

마이크로 파를 이용한 현무암 용융과 섬유 제조

Microwave Melting of the Basalt Rock and Fiber Spinning

✉ 허 유¹, 김형진², 양희원², 전경진³
✉ You Huh¹, Hyungjin Kim², Heewon Yang² and Kyungjin Jeon³

1 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyunghee Univ.)

2 경희대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyunghee Univ.)

3 ㈜세코텍 기술연구소 (Research Laboratory, Secotech Ltd.)

✉ Corresponding author: huhyou@khu.ac.kr, Tel: 031-201-2516

Manuscript received: 2008.2.27 / Revised: 2008.11.10 / Accepted: 2008.11.10

High performance functional fibers are demanded increasingly in the modern industries, while the inorganic fibers such as carbon fibers, glass fibers, and metal fibers are representative among them in that they have high strength, consistent properties in a broad temperature change, etc.. This paper reports on the experimental trial to apply the microwave furnace on melting the natural basalt rock that spreads overall on the global surface and is supposed to be used as the raw material for the inorganic high performance fiber. Results showed that the new method to use the microwave as the heating source to melt the basalt rock was feasible. The crucible spinning could effectively applied for producing the basalt fibers up to 10 micrometer diameter, when the crushed basalt rocks were used. For drawing the molten basalt the drawing roller surface feature was a very important factor.

Key Words : Basalt Rock (현무암), Melting (용융), Drawing (인발), Take-up (권취), Microwave (마이크로파), Crucible (도가니), Crushing (분쇄)

1. 서론

고성능 산업용 섬유는 대표적으로 고강도 Nylon, 고강도 PET, 고강도 Rayon 과 함께 최근에 응용이 확대되고 있는 파라 아라미드 섬유 등 유기섬유가 있으며, 무기섬유로는 탄소섬유(Carbon Fiber)와 유리섬유(Glass Fiber), 그리고 금속섬유(Metal Fiber) 등이 있다. 일반적으로 고성능 유기섬유는 비강도가 우수한 특성이 있으나, 비교적 고온(섭씨 150 도 이상)의 환경에서는 급격한 성능 저하가 나타나고, 시간의 경과에 따라 물성 취화가 발생하는 문제가 있어서 이용에 제약이 있다. 반면에 무기 섬유는 500 도 이상의 고온에서도 상온에서와 같은 성능을 유지하며, 불연성이어서 고

온 환경에서 섬유상 재료가 요구되는 용도에 많이 사용된다. 특히 탄소섬유와 유리섬유는 각각의 용도를 달리하며 사용이 크게 증대되고 있다. 탄소섬유는 우수한 강도와 낮은 밀도 등의 장점이 있으나, 고가이고, 반면에 유리섬유는 가격이 저렴하지만 인장강도가 비교적 낮고, 친환경적이지 못한 결점을 보유하고 있다. 무기섬유 중에서 가장 많이 사용되고 있는 유리섬유는 굵기에 비하여 강도가 우수한 측면이 있으나, 섭씨 600 도를 초과하는 초고온에서는 급격한 역학적 성능의 변화가 나타나는 문제가 있다. 이러한 점에서 탄소 섬유와 유리섬유의 장점을 활용하며, 단점을 보완할 수 있는 고성능 무기섬유소재를 확보하는 것이 대단히 중요하다. 최근에 새로운 무기 섬유로서 현무암

섬유(basalt fiber)는 천연 현무암을 원료로 사용하며, 제조공정이 간단하고, 친환경적이며, 물성과 비강도는 탄소섬유에 비하여 낮으나 유리섬유에 비하여 우수한 것으로 알려져 있으며, 광역 온도 범위에서 사용이 가능한 고성능 산업용 섬유로서 기술계의 관심이 커지고 있다.

현무암 섬유는 현무암을 그대로 섬유화 하였으므로 환경친화성 재료로 알려져 있으며, 내열성이 뛰어나 초저온(-260℃)에서 고온(900℃)까지 사용이 가능하여 단열 및 내화 재료로 개발이 가능하지만, 국내에서는 아직까지 적용제품이 소개되지 않고 있다. 그러나 수지와의 접착성이 높아서 에폭시 수지나 폴리에스터 수지의 보강재로서도 기존의 유리섬유보다 우수한 압축강도를 나타낼 수 있으므로 다양한 응용제품의 개발이 가능하다.

현무암 섬유에 대한 연구는 크게 역학적 성질에 대한 연구¹⁻⁴ 와 기능성에 대한 연구,⁵⁻⁹ 그리고 복합재 강화 성능에 대한 연구¹⁰⁻¹⁷ 로 나누어 볼 수 있으며, 생산기술과 관련된 연구는 자료의 공개가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 유리섬유 및 탄소 섬유의 용도 분야 중 환경적, 기능적, 경제적인 요인에 의한 대체 소재의 시장적 요구에 대응하고 현무암 섬유의 생산과 응용을 위한 기초 기술을 확보하기 위하여 현무암의 새로운 용융 방법과 이를 이용한 현무암 섬유의 제조에 대하여 다룬다.

2. 방사 시스템

현무암 방사 시스템은 원석의 용융부, 용융 현무암의 인발부, 그리고 인발된 현무암 섬유의 권취부로 구성된다(Fig. 1). 용융부는 용융노(furnace)

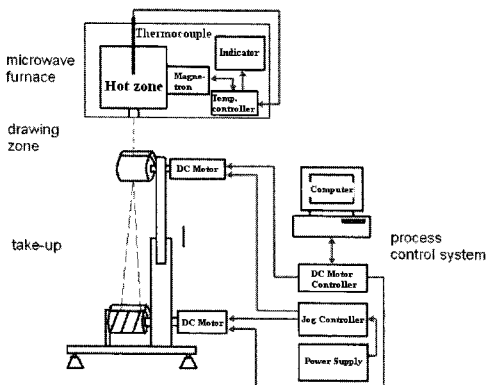


Fig. 1 Construction of the basalt fiber spinning system

와 도가니 그리고 내화벽 시스템으로 이루어진다. 도가니를 통하여 흘러나온 액상 현무암은 고화가 이루어지기 전에 일정 속도로 연신을 받아 원하는 굵기로 변환되어야 하며, 고화된 현무암 섬유는 트레이스 와인딩 롤러에 의하여 보빈에 권취된다. 따라서 실험이 용이하게 진행될 수 있도록 인발, 권취 과정은 컴퓨터에 의하여 제어된다. Fig. 1 은 본 연구를 위하여 제작된 현무암 방사 시스템의 구성도를 보여준다.

2.1 현무암 용융로

현무암 섬유를 제조하기 위해서는 먼저 섬유 원료인 천연 현무암을 용융시켜 유동성을 부여하는 일이 필요하다. 현무암 원석은 1,400~1,500℃에서 용융되기 때문에 용융로는 1,500℃ 이상의 가열 용량을 지녀야 하고, 가열 속도를 조절 가능하여야 하며, 고온에서도 정밀한 온도제어가 이루어질 수 있어야 한다. 천연 광물을 녹이기 위해서는 여러가지 방법이 있으나 소형 용융로 형태로는 주로 가스 및 전기적 가열 방법이 이용된다.¹⁸ 그러나 현무암에는 유전 손실(dielectric loss)을 일으키는 철과 알루미늄이 포함되어 있는 점을 감안하여 열원으로서 마이크로파(microwave)를 이용하기로 하였다.

Table 1 Specifications of the microwave furnace

Max temperature	1,600℃
Hot zone	80x80x40 cm ³
Max heating rate	100℃/min
Temperature deviation	heating: ±5℃
	constant temperature: ±3℃
Programmable controller	10 steps (1 program)

Table 1 은 본 연구에 사용된 마이크로파로의 사양을 나타낸다. 마이크로파 발생장치는 현무암의 용융 온도까지 빠른 승온 속도를 위해 용량 2kW, 마이크로파 주파수 2.45GHz의 마그네트론을 사용하였다. 마이크로파로의 하단에는 마이크로파의 유출이 일어나지 않으며, 동시에 용융 현무암의 유동이 일어날 수 있도록 일정 직경(본 장치에서는 2.98cm)의 홀을 만들고, 이 홀을 통하여 도가니에서 용융된 현무암이 중력에 의하여 유동이 일어나도록 설계하였다. 마이크로파로의 뒷부분

에는 용융된 현무암의 온도를 정확하게 측정하기 위해 열전대를 부착하였고, 정확한 온도 유지 및 제어를 위해 정밀 온도 제어기를 사용하였다. heating zone 을 제외한 마이크로파 로 내부에 축적되는 잠열을 제거하기 위하여 측면에 통풍장치를 설치하였다.

2.2 가열영역

2.2.1 용융체 도가니

현무암 원석을 마이크로파에 의하여 용융시키려면 마이크로파의 투과가 가능하며, 용융된 현무암을 담고, 고온을 견디며, 현무암 성분의 조성에 영향을 미치지 않는 도가니가 필요하다.

본 연구에서는 이를 위하여 고순도 알루미늄아 (Al_2O_3 , 99.8%) 재질을 이용하였다. 제작된 도가니는 컵 모양으로 도가니 바닥 중심에 유동이 생길 수 있도록 직경 2mm 의 홀을 가공하여 용융된 현무암이 중력에 의해 자연 유동될 수 있도록 하였다. 이 때, 도가니 내부에서 용융된 현무암이 표면 장력에 의해 방사 홀을 중심으로 도가니 바닥에 퍼지는 현상과 이로 인해 인발 가능한 연속 유동이 생기지 않는 문제, 그리고 내화 시스템과 용융 현무암의 직접 접촉을 피하며, 도가니의 안정적 위치 고정 등을 감안하여 다음과 같이 도가니를 설계하였다. 즉, 도가니 하단부에 몰딩 작업을 통해 방사구를 일체형으로 제작하였으며, 방사 공정 중이나 유리 막대에 의한 가이드팅 과정에서도 도가니가 움직이지 않도록 내화벽 시스템의 알루미늄아 파이프 내부 지름과 동일한 고정 턱을 제작하였다. Fig. 2 는 이러한 개선된 설계에 의하여 제작된 도가니의 실제 모습을 보여준다.

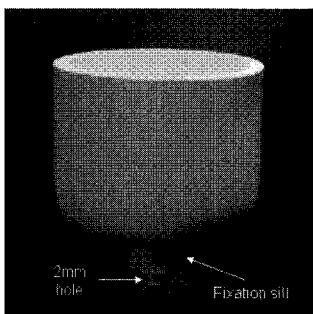


Fig. 2 The crucible used for the experiments

2.2.2 내화벽 시스템

용융로의 가열 영역에서는 용융된 현무암을 담

고, 고온을 견디는 도가니가 설치되며, 도가니 바닥에는 용융 현무암이 중력에 의하여 유동할 수 있도록 일정 크기의 구멍을 가공, 형성하므로 도가니를 안정적으로 유지해 주는 내화벽 시스템이 요구된다. 내화벽 시스템은 마이크로파를 통과할 수 있으며 1,700℃까지 견딜 수 있는 세라믹 내화 보드와 내화 벽돌로 제작하고, 내화 보드에 의해 형성되는 가열 영역에 도가니를 안정적으로 설치할 수 있도록 설계하였다. 용융 현무암이 유동할 수 있도록 도가니에 일체 성형으로 만들어진 방사구는 알루미늄아 봉 안쪽에 설치되는데, 알루미늄아 봉의 길이를 가능한 줄여서 용융된 현무암이 알루미늄아 봉과 닿을 수 있는 가능성을 최소화하였으며, 내화 보드 하단의 내화 벽돌도 최적 크기로 지름을 늘여서, 방사 중 용융 현무암이 내화 벽돌에 닿지 않으며, 가이드팅 작업시에도 시야 확보에 불편함이 최소화될 수 있도록 설계하였다.

Fig. 3 은 본 연구에서 사용된 내화벽 시스템의 실제 모습을 보여준다.

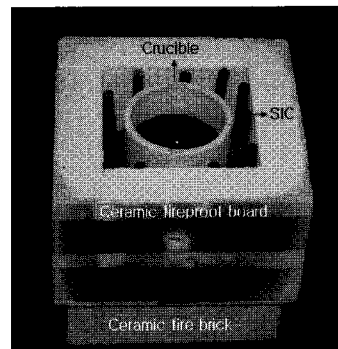


Fig. 3 Refractory system for the experimental furnace

가열 영역에는 현무암 가열 효율을 개선하기 위하여 마이크로파가 커플링 온도까지 현무암 온도를 조속히 상승시킬 수 있도록 감지재 (susceptor)¹⁹ 를 설치하였다. 가열 영역의 바닥과 틈새를 감지재의 판과 분말로 채워 소결하였으며, 벽은 봉상 감지재를 설치하여, 감지재에서 발생한 열이 도가니에 골고루 전달될 수 있도록 하였다.

2.3 인발/권취 시스템

마이크로파 로에서 용융된 현무암을 인발, 권취하기 위하여 방사 부싱으로부터 일정 거리 아래쪽에 인발 롤러를 설치하고, 방사구를 지나온 용융 현무암이 직접 인발되도록 하였으며, 인발된

현무암 섬유는 일정 장력으로 권취되는 구조로 시스템을 구성하였다.

2.3.1 연신부 (drawing part)

방사 시스템에서 용융 방사되어지는 현무암을 인발하여 원하는 굵기의 현무암 섬유를 생산하기 위하여 롤러 쌍을 이용한 인발 시스템이 제작되었다(Fig. 4). 인발 시스템은 롤러 쌍의 현무암 섬유 파지 각도의 변화에 따른 영향력을 확인할 수 있도록 메인 롤러를 기준으로 보조 롤러가 상하 45°씩 위치 조절이 될 수 있도록 설계하였다.

2.3.2 보조 롤러

보조 롤러는 모터 구동이 이루어지는 메인 롤러에 스프링에 의해 밀착하여 두 롤러의 표면에 발생하는 마찰에 의해 피동적으로 구동된다. 이때 보조 롤러의 표면 재질은 현무암 섬유를 생산하는데 영향을 미치는 중요한 요인이다.

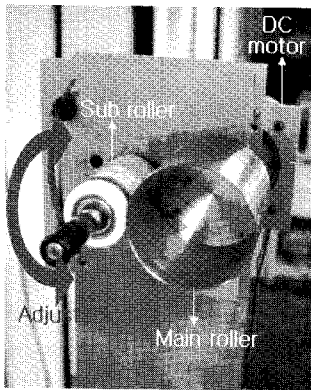


Fig. 4 Photograph of the drawing roller pair

일반적으로 마이크로파 로에서 용융 방사되는 현무암은 온도가 상당히 높기 때문에 롤러 쌍을 이용한 접촉식 인발을 할 경우, 변형 온도 및 내열 온도가 낮은 재질의 롤러는 표면이 쉽게 훼손되고, 반면에 경도가 큰 재질은 인발 파지점에서 섬유가 끊어지는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 여러가지 롤러 표면 재질 중에서 Fig. 5와 같이 알루미늄, 베클라이트, 우레탄, 그리고 테프론의 네가지의 재질의 보조 롤러를 제작하여 현무암 섬유 제조에 적합한 롤러를 찾아 보았다.

메인 롤러와 동일한 재질인 알루미늄으로 보조 롤러를 제작할 경우, 용융된 현무암이 롤러 표면에 닿는 경우나 공정 중에 의해 발생하는 롤러 표

면의 마찰 훼손, 열로 인한 손상에 비교적 유리하다. 그러나 롤러 간의 접촉이 불안정하여 인발비가 일정하지 않게 되어 현무암 섬유의 굵기 불균제가 크게 발생하였다.

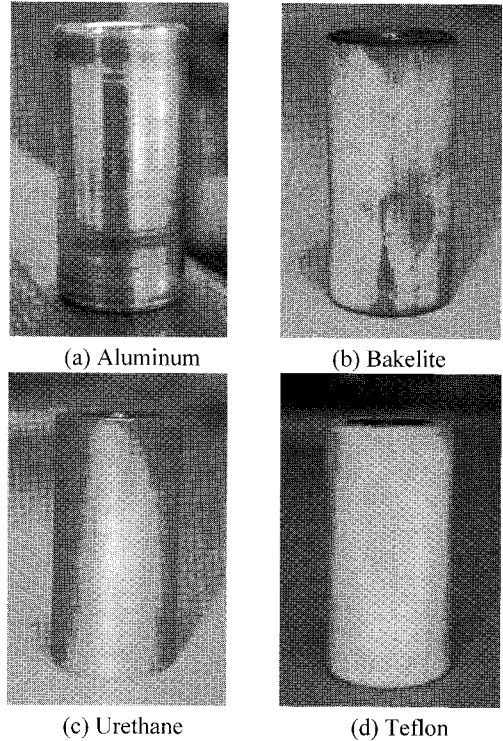


Fig. 5 Press roller used for drawing

반면에 베클라이트 재질은 가공이 용이하고 강도가 좋으며 기계적, 열적 특성이 우수하여 보조 롤러의 재료로 적합하다고 판단되었으나, 재질의 강성이 높아 인발 공정 중에 롤러 쌍의 접촉선에서 인발되던 현무암 섬유의 절단이 자주 발생하였다. 강성이 낮고, 메인 롤러와의 접촉성이 우수한 우레탄 보조 롤러는 우레탄의 내열 온도가 80°C이고 변형온도가 90°C로 상당히 낮아서 인발 공정 중에 보조 롤러의 표면 훼손이 나타나서, 선속도가 불안정하고 일정 굵기의 현무암 섬유 생산이 어려웠다. 테프론은 변형 온도 및 내열 온도가 높아서 지속적인 고온 환경에서 사용이 가능하며, 마찰 계수를 포함한 우수한 기계적 특성으로 인발 공정에 사용이 가능하며, 메인 롤러의 고속 회전에 의한 진동에도 안정적 접촉으로 회전이 가능하여 현무암 섬유의 인발에 적합하였다. 이에 따라 본 연구에서는 보조 롤러로서 테프론 재질을 이용

하였다.

2.3.3 권취부 (take-up part)

인발 공정을 거친 현무암 섬유를 권취하기 위해 Fig. 6 과 같은 권취부가 설계, 제작되었다. 인발된 현무암 섬유가 권취 구간에서 가이드에 의하여 권취 롤러에 감길 때, 일정한 장력을 부여하기 위해 장력 평형 구간을 설치하였다. 장력 평형부의 원리는 다음과 같다. 장력 평형 구간에 V-홈이 파진 텐싱 롤을 설치하여, 현무암 섬유가 권취될 때, 장력 변동에 따라 텐싱 롤이 반원을 그리며 장력에 반응하도록 함으로써 일정한 장력을 유지하며 보빈에 권취될 수 있도록 하였다.

장력 평형부에 의해 일정한 장력을 유지하면서 와인딩부에 도달한 현무암 섬유는 마찰에 의하여 간접 구동되는 지판에 감기게 된다. 지판을 마찰에 의하여 구동시키는 회전 드럼은 구동 모터와 직접 연결되어 있으며, 드럼의 표면은 나선형 홈이 있다. 공급되는 현무암 섬유는 이 홈을 따라 지판에 일정한 분포를 가지며 골고루 감기게 된다. 드럼을 이용하여 지판에 현무암 섬유를 감는 와인딩법은 지판에 감긴 섬유의 양이 증가하여 지판의 구경 변동이 있더라도 일정한 드럼 표면 선속도를 유지할 수 있으므로 항상 안정적으로 현무암 섬유를 감을 수 있다.

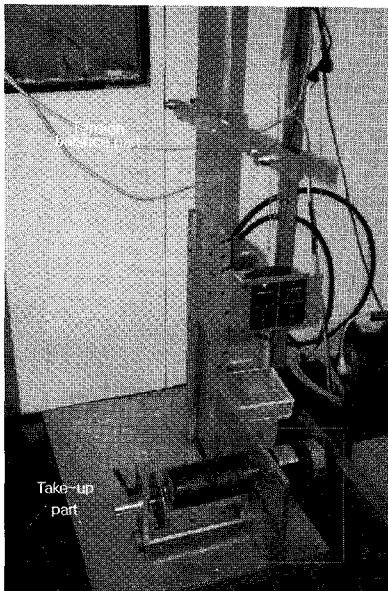


Fig. 6 Take-up system composed of the auto tension balance part and the winding part

2.3.4 인발 구간 길이

마이크로파 로 내의 도가니에서 용융되어 흘러 나온 현무암을 안정적으로 인발하기 위해서 도가니와 권취 롤러까지의 인발 거리는 상당히 중요한 공정 변수이다. 만약 인발 거리가 너무 짧으면 인발 롤러 쌍이 용융 현무암의 열로 인해 손상이 되고, 인발 거리가 너무 길면 현무암 섬유는 이미 상온에서 충분히 고화되어 약간의 환경 변화에도 공정이 민감하여 섬유 절단이 발생한다.

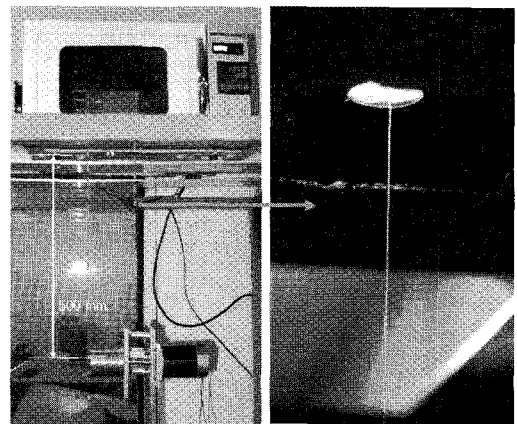


Fig. 7 Photograph of the fiber drawing process

본 실험에서는 도가니와 롤러 쌍까지의 인발 거리가 500mm 인 경우, 가장 적당한 인발이 지속적으로 이루어짐을 확인하였다(Fig. 7).

3. 현무암 용융 방사 실험

3.1 현무암의 구성 성분

현무암 섬유의 생산에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 현무암 구성 성분이다. 실제 현무암의 구성 성분에 따라 현무암 섬유 물성이 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 현무암은 SiO₂ 가 50% 가량 함유되어 있는 세립 화성암으로 회색을 띄며, 치밀하게 보이지만 다공질이다. 화산암 중에서 가장 많은 암석으로 대양지각의 대부분을 구성하고 있다.

본 연구에 사용된 현무암 원석의 구성 성분을 측정하여 얻은 결과는 Table 2 와 같다.

Table 2 에 주어진 바와 같이 규소, 알루미늄, 철 그리고 마그네슘과 칼슘의 산화물이 조성의 대부분을 이룬다. 광물성 성분이 용융에 미치는 영향은 다양하다. SiO₂ 는 용융물의 점도 및 용융 온

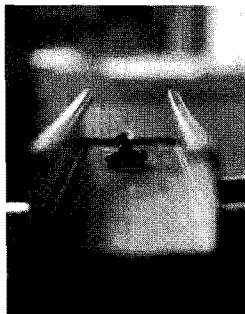
Table 2 Contents of the basalt rock used for experiments

Compositions	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O +K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	others
Contents (weight %)	56	17.4	11.8	3.2	9.9	1.7	-	-	-

도에 관계되는 성분이며, Al₂O₃ 는 결정화 온도와 내열성에 관계되는 성분으로 알려져 있다. 또한, FeO + Fe₂O₃ 는 용융 점도, 및 백금 부식의 반응성에 작용하고, CaO 는 강도, 내열성, 내화학성에, MgO 는 팽창성, 내열성에 관련되는 성분으로 열간 팽창성에 의한 표면 균열에 영향을 미친다. 그 외에도 K₂O + Na₂O 는 용융 온도, 내화학성에 작용하며, 미량성분인 TiO₂, P₂O₅, Cr₂O₃, MnO 및 SO₃ 등은 강도, 용융 온도, 표면 특성, 결정화 속도 등에 관계되는 성분으로 표면 흡착 특성, 냉각 시, 국부 결정화 등에 역할을 하는 것으로 알려져 있다

3.2 현무암 원석의 크기

마이크로파 로에서 현무암 섬유를 방사할 때 현무암 원석의 크기는 상당히 중요한 변수가 된다.



(a) Drops due to the high viscosity of the molten



(b) Dripping on the tray due to the low viscosity of the molten

Fig. 8 Situations in which the basalt rock is molten

도가니에 현무암 원석을 넣고 동일한 공정 조건 하에서 용융 방사를 하더라도 Fig. 8(a)와 같이 높은 점도로 인해 방사구에서 맺혀 있다가 떨어지는 경우와 Fig. 8(b)와 같이 점도가 낮아 현무암이 용융되는 순간부터 방사구에서 흘러나오는 경우가 발생한다.

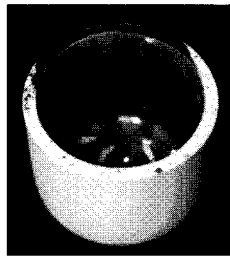
이는 용융 방사에 이용되는 현무암 원석의 크기가 불균일하여, 초기 용융이 시작되는 현무암의 조성에 의해 현무암의 방사 안정성이 결정된다고 판단되어 진다. Fig. 9 은 현무암 원석의 크기에 따른 용융 정도를 확인하기 위하여, 원석을 용융점 이하 1,100℃(열전대 지시온도)까지 가열한 후, 곧 냉각시켜서 도가니 내부를 확인해 본 결과이다. 도가니 내부에 현무암 용융체와 아직 미용융된 일정 크기의 현무암 원석이 공존하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 현무암 원석을 분쇄하여, 혼합함으로써 원료 현무암의 크기와 조성의 불균일에서 나타날 수 있는 용융 속도의 차이를 최소화하여, 용융 방사 실험을 진행하였다.



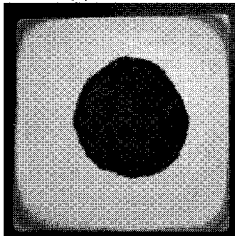
Fig. 9 The state of the half-molten basalt in the crucible

실제, 원석을 사용한 경우와 분쇄 현무암을 사용한 경우를 비교한 결과, 분쇄 현무암이 원석에 비하여 방사 공정에서 더 효율적으로 섬유화가 이루어졌다. 즉, 분쇄 현무암은 원료 조성의 불균일을 완화시켜 용융 방사공정의 효율화를 가져온다는 것을 확인할 수 있었다.

특히, 원석 분쇄 시에 철제 분쇄 절구를 이용하여 현무암 원료에 철 성분이 증가한 경우에는 용융 현무암의 점성이 커져서 도가니의 홀을 통한 유동이 일어나지 않고, 오히려 도가니 내에서 원석의 비등 현상이 발생하여 도가니를 넘치는 현상이 나타났다. Fig. 10 은 이러한 상황에서 현무암이 끓은 도가니 모습과 끓은 현무암이 내화벽 시스템의 뚜껑에 녹은 모습을 보여 준다.



(a) crucible



(b) refractory system defected by the boiled basalt

Fig. 10 The results of the boiled basalt

3.3 섬유 형상

Fig. 11 은 시험 제조된 현무암 섬유의 측면을 현미경 사진으로 보여 준다. 시료의 측면을 보면 매끄럽고, 균일하다.

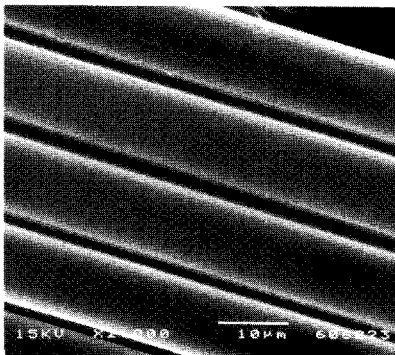


Fig. 11 The side shape of the basalt fibers

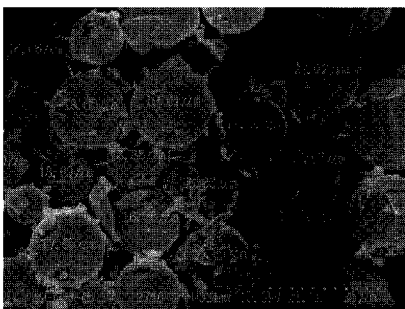


Fig. 12 The cross-sectional shape of the basalt fibers

한편, 현무암 섬유의 단면은 Fig. 12 에서 볼 수 있는 바와 같이 거의 대부분이 원형을 보이며, 절단된 원형 단면 표면은 날카롭게 부러진 모습을 볼 수 있다. 그러나 각 섬유의 측면 굽기는 변동이 있음을 알 수 있다. 이는 동일 생산 조건에서도 현무암의 용융 점도 및 인발 속도의 변동에 기인하는 것으로 보인다.

본 실험에서는 현무암 섬유의 직경 10 μm 까지 연속 생산이 가능하였으며, 원료 조성의 균일화 및 정밀한 속도 제어를 통하여 더 세섬화가 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 고성능 산업용 섬유의 응용이 증대됨에 따라 현재 무기 섬유로서 광범위하게 사용되고 있는 탄소섬유 및 유리섬유, 그리고 금속 섬유가 가지고 있는 물성적, 역학적 성능의 한계를 극복하고, 경제적이며 친환경적 소재의 생산을 위하여, 천연 현무암을 원료로 하여 무기 섬유로서 우수한 기계적 성능과 친환경적 재료로서 알려진 현무암 섬유의 제조기술을 확립하기 위하여 마이크로파를 이용한 현무암 용융 및 방사 기술을 다루었다. 그 결과 마이크로파 용융노는 천연 현무암을 효과적으로 용융시켰으며, 특히 현무암을 분쇄/혼합함으로써 연속적인 용융 유동이 가능하였다. 또한 용융 도가니의 홀을 통하여 유출되는 용융 현무암을 직접 인발함으로써 현무암 섬유를 제조할 수 있음을 확인하였다. 또, 섬유 인발 과정에서는 인발 롤러의 표면 특성이 중요하게 작용하였으며, 테프론 표면이 현무암 섬유 제조에 효율적으로 작용하였다.

참고문헌

1. Militky, J. and Kovacic, V., "Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments," *Textile Res. J.*, Vol. 66, No. 4, pp. 225-229, 1996.
2. Militky, J. and Kovarir, V., "Ultimate Mechanical Properties of Thermally Exposed Basalt Filament Yarns," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, Vol. 354, pp. 55-62, 2000.
3. Militky, J., Kovacic, V. and Rubnerova, J., "Influence of Thermal Treatment on Tensile Failure of Basalt Fibers," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69,

- No. 9, pp. 1025-1033, 2002.
4. Wang, G. J., Liu, Y. W., Guo, Y. J., Zhang, Z. X., Xu, M. X. and Yang, Z. X., "Surface Modification and Characterizations of Basalt Fibers with Non-thermal Plasma," *Surface & Coating Technology*, Vol. 201, No. 15, pp. 6565-6568, 2007.
 5. Gur'ev, V. V., Neproshin, E. I. and Mostovoi, G. E., "The Effect of Basalt Fiber Production Technology on Mechanical Properties of Fiber," *Glass and Ceramics*, Vol. 58, No. 1-2, pp. 62-65, 2001.
 6. Rabinovich, F. N., Zueva, V. N. and Mekeeva, L. V., "Stability of Basalt Fiber in a Medium of Hydration Cement," *Glass and Ceramics*, Vol. 58, No. 11-12, pp. 431-434, 2001.
 7. Satapathy, B. K. and Bijwe, J., "Influence of Operation Parameters on the Performance of Friction Composites Based on Combinations of Rock Fibers and Organic Fibers," *J. of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No. 6, pp. 579-595, 2005.
 8. Liu, Q., Shaw, M. T., Parnas, R. S. and McDonnell, A. -M., "Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation," *Polymer Composites*, Vol. 27, Issue 1, pp. 41-48, 2006.
 9. Liu, Q., Shaw, M. T., Parnas, R. S. and McDonnell, A. -M., "Investigation of Basalt Fiber Composite Aging Behavior for Applications in Transportation," *Polymer Composites*, Vol. 27, Issue 5, pp. 475-483, 2006.
 10. Botev, M., Betchev, H., Bikiaris, D. and Panayiotou, C., "Mechanical Properties and Viscoelastic Behavior of Basalt Fiber-Reinforced Polypropylene," *J. of Applied Polymer Science*, Vol. 74, No. 3, pp. 523-531, 1999.
 11. Zihlif, A. M. and Ragosta, G., "A Study on the Physical Properties of Rock Wool Fiber-Polystyrene Composite," *J. of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 16, No. 3, pp. 273-283, 2003.
 12. Bashtannik, P. I., Kabak, A. I. and Yakovchuk, Y. Y., "The Effect of Adhesion Interaction on the Mechanical Properties of Thermoplastic Basalt Plastics," *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 39, No. 1, pp. 85-88, 2003.
 13. Ivanchenko, D. D., Kolchygin, N. N., Ukrainets, V. I., Glebov, V. V., Vashchenko, V. F. and Tsybulya, Y. L., "Absorbing Properties of Structurally-Periodic Composition Fabrics," *Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques*, pp. 512-514, 2005.
 14. Dias, D. P. and Thaumaturgo, C., "Fracture Toughness of Geopolymeric Concretes Reinforced with Basalt Fibers," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, No. 1, pp. 49-54, 2005.
 15. Sim, J., Park, C. and Moon, D., "Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, Issues 6-7, pp. 504-512, 2005.
 16. Czigany, T., "Special Manufacturing and Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polypropylene Composites: Mechanical Properties and Acoustic Emission Study," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 16, pp. 3210-3220, 2006.
 17. Ozturk, B., Arslan, F. and Ozturk, S., "Hot Wear Properties of Ceramic and Basalt Fiber Reinforced Hybrid Friction Materials," *Tribology International*, Vol. 40, No. 1, pp. 37-48, 2007.
 18. El-Wakil, S. D., "Processes and Design for Manufacturing," PWS Pub. Co., p. 64, 1998.
 19. Zhao, C., Vleugels, J., Groffils, C., Luypaert, P. J. and Van der Biest, O., "Hybrid Sintering with a Tubular Susceptor in a Cylindrical Single-Mode Microwave Furnace," *Acta Materialia*, Vol. 48, No. 14, pp. 3795-3801, 2000.