

# 피스톤 스커트의 코팅두께 예측에 관한 연구

전 상 명\*

호서대학교 자동차공학과

## A Study on the Coating Thickness Prediction of a Piston Skirt

Sang Myung Chun\*

Department of Automotive Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

(Received 1 May 2010 / Accepted 10 September 2010)

**Abstract** : The purpose of this study is to find how to be formed the wet film thickness during the low friction coating process for a piston skirt with application to the theory of screen printing. In other words, the general expressions predicting the pressure under a blade and the volume of coating fluid passing through the blade edge are derived. Using these expressions, the coating thickness on a piston skirt during a sample blade coating process can be quantitatively assessed.

**Key words** : Low friction coating(저 마찰 코팅), Screen printing(스크린 프린팅), Coating blade(코팅 브레이드), Wet film thickness(습막두께), Darcy's law(다시법칙), In-plane permeability(평면 내측 침투성)

### 1. 서 론

브레이드 코팅은 테이프 캐스팅, 나이프 코팅 혹은 브레이드 캐스팅 등으로도 불린다. 브레이드 코팅의 친근한 적용 중의 하나는 각종 금속표면에 저 마찰 코팅막을 형성하는 공정이다. 이러한 브레이드 코팅의 목적은 주로 평평한 표면위에 얇고 연속적이며 균일한 액체 막을 생성하는 것이다. 이 유막은 건조되어 고체 코팅을 형성한다.

피스톤 스커트의 저 마찰재 브레이드 코팅과정은 우선 유체역학 관점에서 모델링<sup>1-5)</sup>이 이루어지며, 코팅 브레이드 하부에 고인 코팅액 두께는 브레이드 코팅 시스템의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 본 코팅과정으로부터 형성되는 압력분포는 이동관속도, 브레이드 경사각, 브레이드 끝단과 스크린사이의 틈새, 점도 및 Darcy상수(침투성)에 의존한다. 또한 스크린 프린팅 운전 시 프린팅 스크린 내의 평

면 내측 침투성(in-plane permeability)의 영향을 조사하기 위해 일반적인 스크린 프린팅의 모델이 전개된다. 이 모델은 프린팅 스크린을 Darcy's 법칙<sup>2-5)</sup>을 만족하는 2차원 다공성 매질로서 취급한다. 스크린 프린팅 시스템의 해석은 Morgan-Cameron 근사법<sup>6)</sup>으로 알려진 다공성 베어링의 이론을 배경으로 한 윤회이론 가정 하에서 이루어진다. 여기서 스크린 내측으로의 코팅액 흐름은 고무롤러 끝단을 지나는 코팅액의 전체 체적의 대부분을 차지한다고 본다. 따라서 사용된 브레이드 코터에 대해 유도된 유막 두께는 스크린 프린팅 중에 침전될 수 있는 코팅액 양의 상한치에 놓인다고 본다.

브레이드 경사면 아래의 압력과 브레이드 경사면 끝단을 지나는 코팅액의 체적유량에 대한 일반적인 표현식을 가지고, 특정 스크린 프린팅 시스템의 코팅두께를 정량적으로 평가한다.

한편, 브레이드 코터와 스크린 사이의 경계조건은 브레이드 코터의 표면은 코팅액이 스며들지 않

\*Corresponding author, E-mail: sangmchun@hanmail.net

기 때문에, 그 표면에서 수직방향 no-slip 경계조건이 사용될 수 있다. 그러나 스크린은 코팅액이 스며들므로, 그 표면에 no-slip 경계조건을 사용할 수 없다. 따라서 단순 흐름 연속성을 만족하기 위해서는 스크린 표면에서의 코팅액 속도는 스크린 내로 여과되는 평균 흐름과 같아야만 한다. 단지 미약하게 스며드는 스크린에 대해서는 이 차이는 무시할 수 있을 정도로 적어질 수 있다.<sup>7,8)</sup> 그러나 브레이드 코팅에 적용되는 프린팅 스크린 경우 코팅액-스크린 경계에서의 코팅액의 접선방향 속도에 대한 불연속성을 피하기 위해 Saffman<sup>9)</sup>과 Beavers & Joseph<sup>10)</sup>에 의하여 제안된 경계조건이 사용된다.

결론적으로 프린팅 스크린은 Darcy's 법칙을 만족하는 2차원 다공성 매질로서 취급하며, 스크린 프린팅 시스템의 해석은 Morgan-Cameron 근사법으로 알려진 다공성 베어링의 이론을 배경으로 한 유효 이론 가정 하에서 이루어진다. 이렇게 유도된 방정식은 Saffman의 경계조건을 적용하여 유한차분법을 사용하여 프로그램이 코딩 된다.

한편, 피스톤 스커트의 코팅은 특히 초기 길들이기 동안 피스톤 스커트와 실린더 보아 사이의 마찰 및 마모를 줄이기 위해 중요한 유효 역할을 합니다. 그런데 코팅두께가 너무 두꺼우면 초기 조립 문제가 발생하고, 심하게 두꺼울 시 피스톤 고착(sticking) 현상이 생기며, 또한 필요이상의 두께로 인한 코팅액의 손실도 발생합니다. 이러한 문제를 극복하기 위해 정해진 코팅 두께를 맞출 수 있는 공정의 설정이 필요하며, 여러 번의 시행착오에 의해 공정을 설정할 수도 있으나, 신속하게 적절한 코팅 공정 설정을 설치하기 위한 방법을 찾기 위하여 본 연구를 수행하고자 한다.

따라서 본 논문에서는 브레이드 경사면 아래의 압력과 브레이드 끝단을 지나는 잉크의 체적에 대한 일반적인 표현식을 가지고, 피스톤 스커트의 저 마찰 코팅제를 코팅하는 공정인 스크린 프린팅 시스템에 관계된 특정 제원에 대한 프린팅 액의 습막 두께를 예측하고, 코팅두께 관리치와 비교하여 코딩된 컴퓨터 프로그램의 신뢰도를 판별하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 브레이드 코팅 시스템

본 연구에서는 Photo. 1에서와 같은 스크린 프린팅 기술을 적용한 피스톤 스커트의 저 마찰제 코팅 과정에 대한 연구를 수치적으로 해석하고자 한다.

본 연구에서 고려한 브레이드 코팅 시스템은 Photo. 1에서 보는 바와 같으며, 상하방향으로는 움직이나 좌우방향으로 고정된 두 개의 브레이드의 아래쪽에 스크린이 부착된 평판이 좌우로 이동한다. 우측 브레이드가 위로 올라간 상태에서 좌측 브레이드가 아래로 내려오고 평판이 좌측으로 움직일 때, 평판 표면위에 연속적이며 균일한 액체 막을 생성한다.

그 후 좌측 브레이드가 위로 올라가고 우측 브레이드가 내려오면 평판이 우측으로 이동할 때, 우측 브레이드의 하부에 형성된 끝 날 같은 경사면 끝단이 두꺼운 막을 걷어 내면서 두 군데의 스크린 망사 속으로 일정한 양의 코팅액을 스며들게 한다. 이 과정에서 경사면 끝단에 의해서 펼쳐진 균일한 코팅액체막에 접근할 때, 급작스러운 압력 증가가 액체 내에 일어난다. 코팅을 형성하기 위해 요구되는 코팅액화성분의 초과량은 발생된 압력 구배에 의해 경사면 끝단 영역으로부터 이탈된다. 이 초과 유체



(a) Vertically moving blade (upper side)



(b) Piston and rotating jig for fixing a piston (lower side)

Photo. 1 Blade coating system for piston skirts

는 코팅 브레이드의 앞쪽과 옆면에서 축적되어 액체 더미를 형성한다. 이 초과 액체 더미의 일부는 다음 공정에서 다시 평판위로 펼쳐진다.

한편 평판에 부착된 스크린 아래서 평판이 우측으로 이동시, 피스톤 고정지그에 고정된 피스톤이 같은 속도로 함께 회전하여 두 군데의 스킵트 면 위에 최종 습막이 형성되며 곧 말라서 고체코팅을 형성한다.

## 2.2 스크린프린팅 기술을 적용한 브레이드 코팅 이론

앞에서 설명한 브레이드 코팅 시스템 내의 스크린 프린팅 의해 피스톤 스킵트에 코팅이 시작되는 순간의 단면도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 스크린 프린팅 과정은 다음과 같다. 이동평판이 움직일 때 경사면 아래의 코팅유체가 압력을 받아 브레이드 하부의 틈새,  $h_0$ 를 지나 두께,  $H$ 의 스크린을 통과한 후 스크린 아래의 하부층(substrate)인 회전하는 피스톤 스킵트와 선접촉하며 코팅된다.

Fig. 1에서  $L$ 은 브레이드의 수평 길이이며,  $O$ 로서 표시된 점이 해석을 위한 좌표의 원점(기준점)이다.

프린팅 되는 코팅액은 점도  $\mu$ 인 뉴턴 액체이라고 가정하며, 율활이론<sup>11)</sup>이 우측 브레이드 경사면 아래에서의 잉크의 운동을 기술하기 위해 사용된다. 브레이드 끝단 폭방향 선상을 따라서는 평판하여 압력 구배가 없으며, 율활이론 가정 하에서 수직방향으로는 코팅액 내의 압력변화는 무시된다. 이러한 상태 하에서는 이동평판 운동방향으로의 압력 구배와 코팅액 내의 접선방향 전단응력의 수직방향 미

분성분 사이에 균형이 성립된다. 전단응력이 코팅액체 속도의  $x$  방향 성분,  $u=u(x,y)$ 로 표현될 때, 이 운동량 평형은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

여기서  $P=P(x)$ 는 코팅액 내의 압력이다.

브레이드 경사면 아래에서 코팅액 내부의 응력은 스크린 경계에서 사라지는 것이 아니라 스크린 몸체 안으로 전달된다. 이러한 응력의 압력 성분은 잉크의 평균 필터링 흐름을 스크린의 수평면 안으로 나타나도록 한다.

프린팅 스크린은 홀섬유직물(monofilament fabrics) 구조의 예이다. 이러한 재료는 Darcy의 법칙<sup>12)</sup>을 따르는 선형 다공성 매개물로서 평면 내측방향(in-plane) 압력 구배에 대해 반응하는 것으로 알려져 있다. 압착(squeegee) 운동 방향으로 향한 주축 중 하나에 대해 등방성 프린팅 스크린 혹은 비등방성 프린팅 스크린에 대하여,<sup>13)</sup> 스크린 평면 내측으로 존재하는 잉크 속도의  $x$ -성분인  $u'=u'(x,y)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$u' = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P'}{\partial x} \quad (2)$$

여기서  $P'=P'(x,y)$ 는 스크린 내의 압력이고,  $k_x$ 는 Darcy의 상수(permeability: 침투성, 면적단위)이다.

율활이론 가정 하에서 브레이드 경사면 아래 코팅액 내의 압력은  $x$ 좌표만의 함수이고, 방정식 (1)은 쉽게 적분된다. 그러나 적분 범위를 정하기 위하여 두 개의 경계조건이 요구된다. 브레이드는 코팅액 스며들지 않기 때문에, 그 표면에서 수직인 방향으로는 no-slip 경계조건이 사용될 수 있다. 그러나 스크린은 코팅액이 스며들므로, 그 표면에 no-slip 경계조건을 사용할 수 없다.

따라서 단순흐름 연속성을 만족하기 위해서는 스크린 표면에서의 코팅액 속도는 스크린 내로 여과되는 평균 흐름과 같아야만 한다. 즉 브레이드 코팅에 적용되는 프린팅 스크린 경우 코팅액-스크린 경계에서의 코팅액의 접선방향 속도에 대한 불연속성을 피하기 위해 Saffman<sup>9)</sup>과 Beavers & Joseph<sup>10)</sup>에 의하여 제안된 다음과 같은 경계조건이 사용된다.

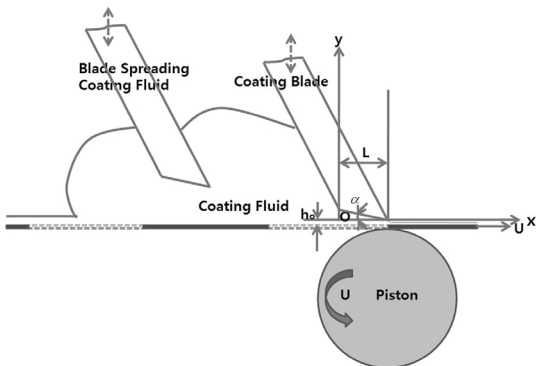


Fig. 1 Cross section of a screen printing equipped with blades coating piston skirts

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\alpha_x}{\sqrt{k_x}} (u - U) \Big|_{y=0} \quad (3)$$

여기서  $\alpha_x$ 는 무차원 상수로서 미끄럼 계수(slip coefficient)라 부르고,  $U$ 는 이동평판의 속도이다. 본질적으로 이 경계조건은 코팅액-스크린 경계에서 발생된 전단응력은  $\sqrt{k_x}/\alpha_x$  차원의 두께를 갖는 코팅액의 얇은 층을 천천히 움직이게 한다.  $\sqrt{k_x}/\alpha_x$ 이 0으로 접근할 때, 이 층은 사라지고, no-slip 조건,  $u(x, y=0) = U$ 이 회복된다.

No-slip 경계조건이 브레이드 경사면에 적용되고, Beavers & Joseph과 Staffman 경계조건이 스크린 표면에 사용될 때, 브레이드 경사면 아래에서의 x방향 성분의 속도는 다음과 같다.

$$u(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left[ y^2 - \frac{1+sy}{1+sh} h^2 \right] \frac{\partial P}{\partial x} + \left[ \frac{s(h-y)}{1+sh} \right] U \quad (4)$$

여기서  $s = \alpha_x / \sqrt{k_x}$ 이며,  $h=h(x)$ 는 스크린 표면으로부터 브레이드 경사면까지 측정되는 경사면 형상이다. 스크린과 접촉하고 있는 끝과 같은 형태의 브레이드 경사면 대해서  $h(x) = (L - x) \tan(\alpha)$ 로 주어진다(Fig. 1). 여기서  $\alpha$ 는 브레이드의 경사각이다.

브레이드 경사면 아래의 흐름은 흐름의 연속성에 의하여 스크린 내의 흐름과 조화되어 연결된다. 브레이드 경사면 아래의 코팅액 내에서는, 흐름의 연속성은 연속방정식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

여기서  $v(x, y)$ 는 코팅액 속도의 수직방향 성분이다. 만약 방정식 (5)를  $\partial v/\partial y$ 에 대해 풀 다음, 스크린 표면과 브레이드 경사면 사이의 틈새를 가로질러 적분하면, 스크린의 표면에서의 코팅액의 수직 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$v(x, y=0) = \frac{\partial Q_x}{\partial x} \quad (6)$$

여기서  $Q_x(x)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$Q_x(x) = -\frac{h^3}{12\mu} \left[ \frac{4+sh}{1+sh} \right] \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \frac{sh^2}{1+sh} \right] U \quad (7)$$

이것은 단지 브레이드 경사면 아래에서 단위 폭당 코팅액의 흐름이다. 방정식 (6)은 다음과 같이 쓰여 질 수 있다.

$$v(x, y=0) = -\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{h^3}{12\mu} \left[ \frac{4+sh}{1+sh} \right] \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{2} \left[ \frac{sh^2}{1+sh} \right] U \right\} \quad (8)$$

프린팅 스크린 내에서는, 흐름 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

여기서  $v'(x, y)$ 는 스크린 내에서 코팅액 속도의 수직 성분이다. 만약 방정식 (2)를 방정식 (9)와 합하면 프린팅 스크린 내측으로의 흐름 연속방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial^2 P'}{\partial x^2} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

프린팅 스크린은 많은 구멍이 나 있고 너무 얇아서 그 두께 방향으로의 어떤 큰 압력 저하도 받아 들일 수 있다. 스크린 압력 내의 가장 심한 변화는 단연 스크린의 위쪽 평면에서 일어난다. 이러한 현상은 스크린 안으로의 압력은 유사 일 차원 함수라는 것을 의미한다. 압력은 코팅액-스크린 경계를 가로질러 연속적이기 때문에 스크린 내의 압력은 브레이드 경사면 아래에서의 압력과 거의 같아야만 한다. 이와 같이 스크린 내에서는  $P'(x, y) \approx P(x)$ 이고 방정식 (10)은 다음과 같이 된다.

$$-\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

만약 방정식 (11)이 스크린 두께를 가로질러 적분된다면, 스크린 표면에서 코팅액 속도의 수직방향 성분이 얻어질 수 있다. 코팅액-스크린 접촉면에서 이 속도 성분은 다음과 같다.

$$v'(x, y=0) = v(x, y=0) \approx \frac{k_x H}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (12)$$

이것은 스크린 아래층인 피스톤 스킵트에서  $v'(x, y = -H) = 0$ 이며, 코팅액의 수직방향 속도는 코팅액-스크린 경계에서 연속이기 때문이다.

방정식 (12)는 윤활 이론에서 Morgan-Cameron 근사값<sup>6)</sup>으로 알려져 있고 정밀한 방법에 의해서 유도될 수 있다. 그러나 여기서 제시된 위의 유도방법은 스크린 안쪽으로의 코팅액 흐름의 주된 면을 강조했다. 평면 안쪽방향으로 존재하는 압력 구배의 작용에 의해 흘러나가는 잉크를 대체하기 위하여 스크린의 주어진 영역 내로 충분한 코팅액 흐름이 들어온다고 본다. 만약 프린팅 스크린이 평면 안으로 침투하는 성질을 갖지 않는다면, 스크린 내측으로 잉크의 수직방향 흐름은 0이며, 이동될 수 있는 잉크의 체적은 간단히 스크린 안으로 고이는 양에 브레이드 경사면 끝단의 틈새를 통해 새어나가는 부분을 더한 것이다.<sup>14)</sup> 평면 안쪽방향 침투성이 포함될 때는, 고무 롤러 끝단을 지나는 순 흐름은 스크린을 통하여 걸러지는  $-(k_x H / \mu) \partial P / \partial x|_{x=L}$  양 만큼 증가된다. 만약 A가 프린팅 스크린의 다공성(porosity) 면적을 나타낸다면, 브레이드 경사면 끝단을 지나 는 단위 폭 당 전체 흐름 Q는 다음과 같다.

$$Q = AHU + \left[ -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right]_{x=L} H + Q_x(x)|_{x=L} \quad (13)$$

방정식 (13)의 첫째 항은 스크린 프린팅 운전에서 브레이드 경사면 끝단을 지나 는 체적 흐름을 평가하기 위해 오랫동안 사용되어 왔다.<sup>1,10,15,16)</sup> 방정식 (13)의 다른 항들은 스크린 프린팅 과정의 동적인 운동을 고려한 추가적인 항이다. 두 항들 모두 양의 값이다. 이는, 만약 모든 흐름이 스크린 하층부에 전달된다고 한다면, 프린팅 스크린의 다공성만을 고려하여 평가된 흐름(AHU)은 언제나 최종 인쇄된 코팅액 두께를 다소 적게 평가하게 된다. 만약 이와 같이 전체 잉크가 전달된다면, 프린팅 코팅액 두께는  $\delta = Q/U$  일 것이다.

브레이드 경사면 끝단을 지나 는 전체 잉크 흐름을 결정하기 위하여, 브레이드 경사면 끝단에서의 압력 구배가 요구된다. 만약 방정식 (8)과 (12)가 합쳐진다면, 브레이드 경사면 아래에서의 압력은 다

음의 미분 방정식을 만족하게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[ \frac{k_x H}{\mu} + \frac{h^3}{12\mu} \frac{4+sh}{1+sh} \right] \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{2} \left[ \frac{sh^2}{1+sh} \right] U \right\} = 0 \quad (14)$$

방정식 (14)로부터 브레이드 경사면 아래의 압력 분포를 구할 수 있으며, 본 연구에서는 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Analysis) 방법을 이용한 유한차분법을 사용하여 구하였다.

한편 1차원 2계 미분방정식 (14)는 해석적으로도 다룰 수 있으며, 방정식 (14)는 한번 적분되면 다음을 얻는다.

$$\left[ \frac{k_x H}{\mu} + \frac{h^3}{12\mu} \frac{4+sh}{1+sh} \right] \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{2} \left[ \frac{sh^2}{1+sh} \right] U = -Q_o \quad (15)$$

여기서  $-Q_o$ 는 적분 상수이다. 만약 방정식 (15)가  $\partial P / \partial x$ 에 대해 풀고  $\partial P / \partial x$ 가 원점으로부터  $x < L$ 인 임의의점까지 적분된다면, 브레이드 경사면 아래의 압력은 다음과 같다.

$$P(x) = \int_0^x \frac{\frac{sh^2 U}{2(1+sh)} - Q_o}{\frac{k_x H}{\mu} + \frac{h^3}{12\mu} \frac{(4+sh)}{(1+sh)}} dx + P_w \quad (16)$$

여기서  $x=0$ 에서,  $P(0) = P_w$ 이며, 이는 코팅액의 표면장력 등을 극복하기 위한 습저항 압력이다.

적분 상수  $Q_o$ 를 결정하고 방정식 (14)에 대한 적분을 완성하기 위하여, 브레이드 경사면 끝단에서 압력이 0이라는 조건을 사용한다. 방정식 (16)에서  $x=L$ 로 놓고,  $Q_o$ 를 풀면, 다음의 식이 얻어진다.

$$Q_o = \frac{P_w + \frac{U}{2} \int_0^L \frac{\frac{sh^2}{(1+sh)}}{\frac{k_x H}{\mu} + \frac{h^3}{12\mu} \frac{(4+sh)}{(1+sh)}} dx}{\int_0^L \frac{1}{\frac{k_x H}{\mu} + \frac{h^3}{12\mu} \frac{(4+sh)}{(1+sh)}} dx} \quad (17)$$

일반적인 Simpsons 적분법칙을 적용하여 계산된  $Q_o$ 를 갖고, 방정식 (15)는 브레이드 경사면 끝단에서 압력 구배  $\partial P / \partial x$ 를 얻기 위하여 사용되고, 방정

식 (13)과 (7)은 Q의 값을 계산하기 위하여 사용된다. 즉 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$Q = AHU + Q_o \quad (18)$$

이와 같이,  $Q_o$ 는 브레이드 경사면 끝단 아래로 스며드는 모든 흐름의 합이며, 스크린을 통하여 스며 나오는 걸러진 성분이다.

따라서 프린팅 코팅액 두께는  $\delta = Q/U$  일 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 샘플 피스톤 코팅두께 계산 결과

본 연구에서 사용한 샘플 브레이드 코팅 시스템에 대한 제원은 Table 1에 도시되었다.

본 제원을 입력하여 구한 압력분포가 Fig. 2에 도시되었다. 여기서는 브레이드 경사면의 끝단 근처에 대하여만 도시하였다. 이는 유한차분법으로 방정식 (14)를 풀기 위하여 적용한 격자크기를 결정하기 위한 것으로, 계산값의 오차를 최소화하기 위한 적절한 격자의 크기로 x-방향 격자수가 500일 때를 선정하였고, 이는 Fig. 2를 보면 알 수 있다. 즉 격자수가 100인 경우를 제외하고 300부터는 그래프가 겹쳐서 나타나기 시작했으며, 500부터 안정화되었다고 보았다.

계산결과 브레이드 경사면의 끝단으로 흐르는 코팅액의 단위 폭 당 유량과 피스톤 스커트에 코팅된 액화 코팅액의 두께는 Fig. 3에 도시되었다. 격자수

Table 1 Sample specification of a blade coating system for piston skirt

Items	Specification
Blade slope angle	10 (degree)
Blade horizontal length	0.01 (m)
Clearance between screen & blade tip	$10 \times 10^{-6}$ (m)
Coating blade speed	0.28 (m/sec)
Screen thickness	$117 \times 10^{-6}$ (m)
Porous screen length	0.082 (m)
Porosity area of printing screen	$1617.448 \times 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> )
Dynamic viscosity of coating fluid	3.57 (Pa.s)
Darcy constant (Permeability constant)	$2.25 \times 10^{-11}$ (m <sup>2</sup> )
Wet resistance pressure (Pressure overcoming surface tension)	13114.754 (Pa)
Slip coefficient	0.9

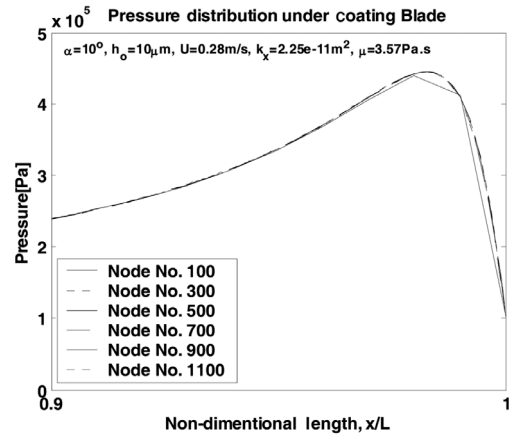


Fig. 2 Pressure distribution under a sample coating blade

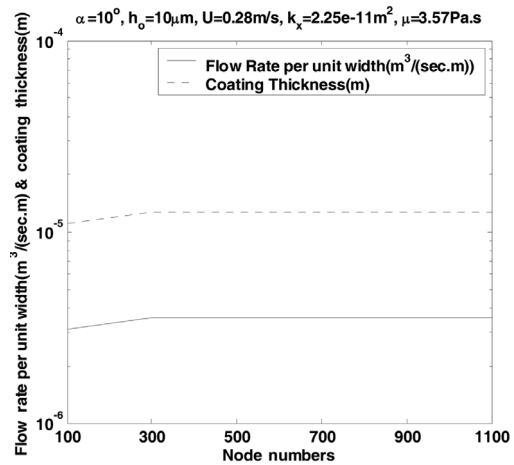


Fig. 3 The flow rate per unit width at blade tip and the coating thickness on piston skirt

가 500일 때 브레이드 경사면의 끝단으로 흐르는 코팅액의 단위 폭 당 유량은  $0.355 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{sec.m})$ 으로 수렴하였고, 피스톤 스커트에 코팅된 액화 코팅액의 두께는  $0.127 \times 10^{-4} \text{ m}$  ( $12.7 \mu\text{m}$ )로 수렴하였다. 실제 관리하는 코팅두께가 10~15  $\mu\text{m}$ 인 점을 고려하면 계산결과가 만족스럽다고 볼 수 있다. 이 코팅두께는 브레이드 끝단과 스크린 사이의 틈새의 크기 따라 당연히 나오는 것 같지만, 이동면의 속도가 어느 한도를 넘어서야지만 틈새와 유사한 값이 나타난다.

#### 3.2 주요 매개변수에 따른 코팅두께 계산 결과 예

코팅 두께에 큰 영향을 주는 요소인 브레이드 경

사면과 스크린 사이의 틈새 크기가 변할 때, 이동면의 속도에 따른 압력변화와 단위 폭 당 유량 변화와 코팅두께의 변화에 대한 조사는 Fig. 4~6에 도시하였다. 틈새가 증가할수록 코팅 액체 내의 압력은 전반적으로 감소하였으나 유량은 증가하였으며, 이동면의 속도가 증가할수록 유량이 증가하였다. 또한 이동면의 속도가 클수록 코팅 두께가 감소하였으나 0.5m/s 이상에서는 코팅 두께의 변화가 미비하였으며, 틈새가 증가함에 따라 코팅 두께의 증가는 매우 크게 나타났다.

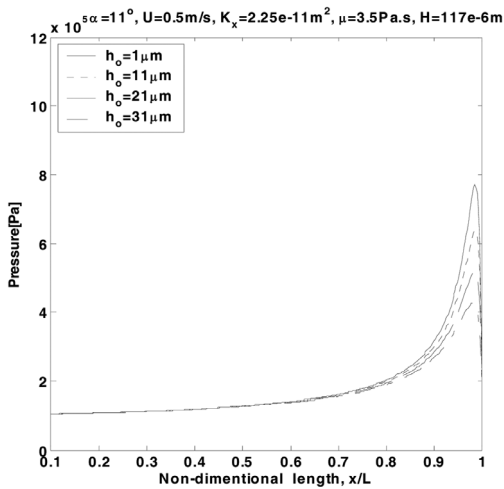


Fig. 4 The comparison of pressure distributions at various clearances between coating blade and printing screen

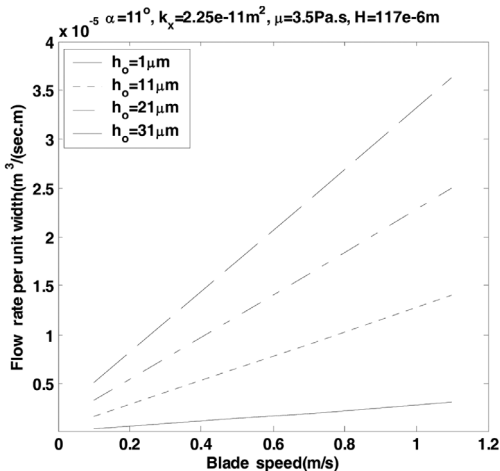


Fig. 5 The comparison of flow rate distributions at various clearances between coating blade and printing screen

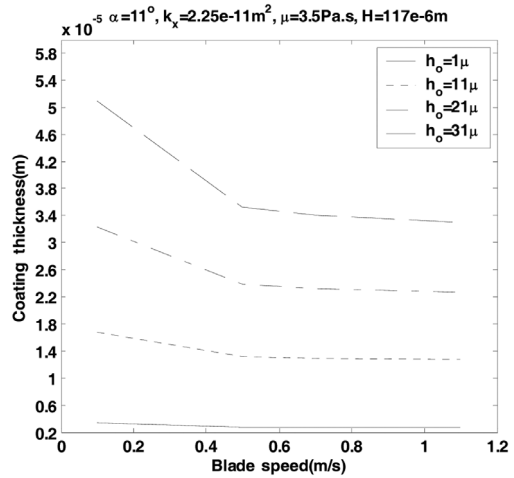


Fig. 6 The comparison of coating thickness distributions at various clearances between coating blade and printing screen

#### 4. 결론

- 1) 본 연구 결과 샘플 피스톤 스크트 브레이드 코팅 시스템에 대한 코팅 두께 예측은 실제 코팅 관리 범위 내에 있었다. 따라서 개발된 본 컴퓨터 프로그램의 신뢰도는 만족할 만하다고 본다.
- 2) 이동면의 속도가 클수록 코팅 두께가 감소하였으나 0.5m/s 이상에서는 코팅 두께의 변화가 미비하였으며, 브레이드 경사면과 스크린 사이의 틈새가 증가함에 따라 코팅 두께의 증가는 매우 크게 나타났다.
- 3) 본 연구결과 코팅두께에 영향을 주는 제어인자들은 이동판 속도, 브레이드 경사각, 브레이드 끝단과 스크린사이의 틈새, 점도 및 Darcy상수(침투성)등이나 특히 브레이드 끝단과 스크린사이의 틈새와 이동판 속도에 따라 크게 좌우된다.

#### References

- 1) B. Huner, "Simplified Analysis of Blade Coating with Applications to the Theory of Screen Printing," The Int. J. for Hybrid Microelectronics, Vol.12, No.2, pp.88-94, 1989.
- 2) B. Huner, "Effects of In-Plane Permeability in Printing Screens," The Int. J. for Hybrid Microelectronics, Vol.13, No.2, pp.35-40, 1990.

- 3) M. M. H. Megat Ahmad, D. T. Gethin, T. C. Claypole and B. J. Roylance, "Numerical and Experimental Investigation into Porous Squeeze Films," *Tribology International*, Vol.31, No.4, pp.189-199, 1998.
- 4) V. K. Puri and C. M. Patel, "Analysis of a Porous Composit Slider Bearing," *Wear*, Vol.78, No.3, p.337, 1982.
- 5) U. Srinivasan, "The Analysis of a Double-Layered Porous Slider Bearing," *Wear*, Vol.42, p.205, 1977.
- 6) A. Cameron, V. T. Morgan and A. E. Stainsby, "Critical Conditions for Hydrodynamic Lubrication of Porous Metal Bearings," *Proc. Inst. Mech. Engrs. (London)*, Vol.176, No.28, p.761, 1962.
- 7) D. D. Joseph and L. N. Tao, "Lubrication of a Porous Bearing - Stokes Solution," *J. Appl. Mech.*, Vol.188, No.12, p.735, 1966.
- 8) C. C. Shir and D. D. Joseph, "Lubrication of a Porous Bearing - Reynolds Solution," *J. Appl. Mech.*, Vol.188, No.12, p.761, 1966.
- 9) P. G. Staffman, "On the Boundary Condition at the Surface of a Porous Medium," *Studies Appl. Maths.*, Vol.1, No.2, p.93, 1971.
- 10) G. S. Beavers and D. D. Joseph, "Boundary Conditions at a Naturally Permeable Wall," *J. Fluid Mech.*, Vol.30, No.1, p.197, 1967.
- 11) A. Cameron, *Basic Lubrication Theory*, 3rd Edn, Halstead Press, New York, 1981.
- 12) K. L. Adams and L. Rebenfield, "In-Plane Flow of Fluids in Fabrics: Structure/Flow Characterization," *Textile Res. J.*, Vol.57, No.11, p.647, 1987.
- 13) B. Huner, "A Note on the Analysis of Anisotropic Porous Bearings under the Morgan-Carmeron Approxiamtion," *Wear*, Vol.134, p.413, 1990.
- 14) C. S. Yih and S. J. McNamara, "An Initial Study of the Water Removal in the Plain Press Nip - Part I," *Tappi*, Vol.47, No.3, p.153, 1964.
- 15) F. Franconville, K. Kurzweil, and S. G. Stalnecker, "Screen: Essential Tool for Thick Film Printing," *Solid State Technology*, Vol.17, No.10, p.61, 1974.
- 16) S. G. Stalnecker, Jr. and R. A. Wyant, "New Stencil Screen Developments for Thick Film Printing," *Solid State Technology*, Vol.26, No.10, p.141, 1983.