

〈논 문〉 SAE NO. 943775

## 사출성형에서 캐비티압력과 인장강도에 관한 연구

### A Study on Cavity Pressure and Tensile Strength of Injection Molding

유 중 학,\* 김 희 송\*\*  
J. H. Yoo, H. S. Kim

#### ABSTRACT

In this research, the tensile strength of molded parts and pressure distribution were analyzed to study the cavity filling stage and packing stage in injection molding. The measurement of cavity pressure was obtained by a data acquisition system with the installation of transducers in the cavity. Molded parts were tested by a universal testing machine to obtain the tensile strength. For the experimental work, the tensile strength of molded parts increased with longer packing time and exact freezing time of the gate was obtained by a cavity pressure curve. In addition, the effect of packing did not occur and tensile strength was almost constant after early 1.5 sec of the freezing time of gate. Density tended to be higher about 0.2% due to a larger degree of mold temperature and melt temperature. Also, changing pressure in the cavity was effectively sensed. Thereafter, the possibility of the development of pattern recognition expert system was confirmed on the basis of the experimental results.

주요기술용어 : Injection Molding(사출성형), Filling Stage(충전단계), Melt Front(유동선단), Switch-over Point(절환점), Peak Cavity Pressure(최대 캐비티압력)

#### 1. 서 론

사출성형이란 고분자 용융체를 금형의 캐비티에 높은 압력을 가하여 채워 넣으므로써 캐비티 형상과 같은 제품을 생산하는 일련의 공정을 말한다. 근래에 무게가 가볍고 고강도를 지닌 고분자재료의 개발로 인하여 자동차, 항공기부품

등에도 많은 사출성형품이 사용되고 있다. 열가소성 플라스틱은 가열하면 용융되고 냉각하면 고화하는 성질을 이용하여 성형된다. 이 성형공정에서는 잘 건조된 수지가 호퍼에서 금형이 열렸을 때에 일정량만 실린더속으로 들어간다. 사출성형기의 폐쇄 행정의 시작되면 금형이 닫히고 노즐이 스프루에 밀착한다. 스크루가 전진할 때

\* 정회원, 한국기술교육대학 생산기계공학과

\*\* 정회원, 단국대학교 기계공학과

수지는 실린더내에서 가열밴드와 스크루압력에 의해 용융되고 다음에 캐비티로 충전된다. 금형속에서 급속히 고화된 성형품은 일정시간 경과후 조임램이 후퇴하면서 금형이 열리고 취출된다. 사출성형공정은 Fig.1과 같이 크게 3단계<sup>1)</sup>로 나눌 수 있으며, 충전단계에서 비압축성, 비등은 유동으로 비뉴우톤 유체의 특성을 갖는다. 보압과 냉각단계에서는 비정상상태의 압축성, 비등은 유동이며 액체에서 고체로의 상변화를 겪게 된다. 성형품의 수축을 최소화하기 위하여 용융고분자가 갖고 있는 열적수축을 보완하도록 고압하에서 수지의 추가적인 공급이 필요하다. 충전단계는 주로 성형품의 외관에 영향을 주며, 보압과 냉각단계에서는 성형품의 치수와 기계적 성질의 향상에 기여한다.

사출성형분야에 있어서 초기의 해석적인 연구<sup>2-3)</sup>들은 유동선단의 생성과 온도분포 및 압력에 측을 목표로 하여 충전과정을 고려하였으며, 최근에는 최종 성형품의 품질에 현저한 영향을 미치는 보압과 냉각과정<sup>4-5)</sup>에 대한 연구가 계속되고 있다. 충전과정에 대해서 Spencer<sup>6)</sup> 등에 의해 처음으로 실험적인 연구가 행하여졌으며, Kamal<sup>1)</sup> 등도 얇은 캐비티를 갖는 평면 유동에 관해 실험적인 연구를 하였다. Chung과 Ryan<sup>7)</sup>, Sanschagrin<sup>8)</sup>은 압력의 예측과 공정제어에 관한 연구를 행하였으며, 단순화한 모델의 해석을 통해 실제의 성형과의 일치를 시도하였다.

성형조건은 성형과정중 각 단계마다 성형품의 품질에 많은 영향을 미친다. 그러므로 각 단계에서 성형공정변수를 제어하는 것은 매우 중요하다. 또한 캐비티압력의 측정은 비정상적인 캐비티압력 패턴을 통하여 금형내에서 일어나는 현상을 감지할 수 있는 방법으로 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 사출속도, 사출압력, 보압 및 냉각시간을 일정하게 놓고, 중요한 성형공정변수인 금형온도, 용융수지온도 및 보압시간의 변화에 따른 캐비티압력을 측정하고, 취출된 성형품의 인장시험을 행하였다. 이로써 최적성형을 위한 캐비티압력 패턴인식의 기초자료를 얻을 수 있고, 기존의 해석 패키지에서 제시하는 설계 및 공정변수에 대한 실제 성형조건외 영향을 밝히

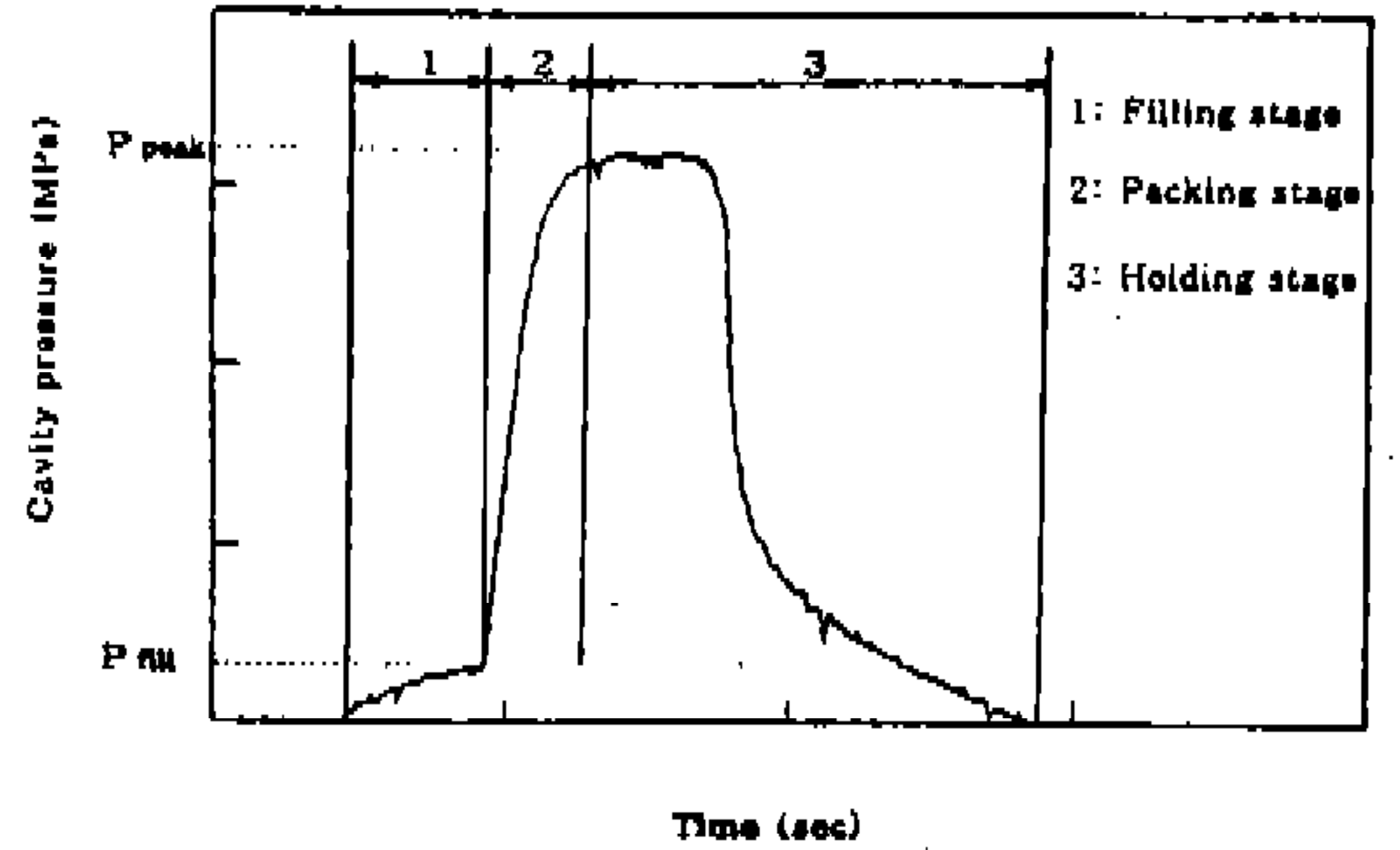
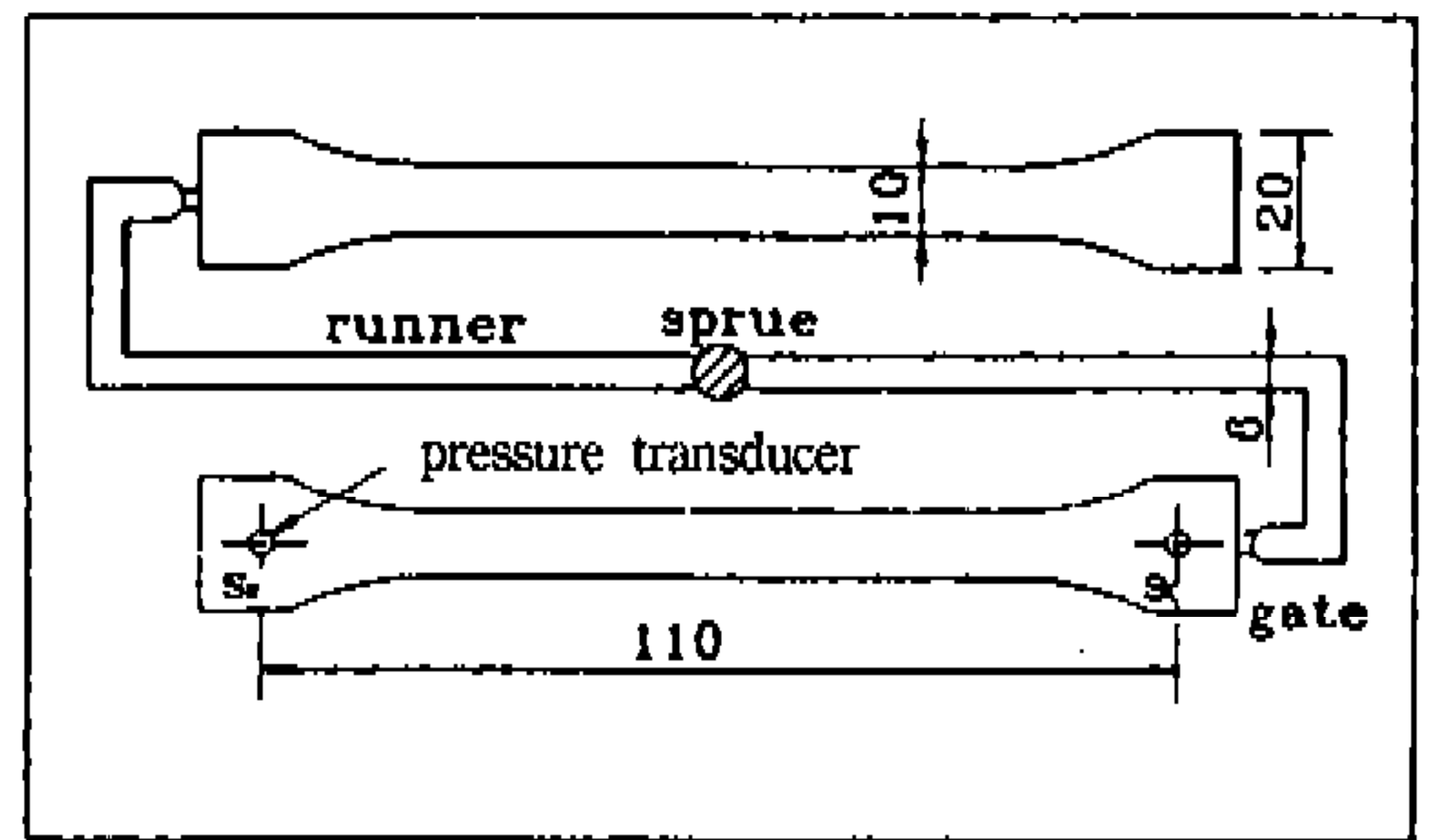
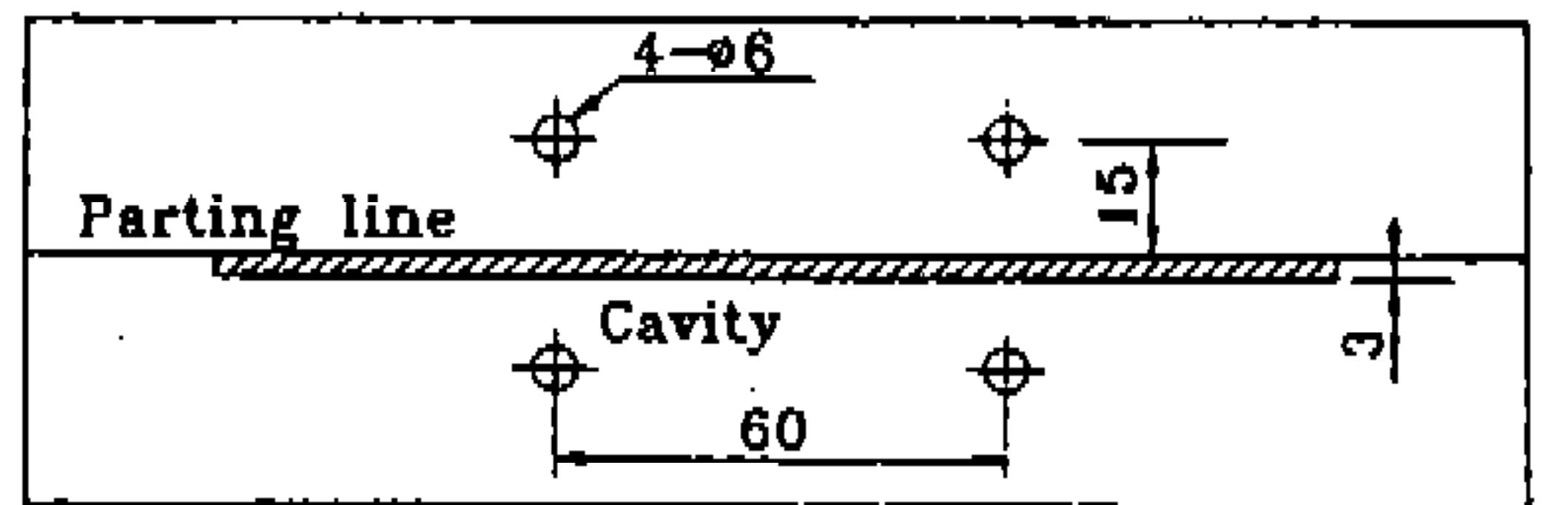


Fig.1 Cavity pressure profile



(a) Cavity geometry



(b) cooling channel

Fig.2 (a) Cavity geometry and (b) Cooling channel configuration in the mold.

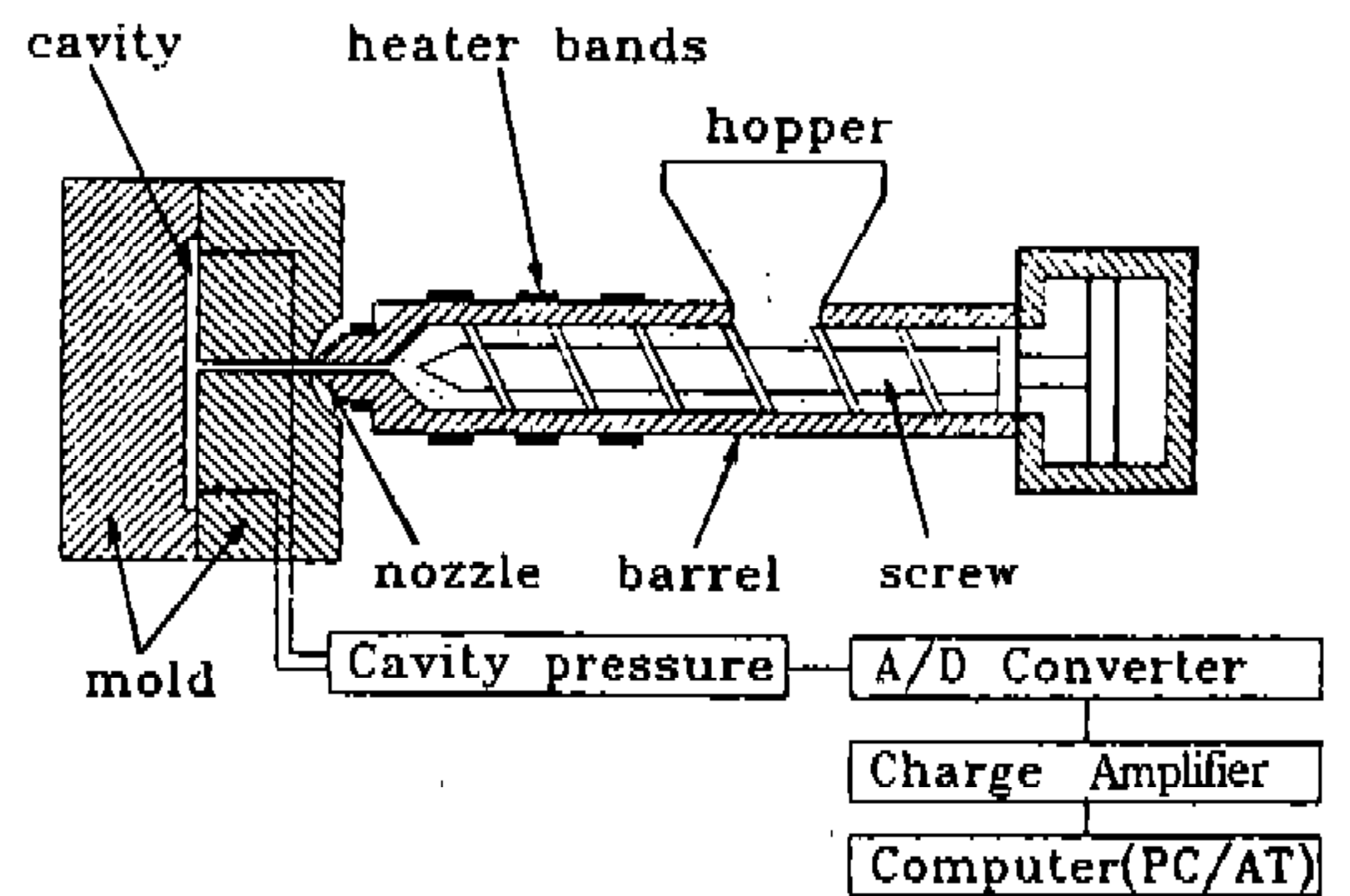


Fig.3 Schematic diagram of data acquisition system in injection molding machine

고자 한다. 또한 성형조건과 밀도가 성형품의 인장강도에 미치는 영향을 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는 사출용량 3.3 Oz, 체결력 75ton인 in-line 스크루식 사출장치와 직압식 형체장치를 갖춘 사출성형기(IDE 75EN)를 사용하였고, 사출금형의 형판 재질은 SM55C, 스프루는 길이 55 mm, 직경은 러너로부터 6mm에서 3.5mm로 역 테이퍼졌으며, 러너는 길이 121.5mm, 직경은 6 mm, 게이트는 사이드게이트(폭 3mm, 길이 1mm, 두께 1mm)로 가공하였다. 금형설계시 러너직경, 게이트 치수와 성형조건 중 사출시간 1.6초, 사출압력 70MPa, 사출속도 2.45m/sec, 보압 84MPa 및 냉각시간 10초는 캐비티내의 압력과 온도가 균일하고 적정하게 작용하도록 Moldflow에서 해석한 결과를 이용하였다.

캐비티형상은 Fig.2(a)와 같은 인장시편으로써 두께는 3mm이며, 게이트에서 각각 20mm, 130mm 위치에 직경 4mm인 Piezo식 압력센서(Kistler 6157A)를 설치하였다. 실험중 금형의 캐비티압력과 금형벽의 온도는 Fig.3에 나타낸것 같이

Table 1 Material Properties for Polypropylene (J1360)

Thermal conductivity	0.103W/m <sup>°C</sup>
Melt density	731kg/m <sup>3</sup>
Specific heat	3056J/kg <sup>°C</sup>
Freeze temperature	83.1 <sup>°C</sup>
No-flow temperature	145.5 <sup>°C</sup>

Table 2 Processing conditions

Mold temperature(°C)	30			45			60		
Melt temperature(°C)	205	220	235	205	220	235	205	220	235
Packing time(sec)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

압력센서와 J형 thermocouple에 의해 Charge amplifier(Kistler 5007)와 A/D converter를 통하여 데이터 획득 시스템에 의해 컴퓨터로 저장되었다. 배럴의 용융수지온도는 사출성형기 계기판에 부착된 온도계로 확인하였다. 한편, 금형의 온도조절은 금형온도조절기를 사용하여 Fig.2(b)와 같이 가공된 냉각수로를 통하여 열매체유(Shell Thermia Oil, B)를 순환시켜 설정된 온도로 유지하였다.

본 실험에서 사용된 수지는 폴리프로필렌(Polypropylene)이며, 그레이드는 J1360으로 Table 1에 이 수지의 물성치를 나타냈다. 실험은 사출시간, 사출압력, 사출속도, 보압 및 냉각시간을 일정하게 하고, 금형온도, 용융수지온도 및 보압시간을 Table 2와 같이 체계적으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 각 성형공정변수에 따라 취출된 인장시편을 만능시험기(Shimadzu, AGIOTA)에서 인장시험하였으며, 밀도는 전자 밀도측정기(electronic densimeter, MIRAGE, SD-120, 0.0001g)로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

충전단계 동안의 사출속도는 성형성에 관계되는 중요한 인자이다. 압력센서에 의한 압력의 감지와 사출개시사이의 시간간격은 압력센서의 위치와 러너 시스템, 사출속도등에 의해 결정된다. 캐비티의 충전과 최대 캐비티압력 출현 사이의 시간간격은 사출성형기의 유압장치의 반응속도와 절환점, 수지의 용융 압축성, 용융온도등에 의해 결정된다. 수지의 유동선단은 분수효과에 의해 반구에 가까운 형태를 유지하며 전진<sup>9)</sup>하고,

캐비티단면의 온도분포는 수지와 금형간의 열전달과 점성열의 발생에 의해 변화하게 된다.

Fig.4는 Table 2에 보인바와 같이 금형온도 60°C, 용융수지온도 220°C로 일정하게 하고 보압시간을 0.0초, 0.5초, 1.0초, 1.5초, 2.0초로 변화시키면서 충전할 때 압력센서 S<sub>1</sub>에 의해 감지된 캐비티 압력곡선이다. 충전이 끝나고 압축으로 전환하는 점 P<sub>1</sub>에서 갑작스런 압력의 증가가 이루어지며, 보압시간을 주지않았을 때도 P<sub>1</sub> 곡선처럼 압축 과정이 약간 발생하는 것은 빠른 사출속도에 의해 충전압력보다 압력이 상승한 것으로 보인다. 보압시간을 0.5초에서 2.0초까지 증가시킬 때 최대 캐비티압력점에서 곡선의 폭이 증가함을 볼 수 있고, P<sub>4</sub>와 P<sub>5</sub>의 곡선이 거의 일치하는 것은 게이트고화에 의해 더 이상의 보압효과는 나타나지않음을 알 수 있다. 또한 보압이 없거나 너무 낮으면 수지의 후충전동안에 보압단계에서 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>와 같은 캐비티 압력곡선의 급격한 변화가 검출되었으며, 보압시간이 2.0초 증가할 때 사이클타임(cycle time)에 미치는 영향은 Fig.4에서 보는 바와 같이 약 0.2초정도로 크지 않음을 알 수 있었다. 보압이 충분하지 못한 성형품에서는 싱크마크(sink mark)와 같은 외관 불량 현상이 나타났으며, 충전단계에서 고속 충전을 위해 에어벤트(air bent)가 필요하다. 고속 충전으로 인해 분자의 배향, 결정화도 및 플래시(flash)가 발생할 수 있으므로 충전압력의 크기, 사출속도 및 원활한 압축단계로의 전환이 요구된다. 또한 압축과 보압단계의 적정 여부에 따라 성형품의 치수 정밀도에 많은 영향을 미쳤으며, 최대 캐비티압력 유지시간을 올바르게 선택하지 않으면 금형에 과대한 부하가 걸려서 손상을 입히거나 플래시가 발생하였다.

충전에서 보압으로의 전환은 사출개시후의 시간, 스크루 스트로크(screw stroke) 및 캐비티압력등에 따라 결정할 수 있지만, 시간에 의한 전환은 스크루속도의 변화를 일으키는 수지의 압축성, 점도 및 수지의 공급 정밀도등의 변화를 고려할 수 없으며, 스크루 스트로크에 의한 방법은 보압공정이 짧을 경우에는 미소 변동에 따른 스위치작동의 부정확이 예측되며, 캐비티압력에

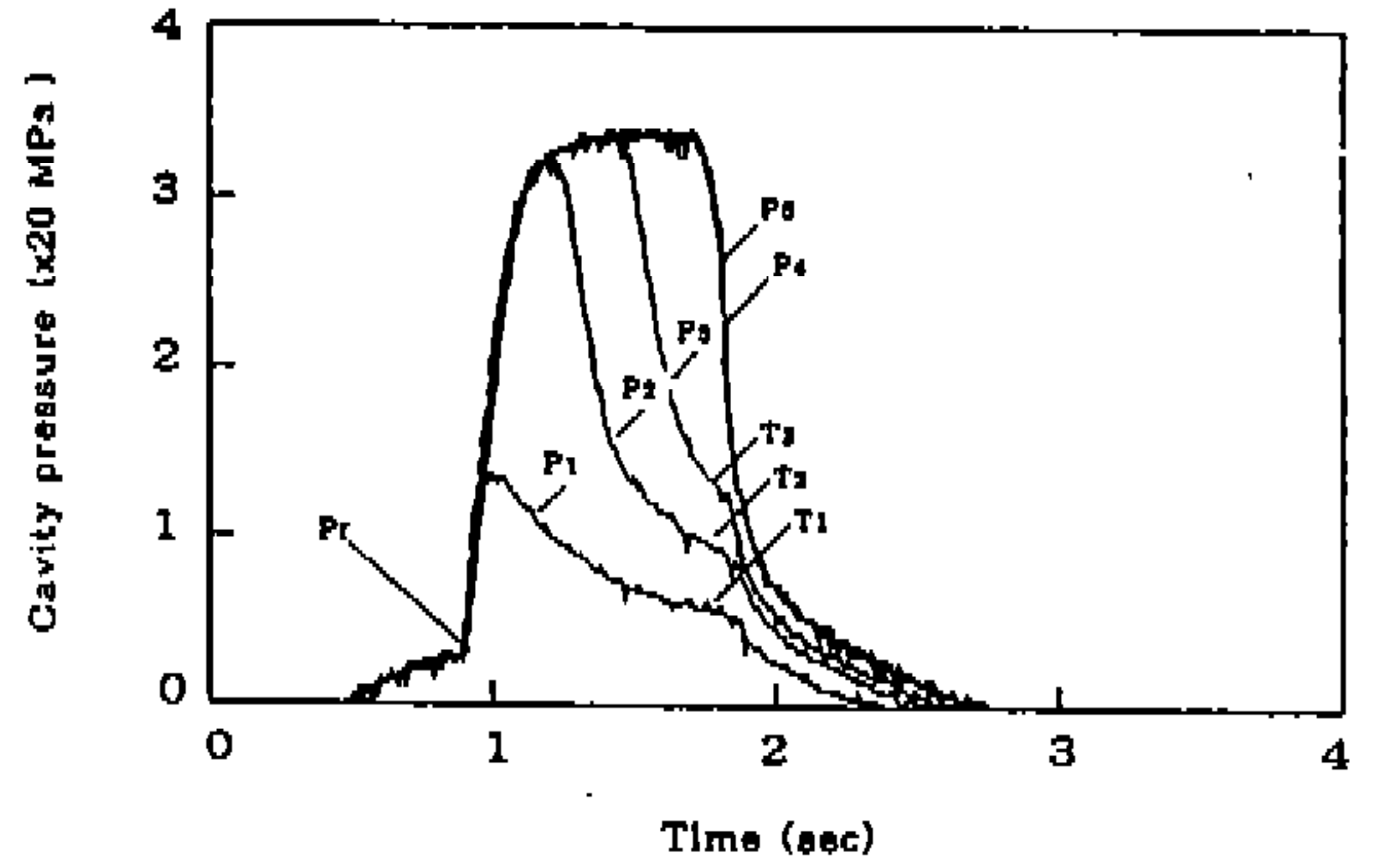


Fig.4 Effect of packing time on cavity pressure patterns

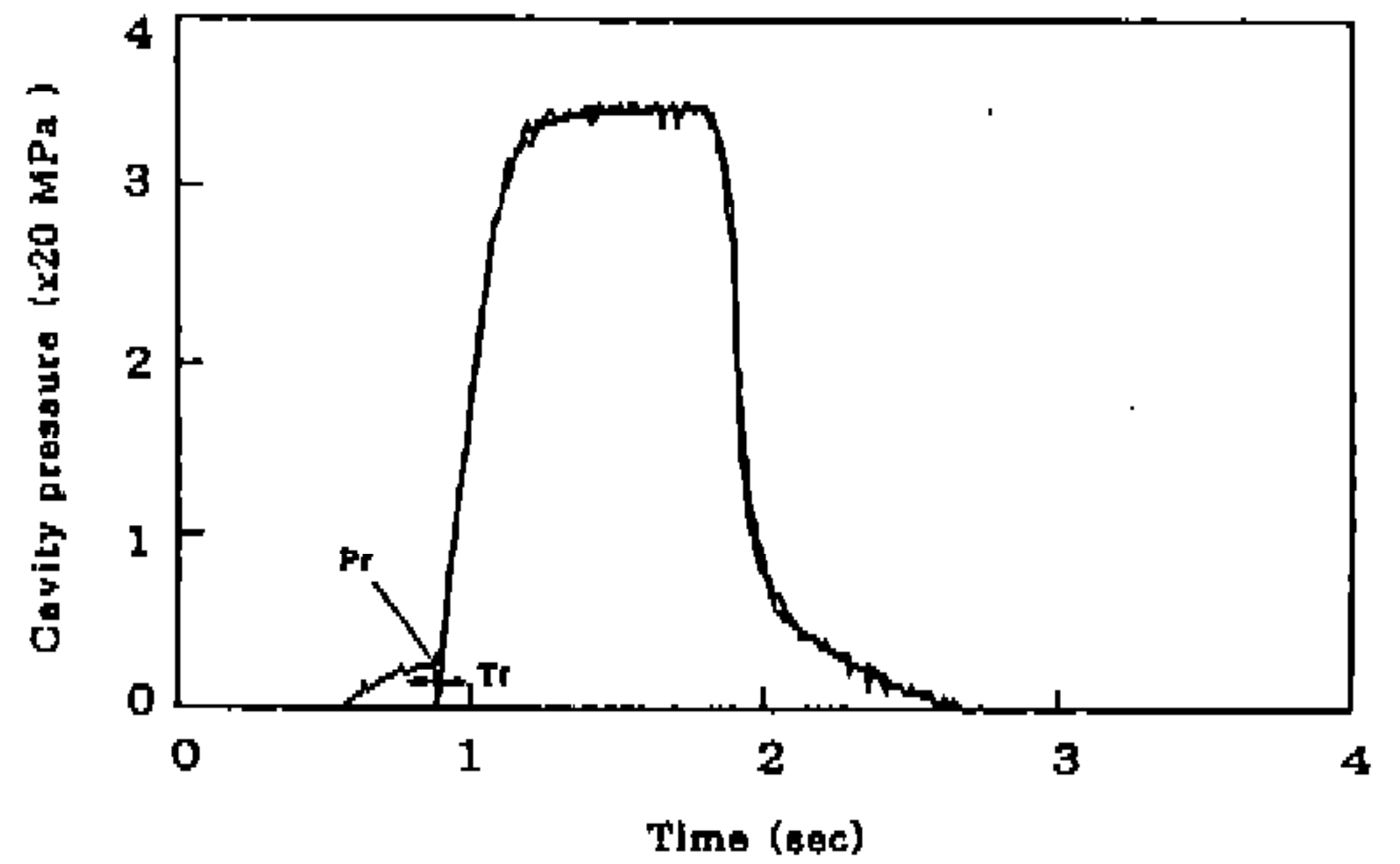
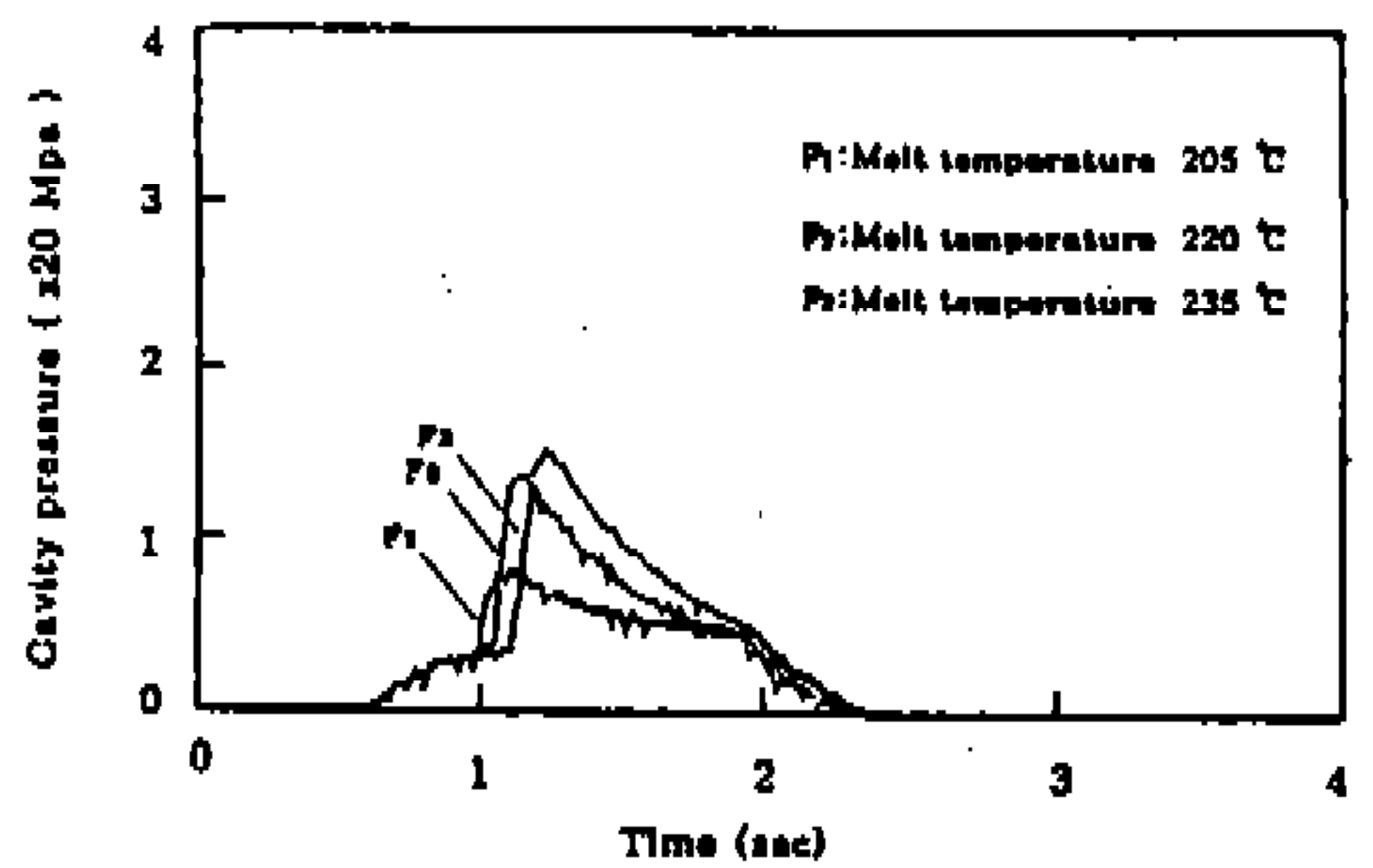
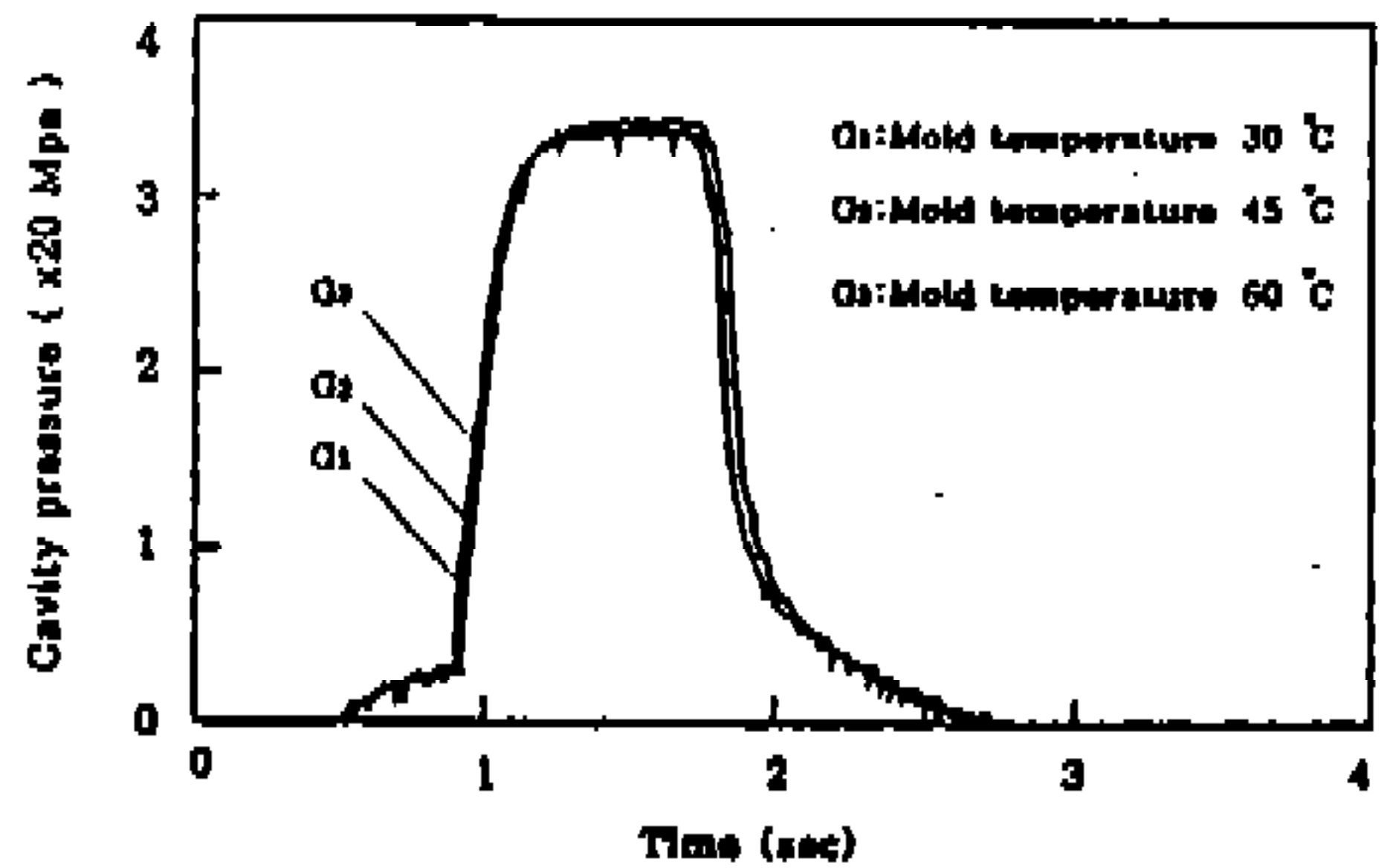


Fig.5 Cavity pressure traces at transducers S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> of Fig.2(a)



(a) melt temperature



(b) mold temperature

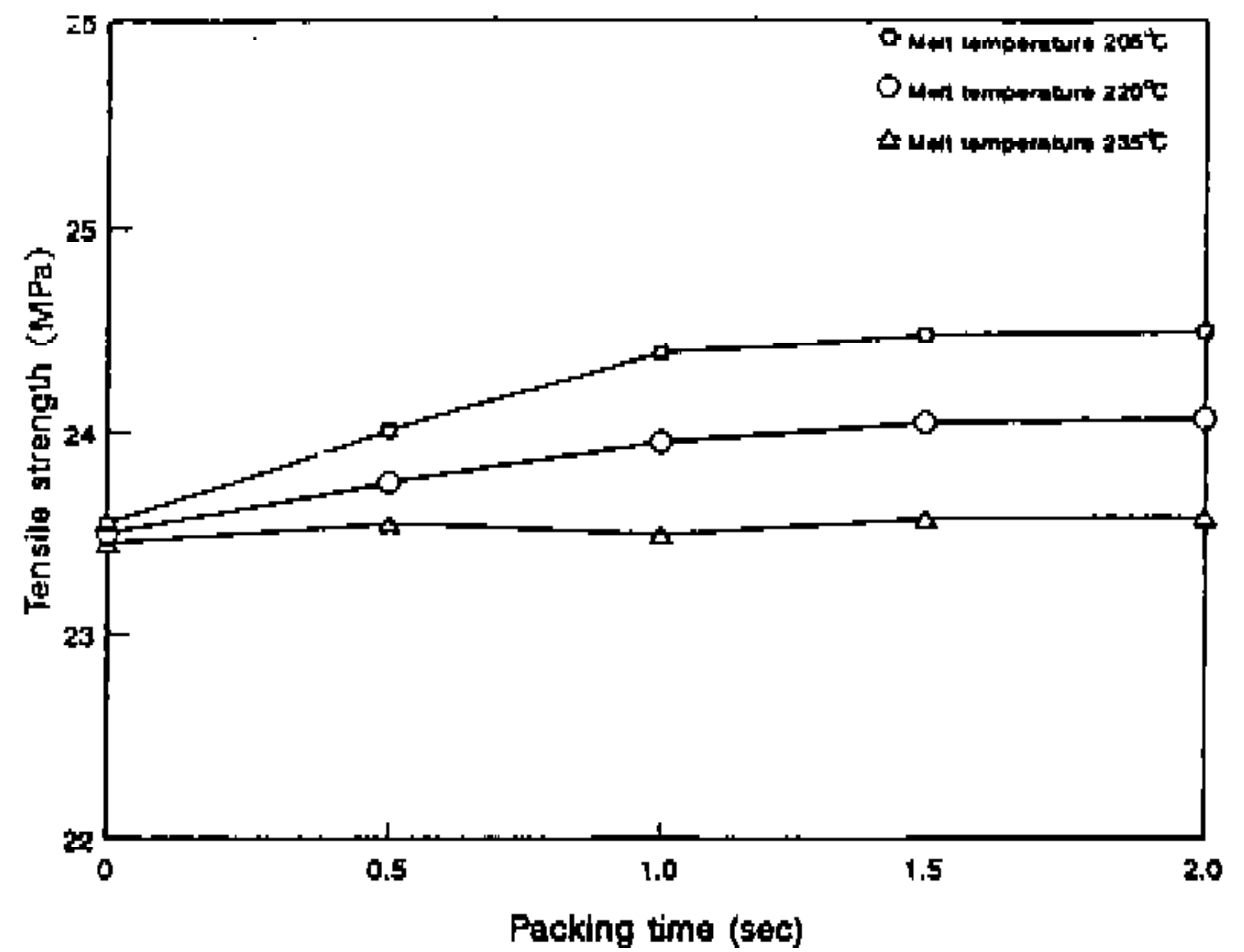
Fig.6 Cavity pressure variations measured for different

의한 방법은 미리 선정된 압력곡선에 따라 절환이 이루어지며 압력이 급속히 증가할 때도 정확한 시기에 전환시킬 수 있으므로 효과적이다. 즉, 캐비티 압력곡선은 절환점의 선택과 성형공정의 최적화에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

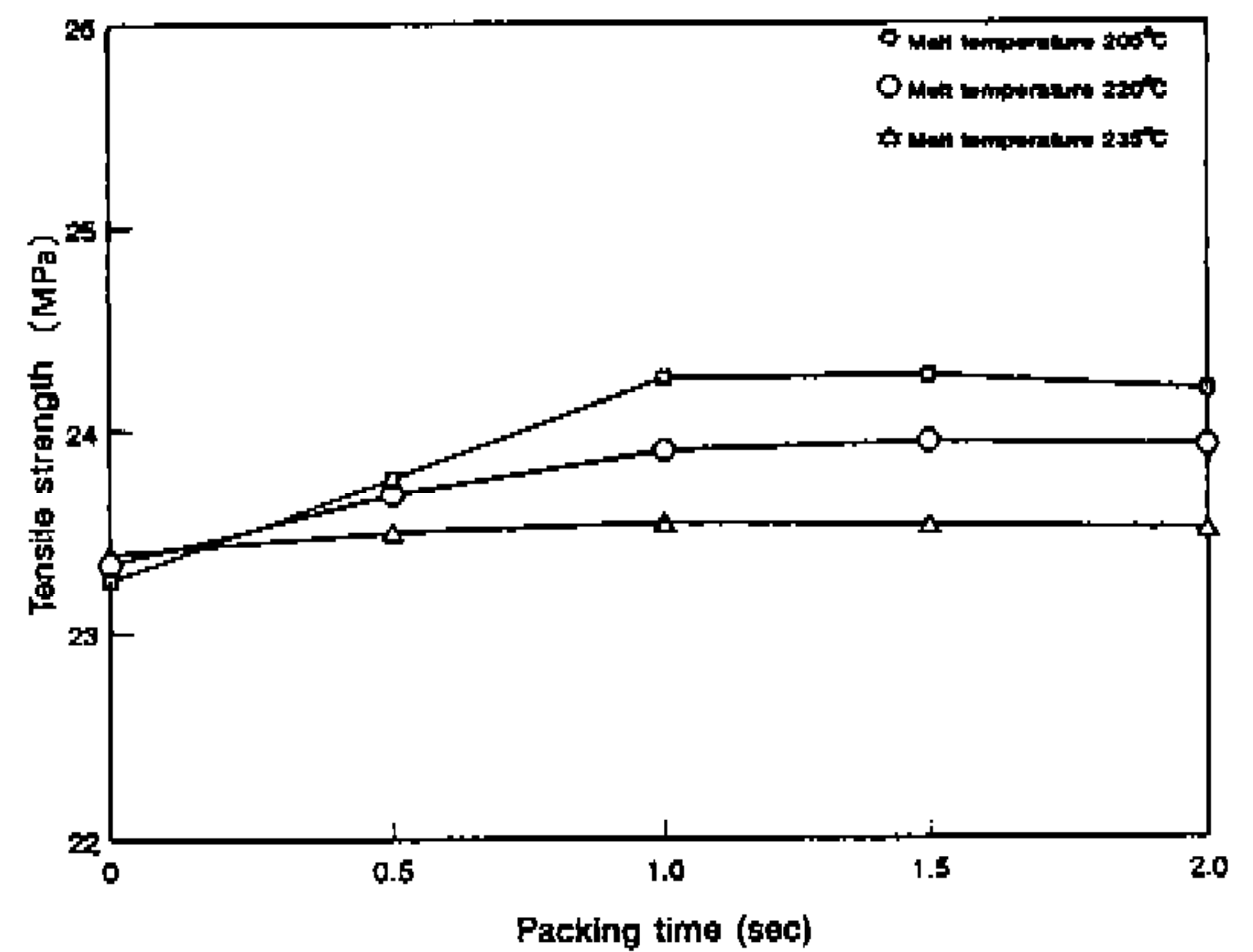
Fig.5는 금형온도 60°C, 용융수지온도 235°C, 보압시간 2.0초일때의 캐비티 압력곡선으로써, 게이트로부터 각각 20mm, 130mm 만큼 떨어진 위치에 설치된 압력센서에 의해 감지된 압력상태를 보여준다. 충전에서 압축과정으로 절환되는점은 P<sub>1</sub>에서 T<sub>1</sub> 만큼 뒤에서 압력곡선이 시작됨을 알 수 있다. 이것은 게이트로부터 130mm 위치에 설치된 압력센서 S<sub>2</sub>에서 감지된 곡선으로써 압축과 보압과정에서 거의 같은 압력이 감지되었다.

Fig.6(a)는 금형온도 30°C, 보압시간 0.0초로 일정할 때 용융수지온도가 205°C, 220°C, 235°C로 변화함에 따라 나타나는 캐비티 압력곡선이며, Fig.6(b)는 용융수지온도 220°C, 보압시간 2.0초로 일정할 때 금형온도가 30°C, 45°C, 60°C로 증가함에 따라 나타나는 캐비티 압력곡선이다. Fig.6(a)에서 충전시간의 차이는 수지온도가 증가하면 수지의 점성이 낮아지므로 더 낮은 유동저항을 갖게 되고, 이 때문에 발생하는 관성효과로 보인다. Fig.6(a), (b)에서 캐비티압력은 용융수지온도의 영향보다 금형온도의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 보압단계의 끝부분동안의 급격한 압력감소는 주로 냉각정도에 따라 결정되며, 수지온도, 제품두께, 금형온도 및 수지 물성의 영향을 받는다.

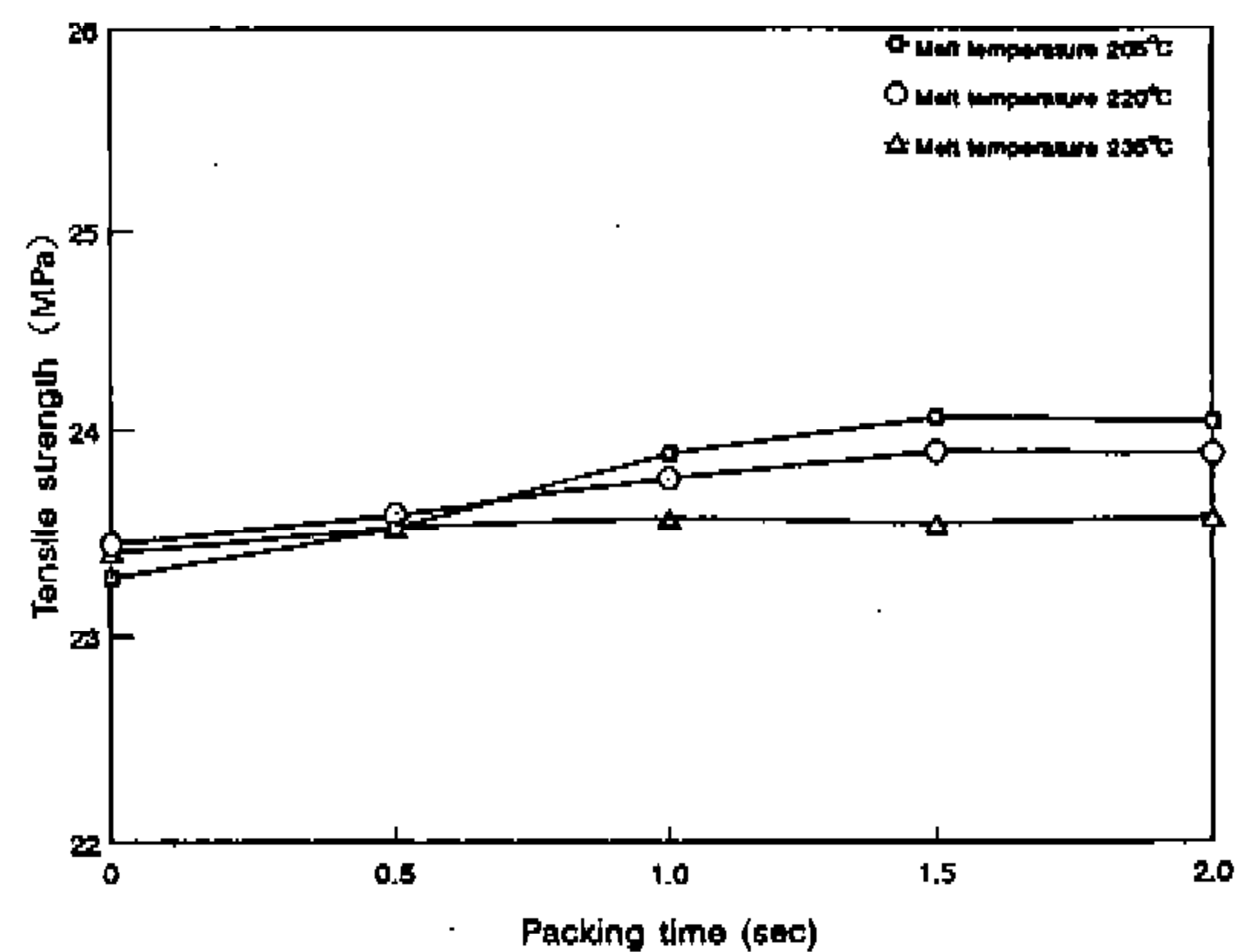
Table 2에 보인 성형공정변수의 변화에 따라 사출성형한 시편을 만능시험기에서 인장시험하여 얻은 인장강도를 Fig.7에 나타내었다. Fig.7(a), (b), (c)는 금형온도를 각각 30°C, 45°C, 60°C로 변화시킬 때 인장강도에 미치는 보압시간의 영향이다. Fig.7(a)는 용융수지온도가 각각 205°C, 220°C, 235°C로 높아짐에 따라 인장강도는 4.06%, 2.40%, 0.64%로 보압의 효과는 많이 감소하였다. 여기에서 인장강도 변화율은 보압시간의 증가에 따른 인장강도의 증가량을 보압시간 0.0초일 때의 인장강도로 나눈값에 100(%)을 곱하여 나타내었다. 용융수지온도가 205°C, 220°C, 235°C로 증가



(a) Mold temperature 30°C

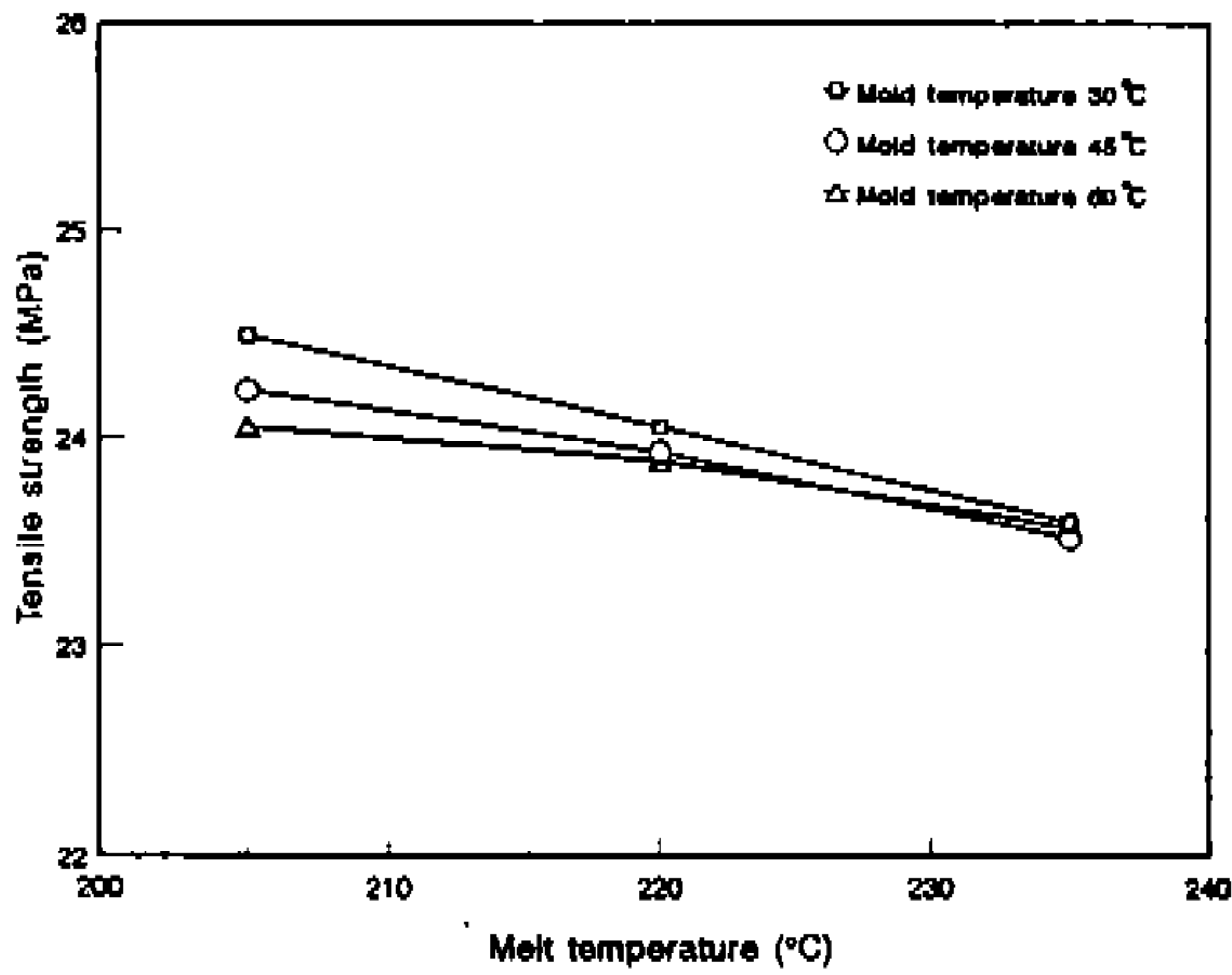


(b) Mold temperature 45°C

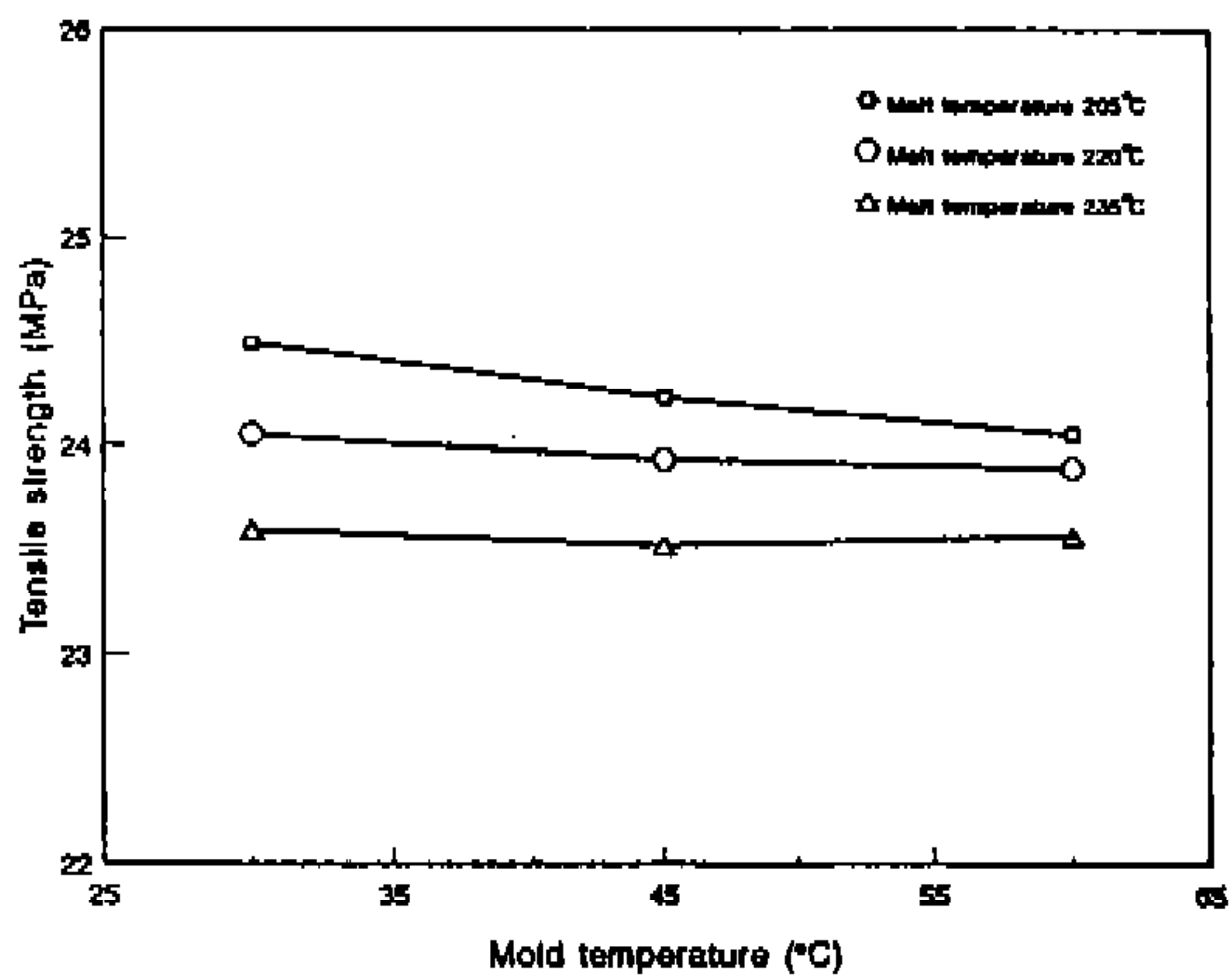


(c) Mold temperature 60°C

Fig.7 Tensile strength variation with packing time



(a) melt temperature



(b) mold temperature

Fig.8 Measured average strength vs. (a) melt temperature and (b) mold temperature

함에 따른 인장강도 변화율은 Fig.7(b)에서 4.34%, 2.59%, 0.66%, Fig.7(c)에서는 3.31%, 1.87%, 0.71%를 나타내었다. 보압시간의 증가는 성형품의 인장강도를 증가시키지만 금형온도가 증가하면 보압효과의 폭이 적게 나타났다. Fig.7(b)와 (c)에서 보압시간이 낮을 때 인장강도의 변화가 일관성이 없는 것은 사출성형기 조작시 충전이 끝나는 시간을 제어하므로 사출량의 조절이 일정치 못하기 때문으로 보인다. 그러므로 안정된 캐비티 압력곡선을 나타내는 보압시간 2.0초일 때의 인장강도 변화율을 구하여 보면 각각 3.82%, 2.90%, 1.94%로써 용융수지온도의 영향보다 금형온도의 영향이 적은것으로 나타났다.

Fig.8은 Table 2와 같은 성형공정변수에 따른 캐비티 압력곡선에서 성형품의 치수와 외관에 충분한 보압효과를 미치는 보압시간인 1.5초와 2.0초일 때의 평균 인장강도를 구하여 나타낸 것이다. Fig.8(a)는 수지온도가 205°C, 220°C, 235°C로 증가할 때 인장강도 변화율은 각각 3.80%, 3.02%, 2.06%의 영향을 받으며, Fig.8(b)는 금형온도가 30°C, 45°C, 60°C로 증가할 때 인장강도 변화율은 각각 1.83%, 0.62%, 0.41%의 영향을 받는 것으로 나타났다. Fig.6의 캐비티 압력곡선에서도 나타낸것처럼 금형온도보다 수지온도의 영향이 더 크게 나타났다. 각 성형조건별로 취출된 시편의 게이트, 중앙 및 끝부분을 채취하여 밀도를 측정하였다. 사출성형에서 폴리프로필렌과 같은 결정성수지는 보압시간과 시편의 부위에 따른 밀도 차이는 매우 작았으며, 용융수지온도, 금형온도가 증가함에 따라 0.2%정도의 밀도 변화가 발생하였다. 인장강도에 미치는 영향도 밀도의 변화에 의한것보다는 금형온도와 용융수지온도의 변화에 따른 결정화도에 의한것으로 보인다. 결정화도는 주로 분자 구조에 기인하지만 성형품의 후처리(annealing)<sup>11-13</sup>에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 성형품의 인장강도를 증가시키려면 후처리를 하거나 성형시에 충분한 결정화를 촉진시키도록 냉각조건을 개선하고 금형온도 및 용융수지온도를 높게 하여야한다.

#### 4. 결 론

사출성형에서 충전과 보압단계의 캐비티압력을 측정하고, 성형품의 인장시험을 실시한 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 캐비티 압력곡선에서 원활한 절환을 위한 각 절환점의 위치선정이 중요하며, 보압시간이 짧을 때 후충전단계에서 곡선의 급격한 변화가 검출되었다. 또한 보압으로 절환후의 캐비티압력의 급격한 감소방지와 보압의 안정을 위한 최대 캐비티압력의 지속시간은 보압의 크기와 최대 캐비티압력에 의해 결정된다.
- 2) 보압시간과 용융수지온도가 증가하면 성형

품의 인장강도를 증가시키지만 금형온도가 증가되면 인장강도에 미치는 영향이 적어짐을 알 수 있었다. 또한 캐비티 압력곡선을 통하여 정확한 게이트 고화시간을 얻을 수 있었고, 본 실험에서 게이트 고화시간 1.5 초를 지나면 보압효과는 나타나지 않고 인장강도는 거의 일정하게 나타났다.

- 3) 보압시간과 시편의 부위에 따른 밀도 차이는 매우 작았으며, 용융수지온도 및 금형온도가 증가함에 따라 0.2% 정도의 밀도 변화가 발생하였다.
- 4) 캐비티 압력곡선은 성형공정변수와 공정상태를 표시하는 중요한 수단으로써, 충전동안 압력의 기울기 및 충전압력, 전환점에서 최대압력까지의 기울기 및 최대압력, 보압의 안정화점과 유지시간 등을 인식하여 공정을 제어할 수 있는 전문가 시스템의 개발 가능성을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. Kamal, M.R. and Kenig, S., "The Injection Molding of Thermoplastic Part I : Theoretical Model", *Polym. Eng. and Sci.*, Vol.12, No.4, pp. 294-301, 1972.
2. Wu, P.-C., Huaug, C.F. and Gogos, C.G., "Simulation of the Mold-Filling Process", *Polym. Eng. and Sci.*, Vol.14, No.3, pp.223-230, 1974.
3. White, J.L., "Fluid Mechanical Analysis of Injection Mold Filling", *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 15, No.1, pp.44-50, 1975.
4. Huilier, D., Terrisse, J., de la Lande, M. -E. and Latrobe, A., "Modelling the Packing Cooling Stage in Injection Molding of Amorphous Polymers", *Intern. Polymer Processing 3*, Vol.4, pp.184-190, 1988.
5. Yoon, K.H. and Wang, K.K., "Birefringence Measurements of Injection-Molded Disks", *SPE ANTEC*, pp.2221-2225, 1992.
6. Spencer, R.S. and Gilmore, G.D., "Equation of State for High Polymers", *Journal of Applied Physics*, Vol.21, pp.523-526, 1950.
7. Chung, T. -S. and Ryan, M.E. "Analysis of the Packing Stage in injection Molding", *Polym. Eng. and Sci.*, Vol.21, No.5, pp.271-275, 1981.
8. Sanschagrín, B., "Process Control of Injection Molding", *Polym. Eng. and Sci.*, Vol.23, No.8, pp.431-437, 1983.
9. Coyle, D.J., Blake, J.W. and Macosko, C.W., "The Kinematics of Fountain Flow in Mold-Filling", *AIChE J.*, Vol.33, No.7, pp.1168-1177, 1987.
10. Dupert, F. and Vanderschuren, L., "Calculation of the Temperature Field in Injection Molding", *AIChE J.*, Vol.34, No.12, pp.1959-1972, 1988.
11. Friedl, C.F. and Mccaffrey, N.J., "Crystallization Prediction in Injection Molding", *SPE ANTEC*, pp.330-332, 1991.
12. Yu Long, Z.H. Stachurski and Shanks R.A., "Crystallization Behaviour of Isotactic Polypropylene/Linear Low Density Polyethylene Blends", *Polym. Int.*, Vol.26, No.3, pp.143-146, 1991.
13. Denault, J. and Vu-khanh, J., "Crystallization Behavior and Effect of Thermal Treatment on Fracture Performance of Glass Flake Reinforced Polypropylene", *Polym. Compos.*, Vol.13, No.5, pp.372-379, 1992.