

리니어모터식 사출성형기의 반력문제 및 노즐터치기구

방 영봉*, 伊藤 進**

Inertia Force Problem and Nozzle Contact Mechanism of Linear Motor Drive Injection Molding Machine

Young-bong Bang*, Susumu Ito**

ABSTRACT

This paper presents the inertial force problem of ultrahigh-speed injection molding machine using linear motors, and presents its solutions. To make very thin products by injection molding, very high injection speed is required, and linear motors are used for this purpose. But direct drive by linear motors may cause brief nozzle separation from the sprue bushing because of the inertia force as large as the total output thrust of the linear motors, and this momentary separation can cause molten plastic leakage. In this paper, two solutions are proposed for this inertia force problem. One is the mechanical cancellation of the inertia force, and the other to increase the nozzle contact force. With the latter solution, the stationary platen bending worsens, so a new nozzle contact mechanism is also proposed, which can prevent the stationary platen bending.

Key Words : Inertia force (관성력), Linear motor(리니어모터), Injection molding(사출성형), Nozzle contact(노즐터치), High speed injection(고속사출)

1. 서론

최근 전자기기의 발달과 더불어 얇고 정밀한 부품의 수요도 증가하고 있다. 휴대용 전화기의 전지 팩, 스마트미디어카드 케이스, 일체형 스피커 콘 등이 그 예이다. 이러한 부품을 만드는 방법으로서 사출성형은 고속이며 한번에 전체의 형상을 만들 수 있고 생산비가 낮은 등 장점을 가지고 있다. 그러나 부품의 냉각시간은 두께의 제곱에 비례하므로 부품의 두께가 얇아짐에 따라서 냉각시간은 급속히 짧아지고 이에 따라서 요구되는 사출 속도는 매우 커지게 된다.^[1] 일반적으로 사출스크류 혹은 플런저의 속도가 800 mm/s (혹은 1000

mm/s) 이상일 때 초고속 사출성형이라고 하고, 이러한 초고속 사출성형은 큰 어큐뮬레이터를 갖추고 있는 특수사양의 유압식 초고속사출성형기만이 가능했다. 이들 유압식 초고속사출성형기는 사출스크류 혹은 플런저의 최고속도가 800 - 1500 mm/s 에 달했다. 전동식 사출성형기가 낮은 에너지 소모, 높은 제어성에 의한 정밀사출가능, 친환경성 등의 여러 가지 장점이 있음에도 불구하고, 회전식 모터와 볼스크류에 의해서는 600 mm/s 이상의 사출속도를 얻는 것이 매우 어려웠다. 이것은 산업용 서보모터의 회전속도가 대체로 4000 rpm 이하이고 사출속도를 높이기 위해서는 볼스크류의 피치와 이에 따른 볼스크류 직경을 크게 해야 하

접수 2002년 2월 18일
* 서울대학교 기계항공공학부
** ファナック株式会社

기 때문에, 관성력의 증가와 볼스크류의 사이즈가 필요이상으로 커지는 것이 원인이었다. 볼스크류 이외의 랙-피니언기구나 RV 랙 등은 속도가 너무 빨라지거나(이에 따라서 힘은 적어진다), 부하용량이 충분하지 않은 등의 문제가 있어서 볼스크류를 대체할 기구로는 사용될 수 없었다. 회전식모터를 사용하는 데서 오는 한계를 극복하기 위해서 최근 리니어모터의 다이렉트구동을 사출기구에 이용한 전동식 초고속사출성형기를 개발하였다.^[2] 본 논문에서는 개발된 리니어모터식 사출성형기에 관하여 간단히 설명하고 리니어모터를 사용하는 것에 의해 발생하는 반력문제와 그 해결방안에 관하여 논한다.

2. 리니어모터를 사용한 사출성형기

리니어모터를 이용한 사출성형기는 기존의 볼스크류식 사출성형기(Fig. 1)와 기본적으로는 같은 구조로, 펠릿을 받아들여 녹인 후 금형 내로 사출하는 사출부(injection unit), 금형을 여닫고 성형된 제품을 밀어내는 型締部(clamping unit), 구동용 모터 및 전열히터를 제어하는 제어부(control unit) 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 다른 부분들은 볼스크류식 사출성형기와 거의 같은 구조로 더 높은 압력과 하중을 견디기 위하여 보강된 형태만을 취하고 있으나, 사출부는 전혀 다른 구조를 가지고 있다. Fig. 2 는 리니어모터를 이용한 사출기구의 단면도이다. 사출추력을 크게 하기 위해서 4 대의 리니어모터를 사용하고 있고, 이 리니어모터들은 영구자석 흡인력을 상쇄하기 위하여 4 각형 대칭 구조로 배치되어 있다. 가동부의 앞에는 로드셀이 장착되어 사출압력을 간접적으로 측정할 수 있도록 되어 있고, 1 대의 absolute 리니어스케일에 의해서 가동부 위치를 검출하여 동기운전을 통하여 4 대의 리니어모터를 제어하고 있다(Fig. 3). 최고사출속도는 2000 mm/s 으로 유압식 초고속사출성형기보다 더 빠른 사출이 가능하다. Fig. 4 는 사출부의 가감속 성능을 보여주는 실험결과로 16 ms 에 2000 mm/s 까지 가속되며 12 ms 에 속도 0 까지 감속 됨을 알 수 있다. 이는 기존의 볼스크류식 사출성형기의 20 배 이상의 가감속 성능이다. Fig. 5 와 6 은 고속사출에 의해서 성형된 스마트미디어 카드 케이스를 보여주고 있다. PC(polycarbonate) +

ABS 의 경우 600 mm/s 의 사출속도에서 burr, burning, short shot 등이 제거되었고, PC 의 경우 2000 mm/s 의 속도에서 비로소 良品이 성형됨을 알 수 있다.

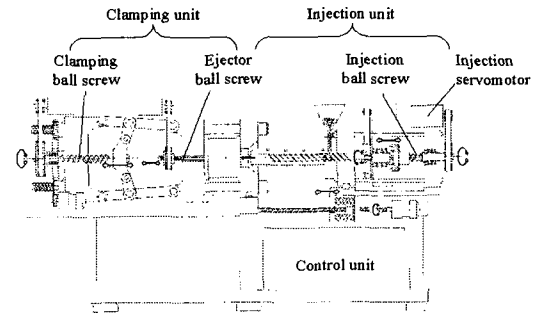


Fig. 1 Typical construction of all-electric injection molding machine

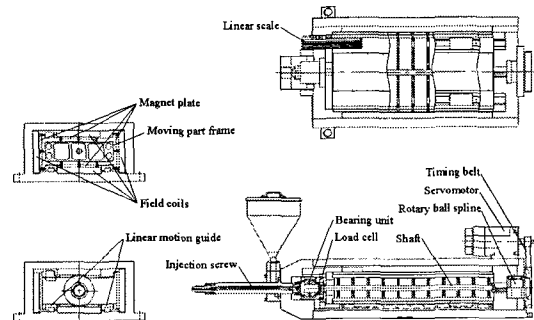


Fig. 2 Structure of ultra-high-speed injection molding machine

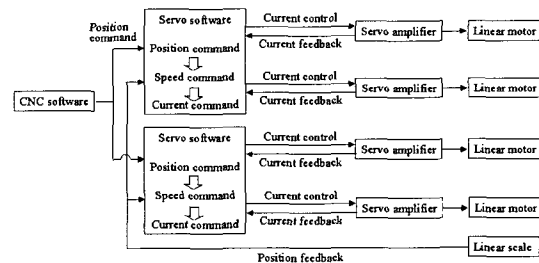


Fig. 3 Control system for four linear motors

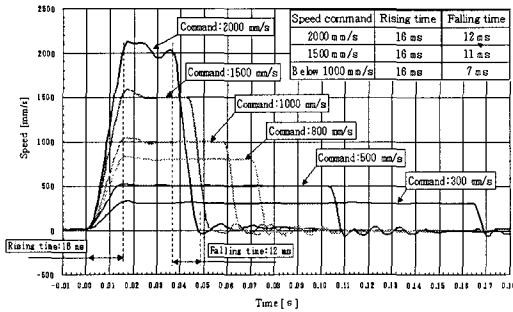


Fig. 4 Acceleration performance of ultra-high-speed injection molding machine

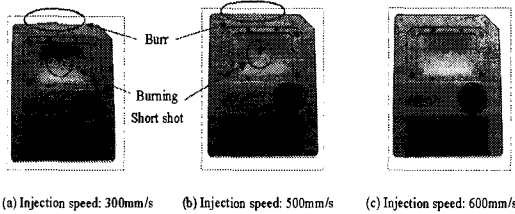


Fig. 5 Examples of molded card shell (smart media)
(Material: PC+ABS, Size: 45mm*37mm, Thickness of thin part: 0.15mm)

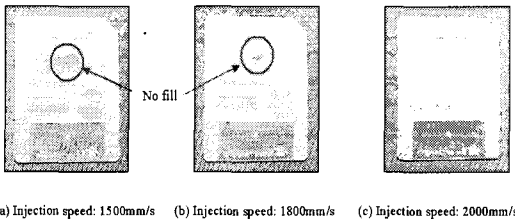


Fig. 6 Examples of molded card shell (smart media)
(Material: PC, Size: 45mm*37mm, Thickness of thin part: 0.15mm)

3. 볼스크류방식과 리니어모터방식의 비교

3.1 가속성능 비교

Fig. 1 에서 알 수 있는 바와 같이 볼스크류식 사출부에서는 회전식 서보모터의 출력이 타이밍벨트와 풀리로 감속되어 볼스크류를 회전시키고 볼스크류의 회전에 의해서 직진운동으로 변환된 모터출력이 사출스크류를 전후진 시키고 있다. 표 1

은 볼스크류식 사출기구와 리니어모터식 사출기구의 가속 성능을 비교하기 위한 것으로, 발생토크 혹은 추력과 각 부분의 질량 혹은 관성모멘트로부터 발생가능한 최고 가속도를 계산하고 있다. 볼스크류식의 경우 사출스크류의 최대추력은 리니어모터식의 4 배 이상이고(278000 N vs. 62000 N) 직진운동을 하는 가동부의 질량도 더 가볍지만(210 kg vs. 310 kg) 발생가능한 가속도는 리니어모터식의 1/20 에도 미치지 못함을 알 수 있다. 이것은 볼스크류식 사출기구의 경우 회전부의 회전관성모멘트가 크고 이것이 감속에 의해서(감속하게 되면 제곱으로 영향을 미침) 직진운동을 하는 질량으로 환산할 경우 매우 큰 값이 되기 때문이다. 이 결과는 볼스크류식이 리니어모터를 이용한 방식보다 근본적으로 고가속성능을 얻기가 어려움을 보여주고 있다.

Table 1 Comparison of inertia and maximum acceleration of injection mechanism: Ball screw type versus linear motor type

Ball screw type	Maximum motor torque	264 N·m
	Servomotor rotor inertia	0.0117 kg·m ²
	Driving pulley inertia	0.00393 kg·m ²
	Slave pulley & ball screw inertia	0.159 kg·m ²
	Reduction ratio of pulleys	38/102
	Ball screw pitch	16 mm
	Maximum injection force	278000 N
	Moving part mass	210 kg
	Equivalent moving part inertia	0.000189 kg·m²
	Total equivalent inertia	0.0379 kg·m²
Maximum acceleration	6.61 m/s²	
Linear motor type	Maximum motor thrust	62000 N
	Moving part mass	310 kg
	Maximum acceleration	200 m/s²

3.2 관성반력 비교

앞절에서 언급했듯이 볼스크류식 사출기구는 회전관성이 대부분을 차지하고 있고, 이것은 가속시에 모터 발생추력의 대부분이 회전관성부하를

가속시키는데 사용됨을 의미한다. 이때에 관성반력이 작용하나 이 반력은 사출유닛을 회전시키려는 방향으로 작용하고 이 힘은 사출방향의 직선운동에는 영향을 주지 않는다. 볼스크류식 사출유닛에서도 직선운동을 하는 부분의 가감속에 의해서 사출방향의 관성반력이 발생하나 직선운동부분의 가속도가 작기 때문에 그 값은 크지 않다(Fig. 7). 예를 들어서 표 1 에 나타난 사출유닛의 경우 가동부 질량이 210 kg, 최대가속도가 6.6 m/s 이므로 사출방향으로의 최대관성반력은 1390 N 이다. 일반적으로 노즐터치력의 여유분이 수천 N 이상이므로 이 정도의 관성반력에 의해서 노즐이 스프루우부싱(sprue bushing)으로부터 떨어지는 노즐브레이크가 발생하지는 않는다.

Fig. 8 은 리니어모터 방식의 사출유닛에서의 힘평형도이고 사출방향의 힘평형식은 다음과 같다.

$$\text{Moving part: } f_o - f_i = m_m a_m \quad (1)$$

$$\text{Mainframe: } f_p + f_l - f_r - f_c = m_f a_f$$

where

- f_o = output thrust of linear motors
- f_r = reaction force
- f_i = injection force
- f_p = pressure force
- f_c = nozzle contact force
- f_l = preload by spring
- m_m = mass of moving part
- m_f = mass of mainframe
- a_m = acceleration of moving part
- a_f = acceleration of mainframe

용융된 플라스틱의 압축성으로 인하여, 사출스 크류가 움직이기 시작하는 사출초기의 pressure

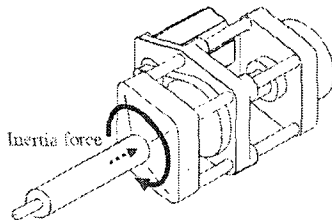


Fig. 7 Inertia forces of ball-screw-type injection unit

force f_p 는 0 으로 볼 수 있다(Fig. 9). 또한 사출부 프레임에 가해지는 반력 f_r 은 리니어모터의 발생추력 f_o 와 같으므로, 노즐터치스프링이 사출유닛을 고정플래튼으로 미는 힘 f_l 이 리니어모터의 발생추력 f_o 보다 작은 경우는 사출초기에 노즐브레이크가 발생하고($f_c = 0$) 이때에 고압의 용융된 플라스틱이 새는 문제가 발생하게 된다.

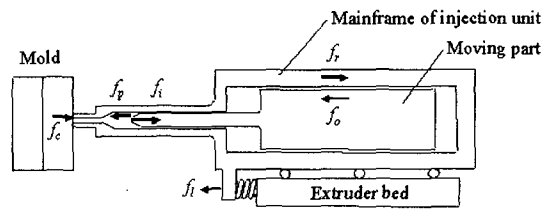


Fig. 8 Forces applied to the injection unit during injection operation

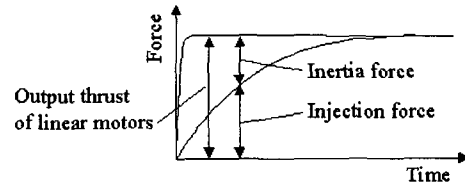


Fig. 9 Inertia force vs. injection force

4. 관성반력 문제의 해결책

4.1 관성반력 상쇄기구

관성반력으로 사출유닛이 움직이는 것은 사출유닛의 질량중심이 이동하는 것이 원인이라고도 볼 수 있다. 가동부가 움직일 때 사출유닛의 질량중심이 이동하지 않도록 하는 것에 의해서 관성반력의 영향을 없애는 것이 가능하다. Fig. 10 - Fig. 12 는 관성반력의 영향을 없애도록 고안된 사출기구이다.^[3] 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 사출스 크류의 이동방향과 그 반대방향으로 움직이는 2 개 이상의 가동부가 있고, 이 가동부들이 움직여도 질량중심이 이동하지 않도록 각 가동부는 질량비의 역비로 된 링크기구에 의해서 구속되어 있다. Fig. 10 과 11 의 구조에 있어서는 가동부 가감속시의 반력이 사출유닛을 회전시키려고 하는 모멘트를 발생하나, 그 모멘트는 사출유닛을 지지하는

상하방향의 힘에 의해서 상쇄되므로 사출방향으로
는 영향을 주지않는다. Fig. 13 은 Fig. 10-Fig. 12 의
사출기구에 사용된 링크기구의 설명도이다. 식 2
에서 알 수 있는 바와 같이 이 링크기구는 상하
가동부의 변위에 대한 선형성을 가지고 있다.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= l \sin \theta + \sqrt{r^2 - (l \cos \theta - h)^2} - \sqrt{r^2 - (l - h)^2} \quad (2) \\
 x_2 &= k l \sin \theta + \sqrt{k^2 r^2 - (k l \cos \theta - k h)^2} - \sqrt{k r^2 - (k l - k h)^2} \\
 &= k \left\{ l \sin \theta + \sqrt{r^2 - (l \cos \theta - h)^2} - \sqrt{r^2 - (l - h)^2} \right\} \\
 &= k x_1
 \end{aligned}$$

where x_1 = displacement of upper moving part
 x_2 = displacement of lower moving part
 k = velocity ratio
 l, r, k, h : link parameter

리니어모터를 이용한 이송시스템을 가지고 있
는 고속 밀링머신이나 레이저 가공기, 펀칭머신
등에서 관성반력에 의한 충격으로 기계 전체가 움
직여 다니는 것을 방지하기 위해서 본체를 스틱볼
트로 바닥면에 고정하는 것을 볼 수 있다. 가동부
의 질량의 변화가 크지 않거나 질량변화에 따른
가동부의 속도비를 조정할 수 있다면 이 반력상쇄
기구는 이러한 용도에도 사용될 수 있다.

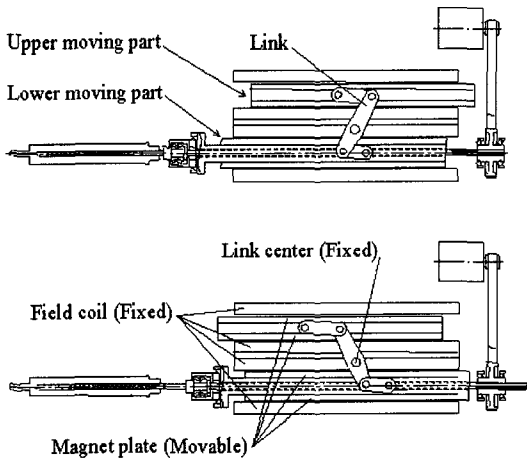


Fig. 10 Inertia-force-canceling mechanism 1

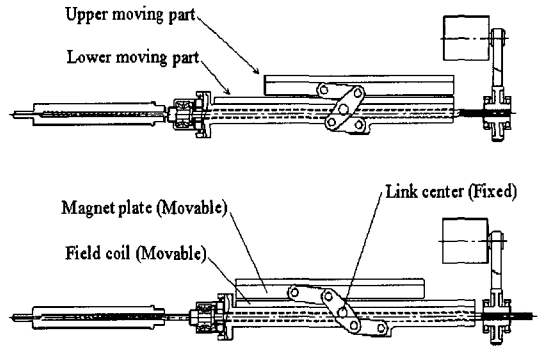


Fig. 11 Inertia-force-canceling mechanism 2

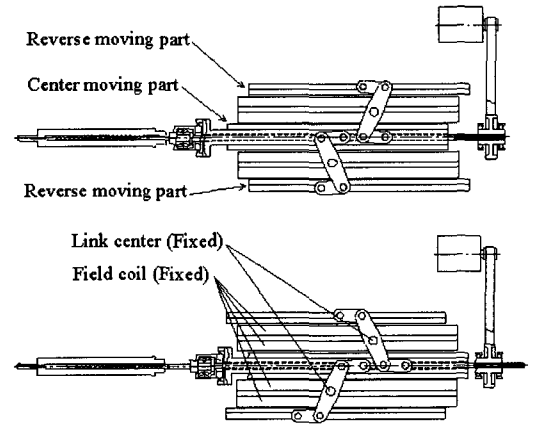


Fig. 12 Inertia-force-canceling mechanism 3

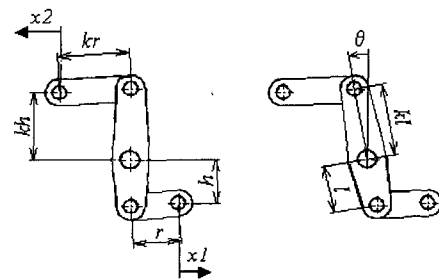


Fig. 13 Link mechanism linearly-connecting the upper and the lower moving part

4.2 노즐터치력의 증가

앞의 방법은 반력문제를 근본적으로 해결하는
방법이나 메커니즘이 다소 복잡하다. 관성반력으

로 인하여 생기는 문제를 해결하는 더 간단한 방법으로 노즐브레이크가 일어나지 않도록 노즐터치력 f_c 를 리니어모터의 출력 f_0 보다 크게 하는 것을 생각할 수 있다. 이것은 노즐터치력을 발생시키는 코일스프링과 사출유닛 이송기구의 부하용량을 늘리는 것만으로 해결될 수 있으나, 다른 문제가 있다. Fig. 14 에서 나타내는 것과 같이 노즐터치력은 고정플래튼(stationary platen)의 기울어짐을 야기시킨다. 노즐터치력에 의한 고정플래튼의 기울어짐은 사출성형기에 있어서 고질적인 문제로, 얇은 물체의 성형에 있어서는 특히 문제가 된다. 이러한 고정플래튼의 기울어짐을 방지하기 위해서 Fig. 15 와 같은 노즐터치기구가 있으나, 두개의 bar 가 작업에 불편을 끼치고 또한 사출유닛의 스윙블(swivel) 동작시에는 두개의 bar 를 고정플래튼측에서 분리하고 나중에 다시 조립해야 하는 불편함이 있었다.^[4] 노즐터치력에 의한 고정플래튼의 기울어짐을 방지하면서도 조작에 불편을 주지 않도록 하기 위하여 Fig. 16 에 나타낸 노즐터치기구를 고안했다.^[5] 그림으로부터 알 수 있는 것과 같이 이 기구는 노즐이 스프루우부싱을 누르는 높이와 노즐터치용 볼스크류가 고정플래튼을 당기는 높이의 차에 의해서 발생하는 모멘트를 연결부재(Fig. 16 에서 connecting block)를 사용하여 없애도록 되어 있다. 즉 노즐터치력과 볼스크류의 당기는 힘이 만드는 모멘트를 상하방향의 힘에 의한 모멘트로서 상쇄하도록 되어 있다. 이 연결부재는 기구의 탄성변형 등에 의해서 약간 사출방향으로 이동하기 때문에 사출방향으로는 자유도를 가지고 다른 방향으로 구속되어 있을 필요가 있다. 이와 같은 자유도를 주기위해서는 리니어가이드를 사용하는 것도 가능하나 이동량이 1mm 정도이므로 구름면에서 플레이킹(flaking)이 일어나기 쉬운 면도 있다.^[6] Fig. 16 에 나타내는 구조는 판스프링에 의해서 연결부재를 지지하는 구조이고 사출방향으로는 자유도를 주고 다른 방향으로 구속하는 것이 가능하다. 판스프링을 두겹게 하고 상하에 노치를 두는 것에 의해서 굽힘강성을 낮추면서도 좌굴(buckling)이 일어나기 어렵게 할 수 있다.

Fig. 17 은 노즐터치력에 의한 고정플래튼의 기울어짐을 측정한 실험결과이다. Fig. 17(a)는 기존 노즐터치기구를 사용했을 때의 측정결과이고 Fig. 17(b)는 새로운 노즐터치기구를 사용했을 때의 측

정결과이다. 노즐터치력을 6000 kgf 이상으로 증가시킬 때까지 넘어짐이 수 마이크로미터 이내에 있음을 알 수 있다.

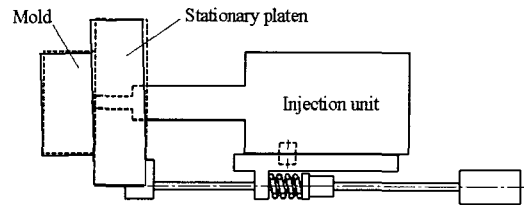


Fig. 14 Stationary platen bending caused by nozzle contact force

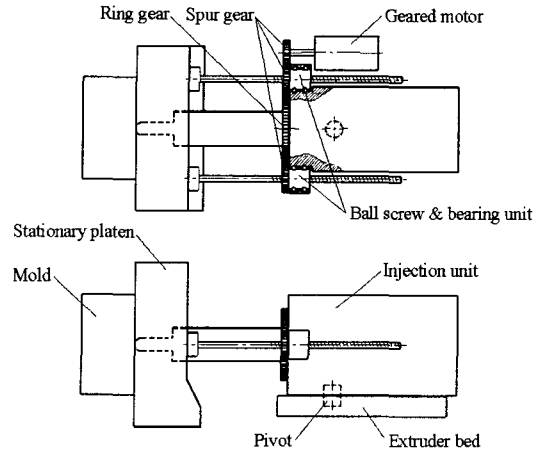


Fig. 15 Existing nozzle contact mechanism preventing stationary platen bending

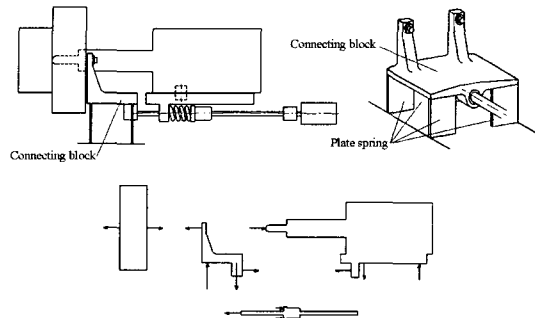


Fig. 16 Nozzle contact mechanism preventing stationary platen bending

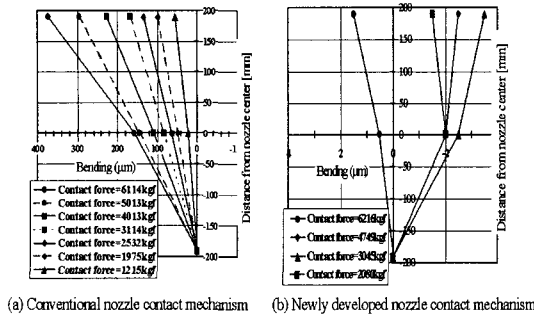


Fig. 17 Stationary platen bending by nozzle contact force

5. 결론

1) 리니어모터를 사출유닛에 사용한 사출성형기는 최고속도 2000 mm/s 의 초고속 사출을 행하는 것이 가능했다.

2) 볼스크류식 사출성형기는 회전관성이 큼으로 인해서 높은 가감속 특성을 얻기 어렵다. 리니어모터를 이용하여 볼스크류식 사출성형기보다 20 배 이상의 가감속 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

3) 리니어모터를 사출유닛에 사용할 경우 관성반력이 문제가 된다. 이 관성반력으로 인해서 노즐브레이크가 일어날 수 있다.

4) 관성반력에 의한 노즐브레이크를 막기 위해서 기구적으로 관성반력을 없앨 수 있다. 이 사출기구는 가동부가 움직여도 사출유닛의 질량중심이 이동하지 않도록 되어 있다.

5) 노즐터치력을 증가시키는 것에 의해서도 노즐브레이크가 발생하는 것을 막을 수 있다. 이 경우 고정플래튼의 기울어짐이 큰 문제가 되나 새로운 노즐터치기구에 의해서 고정플래튼의 기울어짐을 막을 수 있다. 이 노즐터치기구는 노즐터치력과 노즐터치용 볼스크류 인장력의 작용 높이 차에 의해서 발생하는 모멘트를 흡수하는 연결부재를 가지고 있고 이 연결부재에 걸리는 모멘트는 상하방향의 지지력에 의해서 상쇄되도록 되어 있다.

참고문헌

1. Pötsch, G. and Michaeli, W. Injection molding, 1995 (Hanser, New York).
2. Bang, Y. B. and Ito, S., "Linear motor drive ultrahigh-speed injection moulding machine," Proc

Instn Mech Engrs Part B: J Engineering Manufacture, Vol. 216, No. 5, pp. 773-781, 2002.

3. Ito, S., Inaba, Y. and Bang, Y., "Driving device using linear motor," European patent 1095753, 2000.
4. 黒田章公, "出成形機のノズルタッチ機構," 特開平 9-277306, 1997.
5. Ito, S. and Bang, Y., "Injection molding machine with nozzle touch mechanism," European patent 1078728, 2000.
6. 稲葉善治, 伊藤 進, "電動サーボ式射出成形機用ボールねじの寿命に関する研究," 精密工学会誌, Vol. 65, No. 6, pp. 805-809, 1999.