

원환형 덮개장착이 스피너 장비의 기류에 미치는 영향

곽 호 상^{*1}, 양 진 오², 이 상 우³, 박 상 희³

EFFECTS OF PLACEMENT OF A TORUS PLATE COVER ON AIR FLOW IN A SPINNER EQUIPMENT

H.S. Kwak^{*1}, J.O. Yang², S.W. Lee³, and S.H. Park³

A numerical investigation is made of air flow in a spinner equipment used for cleaning and drying flat display panels. A unique feature of the spinner under question is the placement of a torus plate cover over the rotating plate. The turbulent flow is driven by rotation of a large disk and suction by the exhaust system connected to vacuum chamber. The flow is modelled as an axisymmetric two-dimensional flow and computation is conducted by using the FLUENT package with a version of $k-\epsilon$ turbulence model. The required capacity of the exhaust system is assessed numerically. The usefulness of the cover in controlling air flow circulation is examined. A computational trouble shooting is attempted to resolve the problem of panel rising which occurred in real experiment.

Key Words: 스피너(Spinner), 원환유동장애물(Torus Flow Blockage), 회전유동(Rotating Fluid), 기류제어(Flow Control), 강제배기(Forced Exhaust), 에크만 흡입(Ekman Suction)

1. 서 론

스피너(spinner)는 반도체 웨이퍼나 LCD 제조공정에서 판형 소재를 회전시켜 원심력을 이용하여 세정, 건조, 코팅 등의 기능을 수행하는 공정장비를 말한다. 6세대 이후의 LCD 유리기관은 크기가 너무 커 회전력을 이용한 구동방식을 적용하기 어려우나 5세대 이하의 LCD 원판이나 이보다 작은 면적을 다루는 반도체나 OLED 등 차세대 디스플레이 장치 생산공정에는 스피너 방식의 장비가 다양한 용도로 활용되고 있다.

평판형 디스플레이 생산공정은 여러 가지 열유동 현상을 포함하고 있어 이와 관련된 기술적 문제를 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다. 김윤호 등[1]은 대면적 LCD 원판의 훈풍건조공정에 대한 연구를 수행하였고 지철욱 등[2]은 LCD 원판의 진공식 합착공정을 모사할 수 있는 수치모델을 제안

하였다. 회전력을 이용하는 공정에 대해서는 주로 화학증착공정이나 코팅에 대한 연구가 주류를 이루고 있다[3,4]. 그러나 이 논문의 연구대상인 스피너 장비에서의 유동에 대한 연구는 보고된 바가 거의 없는 실정이다.

스피너 장비에서 유동 관점에서의 과제는 적절한 기류제어 방안을 구현하는 것이다. 스피너 내부에는 다양한 요인에 의해 미세 수포와 같은 불순물이 생성되는데 이것이 유리원판의 회전에 의해 형성되는 공기의 흐름을 타고 이동하게 된다. 따라서 제품불량의 원인인 불순물을 제거하기 위한 기류의 조절은 공정의 수율을 보장하기 위한 필수조건이다. 특히 생산성 제고를 위한 원판의 대형화와 회전의 고속화 추세는 스피너 내부의 유동구조를 보다 복잡하게 만들고 있어 이에 대응할 수 있는 적절한 제어기구 설계의 중요성이 강조되고 있다.

원판의 회전에 의한 흡입유동이나 회전하는 두 개의 동심원판 사이의 유동과 같이 기본적인 구조의 회전유동은 매우 고전적인 연구주제로 상당한 이론적 연구성과가 축적되어 있다[5-12]. 이 연구에서는 이러한 회전유동에 대한 기본이론을 활용하여 스피너 내부유동의 특성을 분석한 후 장비내의 불순물 잔류를 방지하기 위하여 강제배기를 적용하고 유동 재

접수일: 2006년 8월 18일, 심사완료일: 2006년 9월 9일.

1 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

2 학생회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

3 금오공과대학교 기계공학부

* Corresponding author E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

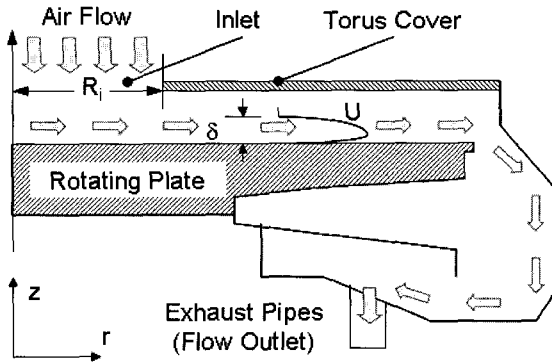


Fig. 1 Schematic diagram showing air flow in the designed spinner with a torus cover. View is given at a meridional cross-section.

순환 방지용 덮개를 설치하는 방안을 제안하였다. 전산유체역학(CFD)을 이용한 수치계산을 활용하여 제안된 방안의 타당성을 검증하는 것이 이 연구의 목적이다. 이 논문에서는 상용 CFD 패키지인 FLUENT를 이용한 수치계산을 수행하여 제안된 스피너 시스템의 내부유동을 분석하고 적절한 운전조건을 탐색할 것이다. 또한 실제 실증시험에서 발생한 기관의 부상 문제에 대하여 수치계산을 수행하여 원인을 규명하고 해결방안을 제시할 것이다.

2. 해석 모델

2.1 물리적 모형

연구대상인 스피너 모델의 개념도를 Fig. 1에 도시하였다. 스피너 중앙부에 반경(R)이 820mm인 원판이 위치하고 있으며 공정중에는 Ω 의 각속도로 회전하게 된다. 이 원판은 가로 1160mm, 세로 980mm의 5세대 LCD 유리기관 장착을 염두에 둔 크기이다. 세정공정에서 사용한 세정제와 물은 원판의 표면에 물방울 형태로 남아있거나 분무 형태로 회전원판 상부에 부유하고 있는데 회전으로 원심력을 유발하여 이를 효과적으로 제거하는 것이 연구대상인 스피너 장비가 수행해야 할 역할이다.

스피너 하단부에 표시된 배기관과 상단의 원환형 덮개(Torus cover)가 이 연구에서 채용한 기류제어 방안을 대표한다. 배기관은 클린룸의 진공배기 시스템에 연결되는데 일정한 진공압이 걸려 스피너 내부의 공기를 강제로 토출하는 역할을 한다. 배기구는 직경 150mm의 원형으로 5개가 배치되어 있다. 원형 덮개는 세정 작업에서 발생한 수증기 기포가 배기되지 않고 대기쪽으로 재순환되어 부유하다가 유리원판에 다시 착상하는 것을 막기 위한 구조물이다. 덮개를 완전히 닫으

면 스피너 내부는 정지한 상판과 회전하는 하판을 가진 공간이 되어 상하면 회전속도의 차에 의한 강력한 자오면 이차유동(Meridional secondary flow)이 발생할 뿐 아니라 스피너 내부 공기가 배기되지 않아 불순물이 장비의 내부에 잔류한다 [7,8]. 따라서 순조로운 배기를 보장하는 공기의 흐름을 만들기 위하여 덮개는 중심부에 반경 R_i의 공기유입구가 있는 원환형(torus) 구조물로 설계하였다. 회전하는 원판과 덮개와의 간격은 100mm이다.

2.2 이론 모형

스피너 내부의 유동은 배기구에 부가되는 진공압과 원판의 회전에 의한 원심력, 두 가지 요인에 의해 구동된다. 연구 대상인 스피너는 내부의 구조가 복잡하여 단순한 원형판이나 사각형 덕트에서처럼 압력차에 의해 구동되는 유량을 이론적으로 쉽게 평가하기 어렵다. 이 연구에서는 상대적으로 접근이 용이한 회전원판의 주위의 유동에 대한 선행연구 성과를 바탕으로 원심력에 의해 구동되는 유량을 예측하고 이를 기준으로 배기 시스템의 용량을 평가하였다.

스피너는 원판을 장착하고 지지하기 위한 구조물을 내부에 포함하고 있지만 덮개가 없다면 회전하는 원판의 윗면 조건은 이론모형에서 자주 등장하는 무한 원판의 경우와 유사하다. 유리패널이 장착된 원판이 회전하면 판 위에는 두께 δ 의 에크만(Ekman) 경계층이 형성된다. 경계층 내부의 유체는 원심력을 받아 반경방향으로 흐르게 되고 연속조건을 만족시키기 위하여 경계층 상부로부터 유체를 끌어들이게 되는데 이를 에크만 흡입(Ekman suction)이라 한다[5,6]. 세정공정에서 발생하는 수포가 회전원판 상부에서 재순환하는 것을 막기 위해서는 최소한 에크만 경계층에서의 구동유량 Q 이상을 제거해야 하므로 이를 배기 시스템의 용량선정 기준으로 삼았다.

회전하는 무한원판 위에서의 유동에 대한 기존의 연구성과를 [6,9-11] 활용하면 반경이 R인 유한원판의 설계기준 유량은 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\text{층류인 경우, } Q/(\Omega R^3) = 2.30 Re^{-1/2} \quad (1)$$

$$\text{난류인 경우, } Q/(\Omega R^3) = 0.219 Re^{-1/5} \quad (2)$$

여기서 Re는 회전각속도와 반경을 기준으로 계산한 레이놀즈 수이다.

$$Re = \Omega R^2 / \nu \quad (3)$$

ν 는 공기의 동점성계수이다. 회전하는 무한원판 위의 유동에서 Re가 3×10^5 보다 크면 난류로 간주할 수 있다[6,9].

Table. 1은 이 연구에서 고려한 원판의 크기를 기준으로 운전 가능한 회전각속도의 영역에서 주요 물리량의 크기를 정리한 것이다. 고려한 회전 각속도의 전 영역에서 Re 는 10^6 이상의 값을 가지므로 유동은 난류라고 볼 수 있다. 난류인 경우, 에크만 경계층의 두께 δ 와 경계층에서의 반경방향 유동의 속도 규모 U 는 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\delta/R = 0.526 Re^{-1/5} \tag{4}$$

$$U = Q/(2\pi R\delta) \tag{5}$$

2.3 계산 모형

이 연구에서는 유동제어와 배기 시스템 설계에 필요한 정보를 확보하기 위하여 상용 CFD 패키지인 FLUENT 6.1을 사용하여 기류를 분석하였다. 해석대상의 기하학적 특성과 유동 조건은 5개의 배기구를 제외하면 방사대칭에 가깝다. 이를 3차원으로 모델링하면 막대한 계산량과 시간이 요구되므로 방사대칭형 2차원 유동으로 단순화하였다. 격자생성 소프트웨어인 GAMBIT을 이용하여 격자망을 만들었다. 격자는 유체장의 기하학적 형상과 어울리면서도 작업이 용이하도록 회전하는 원판 주위와 유동의 유입부와 유출부는 구조화된 사각형 격자를 사용하고 형상이 복잡한 다른 부분은 삼각형 격자를 사용하였다. 유동경계층이 형성되는 원판 부근에 격자를 밀집시켰다.

작동유체는 공기로 밀도와 동점성계수가 $\rho=1.225\text{kg/m}^3$, $\nu=1.46\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 로 일정한 비압축성유체이다. 원판의 회전효과는 방사대칭 선회류(axisymmetric swirl)로 모델링하였다. 난류계산에는 FLUENT가 제공하는 난류 모델중 회전유동에 잘 맞는 것으로 알려진 Realizable k- ϵ 모델을 사용하였다. 난류상수는 기본값을 적용하였고 벽함수를 사용하였다. 유동경계조건으로는 벽면에 점착조건을 적용하였고 스피너 상부 덮개의 유입 구에는 대기압의 압력조건을 적용하였다. 배기구에는 강제배기가 있는 경우 유량조건을 적용하고, 자연배기인 경우 대기압의 압력조건을 적용하였다. 계산은 정지유체를 초기상태로

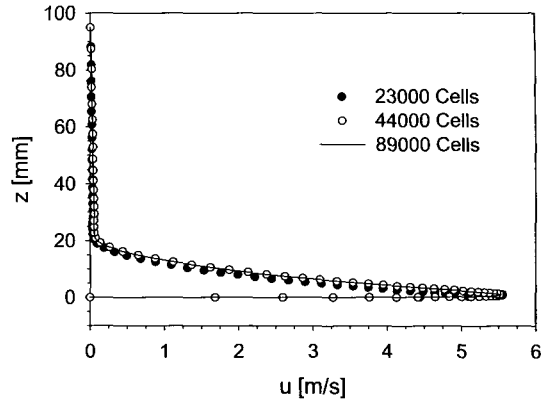


Fig. 2 Vertical profiles of the radial velocity over the rotating plate at $r=0.5\text{m}$ without cover and suction. The number of finite volumes are given in the frame. $\Omega=1200\text{rpm}$.

하여 정상상태에 이를 때 까지 수행하였으며 주요 변수의 잔류오차가 10^{-4} 이하로 떨어지는 것을 수렴판정 기준으로 삼았다.

해석대상 문제에서 계산의 정확도를 좌우하는 부분은 유동을 구동하는 회전원판 위의 에크만 경계층이므로 이에 대한 분해능 확보가 격자생성에서의 핵심과제이다. 계산에 사용할 적정 수준의 격자망을 결정하기 위하여 유한체적 셀의 수를 23,000, 44,000, 89,000개로 변화시켜 가면서 격자민감도를 평가하였다. Fig. 2은 여러 가지 규모의 격자를 사용하여 계산한 회전원판 위에서의 반경 방향 속도분포를 도시한 것이다. 에크만 경계층에 대한 분해능은 23,000개의 셀을 사용하는 경우 다소 부족하지만 44,000개의 셀을 사용한 경우, 충분한 것으로 판정되었다. 이 연구에서 주 관심대상 물리량인 회전에 의한 구동유량을 평가한 결과, 44,000개의 셀의 사용한 경우, 89,000개의 셀을 사용한 경우에 비해 1.0% 미만의 오차를 보였다. 스피너 내부 구조의 단순화와 이차원 유동으로의 모델링의 요인을 고려할 때 44,000개의 셀로 구성된 격자망이 정량적으로 의미있는 결과를 제공하는 것으로 판단하여 이 격자를 이용하여 전산해석을 수행하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 자연배기 기본 유동

스피너 내부의 유동제어에 있어서 가장 핵심적인 고려 대상은 원판 회전의 영향을 대표하는 에크만 경계층이다. 앞 절에서 열린 공간에서 무한 원판이 회전하는 경우, 원판 위에 형성되는 에크만 경계층에 대한 기존 연구성과를 바탕으로 배기에 필요한 유량을 예측하였다 (Table. 1 참조). 이러한 이

Table. 1 Theoretical estimation of the flow quantities with respect to rotation rate [4].

Ω [rpm]	Re [$\times 10^6$]	Q [m^3/s]	δ [mm]	U [m/s]
300	1.45	0.222	25.3	1.70
600	2.89	0.387	22.2	3.41
900	4.34	0.535	20.3	5.11
1200	5.79	0.674	19.2	5.82
1500	7.23	0.806	18.4	8.52

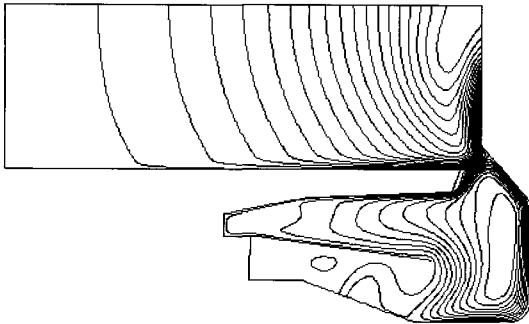


Fig. 3 Streamlines showing meridional flow patterns inside the spinner without cover. The vacuum exhaust system is turned off and $\Omega=1,200$ rpm.

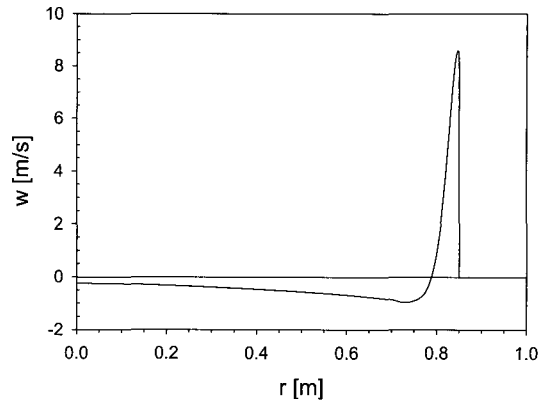


Fig. 4 Radial profile of the vertical velocity at the upper surface of spinner for the same case as in Fig. 3.

론 예측의 타당성을 조사하기 위하여 강제배기가 없고 덮개가 없는 경우에 대하여 원판의 회전속도를 300-1,500rpm 사이에서 변화시켜 가면서 수치계산을 실시하였다.

Fig. 3은 $\Omega=1,200$ rpm인 경우의 수치계산 결과를 정리한 것으로 자오면에서의 이차유동(meridional flow)의 구조를 유선의 형태로 표현하고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 덮개가 없는 경우에는 덮개가 있는 위치에서 상부로 유동영역을 확장하여 대기압 조건을 적용하였다. 원판의 상부에서 박막형 경계층의 존재와 원판으로의 에크만 흡입을 쉽게 확인할 수 있다. 회전원판 부근의 유동 특성은 전체적으로 회전유동 이론의 예측과 정성적으로 잘 일치하고 있다. 문제는 에크만 흡입으로 상부에서 유입된 공기가 하부의 배기구로 유도되지 못하고 다시 원판 상부의 대기로 방출된다는 것이다. 에크만 경계층을 따라 흐르던 유체가 스피너의 외벽과 부딪혀 이 부분의 정압이 상승하게 되는데 유로구조가 복잡하여 유동저항이 큰 배기구 쪽보다는 유동저항이 거의 없고 상대적으로 낮은 대기압을 유지하고 있는 대기쪽으로 공기 흐름이 형성되기 때문이다.

이러한 유동특성을 확인하기 위하여 덮개가 위치할 스피너의 위쪽 경계면에서 수직방향의 속도분포를 Fig. 4에 도시하였다. 중심부에서는 공기가 스피너로 유입되지만 외곽부에서는 거꾸로 스피너로부터 상층부로 공기가 유출됨을 명확히 확인할 수 있다. 이러한 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 상부에서 유입되는 유량과 스피너 외곽부에서 다시 상부로 유출되는 유량, 그리고 배기구에서 유입되는 유량의 변화를 Fig. 5에 정리하였다. 에크만 흡입에 의한 유입유량이 이론식 (2)의 예측보다 다소 크게 나타나고 있으나 정성적으로는 회전각속도에 거의 선형적으로 비례하는 유사한 거동을 보여주고 있다. 정량적 차이는 비교적 복잡한 구조를 가지는 스피너

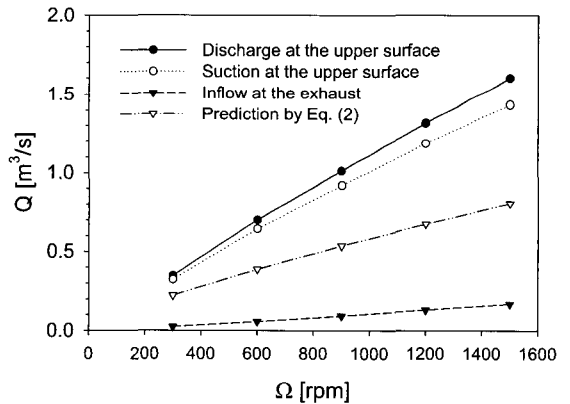


Fig. 5 Variation of flow rate across the spinner vs. rotation rate without artificial air flow control (i.e., without cover and vacuum exhaust system).

내부의 실제 유동과 이론식을 만드는데 사용된 이상적인 무한원판의 유동조건의 차이에서 비롯된 것이라 판단된다.

여기서 배기구에서의 유량은 스피너 쪽으로 유입되는 경우, 양의 부호를 갖도록 데이터를 정리하였다. 따라서 Fig. 5의 결과는 배기구로 공기가 흘러나가는 것이 아니라 오히려 스피너 내부로 공기가 유입되고 있음을 나타내고 있다. 강제배기가 없는 경우 이러한 역류현상은 실험시험에서도 확인된 바 있다[13]. 역류된 공기가 상부의 에크만 흡입류와 합쳐져 다시 상부로 분출되는 것이다. 세정건조공정에서 생성되는 미세수포가 이 기류를 타고 이동한다는 점을 고려할 때 스피너 내부기류로는 치명적인 유동구조라 할 수 있다. 강제 배기 시스템의 필요성을 지적하는 결과이다.

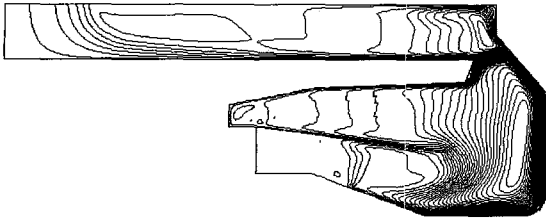


Fig. 6 The legends are the same as in Fig. 4 except for the presence of a torus cover with a hole of $R_t=150\text{mm}$.

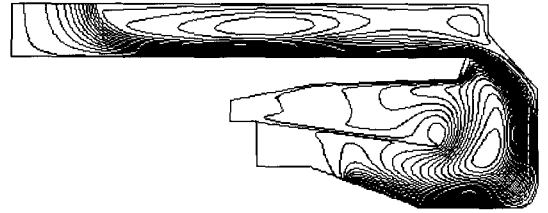


Fig. 7 Streamlines showing flow patterns in a spinner with a torus cover of $R=150$. The exhaust system is turned on to deliver a flow rate of $1\text{m}^3/\text{s}$.

3.2 덮개에 의한 기류 개선

이 연구에서는 원판 상부의 대기쪽으로 방출되는 상향류를 억제하여 미세수포의 재순환을 방지하기 위하여 원판 상부에 덮개를 설치하는 방안을 고려하였다. 덮개의 중앙부에는 원판 회전이 구동하는 유체흡입을 허용하고 스피너 내부에 균일하고 원활한 유동이 형성되도록 배기구의 전체 면적과 비슷한 직경 300mm의 공기유입구를 설치하였다.

이 방안의 유용성을 평가하기 위하여 덮개가 있는 경우에 대한 수치계산을 실시하였다. Fig. 6는 Fig. 4와 동일조건에서 덮개가 있는 경우의 유동장의 구조를 보여주고 있다. 덮개가 없는 경우, 회전하는 무한원판에 의한 흡입유동의 특성이 잘 나타났다면 덮개 설치에 의해 회전속도가 다른 두 동심원판 사이의 전형적인 유동특성을 보여주고 있다[7,8]. 회전하는 원판 위에 형성되는 에크만 경계층에서의 흡입은 동일하나 회전하지 않는 덮개 아래에도 에크만 경계층이 형성되고 흡입과 반대의 분출(blowing)이 일어나 강력한 자오면 이차유동이 발생함을 확인할 수 있다. 단 덮개의 존재로 Fig. 4에 나타났던 스피너 외곽부의 상승류가 완전히 억제되고 흡입구에 유입된 공기는 배기구 쪽으로 순방향 흐름을 형성하며 이동하고 있다.

덮개 설치에 유량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Fig. 5와 동일한 방법으로 회전각속도를 변화시키면서 계산을 수행하였다. Table. 2는 반경이 300mm인 중심부 유입구가 있는 덮개를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우 회전각속도에 따른 회전원판의 구동유량을 비교한 것이다. 덮개가 있는 경우의 유동은 유입구에서 배기구로 형성되었다. 덮개의 설치로 원판의 회전이 스피너 외부에서 끌어들이 수 있는 유효면적이 감소하여 구동유량은 크게 감소하였다. 정량적으로는 덮개가 없는 경우에 비해 약 19-24% 정도로 줄어 들었다. 그러나 식 (2) 식에서 제시한 상관식에서 $R=150\text{mm}$ 를 기준으로 계산한 것 보다는 여전히 큰 값을 보이고 있다. 단순하게 덮개의 유입구 반지름을 기준으로 구동유량을 평가하는 것이 문제가 될 수 있음을 지적하는 결과이다.

3.3 강제배기를 통한 기류개선

지금까지 원판의 회전에 의해 유발되는 자연순환 유동만을 고려하였다. 그러나 이 경우, 덮개를 설치하여 상승류를 억제할 수 있었지만 스피너 내부에는 여전히 제어가 필요한 기류상의 문제가 남아있다. Fig. 6에 나타난 것처럼 정지한 덮개와 회전하는 원판 사이에 강력한 자오면 순환류가 형성되는데 불순물 제거에 부적절한 유동구조이다. 회전원판의 하단부에도 배기구로 향하는 유동은 외벽에 국한되어 있으며 안쪽에는 스피너 내부를 순환하는 강력한 유동구조가 지배적이다.

이러한 유동구조를 개선하기 위하여 배기관을 진공배압 시스템에 연결하여 스피너 내부의 공기를 강제로 토출시키는 방안에 대한 수치실험을 실시하였다. 강제 배기는 유속경계조건으로 모델링하였다. 배기유량은 통상적으로 스피너 장비가 설치되는 바닥 배기형 접근마루식 청정실의 풍량을 고려하여 $1\text{m}^3/\text{s}$ 로 설정하였다. 이는 Table. 2에 제시된 덮개가 있는 경우의 구동유량을 아우르기에 충분한 유량이다.

덮개와 강제배기를 모두 채용한 경우의 해석결과를 Fig. 7에 정리하였다. 강제배기에 의하여 공기유입구에서 배기구까지 순방향 압력구배가 형성되어 안정된 흐름이 조성되고 있음을 확인할 수 있다. 유동구조는 덮개가 있는 자연배기의 경우와 유사해 보이지만 원판 상부와 하부의 회전속도차에 의해 구동되는 자오면 순환유동이 크게 약화되어 유입구에서

Table. 2 Flow rate of the flow induced from the top of spinner vs. rotation rate.

Ω [rpm]	상부로부터의 유입유량 Q [m^3/s]	
	덮개가 없는 경우	$R_t=150\text{mm}$ 인 덮개 장착시
300	0.323	0.0767
600	0.644	0.1333
900	0.920	0.1860
1200	1.185	0.2356
1500	1.434	0.2809

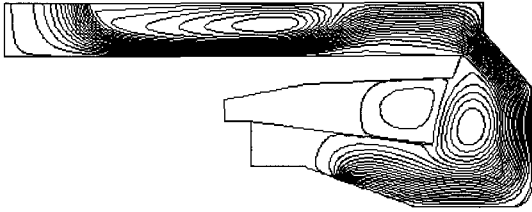


Fig. 8 Legends are the same as in Fig. 7 except for $\Omega=0$.

배기구로의 기류가 주유동을 이루고 있다. 덮개 중앙에서 유입된 공기는 회전하는 원판 위의 경계층을 통과하는 유동구조를 보이고 있는데 회전하는 환경에서 유체의 유입과 유출이 있는 경우 나타나는 전형적인 특징이다[12]. 전체적인 유선의 흐름도 자연스러운 안정된 구조를 보여주고 있다. 원판의 회전에 의해 구동하는 에크만 흡입류의 유량을 상회하는 충분한 유량을 강제로 배기하는 것이 스피너 내부의 재순환 기류를 억제하는 효과적인 방안임을 확인하였다.

3.4 유리기판 떠오름 문제의 해결

일련의 전산해석을 통하여 덮개를 설치하고 강제 배기를 할 경우 원판의 회전수와 상관없이 바람직한 기류분포를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 동일한 규격으로 제작된 스피너에서의 실험시험에서 예상하지 못했던 문제점이 나타났다[13]. 진조공정은 강제배기 시스템이 작동하는 조건에서 기판을 정지상태에서 회전시켜 원심력으로 수분을 제거하고 건조 후 다시 정지시키는 과정의 반복이다. 기판이 회전하고 있는 경우에는 아무 문제가 없었으나 강제배기가 이루어지고 있는 상황에서 원판이 회전하지 않는 경우 원판에 장착된 유리기판이 떠오르는 현상이 발생하였다.

그 원인을 분석하기 위하여 Fig. 7과 동일한 조건에서 원판의 회전이 없는 경우의 유동을 계산하여 유선의 구조를 Fig. 8에 정리하였다. 회전이 있는 경우 유동이 회전하는 원판 위의 경계층에 집중되었던 것과 달리 상층부 전체를 채우고 흐르며 회전에 의한 이차유동 없이 전체적으로는 유입구에서 배기구로의 자연스러운 기류가 형성되고 있음을 볼 수 있다. 그런데 여기서 주목할 것은 유입구에서 들어온 공기가 균일한 반경방향 흐름을 만드는 것이 아니라 유입구 부근에서는 박리가 발생하여 원판에 밀착하여 흐르고 있다는 점이다. 유선이 밀집된 이 부분에서 매우 큰 유속이 발생하고 반대로 정압은 감소하게 된다. 결과적으로 원판상부의 압력이 원판 하부의 압력보다 낮아져 양력이 발생하고 유리기판을 무게를 극복하면 유리기판이 부상하는 치명적인 결과를 초래하는 것이다. 동일한 문제가 원판 회전시에는 발생하지 않는 것은 이 경우 원판의 상하부의 압력은 회전방향 유속과 원심력에 의

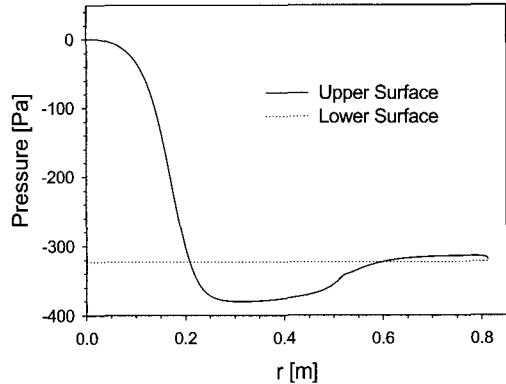


Fig. 9 Pressure distribution on the upper and lower surfaces of the circular plate. $R=150\text{mm}$, $\Omega=0$, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$.

해 지배되기 때문이다.

이러한 현상을 정량적으로 증명하기 위하여 원판 상하부의 압력분포를 Fig. 9에 도시하였다. 원판 하부의 압력은 거의 일정하게 유지되고 있는 반면 상부의 압력분포는 위치에 따라 크게 변함을 알 수 있다. 반경이 작은 중심부는 유입공기가 원판에 부딪히는 정체유동영역(stagnant flow region)과 유사하므로 압력이 높게 유지되고 있으나 유속이 최대가 되는 중간 부근의 압력은 하부의 압력보다 낮게 떨어지고 있다. 반경이 더 커지면 유로면적 증가에 따른 유속감소로 다시 압력이 약간 상승하지만 전체적으로는 기판 아래쪽에 작용하는 압력에 의한 힘이 커 양력이 발생한다. 유속이 최대가 되는 부위의 압력강하가 유리기판의 부상을 유발한다는 시나리오의 신빙성을 수치적으로 확인한 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 원판 상부의 유속을 낮추어 정압강하를 최소화하여야 한다. 강제배기 유량을 줄이는 것도 동압을 줄일 수 있는 하나의 방안이나 이 경우 배기량을 줄이게 되어 내부 기류제어에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 최선의 방안은 아니다. 생각할 수 있는 다른 방안은 공기 유입구의 크기를 크게 하여 유입되는 평균유속을 줄임으로써 정압강하의 크기를 줄이고 저압이 형성되는 부위를 좁히는 것이다.

이 방안의 타당성을 검증하기 위하여 유입구의 직경을 두 배로 키운 $R=300\text{mm}$ 인 경우에 대하여 Fig. 9과 동일조건에서 수치계산을 실시하였다. Fig. 10은 원판 상하부의 압력분포를 보여주고 있다. 평균 유속의 감소로 압력차의 절대값이 크게 줄었음을 볼 수 있다. 압력분포에 있어서도 중앙부위에 양력을 유발하는 압력구배가 일부 보이지만 중심부와 외곽부에서는 원판상부의 압력이 하부의 압력보다 높은 안정적인 압력

참고문헌

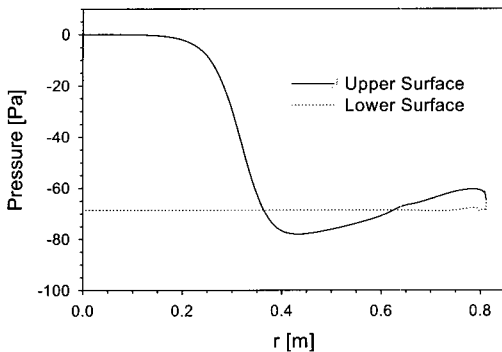


Fig. 10 Legends are the same as in Fig. 9 except for $R_i=300\text{mm}$.

분포를 유지하고 있다. 비회전시 유리 기판이 떠오르는 문제는 유입구의 직경을 크게 하는 것으로 해결될 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

전산유체역학을 이용한 수치실험 기법을 적용하여 5세대 LCD 세정건조용 스피너의 내부유동을 분석하여 설계의 타당성을 검증하고 적정 운전조건을 조사하였다. 수치실험 결과 스피너 내부에서 발생하는 불량요인을 제거하기 위한 난기류 제어방안으로 덮개를 설치하고 예크만 흡입에 의해 구동되는 유량 이상으로 강제배기를 하는 방안이 적절함을 확인하였다. 실증시험에서 원판이 회전하지 않는 경우 유리기판이 부상하는 문제가 발생하였는데 수치계산을 통하여 그 원인을 분석하고 덮개 중앙부의 유입구의 크기가 증가시키는 것이 유용한 해결방안이 됨을 설명하였다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

- [1] 김윤희, 지태호, 김서영, 이광훈, 2006, "LCD 패널 세척공정에서 원격외선 히터에 의한 유리기판 승온시간 예측," *설비공학논문집 Vol.18*, p.526-533.
- [2] 지철욱, 곽호상, 김경훈, 2003, "LCD 유리원판 진공식 합착공정 해석을 위한 수치모델," *한국전산유체공학회지 제 8권 제2호*, p.33-41.
- [3] 송창걸, 황정호, 1997, "증착공정에서의 회전원판 정체점 유동에 대한 상사해석," *대한기계학회논문집B Vol.21*, p.371-379.
- [4] Ma, F. and Hwang, J.H., 1990, "The Effect of Air Shear on the Flow of a Thin Liquid Film over a Rough Rotating Disk," *J. Applied Physics*, Vol.68, p.1265-1271.
- [5] Greenspan, H.P., 1968, *The Theory of Rotating Fluids*, Cambridge Univ. Press.
- [6] Schlichting, H., 1979, "Flow over a Rotating Disk", in *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill.
- [7] Roberts, S.M. and Shipman, J.S., 1976, "Computing of the Flow between a Rotating and a Stationary Disk," *J. Fluid Mech.*, Vol.73, p.53-63.
- [8] Andereck, C., Liu, S.S., and Swinney, H.L., 1986, "Flow Regimes in a Circular Couette System with Independently Rotating Cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol.164, p.155-183.
- [9] Gregory, N. and Walker, W.S., 1960, "Experiments on the Effect of Suction on the Flow due to a Rotating Disk," *J. Fluid Mech.*, Vol.9, p.225-234.
- [10] Rogers, M.H. and Lance, G.N., 1960, "The Rotationally Symmetric Flow of a Viscous Fluid in the Presence of an Infinite Rotating Disk," *J. Fluid Mech.*, Vol.7, p.617-631.
- [11] Sparrow, E.M. and Gregg, J.L., 1960, "Mass Transfer, Flow and Heat Transfer about a Rotating Disk," *Trans. ASME J. Heat Transfer Vol.82*, p.294-302.
- [12] Owen, J.M., Pincomber, J.R. and Rogers, R.H., 1985, "Source-Sink Flow inside a Rotating Cylindrical Cavity," *J. Fluid Mech.*, Vol.155, p.233-265.
- [13] 이상우, 곽호상, 2001, LCD 제조공정의 스피너 내부유동 제어기술 개발, 중소기업청, 금오공과대학교 산학연 컨소시엄 사업보고서.