

◎ 논문

LCD 유리원판 진공식 합착공정 해석을 위한 수치모델

지 철 욱^{*1}, 곽 호 상^{*2}, 김 경 훈^{*3}

A Simulation Model for Vacuum-Driven Bonding of Glass Panels in the Cell Process for LCD Manufacturing

Chul-Wook Ji, Ho Sang Kwak and Kyoung Hoon Kim

A simplified simulation model is designed to investigate the vacuum-driven bonding of glass panels in the cell process for LCD manufacturing. The bonding process is modelled by the transient flow of a weakly-compressible fluid in a very thin channel between two horizontal glass panels. An order of magnitude scaling analysis is conducted based on the characteristic feature of the channel of which height is much smaller than the horizontal length scales. It is revealed that the flow in the channel is represented by a Poiseuille flow of a compressible fluid. A finite volume model has been constructed to acquire the numerical solution to the derived simplified equations. For a simple test problem of pressure-driven microchannel flow, an assessment is made of the accuracy and validity of the proposed model. The basic aspects of vacuum-driven bonding are examined numerically, and the applicability of the present simulation model is illustrated.

Key Words: LCD 유리원판 (LCD glass panel), 진공식 합착(Vacuum-Driven Adhesion), 미소채널 유동(Microchannel Flow), 포아제유 유동(Poiseuille Flow), 규모해석 (Scaling Analysis), 수치해석(Numerical Analysis).

1. 서 론

박막액정표시장치(TFT-LCD, 이하 LCD) 제조 경쟁의 기본 축은 원판의 대형화이다. 부가가치가 높은 대화면 제품의 생산과 제조단가의 절감을 위한 필연적인 선택이다. 그러나 박판 구조를 가지는 원판의 대형화는 생산 공정에서 여러 가지 문제를 유발하여 이의 해결이 기술적 과제로 등장하고 있다. 대표적인 사례가 LCD 생산과

인에서 TFT 유리원판과 칼라 유리원판을 붙여 액정을 담은 밀봉공간을 확보하는 합착공정이다 [1]. 초기의 작은 원판에 사용했던 프레스를 이용하는 직접가압방식은 원판이 커지면서 기계적 파손을 유발하여 더 이상 적용할 수 없게 되었다. 현재 사용되고 있는 유력한 방법의 하나가 원판 내부의 공기를 제거하여 진공압을 형성함으로써 대기압에 의한 자연스러운 분포하중을 유발하는 진공식 합착법이다.

진공식 합착공정의 핵심 요구사항은 두 유리원판 사이의 압력을 적절히 제어하여 원판 사이의 거리를 최대한 균일하게 유지하는 것이다. 원판 사이에 형성되는 공간내부의 압력분포는 공정 시간, 진공압의 정도, 액정주입구 크기, 가열조건

* 2003년 5월 9일 접수

*1 한일이화(주) 중앙연구소

*2 정희원, 금오공과대학교 기계공학부 (교신저자)

*3 금오공과대학교 기계공학부

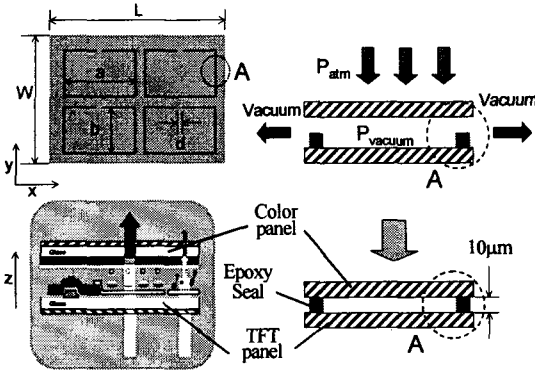


Fig. 1 Illustration of the vacuum-driven adhesion process of LCD glass panels.

등에 의해 결정된다. 이와 같은 다양한 요소가 합착결과에 미치는 영향을 분석하여 최적의 공정 조건을 찾는 것이 기술적 과제이다. 그러나 원판 사이의 공간은 두께가 5-10 μ m 정도에 불과하다. 압력과 같은 기본적인 물리량에 대한 정확한 측정과 이에 기반한 공정분석이 대단히 어렵다. 이러한 경우에 수치모사가 유용한 대안이지만 LCD 제조의 짧은 역사로 인해 합착 과정에 대한 열유동 모델링이 아직 체계적으로 이루어지지 않고 있다. 현재 생산현장에서는 공정후 품질평가를 통하여 공정의 적절성을 거꾸로 추정하는 시행착오법이 일반적으로 사용되고 있다. 불량 발생시 원인 규명이나 공정개선, 진공정 설계에 필수적인 물리적 작동원리를 파악하는데 한계가 있을 수밖에 없다.

이 연구는 이러한 현실을 극복하기 위한 노력의 일환으로 수행되었다. LCD 셀공정의 합착과정을 분석할 수 있는 새로운 해석틀을 구축하는 것이 연구의 목적이다. 2장에서는 합착의 물리적 과정을 열유동 관점에서 모델링하고 비정상 압력 분포를 구할 수 있는 단순 이론모형과 수치모델을 제안할 것이다. 3장에서는 간단한 시험예제를 통하여 제안된 해석모델의 타당성과 실용성을 평가할 것이다.

2. 해석 모델

2.1 진공식 합착의 물리적 과정

LCD의 기본 원리는 TFT 기판의 전기신호를 조작하여 액정의 정렬 방향을 제어함으로써 후광원에서 나온 빛을 칼라기판 쪽으로 선택적으로 투과시켜 색상을 표현하는 것이다. 합착은 TFT

유리원판과 칼라 유리원판을 접착제로 붙여 액정을 주입할 박막형 공간을 확보하는 LCD 셀라인의 최종 조립공정이다[1]. 여기서 접착제는 두 유리판을 붙이는데 결합력을 제공할 뿐 아니라 액정을 밀봉하는 LCD 제품의 형상틀이 되므로 합착은 제품의 수율에 직접적인 영향을 미치는 중요공정이다.

Fig. 1은 진공식 합착공정을 개념적으로 설명한 것이다. 길이가 L, 폭이 W인 대형 TFT 유리원판 위에 접착제(밀봉재)로 원하는 크기와 모양, 수량의 LCD 제품(길이 a, 폭 b)을 그린다. 여기에 칼라 유리원판을 덮고 측면에 진공압을 걸면 원판 사이의 공기가 빠져나가게 된다. 이때 형성되는 외부 대기압과 내부 진공압의 차이만큼의 분포하중을 강제 접착력으로 활용하는 것이다. 밀봉벽의 한 변에는 길이 d의 통로가 열려있다. 이후 공정에서 액정을 넣게될 주입구이고 합착과정에서는 공기의 유출입을 허용하는 출입구이다.

합착 문제에서 일차적인 관심사는 합착력을 결정하는 압력분포이며 이를 구하기 위해서는 두 원판 사이의 공기 흐름을 해석하여야 한다. 이 연구에서는 진공식 합착공정을 h만큼 거리가 떨어진 두 개의 수평 평판 사이에 형성된 박막형 공간(h \ll L)을 흐르는 비정상 유동 문제로 단순모형화하였다. 일반적으로 대기압 조건에서 저속의 공기 흐름은 비압축성으로 볼 수 있지만 진공식 합착에서는 기류에 의한 밀도 감소가 접착력을 만드는 기본 원리이므로 압축성을 고려하여야 한다. 작동유체인 공기를 이상기체로 가정하면 유동을 지배하는 방정식은

$$p = \rho RT \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \alpha \left(\nabla^2 u + \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) \end{aligned} \tag{3a}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \alpha \left(\nabla^2 v + \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{3b}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \alpha \left(\nabla^2 w + \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C w T)}{\partial z} \\ = k(\nabla^2 T). \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ∇^2 은 라플라스 연산자이고 기체의 압축성에 의한 점성효과를 대표하는 ϵ 는

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (5)$$

(u, v, w) 는 (x, y, z) 방향의 속도성분, p 는 절대압력, ρ 는 밀도, R 은 기체상수, T 는 절대온도, α 는 점성계수, C 은 정압비열, k 는 열전도계수이다. 에너지 방정식에서 압축성에 의한 발열은 무시하였다.

2.2 규모해석 (Scaling Analysis)

이 연구에서는 기본방정식을 단순화하기 위하여 규모해석을 실시하였다. 수평방향(x, y) 속도 U_0 , 수직방향(z) 속도 W_0 , 수평방향 길이 L , 수직방향 길이 h , 시간 τ , 합착공정의 압력차 Δp , 밀도 ρ_0 를 기준으로 실제 합착조건을 고려하면

$$x, y \sim L \sim O(1\text{m}), \quad z \sim h \sim O(10\mu\text{m}), \quad (6a)$$

$$p \sim \Delta p \sim (10^5\text{Pa}), \quad (6b)$$

$$u, v \sim U_0 \sim \Delta p h^2 / \mu L \sim O(1\text{m/s}), \quad (6c)$$

$$\begin{aligned} \rho \sim \rho_0 \sim O(1\text{kg/m}^3), \quad \alpha \sim O(10^{-5}\text{kg} \cdot \text{m/s}), \\ C \sim O(10^3\text{J/kgK}), \quad k \sim O(10^{-3}\text{W/mK}), \end{aligned} \quad (6d)$$

$$t \sim \tau, \quad w \sim W_0. \quad (6e)$$

질량보존방정식 (2)에서 각 항의 크기는 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \sim \frac{\rho_0}{\tau}, \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \sim \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \sim \frac{\rho_0 U_0}{L} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \sim \frac{\rho_0 W_0}{h}. \quad (7b)$$

비정상 밀도변화를 모사하기 위한 균형은

$$\rho_0/\tau \sim \rho_0 U_0/L \sim \rho_0 W_0/h. \quad (8)$$

따라서 기준시간 τ 는 대류시간 τ^* 와 같아지며 속도성분의 상대적인 크기는

$$\tau \sim \tau^* \sim L/U_0, \quad (9)$$

$$w/u \sim W_0/U_0 \sim h/L. \quad (10)$$

이 문제의 특징은 해석영역의 한 방향 길이가 다른 방향의 길이보다 매우 작은($h/L \sim 10^{-5}$) 헬레-쇼 유동(Hele-shaw flow, [2-3])이라는 것이다. 따라서 채널 내부유동에서 수직(z)방향의 속도성분은 수평방향에 비해 무시할 만큼 작다.

같은 방법을 운동량방정식에 적용하면

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \sim \frac{\rho_0 U_0}{\tau}, \quad (11a)$$

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} \sim \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} \sim \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} \sim \frac{\rho_0 U_0^2}{L}, \quad (11b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \sim \frac{\Delta p}{L}, \quad (11c)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \sim \alpha \frac{U_0}{L^2}, \quad \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \sim \alpha \frac{U_0}{h^2} \quad (11d)$$

식(11d)의 점성항들의 크기를 비교하면

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} / \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \sim \frac{h^2}{L^2} \sim 10^{-10}. \quad (12)$$

대류항과 점성항의 크기를 비교해 보면

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} / \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \sim \frac{\rho_0 U_0 h}{\alpha L} \sim 10^{-5}. \quad (13)$$

점성항에 대한 비정상항의 상대적인 크기는

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} / \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \sim \frac{\rho_0 h}{\alpha \tau}. \quad (14)$$

여기서 비정상항의 크기는 시간척도 τ 에 의해 결정된다. (2)에서는 대류시간 τ^* 가 유일한 기준이었으나 (3)에서는 점성에 의한 운동량 전달시간을 대표하는 점성확산시간 $\tau^+ = \rho_0 h^2 / \alpha$ 또한 의미있는 시간척도가 될 수 있다. 연구대상 문제에서 크기를 평가해보면 $\tau^* \sim 1$ 초, $\tau^+ \sim 10$ -5초이다. (14)는 운동량방정식 (3)에서 비정상항은 τ^+ 정도의 시간척도에서만 의미를 가짐을 지적하고 있다. 그러나 10-5초의 확산시간 동안에 벌어지는 미시적 거동 하나하나가 수분이 소요되는 거시적 합착과정에 직접 영향을 준다고 보기 어렵다. 초단위의 대류시간이 실제적 의미를 지닌 유의미한 시간척도라 할 수 있다. 이러한 근거로 운동량방정식에서 비정상항을 무시하였는데 그 타당성은 추후 평가할 것이다.

또한 운동량방정식에 포함되어 있는 ϵ 의 영향은

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial x} / \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \sim \frac{h^2}{L^2}. \quad (15)$$

고압축성 유동에서 중요한 압축성 점성효과는 유속이 빠르지 않은 합착공정에서는 무시해도 무방하며 에너지 보존방정식에서 압축성 발열효과를 고려하지 않은 것도 맥락에서 설명할 수 있다.

같은 방법으로 에너지 보존방정식을 평가하면 수직 방향의 전도항 이외의 모든 항을 무시할 수 있다. 여기서 $10 \mu\text{m}$ 두께의 공기층에서 열전달 시간척도중 하나인 전도시간이 $\tau^d \sim \rho_0 C h^2 / k \sim 10$ -5초 정도임을 감안하면 유리원판의 온도가 변하면 거의 동시에 공기층의 온도가 변한다. 따라서 공기층 내부의 온도분포는 해석대상이라기 보다 바닥면 열경계조건에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 이 연구에서는 합착이 등온 조건에서

이루어진다고 가정하여 에너지 보존방정식을 따로 고려하지 않았으나 이를 고려하는 것은 어렵지 않은 일이다.

2.3 단순화 모델

규모해석 결과는 평판사이의 유동에서 비정상항과 관성항을 무시할 수 있음을 지적하고 있다. 결과적으로 운동량방정식은 점성항과 압력항이 균형을 이루는 단순방정식을 표현된다.

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (16a)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} + \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \quad (16b)$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (16c)$$

(16c)는 압력이 높이와 관계없는 평면좌표만의 함수임을 지적하고 있다. 이러한 성질과 벽면에서의 점착조건($u = v = 0$ at $z = 0, h$)을 이용하면 (16)으로 부터 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$u(x, y, z) = -\frac{1}{2\alpha} \frac{\partial p}{\partial x} z(h-z), \quad (17a)$$

$$v(x, y, z) = -\frac{1}{2\alpha} \frac{\partial p}{\partial y} z(h-z). \quad (17b)$$

즉, 평판 사이의 유동은 수직방향으로 포물선형의 구조를 가지는 포아제유 유동(Poiseuille flow)으로 표현된다[4]. 최종적으로 (2)와 (17)을 높이방향으로 적분하면 다음과 같은 2차원 단순방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} = 0, \quad (18)$$

$$U(x, y) = -\frac{1}{12\alpha} \frac{\partial P}{\partial x} h^2, \quad (19a)$$

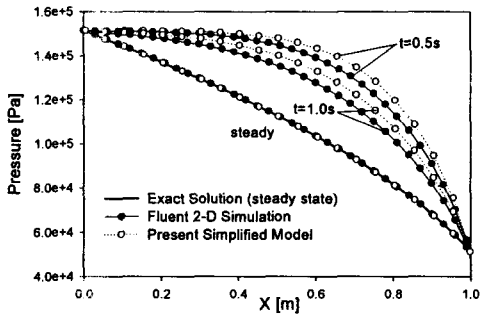


Fig. 2 Results of the numerical tests for the transient Poiseuille flow of a compressible fluid in a shallow channel. t in the frame means the real time in unit of second.

$$V(x, y) = -\frac{1}{12\alpha} \frac{\partial P}{\partial y} h^2 \quad (19b)$$

여기서 U, V, P는 높이방향의 평균물리량이다.

$$U = \int_0^h u dz/h, \quad V = \int_0^h v dz/h, \quad (20a)$$

$$P = \int_0^h p dz/h. \quad (20b)$$

(1), (18), (19)의 지배방정식의 해를 구하기 위하여 엇갈림 격자를 채용한 전형적인 유한체적법 [5]을 이용한 수치모델을 개발하였다. 공간보간은 2차 중앙차분법으로 시간전진은 2차 음해법으로 처리하여 시간과 공간에 대하여 2차의 정확도를 갖는 수치모델을 만들었다. 계산의 수렴성과 안정성을 위하여 하향이완법(under-relaxation)을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치모델 검증 및 시험

이 연구에서 제안한 단순화 유동모형과 수치 모델(이하 간이모델)의 타당성을 평가하기 위하여 검증용 수치시험을 실시하였다. 박막형 채널 내의 압축성 유체의 비정상 점성유동이 시험예제

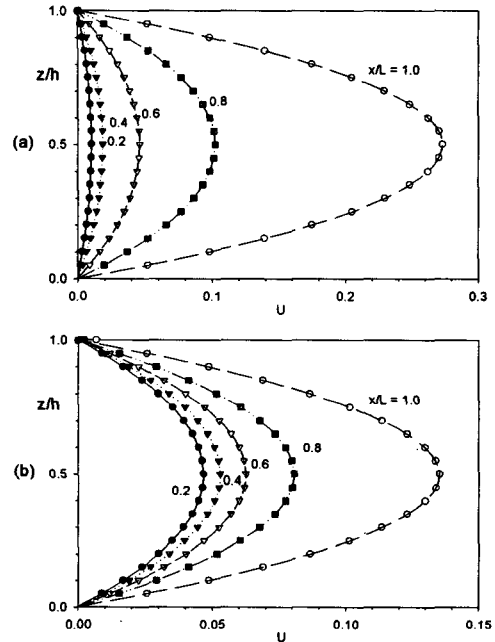


Fig. 3 Vertical velocity distribution in the channel (a) at t=1s; (b) at steady state. Symbols and lines represent the results of numerical simulation by using FLUENT and the corresponding Poiseuille flow profiles of eq. (17), respectively.

이다. 길이가 L이고 높이가 h인 2차원 채널에 공기가 채워져 있고 초기 압력은 Po로 일정하다. 갑자기 채널 좌단과 우단의 압력을 PR, PL로 바꾸어 압력차에 의해 구동되는 유동이 해석대상이다. 시험조건은 다음과 같다.

$$L = 1m; \quad h = 10\mu m$$

$$Po = PR = 151.3 \text{ kPa}; \quad PL = 51.3 \text{ kPa}.$$

간이모델을 이용하면 이 문제는 1차원 비정상 유동으로 모델링할 수 있다.

비교평가를 위하여 상용 전산유체역학 코드인 FLUENT 6.0을 이용하여 동일한 문제를 높이방향의 변화를 고려한 2차원 유동으로 모델링하고 해석을 병행하였다. 이상기체 모델을 이용하고 채널의 좌우단에는 각각 압력입구(Pressure Inlet)와 압력출구(Pressure outlet) 조건을 적용하였다. 음해법의 시간전진, PISO 알고리즘과 상류차분법을 사용하였고 100x20개의 유한체적을

동원하였다.

이 문제의 경우, 등온조건을 가정하면 정상상태에 대한 엄밀해가 존재한다. 정상상태에서는 유동은 압축성 유체의 포아제유 유동으로 표현되며 이에 상응하는 압력장은 다음과 같이 구해진다.

$$P(x) = \sqrt{(P_R^2 - P_L^2)x/L + P_L^2}. \quad (21)$$

수평방향으로 압력이 선형적으로 변하는 비압축성 포아제유 유동과 달리 밀도의 변화가 있어 압력의 제곱이 선형적으로 변한다.

Fig. 2는 100개의 제어체적을 사용한 간이 모델의 1차원 계산결과와 FLUENT를 이용한 2차원 계산결과, 그리고 정상상태에 대한 엄밀해를 모두 보여주고 있다. 정상상태의 압력분포는 두 가지 수치계산 결과 모두 엄밀해와 절삭오차(truncation error)의 범위안에서 일치하고 있다. 문제는 비정상 거동인데 1차원 간이계산 결과가 FLUENT를 이용한 2차원 계산보다 약 5% 정도 압력강하를 지연되게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 원인을 알아보기 위하여 여러 가지 공간보간법(1차 풍상차분법과 2차 중앙차분법)과 시간전진 방법(1차 오일러 음해법, 2차 Adams-Bashforth법, Crank-Nicholson법)을 적용하여 계산을 반복하였다. 그러나 동일한 방정식 (18), (19)을 사용하는 한 간이모델은 절삭오차 규모 이상의 눈에 띄는 차이를 보여주지 않았고 이것은 FLUENT 계산에서도 마찬가지였다. 객관적인 비교기준이 없어 어느 쪽이 타당한 결과인지 확인하기는 어렵지만 비정상해에서 나타난 오차는 수치적인 원인에 의한 것이 아니라 물리적 모델의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다. 원인규명은 후속연구의 과제로 남겨둔다.

이 연구에서 제안하고 있는 유동모형은 미소 채널내에서는 점성력과 압력이 역학적 평형을 이룬다는 평가로부터 출발한 것이다. 이로부터 얻은 결과가 채널내부의 기류는 높이방향으로 포물선 구조를 가지는 포아제유 유동이라는 것이었다. 이를 검증하기 위하여 FLUENT를 이용한 2차원 계산결과에서 높이방향의 속도분포를 추출하여 Fig. 3에 도시하였다. 정상상태는 물론 비정상 과도상태에서도, 채널내의 모든 지점에서 유동은 (17)과 같은 포물선 구조를 가지고 있음을

확인할 수 있다. 이상의 논의에서 이 연구가 제안하고 간이모델의 정량적 정확도 평가는 다소 유보적이지만 적어도 정성적 경향 모사능력과 기본적인 물리적 가정의 적절성을 확인하였다.

간이모델 유도과정에서 도입한 또 하나의 가정은 대류시간 τ^* 를 시간척도의 기준으로 삼아 운동량방정식의 비정상항을 무시한 것이다. 그 타당성을 평가하기 위하여 비정상항을 포함한 수정모델을 작성하여 비교평가를 수행하였다. 기하학적 중형비가 매우 작은 ($h/L \ll 1$) 헬레-쇼 유동(Hele-Shaw flow) 문제에서는 비정상항 뿐 아니라 대류항이 존재하는 경우에도 수직방향의 속도 분포는 포물선 구조를 가진다[2-3]. 이를 반영하여 비정상항을 포함시키면 운동량 보존방정식 (19)는 다음과 같이 수정된다.

$$U^{n+1} = \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \theta U^n \right) / \left(\frac{12\alpha}{h^2} + \theta \right), \quad (22a)$$

$$V^{n+1} = \left(-\frac{\partial P}{\partial y} + \theta V^n \right) / \left(\frac{12\alpha}{h^2} + \theta \right). \quad (22b)$$

여기서 n 과 $n+1$ 은 시간을 표현하는 정수이며 θ 는 비정상항의 존재를 반영하는 상수로 수치모델의 시간전진방법에 의해 결정된다. 비정상 계산의 시간증분(Δt)을 제한하는 조건으로 CFL 조건을 적용하면

$$\theta \sim \rho_0 / \Delta t \sim \rho_0 \Delta x / U_0 < O(Pa/m), \quad (23a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \sim \frac{12\alpha}{h^2} \sim O(10^5 Pa/m). \quad (23b)$$

따라서 θ 의 영향을 무시할 만하다. Fig. 4는 운동량방정식으로 (19)와 (22)를 채용한 간이모델의 계산결과를 비교하고 있다. 두 모델은 대부분의 유효숫자까지 일치하는 거의 동일한 결과를 제출하였다. 운동량정식에서 비정상항을 무시할 수 있으며 이 문제에서 물리적 의미를 가지는 시간척도가 대류시간 τ^* 임을 재확인하는 결과이다.

연구대상과 같이 박막형 미세유로에서의 유동을 다룰 때 점검해야 할 것이 미소규모효과(micro-scale effect)이다 [6-7]. 기체의 경우, 유로의 크기가 매우 작아지면 회박기체의 특성을

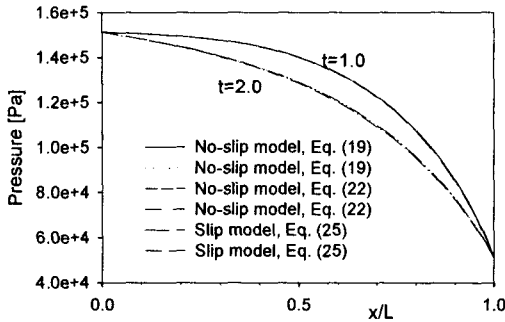


Fig. 4 Effects of the presence of unsteady terms and the slip velocity on the pressure distribution in the channel.

나타나게 되는데 특히 벽면부근에서는 연속체 가정이 만족되지 않는 Knudsen층이 존재하는 것으로 알려져 있다. 이러한 미소규모 효과를 결정하는 주인자인 Knudsen수($Kn = l/\lambda$)이며 1은 유동의 기하학적 특성길이이고 λ 는 기체입자의 자유 이동평균거리(mean-free-path)이다. 공기의 경우 $\lambda = 80nm$ 임을 고려하면 이 문제에서 $Kn \sim O(10^{-2})$ 이며 연속체 유동($Kn < 10^{-3}$)에 가까운 미끄럼 유동(slip flow, $10^{-3} < Kn < 10^{-1}$)형에 해당한다. 이 경우, 벽면 근처에 국한되는 희박기체 효과는 미끄러짐 경계조건(slip condition)으로 표현하는 것이 일반적이다 [6-7].

$$u(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\alpha} \left[\frac{\partial P}{\partial x} \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right) + \beta \right], \quad (24a)$$

$$v(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\alpha} \left[\frac{\partial P}{\partial y} \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right) + \beta \right], \quad (24b)$$

$$\beta = \frac{2-\sigma}{\sigma} \frac{Kn}{1+Kn}.$$

σ 는 접선방향 운동량 보정계수로 공기의 경우 0.87~0.97정도의 값을 가진다. 이를 고려하면 운동량 보존방정식 (19)는 다음과 같이 수정된다.

$$U(x, y) = -\frac{1}{12\alpha} \frac{\partial P}{\partial x} h^2 - \beta, \quad (25a)$$

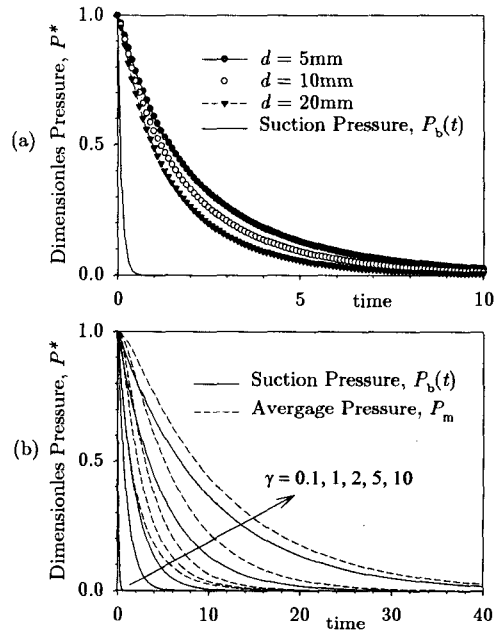


Fig. 5 Time-dependent evolution of the average pressure in the LCD panel. (a) $\gamma=0.1s$; (b) $d=5mm$. Time is in units of second.

$$V(x, y) = -\frac{1}{12\alpha} \frac{\partial P}{\partial y} h^2 - \beta. \quad (25b)$$

(25)식에 기반한 간이모델을 이용하여 얻은 계산결과를 Fig. 4에 함께 도시하였다. 점착조건을 적용한 모델의 결과와의 차이를 느끼기 어렵다. 이 문제에서는 Kn 이 아직 작아 미끄러짐 속도가 압력분포에 미치는 영향은 부차적인 것으로 보인다.

3.2. LCD 유리원판 합착공정 해석

간이모델을 이용하여 LCD 패널의 합착공정에 대한 수치실험을 수행하였다. 실제 공정분석을 위해서는 여러 개의 LCD 면이 인쇄되어 있는 유리원판 전체에 대한 해석이 필요하다. 이 연구에서는 이에 앞서 합착공정에서 내부압력에 영향을 미치는 인자를 파악하고 전체 원판에서 나타나는 문제를 이해하는데 필요한 기초를 확보하기 위하여 비교적 단순한 단일 패널문제를 고려하였다. 연구대상은 유리원판 위에 가로 270mm, 세로 200mm의 13" LCD 한면이 그려진 패널이

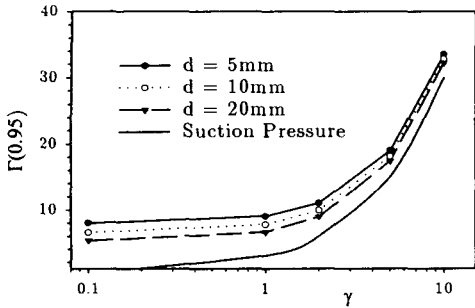


Fig. 6 Estimated time at which the mean pressure in the panel reaches at 95% of the final vacuum pressure.

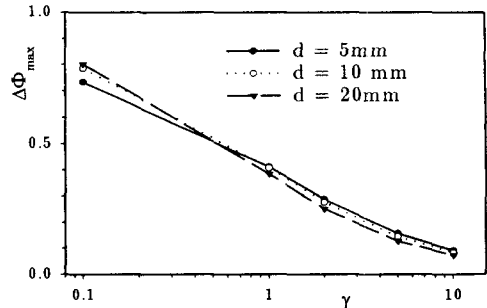


Fig. 8 Maximum pressure difference in the LCD Panel.

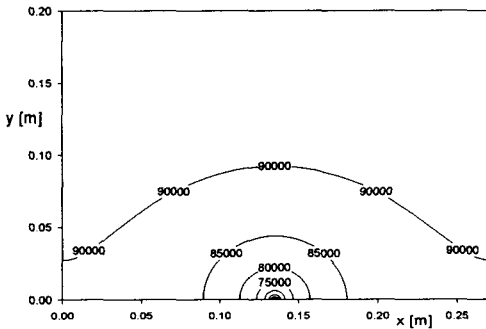


Fig. 7 Pressure distribution in the LCD panel at t=2s, d=5mm, γ=0.1s.

다.

합착공정은 다음과 같은 유동문제에 표현하였다. 초기에 패널내부는 P_{atm} 의 일정한 압력을 유지하고 있다. 패널의 액정주입구에 진공배압 P_b 이 걸리면서 공정은 시작되는데 진공배압의 시간에 따른 변화는 다음과 같이 설정하였다.

$$P_b(t) = P_{atm} + (P_{vac} - P_{atm})[1 - \exp(-t/\gamma)] \quad (26)$$

(26)은 γ 의 시상수(e-folding time scale)를 가지는 지수함수형 감압곡선을 표현하고 있으며 $1/\gamma$ 가 감압의 속도를 대표한다. 실제 합착이 이루어지는 청정실 환경을 고려하여 P_{atm} 과 P_{vac} 은 절대압력으로 151.3kPa(계기압 50kPa)과 51.3kPa(진공압 -50kPa)로 설정하였다. 액정주입구의 길이 d 가 5mm, 10mm, 20mm 세 가지의 경우에 대하여 감압속도를 결정하는 공정변수인 감압시상수 γ 를 바꾸어가면서 수치실험을 실시하였다.

진공식 합착에서 일차적인 관심사는 감압특성,

즉 패널내의 압력을 원하는 수준까지 내리는데 얼마나 시간이 소요되는가 하는 것이다. 이를 평가하기 위하여 간이모델을 이용하여 시간에 따른 패널 내부의 평균압력의 변화를 계산하여 Fig. 5에 도시하였다. 비교기준을 제공하기 위하여 액정주입구에서의 진공배압의 변화 $P_b(t)$ 를 같이 표시하였고 압력은 다음과 같이 무차원화하였다.

$$P^* = (P - P_{vac}) / (P_{atm} - P_{vac}). \quad (27)$$

Fig. 5에서 액정주입구의 크기와 감압시상수가 압력변화에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 일반적으로 예측할 수 있는 것처럼 액정주입구의 크기가 클수록 진공배압의 감압시상수가 작을수록 패널내 평균압력은 빨리 감소하고 있다.

감압시간에 대한 보다 객관적이고 정량적인 평가를 하기 위하여 패널내부의 압력이 최종목표 압력의 95%에 도달하는 시간을 $\Gamma(0.95)$ 로 정의하고 수치계산을 통해 얻은 결과를 Fig. 6에 정리하였다. 이 연구에서 고려한 $d=5-20$ mm 범위에서는 액정주입구 크기가 감압시간에 미치는 영향이 크지 않고 감압 시상수 γ 의 영향이 지배적임을 알 수 있다. γ 가 커지면 감압시간이 크게 증가함을 볼 수 있다. 그러나 감압특성은 진공배압의 거동에 크게 의존하기 때문에 이를 고려하면 평가는 달라질 수 있다. 예를 들면 $\gamma=0.1$ 은 0.3초만에 진공배압이 목표치의 95%까지 떨어지는 경우이다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 진공배압이 합착시작과 동시에 거의 순간적으로 떨어지므로 $\Gamma(0.95)$ 는 패널내부의 순수한 압력응답시간을 거의 그대로 대표한다. 그러나 감압 시상수가 커지면 사정이 달라지는데 감압시간이 길어지

는 것은 응답시간이 늘어나서가 아니라 감압을 구동하는 진공배압이 천천히 떨어지기 때문이다. 실제로 감압 시상수가 커지면 패널내부 압력과 진공배압이 목표압력에 도달하는 시간의 차, 즉 응답 지연이 오히려 줄고 있다. 이 경우, 패널내부 압력변화는 외부에서 걸어주는 진공배압과 거의 같은 속도로 변화하다고 볼 수 있다.

감압시간과 함께 고려해야 할 중요한 인자는 패널내부의 압력분포이다. 일정한 두께의 패널을 얻기 위해서는 최대한 균일한 분포하중을 보장하여야 한다. 이 문제에서는 패널 내부의 최소압력이 진공배압과 같다는 점을 감안하면 Fig. 5로부터 패널내부의 압력차의 정도를 유추할 수 있다. Fig. 7는 감압과정중 패널내부의 압력분포를 그린 것이다. 출구 부분의 급격한 압력구배를 확인할 수 있으며 패널 상하방향으로 무시할 수 없는 하중불균형이 존재함을 보여주고 있다.

합착과정에서의 하중불균형을 나타내는 값대로 패널내부의 최대 압력편차를 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta\Phi_{\max} = \max[P_{\max}^* - P_{\min}^*, t < \Gamma(0.95)] \quad (28)$$

Fig. 8은 액정주입구의 크기와 감압시상수가 패널내의 압력차에 미치는 영향을 종합적으로 보여주고 있다. 압력편차를 결정하는 지배적인 인자 또한 감압시상수 즉 공정시간임을 알 수 있다. 감압시상수가 커지면 압력편차는 반비례하여 감소하는데 이는 패널내부의 압력이 진공배압에 충분히 적용할 시간적 여유가 있기 때문이다.

이상의 논의를 정리하면 다음과 같다. 패널내부의 감압특성을 결정하는 일차적인 인자는 공정시간(감압시상수)이며 이 연구에서 시험한 영역 범위에서는 액정주입구의 크기가 미치는 영향은 부차적이다. 생산성 향상을 위해서는 감압시간을 줄여야 하지만 이 경우 패널내부의 압력차가 커지는 부작용이 발생한다. 생산성과 제품품질 두 가지 조건을 만족시키기 위해서는 허용가능한 압력편차 기준을 확보하고 이를 만족하는 최적의 공정시간을 찾는 것이 필요하다.

4. 맺음말

이 논문에서는 LCD 제조공정중 진공식 합착 과정을 모사할 수 있는 간이 유동모형과 수치계

산 모델을 제안하고 단순예제를 통하여 물리적 타당성과 신뢰성을 검토하였다. 제안된 모델을 활용하여 단일 LCD 기판 합착과정에 대한 수치 실험을 수행하고 액정주입구 길이와 공정시간이 패널내부의 압력응답에 미치는 영향을 분석하였다. 패널내부 압력응답속도와 압력불균형은 진공화 공정시간을 대표하는 감압시상수에 지배적인 영향을 받으며 패널주입구의 크기변화에는 민감하지 않음을 확인하였다.

이 연구는 LCD 유리원판 진공식 합착공정에서 수치모델을 이용한 공정분석의 가능성과 유용성을 확인하는 초기 단계의 연구이다. 실제 합착공정에 대한 완결적인 해석을 위해서는 원판 표면의 불규칙한 구조물의 영향(조도 효과)의 고려, 수치방법론의 정량적 정확도 개선, 여러 면이 인쇄된 유리원판의 합착공정 분석과 같이 물리적 모형과 수치모델에 대한 지속적인 개선 노력이 요구된다.

후기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] <http://www.lgphilips-lcd.com:8888/English/tech/t.html>
- [2] Hele-Shaw, H. S., "Investigation of the nature of surface resistance of water and of stream motion under certain experimental conditions," *Trans. Inst. Nav. Arch.* XI, 25 (1898).
- [3] Schlitiching, H., *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, Korea (1986), pp.123-125.
- [4] White, F. M., *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York (1974), p. 113-115.
- [5] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill (1995).
- [6] G. M. Karniadakis and A. Beskok, *Micro Flows*, Springer-Verlag, New York (2002).
- [7] N.-T. Nguyen and S. T. Wereley, *Fundamentals and Applications of Microfluidics*, Artech House, Boston (2002).