

4 휠 시스템을 이용한 슬래그 섬유 제조

송영환 · 성환구 · 박수한 · 왕효승 · 허보영[†]

경상대학교 나노신소재공학부 아이큐브 사업단

Fabrication Characteristics of Slag Fiber by 4 Wheel System

Yeong Hwan Song, Hwan Goo Seong, Soo Han Park, Xiaosong Wang, and Bo Young Hur[†]

i-Cube Center, School of Nano and Advanced Materials Engineering, Gyeongsang National University, 900, Gazwa-dong, Jinju, 660-701, Korea

Abstract

Steel making slag has gained a considerable attraction as one candidate of eco-materials in research fields for recycling resources. Thus, many researches have been performed but were limited to development of substitute for cement being used in the construction field. A little research work also has been done on development of higher value-added materials, including heat resistant and sound absorbing materials. For this reason, the present study were focused on macrostructure characterization of fabricated slag fibers which are applicable to heat resistant materials. The slag fibers were fabricated through a modified melt extraction method. The processing variables employed were the wheel speed and molten slag temperature. The synthesized fibers were characterized by optical microscope and scanning electron microscopy. It was found that the wheel speed of 1400 rpm generated better quality of mineral fibers in terms of the relative amount of shot, diameter and length. This was attributed to the relative extent of contact width between the flowing melt and the rotating wheel. The thickness of the slag fibers also were decreased with increasing the slag melt temperature due mainly to significant decrease in the viscosity of the slag melt. In addition, the lower melt temperature caused an increase in number of shots plus the mineral fibers.

Key words: Melt extract method, Blaster furnace slag fiber, Recycle.

(Received August 13, 2006 ; Accepted October 13, 2006)

1. 서 론

광물섬유는 암석을 용해하여 섬유상으로 제조된 석면과 규사를 용해하여 제조하는 유리섬유로 분류할 수 있는데 내열성이 높고 불연성, 경량성, 단열·흡음성, 내구성의 특징을 갖춰 건축 설비, 플랜트설비의 단열재 및 방·내화재로서 널리 사용되고 있고 가격이 저렴하고 제조가 용이하나 근래에는 환경규제 품으로 사용의 제한을 받고 있다. 따라서 암면의 소비는 저소음, 저진동, 단열을 요구하는 시장의 성장과 더불어 더욱 성장하고 있는 추세이다[1]. 또한 광물섬유는 일반적으로 천연광물로부터 만들어지지만 최근 슬래그나 건축 폐기물 등과 같은 재활용 재료들을 이용한 제조 방법에 관한 연구가 활발히 진행중이다.

슬래그는 연간 발생량이 470만톤 이상으로 고로 슬래그의 경우 올해 재활용은 고로시멘트용 원료로 사용되어지나 슬래그에 대한 시각이 폐기물에서 새로운 자원으로 변하고 있는 추세이다. 슬래그란 크게 선철을 정련할 때 생산되는 고로 슬래그와 철에서 강을 정련할 때 생산되는 제강 슬래그로 나누어진다. 이런 슬래그들은 각각 지닌 잠재수경성, 내수성, 내해수성, 내화성, 내구성 등의 화학적 성질과 경제성에 따라 시멘트

도료, 도로, 토목, 항만공사, 비료 및 토양 개량제 등으로 사용되어지며 나머지는 매립되거나 유리용 원료로 사용되어진다. 슬래그가 지닌 화학적 특성과 경제성 및 환경에 대한 관심과 조에 따라 재활용의 범위가 점차 확대되고 있는 것이다[2]. 이러한 슬래그를 주원료로 하여 제조한 슬래그 섬유는 일반 광물을 이용한 인조광물섬유와 그 조성이 비슷하고 그 제조상의 특성 또한 천연 광석을 이용하였을 때와 유사하다. 슬래그섬유를 제조하는데 있어서 가장 큰 문제점은 섬유화 되지 않은 입자, 즉 shot의 발생이다. 슬래그 섬유 제조 시 발생하는 shot은 섬유를 압면으로 제조하였을 때 섬유 사이에 위치하여 압면의 열적, 물리적 특성을 저하시킨다고 알려져 있다[3]. 그리고 shot의 함유율은 Table 1의 KS 규격에서와 같이 4%이하로 제한하고 있다. 섬유의 굵기 또한 열전도율에 영향을 미치는 중요한 인자로서 KS규격에 의해 7µm 이하로 규정되어있다. 이러한 shot의 발생은 제조공정의 냉각속도와 용탕의 유동성을 제어함으로써 줄일 수 있다[4-8]. 본 논문에서는 슬래그 섬유를 제어하기 위하여 제철공정에서 발생하는 고로 슬래그를 사용하였다. 제조에 사용된 장비는 기존의 용탕방사법을 개량하여 용탕을 4개의 휠을 통과시켜서 섬유화 시킬 수 있도록 제

[†]E-mail : hurby@gnu.ac.kr

Table 1. Quality standard of mineral wool (KSL9102)

항목	규격치	비고
밀도(kg/m ³)	40~50	
열전도율(cal/mh°C)	0.038 이하	70°C
	0.031 이하	상온
열간수축온도(°C)	650 이하	
섬유평균굵기(μm)	7 이하	
입자(shot)함유율(%)	4 이하	

작되었다. 제조된 섬유의 특성을 분석하기 위하여 실물현미경(OM)과 주사 전자현미경(SEM)을 이용하여 구조적 특성을 알아보았다.

2. 실험 방법

제철공정에서 발생한 수재 고로 슬래그를 주원료로 하여 슬래그 섬유를 제조하였다. 수재 고로슬래그는 수냉시킨 고로 슬래그를 분쇄 과정을 거쳐 제조한 것으로 1 mm 직경을 가지는 구형으로 그 화학적 조성은 Table 2와 같다.

슬래그 섬유를 제조하기 위한 장치로 슬래그를 용융시키기 위한 고주파 유도 용해로와 4개의 휠 그리고 휠을 통과하며 섬유화된 슬래그 섬유를 모으기 위한 집면실로 구성되어 있다. 또한 각각의 휠에는 용융 슬래그를 분리시키고 섬유화하기 위한 같은 크기의 V자 홈이 회전방향으로 배열되어 있고 휠의 내부에는 냉각수를 순환시켜 회전하는 동안에도 계속해서 일정한 온도로 냉각이 이뤄지도록 하였다. 200 g의 고로슬래그를 고주파로를 이용하여 용융시킨 다음 첫째 휠의 표면 위에 Fig. 1과 같이 낙하시켰다. 용융 슬래그를 휠에 낙하시키기 전에 4

개의 휠의 위치를 각각 조절하여 용탕이 4개의 휠 모두를 통과해 집면실에 모일 수 있도록 하였다. 도가니에서 낙하시킨 용탕과 첫째 휠의 접촉면과의 각도는 용탕이 회전하는 4개의 휠 표면과 연속적으로 접촉 될 수 있도록 40~60°의 범위로 조절하였다. 용융 슬래그가 첫 휠 디스크에 부딪히는 지점(Jet Point)은 첫 번째 휠의 가장자리에서 5 cm 거리일 때 가장 높은 섬유 생산량을 보였다. 이전의 연구결과에 의하면 Jet Point는 섬유 제조 시 그 위치에 따라 용융 슬래그가 받는 각속도가 달라지기 때문에 휠의 냉각속도를 고려하여 적절히 조절해야 하므로 1번 휠의 중심과 2번 휠의 중심간 거리는 25~28 cm 일 때 미네랄 섬유의 생산량이 가장 많았으며, 2번, 3번, 4번 휠의 중심간 거리와 용탕진입 각도는 2번 휠의 위치와 1번 휠의 속도에 따라 결정되었다. 각각의 휠의 속도는 직전의 휠의 속도와 비교하여 1.1:1~1.5:1 정도의 비율로 정하였을 때, 특히 1.1:1 ~ 1.3:1의 속도비를 가질 때 가장 높은 생산량을 보였다. 하지만 휠 간의 속도변화에 따른 용융슬래그와 휠 간의 접촉각과 접촉 위치를 정확하게 제어하기 힘들기 때문에 경험적인 데이터를 적용했다. 휠의 속도는 용융슬래그와 휠간의 접촉시간에 영향을 주는 인자로서 연속적으로 수냉되는 휠과의 접촉시간이 용융슬래그의 냉각 속도를 제어하는 중요한 요소이기 때문에 본 실험에서는 휠의 속도는 1번 휠을 기준으로 1000~2000 rpm의 속도로 제조 실험을 진행하였다. 용융 슬래그의 온도는 도가니에서 휠로 낙하되는 용탕의 유동성과 관련이 있다. 따라서 용융슬래그의 온도를 1360~1450°C의 온도범위에서 유지시켰고 각각의 온도범위에서 용융 슬래그의 섬유화 비율을 알아보았다. 또한 제조되어진 섬유들의 직경과 표면형상은 실물현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

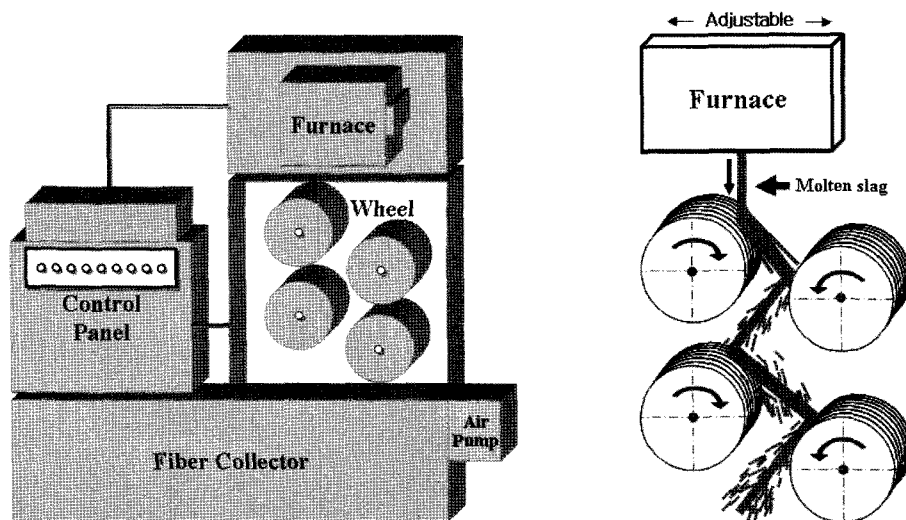


Fig. 1. schematic diagrams and slag melt flow of 4-wheel apparatus for fabrication slag fibers.

Table 2. Chemical composition of the as-received blast furnace slag.

Composition(wt.%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	T.Fe	P ₂ O ₅	TiO ₂	S
Blast furnace slag	42~44	34~36	14~16	3~5	<1	0.2~0.4	<1	0.5~0.7	<1

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 1450°C의 고정 온도에서 1000~2000 rpm의 휠 속도로 제조한 슬래그 섬유들의 실물현미경 사진을 보여주고 있다. Fig 2의 사진들에서 나타난 것과 같이 조건 범위 내에서 휠의 속도를 증가시켜도 슬래그 섬유의 특성에 영향을 줄만한 슬래그 섬유의 형상이나 직경의 변화는 거의 없었다. 하지만 휠의 속도가 1400 rpm일 때가 다른 조건에 비하여 제조된 섬유의 형상이 양호 하였다. 실험 초기 단계에서는 휠의 속도가 증가할수록 제조되어지는 섬유의 직경이 줄어들고 shot의 발생량도 감소할 것으로 예상하였지만 실험결과 휠의 속도가 1400 rpm에서 증가하거나 감소할 경우 슬래그 섬유와 함께 shot의 생산량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 휠의 냉각효율의 차이에서 기인되는 것으로 사료된다[4,5,10]. 1000 rpm의 경우 접촉 면적이 1400 rpm보다 넓고 용탕과 휠과의 접촉시간이 길기 때문에 용탕 중 휠과 접촉한 부분을 빠르게 냉각시키므로 섬유화 되지 못하고 입자의 직경이 큰 shot가 발생하여 그 양이 증가 하였다. 반면에 2000 rpm에서는 1400 rpm인 경우 보다 접촉 면적이 작고 접촉시간 또한 짧기 때문에 충분한 냉각이 일어나지 않아서 섬유화 되지 못한 shot의 발생량이 증가한 것으로 생각된다[9-11]. 휠의 회전 속도가 빠를수록 각속도와 회전 방향으로의 변형응력 또한 증가된다. 때문에 휠 표면의 V 홈과 접촉한 후 미세하게 분리되는 용탕의 체적이 접촉면의 냉각을 통해 섬유화 되는 용탕의 체적 보다 더욱 많아진다. 따라서 입자의 직경이 작은 shot의 발생량이 증가하는 경향을

보였다. 이러한 제조 실험 결과를 보면 본 실험조건에서 고품질의 슬래그 섬유 제조를 위한 휠 속도는 1400 rpm으로 나타났다.

용융슬래그의 온도가 섬유의 제조에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1380~1450°C의 온도 범위에서 각각 제조 실험을 하였다. 휠 속도의 영향을 최소화하기 위하여 휠 속도를 섬유의 생산량이 가장 많았던 1400 rpm으로 고정하여 실험하였다. Fig. 3은 각각 다른 용탕온도에서 제조한 섬유 섬유들의 SEM 사진을 보여주고 있다. 각 온도에서 제조되어진 슬래그 섬유의 직경과 길이는 각각의 샘플 중에서 50개를 선택하여 직경과 길이를 측정 하고 평균값을 계산하여 얻었다. Table 3은 온도에 따른 제조 결과로써 1380°C에서 생산된 슬래그 섬유의 평균 직경과 길이는 각각 15 μm와 25 mm 이고 shot의 양은 전체 섬유 생산량의 5 wt.%인 반면에 1400°C와 1450°C에서 제조된 섬유의 평균 직경은 각각 10 μm와 7 μm 인 것을 알 수 있다. 실험 결과 용탕의 온도가 높아짐에 따라서 슬래그 섬유의 직경이 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 용탕의 온도 변화에 따른 유동성의 차이라고 생각된다.

Fig. 4에 나타난 것과 같이 용융 고로 슬래그의 점도는 1420°C 이상에서 급격하게 감소한다. 용탕의 점도가 높은 경우 더욱 많은 변형응력을 필요로 하게 되기 때문에 1420°C 이하의 온도에서는 비교적 굵은 직경을 가지는 섬유가 생산되는 것으로 분석되며 1420°C 이상의 온도에서는 직경이 줄어드는 현상을 나타내었다. 이는 점도가 떨어져 유동성이 향상되어 가늘고 긴 섬유가 제조되었기 때문이다.

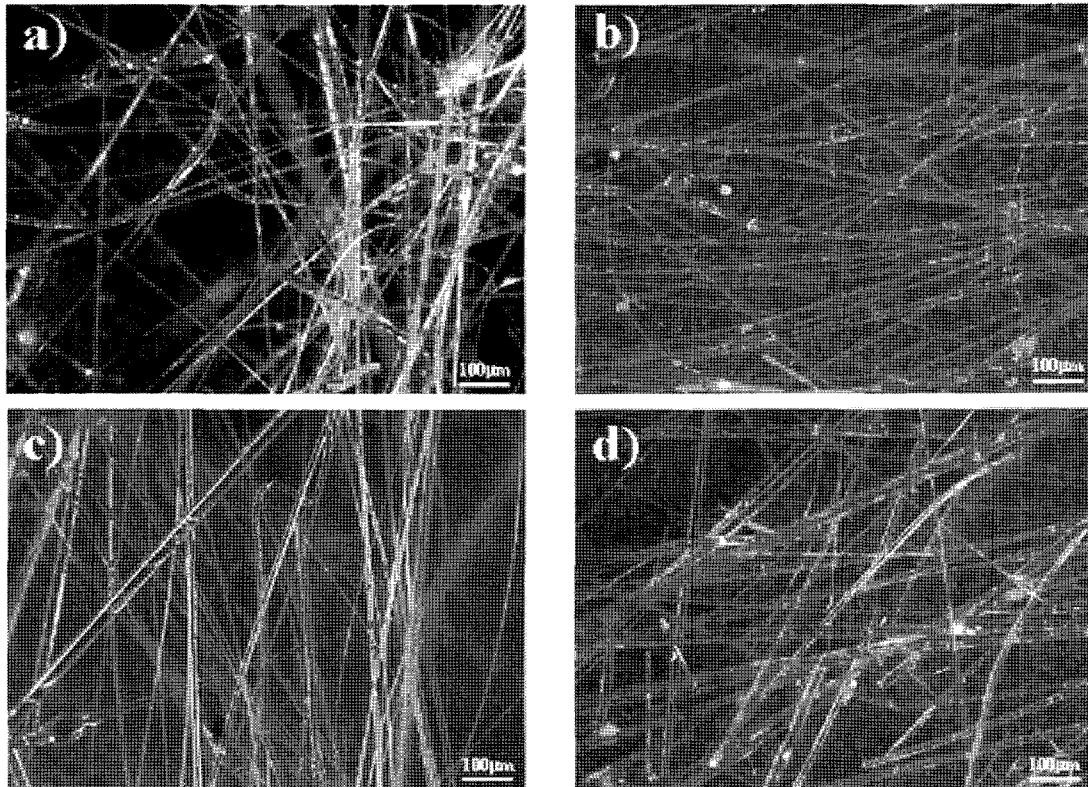


Fig. 2. Macrostructure of slag fibers fabricated at different wheel speeds. (a) 1000 rpm, (b) 1400 rpm, (c) 1800 rpm, (d) 2000 rpm.

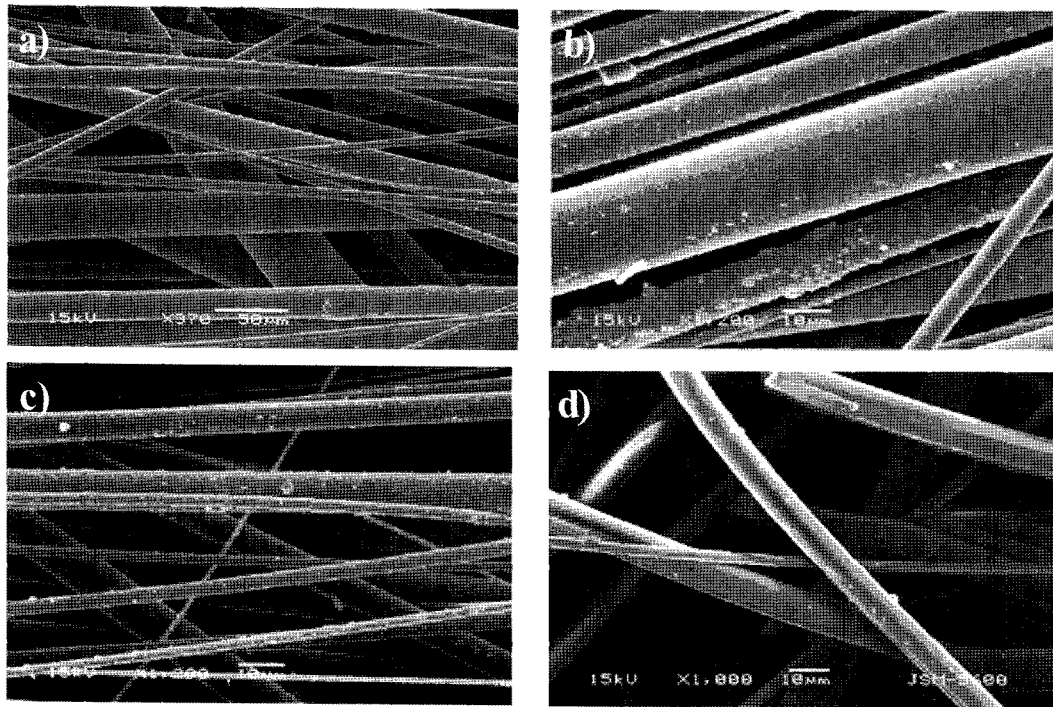


Fig. 3. SEM micrographs of fiber structures produced with different melt temperature at constant wheel speed (1400 rpm). (a)1350°C, (b)1380°C, (c)1400°C, (d)1450°C

Table 3. Fiber morphology and shot volume obtained with different temperature at 1400 rpm.

		1360°C	1380°C	1400°C	1450°C
Thickness (μm)	Min.	15	7	5	2
	Max.	30	25	25	10
	Ave.	17	15	10	7
Length(mm)		30~200			
shot volume(wt.%)		~15%	~10%	~8%	~5%

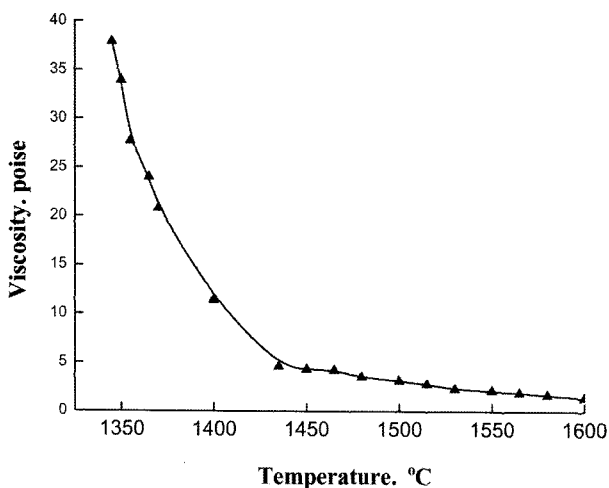


Fig. 4. Viscosity of blast furnace slag.

4. 결 론

4개의 휠을 가지는 섬유 제조장비로 고로 슬래그를 주원료로

하여 슬래그 섬유를 제조실험 결과는 다음과 같다.

1. 용융슬래그 온도를 1450°C로 유지한 경우 휠 속도에 따른 슬래그 섬유 제조 실험결과 1400 rpm에서 다른 조건에서 보다 많은 양의 양질의 슬래그 섬유가 생산되었다. 이것은 휠과 용탕의 접촉 면적이 1400 rpm에서 가장 크기 때문이다. 1400 rpm 이상과 이하의 속도에서는 shot 생산량이 비교적 높았다. 휠 자체의 냉각속도가 일정한 조건에서 휠과 용탕의 접촉 면적이 증가하거나 감소함에 따른 용탕의 국부적인 냉각속도의 변화에서 기인되는 것으로 사료된다.

2. 제조되어진 슬래그 섬유의 직경은 용융슬래그의 온도가 감소함에 따라서 증가하는 것으로 나타났고 1380°C에서의 직경은 17 μm 이고 1450°C에서는 7 μm 를 얻었다. 즉 휠 속도를 일정하게 유지한 조건에서 온도가 감소할수록 용융 슬래그의 점도가 증가하여 섬유상의 유동성을 감소시켰다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] K. O. Ballagh: Applied Acoustics, "Acoustical Properties of wool", 48(2) (1996) 101-120
- [2] T. Schneider: Environment International. "Manmade mineral fibers and other fibers in the air and in settled dust", volume 12, Issues 1-4 (1986) 61-65.
- [3] J. Ström-Olsen: Materials Science and Engineering A,, "Fine fibres by melt extraction", Volume 178, Issues 1-2, 30 April (1994) 239-243.
- [4] A. Giboult, J. Y.Aube, D. Sainte-Foi, U.S. patent 5,143,532, 1992.
- [5] C. H. Schwarb, U.S. patent 4,969,940, 1990.
- [6] J.O. Strom-Olsen, G. Rudkowska, P. Rudkowski: Mater. Sci. Eng. A, "Fine metallic and ceramic fibers by melt extraction", 179-180 (1994) 158-162.
- [7] M. Allahverdi, R. A. L. Drewa, P. Rudkowskab, G Rudkowskib, J. O. Strom-Olsenb; Mater. Sci. Eng. A, "Amorphous CaO · Al₂O₃ fibers by melt extraction", 207 (1996) 12-21.
- [8] F. Trdic, B. Sirok, P. R. Bullen, D. R. Philpott: Real-Time Imaging5, "Monitoring mineral wool production using real time machine vision", (1999) 125-140.
- [9] J. Militky, V. Kovacic, J. Rubneroba: Eng. Fracture Mechanics, "Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers", 69 (2002) 1025-1033.
- [10] Svend Grove-Rasmussen and L. E. Hansen, U.S. patent 5,866,486, (1999).