[논문] 한국소성가공학회지, 제 17 권 제 7 호, 2008
Transactions of Materials Processing, Vol.17, No.7, 2008

깊이가 깊은 사출 금형의 새로운 측벽 두께 설계에 관한 연구

황수진[1]· 류민영[#]

A Study on the Novel Prediction of Mold Wall Thickness for a Deep Depth Injection Mold

S. J. Hwang, M.-Y. Lyu

(Received May 8, 2008)

Abstract

Cavity in the mold is exposed to high pressure during injection molding operation. Injection molded articles with deep depth are often demanded as design variety increases. Subsequently mold becomes weak and deformation increases as the mold depth increases. Thus the injection molds for deep depth articles should be designed to hold out high pressure or stress concentration and large deformation. Through this study, equation for mold design was examined and suggested novel method to determine equation for mold design with deep depth. Novel equation developed in this study was modified from beam theory considering cantilever and two points bending situation while previous equation was modified from just cantilever bending situation. The validity of novel equation was verified through computer simulations for various mold side and wall thickness.

Key Words : Mold, Mold Wall Thickness, Deep Depth Mold, Mold Design, Cantilever, Two Points Bending

1. 서 론

사출 성형이란 성형하고자 하는 모양이 새겨진 금형 (캐비티) 안에 용융된 수지를 고온, 고압으로 주입하여 플라스틱 제품을 성형하는 방법이다. 사출 성형의 공정은 플라스틱의 가소화 - 금형의 형체 - 충전 - 보압 - 냉각 - 이형 및 취출의 순서로 이루어져 있다.

이와 같이 사출 성형 공정이 진행될 때 캐비티 내에서는 압력을 받으며 보압공정에서 가장 큰 압력을 받는다. 보압이 커지면 캐비티 내압이 증가되어 금형의 휨과 변형과 크랙이 발생할 가능성이 높아진다.

과거에는 금형 측벽의 처짐이 성형품에 플래시가 발생하지 않을 정도이면 되었다[1]. 그러나 현재에 요구되는 깊이가 깊은 사출품의 경우 플래시 방지뿐 아니라 금형에 크랙을 방지할 수 있어야 한다. 깊이가 깊은 성형품을 생산하는 금형의 경우, 현재 사용되는 식을 이용할 경우 크랙 발생의 가능성이 있다[2].

지금까지 금형의 벽두께 계산에 사용되는 식은 식 (1)과 같은 처짐 식으로부터 식 (2)와 같이 유도된다[3].

$$\delta = C \times \frac{p \cdot a^4}{E \cdot h^3} \tag{1}$$

$$h = \sqrt[3]{C \times \frac{p \cdot a^4}{E \cdot \delta}} \tag{2}$$

1. 서울산업대학교 대학원, 현재 Moldflow Korea
교신저자: 서울산업대학교 금형설계학과,
E-mail:mylyu@snut.ac.kr

이 때 h는 금형의 벽두께, δ는 처짐량, p는 캐비티 내압, E는 재료의 탄성계수(Elastic Modulus), C는 l/a 에 의해 정해지는 상수이고 l 은 금형의 길이, a는 금형의 깊이이다. 상수 C는 Table 1 에 나타나 있다.

본 연구에서는 금형의 형태와 기존의 수식을 분석하고 금형의 변형과 응력집중을 고려한 새로운 수식을 제안하고자 한다.

Table 1 The constant C in equation(1)

l/a	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
C	0.004	0.053	0.062	0.070	0.078	0.084	0.090
l/a	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	5.0
C	0.096	0.102	0.106	0.111	0.134	0.140	0.142

2. 기존의 벽두께 설계 수식 분석

2.1 수식의 분석

현재 사용되는 벽두께 계산식은 외팔보의 처짐식에서 유래한 것으로 외팔보의 처짐 식은 식 (3)과 같다[4]. 식 (1)과 식 (3)을 비교해보면 식 (3)에서의 상수 3/2 대신 금형의 기하학적 형상을 고려하기 위해 금형의 길이 l 과 깊이 a 에 따른 C 값을 적용하고 있다.

$$\delta = \frac{q \cdot a^4}{8EI} = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \frac{p \cdot a^4}{E \cdot h^3} \qquad (3)$$

Fig. 1 은 l/a 에 따른 C 값의 변화를 그래프로 표현한 것이다. 이 그래프를 보면 금형이 길이 l 이 증가할 때 C 값이 증가된다. 식 (1)에는 l 이 포함돼 있지 않지만 l 이 증가되면 C 값이 증가되므로 결과적으로 l 이 증가될 때 두께의 보강이 이뤄진다.

금형의 깊이 a가 증가되면 l/a는 작아지고 C 값은 감소되므로 깊이가 깊어질수록 벽두께의 보정은 잘 되지 않고 있다. 식 (3)을 이용한 벽두께를 계산하면 a값이 증가될 경우 벽 두께는 $a^{4/3}$의 비로 증가되어야 하나 식 (1)에서는 a가 증가할수록 C값이 줄어들어 결국 벽 두께는 $a^{4/3}$비율보다 작게 증가된다.

지금까지 사용되었던 수식은 외팔보의 수식을 사용하면서 l/a에 따라 즉, 금형의 기하학적 형상에 따라 C 값을 적용하여서 단순한 외팔보의 수식을 보정하고 있다. 그러나 깊이가 깊은 금형일 경우에는 적절하지 못한 C 값으로 인해 벽두께의 적절한 설계가 이루어지지 못하고 있다.

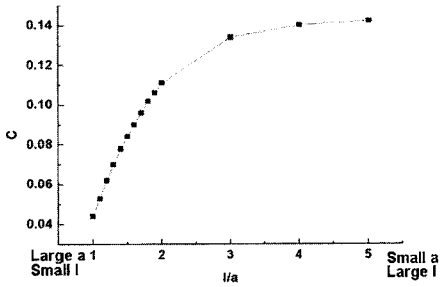
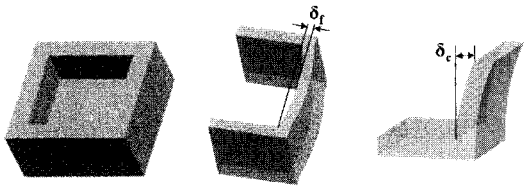


Fig. 1 Variation of C in equation (1) according to l/a

2.2 금형의 기하학적 특성 분석

사출 성형용 금형을 단순화 하여 보면 Fig. 2 와 같이 구분할 수 있다. Fig. 2(a)는 일체형 박스 형태의 간단한 금형을 나타낸 것이다. 이 금형에서 벽면만을 떼어서 보면 Fig. 2(b)와 같이 양단 고정보로 가정할 수 있으며, 밑면과 벽면을 떼어서 보면 Fig. 2(c)와 같이 아래 면이 고정되어 있는 외팔보로 가정할 수 있다.

금형의 Fig. 2(b)와 같이 한 벽면을 양단 고정보로 가정을 할 경우, 금형에서는 바닥 면이 존재하므로 실제로는 양단 고정보보다 과도한 구속이 존재한다. 그리고 Fig. 2(c)와 같이 외팔보로 가정할 경우에도 금형의 밑면 외에 벽 양단에서 고정해주는 면이 있으므로 실제 금형에서는 외팔보와 비교했을 때 두 벽의 구속이 과도하게 작용된다.



(a) Mold (b) Two points bending (c) Cantilever

Fig. 2 Mold cavity and simplified cases for calculation deformation

위의 두 경우를 통해 금형에서 발생하는 변형, 즉 금형의 처짐은 양단 고정보의 처짐량과 비례하며($\delta_{total} \propto \delta_f$), 외팔보의 처짐량과도 비례한다($\delta_{total} \propto \delta_c$). 또한 금형에서 발생하는 처짐량은 양단 고정보의 처짐량과 외팔보의 처짐량의 합과도 비례한다고 볼 수 있다($\delta_{total} \propto \delta_f + \delta_c$). 그러므로 양단 고정보와 외팔보의 처짐량을 모두 고려한 새로운 수식이 필요하다. 다음 식 (4)는 양단 고정보에서의 처짐량이다[4].

$$\delta = \frac{q \cdot l^4}{384EI} = \left(\frac{12}{384}\right) \cdot \frac{p \cdot l^4}{E \cdot h^3} \qquad (4)$$

2.3 금형의 기하학적 형상에 따른 변형

양단 고정보의 처짐과 외팔보의 처짐 중 어느 것이 금형의 처짐에 많은 영향을 미치는지 알아보았다. 이를 위해 Fig. 3 과 같이 단순한 형태의 금형에서 l 또는 a 를 변화하여 모델링 한 후 구조해석을 진행하였다. 구조해석은 전용 CAE 프로그램인 ABAQUS(Version 6.6)를 이용하였으며 기준 처짐량은 0.03mm(ABS 수지 [5]), 캐비티 내의 압력은 80MPa([6]), 영률은 2.0×10^5MPa(STAVAX 재료)를 사용하였다.

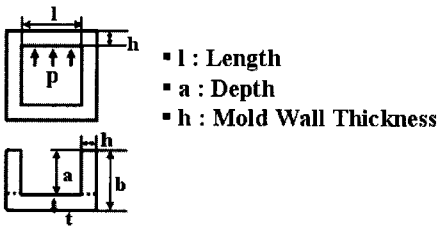


Fig. 3 Dimension of mold

캐비티의 크기는 l=300mm, a=150mm 이며 벽두께는 기존의 방법인 식 (2)를 적용하여 90.8mm 로 하였다. l 과 a 는 각 경우 별로 하나의 요인만 변화시켰으며 범위는 l/a 를 기준으로 0.1~10 까지 적용하였다. 위의 금형을 이용하여 해석의 처짐량($\delta_{simulation}$)과 단순한 양단 고정보 식 (δ_f) 과 외팔보 식 (δ_c)으로 계산된 처짐량을 비교해 보았다.

Fig. 4 는 길이 l 을 변화시켰을 때의 계산 결과이다. 해석의 처짐량은 외팔보의 계산 결과보다 양단 고정보의 계산 결과와 비슷한 경향을 갖고 있다. l 이 450mm 이상인 경우에 계산의 처짐량이 해석의 처짐량보다 커지므로 l/a 가 3 이상일 때 금형의 처짐은 양단 고정보의 처짐으로 계산하는 것이 유리하다고 판단된다.

Fig. 5는 깊이 a를 변화시켰을 때의 결과이다. 이 때의 해석의 처짐량은 외팔보의 계산 결과와 유사한 경향을 가졌다. a가 150mm 이상이 되면 외팔보 식으로 계산된 처짐량이 금형의 처짐량보다 커지게 된다. 따라서 l/a가 2 이하가 될 때 금형의 처짐은 외팔보의 처짐으로 계산하는 것이 유리하다고 판단된다.

위의 해석 결과와 같이 금형의 처짐은 양단 고정보의 처짐이나 외팔보의 처짐의 경향을 모두 가지고 있다. 그러므로 금형의 벽두께 설계 식은 양단 고정보와 외팔보의 결합으로 이뤄지는 것이 타당하다고 판단된다.

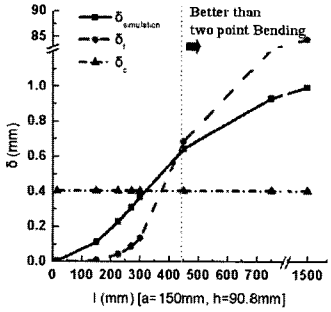


Fig. 4 Variations of deflection for various mold length, l

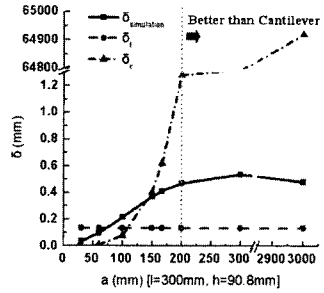


Fig. 5 Variations of deflection for various mold depth, a

3. 새로운 측벽 계산 방법

3.1 새로운 측벽 계산식 유도

금형에서 l이 매우 길 경우는 양단 고정보로 가정할 수 있으며 이때의 처짐을 δ_f 라 한다. a가 매우 깊을 경우는 외팔보로 가정할 수 있으며 이때의 처짐은 δ_c로 한다. 적정한 l과 a일 때의 금형의 처짐은 식 (5)와 같이 양단 고정보와 외팔보의 식을 결합해서 표현한다.

$$\delta_t \propto x \cdot \delta_f + (1-x) \cdot \delta_c \qquad (5)$$

여기서 x 는 금형의 형상에 따라 양단 고정보와 외팔보의 비중을 정하는 값으로 외팔보 일 경우 x 는 0, 양단 고정보일 경우에는 x 는 1 이다. 식 (5)에 비례상수 y 를 이용하여 식 (6)이 유도하였다. 이 때의 y 는 실제 금형의 처짐량 (δ_t)과 간단한 보 이론으로 양단 고정보와 외팔보의 합으로 계산된 변형과의 차이를 보정해주기 위한 계수 역

할을 한다.

$$\delta_t = y \cdot [x \cdot \delta_f + (1-x) \cdot \delta_c] \quad (6)$$

x 는 l/a 에 따라 선형함수로 가정할 수 있다. 이 때 l/a 의 범위에 따라 x 값이 변하고 계산되는 벽두께 값도 변하게 된다. 식 (7)은 l/a 의 범위를 0.1 과 10 사이로 가정하였을 때의 x 이다. 이 때 l/a 가 0.1 인 경우는 외팔보로 간주하여 x 가 0 이고, l/a 가 10 인 경우는 양단 고정보로 간주하여 x 가 1 이다.

$$x = c_1(l/a) + b \quad (7a)$$

$$x = \frac{1}{9.9} \times l/a - \frac{0.1}{9.9} \quad (7b)$$

y 는 x=0 이면 외팔보로 가정되어 식 (8)와 같으며, x=1 이면 양단 고정보로 가정되어 식 (9)와 같다. 이 때 δ_t 는 금형의 실제처짐량이며 본 논문에서는 구조해석을 통해 구한 처짐량을 이용하였다.

$$\delta_t = \delta_c \times y \rightarrow \delta_t = \delta_c \times y_c \quad (8)$$

$$\delta_t = \delta_f \times y \rightarrow \delta_t = \delta_f \times y_, \quad (9)$$

이 때 y 를 x 에 따른 선형 함수로 가정한다면 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$y = (y_f - y_c)x + y_c \quad (10)$$

위의 식을 종합하면 δ_t 는 식 (11)과 같이 전개된다.

$$\delta_t = [(y_f - y_c) \cdot x + y_c] \cdot [x \cdot \delta_f + (1-x) \cdot \delta_c] \quad (11)$$

새로운 벽두께 계산식을 유도할 때 식 (8), (9)에서 구조해석에서 얻어진 처짐량을 이용하였다. 구조해석에서 구해진 처짐량은 실제 금형에서 얻어진 처짐량과 비교하였을 때 차이가 발생할 수 있으므로 이 차이를 보상하기 위해 안전계수 (Safety Factor, SF)를 고려하였다. 안전계수는 상수로, 벽두께 수식에 적용할 때 $\delta_{simulation}$ 에 곱하며 SF 가 증가하면 벽두께도 증가된다.

최종 유도된 수식은 식 (11)과 같다. 이 때 x 와 y 는 l/a 의 범위와 $\delta_{simulation}$, 그리고 안전계수 (Safety Factor, SF) 값에 따라 결정되며 x 와 y 가 변화되면 벽두께 값도 변화한다.

3.2 새로운 측벽 계산식 적용

금형을 깊이에 따라 총 4 개의 그룹으로 분류하

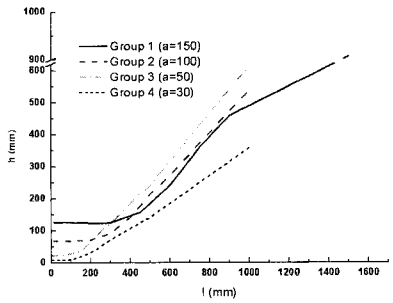


Fig. 6 Profiles of mold wall thickness for l/a=0.5~5, SF = 2

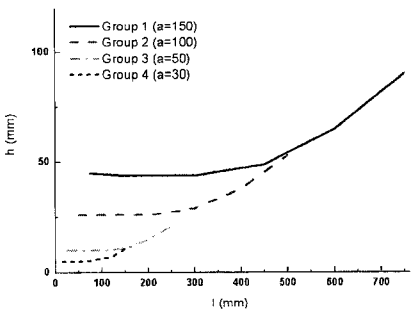


Fig. 7(a) Profiles of mold wall thickness for same y, l/a=0.1~10, SF = 1

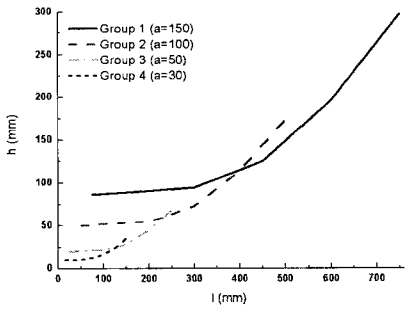


Fig. 7(b) Profiles of mold wall thickness for same y, l/a=0.5~5, SF = 1

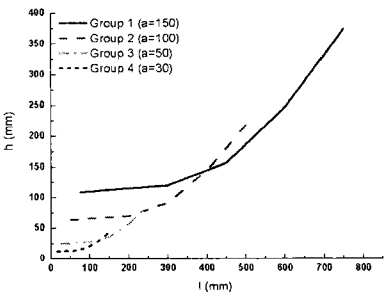


Fig. 7(c) Profiles of mold wall thickness for same y, l/a=0.5~5, SF =2

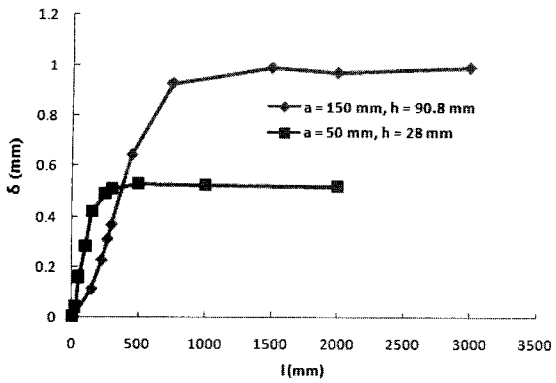


Fig. 8 Maximum deflections according to mold size for thickness 90.8mm and 28mm

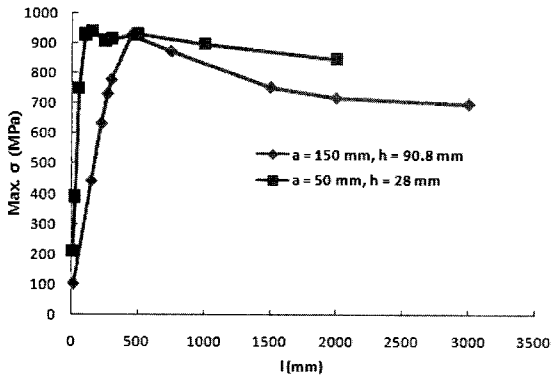


Fig. 9 Maximum stresses according to mold size for thickness 90.8mm and 28mm

여 새로운 계산 식을 이용하여 벽두께를 계산하였다. l=300mm, h=90.8mm을 기준으로 깊이에 따라 Group 1은 a=150mm, Group 2는 a=100mm, Group 3은 a=50mm, Group 4는 a=30mm로 구별하였다.

벽두께 계산 결과는 Fig. 6 과 같다. 그래프를 살펴보면 계산 결과 같은 길이의 금형에서 깊이가 더 얕을수록 벽두께가 더 두껍게 계산되었다. 이는 각 깊이에 따라 계산된 y 값이 다르기 때문이며 이를 보완하기 위하여 4 가지 그룹의 평균값을 이용하여 동일한 y 값을 이용하였다.

Fig. 7 은 동일한 y 값을 이용하여 l/a 의 범위를 2 가지로 변경하고 SF 를 변화시켜서 계산된 벽두께를 보여주고 있다. Fig. 7(c)의 결과, 즉 l/a=0.5~5, SF=2 일 때의 값이 적절한 금형 벽두께를 예측할 수 있다고 판단된다.

그러나 l 이 길어질 경우 과도하게 벽두께가 계산되었다. 따라서 길이의 변화에 따라 최대 처짐량과 최대 응력의 경향을 비교하기 위해서 구조해석을 진행하였다. 금형의 크기는 식(2)를 이용하여 a=150mm, h=90.8mm 과 a=50mm, h=28mm 의 두 가지 크기의 금형을 기준으로 금형의 길이 l 을 변화시켜 구조 해석을 진행한 후 결과를 비교하였다. Fig. 8 은 금형의 크기에 따라 나타나는 변형량 이다. 두께가 h=90.8mm 와 h=28mm 인 경우 모두 길이 l 이 작은 영역에서는 길이의 증가에 따라 처짐이 증가하지만 길이가 어느 정도 이상이 되면 처짐량에 변화가 없다. Fig. 9 는 금형의 크기에 따른 최대응력의 결과이다. 변형량의 추이와 마찬가지로 금형의 크기가 작은 경우에는 금형의 크기가 커짐에 따라 최대응력이 증가하나 금형의 크기 즉, 금형의 길이 l 이 어느 값 이상이 되면 최대응력이 오히려 감소한다. 이를 통해 금형의 길이 l, 즉 l/a 이 어느 이상에서는 벽두께의 증가가 없어도 안전할 것으로 판단된다.

이상과 같은 모든 상황을 고려하여 결정한 벽두께를 위한 최종 식은 다음과 같다.

$$\delta_l = [(y_f - y_c)\cdot x + y_c]\cdot[x\cdot\delta_f + (1-x)\cdot\delta_c] \quad (12)$$

여기서 x는 $(1/4.5)\times(l/a)-0.11$, y_c는 0.129, y_f는 0.398이며 SF는 2이다. l/a<1 일 경우에는 l/a = 1일 때의 벽두께 사용하고 l/a≥4 일 경우에는 l/a = 4일 때의 벽두께를 사용한다. 이렇게 최종 식으로 계산된 벽두께는 Fig. 10와 같다

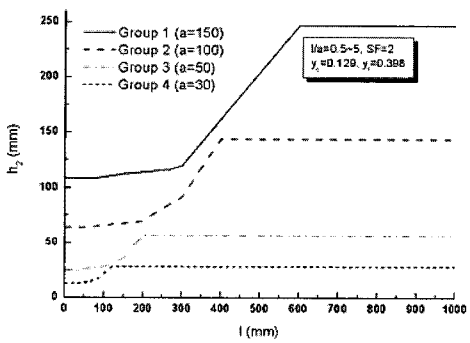


Fig.10 Wall thickness according to the equation (12)

3.3 새로운 측벽 계산식의 검증

새로운 측벽 계산식을 검증하기 위해 기존의 수식과 새로운 수식으로 벽두께를 계산하여 구조해석을 진행하였다. 각 그룹별로 l/a가 4, 5 그리고 와 7인 경우의 금형을 설계하여 구조해석을 진행하였으며 구조해석에서 나온 결과 중 최대 응력

과 재료의 피로한도(STAVAX, 830MPa)를 비교하였다. 이 때 기존의 수식으로 계산된 벽두께를 h_1이라 하였고 새로운 수식에서 계산된 벽두께를 h_2라 하였으며 각 경우 나온 최대 응력을 h_1 Maximum Stress, h_2 Maximum Stress로 표시하였다. Table 2는 해석 결과를 보여주고 있다.

Table 2를 보면 새로운 수식을 이용한 두께에서 최대응력이 크게 감소되었으며 해석 시 고려한 금형 재료의 피로한도 보다 훨씬 작은 응력을 보여 안전한 상태임을 알 수 있다.

금형의 안전성을 고려하였을 때 위의 결과로 보아 새로이 제시된 금형 벽두께 설계 식은 기존의 벽두께 설계 식보다 안전하다고 판단된다. 그리고 새로운 벽두께 설계 식은 사출 금형의 벽두께 설계 시 유용하게 쓰일 수 있다고 판단된다.

Table 2 Comparison of maximum Stress between h_1 in equation (2) and h_2 in equation (12)

Group	No.	l (mm)	a (mm)	l/a	h_1 (mm)	h_1 Max.σ (MPa)	h_2 (mm)	h_2 Max.σ (MPa)
Group 1 (a=150 mm)	1	600	150	4	98	-	247	239
	2	750	150	5	99	763	247	222
	3	1050	150	7	99	678	247	209
Group 2 (a=100 mm)	1	400	100	4	57	-	144	272
	2	500	100	5	57	923	144	262
	3	700	100	7	57	835	144	262
Group 3 (a=50 mm)	1	200	50	4	23	-	57	399
	2	250	50	5	23	1331	57	407
	3	350	50	7	23	1174	57	383
Group 4 (a=30 mm)	1	120	30	4	11	-	29	528
	2	150	30	5	12	1543	29	493
	3	210	30	7	12	2077	29	459

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 금형의 벽두께 수식은 외팔보의 수식에서 C라는 상수를 이용하여 금형의 기하학적 형상을 고려하였다. 그러나 깊이가 깊은 금형일 경우 C 값이 적절하지 못해 충분한 벽두께 설계가 이뤄지지 않았다.

(2) 금형의 한 벽면은 양단 고정보와 외팔보로 구성되어 있다. 그러므로 금형의 변형은 이 두 가지를 고려해야 한다.

(3) 새로 유도된 벽두께 수식은 양단 고정보와 외팔보를 모두 고려하여 완성되었으며 계산되는 값은 l/a의 범위와 SF에 따라 변화한다.

(4) 금형의 크기가 작은 범위에서는 금형의 크기 변화가 최대 처짐량과 최대 응력에 영향을 많이 미치나 크기가 어느 이상이 되면 금형의 크기에 관계없이 일정하거나 작아지는 경향을 보인다.

(5) 새로운 수식으로 계산된 벽두께로 설계된 금형을 구조해석 한 결과 최대 응력이 재료의 피로한도 이내였다. 위의 결과로 보아 금형의 벽두께 설계 식은 안전하며 앞으로 벽두께 설계 시 유용하게 쓰일 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

[1] Osswald, Turng, Gramann, 2002, Injection Molding Handbook, USA, Hanser, p. 294.

[2] S. H. Choi, M.-Y. Lyu, D. W. Kim, S. Y. Kim, K. S. Shin, K. Y. Kim, 2008, A structural analysis of deep depth injection mold to investigate the cause of crack, The Korean Society for Technology of Plasticity, Korea, Society's Spring Meeting, pp. 297~300.

[3] D. V. Rosato, D. V. Rosato, 1995, Injection Molding Handbook Second edition, USA, Champman & Hall, p. 346.

[4] J. M. Gere, 2004, Mechanics of materials, 6th Edition, USA, Tomson Learning.

[5] N. H. Shin, K. D. Lee, 1991, Korea, Korea Industrial Information Center, p. 128.

[6] D. Kim, 2008, An analysis of cavity pressure for various injection molding conditions, The Korean Society for Technology of Plasticity, Korea, Society's Spring Meeting, pp. 293~296.