

## LCD 제조용 스퍼터링 장비의 비접촉식 유리평판 이송장치에 대한 수치적 연구

강우진\*, 임익태\*\*, 김우승 \*\*\*

\*한양대학교 기계공학과, \*\* 익산대학교 자동차공학과, \*\*\*한양대학교 기계공학과

### 초록

Non-contact transportation of the large-sized glass plate using air-cushion is considered for sputtering system of LCD panel. The Argon gas from second gas injection holes is injected to levitate and transport the glass plate. Low maximum pressure and uniform pressure distribution on the bottom surface of the glass plate must be maintained for stable levitation and transportation of the glass plate. Therefore, the analysis of fluid flow between the glass plate and the air-pad is numerically performed for varying space between the injection holes in this study. The pressure uniformity on the bottom surface of the glass plate is evaluated for overall glass plate. The distance between the injection holes must be designed below 90 mm for obtaining the low maximum pressure and uniform pressure distribution.

### 1. 서론

고품질의 액정표시장치(liquid crystal display, LCD) 제조에 있어서 유리 평판의 표면에 원하는 물질을 코팅하기 위한 스퍼터링(sputtering)장비의 개발은 기술적으로 매우 중요한 부분이다. 이 스퍼터링 장비 개발에 필요한 기술 중에서 유리 평판을 이송시키는 기술은 제품의 품질 향상에 큰 영향을 미친다.

유리 평판을 이송시키는 방식에는 평판을 직접 이송하는 접촉 방식과 기기와의 접촉을 최소한으로 하여 이송하는 비접촉 방식이 있다. 접촉 방식으로 유리 평판을 이송시키는 방법은 유리 평판의 크기가 대형화됨에 따라 유리 평판의 휨이나 표면 긁힘 등의 문제를 유발시키기 때문에 현재 비접촉식 이송 방법이 많은 관심을 받고 있다. 비접촉식 이송 방식에는 Poh 등<sup>(1)</sup>이 연구한 전자기 또는 정전기력을 이용하는 방법과 Amano 등<sup>(2)</sup>이 연구한 음파를 이용하는 방법, 그리고 Im 등<sup>(3)</sup>, Jun 등<sup>(4)</sup>이 연구한 분사기체를 이용하는 방법이 있다.

본 연구에서는 에어패드(air-pad)에 존재하는 다수의 홀에서 고속의 기체를 분사하여 유리 평판을 부상 및 이송시키는 7세대 LCD용 비접촉식 이송방법(air-cushion)에 대해 다루고 있다. 그리고 에어패드에 대한 3차원 유동해석을 통해 유리평판을 보다 안정적으로 부상 및 이송시킬 수 있는 에어패드 형상을 제안하고, 설계에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

### 2. 수치해석 방법

#### 2.1 에어패드의 형상

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 7세대 스퍼터링 장비용 비접촉식 유리평판 이송장치의 개략도를 나타낸다. 에어패드는 지면과 87°의 각을 이루고 있으며, 에어패드에서 분사된 고속의 아르곤 가스로 유리 평판을 부상시킨다. Fig. 2는 에어패드의 형상을 나타낸 것이다. 에어 패드는 두께 5 mm의 스테인리스로 제작된 15개의 에어패드 모듈로 구성된다. 여기서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 각각 2차 가스 분사구 사이의 x축 및 y축 간격이다.

2.2 해석 모델 및 수치해석 방법

Fig. 3은 본 연구에서 계산영역으로 고려한 에어패드와 부상된 유리평판의 개략적인 단면형상을 나타낸 것이다. 에어패드 모듈 하부의 1차 가스 분사구( $D_1=12.7$  mm)로 공급된 아르곤 가스는 에어패드 모듈 상부에 배치된 다수의 2차 가스 분사구( $D_2=0.5$  mm)를 통해 분사되어 유리평판을 부상시키게 된다. 이때 유리평판과 에어패드 사이에서 일어나는 유체 유동을 수치적으로 해석하였고, 수치해석 결과를 통해 유리평판 하부에 작용하는 압력 분포를 예측하였다. 수치해석은 계산 시간 및 대칭조건을 고려하여 Fig. 2의 점선부분과 같이 유리평판 및 에어패드의 1/4영역에 대하여 수행하였다. 본 연구의 해석을 위해 도입한 가정은 아래와 같다.

- ① 각 2차 가스 분사구에서 분사되는 가스의 유량은 동일하며, 2차 가스 분사구에서 분사된 유량의 합은 1차 가스 분사구에서 유입된 유량과 같다.
- ② 유리평판은 에어패드의 중앙에 배치되어 있으며, 고정되어 있다.
- ③ 유리평판의 휨이나 스퍼터링 공정 중의 스트레스로 인한 변형은 고려하지 않는다.
- ④ 에어패드와의 접촉으로 인한 굽힘을 피함과 동시에 안정성을 확보하기 위해서 실제 설계 시
- ⑤ 유리평판이 평균 부상을 5 mm이상으로 가정하기 때문에 해석모델의 유리평판의 부상높이는 5 mm로 고정한다.

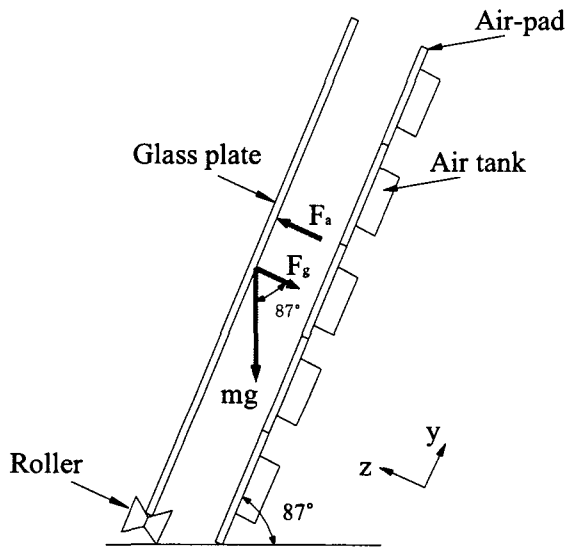


Fig. 1. Schematic diagram of the air-pad

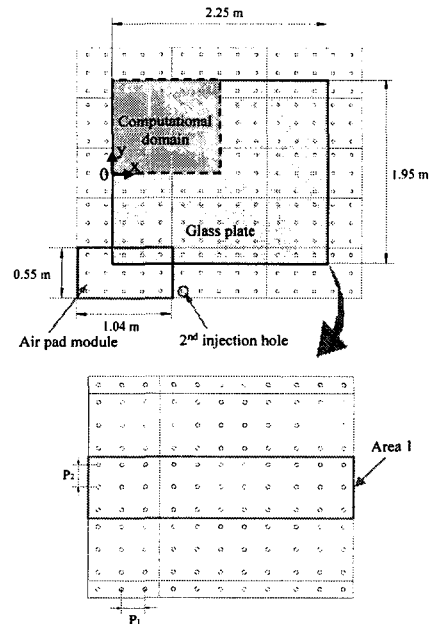


Fig. 2. Schematic diagram of the air-pad

유리평판의 5 mm 부상을 만족시키기 위해 유리평판 하중( $=mg$ )의  $z$  방향 분력인  $F_g$ 와 분사된 가스가 유리평판 하부에  $z$  방향으로 작용하는 힘인  $F_a$ 가 같아야 한다. 유리평판은 지면과 87°의 각도로 기울어져 있기 때문에 유리평판 하중의  $z$  방향 분력인  $F_g$ 는 다음과 같다.

$$F_g = (\rho_g V_g)g \times \cos 87^\circ = 4.024 N \tag{1}$$

유리평판 하부에 가해지는 힘은 유리평판 하부에 가해지는 압력을 식 (2)와 같이 면적에 대해 적분하여 구할 수 있다.

$$F_a = \int_A p dA \tag{2}$$

본 연구에서는 2차 가스 분사구 사이의 x축 간격 P<sub>1</sub> 및 y축 간격 P<sub>2</sub>를 에어패드 형상 설계에 필요한 변수로 고려하였다. 유리평판 부상 시 안정성 확보를 위해서는 유리평판의 압력집중이 최소화되어야 한다. 따라서, 각 설계 변수의 변화에 대하여 유리평판 하부에 작용하는 압력분포의 변화를 해석하였다.

### 2.3 유리평판에 작용하는 압력의 균일도 해석

유리평판 하부에 작용하는 압력의 균일도( $\gamma$ )를 평가하기 위해 Weltens<sup>(6)</sup>등이 제안한 식 (3), (4)를 사용하였다.

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i S_i}{S} \tag{3}$$

$$\gamma = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - \bar{p}|}{2\bar{p}} S_i \tag{4}$$

여기서  $n$ 은 유리평판 표면에 분포하는 총 계산 셀을 의미하며,  $S$ 는 유리평판의 단면적,  $S_i$ 와  $p_i$ 는 각 셀의 단면적과 국부 압력,  $\bar{p}$ 는 평균압력을 나타낸다.

### 2.4 지배방정식

시스템 해석에 사용된 3차원 난류 비압축성 정상상태 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{5}$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + \rho g_i \tag{6}$$

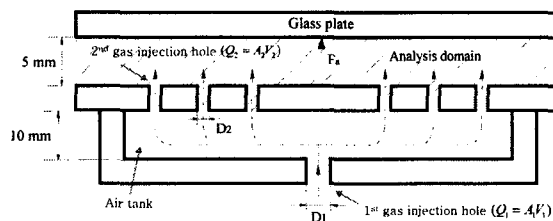


Fig. 3. Schematic diagram of analysis domain

여기서, 첨자  $i = 1, 2, 3$ 은 각각  $x, y$  및  $z$  방향으로의 변위를 의미한다. 식 (6)의 레이놀즈 응력항( $\overline{\rho u_i' u_j'}$ )은 난류유동을 지배하는 요소로서 식 (7)과 같이 정의 된다.

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = -\mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{7}$$

여기서,  $\mu_t$ 는 난류 와점성계수로 식 (8)과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

본 연구에서는 표준  $k-\varepsilon$  난류모델을 이용하며, 이때 난류 운동에너지  $k$ 와 소산율  $\varepsilon$ 의 방정식은 식 (9), (10)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{10}$$

식 (9)과 식 (10)에 나타난  $G_k$ 는 난류응력에 의한 생성에너지로서 다음과 같다.

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \tag{11}$$

지배방정식들의 운동량, 난류 운동 에너지, 난류 소산에 대한 차분은 상류차분법을 사용하였고 압력장과 속도장의 연계를 위하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서는 상용 열유동 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 지배방정식을 풀었다.

### 2.5 경계조건

모든 벽면에서의 속도는 점착(no-slip) 조건을 부여하였으며, 기체가 유입되는 입구영역에는 속도조건을 부여하였다. 출구에서는 압력 경계조건으로 대기압을 적용하였고, 대칭면에서는 모든 종속변수에 대해 대칭조건을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 2차 가스 분사구의 간격에 대한 영향

본 연구에서는 유리평판 하부에 작용하는 압력 의 균일도를 증가시키기 위해 에어패드의 설계 변수인  $P_1$ 과  $P_2$ 의 변화에 따라 유리평판 하부에 작용하는 압력분포를 해석하였다. 먼저  $P_1$ 과  $P_2$ 를 동일하게 두고,  $P_1$ 의 변화에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 4는  $P_1$ 의 변화에 대하여 유리평판의 부상조건인 " $F_g = F_a$ "를 만족시키는 2차 가스 분사구에서의 초기 속도조건 을 나타낸 것이다.  $P_1$ 이 증가하면, 2차 가스 분사구의 수가 감소하기 때문에 그에 따라 분사되는 가스의 속도가 증가하게 된다.

유리평판 하부에 작용 하는 y 방향으로의 압력분포를 나타내기 위하여 사용한 x축 방향의 위치를 Fig. 5에 나타내었다. 위치 A는 2차 가스 분사구간의 중간 위치를 말하며, 위치 B는 유리평판 아래에 분사구가 위치한 부분을 나타낸다. 유리평판에서 위치 A와 B는 모두 x축의 대칭경계면에 인접해 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 나타낸 위치 A에서 유리평판 하부에 작용하는 압력분포를 y 방향에 대해 나타낸 것이다.  $P_1$ 이 50 mm일 때 최대압력은 1.87 Pa,  $P_1$ 이 110 mm일 때 최대압력은 2.35 Pa임을 알 수 있다. 그리고 위치 B에서 유리평판의 하부에 작용하는 압력을 Fig. 7에 나타내었다.  $P_1$ 이 50 mm 일 때 최대압력은 56.69 Pa이고,  $P_1$ 이 110 mm일 때 최대압력은 1828 Pa이다. 위치 A와 B에 따른 유리평판의 하부에 작용하는 최대압력 값을 비교해 보면,  $P_1$ 이 50 mm와 110 mm일 때 각각 약 30배

와 약 2700배의 차이를 나타낸다. 따라서 Jun 등<sup>(4)</sup>의 연구에서와 같이 위치 B에서 나타나는 높은 압력을 고려하지 않고, 위치 A에서의 압력분포만으로 유리평판 전체에 작용하는 압력을 평가하는 것은 타당하지 않다. 따라서 본 연구에서는 유리평판 전체의 압력 균일도 계산을 통해  $P_1$ 의 변화에 따른 압력분포를 나타내었다.

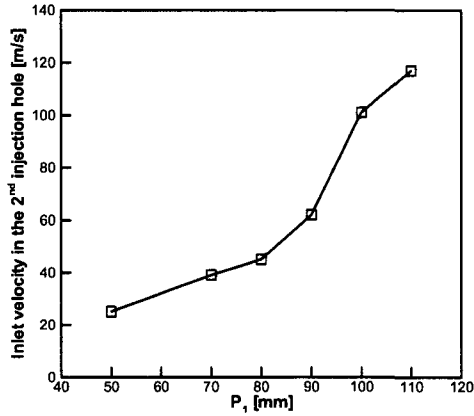


Fig. 4. Inlet velocity required to levitate the glass plate for various values of  $P_1$

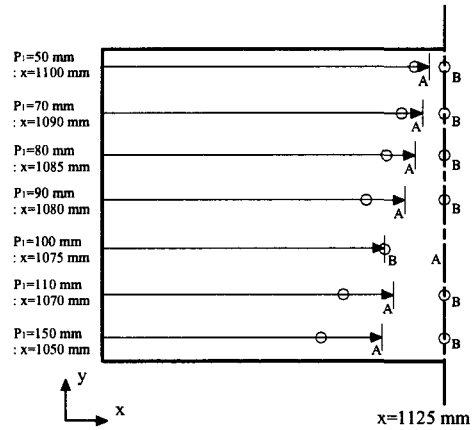


Fig. 5. Measurement positions of the pressure

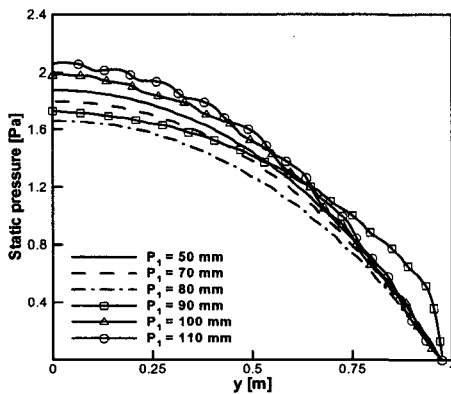


Fig. 6. Pressure profiles at the section A for various values of  $P_1$

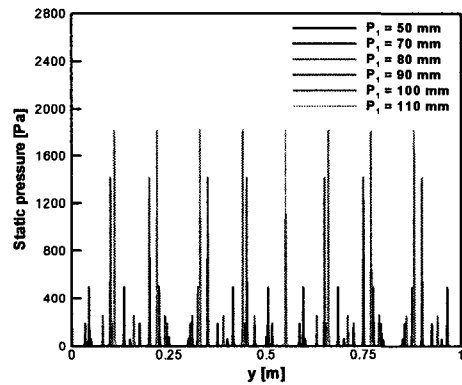


Fig. 7. Pressure profiles at the section B for various values of  $P_1$

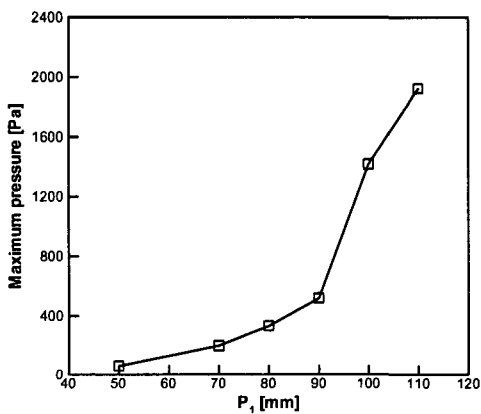


Fig. 8. Maximum pressure for various values of  $P_1$

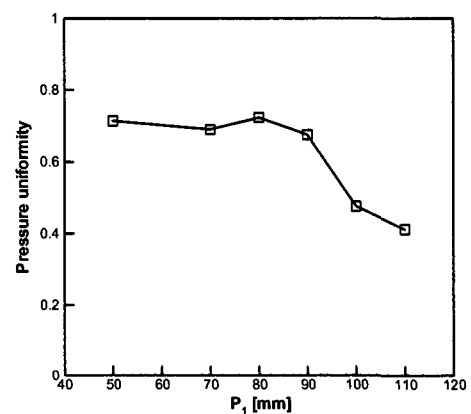


Fig. 9. Pressure uniformity for various values of  $P_1$

$P_1$ 의 변화에 대하여 유리평판에 작용하는 최대압력을 Fig. 8에 나타내었다. 유리평판에 작용 하는 최대압력은 2차 가스 분사구에서의 입구 속도 변화에 비례해서 증가하며, 입구 속도가 62 m/s에서 101 m/s로 급격하게 증가하는 90 mm와 100 mm 사이에서 518 Pa에서 1417 Pa로 크게 증가 함을 볼 수 있다.

Fig. 9는  $P_1$ 의 변화에 따른 유리평판 하부의 압력 균일도를 나타낸 것이다. 압력 균일도는  $P_1$ 이 90 mm이하일 때 0.67이상으로 비교적 높게 나타났으며,  $P_1$ 이 80 mm일 때 0.723으로 가장 높게 나타났다.  $P_1$ 이 90 mm에서 100 mm로 커지면 압력 균일도가 0.47로 감소하는데, 이는 유리 평판에 작용하는 최대압력의 급격한 증가와 분사구 수의 감소에 따른 영향으로 보여진다. 이와 같이 최대압력이 높고, 압력 균일도가 낮으면 유리평판 부상 및 이송의 안정성을 저해할 가능성이 크기 때문에 에어패드 설계 시  $P_1(=P_2)$ 의 간격은 90 mm이하로 고려되어야 함을 알 수 있다.

### 3.2 2차 가스 분사구의 세로 간격( $P_2$ )에 대한 영향

2차 가스 분사구의 세로 간격에 대한 유리평판 하부에서의 압력 분포를 살펴보기 위해, Fig. 2에 나타낸 Area 1에서  $P_2$ 의 변화에 따른 유리평판 하부에서의 압력분포를 해석하였다. 해석에 사용된  $P_2$ 의 간격과 2차 가스 분사구의 y축 방향으로의 개수를 Table 1에 나타내었다.

Area 1에서 2차 가스 분사구의 y축 방향으로의 개수에 따른 유리평판 부상을 만족시키는 2차 가스 분사구에서의 초기 속도조건을 Fig. 10에 나타내었다.  $P_2$ 가 증가하면 2차 가스 분사구의 y축 방향으로의 개수가 감소하기 때문에 그에 따라 가스의 분사속도가 증가하게 된다.

Fig. 11은 Area 1에서 2차 가스 분사구의 y축 방향으로의 개수에 따른 유리평판 하부에서의 최대 압력을 나타낸다. 2차 가스 분사구가 없는 경우와 2차 가스 분사구가 7개일 경우 유리평판 하부의 최대압력은 각각 590 Pa, 332 Pa이다. Area 1에서의 2차 가스 분사구 수가 감소함에 따라 2차 가스 분사구에서의 입구 속도는 증가하게 되며, 그 영향으로 유리평판 하부의 최대압력 또한 증가한다.

Fig. 12는  $P_2$ 의 변화에 따른 유리평판 하부 에서의 압력 균일도를 나타낸다. Area 1에 2차 가스 분사구가 전혀 없을 경우(case 6) 압력 균일도는 0.7이고, 2차 가스 분사구가 y축 방향으로 7개 있을 경우(case 1) 압력 균일도는 0.723으로 압력 균일도의 차는 약 0.02로 매우 작다. 2차 가스 분사구가 y축 방향으로 7개 있는 경우가 차이는 크지 않으나 가장 높은 압력 균일도를 나타내었고, 최대압력 또한 가장 낮게 나타났기 때문에 계산 결과 중 가장 안정적인 결과라 할 수 있다.

Table 1. The number of the 2<sup>nd</sup> gas injection holes along the y-axis for varying  $P_2$

Case number	$P_2$ (mm)	The number of holes along the y-axis
1	80	7
2	160	4
3	240	3
4	320	2
5	center	1
6	no hole	0

## 4. 결론

유리평판의 안정적인 부상 및 이송을 위해서는 유리평판 하부에 작용하는 최대압력의 감소와 높은 압력 균일도의 확보가 중요하다. 이를 위해 에어패드의 설계변수 인  $P_1$ 과  $P_2$ 의 변화에 따른 유리평판 하부의 압력 분포를 수치적 해석을 통해 살펴보았다.

2차 가스 분사구의 x, y 방향의 간격이 동일하고 등간격에 대해 해석을 수행하였으며, 본 연구에서 고려된 물리적 상황에서  $P_1$ 이 80mm일 때 0.723으로 가장 높은 압력 균일도를 나타 내었으며, 50 mm일 때 56.69 Pa로 최대압력이 가장 낮았다. 유리평판에 작용하는 최대압력 및 압력 균일도를 고려해 볼 때 유리평판을 비교적 안정적으로 부상 및 이송하기 위해서  $P_1$ 은 90 mm 이하가 되어야 한다고

판단할 수 있다.

또한 Area 1에서  $P_2$ 가 증가할수록 최대압력은 크게 증가하였으며,  $P_2$ 가 80 mm인 경우 가장 높은 압력 균일도를 나타내었으나 다른 경우와 비교하였을 때 그 차이는 크지 않았다. 따라서 Area 1의  $P_2$  변화에 대해 유리평판 하부에 작용하는 압력 균일도의 평가만으로 에어패드 설계변수를 제안하는 것은 무리가 있음을 알 수 있다. 그러므로 더 안정적인 결과를 얻기 위해 2차 가스 분사구의 y축 방향 간격에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

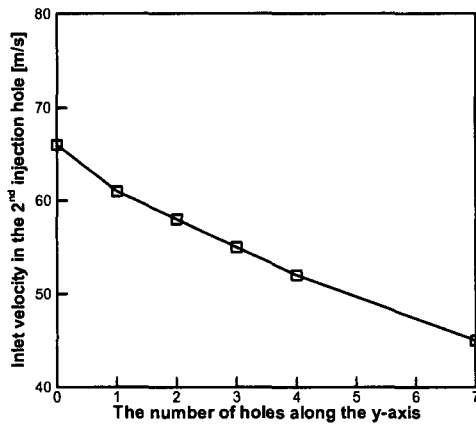


Fig. 10. Inlet velocity required to levitate the glass plate for various values of  $P_2$

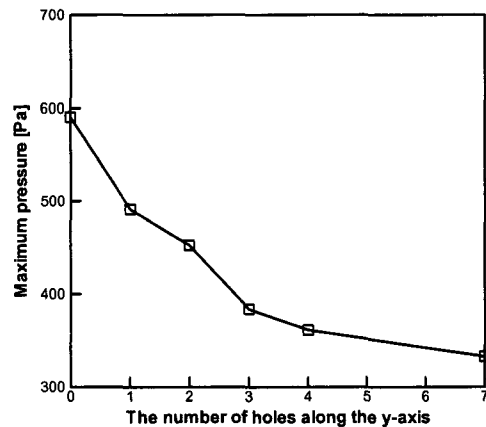


Fig. 11. Maximum pressure for various values of  $P_2$

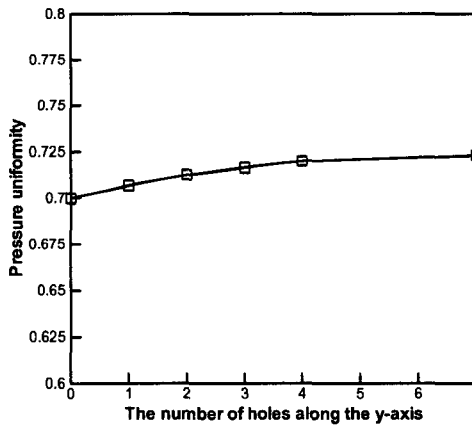


Fig. 12. Pressure uniformity for various values of  $P_2$

### 참고문헌

- [1] F. Poh, T. Higuchi, K. Yoshida, K. Oka, "Non-contact transportation system for thin glass plate utilizing combination of air bearing and electrostatic force" SICE' 99, 202, B-2, pp.1053-1058, 1999.
- [2] T. Amano, Y.K. Nakamura, S. Ueha, Y. Hashimoto, "A multi transducer near field acoustic levitation system for non-contact transportation of large-sized planar objects", Japanese journal of applied physics, Vol.39, part I No.5B, pp.2982-2985, 2000.
- [3] I.T. Im, H.J. Jun, K.S. Kim, "Numerical study on the air-cushion glass transportation unit for LCD panels", 반도체 및 디스플레이 장비학회지 제5권 제1호, pp.27-31, 2006.
- [4] H.J. Jun, K.S. Kim, I.T. Im, "A study on the air cushion pad of non-contact glass

- transportation unit", Proceedings of the KSDet fall conference, pp.138-144, 2006.
- [5] H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumairer, D. Rammoser, "Optimisation of catalytic converter gas flow distribution by CFD distribution", SAE Paper No. 930780, 2006.