

접선 방향의 기체 주입에 의한 입자 마모 특성 연구

이시훈[†] · 박찬승* · 이재구 · 김재호

한국에너지기술연구원 가스화연구센터, *캘리포니아 주립대학 환경연구센터
(2008년 2월 11일 접수, 2008년 3월 28일 채택)

Attrition Characteristics in an Advanced Gasifier with Swirl Injection

See Hoon Lee[†], Chan Seung Park*, Jae Goo Lee, and Jae Ho Kim

Korea Institute of Energy Research, Gasification Research Center, Daejeon 305-343, Korea

*CE-CERT, UCR, Riverside, California, USA

(Received February 11, 2008; accepted March 28, 2008)

ASTM D5757-95에 따른 입자 마모 측정기를 이용하여 접선 방향의 기체 주입에 따른 입자 마모 특성을 고찰하였다. 접선 방향의 기체 주입에 따른 영향을 고찰하기 위하여 모래의 입도 분포 변화, 비산 회재의 양 등을 측정하여 비교하였다. 입자 마모에 따라서 발생하는 미세 입자들은 기체 유속이 증가함에 따라서 증가하였다. 수직 방향의 기체 주입에 비해 접선 방향으로 기체를 주입함에 따라서 입자 마모량이 변하였으며 노즐의 각도가 감소함에 따라서 비산량이 줄어들었다. 또한 전체 유량이 동일한 경우, 사용되는 노즐이 증가할수록 입도변화가 커짐도 알 수 있었다.

In the reactor for the american standard test method (ASTM) D5757-95 with swirl injection nozzles, the attrition characteristics of sand was investigated. The change of particle size distribution and weight of fine particles were compared to identify the effect of swirl injection nozzle on attrition. The fine particles due to particle attrition increased with increasing gas velocities. The weight of fine particles due to jet attrition was changed with angle of swirl injection nozzle. The fine particles decreased with decreasing the angle of swirl injection nozzle. Also, the change of particle size distribution increased with increasing the number of swirl injection nozzles at the same flow rate.

Keywords: attrition, swirl injection, eluidized bed, jet

1. 서 론

21세기의 지속적인 성장과 삶의 질 향상을 위한 새로운 에너지 기술개발에 대한 필요성이 에너지 수급 체계의 불안정성, 환경 문제에 따른 규제 강화, 대체에너지 개발의 어려움 등 때문에 강조되고 있다. 이에 따라 많은 국가들은 자국에 풍부한 재생에너지 자원으로부터 전력, 열, 합성가스 등을 생산하기 위한 노력을 활발히 진행하고 있다. 특히 바이오매스로부터 합성가스 및 합성연료를 생산하는 새로운 반응기, 열촉매를 이용하여 천연가스를 분해하여 수소와 탄소를 생산하는 열촉매 반응기 등, 기존의 단순한 고정층 형태에서 벗어나 고체가 유동하는 유동층 형태가 널리 이용되고 있다[1,2]. 일반적으로 유동층 반응기는 반응 효율이 높고 등온성이 우수하며 장치의 대형화가 유리하다고 알려졌으나 입자와 입자간의 마찰, 입자와 벽간의 마찰 등에 의한 마모 현상이 단점으로 지적되고 있다[1].

바이오매스 열분해 및 가스화 반응, 열촉매 분해 반응기 등에 이용되는 기포 유동층 반응기는 충물질과 고체 탄화수소 물질 또는 촉매 등이 유동층 반응기 안에서 밖으로 배출되지 않아야 하나 마모 및 비산(elutriation) 현상에 의해서 만들어지는 미세 입자들이 반응기 밖

로 유출되게 된다[3]. 반응기 안에서 입자의 변화를 이해하는 것은 반응기 설계에 매우 중요한 인자가 되며 이것은 반응 효율과 입자 배출 조절에 영향을 끼치게 된다. Tardin 등[4]은 0.3 m-I.D., 2.2 m-high 의 CFB에서 수행한 batch 실험을 통하여, 조업 유속이 증가함에 따라 마모가 활발히 일어나 미세 입자를 더 많이 발생하기 때문에 기체 유속이 증가할수록 평균 입도가 감소한다고 하였다. 또한 초기 입자의 크기가 클수록 평균 입도가 감소한다고 하였다. 분산판의 오리피스(orifice)에서 발생하는 제트(jet)에 의한 유동층의 영향은 jet penetration length로 정의되는 일정한 영역에서만 영향을 미친다. 제트 길이 이를 넘어서면 층높이를 증가시켜도 제트에 의한 입자 마모 속도는 일정하게 된다. 분산판의 제트 영역에서 입자 마모에 영향을 주는 인자는 오리피스의 분포와 크기, 기체 유속, 오리피스 속도 등이 있다. Werther와 Xi[5]와 Werther와 Reppenhagen[6]은 제트 영역에서 단일 오리피스에 의한 입자 마모 속도가 오리피스의 유속과 입자 크기에 비례한다고 하였다. Wu 등[7]은 porous 분산판과 3~5 mm의 단일 노즐을 사용하여 제트에 의한 입자의 마모를 실험하여 마모 속도가 노즐에서의 오리피스 제트 속도와 반응기의 겉보기 속도에 영향을 받는다고 하였고 유동층 높이가 커질수록 마모 속도가 증가한다고 하였다. Kage 등[8]은 유동층 반응기에 수평으로 주입되는 제트에 의한 입자 마모를 실험하였다. 그는 슬러그의 특성이 변화함에 따라 마모의 특

[†] 교신저자 (e-mail: donald@kier.re.kr)

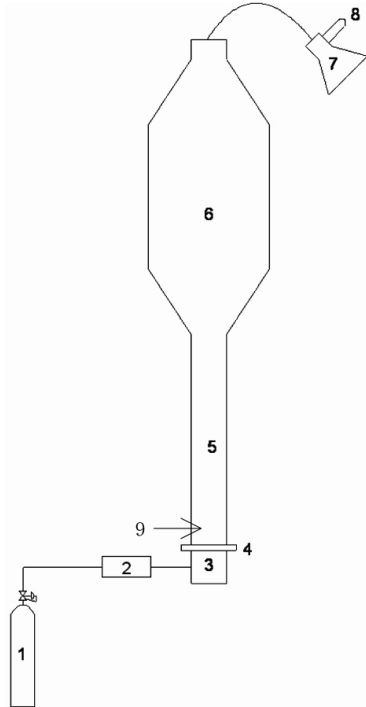


Figure 1. Schematic diagram of ASTM D5757 reactor with swirl injection (1. Air, 2. Flowmeter, 3. Windbox, 4. Distributor, 5. Attrition reactor, 6. Freeboard, 7. Flask, 8. Timble filter, 9. Nozzle direction).

성이 변한다고 하였으며 입자가 2개 혹은 그 이상으로 깨지는 현상은 발생하지 않았고 마멸만 나타났다고 하였다. 그러나 대부분의 연구가 단일 노즐 또는 수직형으로 연결된 노즐의 영향만을 연구하였다. 이에 따라 본 연구에서는 새로운 반응기들에 적용되는 접선 방향의 노즐에 의한 입자의 마모 특성을 각도, 개수 등의 조건들에 따라서 분석하였다.

2. 실험 장치 및 범위

접선 방향의 기체 주입에 따른 입자의 마모 특성을 고찰하기 위하여 ASTM D 5757-95 반응기를 개조하여 제작한 swirl injection 반응기의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 마모관은 내경 0.035 m, 높이 0.71 m, 두께 3 mm의 stainless steel, 침강조는 내경 0.11 m, 높이 0.63 m, 두께 3 mm의 stainless steel로 제작되었다. 침강조의 하부는 높이 0.23 m의 확장관으로 마모관에 연결되어 있으며, 상부는 높이 0.1 m의 수축관으로 직경 0.034 m의 기체 출구와 연결되어 있다. 기체 출구를 통하여 외부로 비산된 입자는 삼각 flask와 timble filter에서 포집된다.

기체 분산관은 0.381 mm 오리피스 3개가 삼각 pitch (pitch: 0.017 m)로 배열되어 있다. 접선 방향의 기체 주입(swirl injection)을 고찰하기 위하여 0, 45, 90°의 각도로 각각 4개의 노즐이 설치된 마모관을 3개를 추가로 제작하여 실험에 사용하였다. 각각의 노즐은 90° 간격으로 설치되어 있다. 반응기의 기체 유속을 ASTM 규정에 따라 0.17 m/s를 기준으로 하여 0.09~0.4 m/s까지 MFC (5850EM, Brooks Co.)를 이용하여 조절하였다. 수력학적 특성을 고찰하기 위한 입자층의 무게는 50 g으로 하였으며 5 h 동안을 운전하며 마모 특성을 실험하였다. 기존의 결과와 비교하기 위하여 모래를 사용하였으며 입도를

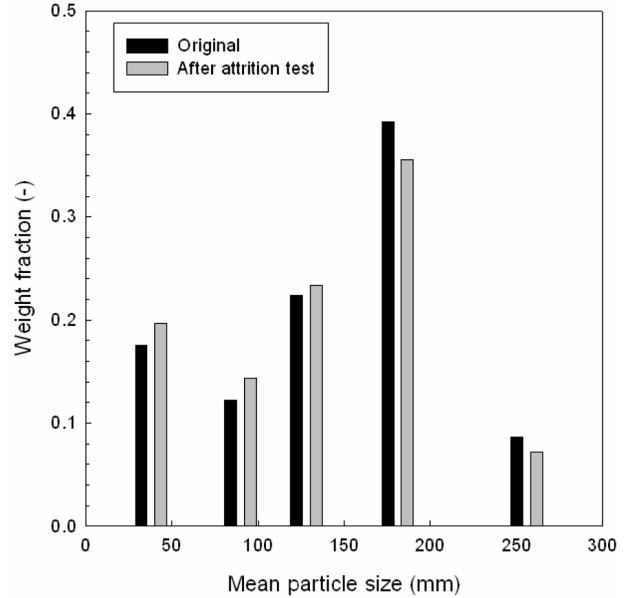


Figure 2. Particle size distribution of original sand and operated sand.

212~300 μm로 고정하였다. 각각의 실험에서 비산회재는 1 h 단위로 측정되었으며 실험이 끝난 후, 고체의 입도를 sieve shaker (0~106, 106~150, 150~212, 212~250, 250~300 μm)를 이용하여 마모에 대한 영향을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1. Swirl 주입

대부분의 반응기에서 사용하고 있는 수직 방향의 기체 주입에서 벗어나 접선 방향의 기체 주입에 따른 입자의 마모 및 이에 따른 입도 분포 변화를 측정하기 위하여 유동층 반응기에서 유동물질로 많이 이용되고 있는 모래의 입도 변화를 측정하여 Figure 2에 나타내었다. 일반적으로 유동층 반응기에서 유동 입자로 많이 사용되는 모래, 석회석, 회재 등의 입자에 따른 Lee 등[9]의 결과를 보면 마모지수가 모래, 석회석, 회재의 순으로 증가한다. 회재와 모래의 마모지수와 수정마모지수를 비교하면 모두 회재가 4~5배 높게 나왔으며 석회석의 경우, 2배 정도 높게 나타났다.

마모관에서 배출되어 상부의 비산 물질 포집기에 잡히는 물질들의 입도는 대부분 10 μm 이하이기 때문에 가장 낮은 입도 분포 영역인 0~75 μm의 영역에 포함하여 계산하였다. 테스트 전의 입도를 보면 0~300 μm까지 고르게 분포가 되어 있으며 100~200 μm가 가장 많이 포함되어 있었다. 시험 후의 입도 분포를 보면, 150 μm 이상의 입자들의 분포는 감소하였으며 입자 크기가 작은 경우는 모두 증가하였다. 따라서 접선 방향의 기체 주입에 따른 마모 특성을 고찰하기 위하여 212~300 μm의 입자를 기준으로 실험하였다. 입자의 마모에 따라서 비산되는 양과 비산되지 않는 양이 상대적으로 존재하고 입자의 성상, 크기 등에 따라서 서로 다른 경향을 보이기 때문에 일반적으로 유동층 반응기에서 널리 이용되는 크기의 입자를 선정하였다[8,9].

212~300 μm의 입자로 5 h 동안 마모 실험한 결과를 Figure 3에 나타내었다. 실험은 10 L/min의 공기를 이용하였으며 5 h 동안 가동한 후에 비산물질들과 마모관에 남아있는 양을 합하여 이들의 입도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 212~300 μm의 입도의 90%

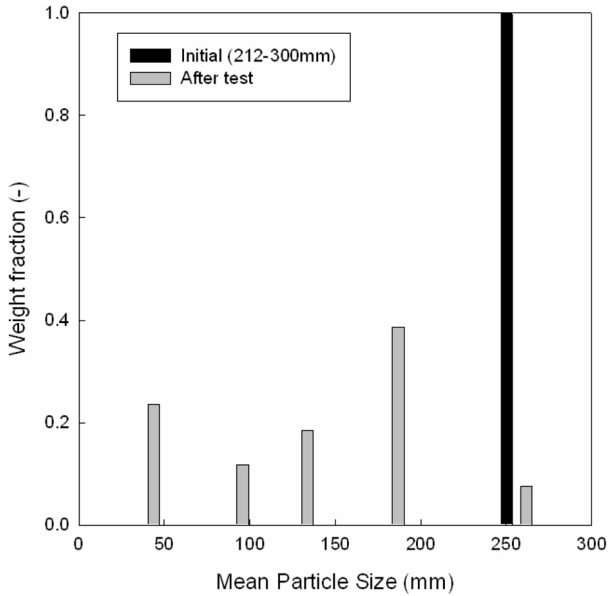


Figure 3. Particle size distribution after attrition test of 212~300 μm particle.

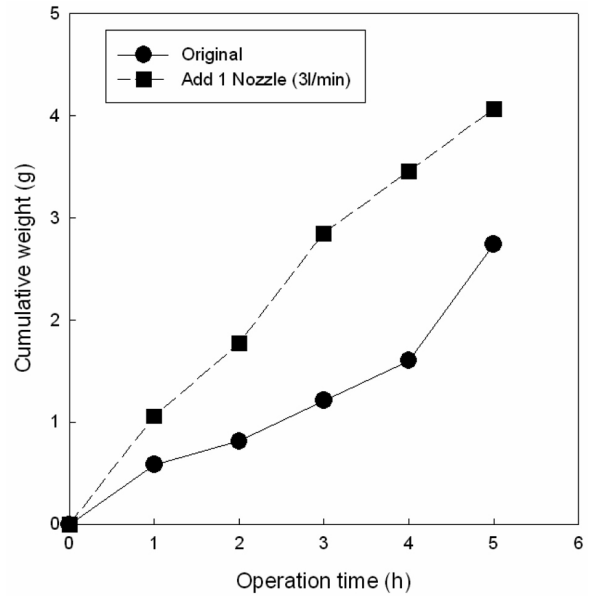


Figure 5. Cumulative weight of fine particle during attrition test.

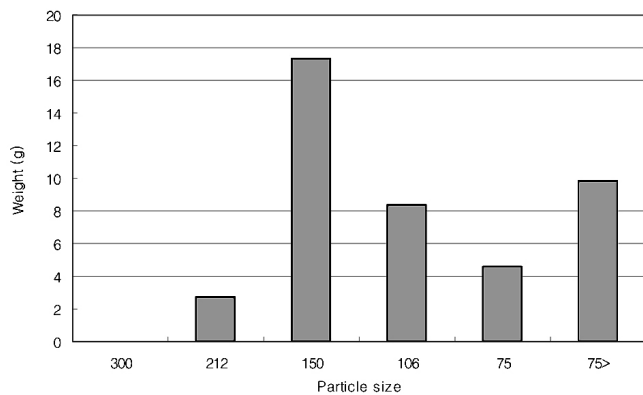


Figure 4. Weight after attrition test of 212~300 μm particle.

이상이 고체와 고체, 고체와 벽 등의 마모에 의해서 감소함을 알 수 있다. 이는 Lee 등[9]의 결과에서 보듯이 유동층 내의 마모 현상이 10 μm 이하의 미세한 입자들만을 생성하는 것이 아니라 전체 입도의 변화를 주어 유동층의 상태를 변화시키는 요인이 된다. Figure 4에는 동일 실험에서 실험 후의 마모관에 남아있는 실험 입자들의 입도별 무게 분포를 나타내었다. 75 μm 이하의 입자들이 비산되어 반응기 밖으로 배출되었음에도 불구하고 그림에서 보듯이 75 μm 이하의 입자가 매우 많이 존재함을 알 수 있다. 입자의 마모는 미세 입자의 비산으로 인한 증발질의 손실과 반응기 내의 입도 분포를 지속적으로 변화시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

Figure 5에는 1개의 접선 노즐을 이용하여 진행한 마모 실험의 시간에 따른 비산회재 포집량을 나타내었다. ASTM에 따른 단순 마모 실험과 같이 접선 노즐을 이용하는 경우에도 시간에 따른 비산회재 배출량이 지속적으로 증가하였다. 또한 기존의 실험[1,9]과 마찬가지로 실험을 시작한 후의 1 h 동안에 배출되는 회재의 양이 가장 많았다. 이는 초기 입자들의 크기가 가장 크고 이에 따라 접선 방향의 기체 주입의 영향에 따른 마모 효과가 가장 크기 때문으로 여겨진다. 비산회재의 누적 분포를 비교해보면, 개조된 마모관에서의 입자의 마모가

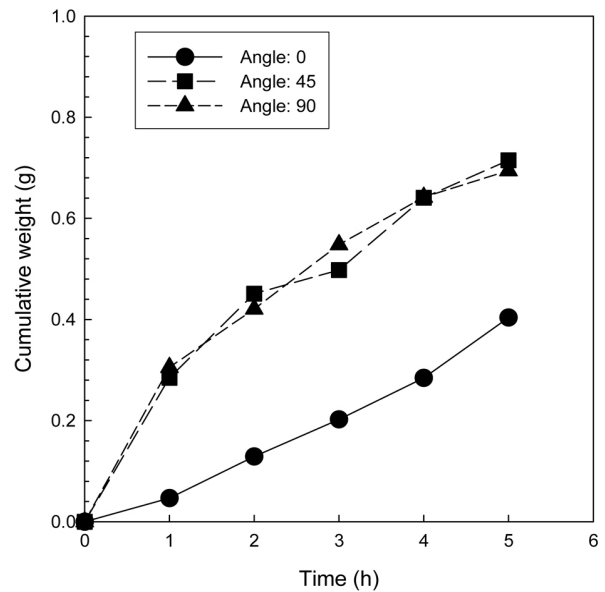


Figure 6. Cumulative weight of fine particle with angle of swirl injection nozzle.

더욱 활발하게 나타남을 알 수 있다.

Figure 6과 Figure 7에는 접선 방향의 각도에 따른 마모 특성을 나타내었다. 일반적으로 노즐 형태로 기체를 주입하는 경우에는 접선 방향(0°)으로 주입하는 경우와 수직으로 주입하는 경우에 대한 연구만이 이루어졌다. 그림에서 보면 접선 방향으로의 기체 주입으로 인한 비산 회재 발생보다는 수직 방향의 주입에 의한 비산 회재 발생이 더욱 많았다. 그러나 45°로 주입한 경우에는 수직으로 주입한 경우와 비슷한 비산 회재 발생량을 나타내었다.

일반적으로 입자 혼합을 위해서는 반응기 하부에서 수직 방향으로 주입하는 경우가 접선 방향으로 기체를 주입하는 경우보다 월등한 것으로 보고되었으나, 비산회재로 배출되는 미세 입자의 양을 보면 수직으로 주입하는 경우가 접선 방향으로 주입하는 경우보다 높게 나타

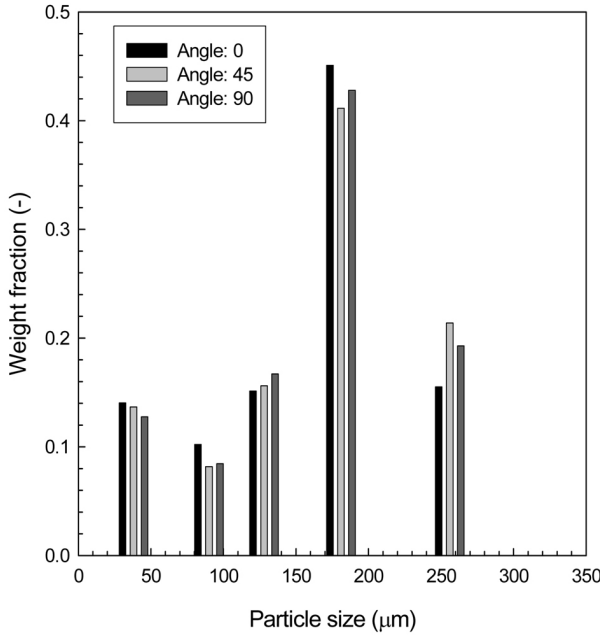


Figure 7. Particle size distribution with angle of swirl injection nozzle.

났다. 또한 Figure 7을 보면 접선 방향으로 기체를 주입하는 경우의 입도 분포 변화가 수직으로 주입하는 경우보다 활발히 일어남을 알 수 있다. 따라서 반응기의 하부에서 수직으로 기체를 주입하는 경우에는 입자의 직접적인 마모로 인하여 반응기 밖으로 배출되는 미세한 입자들이 많이 발생하고, 접선 방향으로 주입하는 경우에 유동층 내의 전체적인 입도 변화가 활발히 이루어지나 비산화재로의 배출량은 상대적으로 적음을 알 수 있다. 또한 접선 방향 노즐이 45~90°일 경우에는 초기 1 h 동안에 가장 많은 비산화재가 발생하나 접선 방향인 0°의 경우에는 초기에 마모량이 적다가 시간이 지나면서 비산 회재의 량이 증가하는 경향을 보였다.

Figure 8에는 주입되는 유량을 고정(10 L/min)시킨 상태에서 접선 방향의 노즐 개수를 증가시킨 경우의 비산입자의 누적분포를 나타내었다. 노즐 개수에 따른 영향을 고찰하기 위하여 각각의 노즐의 유량은 2 L/min으로 고정하였다. 그림에서 보듯이 노즐 개수가 증가할수록 비산입자 발생량이 증가하였다. 그러나 3~4개 사이에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 반응기 노즐로만 주입되는 경우보다 반응기 하부에서 주입되는 가스에 의한 비산입자 발생량이 더욱 많음으로 보아 반응기 하부로의 가스 주입이 노즐 주입보다 입자 마모에 유리함을 알 수 있다.

4. 결 론

바이오매스 가스화와 같이 최근에 개발되는 새로운 반응기들이 널리 이용하고 있는 유동층은 입자의 손실이 전체 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 동일한 유량을 주입하면서도 입자 마모를 줄이는 것은 효율 증대와 가스 정제에 큰 도움이 된다. 일반적으로 이용되는 수직 방향의 기체 주입에 비해 접선 방향의 주입이 입자의 혼합 효과는 좋으며 비산화재 배출은 적었다. 노즐을 이용하지 않는 경우보다

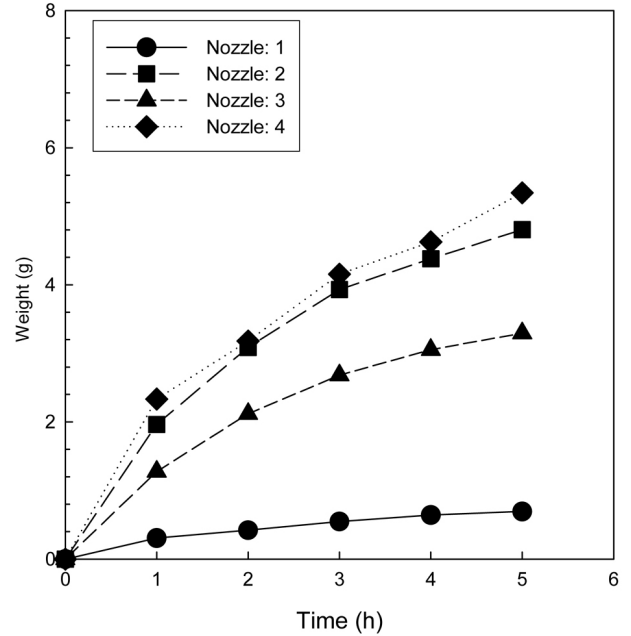


Figure 8. Cumulative weight of fine particle with number of nozzles.

노즐을 이용하는 경우에 비산 회재의 발생량과 유동 물질의 입도 변화가 활발하게 나타났다. 노즐의 접선 방향의 각도가 수직인 경우보다 45, 0°로 낮아질수록 비산량은 줄어드는 효과가 있으나, 반응기 내부의 입도 변화는 커지는 현상을 보여주었다. 또한 전체 유량이 동일한 경우에는 사용되는 노즐이 증가할수록 입도변화가 커짐도 알 수 있었다.

사 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2006-611-D00007).

참 고 문 헌

1. S. H. Lee and S. D. Kim, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 1090 (2004).
2. D. K. Park, M. W. Seo, J. H. Goo, S. D. Kim, S. H. Lee, J. G. Lee, and B. H. Song, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18**, 415 (2007).
3. D. Merrick and J. Highley, *AIChE Symp. series*, **70**, 366 (1974).
4. P. Tardin, L. Goldstein, G. Lombardi, and J. Pagliuso, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 4141 (2001).
5. J. Werther and W. Xi, *Powder Technology*, **76**, 39 (1993).
6. J. Werther and J. Reppenhagen, Siemens Westinghouse Power Corporation, Pittsburgh, PA, USA, 435 (1999).
7. S. Y. Wu, J. Baeyens, and C. Y. Chu, *Can. J. Chem. Eng.*, **77**, 738 (1999).
8. H. Kage, K. Kawaji, H. Ogura, and Y. Matsuno, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **33**, 605 (2000).
9. S. H. Lee, S. D. Kim, J. S. Kim, and J. M. Lee, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**, 547 (2006).