

< 논문 >

초미세발포 플라스틱 기어에 관한 연구 (I)

- 초미세발포 플라스틱 기어의 공정설계 -

정 태 형[†] · 하 영 욱^{*}

(2004년 9월 3일 접수, 2005년 3월 14일 심사완료)

Injection Molded Microcellular Plastic Gear (I)

- Process Design for the Microcellular Plastic Gear -

Tae Hyong Chong and Young Wook Ha

Key Words : Gear(기어), Microcellular Plastic Gear(초미세발포 플라스틱 기어), Fatigue Strength(피로 강도), Gear Accuracy(기어 정밀도), Thermodynamic Instability(열역학적 불안정성), Nucleation(핵생성), Cell Growth(셀성장), Counter Pressure(카운터프레셔)

Abstract

This research proposes a process design of injection molded microcellular plastic gears for enhancing the fatigue strength/durability and accuracy of the gears applying thermodynamic instability to microcellular foaming process. To develop the injection molded plastic gears by way of microcellular process, it is absolutely necessary the following two process design. The first is microcellular foaming process for enhancing the strength/durability of plastic gears. To be microcellular process succeeded, based on the microcellular principle, mechanical apparatus is designed where nucleation and cell growth are to be generated renewably. The second is the counter pressure process which is mainly for improving the tooth surface roughness and the accuracy of microcellular gears. For the former process, screw, nozzle and gas equipment are newly designed, and for the latter, counter pressure by nitrogen gas is intentionally brought about into mold cavity when injecting plastic gears. Based on the proposed process design, using gear mold, experiments of injection molding show that, in internal space of plastic gears, microcellular nuclear cells less than 5 μ m in diameter have been generated homogeneously via electron microscope photos.

기호설명				
C_{eq}	: 용해가스의 농도	[cm ³ /g]	η	: 폴리머/가스의 점도 [Pa·s]
p	: 압력	[Pa]	$\dot{\gamma}$: 전단률 [s ⁻¹]
T	: 온도	[°C]or[K]	C_p	: 일정압력하에서의 비열 [kJ/kg·K]
T_D	: 확산시간	[s]	k	: 열전도 계수 [W/m·K]
L_D	: 확산거리	[cm]	m_r	: 유체 특성 상수 [N·s ⁿ /m ²]
D	: 확산계수	[cm ² /s]	a	: 유체 특성 무차원 상수
R	: 이상기체상수	[J/mol·K]	D_s	: 스크류 직경 [m]
ΔE_D	: 확산 활성화에너지	[J/mol]	L_s	: 스크류 길이 [m]
v	: 속도벡터	[m/s]	r_o	: 노즐 반경 [m]
ρ	: 밀도	[kg/m ³]	L	: 노즐 길이 [m]
t	: 시간	[s]	q	: 체적유량 [m ³ /s]
			Fm_s	: 발포배율 [%]

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : thchong@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0458 FAX : (02)2296-4799

^{*} 한양대학교 대학원 기계설계학과

1. 서론

열가소성폴리머를 이용한 플라스틱 기어는 사출 성형으로 제작한다.⁽¹⁾ 플라스틱 기어의 사출 후에 발생하는 불균일한 수축은 기어 정밀도를 저하시

기고 진동 및 소음 발생의 원인이 된다. 이에 기여 정밀도 향상을 위한 금형 설계법과 해석 및 실험을 통한 설계 이론 확립을 위한 노력이 플라스틱 기어 연구자에 의해 활발히 이루어져 왔다.^(2,3) 그러나 정밀도 향상을 위한 설계적 측면에서의 노력에도 불구하고 아직도 많은 문제점들이 있다. 기어와 같은 축대칭 원주상의 플라스틱 제품을 성형함에 있어서는 기어의 중심점에 게이트를 설계하는 것이 치수 안정성, 균일한 유동속도 및 수축에 바람직하나, 기어는 중심점에 축이 존재하므로 게이트를 설계할 수 없다. 또한, 강도적인 측면에서 플라스틱은 금속 재료와 비교하여, 인장강도와 굽힘강도는 강의 약 1/8~1/10이며, 탄성계수는 강의 약 1/70~1/100이다. 기계적 특성도 온도 상승에 따라 저하되므로 강도에 대한 신뢰성을 확보하는 것이 필수적이다.

플라스틱 제품의 강도를 향상시키기 위한 새로운 접근 방법이 초미세발포(microcellular foaming)이다. 그러나, 초미세발포는 주로 생산성 향상과 원재료 절감을 목적으로 압출 공정에서의 연구가 이루어졌으며,⁽⁴⁾ 사출에서의 연구는 아직도 미비한 실정이다. 특히, 사출 성형 플라스틱 기어에 있어서는 초미세발포와 관련된 연구 사례가 없어 기초 기술이 부족한 현실이다. 따라서, 초미세발포 기어를 개발하기 위해서는 새로운 개념의 초미세발포 공정 설계 기술이 도입되어야 한다. 즉, 카운터프레스로써 이끝원에서의 균일한 유동을 유발하여 정밀도를 향상시키고, 치면거칠기 문제를 해결하여야 한다. 즉, 사출 공정에서 기어의 내부에 초미세발포가 이루어질 수 있도록 공정설계를 수행해야 하는 한편, 강도를 향상시키는 초미세발포 플라스틱 기어의 특성 및 개발에 관한 연구가 반드시 필요하다.

따라서, 본 연구는 플라스틱 기어의 정밀도와 피로강도 향상을 목적으로 카운터프레스 초미세발포 기어를 개발하기 위한 공정 설계를 제시하고자 한다.

2. 초미세발포 플라스틱

발포(foaming)는 폴리머 내부에 미세한 크기를 갖는 많은 기포들이 생기도록 하는 기술을 말한다. 그러나, 발포 기술은 충격 강도(impact strength)와 인성(toughness)과 같은 기계적 성질이 저하되므로 강도를 요하는 구조물에는 사용될 수 없었다. 또한, 발포시 사용되는 발포제(foaming agency)는 환경에 유해한 프레온이나 부탄 등으로 사용이 제한되고 있다. 이러한 단점들을 개선하여 장점들을

활용하기 위한 초미세발포 기술이 1980년대 미국 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 개발되었다.⁽⁵⁾ 초미세발포는 발포제인 가스를 물리적으로 폴리머에 용해되도록 한 후 열역학적 불안정성을 이용하여 기포를 생성시키는 방법이다.

2.1 핵 생성과 셀 성장

Fig. 1과 같이 초미세발포에 의해 만들어지는 제품은 그 내부에 수 없이 많은 기포들이 존재하는 특징을 갖는다. 따라서, 초미세발포로 성형된 폴리머 재료는 높은 인성, 높은 충격강도, 높은 피로수명, 높은 열적안정성, 낮은 열전도율을 가진다.⁽⁶⁾ 초미세발포의 첫번째 단계는 이산화탄소나 질소와 같은 기체를 폴리머 재료 내부로 용해시키는 것이다. 고압 상태인 가스와 폴리머는 기체 농도 차이에 의하여 가스가 폴리머 내부로 용해된다. 용해되는 가스의 농도(C_{eq})는 식 (1)과 같이 압력(p)와 온도(T)의 함수로 표시할 수 있다.

$$dC_{eq} = dC_{eq}(P, T) = \left(\frac{\partial C_{eq}}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial C_{eq}}{\partial T}\right)_P dT \quad (1)$$

두번째 단계는 수십억 개의 초미세 기포들의 급속한 핵(nucleus) 생성이다. 핵 생성은 열역학적 불안정성(thermal instability)에 의해 생겨난다. 열역학적 불안정성은 계에 갑작스런 변화가 생겨 자유에너지가 증가된 상태를 말한다. 즉, 외부의 온도와 압력의 영향에 의하여 자유에너지가 증가되면 초기의 낮은 자유에너지 수준으로 되돌아가게 되는 과정에서 발생하는 에너지를 이용한 것이 발포이다. 열역학적 불안정성은 가스의 용해도를 급격히 낮춤으로써 가능하다. 가스의 용해도는 온도와 압력의 함수로써 상호관계를 Fig. 2와 같이 도시할 수 있다. 초미세발포에서 수십억 개의 초미세 기포들을 만들기 위해서는 용해도가 강하되도록 압력을 낮추고 온도를 높여야 한다. Fig. 2에서 가스로 포화된 상태를 C라 하면 압력

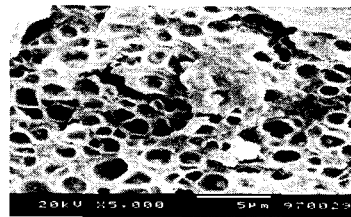


Fig. 1 Scanning electron micrograph(SEM) of a microcellular foaming

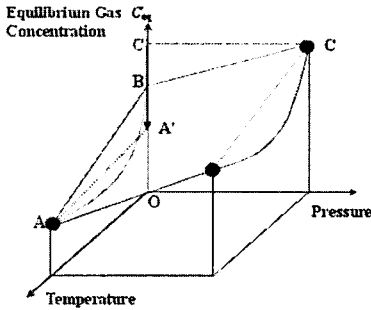


Fig. 2 Three-dimensional diagram of solubility-pressure-temperature relations

을 제거한 후의 상태는 B가 된다. 또한, 온도를 높이면 A상태에 도달하게 된다. 이러한 각각의 상태를 급격하게 변화시키면 열역학적 불안정상태를 안정상태로 바꾸기 위하여 폴리머 내부에서 발포가 일어나게 된다. 마지막 단계는 초미세발포의 셀(cell) 성장이다. 생성된 핵을 성장시키면서 전체 밀도를 낮추기 위해 폴리머/가스는 유리전이온도 이상으로 가열된다. 열에 의해 폴리머 재료 내부의 사슬간 결합력이 작아지면 가스가 확산되어 셀이 성장한다.

2.2 가스 혼합과 확산

초미세발포를 연속 공정인 사출 성형으로 생산하기 위해서는 적당량의 폴리머와 가스가 혼합되어야 한다. 폴리머/가스가 혼합상(mixed phase)에서 단일상(single phase)인 등방성(homogeneous)으로 형성되는 것은 가스 확산(diffusion)의 지배를 받는다. 폴리머내에서의 가스 확산은 매우 천천히 진행된다. 열가소성 폴리머내에서 이산화탄소의 확산계수(diffusion coefficient)는 상온에서 약 $5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 정도이다. 가스가 0.5mm 확산되는데 소요되는 확산시간(T_D)는 식 (2)에 의해 예측할 수 있다. 즉, 1mm 두께의 시편이 가스에 포화되기 위해서는 대략 14시간이 걸린다는 것을 의미한다.^(7,8)

연속 공정에서 초미세발포로 플라스틱을 성형하기 위해서는 빠른 폴리머/가스의 혼합 기술이 필요하다. 빠른 혼합을 위해서는 확산 거리를 줄이고 확산계수를 증가시켜야 한다. 가스 확산계수(D)는 식 (3)으로 표현될 수 있다. 식 (3)에서 D_0 는 가스에 따른 확산계수 상수값을 나타낸다.

$$T_D \approx L_D^2 / D \approx 50,000\text{s} \approx 14\text{h} \quad (2)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{RT}\right) \quad (3)$$

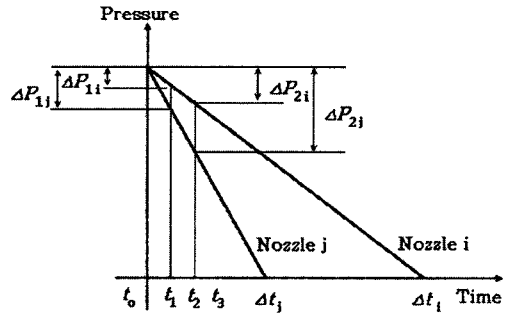


Fig. 3 Comparison of the pressure drop profiles for nozzle i and j

2.3 압력 강하와 용해도

초미세발포에서 압력 강하는 핵 생성과 셀 성장에 큰 영향을 주는 변수이다. 사출에서 압력 강하는 폴리머/가스가 노즐 선단에서 급형 캐비티로 주입될 때 발생되는 것으로, 노즐 설계에 있어서 중요한 설계 인자이다. 즉, 1GPa/s 이상의 큰 압력 강하율이 노즐내에서 이루어져야 초미세발포 셀의 밀도가 10^9 개/cm³ 이상이 된다.^(7,8) Fig. 3 은 노즐 i 와 노즐 j 에 대하여 서로 다른 압력 강하를 나타낸 것이다. 시간 t_0 에서 t_1 까지의 노즐 j 에 대한 압력 강하 ΔP_{1j} 는 노즐 i 에서의 압력 강하 ΔP_{1i} 보다 더 크다. 핵 생성률은 식 (1)에서와 같이 압력 강하 ΔP 의 함수로써, 노즐 j 에서의 핵 생성률은 노즐 i 에서의 핵생성률 보다 크며, 전체 핵 생성 시간은 노즐 j 가 노즐 i 보다 짧다. t_2 에서 t_1 에서 생성된 핵들이 추가적으로 생기는 핵들과 결합하여 셀로 성장하게 된다. 셀의 수는 시간이 경과함에 따라 기하급수적으로 증가하며, 주위의 불안정한 가스와 결합하여 성장한다. 상대적으로 많은 수의 핵을 생성한 노즐 j 가 노즐 i 보다 더 빠르게 결합하여 셀의 성장 속도가 빠르며 많은 수의 발포를 야기시키게 된다. 결론적으로 폴리머/가스 상태에서 핵 생성과 셀의 성장은 압력 강하에 의해 이루어지며, 연속 공정인 사출에서는 노즐의 길이와 직경을 설계하는데 있어서 빠른 압력 강하가 이루어질 수 있도록 해야 한다.

3. 초미세발포 플라스틱을 위한 실험 장치 설계

3.1 초미세발포 플라스틱을 위한 스크류 설계

스크류는 계량, 혼합, 사출의 역할을 하는 매우 중요한 부분으로서 폴리머의 특성에 따라 스크류

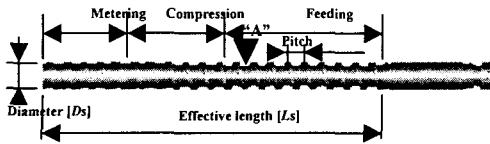


Fig. 4 Composition of the screw for injection molding (L_s/D_s ratio=25, Compression ratio=3, Volumetric ratio=2.65, Feeding depth=6mm, Compression depth=2 to 6mm, Metering depth=2mm)

의 길이에 대한 내경비(L_s/D_s)와 계량 깊이와 혼합 깊이의 비로 표현되는 압축비(compression ratio) 그리고 스크류 회전 속도 등에 따라 설계가 이루어진다.⁽¹⁰⁾ 스크류는 크게 계량부(metering zone), 압축부(compression zone), 혼합부(feeding zone) 세 영역으로 나누어지며 그 형상을 Fig. 4에 도시하였다.

혼합부는 스크류 전체 길이의 50%로 설계하였으며, 계량부는 전체 길이의 20%로 설계하였다. 초미세발포를 이용한 사출에서는 스크류의 압축부의 시작 부분부터 폴리머/가스가 충분히 혼합되도록 스크류의 일반적 사용 압축비인 2.1~2.5를 3으로 설계하여 배럴내에서의 짧은 체류 시간 동안 가스와 폴리머가 단일상이 될 수 있도록 하였다.

폴리머 펠렛이 혼합부를 통과할 때 혼합물을 높이기 위하여 압축부 시작점에서 24mm 전 위치한 Fig. 4의 “A”지점에 가스가 주입되도록 가스 공급 주입구를 설치하였다. 또한, 압축부의 피치는 14mm로 혼합부의 피치 38mm보다 이송속도가 늦어짐으로 이를 보완하기 위하여 압축부 스크류의 날을 두줄 나선형상으로 설계하여 많은 난류유동이 발생되어 혼합을 증가시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에 사용된 스크류는 기존 스크류의 내경비(L_s/D_s)를 15에서 25가 되도록 설계하였다. 또한, 추가적으로 강제 난류유동을 유발시켜 혼합율을 높일 수 있도록 스크류 계량부의 날을 60° 간격으로 잘라 설계하였다.

3.2 초미세발포 플라스틱을 위한 노즐설계

3.2.1 노즐내 유동에서의 압력강하

핵 생성률(nucleation rate)은 물리적으로 노즐을 통과할 때 생성되는 기포 핵의 개수를 의미한다. 핵 생성률을 좌우하는 노즐 변수로는 노즐 반경(r_0)와 길이(L)가 있으며, 폴리머/가스 유동에서 노즐의 반경과 길이 변화에 따른 압력변화 분석을 통해 압력 강하율과 용해도 강하율을 계산하여 그 결과로부터 노즐의 설계 변수 값인 반경과 길이를 결정하였다. 노즐내에서 유체 유동과 열전달을 표현하는 비점성유체에 대한 지배방정식은 식 (4)~(6)로 표현된다.⁽⁹⁾ 식 (4)~(6)은 각각 연속방정식, 운

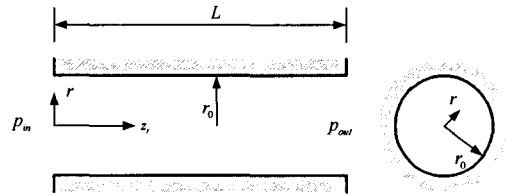


Fig. 5 Fluid flow in a circular nozzle

동방정식, 에너지방정식을 나타낸 것이다.

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{4}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + [\nabla \cdot \eta \dot{\gamma}] \tag{5}$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \frac{1}{2} \eta (\dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma}) \tag{6}$$

본 연구에서 반경이 r_0 이고 길이가 L 인 원형 노즐을 통과하는 폴리머/가스의 유동을 해석하기 위한 노즐의 설계 변수를 Fig. 5 에 나타내었다. 폴리머/가스의 점도는 전단율에 의존한다고 가정하여 지수(power-law) 모델에 의해 식 (7)과 같이 표현된다.⁽⁹⁾ 노즐의 임의 반경 r 에서 통과하는 유동의 경우는 식 (5)를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (8)에서 V_z 은 z , 방향의 속도분포를 나타낸다.

$$\eta = m_r \dot{\gamma}^{\left(\frac{1}{a}-1\right)} \tag{7}$$

$$\frac{dp}{dz_r} = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r m_r \left(\frac{dV_z}{dr} \right)^{1/a} \right] \tag{8}$$

경계조건은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} V_z(r_0) &= 0 \\ \frac{dV_z}{dr}(0) &= 0 \end{aligned} \tag{9}$$

식 (8)에 식 (9)인 경계조건을 적용하여 해석하면, 속도분포 V_z 은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$V_z(r) = \left(\frac{r_0}{a+1} \right) \left(-\frac{r_0}{2m_r} \frac{dp}{dz_r} \right)^a \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{a+1} \right] \tag{10}$$

폴리머/가스 용해의 체적유량 q 는 식 (11)과 같다.

$$q = \int_0^{r_0} V_z 2\pi r dr = \frac{\pi r_0^3}{a+3} \left[-\frac{r_0}{2m_r} \left(\frac{dp}{dz_r} \right) \right]^a \tag{11}$$

노즐의 길이에 대하여 식 (11)을 적분하면, 입구와 출구 사이에서 압력 차이 Δp 는 식 (12)와 같다.

$$-\Delta p = \frac{2m_r L}{r_0} \left[\frac{q(a+3)}{\pi_0^3} \right]^{1/a} \quad (12)$$

3.2.2 폴리아세탈의 압력강하와 체류시간

성형온도 조건인 200℃에서 폴리아세탈(POM: KEPITAL F20-03)의 유동을 적용 대상으로 하였다. 계산에 사용된 특성 계수는 $m_r = 2,229.3 \text{ N}\cdot\text{s}^{0.58}/\text{m}^2$, $a=1.72$ 이다. 따라서, 식 (12)는 식 (13)처럼 나타낼 수 있다.

$$-\Delta p = 5648.8 \left[\frac{L}{r_0^{2.74}} \right] q^{0.58} \quad (13)$$

노즐을 통과할 때 압력강하는 같은 유동에서는 동일하다. 비뉴턴유체에 대하여 식 (13)의 일반적인 형태는 식 (14)와 같다.

$$\frac{L}{r_0^{3(1/a)+1}} = \frac{-\Delta p}{2m_r} \left[\frac{\pi}{q(a+3)} \right]^{1/a} = \text{const.} \quad (14)$$

75ton 사출기로 사출시 노즐 선단의 압력인 25MPa에 대하여 체적유량은 식 (15)과 같다.

$$q = \left(\frac{-\Delta p}{5649 \frac{L}{r_0^{2.74}}} \right)^{1/0.58} = \left(\frac{25 \times 10^6}{5649 \times 2,384,386} \right)^{1/0.58} = 1.953 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \quad (15)$$

길이와 반경이 다른 3가지 노즐에 대하여 해석을 수행하였다. 즉, Nozzle 1; $L=15\text{mm}$, $r_0=1.5\text{mm}$, Nozzle 2; $L=7\text{mm}$, $r_0=1.0\text{mm}$, Nozzle 3; $L=5\text{mm}$, $r_0=0.75\text{mm}$ 이다. 길이 L 의 노즐에서 폴리머/가스 용해 유동의 평균체류시간 Δt 는 식 (16)과 같다.

$$\Delta t \approx \frac{L}{V_{\text{avg}}} = \frac{L}{\frac{q}{\pi_0^2}} = \frac{\pi_0^2 L}{q} \quad (16)$$

각 노즐에 대한 평균체류시간은 식 (17)과 같다.

$$\Delta t_1 \approx \frac{\pi_0^2 L}{q} = \frac{\pi(1.5 \times 10^{-3})^2(15 \times 10^{-3})}{1.953 \times 10^{-5}} = 5.429 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &\approx \frac{\pi_0^2 L}{q} = \frac{\pi(1 \times 10^{-3})^2(7 \times 10^{-3})}{1.953 \times 10^{-5}} = 1.126 \times 10^{-3} \text{ s} \\ \Delta t_3 &\approx \frac{\pi_0^2 L}{q} = \frac{\pi(0.75 \times 10^{-3})^2(7 \times 10^{-3})}{1.953 \times 10^{-5}} = 0.452 \times 10^{-3} \text{ s} \end{aligned} \quad (17)$$

3.2.3 압력 강하율과 용해도 강하율

노즐에서 압력강하율은 각각의 노즐에 대하여 체류시간의 차이가 있기 때문에 압력강하가 동일하여도 차이가 있다. 평균적인 압력강하율은 식 (18)과 같이 표현되며, 각 노즐의 압력강하율은 식 (19)와 같이 계산된다.

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{-\Delta p}{\Delta t} \approx \frac{-\Delta p q}{\pi_0^2 L} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{-dp}{dt} \right)_1 &= \frac{-\Delta p}{\Delta t_1} \approx \frac{25 \times 10^6}{5.429 \times 10^{-3}} = 4.065 \text{ GPa/s} \\ \left(\frac{-dp}{dt} \right)_2 &= \frac{-\Delta p}{\Delta t_2} \approx \frac{25 \times 10^6}{1.126 \times 10^{-3}} = 22.202 \text{ GPa/s} \\ \left(\frac{-dp}{dt} \right)_3 &= \frac{-\Delta p}{\Delta t_3} \approx \frac{25 \times 10^6}{0.452 \times 10^{-3}} = 55.259 \text{ GPa/s} \end{aligned} \quad (19)$$

가스용해도는 압력에 비례하므로 압력강하율이 크면 용해도 강하율도 크게 된다. 가스용해도 강하율은 식 (20)으로 표현된다.

$$\frac{dC_s}{dt} \approx \frac{\Delta C_s}{\Delta t} \approx \frac{\Delta C_s q}{\pi_0^2 L} \quad (20)$$

여기서, ΔC_s 는 폴리머에서 가스용해도의 변화이다. 각각의 노즐에 대하여 용해도 강하율은 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dC_s}{dt} \right)_1 &\approx \frac{\Delta C_s}{\Delta t_1} \approx \frac{0.1}{5.429 \times 10^{-3}} = 18.42 \text{ s}^{-1} \\ \left(\frac{dC_s}{dt} \right)_2 &\approx \frac{\Delta C_s}{\Delta t_2} \approx \frac{0.1}{1.126 \times 10^{-3}} = 88.81 \text{ s}^{-1} \\ \left(\frac{dC_s}{dt} \right)_3 &\approx \frac{\Delta C_s}{\Delta t_3} \approx \frac{0.1}{0.452 \times 10^{-3}} = 221.03 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에서와 같이 노즐의 용해도 강하율이 차이가 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 본 연구에서는 핵 생성물이 4GPa/s 이상되도록 반경 1.5mm, 길이 15mm로 설계하였다.

3.3 초미세발포를 위한 가스 공급장치의 설계

연속 공정인 사출에서 초미세발포를 적용하기 위하여 용융된 폴리머에 가스를 공급하여 폴리머/가스로 이루어진 단일상으로 만들어 주어야 한다. 폴리머의 계량시 배럴 내부의 압력은 15MPa 이상으로 상승한다. 그러나 발포제로 사용되는 이산화탄소나 질소가스의 용기내 압력은 각각 8MPa, 12MPa이기 때문에 용기의 압력보다 배럴내의 압력이 높아 가스를 주입할 수 없다. 따라서, 배럴내로 가스를 공급하기 위한 부가적인 장치가 필요하다. 즉, 가스 공급 장치와 고압 상태의 가스양을 제어할 수 있는 압축 부스터 장치를 설계하였다.

한편, 스크류의 회전시 발생하는 높은 압력에 의해 가스 주입시 폴리머가 역류하게 되어 가스 공급을 할 수 없게 된다. 따라서, 역류를 방지하고 가스 공급을 원활하게 해주는 가스 공급 홀을 설계하였다. 가스 공급 부위는 직경 0.3mm의 홀을 100개 이상 가공하여 고압으로 분사 주입될 경우, gas와 폴리머의 혼합 및 확산이 빨리 일어날 수 있도록 설계하였다. 가스 공급 홀은 배럴 주위에 4개소를 설치하여 각 부분에서 원활한 가스/폴리머 혼합이 이루어지도록 한다. 결과적으로 새로이 설계 제작된 스크류, 노즐, 가스 공급 장치를 기존의 사출기에 부가하여 초미세발포 사출기를 구성하였다.

4. 초미세발포 기어를 위한 카운터프레서 금형 캐비티 설계

플라스틱 기어의 경우 사출 후의 수축 때문에 정밀도를 유지하기 어려워 진동, 소음 발생 등의 원인이 된다. 따라서, 초미세발포 사출시 카운터프레서를 적용함으로써 제품 전반에 걸친 수축을 균일하게 하고 미세하게 하여, 플라스틱 기어의 정밀도를 높이는 방법을 제안한다. 또한, 초미세발포시 제품 외관표면의 문제점을 해결하기 위하여 카운터프레서를 적용한 초미세발포 기어 금형을 본 연구에서 제안한다.

카운터프레서(counter pressure)란 실링(sealing)이 된 금형 캐비티 면에 질소가스를 강제로 주입하여 폴리머의 흐름 방향과 반대 방향으로 압력을 가하는 것을 말한다. 카운터프레서의 압력은 기체 상태로 질소를 유지하기 위한 초임계 압력인 3MPa로 설정하였다. Fig. 6은 카운터프레서를 적용하기 위한 금형 캐비티의 개략도를 나타낸 것이다. Fig.

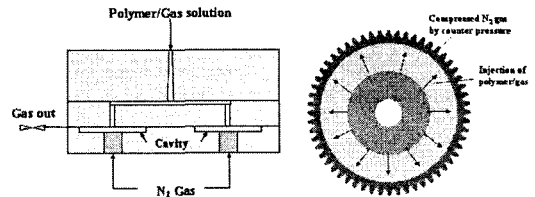


Fig. 6 Schematic diagram of proposed counter pressure mold

Table 1 Specification of microcellular plastic gear

Spur gear specification	Unit	Gear	Cavity gear
Module	[mm]	0.8	0.816
Number of teeth	-	56	56
Face width	[mm]	5	5.1
Pressure angle	[deg.]	20	20
Addendum modification coefficient	-	0	0
Fillet radius	[mm]	0.3	0.3
Corner radius of tooth tip	[mm]	0.3	0.3
Pitch circle diameter	[mm]	44.8	45.713

6의 좌측 그림에서 폴리머/가스가 캐비티내로 충전될 때 질소가스를 아래쪽에서 주입하면, 우측 그림과 같이 카운터프레서에 의해 압축된 질소가스층이 형성된다. 충진이 완료되는 시점에서 카운터프레서를 제거하면 기어 이끝원 선단까지 균일하게 충전된다. 이러한 원리로 기어의 냉각이 일정해지며 정밀도가 개선될 수 있는 것이다. 또한, 카운터프레서를 폴리머가 고화되는 시점에서 갑자기 제거하면 셀이 성장될 때 발생하는 발포력(foaming force)이 폴리머를 뚫고 캐비티 측벽까지 성장하지 못하여 표면거칠기가 향상되므로 초미세발포의 표면 문제점도 해결할 수 있다.

본 연구에서 제안한 카운터프레서를 초미세발포 기어에 적용하기 위해 모듈이 0.8인 기어 금형을 제작하였으며, 금형 캐비티 전체를 실링할 수 있는 설계와 카운터프레서의 주입 및 제거 시간을 조절하는 장치 등을 부가하였다. 기어의 제원과 수축률을 2% 적용한 캐비티 기어의 제원은 Table 1과 같다.

5. 카운터프레서 초미세발포 기어의 사출 성형

카운터프레서는 초미세발포시 발생하는 표면문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서 제안한 방법이다. 용융 폴리머는 75톤 사출기의 경우 캐비티내로 0.5초 내에 충진이 이루어진다. 사출시 폴리머(POM)의 경우 금형 표면의 온도는 60℃이며 용융 폴리머의 온도는 200℃이므로, 고온의 폴리머가 상대적으로 온도가 매우 낮은 금형 표면에 접촉되어 냉각이 이루어지게 된다. 그러나 카운터

프레스를 가하게 되면 폴리머가 사출되면서 금형 캐비티를 채우고 있던 질소가스를 압축하여 캐비티 벽면에 질소가스 층이 형성된다. 이것으로 인해 폴리머가 금형 표면에 직접 닿지 않아 폴리머의 고화가 상대적으로 늦게 진행된다. 따라서, 기존의 경우 충전시간을 0.5초라면 냉각으로 제품이 고화되는 시간은 11초 정도 소요되며, 카운터프레스를 가할 경우는 냉각시간이 11초 이상 소요될 수 있다. 카운터프레스를 가압한 상태에서 폴리머/가스를 캐비티 내에 사출한 후 사출 시작 신호는 사출기 내부의 컨트롤러(controller)에 전달되고, 보압이 완료되고 냉각이 시작되는 시점에서 카운터프레스용 질소가스를 캐비티로부터 제거하면 압력 강하가 발생하여 폴리머 내에 있던 가스들이 발포를 일으키게 된다.

Fig. 7은 사출시의 폴리머/가스가 충전되면서 카운터프레스가 작용되는 공정을 나타낸 것으로 “a” 단계는 질소가스로 캐비티 내의 공간을 채우는 단계이고, “b”는 폴리머가 캐비티 내로 사출되면서 질소가스가 압축되는 과정을 나타낸 것이다. 즉, 고압의 사출압력은 캐비티 내의 질소가스를 진공 상태로 압축하여 쿠션 층을 만들게 된다. “c”는 냉각 중에 가스를 제거하여 폴리머가 균일하게 캐비티에 충전되도록 하는 역할과 셀의 발포가 이루어질 수 있도록 2차 압력 강하가 이루어지는 단계를 나타낸 것이다. Fig. 8은 본 연구에 사용된 카운터프레스 장치를 설치한 초미세 발포용 사출 기계의 개략도이다.

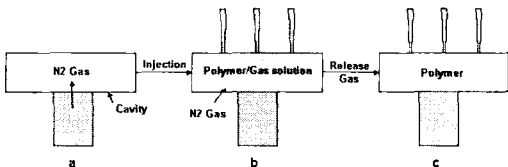


Fig. 7 Flow diagram of proposed counter pressure molding process

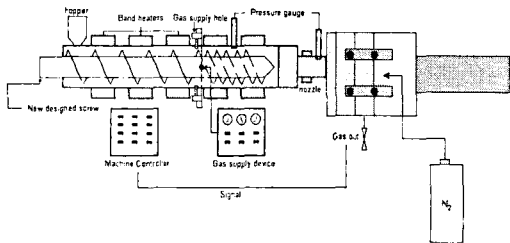


Fig. 8 Schematic diagram of test machine for micro-cellular plastic gear with counter pressure

6. 실험 및 결과

기어의 사출성형은 일반 사출 기어, 카운터프레스를 적용하지 않은 초미세발포 기어, 카운터프레스를 적용한 초미세발포 기어 3가지 경우에 대하여 성형을 수행하였다. 발포배율(Fm_g)은 발포시키지 않은 일반 사출시의 스크류 계량 위치(S_s)와 발포시의 스크류 계량위치(S_m)와의 차이에 대한 비로써, 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Fm_g = \frac{S_s - S_m}{S_s} \times 100 \quad (\%) \quad (22)$$

즉, 일반 사출시의 계량 스크류 위치인 26mm를 0%, 24mm를 10%, 22mm를 20%, 20mm를 35% 발포 배율이라 각각 정의하였다. 카운터프레스 초미세발포 기어는 스크류의 위치를 26mm로 하고 발포 배율은 0%로 하여 사출 조건을 설정하였다. 또한, 카운터프레스를 1초부터 5초까지 0.5초씩 증가시키면서 기어를 성형하였다.

수축 현상을 고찰하기 위하여 일반 사출 기어를 성형하여 이끝원 직경 치수를 측정하여 기준으로 하고 다른 조건을 모두 같게 놓은 다음 초미세발포 기어와 카운터프레스 초미세발포 기어를 성형하여 이끝원 직경 측정을 수행하였다. Table 2는 마이크로미터로 측정한 이끝원 직경을 나타낸다. 카운터프레스 초미세발포 기어의 카운터프레스의 시간 변화에 따라 수축의 영향으로 이끝원 직경이 변화됨을 알 수 있다. Table 2에서 SGear는 일반 사출 기어이며, MGear는 카운터프레스를 적용하지 않은 초미세발포 기어이며, CGear는 카운터프레스와 초미세발포를 적용한 기어를 나타낸 것으로 이하 이 약자로 설명하기로 한다. CGear뒤의 숫자는 카운터프레스를 적용한 시간을 의미한다.

카운터프레스의 시간을 1.5초부터 5초까지 변화시키면서 성형한 결과 카운터프레스를 너무 일찍 제거할 경우 SGear와 유사한 수축이 발생하였으며, 3.5초가 지나면 카운터프레스의 영향으로 수축량이 줄어들어 이끝원 직경이 크게 성형되었다. 이 원인으로 수축은 보압과 관련되므로 보압이 끝나는 시점에서 카운터프레스를 제거하면 압축된 질소가스 층이 캐비티의 기어 이끝 방향으로 팽창하면서 보압의 역할을 하기 때문에 수축이 줄어든 것으로 판단된다. 전자현미경으로 기어 단면을 촬영한 결과 Fig. 9와 같이 미세한 발포 셀들이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 10과 같이 치면거칠기를 측정한 결과 CGear가 MGear보다 치면거칠기가 향상됨을

Table 2 Measurement data of the gear outer diameter

Specimen No.	SGear	MGear							
		M0%	CP1.5s	CP2s	CP2.5s	CP3.5s	CP4s	CP5s	
1	46.10	46.08	46.07	46.09	46.10	46.14	46.18	46.16	
2	46.11	46.10	46.08	46.10	46.11	46.13	46.17	46.15	
3	46.10	46.09	46.09	46.10	46.10	46.15	46.18	46.15	
4	46.11	46.09	46.09	46.09	46.11	46.14	46.20	46.16	
5	46.12	46.08	46.08	46.10	46.11	46.14	46.18	46.17	
Average	46.11	46.09	46.08	46.10	46.11	46.14	46.18	46.16	
Shrinkage rate[%]	2.61	2.65	2.68	2.63	2.61	2.54	2.45	2.50	

*notes) SGear : Non-microcellular plastic gear
 MGear: Microcellular plastic gear without counter pressure
 CGear : Microcellular plastic gear with counter pressure
 M0% : Foaming magnitude 0% of the MGear
 CP(Number)s : Counter pressure time of the CGear

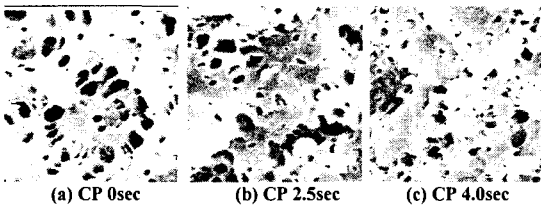


Fig. 9 Electron microscope of the microcellular plastic gear with counter pressure. (Size is below 5 μ m.)

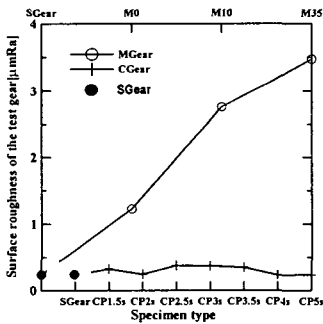


Fig. 10 Comparison of the roughness measurement data to microcellular gear(MGear) and microcellular gear with counter pressure(CGear)

검증하였다. 검증 결과 본 연구에서 제안한 사출에서의 초미세발포를 위한 공정 설계와 카운터프레서 급형을 이용한 공정 설계를 통하여 기어 이(tooth)에 균일한 초미세발포 셀의 형성과 치면거칠기의 문제점이 해결됨을 검증하였다.

7. 결론

본 연구에서는 초미세발포 플라스틱 기어의 사출 성형에 필수적인 공정설계를 제안하고 정밀도와 내구성 향상을 위한 카운터프레서 초미세발포

기어를 개발한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 플라스틱 기어의 사출 성형시 초미세발포가 이루어질 수 있도록 스크류, 노즐, 가스공급장치에 대한 공정 설계를 수행하였다.

(2) 일반적인 초미세발포의 문제점인 표면거칠기와 기어의 정밀도를 향상시키기 위하여 새로운 카운터프레서 공법을 제안하였다.

(3) 카운터프레서 초미세발포 플라스틱 기어의 사출 성형한 결과는 전자현미경 촬영을 통하여 기어 이(tooth) 내부에 5 μ m 미만의 초미세 발포셀들이 균일하게 분포되어 성형되었음을 검증할 수 있었다.

(4) 기어 치면의 표면거칠기에 대하여 카운터프레서를 가하지 않고 성형한 초미세발포 기어의 치면거칠기의 문제점을 카운터프레서 공정으로 완전히 해결할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Macdermott, C. P. and Shenoy, A. V., 1997, *Selecting Thermoplastics for Engineering Application*, 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc., New York.
- (2) Tsukamoto, N., Maruyama, H. and Terashima, K., 1990, "Fundamental Characteristics of Plastic Gears Made of Thermoplastic Resin Filled with Various Fibers," *JISME International Journal*, Series C, Vol. 33, No. 4, pp. 590~596.
- (3) Shoji, A., Nogami, M. and Satho, I., 1996, "Studies on the Strength of Injection Molded Plastic Gears," *Power Transmission and Gearing Conference, ASME* Vol. 88, pp. 739~744.
- (4) Park, C. B. and Suh, N. P., 1993, "Extrusion of Microcellular Polymers Using a Rapid Pressure Drop Device," *Society of Plastic Engineers Technical Papers*, Vol. 39, pp. 1818~1822.
- (5) Martini, J., Suh, N. P. and Waldman, F. A., 1982, "The Production and Analysis of Microcellular Thermoplastic Foam," *Proceeding of the SPE ANTEC*, Vol. 28, pp. 674~676.
- (6) Seeler, K. A. and Kumar, V., 1993, "Tension-Tension Fatigue of Microcellular Polycarbonate: Initial Results," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 12, pp. 359~376.
- (7) Park, C. B., Baldwin, D. F. and Suh, N. P., 1993, "Cell Nucleation by Rapid Pressure Drop in Continuous Processing of Microcellular Plastics," *Proceeding of ASME*, New Orleans, LA.
- (8) Durril, P. L. and Griskey, R. G., 1966, "Diffusion and Solution of Gases in Thermally Softened or Molten Polymers: Part 1," *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1147~1151.
- (9) Peter, K., 1995, *Flow Analysis of Injection Molds*, Hanser and Gardner Publications, Inc. pp. 6~107.