

대응점도를 이용한 Maddock Mixing Head의 비뉴튼성 유체 흐름해석

이기윤

충남대학교 공과대학 고분자공학과
(1997년 7월 29일 접수)

An Analysis of Maddock Mixing Head Using Equivalent non-Newtonian Viscosity

Kee-Yoon Lee

Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam University, Taejon 305-764, Korea

E-mail: kylee@hanbat.chungnam.ac.kr

(Received July 29, 1997)

요약: 단축성형 압출기에서의 Maddock mixing head (MMH)의 성능에 대하여 non-Newtonian fluid model에 대한 이론적 연구가 수행되었다. 본 연구에는 점도와 관련된 flow analysis network (FAN) 방법, 즉 Newtonian 대응점도가 MMH down-channel과 cross-channel 방향에서의 압력변화를 예상하는데 사용되었고, 실험적 비교로는 MMH를 가진 두 개의 스크류를 사용하여 실험하여 출간된 데이터를 사용하였다. 즉, 하나 (실험 #28~36)는 down-channel 방향으로 mixing head 입구와 출구에서의 압력 차이를 측정하기 위한 것이고, 다른 하나 (실험 #40~49)는 mixing head 중간에서 cross-channel 방향으로 압력 변화를 측정하기 위한 것이었다. 본 연구에서는 h_1 의 변수를 도입하여 power law model의 Newtonian 대응점도를 이용하여 실험결과를 모사하였다. 본 연구를 통하여 실험결과와 이론적 모사와의 차이를 한층 감소시킬 수 있었다.

ABSTRACT: A theoretical study with non-Newtonian fluid model was conducted on the performance of the Maddock mixing head (MMH) in plasticating single-screw extrusion. In this study, the flow analysis network (FAN) method with the corresponding viscosity, so called, the equivalent non-Newtonian viscosity was used for the prediction of pressure variation in both the down-channel and cross-channel direction of MMH. And for the experimental study, the published data were used. Two kinds of screws with the MMH were used, namely: one screw (exp. # 28~36) to measure the pressure difference between the entrance and the exit of the mixing head in the down-channel direction and the other screw (exp. # 40~49) to measure pressure variations in the cross-channel direction in the middle of the mixing head. In this study we tried it by using the parameter h_1 . The equivalent non-Newtonian viscosity of power law model with drag flow was used to simulate the experimental results. This study made the progress on the agreements between experimental results and theoretical predictions.

Keywords: Maddock mixing head(MMH), FAN, equivalent non-Newtonian viscosity.

서 론

단축 성형 압출기의 혼련 효과를 증대시키는 Maddock mixing head (MMH)는 LeRoy에¹ 의해 제안되었고, 구체적인 실험과 그 효과가 이미 Maddock에² 의해 증명되었다.

Fig. 1에서는 MMH를 도식적으로 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 유체가 inlet channel로 들어와서 mixing land (또는 barrier land)를 통해 outlet channel로 나와 압출기 선단으로 진행되는 MMH에서의 유체 흐름 메카니즘을 보여주며, Fig. 1(b)는 단면도로서 4쌍의 골이 패여있음을 보여준다. 4쌍의 골과 턱이 번갈아가면서 고분자의 흐름을 방해하고 촉진시키면서 혼련효과를 배가시킨다. Tadmor 등은³ Newtonian 유체로 가정하여 wiping land에서 압력상승과 감소를 보고하였다. 이 경우는 wiping land가 스크류 축과 평행한 경우가 아니었으나 이후 Tadmor의 연구진은 power-law 모델을 사용하여 다시 해석하

였다. Rawwendaal은⁴ 이를 정리하여 책으로 출간하였으며, Lindt 등은⁵ 유한차등법으로 Tadmor의 해석을 발전시켰다. 그러나 앞서의 해석은 2차원으로 행해졌으며 MMH의 전반적인 해석에는 미흡하였다.

Han의 연구진에⁶ 의해서 flow analysis network (FAN)의 방식으로 Newtonian과 non-Newtonian 유체의 경우에 MMH에서의 흐름이 규명되었으나, 고분자 물질의 전단속도에 의한 점도 특성을 간략히 하여 x방향의 효과만 고려하였다. 더불어 압력에 의한 흐름인 z방향의 속도도 첨가되어 전단응력에 따른 점도의 영향을 고려해야 한다. Drag force가 아직 해결되지 않고 있고, White 등은⁹⁻¹¹ 상수값 C_1 을 적분식에 포함시켜 drag force 흐름과 압력흐름을 해석하여 발표하였으나 아직도 C_1 값을 이론적으로 정의하기 어려웠다.

따라서, 본 논문에서는 shear thinning 현상을 나타내는 고분자 용융체의 non-Newtonian 흐름 현상을 drag force와 연계된 대응점도 (equivalent Newtonian viscosity)로 단순화하여 계산 모사를 통하여 MMH를 해석하였다.

실험 및 결과

본 실험의 내용은 문헌에⁶ 자세히 상술되어 있으며, 여기서는 간단히 결과 도출을 위해 기술하겠다.

실험에 사용된 압출기에 관한 기하학적 형태의 크기는 Table 1에 나타내었고, 압력은 9군데에서 측정하였으며 그 위치를 Table 2에 제시하였다. 또한 사용된 스크류의 MMH는 No.1과 No.2 두종류로 그

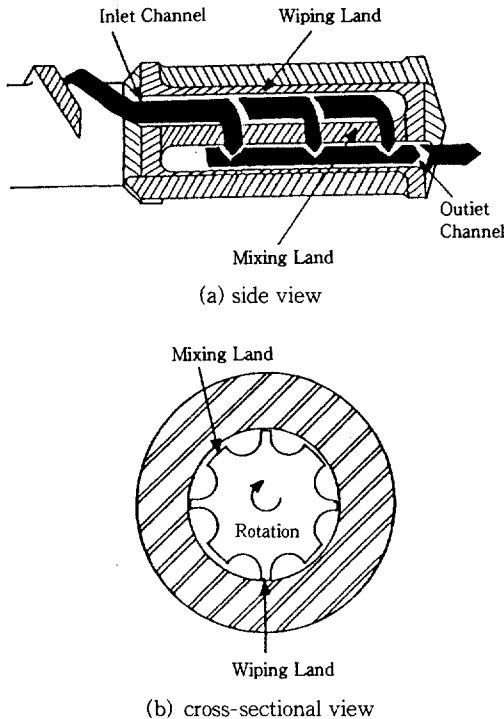


Figure 1. Schematic diagram of the Maddock mixing head: (a) side view and (b) cross-sectional view.

Table 1. Geometrical Configurations of the Single-Screw Extruder Employed

screw diameter (mm)	63.5
extruder length (L/D)	24.35
feed section (L/D)	5.0
channel width (mm)	54.14
channel depth in the feed section (mm)	11.35
tapered section (L/D)	3.0
metering section (L/D)	16.35
channel depth in the metering section (m)	3.73
flight width (mm)	6.35
flight helix angle (degree)	17.7

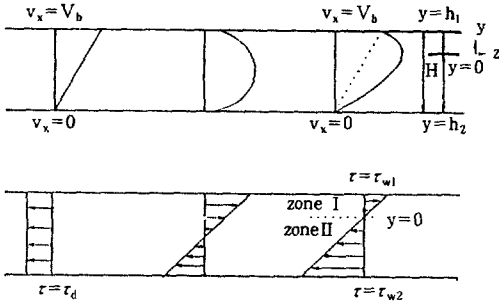


Figure 2. Velocity and shear stress profiles at the simple shear and pressure flow.

Table 2. The Position of the Pressure Transducers Mounted along the Extruder Axis

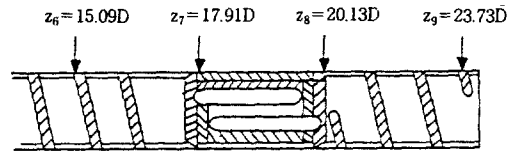
position	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9
L/D	0.68	3.81	6.63	9.45	12.27	15.09	17.91	20.13	23.73

Table 3. Dimensions of the Maddock Mixing Heads Employed

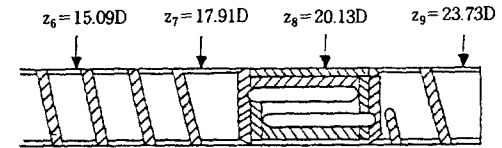
	mixing head #1	mixing head #2
length of the mixing head (mm)	212.60	212.73
length of the channel (mm)	149.10	149.23
width of the channel (mm)	9.35	9.35
clearance of the barrier flight (mm)	0.53	0.66
clearance of the wiping flight (mm)	0.08	0.08
maximum radius of the channel (mm)	14.88	14.88
number of inlet channels	3.00	3.00
number of outlet channels	3.00	3.00

크기를 표시하여 Table 3에 제시하였다. 실험에서는 두개의 스크류가 사용되었으며, Fig. 3에 나타냈듯이 스크류 No.1은 7번과 8번의 위치에서 압력이 측정되었고, 스크류 No.2는 outlet channel 중앙에 위치한 8번에서 측정되었다. 따라서 스크류 No.1은 mixing head를 지나가는 압력의 변화(z방향)를 측정할 수 있었고, 스크류 No.2는 mixing head를 가로지르는 압력 변화(x방향)를 측정할 수 있었다. 또한 MMH의 기하학적인 형태는 Fig. 4에 도식화하였다.

사용 물질로는 저밀도 폴리에틸렌 (LDPE, Rexene 143)을 사용하였고 스크류 회전속도와 다이 크기를 조절하여 압출기 선단압력 또는 압출량을 변화시켰다.



(a) Screw #1



(b) Screw #2

Figure 3. Schematic depicting the positions of pressure transducers mounted in the Maddock mixing head : (a) Screw #1 and (b) Screw #2.

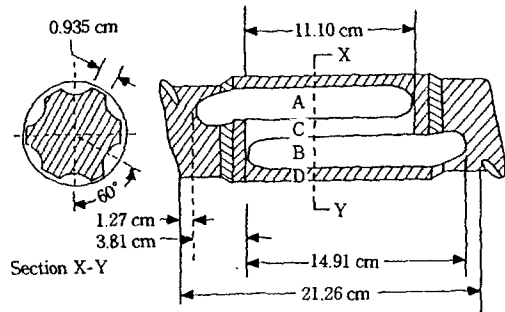


Figure 4. Geometrical configurations of the Maddock mixing head employed in the present study.

압력센서에서 MMH의 골과 직각 방향의 압력분포를 측정할 수 있었다. 이를 Fig. 5에 나타내었고 실험번호 40, 41, 42는 압출기 선단압력이 1000, 2000, 3000 psi임을 각각 의미하고 ABCD는 Fig. 4를 참조하면 MMH의 4부분에 따른 압력변화임을 알 수 있다. 특히 Fig. 5(a)~(c)에서 C부분의 압력차이를 볼 수 있다.

이 론

등은 과정으로 가정하고 직교좌표를 이용하면 다음과 같은 식과 경계조건을 얻는다.

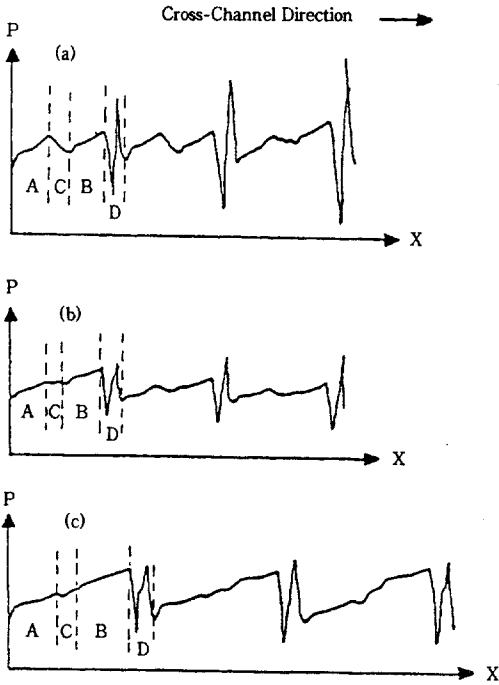


Figure 5. Experimental pressure variations in the cross-channel direction of mixing head #2 at a screw speed of 50 rpm: (a) Run #40; (b) Run #41; (c) Run #42. The extrusion conditions used are given in Table 5.

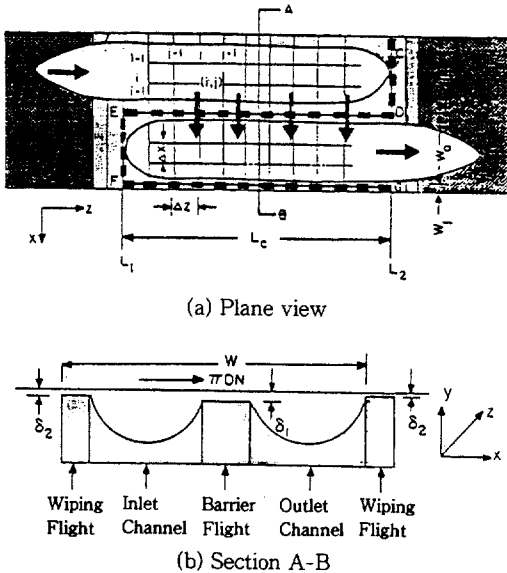


Figure 6. Schematic of a Maddock mixing head: (a) plane view and (b) cross-sectional view at section A-B.

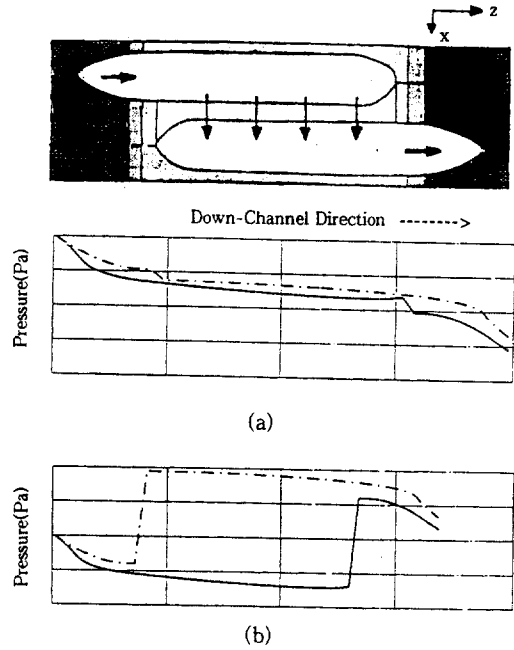


Figure 7. Predicted pressure distributions in the down-channel direction of mixing head #1 at a screw speed of 50 rpm for the same extrusion conditions as experiments: (a) Run #28; (b) Run #30. The extrusion conditions simulated are given in Table 4. (Solid line: pressure profile at the inlet channel, dotted line: pressure profile at the outlet channel).

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

식 (2)를 이용하여 x방향의 pressure force와 drag force를 동시에 해석한 것을 도식적으로 Fig. 2에 표시하였다.

식 (3)을 다음과 같이 영역을 I과 II로 나누어 수식을 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{w1} = -\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) h_1 \quad (\text{zone II에서}) \quad (4)$$

$$\tau_{w2} = -\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) h_2 \quad (\text{zone II에서}) \quad (5)$$

경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_x = 0; \tau = 0; y = 0 \quad (\text{zone I과 zone II의 교차점}) \quad (6)$$

$$v_x = V_b; \tau = \tau_{w1}; y = h_1 \quad (\text{zone I에서}) \quad (7)$$

$$v_x = 0; \tau = \tau_{w2}; y = h_2 \quad (\text{zone II에서}) \quad (8)$$

전체 깊이 H 는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 아래와 같이 표현된다.

$$H = |h_1| + |h_2| \quad (9)$$

Zone I과 II의 영역에서 식(4)를 정리하면,

$$\frac{\tau_{w1}}{h_1} = \frac{\tau_{w2}}{h_2} \quad (10)$$

이다. 위 식으로부터 부피속도를 계산하면

$$q = \int_0^{h_1} v_x(y) dy + \int_{h_2}^0 v_x(y) dy \quad (11)$$

이고, 이를 다시 부분 적분으로 정리하면 아래와 같다.

$$q = -\frac{h_1^2}{\tau_{w1}^2} \int_0^{\tau_{w1}} \tau \dot{\gamma} d\tau - \frac{h_2^2}{\tau_{w2}^2} \int_{\tau_{w2}}^0 \tau \dot{\gamma} d\tau \quad (12)$$

전단응력의 정의 ($\tau = -\mu \dot{\gamma}$)를 적용하고 식 (8)을 이용하면

$$q = \frac{\tau_{w1}}{3\mu h_1} [|h_1|^3 + |h_2|^3] \quad (13)$$

이다. 한편 power-law model ($\tau = K(T) \dot{\gamma}^n$)을 이용하면⁶ 식 (12)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q = \frac{(|h_1|^{2+\frac{1}{n}} + |h_2|^{2+\frac{1}{n}}) \tau_{w1}^{\frac{1}{n}}}{\left(2 + \frac{1}{n}\right) K^{\frac{1}{n}} h_1^{\frac{1}{n}}} \quad (14)$$

마지막으로 식 (13)과 (14)로부터 대응점도 ($\bar{\mu}$)를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\mu} = \frac{\left(2 + \frac{1}{2}\right) K^{\frac{1}{n}} h_1^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} [|h_1|^3 + |h_2|^3]}{3\tau_{w1}^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} [|h_1|^{2+\frac{1}{n}} + |h_2|^{2+\frac{1}{n}}]} \quad (15)$$

$$|h_1| = \frac{H}{2} + \frac{\bar{\mu} V_b}{H \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)} \quad (16)$$

$$|h_2| = H - h_1 \quad (17)$$

식 (15)~(17)을 사용하여 power-law model을 이용한 Newtonian 대응점도 ($\bar{\mu}$)를 구할 수 있어 shear thinning 효과를 잘 나타낼 수 있는 식이 유도되었다.

수치해석

MMH를 해석하기 위해서는 2차원 유한 차등법으로는 한계가 있기 때문에 3차원 모델링이 필요하다. 이를 간략히 모델링하기에 적합한 FAN방법을 택하여 해석하였다. Fig. 6에서는 도식적으로 MMH의 평면도와 단면도를 나타내었다. Fig. 6(a)에서 화살표로 나타내었듯이 고분자 유체 흐름이 존재한다. 즉 (i)압력에 의한 z방향의 흐름 (ii)드래그에 의해 δ_1 (Fig. 6(b)에 표시)의 틈새로 흐르는 x방향의 흐름이다. 기본적인 수식으로부터 수치해석에 적용하기 위해 경계조건과 부피속도 등을 전개하였다.⁶

FAN방법을 적용하기 위해 점 (i, j)에서 정리하면

$$q_x(i, j) = \frac{1}{4} V_b [H(i+1, j) + H(i, j)] - \frac{1}{96\eta_x \Delta x} [H(i+1, j) + H(i, j)]^3 [P(i+1, j) - P(i, j)] \quad (18)$$

$$q_z(i, j) = -\frac{1}{96\eta_z \Delta z} [H(i, j+1) + H(i, j)]^3 [P(i, j+1) - P(i, j)] \quad (19)$$

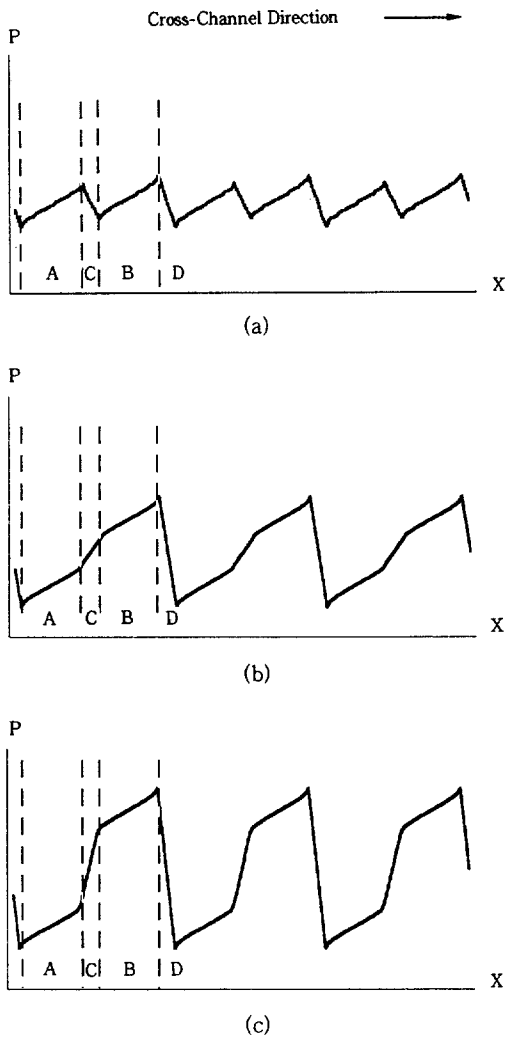


Figure 8. Predicted pressure variations in the cross-channel direction of mixing head #2 at a screw speed of 50 rpm for the same extrusion conditions as experiments: (a) Run #40; (b) Run #41; and (c) Run #42. The extrusion conditions simulated are given in Table 5.

으로 표시되며, 여기에서 η_x 와 η_z 는 다음 식으로 표현된다.

$$\eta_x = \left[\frac{\bar{\mu}(i,j) + \bar{\mu}(i+1,j)}{2} \right] \quad (20)$$

$$\eta_z = \left[\frac{\bar{\mu}(i,j) + \bar{\mu}(i,j+1)}{2} \right] \quad (21)$$

여기에서 $\bar{\mu}$ 는 식 (15)~(17)로부터 구하고, 각 요소에서의 물질 수지식을 나타내면,

$$[q_x(i-1,j) - q_x(i,j)]\Delta z + [q_z(i,j-1) - q_z(i,j)]\Delta x = 0 \quad (22)$$

로 정리되고, 식 (18)과 (19)를 식 (22)에 대입하면 압력분포가 미지수로 나타나는 최종식을 만들 수 있다.

Shear-thinning 현상은 power-law 모델로 표시되며, 대응점도를 나타내는 식 (15)를 가지고 식 (18)과 식 (19)를 구하기 위해서 다음과 같이 τ_w 에 대한 전개가 필요하다.

$$|\tau_w(i,j)| = [\tau_{wx}^2(i,j) + \tau_{wz}^2(i,j)]^{1/2} \quad (23)$$

여기에서 τ_{wx} 와 τ_{wz} 는 식 (6)에 의해

$$\tau_{wx}(i,j) = [P(i,j) - P(i-1,j)]H(i,j)/2\Delta x \quad (24)$$

$$\tau_{wz}(i,j) = [P(i,j) - P(i,j-1)]H(i,j)/2\Delta z \quad (25)$$

으로 계산되었다. 계산에 필요한 경계조건과 MMH의 기하학적인 형태는 문헌을⁶ 참고하였다.

실험결과와 수치해석의 비교

스크류의 회전속도와 압출량, 압력 변화량의 실험치와 계산치를 비교한 값 등을 스크류 No.1과 스크류 No.2에 대해서 각각 Table 4와 5에 명시하였다. 측정된 실험치와 simulation한 예상치와는 아직 차이가 있으나 그 경향은 비교적 일치하고 있다.

Fig. 7에서는 MMH No.1의 경우 FAN방법을 사용하여 simulation한 결과로 z방향의 압력변화가 증가와 감소로 나타난다. 실험 측정 결과인⁶ Fig. 5의 실험 번호 28(압출기 선단압력; 1000 psi)에서는 P가 감소하였고, 실험번호 30(압출기 선단압력; 3000 psi)에서는 증가로 측정되며 이는 Fig. 7에서 $P = z_7 - z_8$ 값을 보면 실험치와 같은 경향을 보인다. 실험번호 30의 경우에는 압출기 선단압력이 증가할수록 압력에 의한 유체흐름보다 드래그에 의한 유체

Table 4. Summary of the Extrusion Conditions Employed for Screw # 1 and Comparison of Predicted Pressure Variation across Mixing Head with Experiment

run no.	screw speed (rpm)	head pressure (MPa)	throughput (kg/h)	measured ^a ΔP (MPa)	predicted ΔP (MPa)	
					Newtonian viscosity	equivalent non-Newtonian viscosity
28	50	6.89	41.95	-0.27	-0.12	-0.25
29	50	13.78	38.77	+0.28	+0.01	+0.40
30	50	20.67	35.59	+1.03	+0.15	+1.07
31	75	6.89	64.33	-0.43	-0.18	-0.56
32	75	13.78	60.34	+0.14	-0.05	+0.11
33	75	20.67	56.21	+0.62	+0.06	+0.82
34	100	6.89	86.81	-0.89	-0.21	-0.80
35	100	13.78	81.81	-0.28	-0.11	-0.21
36	100	20.67	77.14	+0.34	-0.02	+0.63

^a ΔP = P8-P7, so the minus sign denotes pressure drop and the plus sign denotes pressure rise across the Maddock mixing head.

Table 5. Summary of the Extrusion Conditions Employed for Screw # 2 and Comparison of Predicted Pressure Variation across Mixing Head with Experiment

run no.	screw speed (rpm)	head pressure (MPa)	throughput (kg/h)	measured ^a ΔP (MPa)	predicted ΔP (MPa)	
					Newtonian viscosity	equivalent non-Newtonian viscosity
40	50		54.39	-0.55	-0.19	-0.44
41	50	6.89	48.53	+0.14	-0.06	-0.14
42	50	13.78	42.04	+0.82	+0.09	+0.12
43	50	20.67	35.37	+1.72	+0.36	+0.38
44	25	6.89	27.42	-0.55	+0.13	-0.28
45	25	13.78	16.34	+1.58	+0.33	+0.35
46	75	20.67	77.59	-0.41	-0.19	-0.40
47	75	6.89	64.29	+0.62	+0.07	+0.10
48	100	13.78	99.88	-0.34	-0.13	-0.28
49	100	20.67	85.44	+0.90	+0.08	+0.13

^a These are the values obtained by interpolating the pressure readings taken at z_7 and z_9 , and the minus sign denotes pressure drop and the plus sign denotes pressure rise.

흐름이 지배적이라는 것을 알 수 있었다. 이론적인 수치해석 예상치는 Newtonian점도 모델과 본 연구의 주요 관심사인 power-law모델을 이용한 대응점도 모델을 근간으로 계산한 두 가지를 비교하였다. 수치해석 결과는 Table 4에 제시하였는데 대응점도 모델의 경우가 Newtonian모델을 이용한 경우보다 실험치에 근접한 수치를 제공하여 주고 있다. 특히 실험번호 36의 경우만 제외하면 경향과 수치면에서도 비교적 일치하고 있음을 보여준다. 그 예로 실험번호 31, 32, 33에서 측정치는 -0.43, 0.14, 0.62

MPa이었고 해석 결과는 -0.56, 0.11, 0.82 MPa이어서 경향성과 결과 수치에서도 Newtonian의 경우(-0.18, -0.05, 0.06)보다 잘 일치되었다.

다음은 MMH No.2의 경우로 barrier부분의 간격이 약간 큰 경우이며 Table 3에 표시된 형상으로 x방향의 압력변화를 고찰하기로 하겠다.

두 가지의 경우를 FAN방법으로 simulation하면 Fig. 8과 같이 예측된다. Fig. 8은 x방향의 압력분포를 해석하여 그린 것으로 y축의 실제 압력차의 크기를 (a), (b), (c)의 세 경우 모두 동일하게 작성

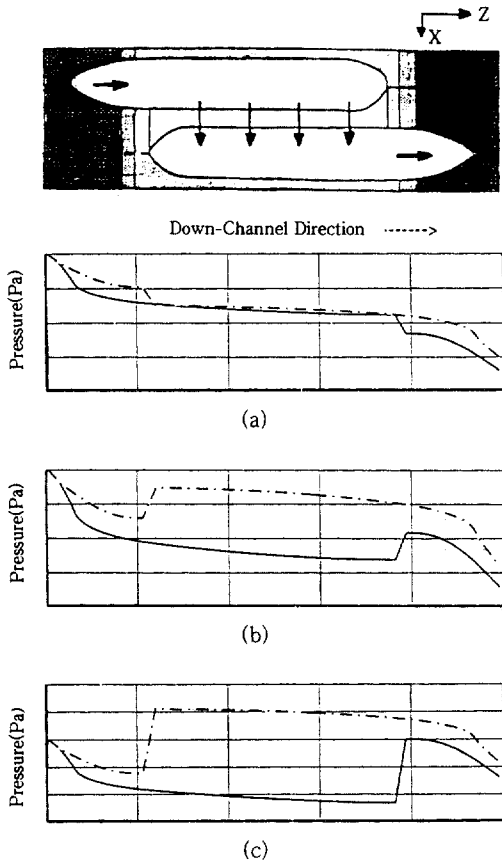


Figure 9. Predicted pressure distributions in the down-channel direction of mixing head #2 at a screw speed 50 rpm for the same extrusion conditions as experiments: (a) Run #40, (b) Run #41, and (c) Run #42. The extrusion conditions simulated are given in Table 5.

하였다. 다시 말하면, Table 5에서 보듯이 압출기의 진행방향(z 방향)으로 MMH 부근에서 압력감소가 발생하는 실험번호 40의 경우에는 Fig. 8의 C부분에서 역시 압력감소가 나타나고, Table 5의 실험번호 42의 경우 z방향으로 압력상승이 나타나는 경우에는 수치해석 결과인 Fig. 8의 C부분에서도 역시 동일한 경향으로 압력상승이 모사된다. 이에 대한 실험결과는 Fig. 5의 (a)와 (c)에 잘 나타나 있으며, MMH의 C부분이 해석된 내용과 같은 경향을 보인다. 그리고, 압력이 불규칙한 MMH의 D부분을 제외하고는 같은 경향을 보인다. 이러한 해석은 Tadmor

와 Klein,³ Elbirli⁵ 등의 해석과도 잘 일치한다. 이로써 압력증가와 감소를 전부 해석하게 되었다. 실험번호 40, 41과 42의 경우에 z방향의 압력변화를 컴퓨터 simulation을 해보면 Fig. 9와 같이 simulation으로 예측된다. Fig. 8의 C부분에서 x방향의 압력 감소와 상승되는 경향을, Fig. 9에서 z방향으로 해석한 결과에서도 outlet channel의 압력상승(실험번호 42)과 강하(실험번호 40)가 발생하는 곳을 마찬가지로 볼 수 있었고, 실제 실험인 Table 5에서도 같은 경향을 확인할 수 있었다. 이를 종합한 수치해석 결과는 Table 5에 제시하였다. 이 경우는 MMH No.1 경우보다 해석결과가 실험결과와 양적인 차이를 보이거나 Newtonian유체의 해석이 더욱 정확함을 알 수 있다.

이상을 종합하면 MMH에서는 압력 강하뿐만 아니라 압력상승도 가공조건에 따라 존재하며, 일반적으로 이제까지 예상되었던 MMH에서의 급격한 압력 강하는 존재하지 않았다. 더욱이 MMH에서는 z방향의 압력구배가 x방향의 압력구배의 경향과 일치하여 매우 특이한 성질을 보였고 대응점도의 도입으로 이에 대한 해석이 더욱 정확해졌다.

결 론

본 논문에서는 drag force와 압력에 의한 유체 흐름(non-Newtonian)을 동시에 해석할 수 있는 이론식을 power-law 모델의 대응점도를 사용하여 해석함으로써 non-Newtonian유체에까지 영역을 확대하였다.

결과에서 MMH의 기계적인 설계뿐만 아니라, 유체흐름의 관점에서도 압출조건이 압력분포에 큰 영향을 주며, x방향과 z방향의 압력분포와 유체의 흐름에도 밀접한 관계가 있음을 다시 보였으며,⁶ power-law를 이용한 대응점도를 사용하여 수치해석을 할 경우, 실험에서 구한 압력차와 좀더 근접한 압력차를 수치해석으로 구할 수 있었다.

현재까지의 연구에서 미흡한 점은 FAN 방법이 유용하기는 하나 단순화시키는 과정에서 오차를 많이 발생하여 컴퓨터 simulation에 정확성이 아직도 부족하다는 점이다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 1차적인 단계인 non-Newtonian유체의 해석과 drag

force를 포함한 해석을 확립시킴으로써 FAN을 1차적으로 발전시켰다고 할 수 있겠다. 앞으로 non-isothermal 과정을 FAN으로 해석하는 것과 이에 대한 검증으로 앞으로 3차원 유한 요소법이 요구된다.

참 고 문 헌

1. G. LeRoy, U.S. Patent 3,486,192 (1969).
2. B. H. Maddock, *SPE J.*, **23**, 23 (1967).
3. Z. Tadmor and I. Klen, *Polym. Eng. Sci.*, **13**, 382 (1973).
4. Rawwendaal, "Polymer Extrusion, Hanser", Munich, 1986.
5. B. Elbirli, J. T. Lindt, S. R. Gottgetreu, and S. M. Baba, *SPE ANTEC Tech. Papers*, **29**, 104 (1983).
6. C. D. Han, K. Y. Lee, and N. C. Wheeler, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 11 (1991)
7. Z. Tadmor, E. Broyer, and C. Gutfinger, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 660 (1974)
8. C. D. Han, K. Y. Lee, and N. C. Wheeler, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 1557 (1990)
9. W. Szydlowski, R. Brzoskowski, and J. L. White, *Int. Polym. Proc.*, **1**, 207 (1987)
10. W. Szydlowski and J. L. White, *Int. Polym. Proc.*, **2**, 142 (1988)
11. W. Szydlowski and J. L. White, *Int. Polym. Proc.*, **4**, 262 (1989)