

화울링 저감을 위한 분립체용 볼 밸브의 개발

이 찬, 원 영 식*

수원대학교 기계공학과

* 동화솔루션

(접수일자 : 2005. 9. 29 / 채택일자 : 2005. 10. 31)

Development of the Fouling-Controlled Ball Valve Used for Gas-Solid Flow

*Chan Lee, Young Shik Won**

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon

** Dongwha Solution*

요 약

밸브 내부의 입자들의 화울링 현상의 제어 및 저감을 위해 공기분사 방식을 적용하는 새로운 분립체용 볼 밸브를 개발하였다. 밸브 내부의 분립체 와 분사공기 흐름간의 상호작용 및 화울링 현상에 대한 규명을 위해 전산유체역학적 해석을 수행하였고, 해석결과들을 밸브 형상 및 공기분사 조건 설계에 반영하였다. 설계된 분립체용 볼 밸브의 실제 시험을 통해, 본 볼 밸브가 여러 운전 조건들에 대해서 우수한 화울링 저감효과를 가짐을 알 수 있었다.

ABSTRACT : Developed is the new gas-solid flow ball valve where air injection purging concept is applied for the control and the reduction of particle fouling. CFD analyses are conducted for investigating the interaction between gas-solid and air injection streams and the fouling phenomena in valve, and the analysis results are reflected in the design of valve geometry and air injection condition. Through the actual tests on designed ball valve, the present valve is shown to be superior in fouling reduction.

Key words: Gas-solid flow(분립체), Fouling(화울링), Ball valve(볼 밸브), 퇴적률(Deposit rate), 퇴적비율(Deposit ratio)

1. 서 론

최근 들어 국내 경제의 주춧돌 역할을 하는 반도체 및 LCD 산업은 수 많은 CVD설비를 사용하고 있다. 그러나 CVD 설비의 반도체 제조 공정 특성 상 다양한 가스의 사용과 마이크론(μm) 사이즈의 미세한 고체 입자들의 발생이 불가피하며, 이로 인해 CVD 설비에서 발생하는 공정 가스는 가연성이며 dense phase의 분립체(gas-solid flow)의 특징을 보인다. 이러한 이유로, 반도체 제조 공정은 일정시간의 조업 후, 제조 설비내의 입자 체류 및 분진 폭발을 방지하기 위해, 공정가스를 외부로 배출하고, 세정가스를 이용하여 설비 내부의 세정작업을 수행하여야한다. 그리고 이러한 조업과 세정의 작업은 반복적으로 이루어지며, 이로 인해 CVD 설비로부터 공정가스 와 세정가스가 번갈아 배출된다. 반도체 제조를 위한 CVD 설비 후방에는 공정가스와 세정가스의 처리를 위한 각각의 환경설비가 설치되며, CVD 설비와 환경설비 사이에는 공정가스와 세정가스를 각각의 환경설비로 교대해 보내기 위한 3-way 밸브의 설치가 필수적이다. 그러나 이러한 3-way 밸브는 높은 밀도 및 경도를 가지는 고체입자들을 포함하는 고속 분립체를 다루므로, 밸브 내부 유로 및 접속 부위에서의 화울링 및 마모 현상이 매우 심각하며, 이로 인한 밸브의 오작동 및 가스 누설이 흔히 관찰되고 있다[1]. 또한 이러한 3-way 밸브의 오작동 및 가스 누설은 공정가스와 세정가스 간의 혼합을 야기하게 되며 이로 인한 분진 폭발의 위험성 및 후방 환경설비의 처리 부하 증가 및 성능 저하는 반도체 공장의 생산성 및 신뢰성을 떨어뜨리는 매우 심각한 문제들이다[2].

기존의 반도체 제조라인에 사용되는 3-way 밸브는, Fig.1 에서 보여 지듯이, 실린더형 밸브로서 밸브로 유입되는 가스중의 입자들이 밸브 내부에서 재순환, 정체되는 구간이 많고, 이로 인해 밸브 내부의 퇴적(deposit) 및 화울링(fouling) 현상이 현저하게 발생하며 이로 인한 밸브 내부의 마모 및 침식, 부식이 밸브의 수명을 단축시키는 요인이다[2,3,4,5]. 이러한 이유로, 최근 들어서 반도체 전문설비 업체들은 좀더 수명이 길며 작동의 신뢰성이 있는 3-way 밸브의 개념 정립 및 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있으

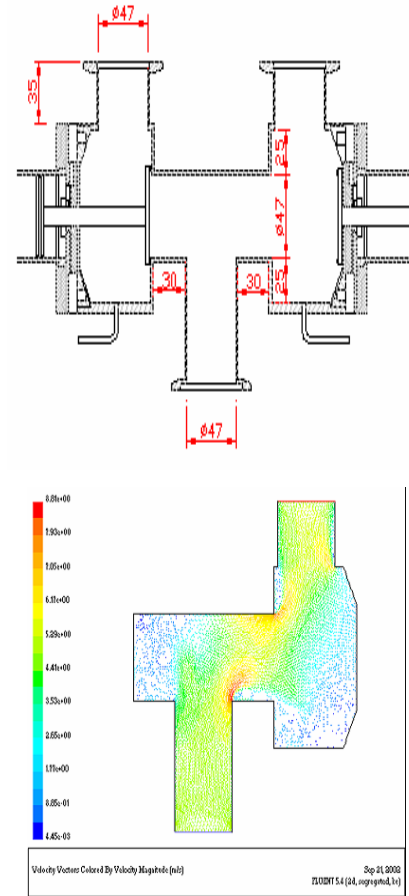


Fig.1 Schematics and gas velocity vector of cylinder-type valve

나, 밸브 내부의 입자들이 야기하는 화울링 문제를 해결하지 못해 밸브의 성능 및 내구성 향상에 많은 어려움을 겪고 있다.

그러므로 본 연구는 앞서 언급한 것과 같은 실린더형 밸브의 문제점을 해결하기 위해, 분립체 밸브로서 기존의 실린더형 밸브 대신 볼 밸브 형태를 적용하였고, 밸브 내부의 화울링현상의 제어 및 저감을 위해서는 밸브 내부에서의 공기분사방식을 적용하였다. 또한 본 밸브의 유체역학적 현상 규명 및 파울링 거동을 평가하여 밸브 설계에 반영하기 위해 전산유체역학적 해석방법을 사용하였고, 설계된 밸브의 화울링 특성은 실험을 통해 검증하였다. 더 나아가 실험적 결과들로부터 본 연구에서 제안된 볼 밸브가 화울링 현상을 저감시키는 데 매우 효과적임을 알 수 있었다.

2. 밸브의 설계 및 해석

2-1. 밸브의 설계 개념

앞서 언급한 바와 같이, 기존의 실린더형 밸브의 문제점들은 밸브로 유입되는 가스중의 부식성, 침식성 입자들의 밸브 내부 체류현상에 의해 기인하며, 이로 인해 비유선형 밸브 내부형상으로 인한 가스 흐름의 정체, 벽면과의 충돌 현상, 밸브의 입구 분류가 밸브 측면 벽에 충돌하여 침식(erosion)현상, 밸브의 피스톤 head 근처에 가스의 재순환 영역 형성 마찰, 마모 및 입자의 적체, 밸브의 closed 피스톤 head 근처에 고압 형성으로 인한 피스톤/ 실린더 간극(clearance)을 통한 가스 누설 및 입자의 끼임 현상등이 발생한다. 이러한 기존 밸브 내부의 부정적인 현상을 원천적으로 방지하기 위해서는, 실린더형 밸브의 내부 유로와는 달리 좀더 유선형의 기하학적 유로 형상을 가지는 밸브가 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 90° 곡관(elbow) 형태의 유로를 가지는 볼 밸브를 고려하였다.

본 연구에서는 3차원 분립체 볼 밸브의 설계 개념 확정 및 기본 설계를 위해서 전산유체역학적 해석방법을 사용하였다. 밸브 내부 분립체의 유동 해석을 위해 3차원 정상상태 유동해석을 수행하였고, 3차원 유동 해석을 위해 상용코드인 FLUENT code[6]를 사용하였다. 전산해석을 함에 있어서 난류에 의한 효과는 standard k-ε model을 사용하였고, 가스의 난류 유동에 따라 움직이는 분진 입자의 거동을 예측하기 위해서 discrete phase 모델을 사용하였다. 이때 입자들은 10 μm 의 균일한 사이즈를 가지는 것으로 가정하였으며, 가스 흐름에 따른 입자의 궤적은 stochastic 모델을 사용하여 구하였다[6].

볼 밸브의 상세 설계에 앞서 본 연구에서는 볼 밸브의 곡관 유동 형태에 대한 타당성을 전산유체역학적 해석방법을 이용하여 우선적으로 검토하였고(Fig.2 참조), 이때 곡관을 통과하는 대표적인 공정 가스의 성상 및 분진 입자의 조건들은 Table 1 에 보여지고 있다[5].

Figs.3 과 4는 곡관형태의 밸브 내부 유로에 대한 가스 흐름의 압력, 속도 분포 및 분진 입자의 궤적을

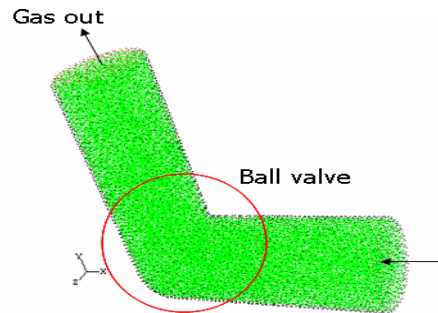


Fig.2 90o turning flow path of ball valve

Table 1. Properties of gas and particles

Item	Quantity	Remark
Gas flow (kg/s)	0.003	N ₂ (81.0%), SiH ₄ (2.7%), NH ₃ (6.5%), H ₂ (6.5%), PH ₃ (3.2%)
Particle flow (kg/s)	0.0003	* Solid-to-gas loading ratio = 0.1 * 90% of SiH ₄ in CVD process is converted to SiO ₂ particles

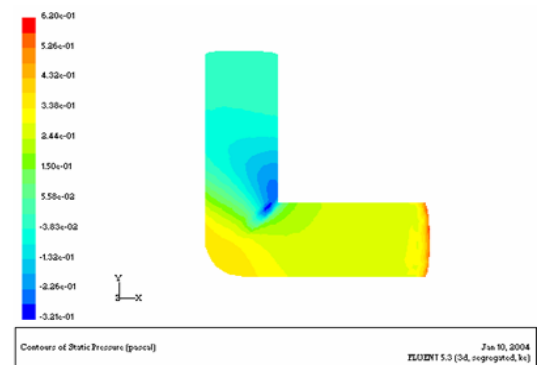
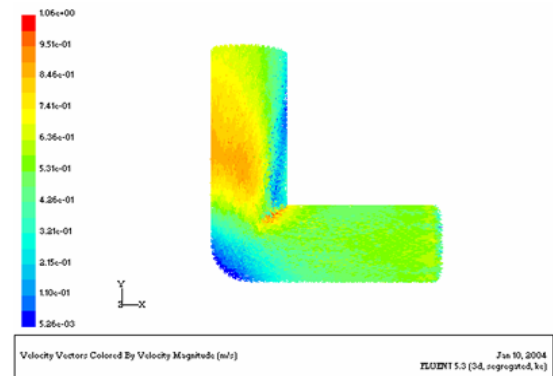


Fig.3 Velocity and pressure distributions in 90o turning section

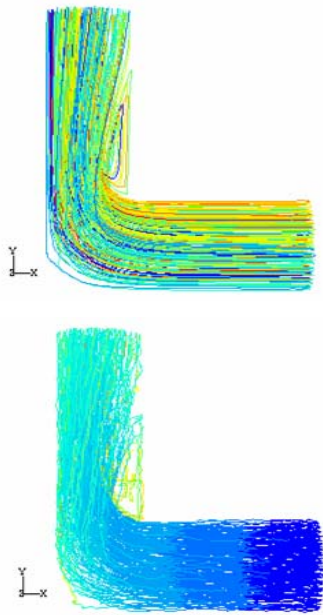


Fig.4 Flow pathlines and particle tracks in 90° turning section

전산유체역학적 해석방법을 이용하여 예측한 결과들을 보여주고 있으며, Fig.1의 실린더형 밸브 내부 유로에서의 속도 분포와 비교해 볼 때 입자의 충돌, 정체 및 재순환 영역이 많이 줄어들은 것을 알 수 있다. 그러나 곡관형 볼 밸브라 할지라도 밸브의 turning corner의 후방에 재순환 영역이 생성되며, 재순환 영역에서 부식성 가스가 정체되며 분진들도 밸브 내벽을 불규칙하게 충돌하는 현상도 보여주고 있다. 또한 유입된 분진 입자들이 고속으로 밸브의 내부 벽면에 충돌하여 부식(erosion)을 통한 마모 현상을 유발할 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로, 이러한 볼 밸브 내부의 유동 문제를 해결하기 위해서는 재순환 영역의 축소를 위한 유동제어 개념이 밸브 설계 시 고려되어야 하고, 본 연구에서는 이를 위해 Fig.5와 같이 밸브 표면에서의 공기분사(air injection purging)를 적용하였다.

2-2. 밸브의 형상 설계

앞서 언급한 바와 같이 분진 입자의 충돌 및 재순환 영역을 줄이기 위해, 밸브의 유로를 90° 곡관의 형태를 가지도록 설계하였고, 곡관 유로 내부의 가스

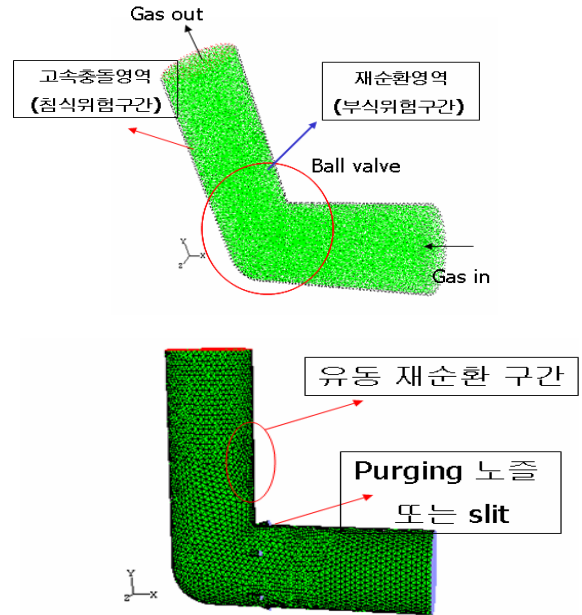


Fig.5 Flow-related problems and air injection purging concept

유동박리(flow separation)에 의해 불가피하게 발생하는 재순환 영역을 최소화하기 위해서는 밸브 표면에서의 purging을 적용하였다.

Fig.6은 이러한 설계 개념을 가지고 본 연구에서 고안한 밸브의 형상을 보여주고 있다. 밸브 입, 출구의 유로 단면을 축소-확대관의 형태로 설계한 이유는 밸브 입, 출구에서 가스 흐름을 가속시켜 높은 유체 운동량을 얻어내어, 밸브 벽면에서의 유동 정체 및 재순환 현상을 제어하고자 함이다. 또한 밸브의 벽 표면에서의 purging은 slit 형태의 틈 사이로 외부에서 고압의 질소를 흐름방향에 따라 20°의 각도로 분출시키는 형태로 설계하였고, 밸브 입, 출구에서의 분출 흐름을 Fig.6에서는 각각 upstream, downstream purging으로 표시하고 있다. Fig.7은 본 연구에서 설계한 볼 밸브의 3차원 형상을 입체적으로 보여주고 있다.

Fig.8은 purging이 없는 경우의 밸브 내부의 유속 분포와 입자의 궤적을 보여주고 있다. 축소-확대 단면 설계로 인해 유동 재순환 영역이 상대적으로 줄어들었으나, 가스흐름에 따른 입자의 궤적이 매우 불규칙한 거동을 보여주며, 밸브 코너 후방에서의 유

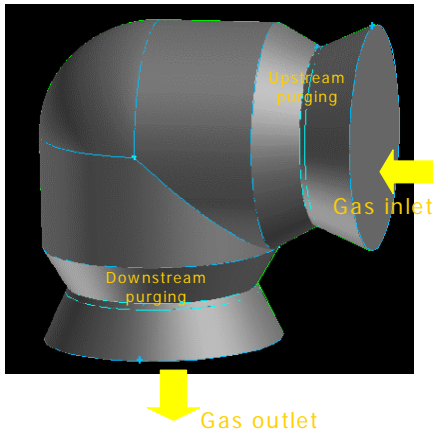


Fig.6 Geometric configuration of ball valve

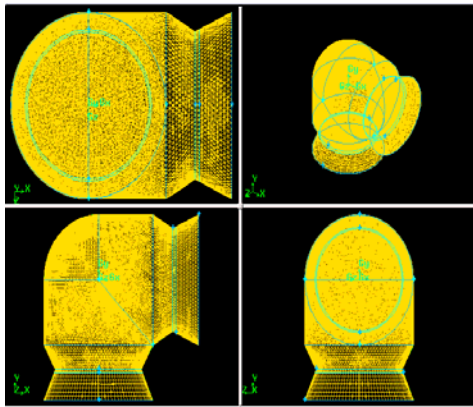


Fig.7 Three-dimensional views of ball valve

동 재순환에 의해 입자가 정체되어 퇴적될 가능성이 있는 것으로 보여 진다. 또한 밸브 입구에서 유입된 가스 흐름이 밸브 벽면에 충돌하여 발생하는 재순환 영역의 존재는 분진 입자의 퇴적을 초래할 것으로 예견된다. Figs.9, 10 및 11 은 gage 압력으로 0.2, 1.0 및 2.0 기압의 질소를 purging 유체로 사용하는 경우의 밸브 내부의 유속 분포 및 입자들의 궤적을 보여주고 있다. 그림들에서 볼 수 있듯이, purging 이 있는 경우가 없는 경우에 비해 밸브 후방 부위의 재순환 영역을 줄이는 효과가 있으며, 입자 궤적간의 꼬임현상 및 입자들 간의 충돌현상도 줄어드는 것을 알 수 있다. 특히 밸브 출구에서의 upstream purging 으로 인해 밸브 출구 부위의 재순환 영역 제어가 효과적으로 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 밸브 입구 흐름이 벽면에 충돌하며 발생시키는 재순환영

역은 purging을 통해 제어하는 것이 어려운 것으로 보여지며, purging 압력도 밸브 내부의 재순환 영역 감소 제어에 큰 영향을 미치지 못하는 못하며, 밸브를 통과하는 가스 압력손실도 전체압력에 비해 큰 차이를 보이지 않았다.

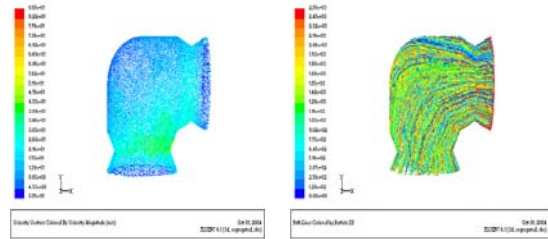


Fig.8 Velocity vector and particle tracks in the valve with no purging

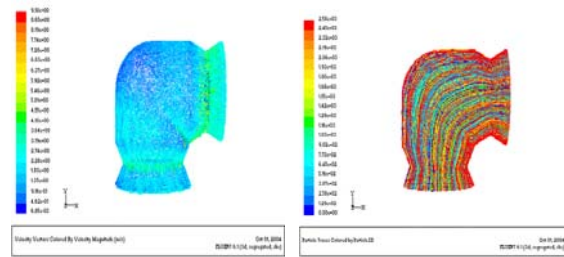


Fig.9 Velocity vector and particle tracks in the valve with purging at 0.2 atm

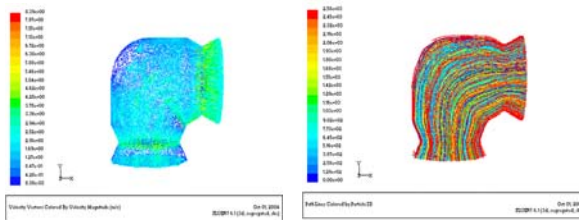


Fig.10 Velocity vector and particle tracks in the valve with purging at 1 atm

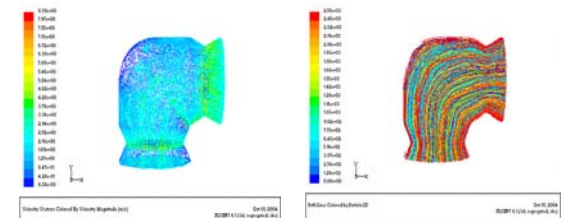


Fig.11 Velocity vector and particle tracks in the valve with purging at 2 atm

앞서의 설계 개념을 이용하여 설계, 제작된 볼 밸브의 전체 외형과 볼 밸브 port 에 관한 사진이 Fig.12 에 나타나 있다.

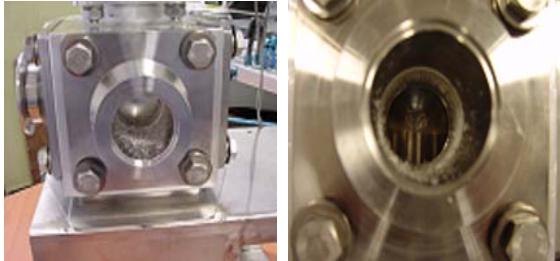


Fig.12 Ball valve assembly and its outlet port

3. 밸브의 화울링 시험

앞서 설계된 밸브의 화울링 특성에 대한 시험을 수행하였다. 본 밸브의 화울링 저감 성능 시험을 위해서는 실제 반도체 공정의 분립체(gas-solid mixture) 흐름에 대한 모사시험을 수행하였다. 본 연구의 모의 시험을 위해 구성한 실험설비의 구성 및 사진이 Fig.13 에 나타나 있다.

그림에서 보여 지듯이, 밸브로 들어가는 가스는 공기를 사용하였고, 공기유량은 1.2 m³/min 로 설정하였다. 반도체 공정에서 발생하는 분진입자는 독성이 강한 관계로, 실제 분진 입자를 대체하는 분진입자로 점착성이 강한 밀가루를 사용하였다. Fig.14 의 입도 분석결과에서 보여지듯이, 밀가루 입자 크기는 0.1 ~ 300 μm 범위에 걸쳐있으며 평균 입자의 크기는 41.77 μm 로 나타났다. 밀가루 입자는 Fig.15 과 같은 특성의 회전식 고체 공급 장치를 통해 공기 중에 투입되어 공기 중에 비산되어 밸브를 통과한다.

밸브내부에서 퇴적되지 않은 고체입자들은 밸브 후방에 설치된 백 필터로부터 회수하여 무게를 잰 후 투입된 고체량과의 차이로부터 밸브 내부에서의 고체 퇴적량(deposit weight)을 구하고, 그에 따라 단위 시간당 퇴적률(deposit rate, g/min), 더 나아가 투입 고체량 대비 밸브 내 고체입자의 퇴적량인 퇴적비율(deposit ratio, g/g)을 실험적으로 구하였다. Purge가 없는 경우의 설계점(부하비율=0.1)에서 밸브에 퇴적되는 고체입자의 퇴적률은 15.41 g/min, 퇴

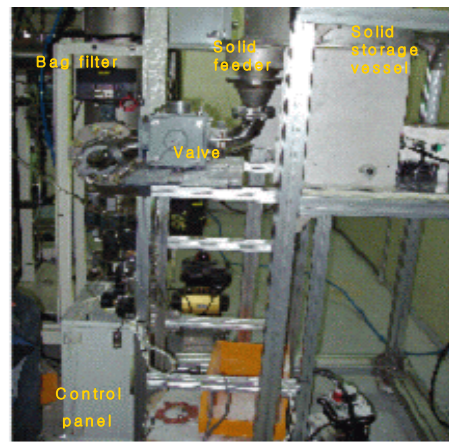
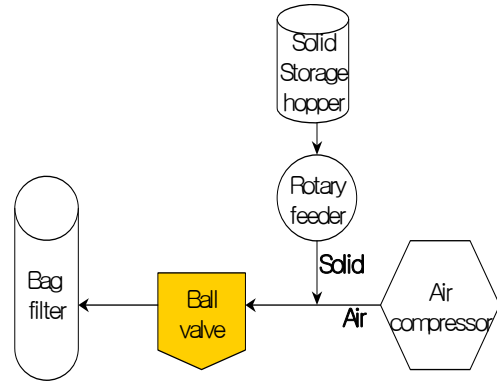


Fig.13 Lab test apparatus for the fouling of ball valve

적비율은 0.107 g/g 로 측정되었다. Purge가 없는 경우를 기준으로 하여 부하비율(0.02~0.14)과 purge 유량(10~80 LPM)에 따른 화울링에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하였다.

Figs.16 과 17은 가스의 온도가 상온으로 유지되는 경우의 밸브의 모사시험을 통한 고체입자들의 화울링 특성을 퇴적률과 퇴적비율로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 밸브 내 고체입자의 퇴적률은 10 g/min 이하, 퇴적비율은 0.02 g/g 이하로서 purge가 없는 경우에 비해 매우 낮게 나타났다. 즉 공기분사에 따른 purge 효과가 입자 퇴적을 제어하는데 매우 효과적임을 알 수 있다. 또한 부하비율(solid-to-gas loading ratio)이 커질수록 퇴적률은 증가하나 퇴적비율은 거의 일정한 경향을 보인다. 그리고 앞서의 전산해석결과들에서 예측된 바와 같이, purge 유량(또는 압력)은 고체입자의 퇴적비율에는 큰 영향을 미치지 않는다고, 낮은 부하비율 조건

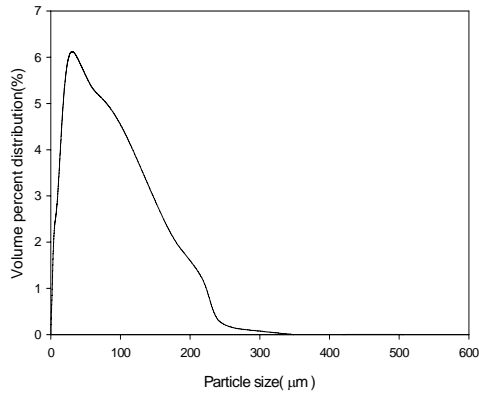


Fig.14 Histogram for particle size distribution

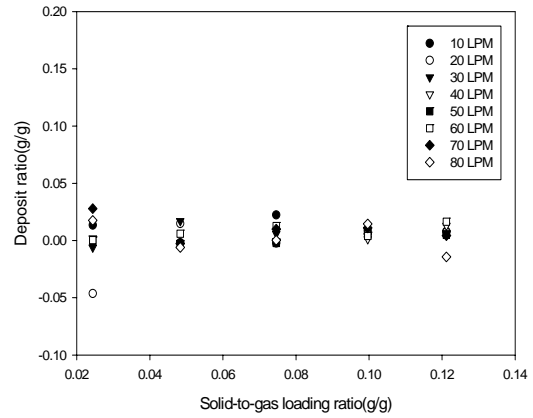


Fig.17 Effect of purge flow on the deposit ratio of solid at 250C

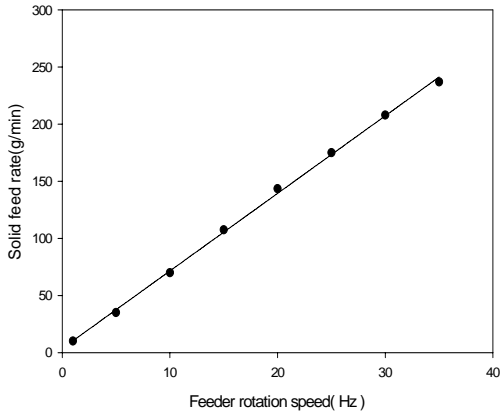


Fig.15 Solid feed rate with feeder rotation speed

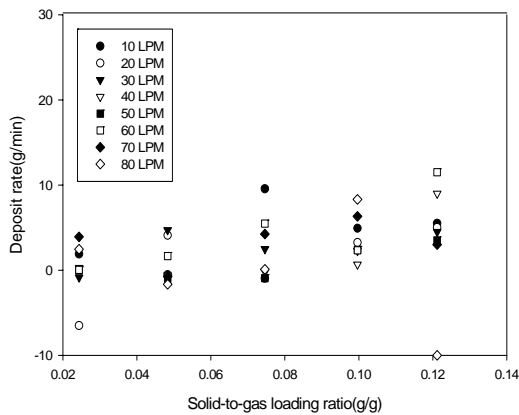


Fig.16 Effect of purge flow on the deposit rate of solid at 250C

에서는 purge 유량에 의한 효과가 다소 불규칙하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 측정결과들로부터, 밸브 내 고체입자는 가스에 분산, 비산되어 흘러가나, 밸브 내 가스 유속이 비교적 낮은 관계로(10 m/s 이하) 흐름 중의 고체입자가 중력에 의해 일부 퇴적되는 것으로 판단된다.

4. 결론

화울링이 많이 유발되는 분립체 가스의 처리를 위한 새로운 개념의 3-way 볼 밸브를 개발하였다. 볼 밸브는 기존의 실린더형 밸브의 단점을 극복하기 위하여, 밸브를 곡관형유로를 가지는 볼 밸브로 구성하였고, 밸브 내부의 고체입자 퇴적현상을 줄이기 위해 밸브 입,출구 부위의 노즐형태 설계 및 공기분사 purging 설계 개념을 도입하였다. 그리고 전산유체역학적 해석방법을 이용하여 본 밸브의 설계개념을 검토하고, 밸브 내부 분립체의 유동 및 입자 화울링 특성을 검토하였다. 설계된 밸브의 화울링 특성 시험을 통해, 본 밸브의 설계 개념 및 해석 결과를 밸브 내부에서 고체입자의 퇴적률은 부하비율에 따라 증가하며, 퇴적비율은 낮은 부하비율에서 불규칙한 양상을 보이지만 다소 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터의 지원에 의한 것입니다. 이에 관계자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이찬, 반도체 공정용 밸브의 전산해석 기술, 경기 중소기업지원센터 기술지도보고서, 2003
- [2] 김진환 외, 분체공학, 동화기술, 2005
- [3] 권동구, 김윤제, “고속 분립체 이송용 곡관의 내마모성 향상에 관한 연구,” 에너지공학, vol.10, no.1, pp.33-39, 2001
- [4] 권동구, 김윤제, “내마모성을 갖는 고속 분립체 이송용 곡관의 형상 설계,” 한국에너지공학회 2000년도 춘계학술발표회 논문집, pp.229-235, 2000
- [5] 이찬 외, 반도체 공정의 분립체 불 밸브 개발, 중소기업 기술혁신개발사업 최종보고서, 경기중소기업청, 2005
- [6] Fluent Code User Manual, 2005