



LCD 기판 세정건조용 스피너 설계를 위한 내부유동 해석

곽 호 상*¹, 이 상 우*², 이 상 현*³, 김 용 범*⁴

Computational Analysis of Air Flow in a Spinner for Drying LCD Glass Panel

Ho Sang Kwak, Sang Woo Lee, Sanghyun Lee, and Yong Bum Kim

A numerical model is employed for design of a spinner device to dry the 5-th generation LCD glass panel. The turbulent flow in a spinner is driven by rotation of a large disk and suction by the exhaust system connected to vacuum chamber, which is simulated by using the FLUENT package. Based on numerical simulation, the required capacity of exhaust system is assessed. The effects of the presence of cover on the flow characteristics are examined. A computational trouble shooting is attempted to resolve the problem of panel rising which occurred in real experiments.

Key Words: 스피너(Spinner), 회전유동(Rotating Flow), 강제배기(Forced Exhaust), 기류제어(Air Flow Control), 에크만 흡입(Ekman Suction), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

스피너(spinner)는 박막 트랜지스터 액정표시 장치(TFT LCD) 제조공정에서 유리원판을 회전시켜 원심력을 이용하여 세정, 건조, 코팅, 현상 등의 기능을 수행하는 장비이다. 최근 국내 제조사들을 필두로 LCD 생산체계가 5세대로 진화함에 따라 이에 대응하기 위한 차세대 LCD 제조장비 개발이 광범위하게 이루어지고 있다. 이 연구는 5세대 유리원판을 세정건조할 수 있는 대형 스피너를 개발하기 위한 노력의 일환으로 수행되었다 [1].

스피너 개발에 있어서 유동관점의 핵심적인 과제는 적절한 기류제어 메커니즘을 구현하는 것이다. 스피너 내부에는 작업중 다양한 요인에 의해 미세수포와 같은 불순물이 생성되는데 이것이 유리원판의 회전에 의해 형성되는 공기의 흐름을 타고 이동하게 된다. 따라서 제품불량의 원인이 되는 불순물을 제거하기 위한 기류의 조절은 공정의 수율을 보장하기 위한 필수조건이다. 특히 생산성 제고를 위한 원판의 대형화와 회전의 고속화 추세가 가속됨에 따라 스피너 내부의 유동구조가 더욱 복잡해지고 있어 이에 대응할 수 있는 적절한 제어기구 설계의 중요성이 보다 강조되고 있다.

이 연구에서는 회전유동 이론[2]에 입각한 스피너 내부유동의 특성 분석에 기초하여 강제배기를 적용하고 유동 재순환 방지용 덮개를 설치하는 방안을 제안하였다. 전산유체역학(CFD)에

*¹ 정희원, 금오공과대학교 기계공학부

*² 금오공과대학교 기계공학부

*³ 정희원, 금오공과대학교 기계공학과 대학원

*⁴ (주)탐엔지니어링



기반한 가상실험 기법을 적용하여 제안된 방안의 타당성을 검증하는 것이 이 연구의 목적이다. 상용 CFD 패키지인 FLUENT를 이용한 수치계산을 통하여 스피너 내부유동의 물리적 특성을 규명하고 최적의 운전조건을 결정하였다. 또한 이 연구와 병행하여 실시된 실증시험이 진행되었는데 여기서 기판이 떠오르는 새로운 문제가 발생하였다. 수치적인 실험을 통하여 그 원인을 분석하고 해결방안을 제시하였다.

2. 모델

2.1 물리적 모델과 기본 유동

연구대상인 스피너 모델의 개념도를 Fig.1에 도시하였다. 스피너 중앙부에는 반경(R)이 820 mm인 원판이 위치하고 있으며 공정중에는 가로 1160mm, 세로 980mm의 5세대 LCD 유리원판을 장착하여 Ω의 각속도로 회전하게 된다. 스피너 하단부에 표시된 배기관과 상단의 덮개가 이 연구에서 채용한 기류제어 방안을 대표한다. 배기관은 클린룸의 진공배기 시스템에 연결되어 스피너 내부의 공기를 토출하게 된다. 덮개는 세정작업시 발생하는 수증기의 기포가 대기중으로 이동하여 부유하다가 건조 공정중에 유리원판에 다시 착상하는 것을 막기 위한 재순환 방지용 구조물이다. 덮개의 중심에는 공기의 흐름을 보장하기 위하여 반경 R_i의 공기유입구를 열어놓았다.

스피너 내부의 유동은 강제배기와 원판의 회전, 두 가지 요인에 의한 구동된다. 유리패널이

장착된 원판이 회전하면 판 위에는 두께 δ의 에크만(Ekman) 경계층이 형성된다. 경계층 내부의 유체는 원심력을 받아 반경방향으로 흐르게 되고 연속조건을 만족시키기 위하여 경계층 상부로부터 유체를 흡입하게 되는데 이를 에크만 흡입(Ekman suction)이라 한다.

세정과정에서 발생하는 수포가 회전원판 상부에서 재순환하는 것을 막기 위해서는 최소한 에크만 경계층에서의 구동유량 Q 이상을 제거해야 하므로 이를 배기 시스템의 용량선정 기준으로 삼았다. 이 연구에서는 회전하는 무한원판 모델[3]에서 반경 R_i점에서의 설계기준 유량을 다음과 같이 평가하였다.

$$Q = 0.219 \Omega R^3 Re^{-1/5} \quad (1)$$

여기서 Re는 회전속도 기준 레이놀즈수이다.

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

ν는 공기의 동점성계수이다. 경계층의 두께 δ와 경계층에서의 반경방향 유동의 평균유속 U는 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\delta = 0.526 R Re^{-1/5} \quad (3)$$

$$U = Q / 2\pi R \delta \quad (4)$$

회전속도에 따른 주요 변수의 변화를 Table 1에 정리하였다.

Ω [rpm]	Re [×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

Table 1 Variation of the basic flow quantities with respect to rotation rate.

2.2 수치계산 모델

이 연구에서는 유동제어와 배기 시스템 설계에 필요한 정성적 정량적 정보를 확보하기 위하여 상용 CFD 패키지인 FLUENT ver 5.4를 사

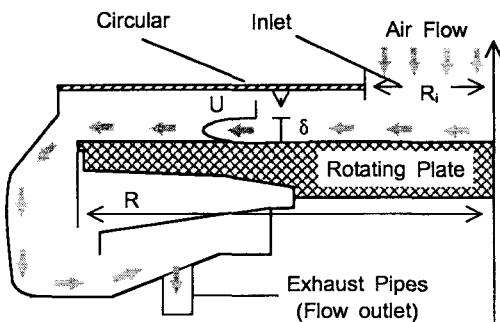


Fig. 1 Schematic diagram showing air flow in the designed spinner.

용하여 기류특성을 분석하였다. 해석대상의 기하학적 특성과 유동조건은 5개의 배기구를 제외하면 방사대칭에 가깝다. 이를 3차원으로 모델링하면 막대한 계산량과 시간이 요구되므로 방사대칭형 2차원 유동으로 모델링하였다. 격자생성 소프트웨어인 GAMBIT을 이용하여 해석대상을 11186개의 셀로 구성된 격자망을 만들었다. 격자는 유체장의 기하학적 형상과 어울리는 구조화된 형태로 만들었으며 유동경계층이 형성되는 원판 부근에 격자를 밀집시켰다.

작동유체는 공기이며 밀도는 $\rho=1.225\text{kg/m}^3$, 동점성계수는 $\nu=1.46\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 로 일정하다. 원판의 회전효과는 등방선회류 (axisymmetric swirl option)로 모델링하였다. 난류계산에는 FLUENT가 제공하는 난류모델중 회전유동에 잘 맞는 것으로 알려진 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 난류상수는 기본값을 적용하였고 벽함수를 사용하였다. 유동경계조건으로는 벽면에서 점착조건을 적용하였고 스피너 상부 덮개의 유입구에는 대기압의 압력경계조건을 적용하였다. 배기구에는 강제배기가 있는 경우 유량조건을 적용하고, 자연배기인 경우 대기압의 압력조건을 적용하였다. 계산은 정지유체를 초기상태로 하여 정상상태에 이를 때 까지 수행하였으며 주요 변수의 잔류오차가 10^{-4} 이하가 떨어지는 것을 수렴판정 기준으로 삼았다.

3. 결과 및 토론

3.1 자연배기인 경우의 기본 유동

스피너 내부의 유동을 제어하는데 가장 핵심적인 관건이 되는 것은 원판의 회전에 의한 에크만 경계층에서의 회전유동이다. 앞절에서 열린 공간에서 원판이 회전하는 경우의 에크만 경계층 이론을 바탕으로 배기가 요구되는 유량을 평가하였다. 그 타당성을 조사하기 위하여 강제배기가 없고 덮개가 없는 경우에 대하여 원판의 회전속도를 300-1500 rpm 사이에서 변화시켜가면서 수치계산을 실시하였다.

Fig.2는 $\Omega=1200\text{rpm}$ 인 경우의 수치계산결과이다. 자오면에서의 이차유동(meridional flow)을 유선함수형태로 표현하고 있다. 원판의 상부에 박막형 경계층과 원판으로의 에크만 흡입을

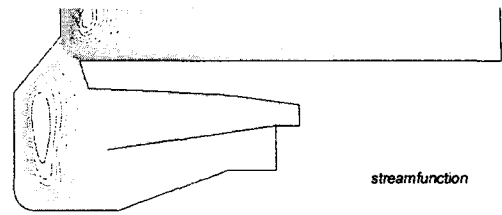


Fig. 2 Flow pattern in a spinner without cover. The exhaust system is turned off and the rotation plate rotates at $\Omega=1200$ rpm.

쉽게 확인할 수 있다. 회전원판 부근의 유동특성은 전체적으로 회전유동 이론의 예측과 정성적으로 잘 일치하고 있다. 문제는 에크만 흡입으로 상부에서 유입된 공기가 하부의 배기구로 유도되지 못하고 다시 대기중으로 방출된다는 것이다. 에크만 경계층을 따라 흐르던 유체가 스피너의 외벽과 부딪혀 이 부분의 정압이 상승하게 되는데 유로구조가 복잡하여 유동저항이 큰 배기구쪽 보다는 유동저항이 거의 없고 압력이 낮은 대기압의 대기중으로 공기 흐름이 형성되기 때문이다.

이러한 유동특성을 정량적으로 확인하기 위하여 회전속도에 따른 상부에서 유입되는 유량과 스피너 외곽부에서 다시 상부로 유출되는 유량, 그리고 배기구에서 유입되는 유량의 변화를 Fig.3에 정리하였다. 에크만 흡입에 의한 유입유량이 식(1)의 예측보다 다소 크게 나타나고 있으나 정성적으로는 유사한 거동을 보여주고 있다. 정량적 차이는 비교적 복잡한 구조를 가지는 스피너 유동과 이상적인 무한원판에서의 이

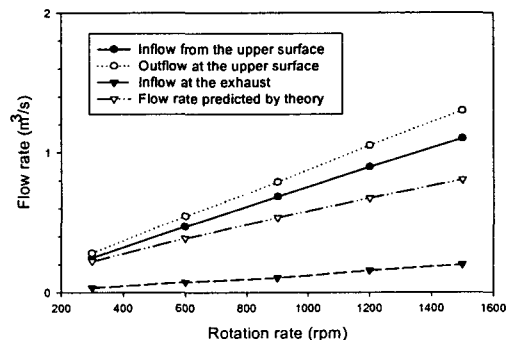


Fig. 3 Variation of flow rate in a spinner without cover the versus rotation rate

론예측 사이의 조건차이에서 비롯된 것으로 판단된다. 배기구에서는 배기가 이루어지지 않고 오히려 스피너 내부로 공기가 유입되고 있다. 강제배기가 없는 경우 이러한 역류현상은 실험 시험에서 확인된 바 있다. 역류된 공기는 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.

이 연구에서는 대기중으로 재유출되는 상향류를 억제하여 미세수포의 재순환을 방지하기 위하여 원판 상부에 덮개를 설치하는 방안을 고려하였다. 덮개의 중앙부에는 원판회전이 구동하는 유체흡입을 허용하고 스피너 내부에 균일하고 원할한 유동이 형성되도록 배기구 면적과 비슷한 반경 150mm의 공기유입구를 설치하였다.

이 방안의 유용성을 평가하기 위하여 덮개가 있는 경우에 대한 수치계산을 실시하였다. Fig. 4는 Fig.3과 동일조건에서 덮개가 있는 경우의 유동장의 구조를 보여주고 있다. Fig.3에 나타났던 스피너 외곽부의 상승류를 완전히 억제되고 흡입구에 유입된 공기는 배기구쪽으로 순방향 흐름을 타고 이동하고 있다. 회전원판 상부의 에크만 경계층 유동은 덮개의 존재로 에크만 흡입강도가 다소 약해진 것을 제외하면 크게 달라지지 않았다. 전체적으로 덮개의 설치가 스피너 내부의 기류를 조절에 있어 효과적 방안임을 확인할 수 있다.

3.2 강제배기를 통한 기류특성 개선

지금까지 원판의 회전에 의해 유발되는 자연

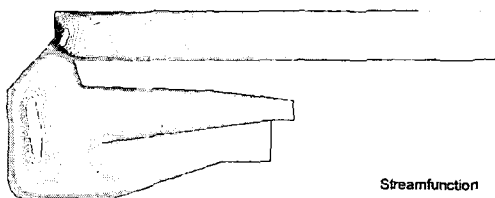


Fig. 4 Flow pattern in a spinner with a cover. The exhaust system is turned off. $Q=1200\text{rpm}$, $R_i=150\text{mm}$.

순환유동만을 고려하였다. 그러나 이 경우, 덮개를 설치하여 상승류를 억제할 수 있었지만 스피너 내부에는 여전히 제어가 필요한 기류상의 문제점이 남아있다. Fig. 4에 나타난 것처럼 정지한 덮개와 회전하는 원판사이에 강력한 자연순환류가 형성되어 불순물 제거에 부적절한 유동구조를 가지고 있다. 회전원판의 하단부에는 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 유속경계조건을 통하여 모델링하였다. 배기유량은 Table 1의 모든 경우를 아우르기에 충분한 $1\text{m}^3/\text{s}$ 로 설정하였다.

덮개와 강제배기를 모두 채용한 경우의 해석 결과를 Fig.5에 정리하였다. 강제배기에 의한 공기유입구에서 배기구까지 순방향 압력구배가 형성되어 안정된 흐름이 조성되고 있음을 확인할 수 있다. 유동구조는 덮개가 있는 자연배기의 경우와 유사해 보이지만 원판 상부와 하부의 자연순환유동이 크게 약화되어 유입구에서 배기구로의 기류가 주유동을 이루고 있다. 유선의 흐름도 자연스러운 안정된 유동구조를 보여주고 있다. 원판의 회전에 의해 구동하는 에크만 유입류의 유량을 상회하는 충분한 유량을 강제배기하는 것이 효과적인 기류제어 방안임을 보여주는 결과이다.

3.3 유리기판 부상문제의 해결

일련의 전산해석을 통하여 덮개를 설치하고

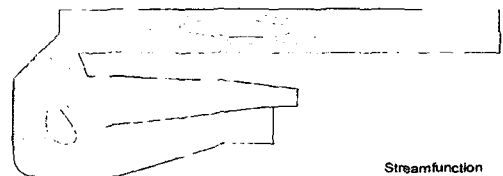


Fig. 5 The legends are the same as in Fig. 4 except for the fact that a forced suction of air with a flow rate $1\text{m}^3/\text{s}$ is driven by the exhaust system.

강제 배기를 할 경우 원판의 회전수와 상관없이 바람직한 기류분포를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이러한 분석에 기초하여 실물 스피너 장치를 제작하고 동일조건에서 시험을 수행하여 장비의 우수한 건조능력을 확인하였다. 그러나 이 과정에서 예상하지 못했던 문제가 발생하였다. 건조공정은 강제배기를 일정하게 유지한 가운데 원판을 정지상태에서 회전시켜 원심력으로 수분을 제거하고 건조 후 다시 정지시키는 과정의 반복이다. 원판이 회전하고 있는 경우에는 아무 문제가 없었으나 강제배기가 이루어지고 있는 상황에서 원판이 회전하지 않는 경우 원판에 장착된 유리기판이 부상하는 예기치 못한 현상이 발생하였다.

그 원인을 분석하기 위하여 Fig.5와 동일한 조건에서 원판의 회전이 없는 경우의 유동을 계산하여 결과를 Fig. 6에 정리하였다. Fig.6(a)는 강제배기에 의해 흡기구에서 배기구로의 자연스러운 기류가 형성되고 있음을 보여주고 있다. 그런데 여기서 주목할 것은 흡기구에서 유입된 공기가 균일한 반경방향 흐름을 만드는 것이 아니라 원판에 밀착하여 흐르고 있다는 점이다. Fig. 6(b)에서 나타난 것처럼 원판 상부에 유속이 매우 큰 것을 확인할 수 있는데 유속이 증가하면 반대로 정압은 감소하게 된다. 결과적으로 원판상부의 압력이 원판 하부의 압력보다 낮아져 양력이 발생하고 유리기판을 무게를 극복하면 유리기판이 부상하는 치명적인 결과를 초래

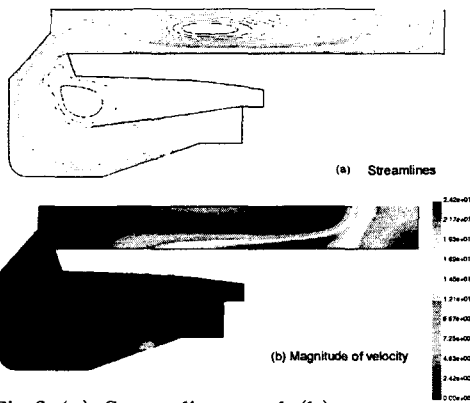


Fig.6 (a) Streamlines and (b) contour plot for magnitude of velocity vector. $\Omega=0$, $Q=1m^3/s$, $R_i=150mm$.

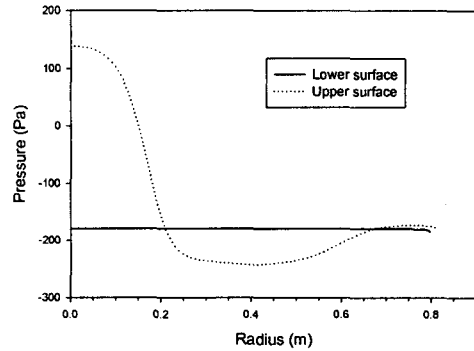


Fig. 7 Pressure distribution at the upper and lower surface of the circular plate. $R_i=150mm$, $\Omega=0$, $Q=1m^3/s$.

하는 것이다. 동일한 문제가 원판 회전시에는 발생하지 않는 것은 이 경우 원판의 상하부의 압력은 회전방향 유속과 원심력에 의해 지배되기 때문이다.

이를 확인하기 위하여 원판 상하부의 압력분포를 Fig. 7에 도시하였다. 원판 하부의 압력은 거의 일정하게 유지되고 있는 반면 상부의 압력분포는 위치에 따라 크게 변함을 알 수 있다. 반경이 작은 중심부위는 유입공기가 원판에 부딪히는 정체유동영역(stagnant flow region)이므로 압력이 높게 유지되고 있으나 유속이 최대가 되는 중간반경 부근의 압력은 하부의 압력보다 낮게 떨어지고 있다. 반경이 더 커지면 유로면적 증가에 따른 유속감소로 다시 압력이 약간 상승한다. Fig.7은 유속이 최대가 되는 부위의 압력강하가 유리기판의 부상을 유발한다는 시나리오의 신빙성을 수치적으로 증명한 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 원판 상부의 유속을 낮추어 정압강하를 최소화하여야 한다. 강제배기 유량을 줄이는 것도 하나의 방안이나 이 경우 배기량이 원판회전시 형성되는 예크만 유량보다 낮아져 내부 기류구조의 건전성을 보장하기 어렵다. 생각할 수 있는 다른 방안은 공기 유입구의 크기를 키워 유입되는 평균유속을 줄이고 저압이 형성되는 부위를 좁히는 것이다.

이 방안의 타당성을 검증하기 위하여 유입구의 직경을 두배로 키운 $R_i=300mm$ 인 경우에 대하여 동일조건에서 수치계산을 실시하였다. Fig. 8

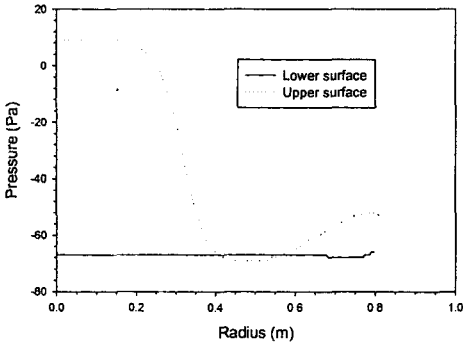


Fig. 8 Pressure distribution at the upper and lower surface of the circular plate. $R_i=300\text{mm}$, $\Omega=0$, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$.

은 원판 상하부의 압력분포를 보여주고 있다. Fig. 7에 나타났던 양력을 만드는 역압력구배를 찾아볼 수 없으며 전체적으로 원판상부의 압력이 하부의 압력보다 높은 안정적인 압력분포를 유지하고 있다. 결론적으로 비회전시 유리패널 부상의 문제는 유입구의 직경을 크게 하는 것으로 해결될 수 있음을 증명하는 결과이다.

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 에크만 흡입에 의해 구동되는 유량 이상으로 강제배기를 하는 방안이 적절함을 확인하였다. 실증시험에서 원판이 회전하지 않는 경우 유리판이 부상하는 문제가 발생하였는데 수치계산을 통하여 그 원인을 분석하고 덮개 중앙부의 유입구의 크기가 증가시키는 것이 유용한 해결방안임을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 경상북도, 중소기업청에서 지원하

는 8차(2000)년도 금오공과대학교 산학연 공동 기술개발 컨소시엄과제로 수행되었으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- [1] 이상우, 광호상, LCD 제조공정의 스피너 내부유동 제어기술 개발, 중소기업청, 금오공과대학교 산학연 컨소시엄 사업보고서 (2001).
- [2] Greenspan, H. P., *The Theory of Rotating Fluids*, Cambridge Univ. Press (1968).
- [3] Schlichting, H., "The rotating disk", in *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill (1979).