철광석의 역학적 특성 평가에 관한 연구

김재명 · 김찬욱* · *석한길**

(주)포스코애포텍, *포항산업과학연구원, **강원대학교

A Study on the Evaluation of Mechanical Characteristics of Iron Ores

Jae Myung Kim, Chan Wook Kim* and *Han Gil Suk**

Posco m-tech institute of technology

**Research Institute of Industrial Science & Technology*

***Kangwon National University*

요 약

본 연구에서는 자원고갈에 따른 철광석의 자원화 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 Fe함량이 각각 64%(A광석)와 57%(B광석)인 Fe품위를 갖는 2종의 철광석 시료를 대상으로, 광석의 파쇄거동 특성 및 조직학적 측면에서 비교분석을 통하여 광종별 품위향상 가능성을 알아보고자 하였다. SEM 분석결과, 철광석 A의 경우 철산화물과 맥석이 분리된 형태로 분포되어 있으며, B광석의 경우는 철산화물과 맥석이 혼재되어 분포되어 있었다. 이는 B광석에 비해 A광석이 분쇄에 의한 단체분리가 보다 용이함을 의미한다. 따라서 A광석은 적절한 입도로 분쇄 후 자력선별 등에 의한 품위 향상이 가능할 것으로 판단된다. 반면 B광석은 단체분리를 위하여 A광석보다 미립으로 분쇄하여야 할 것으로 판단되나, 열처리 전 62~68% Fe조성이 열처리 후 약 81%로 증가하는 경향을 보여, 열처리를 적용한 품위 향상이 가능할 것으로 사료된다.

주제어 : 저품위 철광석, 단체분리, 광물학적 특성, 열처리

Abstract

The objective of this study is to investigate the possibility of beneficiation of low grade iron ore. Iron ore A might be upgraded by the mineral liberation effect, while iron ore B was expected to be difficult to upgrade. However, the Fe contents of iron ore B were increased from 68% to 81% by the heat treatment process. Iron ore A was found to possibly enrich the Fe components through the physical separation process, such as magnetic separation, floatation and gravity concentration. In the case of iron ore B, it was possible to concentrate the Fe components through the heat treatment process.

Key words : Low-grade iron ores, Liberation, Mineralogical Characteristics, Heat treatment

· Received : February 24, 2014 · 1st Revised : April 30, 2014 · 2nd Revised : July 14, 2014 · Accepted : July 30, 2014

*Corresponding Author : Han Gil Suk (E-mail : hgsuk@kangwon.ac.kr)

Materials and Metallurgical Engineering, kangwon National University, 346 Joongang-ro Samcheok-si, Gangwondo, 245-711 Korea

Tel : +82-33-570-6415 / Fax : +82-33-573-6409

©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

철은 제철, 제강의 주원료로 산소, 규소, 알루미늄 다음인 4번째로 풍부한 지구구성원소로서 지각의 약 5%를 구성하고 있다. 채굴시 보통 산화물로 산출되며 주요 광물로는 적철광, 자철광, 갈철광, 침철광 및 티탄철광 등이 있다. 또한 철은 인류문명이 근대산업사회로 변천해 오는 과정에서 가장 큰 역할을 한 원소로서 현재 사용되는 금속의 95% 이상을 차지하고 있으며, 산업기계, 조선, 자동차공업, 건설업 등 다양한 분야에 널리 이용되고 있다.

USGS(미국지질조사소)는 세계 철광석 매장량을 약 1,700억톤으로 추정하고 있다. 철광석의 주요 부존국가는 러시아, 브라질, 중국, 호주 등으로 세계 매장량의 약 2/3가 이들 국가에 편중되어 있다¹⁾. 한국의 철광석 생산량은 1968년 82만 9,581톤을 정점으로 점차 그 생산이 감소하여 2003년에는 17만 4,009톤에 불과했고, 이 후 지속적인 감소추세에 있으며, 현재는 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다²⁾.

철강, 자동차, 조선, 정보기술(IT) 등 국내 주력산업의 구조적 특성상 광물소비량이 많을 수밖에 없지만, 부존 자원은 부족하여 생산이 늘어날수록 수입의존도 또한 높아질 수밖에 없다. 한국광물자원공사에 따르면 2000년 84.3%였던 광물자원 수입의존도가 2005년에는 90.7%를 기록하면서 처음으로 90%대를 넘어섰다³⁾. 2010년 기준 한국의 철광석 매장량은 확정량이 약 1,100만톤, 추정량이 약 3,900만톤이다. 주요 부존국에 비해 현저히 낮은 매장량도 문제이지만 평균 품위가 41.3%대로 내수량 기준 품위인 56~65%에 비해 턱없이 부족한 저품위 광석으로 이를 효과적으로 활용할 대책이 필요한 실정이다⁴⁾.

본 연구에서는 이러한 경제적 가치가 낮은 저품위 철광석의 자원화 가능성에 대하여 가늠해 보고자 하였다. 이를 위하여 광물의 표면성질의 차이를 이용한 체질, 분급, 비중선광, 자력선광과 부유선광 등 광물의 단체분리(Mineral liberation)를 목적으로 행하여지는 전처리 공정에 초점을 맞추어 점하중강도, 파쇄율 및 분급도 측정실험을 수행하였으며, 분쇄 효율을 규명하고자 파쇄율에 중점을 두고 실험을 진행하였다⁵⁻⁷⁾. 또한 광석의 조직학적 특성 파악을 위하여 XRD와 SEM 분석 시험도 병행하였다.

2. 시료 및 실험 방법

2.1. 시료의 특성

본 연구에서 일련의 실험들을 통한 철광석의 품위 향상 가능성에 대한 단순한 경향을 확인하고, 광석에 대한 정보가 전무한 괴광 형태인 2종의 호주산 적철광 A와 호주산 갈철광 B를 선정하여 실험을 진행하였다. 열처리와 점하중 강도 측정에는 원광 상태 그대로인 괴광 형태의 광석을 사용하였고 이 외의 모든 실험에는 ± 5 mm 입도로 조분쇄한 광석과 이 조분쇄된 것을 다시 $-500 \mu\text{m}$ 으로 미분쇄한 광석이 사용되었다.

X선 회절분석(X-ray diffraction)을 위해 본 연구에 사용된 기기는 Rigaku사의 D/max 2500으로 $-500 \mu\text{m}$ 입도의 철광석 A 및 B의 원광과 열처리한 시료의 XRD분석을 각각 행하였다. 분석 조건은 Cu target, $K_{\alpha}=1.54059 \text{ \AA}$, 전압 40 kV, 전류 300 mA, scan speed $0.06^{\circ}/\text{sec}$, divergence and scattering slit 1° 로 θ -2 θ scan방식으로 θ 는 $5 \sim 45^{\circ}$ 범위로 산란각도를 측정하였다.

본 연구에서는 JEOL사의 JSM-840A를 이용하여 주사전자현미경(SEM)분석을 행하였다. jaw crusher (150 mm $\times$ 200 mm, SW0J01)에서 ± 5 mm 입도로 파쇄된 철광석 A 및 B의 파면을 관찰 면으로 하고 백금 코팅 후 SEM분석을 행하였으며, 원광 상태와 열처리 후의 상태로 나누어 분석하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 급속가열 시험

본 연구에서는 철광석 원광을 열처리한 후 급속냉각시켜 철광석을 구성하는 철산화물과 맥석 구성 광물간의 열팽창률 차이에 따른 균열을 야기시켜 이에 따른 파쇄거동 특성을 알아보고자 2종의 철광석 A와 B를 대상으로 실험하였다. 열처리 실험조건은 700°C 로 가열된 상태의 전기로(Front door Box Type, 10 kw)내에 철광석 A와 B를 신속히 장입하고 1시간동안 가열한 후 다시 신속히 꺼내어 대기중에서 급랭 하였다.

2.2.2. Point load strength test

열처리가 광석의 강도에 미치는 영향을 확인해 보고자 열처리 전(원광)과 후로 나누어 점하중강도 값을 비교 측정하였다. 우선 점하중강도 측정을 위하여 시험편의 가공이 필요하지만, 본 연구에서는 별도의 가공을 거치지 않고 50 mm에 근접한 lump형태의 광석을 선정하여, 점하중강도 시험을 수행하였다. 준비된 시험편 각각

의 W(너비) 및 D(두께)를 측정한 후 시험편을 장착하고, 장착한 시험편이 10~60초 사이에 파괴가 일어날 수 있도록 서서히 하중을 가하여, 시험편이 파괴되는 순간의 최대 하중 값(kgf/cm²)을 측정하였으며, 이를 다음의 점하중 강도 계산식에 대입하여 값을 산출하였다⁸⁾.

$$I_{s(50)} = \frac{\left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} P}{\left(\frac{4WD}{\pi}\right)}$$

2.2.3. Breakage rate 및 입도분포

철 광석 A와 B를 jaw crusher(150 mm × 200 mm, SW0J01)를 이용하여 5 mm 이하로 조분쇄하고 planetary ball mill(fritsch, pulverisette 5) 250 ml의 용기내에 30 mm tempered steel ball 10개와 앞서 조분쇄한 5 mm 이하의 철광석 시료 A와 B를 각각 150 g씩 장입한 후 350 rpm 조건에서 30초, 60초 및 90초로 분쇄하였다. 각각의 시간대 별로 분쇄된 시료의 breakage rate와 입도분포를 확인하기 위하여 Sieve shaker(haver&boecker, EML 200 digital plus T)에 500, 400, 300, 200, 100 및 53 μm의 sieve(haver & boecker社, DIN ISO 3310-1 standard sieve)를 장착하고 진폭(amplitude)3.0으로 3분간 체질하였다.

2.2.4. 비표면적 측정

본 연구에서는 흡착에 의한 표면적 측정 방법으로 분체 입자의 표면적뿐만 아니라, 입자 내부의 기공 부피까지 측정 가능한 BET 측정을 하였다. BELSORP社의 BELSORP-mini 모델을 이용하여 측정하였으며, 먼저 시료용기와 시료의 무게를 측정하고 시료장입 후 이미 흡착되어있는 수분이나 다른 가스에 의한 측정 불확도를 최소화하기 위하여, 전처리 과정에 해당하는 시료의 탈가스화를 300°C 온도에서 6시간동안 실시하였다. 이후 시료를 장치에 고정하고 액체질소 온도인 77 K로 분석을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 광물학적 특성

두 광석 시험편의 성분분석을 위해 ICP(Inductively Coupled Plasma)분석을 행하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 이를 보면 두 광석의 Fe 함량은 각각 64.74%와 57.23%로 두 광석 모두 내수 기준 품위인 56~65% Fe에 적합한 광석임을 알 수 있다. 맥석은 두 광석 모두 높은 함유율을 보이진 않으며, B광석의 불순물이 A광석에 비해 모두 높게 나타났으나, MgO는 A광석이 높은 것으로 확인되었다. 이러한 원인은 X-선 회절분석에서 알 수 있듯이 A광석에는 마그네사이트가 소량 함유 되어 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 1과 Fig. 2에 나타낸 XRD 분석결과를 살펴보

Fig. 1. Weight loss of Iron ore A and B after heating.

Fig. 2. Moisture content of Iron Ore A and B.

Table 1. Chemical composition of iron ore A and B(Unit : wt%)

Ore	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C	S
A	64.74	2.10	0.16	0.11	2.19	0.32	0.007
B	57.23	5.08	2.30	0.17	0.18	-	0.015

면 원광 상태의 철광석 A는 magnetite와 hematite가 혼재되어 분포된 형태의 광석으로 맥석은 마그네사이트 형태로 존재하고, B광석은 (OH)기가 함유된 goethite를 주성분으로 하는 광석으로 소량의 적철석이 존재함을 확인할 수 있는데, 열처리 전 A광석에서 관찰되었던 마그네사이트와 B광석에서 관찰되었던 침철석은 열처리 후에는 관찰되지 않았다. 이는 열처리에 의해 마그네사이트는 약 650°C에서 MgO와 CO₂로 열분해가 이루어지고 침철석은 약 250°C부근에서 (OH)가 탈락되어 goethite상이 hematite상으로 바뀐 결과로 판단되며 열처리 후 A 및 B광석의 중량 감소에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다^{9,10}. 또한 B광석의 XRD 측정 결과를 보면 열처리에 의한 (OH)기의 탈리가 균열을 야기한 원인이 되어 열처리 후 B광석의 점하중 강도가 큰 폭으로 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 철광석 시료 A와 B에 대한 SEM분석 결과를 나타낸 것으로서 밝은 부분이 철산화물이 집중한 영역으로 보이며 어두운 부분이 맥석이 집중된 영역으로 판단된다. B광석의 가열 후의 SEM사진

Fig. 3. Point load strength of Iron ore A and B.

Fig. 4. BET Analysis of Iron ore A.

에 원으로 표시한 부분을 보면 가열 전에는 관찰할 수 없었던 다수의 기공들이 관찰되는데 이는 가열을 통하여 (OH)기가 탈리되어 생긴 결과로 판단된다. 상술한 SEM 분석 결과와 같이 A광석은 철산화물과 맥석이 비교적 독립적으로 분리된 형태의 상으로써 광석의 미립화에 의한 단체분리효과를 기대할 수 있을 것으로 판단됨에 따라 자력선별, 부유선별 및 비중선별 등의 광석처리 공정을 통한 품위 향상이 가능할 것으로 판단된다. 반면 B광석은 철산화물과 Si 및 Al산화물 등의 맥석이 혼재되어 균일하게 분산된 조직을 갖고 있어 단체분리를 위하여 A광석보다 미립으로 분쇄하여야 할 것으로 판단되나 열처리 후의 SEM-EDAX결과를 보면 Fe성분 조성이 열처리 전인 62~68%에서 약 81%로 크게 증가하는 경향을 보여 열처리를 적용한 광석의 품위향상이 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 광석의 파쇄거동 특성

Fig. 5는 철광석 A 및 B에 대한 열처리 전과 후의 중량변화를 각각 나타낸 것이다. 실험오차를 최소화하기 위하여 각 광석마다 3회씩 열처리를 행하였으며, 그 결과 A광석의 평균 중량 감소율이 1.64%, B광석의 평균 중량 감소율이 12.7%로 B광석의 평균 중량 감소율이 A광석의 평균 중량 감소율에 비해 약 7배가량 상대적으로 높게 나타났다. 열처리가 광석의 중량 감소에 미치는 다양한 인자들 중 수분함량이 미치는 영향을 확인해 보고자 수행한 수분함량 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 7은 철광석 A와 B의 열처리 전과 후의 점하중 강도 시험 결과이다. 열처리 전 A광석의 점하중 강도는 7.61 Mpa, B광석은 1.44 Mpa로 A광석이 B광석보다 높

Fig. 5. BET Analysis of Iron ore B.

Fig. 6. Breakage rates of Iron ore A and B.

Fig. 7. Particle size distribution of iron ore A.

Fig. 8. Particle size distribution of iron ore B.

Fig. 9. Particle size distribution under 200 μm of iron ore B.

은 강도를 갖는 것을 알 수 있다. 열처리 후의 강도는 A광석이 4.81 Mpa, B광석이 0.11 Mpa로 두 광석 모두 열처리 후의 점하중 강도 값이 열처리 전에 비해 낮게 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9는 BET측정 결과로, 입도가 $-500\mu\text{m}$ 인 A와 B 광석의 원광 시료를 측정된 것이다. 이를 살펴보면 A광석의 비표면적은 $1.7511\text{ m}^2\text{g}^{-1}$, B광석은

$59.566\text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 로 B광석이 A광석에 비해 약 30배 이상의 월등히 높은 비표면적 값을 나타내었다. 총 기공의 부피는 A광석이 $0.0034961\text{ cm}^3\text{g}^{-1}$, B광석이 $0.067387\text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ 로 역시 B광석이 높게 나타났으며, 평균 기공의 직경은 A광석이 7.986 nm, B광석이 4.5252 nm의 값을 나타냈다. 이는 A광석에 비해 B광석이 직경은 작지만 더 많

Fig. 10. XRD Patterns of Iron ore A.

Fig. 11. XRD Patterns of Iron ore B.

Table 2. Particle size group

Particle group	Size
S0	+500 μm
S1	500~400 μm
S2	400~300 μm
S3	300~200 μm
S4	200~100 μm
S5	100~53 μm
S6	-53 μm

은 수의 기공을 포함하고 있음을 의미한다. 따라서 B광석이 A광석에 비해 월등히 큰 비표면적 값을 나타낸 것으로 보이며, 이로 인하여 열처리 전 B광석의 점하중 강도가 A광석보다 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한 열처리 후 A광석은 형태에 거의 변화가 없었던 반면에 B광석은 수많은 크랙이 형성된 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 이는 광석의 기공내부에 갇혀있던 기체와 수분 등의 물질들이 열처리에 의하여 팽창하면서 발생한 결과로 보인다.

Fig. 10은 Breakage rate 측정 결과로 분쇄 후 S0입도에 해당하며, Table 2에 분립한 각 입도별 크기를 나타내었다. 분쇄시간이 증가함에 따라 분쇄되는 입자가 작아지는 반면 큰 입자의 분율 또한 작게 되어 기울기가 음수를 나타내고 있으며, 여기서 기울기는 다음에 나타내는 식에서 S_i 에 해당하는 인자로 Breakage rate를 나타낸다¹¹⁾.

$$\ln \frac{\omega_1(t)}{\omega_1(0)} = -S_i t$$

열처리 전 A광석이 -0.04, B광석이 -0.05로 B광석

이 A광석 보다 큰 수치를 나타냈다. 열처리 후에는 A광석이 -0.03으로 열처리 전과 큰 차이를 보이지 않았으며, B광석이 -0.06으로 가장 큰 수치를 보였다. 이는 열처리 후 B광석의 분쇄가 A광석 보다 용이함을 의미하며 점하중 강도 시험 결과와도 일치한다. 그러나 A광석의 경우 열처리 전과 후에 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않으며, 이는 열처리가 A광석의 분쇄율에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

이러한 결과의 원인을 입도분포와 연계하여 분석해보면 다음과 같다. Fig. 11과 Fig. 12는 열처리 전과 후의 A 및 B광석을 30초, 60초 및 90초로 분쇄 후 입도분포를 비교한 것으로 열처리 전 A광석은 분쇄 시간이 증가함에 따라 S4입자의 양은 감소한 반면에 가장 입도가 작은 S6입자의 양은 증가하는 특징을 보였다. 열처리 후에는 분쇄 시간이 증가함에 따라 S4입자의 양이 열처리 전과는 달리 증가하는 것을 확인할 수 있으며, S6입자의 양도 증가는 하였으나 열처리 전에 비해 상승 폭은 다소 감소하였다. 이는 전술한 Breakage rate 및 BET측정 결과에 나타난 바와 같이 A광석이 B광석에 비해 상대적으로 비표면적이 작고 기공의 직경은 A광석이 B광석보다 크기 때문에 열처리에 의해 크랙을 유발하는 요인이 감소하는데 기인하는 것으로 판단된다. B광석은 열처리 전 S6입자에 분포되는 양이 크게 되는 특징을 보이고 있으며, S4 및 S5입자의 양이 분쇄 시간의 증가에 따라 증가하는 패턴을 보이고 있다. 열처리 후에는 S6입자가 약간 감소하였지만 S4 및 S5입자의 양은 열처리 전 보다 증가하여 비슷한 양상을 나타내고 있는 것으로 판단된다. Fig. 13은 B광석의 열처리 전과 후의 입도분포에서 -200 μm , 즉 S4~S6입자에 분포하는 입자의 양의 전체 총량에 대한 비율을 나타낸 것으로 분쇄 시간 30초에서는 열처리 전

Fig. 12. SEM Analysis of Iron ore A.

및 열처리 후의 비율이 거의 비슷한 수치를 보이지만 이후 분쇄 시간이 증가할수록 열처리 후 $-200\ \mu\text{m}$ 의 미분의 양이 열처리 전에 비해 많아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 B광석이 열처리 후 분쇄율이 증가하였음을 나타내는 것으로 점하중 강도 및 Breakage rate 결과와 일치함을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 자원고갈에 따른 저품질 철광석의 자원화 가능성에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다

음과 같다.

1) XRD분석 결과, A철광석 내에 Fe는 자철석과 적철석이 혼재된 형태로 존재하고, B철광석은 침철석과 적철석형태로 존재함을 확인하였다. 열처리 후 A광석 내에 마그네사이트는 650°C 부근에서 MgO와 CO_3 로 열분해 되었으며, B광석 내에 침철석은 250°C 부근에서 (OH)기가 탈락되어 hematite화 함을 알 수 있었다.

2) BET측정 결과, B광석이 A광석에 비해 약 30배 이상 높은 비표면적을 나타내었다. 또한 평균 직경은 작지만 더 많은 수의 기공들이 상대적으로 B광석 내에 많이 포함되어 있는 것을 확인하였다. 점하중 강도,

Fig. 13. SEM Analysis of Iron ore B.

Breakage rate 및 입도분포 측정을 통하여 기공이 더 많은 B광석의 분쇄가 A광석 보다 양호한 것을 확인하였다.

3) 열처리 후 B광석의 SEM결과를 보면, 가열 전에는 발견되지 않았던 다수의 기공들이 관찰되는데, 이는 열처리 과정에서 $\text{FeO}(\text{OH})$ 의 (OH) 기가 250°C 부근에서 탈리된 결과이다. 이러한 현상이 균열을 야기하여 열처리 후 B광석의 분쇄를 향상에 기여하였으며, 이를 점하중 강도, Breakage rate 및 입도분포 측정을 통하여 확인할 수 있었다.

References

1. U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries, January 2011.
2. Hyeongu Lee, Huisu Moon, Minsu Oh, 2007: Mineral deposit in Korea, p.53, Acanet.
3. The Korea economic daily, 2011: www.hankyung.com. Dec.4.
4. Current state of the reserves of mineral resources, 2010: Korea Resources Corporation.
5. Uikyoo Choi, Seonghoon Lee, Sangho Cho, Soobok Jeong, Younghun Kim, Jaikoo Park, 2011: Characteristics of degree of mineral liberation for ball milling products of

- skarn ore, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol.48, No.1, pp.52-58.
6. Jongyaeong Hyun, Hyungsuk Kim, Kangho Shin, Dongsung Cho, 1997: A study on the recovery of a metallic Fe-particle from the steelmaking E.A.F. slag by the magnetic separation, J. of Korean inst of resources recycling, Vol.6, No.3, pp.3-8.
 7. Bongchan Ban, Sunnam Yu, Dongsu Kim, 2003: Studies of the recovery of iron and steel-making slags by magnetic separation, J. of Korean inst of resources recycling, Vol.12, No.5, pp.36-41.
 8. Korean society for rock mechanics, Standard test method for point load strength of rock, Journal of Korean tunnelling and underground space association, Vol.17, No.2, pp.75-82.
 9. Munyeong Jeong, 2006: Occurrence and demand and supply of magnesite ores, J. Miner. Soc. Korea(Mineral & Industry), 19, 1, pp.45-56.
 10. Youngdo Park, Hunha Lee, Taeok Kim, 1994: The thermal decomposition process of d-FeOOH prepared by rapid oxidation method, Journal of the Korean Ceramic Society, Vol.31, No.12, pp.1501-1506.
 11. Sungjin Hong, Chanwook Kim, 2010: Study on breakage rates of low manganese ores, Journal of the Research Institute of Industrial Science & Technology, Vol.24, No.4, pp.171-175.

김 재 명

- 강원대학교 재료 금속공학과 학사
- 강원대학교 대학원 재료 금속공학과 석사
- 현재 동일제강 품질 보증팀 사원

김 찬 욱

- 한양대학교 금속공학과 학사
- 한양대학교 금속공학과 석사
- 동경대학 금속공학과 박사
- 현재 포항산업과학연구원 책임연구원

석 한 길

- 한양대학교 금속공학과 학사
- 독일 아헨공대 재료공학부 석사
- 독일 아헨공대 재료공학 박사
- 현재 강원대학교 재료금속공학과 교수