

## 실리콘 웨이퍼 연마장비용 왁스 스프인코팅장치의 내부기류 제어에 관한 전산유동해석

김경진 · 김동주\* · 박종윤\*\*†

금오공과대학교 기계시스템공학과, \*금오공과대학교 기계공학과, †\*\*금오공과대학교 기전공학과

### CFD Analysis on the Internal Air Flow Control in a Wax Spin Coater of Silicon Wafer Polishing Station

Kyoungjin Kim, Dongjoo Kim\* and Joong-Youn Park\*\*†

Department of Mechanical System Engineering

\*Department of Mechanical Engineering

†\*\*Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology

#### ABSTRACT

In this paper, the air flow induced by the rotating flat disk is numerically investigated in a hope to better understand the air flow structures inside the wax spin coater for a silicon wafer polishing station. Due to the complex inner geometry of actual spin coater such as the casing around the rotating ceramic block and servo motor, recirculation of air flow is inevitably found on the coating target if the internal space of spin coater is closed at the bottom and it could be the possible source of contamination on the wax coating. By numerical flow simulation, we found that it is necessary to install the air vent at the bottom and to apply the sufficient air suction in order to control the path of air flow and to eliminate the air recirculation zone above the spinning surface of coating target.

**Key Words** : Silicon Wafer, Spin Coater, Wafer Polishing Station, Air Flow Control, CFD

#### 1. 서 론

반도체 소자용 단결정 실리콘 웨이퍼는 여러 복잡한 초정밀 제조 공정을 거쳐 생산되는데 전체 웨이퍼 제조 공정에서 핵심공정 중의 하나인 웨이퍼 표면 연마 공정은 앞서의 실리콘 잉곳 절단공정을 거쳐 나온 거친 웨이퍼의 표면을 평탄하게 만들고 표면의 결점을 제거하는 공정이다. 웨이퍼 표면상에 고도의 평탄도 (degree of planarization)를 확보하는 것은 웨이퍼 제조에서 고수율 확보의 필수조건이다[1,2]. 또한 반도체 소자의 초소형화 및 고집적화가 가속됨에 따라 웨이퍼의 평탄도에 대한 반도체 산업계의 요구 수준은 점점 높아지고 있으며 현재 0.1 마이크로미터 수준의 전체 적 평탄도 및 수 나노미터 단위의 국부적 미세제도 확

보가 필요하다.

실리콘 웨이퍼 연마공정을 수행하는 웨이퍼 연마스테이션이 Fig. 1에 개략적으로 도식되어 있다. 웨이퍼는 3단계의 각각 다른 연마도에 따른 연마 세부공정을 거쳐 완성단계에 이르는데, 이 세부공정에 들어가기 전 후에 웨이퍼를 연마헤드에 장착 및 탈착시키는 웨이퍼 연마 준비공정이 필요하다. 웨이퍼의 표면 연마는 초고도의 정밀공정을 요구하는 작업이므로 웨이퍼의 연마도는 웨이퍼가 연마헤드에 장착되는 방식 및 그 장착 정밀도에 크게 좌우될 수 있다.

Fig. 1의 왼편에 보이는 왁스 마운터는 현재 산업현장에서 웨이퍼를 연마헤드에 장착하는데 주로 채택하는 장치로서 도포된 액상의 왁스를 이용하여 웨이퍼를 부착시키는 왁스방식이다. 앞서 언급된 도식에서 시계 방향으로 진행되는 왁스 마운터에서의 웨이퍼 핸들링 세부 공정단계를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 고도의

†E-mail : jypark@kumoh.ac.kr

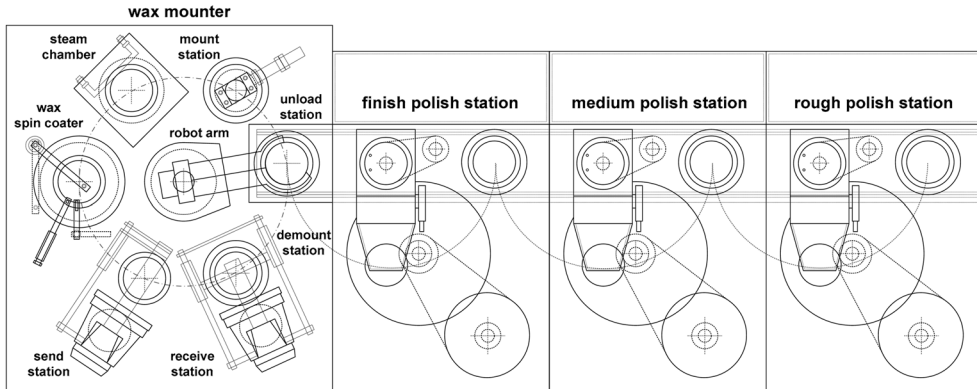


Fig. 1. Schematic of silicon wafer polishing station including wax mounter.

평탄도를 갖는 SiC 재료의 세라믹 블록에 스펀코팅 방식으로 10마이크론 정도로 매우 얇고 균일한 왁스 코팅층을 확보한 후에 열처리 공정으로 거쳐 웨이퍼가 블록 표면에 부착된다. 웨이퍼가 부착된 세라믹 블록은 각 연마단계로 이송되어 해당 연마헤드에 장착되어 연마공정이 진행되며, 다시 왁스 마운터로 이송된 후 세라믹 블록에서 탈착되어져 카세트에 담기게 된다.

여기서 왁스 마운터의 핵심장치는 스펀코팅장치로서 웨이퍼가 부착될 세라믹 블록에 매우 균일한 왁스 코팅층이 확보되지 않거나 공기기포, 미립입자 등으로 코팅층이 오염된다면 웨이퍼 연마 시 목표로 하는 고도의 웨이퍼 평탄도를 이룰 수가 없다. 이러한 정밀공정이 필요한 스펀코팅장치에서 원판의 고속회전으로 발생하는 코팅대상 표면상 및 그 주위의 공기유동이 균일 왁스 코팅층 형성에 영향을 줄 수 있다.

참고로 반도체소자의 제조에서 노광 및 식각공정 전 단계로 실리콘 웨이퍼 표면에 감광제 도포를 스펀코팅 방식으로 수행하고 있으며 이에 대한 연구는 활발히 진행된 바 있다[3-6]. 하지만 본 연구 대상인 스펀코팅 장치는 실리콘 웨이퍼 생산공정에 이용되며 웨이퍼가 아닌 웨이퍼가 장착될 세라믹 블록에 스펀코팅이 적용되며, 웨이퍼 제조공정의 스펀코팅장치에 관한 연구는 수행된 바가 없다.

한편, 웨이퍼의 연마헤드 장착방식으로 최근 들어 왁스를 이용하지 않고, 다공성 패드를 이용하여 웨이퍼를 세라믹 블록에 흡착시키는 왁스리스 방식이 쓰이기도 하나[7], 왁스 방식이 국내 웨이퍼 생산현장에서 가장 많이 이용된다.

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼 표면 연마공정장치의 일부인 스펀코팅장치의 내부 공기유동을 전산유체역학(CFD)기법으로 해석함으로써 기존 장치에서의 기류경

로 인한 문제점을 분석하고 왁스 코팅층 균일도포 및 코팅층의 오염 등의 문제점 해결에 유리한 내부 기류제어 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 해석대상 및 방법

### 2.1. 스펀코팅장치 구조

8인치 실리콘 웨이퍼 연마스테이션의 준비공정장비인 왁스 마운터의 일부인 스펀코팅장치는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 세라믹 블록을 장착하여 회전구동을 수행하는 서보모터를 비롯하여 액상의 왁스 공급장치 및 스펀코팅 전에 세라믹 블록 상의 이물질을 제거하는 세정장치로 구성된다. 또한 Fig. 3의 오른쪽에 보이는 바와 같이 서보모터 및 세라믹 블록을 감싸는 캐치컵 케이싱이 있어 스펀코팅 시 세라믹 블록 밖으로 넘치는 왁스가 장치 외부로 나가지 않도록 장치 내부로

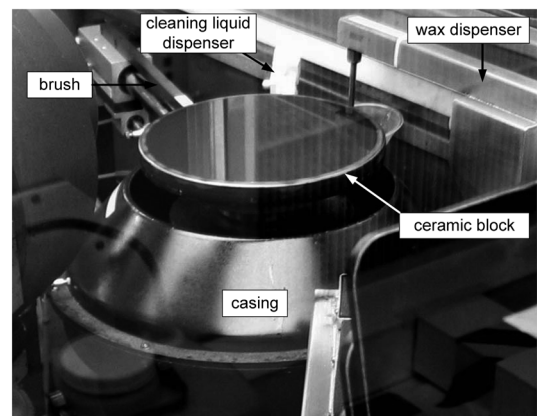


Fig. 2. Wax spin coater for wafer carrying ceramic block in the silicon wafer polishing station.

모아준다. 세라믹 블록이 장착되는 선반은 상하 이동이 가능하여 세라믹 블록이 로봇암에 의하여 탈부착이 될 때는 Fig. 2에 보이는 위치로 세라믹 블록이 케이싱 위로 이동하며, 세라믹 블록이 회전하며 왁스가 도포될 때에는 Fig. 3과 같이 케이싱 내부로 이동한다.

본 연구에서는 장치 내부의 서보모터부 및 이에 장착된 세라믹 블록이 고속회전하는 스펀코팅 시에 장치 내부 및 세라믹 블록 표면 상의 공기유동에 대한 전산해석에 초점을 맞추었다. 이러한 기류해석에 대한 유동계산영역에는 Fig. 3의 왼편에 보이는 바와 같이 회전하는 세라믹 블록 및 서보모터부와 케이싱 사이의 영역과 함께 외부에서의 공기유입을 고려하기 위한 세라믹 블록 위의 외부공기 영역이 포함되어 있다.

케이싱 및 세라믹 블록을 포함한 회전부의 축방향 높이는 각각 26 cm 및 22.5 cm 인데 반하여 외부공기 영역의 높이는 50 cm로 충분히 주어 세라믹 블록 표면에 생겨나는 재순환 유동을 해석할 수 있도록 하였다. 8인치 웨이퍼 장착이 가능한 세라믹 블록의 직경 및 두께는 각각 24 cm 및 2.5 cm로서 실제 산업현장에서 사용되는 장치의 크기이다. 그리고 스펀코팅장치 내부기류의 제어를 위하여 케이싱 내부의 최하단에 공기흡입구를 마련하였으며, 본 연구에서 그 형상은 높이 3 cm, 직경 38 cm의 원통형 형상으로 단순화 하였다.

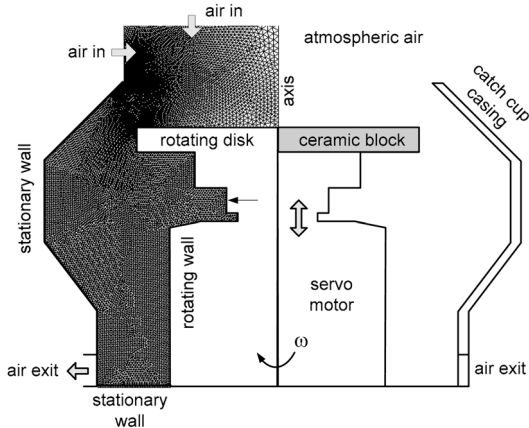


Fig. 3. Cross-sectional view of wax spin coater and computational domain for air flow analysis.

Fig. 4에 보이는 바와 같은 회전하는 무한크기 원판 주위의 유체유동은 그 동안 많은 연구가 진행된 분야로서 von Kármán 점성프롭 현상이라 불리며, 층류 유동의 경우 상사해가 존재한다[8]. 본 연구의 대상이 되는 스펀코팅장치 상의 기류 역시 기본적으로 같은 유동이나, 회전체인 세라믹 블록의 유한한 크기와 주위의

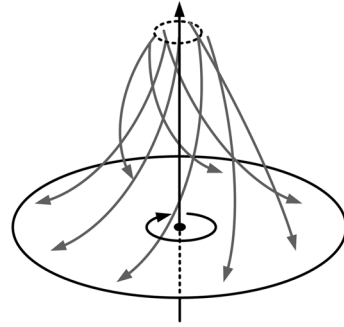


Fig. 4. Viscous flow pattern on the rotating disk (von Kármán viscous pump).

케이싱에 의하여 유동구조가 크게 영향을 받는다. 따라서 최소한 2차원 유동해석이 필요하다.

## 2.2. 기류 전산해석 방법

스펀코팅장치 내부 및 주위의 기류는 2차원 축대칭 유동으로 단순화 하였으며 세라믹 블록 및 내부장치의 회전에 따른 선회유동 역시 유동해석에서 고려되었다. 액상의 왁스층은 두께가 매우 얇으므로 공기유동에 영향을 주지 않는다고 할 수 있어 세라믹 블록 상의 왁스층은 해석에서 고려되지 않았다. 공기유동은 비압축성 정상유동이라고 가정하였다. 또한, 높은 회전수에 따라 유동은 난류라고 가정하였으며, 난류 유동장을 해석하기 위하여 Renormalization Group 이론에 기반을 둔 RNG k-ε 난류모델을 사용하였다[9]. 적용된 난류모델은 일반적인 표준 k-ε 난류모델에 비하여 본 연구의 대상 공기유동에서 나타나는 강한 선회 및 와류유동의 해석에 높은 예측 정확도를 가진다고 알려져 있다[10].

레이놀즈 평균 연속방정식 및 운동량방정식 그리고 난류운동에너지 및 난류운동에너지 소산율에 대한 난류 수송방정식 등 일련의 유동 지배방정식들은 미소 제어체적방법을 기반으로 하여 이산화되었으며 그 수치계산에는 범용 유동해석 소프트웨어인 FLUENT 6.3이 사용되었다. 전산해석에 사용된 계산격자계는 GAMBIT 소프트웨어를 사용하여 마련되었으며, 약 3만개의 비정렬 삼각형 격자가 사용되었다.

세라믹 블록 및 서보모터부의 회전속도는 실제 웨이퍼 제조공정에서는 200~500 rpm 정도인데, 본 연구에서는 100 rpm의 저속에서부터 1000 rpm까지의 고속회전까지를 해석의 대상으로 삼았다. 또한 하단의 공기흡입구를 통한 기류제어를 적용하여 공기흡입이 고려되지 않은 경우와 비교하여 기류제어의 적용에 따른 기류변화 및 그 유용성을 해석하였다.

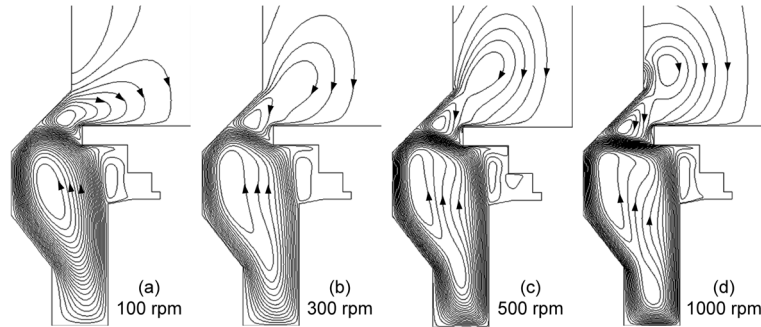


Fig. 5. Effects of rotational speed on the streamlines of air flow in a spin coater with bottom air exit closed.

### 3. 전산해석 결과

본 연구에서는 먼저 장치 내부가 완전히 밀폐가 된 경우에 앞서 제시된 왁스 스핀코팅장치 내에서의 기류에 대해 전산해석을 수행하였으며 코팅과정에 악영향을 줄 수 있는 내부기류의 문제점을 분석하였다. Fig. 3에서 보이는 하단의 공기흡입구를 막아 케이싱과 같이 계산 상 점착조건으로 처리하였다.

세라믹 블록 및 서보모터부의 회전속도는 100 rpm에서 시작하여 300, 500 그리고 1000 rpm의 경우까지 유동 전산해석의 대상으로 삼았다. Fig. 5에는 회전속도가 스핀코팅장치 내 기류에 미치는 영향을 유선(streamline)으로 표현하였다. 먼저 저속인 100 rpm의 경우를 보면, 스핀코팅장치 내부에서 유동이 회전방향을 따라 선회하면서 서보모터부 면을 타고 내려가고 회전하는 세라믹 블록 높이까지 케이싱을 타고 올라가는 재순환 유동영역이 존재한다. 한편 세라믹 블록 상단에서 블록의 가장자리 옆까지 유동이 상하로 재순환하는데, 내부의 재순환과는 반대방향으로 기류가 순환함을 볼 수 있다. 앞서 언급한 von Kármán 점성뽀프 현상에서 보다시피 회전축을 따라 회전하는 원판에 유

동이 다가와 원판 표면을 따라 퍼져나가게 되므로 재순환 영역의 순환방향은 이에 따라 결정된다.

회전속도가 올라가도 이러한 두 형태의 유동 재순환 영역은 유지가 된다. 회전속도가 높을수록 커지는 원심력에 따라 내부의 재순환 유동은 벽면에 밀착되며, 세라믹 블록 상단의 재순환 유동은 그 영역이 커진다. 특히 1000 rpm과 같은 고속회전에서는 상단의 재순환이 둘로 갈라지며 내부의 재순환 영역을 밀고 들어감을 볼 수 있다.

스핀코팅 대상인 세라믹 블록 표면상에 재순환 유동이 존재하는 것은 코팅층 품질을 볼 때 바람직하지 않은 현상으로, 세라믹 블록을 벗어나가는 왁스 코팅액적이나 내부의 오염입자가 다시 코팅층으로 되돌아올 수 있으며, 코팅층 상의 복잡한 유동구조는 균일한 코팅층 형성에 방해가 된다. 따라서 스핀코팅장치의 설계에서 내부기류를 제어하여 세라믹 블록 상의 재순환 유동을 제거해줄 필요성이 있다.

이와 같이 스핀코팅장치의 내부가 밀폐되었을 때 발생하는 내부기류의 문제점을 해결하기 위하여 내부의 케이싱 하단에 공기흡입구를 설치하였다. 먼저 강제적인 공기흡입 없이 공기흡입구를 개방한 경우가 공기흐

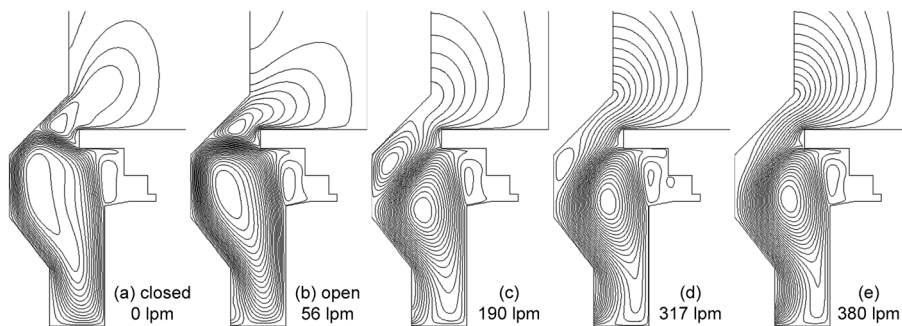


Fig. 6. Effects of air flow suction on the streamlines of air flow in a spin coater rotating at 300 rpm.

를 개선에 도움이 되는지를 300 rpm 회전속도 기준으로 살펴보았다. 공기흡입구 개방은 상부의 외기와 같은 공기 압력을 경계조건으로 처리하여 모델링 되었는데, 그 결과로 56 lpm의 공기량이 상부 대기에서 유입되어 개방된 하단부로 빠져나갔으며 기류 구조의 변화는 Fig. 6(b)에 나타나 있다. Fig. 6(a)의 밀폐 경우와 비교하여 볼 때, 하단을 개방하여줌으로써 상부의 기류 재순환영역이 하부 쪽으로 약간 이동을 하였으나 큰 변화는 없는 것으로 보인다.

이번에는 공기흡입구의 흡입압력을 조정하여 강제적인 공기흡입이 이루어지도록 하였으며, 300 rpm의 회전속도 기류구조에 대한 공기흡입 정도의 영향이 Fig. 6에 나타나 있다. 흡입압력 또는 공기흡입량이 높아지면서 상부의 기류 재순환영역이 점점 더 장치 내부로 파고 들어가며 그 영역이 작아지게 된다. 또한 하부로 이동한 상부 재순환영역과 하부에 존재하는 재순환영역 사이에 강제흡입되는 공기의 이동경로가 명확히 생겨남을 볼 수 있다. 공기흡입량이 380 lpm 정도 또는 그 이상으로 충분히 커지면 Fig. 6(e)에 보는 바와 같이 세라믹 블록 상에 있었던 기류 재순환영역이 완전히 제거되어 기류 재순환에 따른 세라믹 블록의 코팅층 상의 입자 오염 위험성을 최소화할 수 있으리라 본다.

스펀코팅으로 타겟 표면에 생성되는 액체 코팅층에서는 Ekman 유동 불안정성에 의하여 나선형 형상의 띠가 코팅층 표면에 생겨날 수 있다[11,12]. 이러한 유동 불안정성을 제거해주기 위해서는 세라믹 블록 표면 위 기류의 선회속도를 최소화하는 것이 좋다. 또한 입자 오염원이 코팅 타겟표면 상에서 부유할 기회를 줄이고 신속히 하부로 빠져나가야 하는 면에서도 표면

상의 기류 선회속도를 최대한 줄이는 것이 유리하다. 300 rpm의 회전속도에서 장치 내부가 밀폐된 경우와 380 lpm 공기량의 강제흡입이 있는 경우에 대하여 기류의 선회속도 분포를 Fig. 7에서 비교하였다. 이 경우 역시 강제흡입을 적용할 때 회전표면 상의 기류 선회속도가 대폭 감소하였음을 볼 수 있어 스펀코팅장치에서 하부로의 강제흡입이 필요함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

실리콘 웨이퍼 연마장비의 준비공정용 왁스 스펀코팅장치의 설계에서 입자 오염 위험성 감소와 균일한 코팅층 생성을 위하여 코팅 타겟인 세라믹 블록 상 장치내부의 기류 전산해석을 수행하여 공기유동의 구조를 분석하였다.

장치내부가 밀폐된 경우 세라믹 블록 상에 기류 재순환영역 및 높은 기류 선회속도가 발견되어 코팅표면 상의 오염 위험성 및 유동 불안정성이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 장치내부에 공기흡입구를 설치하여 강제적 공기흡입으로 기류를 제어하였다. 공기흡입량이 충분할 때 코팅 타겟표면 상의 기류 재순환영역을 제거할 수 있었으며 기류 선회속도 역시 크게 감소시킬 수 있어 코팅 품질 유지에 유리함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문이다(과제번호: 2010-104-019).

#### 참고문헌

1. Pei, Z. J., Fisher, G. R., and Liu, J., "Grinding of Silicon Wafers: A View from Historical Perspectives," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1297-1307, 2008.
2. Sun, W., Pei, Z. J., and Fisher, G. R., "Fine Grinding of Silicon Wafers: Effects of Chuck Shape on Grinding Marks," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 673-686, 2005.
3. Larson, R. G. and Reh, T. J., "Spin Coating," *Liquid Film Coating*, edited by Kistler, S. F. and Schweizer, P. M., Chapman & Hill, London, pp. 709-734, 1997.
4. Bornside, D. E., Brown, R. A., Ackmann, P. W., Frank, J. R., Tryba, A. A., and Geyling, F. T., "The Effects of Gas Phase Convection on Mass Transfer in

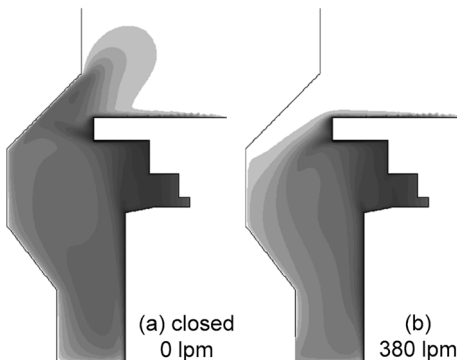


Fig. 7. Swirl velocity contours for the cases of closed air exit and the air suction with the volume flow rate of 380 lpm. Darker area represents higher swirl velocity.

- Spin Coating,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 73, pp. 585-600, 1993.
5. Oztekin, A., Bornside, D. E., Brown, R. A., and Seidel, P. K., “The Connection between Hydrodynamic Stability of Gas Flow in Spin Coating and Coated Film Uniformity,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 77, pp. 2297-2308, 1995.
  6. Yang, Y.-K. and Chang, T.-C., “Experimental Analysis and Optimization of a Photo Resist Coating Process for Photolithography in Wafer Fabrication,” *Microelectronics Journal*, Vol. 37, pp. 746-751, 2006.
  7. Kim, K., Kwak, H. S., and Park, K. S., “An Experimental Study on Wafer Demounting by Water Jet in a Waxless Silicon Wafer Mounting System,” *Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology*, Vol. 8, pp. 31-35, 2009.
  8. Panton, R. L., *Incompressible Flow*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.
  9. Choudhury, D., “Introduction to Renormalization Group Method and Turbulence Modeling,” Technical Memorandum TM-107, Fluent Inc., 1993.
  10. Gupta, A. and Ranganathan, K., “Three-Dimensional Turbulent Swirling Flow in a Cylinder: Experiments and Computations,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 249-261, 2007.
  11. Wahal, S., Oztekin, A., Bornside, D. E., Brown, R. A., Seidel, P. K., Ackmann, P. W., and Geyling, F. T., “Visualization of a Gas Flow Instability in Spin Coating Systems,” *Applied Physics Letters*, Vol. 62, pp. 2584-2586, 1993.
  12. Craster, R. V. and Matar, O. K., “Dynamics and Stability of Thin Liquid Films,” *Reviews of Modern Physics*, Vol. 81, pp. 1131-1198, 2009.
- 
- 접수일: 2011년 1월 3일, 심사일: 2011년 1월 25일,  
 게재확정일: 2011년 2월 28일