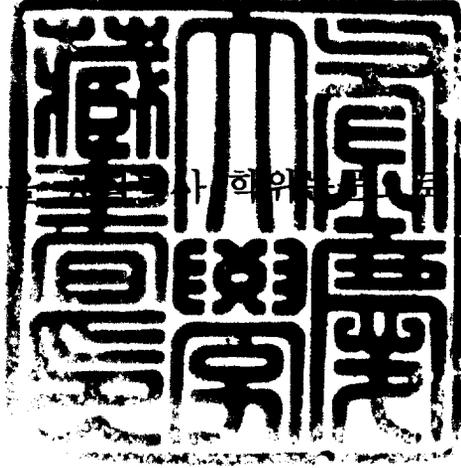


공학박사 학위논문

사출성형 방식에 따른 성형수축
거동에 관한 연구

지도교수 정영득

이 논문은 공학박사 학위논문으로 제출함.



2006년 2월

부경대학교 대학원

기계공학과

최윤식

崔潤植의 工學博士 學位論文을 認准함.

2005年 12月 19日

主	審	工學博士	沈 成 輔	
委	員	工學博士	柳 重 學	
委	員	工學博士	韓 圭 澤	
委	員	工學博士	郭 在 燮	
委	員	工學博士	鄭 英 得	

목 차

Abstract

List of tables

List of figures

Nomenclature

제 1 장 서 론	1
1. 1 연구배경	1
1. 2 사출성형의 수축에 관한 연구동향	4
1. 3 연구목적 및 내용	7
1. 4 논문의 구성	10
제 2 장 사출성형	13
2. 1 사출성형과 수축	13
2.1.1 사출성형 시스템	13
2.1.2 금형구조	15
2.1.3 유동기구	17
2.1.4 금형의 냉각회로	19
2.1.5 성형수축	20
2.1.6 수축에 관련한 성형인자	24
2. 2 사출성형해석	30
2.2.1 사출성형해석의 목적	30
2.2.2 사출성형해석의 수행절차	30

2.2.3 사출성형해석의 이론식 -----	31
2. 3 사출압축과 성형수축 -----	36
2.3.1 사출압축 성형 -----	36
2.3.2 사출압축성형시의 수축 -----	38
2.3.3 일반 사출공정과 사출압축공정의 pVT곡선 -----	39
제 3 장 실험장치 및 실험방법 -----	43
3. 1 사출성형기 -----	43
3. 2 실험금형 및 시편 -----	46
3. 3 수축실험 및 측정 -----	52
3.3.1 실험방법 -----	52
3.3.2 실험용 수지 -----	56
3.3.3 캐비티 내압 측정 -----	59
제 4 장 사출성형시 수축실험 결과 및 고찰 -----	60
4. 1 PP 수지의 수축거동 -----	60
4.1.1 캐비티 형상에 따른 성형수축 변화 -----	60
4.1.2 캐비티 내압에 따른 성형수축 변화 -----	62
4.1.3 사출속도에 따른 성형수축 변화 -----	63
4. 2 PA 수지의 수축거동 -----	66
4.2.1 사출속도에 따른 성형수축 변화 -----	66
4.2.2 사출속도에 따른 측정 위치별 성형수축 변화 --	67
4.2.3 보압의 변화에 따른 성형수축 변화 -----	68

4.2.4 보압의 변화에 따른 측정 위치별 성형수축 변화	69
4.2.5 성형해석결과와 실험결과의 비교	70
4.3 PC 수지의 수축거동	74
4.3.1 수지온도에 따른 수축 변화	74
4.3.2 금형온도에 따른 수축 변화	76
4.3.3 보압에 따른 수축 변화	78
4.3.4 수지온도에 따른 캐비티 내압 변화	79
4.3.5 금형온도에 따른 캐비티 내압 변화	80
4.3.6 보압에 따른 캐비티 내압 변화	80
제 5 장 사출압축성형시 수축실험 결과 및 고찰	82
5.1 PMMA 수지의 수축거동	82
5.1.1 게이트 타입에 따른 수축 변화	82
5.1.2 사출압력에 따른 수축 변화	86
5.1.3 압축유지시간에 따른 수축 변화	89
5.2 사출압축성형시 LCD BLU 도광판의 수축	92
5.2.1 LCD BLU 도광판과 사출압축성형	92
5.2.2 사출압축실험 및 결과	94
제 6 장 결 론	100

참고문헌

감사의 글

A Study on Shrinkage Behavior according to Injection Molding Processes

Choi, Yoon Sik

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Pukyong National University

Abstract

The shrinkage of molding products is an important factor that could affect on dimensional accuracy and warpage. In this study, the relation between injection process conditions and the shrinkage phenomena was investigated by studying a lot of published papers about two processes such as injection molding and injection compression molding.

Based on these basic studies, experimental studies were conducted in moldings having different aspect ratio for two injection molding processes.

In the injection molding, the experiment was performed for the crystalline polymers such as polypropylene(PP) and polyamide(PA), and the amorphous polymers such as polycarbonate(PC). Experimental conditions were aspect ratio, injection speed, mold temperature, melt temperature and holding pressure.

Based upon experimental results, in case of the cross direction of melt

flow, the shrinkage of near gate was consistently lower than far gate in PP, PA6 and PC polymers. However, the shrinkage in case of melt flow direction was different from near gate and far gate. The shrinkage on PP and PC polymers in melt flow direction was lower than the in melt flow cross direction. In the case of PA6, the shrinkage in melt flow direction was higher than in melt flow cross direction. The reason of these differences was considered that each polymer has unique property such as entropy elasticity.

In the PP moldings, as increased the aspect ratio, the shrinkage of melt flow-direction decreased. In case of PA moldings, the shrinkage of plaque molding was of the smallest quantity at low injection speed. However, as increased the injection speed, the shrinkage of all kinds of moldings decreased and was eventually alike.

An amorphous polymer PMMA was used for the experiment of injection compression molding. The main experimental parameters were injection compression pressure and injection compression time. The shrinkage in the injection compression molding could be predicted by analyzing a pvT diagram. Through the case study of 17" LCD BLU plate was verified by the shrinkage could be governed by controlling the compression pressure .

The results of this study could be used to design the mold and to set the parameters of the injection molding process for the new molding products having a different aspect ratio and also could be used for controlling of the shrinkage.

List of tables

- Table 1-1 Studies on the shrinkage in the injection molding
- Table 3-1 Specifications of injection molding machines
- Table 3-2 Molding conditions for experiment of PP and PA6 polymer
- Table 3-3 Molding conditions for experiment of PC polymer
- Table 3-4 Properties of PP M580
- Table 3-5 Properties of PA6 8280b NP
- Table 3-6 Properties of PC LEXAN-141
- Table 3-7 Properties of PMMA IF380
- Table 4-1 Input data for shrinkage analysis
- Table 5-1 Specifications for 17" light guide panel
- Table 5-2 Light guide panel size by 1st injection-compression molding
by press mode
- Table 5-3 Light guide panel size by 2nd injection-compression molding
by press mode
- Table 5-4 Light guide panel size by 3rd injection-compression molding
by AP mode

List of figures

- Fig. 2-1 Composition of injection molding system
- Fig. 2-2 Types of injection mold
- Fig. 2-3 Delivery system and cavity in the mold
- Fig. 2-4 Cooling system in injection molding system
- Fig. 2-5 p v T diagram of amorphous and semi-crystalline plastic
- Fig. 2-6 Relationship between shrinkage and characteristic parameter
- Fig. 2-7 Flow front of the melt plastic
- Fig. 2-8 Injection compression molding processes
- Fig. 2-9 p v T diagram of PMMA on injection molding
- Fig. 2-10 p v T diagram of PMMA on injection compression molding
- Fig. 3-1 Injection molding machine (75ton)
- Fig. 3-2 Injection compression molding machine (140ton)
- Fig. 3-3 Schematics of experimental injection mold
- Fig. 3-4 Photo. of experimental mold
- Fig. 3-5 Locations of pressure measuring sensors in mold
- Fig. 3-6 Photo. of experimental injection mold with pressure measuring sensors
- Fig. 3-7 Shapes of experimental specimen
- Fig. 3-8 Molded specimens
- Fig. 3-9 Experimental plaque by injection compression molding
- Fig. 3-10 Shrinkage measuring locations
- Fig. 3-11 Measuring machine(Mitutoyo OPTOEYE A2)

- Fig. 3-12 Mashalling system for measuring cavity pressure
- Fig. 4-1 Shrinkage vs. cavity type in case of PP
- Fig. 4-2 Cavity pressure vs. cavity pressure in case of PP
- Fig. 4-3 Shrinkage vs. injection speed in case of PP
- Fig. 4-4 Shrinkage vs. injection speed in case of PA
- Fig. 4-5 Shrinkage vs. measuring point in case of PA
- Fig. 4-6 Shrinkage vs. cavity pressure in case of PA
- Fig. 4-7 Shrinkage vs. measuring point in case of PA
- Fig. 4-8 Mesh for injection molding analysis
- Fig. 4-9 Injection molding analysis result
- Fig. 4-10 Shrinkage of flow direction
- Fig. 4-11 Shrinkage of cross flow direction
- Fig. 4-12 Shrinkage vs. melt temperature for PC
- Fig. 4-13 Shrinkage vs. mold temperature for PC
- Fig. 4-14 Shrinkage vs. holding pressure for PC
- Fig. 4-15 Cavity pressure vs. melt temperature for PC
- Fig. 4-16 Cavity pressure vs. mold temperature for PC
- Fig. 4-17 Cavity pressure vs. holding pressure for PC
- Fig. 5-1 Shrinkage vs. measuring point in case of side gate
- Fig. 5-2 Shrinkage vs. measuring point in case of fan gate
- Fig. 5-3 Shrinkage vs. measuring point in case of film gate
- Fig. 5-4 Shrinkage vs. injection compression pressure in case of side gate
- Fig. 5-5 Shrinkage vs. injection compression pressure in case of fan

gate

Fig. 5-6 Shrinkage vs. injection compression pressure in case of film

gate

Fig. 5-7 Shrinkage vs. injection compression time in case of side gate

Fig. 5-8 Shrinkage vs. injection compression time in case of fan gate

Fig. 5-9 Shrinkage vs. injection compression time in case of film gate

Fig. 5-10 Light guide panel for 17" notebook

Fig. 5-11 Injection compression molding machine(450ton)

Fig. 5-12 Shrinkage according to injection compression type

Nomenclature

x, y, z	: Cartesian coordinate system	
v	: Velocity	[m/s]
p	: Pressure	[kg/cm ²]
t	: Time	[sec]
η	: Viscosity	[m ² /s]
$\dot{\gamma}$: Shear rate	[sec ⁻¹]
c_p	: Specific heat	[J/kg · K · °C]
ρ	: Density	[kg/m ³]
k	: Isothermal compressibility coefficient	[kg/cm ²]
T	: Temperature	[°C]
β	: Volume expansion coefficient	[kg/cm ²]
F	: Fluidity	
\bar{v}	: Average velocity	[m/s]

제 1 장 서 론

1. 1 연구배경

플라스틱 재료는 1870년에 셀룰로이드(celluloid)가 발명되고, 제 2차 세계대전을 거치면서 급속히 발전하였다. 이러한 플라스틱은 종래의 종이, 나무, 금속을 대신할 수 있는 재료로서 그 인식이 확산되었고, 단일 공정으로 복잡한 형상의 완제품을 생산할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 일용품과 산업전반에 걸쳐 광범위하게 사용되는 재료가 되었다¹⁾.

대부분의 플라스틱 제품은 사출성형공정(injection molding)을 통하여 성형 생산되는데, 1940년대의 사출성형기술은 가전제품, OA기기, 자동차 부품 및 정밀기기 등에 널리 보급되었다. 1960년대에 접어들면서 플라스틱의 소비가 급증하였다. 그 이유는 현재의 사출성형기의 기초가 되는 인라인 스크류(screw) 방식의 사출성형기가 개발되었기 때문이며, 이로서 플라스틱 제품의 고생산성과 고품질의 요구를 충족할 수 있게 되었다. 1970년대에 개발된 고속사출성형방식은 여러 가지 제품의 플라스틱화를 촉진시키는데 일조하였다. 1980년대 말에 도입된 저압사출성형방식은 다품종 소량생산과 성형품의 고품질화를 촉진시켰으며, 이와 동시에 텔레비전과 같은 가전제품의 대형화를 원하는 소비자의 욕구와 자동차 경량화의 목적에 따라 제품의 플라스틱화가 더욱 증가하게 되었다. 이러한 플라스틱 제품은 사출성형으로 구조가 복잡하며 대형의 부품도 생산

할 수 있었다.

그러나 고온, 고압에 의한 일반 사출성형은 성형품의 휨(warpage), 성형수축(shrinkage), 싱크 마크(sink mark) 등의 성형불량이 발생한다²⁾. 이 중에서 수축 문제는 현재 양산체제에서 미크론(micron) 단위까지 요구하는 상황에서 해결되어야 할 중요한 문제 중의 하나가 되었다. 성형제품의 수축과 관련하여 수지재료의 수축률은 금형 설계자가 금형의 설계 전에 미리 정확히 알아두어야 중요한 설계변수이다. 그러나 수지의 수축률은 수지 메이커에서 발표한 데이터를 그대로 믿고 금형 설계에 적용하고 있는 것이 또한 현실이다. 수축률을 감안하여 정확한 치수로 성형된 제품이라 할 지라도 성형 후에 수축률의 차이에 의해 발생하는 휨과 변형은 제품 조립상의 문제가 되고 있다.

제품에 발생하는 수축은 수지가 성형 중에 열을 받아서 액상이 되고, 액상의 수지는 다시 고압의 사출압을 받아서 금형의 캐비티에 충전되며, 캐비티에 충전된 고온의 수지는 상대적으로 차가운 금형과의 접촉으로 열을 잃으면서 고화되고 수축된다. 그 다음에는 금형이 열리고 제품이 취출되어 상온까지 냉각되면서 또 다시 수축이 발생한다. 이 수축은 용융된 수지가 응고할 때에 일어나는 체적의 변화에 의한 것뿐만 아니라, 여러 가지 요인에 의해서 영향을 받는다. 예를 들면, 수지온도, 금형온도, 충전속도, 보압 등의 성형조건의 변화와 성형품의 형상비, 첨가제 등에 따라 성형수축은 변화한다. 이렇게 많은 변수들이 존재하므로 성형수축을 정확히 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다.

성형수축에 의한 제품변형을 줄일 목적으로 사출압축성형 (injection compressing molding) 기술이 개발되었는데, 이 성형방법은 CD, 렌즈, LCD (liquid crystal display) BLU(back light unit)용 도광판 등의 제품성형에 적용되면서 광학제품 및 박육제품의 복굴절 성능을 향상시키고 잔류응력을 최소화할 목적으로 많이 적용되고 있다. 사출압축성형은 전사성 및 휨 방지, 고밀도의 성형품 성형에 유리하다. 따라서 치수정밀도를 향상시키며 일반 사출성형에서는 불가능한 초박육 제품의 성형에 적용되는 등의 많은 장점들을 가지고 있다. 그러나 사출압축공정은 사출성형기의 형식과 금형의 형식에 따라 제어 방식이 다양할 뿐만 아니라 현장에서는 성형수축률에 대한 데이터도 찾아보기 힘든 실정에 있으므로 정밀성형용 사출압축형 금형개발에 많은 애로를 겪고 있다.

성형수축 문제를 해결하기 위해서는 수축에 관련한 기존의 연구 결과를 문헌을 통해 고찰 한 후 각종 수지에 따른 성형조건별 성형수축의 크기와 경향을 정확히 구해 내는 연구와 사출압축성형에서 일어나는 수축의 특성과 수축의 크기에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있다.

1. 2 사출성형의 수축에 관한연구 동향

최근의 열가소성 플라스틱 제품은 다른 부품과 조립될 필요가 있어 아주 엄격한 치수정밀도가 요하게 되었다. Liu와 Manzione³⁾, Neubert⁴⁾, Broadhed와 Koch⁵⁾ 등의 연구에 따르면 수축은 보압(holding pressure), 보압시간, 수지온도와 금형온도, 사출속도(injection rate), 게이트 형상 및 다른 성형인자들에 의해서 영향을 받는다고 하였다. 특히, 거의 모든 연구에서 보압이 수축에 가장 큰 영향을 미치는 성형인자로 나타나 있다. Mamat⁶⁾, Kumazawa⁷⁾, Bain⁸⁾, Isayev와 Hariharan⁹⁾ 등은 보압 다음으로 수축에 영향을 미치는 성형인자는 성형온도라고 발표하고 있다.

Delbarre¹⁰⁾, Nagy¹¹⁾ 등은 결정성 수지를 대상으로 한 연구에서 금형온도를 증가시키면 수축이 증가한다고 발표하였으나, 이와 반대로 Bain⁸⁾, Liu와 Manzione³⁾ 등은 비결정성 수지를 대상으로 수행한 연구에서 금형온도를 증가시키면 수축률이 감소하는 정반대의 결과를 발표하였다.

보압시간(holding pressure time)과 관련된 연구에서 Jansen¹²⁾, Leo와 Cuvelliez¹³⁾ 등은 보압시간의 증가는 항상 수축을 감소시키는 결과를 보였다고 하였다.

대부분의 연구는 사각시편과 인장시편 형상에 대해서 수행되었으며, 예외적인 연구로서 Heiber¹⁴⁾, Gerbert¹⁵⁾ 등은 디스크의 중앙에 게이트가 있을 때의 수축에 대해 연구하였으며, Ni와 Wang¹⁶⁾은 박스 금형의 수축에 대하여 연구하였으며, 구멍이 있는 평판 제품에 대

한 수축은 Gennari¹⁷⁾, Burke와 Kazmer¹⁸⁾에 의해서 연구되었다. 그 밖의 연구로서 Ries¹⁹⁾, Lee와 Dubin²⁰⁾ 등은 성형품의 형상을 실험인자로 연구하기도 하였다.

Ries¹⁹⁾, Lee와 Dubin²⁰⁾, Thomas와 McCaffery²¹⁾ 등은 유동방향에 따른 성형수축의 변화는 대부분 캐비티 내압과 관련되어 있다고 발표하였다. Mamat⁶⁾, Thomas와 McCaffery²¹⁾ 등은 결정성 수지인 폴리프로필렌(polypropylene; PP)과 폴리아미드(polyamide; PA)수지를 대상으로 한 연구에서 수축이 성형품의 수지흐름 방향과 수지흐름 직각방향의 수축이 다르게 나타났다고 발표하였으며, 예외적으로 Thomas²¹⁾의 PP성형품의 연구에서는 게이트에서 가까울수록 수지흐름 방향의 수축이 흐름직각 방향의 수축보다 크게 나타났으며, 게이트에서 멀수록 반대의 결과를 보였다고 발표하였다. Jansen, Van Dijk와 Husselman²²⁾ 등은 연구문헌 인용에서 비결정성 수지인 폴리카보네이트(polycarbonate; PC)는 수지흐름 방향과 흐름직각 방향의 수축은 차이가 없다고 발표하였다. 그리고 Delbarre¹⁰⁾, Lee와 Dubin²⁰⁾, Jansen, Van Dijk와 Freriksen²³⁾ 등의 여러 연구에서는 섬유(fiber)가 첨가된 경우에는 수지흐름 방향과 흐름직각 방향의 수축에는 상당한 차이가 있으며, 항상 수지흐름 방향의 수축이 수지흐름직각 방향보다 작게 나타났다고 발표하였다.

대부분의 연구는 수축량을 성형 후 24 ~ 48시간 후에 일어나는 성형품의 수축을 측정하여 계산하였다²⁴⁾. 그러나 플라스틱 성형품은 성형 후 물리적인 회복성향과 수지의 재결정 등으로 인하여 수축이 계속 발생한다⁸⁾. 플라스틱의 수축은 시간의 로그값에 비례하

여 계속된다고 하였다²⁵⁾. 수축에 영향을 미치는 인자들에 대한 첫 연구로서 제한된 실험횟수에서 얻은 수축 데이터를 바탕으로 수정된 경험식을 만들기 위해서 통계적 해석방법(statistical analysis method)이 사용되었다^{8,11,21)}.

수축을 쉽게 이해하기 위한 방법으로 금형의 캐비티를 폐공간으로 간주하여, 금형에 사출되는 수지의 총 중량에 대한 계산을 고려하는 것이다. Heiber는 성형품의 체적 수축은 압력, 체적, 온도를 종합하여 나타낸 pvT 선도를 따라서 변화한다고 연구하였다¹⁴⁾. 보통 이러한 모델들은 최종의 체적 수축을 얻기 위해서 수지온도와 압력을 고려하여 만들어진 Tait 식을 사용한다^{26,27)}.

綾井 英二는 사출압축성형에서의 수축예측도 각 수지의 pvT선도에 따라 예측이 가능하다고 하였다²⁸⁾. 能川 玄은 사출압축성형방법 중 사출프레스방법을 연구하면서 연구에 사용된 사출성형기를 소개하였다²⁹⁾. Wu와 Su는 일반 사출성형과 사출압축성형 방식을 사용하여 LCD BLU의 성형에 있어서 성형조건이 LCD BLU 성형품의 수축에 미치는 영향을 연구하여, 일반 사출성형에서는 보압이, 사출압축성형에서는 금형온도, 수지온도, 사출속도가 성형품의 수축에 영향을 미치는 인자라고 발표하였다³⁰⁾. Young은 렌즈성형에서 사출압축성형의 성형인자가 잔류응력과 수축에 미치는 영향을 연구하여, 금형온도와 압축압력이 중요한 성형인자라고 발표하였다³¹⁾. 이상의 연구결과를 정리하면 Table 1-1과 같다.

1. 3 연구목적 및 내용

사출성형 공정은 정밀치수를 요하는 복잡한 대형 플라스틱 제품의 대량 생산에 이상적이다. 이러한 플라스틱 성형공정은 과거에는 제품의 기능적인 측면을 강조하여 플라스틱의 기계적, 물리적 성질을 중요한 설계인자로 인식하였으나, 현대의 플라스틱 산업에서는 제품의 미적인 측면도 중요한 인자로 고려하고 있는 현실이다³²⁾. 또한, 플라스틱 산업은 종래의 양산체제에서 보다 고정도와 고품질을 요구하게 되었고, 성형품에 대하여는 마이크론 단위까지 치수정밀도가 높은 가공을 필요로 하고 있다.

성형품의 치수정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 성형품의 수축률이며, 플라스틱 마다 고유의 수축률이 존재한다. 수많은 플라스틱이 사용되고 있는 현실에서 모든 제품에 특정한 수축률을 적용하기에는 많은 문제점이 있으므로, 현재에는 플라스틱 수지회사에서 제공하는 수축률을 금형설계에 적용하거나, 금형 설계자 자신의 경험치에 의존하고 있다. 한편, 사출성형 시 플라스틱 제품은 형상에 따라 분자배향의 정도가 다르게 되며, 그에 의해 수축의 정도도 달라진다. 플라스틱 성형품의 수축률에 관한 기존의 연구에서는 거의 인장 시편 및 단순한 사각 형상품을 대상으로 하고 있다³³⁻³⁸⁾.

본 연구에서는 일반 사출성형시와 사출압축성형시에 일어나는 플라스틱 성형품의 수축거동에 관한 2개의 분야에 대해 연구하였다. 일반 사출성형시의 수축연구에서는 결정성 수지인 폴리프로필렌수지와 폴리아미드 수지 및 비결정성 수지인 폴리카보네이트 수지를 대상으

로 3가지의 각기 다른 형상비(aspect ratio)를 갖는 시편을 통해 수축률 변화에 대한 거동을 실험을 통해 알아보았다. 성형수축실험은 수축에 영향을 미치는 성형인자를 선정한 후, 그 성형인자가 성형수축에 어떤 영향을 미치는지를 조사하였다. 성형인자와 실험내용은 아래와 같다. 또한, 제품의 형상비에 따른 수축거동을 알아보기 위해서 사출성형해석의 결과와 실제 사출성형 실험한 결과를 비교하였다.

- 1) 캐비티 형상에 따른 성형수축 변화
- 2) 캐비티 내압에 따른 성형수축 변화
- 3) 사출속도에 따른 성형수축 변화
- 4) 보압의 변화에 따른 성형수축 변화
- 5) 수지온도에 따른 성형수축 변화
- 6) 금형온도에 따른 성형수축 변화

사출압축성형에 관한 수축 연구에서는 폴리메틸메타크릴레이트(polymethylmethacrylate ; PMMA)수지를 대상으로 사각형(plaque) 형태의 성형품이 사출압축성형시에 일어나는 수축의 거동을 사출압축 실험을 통하여 알아보았다. 사출압축실험에 선정된 성형인자와 실험 내용은 아래와 같다.

- 1) 금형의 게이트 형상에 따른 성형수축 변화
- 2) 사출압축력에 따른 성형수축 변화
- 3) 사출압축 유지시간에 대한 성형수축 변화

또한, 사출압축성형시 PMMA수지의 pvT선도에 따라 추정된 이론적인 수축률과 실제 실험에서 측정된 수축률과의 차이에 대해 고찰하였다.

본 사출압축성형시 수축거동에 관한 연구결과를 검증하기 위한 사례연구로서 노트북용 모니터의 LCD BLU 도광판 제품에 준하는 성형품을 대상으로 실험하였다.

본 연구의 결과는 일반 사출성형용 금형설계와 사출압축용 금형설계 및 성형작업시 기초 자료로 활용이 크게 기대되며, CAE용 성형해석프로그램의 개발시에 기초 자료로 활용이 기대된다.

1. 4 논문의 구성

본 논문은 6개의 장으로 구성되어있다. 제 1장에서는 플라스틱 사출성형공정에 있어서 성형수축을 설명하고, 이와 관련하여 본 연구를 수행하게 된 연구배경 및 성형수축의 연구 동향 등을 설명하였다. 그리고 본 연구의 목적과 내용을 기술하였다.

제 2장에서는 사출성형의 개요와 관련 시스템 및 성형수축과 관련한 성형인자를 소개하였다. 그리고 연구를 위하여 사용된 성형이론식과 사출성형 CAE의 개요와 목적 등을 설명하였다. 또한, 본 논문에서 채택된 성형방식인, 일반 사출성형(injection molding)과 사출압축성형(injection compression molding)의 일반적인 공정과 특징을 비교하였다. 또한 각 성형방식에서 발생하는 성형수축에 대하여 설명하였다.

제 3장에서는 연구를 위하여 사용된 사출성형기, 실험용 금형과 실험시편, 사용수지의 특성과 물성치, 금형 캐비티 내압 측정장치 등의 실험장치 및 실험방법에 대해 기술하였다.

제 4장에서는 결정성 수지인 PP와 PA6, 비결정성 수지인 PC 수지에 대하여 일반 사출성형에 있어서 성형조건이 이들 각기 다른 형상비를 갖는 성형품의 수축에 어떤 영향을 미치는 지에 관하여 연구하였다. 이 장의 주요 내용은 캐비티 형상 즉, 성형품의 형상과 내압의 변화, 사출속도, 수지온도, 금형온도 등의 사출성형조건이 각각의 성형품 수축거동에 어떤 영향을 미치는가를 조사하였다.

제 5장에서는 사출압축성형시 PMMA 성형품이 성형인자에 따라 수

축에 어떠한 영향을 미치는지를 실험연구하였다. 일반 사출성형과 같은 방법으로 사출압축시에 각 성형조건이 성형품의 수축에 어떤 영향을 미치는지를 알아보았다. 특히, 일반 사출성형시와 사출압축성형시의 수축을 비교하여 사출압축성형시의 수축특성을 알아보았다. 또한 사례연구로서 노트북용 LCD BLU 도광판의 사출압축성형과정에서 발생하는 수축에 대해 압축력의 제어와 성형수축과의 관계를 알아보았다.

제 6장에서는 이상의 연구에서 분석된 주요한 연구 결과를 종합한 결론을 기술하였다.

Table 1-1 Studies on the shrinkage in the injection molding

Classification		Main contents	Reference number
Injection molding	Injection conditions	The relation of holding pressure and shrinkage	3, 4, 5
		The relation of melt temperature and shrinkage	6, 7, 8, 9
		The relation of mold temperature and shrinkage	3, 8
		The relation of holding time and shrinkage	12, 13
	Cavity types	Disk type	14, 15
		Box type	16
		Plate with hole	17, 18
		Etc	19, 20
	Melt flow direction	The relation of cavity pressure and flow direction	6, 19, 20, 21, 22
	Additives	The relation of fiber and flow direction	10, 20, 23
Injection compression molding	Injection conditions	Prediction of shrinkage by the pvT diagram	28
	Compression method	Injection compression molding machine	29
	Product shape	Processing conditions affects on the shrinkage LCD BLU and Lens	30, 31

제 2 장 사출성형

2. 1 사출성형과 수축

2.1.1 사출성형 시스템

Fig. 2-1에서 보는 바와 같이 전형적인 사출성형시스템은 사출시스템, 유압시스템, 형체결시스템, 제어시스템이 프레임 위에 구성되며, 주로 형체결력 톤(ton)수와 사출능력의 크기로 주요규격을 나타낸다. 주요 규격외에 사출속도, 사출압력, 스크루설계, 금형두께 및 타이바 사이의 거리 등을 사용한다. 사출성형시스템의 보조 장치로는 수지건조기, 재료이송 장치, 분쇄기, 금형온도 제어기, 냉각장치, 제품제거 로봇(robot) 및 제품처리장치 등이 있다.

Fig. 2-1의 (1)은 사출시스템으로 호퍼, 왕복 스크류 및 고정반으로 구성되어 있다. 이 시스템은 수지의 이송, 압축, 가스 제거, 용융 및 사출 과정 등을 거치면서 플라스틱을 가소화 및 계량하고 전달한다. 사출성형기의 호퍼는 열가소성 재료의 작은 펠릿(pellet)을 저장하고 저장된 펠릿은 배럴(barrel)과 스크류 장치로 중력에 의해 이송된다. 배럴은 왕복 가소화 스크류를 지지하고 있다. 노즐은 실린더를 금형의 스프루 부시에 연결하며 실린더와 금형 사이의 밀폐를 형성해 용융수지를 전달한다. Fig. 2-1의 (2)는 금형 시스템으로 가동반과 고정반 사이에 금형을 설치하며 타이바(tie-bar)에 지지된 가동반으로 금형에 체결력을 가한다. Fig. 2-1의 (3)은 유압시스템으로 금형의 개폐 및 체결력을 유지하고, 사출시스템의 배럴내에 있는 왕복스크

류를 회전시키고, 금형내의 이젝터 핀을 동작시키며, 금형 코어를 이동할 수 있게 한다. Fig. 2-1의 (4)는 형체결 시스템으로 금형의 개폐, 금형의 구성 부품의 지지 및 작동, 금형의 체결력을 제공한다. 체결력은 기계적인 잠금, 유압 잠금 또는 기본적인 형태의 조합에 의해 생성된다.

Fig. 2-1의 (5)는 제어 시스템으로 성형기 운전에서 일관성과 반복성을 제공한다. 이는 온도, 압력, 사출속도, 스크류 속도 및 위치 그리고 유압위치 등을 포함하는 공정 변수를 감시하고 제어한다.

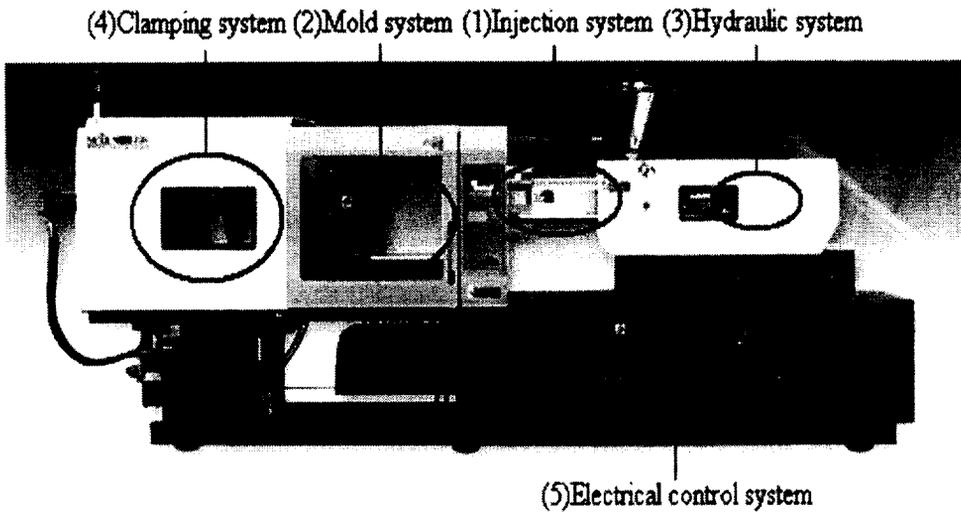


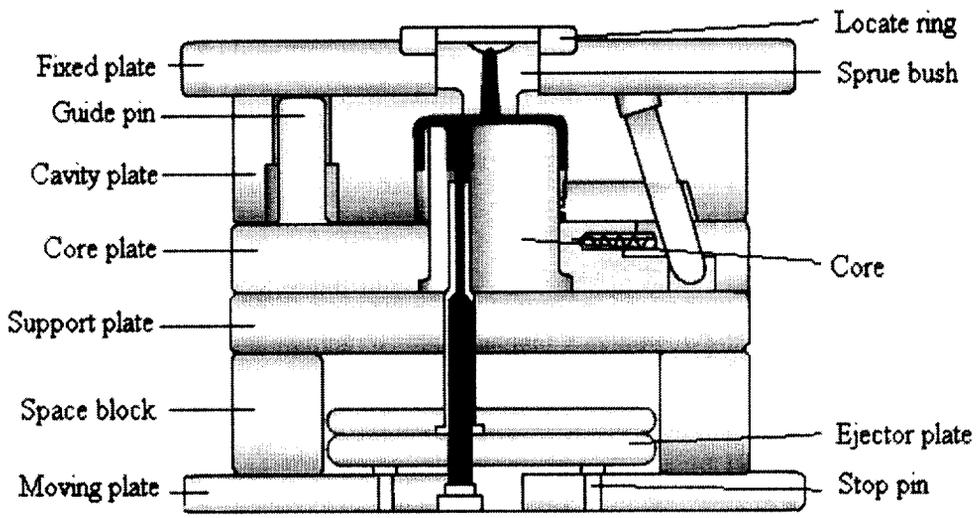
Fig. 2-1 Composition of injection molding system

2.1.2 금형구조

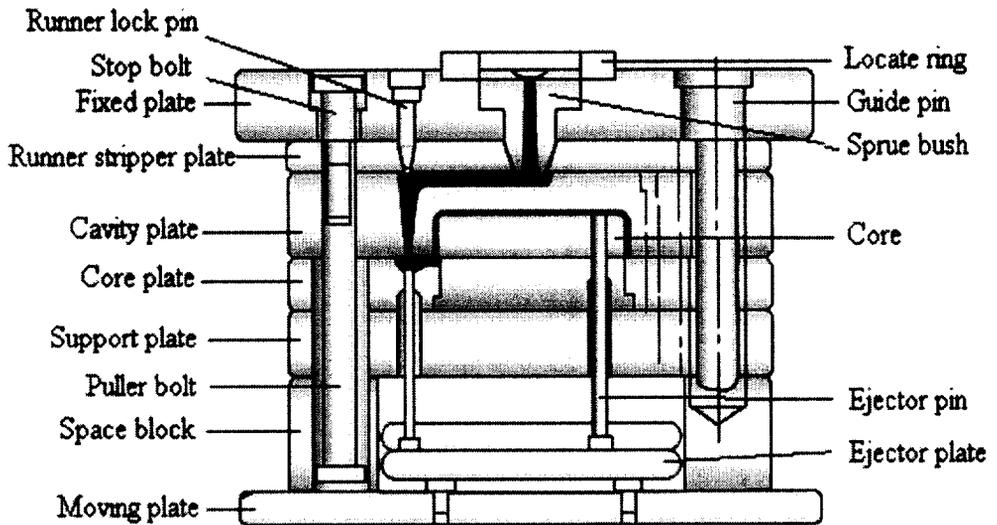
Fig. 2-1의 (2)에 설치되는 금형은 성형 제품의 형상을 결정한다. 금형의 구조는 성형품의 형상, 재질, 성형기의 규격, 금형제작 방법에 따라 여러 형식이 있지만, 기본적인 구조로 Fig. 2-2와 같이 2매 구성금형과 3매 구성금형으로 분류한다. 이것은 금형이 2부분으로 나누어지는가, 3부분으로 나누어지는 지에 따른 분류이다.

2매 구성금형은 고정측과 가동측으로 나누어지는데 고정측은 사출 성형기의 고정측의 다이플레이트에 고정되고 수지가 사출되는 측이다. 가동측은 성형기의 가동측 다이플레이트에 부착되며 성형시 성형품이 붙어있게 되므로 취출기구가 부착되는 측이다. 이러한 유형의 금형은 전형적으로 캐비티와 같은 금형판에 러너를 가지고 제품의 테두리나 그 주위에 게이트가 있는 제품에 사용된다.

3매 구성금형은 전형적으로 제품의 테두리를 벗어난 곳에 게이트를 적용할 수 있는 제품에 대하여 사용된다. 러너는 러너스트리퍼 플레이트(runner stripper plate)의 뒷면에 자리한다. 게이트를 임의의 위치에 설정하기가 쉽고, 다수 캐비티의 경우 성형품 가운데에 게이트의 위치 설정이 가능하며, 편게이트의 채용이 용이하다. 금형이 열리는 파팅면이 많고 속도가 늦어지게 되어 사이클 타임이 길어지는 단점이 있다.



(a) 2 plate type



(b) 3 plate type

Fig. 2-2 Types of injection mold

2.1.3 유동기구

용융수지를 성형기 노즐로부터 캐비티로의 이동통로를 제공하는 유동 시스템은 Fig. 2-3 에서 보는 바와 같이 일반적으로 스프루 (sprue), 콜드 슬러그 웰(cold slug well), 주 러너(primary runner), 보조 러너(secondary runner) 및 게이트(gate)를 포함한다³⁹⁾.

사출성형금형은 캐비티, 스프루 및 러너 시스템을 지지하는 성형판, 이젝트핀, 그리고 냉각회로로 이루어져 있다. 사출금형은 기본적으로 용융된 열가소성 수지를 고압으로 정밀 제작된 금형내부의 성형품 형상을 갖는 공간(cavity)에 주입하여 고화시키는 열교환기로 일반적으로 공구강으로 만들어진 형판과 형판의 조립체이다. 금형시스템은 캐비티 내에서 플라스틱에 형태를 부여하여 성형한 후 성형된 제품을 취출한다. 스프루 치수는 설계된 제품의 크기에 따라 정해진다. 특히 제품의 두께를 고려하여 결정되어진다. 스프루는 다른 단면보다 먼저 고화되어서는 안되며, 보다 쉽고 확실하게 수지를 캐비티에 도달시켜야 한다. 러너는 수지가 스프루에서 캐비티로 흘러 들어가도록 안내해준다. 러너를 통과하기 위해서는 추가적인 압력이 요구된다. 수지가 러너를 따라 흐를 때 마찰열이 러너에서 발생하여 수지의 온도를 높이며, 이는 수지의 흐름을 개선시킨다. 단면이 큰 러너는 상대적으로 단면이 작은 러너에 비해 작은 압력이 요구되므로 흐름이 원활하지만 긴 냉각시간, 많은 재료의 소비, 큰 형 체결력이 필요하다.

러너의 형태는 보통 표준형, 브릿지형, 방사형 등 3가지가 있다. 이들은 보통 멀티캐비티(multi-cavity system)에 사용된다. 이상적인

사출은 몰드의 모든 부분에서 일정한 밀도로 자유롭게 용융수지가 전달되어야 하고 이를 실현하기 위해 핫 러너(hot runner)가 사용되며, 핫러너 안에서 수지는 용융상태를 유지된다. 핫러너 시스템은 성형품과 함께 러너를 취출 않기 때문에 재료의 소비를 줄이고, 러너 제거공정이 필요 없다.

게이트는 용융수지가 금형 안으로 들어갈 수 있도록 해주는 입구로서 1점 게이트는 다점 게이트에 비하여 더 좋은 유동 형태를 얻을 수 있으나 생산성 향상이라는 점에서는 다점 게이트가 좋다. 1점 게이트는 제품에 웰드라인, 멜드라인을 만들지 않으며 스크랩의 양이 적기 때문에 경제적이다. 게이트의 위치는 기능이나 외부형태에 손상이 없는 가장 두꺼운 부분에 변형을 최소화 하기 위해 대칭으로 설치하고 에어 배출을 돕기 위해 공기 배출구를 설치하고 제팅(jetting)⁴⁰⁾을 발생시키지 않는 크기로 하며, 다점 게이트는 웰드라인, 멜드라인의 발생 위치에 주의해야한다.

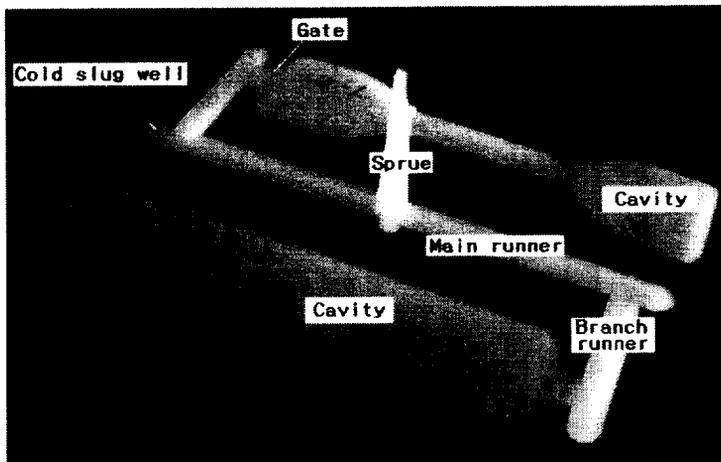


Fig. 2-3 Delivery system and cavity in the mold

2.1.4 금형의 냉각회로

냉각회로는 금형의 내부에 위치하는 통로로 이를 통해 냉매가 순환된다. 그 기능은 금형표면의 온도를 제어하는 것이다. 금형냉각시스템은 Fig. 2-4와 같이 온도제어장치, 펌프, 공급 분기관, 호스, 냉각채널, 회수 분기관으로 구성되어 있다. 사출성형품의 품질은 냉각회로에 의한 열평형조건에 따라 크게 달라질 수 있으며, 생산의 경제적 효율성은 어떤 내용의 열교환시스템을 가진 금형으로 생산하느냐에 달려 있다. 냉각수로서는 전형적으로 금형의 캐비티와 코어를 관통하고 있다. 냉각수로에서 너무 멀리 떨어진 영역을 국부적으로 냉각하는 방법으로는 배플(baffle), 버블러(bubbler) 및 열핀(conduction pin)을 사용 한다⁴¹⁾.

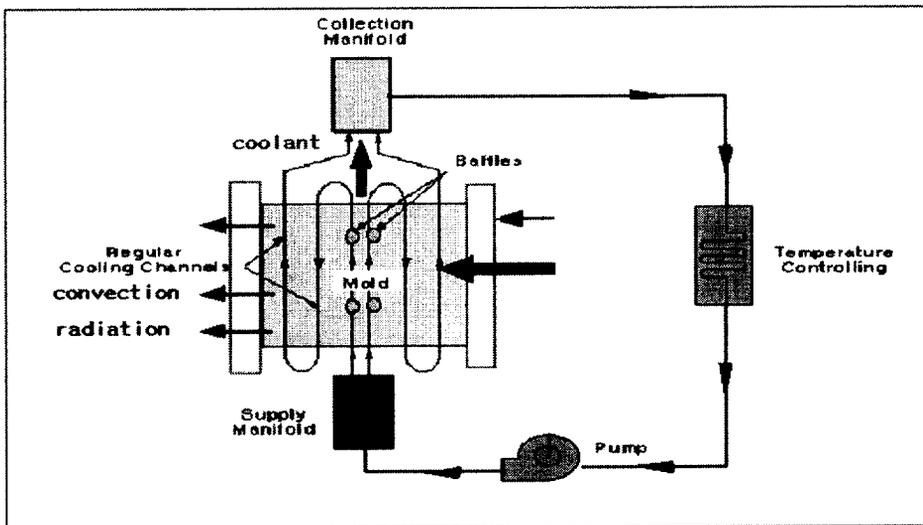
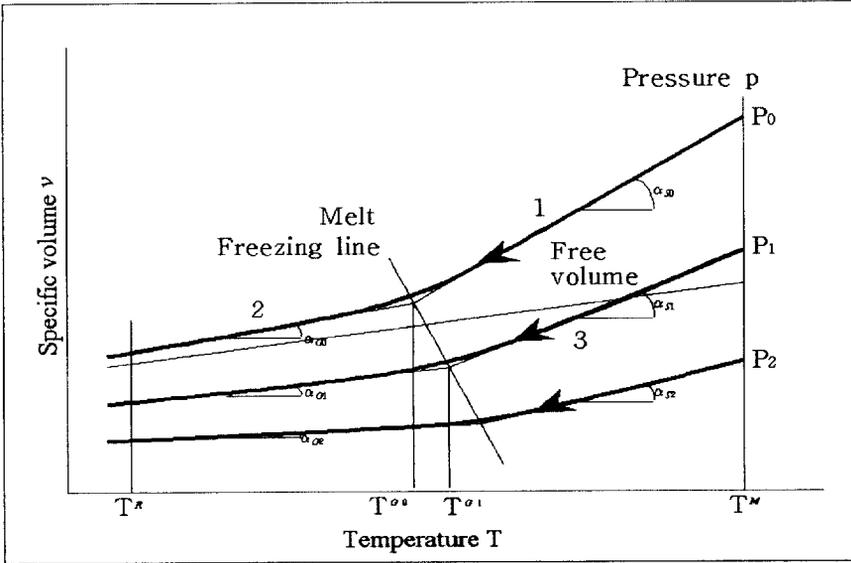


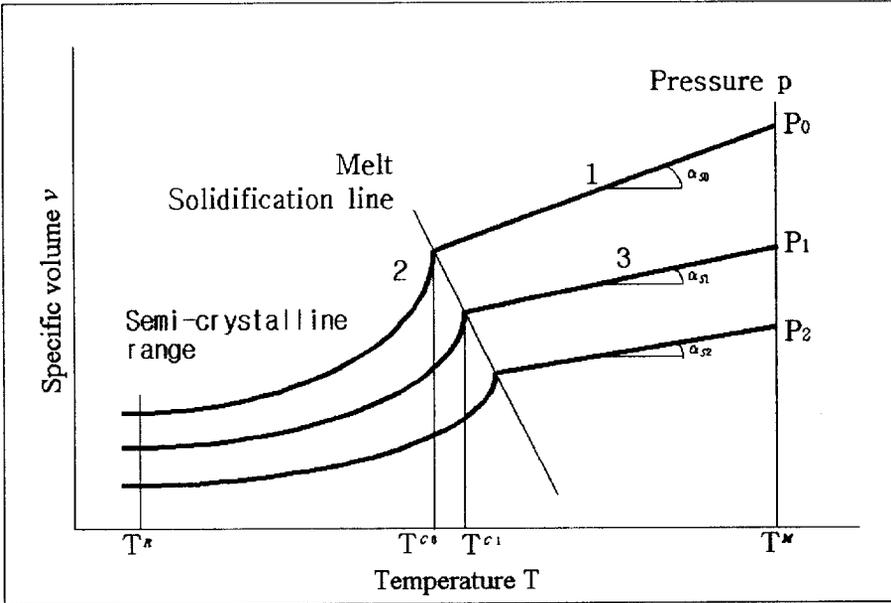
Fig. 2-4 Cooling system in injection molding system

2.1.5 성형수축

성형품을 금형으로부터 빼내 상온까지 냉각시키면 수축이 생긴다. 형 열림 후 24시간 이내에 발생하는 수축을 성형수축, 그 후에 발생하는 수축을 후수축(post shrinkage)이라고 한다. 성형수축은 크게 체적수축(volumetric shrinkage)과 선형수축(liner shrinkage)으로 나누는데, 용융된 수지가 고화될 때 체적이 줄어들어 수축하게 되는것을 체적수축이라 한다. 수지의 흐름방향이나 분자배향, 결정화, 충전제 및 강화제에 의한 영향 등에서 오는 방향성을 가지는 길이방향의 수축을 선형수축이라 한다⁴²⁾. Fig. 2-5(a)는 비결정성수지의 pvT 다이어그램이며, Fig. 2-5(b)는 결정성수지의 pvT 다이어그램이다.



(a) Amorphous



(b) Semi-crystalline

Fig. 2-5 pvT diagram of amorphous and semi-crystalline plastic

열가소성 플라스틱의 성형에 있어서 재료는 열을 받아서 유동이 가능한 액체로 되며 여기에 사출압력이 작용하여 캐비티내에 충전되고 나면, 캐비티내의 수지의 열이 금형으로 전도되어 상실되면서 고화되며 수축한다. 금형을 열고 제품을 이형시켜서 상온까지 냉각시키면 적은 양이나마 또 다시 수축한다. 이 수축은 용융된 수지가 응고할 때에 일어나는 체적의 변화에 의한 것이 대부분이지만 그 외에 수축률에 영향을 주는 요인이 몇 가지 더 있다. 예를 들면 결정성 수지의 경우에는 수지의 흐름방향과 이것의 직각방향의 수축편차가 생기기도 한다. 일반적으로 수지의 흐름방향의 수축이 흐름의 직각방향보다 크게 된다. 또한 사출압력을 높이면 성형수축률은 작게 되며, 비체적 변화에 대해서는 수지온도, 금형온도, 충전속도 등을 낮추면 충전된 수지의 평균온도도 낮아져서 용융물의 비체적을 작게 하며 금형 속의 수지 수축률을 작게 한다.

이와 같이 수축에 의해 금형 캐비티 내에서 성형된 제품은 대부분 캐비티 치수보다는 약간 작아진다. 따라서 도면의 치수와 꼭 같이 성형품을 만들고자 하면 금형의 캐비티의 치수는 수축을 감안하여 약간 크게 만들어야 한다.

성형수축률 S 는 다음 식으로 정의하여 사용하고 있다.

$$S = \frac{L_m - L_a}{L_m} \times 100(\%) \quad (2.1)$$

여기서,

L_m : 상온에서의 금형치수

L_a : 상온에서의 성형품 치수

성형수출률을 감안한 금형치수는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$L_m = \frac{L_a}{1 - \alpha_L} \quad (2.2)$$

여기서,

α_L : 수지의 수축계수

일반적으로 성형수축률은 1/1000단위로 표시한다.

고분자 수지의 밀도 변화는 액상과 고상의 두 영역을 묘사할 수 있는 아래와 같은 Tait의 실험식을 이용하여 나타낼 수 있다^{43,44}).

$$\nu(T,p) = \nu_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + \nu_t(T,p) \quad (2.3)$$

여기서,

T : 온도

p : 압력

C : 상수

B : 온도함수

만약, $T > T_t$ 이면

$$\nu_0 = b_{1m} + b_{2m} \bar{T}$$

$$B(T) = b_{3m} \exp(-b_{4m} \bar{T})$$

$$\nu_t(T, p) = 0$$

$T < T_t$ 이면

$$\nu_0 = b_{1s} + b_{2s} \bar{T}$$

$$B(T) = b_{3s} \exp(-b_{4s} \bar{T})$$

$$\nu_t(T, p) = b_7 \exp(b_8 \bar{T} - b_9 p)$$

이며, C는 유니버설 상수로서 0.0894의 값을 가지며 \bar{T} 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\bar{T} = T - b_5 \tag{2.4}$$

이고, T_t 는 유리전이온도(glass transition temperature) 이다.

2.1.6 수축에 관련한 성형인자

성형수축률은 동일한 수지일지라도 성형조건에 따라 변화하므로 특히, 정밀사출성형의 경우 금형설계 시에 성형수축률의 결정에 주

의하여야 한다. 다음은 각 성형조건, 수지의 종류, 성형품의 두께 및 게이트의 크기에 따라 수축률이 어떻게 영향을 받는지에 대한 일반적인 수축의 성질을 기술한 것이다.

(1) 수지온도와 성형수축

일반적으로 수지의 온도는 성형조건외 다른 인자에 비교해서 성형수축에 대한 영향은 적다. 수지온도가 높으면 수축에 대하여 두 가지의 반대성질을 가지고 있다. 첫 번째는 높은 성형온도는 잠재적인 수지의 열적 수축을 더 증가시키고, 두 번째는 수지점도의 감소로 압력전달이 용이하여 수축을 감소시키는 원인을 제공한다.

(2) 금형온도와 성형수축

결정성수지는 금형온도가 높아지면 성형품의 냉각속도가 늦어지기 때문에 결정화가 비교적 많이 진행되어 수축률이 증대하게 된다. 이 영향은 수축률에 크게 작용하며, 비결정성수지는 보통 성형수축률이 1% 이하인데 비해, 결정성수지는 5%에 달하는 것도 있다.

비결정성수지의 성형수축은 대부분 열수축(냉각수축)에 의한 것이지만, 열가소성수지는 금형온도가 성형성, 치수품질, 변형, 외관품질, 물성에 영향을 준다. 금형온도가 높아지면 대부분의 경우 수축률이 크게 되는 경향이 있다. 반면에 금형온도가 높아지면 냉각이 늦어지게 되고 사출압력이 충분히 전달 되어 금형내의 수축이 적게 되고, 금형으로부터 취출한 후의 탄성회복도 커진다. 이 두 가지가 종합적으로 적용되어 금형온도에 의한 성형수축률은 크거나

혹은 작게 나타나게 된다. 같은 열가소성 수지일지라도 결정성수지와 비결정수지는 금형온도의 영향에 큰 차이가 있다. 결정성 수지는 금형온도가 높아지면 결정화가 진행되어 결정화도가 커져서 수축률이 크게 된다.

(3) 사출압력과 성형수축

사출압력이 높으면 금형 내에서 수지의 용융정도의 차가 적으며 그 때문에 층간에 작용하는 전단력은 작아지고 수축도 작아진다. 또 사출압력이 높은 것은 탄성회복도 크며 그 때문에 결과적으로 수축은 작아진다. 폴리스티렌 등의 비결정성 수지의 경우 사출압력에 대한 수축률의 변화가 직선적인 것에 대하여 결정성 수지에서는 곡선으로 변화한다. 이것은 결정화 과정에서 일어나는 수축의 영향 때문이다.

(4) 사출속도와 성형수축

사출속도가 증가하면 캐비티내를 유동하는 용융수지가 전단가열되어 점도가 감소하여 유동성이 증가하게 된다. 따라서 캐비티에 충전율이 증가하여 수축이 감소하지만, 일정수준 이상으로 사출속도가 증가하면 용융수지의 온도가 증가하는데 이는 성형수축의 증가의 원인이 된다.

(5) 냉각시간과 성형수축

냉각시간이 길면 냉각이 균일하게 되어 금형내의 수지는 충분히

고화하기 때문에 금형으로부터 빼내어진 성형품의 치수는 금형치수에 더욱 가깝게 되므로 성형수축률은 작게 된다. 결정성수지의 경우는 결정화가 천천히 진행되어 결정화도가 높아지기 때문에 성형수축률로 볼 때 크게 된다. 그러나 실제에 있어서는 성형품의 살두께, 수지온도, 결정화의 진행 등으로부터 복합적으로 영향을 받기 때문에 그 경향이 획일적이지는 않다.

(6) 보압과 성형수축

스크류 전진시간은 게이트가 냉각되어 고화되지 않은 상태에서 수지를 계속 압축하고 있는 보압시간이다. 게이트의 고화시간까지 스크류가 전진을 계속한다면 수축률은 최소로 되고 제품중량은 최대로 된다. 그러나 게이트가 고화되기 전에 스크류가 정지되면 수축률은 커지게 되고 치수의 변동도 크게 된다. 성형수축률을 최소로 하고 치수변동 범위를 극소화하기 위해서는 스크류 전진시간을 게이트 고화시간보다 짧게 해서는 안된다.

(7) 배향성과 성형수축

성형과정에서 일어나는 수지의 분자배향이나 유리섬유 또는 석면 등 장섬유 충전제 및 강화제에 의한 배향은 성형수축률에 방향성을 주는 원인이 되어 유동방향과 직각방향과는 수축률에 많은 차이를 나타낸다.

(8) 성형품 살두께와 성형수축

성형품의 살두께가 냉각속도에 영향을 미친다. 살두께가 커짐에 따라 냉각속도가 늦어져서 수축률이 커지게 된다. 그러나 수지의 종류에 따라 수축률의 차이가 있으며 ABS, PC 등은 살두께에 거의 관계가 없으며, PMMA, PS 등은 살두께에 비례하여 수축률이 커지며 경질 PVC처럼 살두께가 커짐에 따라 역으로 수축률이 작게 되는 것도 있다.

(9) 게이트의 크기와 성형수축

게이트의 단면적이 작으면 게이트가 먼저 고화하여 금형내의 수지에 충분한 성형압력이 전달되기가 어려워지기 때문에 대개의 경우 성형수축률이 크게 된다. 게이트 단면적이 크면 수지가 비교적 긴 시간동안 유동이 가능한 상태가 되어 충분한 압력을 전달할 수 있기 때문에 성형수축률은 작게 된다. 그리고 실험적으로 게이트부에서 주입속도가 빠를수록 성형수축률이 크다는 것이 알려져 있다. 따라서 게이트 단면적이 클수록 주입속도는 낮게 되고 성형수축률은 감소한다.

이상의 성형조건과 수축률의 변동에 관한 내용 중에서 몇가지를 그래프로 나타내면 Fig. 2-6과 같다⁴⁵⁾.

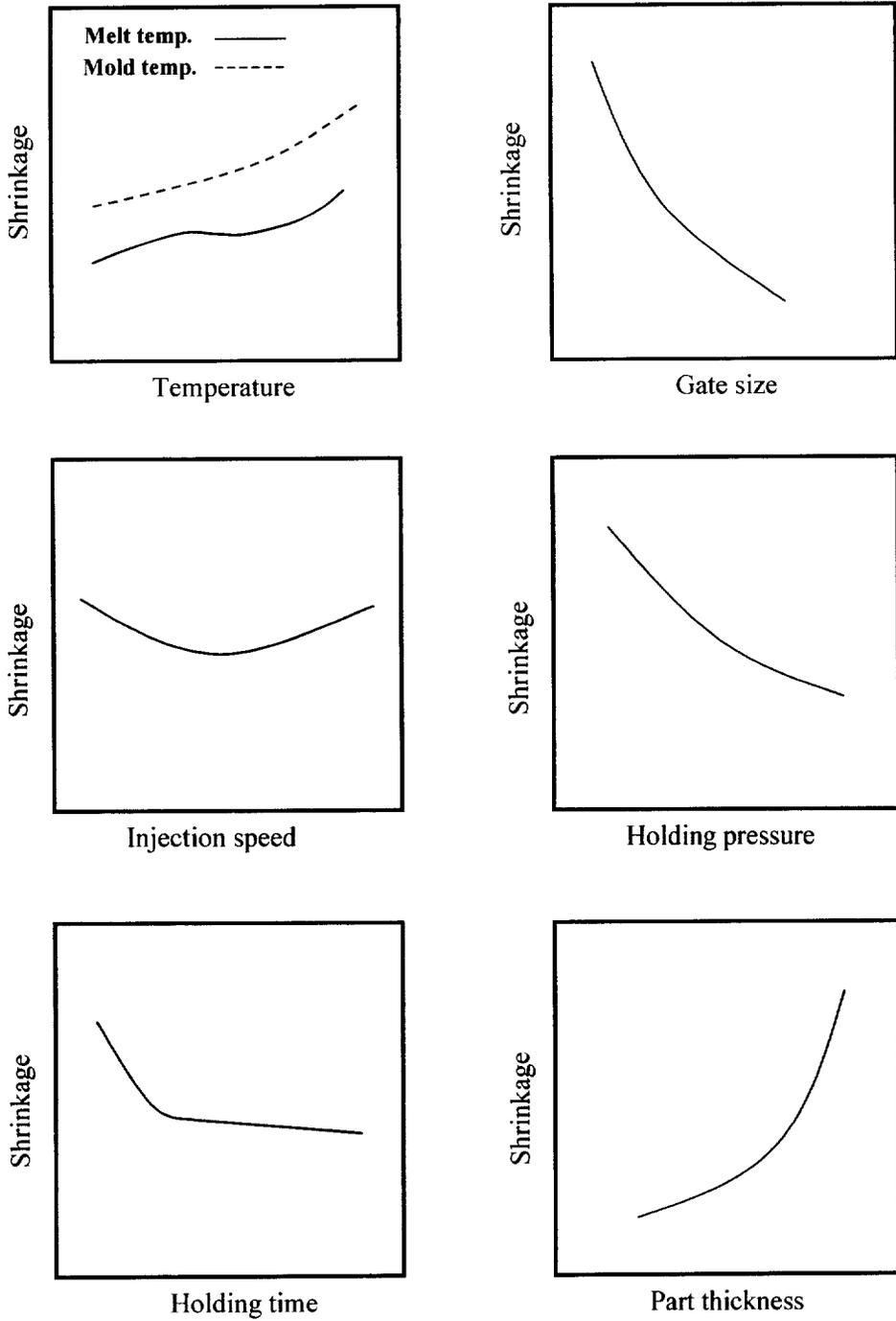


Fig. 2-6 Relationship between shrinkage and characteristic parameter

2. 2 사출성형해석

2.2.1 사출성형해석의 목적

컴퓨터는 제품개발의 각 단계에서 상당히 유용한 개발도구이며, 제품개발의 모든 단계에서 컴퓨터를 이용함으로써 보다 우수한 제품개발이 가능하게 된다. 특히 제품개발에 컴퓨터를 사용하여 설계도구로 사용한다면, 시작품의 제작횟수를 줄일 수 있음은 물론 제품의 개발기간의 단축 및 개발비용의 절감에 큰 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 CAE 프로그램의 사용은 많이 보급되어 많은 업체에서 많이 활용하고 있다. 특히, 플라스틱 사출성형품에 있어서 제품 설계자는 도면에 표기된 치수정밀도를 가진 제품의 성형이 가능한지의 여부를 예측할 수 있으며, 금형 설계자는 러너, 게이트 및 금형 냉각시스템이 제품에 미치는 영향을 미리 예측할 수 있으며, 사출성형 담당자는 제품을 양호하게 성형할 수 있는지, 어떤 사출성형기를 사용해야 하는가, 성형조건을 권장 조건으로 설정 하였다면 이 조건의 신뢰성의 정도를 알아 볼 수 있다. 결과적으로 사출성형 CAE는 이러한 각각의 단계에 대해서 유용한 결과를 제공한다.

2.2.2 사출성형해석의 수행절차

사출성형해석의 수행절차를 살펴보면 아래와 같다.

- (1) 명확한 목표의 설정 : 사출성형해석을 통해서 어떤 결과를 얻고자 하는 지에 대한 명확한 목표를 설정하여야 한다.
- (2) 성형 가능성의 검증 : 구상한 제품에 대한 성형 가능성의 가부를 검토하여야 한다. 이와 같은 검토는 컴퓨터 해석을 위한 모델을

만들지 않고도 가능하다.

- (3) 제품의 유한요소 생성 : 제품의 크기, 형상 및 기능 등을 정의한 후에는 제품에 대한 3차원 설계 모델을 이용하여 유한요소를 생성한다. 이 때 제품의 형상을 정의하는 유한요소는 구조해석과 사출성형해석에 사용된다.
- (4) 성형성 검토를 위한 충전해석 수행 : 제품의 정의가 완료되면 충전해석을 수행한다. 이 때, 새롭게 추가된 형상이나 두께 변화가 성형 시 어떤 영향을 미치는 지를 확인한다.
- (5) 충전해석의 추가 수행 : 냉각 해석을 수행하지 않고 충전해석을 수행하면 설계안은 보다 구체화 된다.
- (6) 수축률 차이의 평가 : 수축률 차이와 수축률의 차이가 제품의 형상에 미치는 영향을 평가한다.
- (7) 금형냉각 해석의 수행 : 이미 만들어진 모델과 충전 및 후 충전 해석을 통해서 캐비티 내의 용융수지에서 금형으로 방출되는 열량을 계산하여 금형냉각 해석을 수행한다.
- (8) 금형냉각 채널의 수정 : 금형벽면의 온도분포를 개선하기 위해서 금형냉각채널을 수정한다.
- (9) 충전, 냉각, 보압 해석의 통합적 수행 : 수축 및 변형해석을 위해 이전 단계의 해석결과를 활용한다.

2.2.3 사출성형해석의 이론식

사출성형에서 용융수지는 압축성이며, 비뉴턴 유체(non-newtonian fluid)이다. Fig. 2-7과 같이 캐비티 내에서 금형 벽면에 열을 전달하

고 고화층(frozen layer)을 형성하면서 유동하며 용융 선단(melt front)은 분수효과(fountain effect)를 나타낸다⁴⁶⁻⁴⁹⁾. 유동해석은 Hele-Shaw 유동에 기초한 지배방정식을 수식화하여 사용하며, 이들의 지배방정식은 다음과 같다⁴⁶⁻⁵⁰⁾.

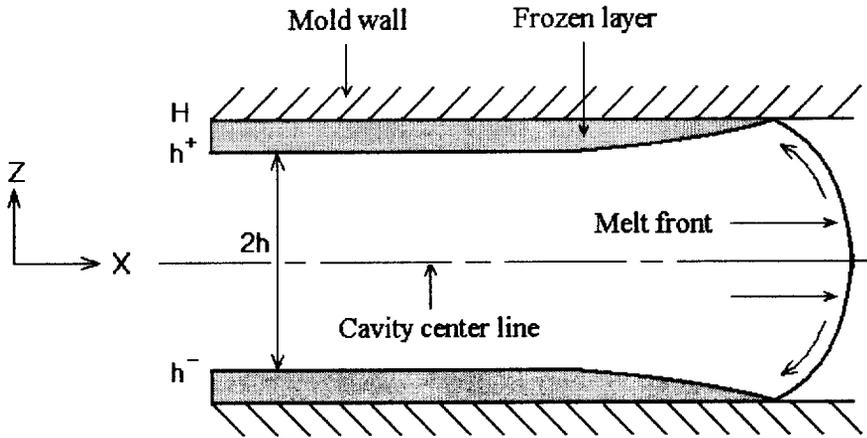


Fig. 2-7 Flow front of melt plastic

(2.5)식은 연속방정식을, (2.6)식은 운동량 방정식, (2.7)식은 에너지 방정식을 각각 나타낸다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + \beta T \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.7)$$

여기서, 첨자(x, y, z)는 좌표축을 나타내며, v 는 속도, p 는 압력, η 는 점성, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률 속도, ρ 는 밀도, c_p 는 정압비열, T 는 온도, k 는 등온압축계수, β 는 체적팽창계수(coefficient of volume expansion)를 나타낸다.

한편, 충전과정(filling phase)에 있어 용융수지는 캐비티 내에 충전되는 동안 비압축성과 2차원유동($v_z = 0$) 과정으로 취급된다. 따라서 충전과정에서 지배방정식은 식 (2.8), (2.9), (2.10)과 같이 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 각각 나타낸다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

또한, Kennedy⁴⁶⁾, Seow⁵¹⁾ 등은 유동성(fluidity)을 정의하였고, 연

속 및 운동량 방정식을 결합시킨 충전과정에서 압력 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.11)$$

여기서, F 는 유동성을 나타내며, 식(2.12)과 같다.

$$F = \int_0^h \frac{z^2}{h} dz \quad (2.12)$$

Fig. 2-7에서 캐비티 내 벽면의 고화층에서 경계조건으로서 각 유동속도는 0(zero)이므로,

$$(v_x, v_y, v_z) = 0 \quad (\text{at } z = h) \quad (2.13)$$

또한, 캐비티 중심선에서는

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0 \quad (\text{at } z = 0) \quad (2.14)$$

식 (2.9)로부터 식(2.15)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} z = \eta \frac{\partial v_x}{\partial z}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \quad (2.15)$$

성형 두께에 대한 평균유동속도(average velocities)를 구하기 위해 식(2.15)에 적분식 F 를 대입하며,

$$\bar{v}_x = -\frac{F}{h} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \bar{v}_y = -\frac{F}{h} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.16)$$

여기서, 임의의 x, y 방향에 있어 단위 유동길이에 대한 유동량은 식(2.17)과 같다.

$$m_x = \int_{h^-}^{h^+} v_x dz, \quad m_y = \int_{h^-}^{h^+} v_y dz \quad (2.17)$$

2. 3 사출압축과 성형수축

2.3.1 사출압축 성형

사출압축성형에 대한 관심은 오래전부터 시작되었으나, 그 연구는 역사가 오래되지 않았다. 사출압축용 성형기로서는 20년 전에 앵겔사(Engel)가 토글식 압출압축기를 개발하여 주로 렌즈성형에 적용하였다. 그리고 최근 여러 가지 사출압축성형 방법이 소개되고 있으나, 조직적 연구는 되지 않고 있다.

최근, 콤팩트디스크의 성형으로 변형이 적고 정밀한 전사(mapping)가 필요하여, 국내 성형기 제작업체에서 연구가 진행되어 콤팩트디스크 전용 성형기를 설계하고 있다. 또한, 이 기술을 적용할 때, 금형설계, 성형조건설정 등에 대한 고려가 필요하고, 압축의 시점 등의 연구가 필요하였다. 이것에 관해서는 몇 년 전부터 성형수축을 pVT곡선을 이용해 컨트롤하는 것이 중시되어, 큰 직경의 렌즈를 pVT곡선에 따른 실용적인 생산이 시도 되었다. 사출압축성형은 전사성의 향상과 변형방지에 유용함이 확인되었고, 동시에 휘어짐 방지와 밀도를 높이는 효과가 중요시되어 새로운 연구 분야로서 발전하였다.

사출압축 성형법의 적용분야는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 전사성과 저변형의 특성을 활용하여 기포가 적고, 치수 정밀도가 좋은 성형품을 만들기 위한 목적으로 사용되며, 이에 해당되는 성형품은 콤팩트디스크, 렌즈 등의 주로 광학적 성형품에 이용된다.
- (2) 휘어짐 방지를 목적으로 하는 사출압축성형은 폴리아세틸과 같은 엔지니어링 플라스틱 뿐만 아니라, 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등 범용플라스틱에도 변형을 막는 효과가 있다.

(3) 일반 사출성형에는 불가능한 박육제품의 성형에 사용된다. 1.2mm의 두께의 콤팩트디스크에는 흐름이 좋지 않은 폴리카보네이트를 사용하여 직경 300mm의 원판을 그대로 사출성형 할 수 없으나, 사출압축성형에는 가능하다.

사출압축성형은 두께에 대해 면적이 큰 성형품에 유효하지만 모든 성형품에 적용시킬 수 있는 것은 아니다.

사출압축성형은 보통 압축성형기를 사용하여 약간 열린 상태의 캐비티에 재료를 저압으로 주입한 후 금형을 닫으면서 가압하는 것이 기본적인 성형방법이며, 실제적으로는 압축성형과 동일한 성형과정이다.

사출압축성형기를 이용한 사출압축성형 방법은 Fig. 2-8과 같이 형체력을 2단으로 절환하여 사출압축하는 로링크(rolinx)방식, 금형의 코어를 작동시키는 마이크로몰더(micromolder)방식, 미리 금형을 열어놓은 상태에서 사출한 후 압축하는 사출프레스(injection-press)방식 등이 있다²⁸⁾. 본 연구에서 적용한 사출압축방식은 로링크 방법으로 사출시 사출압력에 의해 가동측이 일정량 열리며, 사출이 끝나면 보압의 적용시 가동측이 압축력을 받아 압축유지시간 만큼 압축하게 하는 성형법이다.

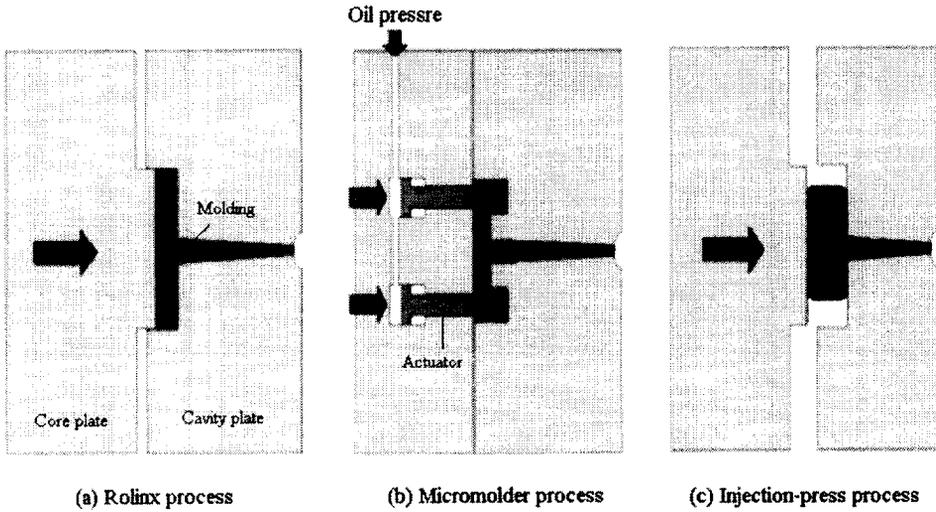


Fig. 2-8 Injection compression molding processes

2.3.2 사출압축성형시의 수축

사출압축성형은 압축성형기를 사용하여 금형을 약간 연 상태에서 캐비티에 재료를 저압으로 주입한 후, 금형을 닫으면서 캐비티내의 수지를 가압하는 것이 기본적인 방법으로, 실질적으로는 압축성형과 같은 성형과정이 된다. 이것은 응용상태의 수지의 전면에 균일한 압축력이 증가되기 때문에 수지유동 방향에 압력강하가 발생하지 않고 압축방향에 직각으로 배향이 일어난다. 이 때문에 성형품이 변형가능성이 대폭 줄어든다. 다시 말하면, 사출압축성형은 용융재료의 금형 유입은 일반 사출성형과 같지만, 사출압력이 낮아질 수 있다. 가장 주목해야 할 것은 냉각에 있어서의 수축과정으로, 일반 사출성형에는 게이트를 통해 충전된 재료가 냉각에 의해 수축하지만, 사출압축성형에서는 압축되어 작아지는 캐비티에 의해 내압

이 높아지고, 금형냉각에 의해 캐비티 내의 온도가 낮아진다. 즉, 사출성형에는 게이트가 냉각할 때까지 보압의 영향을 받아 게이트가 봉입(sealing)된 후에 냉각이 일어나고, 캐비티 내압은 재료가 냉각하는 것에 따라 줄어든다. 그러나 사출압축성형에서는 게이트 봉입 후에 캐비티 체적을 축소하고 캐비티 내의 높은 내압을 균일하게 발생시키고, 균일한 냉각이 이루어진다. 일반 사출성형에는 캐비티의 비체적과 성형품 취출 후 상온에서의 비체적과의 차가 성형수축률이 된다. 그러나 사출압축성형은 압축시의 비체적과 표준상태에 있어서의 재료의 비체적과의 차가 성형수축률이 된다. 그리고 압축의 정도를 얼마나 크게 할 것인가는 수축에 있어 중요한 변수이며, 여기에는 각 수지 재료의 pvT곡선을 이용하면 이론적인 설계가 가능하다.

2.3.3 일반 사출공정과 사출압축공정의 pvT곡선

일반 사출성형에서의 수축거동과 사출압축성형에서의 수축거동을 비교하기 위하여 PMMA수지의 pvT선도를 분석하였다. Fig. 2-9는 일반 사출성형시의 PMMA의 pvT선도로서 ① → ② → ③ → ④의 과정을 통해 ④에 해당하는 비체적으로 성형된다. 즉, ① → ②에서는 초기 사출압력에 의해 압축되며, ② → ③에서 보압이 작용하는 과정이며, ④의 지점에서 이젝팅된다.

Fig. 2-10은 PMMA의 사출압축성형시 pvT곡선상에서의 성형과정을 설명한 것으로 ① → ② → ③ → ④ → ⑤를 통해 ⑤에 해당하는 비체적으로 성형된다. 즉, ① → ②과정에서는 수지가 금형에

유입되면 초기 사출압력은 $200 \sim 300\text{kgf/cm}^2$ 정도로 낮게 된 상태에서 보압이 작용하며, 어느 정도 수지온도가 낮게 되었을 때에 ③ → ④의 과정에서 압축력이 900kgf/cm^2 정도 높게 걸리어 ④지점에서 캐비티 내에서 계속 응고하여 동일 비체적으로 ⑤의 지점에서 이젝팅 된다. 만약 ⑤의 비체적을 ⑥과 같게 압축을 제어할 수 있다면 이론적으로 수축률 제로의 성형품을 얻을 수 있을 것이다.

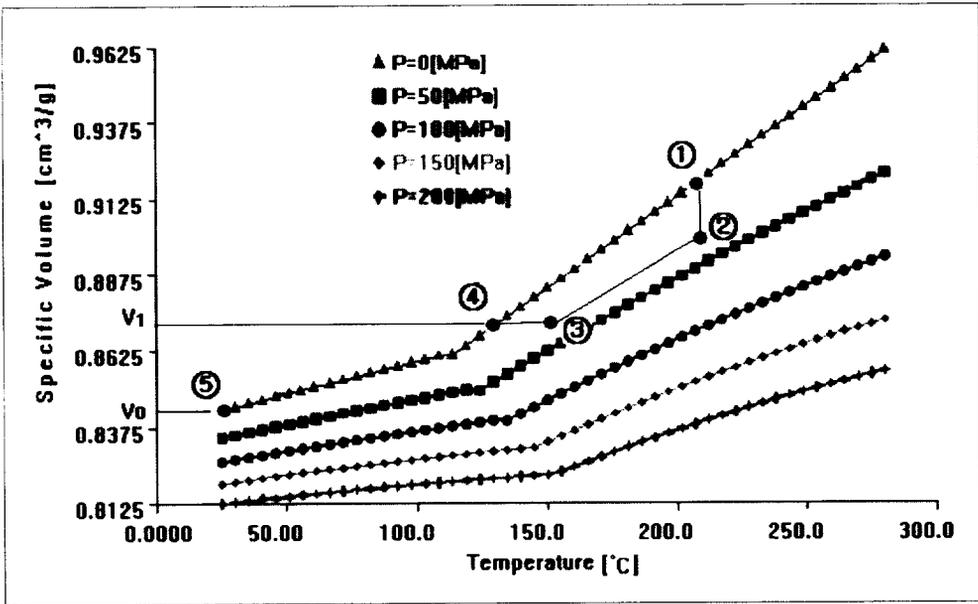


Fig. 2-9 pvT diagram of PMMA on injection molding

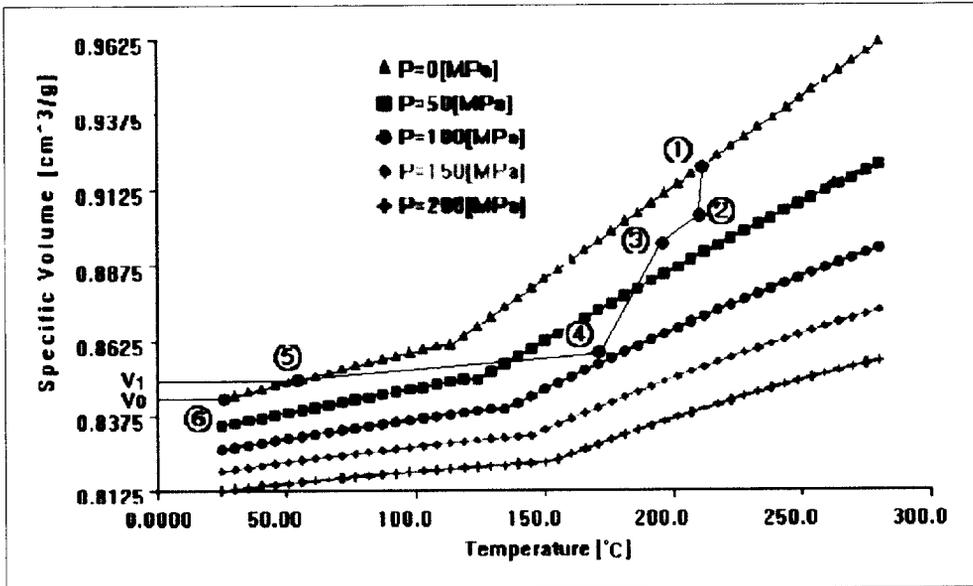


Fig. 2-10 pvT diagram of PMMA on injection compression molding

Fig. 2-9와 Fig. 2-10의 pVT선도에서 본 체적수축은 비체적 V_1 과 V_0 의 차이로 나타난다. 따라서 성형품이 등방성 수축을 한다고 가정하면, 성형수축률 S 는 식(2.18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = 1 - \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.18)$$

여기서,

V_0 : 표준상태에서의 수지의 비체적

V_1 : 성형조건하에서의 수지의 비체적

제 3 장 실험장치 및 실험방법

3. 1 사출성형기

본 연구에서 일반 사출성형용 수축실험에 사용한 사출성형기는 Fig. 3-1과 같은 LG기계에서 제작한 형체력 75톤(ton)(모델명 IDE 75EN)의 직압식 수평형 타입이다.

사출압축성형의 수축실험에 사용한 사출압축성형기는 Fig. 3-2의 LG기계에서 제작한 140톤(모델명 LGH 140N)인 직압식 수평형을 사용하였으며, 각 성형기의 규격은 Table 3-1과 같다.

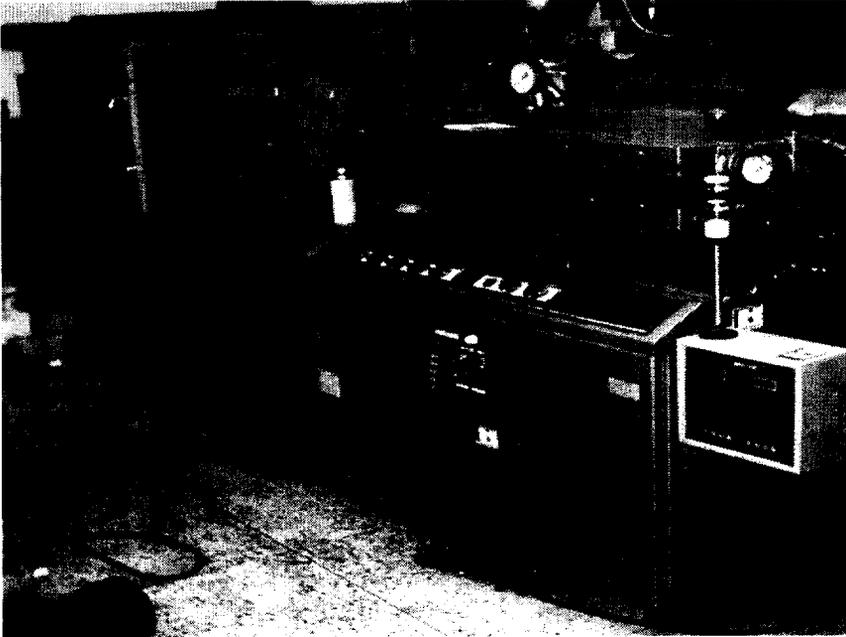


Fig. 3-1 Injection molding machine (75ton)

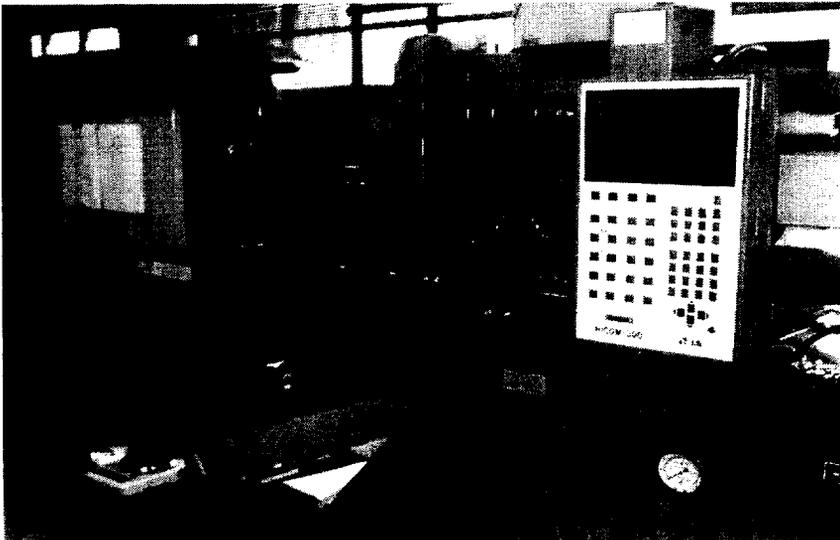


Fig. 3-2 Injection compression molding machine (140ton)

Table 3-1 Specifications of injection molding machines

Specifications		Unit	75ton	140ton
Injection unit	Screw dimension	mm	36	40
	Ideal shot size	cm ³	112	201
	Injection size(ps)	g	103	185
	Max. injection pressure	kgf/cm ²	1,400	1,550
	Max. holding pressure	MPa	80	90
	Injection rate	cm ³ /sec	63	206
	Melt ability(ps)	kg/h	42	86
	Max. screw rpm	rpm	200	400
Clamping unit	Clamping force	ton	75	140
	Tie bar intervals	mm	310×260	420×420
	Clamping stroke	mm	270	350
	Max. mold plate thickness	mm	550	760
	Mold height	mm	180 ~ 280	200 ~ 410
	Extrusion pressure	ton	2.2	2.5
	Extrusion stroke	mm	55	80

3. 2 실험금형 및 시편

Fig. 3-3에서 Fig. 3-6은 일반 사출성형의 수축연구에 사용한 실험용 금형을 나타낸 것으로, 금형 크기는 $250 \times 250 \times 220\text{mm}$ 이며, 2개의 캐비티를 갖춘 2매 구성형 금형이다. 그리고 사출성형시 내부 압력을 측정하기 위해 내압측정용 센서가 설치되어 있다. 실험용 성형품은 인장강도 측정용 시험편 형상이며, 팬 게이트(fan gate)형식에 의해 성형하였다. 실험용 금형은 캐비티 형상을 변경할 수 있는 캐비티를 인서트하여 조립할 수 있는 구조로 설계제작되어 있어 Fig. 3-7과 같은 3가지의 시편형상을 성형할 수 있다. Fig. 3-5는 성형 제품에 대한 센서의 위치를 나타낸 것으로서, 직경 3mm의 센서를 이젝트 핀으로 겸용하였으며, 금형의 러너와 캐비티 부위에 각각 4 개소에 설치하였다.

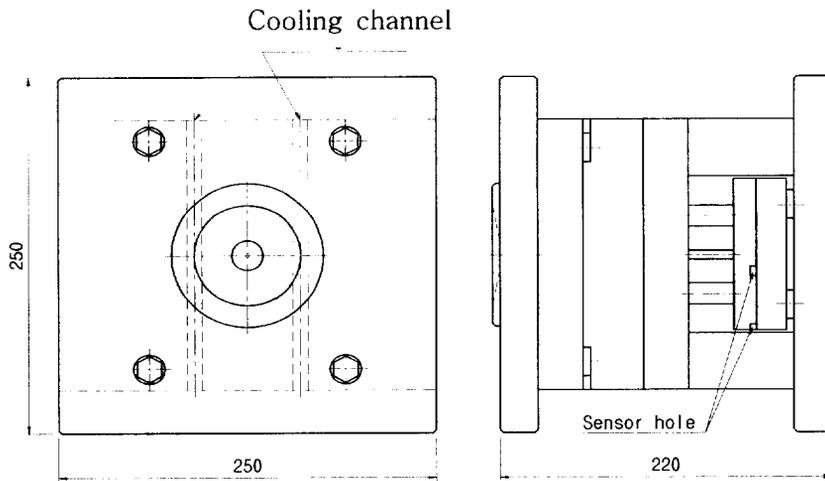


Fig. 3-3 Schematics of experimental injection mold

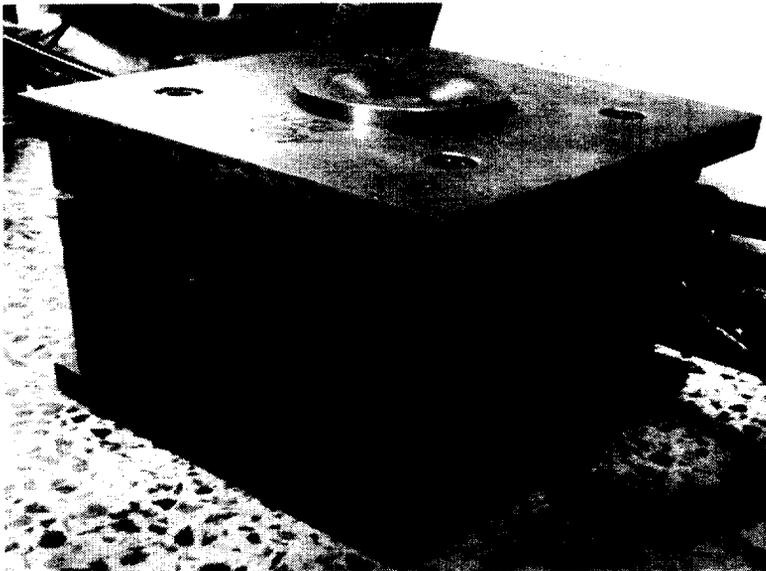


Fig. 3-4 Photo. of experimental mold

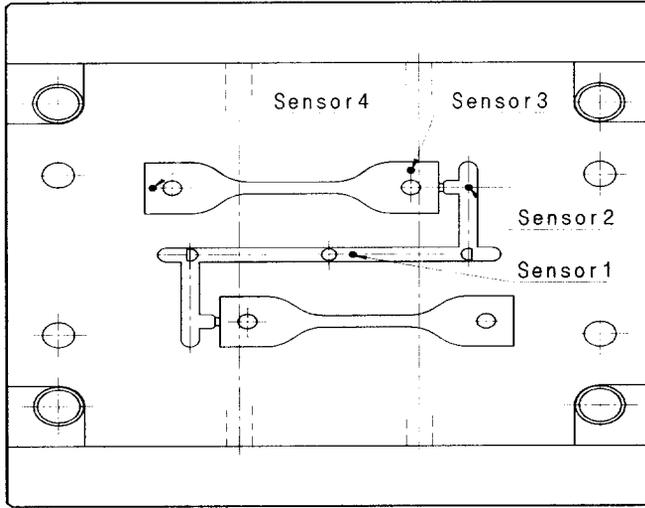


Fig. 3-5 Locations of pressure measuring sensors in mold

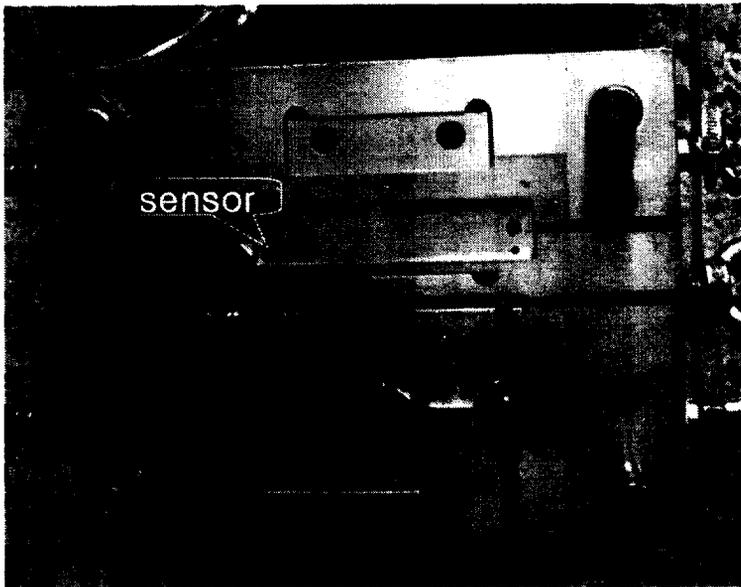


Fig. 3-6 Photo. of experimental injection mold with pressure measuring sensors

Fig. 3-7은 수축과 관련된 실험에 사용된 시편형상을 나타낸 것으로 (a)는 직사각형(plaque type), (b)는 목이 넓은 형(wide type), (c)는 표준형(normal type)으로 구분하였다. 시편의 가로와 세로의 크기는 모두 동일하지만 시편의 중앙부를 세가지로 변화시키면서 성형품의 형상비(aspect ratio)를 다르게 설계하였다.

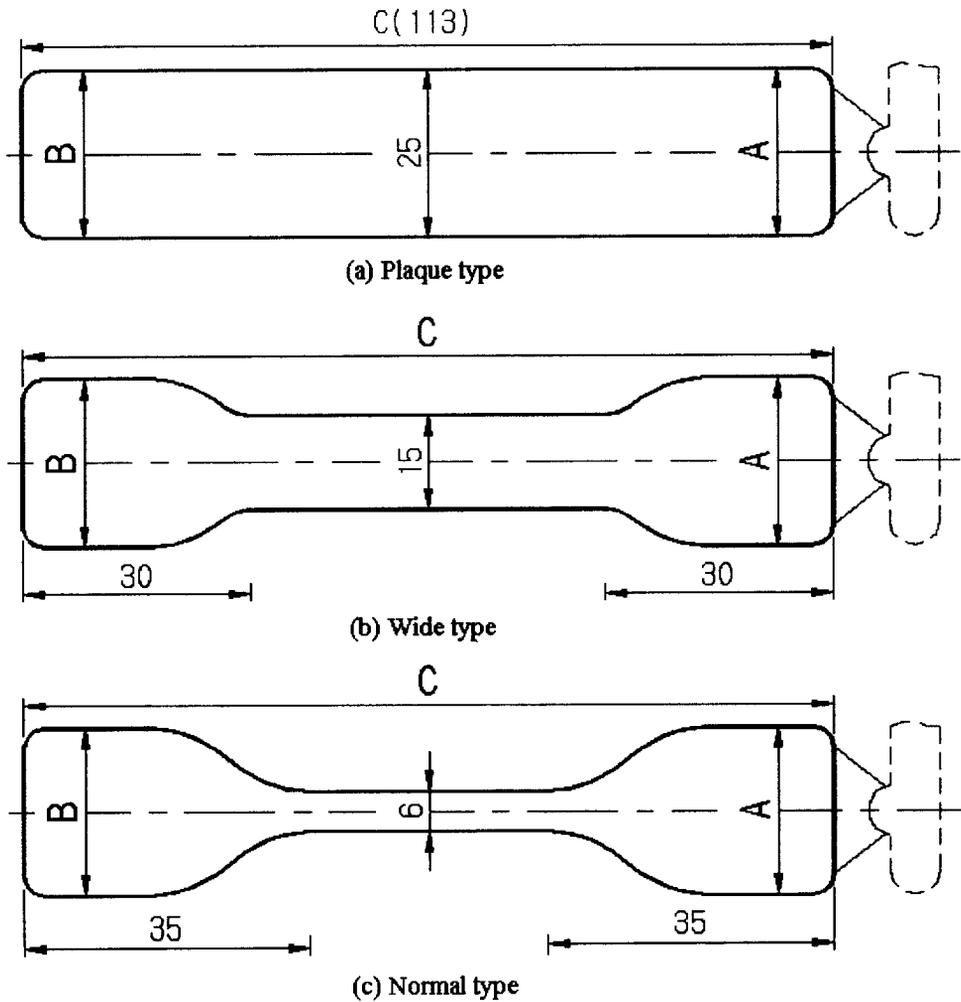


Fig. 3-7 Shapes of experimental specimen

Fig. 3-8은 실제 사출성형실험에 의해 성형된 시편을 나타낸 것이다.

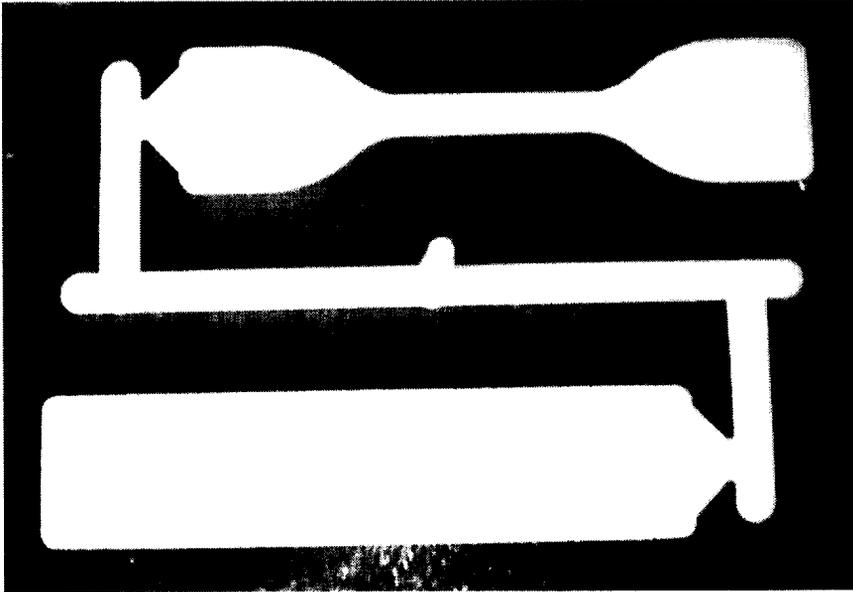


Fig. 3-8 Molded specimens

Fig. 3-9는 사출압축성형에 사용된 시험편을 나타낸 것으로, 시험용 성형품의 크기는 $90 \times 150 \times 3\text{mm}$ 의 사각형상품이다. Fig. 3-10은 사출압축성형품의 수축률을 측정한 부위를 나타낸 것으로, 금형의 캐비티내에 미세 홈가공을 하여 측정부위를 성형한 것이다. 또한 실험용 금형내의 게이트 형상을 사이드 게이트, 팬 게이트 및 필름 게이트의 3가지 게이트를 변경할 수 있는 구조로 설계제작 되어 있다.

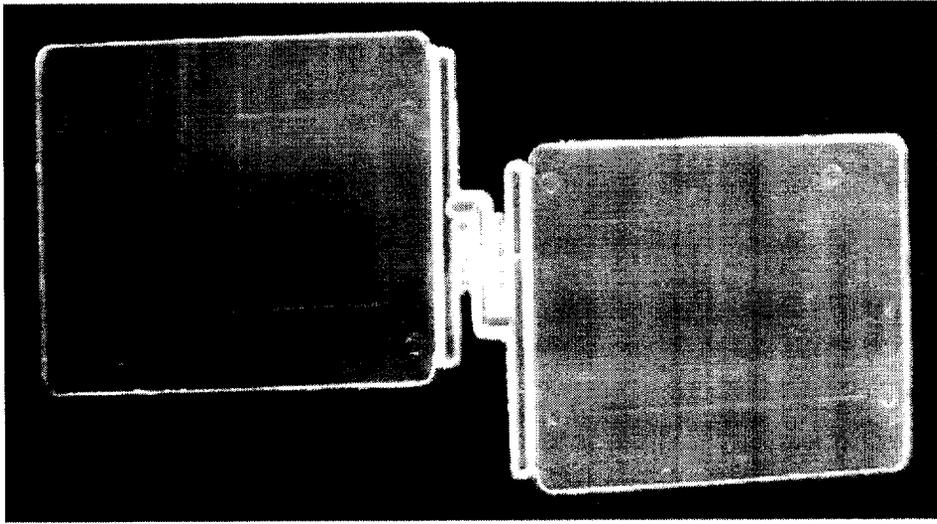


Fig. 3-9 Experimental plaque by injection compression molding

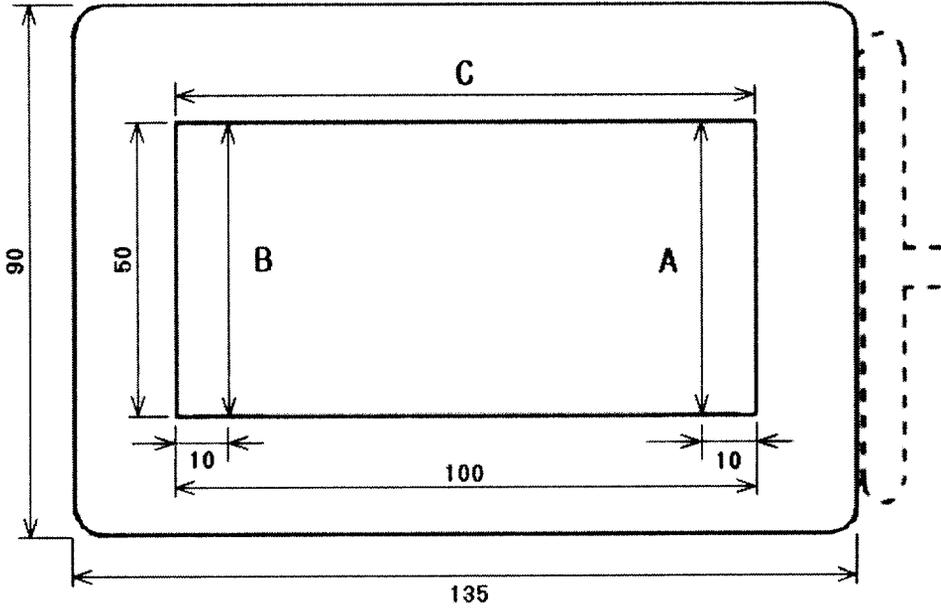


Fig. 3-10 Shrinkage measuring locations

3. 3 수축실험 및 측정

3.3.1 실험방법

수축실험에 사용된 수지는 결정성수지 2종과 비결정성 수지 1종을 대상으로 선정하였다. 결정성수지로서는 LG-Caltex사에서 생산한 폴리프로필렌 M580수지와 BASF사에서 생산한 폴리아미드 8280b NP 수지를 사용하였으며, 비결정성 수지는 제너럴일렉트릭(GE)사의 폴리 카보네이트 LEXAN-141을 사용하였다.

결정성 수지인 PP 수지의 성형조건은 Table 3-2와 같으며, 실험전에 수지를 80℃에서 3시간 동안 건조시켰다. 금형온도 45℃, 수지온도 210℃, 순수 사출시간 2초, 사출압 60%의 상태에서 보압은 50MPa, 사출속도는 30%에서 70%까지 각각 10%씩 증가시켜 5 단계로 실험하였다.

PA6 수지의 실험을 위한 성형조건은 Table 3-2과 같다. 실험전에 수지를 80℃에서 3시간 동안 건조시켰고, 금형온도 70℃, 수지온도 240℃, 사출시간 2초, 사출압 70%의 상태에서 보압은 50MPa, 사출속도는 30%에서 60%까지 각각 10%씩 증가시켜 4 단계로 실험하였다.

Table 3-2 Molding conditions for of PP and PA6 polymer

Molding condition		Polymer	PP	PA
		LG-Caltex M580	BASF 8280b NP	
Resin dry	Heat drier (Hour at 80 °C)		3	3
	Hopper drier(°C)		80	80
Pressure	Injection pressure(%)		60	70
	Injection speed(%)		30 ~ 70	30 ~ 60
	Holding pressure(MPa)		50	40 ~ 70
Temperature	Melt temperature(°C)		210	240
	Mold temperature(°C)		45	70
	Laboratory temperature(°C)		15	15
The others	Total cycle time(sec)		20	20
	Cooling time(sec)		15	15
	Holding time(sec)		2	2
	Humidity(%)		48	48

비결정성 수지인 PC수지의 실험을 위한 성형조건은 Table 3-3과 같으며, 실험전에 수지를 120℃에서 3시간 동안 건조시켰다. 금형온도는 80 ~ 100℃까지 10℃ 단위로 3단계로 변화시켰고, 수지온도는 300 ~ 320℃까지 5℃ 단위로 4단계로 변화시켰으며, 사출시간 2초, 사출압 120MPa의 상태에서 보압은 60 ~ 90MPa까지 4단계로 변화시키면서 성형하였다.

Table 3-3 Molding conditions for of PC polymer

Polymer		PC LEXAN-141
Molding condition		
Resin dry	Heat drier (Hours at 120℃)	3
	Hopper drier(℃)	120
Pressure	Injection pressure(MPa)	120
	Holding pressure(MPa)	60 ~ 90
Temperature	Melt temperature(℃)	300 ~ 320
	Mold temperature(℃)	80 ~ 100
	Laboratory temperature(℃)	15
The others	Total cycle time(sec)	20
	Cooling time(sec)	15
	Holding time(sec)	2
	Humidity(%)	48

성형품의 수축률 측정은 취출 후 24 시간이 경과한 후에 고정구를 이용하여 게이트 측의 폭 A, 게이트 반대쪽의 폭 B, 길이 방향 C의 3개소에 대해 각각의 수축률을 측정하였다. 시편에 대한 수축률의 측정은 Fig. 3-11에 나타낸 Mitutoyo사에서 제작한 투영기의 OPTOEYE A2를 이용하여 측정하였으며, 측정정밀도는 1/1000의 정밀도로 측정하였으며, 각각의 시편은 3회 측정하여 그 평균값을 데이터 값으로 정하였다.

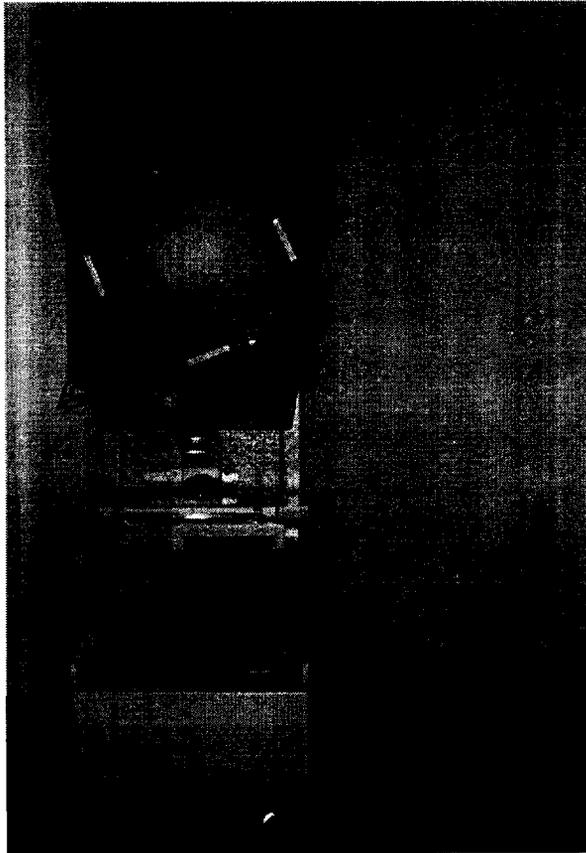


Fig. 3-11 Measuring machine(Mitutoyo, OPTOEYE A2)

3.3.2 실험용 수지

결정성 수지인 PP 수지는 압출, 블로성형, 사출성형, 압축성형, 진공성형이 가능하며 섬유, 필름 또는 다양한 색상의 투명한 폼으로 만들 수 있다. 주 용도는 포장지와 같은 필름 형태로 사용된다.

실험에 사용한 수지는 LG화학의 PP수지 계열인 M580이다. Table 3-4는 M580수지의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 3-5는 PA6 수지의 물성치를 나타낸 것으로, 이 수지는 카페트 및 가정용 내장 섬유제품, 의류, 스타킹, 수영복 및 특수 의류용 섬유, 로우프 등의 산업 자재용 섬유 및 엔지니어링 플라스틱으로 사용된다. 실험에 사용한 수지는 BASF사의 PA6수지 계열인 8280b NP이다.

비결정성 수지인 PC 수지는 제너럴일렉트릭사에서 생산된 LEXAN-141를 사용하였다. Table 3-6은 PC수지의 물성을 나타낸 것이다.

사출압축성형실험에 사용된 수지는 PMMA로 투명하며, 일반사출과 자동차 램프의 부품으로 많이 사용되는 LG 케미컬사의 IF850을 사용하였다. Table 3-7은 PMMA수지의 물성을 나타낸 것이다.

Table 3-4 Properties of PP M580

	Test method	Test condition	Unit	Value
Melt index	ASTM D1238	200 °C/5kg	g/10min	62
Specific gravity	ASTM D792	-	-	1.05
Shrinkage	ASTM D955	-	%	1.5~1.8
Tensile strength(Yield)	ASTM D638	50mm/min	kg/cm ²	320
Tensile modulus	ASTM D638	50mm/min	kg/cm ²	19370
Elongation at break	ASTM D638	50mm/min	%	14
Flexural yield strength	ASTM D790	50mm/min	kg/cm ²	369
Flexural modulus	ASTM D790	15mm/min	kg/cm ²	14276

Table 3-5 Properties of PA6 8280b NP

	Test method	Test condition	Unit	Value
Melt index	ASTM D1238	275 °C/5kg	cm ³ /10min	150
Specific gravity	ASTM D792	-	-	1.13
Shrinkage	ASTM D955	10 ⁻³ :in/in	%	0.9
Tensile strength(Yield)	ASTM D638	50mm/min	kg/cm ²	900
Tensile modulus	-	-	-	-
Elongation at break	ASTM D638	50mm/min	%	20 ~ 50
Flexural yield strength	-	-	-	-
Flexural modulus	ASTM D790	15mm/min	kg/cm ²	32,000

Table 3-6 Properties of PC LEXAN-141

	Test method	Test condition	Unit	Value
Melt index	ASTM D1238	200°C/10kg	g/10min	10.5
Specific gravity	ASTM D792	-	-	1.20
Shrinkage	ASTM D955	-	%	0.6~0.9
Tensile strength(Yield)	ASTM D638	50mm/min	MPa	62
Rockwell Hardness	ASTM D785	R•scale	-	118
IZOD Impact strength	ASTM D256	Notched 23 °C	J/m	801
Heat Distortion Temperature	ASTM D648	18.6kg	°C	138
Flammability	ASTM UL94	-	-	HB

Table 3-7 Properties of PMMA IF380

	Test method	Test condition	Unit	Value
Melt index	ASTM D1238	230 °C/3.8kg	g/10min	13.6
Specific gravity	ASTM D792	-	-	1.18
Shrinkage	ASTM D955	-	%	0.2 ~ 0.6
Tensile strength(Yield)	ASTM D638	50mm/min	kg/cm ²	690
Tensile modulus	-	-	-	-
Elongation at break	ASTM D638	50mm/min	%	14
Flexural yield strength	-	-	-	-
Flexural modulus	ASTM D790	15mm/min	kg/cm ²	32,000

3.3.3 캐비티 내압 측정

Fig. 3-12는 금형의 내압을 측정하기 위해 기신정기주식회사의 내압 측정용 마샬링 시스템 EPA-001을 이용하였다.⁵²⁾ EPA-001은 8개의 신호를 앰프로 받아드린 후 전용 프로그램을 통해 압력형태를 분석할 수 있다.

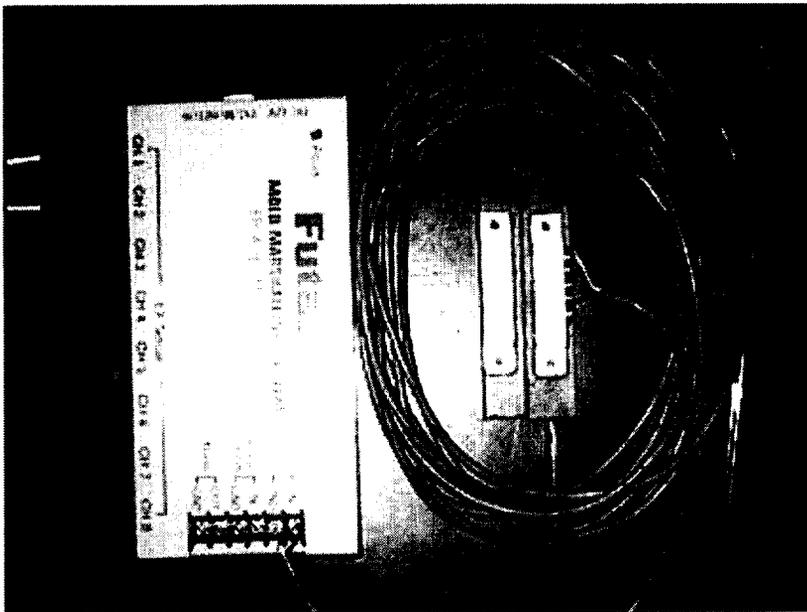


Fig. 3-12 Mashalling system for measuring cavity pressure

제 4 장 사출성형시 수축실험 결과 및 고찰

4. 1 PP 수지의 수축거동

4.1.1 캐비티 형상에 따른 성형수축 변화

Fig. 4-1은 보압 50MPa, 사출속도 60%의 조건 일 때의 캐비티 형상에 따른 수축률 변화를 나타내는 그래프이다. 측정부위 C에서 측정된 유동방향의 수축률은 1.99 ~ 2.25%의 값을 나타내었으며, 측정부위 A 및 B에서 측정된 유동직각방향의 수축률은 1.28 ~ 2.00%의 값을 나타내었으며, 유동방향의 수축률이 직각방향의 수축률보다 평균 25% 크게 나타났다.

실험에서 캐비티 형상에 관계없이 측정위치 별로 A, B, C 순으로 수축률이 증가하였다. 이와 같은 결과는 A부위는 금형의 게이트와 가장 가까운 부위로 사출성형시 용융된 수지에 전해지는 사출압 및보압이 가장 크게 작용하는 곳이다. 그리고 용융수지는 A부위를 지나 캐비티 말단부위인 B점까지 수지가 유동되면서 점차 고화된다. 그러므로 사출압과 보압 등의 압력 전달이 A부위가 가장 잘 전달된다. 따라서 수축률은 A부위가 가장 작아지게 된다고 생각된다. 측정부위별 수축률에서 가장 큰 수축률을 보인 C부위는 성형품의 전장 길이로서 사출성형시 용융수지가 흐르는 방향과 동일하다. 용융수지는 캐비티를 흘러가면서 성형품내부에 분자배향(molecular orientation)이 일어나게 된다. 이러한 분자배향은 성형품이 냉각되면서 수지 본래의 랜덤한 상태로 돌아가려고 한다. 이로 인하여 용융수지의 유동방향인 C부위에서 수축이 가장 크게 발생한다.

캐비티 형상에 따른 수축률의 결과를 보면, normal형상일 때 수축

률이 가장 작은 것을 알 수 있으며, 성형품의 표면적이 wide형과 plaque형상으로 넓어질수록 수축률이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 normal형처럼 캐비티 중앙에서 표면적이 줄어드는 지점에서 수지가 갖는 비뉴턴 유체의 전단박하(shear thinning)⁵³⁾ 현상과 이로 인한 전단열 발생으로 수지의 점도가 낮아지고, 용융수지의 흐름이 빨라져 충전율이 향상되어 수축률이 가장 작게 나타난다고 생각된다. Plaque형의 경우 게이트 주변에서는 전단마찰에 의한 열 발생량이 높지만, 유동이 진전함에 따라 표면적이 넓어지므로 유동전단의 속도가 떨어져 마찰열량이 줄어들게 되고, 마지막은 마찰에 의해서 발생하는 열량보다는 열전도에 의한 금형으로의 손실되는 열량이 많아지게 되어 보압의 전달성이 저하되어 수축률이 증가된 것으로 사료된다.

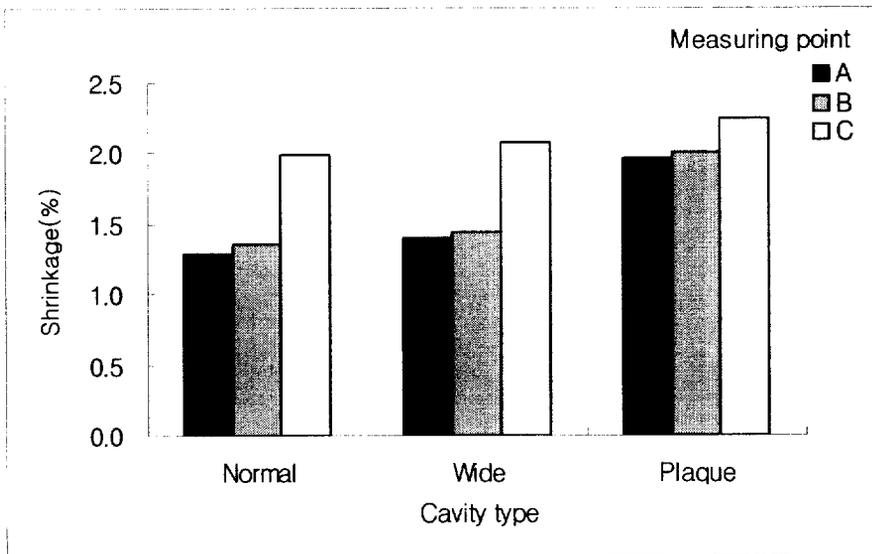


Fig. 4-1 Shrinkage vs. cavity type in case of PP

4.1.2 캐비티 내압에 따른 성형수축 변화

Fig. 4-2는 캐비티 형상에 따른 센서위치별 충전과정 중 최대 압력을 나타내는 그래프이다. 각 센서 부위별 캐비티 내압의 크기는 Fig. 4-2와 같이 sensor1, sensor2, sensor3 순으로 작게 나타났다. 일반적으로 normal형의 경우 단면적이 줄어드는 목(neck)부위에 용융수지가 흘러갈 때 압력손실이 크게 나타날 것으로 예상하였으나 결과적으로 wide형에 비해 큰 차이를 나타내지 않았다. Normal형의 경우 러너쪽(sensor1)과 팬 게이트 입구쪽(sensor2)의 압력강하는 약 8.6%이었다. 이러한 결과와 관련한 다른 연구⁵⁴⁾에서는 사이드 게이트의 경우 압력강하량은 약 21.6%이었다. 결국 팬 게이트는 사이드 게이트에 비해 약 13%의 낮은 압력강하를 보였다.

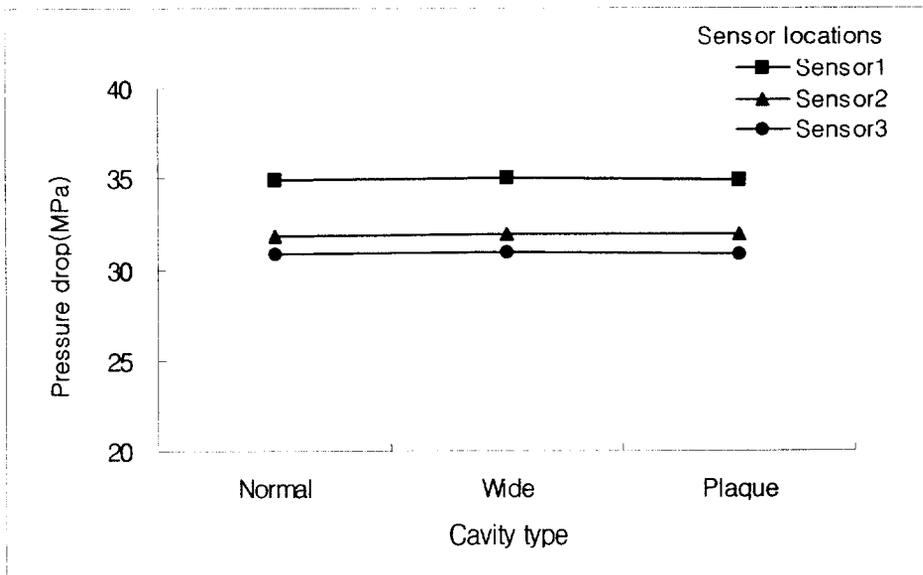
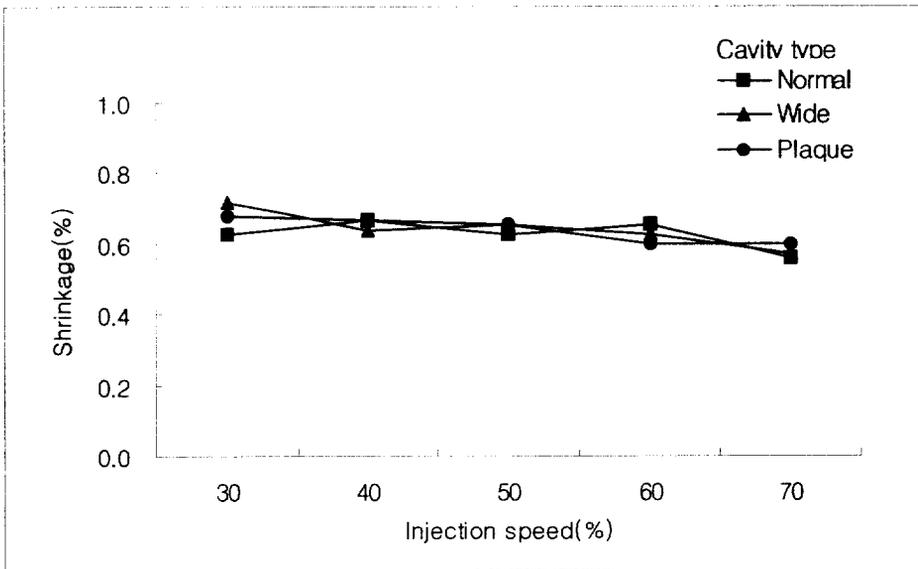


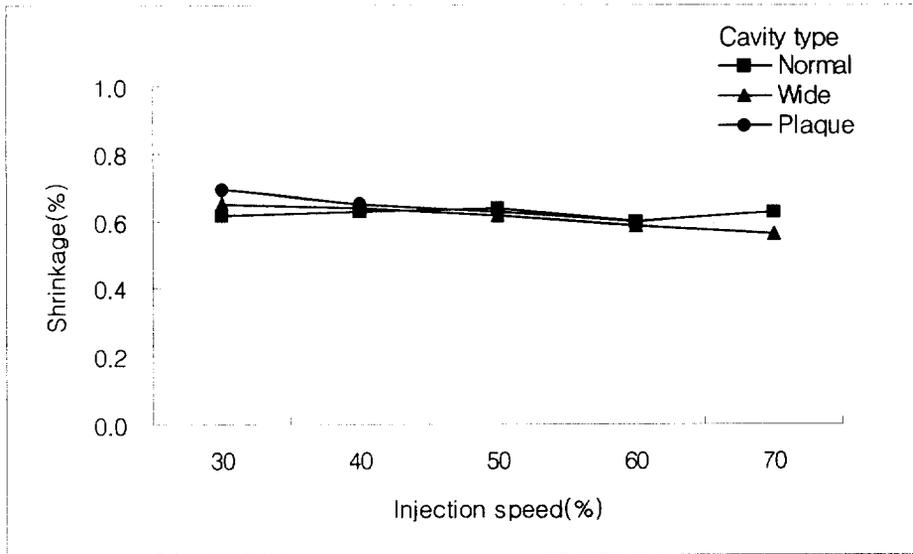
Fig. 4-2 Cavity pressure vs. cavity pressure in case of PP

4.1.3 사출속도에 따른 성형수축 변화

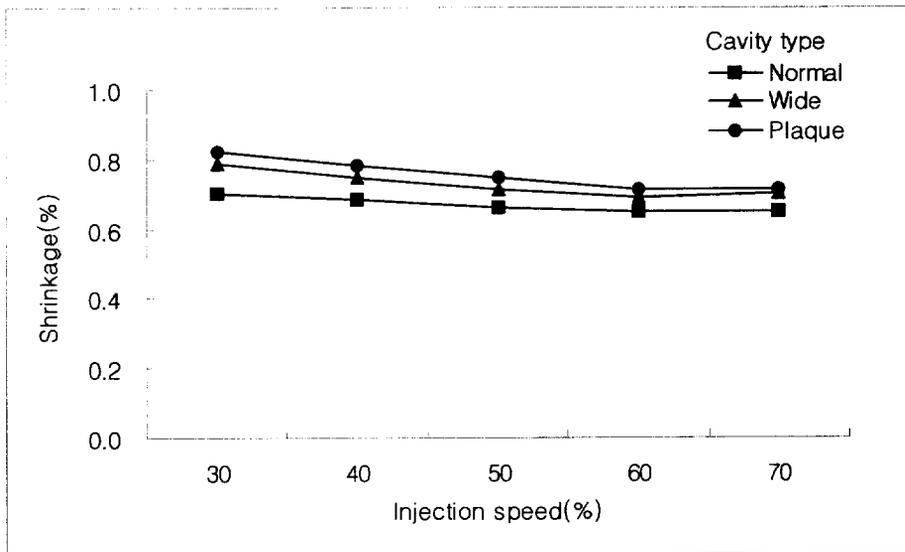
Fig. 4-3의 (a), (b), (c)는 사출속도에 따른 수축률 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 4-3의 (a), (b)에서 알 수 있듯이 수지의 유동 방향에 대한 직각방향의 수축률 변화는 캐비티 형상에 따라서 명확히 나타나지 않았다. 단지 사출속도의 증가에 따라 전체적인 수축률이 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 수지 유동방향의 수축률은 Fig. 4-3의 (c)와 같이 normal형은 0.67%, wide형은 0.73%, plaque형은 0.75%로 나타났다. 사출속도가 증가 할수록 용융수지의 유동속도가 빨라지므로 캐비티 충전시간이 단축된다. 같은 사이클 타임이라면 (c)형의 수지 충전시간이 단축되고 단축된 시간만큼 냉각시간을 연장시키는 효과가 있다⁵⁵⁾.



(a) Measuring point A



(b) Measuring point B



(c) Measuring point C

Fig. 4-3 Shrinkage vs. injection speed in case of PP

즉, plaque형은 급냉효과를 가지고, normal형은 서냉효과를 가진다고 볼 수 있고, 충전 공정에서 발생한 배향성이 냉각과정에서 열적상태의 변화로 성형품 내부에서 수지분자들의 배향이 랜덤상태로 도달하려는 탄성 엔트로피(entropy elasticity)가 커지게 된다⁵⁶⁾. 따라서 사출속도가 증가할수록 수축률은 감소한다고 생각된다.

4. 2 PA 수지의 수축거동

4.2.1 사출속도에 따른 성형수축 변화

Fig. 4-4는 시편형상별 사출속도에 따른 성형수축률 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 시편형상에 상관없이 사출속도가 증가할수록 수축률이 감소하다가 어떤 사출속도에 달하면 수축률의 변화가 거의 없음을 알 수 있었다. 이는 사출속도가 증가할수록 캐비티의 충전량이 증가하여 성형품의 밀도가 조밀해지며 성형품의 성형수축률이 감소하며, 이러한 효과는 일정 사출속도이상에서는 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다.

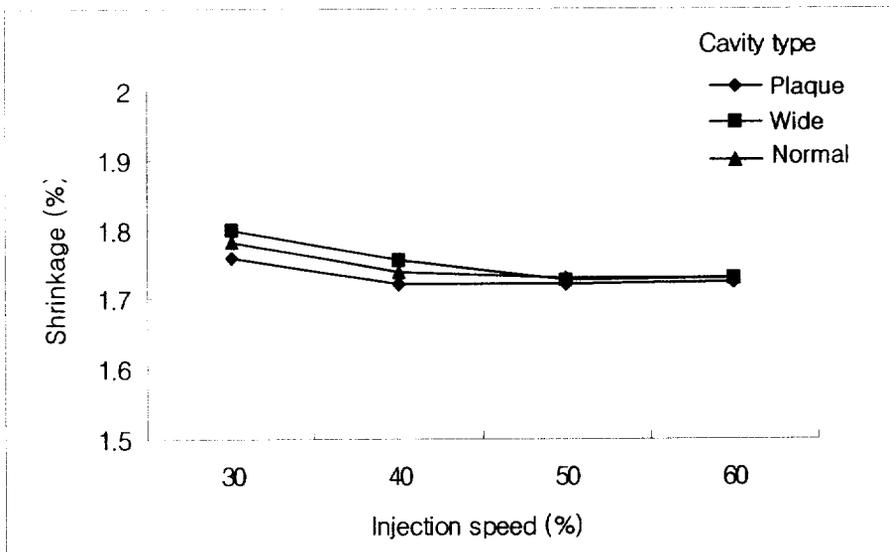


Fig. 4-4 Shrinkage vs. injection speed in case of PA

4.2.2 사출속도에 따른 측정 위치별 성형수축 변화

Fig. 4-5는 시편의 측정 위치별로 사출속도가 성형수축률에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 시편의 B부위에서 측정된 성형수축률이 가장 크게 나타났는데 B부위는 게이트에서 가장 멀리 떨어진 말단지점으로 A부위보다 압력전달성이 낮으며, 압력이 전달되었다 하더라도 그 전달된 압력이 일정하지 않기 때문으로 생각된다⁵⁷⁾. 그리고 C부위의 성형수축률이 가장 작게 나타났는데 이는 PP 실험에서 보였던 결과와 다른 것이다. 이런 차이는 각 수지마다 탄성 엔트로피의 크기가 다름에서 오는 요인과 기타 향후 연구에서 밝혀야 할 많은 요인이 있을 것으로 생각하며, 본 연구에서는 그 결과 값만 제시하는 것으로 한다.

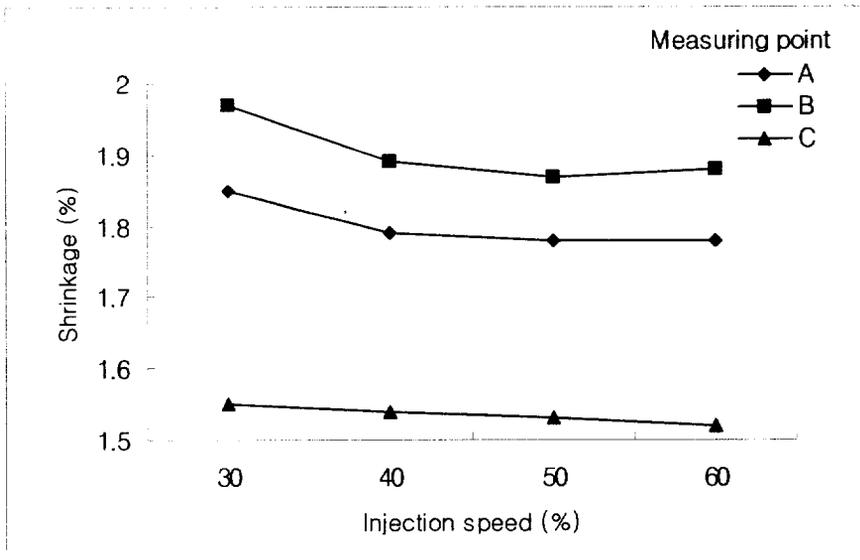


Fig. 4-5 Shrinkage vs. measuring point in case of PA

4.2.3 보압의 변화에 따른 성형수축 변화

Fig. 4-6은 시편의 형상에 따라 보압에 의한 성형수축률의 변화를 나타낸 그래프이다. 시편 형상과는 상관없이 전체적으로 보압이 증가할수록 성형수축률이 감소하는 경향을 보였다. 이런 현상은 사출압과 보압의 증가가 성형수축률을 감소시킨다는 기존의 연구²²⁾결과와 같은 것으로 나타났다.

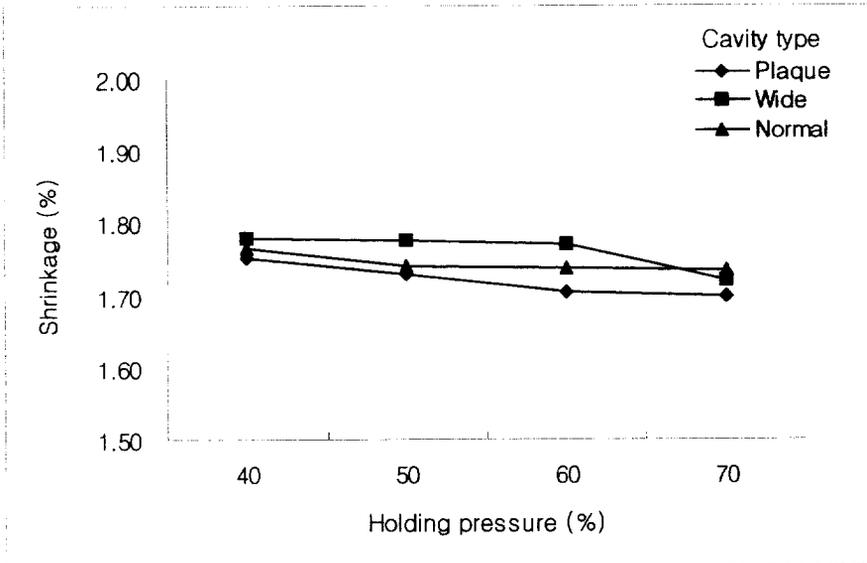


Fig. 4-6 Shrinkage vs. holding pressure in case of PA

4.2.4 보압의 변화에 따른 측정 위치별 성형수축 변화

Fig. 4-7은 시편의 측정 위치에 따라 보압이 성형수축률에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 측정위치 C를 제외한 나머지 측정위치에서의 성형수축률은 보압이 증가할수록 약간 감소하는 경향을 보였다. C부위에서 수축률의 변화가 거의 없는 것은 고온의 용융수지가 사출되면서 보압이 작용하기 전에 사출압에 의해 충분히 캐비티에 충전되어 보압의 영향이 미미하여 생긴 결과라고 생각한다.

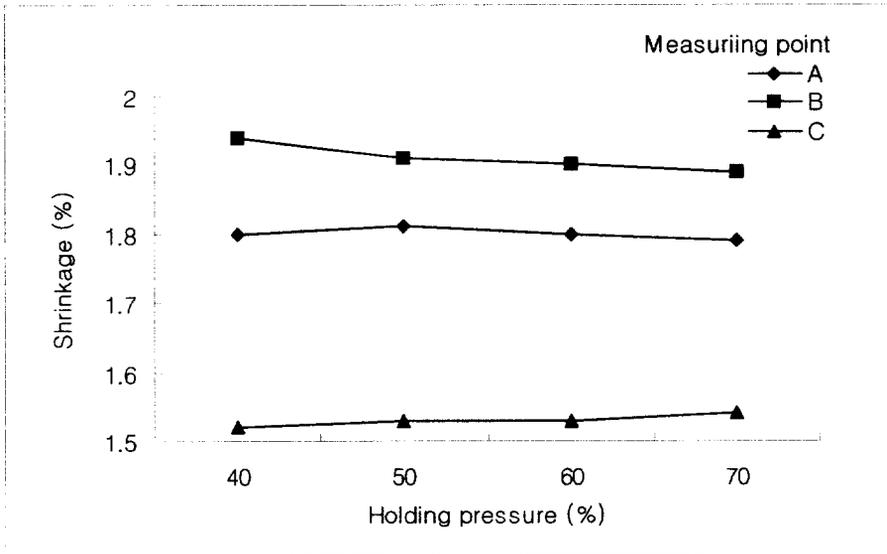


Fig. 4-7 Shrinkage vs. measuring point in case of PA

4.2.5 성형해석결과와 실험결과의 비교

PA6 성형품의 사출성형해석은 상용 3D사출성형해석 프로그램인 3D TIMON을 이용하였다. 3D TIMON은 일본 TORAY사에서 개발된 사출성형 해석용 프로그램이다. 다른 범용 사출성형해석 소프트웨어와는 달리 세계 최초로 완전한 3차원 솔리드를 기반으로 개발되어 일반적인 제품의 성형해석뿐만 아니라, 다양한 두께를 가진 제품, 두꺼운 제품, 아주 얇은 제품 그리고 인서트(insert) 제품 등의 복잡하고 정밀한 제품에 대한 정확한 해석이 가능하다. 특히, LENS나 BLU 등 최첨단 제품에 대해 전문적이고 신뢰도 있는 해석에 유리하다. 본 연구에서 성형해석에 사용된 전처리 조건은 Table 4-1과 같다.

Table 4-1 Input data for shrinkage analysis

Input data	Unit	Value
Melt temperature	℃	250
Mold temperature	℃	70
Injection pressure	MPa	110
Holding pressure	MPa	70
Injection time	sec	11
Holding time	sec	7
Cooling time	sec	15

Fig. 4-8은 성형해석에 사용된 성형품의 유한요소 메쉬를 나타낸 것이며, Fig. 4-9는 충전과 보압을 포함하는 유동해석 결과를 나타낸

것으로 예측 된 충전시간은 약 1.98초로 나타났다.

Fig. 4-10과 4-11은 성형 후 성형품의 수지유동방향과 유동직각방향에 대한 수축량을 예측한 결과이다. Fig. 4-10은 수지흐름방향에 대한 수축량을 나타낸 것으로, 수축량은 약 1.6mm로 예측되었는데 이것은 실제 금형의 캐비티 길이 113mm에 대하여 수축률을 계산하면 수축률은 약 1.43%의 값이 된다. Fig. 4-11은 수지흐름의 직각방향에 대한 해석 결과를 나타낸 것으로 수축량은 0.37mm로 예측되었다. 이것은 실제 금형의 폭 25mm에 대하여 수축률은 약 1.51%의 값이 된다. 이들 수축률을 앞에서 기술한 실제 실험결과와 비교하면 성형품의 폭 방향에서의 수축률이 성형품의 길이방향에서의 수축률 보다 크다는 것을 알 수 있다.

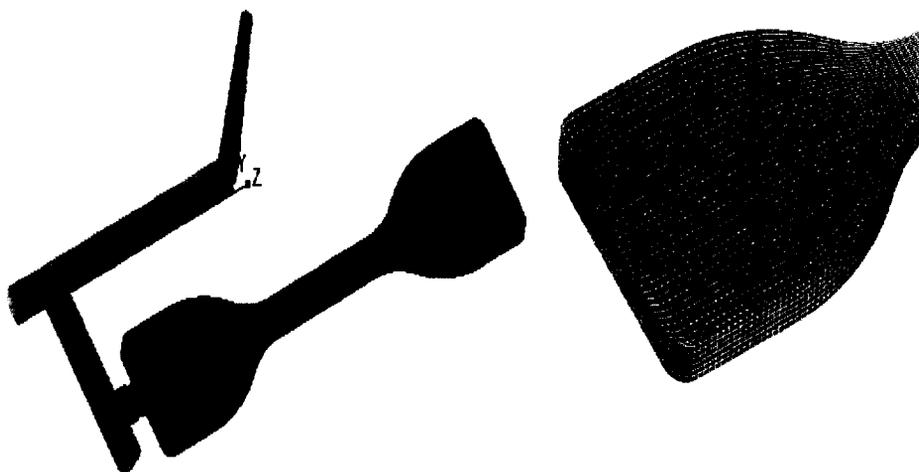
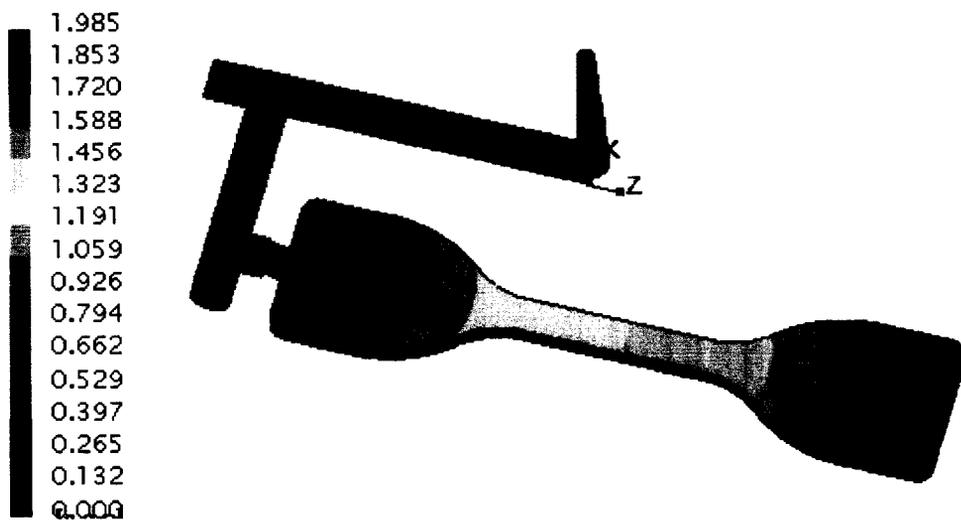


Fig. 4-8 Mesh for injection molding analysis



Contour (PSH,case2,Analysis Result/Filling Patter)

Fig. 4-9 Injection molding analysis result

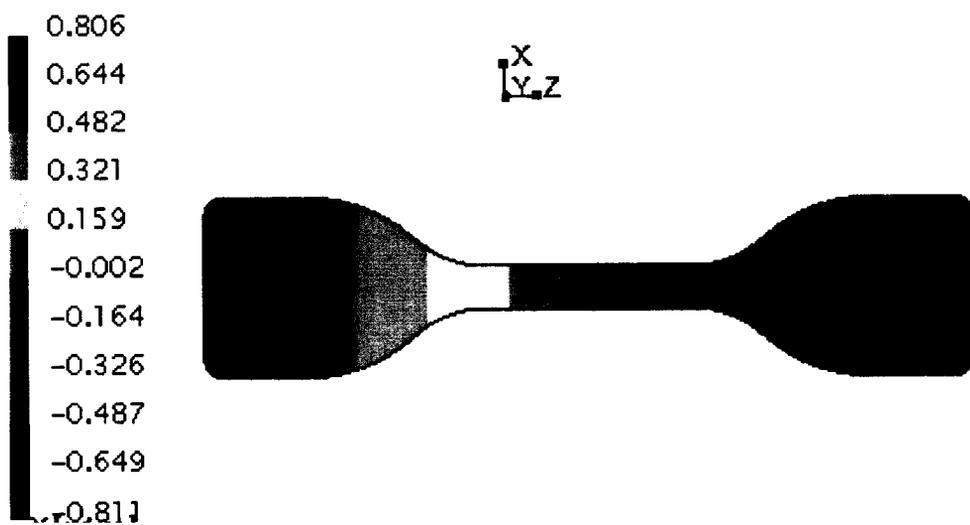


Fig. 4-10 Shrinkage of flow direction (PA)

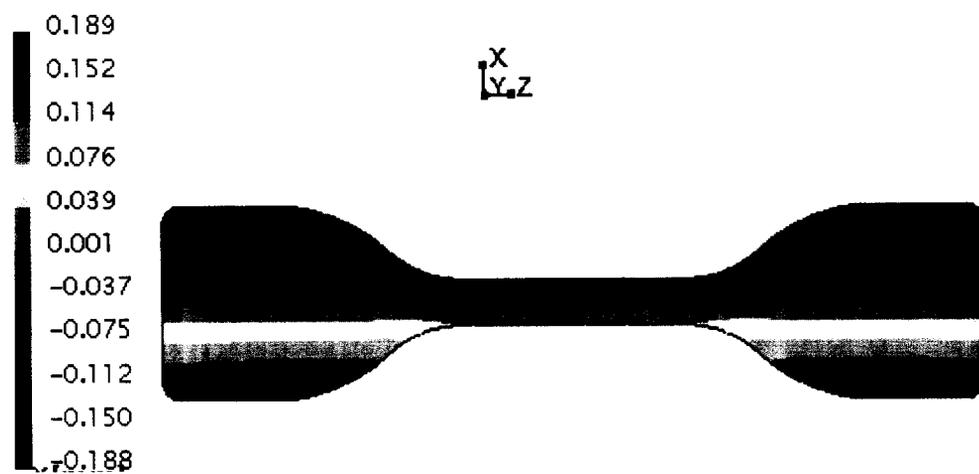


Fig. 4-11 Shrinkage of cross flow direction (PA)

4. 3 PC 수지의 수축거동

4.3.1 수지온도에 따른 수축 변화

측정부위는 3장의 Fig. 3-7과 같이 게이트부 시편폭을 A, 게이트 반대편의 시편폭을 B, 수지흐름방향의 길이를 C로 하여 3부위의 수축률을 측정하였다.

Fig. 4-12는 수지온도에 따른 수축률의 변화를 나타낸 그래프이다. 이것은 금형온도 80℃, 보압 90MPa일 때의 수축률의 변화이다. 수축률은 미세하지만 수지온도 310℃에서 가장 작은 것을 알 수 있다.

수지온도가 상승하면 유동성이 좋아지므로 금형 캐비티내의 충전상태가 좋아지고, 금형내에서의 냉각시간이 길어지므로 수지는 치밀하게 되어 일정온도까지는 수축률이 작아지게 된다. 반면 수지온도가 과다하게 상승하면 열적 팽창이 크게 되어 냉각후의 수축량은 커지게 되는 것으로 사료된다⁵⁸⁾.

그러나, 위에서 기술한 수축률 변화의 값은 아주 미미하므로 전반적으로 생각할 때 수지온도가 수축률에 미치는 영향은 극히 작다고 생각된다.

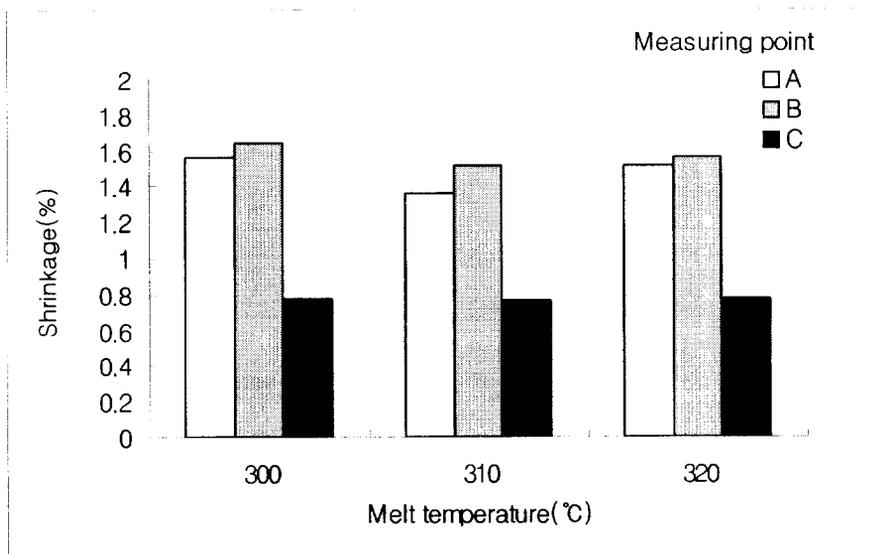


Fig. 4-12 Shrinkage vs. melt temperature for PC

4.3.2 금형온도에 따른 수축 변화

Fig. 4-13은 금형온도에 따른 수축률의 변화를 나타낸 그래프이다. 여기서는 수지온도 300℃, 보압 90MPa일 때의 결과를 나타내었다. 일반적으로 결정성 수지는 금형온도가 높아지면 성형품의 취출 후 열적수축, 상변화에 의한 수축, 취출 후의 압축이 풀림에 기인하는 체적변화, 수지의 서냉으로 인한 결정화도의 상승 등으로 수축률이 크게 나타나는 것이 일반적이거나 비결정성인 PC수지는 금형온도의 변화에 따라 수축률의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

용융수지의 비체적은 냉각되면서 감소하며, 융점에서 결정이 형성될 때에 급격히 감소한다. 실제로 결정성수지의 비체적은 비결정성수지의 비체적보다 작다. 결국 결정성수지가 비결정성수지보다 수축률이 크다는 것을 의미한다. 따라서 결정성수지는 결정화를 조절하여 수축률을 조절할 수 있다. 이것은 냉각속도를 조절하면서 수축률조정이 가능하다는 것을 의미한다. 그러나 얇은 성형품의 경우 금형온도를 높여 서냉의 효과로 수축률을 줄일 수는 있지만 두꺼운 성형품의 경우는 수지의 냉각속도를 조절하기란 힘들 것이다. 따라서 결정이 없는 비결정성수지에서 금형온도에 따른 수축률의 변화는 큰 의미가 없는 것으로 사료된다.

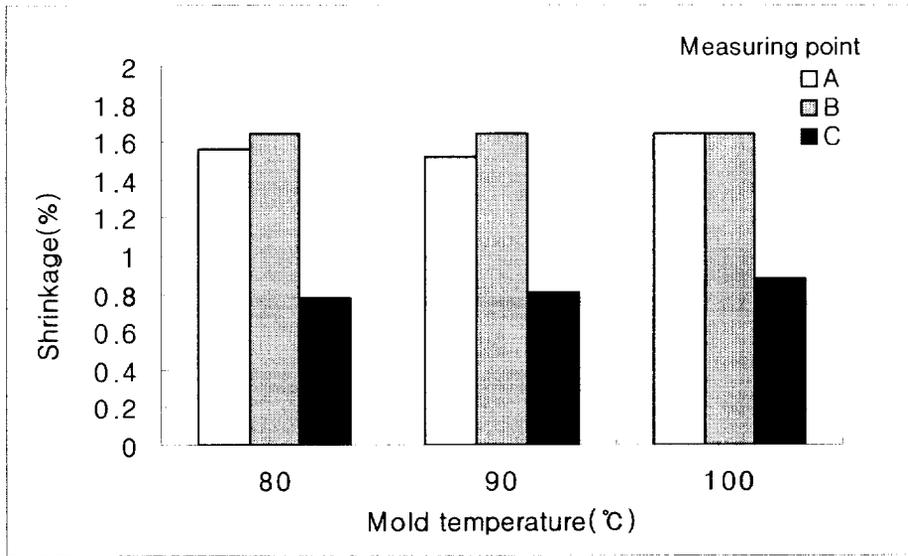


Fig. 4-13 Shrinkage vs. mold temperature for PC

4.3.3 보압에 따른 수축 변화

Fig. 4-14는 보압에 따른 수축률의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그래프는 수지온도 300℃, 금형온도 90℃일 때의 결과를 나타내었다. 보압이 증가함에 따라 측정 부분별로 감소하지만 2/1000 ~ 3/1000의 차이를 나타내면서 수축률이 감소하였다. 이러한 결과는 4.2.3절에서 기술한 PA수지의 경우와 같이 보압이 증가할 수록 성형 수축률은 감소한다는 일반적으로 알려져 있는 성형수축률에 대한 결과와 같다.

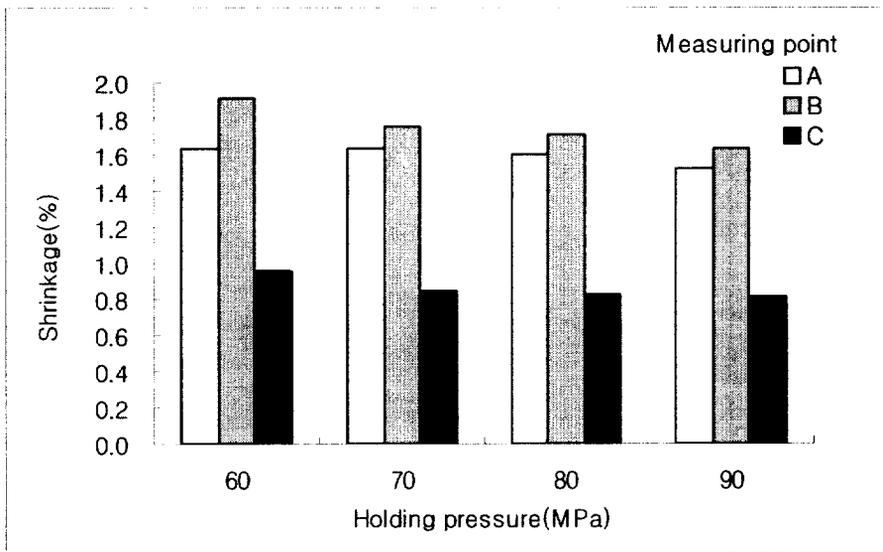


Fig. 4-14 Shrinkage vs. holding pressure for PC

4.3.4 수지온도에 따른 캐비티 내압 변화

Fig. 4-15는 사출압력 120MPa, 금형온도 100℃, 보압 90MPa의 경우에 캐비티 내압을 센서위치별로 측정하여 나타낸 그래프이다. 3장의 Fig. 3-5에서 기술한 바와 같이 Sensor1, Sensor2는 러너부의 압력을 나타내고, Sensor3, Sensor4는 캐비티 내부의 압력을 나타낸다.

수지온도가 높아짐에 따라서 PC수지의 센서별 압력강하는 약 60 ~ 80MPa로 나타났다. 또 수지온도가 높을수록 압력 전달성이 비례적으로 상승함을 알 수 있다. 이는 수지온도의 상승으로 인해 수지의 밀도가 치밀해지고 점도가 낮아져 유동성이 좋아지며, 금형내 충전상태가 좋아지는 결과로 금형내 압력이 점차 높아지는 것으로 사료된다
59)

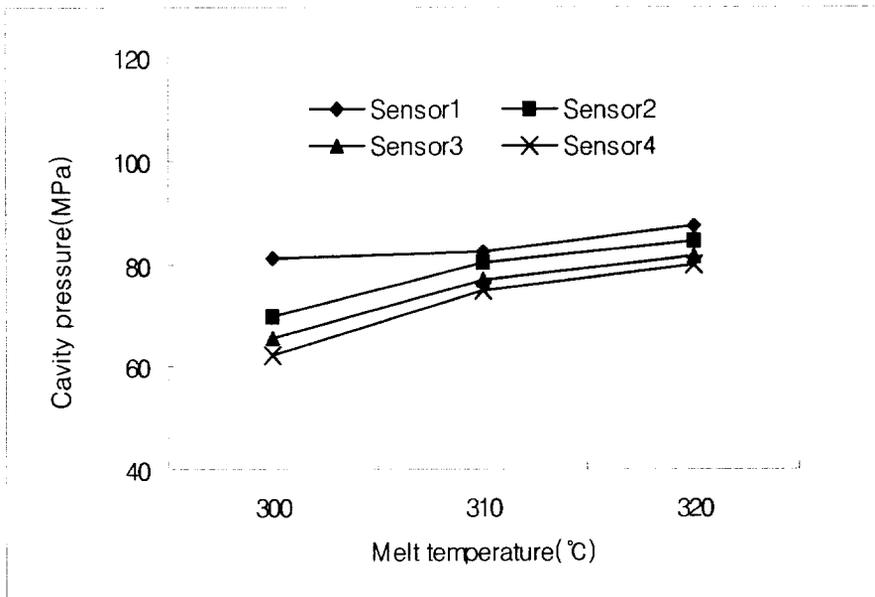


Fig. 4-15 Cavity pressure vs. melt temperature for PC

4.3.5 금형온도에 따른 캐비티 내압 변화

Fig. 4-16은 수지온도 300℃, 보압 80MPa에서 금형온도에 따른 캐비티 내압을 나타낸 것이다. 금형온도의 변화는 4.3.4절의 수지온도와 같이 캐비티 내압에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

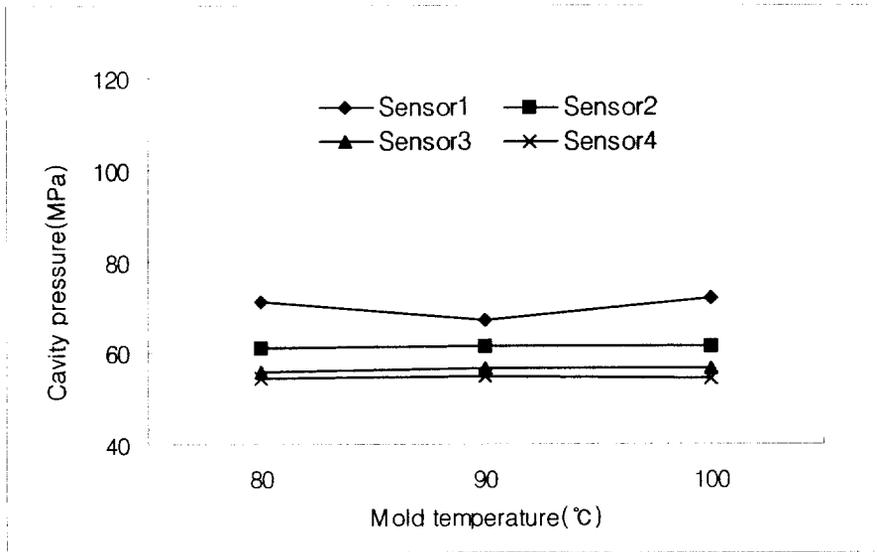


Fig. 4-16 Cavity pressure vs. mold temperature for PC

4.3.6 보압에 따른 캐비티 내압 변화

Fig. 4-17은 4.3.5절의 성형조건과 같은 경우에 보압의 변화에 따른 캐비티 내압의 변화를 나타낸 그래프이다. 보압이 60MPa에서 90MPa로 보압이 증가함에 따라 캐비티의 내압도 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이것은 보압이 증가하면 수지의 점도의 저하, 유

동성 향상으로 금형의 러너나 캐비티내 충전을 좋게하여 압력손실이 상대적으로 적게되어 캐비티 내의 압력이 상승하는 것으로 사료된다
60)

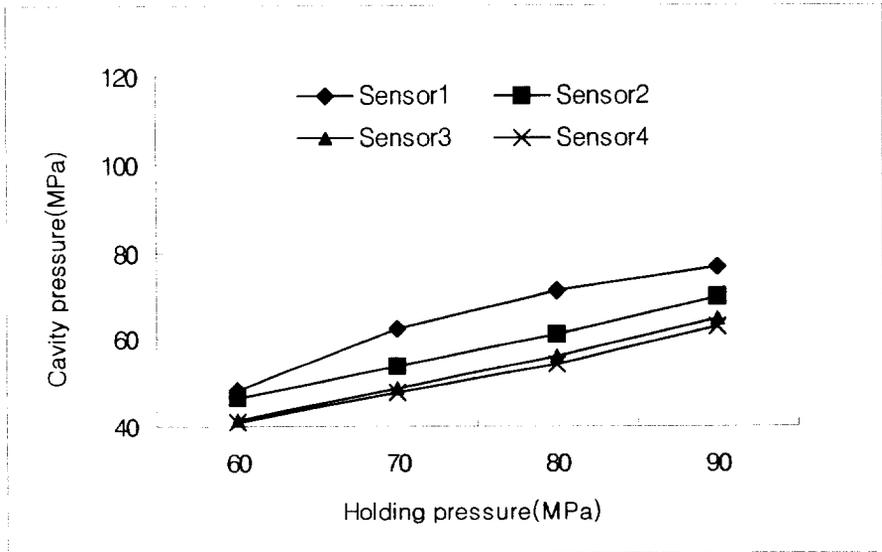


Fig. 4-17 Cavity pressure vs. holding pressure for PC

제 5 장 사출압축성형시 수축실험 결과 및 고찰

5. 1 PMMA수지의 수축거동

5.1.1 게이트 타입에 따른 수축 변화

Fig. 5-1, 5-2, 5-3은 PMMA수지의 일반 사출성형과 압축사출성형에서의 게이트 형상에 따른 수축률을 비교한 것이다. 사이드 게이트(side gate), 팬 게이트(fan gate), 필름 게이트(film gate) 일 경우 일반 사출성형과 사출압축성형을 이용하여 보압 70%, 사출속도 70% 일때의 성형품의 수축률의 변화를 나타내었다. Fig. 5-1은 사이드 게이트를 사용하였을 경우로서, 일반 사출성형시 A부위는 0.92%, B부위는 0.88%, C부위는 0.38%의 수축률을 각각 나타내었다. 사출압축성형시에는 A부위는 0.858%, B부위는 0.84%, C부위는 0.35%의 평균 수축률을 나타내었다. Fig. 5-2는 팬 게이트를 사용하였을 경우로서, 일반 사출성형시 A부위는 0.92%, B부위는 0.91%, C부위는 0.42%의 수축률을 보였다. 사출압축성형시에는 A부위는 0.85%, B부위는 0.86%, C부위는 0.39%의 평균 수축률을 보였다. Fig. 5-3은 필름 게이트를 사용하였을 경우로서, 일반 사출성형시 A부위는 0.83%, B부위는 0.77%, C부위는 0.36%의 수축률을 보였다. 사출압축성형시 A부위는 0.78%, B부위는 0.74%, C부위는 0.33%의 평균 수축률을 보였다. 사이드 게이트와 팬 게이트를 사용했을 때 성형품의 수축률은 비슷하였으며, 필름 게이트를 사용하였을 때가 가장 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 게이트 형식에 따른 수지의 유동 용이성에 비례하여 수축률이

낮아지는 결과라고 생각된다.

일반 사출성형시보다 사출압축성형시의 수축률이 약 5/1000정도 작게 나타났다. 실험에 사용한 금형에서의 보압냉각공정이 제 2장의 Fig. 2-10과 같은 pvT 선도의 사출압축성형 프로파일을 따라 성형되었다고 하면, V_0 는 약 0.8425이며, 비체적 V_1 은 약 0.8475이므로, 수축률은 2.1.5절의 식(2-1)를 이용하여 계산하면 약 0.002로 예측되었다. 그러나 실제 실험결과는 예측하였던 수축률보다는 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 실험에 사용한 금형이 등방성의 성형에 유리한 포지티브(positive)형⁶¹⁾이 아니며, 성형압축시 게이트의 미고화로 캐비티에서 노즐로 수지의 일부역류가 발생한 것으로 추정되며, 본 실험에 사용한 사출성형기는 압축시작 시점이 성형기의 보압과 동시에 작용되는 제한이 있는 등의 이유에서 완전한 압축이 이루어지지 못함에서 오는 결과라 사료된다. 그러나 사출압축성형에 의한 성형수축률은 일반 사출에서의 성형수축률 보다는 낮게 나타났다. 만약, 금형형식의 포지티브화 및 게이트의 기계적 역류 방지 등을 가능케 하면 수축률을 더욱 감소시킬 수 있으며, 등방성도 크게 향상될 것으로 생각된다.

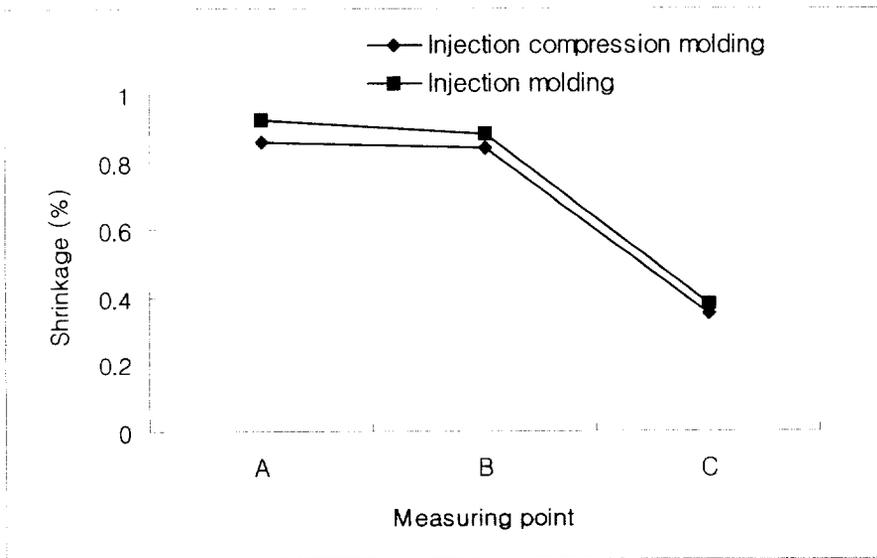


Fig. 5-1 Shrinkage vs. measuring point in case of side gate

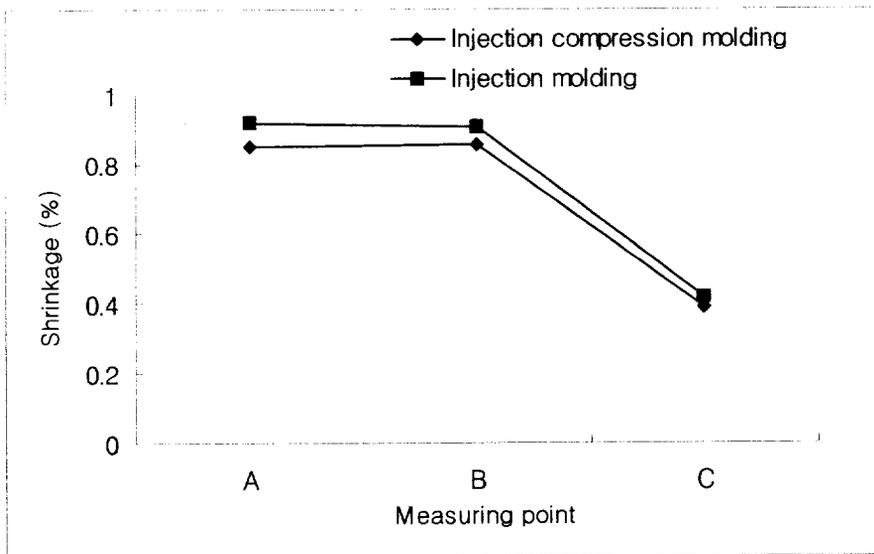


Fig. 5-2 Shrinkage vs. measuring point in case of fan gate

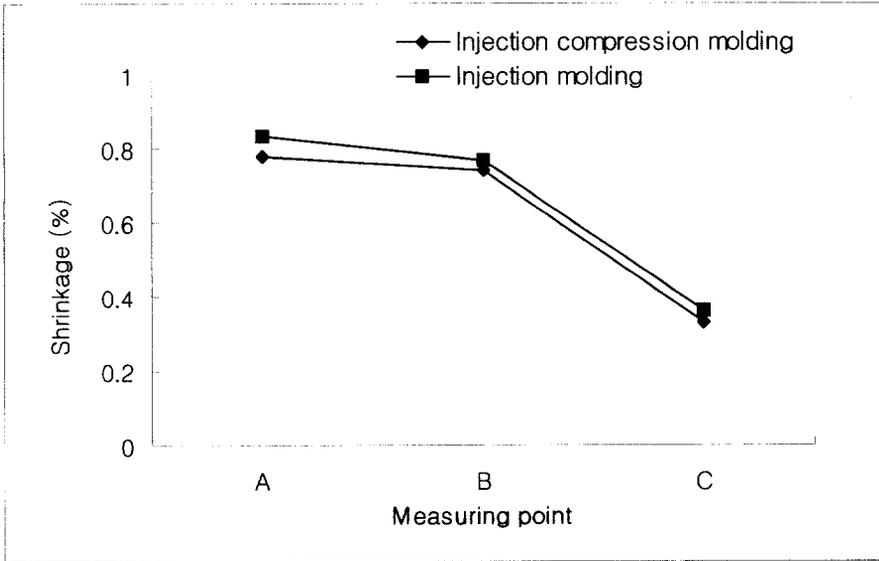


Fig. 5-3 Shrinkage vs. measuring point in case of film gate

5.1.2 사출압축력에 따른 수축 변화

Fig. 5-4에서 Fig. 5-6은 각각 게이트 형상에 따라 사출압축성형시의 압축력이 최대 형체력의 45, 55, 65%일 때 측정부위에 따른 수축률을 나타내는 그래프이다.

Fig. 5-4은 사이드 게이트를 사용하였을때 압축력과 수축률을 나타내는 그래프이며, 압축력이 45%일 때 게이트부는 0.87%, 게이트 반대부는 0.83%, 유동방향은 0.35%의 수축률을 보였으며, 압축력이 55%일 때 게이트부는 0.86%, 게이트 반대부는 0.84%, 유동방향은 0.35%, 압축력이 65%일 때 게이트부는 0.82%, 게이트 반대부는 0.84%, 유동방향은 0.34%의 수축률을 보였다.

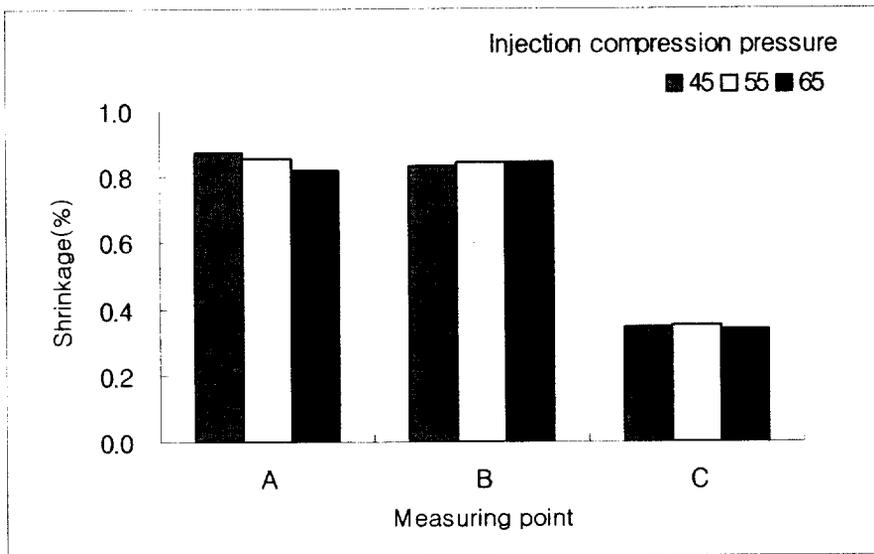


Fig. 5-4 Shrinkage vs. injection compression pressure in case of side gate

Fig. 5-5는 팬 게이트를 사용하였을시 압축력과 수축률을 나타내

는 그래프이며 압력이 45%일 때 게이트부는 0.89%, 게이트 반대부는 0.87%, 유동방향은 0.39%의 수축률을 보였으며, 압력이 55%일 때 게이트부는 0.84%, 게이트 반대부는 0.86%, 유동방향은 0.40%, 압력이 65%일 때 게이트부는 0.83%, 게이트 반대부는 0.85%, 유동방향은 0.38%의 수축률을 보였다

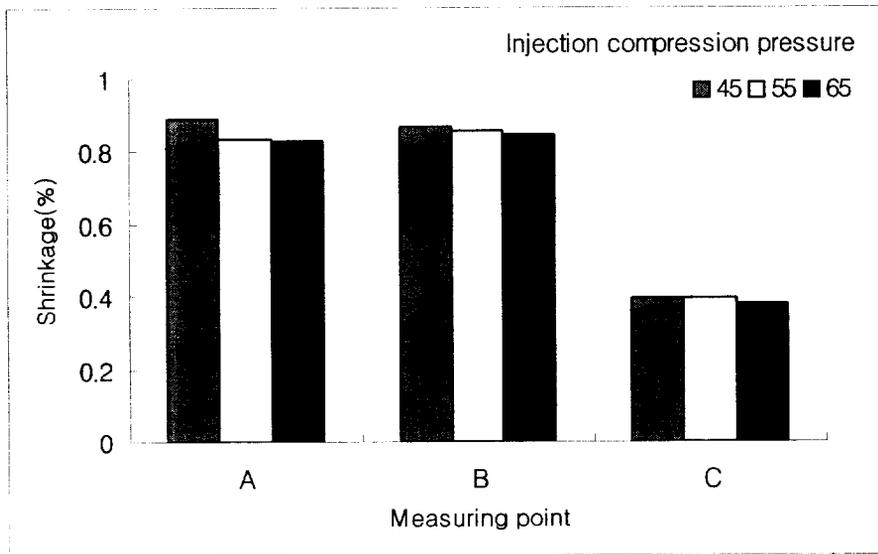


Fig. 5-5 Shrinkage vs. injection compression pressure in case of fan gate

Fig. 5-6은 필름 게이트를 사용하였을시 압축력에 따른 수축의 변화를 나타내는 그래프이며, 압축력이 45%일 때 게이트부는 0.80%, 게이트 반대부는 0.70%, 유동방향은 0.33%의 수축률을 보였으며, 압축력이 55%일 때 게이트부는 0.82%, 게이트 반대부는 0.80%, 유동방향은 0.33%, 압축력이 65%일 때 게이트부는 0.71%, 게이트 반대부는 0.71%, 유동방향은 0.34%의 수축률을 보였다. 압축력이 45%에서 65%

로 증가시켰을 경우에 수축률이 일정한 경향이 없이 변화되었다.

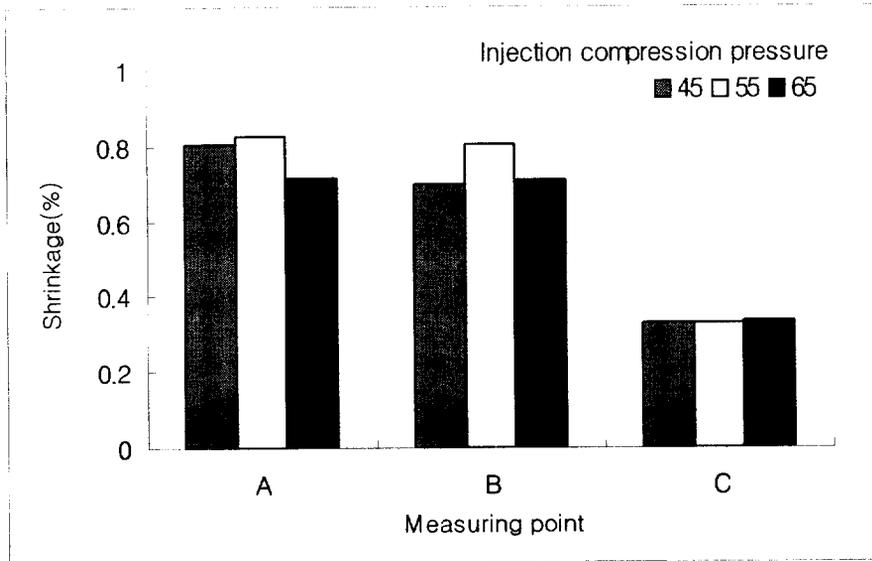


Fig. 5-6 Shrinkage vs. injection compression pressure in case of film gate

이상의 실험결과에서 압축력이 증가할수록 수축률이 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 2.3.3절에서 보였던 Fig. 2-10의 pvT선도에서 ③ → ④의 간격이 크게 되어 V_1 의 값이 V_0 에 더 근접하게 되므로 일어나는 결과라 할 수 있다. 그러나 Fig. 5-4의 사이드 게이트 경우에는 팬 게이트, 필름 게이트에 비해 게이트의 단면적이 작아서 성형시편의 고화가 많이 발생하여 압력전달성이 떨어지는 영향과 측정오차 등에 의해 압축력의 크기에 따른 영향이 비례적으로 나타나지 않은 것으로 추정된다. 특히 Fig. 5-6에서 압축력 55% 경우에는 캐비티 내부의 수지가 러너부위로 일부가 역류되어 압축력이 증가함에도 불구하고 수축률이 더 크게 되는 결과를 나타낸 것으로 추정된다.

5.1.3 압축유지시간에 따른 수축 변화

Fig. 5-7에서 Fig. 5-9는 압축유지시간이 5초, 10초, 15초일 때의 측정부위에 따른 수축률을 나타내는 그래프이다.

Fig. 5-7은 사이드 게이트를 사용하였을시 압축시간에 따른 수축의 변화를 나타내는 그래프이며, 압축유지시간 5초 일 경우 게이트부는 0.87%, 게이트 반대부는 0.84%, 유동방향은 0.35%의 수축률을 보였으며, 압축유지시간이 10초 일 경우 게이트부는 0.85%, 게이트 반대부는 0.84%, 유동방향은 0.34%, 압축유지시간이 15초 일 경우 게이트부는 0.83%, 게이트 반대부는 0.83%, 유동방향은 0.33%의 수축률을 보였다.

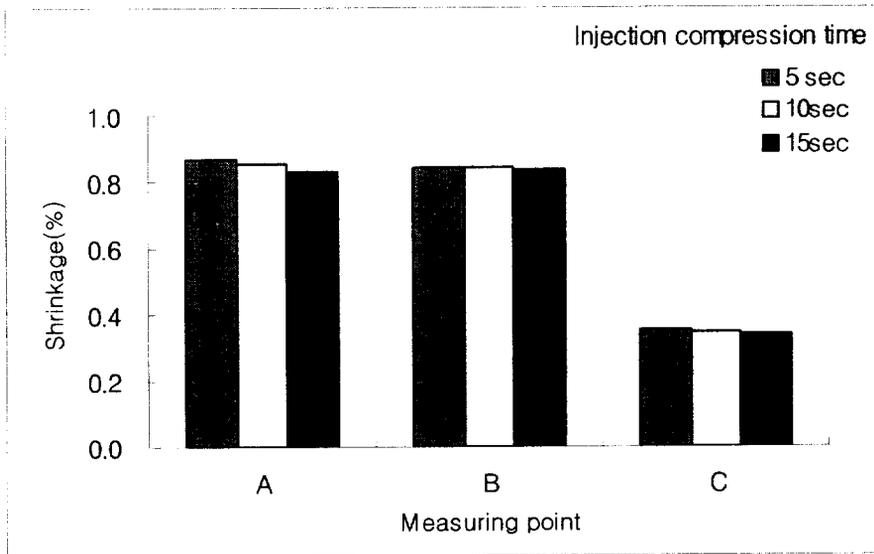


Fig. 5-7 Shrinkage vs. injection compression time in case of side gate

Fig. 5-8은 팬 게이트를 사용하였을시 압축시간에 따른 수축의 변

화를 나타내는 그래프이며, 압축유지시간이 5초 일 경우 게이트부는 0.87%, 게이트 반대부는 0.86%, 유동방향은 0.40%의 수축률을 보였으며, 압축유지시간이 10초 일 경우 게이트부는 0.85%, 게이트 반대부는 0.85%, 유동방향은 0.39%, 압축유지시간이 15초 일 경우 게이트부는 0.84%, 게이트 반대부는 0.84%, 유동방향은 0.37%의 수축률을 보였다.

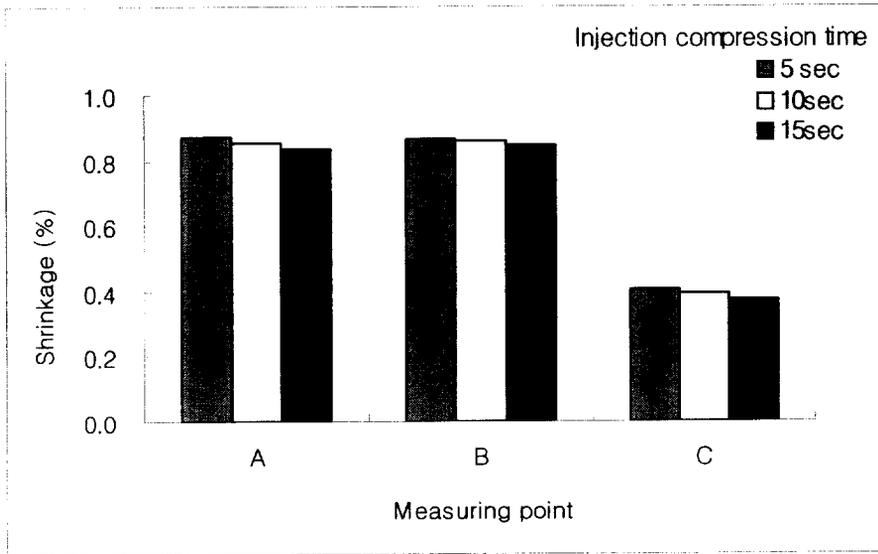


Fig. 5-8 Shrinkage vs. injection compression time in case of fan gate

Fig. 5-9는 필름 게이트를 사용하였을때 압축시간에 따른 수축의 변화를 나타내는 그래프이며, 압축유지시간이 5초 일 경우 게이트부는 0.82%, 게이트 반대부는 0.78%, 유동방향은 0.35%의 수축률을 보였으며, 압축유지시간이 10초 일 경우 게이트부는 0.78%, 게이트 반대부는 0.74%, 유동방향은 0.32%, 압축유지시간이 15초 때 게이트부

는 0.74%, 게이트 반대부는 0.69%, 유동방향은 0.32%의 수축률을 보였다.

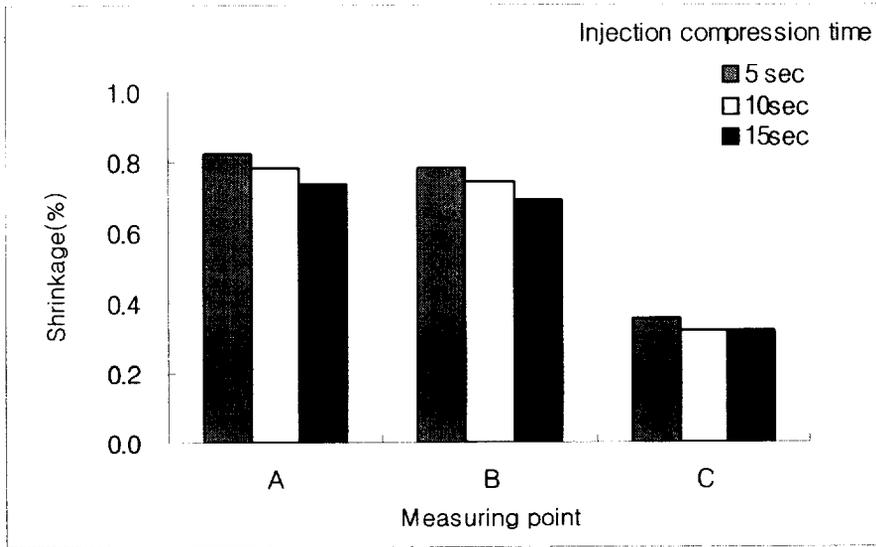


Fig. 5-9 Shrinkage vs. injection compression time in case of film gate

압축유지시간이 15초 때가 압축유지시간이 5초 일 때보다 수축률이 더 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 압축유지시간이 길어짐에 따라 수축률은 약간 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 압축력의 유지시간이 길어질수록 성형품의 밀도를 더 크게 하여, 결과적으로 수축률을 감소시키는 결과가 된다고 생각한다.

5.2 사출압축성형시 LCD BLU 도광판의 수축

5.2.1 LCD BLU 도광판과 사출압축성형

사출압축성형에 의해서 생산되는 대표적인 제품 중의 하나가 LCD (liquid crystal display) BLU(back light unit)용 도광판이다. 본 연구에서는 국내 H사에서 생산하고 있는 17인치 LCD BLU 도광판을 사례로 성형조건에 따라 수축률이 크게 변화게 되는 것을 사례연구로서 제시한다.

Fig. 5-10은 실험에 사용한 17인치 LCD BLU 도광판을 나타낸 것이다. LCD BLU 도광판의 성형에 사용되는 수지는 일본의 미츠비시(Mitsubishi)사의 PMMA VH계열을 사용하였으며, 성형에 사용되는 사출압축성형기는 450ton 전동사출성형기로 Fig. 5-11과 같다.

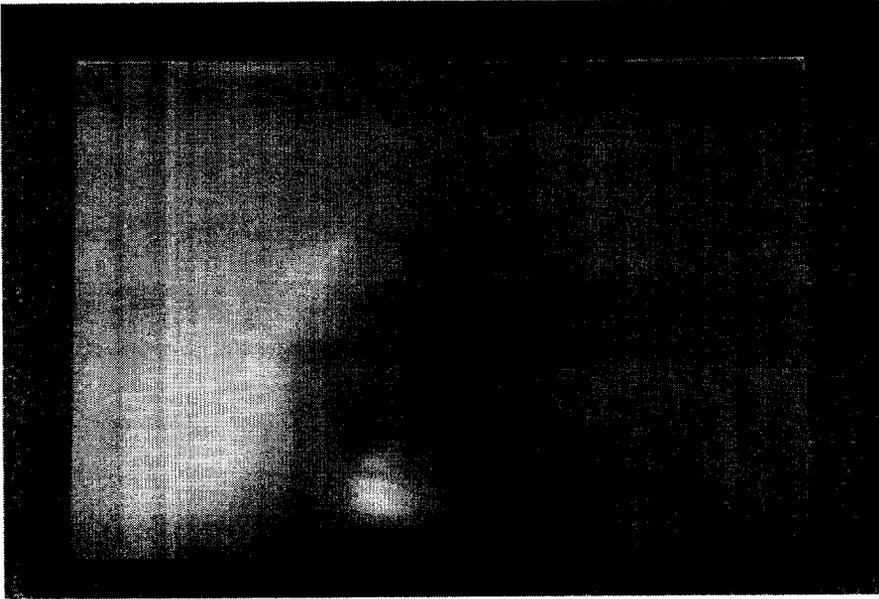


Fig. 5-10 Light guide panel for 17" notebook

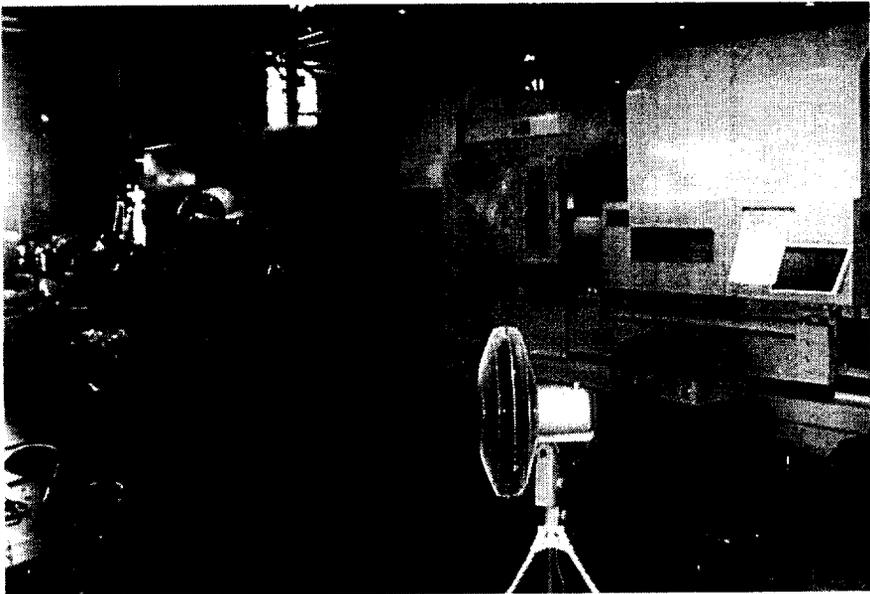


Fig. 5-11 Injection compression molding machine(450Ton)

5.2.2 사출압축실험 및 결과

17인치 LCD BLU 도광판의 설계기준을 마련한 후에 적용 수지를 선정하고, 그 수지의 수축률 및 여러 가지 성형조건을 고려하여 금형을 설계하였다. 제작된 금형을 450ton 사출압축성형기를 이용하여 LCD BLU 도광판을 성형한 후, 치수 정밀도를 측정하여 마련된 기준과 비교하여 최종적인 성형조건을 선정하였다. 사출압축실험은 H사에서 적용하고 있는 프레스 방식과 AP(active press)방식의 두 가지 방식으로 실시하였다. Table 5-1은 17인치 LCD BLU 도광판 제품의 치수기준을 나타낸 것이다.

Table 5-1 Specifications of 17" light guide panel

Item	Specification		Shrinkage	Mold size
	Type	Tolerance	%	
Width (mm)	349.60	±0.2	0.5	351.34
	349.60			351.35
Height (mm)	278.60			280.00
	278.60			279.98
	278.60			279.99
Weight(g)	925.00			+35

LCD BLU 도광판 성형품에서 가로방향의 상하측면과 세로방향의 좌, 중, 우의 3개소 치수를 기준으로 수지의 수축률을 적용하여 Table 5-1의 금형치수와 같이 금형을 설계 및 제작하였다. 예를들면, LCD BLU 도광판 제품의 가로측 기준 길이가 349.60mm인 제품을 얻기 위해서는 수지의 수축률을 감안하여 성형품의 치수보다 1.748mm 크게 금형의 치수를 설계해야 하므로 금형 치수는 351.34mm가 된다. 이와 같이 금형 캐비티의 치수가 결정되어 금형 설계가 완료된다.

제작된 금형은 프레스 사출압축방식을 이용하여 1차 사출압축성형하였으며, 성형품의 치수는 Table 5-2와 같게 측정되었다.

Table 5-2 Light guide panel size by 1st injection-compression molding by press mode

Item	Spec.	Mold size	Parts		Shrinkage (%)
			1	2	
Width (mm)	349.60	351.34	350.20	350.20	0.326
	349.60	351.35	350.18	350.19	0.332
Height (mm)	278.60	280.00	279.07	279.08	0.330
	278.60	279.98	279.15	279.14	0.302
	278.60	279.99	279.06	279.03	0.346
Weight(g)	925.00	-	912.00		-

Table 5-2에서 알 수 있듯이 성형된 시편 1의 가로치수가 350.20mm로 측정되었으며, 이때의 수축률은 0.326이었으며, 제품 중량은 912g이었다. 이것은 기준 제품의 치수에 비해 약간 크게 성형되었으며, 수축률은 예상하였던 0.5% 보다 감소한 약 0.3%로 나타났다. 이것은 기준 제품의 치수보다 압축성형 된 제품의 치수가 크다는 것을 의미하므로, 캐비티 크기를 재조정할 필요가 있었다. 이에 캐비티의 가로와 세로치수를 각각 0.4mm씩 줄이는 1차 금형 수정을 실시하였다. 1차 사출압축실험시 적용 압축력은 약 290ton으로, 캐비티 전면에 가해지는 압축력은 약 495ton이었다.

1차 수정된 금형을 프레스 사출압축 방법으로 2차 사출압축실험한 결과를 Table 5-3에 나타내었다.

Table 5-3 Light guide pane size by 2nd injection-compression molding by press mode

Item	Spec.	Mold size	Parts	Shrinkage (%)
			1	
Width (mm)	349.60	350.94	349.45	0.426
	349.60	350.95	349.44	0.432
Height (mm)	278.60	279.60	278.52	0.388
	278.60	279.58	278.60	0.352
	278.60	279.59	278.48	0.399
Weight(g)	925.00	-	904.00	-

Table 5-3에서 알 수 있듯이 금형 수정 후 성형실험 한 시편 1의 가로 치수가 349.45mm로 측정되었다. 이때의 수축률은 0.426이었다. 이때 측정된 제품중량은 904(g)이었다.

2차 사출압축실험한 성형품의 치수는 기준치수에 거의 부합되었다. 이때의 압축력은 1차 실험때와 동일한 290ton이었지만, 캐비티 전면에 가해지는 압축력은 약 445ton으로 1차에 비하여 약 50ton이 감소하였다. 이것은 캐비티의 치수를 수정하고, 사출량을 조정하여 약간 감소시킨 결과이다.

수정된 금형을 사용하여 AP사출압축 방식을 이용하여 3차 사출압축실험한 결과는 Table 5-4과 같다.

Table 5-4 Light guide pane size by 3rd injection-compression molding by AP mode

Item	Spec.	Mold size	Parts		Shrinkage (%)
			1	2	
Width (mm)	349.60	350.94	348.95	348.97	0.564
	349.60	350.95	348.95	348.95	0.572
Height (mm)	278.60	279.60	278.18	278.19	0.506
	278.60	279.58	278.26	278.26	0.474
	278.60	279.59	278.28	278.14	0.522
Weight(g)	925.00	-	894.00		-

압축압력을 이전의 프레스 방식에서 보다 약 60ton 증가시켜 350ton의 압축압력으로 성형시킨 결과 성형품의 치수가 약 348.95mm로 기준 치수보다 약간 작게 측정되었다. 그때의 수축률은 0.564이고, 측정된 성형품의 중량은 약 894g이었다.

이상에서 기술한 사출압축성형 실험의 결과를 고찰해보면 사출압축성형 제품은 사출압축압력을 제어하면 성형품의 수축률을 임의로 제어할 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

2가지 성형방식에 따라 성형된 LCD BLU 도광판의 수축률은 Fig. 5-12와 같이 변동되었다. 따라서, 이와 같이 사출압축성형시에는 동일한 금형과 동일한 성형품이지만 압축력 등의 변화에 따라 수축률은 제어할 수 있음을 의미한다. 즉, 사출압축성형시의 수축률은 이론적으로 볼 때, 압축력의 크기를 크게 함에 따라 0%까지 조정할 수 있다고 할 수 있다.

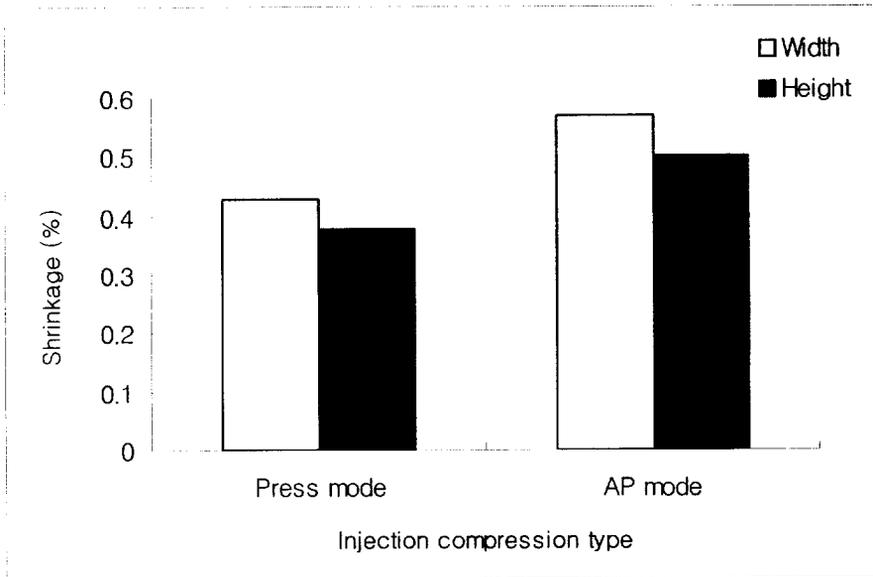


Fig. 5-12 Shrinkage according to injection compression type

제 6 장 결 론

본 연구에서는 일반 사출성형시와 사출압축성형시에 일어나는 성형수축에 대하여 폴리프로필렌(PP), 폴리아미드(PA), 폴리카보네이트(PC) 및 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA) 수지를 대상으로 하여 성형압력, 성형온도, 금형온도, 사출속도 등의 성형조건의 변화에 따른 수축의 거동에 대해 연구하였다.

일반 사출성형시의 수축연구에는 PP, PA, PC 수지를 대상으로 성형품의 형상비에 따른 수축거동을 주로 다루었으며, 그 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) PP 성형에서 성형품의 형상비가 커질수록 수지흐름방향의 수축률은 약 2%에서 1.3% 범위로 감소하였으며, 사출속도가 10%씩 증가할수록 수지흐름방향의 수축률은 약 0.1% 씩 감소함을 알 수 있었다.
- (2) PA 성형에서 사출속도와 보압을 증가시킬수록 수축률은 비례하여 감소하였으며, 측정부위별 수축률은 수지흐름 직각방향의 경우 게이트에서 먼쪽, 게이트 근처, 길이 방향 순으로 감소하였다.
- (3) PP 성형에서 직사각형 성형품의 경우에는 형상비가 다른 성형품보다 길이방향의 수축률이 크게 나타났다. 그러나 PA 성형품에서는 이와 정반대로 길이방향의 수축률은 가장 작게 나타났다. 이와 같은 현상은 각 수지가 갖는 분자배향의 탄성 엔트로피(entropy elasticity)의 차이에 의한 것이라 추정된다.

(4) PC 성형품에서 수지온도가 310℃까지는 수축률이 감소하였지만 그 이상의 온도에서는 수축률이 점차 증가하였다. 그리고 금형온도가 수축률에 미치는 영향은 거의 없었다.

사출압축성형시에 일어나는 수축연구에는 PMMA를 대상으로 각 게이트 형상별로 압축력과 압축유지시간에 따른 수축거동을 주로 다루었다. 또한 사례연구로서 모니터용 LCD BLU 도광판을 대상으로 수축률은 압축력의 크기에 의해 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 사출압축시 수축률에 미치는 성형조건으로 압축력보다는 압축유지시간이 더 크게 영향을 미쳤다. 게이트 형식에서는 사이드게이트와 팬 게이트를 사용할 때의 수축률은 유사하며, 필름게이트를 사용할 때에 수축률이 가장 작았다.

(2) 사출압축성형시의 성형수축률이 일반 사출성형시의 성형수축률에 비하여 약 5/1000정도 감소하였다.

(3) 컴퓨터용 17" LCD BLU 도광판의 성형에 있어서 수축률은 압축력의 제어에 따라 조절할 수 있었다.

참고문헌

1. 夷藤 忠, 曾根忠利, 中川 曠, “射出成形 第10版”, 工業調査會, 플라스틱·에지, pp. 15-22, 1993.
2. 한국금형협동조합, “한국금형공업총람”, pp. 6-32, 1998.
3. C. Liu and L. T. Manzione, “Process studies in precision injection molding. I: Process parameters and precision”, Polymer Engineering Science, Vol. 36, Issu. 1, 1996.
4. C. J. Neubert, "Linear shrinkage differences in plastic injection molded parts", SPE Antec Tech., Vol. 40, pp. 1904, 1994.
5. B. Broadhead and P. Koch, "The effect of mold surface topography on plastic part shrinkage in injection molding", SPE Antec Tech., Vol. 39, pp. 429, 1993.
6. A. Mamat et al., “Analysis of shrinkage by dual kriging for filled and unfilled polypropylene molded parts”, Polymer Engineering Science, Vol. 35, Issu. 19, pp. 1511, 1995.
7. H. Kumazawa, "Unified Design Method of the Cavity for Injection Molded Spur Gears", SPE Antec Tech., Vol. 40, pp. 817, 1994.
8. M. F. Bain, S. L. Janicki, A. S. Ulmer, and L. S. Thomas, "Approximate model for analyzing frozen-In strains and shrinkage of extruded PVC lineal profiles", SPE Antec Tech., Vol. 38, pp. 977, 1991.
9. A. I. Isayev and T. Harigharan, “Volumetric effects in the

- injection molding of polymers”, *Polymer Engineering Science*, Vol. 25, Issu. 5, pp. 271, 1985.
10. P. Delbarre et al., "Estimating linear shrinkage of semicrystalline resins from pressure-volume-temperature (PVT) data", *SPE Antec Tech.*, Vol. 37, pp. 301, 1991.
 11. M. R. Nagy, "High accuracy shrinkage and warpage prediction for injection molding", *SPE Antec Tech.*, Vol. 39, pp. 2155, 1993.
 12. K. M. B. Jansen, G. Titomanlio, and R. Pantani, "As-molded shrinkage measurements on polystyrene injection molded products”, *Polymer Engineering Science*, Vol. 38, Issu. 2, pp. 254, 1998.
 13. V. Leo and C. H. Cuveliez, “The effect of the packing parameters, gate geometry, and mold elasticity on the final dimensions of a molded part”, *Polymer Engineering Science*, Vol. 36, Issu. 15, pp. 1961, 1996.
 14. C. A. Heiber et al., "Prediction of anisotropic shrinkage behavior of plastic injection molded parts by experimental design approach", *SPE Antec Tech.*, Vol. 73, pp. 259, 1991.
 15. L. P. Herbert et al., "A study on quality monitoring of injection molded parts", *SPE Antec Tech.*, Vol. 37, pp. 430, 1991.
 16. S. J. Ni and K. K. Wang, "Warpage index for mold designers and CAE analysis", *SPE Antec Tech.*, Vol. 39, pp. 612, 1993.
 17. A. G. Gemmari, "Minimize part warpage by integrated CAE technology", *SPE Antec Tech.*, Vol. 39, pp. 3436, 1993.
 18. G. Burke and D. Kazmer; "Shrinking control and residual styrene

- of unsaturated polyester resins cured at low temperatures", SPE Antec Tech., Vol. 38, pp. 1354, 1992.
19. H. Ries, "Colored engineering resins for high strain/thin walled applications", Kunststoffe Plasto Europe, Vol. 84, pp. 1710, 1994.
 20. C. S. Lee and A. Dubin, "Cure, shrinkage and properties of an epoxy material", SPE Antec Tech., Vol. 36, pp. 375, 1990.
 21. R. Thomas and N. McCaffery, "Effect of temperature dependent thermal properties on the accuracy of simulation of injection molding", SPE Antec Tech., Vol. 35, pp. 371, 1989.
 22. K. M. B. Jansen, D. J. Van Dijk and M. H. Husselman, "Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding", Polymer Engineering Science, Vol. 38, Issu. 5, pp.838-846, 1998.
 23. K. M. B. Jansen, D. J. Van Dijk, M. J. A. Freriksen, "Shrinkage anisotropy in fiber reinforced injection molded products", Polymer Engineering Science, Vol. 19, Issu. 4, pp. 325, 1998.
 24. Annual book of ASTM Standards, Designation D995~89, Vol. 8.01, 1989.
 25. L. C. E. Struik, Internal stress, "Dimensional stabilites an molecular orientation in plastics", pp. 177, Wiley and Sons, Brisbane, 1990.
 26. N. Mekhilef, "Pressure-volume-temperatur dependence in polyvinylidene fluoride and polyvinylidd fluoride-hexafluoro propylene copolymer", SPE Antec Tech. Paper, Vol. 46, pp. 547, 2000.

27. L. Capt and M. R. Kamal, "Effect of pressure on crystallization of polyethylene", SPE Antec Tech. Paper, Vol. 45, pp. 831, 1999.
28. 綾井 英二, "射出壓縮成形技術のポイソト", 工業調査會, プラスチック, Vol. 17, pp. 23, 1986.
29. 能川 玄, "射出プレス成形", 工業調査會, プラスチック, Vol. 45, pp. 8, 1989.
30. C. H. Wu and Y. L. Su, "Optimization of wedge-shaped parts for injection molding and injection compression molding", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 2, pp. 215-224, 2003.
31. W. B. Young, "Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens", Applied Mathematical Modelling, Vol. 29, pp. 955-971, 2005.
32. DawKins, Eric, Horton, Kris and Dr. Engelmann, Paul, "Color and gloss-the connection to process condition", Journal of Injection Molding Technology, pp. 1-7, 1998.
33. 유중학, 김희송, "폴리프로필렌의 사출성형조건이 성형품의 선형수축률과 중량에 미치는 영향", 대한기계학회논문집, 제 19권, 제 2호, pp. 322-329, 1995.
34. Uffe. R. A. Theilade, Erik Kjær, Hans .N .H, "The effect of mold surface topography on plastic part In process shrinkage in injection molding", SPE Antec Tech., pp. 463-467, 2003.
35. D. A. Velarde, M. J. Yeagley, "Linear shrinkage differences in plastic injection molded parts", SPE Antec Tech., pp. 3466-3469, 2000.

36. E. Bociaga, "Effect of manufacturing conditions on the properties of injection molded polyethylene test specimens", *Journal of Injection Molding Technology*, March 2001, Vol. 5, No.1, pp. 15-22, 2001.
37. P. M. Gipson, P. F. Grelle, B. A. Salamon, "The effects of process conditions, nominal wall thickness, and flow length on the shrinkage characteristics of injection molded polypropylene", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 117-125, 1999.
38. C. Lotti, M. M. Ueki, R. E. S. Bretas, "Prediction of shrinkage of injection molded PP plaques using artificial neural networks", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 157-176, 2002.
39. 정영득, 박태원, 김현필, "플라스틱 성형을 위한 알기쉬운 금형설계", pp. 199-230, 1998.
40. 권태헌, 박성진, 윤경환, 이상봉, 정영득, "사출성형 CAE 설계지침", 문운당, pp. 199-202, 2001.
41. C-MOLD, "C-MOLD design guide a resource for plastics engineers-third edition", Advanced CAE technology, Inc, Ithaca, New York, pp. 129-152, 1999.
42. 조웅식, "사출성형 금형설계기술", 기전연구소, pp. 55-61, 2001.
43. S. C. Lee, C. E. P and D. Y. Yand, "Analysis for filling stage of injection molding considering compressibility and phase change",

Journal of KSPE, Vol. 18, No. 12, 2001.

44. 정영득, 구본홍, “제품 및 금형설계”, 인터비전, pp. 371-372, 2005.
45. G. Menges, W. Michaeli and P. Mohren, " How to make injection molds", Hanser Publishers, Munich, Third edition, pp. 346, 2000.
46. P. Kennedy, "Flow analysis of injection molds", Carl Hanse Verlag Munich Vienna New York, pp. 41-108, 1995.
47. L. Kondic, M. J. Shlley and P. Palfy-Muhoray, "Non-newtonian Hele-Shaw flow and the saffman-taylor instability", The American Physical Society, Vol. 80, No. 7, pp. 1433-1436, 1998.
48. L. Kondic, M. J. Shlley and P. Palfy-Muhoray, "Models of non-newtonian Hele-Shaw flow", The american society, Vol. 54, No. 5, pp. 4536-4539, 1996.
49. R. Y. Chang and W. H. Yang, "Numerical simulation of injection molding using a three-dimensional finite volume approach", Int. J. Numer. Meth, Fluids 2001, Vol. 37, pp. 125-148, 2001.
50. P. Kennedy, "Flow analysis reference", Moldflow Pty. Ltd., pp. 59-108, 1993.
51. L. W. Seow, Y. C. Lam, "Optimizing flow in plastic injection molding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 72, pp. 333-341, 1997.
52. “마살링 시스템 취급설명서”, 기신정기(주), 2001.
53. J. P. Beaumont, R. Nagel and R. Sherman, "Successful injection molding-process, design, and simulation", Hanser Publishers,

Munich, pp. 165-197, 2002.

54. 한동엽, "The effects of molding conditions on the molding quality in the amorphous polymers", 부경대학교 공학석사 논문, 2003.
55. 최윤식, 한동엽, 정영득, "제품 형상에 따른 PP수지의 수축거동", 한국기계가공학회지 제2권, 제1호, pp. 100-105, 2003.
56. J. P. Beaumont, R. Nagel and R. Sherman, "Successful injection molding", Hanser, pp. 178-179, 2002.
57. 최윤식, 한동엽, 정영득, "PA6 사출성형의 형상에 따른 성형 수축거동", 산업기술교육훈련학회지 제10권 제2호, pp. 41-46, 2005.
58. 한성렬, "The effects of additives on the polypropylene injection molding", 부경대학교 공학석사 논문, 2001.
59. G. Potsch, "Injection molding", Hanser, pp. 132-134, 1999.
60. 최윤식, 정영득, "PC성형품에서 성형 시 캐비티내압과 성형품질", 산업기술교육훈련학회지 제8권 제2호, pp. 59-65, 2003.
61. 최윤식, 한성렬, 정영득. "사출압축성형시 PMMA 재료의 성형 수축거동", 한국동력기계공학회지 제9권 제4호, pp. 83-89, 2005.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 학문의 길로 인도해 주시며 학문적 가르침과 질책을 아끼지 않으셨고, 항상 자상하신 정영득 지도교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고 본 논문의 주심을 맡아 지도해 주시던 심성보 교수님과 세심한 배려와 가르침으로 본 논문을 성의껏 심사를 해 주시던 한규택 교수님, 광재섭 교수님, 한국기술교육대학교 유중하 교수님께 감사의 마음을 드립니다. 학위기간 동안 지도해주신 부경대학교 구양 교수님, 하만정 교수님 및 기계공학부 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 창원기능대학 박래원 교수님, 계산점공사 채덕근 사장님께 감사드립니다. 기계공학부의 정밀성형실험실 박사과정의 한성렬, 한동엽, 권윤수 선생님의 좋은 결실을 기대합니다. 특히 실험 및 자료정리에 강철민, 문영배, 노병수의 여러 후배들에게 고마움을 전합니다. 논문수행에 많은 도움을 주신 최성정밀의 유희종 전무이사님과 김경곤 과장님, 한부정공 한문수 사장님, 일진에이텍(주) 전영도 사장님, 성진지오텍(주) 전정도 사장님께도 진심으로 감사의 말씀을 올리고 싶습니다.

학위기간동안 편의를 제공하여 주신 부산기능대 정양숙 학장님을 비롯한 동료 교수님과 교직원분들께 이 지면을 빌어 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

또한 일가친척 여러 어르신, 처가형제와 자기 일처럼 걱정하고 격려와 성원을 해주신 36회 두우회 고향친구들과 SGI회원, 도약회 회원 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 올립니다.

오늘이 있기까지 아들이 잘 되기를 늘 기원하시며 걱정하시던, 지금은 고인이 되신 부모님 영전에 이 결실을 바칩니다. 희망과 용기를 갖게 항상 염려와 걱정을 하여주신 울산의 형님과 형수님, 경주 큰 누님과 자형, 부산의 두 누님과 자형, 울산 동생내외의 화목함이 힘이 되었음을 감사히 생각하고 있습니다.

한 가정의 가장으로서 늦은 공부에 경제적, 시간적으로 충실하지 못한 남편의 뒷바라지에 애쓰고 온갖 어려움을 인내하면서 부족함을 내색하지 않고 묵묵히 내조해주신 아내 김경숙에게 항상 감사하고 있음을 전하며 학업에 열중하는 사랑하는 아들 준원이와 딸 하영이가 씩씩하고 건강하게 바르게 자라서 이 사회의 믿음직한 일원으로 자리매김하길 바라며 이 기쁨을 함께 하고 싶습니다.

모든 분들께 진심으로 감사의 말씀을 올리며 앞날에 좋은 일만 있기를 기원합니다.

박사학위를 마무리 하면서

2005년 12월 중순

최 윤 식