093	14.535	15.164	15.168	14.863	15.089	15.248	15.478	15.371	15.536
Al	6.101	4.876	6.820	7.265	6.548	6.070	5.412	5.931	5.267	4.186
Mo	4.547	4.725	4.517	4.420	4.664	4.506	4.488	4.557	4.451	4.608
Nb	2.276	2.346	2.218	2.312	2.320	2.291	2.315	2.321	2.392	2.333
Fe	1.984	2.307	2.206	2.286	1.550	1.767	1.999	2.028	2.137	2.112
Ti	0.768	0.912	1.022	0.975	0.848	0.901	0.949	0.954	1.017	0.885
Si	0.292	1.312	0.344	0.264	0.132	0.241	0.277		0.159	0.306
Ca	0.332	0.892								
Zr	0.087		0.098		0.098	0.120	0.104		0.085	0.103
Cl	0.146									
Cu		0.114								
K		0.082								
P				0.080						

### 3. 결과 및 고찰

Table 1은 XRF를 이용하여 주조된 시편의 원소를 분석한 결과를 나타내고 있다. 모든 조건에서 혼합된 가스를 주입하였을 때 Cr, Mo, Nb의 조성은 큰 변화가 없었다. 그러나 100 sccm의 조건에서 주입 시간이 증가함에 따라 Al의 조성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Si, Ca, Cu 및 K 등의 원소가 산화되면서 슬래그에 포함되어 Al의 상대적인 조성비가 증가한 것으로 판단된다. 반면에 산소 주입량이 100 sccm보다 많은 조건에서는 산소 주입량-시간이 증가함에 따라 Al의 조성이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 산소가 많은 경우에 Al이 감소하는 원인은 전산 모사(HSC chemistry)를 통해서 계산된 Table 2와 Table 3에서 나타낸 바와 같이 Gibbs free energy에 따른 첨가된 원소의 산화와 환원 반응 결과로 인해 이루어진 것으로 판단된다. Table 2에서 보듯이, 탄화물의 경우에는 산소가 주입됨에 따라 C의 산화가 이루어지며 첨가원소가 환원되는 반응이 일어난다. 하지만 산소의 과다 주입으로 인하여 첨가원소가 산화되었을 경우에는 Table 3에서와 같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 제외한 첨가원소가 C에 의하여 환원반응이 일어나는 반면에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 Gibbs free energy가 안정하여 환원이 일어나지 않고 슬래그에 함유되어 Al의 조성이 감소되는 것으로 예상된다.

**Table 2.** The decarbonizing equation and Gibbs free energy of carbides

Decarbonizing of Al carbide	$2Al_4C_3 + 3O_2(g) = 8Al + 6CO(g)$
	$\Delta G : -333.545 \text{ kcal}$
	$Al_4C_3 + 3O_2(g) = 4Al + 3CO_2(g)$
Decarbonizing of Ni carbide	$2Ni_3C + O_2(g) = 6Ni + 2CO(g)$
	$\Delta G : -144.947 \text{ kcal}$
	$Ni_3C + O_2(g) = 3Ni + CO_2(g)$
Decarbonizing of Mo carbide	$2MoC + O_2(g) = 2Mo + 2CO(g)$
	$\Delta G : -111.805 \text{ kcal}$
	$MoC + O_2(g) = Mo + CO_2(g)$
Decarbonizing of Cr carbide	$Cr_3C_2 + O_2(g) = 3Cr + 2CO(g)$
	$\Delta G : -98.816 \text{ kcal}$
	$Cr_3C_2 + 2O_2(g) = 3Cr + 2CO_2(g)$
Decarbonizing of Nb carbide	$2NbC + O_2(g) = 2Nb + 2CO(g)$
	$\Delta G : -62.086 \text{ kcal}$
	$NbC + O_2(g) = Nb + CO_2(g)$
	$\Delta G : -62.963 \text{ kcal}$

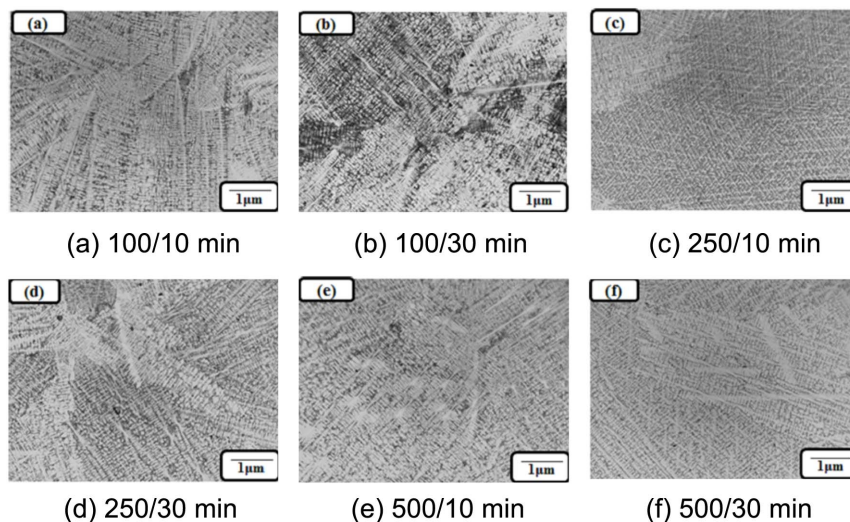
**Table 3.** The reaction equation and Gibbs free energy of oxide and carbon

Reaction of Mo oxide and carbon	$\text{MoO}_3 + 3\text{C} = \text{Mo} + 3\text{CO}(\text{g})$
	$\Delta G : -102.705 \text{ kcal}$
Reaction of Mo oxide and carbon	$2\text{MoO}_3 + 3\text{C} = 2\text{Mo} + 3\text{CO}_2(\text{g})$
	$\Delta G : -112.769 \text{ kcal}$
Reaction of Ni oxide and carbon	$\text{NiO} + \text{C} = \text{Ni} + \text{CO}(\text{g})$
	$\Delta G : -42.092 \text{ kcal}$
Reaction of Ni oxide and carbon	$2\text{NiO} + \text{C} = 2\text{Ni} + \text{CO}_2(\text{g})$
	$\Delta G : -53.303 \text{ kcal}$
Reaction of Nb oxide and carbon	$\text{Nb}_2\text{O}_5 + 5\text{C} = 2\text{Nb} + 5\text{CO}(\text{g})$
	$\Delta G : -35.174 \text{ kcal}$
Reaction of Nb oxide and carbon	$2\text{Nb}_2\text{O}_5 + 5\text{C} = 4\text{Nb} + 5\text{CO}_2(\text{g})$
	$\Delta G : 84.054 \text{ kcal}$
Reaction of Cr oxide and carbon	$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Cr} + 3\text{CO}(\text{g})$
	$\Delta G : -23.304 \text{ kcal}$
Reaction of Cr oxide and carbon	$2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 4\text{Cr} + 3\text{CO}_2(\text{g})$
	$\Delta G : 46.033 \text{ kcal}$
Reaction of Al oxide and carbon	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Al} + 3\text{CO}(\text{g})$
	$\Delta G : 79.982 \text{ kcal}$
Reaction of Al oxide and carbon	$2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 4\text{Al} + 3\text{CO}_2(\text{g})$
	$\Delta G : 252.605 \text{ kcal}$

Fig. 2는 주조된 각 시편의 광학현미경 사진을 보여 주고 있다. 광학현미경에서 수지상의 크기는 산소 주입량 및 주입 시간에 따라 변화가 거의 없는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 가스의 주입이 직접적인 냉각 속도에는 영향을 미치지 못하지만 주입 후 안정화를 위해 유지 시간 및 응고가 진행됨에 따라 주입된 가스 중 용탕에 잔존하던 산소가 시료와의 반응, 방출되는 동일한 현상이 일어나게 되어 크기가 유사하고 균일한 수지상정 조직을 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 주조된 시편의 조직을 주사전자현미경으로 관찰 한 것이다. 산소 첨가량이 100 sccm/30 min에서 500 sccm/30 min으로 증가할수록  $\gamma'$ 상의 크기는 89.7 nm에서 42.1 nm로 감소하였으며 이와 함께  $\gamma'$ 상의 전체적인 분율도 57.55%에서 24.59%로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 산소에 의한 첨가원소 양의 변화에 따른 것으로 판단되며  $\gamma'$ 상의 정량적인 크기와 분율은 Table 4에 나타내었으며 재활용 되기 전인 Inconel 713C 스크랩보다 매우 미세한  $\gamma'$ 상이 생성된 것을 확인할 수 있다. 이는 주입된 가스에 의해 화학적인 반응과 가스의 방출로 인하여 냉각속도가 증가되고 산소의 방출이 증가함에 따라  $\gamma'$ 상이 미세화된 결과로 판단된다.

Fig. 4는 주조된 시편의 경도를 측정된 결과를 보여 주고 있다. 경도 측정 결과는 조직사진 관찰 결과에서 예상할 수 있듯이 100 sccm의 주입 조건 외에는 전체적인 산소량이 증가함에 따라 경도가 하락하는 것을 확

**Fig. 2.** The optical microscope images of IN 713C ingot by AOD.

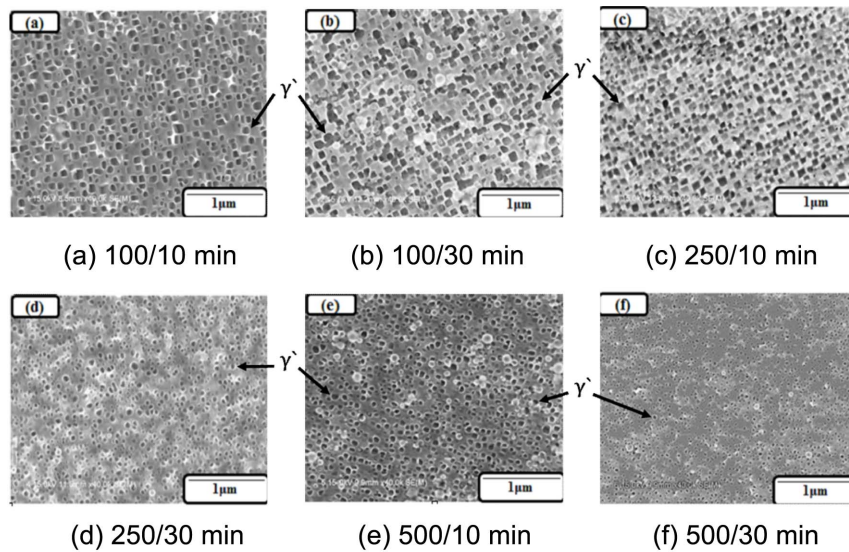


Fig. 3. The SEM microscope images of IN 713C ingot by AOD.

Table 4. The size and ratio of  $\gamma'$  phase in IN 713C ingot fabricated by AOD

	Virgin	100/10 min	100/30 min	250/10 min	250/30 min	500/10 min	500/30 min
Size (nm)	249	93.6	89.7	86.2	73.3	82.4	42.1
Ratio (%)	59.5	57.1	57.55	63.03	59.2	53.2	24.59

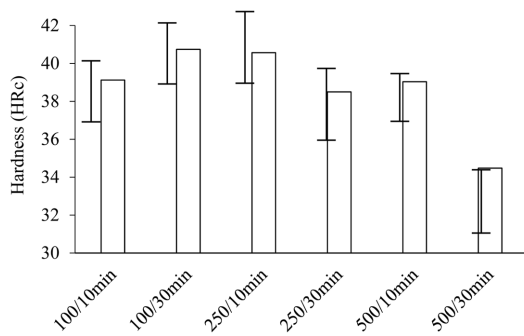


Fig. 4. Hardness of IN 713C specimens manufactured by AOD method.

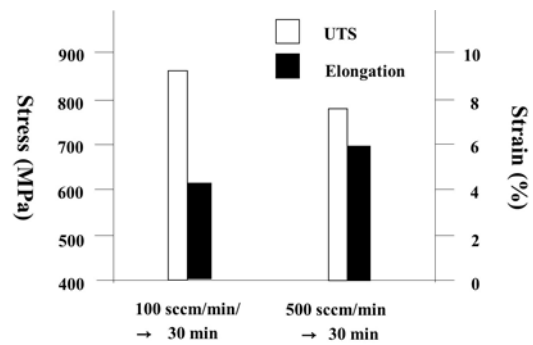


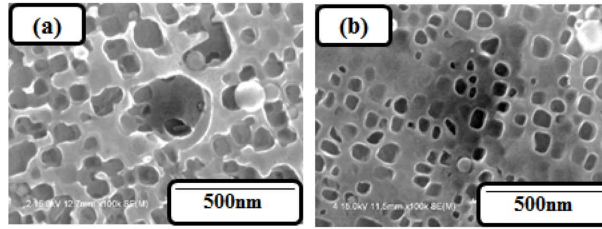
Fig. 5. The tensile properties of IN 713C specimens (100/30min & 500/30min).

인할 수 있다. 이러한 결과는 위에서 언급한 내용과 같이 산소에 의한 산화, 환원 반응으로 인하여  $\gamma'$ 상을 이루고 있는 원소인 Al 양이 감소하고 C가 산소와 반응하여 전체적인 탄화물이 감소하였으며 기존 결과에서 보듯이 산소주입량에 따라 기타 첨가물의 함유량이 변화되었기 때문에 Ni기 초내열 합금의 주 강화상인  $\gamma'$ 상 및 탄화물 양이 감소하여 경도가 감소된 것으로

판단된다.

Fig. 5는 각각 100 sccm과 500 sccm의 산소 주입량 조건에서 30분간 유지하여 제조된 시편의 인장특성을 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 100 sccm의 조건에서 제조된 시편이 500 sccm의 조건에서 제조된 시편보다 높은 인장강도를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 경도 실험의 결과와 마찬가지로





Elements (wt%)	250 sccm/10min		500 sccm/10min	
	Pin hole	Matrix	Pin hole	Matrix
Ni	77.13	78.15	73.74	77.85
Cr	18.04	17.05	22.11	17.52
Al	4.83	4.8	4.15	4.63

Fig. 6. SEM images and EDX results of pin hole formed by injected oxygen (a) 250 sccm, (b) 500 sccm.

500 sccm의 조건에서 제조된 시편에서 100 sccm의 조건에서 제조된 시편보다  $\gamma'$ 상과 탄화물의 양이 감소하여 인장강도가 감소한 것으로 사료되며 강화상이 감소하고 전체적인 첨가물의 함유량이 감소하여 산소의 주입량이 높은 500 sccm의 조건에서 연신율이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 혼합 기체 내에 산소의 주입량이 250, 500 sccm의 조건에서 10 분간 혼합 기체를 주입하여 주조한 시편의 pin hole 이미지와 Ni, Cr, Al의 원소 검출 결과를 보여주고 있다. 산소의 주입량이 250 sccm의 조건에서는 pin hole 영역과 기지영역에서 Al 원소의 분포량은 유사하며 AOD 공정의 주요 반응인 C가 산화되어 Ni 원소만 미소하게 증가하는 것으로 판단된다. 그 반면에 산소의 주입량이 500 sccm의 조건에서는 C가 산소에 의하여 산화되어 CO 혹은 CO<sub>2</sub> 기체로 방출되고 Al 원소가 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화되어 slag에 포함되면서 Al의 원소가 기지보다 감소되는 것을 확인할 수 있다.

위와 같은 산소 주입에 따른 반응에 대한 모식도를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에서 나타낸 것과 같이 산소가 주입되지 않았을 경우에는 강화상의 원소인 Al과 탄화물의 생성에 필요한 C가 표면과 내부에 균일하게 분포되어 있다. 하지만 Fig. 7(b)에서와 같이 산소가 주입되어 반응을 시작하는 초기에는 산소와 C가 반응하여 CO 및 CO<sub>2</sub>가 형성되어 외부로 방출되게 된다. 또한, Fig. 7(c)와 같이 산소의 과다 주입 혹은 주입 시간이 증가할 경우, pin hole에서 산소와의 반응으로 인하여  $\gamma'$ 상을 구성하는 Al 원소가 산화에 의하여 감

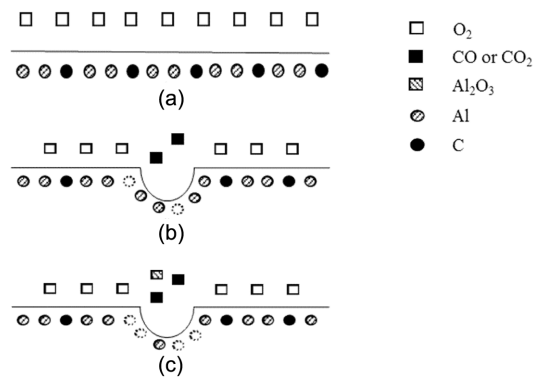


Fig. 7. Schematic illustration of reaction matrix elements such as Al, C with O<sub>2</sub> (a) before O<sub>2</sub> injection, (b) the early stage of reaction and (c) the late stage of reaction.

소되어  $\gamma'$ 상이 분율이 감소하므로 기계적 성질 즉, 경도가 감소하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

Inconel 713C 스크랩을 AOD 공정을 이용하여 재활용된 니켈계 초내열 합금의 산소 분압과 주입 시간에 따른 주조 시편의 미세조직 및 기계적 성질을 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. AOD 공법을 통하여 C의 산화 즉, 탄화물의 환원 반응을 이용하여 첨가 원소들의 탄화물 제어가 가능한

것을 확인할 수 있었다.

2. 25%의 산소 분압 즉, 250 sccm 이상의 산소 주입량의 조건에서 주조된 시편은 산소 주입량과 주입 시간이 증가할수록 경도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 산소 주입량에 의하여 Al이 산화되면서  $\gamma'$ 상 분율의 감소에 기인된다고 판단된다.

3. AOD 공정을 통하여 Inconel 713C 스크랩을 재활용하여 니켈계 초내열 합금을 제조 시 전체적인 산소의 주입량이  $\gamma'$ 상의 분율 즉, 기계적 성질을 좌우하는 중요한 인자로 된다고 사료된다.

### References

1. Park, H. K, Shin, H. D., 2009 : "Current Status on the Recycling of Domestic Nonferrous Metal Scraps", *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, Vol. 18, pp. 52-57.
2. Binczyk, F., Śleziona, J., 2010 : "Effect of modification on the mechanical properties of IN-713C alloy", *Archives of Foundry Eng.*, Vol. 10, pp. 195-198.
3. Mousavizade, S. M. et al., 2009 : "Effect of severe plastic deformation on grain boundary liquation of a nickel-base superalloy", *Script. Mater.*, Vol. 60, pp. 244-247.
4. Takahashi, A., Kawanabe, M. and Ghoniem, N. M., 2010 : " $\gamma$ -precipitate strengthening in nickel-based superalloys", *Phil. Mag.*, Vol. 90, pp. 3767-3786.
5. Lachowicz, M. B., Faryna, M., Podrez-Radziszewska, M., 2011 : "Grain size reduction in the 713C nickel super alloy as a result of heat treatment", *Archives of Foundry Eng.*, Vol. 11, pp. 143-148.
6. Yoo, K. K. et al., 2008 : "Separation of Ni and Fe from  $H_2SO_4$  leaching solution of scrapped Fe-Ni alloy", *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, Vol. 17, pp. 80-87.
7. Binczyk, F., Śleziona, J., 2009 : "Macro- and micro-hardness of IN-713C nickel superalloy constituents", *Archives of Foundry Eng.*, Vol. 9, pp. 9-12.
8. Maccagno, T. M. et al., 1990 : "Microstructure, creep properties, and rejuvenation of service-exposed alloy 713C turbine blades", *Metall. Trans. A*, Vol. 21, pp. 3115-3125.
9. Chaturvedi, M. C., Han, Y. F., 1983 : "Strengthening mechanisms in Inconel 718 superalloy", *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 145-149.
10. de Barbadillo, J. J., 1983 : "Nickel-Base Superalloys; Physical Metallurgy of Recycling", *Metall. Trans. A*, Vol. 14, pp. 329-341.



이 덕 희

- 아주대학교 에너지시스템학과 석사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 연구원



우 기 도

- 경북대학교 금속공학과 공학박사
- 현재 전북대학교 신소재공학부 교수



강 황 진

- Tohoku University, Material Processing 공학박사
- 현재 (주)엔아이비 대표이사



윤 진 호

- 서울시립대학교 신소재공학과 공학박사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 선임연구원