

불밀에 의한 흑연의 특성변화와 제트밀을 이용한 흑연 분쇄

이승아, 한현각*
순천향대학교 나노화학공학과

Characteristics of Graphite Using Ball Mill and Comminution of Graphite Using Jet Mill

Seung A Lee, Hyun Kak Han*
Department of chemical engineering Soonchunhyang University

요약 흑연은 플레이크 흑연, 베인 흑연, 비정질 흑연 3가지 형태가 있다. 플레이크 흑연은 평평하며, 그 모양은 각져 있거나 형태가 복잡한 모서리를 갖는다. 플레이크 흑연은 주로 마찰제, 윤활제, 난연 물질로 사용되고 있다. 불밀링은 물질의 크기를 작게 하거나, 혼합 하는데 사용된다. 불밀링한 플레이크 흑연은 흑연의 크기 감소보다는 반대로 불밀의 자 표면과 볼에 부착하는 현상을 보였다. 불밀에 사용한 볼의 표면에 흑연이 부착하여 볼의 크기가 20% 이상 증대하였다. 흑연과 산화제를 혼합하는 불밀 조업에서는 볼과 자의 표면에 흑연이 부착하는 현상은 발생하지 않았다. 불밀 조업에서 산화제인 황산과 과염소산만을 각각 흑연과 혼합 실험 하면 흑연 간의 간극이 넓어지지 않았다. 산화제와 삽입제 혼합물인 황산과 황산암모니움, 과염소산과 과망간산칼륨 혼합물을 각각 흑연과 혼합한 결과 흑연간의 간극이 10mm 이상 벌어졌다. 제트밀 조업에서는 불밀 조업과 비교하여 입자의 크기가 감소하는 현상을 보였다. 제트밀 실험에서 플레이크 흑연입자는 전자현미경과 입도 분석기 측정 결과 크기가 71% 정도 감소하였다.

Abstract Graphite has three forms, flake, highly crystalline, and amorphous. Flake graphite is flat, angular, and has irregular edges. This type of graphite is widely used in friction materials, lubricants, and nonflammable materials. Ball milling was used to reduce the size and blend materials. Ball milling of flake graphite resulted in large particle sizes and attachment to the balls and ball mill surfaces. Furthermore, attachment of graphite to ball surfaces resulted in a 20% increase in ball diameters. However, when graphite was mixed with an oxidizer, graphite did not attach to ball surfaces. Gab widening did not occur when graphite flake was mixed with an oxidizer such as sulfuric acid or perchloric acid, but gab widening of 10mm was observed when graphite, an oxidizer, and insertor (a mixture of sulfuric acid and ammonium sulfate, perchloric acid, and potassium permanganate) were used. Jet milling resulted in a 71% reduction in particle size versus ball milling as determined by SEM and particle size analysis.

Keywords : Graphite, Comminution, Ball Mill, Jet Mill, Gap

본 연구는 교육부의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)이 주관하는 '순천향대학교 대학 내 산학연협력단지 조성사업'의 지원을 받아 연구되었습니다. (주)케이팩 강현숙 대표님과 김천식 팀장님께서도 감사합니다.

*Corresponding Author : HyunKak Han(Soonchunhyang Univ.)

email: chemhan@sch.ac.kr

Received December 19, 2022

Revised January 16, 2023

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

1.1 흑연의 종류

흑연은 인류가 오랫동안 이용하여 왔으며, 그 성분은 대부분 탄소이며, 결정은 대부분 육방정계이고 일부가 삼방정계이다. 흑연은 크게 천연흑연과 합성흑연으로 나눌 수 있으며, 천연흑연은 인상흑연(flake), 고결정질(high crystalline)흑연, 미정질(amorphous)흑연으로 나누고, 합성흑연은 일차(primary)흑연, 이차(secondary)흑연, 흑연섬유(graphite fiber)로 나뉜다[1,2].

1.2 흑연의 장점과 특성

흑연은 무독성, 무공해의 장점이 있어 단독 혹은 다른 난연재와 혼합하여 난연성이 우수한 플라스틱 제조에 많이 사용되고 있다. 원리는 고온에서 급격한 팽창 된 흑연은 화염을 질식시키는 반면, 흑연으로 도포된 표면을 열분해 및 산소 접촉으로부터 격리시켜 외부로 열을 방출하고 다양한 난연 방식을 통해 표면의 탄화를 저지한다.

흑연은 동일한 난연 효과를 얻기 위해 일반 난연재보다 훨씬 적은 양을 사용하며, 무기물이어서 화학적으로 다른 난연재와 비교하여 상대적으로 안정적이며 부작용이 없다. 따라서 흑연은 난연성 폴리우레탄, 난연성 폴리올레핀, 난연성 고무, 난연성 폴리 페닐 렌 플라스틱, 난연성 카보네이트 올리고머, 난연성 아스팔트 및 난연성 케이블 등에 널리 사용되었다.

흑연은 1) 흡착 성능이 우수하며, 분자구조상 sp² 결합으로 이루어져 기공이 발달 되어 있고, 중공극성을 가지고 있어 거대 분자를 잘 흡착한다. 2) 산화, 내 부식성에 강한 내성을 지니고 있어 모든 화학적 부식의 내화학성이 우수하다. 3) 방사능에 강한 내성을 가지고 있어 변형 및 노화, 분해 없이 각종 방사선에 장기간 노출되어도 변형이 발생하지 않는다. 4) 고온 및 저온 성능에 대한 강한 저항력을 가지고 있다. 흑연 온도 범위는 매우 넓고, -200℃의 초 저온과 3600℃의 고온까지 견딜 수 있다. 밀봉 재료로서 비산 화성 매질이나 불활성 가스에서 200-2500 ℃의 범위에서 사용하면 고온에서 부드러워 지지 않으며, 특히 압력과 고온이 번갈아 변화하는 상황에서도 쉽게 물성이 변화하지 않고 고온, 고압 윤활제로 사용되고 있다. 5) 흑연은 강한 표면 활성을 갖고 있어 표면 자유 에너지가 급격히 증가하기 때문에 표면 활성이 향상되어 흡착성 및 접착성이 강하고 접착제 없이도 다양한 제품에 직접 압착될 수 있다. 흑연은 강한 이방성

을 가지고 있으며, 열전달, 전도 및 열팽창에서 우수한 이방성을 가지며, 평면 층에서의 열전도도는 두께 방향보다 28 배 더 크며 전도도의 500 배이다[3,4,9,10].

단열제로 널리 사용되고 있는 폴리우레아는 열악한 화재 특성 때문에 사용이 매우 제한적이다. 폴리우레아 화재 실험에 의하면, 발화 후 14초 이내에 폴리우레아가 녹아내리고 화재가 급격히 확대된다. 난연소재를 도포한 폴리우레아는 표면에 일부 탄화물만이 생성되고, 비산물이 적게 발생하며, 화재도 확대하지 않는 현상을 확인할 수 있다. 도포용 난연소재실험에서 여러 가지 소재를 혼합하여 실험하였으나, 플레이크 흑연이 가장 적합한 소재이다. 또한 난연소재로 사용되는 흑연 입자는 크기가 작고 입자 사이의 간극이 넓어야, 폴리우레아와 혼합이 잘되고, 열이 폴리우레아 판넬 표면에 넓게 빨리 전달되어 국소적으로 열이 집중하는 현상이 발생하지 않아 화재가 확대되는 시간을 단축할 수 있어, 초기 화재 진압시간을 벌 수 있으며, 입자의 크기가 작으면, 폴리우레아 판넬 제작시 사용되는 노즐의 수명에 많은 영향을 미치게 되어 경제적이다[11,12].

본 연구에서는 볼밀을 사용하여, 난연 폴리우레아 제조에 사용되는 플레이크 흑연의 물성과 간극변화, 제트 밀을 이용하여 흑연의 분쇄에 대하여 연구하였다.

2. 본론

2.1 실험장치

2.1.1 볼밀

실험장치는 미분쇄기중 하나인 볼밀(Ball Mill Drive, DAEGA), 시료를 담은 Jar(부피: 1L, 7.3L), 시료를 분쇄하기 위하여 Ball은 스텐레스볼, 지르코니아볼, 알루미늄아 볼을 사용하였으며, 직경은 5.0mm를 사용 한다. 볼밀의 사진과 정보를 Fig. 1로 정리하였다[6].

시료가 잘 분쇄 되었는지 물성을 측정하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscope, ISP Co. Ltd.)을 사용하였으며, Measuring Excellence를 지향하는 광학 측정 프레임워크로 Mex프로그램(Mex, 2XWARE)으로 SEM 사진 입도를 측정하였으며, 입도분석기(Mastersizer, Malvern)를 사용하였다[6].



Model No.	BM-0102-70-1000
Date	2018. Jan
Power	220V/1 ϕ
Motor	0.75KW
Size(cm)	1125 · 570 · 1105
Weight	110kg

Fig. 1. Ball Mill image and Simple Information[6]

2.1.2 제트밀

제트밀(Jet Mill, DAEGA)은, 제트 기류를 이용하여 시료를 분쇄하며, 1차(Cyclone)와 2차(Bag Filter)로 나눠서 시료를 회수하였다. 시료를 분쇄하기 위해 압력은 8Bar를 기준으로 실험을 진행하였다.



Model No.	JM-LA
Date	2018. Jan
Power	220V/1 ϕ
Material	SUS304
Comp Air	7.5-9.9kg/cm ²
Weight	40kg

Fig. 2. Jet Mill image and Simple Information.

2.2 실험시약 및 시료

사용된 흑연에 대한 자료는 Table 1에 있다. Sample 1은 Qingdao Kropfmuehl Graphite의 제품이며, 2,3,4는 Samjung CNG 제품을 사용하였다. 시료의 입도분포도와 전자현미경 사진은 Fig. 3, 4에 있다.

팽창흑연 제조를 위해 흑연사이의 공간을 확장시키는 삽입제로 H_2SO_4 (Sulfuric acid, 95%, DAEJUNG),과 $HClO_4$ (Perchloric Acid, 70%, DAEJUNG), 산화제로 $(NH_4)_2SO_4$ (Ammonium Sulfate, 99%, DUKSAN)와 $KMnO_4$ (Potassium permanganate, 99.3%, SAMCHUN)을 혼합하여 사용하였다[4,7,8,10].

Table 1. Raw sample graphite data.

	Particle Size(um)	Dv50(um)	specific gravity
sample 1	500- 212+	488	1.77
sample 2	106- 40+	66.8	1.9
sample 3	350- 106+	287	1.05
sample 4	150- 75+	149	1.89

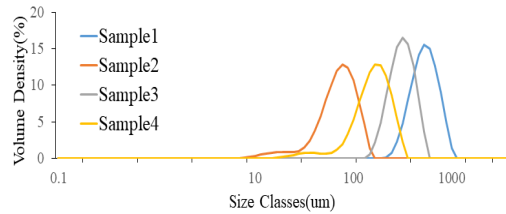


Fig. 3. Particle size distribution of sample 1 to 4 before experiments.

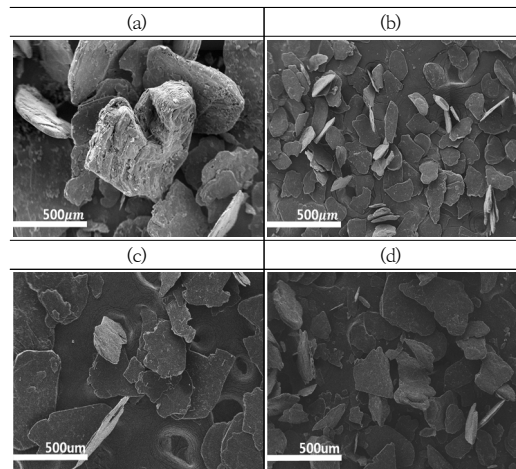


Fig. 4. SEM image of samples a) sample 1 b) sample 2 c) sample 3 d) sample 4

2.3 실험방법

2.3.1 볼밀 실험방법

볼밀의 회전수는 500RPM, 볼은 직경 5mm 인 알루미늄, 스텐레스볼, 지르코니아볼 사용하였으며, 조업시간은 6시간, 12시간, 24시간, 72시간으로 진행했으며 볼밀의 시료와 볼의 충전률은 10%, 30%, 50%로 하였다. [6] 볼밀 실험은 1) 볼과 시료의 무게를 측정 후 시료와 볼을 자(Jar)에 장입한다. 2) 가동시간과 RPM을 설정하고 분쇄를 시작한다. 3) 분쇄가 완료되면 시료와 볼을 자에서 부터 꺼낸 후 볼과 시료를 분리한다. 4) 분리한

시료는 체와 SEM과 Mex 프로그램, 입도 분석기를 이용하여 입도를 측정하였다. 볼의 종류, 자(jar)부피, 실험시간, RPM을 변화 시켜가면서 1)-4) 실험을 반복하였다 [5,6,9].

2.3.2 팽창흑연 제조방법

1) 황산(2, 5, 7%)과 황산암모늄(0.1%), 흑연(1%)을 섞어 1시간 교반 후, 2) pH가 5-6이 될 때까지 90℃~100℃ 물로 세척하고, 감압 여과하여, 3) 80℃에서 48시간 건조 후 분석하였다.

4) 과염소산(2, 5, 7%)과 과망간산칼륨(0.1%), 흑연(1%)을 섞어 1시간 교반 후, 2)-3)을 반복하였다 [4,7,8,10].

2.3.3 제트밀 실험방법

제트밀에 유입되는 공기 압력은 메인(main)이 8Bar, 추출부분(ejector) 45Bar, 사이드(side) 3Bar를 유지하였으며, 유압 량은 10g/min로 5분간 주입하였다. 1) 제트밀의 압력을 맞춘 후 흑연을 제트밀에 주입하였다. 분쇄된 시료는 용기에 담아 SEM과 입도분석기로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 볼밀을 이용한 흑연 분쇄

볼밀은 산업현장과 연구실에서 입자의 크기를 작게 하는 분쇄와 물질 혼합에 많이 사용되고 있는 분쇄 및 혼합 장비이다. 산업현장에서 볼밀을 주로 분쇄에 많이 사용되나 플레이크 흑연을 분쇄하는 분쇄 공정에서 발생한 흑연의 부착현상에 대한보고가 없다. 본 연구에서 플레이크 흑연을 분쇄하기 위하여 볼밀을 사용한 결과 분쇄 현상을 잘 발생하지 않았다. Fig. 5는 분쇄전 Sample 1의 SEM 이미지이며, Fig. 6, 7에는 Sample 1의 분쇄시간 변화에 따른 시료의 분쇄, Fig. 8, 9에는 자의 크기 변화에 의한 시료의 분쇄, Fig. 10, 11에는 충전률 변화에 따른 시료의 분쇄, Fig. 12, 13에는 볼의 종류에 따른 시료의 분쇄 결과이다. Fig. 14, 15에는 분쇄에 사용된 볼에 흑연이 흡착된 결과를 나타내었다.

흑연은 sp²결합에 의해 x축과 y축으로는 강한 결합을 이루고 있지만, z축으로는 결합이 약해, 포크 레인 구동부, 헬리콥터의 고속회전체의 고체윤활재로 사용되고 있으며, z축의 상대적으로 약한 결합에 의해, 볼밀에서 분

쇄되기보다는 미끄러지는 현상이 발생하여 자의 벽면에 부착되거나 볼에 뭉쳐지는 현상이 발생한다.

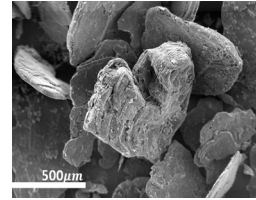


Fig. 5. SEM image of Sample 1.

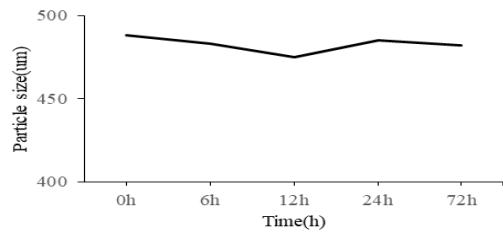


Fig. 6. Mean size change of graphite by operation time.

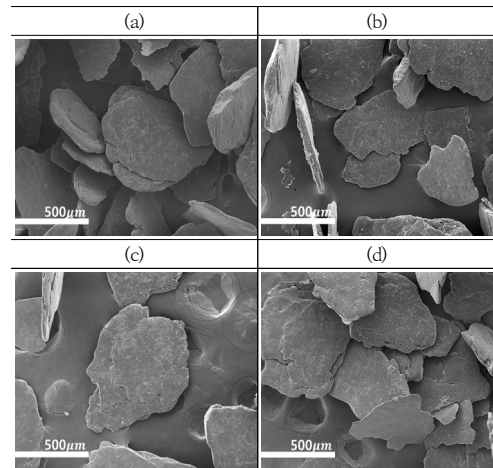


Fig. 7. SEM image of graphite by operation time. (a) 6h, (b) 12h, (c) 24h, (d) 72h

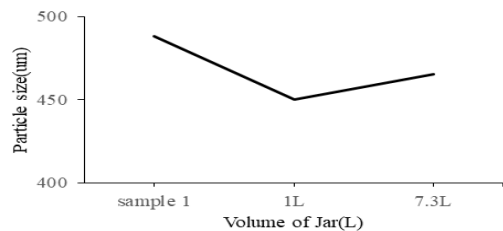


Fig. 8. Mean size change of graphite by volume of jar.

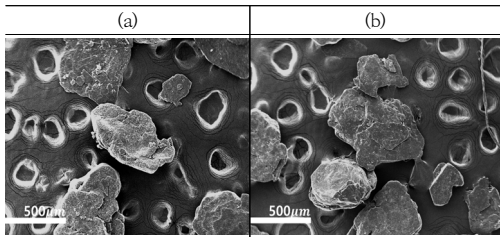


Fig. 9. SEM image of graphite by volume of jar. (a) 1L, (b) 7.3L

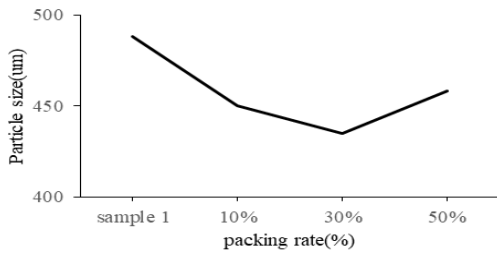


Fig. 10. Mean size change of graphite by packing rate.

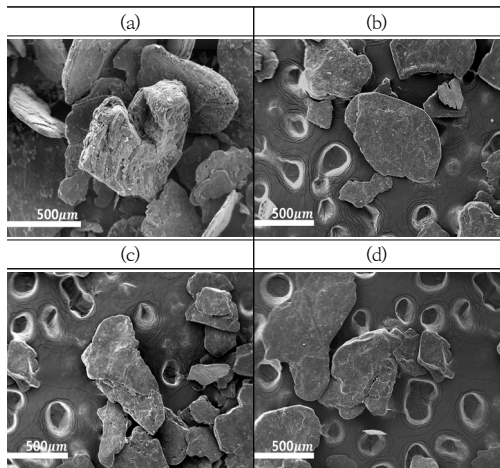


Fig. 11. SEM image of graphite by packing rate. (a) Sample 1, (b) 10%, (c) 30%, (d) 50%

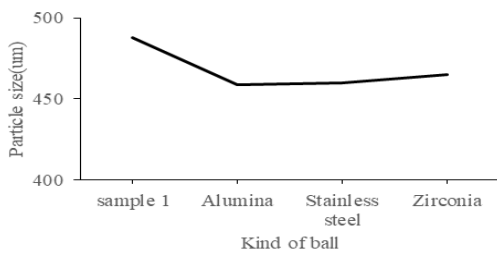


Fig. 12. Mean size change of graphite by kind of ball.

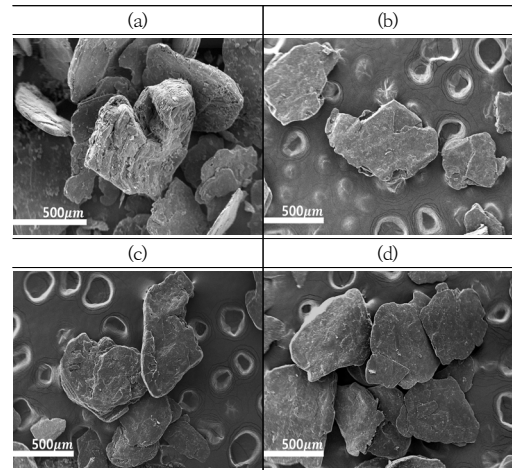


Fig. 13. SEM image of graphite by kind of ball. (a) Sample 1, (b) Alumina, (c) Stainless steel, (d) Zirconia

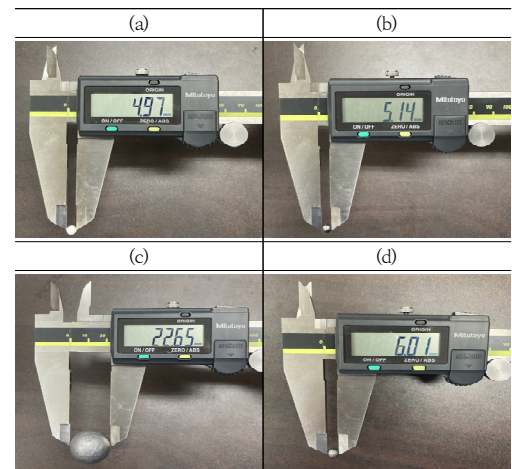


Fig. 14. Change of ball size before and after experiments of sample 1. (a) sample 1, (b) 12h, (c) 72h, (d) 72h (Samjung CNG)

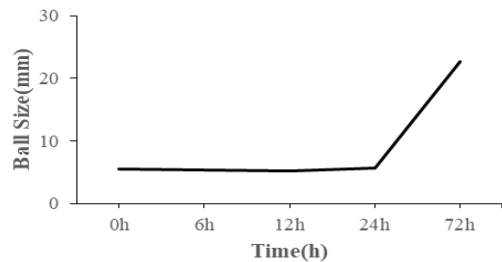


Fig. 15. Change of ball size by operation time.

3.2 삽입제에 의한 흑연의 물성 변화

3.2.1 황산에 의한 흑연의 물성 변화

Fig. 16은 산화제인 황산암모늄을 혼합하지 않고 5% 황산을 주입하여 볼밀에서 12시간 혼합한 후 결과이며, 흑연사이의 간극보다는 황산에 의해 부서진 작은 흑연 입자가 흑연표면에 부착되었다.

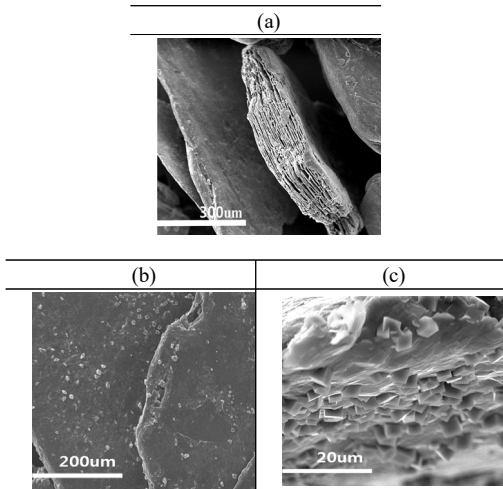


Fig. 16. SEM image of graphite before addition of 5wt% sulfuric acid (a) before addition (b) $\times 300$, (c) $\times 3000$

3.2.2 황산과 황산암모늄 혼합제에 의한 흑연의 물성 변화

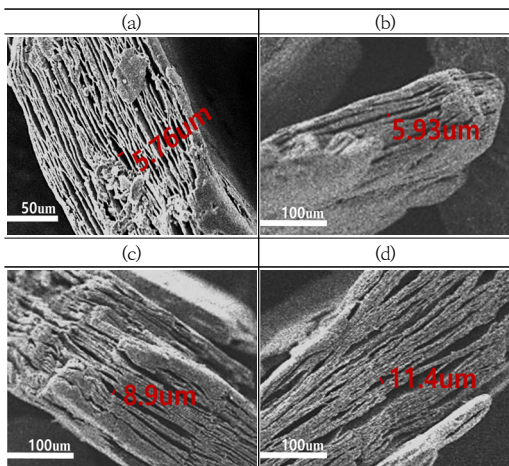


Fig. 17. SEM image of sample 1 by addition of sulfuric acid and Ammonium Sulfate. (a) 0%, (b) 2%, (c) 5% (d) 7%

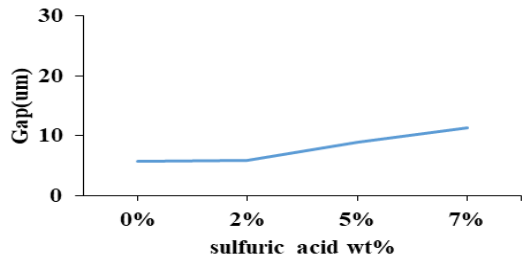


Fig. 18. Gap of graphite by addition of sulfuric acid and Ammonium Sulfate.

흑연간의 사이를 확장시키기 위하여 삽입제로 황산과 산화제로 황산암모늄을 이용하였다. 최초 시료의 전자현미경사진을 보면 흑연사이의 간극이 보이지 않으나, 2, 5, 7%의 황산과 0.1% 황산암모늄을 혼합하여 팽창흑연을 제조하였으며 Fig. 17, 18의 결과를 보면 7% 주입하였을 때 가장 흑연의 간극이 크을 알 수 있었다.

3.2.3 과염소산에 의한 흑연의 물성변화

산화제인 과망산간칼륨을 혼합하지 않고 과염소산만으로 볼밀 실험을 실시하였다. Fig. 19의 결과를 보면 삽입제인 과염소산만으로는 흑연의 간극이 벌어지지 않고 산화제를 같이 사용하여 흑연의 표면을 먼저 산화한 다음 삽입제에 의해 흑연의 간극이 벌어지는 것을 알 수 있었다.

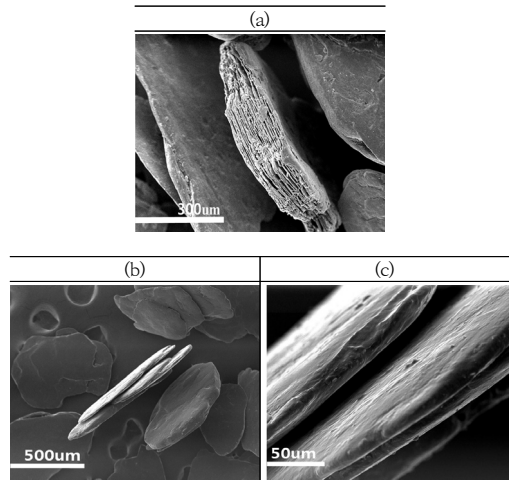


Fig. 19. SEM image of graphite before addition of 5wt% perchloric acid. (a) $\times 0$, (b) $\times 300$, (c) $\times 3000$

3.2.4 과염소산과 과망간산칼륨 혼합제에 의한 흑연의 물성변화

흑연간의 간극을 크게 하는 삽입제인 과염소산(2, 5, 7%)과 산화제인 과망간산칼륨(0.1%)을 흑연 (1%)의 비율로 혼합하여 팽창흑연을 제조하였으며 Fig. 20, 21 결과를 보면 7% 주입하였을 때 가장 흑연의 간극이 큼을 알 수 있었다.

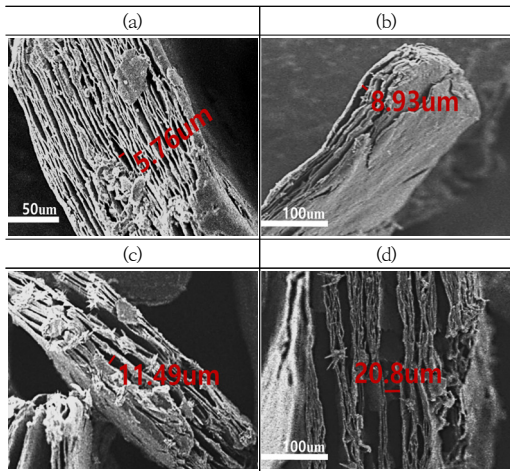


Fig. 20. SEM image of graphite by addition of perchloric acid and Potassium manganate. (a) sample 1, (b) 2%, (c) 5% (d) 7%

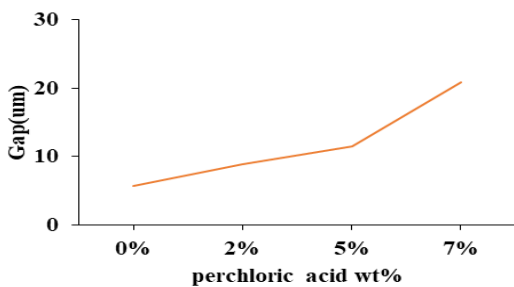


Fig. 21. Gap of graphite by addition of perchloric acid and Potassium manganate.

3.3 제트밀에 의한 흑연의 분쇄

Table 2는 시료별 제트밀 실험 전 후 평균입경 변화를 정리하였다. 제트밀 실험으로 흑연의 평균입경이 약 71% 감소함을 알 수 있었다.

Table 2. mean particle size change by jet milling.

	mean particle size of before jet milling (μm)	mean particle size of after jet milling (μm)
sample 1	488	144
sample 2	66.8	51.8
sample 3	287	138
sample 4	149	127

Fig. 22에는 시료1의 제트밀 실험 전 후의 입도분포이고, Fig. 23은 실험 전 후 전자현미경 사진이다. 488μm 이상의 입자가 분쇄되어 평균입경이 작아지는 것을 알 수 있으며, 전자현미경 사진에서도 같은 현상이 보이고 있다.

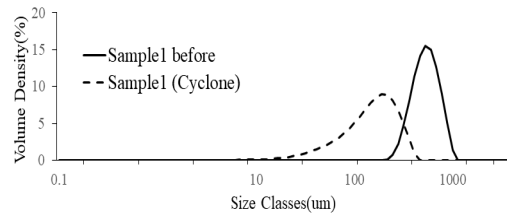


Fig. 22. Particle size distribution sample1 after Jet milling.

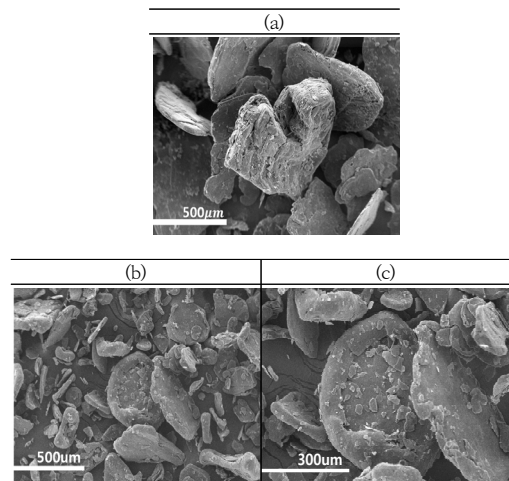


Fig. 23. SEM image of sample 1 after Jet milling. (a) before experiment, (b) after experiment (×100), (c) after experiment(×200)

Fig. 24에는 시료2의 제트밀 실험 전 후의 입도분포 이고, Fig. 25는 실험 전 후 전자현미경 사진이다. 입자의 평균입경이 23% 감소함을 알 수 있다.

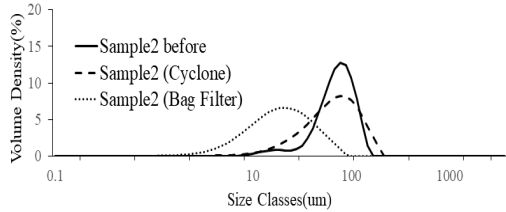


Fig. 24. particle size distribution sample2 after Jet milling.

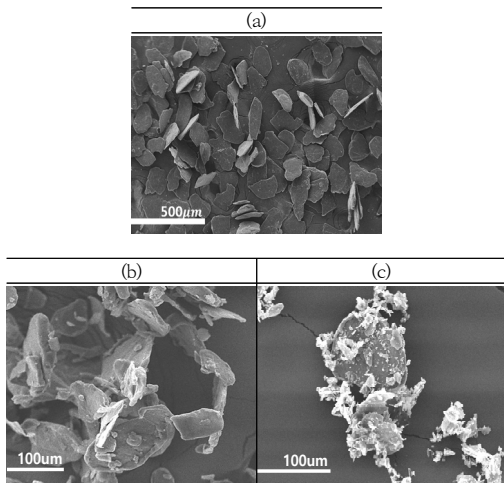


Fig. 25. SEM image of Sample2 after Jet mill. (a) before experiment, (b) Cyclone($\times 300$), (c) Bag Filter($\times 500$)

Fig. 26에는 시료3의 제트밀 실험 전 후의 입도분포 이고, Fig. 27은 실험 전 후 전자현미경 사진이다. 입자의 평균입경이 52% 감소함을 알 수 있다.

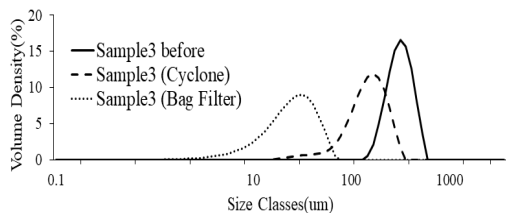


Fig. 26. particle size distribution sample3 after Jet milling.

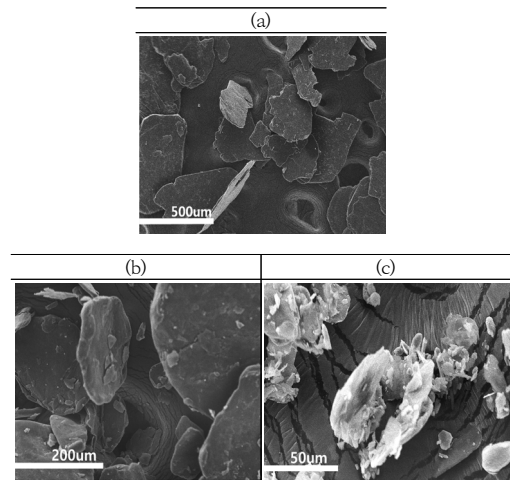


Fig. 27. SEM image of Sample3 after Jet mill. (a) before experiment, (b) Cyclone($\times 300$), (c) Bag Filter($\times 1000$)

Fig. 28에는 시료4의 제트밀 실험 전 후의 입도분포 이고, Fig. 29는 실험 전 후 전자현미경 사진이다. 입자의 평균입경이 15% 감소함을 알 수 있다.

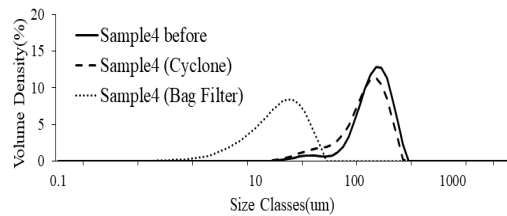


Fig. 28. particle size distribution of sample4 after Jet milling.

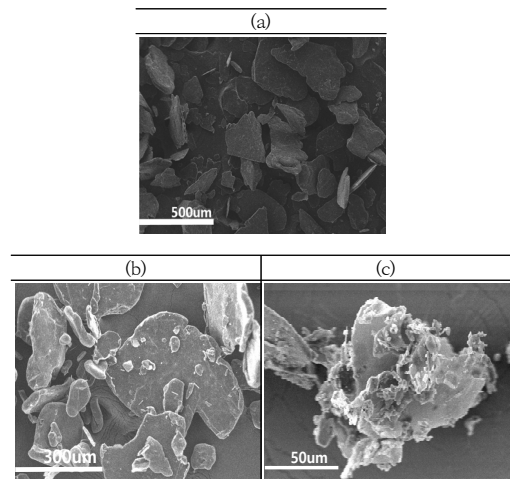


Fig. 29. SEM image of Sample4 after Jet mill. (a) before experiment, (b) Cyclone($\times 200$), (c) Bag Filter($\times 1000$)

4. 결론

1. 흑연의 불밀 실험에서는
 - 1) 분쇄보다는 뭉침 현상에 의해 볼과 자의 표면에 흑연이 부착되었다.
 - 2) 삽입제만을 혼합하였을 때는 플레이크흑연의 간극 변화가 발생하지 않았으나, 산화제와 삽입제 혼합물과 혼합하였을 때 최대 10mm의 간극 벌어짐이 발생하였다.
2. 플레이크 흑연 입자의 제트밀 실험에서는 최대 71% 정도 입자크기 감소가 발생하였다.

References

- [1] S. J Lee, "Usage and type of graphite", J. Miner. Soc. Korea(Mineral and Industry), 13, 2, 40-50, 2000.
- [2] Harben, PW and Kuzvart, M "A Global Geology" 193-2, 1997.
- [3] J. E Lee, "A Study on the Material Properties of the Ink Stick and the Graphite" Hongik University's dissertation (Master's), pp.20-35, 2013.
- [4] H. J Roh, 'Manufacture of the expanded graphite using natural graphite', Graduate School of Industry at Kyungpook National University of Technology (Master's), pp.2-10, 1995.
- [5] S. J Kim, J. Y Choi, H. H Shin, "Design and Analysis of Mixture Experiments for Ball Mix Selection in the Ball Milling" J Korean Soc Qual Manag Vol. 42, No.4: 579-590, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2014.42.4.579>
- [6] S. A Lee, H. K Han. "Comminution of Alumina using Ball Mill" Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 22, No. 8, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.8.688>
- [7] Y. S Park, "Preparation of Expanded Graphite using Perchloric Acid and Sulfuric Acid and It's Application as Anode Materials for High Power Li-ion Secondary battery" Graduate School of Nanotechnology, Myongji University(Master's), pp.11-17, 2010.
- [8] D. Y Park, "Preparation and characterization of expanded graphite as anode materials for high power Li-ion secondary batteries", Graduate School of Nanotechnology, Myongji University(Master's), pp.22-35, 2010.
- [9] W. P Jang, "Changes in mechanical properties according to particle size of isotropic graphite powder in manufacturing bulk graphite", New Materials Engineering, Kumoh University of Technology (Master's), pp.7-46, 2019.

- [10] S. D Im, "A Study on the Fire Resistance Characteristics and Applications of Expandable Graphite Composite Materias" Chonju University Graduate School, pp.1-91. 2022.
- [11] K. O Chun, D. H Rie, "A Study for the Fire Retardant-Characteristics of Expandable Graphite Composite Materials", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 3, pp. 28-33, June 2017.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.3.28>
- [12] H. S Ryu1, S. H Shin, S. Y Song, D. M Kim, "Mechanical and Fire Resistance Properties of Surface Preparation Mortar in Buildings Using Expanded Graphite" Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, v.7 no.4 , 2019, pp.395 - 404.
DOI: <https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.4.395>

이 승 아(Seung A Lee)

[준회원]



- 2021년 2월 : 순천향대학교 나노 화학공학과 (학사)
- 2023년 2월 : 순천향대학교 화학 공학 환경공학과 (석사)

<관심분야>

표면개질, 나노분체공학, 미립자공학

한 현 각(Hyun Kak Han)

[정회원]



- 1990년 8월 : 고려대학교 일반대학원 화학공학과 (박사)
- 1993년 ~ 현재 : 순천향대학교 교수
- 2017년 한국화학공학회 제 48대 부회장

<관심분야>

나노분체공학, 결정화공정, 나노입자표면개질, 나노입자코팅, 신뢰성공학