

공기 슬릿 구조를 이용한 공기 부상 컨베이어의 공기 소모량 감소

이학구*(KAIST), 이대길(KAIST)

Reduction of the air consumption in the air conveyor with the air slit

H. G Lee(Mecha. Eng. Dept. KAIST), D. G Lee(Mecha. Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

The area of flat glass panel displays such as LCD (Liquid crystal display) and PDP (Plasma display panel) has been increased more than $2 \times 2 \text{ m}^2$ for productivity improvement. However, such a large panel area incurs large panel deflection during panel transfer using robots or AGV (Automated guided vehicle) systems. Therefore, electronic industries are making an effort to find an alternative transfer system for the large glass panels with small deflection. The air conveyor with porous pads is one plausible solution, but it becomes expensive because the large porous pads cost much and air consumption increases as the panel area increases. In this work, a simple air slit levitating conveyor was devised to lower the equipment cost and to reduce the air consumption of system. The air flow model between the LCD glass panel and conveyor was constructed and its validity was verified by experiments. To minimize the air consumption, the conveyor dimensions were optimized, and the air consumptions between the air conveyors with the air slit and that with the porous pad were compared.

Key Words : Air conveyor(공기 부상 컨베이어), Air slit (공기 슬릿), Porous pad (다공성 패드)

1. 서론

전자 산업 분야에서 LCD (Liquid crystal display), PDP (Plasma display panel)와 같은 평판 유리 패널 디스플레이의 생산성을 향상 시키기 위하여 유리 패널의 면적을 증가시켜왔다. 7 세대 이상의 유리 패널은 $2 \times 2 \text{ m}^2$ 이상의 면적과 0.5 - 0.7 mm 의 두께를 가지기 때문에 패널 이송 시 큰 처짐량 (Deflection)이 발생된다. 이로 인하여 7 세대 이전의 패널 이송시스템인 로봇 (Robot), AGV (Automated guided vehicle) 시스템을 디스플레이 생산에 적용하기 어려우며, 이를 해결할 수 있는 대체 이송 시스템에 대한 다양한 연구들이 수행되고 있다.

공기 부상 컨베이어 (Air conveyor)는 이러한 패널의 처짐량 문제를 해결할 수 있는 대체 이송 시스템으로, 공기 압력을 이용하여 패널을 부상시킨 후, 롤러 (Roller) 또는 타이밍 벨트 (Timing belt) 등의 구동장치를 이용하여 패널을 이송하는 장치이다. 공기 부상 컨베이어 시스템에 대하여 기존의 수행된 연구를 요약하면 다음과 같다. Naam [1] 등은

다공성 베어링 (Bearing)에서 점성 유동과 관성 유동의 하중 지지능력 (Load capacity)에 대하여 연구를 수행하였으며, 이로부터 점성 유동의 하중 지지능력이 관성 유동보다 높다는 결론을 얻었다. Chandra [2] 등은 구멍 리스트릭터 형식 베어링 (Hole restrictor-type bearing)의 압력 분포 및 하중 지지능력에 대하여 연구를 수행하였으며, 구멍 리스트릭터 근방에서 압력이 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 집중된 압력 분포는 패널의 처짐량을 증가시키기 때문에 구멍 리스트릭터 형식 베어링은 대면적 얇은 패널 이송에 적합하지 않다. Liaw [3] 등은 다공성 베어링에 슬립 경계조건 (Slip boundary condition)을 적용하여 슬라이딩 (Sliding) 상태 및 정지 (Static) 상태에서의 하중 지지능력을 비교하였으며, 이로부터 슬라이딩 효과가 하중 지지능력을 감소시킨다는 결론을 얻었다.

기존의 연구 결과로부터 대면적 얇은 패널 이송에 다공성 베어링이 구멍 리스트릭터 타입 베어링보다 유리하다는 것을 알 수 있으며, 따라서 디스플레이 산업에서 다공성 패드 구조의 공기 부상 컨

베이어를 주로 채택하고 있다. 디스플레이 패널은 얇은 두께로 인하여 패널 부상에 필요한 압력 및 곱힘 강성이 매우 작으며, 이로 인하여 공기 부상 컨베이어는 하중 지지 능력보다 패널의 처짐량을 줄일 수 있는 균일한 압력 분포 생성이 중요하다. 하지만, 다공성 패드의 경우 생성되는 압력 분포가 패널의 처짐량에 크게 영향을 받기 때문에 균일한 압력 분포가 발생하지 않는다. 또한, 다공성 패드는 1000°C 이상에서 세라믹 분말의 소결 (Sintering)을 통해 제조 되므로 제조 가격이 높다. 이외에도 기존의 다공성 패드를 이용한 공기 부상 컨베이어는 패널 부상에 대량의 공기를 소모하는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 패널의 처짐량, 컨베이어의 제조 가격 및 공기 소모량을 줄일 수 있는 새로운 구조의 공기 부상 컨베이어 개발이 필요하다.

본 연구에서는 압력분포가 패널의 처짐량과 무관한 새로운 공기 슬릿 (Air slit) 구조를 고안하였으며, 실험을 통하여 이를 검증하였다. 또한, 공기 슬릿 및 다공성 패드에 생성되는 압력 분포를 해석하여 각각의 패널 처짐량 및 공기 소모량을 비교하였다.

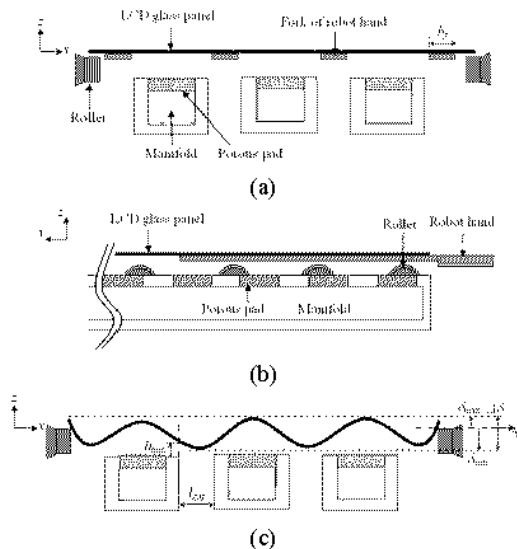


Fig. 1 . Schematic diagram of a conventional air conveyor having three conveyor lines: (a) sectional view in the xz -plane before panel loading; (b) sectional view in the yz -plane before panel loading; (c) sectional view in xz -plane after panel loading.

2. 공기 부상 컨베이어의 구동 조건

Fig. 1 은 세 개의 컨베이어 라인을 갖는 기존의 공기 부상 컨베이어 개략도이다. LCD 유리 패널은 다수의 포크 (Fork)를 갖는 로봇 핸드(Robot hand)에 의하여 공기 부상 컨베이어에 적재된 후, 밀면에서

공급되는 공기 압력에 의하여 부상된다. 부상된 패널은 롤러 또는 타이밍벨트와 같은 구동 장치에 의하여 다음 장비로 이송된다. 이때 패널의 처짐량은 작아야 하며 패널 표면의 긁힘(Scratch)을 방지하기 위하여 충분히 높은 부상 높이가 요구된다.

공기 부상 컨베이어의 구동조건은 다음과 같다. 과도한 패널의 처짐은 LCD 유리 패널에 부착된 회로에 결함을 발생시키므로, 최대, 최소 처짐량의 차이인 $\Delta\delta$ 는 허용 값 $\Delta\delta_c$ 보다 작아야 한다. 또한 최소 부상 높이는 패널 표면의 긁힘 방지를 위하여 허용 값 h_c 보다 커야 한다:

$$\Delta\delta \leq \Delta\delta_c \quad (1)$$

$$h_{\min} \geq h_c \quad (2)$$

로봇 핸드를 이용하여 패널을 적재하기 위해서는 컨베이어 라인 사이의 간격 l_{gap} 이 로봇 핸드 포크의 폭 b_f 보다 커야 한다.

$$l_{gap} > b_f \quad (3)$$

LCD 유리 패널과 롤러 사이의 미끄러짐 (Slip)을 방지하기 위해서는 패널의 가속도가 롤러와 패널 사이의 마찰력보다 작아야 한다. y 방향의 최대 가속도 a_{\max} , 롤러와 패널 사이의 마찰계수 μ 사이의 관계는 다음과 같다.

$$ma_{\max} < (1 - \phi)\mu mg \quad (4)$$

여기서, m 과 g 는 각각 패널의 질량과 중력가속도이며, ϕ 는 공기 압력에 의하여 지탱되는 패널 하중비 (Fraction)을 나타낸다. 식 (4)로부터 ϕ 의 범위는 다음과 같다.

$$0 < \phi < 1 - \frac{a_{\max}}{\mu g} \quad (5)$$

3. 공기 유동 모델

Fig. 2 는 각각 다공성 패드, 공기 슬릿을 이용한 컨베이어 라인의 구조를 나타낸다. 다공성 패드의 경우 패드의 전면에서 공기가 공급되며, 공기 슬릿의 경우 구멍 리스트릭터를 통하여 공기가 공급된 후, 공기 슬릿 내에서 퍼지게 된다. 따라서, 공기 슬릿의 경우 공급되는 공기의 속도가 다공성 패드에 비하여 빠르므로, 집중 압력 분포를 막기 위하여 Fig 2(b)에서의 캡 (Cap)이 필요하다. 공기 유동은 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 다공성 패드, 플랜지 (Flange), 공기 슬릿에서의 세가지 유동으로 나누어

생각할 수 있다.

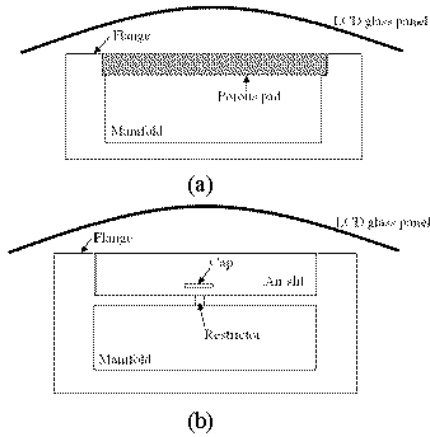


Fig. 2 Structure of conveyor line: (a) porous pad type; (b) air slit type.

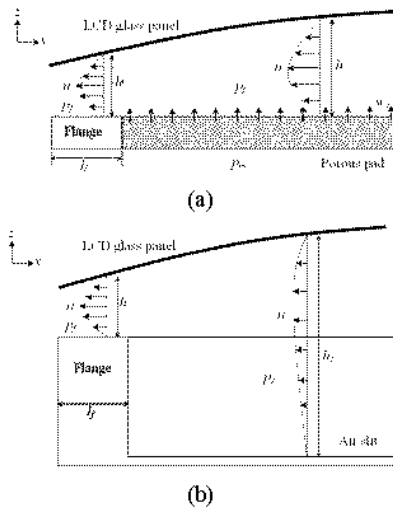


Fig. 3 Air flow model: (a) in the porous pad with flange; (b) in the air slit with flange.

Table 1 Material properties of LCD glass panel

Elastic modulus, E [GPa]	69.2
Poisson's ratio, ν	0.23
Density, ρ [kg/m ³]	2370
Thickness, t [mm]	0.5 - 0.7
Area density, ρ_{LCD} [kg/m ²]	1.19 - 1.66
Weight per unit area [Pa]	11.6 - 16.3

3.1 다공성 패드

Fig. 3(a)는 플랜지를 가지는 다공성 패드에서의 공기 유동 모델을 나타낸다. Darcy 방정식으로부터 다공성 패드를 통해 z 방향으로 공급되는 공기의

유속, w_o 는 압력차 $p_m - p_p$ 에 비례한다 [1]. 일반적으로 p_m 의 계수는 10^5 Pa, p_p 의 계수는 Table 1에서의 LCD 유리 패널의 단면적당 무게와 같은 10Pa이다. 따라서, $p_m - p_p \approx p_m$ 이므로 w_o 는 상수로 가정할 수 있다. 또한, p_p 의 값이 매우 작기 때문에 패널과 컨베이어 사이를 흐르는 공기는 비압축성 유체로 가정할 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 y 방향 컨베이어 라인의 길이가 x 방향 폭에 비하여 매우 크기 때문에 y 방향 속도 구배 (Velocity gradient)를 무시할 수 있다. 그리고, 패널의 부상 높이, h 는 x 방향 컨베이어 라인의 폭에 비하여 매우 작으므로 $\partial^2 u / \partial z^2$ 와 비교하여 $\partial^2 u / \partial x^2$ 를 무시할 수 있다. 이러한 가정들을 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식 (Continuity)에 적용한 후 간략히 나타내면 다음과 같다.

$$-\frac{\partial p_e}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

노슬립 경계조건 (No slip condition)을 이용하여 식 (5)를 z 에 대하여 적분한 후, 결과 식을 식 (6)의 z 에 대하여 적분 식에 대입하면 p_p 의 지배방정식인 Reynold 방정식이 얻어진다.

$$\frac{1}{12\eta} \frac{d}{dx} \left[h^3 \frac{dp_e}{dx} \right] = -w_o \quad (7)$$

3.2 플랜지

플랜지의 경우 z 방향의 공기 유속 w_o 가 0이므로 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial p_e}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

식 (9)를 z 에 대하여 적분하면 한쪽 플랜지를 통하여 빠져나가는 전체 공기 소모량 q 의 반이 된다. 노슬립 경계조건을 이용하여 z 에 대하여 식 (8)을 적분한 후, 이를 식 (9)의 z 에 대한 적분 식에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{dp_f}{dx} = -\frac{6\eta q}{h_f^3} \quad (18)$$

3.3 공기 슬릿

Fig. 3(b)는 플랜지를 갖는 공기 슬릿 구조를 나타낸다. 공기 슬릿에서의 부상 높이 h_s 는 플랜지에

서의 부상 높이 h 에 비하여 매우 크므로, 식 (18)의 압력구배를 무시할 수 있다. 따라서, 공기 슬릿에서의 압력은 상수로 가정할 수 있다.

$$p_s = \text{constant} \quad (19)$$

4. 부상된 패널의 처짐량

본 연구에서는 공기 슬릿과 다공성 패드의 공기 소모량을 비교하기 위하여 Fig. 4와 같은 단일 컨베이어 라인 모델을 생각하였다. Fig. 4에서 y -방향으로 단위 길이를 가지는 LCD 유리 패널에 대한 패널 처짐량 δ 의 지배방정식은 다음과 같다.

$$D \frac{d^2 \delta}{dx^2} = M = \frac{f_w}{2} (l_p x - x^2) - \frac{x}{2} \int_0^{l_p} p dx + \int_0^x p dx \quad (20)$$

$$\text{where, } D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

여기서, E , ν , t 는 각각 강성, 푸아송비 (Poisson's ratio) 및 패널의 두께를 나타낸다. 식을 간략하게 만들기 위하여 다음과 같은 무차원 수를 사용하였다.

$$p' = \frac{p}{f_w} \quad x' = \frac{x}{l_p} \quad \delta = \frac{384D}{5f_w l_p^4} \delta \quad (21)$$

여기서, $5f_w l_p^4 / 384D$ 는 단순 지지 조건에서 f_w 의 자중이 패널에 가해졌을 때 패널 중앙에서의 처짐량을 나타낸다. 식 (22)를 식 (21)에 대입한 후, 단순 지지 조건을 사용하여 적분하면 δ 의 지배방정식이 얻어진다.

$$\delta'' = \frac{16}{5} \left(-x'^4 + 2x'^2 - x' - 2x'^2 \int_0^1 p' dx' + 24 \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 p' dx' dx' dx' + 2cx' \right) \quad (22)$$

$$\text{where, } c = \int_0^1 p' dx' - 12 \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 p' dx' dx' dx'$$

5. 입력분포의 계산 알고리즘

공기 부상 컨베이어의 공기 소모량은 식 (18)에 의하여 주어진 압력분포 및 유리 패널의 부상 높이 h 로부터 계산된다. Fig. 5는 패널의 부상 높이 h 를 나타낸다. 플랜지 위에서 패널의 부상 높이 h 와 패널의 처짐량 δ 의 합이 일정하고, 부상 높이가 최소일 때, 즉 h_{\min} 이 최소 허용 값 h_c 와 같을 때 공기 유량이 최소가 되므로 h 는 다음과 같이 표현된다.

$$h = h_c - \frac{5f_w l_p^4}{384D} \left(\delta' \Big|_{x=0.5l_p} + \delta' \right) \quad (24)$$

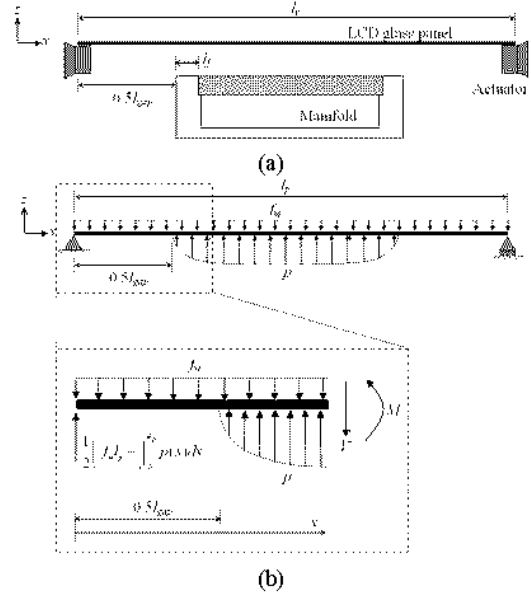


Fig. 4 One conveyor line model: (a) schematic diagram; (b) free body diagram.

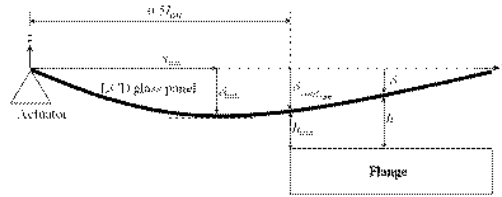


Fig. 5 Levitating height, h of glass panel.

압력분포는 패널의 처짐량으로부터 계산되며, 패널 처짐량을 구하기 위해서는 압력분포가 필요하다. 따라서, 압력분포와 패널의 처짐량은 반복계산 (Iteration)을 통하여 구해야 하며, 본 연구에서 사용된 반복계산 루틴 (Routine)은 Fig. 6과 같다. 초기 압력분포, p'_i 로부터 패널의 처짐량, δ 를 구한 후, 다시 압력분포, p'_o 를 구한다. $p'_i - p'_o$ 가 허용에러 (Error)보다 작지 않을 경우, 다음 반복 계산에서 p'_i 를 $\alpha p'_o$ 로 개선시킨다. $\alpha p'_o$ 는 최소 처짐량이 주어진 δ'_{\min} 이 되도록 하는 압력분포이며, 계수 α 는 다음과 같이 구해진다. 최소 처짐량의 위치를 x'_{\min} 이라 하면 이 점에서의 기울기 즉 식 (23)의 미분값이 0이 된다. 이를 이용하여 식 (23)을 δ'_{\min} 에 대하여 정리하면

$$\delta'_{\min} = \frac{16}{5} \left(3x'^4_{\min} - 4x'^2_{\min} + 4x'^2_{\min} \int_0^1 p' dx' + 24 \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 p' dx' dx' dx' - 24 \int_0^1 \int_0^1 p' dx' dx' \right) \quad (25)$$

x'_{\min} 은 플랜지 밖에 위치하므로 x'_{\min} 까지 압력분포

의 다중 적분은 0 이 되고, 패널 전면에 대한 무차원 압력분포의 적분은 정의로부터 ϕ 가 된다. 이를 정리하면,

$$3x_{\min}^4 - 4x_{\min}^3(1-\phi) - \frac{5}{16}\delta'_{\min} = 0 \quad (26)$$

따라서, 식 (26)으로부터 최소 처짐량의 위치를 결정된다.

식 (22)는 패널 자중에 의한 처짐량 δ'_1 과 압력 분포에 의한 처짐량 δ'_2 로 나누어진다. x'_{\min} 에서 처짐량을 두 성분으로 나누면 다음과 같다.

$$\delta'_{\min} = \delta'_1(x'_{\min}) + \delta'_2(x'_{\min}, \alpha p'_c) = \delta'_1(x'_{\min}) + \alpha \delta'_2(x'_{\min}, p'_c) \quad (27)$$

식 (27)을 계수 α 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\delta'_{\min} - \delta'_1(x'_{\min})}{\delta'_2(x'_{\min}, p'_c)} \quad (28)$$

식 (26)과 식 (28)을 이용하면 주어진 ϕ 와 δ'_{\min} 에서 압력분포 및 처짐량을 수립시킬 수 있다.

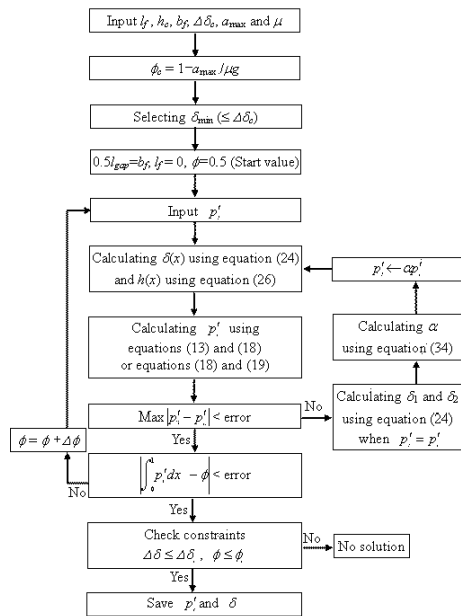


Fig. 6 Algorithm for calculating the pressure distribution and the panel deflection

6. 측정 실험

공기 슬릿 내에서 압력분포가 균일하다는 가정을 Fig. 7 과 같은 실험장비를 사용하여 검증하였다. Table 2 는 장비의 치수를 나타낸다. 패널은 적층각도 $\pm 5^\circ$, 두께 0.56mm ($D=8.3 \times 10^{-2}$ N·m), 밀도 1590 kg/m³ 인 탄소섬유/에폭시 복합재료 (USN 150)을 사용하였다.

Table 2 Dimensions of the experimental setup

Length of experimental setup [mm]	450
Dimension of air slit length \times width \times thickness [mm ³]	72 \times 4 \times 5
Length of flange [mm]	20

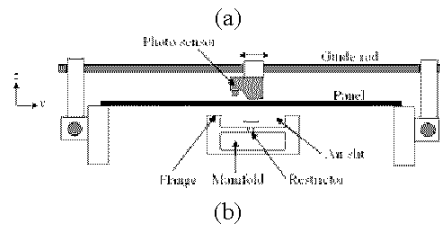
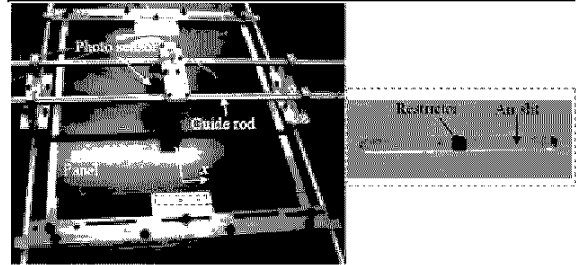


Fig. 7 Experimental setup: (a) photograph; (b) schematic diagram.

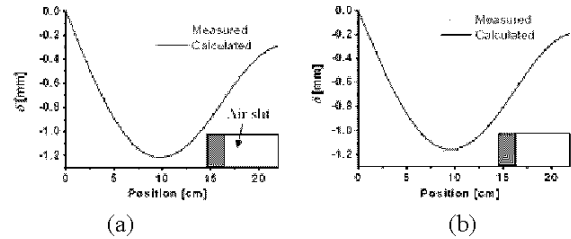


Fig. 8 Measured and calculated deflections with respect to volume flow rate: (a) $q = 10$ l/m·min; (b) $q = 20$ l/m·min.

Fig. 8 은 광 센서로 측정된 공기 유량에 따른 패널의 처짐량을 나타낸다. Fig. 8 에서 측정된 처짐량과 균일 압력분포 가정에 의하여 계산된 처짐량이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

7. 공기 소모량 및 처짐량 비교

Fig. 9 는 플랜지 길이의 증가에 따른 압력 분포 및 처짐량의 변화를 나타낸다. 플랜지 길이가 증가할수록 중심의 압력분포가 증가하며, 이로부터 패널 중심에서 처짐량이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9(b)에서 최대 처짐량은 플랜지 길이 52.4mm 이전에는 0 이며 그 이상에서는 패널 중심의 처짐량과 같다는 것을 볼 수 있다. 따라서 최대, 최소 처짐량의 차이인 $\Delta\delta$ 는 Fig. 10(a)와 같은 경향을 갖는다. Fig. 9(a)에서 플랜지 길이 증가에 따라 플랜지 끝단의 압력구배가 감소하는 것을 볼 수 있으며,

따라서 공기 소모량 q 는 Fig. 10(b)와 같은 경향을 갖는다. Fig. 11 은 δ_{\min} 에 따른 $\Delta\delta$ 및 q 의 경향을 나타낸다. $\Delta\delta$ 가 $\Delta\delta_c$ 와 같은 위치인 A, B, C 에서 최대의 플랜지 길이를 가지며, $-\delta_{\min}$ 이 $\Delta\delta_c$ 와 같을 때인 A 에서 최소의 공기소모량 q_{\min} 을 갖는다.

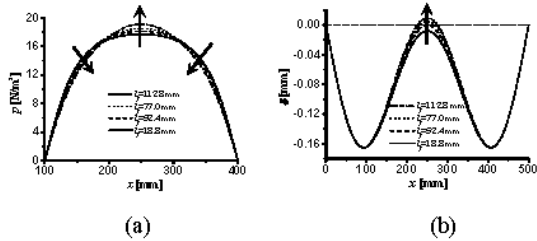


Fig. 9 $p(x)$ and $\delta(x)$ with respect to l_f when $l_{gap} = 200\text{mm}$, $h_{\min} = 0.20\text{mm}$, $\delta_{\min} = -0.165\text{mm}$: (a) $p(x)$; (b) $\delta(x)$.

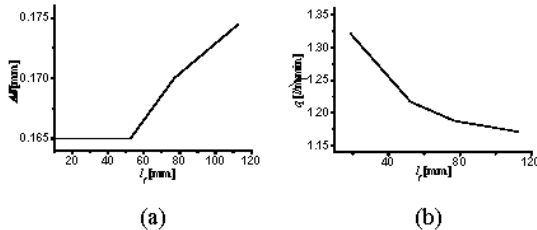


Fig. 10 $\Delta\delta$ and q with respect to l_f : (a) $\Delta\delta$; (b) q .

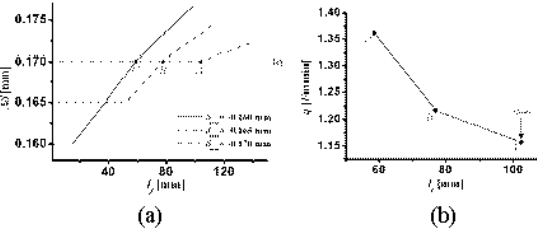


Fig. 11 $\Delta\delta$ and q with respect to l_f and δ_{\min} when $l_{gap} = 200\text{mm}$, $h_{\min} = 0.20\text{mm}$, $\Delta\delta_c = 0.170\text{mm}$: (a) $\Delta\delta$; (b) q .

Fig. 12 는 공기 슬릿과 다공성 패드에서 $\Delta\delta_c$ 에 따른 q_{\min} 및 ϕ 의 변화를 나타낸다. 동일한 $\Delta\delta_c$ 조건에서 공기 슬릿의 q_{\min} 은 다공성 패드의 q_{\min} 보다 최대 13.6% 작았으며, 동일한 공기 소모량에서 Fig. 12(b)와 같이 ϕ 가 ϕ_c 보다 작을 때 공기 슬릿의 $\Delta\delta$ 는 다공성 패드의 $\Delta\delta$ 보다 6.6% 작았다. 이러한 현상은 Fig. 13 과 같은 압력분포의 차이 때문에 발생한다. $\Delta\delta$ 를 줄이기 위하여 플랜지 길이를 감소시켰을 때 균일한 압력분포가 발생하는 공기 슬릿에서는 작은 플랜지 길이로 감소해도 쉽게 평탄한 압력분포가 발생되지만 다공성 패드에서는 플랜지 길이를 크게 감소시켜야만 평탄한 압력 분포가 발생한다. 따라서 작은 처짐량 조건에서 공기 슬릿은 다공성 패드보다 긴 플랜지 길이를 가지며, 이로 인하여 다공성 패드보다 공기 소모량이 작다.

8. 결론

본 연구에서는 공기 부상 컨베이어의 가격 및 공기 소모량을 줄이기 위하여 공기 슬릿 구조를 고안하였다. LCD 유리 패널과 컨베이어 사이를 흐르는 공기 유동 모델로부터 공기 슬릿 및 다공성 패드의 공기 소모량을 비교하였으며, 공기 슬릿의 공기 소모량이 다공성 패드보다 13.6% 작았다. 따라서, LCD, PDP 패널과 같은 대면적 얇은 패널 이송 시, 공기 슬릿 구조가 다공성 패드 구조에 보다 성능이 우수하다는 결론을 얻었다.

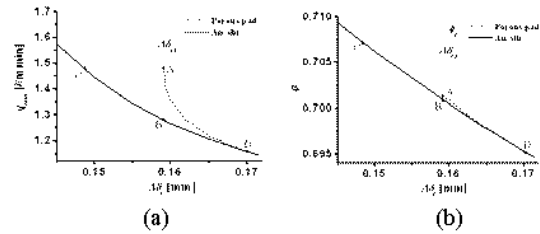


Fig. 12 Reduction of q_{\min} and $\Delta\delta$ using the air slit when $l_{gap} = 200\text{mm}$ and $h_{\min} = 0.20\text{mm}$: (a) q_{\min} ; (b) ϕ

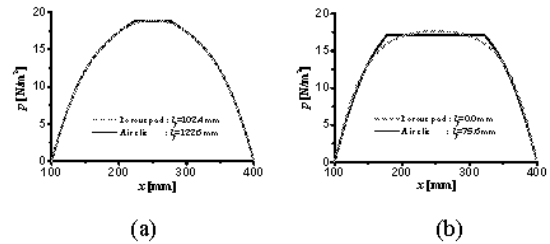


Fig. 13 Pressure distribution in the air slit and in the porous pad with respect to the x -axis (a) at the point D in Fig. 15; (b) at the points A and B in Fig. 15.

참고문헌

1. Naam, A.G, and Lewis, G.K., "The steady performance of externally pressurized porous rectangular pad gas bearings incorporating viscous and inertia dominated flow," Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 22, pp. 203-205, 1980.
2. Chandra, C.J.G, Srinivas, Y.L., Seetharamu, K.N., and Parameswaran, M.A., "Investigation of air film conveyor pressurized through multiple holes," Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 6, pp.235-243, 1990.
3. Liaw, S.P, and Lin, D.G, "Sliding effect of gas-lubricated porous rectangular thrust bearings," Wear: An international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear, Vol. 141, pp. 235-248, 1991.