

두 회전 롤러 사이의 유체 Splitting Point에 관한 연구

임규진[†], 신종순

[†]한국기계연구원, 중부대학교 공과대학 인쇄미디어과
(2005년 10월 10일 접수, 2005년 11월 4일 최종 수정본 접수)

The Splitting Point of Liquid Film between two Rotating Rollers

Kyu-Jin Lim[†], Joong-Soon Shin

[†] Dept. of Advanced Industrial Technology, Korea Institute of Machinery & Materials,
Dept. of Graphic Arts & Media, College of Engineering, Joong-bu University
(Received 10 October 2005, in final form 4 November 2005)

Abstract

The liquid film behavior between two rotating rollers has been analyzed for many years. Their contributions were, however, limited almost within the areas of polymer laminar flow in there. When the slip contact of two rotating rollers is used as a role of vehicle to distribute the liquid discharged on to each roller after splitting from the nip, there was few available relationship to control the roller speed and to design system.

On this work it was possible to get out a certain relationship between the discharged film thickness ratio and the roller surface speeds without any help of pressure limit at the splitting point.

The hydrodynamic analyzation of Newtonian liquid behavior around the point was well proved on some manipulative experiment. The thickness ratio increases along with the roll surface speed ratio increases. And the discharged volume flow rate ratio on each roller surface varies with square of the speed ratio. Both of these relationship have a decision factor also made up by the speed ratio.

1. 서 론

롤 코팅은 종이와 플라스틱 필름에 얇은 박막을 효율적으로 도포하고자 하는 공정에 많이 쓰인다. 특히 순방향 롤코팅(Forward Roll Coating) 방식은 각종 도포장치, 인쇄기계, 초지기 등에 일반적으로 적용되는 도포방식이지만 그동안 기어방식의 구동시스템으로 인한 제한 때문에 맞물린 두 롤러의 회전속도가 같아 다른 방식과 달리 metering 응용에 한계를 가지고 있었다. 그러나 최근 서머모터 등의 직접구동이 여유롭게 되어 이의 응용에 확대되고 있다.

Fig. 1과 같이 두 회전 원통사이에서 끼여 원통 Roller의 회전력으로 그 틈새를 흐르는 유체의 운동을 해석 하는 데는 그 영역을 흐름의 방향에 따라 bank region, laminar low region 그리고 splitting region 등의 3가지로 분류된다.

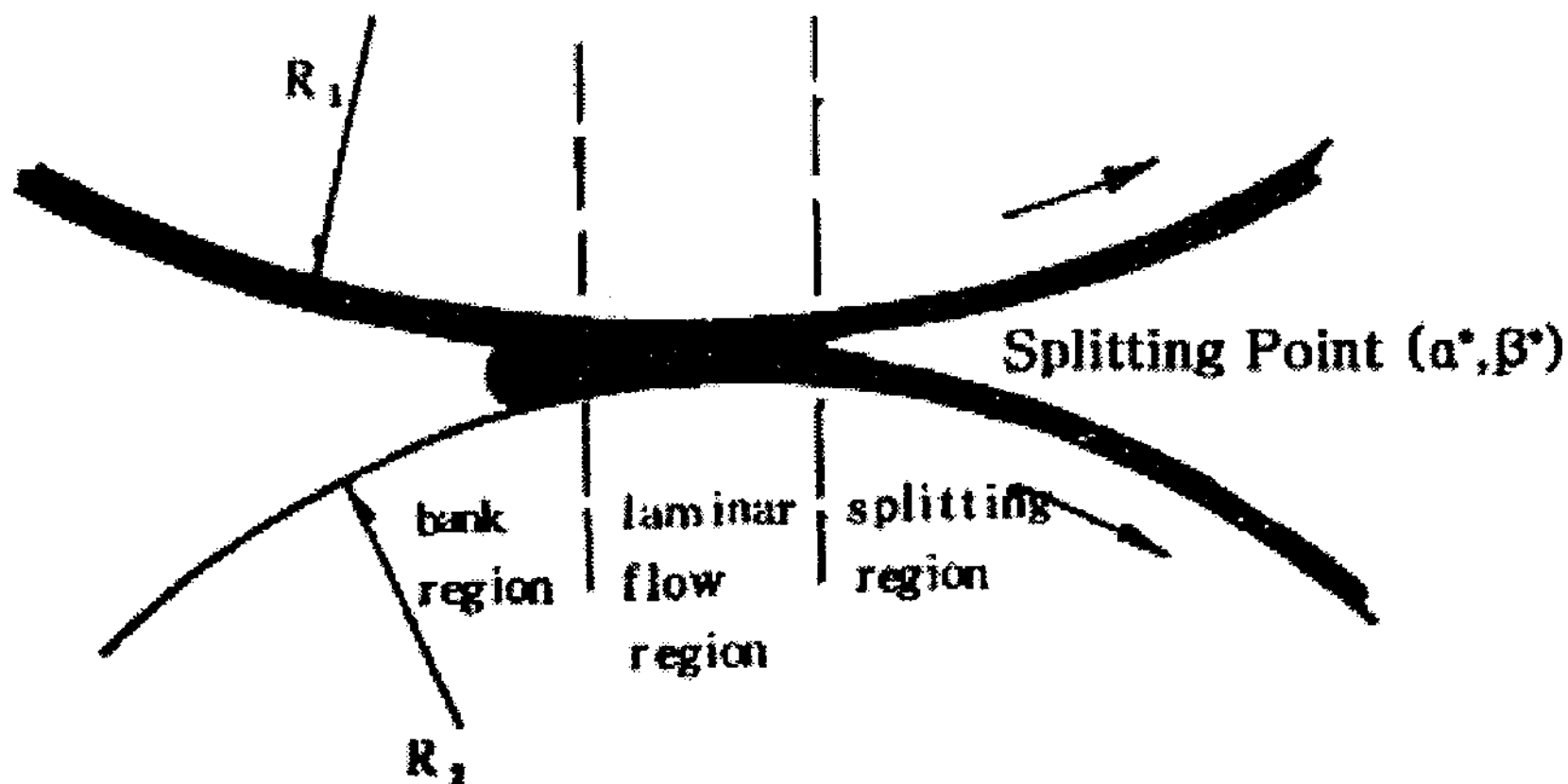


Fig. 1. Regions of the nip.

앞의 두 영역에 관하여는 Regnolds¹⁾ 이후 Gaskell²⁾, Bergen³⁾, Pearson, Chong, White, Alston⁴⁾, Takserman-Kroger⁵⁾, Kiparissides^{6,7)}, Tanner, Tadmor⁸⁾와 최근의 Coyle⁹⁾, Savage¹⁰⁾ 등등의 연구로 그 해석이 상당한 정도에 이르렀다.

그러나 마지막 영역 즉 Splitting region에 대하여는 유체 물성의 표면장력^{11,12)}, 응집력, elastic modulus¹³⁾ 및 혼입되는 기포¹¹⁾ 등에 의한 자유표면의 불안정성이 점도와 함께 ribbing 발생의 원인이 되어 최근까지 이 문제가 주요 관심사가 되고 있다^{14~16)}.

역사적으로 보면 1953년 Bank와 Mill¹⁷⁾에 의하여 이 영역의 유체 filaments를 처음 촬영 관찰하였고 Siodal¹³⁾ 역시 관찰을 통해 유체의 relaxation time이 이 영역의 현상과 관계있음을 제시하였다. 1961년 Mill¹⁸⁾, Pitts와 Greiller¹¹⁾ 등은 ribs의 형성이 표면장력과

관계됨을 시험하였고 1965년 Hintermeier와 White¹⁹⁾는 Splitting Point의 좌표를 처음으로 제시하였다.

본 연구는 Hintermeier^{19~21)} 등의 좌표가 한정된 조건에 국한한데 비하여 새로운 좌표계를 제시함으로써 Splitting region의 첫 경계인 이 좌표점은 laminar flow region의 유변학적 해석으로부터 구할 수 있음을 밝히고자 하였다.

2. 실험

2-1. 시료

시료로써 사용한 Newtonian 유체는 한국표준연구소에서 공급한 Silicon 오일 (미국 Cannon Instrument Co.제) 4종이다.

Table 1. Viscosities of Newtonian Liquid

Certified Viscosity Standard No	Viscosity(at 200C)(poise)
Cannon S 200	5.639
Cannon S 2000	85.940
Cannon S 8000	354.800
Cannon S 30000	710.900

2-2 실험장치

2-2. 실험장치

여러 가지 실험 장치가 제안될 수 있으나 α^* 및 β^* 의 좌표를 비교적 정확하게 측정할 수 있는 실험기구로써 Fig. 2와 같이 실험 장치를 제작하여 실험하였다.

R_1 , R_2 모두 SK 3-steel로서 표면을 super finishing하여 roughness guage로 $\pm 0.5\mu$ 의 평활도를 갖도록 하였으며, R_1 의 steel 용량 182cc, R_2 의 steel용량 1760cc로서 항온실에서 R_2 의 1회 주행으로 발생한 열량은 steel자체가 충분히 소거 되도록 함으로써 별도 항온장치를 부착할 필요가 없었다.

R_1 의 반지름은 50 mm, 42.5 mm의 두 종을 실험하였고, R_2 는 nip clearance 0.1mm 이 내에서 $3\pi/2 < \beta < \pi$ 범위를 오차한계 10^{-4} mm 까지 허용한 직선으로 볼 수 있는 반지름 200cm 의 plate roller로 대신하였다.

R_1 : Roller 1 R_2 : Roller 2

M_1 : Moter 1 M_2 : Moter 2

P.C : Photoelectric sensor unit S.C : Screw shaft

L : Carbon arc lamp L_1, L_2, L_3, L_4 : Lens

MS : Microscope,
 MM₁, MM₂ : Nip micrometers MM₃ : Exit distance micrometer
 P : Prism, V : View finder
 C : Camera, v₁, v₂ : Speed controlled

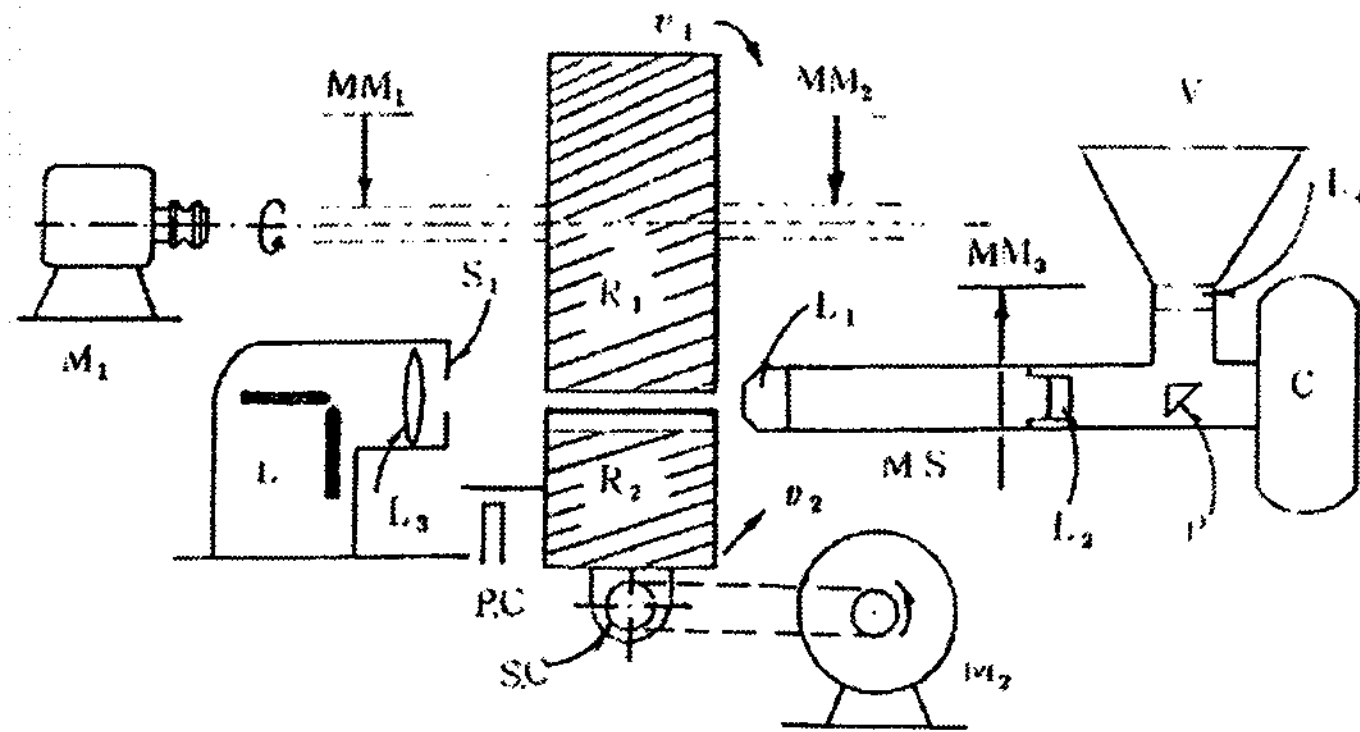


Fig. 2. Experimental equipment.

시료는 thickness guider를 사용 R₂ 위에 일정량씩 실려 놓음으로서 재현성이 가능하게 하였고, 각 roller상에 유출된 피막두께는 ink thickness guider 혹은 현미경을 통하여 ±0.2u오차 내에서 측정하였다. R₂가 plate인 관계로 전 영역에 걸쳐 nip clearance가 같도록 하기 위하여 현미경을 조정하고 이를 더욱 일정한 위치에서 광전 cell에 의한 자동 셔터로 촬영케 함으로서 오차를 최소화 시켰다. 따라서 splitting point의 쌍극자 좌표점 (α*,β*)를 현미경 촬영으로 얻어내고 film 두께를 측정할 수 있도록 하였다.

3-3. 실험방법

2-3. 실험방법

Nip clearance를 5u에서 100u까지 변화시키고 R₁, R₂ 및 v₁, v₂를 일정하게 하여 h₁/h₂ 및 α*의 위치를 확인 측정하는 방법과 nip clearance 및 R₁, R₂를 일정하게 하고 r=v₁ / v₂을 1에서 30까지 변화시켜 h₁/h₂ 및 α*의 위치를 확인 측정하는 방법 등 두 가지 실험을 시행하고 각각의 경우 시료를 모두 사용하여 점도와의 관계를 검토하였다.

각각의 현미경사진 결과는 Fig. 2와 같이 center point에 splitting point가 위치하도록 MM₃를 이동하여 얻은 x값과 ht에서 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$ht = H + \sqrt{2R_1x} \tag{1}$$

H : Nip clearance

따라서 현미경사진에서 ht ; y로 얻어낸 비로부터 y값을 얻을 수 있고 H는 MM₁ 및

MM₂로부터 얻을 수 있다. 이 값이 α 와 β 의 쌍극자 좌표(Bipolar Coordination 관계식에 대입하여 α^* , β^* 의 값으로 변환 된다.

$$\alpha^* = \frac{1}{2} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (a+y)^2}{x^2 + (a-y)^2}} \quad (2)$$

$$\beta^* = \tan^{-1} \frac{(y+a)}{x} - \tan^{-1} \frac{(y-a)}{x} \quad (3)$$

또한, splitting point (α^* , β^*)에서 속도비 $r = \frac{v_1}{v_2}$ 는 식(4)와 같다.

$$r = \frac{\alpha_1 - \alpha^*}{\alpha^* + \alpha_2} \quad (4)$$

여기서 α_1, α_2 는 각 roller 표면상의 α 좌표 값이다.

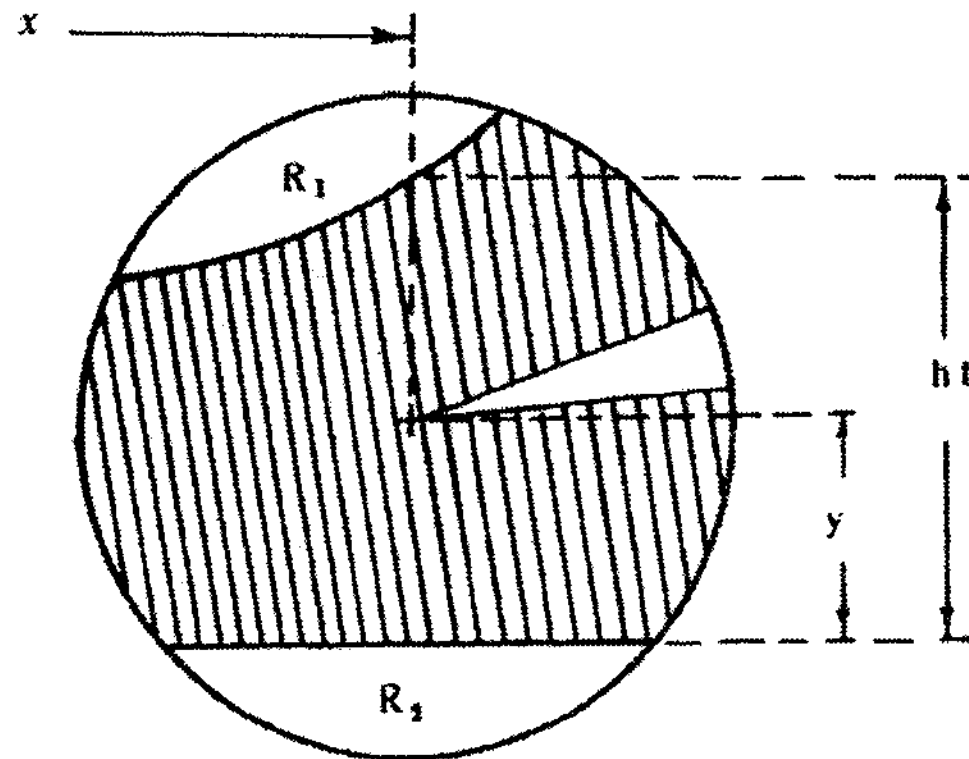


Fig. 3. Splitting point in microphotograph.

3. 결과 및 고찰

3-1. Splitting points

실험에 나타난 splitting point의 좌표는 Fig. 4, 5, 6, 7, Table 2와 같다.

214배의 현미경사진에는 R₁과 R₂를 H=25 μ 이상에서 그리고 $r=11(v_2=8^{cm}/sec)$ 이하로 할 때 포함시킬 수 없었다(시료두께 50 μ 이상). 따라서 사진으로 얻은 data는 X50현미경을 사용하여 얻은 것으로 하였다. 현미경으로 유출필름의 두께를 측정하여 h_1/h_2 를 구하는 것이 보다 오차가 적게 나타난다. 사진으로 관찰된 중요한 또 하나의 결과는 점(α^* , β^*)을 기

점으로 분리되어 각 롤러를 타고 가는 유체의 속도는 분리점 바로 직후에는 v_1 및 v_2 보다 빠른 속도를 갖고 있는 것이 두께의 차이로 알 수 있었다. (Fig. 8)

실험 결과에 의하면 splitting point α^* 및 유출 film의 두께비 h_1/h_2 는 속도비 r 의 함수로서 나타남을 알 수 있었다.

$$\frac{h_1}{h_2} = r \cdot \frac{(r+3)}{(3r+1)} \quad (5)$$

이것은 또한 롤러의 반경과도 무관하며 nip clearance 또한 reynolds lubrication approximation 범주 안에 있는 0.1mm이내(로라 반경과 상대적임)에서는 무관하게 나타났다. 운동방정식을 세울 때 가속도 항의 무시도 $r=30(v_1=2.4^m/sec)$ 까지는 가능함을 알 수 있었다.

시료에 따른 점도차는 β^* 의 위치에 영향을 주며 q_1/q_2 및 α^* 위치에는 무관하며 또한 이것은 β^* 위치에 관계없이 일정함을 알 수 있었다.

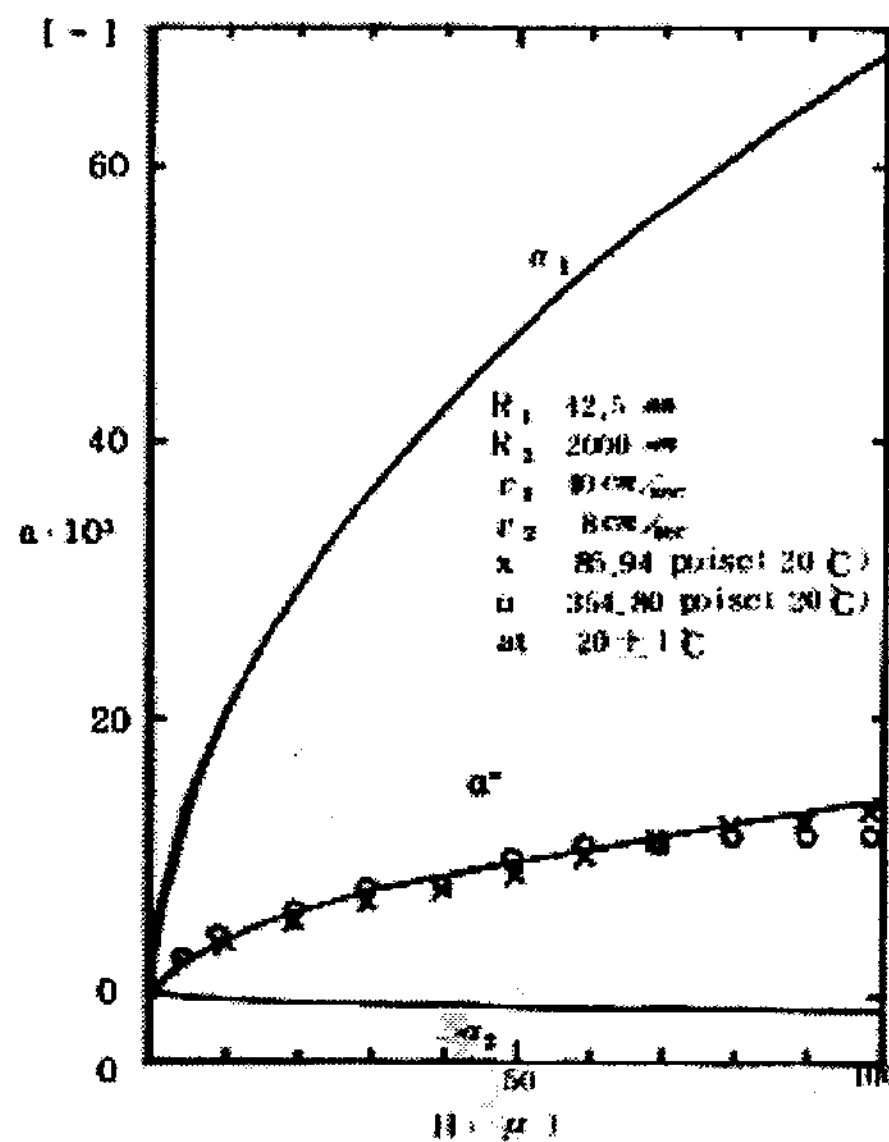


Fig. 4. Comparison of α^* with empirical results obtained with x50 microscope as varying Nip center clearance(H) at constant v_1 and v_2 .

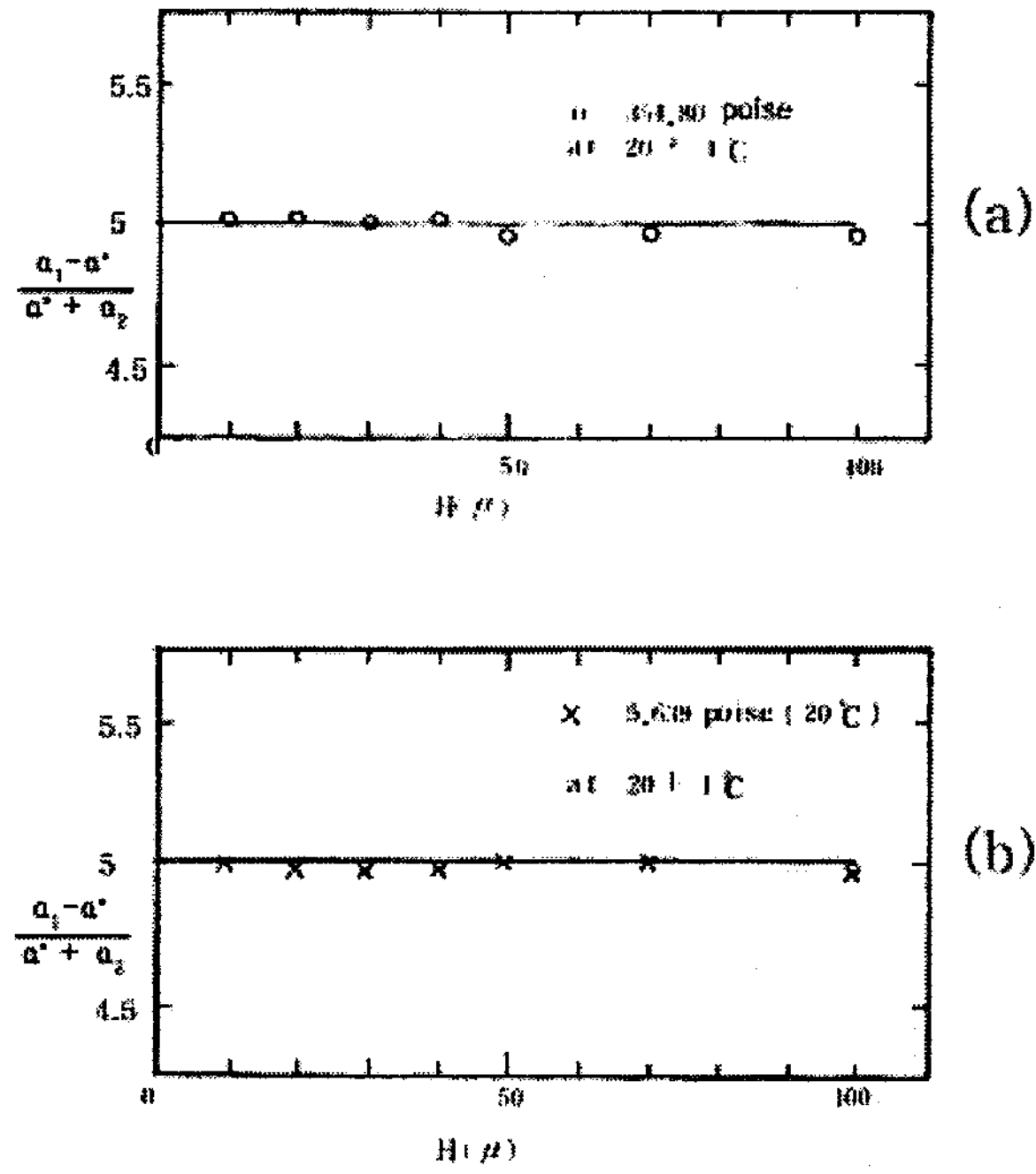


Fig. 5. Same results as Fig. 4. expression in the ratio of $\alpha_1 - \alpha^* / \alpha^* + \alpha_2$.

Table 2. Comparison h_1/h_2 with Experiment as Fig. 6

r	f^a	h_1/h_2^b	$h_1 (\mu)^c$	$h_2(\mu)^c$	h_1/h_2^c
0	3.000	0.000			
1	1.000	1.000	48	52	0.923
3	0.600	1.800	50	30	1.667
5	0.500	2.500	62	24	2.583
6	0.474	2.844	56	20	2.800
9	0.429	3.861	64	16	4.000
12	0.405	4.860	72	14	5.143
15	0.391	5.865	60	10	6.000
18	0.382	6.876	58	8	7.250
21	0.375	7.875	50	6	8.333
24	0.370	8.880	36	4	9.000
27	0.366	9.882	18	2	9.000
30	0.363	10.890	18	2	9.000

a; $f = \frac{r + 3}{3r + 1}$

b; by Eq. (5)

c; 측정오차 $\pm 2 \mu$

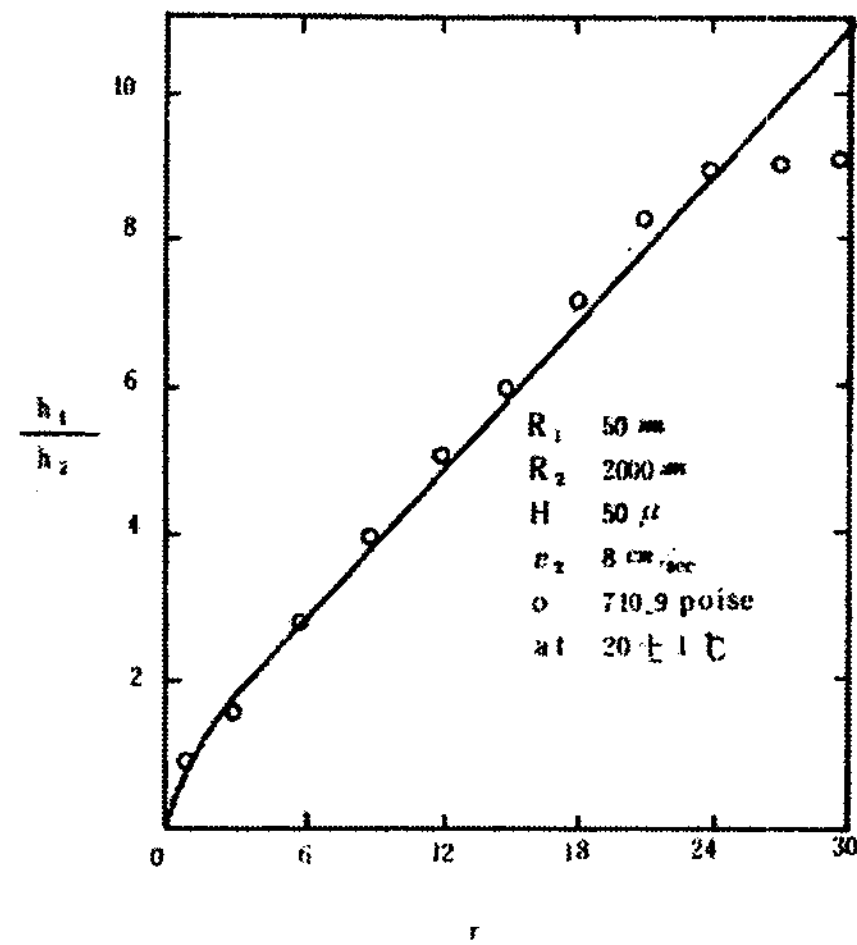


Fig. 6. Comparison Eq.(5) with empirical results obtained as varying the velocity ratio, r at constant clearance (50μ) and mounted sample thickness (100μ).

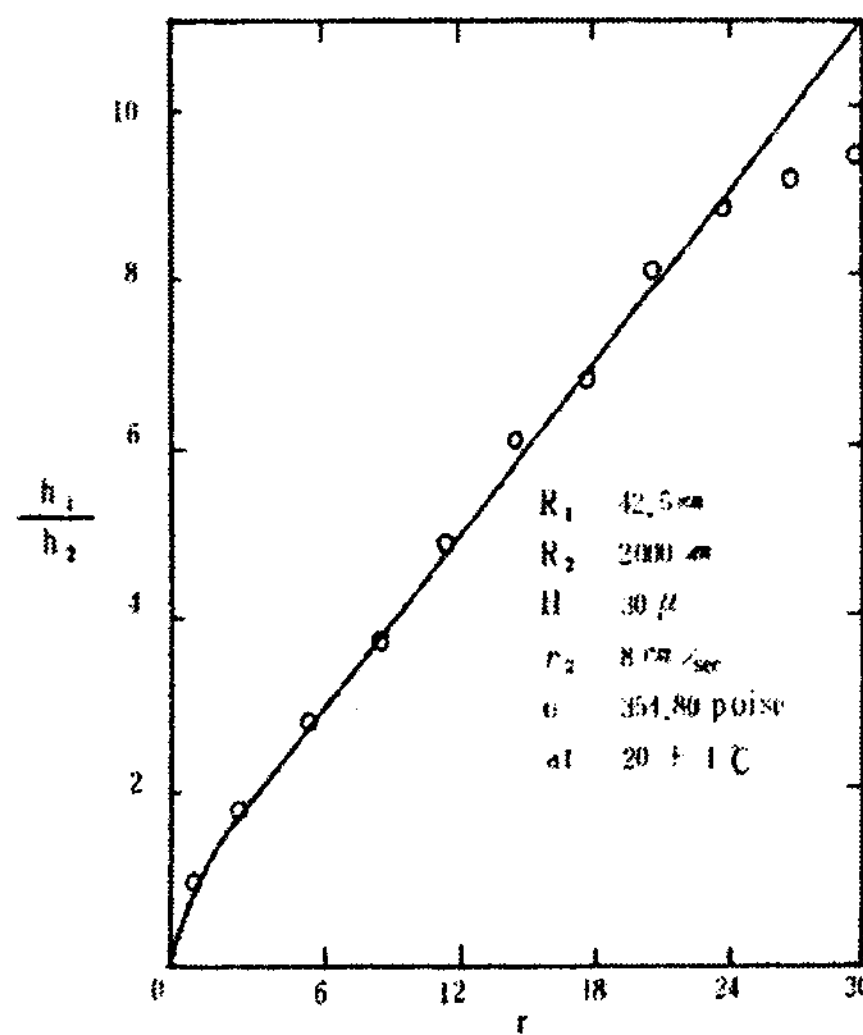


Fig. 7. Comparison of Eq.(5) with empirical results obtained as varying the velocity ratio, r at constant clearance (30μ) and mounted sample thickness (100μ).

3-2. α^* 와 β^* 의 관계

본 연구에서 주된 목적으로 다루지 않았지만 β^* 의 위치는 r 이 크면 클수록 또 유량 (Bank량으로도 볼 수 있음)이 많아질수록 nip center에서 멀어짐을 알 수 있다. 이것은

β^* 는 laminar region내의 driving force인 압력의 함수로서 압력이 적을수록 nip center 쪽으로 가깝게 β^* 가 위치한다고 할 수 있다. 이 때문에 splitting point α^* 를 $\beta=\beta^*$ 에서의 pressure limit를 구하여 풀고자 하는 노력이 근간에 시도되고 있으나 본 연구에서와 같이 압력한계를 무르더라도 splitting point α^* 를 $v_\alpha=0$ 인 곳에서 비롯된다는 사실로 구할 수 있었으며 이 결과는 실험으로 검증되었으므로 Hintermeier 등이 가정한 대로 점(α^*, β^*)에서 $v_\beta=0$ 은 현상에 대한 속단이라 하겠다.

3-3. Splitting region

현미경 관찰에 의하면 splitting point 주변의 유변학적 현상을 schematic하게 제안할 수 있다. Fig. 8은 이 현상을 도해한 것으로 점(α^*, β^*)에서의 성분속도 v_β, v_α 는 Fig. 9와 같이 되었다가 splitting 된 직후 β_1 까지는 유체의 표면장력에 의하여 유체와 공기와의 계면의 interface velocity는 급속히 감속되었다가 β_1 을 지난 후부터는 전체적으로 롤러의 표면속도(v_1, v_2)에 따르게 된다. 따라서 β^* 와 β_1 사이의 성분속도 v_β 는 Fig. 10과 같이 남아 있던 압력에 의하여 표현할 수 있겠다. 이와 같은 도해에 의하여 β^* 에서 로라 틈새 간격이 β_1 이후의 h_1+h_2 에 의한 두께보다 작더라도 그만큼의 유출이 가능한 이유가 설명되며 splitting 후의 β_1 로부터 liquid surface speed 가 R_1, R_2 의 표면속도로 equilibrium되기까지의 splitting region에 대한 해석이 가능하게 된다.

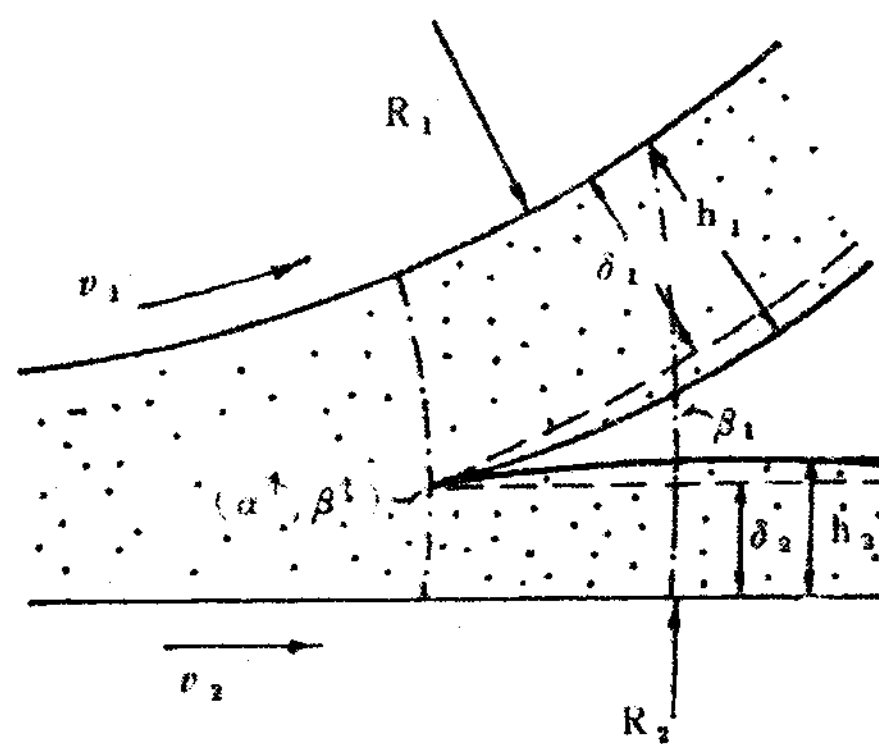


Fig. 8. Schematic Diagram of the Splitting region.

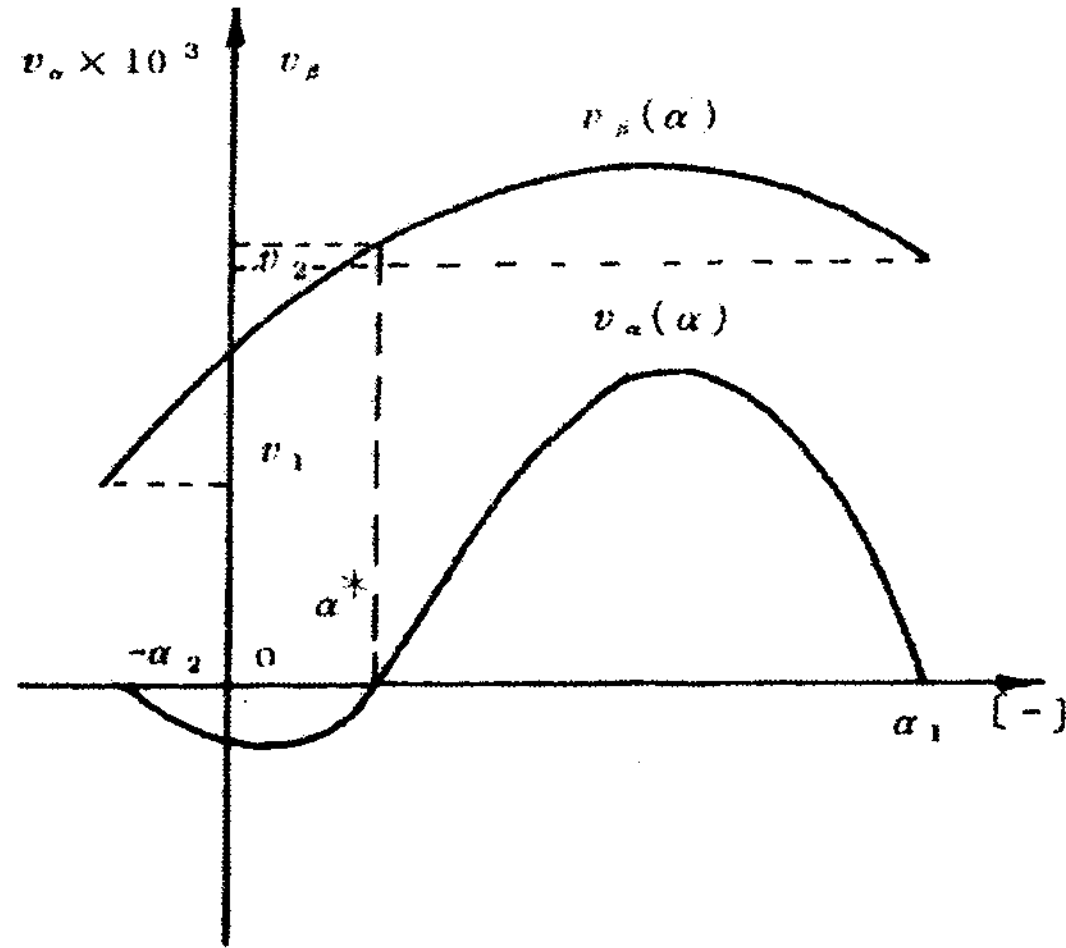


Fig. 9. Velocity distributions $v_\beta(\alpha)$ and $v_\alpha(\alpha)$ at $\beta=\beta^*$.

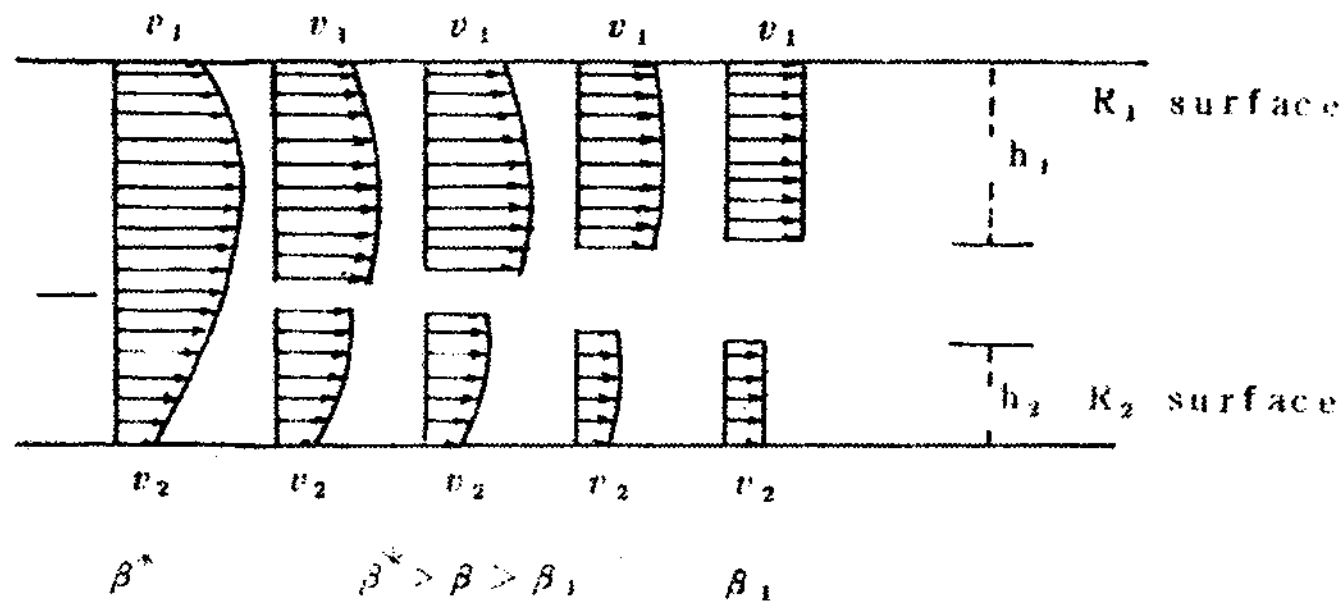


Fig. 10. Schematic plot of velocity distributions $v_\beta(\alpha)$ between β^* and β_1 .

3-4. 유출량비 (Discharged Volume flow rate q_1/q_2)

Splitting point(α^*, β^*)에서 film 두께가 δ_1, δ_2 로부터 h_1, h_2 로 증가한 증분은 그 비로써

$$\frac{h_1}{h_2} - \frac{\alpha_1 - \alpha^*}{\alpha^* + \alpha_2} = \frac{r + 3}{3r + 1} = f \tag{6}$$

이는 앞에서 고찰한 현미경 사진의 결과를 반증한다.

Fig. 6의 결과는

$$\frac{q_1}{q_2} = r^2 \cdot \frac{(r + 3)}{(3r + 1)} \tag{7}$$

을 따르고 있음을 나타내는데 비하여 Hintermeier의 결과에 의하면,

$$q_2 - q_1 = \frac{3Q}{4} \cdot \frac{\Delta U}{U_m} \quad (8)$$

여기서 $Q = q_1 + q_2$

$$\Delta U = v_1 - v_2$$

$$U_m = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Eq. (8)을 다시 정리하면,

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{r - 5}{l - 5r}$$

이 되어 $r > 1$ 일 때 $q_1/q_2 < 1$ 인 불합리한 결과가 나온다. 실험 결과를 Eq. (7)과 비교하면 Fig. 11과 같다.

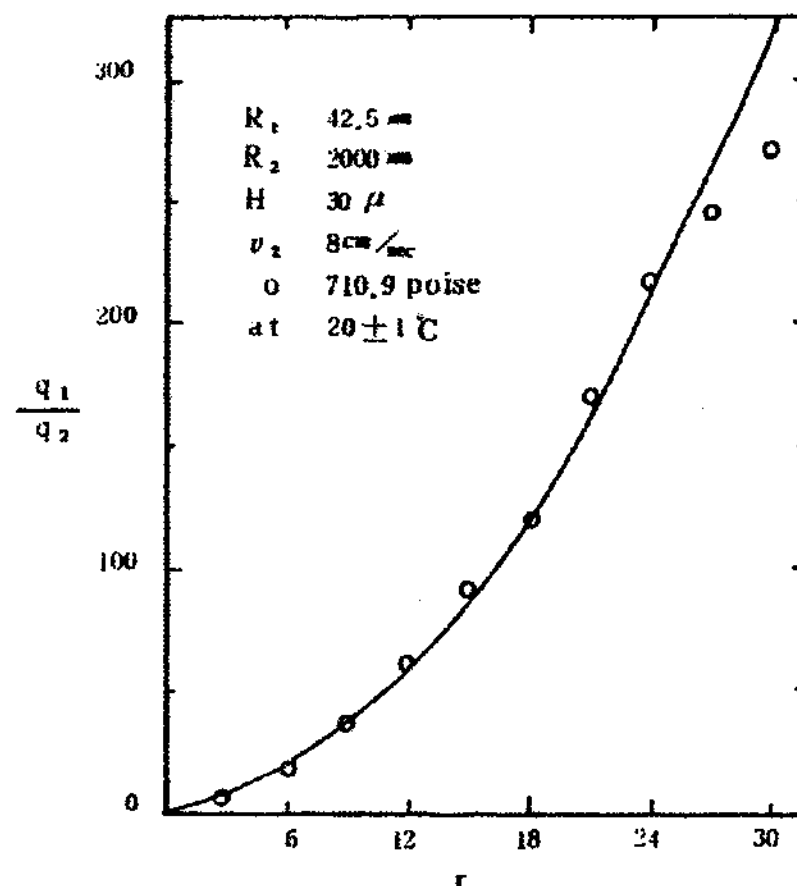


Fig. 11. Comparison of Eq. (18) with empirical results obtained as varying velocity ratio.

4. 결 론

1. 두개의 회전하는 원통 롤러에 의하여 그 틈새에 맞물리는 속으로 유체를 전달하는 시스템에서 각 롤러상의 유출량비는

$$\frac{q_1}{q_2} = r^2 \cdot \frac{r + 3}{3r + 1}$$

유출된 필름의 두께비는

$$\frac{h_1}{h_2} = r \cdot \frac{r+3}{3r+1}$$

와 같다.

2. Splitting region ($\beta^* > \beta > \beta_1$)에 대한 유변학적 해석으로 표면장력과의 관계를 재정리할 수 있으므로 장차 이 분야에 대한 연구를 가속시킬 수 있을 것으로 예상된다.
3. Non-Newtonian 유체에 대하여도 laminar region의 유변학적 해석으로 구한 v_β 및 v_α 로부터 α^* 를 구할 수 있을 것으로 예상하며 따라서 인쇄, coating, milling, 윤활계통 및 제지, 고무공업분야 등에 쓰이는 롤러 시스템의 적용이 가능해지리라 믿는다.

참고문헌

- 1) R. R. Myers, R. D. Hoffman ; Trans. of the society of Rheol. V, pp. 317~328 (1961).
- 2) R. E. Gaskell ; *J. of Applied Mechanics*, sept. pp. 334~336 (1950).
- 3) J. T. Bergen, G. W. Scott, Jr ; *J. of Applied Mechanics*, March, pp. 101~106 (1951).
- 4) W. W. Alston, Jr & K. N. Astill ; *J. of Applied Polymer Scien.*, 17, pp. 3157~3174 (1973).
- 5) R. Tackerman - Krozer, G. Schenkle, and G. Ehrmann ; *Rheol. Acta* 14, pp. 1066~1076 (1975).
- 6) C. Kiparissides, J. Vlachopoulos ; *Poly. Eng. & Scien.* 16, 10, pp. 712~719 (1976).
- 7) C. Kiparissides, J. Vlachopoulos ; *Poly, Eng, & Scien.*, 18, 3, pp. 210~214 (1978).
- 8) Z. Tadmor, C. Gogos "Principle of Polymer Processing" willy (1979).
- 9) D. J. Coyle, ph. D. Thesis, University of Minnosota (1994).
- 10) Savage, M. D. *AlchE J.* 30, pp. 999~1002 (1984).
- 11) E. Pitts, J. Greiller ; *J. Fluid Mech.*, 11, pp. 33~50 (1961).
- 12) D. J. Coyle, C. W. Scriven, *J. Fluid Mech*, 216, pp. 437~458 (1990).
- 13) L. H. Sjodahi ; *American Ink Marker*, March, pp. 31~57 (1951).
- 14) M. Pasquali, L. E. Scriven, *J. Non-Newton. Fluid Mech* 108, pp. 368~409 (2002).
- 15) A. G. Lee, E. S. G. Shaqfeh, and B. Khomami, *J. Non-Newton, Fluid Mech.*, 108, pp. 327~362. (2002).
- 16) M. D. Smith, Y. L. Joo, and R. C. Armstrong, R.A. Brown, *J. Non-Newton.*

Fluid, 109. pp. 13~50 (2003).

- 17) W. H. Banks, E. C. Mill ; Proc. Roy. Soc. A, 221, pp. 414~419 (1954).
- 18) C. C. Mill, C. R. South ; *J. Fluid Mech*, 28, part 3, pp. 523~529 (1967).
- 19) J. C. Hintermeier, R. E. white ; Tappi., 48, 11, pp. 617~625 (1965).
- 20) W. S. Ho, F. A. Holland ; Tappi, 61, 2, pp. 53~56 (1978).
- 21) N. V. Deshpapd ; Tappi Conference, Vol. 14~16, Nov, pp. 179~185 (1977).
- 22) O. Reynolds ; Phil , Trans., Part 1. 177, pp. 157~234 (1886).