공학박사 학위논문

다수 캐비티 사출금형에서의 균형충전에 관한 연구

지도교수 [illegible]

이 [illegible]으로 제출함.

2006년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

제 덕 근

諸德根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 河 萬 景

委 員 工學博士 具 洋

委 員 工學博士 閔 丙 鉉

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

1. 서 론 ---------- 1

1.1 연구 배경 ---------- 1

1.2 최근 연구 동향 ---------- 4

1.3 연구 목적 및 내용 ---------- 8

1.4 논문 구성 ---------- 11

2. 다수 캐비티 사출금형에서의 충전불균형 ---------- 13

2.1 사출성형공정 ---------- 13

2.2 다수 캐비티 금형 ---------- 18

2.3 플라스틱 수지의 유동특성 ---------- 23

2.4 충전불균형의 원인 ---------- 30

2.5 균형충전도의 정의 ---------- 32

2.6 균형충전 확인을 위한 CAE 유동해석 ---------- 34

3. 실험 및 결과 고찰 ---------- 38

3.1 수지와 성형조건에 따른 균형충전도 실험 ---------- 38

3.2 편측분기형 러너배열에서의 균형충전도 실험 ---------- 43

3.3 유리섬유보강 수지의 균형충전도 실험 ---------- 51

3.4 핫러너에서의 균형충전도 실험 ---------- 57

3.5 실험계획법에 의한 균형충전 영향인자 평가 ---------- 67

4. 균형충전을 위한 사출금형의 개발 ---------- 73

4.1 4BF 금형 ---------- 73

4.2 러너 코어(runner core)핀 금형 ---------- 79

4.3 조절형 러너코어핀 금형 ---------- 84

5. 결론 ---------- 88

참고문헌 ---------- 90

A Study on the Filling Balance in Multi-Cavity Injection Molds

Je, Deok Keun

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Pukyong National University

Abstract

The injection molding process is a predominant method for producing plastic parts. In order to maximize productivity and molding quality in a injection mold, it is important that each cavity in a multi-cavity injection mold is identical. This requires that cavity dimensions should be identical and delivery system of melt to each cavity have to be the same.

Despite the geometrically balanced layout in multi-cavity injection mold more than 4 cavities, it has been observed that the filling in each cavity results in imbalances. Most of cases, this phenomenon of filling imbalances have a bad effect on dimension accuracy, warpage, molding appearance and strength of molding parts.

In recent years, some papers by Beaumont et al. in 1997 have been presented about filling imbalance in multi-cavity injection mold.

In this study, experiment were conducted to investigate the effect of variables in injection molding process on DFB(Degree of Filling Balance) by using PP, ABS, PA, PMMA polymers. Also, the DFB for "H" and "L" type runner layout in 2 plate and 3 plate cold runner mold was observed and the DFB of hot and cold runner mold in case of using glass fiber reinforced plastic was compared. On the other hand, it was examined the effect on the DFB influenced by variables in injection molding process using Taguchi method for the design of experiments. On the basis of these experimental studies, this paper presented a new mold called as 4BF mold that is useful to balanced filling in 3 plate mold and established its feasibility through experiment. Additionally the paper presented a new mold structure that has adjustable length of runner core pin(RC pin) in the outside of mold and verified experimentally its usefulness and possibility for perfect filling balance. An externally adjustable RC pin mold proposed in this study will be expected to apply the design of mold and injection molding for mass productions of precision plastic parts such as cellular phone parts, plastic gears.

LIST OF TABLES

Table 1-1 Summary of researches on filling imbalance

Table 3-1 Injection molding conditions for experiment

Table 3-2 Experimental conditions for design of experiment

Table 4-1 Experimental conditions for RC pin mold

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Filling imbalanced molding in multi-cavity injection mold

Fig. 1-2 Melt Flipper™ technology

Fig. 1-3 Melt Flipper MAX™ technology

Fig. 1-4 Filling imbalances in 4 cavity mold

Fig. 2-1 Injection molding cycle

Fig. 2-2 Process of injection molding

Fig. 2-3 Geometrically imbalanced runner layout

Fig. 2-4 Geometrically balanced runner layout

Fig. 2-5 Profile of shear rate within runner

Fig. 2-6 Typical velocity, shear rate, temperature and viscosity profiles

Fig. 2-7 Temperature sensitivity of various polymers

Fig. 2-8 Flow pattern of plaque type molding

Fig. 2-9 Effect of high sheared material on filling pattern

Fig. 2-10 Different shear rate between primary and secondary runner

Fig. 2-11 Filling imbalances due to non-symmetrical shear rate distribution

Fig. 2-12 Inner and outer part in multi-cavity runner layout

Fig. 2-13 Mid-plane model and mesh for injection molding analysis

Fig. 2-14 Actual filling patterns vs. CAE simulated filling patterns

Fig. 3-1 Experimental mold and runner layout

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

Fig. 3-3 Various polymer's DFB according to injection speed

Fig. 3-4 Relation between DFB and temperature sensitivity

Fig. 3-5 Filling imbalance in binary branch type runner

Fig. 3-6 Filling imbalance in unary branch type runner

Fig. 3-7 Various runner shapes

Fig. 3-8 Various polymer's DFB according to injection speed

Fig. 3-9 Effect of shear rate on viscosity

Fig. 3-10 Relationship between DFB and T_b

Fig. 3-11 DFB according to various runner shape

Fig. 3-12 Experimental equipments

Fig. 3-13 Filling imbalances according to various PA6 polymers

Fig. 3-14 DFB according to glass fiber contents

Fig. 3-15 Hot runner system

Fig. 3-16 Experimental hot runner mold

Fig. 3-17 Filling imbalance by hot runner mold

Fig. 3-18 DFB vs. injection speed (ABS)

Fig. 3-19 Runner and cavity layout in experimental mold

Fig. 3-20 DFB vs. injection speed (PMMA)

Fig. 3-21 DFB vs. injection speed (PA)

Fig. 3-22 Comparison of various polymer's DFB

Fig. 3-23 DFB according to experimental factor

Fig. 3-24 Effect of each factor on the DFB

Fig. 4-1 New runner system for filling balance in 3 plate mold

Fig. 4-2 Schematic of 4BF mold

Fig. 4-3 Relation between DFB and injection speed

Fig. 4-4 Relation between DFB and melt temperature

Fig. 4-5 Comparison of DFB between 4BF mold and 3plate mold

Fig. 4-6 Effect of RC pin for filling balance

Fig. 4-7 Experimental mold for runner core pin

Fig. 4-8 Improvement of DFB by using RC pin

Fig. 4-9 Externally adjustable RC pin mold

Fig. 4-10 DFB according to insert length of RC pin in various polymers

NOMENCLATURE

V_0 : Maximum melt velocity [㎝/sec]

R : Radius of runner [㎝]

dr : Distance from flow center line [㎝]

n : Power law index

$\dot{\gamma}$: Shear rate [sec^{-1}]

τ : Shear stress at boundary [Pa]

η_0 : Viscosity at $\dot{\gamma}=0$

T^* : Transition temperature at $\eta=\infty$ [℃]

T : Melt temperature [℃]

A_1 : WLF's coefficients

A_2 : WLF's coefficients [K]

D_1 : Reference viscosity at $\dot{\gamma}=0$ [Pa·s]

D_2 : Transition temperature when gauge pressure reaches zero [K]

D_3 : T^*'s variation by pressure [K/Pa]

T_b : Temperature sensitivity [K]

y_i : Experimental data

n : Number of experiments

1. 서 론

1.1 연구 배경

오늘날 산업의 고도화와 더불어 플라스틱 재료의 사용분야가 점점 확대되어, 이제 플라스틱은 현대산업에 없어서는 안 될 중요한 소재로서 그 비중이 커져가고 있다.

플라스틱 재료는 타 재료에 비하여 여러가지 우수한 성질 즉, 경량, 성형성, 미려한 외관, 전기절연성, 내수성, 내유성, 내식성, 착색의 용이성, 고 생산성 등을 가지고 있으며, 이를 이용하여 여러분야의 제품에 이들의 특성을 적용하고 있으며, 최근에는 내열성, 고강성 플라스틱이 개발되어 기계 구조용 부품과 반도체를 포함한 초정밀 첨단제품의 영역에까지 확대 사용되고 있는 실정이다.

플라스틱 제품의 성형공정은 압축성형, 트랜스퍼 성형(transfer molding), 적층성형(laminate molding), 사출성형, 압출성형, 중공성형(blow molding), 캘린더링(calendaring), 진공성형, 회전성형 등 다양한 성형방법이 개발되어 있으나, 그 중에서 사출성형이 플라스틱 성형의 약 70% 이상을 차지하고 있다.[1)]

사출성형은 타 공정에 비하여 월등히 생산성이 높으면서도 정밀치수의 성형이 가능하며, 또한 반복 정밀도도 높기 때문에 많은 분야에서 적용하고 있으나, 금형 및 성형기와 같은 설비의 비용이 높고 성형조건의 설정이 까다로운 편이다. 또한, 최근에는 금형 설계 전에 시뮬레이션을 통해 성형성 및 후변형을 알아보기 위해서 사출

성형해석 프로그램을 많이 활용하고 있다.

플라스틱의 성형 공정에서 생산성을 향상시키기 위해서는 성형사이클타임의 단축과 다수 캐비티 금형[2] 개발이 필수적인데 성형 사이클타임의 단축을 위해서는 적절한 냉각시스템과 고속사출성형기 등에 관한 연구가 필요 할 것이며, 다수 캐비티 금형에서는 각 캐비티에서 성형되는 성형품에 대한 균일한 품질의 확보를 위한 최적 성형조건의 탐색과 금형구조의 개선에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다.

다수 캐비티 사출금형에서 각 캐비티 간에 일어나는 충전불균형은 성형품의 품질에 큰 저해 요인으로서 플라스틱 제품의 치수정밀도, 외관품질, 강도 등의 품질에 불균일한 결과를 가져오는 근본적인 요인으로 지적되고 있다.

이와 같은 다수 캐비티 사출금형에서의 충전불균형은 1997년 Beaumont[3]에 의해 그 현상의 원인이 규명되었으며, 그 이전에는 단순히 불균일한 금형온도의 분포, 러너 시스템의 가공시 가공오차, 사출압력에 의한 금형형판의 휨, 캐비티의 가공시 가공 오차 등에서 오는 결과로 생각되어져 그에 대한 중요성이 간과되어 왔다. 그러나 실제로 충전 불균형은 충전단계에서 러너 내에 발생하는 불균일한 전단분포에 기인하여 발생되므로 점도 변화에 영향을 주는 수지의 물성, 러너의 배열(layout)과 같은 외부 요인과 사출속도, 수지온도, 금형온도, 사출압력과 같은 성형공정조건에 의한 요인에 의해 충전 불균형의 양상이 달라지게 된다.[4]

본 연구에서는 다수 캐비티를 가지는 사출금형에서 발생하는 충

전불균형 현상에 대해 그 원인을 구체적으로 규명하고, 충전불균형 현상에 영향을 미치는 성형조건을 분석한 후 이를 최소화할 수 있는 성형조건의 도출과 같은 소프트웨어적 해결방안과 금형구조를 개선하여 충전불균형을 해소할 수 있는 하드웨어적 해결방안을 제시하고자 한다. Fig. 1-1은 실제 다수 캐비티의 사출금형에서 발생하는 각 캐비티간의 충전불균형 현상을 나타낸 사진이다.

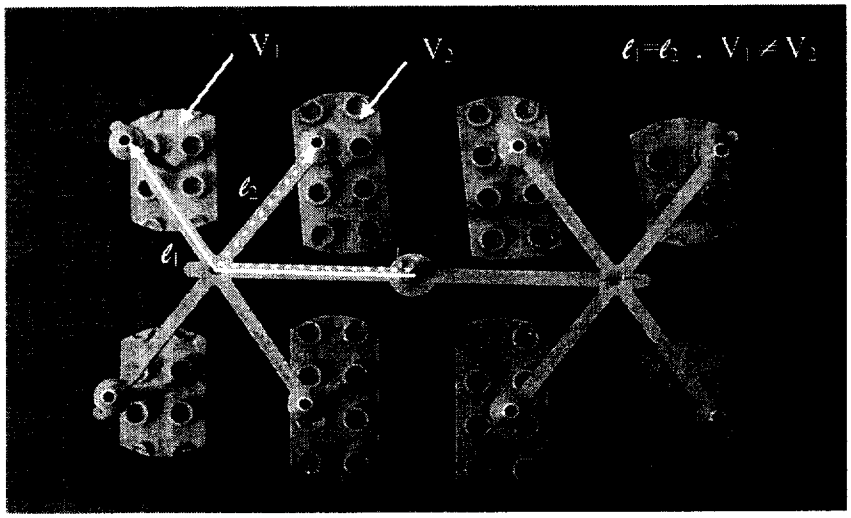


Fig. 1-1 Filling imbalanced molding in multi-cavity injection mold

1.2 최근 연구 동향

다수 캐비티 사출금형의 충전불균형에 관련된 연구는 1997년 Beaumont[3]에 의해 발표된 것을 시작으로, 다수의 연구 결과가 발표되고 있다. 기존의 연구 결과를 분류하면 충전불균형 현상의 이론적 해석과 기초 실험에 관한 연구와 충전불균형 현상의 해소를 위한 러너의 형상 개선과 관련된 연구의 2가지로 분류할 수 있다.

충전불균형 현상의 이론적 해석과 기초 실험에 관한 연구는 Kumar와 Grald[5] 등이 충전공정을 수치 해석적인 방법과 3D 시뮬레이션을 통해 충전불균형 현상을 실제 실험결과와 비교하였으며, Csaldi와 Michel[6]는 사출공정조건 중 전단율에 가장 큰 영향을 미치는 유동속도와 충전불균형의 관계를 분석하여, 유동속도가 클수록 충전불균형도는 감소한다고 발표하였다. 또 White[7]는 콜드 러너에서 발생하는 충전불균형 현상이 핫러너에서도 발생한다는 연구결과를 발표하였으며, Allen과 Lacey[8]는 러너에서 발생하는 충전불균형 현상의 원인인 불균일한 전단 분포는 스프루에서 부터 발생한다는 사실을 2 캐비티 플라스틱 기어 성형품을 예로 들어 연구하였다. 또한 Reifschneider[9]은 캐비티 충전량에 따른 충전불균형에 대해 분석하여, 충전량이 97%일 때 충전불균형이 최소값을 나타냄을 밝혔으며, Auell과 Baily[10]는 TPE(thermoplastic elastomer)의 충전불균형 거동에 관한 연구 결과를 발표하였다.

충전불균형 현상의 해소를 위한 러너의 형상 및 개선에 관련된 주요 연구결과로서는 Young과 Beaumont[3]가 발표한 논문에서 일반

적인 "H"러너에서 1차 러너를 2단으로 분리하여 기존의 러너에서 발생하던 66%~72%의 충전불균형을 46.6%~48.8%로 줄일 수 있었음을 발표하였고, Hoffman과 Beaumont[11] 등은 1차 러너 내부에서 발생하는 불균일한 전단율 분포를 Fig. 1-2와 같은 Melt Flipper™ [12,13]라는 장치를 사용하여 수지의 유동을 회전시켜 2차 러너에서는 균일하게 전단율을 분포시킴으로써 충전불균형을 8배이상 향상시킬 수 있었으며, Boell과 Beaumont[14]는 핫러너 매니폴더에 Melt flipper™를 설치하여 2차 러너 내부의 전단율 변화를 관찰한 결과 콜드러너와 같은 효과를 얻어 충전불균형 현상이 감소한다는 사실을 발표하였다.

Beaumont는 최근에 스프루에서 1차 러너에 연결되는 부분에서 수지 유동의 회전을 위하여 Fig. 1-3과 같은 Melt Flipper Max™ [15]라는 새로운 금형구조를 발표하였다.

한편, 국내에서의 연구결과로는 부경대학교 정밀성형실험실에서 위에서 기술한 기존의 연구내용을 비교확인하기 위한 연구결과[16-19]가 다수 있을 뿐 다른 연구결과는 찾을 수 없었다.

이상에서 기술한 다수 캐비티 금형에서의 충전불균형에 관한 연구결과를 정리하면 Table 1-1과 같다.

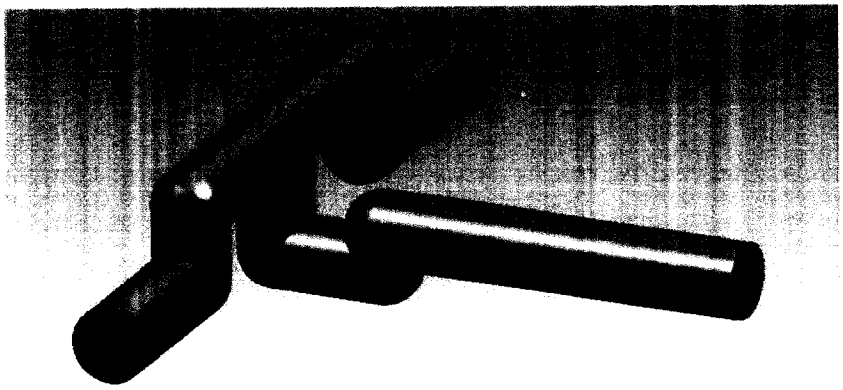


Fig. 1-2 Melt Flipper^{TM} technology

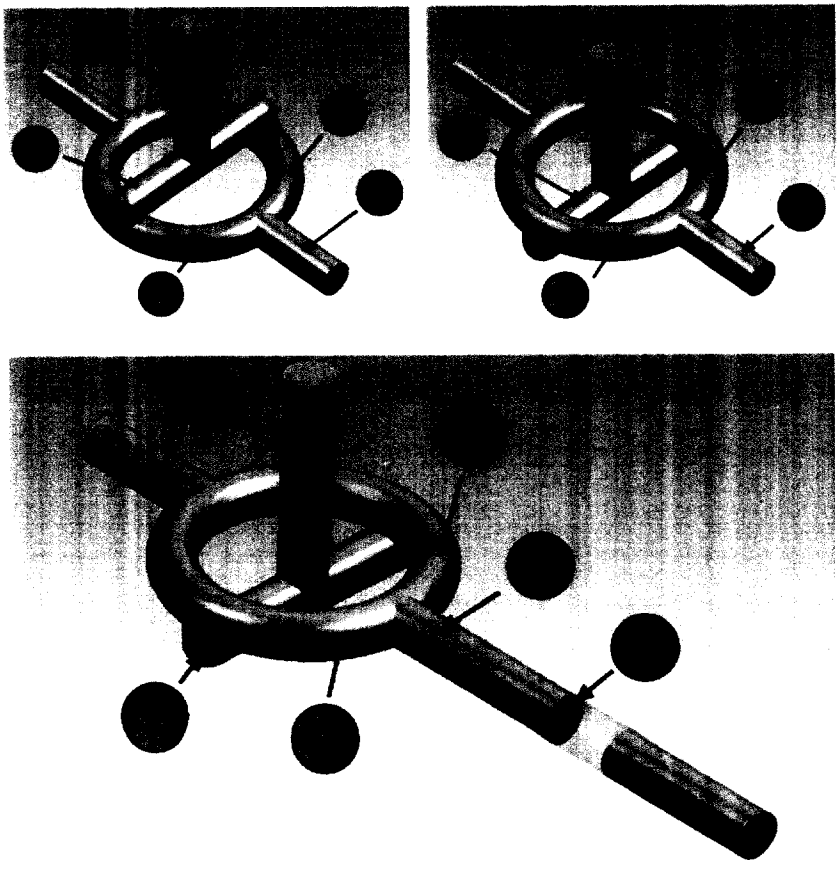


Fig. 1-3 Melt Flipper MAX^{TM} technology

Table 1-1 Summary of researches on filling imbalance

Classification	Title of Papers	Authors	No. of Reference
Theoritical Analysis & Experimental Study	Experimental and Numerial Analysis of the Flow Imbalance in a Runner System	Kumar, Egelja	5
	Examination of Method for Diagnosing Mold Filling Imbalances in New Multi-Cavity Molds	Cypher, Neely	20
	Development of Filling Imbalances in Hot Runner Molds	White	7
	Documenting Flow Segregation in Geometrically Balanced Runners	Reifschneider	9
	Process Window as Effected by Shear Induced Flow Imbalance in Multicavity Molds	Casaldi, Michel	6
	The Affects of Shear Induced Imbalance on the Concentricity of Injection Molded Gears	Allen, Lacey	8
New Runner Shape or New Mold Structure for Balanced Filling	Revolutionizing Runner Design Hot & Cold Runner Molds	Beaumont	21
	Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems	Beaumont, Young, Jaworski	3
	Artificially Balancing Geometrically Balanced Runner Systems	Boell, Beaumont, Young	14
	Filling Imbalnce in 3plate Type Injection Molds with Multi-Cavity	Deok Keun Je, Yeong Deug Jeong	18

1.3 연구목적 및 내용

1.3.1 연구목적

사출성형에 있어서 생산성과 성형품의 품질을 극대화하기 위해서는 다수 캐비티의 금형에서 각 캐비티에서 성형되는 성형품들은 균등하여야 하며 이를 달성하기 위해서는 각 캐비티의 금형치수도 동일하며 충전조건이나 냉각조건도 또한 동일해야 한다.

특히, 균형충전을 위하여 지금도 채용되고 있는 기하학적 균형 러너 시스템이 실제로는 러너내에서의 전단분포의 불균형과 그로 인한 점도의 불균형으로 불균형충전이 된다는 것이 1997년 Beaumont[3]에 의해 밝혀졌다.

산업현장에서는 지금도 다수 캐비티 금형에 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 시스템을 적용하고 있으며, 각 캐비티 간에 균형충전을 위하여 시행착오법(try and error)의 방법으로 러너의 크기나 게이트 크기를 변경시켜 균형충전을 도모하고 있지만, 이 또한 각 캐비티에 작용하는 성형압력이나 수지의 밀도가 달라져 성형품의 품질에 영향을 주므로 완전한 해결책은 되지 못한다. 극단적인 경우, Fig. 1-4와 같이 불균형충전으로 인하여 성형품의 품질이 요구 수준에 미치지 못할 경우 캐비티 수의 절반을 폐쇄하여 성형하고 있는 경우도 있어 생산성과 품질의 양면에서 불균형충전은 중대한 문제가 아닐 수 없다.

이에 본 연구에서는 기하학적 균형 러너 시스템을 가진 다수 캐비티 금형에서 발생하는 충전불균형 현상의 원인을 이론적으로 규명하고 그에 영향을 미치는 성형조건 인자를 분석하여 충전불균형

을 최소화하는 성형조건을 도출하고자 한다.

또한, 전단분포의 불균형과 그로 인한 점도의 불균형을 해소하여 충전불균형을 근원적으로 해결하기 위한 방안으로 1차 러너의 분기점에 코어핀을 채용하는 RC pin (runner core pin) 구조를 갖는 금형을 제안하고 그 효과를 검증하고자 한다.

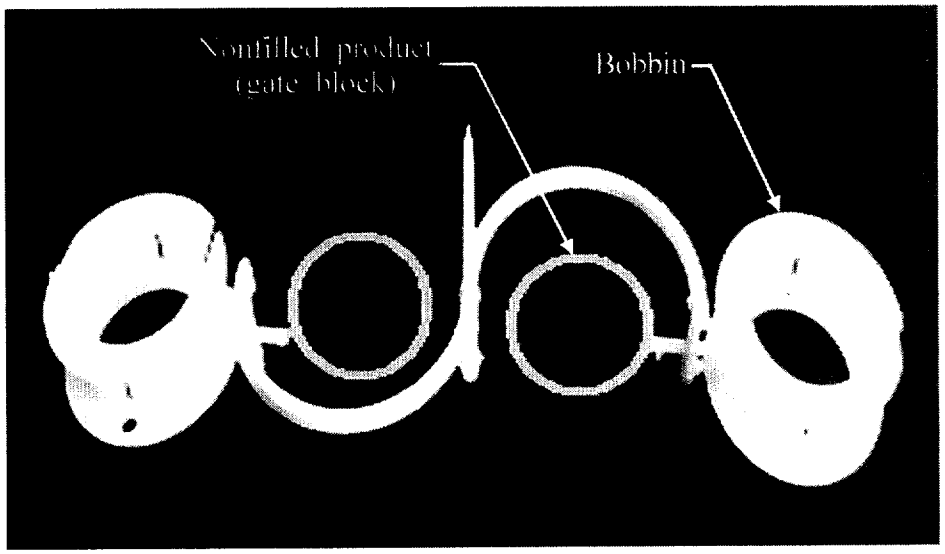


Fig. 1-4 Filling imbalances in 4 cavity mold

1.3.2 연구내용

본 연구에서 수행한 연구내용으로는 첫째, 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 배열을 가진 사출금형에서 일으나는 충전불균형 현상에 대한 기존의 연구결과를 문헌 연구를 통하여 정리하고, 이를 기반으로 하여 본 연구에서 별도로 연구한 편측분기형 러너배열에서 일으나는 충전불균형을 이론적으로 설명할 수 있는 충전 모델을 제시하였다.

두 번째로는 PP, PA, ABS, PC 등의 각종 수지를 대상으로 하여 러너 형식으로는 편측분기형과 양측분기형의 러너 배열에 대하여 사출속도, 사출압력, 금형온도, 수지온도 등의 성형조건에 따른 충전불균형도에 대하여 실험하고 그 결과에 대해 고찰하였다.

세 번째로 각 성형인자가 충전불균형도에 미치는 영향의 정도를 찾아내기 위하여 다구찌의 실험계획법을 이용하여 실험하고 그 결과를 정리하였다.

마지막으로 위와 같은 이론적 배경과 실험내용들을 기초로 하여 기하학적으로 균형을 갖는 4캐비티 이상의 금형에 적용할 수 있는 균형충전용의 새로운 사출금형 구조를 제안하고, 이것의 유효성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제시한 러너 코어핀을 활용한 새로운 금형구조는 실제 성형 작업시 금형의 외측에서 미세 조정이 가능한 구조로 개발되었으므로 그 실용성이 우수하다고 할 수 있다.

1.4 논문 구성

본 논문은 5개의 장으로 구성되었으며, 다수 캐비티 금형에서 발생하는 충전불균형 현상을 여러 가지의 수지재료를 대상으로 각 성형조건이 충전불균형도에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 또한, 그 결과를 참조하여 충전불균형 현상을 해소할 수 있는 새로운 금형 구조를 개발하여 그 실용성을 검증하기 위한 실험내용 및 결과를 주내용으로 다루었다. 다음은 각 장에서 기술한 내용들이다.

제 1장에서는 다수 캐비티 금형에서의 충전불균형 현상에 대한 연구의 배경과 Beaumont에 의한 1997년에 최초로 시작된 연구로부터 최근까지의 연구동향에 대해서 기술한 후 본 연구의 목적 및 내용에 대해서 설명하였다.

제 2장에서는 사출성형공정과 다수 캐비티 금형의 특성에 대해 기술하고 플라스틱 수지의 유동특성을 설명하였다. 이로 인한 충전불균형의 원인을 규명하고 균형충전도에 대하여 정의하였다. 또한 CAE상에서의 유동해석을 통하여 상용되고 있는 성형해석 CAE 프로그램으로는 충전불균형 현상을 시뮬레이션 할 수 없다는 문제점을 제시하였다.

제 3장에서는 여러 성형조건하에서의 수행한 균형충전 실험들을 기술하였으며, 성형조건에 따라 PP, LDPE, ABS, PA6, PMMA, PC의 범용수지에 의한 균형충전 실험과 러너형태에 따른 ABS, GPPS, PP, LDPE 수지의 스푼(spoon)형 4cavity 2매 구성 금형에서의 균형충전 실험내용을 기술하였다. 또한 유리섬유보강제 첨가에 따른 균

형충전 실험을 PA6 GF15, PA6 GF25, PA6 GF33 수지를 사용하여 수행한 내용과 핫러너 금형에서의 ABS, PMMA, PA6 수지의 균형충전 실험을 수행한 내용을 기술하였으며, 실험계획법에 따른 균형충전의 영향인자를 다구찌 기법을 통하여 분석하였다.

제 4장에서는 위 실험에 의하여 나타난 충전불균형을 해소할 수 있는 균형충전용 금형을 3매구성금형에서의 균형충전 구조와 러너 코어핀을 이용한 새로운 구조의 균형충전용 금형을 개발하여 PP, ABS, PMMA 수지를 사용하여 개발된 금형의 실용성에 대하여 검증하였다.

제 5장에서는 본 연구에서 얻어진 연구 결과들을 전체적으로 요약 고찰하여 결론으로 기술하였다.

2. 다수 캐비티 사출금형에서의 충전불균형

2.1 사출성형공정

열가소성 수지의 사출성형은 플라스틱 수지를 유용한 제품으로 변환시키는 가장 보편적인 공정이다. 사출성형은 Fig. 2-1과 같이 수지의 충전, 보압, 냉각, 형개, 이젝팅, 형폐의 공정으로 이루어진다.

Fig. 2-2는 각 사출성형공정 중에 일으나는 사출유닛에서의 스크류의 위치와 금형내의 충전상태를 공정별로 나타낸 것이다.

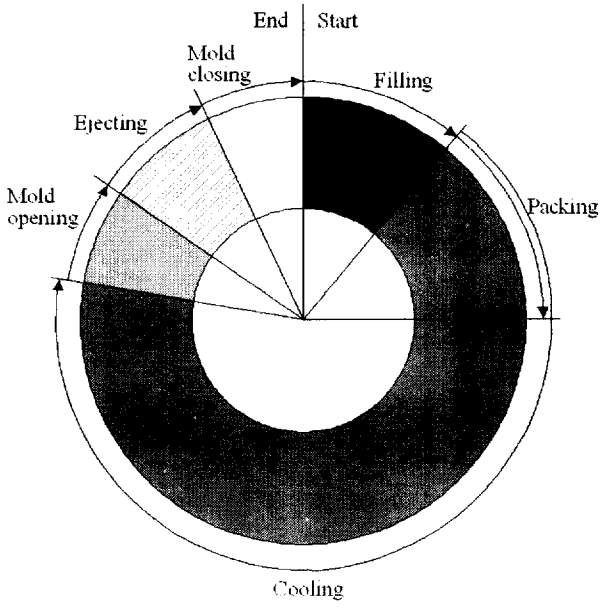


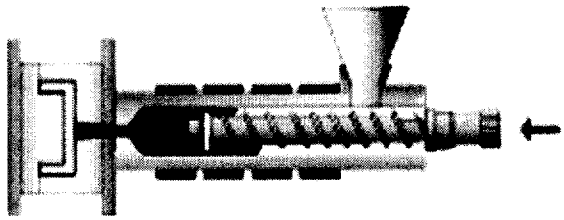
Fig. 2-1 Injection molding cycle

가소화공정은 2㎜~3㎜ 크기의 펠릿(pellet)으로 공급되는 수지 컴파운드를 사출성형기의 호퍼에 투입되는 것으로 시작된다. 컴파운드의 수분제거와 청결을 유지하기 위해 여러 가지의 예비조치가 필요하다. 이송 호퍼의 통로를 거쳐 온 펠릿을 스크류가 작동하여 전기에 의해 가열된 성형기의 배럴 속으로 밀어 넣는다.

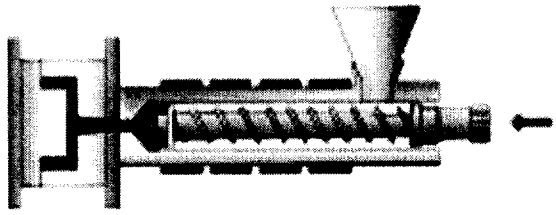
펠릿과 배럴 사이에 일어나는 접촉 마찰에 의해 플라스틱에 열이 전해진다. 또한 스크류의 홈과 배럴 사이에 펠릿을 꽉 차게 밀어 넣는 스크류의 기계력에 의해 더 많은 열이 수지에 가해진다. 필요한 열의 70% 까지는 스크류 홈사이에 억지로 꽉 차게 밀어 넣는 소위 크라싱(crushing) 도중에 생기는 전단가열에 의해 제공된다. 플라스틱 재료의 온도가 액체로 되는 전이온도(transition temperature) 이상으로 높게 되면 충전공정을 시작할 수 있는 준비가 완료된다.

스크류의 회전이 중지되고 유압 또는 전동력으로 스크류의 선단에 있는 용융된 플라스틱을 밀게 된다. 스크류 선단에 있는 논리턴 밸브(non-return valve)는 스크류를 따라 역류가 생기지 못하게 한다. 용융 플라스틱은 노즐을 통해 스프루 및 러너시스템으로 유동한 후 게이트를 통해 캐비티로 충전된다.

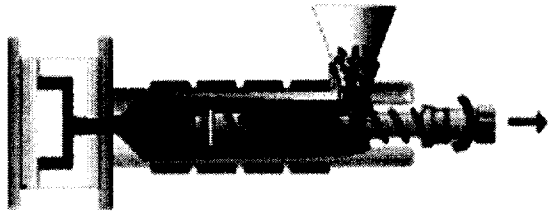
플라스틱 재표는 금형의 차가운 표면에 닿자마자 냉각되기 시작한다. 만약 금형 벽면의 온도가 플라스틱이 유동하는 양쪽면에서 동일하다면 차가운 대칭의 용융수지의 유동 레이어(layer)는 유동 경로에 따라 금형면에 정체되게 된다. 이렇게 됨으로서 유동경로는 좁아져서 유동저항이 증가되며 플라스틱 유동의 중심부 사이에 비선형의 급격한 온도구배가 존재하게 된다.



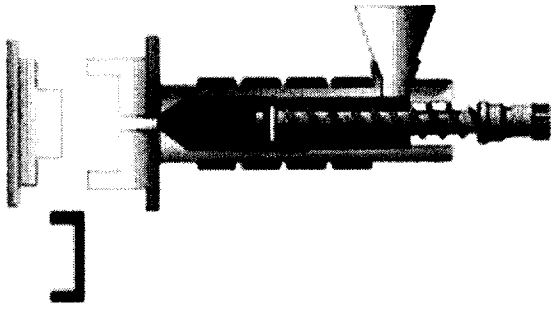
(a) Filling process



(b) Packing process



(c) Cooling process



(d) Ejecting process

Fig. 2-2 Process of injection molding

유동을 보장하기 위해서는 스크류 선단과 유동선단 사이에 압력 구배가 유지되어야 한다. 캐비티에 충전되었을 때에도 게이트 근처에는 가장 높은 압력을 가지며 성형품내에는 압력구배가 여전히 남게 된다. 또한, 이때 수지 점도는 높아지며 유동경로도 좁아지게 되므로 수지 내의 압력은 불균등하게 분포되어진다. 즉, 캐비티 내의 가장 높은 압력은 게이트 근처에 있으며, 가장 낮은 압력은 캐비티 내에서 가장 늦게 충전되어지는 유동선단에 있게 된다. 유동 플라스틱과 금형 벽면의 응고층 사이에 전단이 커져서 유동 방향으로 폴리머 분자를 잡아당기게 되어 유동방향으로 분자배향(molecular orientation) 및 섬유배향(fiber orientation)을 생성시킨다.

캐비티에 충전이 완료되면 빠른 냉각이 시작된다. 사출이 중지되면 고온의 재료가 충전되어 있는 캐비티에는 추가적인 열의 부가는 없으며, 강재 대류와 두께별 온도구배는 제로(zero)로 된다. 플라스틱 유동 중에 생긴 분자 및 섬유배향은 응고되며, 부품의 두께 방향과 흐름방향에 따라 각기 다른 상태로 배향이 남게 된다.

플라스틱은 용융온도에서 고상으로 냉각되면서 수축한다. 수축에 관련된 압력, 온도 및 비체적과의 관계는 각 수지재료별 pvT선도에 따라 지배된다. 일반적으로 pvT선도에 따르면 온도가 낮아질 때 압력이 높으면 수축은 적게 일어나고, 압력이 낮으면 수축은 더 많이 일어난다. 캐비티 내의 플라스틱의 총 체적은 냉각이 진행됨에 따라 감소된다. 캐비티 내에 체적이 줄어드는 것을 보상하기 위해 추가로 플라스틱을 강제로 캐비티 내로 밀어 넣어야한다. 이와 같은 유동은 유동경로가 유체상태를 지속하는 한 계속된다. 낮은 압력구

배와 낮은 유량을 갖는 유동은 점도를 낮추는 전단감소(shear thinning)의 이점을 제공하지 못한다. 유동경로 상에 있는 수지가 수지의 유동온도 이하로 되면 보상 유동은 정지되며 보압 스위치도 꺼지게 된다.

사출성형의 사이클 타임은 성형품을 냉각시켜 취출온도까지 도달하는데 필요한 냉각시간과 플라스틱 재료를 용융온도로 가열하는데 필요한 가소화 시간에 의해 주로 정해진다. 냉매를 통과시키는 냉각채널(cooling channel)을 금형 내에 가공하게 되는데, 이것은 캐비티 벽면을 일정한 온도로 유지시킬 수 있도록 캐비티 블록에 가능한 인접되게 설치한다. 성형제품이 취출온도까지 냉각되면 성형기는 금형을 열게 하여 제품을 캐비티로부터 취출시킨다.[22)]

2.2 다수 캐비티 금형

다수 캐비티 금형에서 각 캐비티에 동시충전을 가능하게 하면 주어진 규격 내에 합격되는 제품을 생산할 수 있는 가능성이 커지며, 사출성형시 성형조건 제한에 대한 영향을 적게 받을 수 있다. 그러므로, 다수캐비티 금형에서 각 캐비티에 동시충전이 가능하면 한번의 성형사이클 동안 양품을 많이 생산할 수 있으므로 이익을 극대화할 수 있다.

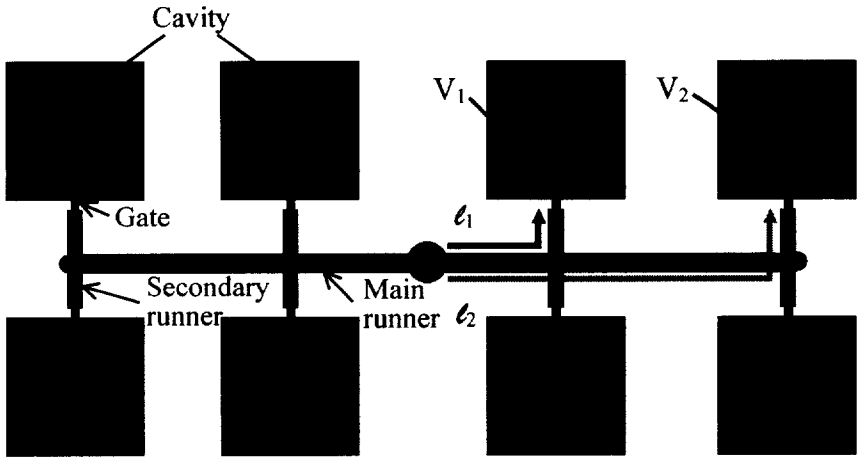
다수 캐비티 금형을 사용하는 이유는 한번의 성형으로 동일한 제품을 여러 개 생산하기 위해서이다. 그러나 금형의 치수와 냉각속도를 동일하게 하는 것은 그렇게 쉽지 않다. 다수 캐비티 금형에서 동일한 제품을 얻기 위해서는 각 캐비티로 유입되는 수지의 상태를 동일하게 하여야 한다. 그러나 일반적으로 사용되고 있는 대칭배열의 러너구조를 이용하더라도 각 캐비티에서의 수지의 유동상태, 온도, 물성 밸런스 등에는 많은 차이가 발생하게 된다.

Fig. 2-3과 같이 기하학적으로 균형을 갖추지 않은 러너배열을 사용하면 러너의 중량이 줄어들어 수지의 사용량은 적어지지만 유동불균형 정도는 더욱 커지게 된다. 이러한 러너배열을 이용할 때에는 약간의 장점이 있지만 정밀 사출성형에서는 사용해서는 안 된다. 수지가 위와 같은 러너시스템을 통해서 흘러가게 될 때, 길이 방향을 따라가면서 순차적으로 각 캐비티에 도달하게 된다. 만약 게이트가 비제한 형태이며 성형품의 두께가 두꺼운 금형에서 상대적으로 빠른 속도로 사출한다면, 스프루에서 가장 가까운 캐비티를

충전한 후 러너를 따라가면서 나머지 캐비티를 순차적으로 충전하게 된다.

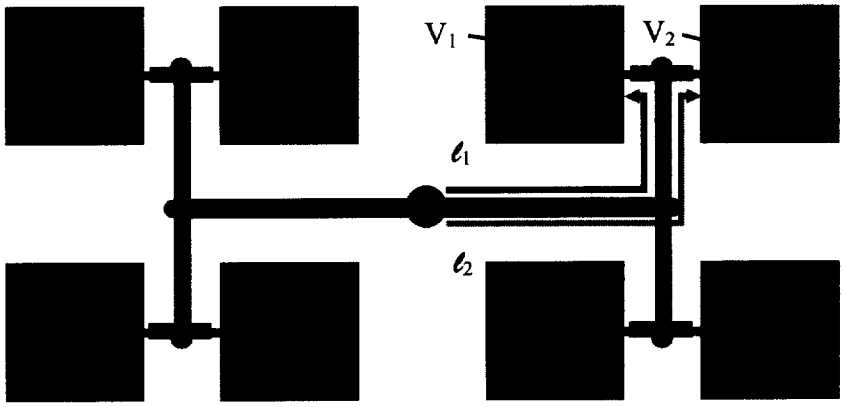
Fig. 2-3과 같이 8개의 캐비티를 가진 금형에서 러너배열은 생선뼈(fish bone) 형태로 되어있다. 이 때, 스프루에 가까운 캐비티를 '첫번째 유동에 의한 캐비티' 라고, 나머지 캐비티를 '두번째 유동에 의한 캐비티' 라고 정의하면 스프루에 가장 가까운 캐비티, 즉 '첫번째 유동에 의한 캐비티' 가 채워지는 순간, 유동은 더 이상 8개의 캐비티로 분기되지 않기 때문에 '두번째 유동에 의한 캐비티' 로 흘러가는 유동선단의 속도는 거의 2배가 된다. 이와 같이 속도가 증가함에 따라 압력도 급격하게 증가하게 되고 '첫번째 유동에 의한 캐비티' 에서는 거의 정수압상태에 도달하게 된다. 그래서 전체 충전압력은 '첫번째 유동에 의한 캐비티' 에서의 급격한 압력상승을 유발하게 된다. '첫번째 유동에 의한 캐비티' 내에서의 압력은 매우 높게 되지만 '두번째 유동에 의한 캐비티' 가 충전 완료되기 전의 유동선단의 압력은 대기압 상태인 것에 주목할 필요가 있다.

다수 캐비티 금형구조에서 성형된 제품을 살펴보면, '두번째 유동에 의한 캐비티' 의 제품은 보다 낮은 압력 하에서 높은 전단력과 오랜 시간에 걸쳐 전단력이 변하게 되며 캐비티 내부를 흐르면서 전단율이 높아진다. '첫번째 유동에 의한 캐비티' 에서는 압력이 급격히 상승하여 정수압상태로 되어감에 따라 형체력이 증가할 것을 고려한다면 양품을 생산할 수 있는 성형조건의 범위는 더욱 좁아지게 된다.



$\ell_1 \neq \ell_2,\ V_1 \neq V_2$

Fig. 2-3 Geometrically imbalanced runner layout



$\ell_1 = \ell_2,\ V_1 \neq V_2$

Fig. 2-4 Geometrically balanced runner layout

위에서는 게이트가 비제한 형태이거나 성형품의 두께가 두꺼운 금형에서 상대적으로 빠른 속도로 사출한 경우를 설명하였는데, 이와 반대로 게이트나 성형품의 두께가 줄어든 경우에 낮은 사출속도로 성형을 하게 되면, '첫번째 유동에 의한 캐비티' 에서 유동정체 현상이 생겨서 유동선단의 진전이 위의 경우와 반대가 된다.

Fig. 2-4와 같이 기하학적으로 균형을 갖춘 러너배열을 갖는 금형에는 생선뼈 형태의 러너배열에서 발생한 것과 비슷한 현상이 발생한다. 그러므로 4개 이상의 캐비티를 갖는 금형에서 진정한 러너밸런스를 얻고자 한다면 러너분기가 없는 방사상의 유동을 하는 러너를 사용하거나 H자 형태의 기하학적 균형을 갖춘 러너배열에서 분기되는 곳에 수지를 잘 섞어주는 기술을 추천하고 있다.[23] 실용성이 떨어지기는 하지만 핫러너에서 고정된 형태의 수지 혼합장치를 사용하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 일반적으로, 러너 내를 흘러가는 수지의 불균형 정도는 러너의 직경 및 길이에 따라 달라지게 된다. 그렇지만, 요구되는 치수정밀도가 높아지고 캐비티의 수가 늘어날수록 문제의 소지는 많아지게 된다.

유동밸런스를 이루기 위해서는 게이트의 직경을 변경하거나 러너 단면을 변경하기도 하지만, 이러한 것은 또다른 문제를 야기 시킬 수 있기 때문에 좋은 해결책이 아니다. 금형에서는 조그마한 성형조건의 변화나 물성 변화에 의해서 유동밸런스를 깨뜨리게 한다. 만약, 게이트 직경을 변경하여 유동밸런스를 이루었다고 하면, 보압공정에서 게이트 직경의 차이로 인해서 게이트 고화시간이 달라지게 된다. 생선뼈 형태의 러너배열을 사용하여야 한다면, 분기 내

러너의 직경을 각각 다르게 하여 의도적으로 유동밸런스를 이룰 수 있다. 이 경우가 게이트의 직경을 변경하는 경우보다 좋지만, 성형압력이 균형을 이루도록 하기 위한 성형조건 범위가 상대적으로 좁아지게 된다. 그러므로 충전공정 동안 캐비티 간의 압력균형을 이루어졌다고 할지라도, 각 캐비티에서는 보압 조건이나 온도가 달라지게 된다. 따라서 위에서 언급한 방법들은 치수정밀도가 상대적으로 낮은 제품에 적용하여야 한다.[23)]

2.3 플라스틱 수지의 유동특성

플라스틱 재료인 수지는 러너 내에서 유동 시 층류유동(laminar flow)의 특징을 나타내며, 폴리머의 층과 층 사이의 상대유동과 유동채널의 반경에 따라 흐르는 폴리머의 유동은 다르게 나타난다. 이 변화의 비율을 전단율이라 하며, 유동채널 내에서의 수지유동에 대한 전단율 곡선은 Fig. 2-5와 같은 형상으로 나타난다. 전단율은 러너 벽면 고화층 아래에서 가장 크게 형성되며, 러너 중심으로 갈수록 전단율은 감소하여 유동채널 중심에서의 전단율은 0이 된다. 이와 같은 전단율 분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.[4)]

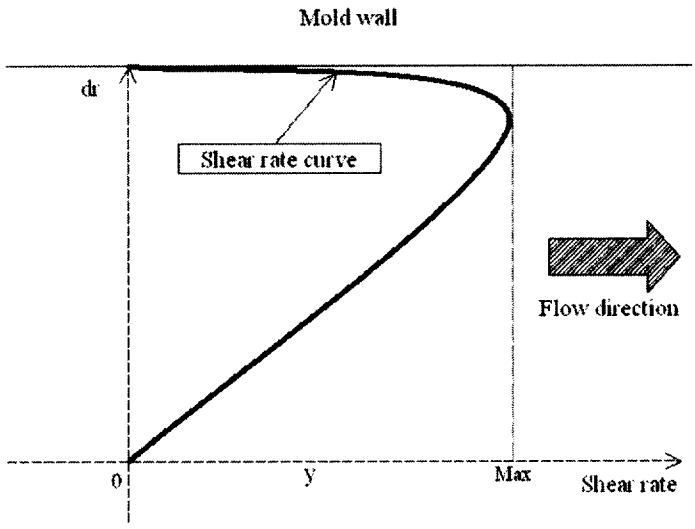


Fig. 2-5 Profile of shear rate within runner

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial}{\partial r}\left[V_0\left(1 - \left(\frac{dr}{R}\right)^{(n+1/n)}\right)\right] \quad (1)$$

여기서,

V_0 : 최고 흐름 속도 (㎝/sec)

R : 러너의 반경 (㎝)

dr : 흐름 중심으로부터의 위치 (㎝)

n : 지수법칙에 따른 지수

수지가 러너 내부를 흐를 때 형성된 전단율 분포는 유속이 빨라짐에 따라 Fig. 2-6과 같이 러너의 반경에 따라 변하게 된 정상적인 성형 조건에서는 전단율이 커지면 그 부위의 온도는 높아지게 되고, 수지의 점성은 낮아지는 소위 전단감소(shear thinning)현상을 나타내어 해당부위의 유동성을 증가시키는 요인이 된다. 사출성형 시 수지점도와 전단율 등과의 관계는 다음의 식(2)와 같은 수정 Cross 점도 모델을 사용하여 나타낼 수 있다.[16]

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \times \dot{\gamma}}{\tau}\right)^{(1-n)}} \quad (2)$$

여기서,

$\dot{\gamma}$: 전단율(shear rate) (sec^{-1})

τ : 경계역에서의 전단응력 (Pa)

n : 비뉴턴 지수

η_0 : 제로 전단율에서의 점도

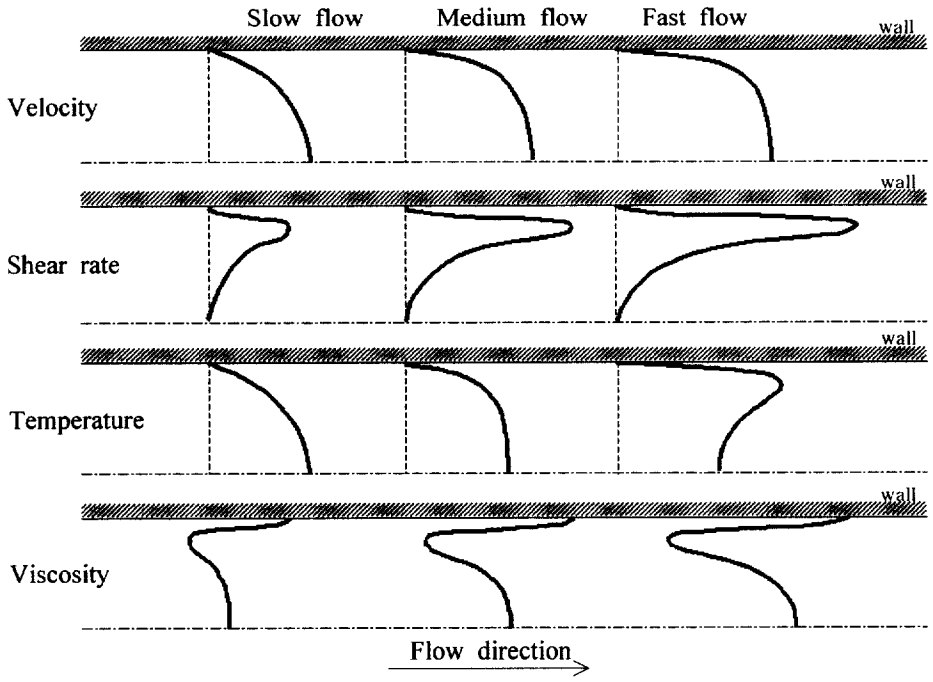


Fig. 2-6 Typical velocity, shear rate, temperature and viscosity profiles

제로 전단율에서의 점도 η_0는 온도와 압력의 함수로써 식(3) 및 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_0(T, P) = D_1 exp\left[-\frac{(A_1(T - T^*))}{(A_2 + (T - T^*))}\right] \tag{3}$$

$$A_2 = \widetilde{A_2} + D_3 P$$

$$T^* = D_2 + D_3 P$$

$$\eta_0(T) = Bexp\left(\frac{T_b}{T}\right) \tag{4}$$

여기서,

T^* : 점도가 무한대에 이르는 전이온도 (℃)

T : 성형온도 (℃)

A_1 : WLF식에서의 전위계수

A_2 : WLF식에서의 전위계수 (K)

D_1 : 제로 전단율에서의 기준 점도 (Pa·s)

D_2 : 제로 게이지압에서 유리전이온도 (K)

D_3 : 압력에 의한 T^*의 변화량 (K/Pa)

수지에 대한 온도민감도(temperature sensitivity) T_b[4]는 식(5)를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$T_b = \frac{A_1(A_2 + D_1) \cdot T^2}{[A_2 + (T - D_2)]^2} \tag{5}$$

여기서,

T_b : 온도민감도 (K)

T : 성형온도 (K)

A_1 : WLF식에서의 전위계수

A_2 : WLF식에서의 전위계수 (K)

D_1 : 제로 전단율에서의 기준 점도 (Pa·s)

D_2 : 제로 게이지압에서 유리전이온도 (K)

Fig. 2-7은 각 수지별에 따른 온도민감도의 분포를 나타낸 그림이다.[24)]

앞에서 언급한 전단율 분포에 의한 점도 및 유동성 변화는 원형 러너에서 뿐만 아니라 평판유동에서도 고려할 수 있다. Fig. 2-8는 실제의 플라스틱 평판 성형품의 미충전 상태에서 고화된 유동선단 형상에 대한 사진을 나타낸 것으로서 이 현상은 캐비티의 벽면 근처에서는 전단율이 크게 되어 수지의 전단감소와 전단마찰에 의한 유동성이 개선되어 벽면 근처가 캐비티 중앙부위보다 더 빨리 흐른 결과로 추정된다.

Fig. 2-9는 Fig. 2-8의 유동특성을 설명하는 그림이다.

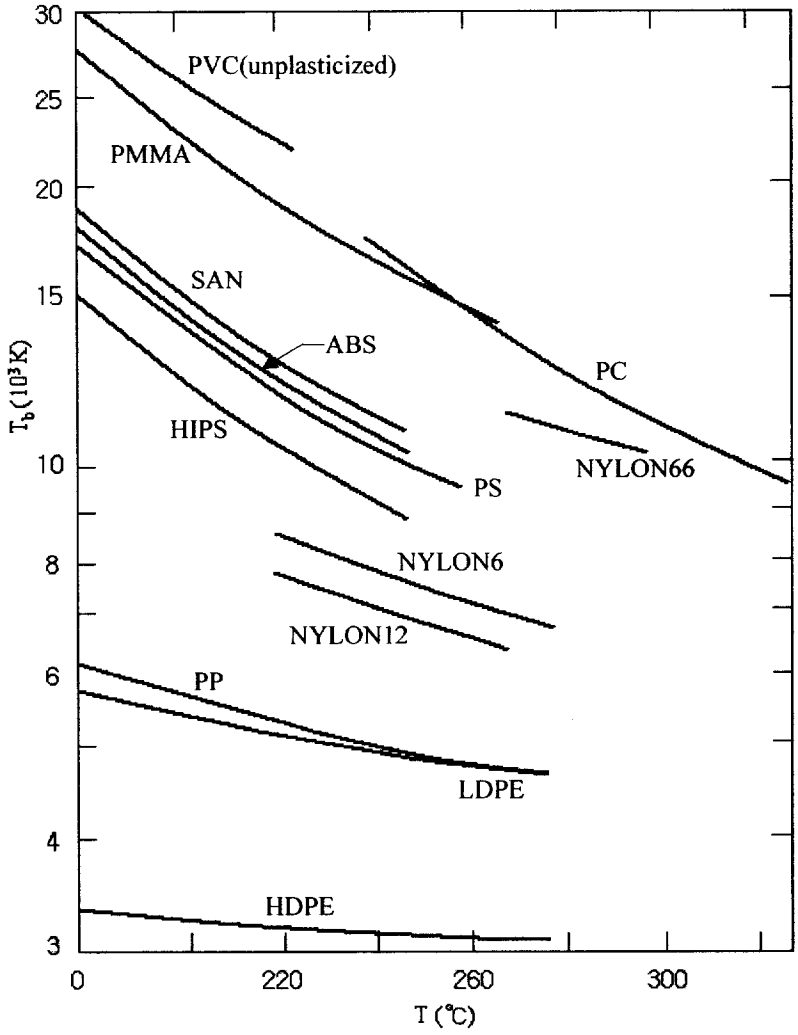


Fig. 2-7 Temperature sensitivity of various polymers

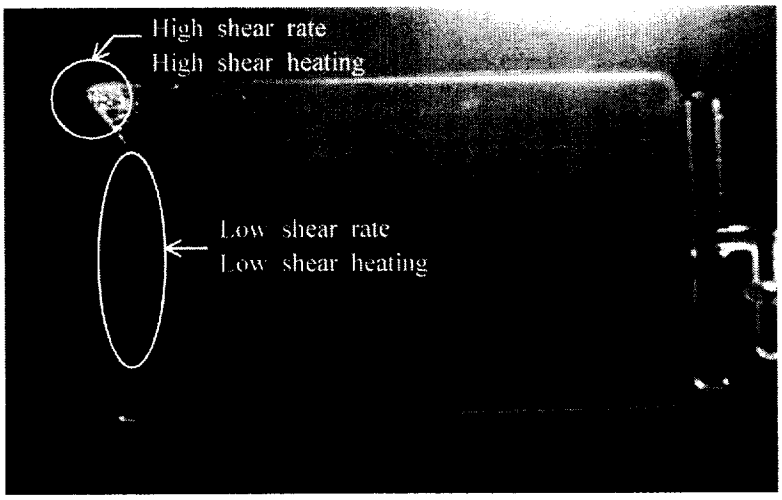


Fig. 2-8 Flow pattern of plaque type molding

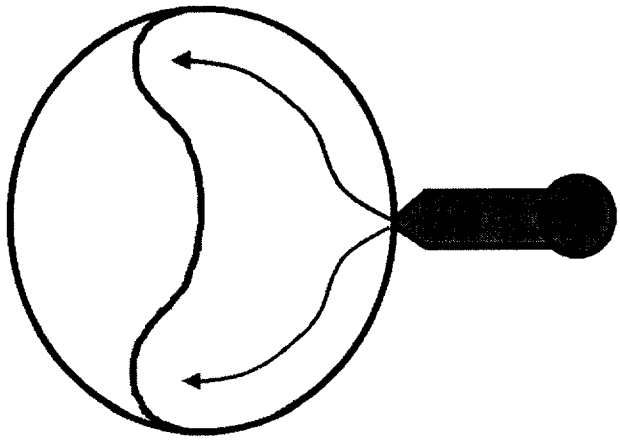


Fig. 2-9 Effect of high sheared material on filling pattern

2.4 충전불균형의 원인

앞에서 언급한 러너 내부의 전단율 분포는 1차 러너(primary runner)에서는 Fig. 2-10에서 보는 것과 같이 높은 전단영역이 러너 외경부에 형성되고 낮은 전단영역은 러너 중심부에 위치하여 대칭적으로 나타난다. 그러나 2차 러너(secondary runner)에서는 1차 러너의 높은 전단영역의 영향으로 높은 전단영역이 스프루에서 가까운 내측에 위치하고, 낮은 전단영역이 외측에 위치하여 비대칭적으로 전단영역이 분포된다. 이러한 이유로 앞에서 언급한 전단감소 현상에 의해 2차 러너의 점도분포는 스프루에 가까운 스프루측의 점도가 낮아지게 되어 유동성이 증가하게 된다.[25)]

Fig. 2-11에서 보는 것과 같은 러너에서 내측 캐비티(inner cavity)와 외측 캐비티(outer cavity)는 기하학적으로 균형을 이루는 위치에 있다. 스프루를 지나 러너를 통과하는 플라스틱 용융수지는 러너 내부 중심부와 외경부의 전단율이 불균일하게 분포되게 된다. 러너 외경부, 즉 금형벽면 고화층 아래의 수지 흐름(실선)은 러너 중심부의 수지 흐름(점선)에 비해 상대적으로 높은 전단율이 형성되므로 온도는 상승되고, 점도는 감소하게 된다. 또한 전단율이 커짐에 따라 상대적으로 전단 마찰열 또한 증가하게 되므로, 이는 외경부의 수지 흐름의 유동성을 더욱 증가시킨다. 따라서 외경부를 따라 흐르는 수지 흐름은 중심부의 흐름보다 유동성이 좋아지게 되고, 유동성이 좋은 외경부의 흐름에 지배되어 충전되어지는 스프루에서 가까운 내측 캐비티가 먼저 충전되어진다.

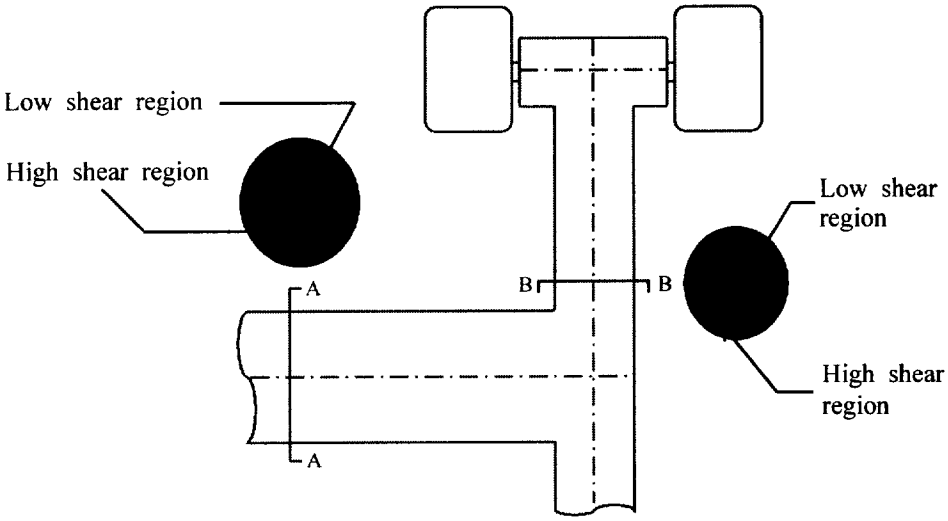


Fig. 2-10 Different shear rate between primary and secondary runner

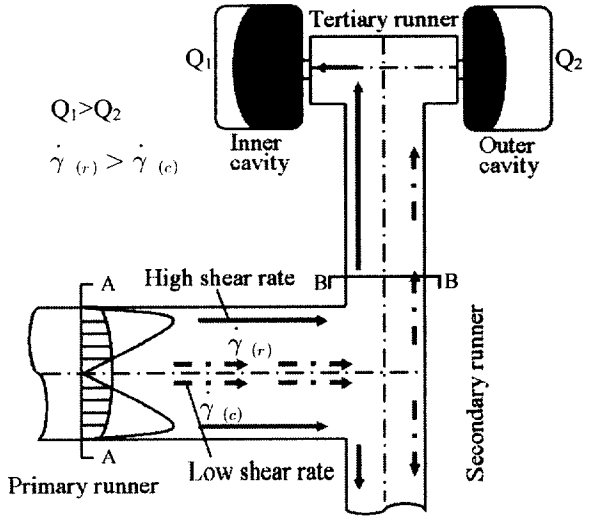


Fig. 2-11 Filling imbalance due to non-symmetrical shear rate distribution

2.5 균형충전도의 정의

Fig. 2-12에서 보는 것과 같이 충전량이 많은 내측 캐비티와 충전량이 적은 외측 캐비티 사이에서 발생하는 충전불균형 현상을 정량적으로 나타내기 위해 식(6)의 균형충전도(DFB : Degree of Filling Balance)와 식 (7)의 충전불균형도(DFI : Degree of Filling Imbalance)를 각각 정의하였다. DFB는 100%에 가까워질수록 균형충전에 가까워지게 되며, 100%가 넘는 값은 스프루에서 멀리 떨어진 외측 캐비티가 더 많이 충전되었음을 의미한다. 또한, DFI는 0에 가까운 값을 가질수록 균형충전에 가깝게 되며, -값을 가지면 스프루에서 멀리 떨어진 외측 캐비티가 더 많이 충전되었음을 의미한다.

DFB (Degree of Filling Balance)

$$= \frac{Outer\ part's\ weight}{Inner\ part's\ weight} \times 100\,(\%) \qquad (6)$$

DFI (Degree of Filling Imbalance)

$$= (1 - \frac{Outer\ part's\ weight}{Inner\ part's\ weight}) \times 100\,(\%) \qquad (7)$$

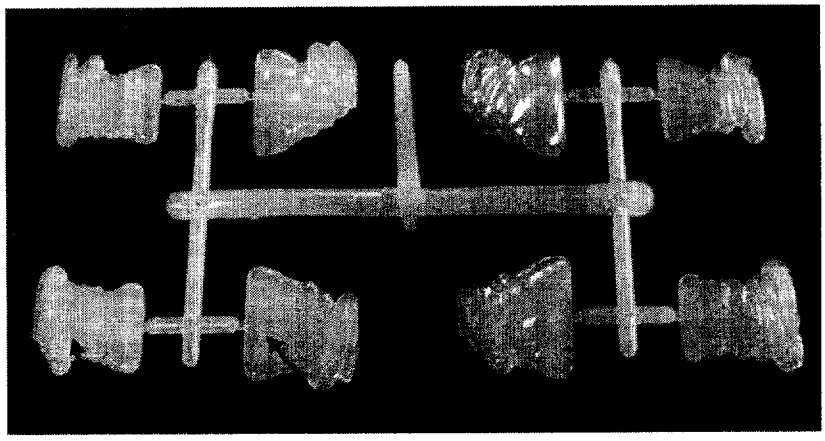


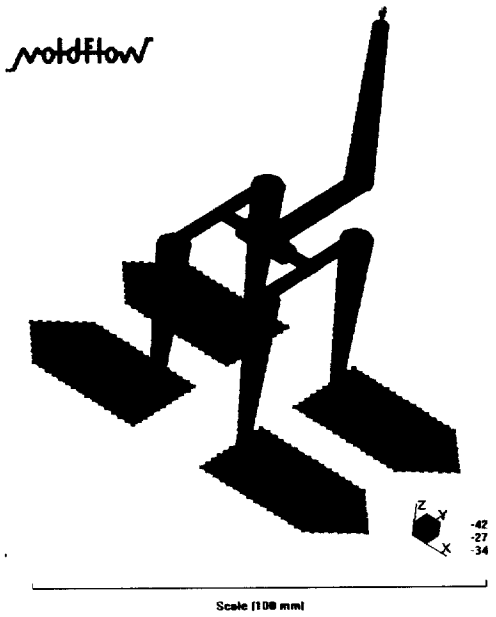
Fig. 2-12 Inner and outer part in multi-cavity runner layout

2.6 균형충전 확인을 위한 CAE 유동해석

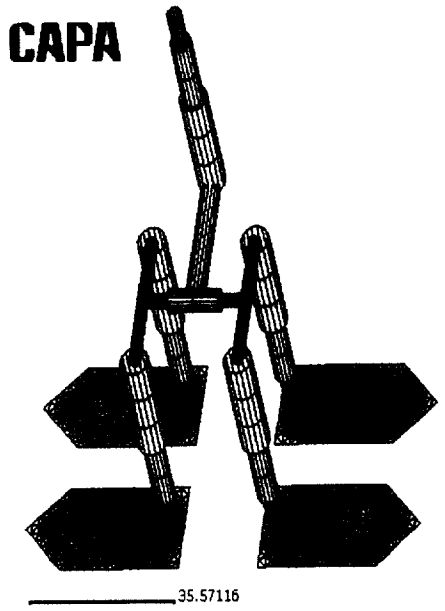
실제 사출성형공정에서 발생하는 충전불균형 현상이 사출성형해석에는 그 현상이 잘 표현되는 지를 알아보기 위해 사출성형 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 모델은 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 시스템에 의해 충전되는 8 캐비티 형상을 채택하였다. 사출성형 CAE S/W는 CAPA 7.2와 Moldflow 4.1을 사용하였으며, 해석에 사용된 메쉬(mesh)는 삼각메쉬로 CAPA에서는 2,936개였고, Moldflow™에서는 2,898개였다. 해석에 적용한 대상수지는 BASF사에서 제조한 ABS(GP22)를 사용하였으며, 사출성형기는 LG기계에서 제작한 형체력 140톤 직압식 사출기를 선정하였다. 성형공정조건은 ABS수지의 일반적인 성형조건인 금형온도 65℃, 수지온도 235℃, 사출시간 2sec, 사출압력 169kg/㎠로 설정하여 충전해석 중에 발생하는 충전불균형 현상을 관찰하였다.

Fig. 2-13는 성형해석에 사용된 모델과 메쉬모델을 나타내고 있다. Fig. 2-14 (a)와 (b)는 Moldflow™와 CAPA의 성형해석결과와 실제 성형실험에서 얻은 충전패턴을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 2-14에서 보는 것과 같이 실제 성형 시에는 충전불균형 현상이 발생하지만, 성형해석상으로는 4개의 캐비티가 동시에 충전됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 현재까지 사출성형해석 프로그램에서 사용하는 러너 멧싱(runner meshing)이 해석의 용이성을 위해 1차원 빔 엘리먼트(beam element)를 사용하는 데 있다. 1차원 빔 엘리먼트는 실제 러너 내부를 흐르는 용융 수지의 전단율에 기인한 흐름속도의

차이를 정의할 수 없다. 그 결과 사출유동 해석상에서 같은 유동거리의 러너를 가진 캐비티는 충전불균형 없이 동시에 충전되는 결과를 나타내게 된다. 현재 대부분의 상용 사출성형해석 프로그램에서 기하학적 균형을 갖춘 8캐비티 금형에서의 충전불균형현상을 나타내지 못하는 문제는 러너의 3차원 메쉬가 가능하며 전단불균형의 이론식이 프로그램에 반영된 3D 사출성형 해석프로그램의 개발을 통해 해결해야 할 과제이다.

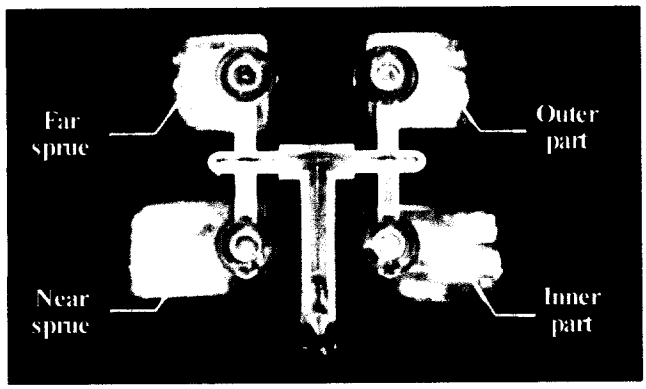


(a) Mesh by Moldflow™

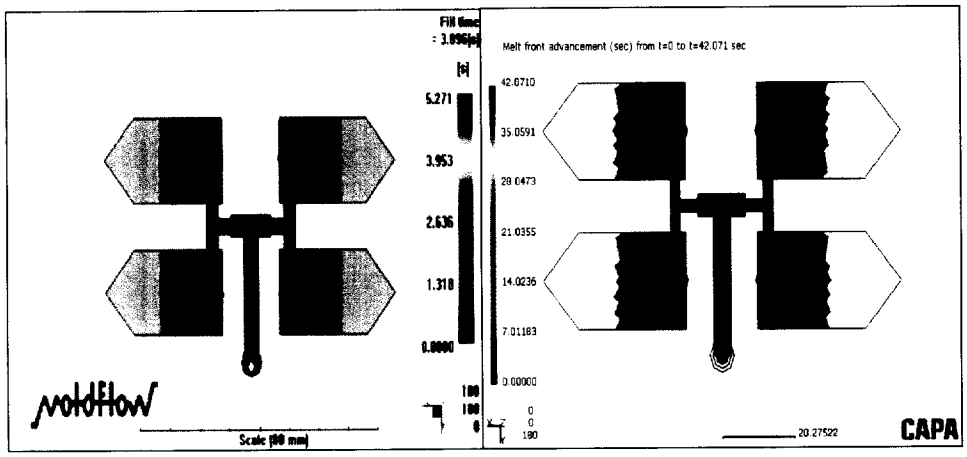


(b) Mesh by CAPA

Fig. 2-13 Mid-plane model and mesh for injection molding analysis



(a) Filling pattern molded by experiment



(b) Filling patterns in CAE injection molding analysis

Fig. 2-14 Actual filling patterns vs. CAE simulated filling patterns

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 수지와 성형조건에 따른 균형충전도 실험

3.1.1 실험재료

수지에 따른 균형충전도의 변화를 알아보기 위해 범용수지 중 결정성 수지인 PP(LG M540), LDPE(H.Y Chemical), PA6(Ultramid 8202B)와 비결정성 수지인 ABS(BASF GP22), PMMA(LG IF830), PC(GE Lexan 1330)을 실험 대상수지로 선정하였다.

3.1.2 실험장치 및 방법

실험에 사용된 사출성형기는 LG기계에서 제작된 형체력 140톤 직압식 사출기이며, 실험금형은 기하학적 균형을 갖춘 러너시스템을 설계한 8캐비티 3매 구성 금형을 사용하였다. 각 수지에 대한 성형조건은 사출압력을 성형기 최대압력의 70%로 고정한 후 수지온도와 금형온도는 각 수지의 적정조건으로 설정하였다. 또한, 사출속도를 성형기 최대속도의 30%에서 70%까지로 변화시켜 그에 따른 균형충전도를 측정하였다. Table 3-1은 실험에 사용된 수지의 성형조건을 나타내고 있으며, Fig. 3-1은 실험용 금형과 금형내의 러너배열을 나타낸 것이며, Fig. 3-2는 실험에 사용한 사출성형기를 나타낸 것이다.

Table 3-1 Injection molding conditions for experiment

Processing conditions	Unit	PP	LDPE	PA6	ABS	PMMA	PC
Injection speed	%	30, 40, 50, 60, 70					
Injection pressure	%	70					
Melt temperature	℃	190 ~210	190 ~210	220 ~240	210 ~230	210 ~230	280 ~300
Mold temperature	℃	50	50	60	60	50	70

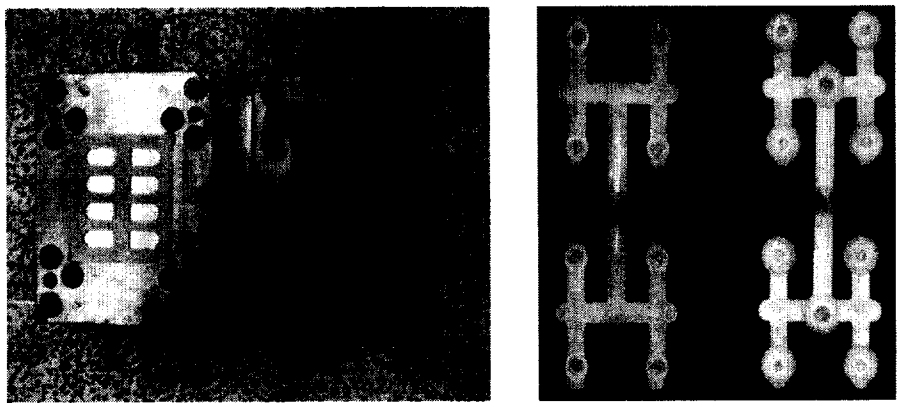


Fig. 3-1 Experimental mold and runner layout

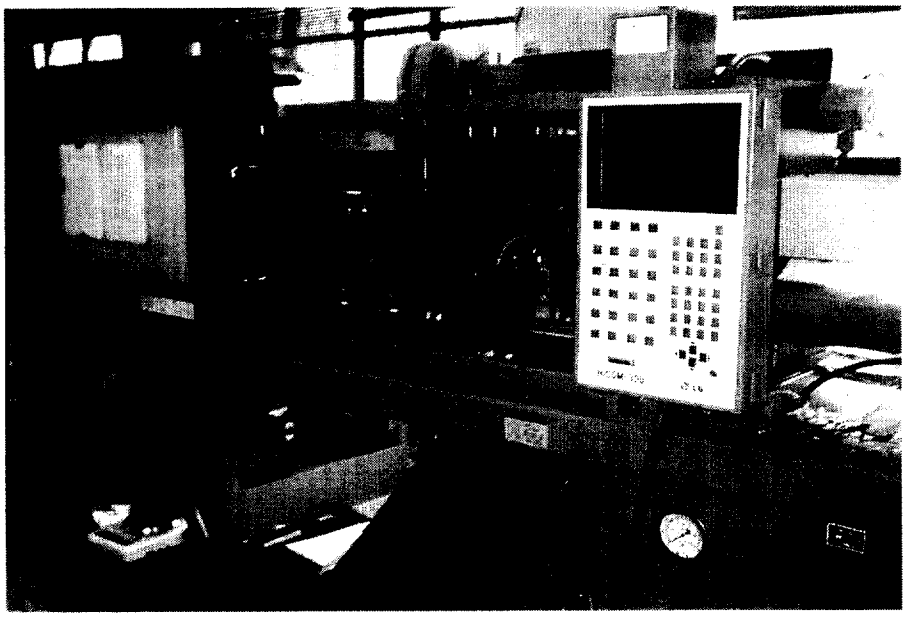


Fig. 3-2 Injection molding machine(140ton)

3.1.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 3-3은 각 수지별 균형충전도(DFB)를 나타내고 있다. DFB값은 100% 일 때가 완전한 균형충전을 나타낸다. Fig. 3-3을 살펴보면 전체적인 DFB 값은 사출속도가 증가할수록 약간씩 높아지는 경향을 나타내었으며, 일반적으로 결정성 수지(PP, PA6, LDPE)가 비결정성 수지(ABS, PMMA, PC)에 비해 균형충전도가 높음을 알 수 있다. 실험에 사용된 수지 중에서 PP가 모든 사출속도 영역에서 90% 이상의 균형충전도를 나타내어 가장 좋은 균형충전도를 나타내었으며, PP 다음으로는 PA6와 LDPE가 비교적 좋은 균형충전도를 나타내었다. 반면에 ABS는 균형충전도가 60% 내외로 가장 낮은 값을 나타냈다.

이상의 결과를 종합해보면 결정성 수지의 균형충전도는 약 80%~90%의 수준이며, 비결정성 수지의 균형충전도는 약 60%~70%의 수준을 나타내어, 균형충전도에서 약 20%의 차이를 나타내었다.

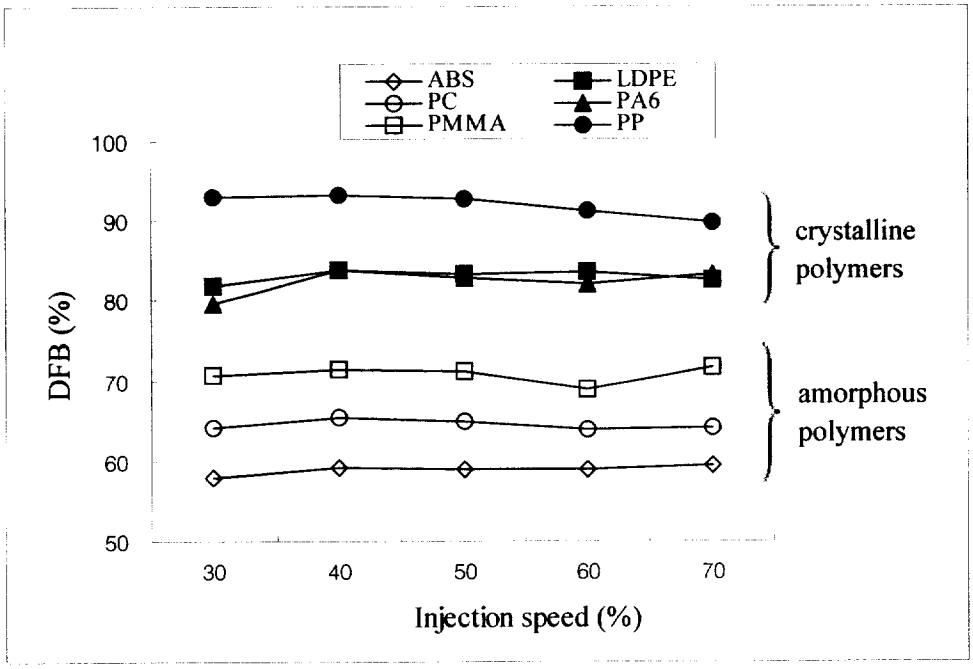


Fig. 3-3 Various polymer's DFB according to injection speed

앞에서의 각 수지별 균형충전도의 변화는 각 수지가 가지고 있는 고유의 물성치인 온도민감도(T_b)와의 관계를 통해 설명할 수 있다.[26] Fig. 3-4에서 보는 것과 각 수지의 DFB는 수지의 온도민감도 (Fig. 2-7 참조)가 클수록 DFB의 값은 반비례하여 낮아짐을 알 수 있다. 이는 온도민감도가 큰 수지일수록 유동 중에 발생하는 전단율에 기인한 온도의 변동이 점도 변화에 민감하게 작용하기 때문이

라고 생각한다. 따라서, 온도민감도가 높은 비결정성수지의 균형충전도는 온도민감도가 낮은 결정성 수지에 비해 낮아지게 된다.

Fig. 3-4는 실험에 사용된 수지의 균형충전도와 온도민감도와의 관계를 나타내고 있다. 여기서 각 수지별 균형충전도 DFB의 값과 온도민감도의 값의 사이에는 어떤 일정한 값을 갖는 관계식이 예측된다.

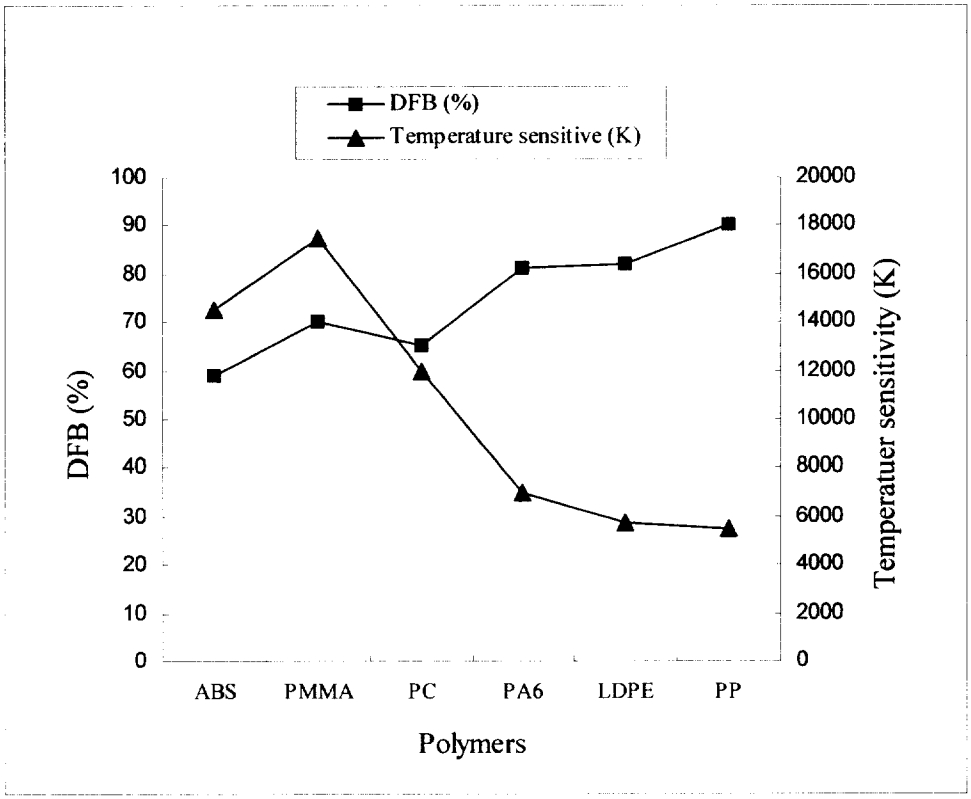


Fig. 3-4 Relation between DFB and temperature sensitivity

3.2 편측분기형 러너배열에서의 균형충전도 실험

3.2.1 편측분기형 러너배열

Fig. 3-5에서 보는 것과 같은 H형 양측분기형 러너(binary branch runner)배열을 갖는 Cavity 1과 Cavity 2는 기하학적으로 균형을 이루는 위치에 있다. 그러나 이와 같이 기학학적으로도 균형을 이루는 다수 캐비티는 실제로 불균형적으로 충전된다. 이와 같은 충전 불균형의 원인에 대해서는 2.4절에서 기술하였다.

한편, 편측분기형 러너(unary branch runner)에서의 충전 불균형 역시 양측분기형 러너와 같이 전단에 기인한 러너내의 비대칭 전단영역의 존재에 의해 설명할 수 있다. 즉, 주 러너 벽면 고화층 아래를 따라 흐르는 수지는 높은 전단율과 전단 마찰에 의해 중심부의 수지보다 더 뜨거운 상태가 된다. 그러나 양측분기와 달리 편측분기에서는 Fig. 3-6에서 보는 것과 같이 90° 방향전환이 이루어지는 콜드 슬러그 웰(cold slug well)부분에서 러너 벽면 고화층 아래의 상대적으로 고온의 수지유동과 러너 중심부의 저온 수지유동의 혼합에 의해 발생하는 중간 유동(medial flow)층을 생각할 수 있다. 이와 같은 가정에 의해 러너 내측의 아무런 간섭 없이 흐르는 유동층보다는 다소 느린 혼합된 새로운 유동이 발생하게 된다고 판단된다. 그 결과 내측 러너 벽면 근처를 흐르고 있는 고온의 유로에 접하게 되는 스프루에 가까운 내측 캐비티가 먼저 충전되어지는 것으로 설명한다. 위에서 기술한 편측분기형 러너에서의 충전불균형은 양측분기형 러너에서의 충전불균형과는 달리 수지간의 합병내지 작용에 의한 중간 유동에 의해 발생된다. 그러므로 불균일한 전단율

의 분포에 기인하여 서로간의 간섭 없이 흐르는 러너 내외측 유동층의 유동성 차이에 의해서 발생하는 양측분기형 러너에서의 충전불균형보다는 편측분기형 러너에서의 충전불균형이 다소 개선될 것이다.

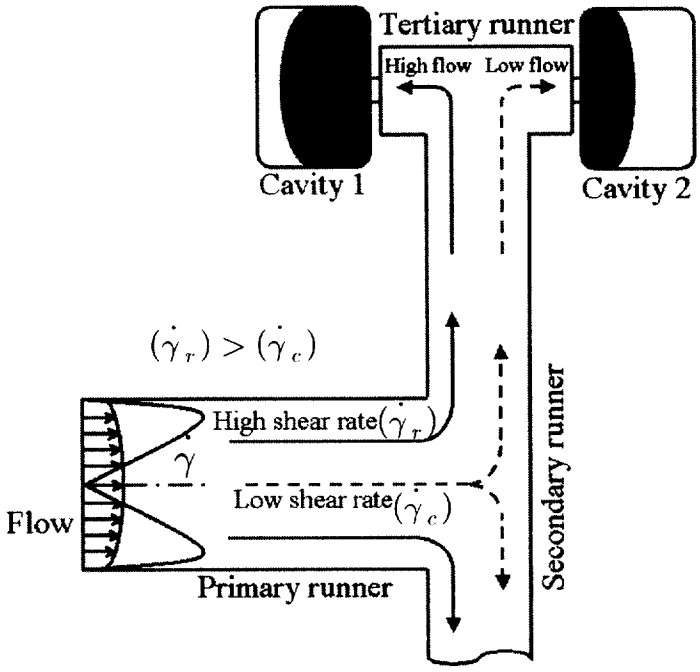


Fig. 3-5 Filling imbalance in binary branch type runner

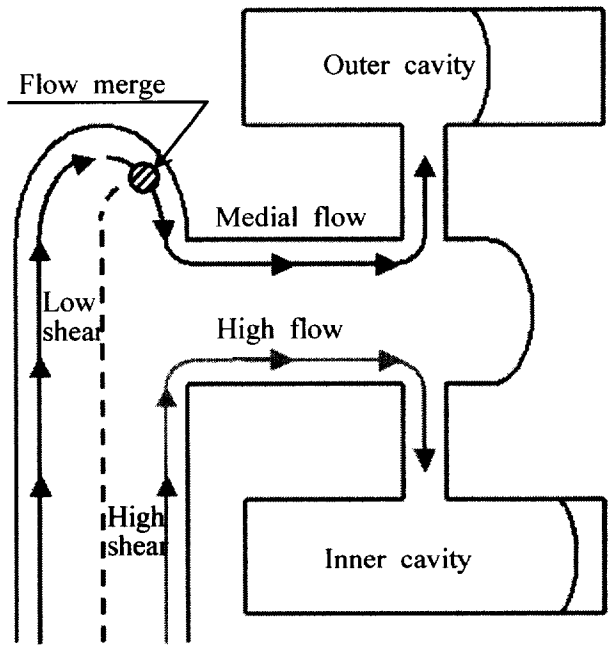


Fig. 3-6 Filling imbalance in unary branch type runner

3.2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 금형은 4개의 캐비티를 갖는 2매 구성형 금형이며, 사출성형기는 LG기계에서 제작한 75톤 유압식 수평형 사출성형기이다. 수지 재료는 온도민감도의 값에서 차이가 많이나는 비결정성 ABS, GPPS와 결정성 PP, LDPE를 대상 수지로 선정하였다. 실험 변수로는 사출속도와 러너형상을 선택하고 그 변수에 따르는 균형충전도를 측정하였다.

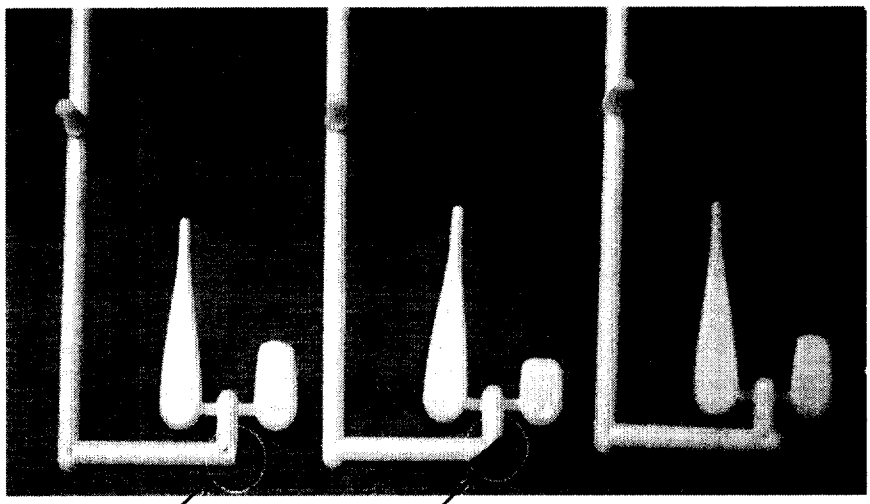


Fig. 3-7 Various runner shapes

DFB값을 구하기 위해서는 미충전(short shot)성형으로 계량하였다. 사출 속도는 사출성형기 최대 사출속도의 30%~70%사이를 5단계로 구분하여 설정하였으며, 러너의 형상은 Fig. 3-7에서와 같이 일반적인 러너 형상에서 변화를 주어 중심부와 외경부의 수지 흐름의 병합이 일어나는 부분으로 예상되는 콜드슬러그웰을 제거한 형상(none cold slug well)과 유동 단면적을 줄임으로써 러너 내부의 유동층의 흐름속도의 차를 줄이고자 하는 형상, 즉 유동단면이 좁은 형상(narrow runner)을 선택하였다.

3.2.3 실험결과 및 고찰

Fig. 3-8은 대상 수지별 사출속도에 대한 균형충전도를 나타낸 것이다. 수지의 종류와 관계없이 사출속도가 증가함에 따라 DFB값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 3-9와 같이 일반적으로 수지는 사출속도를 증가 시키면 점도는 높은 전단율에 의해 감소하는 경향을 보이다가 어느 구간부터는 전단률에 관계없이 일정한 점도값을 보이게 된다. 그러므로 불균일한 전단 분포에 기인하는 균형충전에서 사출속도를 더욱 빠르게 하는 것은 대상수지의 점도를 일정하게 하는 영역으로 유도할 수 있으므로, 결과적으로 균형충전을 증가시키는 요인이 된다고 생각된다. 각 수지별 DFB값은 ABS의 DFB값이 가장 낮게 나타났다. 이는 ABS의 온도민감도 T_b(12,406 K)값이 타 수지보다 상대적으로 큰 값을 갖기 때문으로 설명할 수 있다. 다른 수지의 DFB값 역시 온도민감도 T_b의 크기와 비례하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 3-10은 수지별 DFB값과 온도민감도의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 3-11은 러너 형태에 따른 균형충전도를 나타낸 것이다. 콜드슬러그웰을 제거한 러너형태(Fig. 3-7의 none cold slug well)와 편측 분기점의 유동 단면적을 더욱 좁게한 러너형태(Fig. 3-7의 narrow runner)를 대상으로 그에 따른 DFB값을 Fig. 3-11에 나타내었다.

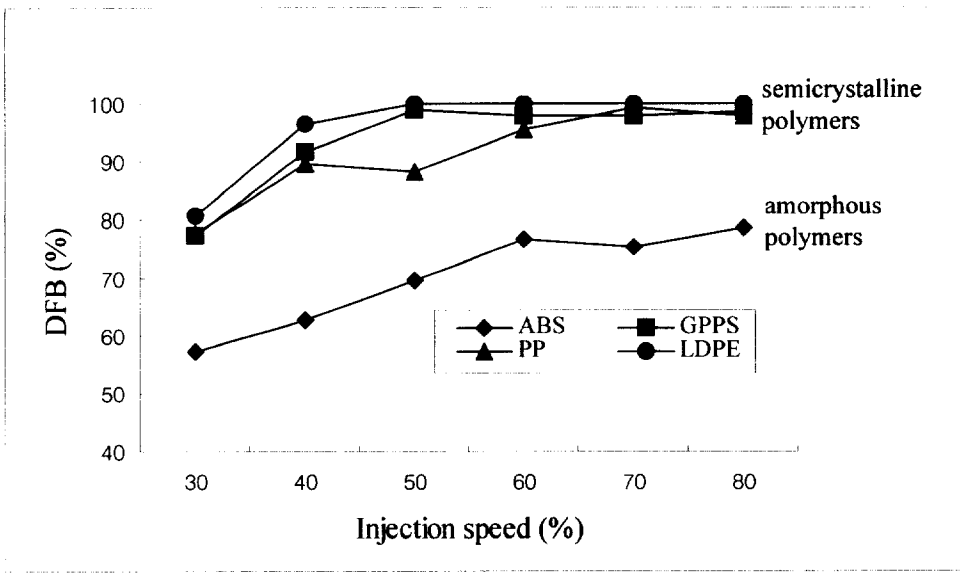


Fig. 3-8 Various polymer's DFB according to injection speed

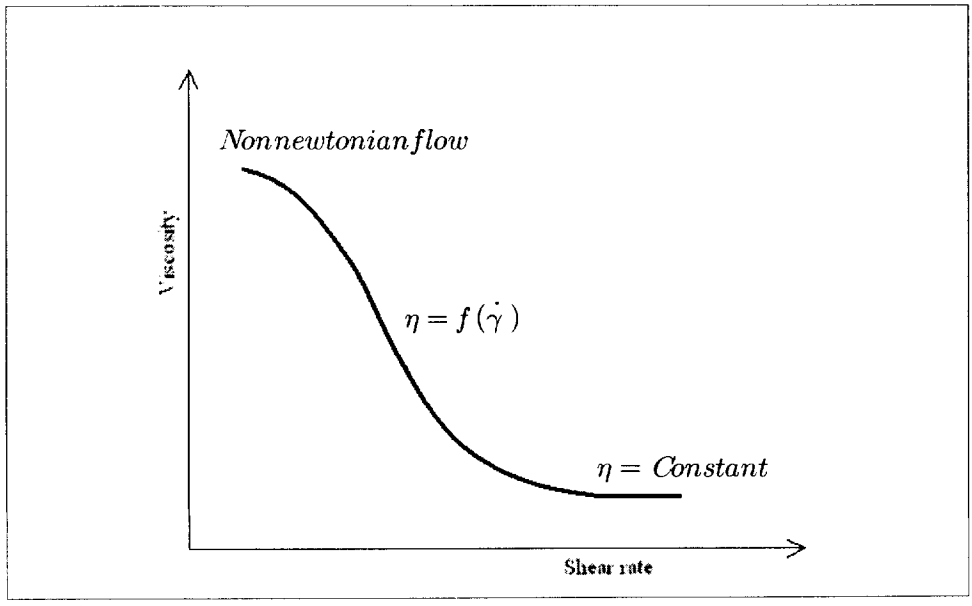


Fig. 3-9 Effect of shear rate on viscosity

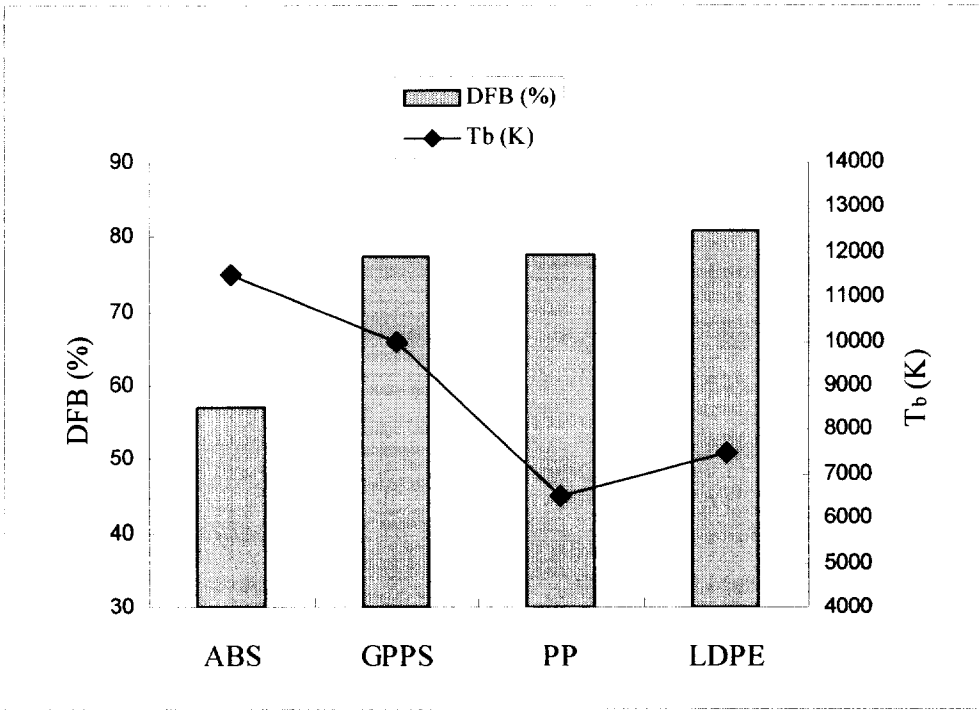


Fig. 3-10 Relationship between DFB and T_b

Fig. 3-11에서 보는 것과 같이 콜드 슬러그 웰을 제거한 러너의 형상에서는 일반형상러너보다 다소 균형충전도가 증가하였으나 유동 단면적을 줄인 러너 형상에서는 오히려 균형충전도가 더 낮게 나타났다. 전체적으로 일반러너와 변형러너들 사이에의 균형충전도는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 수지 멜트의 유동 스트림(flow stream)은 층류 유동으로 유동층이 흐르게 되는 유로가 비록 좁아졌다고 하여도 서로 뒤섞이지 않고 흐르기 때문이라고 생각한다. 그러므로 러너 형태의 변화는 러너 균형충전도를 증가시키는데 있어서 크게 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

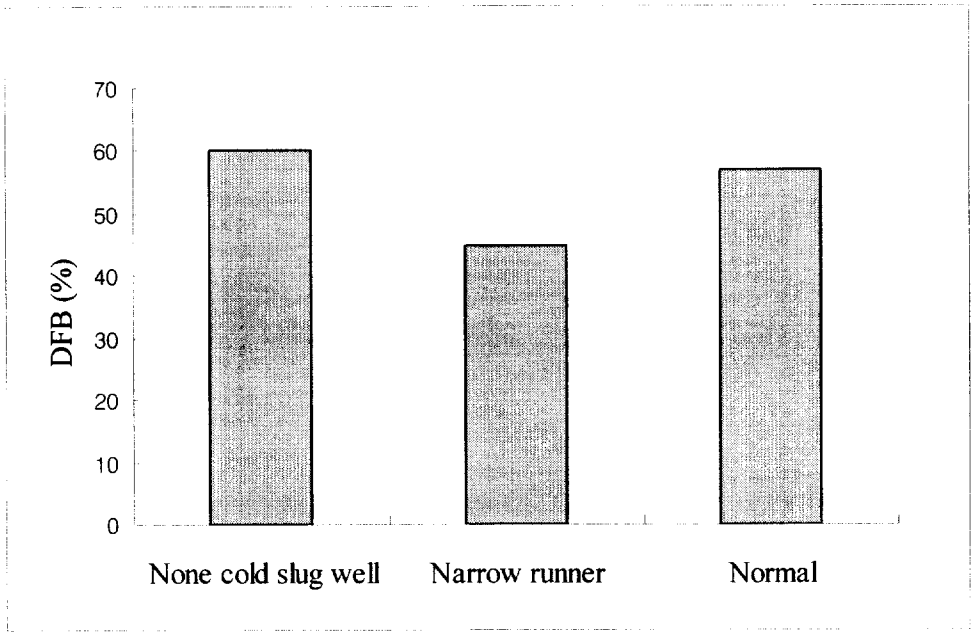


Fig. 3-11 DFB according to various runner shape

3.3 유리섬유보강 수지의 균형충전도 실험

3.3.1 유리섬유보강제의 특성

사출성형시에 유리섬유보강제가 첨가되면, 수지의 수축율에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 섬유보강제들은 봉과 같은 형상을 가지게 되므로, 이들 보강제가 수지의 유동방향으로 배향(orientation)되게 되면, 이 방향으로의 수축은 감소하게 된다. 결정성 수지나 비결정성 수지에 대해서 보강제의 배향성 효과에 의해서 수축이 가장 크게 생기는 방향은 배향과 직각방향이다. 또한, 보강섬유의 배향성에 의한 이방성수축 효과는 순수 수지나 알갱이 첨가제가 함유된 수지의 수축과는 아주 다른 양상을 띠게 된다.

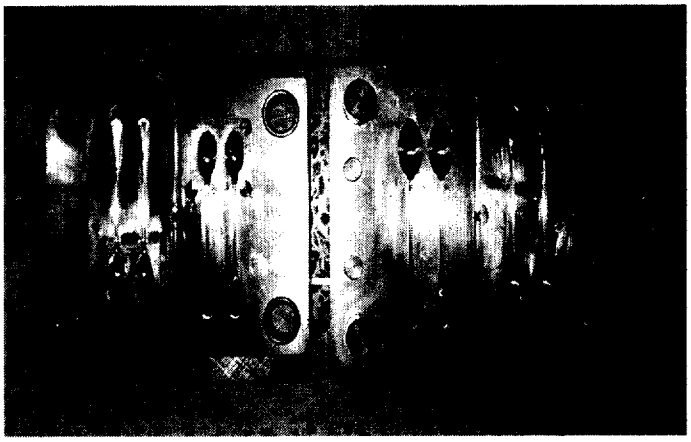
섬유보강제가 함유된 수지의 수축은 배향성 효과에 의해서 결정된다. 수지내 보강제가 한 방향으로 정렬되는 정도가 높으면, 이 방향으로의 수축은 매우 작아지게 되며, 이 방향과 수직한 방향으로의 수축은 이보다는 크지만 베이스 수지의 수축보다는 약간 작게 된다. 따라서, 수축에 영향을 미치는 것은 보강제의 배향성이며 성형조건, 제품의 형상, 게이트의 위치 등은 보강제의 배향에 영향을 미친다. 또한, 보강제의 수축은 원재료의 종류와 보강제의 함유량에 따라 변하게 된다. 만약 보강제가 함유되어 수지의 강성과 강도가 향상되었다면, 이 때의 배향성은 수지와 보강섬유 사이의 결합에 의해서 수지의 수축이 줄어들게 한다. 만약 수지와 보강제 사이의 결합 정도가 매우 우수하다면, 보강제의 높은 강성에 의해서 섬유가 배향되는 방향으로의 수축은 제한을 받게 된다. 그러므로, 수지의 흐름방향과 흐름직각방향의 수축은 섬유보강제의 배향정도에

비례한다고 할 수 있다.

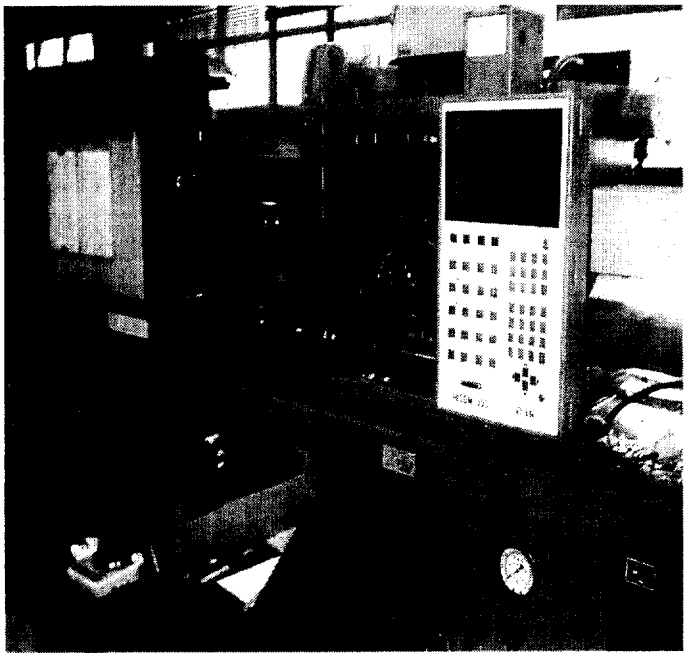
또한, 섬유보강제의 종류와 섬유보강제의 배향성은 기계적 물성에 가장 크게 영향을 미친다. 보강제가 함유된 수지는 기계적 물성이 최대 400%까지 향상될 수 있다. 섬유보강 수지에서 베이스 수지는 기계적 물성에 영향을 미치고 복잡한 기계적 물성을 갖게 하는데 기여하지만, 단지 중량비로 20% 이상의 섬유를 함유함으로써 최대 400% 까지 기계적 물성을 향상시킬 수 있기 때문에 베이스 수지의 물성변화는 고려하지 않아도 된다.[27)]

3.3.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 금형은 4개의 스푼 형상 캐비티를 갖는 2매 구성형 금형이며, 사출성형기는 LG기계에서 제작한 75톤 유압식 수평형 사출기이다. 수지 재료는 앞 장에서 언급한 순수 PA6 수지 1종과 유리섬유보강 PA6 수지 3종을 대상으로 하였으며, 실험 변수로는 사출속도와 PA6에 대한 유리섬유 보강제의 함유량이었다. 사출속도는 사출성형기의 최대 사출속도의 30%에서 70%의 범위에서 5단계로 구분 설정하였으며, 유리섬유 보강제의 함유량은 시중에서 상용되는 15%, 25%, 33%로 각각 설정하여 각 실험 변수에 따르는 균형충전도를 조사하였다. Fig. 3-12은 실험금형 및 사출성형기를 나타낸 것이다.



(a) Experimental mold

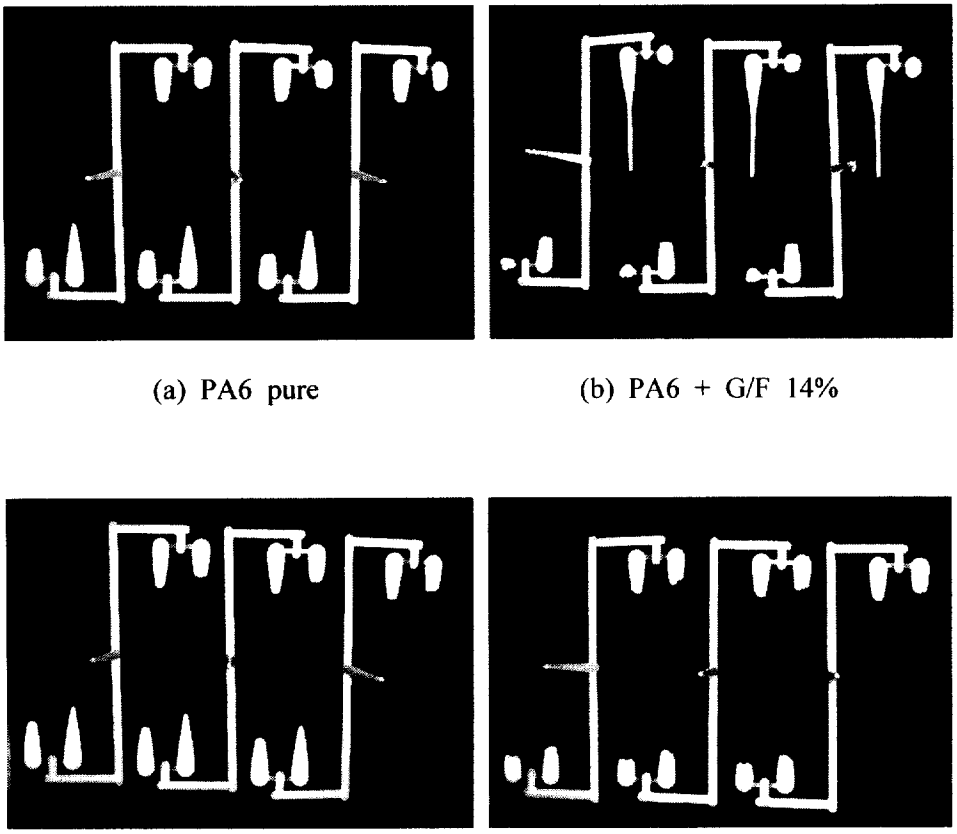


(b) Injection molding machine

Fig. 3-12 Experimental equipments

3.3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 3-13은 사출성형실험 결과 동일한 사출속도에서 발생하는 각 캐비티 간의 충전불균형 현상을 나타내고 있다. 제 2장에서 기술한 사출성형 CAE 해석결과에서는 균형충전이 일어나지만, 본 실험의 결과는 캐비티 간의 충전불균형이 발생하였다.



(a) PA6 pure (b) PA6 + G/F 14%

(c) PA6 + G/F 25% (d) PA6 + G/F 33%

Fig. 3-13 Filling imbalances according to various PA6 polymers

Fig. 3-14는 유리섬유보강제의 함유량과 사출속도의 변화에 따른 대상수지의 균형충전도를 나타내고 있다. 사출속도가 사출성형기 최대속도의 30%에서 60%의 범위에서는 균형충전도에 급격한 증가현상을 보였으며, 60% 이상에서는 사출속도의 증가에 따라 균형충전도의 증가는 극히 미미한 상태를 나타내었다. 또한, 유리섬유보강제의 함유량이 증가함에 따라 충전불균형 현상은 감소하는 경향을 보였다. 이는 러너 내의 수지유동 시 유리섬유보강제에 의한 섬유배향(fiber orientation)이 러너 중심부와 외경부의 전단율의 차이를 감소시키는데 영향을 미치는 결과라고 생각한다. 그리고 유리섬유보강제의 함유량과 관계없이 모든 대상 수지에서 사출속도를 증가시킴에 따라 균형충전도는 증가함을 알 수 있다. 이는 3.2.3절에서 기술한 고찰한 내용과 같다고 할 수 있다. 사출속도가 균형충전도에 변화를 나타내지 않는 사출속도 40%일 경우에 유리섬유 함유량에 33%일 경우에는 순수수지에 비해 균형충전도가 약 34% 정도 향상됨을 알 수 있다. 이는 유리섬유 함유량의 %값만큼 균형충전도도 향상되는 경향을 보여주고 있다. 즉, PA수지일 경우 유리섬유가 10% 함유되면 균형충전도도 약 10% 향상된다고 할 수 있다.

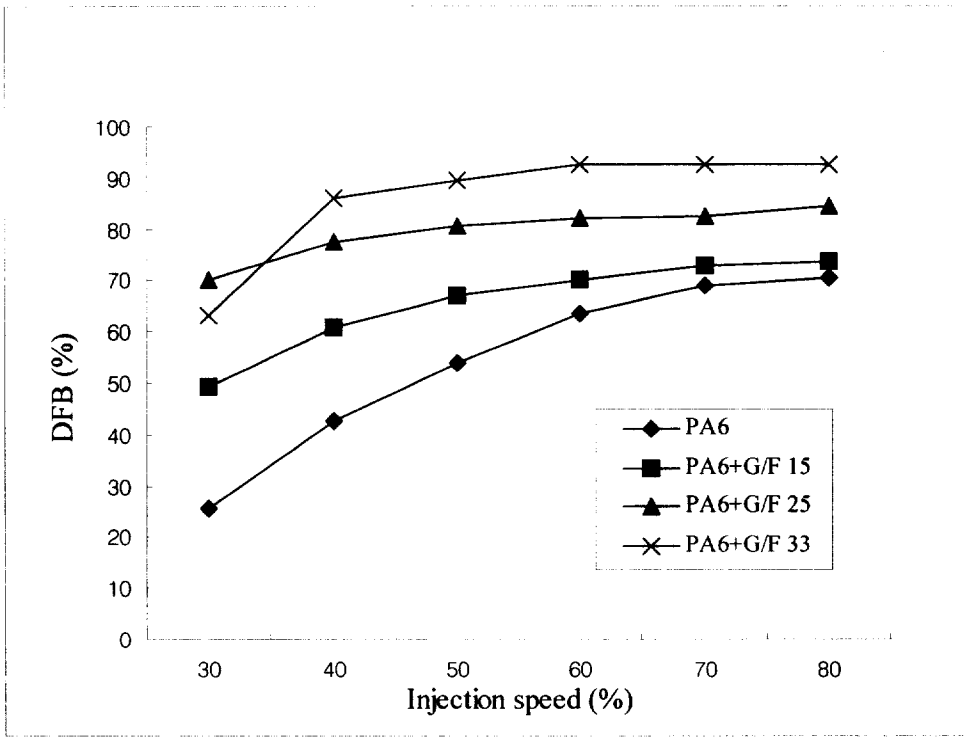


Fig. 3-14 DFB according to glass fiber contents

3.4 핫러너에서의 균형충전도 실험

3.4.1 핫러너에서의 사출성형 특성

핫러너 금형(hot runner mold)이란 Fig. 3-16과 같이 러너가 금형내의 매니폴드와 핫부시 내에서 용융된 상태로 머물면서 성형사이클 중에 이젝팅되지 않는 구조의 금형을 말한다. 핫러너 금형은 콜드러너 금형에 비하여 각 사이클 도중에 핫러너에 수지가 충전되고 성형품만 이젝팅됨으로서 러너의 처리와 성형 후 러너의 저장 및 폐기가 필요없다는 장점이 있다. 또한, 러너가 없기 때문에 사출량, 가소화시간, 러너 냉각시간 및 형개 스트로크가 감소되는 장점이 있다. 그리고 형체력(clamping force)도 콜드러너 때문에 발생하는 성형압력이 생략되기 때문에 콜드러너금형의 형체력보다 감소한다. 이들 장점 때문에 사출성형기의 용량이 낮은 것을 사용하여 성형할 수 있다.

핫러너 설계는 캐비티 판 상면에 러너 통로를 만들어 게이트 위치선정에 융통성을 제공할 수 있는 3매 구성 금형의 콜드러너 설계와 유사하게 할 수 있다. 콜드러너보다 더 굵은 유동채널을 사용할 수 있기 때문에 3매 구성형 콜드러너 시스템에서 생기는 높은 압력강하를 고려할 필요가 없기 때문에 게이트위치를 융통성있게 선정할 수 있다. 핫러너는 또한 형체력을 증가시키지 않고 성형품을 2배로 성형시킬 수 있는 스택금형(stack mold)[28]에도 적용할 수 있다.

그러나, 핫러너 금형의 설계는 복잡한 구조가 필요하다. 핫러너 시스템은 2개의 주요 부품인 매니폴드(manifold)와 드롭(drop)으로

구성된다. 매니폴드는 사출성형기 노즐에서 캐비티 상면의 지정된 위치로 수지를 전달하는 기능을 한다. 매니폴드는 금형내에 내장되어 있으며 통상 사출성형기의 형부착판과 평행하게 설치된다. 핫드롭은 매니폴드로부터 캐비티로 직접적인 수지의 유동통로를 제공하거나 또는 다수 캐비티로 연결되는 콜드러너로 간접적인 유동통로를 제공한다. 드롭은 일반적으로 메니폴드에 90° 로 수직되게 캐비티 판에 설치되어 캐비티와 통하게 된다.

핫러너 시스템 내의 매니폴드는 가열형과 단열형이 있다. 드롭은 가열형, 열전도형, 단열형이 있다. 가열형 매니폴드와 드롭은 히터와 온도 컨트롤러를 갖고 있다. 열전도형 드롭은 베릴리움동(berrilium copper)과 같은 고 열전도성 재료로 제작되며 매니폴드에서 전도를 통해 열을 받는다. 단열형 핫러너 시스템은 시스템 내에 흐르는 용융수지 외에 다른 열원은 없다.[28)]

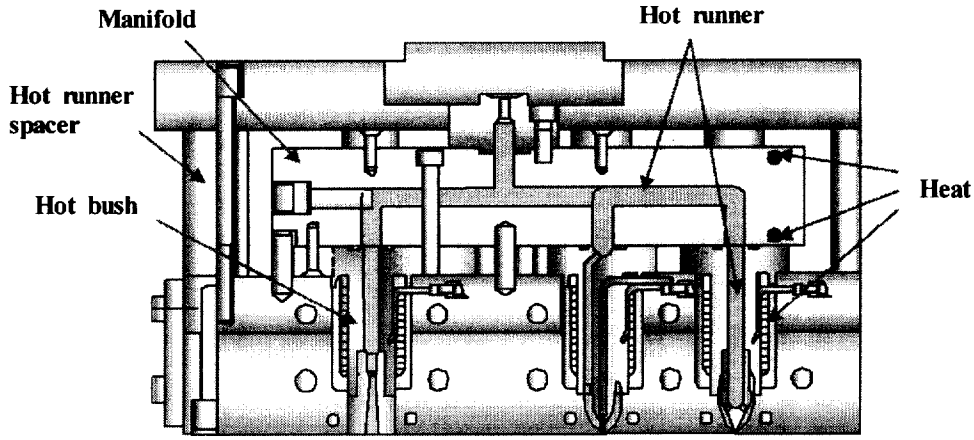


Fig. 3-15 Hot runner system

3.4.2 실험장치 및 방법

균형충전 실험에 사용된 금형은 Fig. 3-16과 같이 크기가 440×600×400㎜이며, 핫러너(hot-runner)[29] 시스템으로 구성되어 있으며, 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 배열로서 8캐비티로 구성되어있다. 성형 실험에 사용된 수지는 비결정성 수지 중 LG Chemical사의 ABS HG-173과 PMMA IH830을 사용하였으며, 결정성 수지로는 PA6를 채택하여 모두 3가지 수지를 사용하였다. 수지의 성형온도는 유동 시뮬레이션에서 적용되었던 성형조건을 그대로 사용하였으며, 사용한 사출성형기는 LG기계에서 제작한 140톤 사출성형기(LGH140N)를 사용하였다.[30] Fig. 3-17은 충전불균형 실험을 통하여 성형한 미충전 상태의 시편을 나타낸 것이다.

핫러너 금형의 균형충전 실험방법은 캐비티에 강제로 미성형을 시켰을 때 성형품의 무게를 측정하여 DFB를 계산하였다. 균형충전 실험에 적용한 성형조건은 사출속도와 성형온도로 정하였다. 사출속도는 충전불균형에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며,[3,17-19] 사출성형기의 최대사출속도의 20%에서 80%의 범위에서 20%씩 4단계로 증가 시키면서 성형하였다. 또한, 성형온도는 220℃, 230℃, 240℃의 3단계의 성형온도로 설정한 후 실험하였다. 각각의 성형 조건에 대하여 다섯번씩 성형한 후 첫 번째와 마지막 성형품은 버리고 나머지 3개의 성형품의 무게를 평균하여 균형충전도의 데이터로 사용하였다.

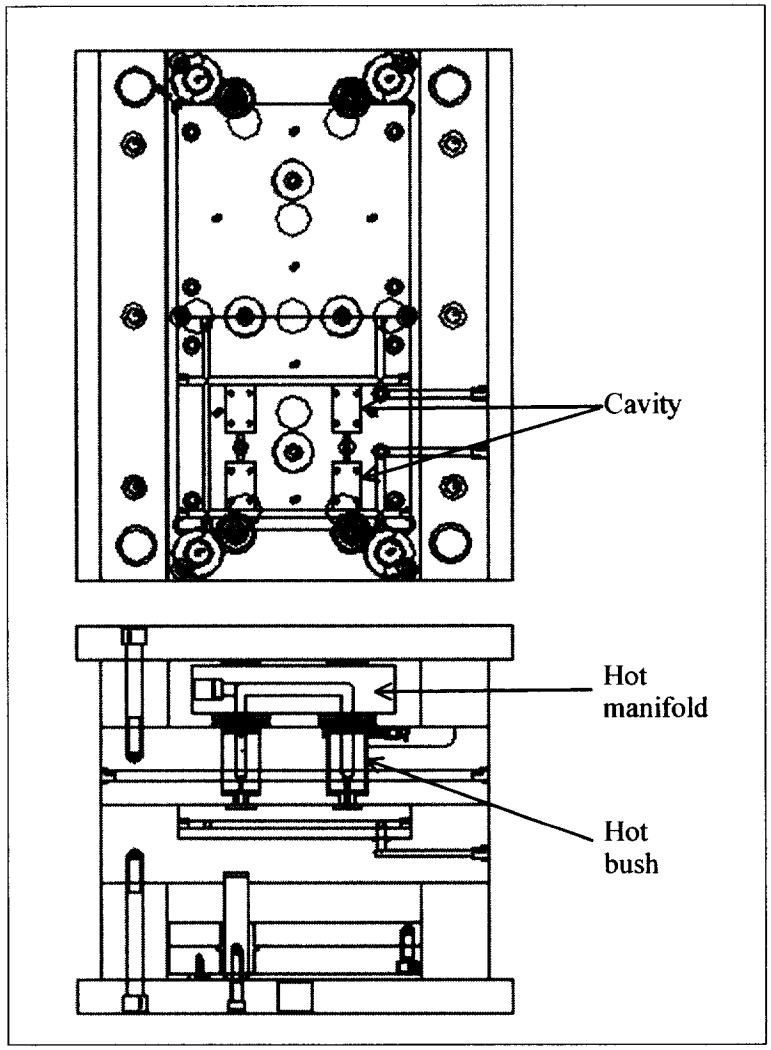
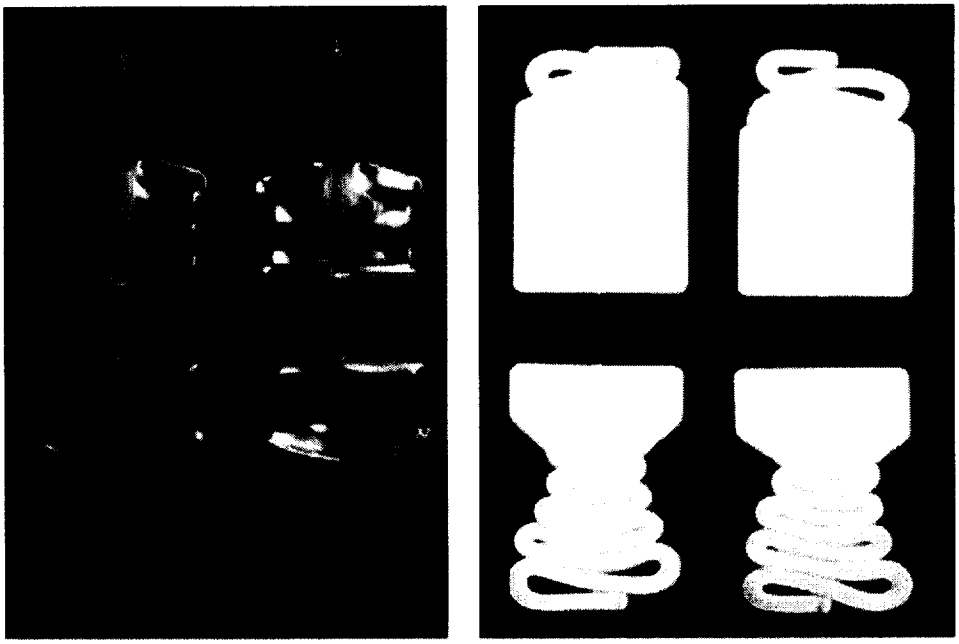


Fig. 3-16 Experimental hot runner mold



(a) PMMA (b) ABS

Fig. 3-17 Filling imbalance by hot runner mold

3.4.3 실험결과 및 고찰

3.4.3.1 비결정성 수지의 균형충전도

(1) ABS수지의 균형충전도

Fig. 3-18은 ABS수지의 균형충전도를 나타낸 그래프이다. 사출속도가 증가할수록 균형충전도가 증가하는 경향을 보였다. 그리고 성형온도 또한 높을수록 균형충전도가 증가하는 경향을 나타내었다. 성형조건 중 최대사출속도인 80%에서는 오히려 Fig. 3-19에 나타낸 스프루에서 먼쪽에 위치한 3, 4번의 캐비티에 더 많은 양의 수지가

충전되는 현상도 나타났다. 이와 같은 결과는 콜드러너 금형에 대한 선행연구[17-19]의 결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 단지 그 데이터의 값만 다르게 나타났다.

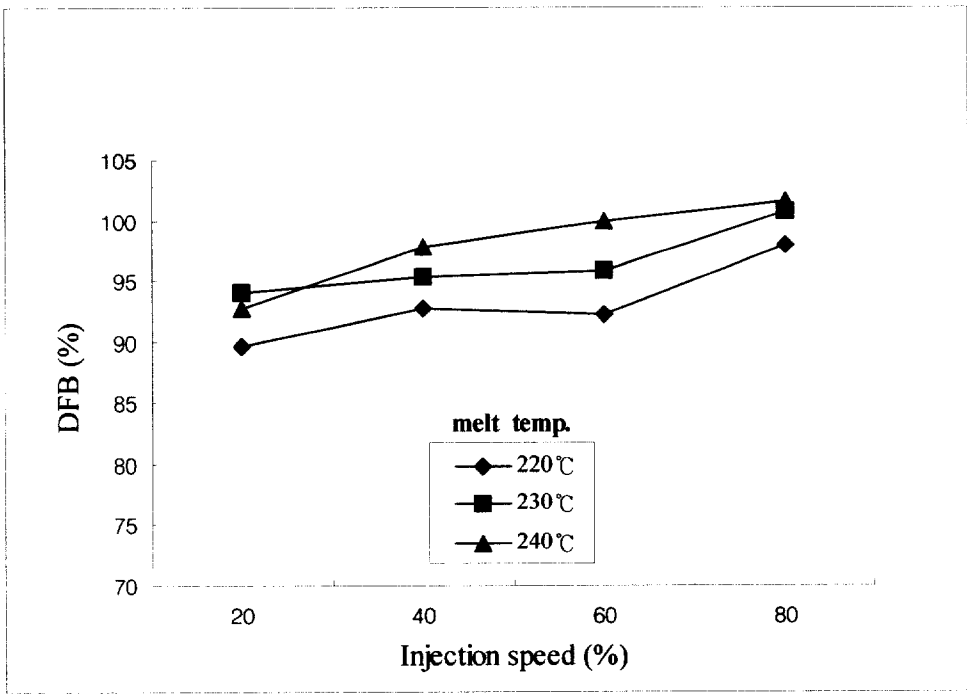


Fig. 3-18 DFB vs. injection speed (ABS)

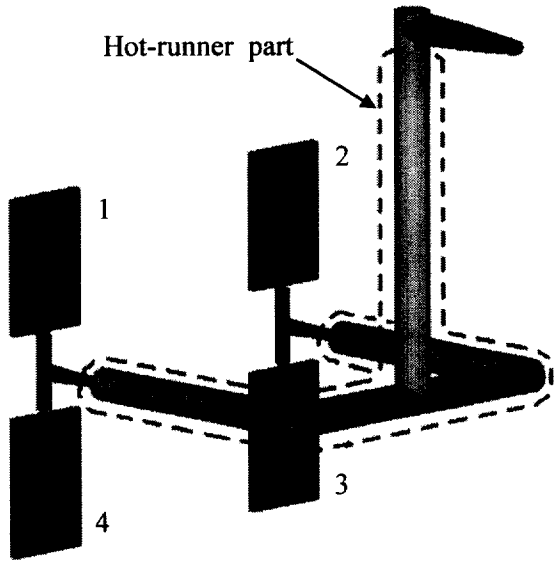


Fig. 3-19 Runner and cavity layout in experimental mold

(2) PMMA수지의 균형충전도

Fig. 3-20은 PMMA수지의 균형충전도를 나타낸 그래프이다. ABS 수지와 같이 성형온도가 증가할수록 균형충전도가 높아지는 것을 알 수 있었다. 그러나 ABS수지의 경우보다 균형충전도의 변화가 적게 나타났다. PMMA수지의 전체적인 균형충전도의 값은 ABS보다 작게 나타났다. 이는 PMMA수지의 온도민감도(T_b)가 다른 수지와 비교하면 가장 큰값을 나타내고 있지만, 본 실험에 사용한 PMMA 수지에 대한 정확한 T_b값은 측정하지 못하여 그 이유를 설명하기가 현재로서는 곤란하여 향후 연구과제로 남겨둔다.

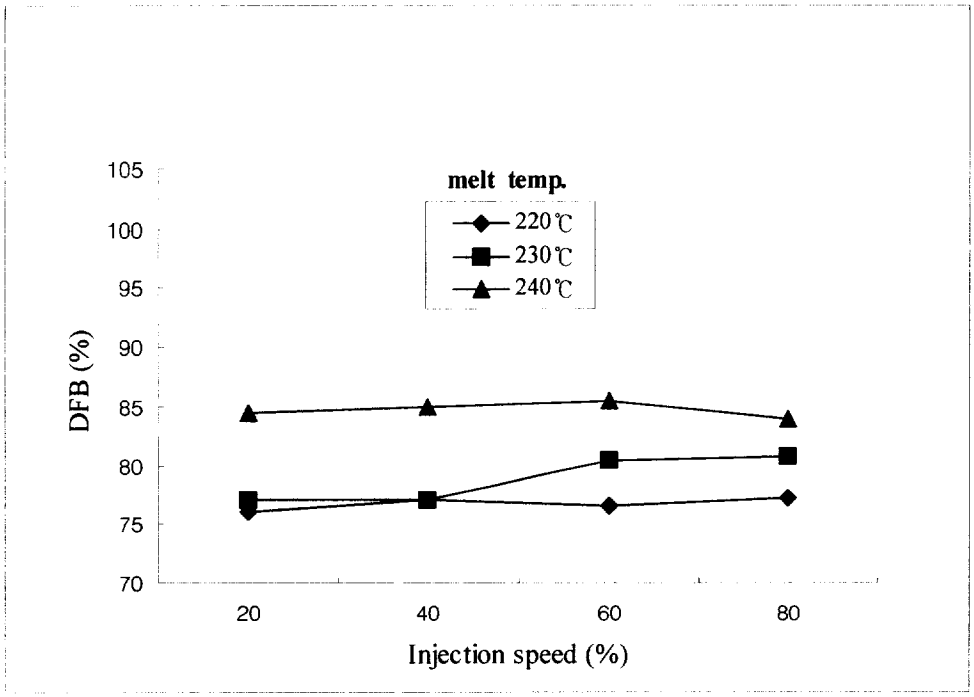


Fig. 3-20 DFB vs. injection speed (PMMA)

3.4.3.2 결정성 수지 PA의 균형충전도

비결정성 수지의 균형충전도와 비교하기 위하여 결정성 수지인 PA를 실험재료로 균형충전 실험을 하였다. Fig. 3-21은 PA수지의 균형충전도를 나타낸 그래프로 비결정성 수지인 ABS, PMMA수지에 비하여 균형충전도가 매우 양호하게 나타났다. 그리고 각 성형온도별 수지의 균형충전도의 변동 폭도 아주 작게 나타났다. 이와 같은 현상은 PA 수지의 온도민감도가 ABS 및 PMMA 수지의 온도민감도 보다 훨씬 낮기 때문이라고 생각한다.[31)]

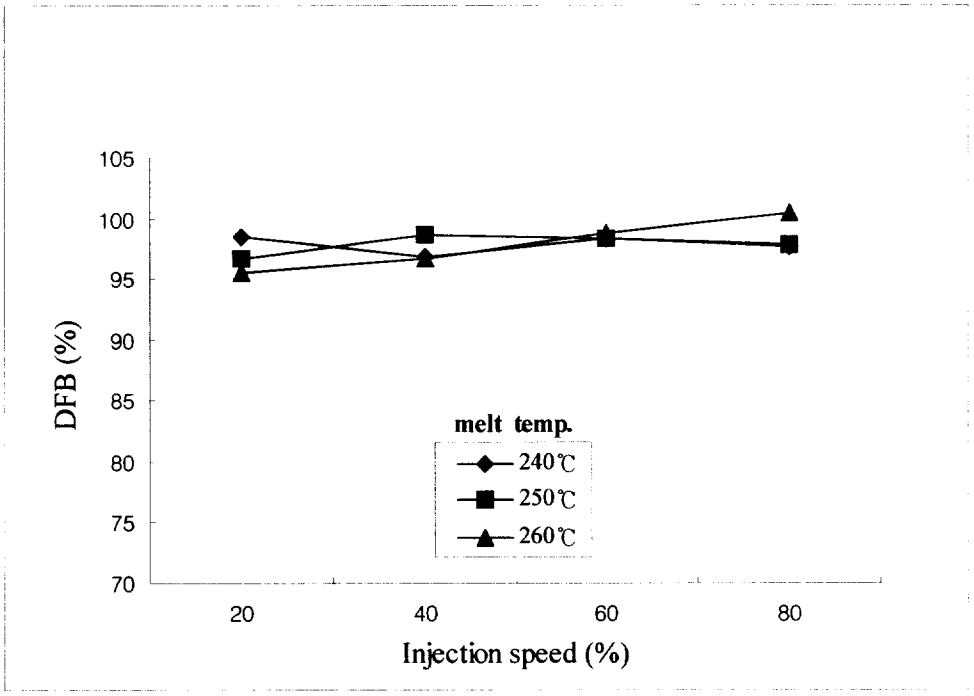


Fig. 3-21 DFB vs. injection speed (PA)

3.4.3.3 각 수지별 DFB의 비교

이상의 3가지 수지에 대해 사출속도에 따른 DFB를 종합하여 Fig. 3-22에 나타내었다. 수지 종류와는 상관없이 사출속도가 증가할수록 DFB가 증가함을 알 수 있다.

콜드러너 금형에서의 연구결과와 같이 핫러너 금형에서도 사출속도를 증가시키면 균형충전도가 향상되는데 이는 사출속도를 빠르게 하면 수지의 온도 변화를 감소시켜 수지내부에서 발생하는 전단율의 변화도 감소되어 결과적으로 균형충전도를 증가시킨다고 생각한다. 그리고 DFB의 값이 큰 것부터 나열하면 PA, ABS, PMMA순으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 각 수지의 온도민감도의 크기와

역순이다.[18,31] 본 실험연구에 사용된 ABS수지의 DFB값을 앞선 3.1절에서 기술한 콜드러너 금형에서의 균형충전 연구의 DFB와 비교하면 핫러너 금형에서의 DFB값이 약 10%정도 개선된 것을 알 수 있다.

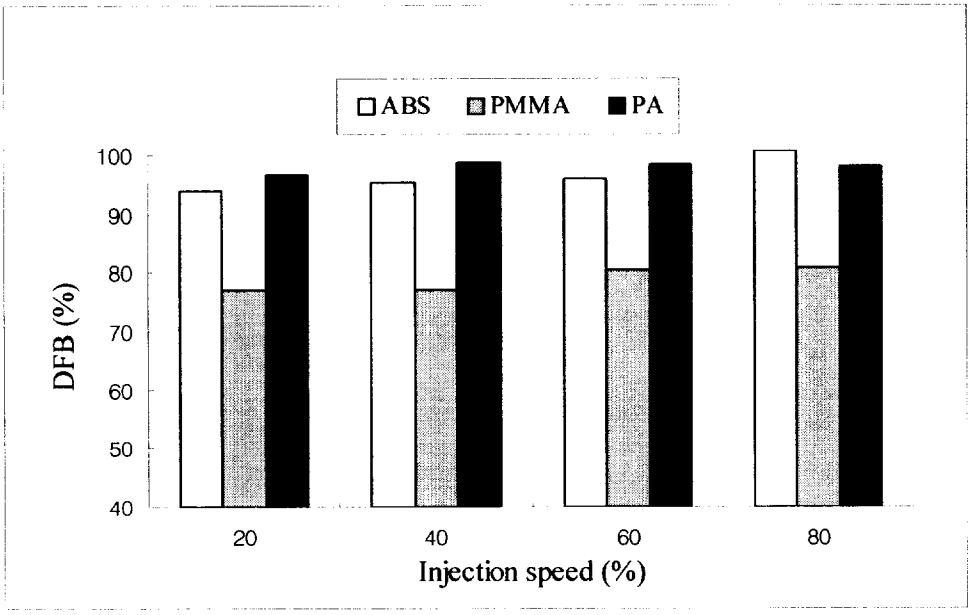


Fig. 3-22 Comparison of various polymer's DFB

3.5 실험계획법에 의한 균형충전 영향인자 평가

3.5.1 실험계획법

성형품의 균형충전에 가장 영향을 크게 미치는 성형 인자를 도출하기 위해 다구찌 기법을 통한 실험을 수행하였다.

다구찌 기법의 사용 목적은 제어할 수 있는 영향력이 강한 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것에 있으나, 본 실험에는 인자별 영향력만 확인한 후 성형에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 기법에 필요한 것이 S/N비 (signal to noise ratio) 로서, S/N비는 특성치에 따라 망목특성, 망대특성, 망소특성으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 영향인자에 의해 발생하는 균형충전도를 특성치로 선정하여, 최대화하는 방향으로 실험이 수행되었으므로 망대특성 분석을 사용하였다. 식 (8)은 S/N비 중에서 망대특성을 나타낸 것이다.[32)]

$$\eta = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{8}$$

여기서

y_i : 실험에서 얻은 데이터 값

n : 실험 횟수

3.5.2 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 사출성형기는 LG기계에서 제작한 형체력 140톤 직압식 수평형 사출성형기를 사용하였으며, 실험 금형은 기하학적으로 균형을 갖춘 러너에 의해 충전되는 8캐비티 금형을 사용하였다. 대상수지는 범용 수지인 ABS(TR558 AI)를 사용하였다.

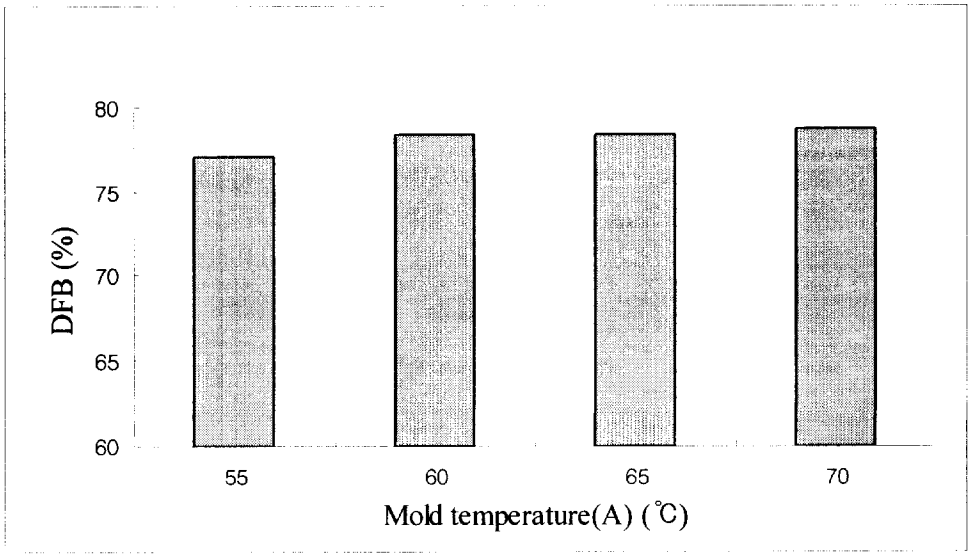
실험조건은 일반적인 ABS의 성형조건인 수지온도 235℃, 금형온도 65℃, 사출속도 60%, 사출압력 60%를 고정 조건으로 설정한 후 각각의 성형 조건을 4단계로 변화시켜, 그에 따르는 균형충전도를 조사하였다. Table 3-2은 성형실험 조건을 나타내고 있다.

Table 3-2 Experimental conditions for design of experiment

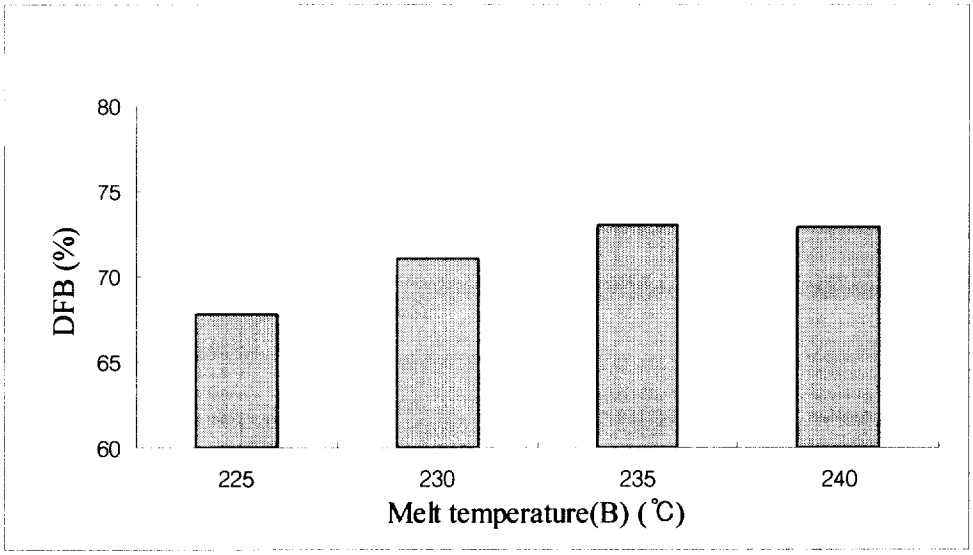
Factor	Unit	Code	Molding conditions			
Mold temp.	℃	A	55	60	65	70
Melt temp.	℃	B	225	230	235	240
Injection speed	%	C	40	50	60	70
Injection pressure	%	D	40	50	60	70

3.5.3 실험결과 및 고찰

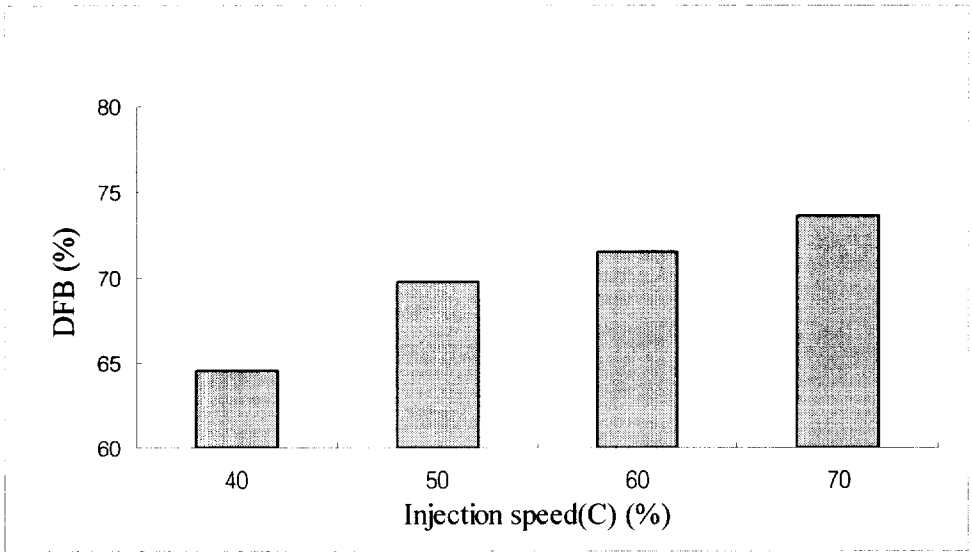
Fig. 3-23 (a), (b), (c), (d)는 균형충전에 영향을 주는 성형 변수인 금형온도, 수지온도, 사출속도, 사출압력의 변화에 따라 변화하는 균형충전도를 나타내고 있다. 4가지 변수 모두 유동성이 증가하는 조건, 즉 높은 사출속도, 사출압력, 금형온도, 수지온도에서 균형충전도가 증가함을 알 수 있다. 유동성이 증가하면 전단율 또한 증가하게 된다. 전단율의 증가는 수지 점도를 감소시키게 된다. 그러나 Fig. 3-9에서 알 수 있듯이 전단율이 증가하면 점도는 점차 감소하게 되지만 어느 시점 이후에는 일정한 값을 나타낸다.[33] 이와 같은 이유로 유동성이 증가하도록 성형변수를 설정하는 것은 러너 내부의 대상수지의 불균일한 전단율에 의한 불균일한 점도를 낮추어 일정하게 하는 구간으로 유도하므로, 결과적으로 균형충전도는 증가하게 된다고 생각한다.



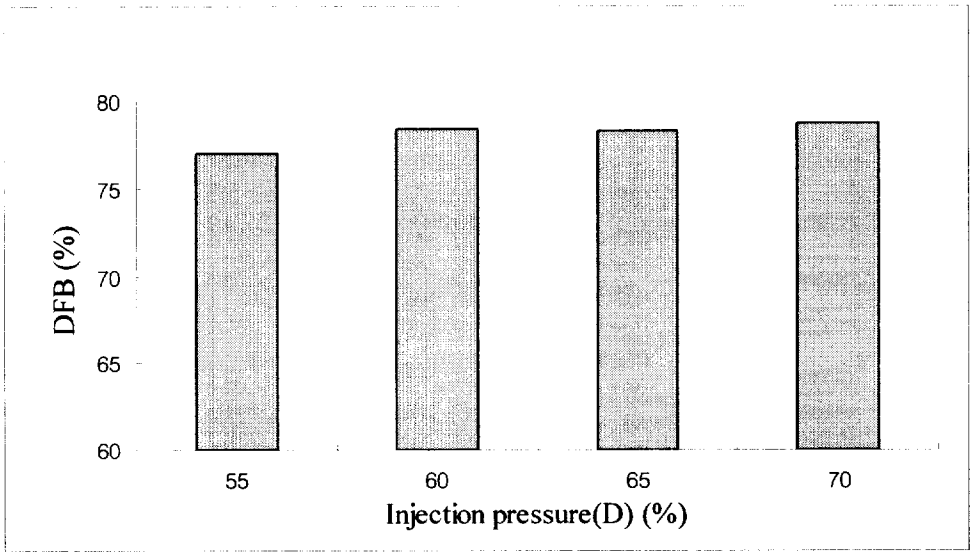
(a) Mold temperature



(b) Melt temperature



(c) Injection speed



(d) Injection pressure

Fig. 3-23 DFB according to experimental factor

균형충전도에 영향을 미치는 인자의 영향도는 Fig. 3-24와 같다. 영향도가 큰 인자는 사출속도(C), 수지온도(B), 금형온도(A), 사출압력(D)의 순이며 본 실험의 대상재료인 ABS에서 그 비는 약 5 : 3 : 1 : 1 로 나타났다. 이는 사출속도가 충전불균형을 발생시키는 불균일한 전단율 분포에 가장 크게 영향을 미치는 인자이기 때문으로 사료된다.

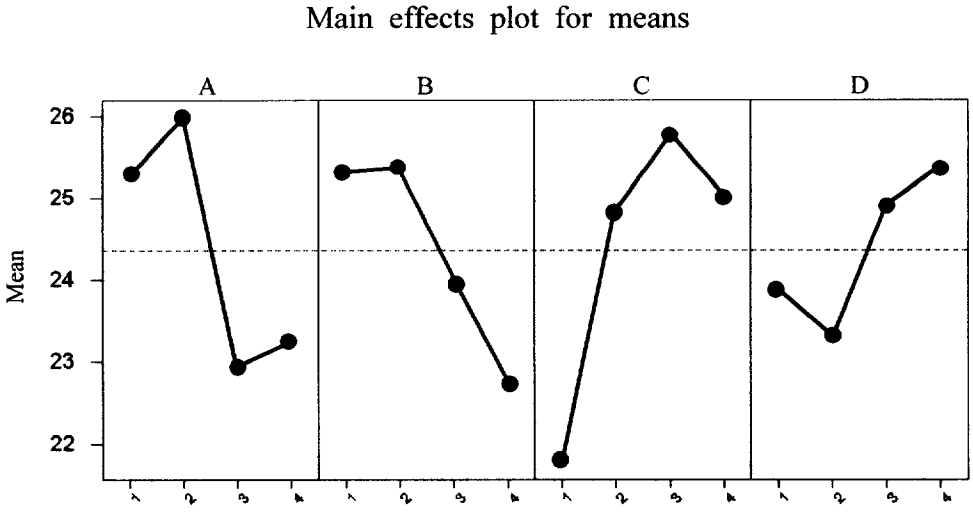


Fig. 3-24 Effect of each factor on the DFB

4. 균형충전을 위한 사출금형의 개발

4.1 4BF 금형

4.1.1 균형충전을 위한 러너시스템

2매구성 금형에서 콜드러너 형식에서 2차 분기가 없는 경우에는 흐름상의 균형충전을 가져올 수 있으며, 2차 분기가 있는 경우에는 트랙효과(track effects)에 의해 스프루에서 가까운 캐비티가 먼저 충전하게 된다.

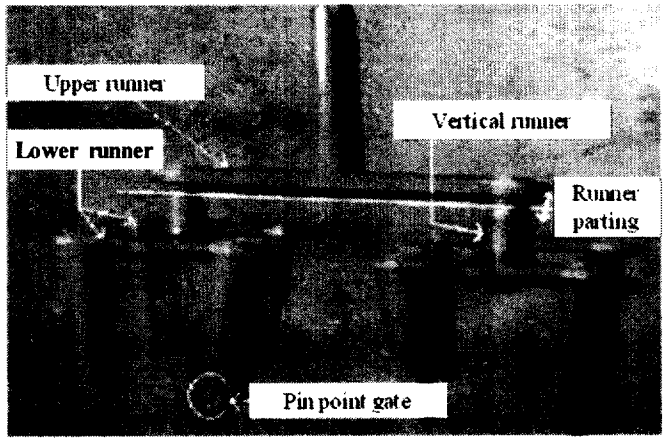


Fig. 4-1 New runner system for filling balance in 3 plate mold

본 연구에서는 3매 구성 금형에서의 균형충전을 위해서 3매구성 금형에서 2차 분기가 없는 러너구조를 설계할 수 있도록 하기위해 Fig. 4-1과 같은 러너 시스템을 제안하였다. 금형이 열릴 때 그림의 러너 파팅부(runner parting)에서 절단이 가능한 금형구조를 고안

하게 되었다.

4.1.2 3매구성 금형의 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 금형은 8개의 캐비티를 갖는 3매구성 금형이며, 사출성형기는 LG기계에서 제작한 140톤 유압식 수평형 사출성형기이다. 수지재료는 온도민감도(T_b)에서 상호간에 큰 차이가 있으면서 일반적으로 많이 사용되고 있는 PP, ABS 2종을 대상재료로 선정하였다.

본 실험에서 실험변수로 사출속도와 수지온도를 선택하였으며 사출속도를 사출성형기의 최대사출속도의 30%, 40%, 50%, 60%, 70%의 5단계로, 수지온도를 220℃, 235℃, 250℃의 3단계로 설정하여 그 변수에 따르는 균형충전도를 측정하였다.

4.1.3 4매 구성 금형의 실험장치 및 방법

Fig. 4-2는 본 연구에서 제안한 3매구성 금형에서 균형충전이 가능한 균형충전형 4매구성 금형[4BF mold라 호칭함]의 구조를 나타낸 것이다. 본 금형구조의 특징은 Fig. 4-1에서 러너 파팅부에서 절단을 가능하게 하기 위해 Fig. 4-2에서 러너 취출판과 이의 작동을 위해 러너 취출봉이 추가된 것이며, 나머지 부품의 구조와 기능은 기존의 3매구성 금형과 동일하다.[34)]

성형이 완료된 후 금형이 열릴 때 Fig. 4-2의 P_1 파팅부 공간에서 Fig. 4-1의 러너상부(upper runner)가 취출되고, P_2 파팅부 공간에서는 Fig. 4-1의 러너하부(lower runner)가 취출된다. 러너부위를 러

너상부와 러너하부로 절단하는 구조를 취한 이유는 러너상부에서 러너 유동을 수직 러너부(vertical runner)를 지나게 함으로서 Beaumont교수가 제안한 Melt Flipper^{TM}와 같은 효과를 생성시켜 유동균형을 취하게 하여 각 캐비티에 핀포인트 게이트를 통해 균형충전이 가능하게 하기 위함이다.

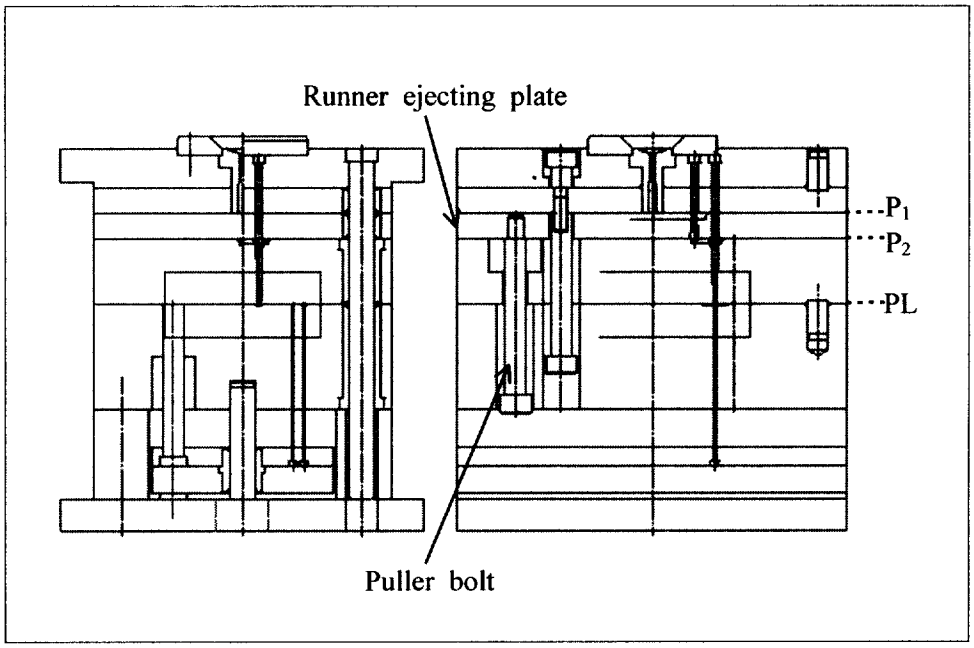


Fig. 4-2 Schematics of 4BF mold

4.1.4 3매구성 금형의 실험결과 및 고찰

4.1.4.1 수지재료에 따른 균형충전도

Fig. 4-3은 PP와 ABS를 대상으로 사출속도를 변화시켜 DFB값을 나타낸 것으로서, PP수지의 DFB가 ABS의 DFB 보다 약 30% 정도 크게 나타났으며, 이는 ABS의 온도민감도 T_b값(10,000K)이 PP의 T_b

값(5,500K)보다 상대적으로 큰 값을 갖기 때문으로 설명할 수 있다.[35] 또한 각 수지별 DFB는 사출속도가 증가함에 따라 점차 약간 증가하는 경향을 보였으며, 이는 앞에서의 연구와 기존의 연구결과[3,4] 유사하다.

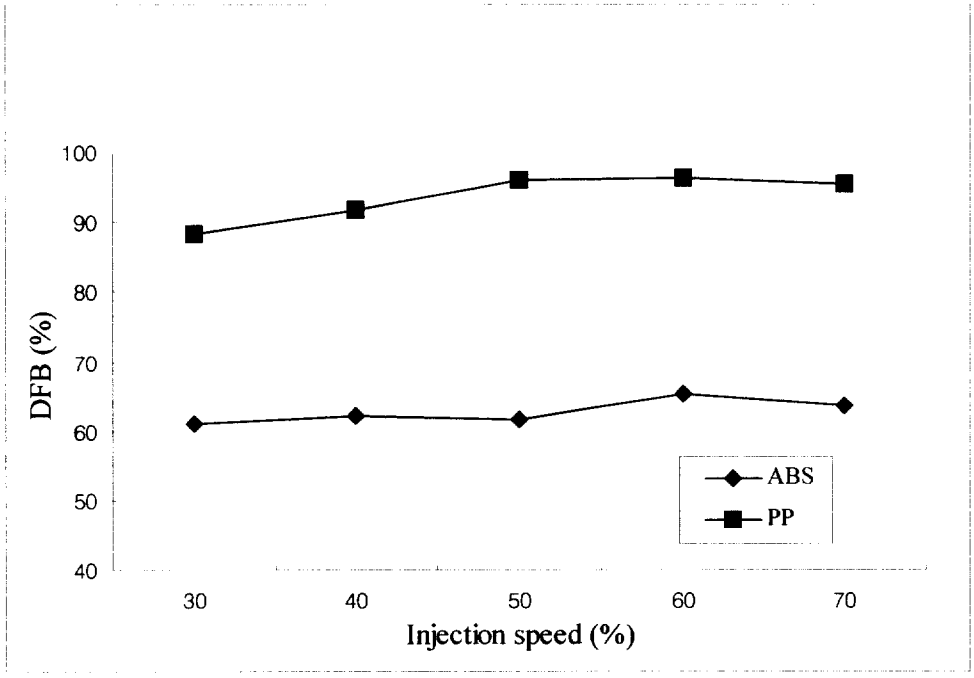


Fig. 4-3 Relations between DFB and injection speed

4.1.4.2 수지온도에 따른 균형충전도

Fig. 4-4는 수지온도의 변화에 따른 DFB값을 나타낸 것으로서, 수지온도가 높을수록 DFB값은 약간 증가함을 알 수 있다. 이는 수지온도가 높을수록 수지의 점도가 낮게 되어 수지 유동성이 개선된

효과에 의해 각 캐비티 간의 균형충전도르 개선시키며 또한, Fig. 4-3에서의 사출속도를 증가시켰을 때와 같은 효과도 기여한 것으로 생각한다.

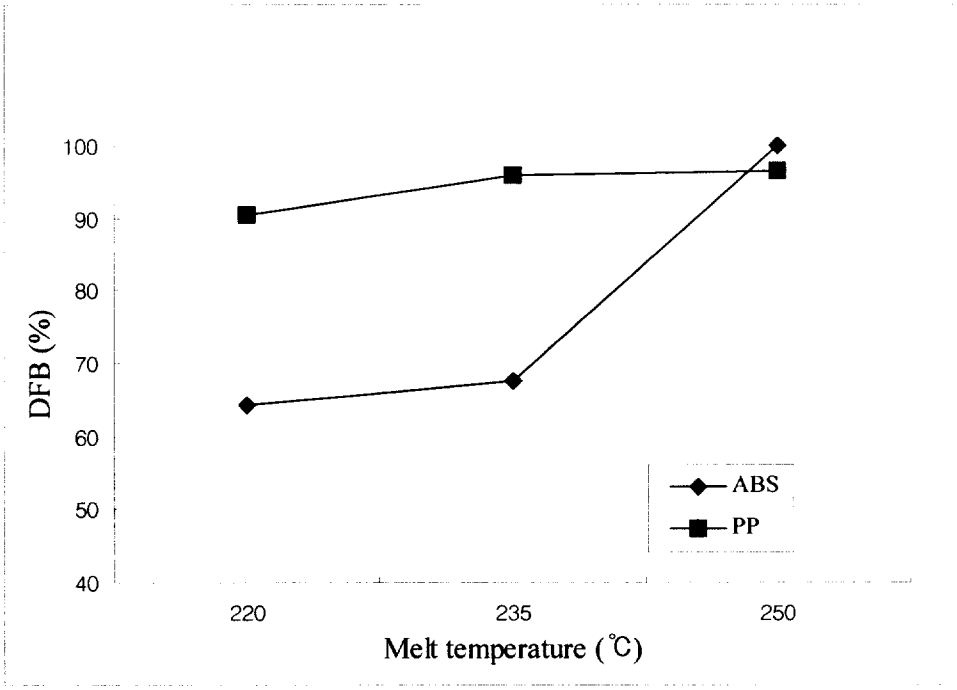


Fig. 4-4 Relation between DFB and melt temperature

4.1.5 4매 구성 금형의 실험결과 및 고찰

Fig. 4-5는 균형충전용으로 개발한 4BF 금형에 의한 균형충전도의 개선된 내용을 알아보기 위해 ABS수지를 대상으로 실험한 결과를 나타낸 것이다. 실험시 성형조건은 수지온도 220℃, 사출압 40%, 사출시간 1.8초이다. 여기서 4BF 금형에서는 기존의 3매구성

금형의 충전불균형 현상이 개선되어 오히려 외측 캐비티에 충전량이 더 크게 되었으며, 여기서 DFB값은 절대값으로 나타내었으며, 그 값은 약 89~93%정도 나타났다. 이 현상은 스프루측 러너 록핀(runner lock pin)에 의한 수지흐름의 불균형에 의한 원인이 큰 것으로 생각된다.

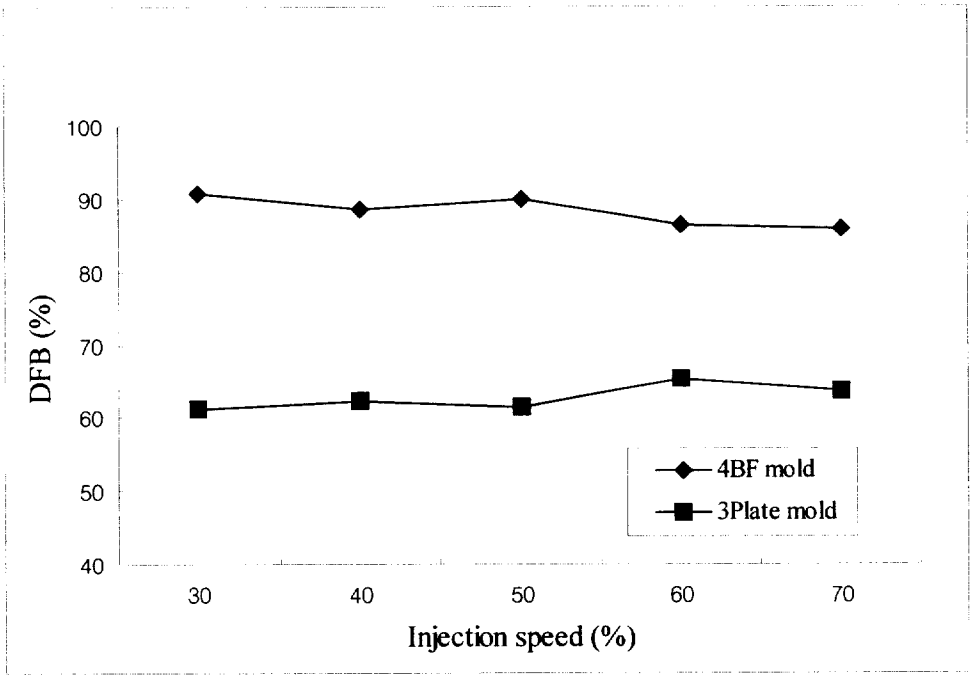
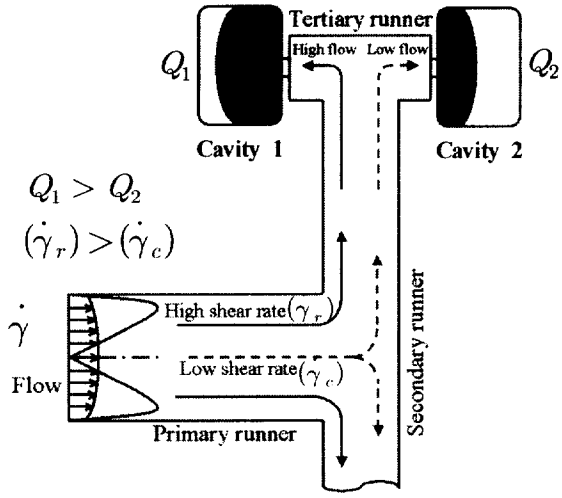


Fig. 4-5 Comparison of DFB between 4BF mold and 3plate mold

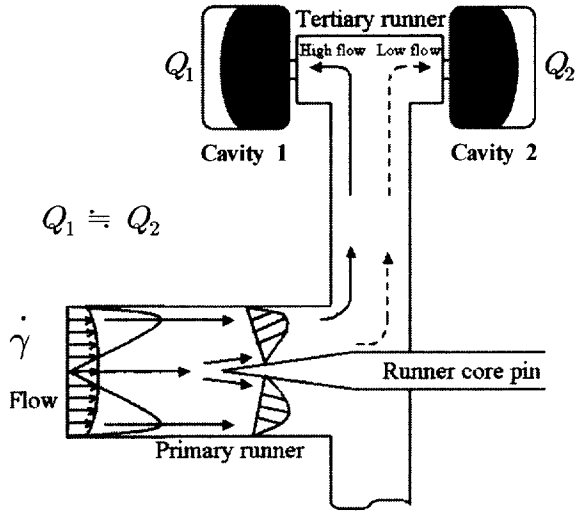
4.2 러너 코어(runner core)핀 금형

4.2.1 러너 코어핀 금형

Fig. 4-6은 러너 코어핀(Runner core pin; RC pin으로 호칭함)에 의한 러너 내부의 전단율 분포 변화를 나타내고 있다. Fig. 4-6 (a)에서 보는 것과 같이 러너 외경부와 중심부에 비대칭적으로 형성되는 전단율 분포는 Fig. 4-6 (b)에서 보는 것과 같은 러너 코어핀에 의해 대칭적으로 형성됨을 알 수 있다. 이와 같이 대칭적으로 분포된 전단율은 러너 외경부와 중심부의 점도를 일정하게 하며, 동일한 유동성을 가지게 하여 내측 캐비티 Cavity 1과 외측 캐비티 Cavity2의 충전량을 동일하게 한다.



(a) Non-symmetrical shear distribution



(b) Symmetrical shear distribution by runner core pin

Fig. 4-6 Effect of RC pin for filling balance

4.2.2 실험 장치 및 조건

본 실험에 사용된 사출성형기는 LG기계에서 제작한 형체력 140톤 직압식 수평형 사출성형기를 사용하였으며, 실험 금형은 기하학적으로 균형을 갖춘 러너에 의해 충전되는 8캐비티 금형을 사용하였다.

충전불균형 개선에 영향을 줄 것으로 기대되는 러너 코어핀은 직경 3㎜, 길이 60㎜로 1차 러너와 2차 러너에 각각 경사핀을 사용한 슬라이드 코어에 의해 삽입하였다. 각 캐비티에서 발생하는 충전불균형에 대한 RC pin의 영향을 각각 알아보기 위해 1번 캐비티는 1차 러너에만 RC pin이 적용하였고, 2번 캐비티는 2차 러너에만, 3번 캐비티는 RC pin이 적용되지 않았으며, 4번 캐비티에는 1차와 2차 러너 모두에 RC pin이 적용되었다.

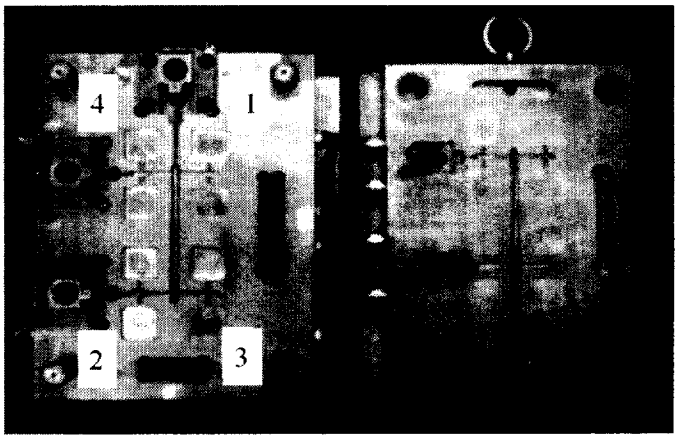


Fig. 4-7 Experimental mold for runner core pin

대상수지는 기존 연구에서 타수지에 비해 비교적 확연한 충전불균형 현상을 나타내었던 ABS(TR558 AI)와 PMMA(IF850)을 사용하였다. Fig. 4-7은 RC pin이 설치된 실험 금형을 나타내고 있다.

성형조건은 금형온도는 50℃, 사출속도는 최대사출속도의 30%, 사출압력은 최대사출압의 50%, 성형온도는 235℃로 설정하여 러너 코어핀의 사용여부에 따른 균형충전도를 동일 조건에서 5회 반복 성형하여 그 평균값을 측정치로 채택하였다.

4.2.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 4-8은 균형충전을 위해 고안된 RC pin이 각 캐비티에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 4-8에서 보는 것과 같이 1차 러너에만 RC pin이 삽입된 1번 캐비티의 균형충전도가 RC pin이 삽입되지 않은 3번 캐비티에 비해 확연히 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 2차 러너에 RC pin이 삽입된 2번 캐비티와 4번 캐비티의 균형충전도는 오히려 더 낮아짐을 알수 있다. 이는 1차 러너에서 발생하는 비대칭 전단 분포는 중심부와 외경부에 나타나므로 RC pin에 의해 그 차이가 개선되었으나, 2차 러너에서 발생하는 비대칭 전단 분포는 러너 내측과 외측에 나타나는 불균일한 전단 분포이므로 러너 코어핀이 오히려 비대칭적인 전단분포에 경계를 형성시키는 효과를 유발시켜 균형충전도를 더욱 감소시키는 것으로 생각된다.

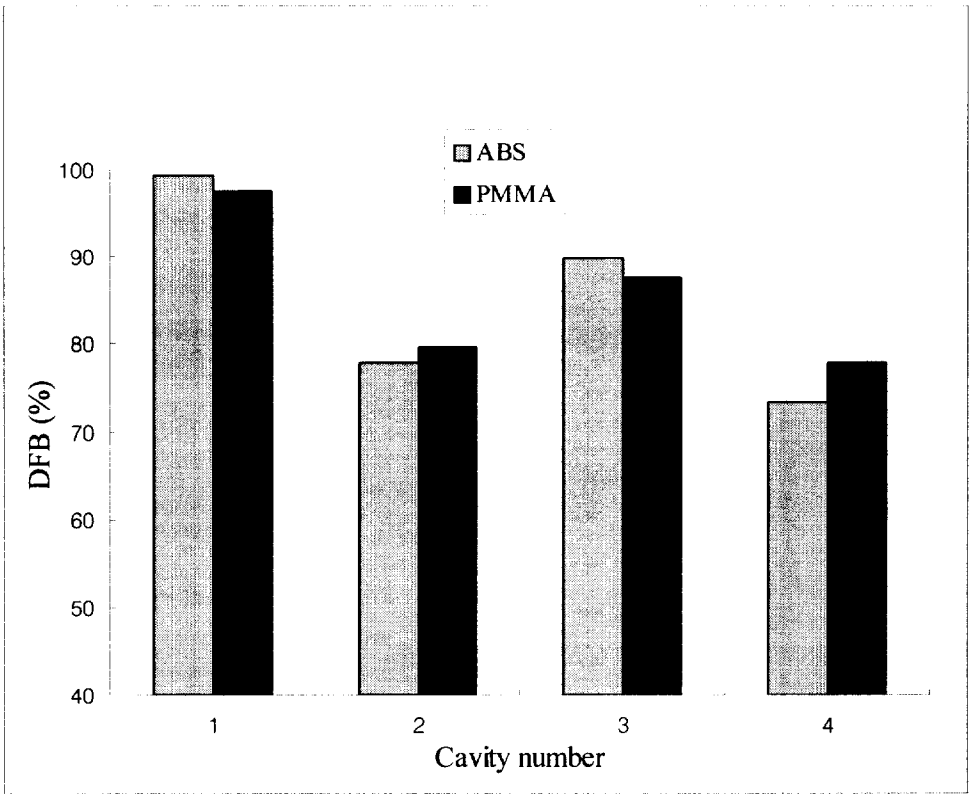


Fig. 4-8 Improvement of DFB by using RC pin

4.3 조절형 러너코어핀 금형

4.3.1 조절형 러너 코어핀 금형

Fig. 4-9는 조절형 러너코어핀 금형(adjustable RC pin mold)의 구조를 나타낸 것으로, Fig. 4-9(b)의 RC pin의 삽입길이를 금형의 외부에서 조절할 수 있도록 하였다. 러너 코어핀의 삽입길이는 육각렌치(wrench)를 이용하여 우측으로 1회전시키면 1㎜씩 전진되도록 하였다.

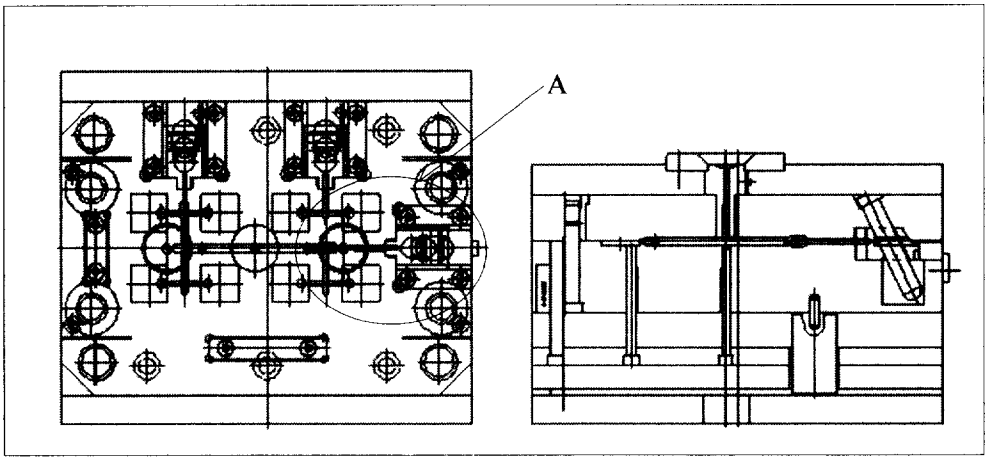
본 금형구조는 다수 캐비티 금형의 실제 성형작업시 각 수지별로 최적의 균형충전을 셋팅하기 위해서 미세한 조절이 가능하여 현장에서의 실효성이 우수하다고 판단된다.

4.3.2 실험장치 및 조건

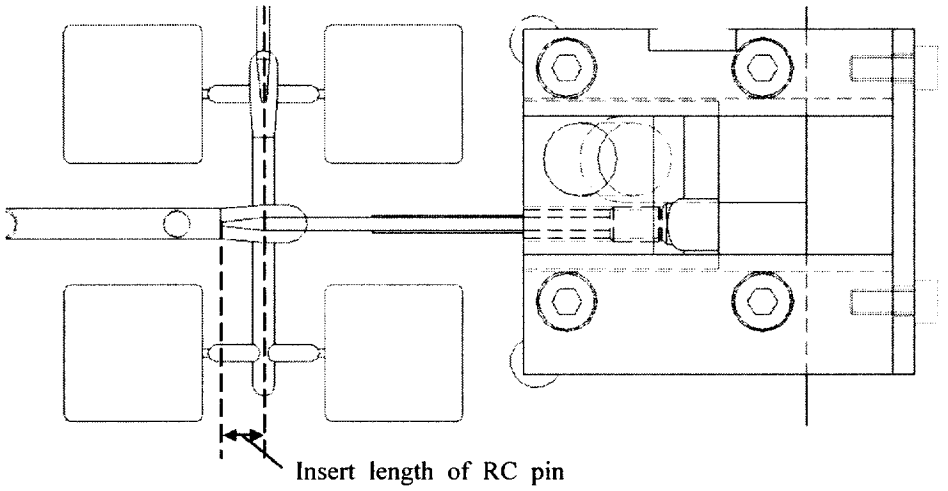
본 실험에 사용된 사출성형기는 LG기계에서 제작한 형체력 140톤 직압식 수평형 사출성형기를 사용하였으며, 실험 금형은 4.3.1. 절에서 설명한 조절형 RC pin금형을 사용하였다.

Table 4-1과 같이 각 수지별로 DFB가 가장 높은 성형조건하에서 조절형 RC pin을 5㎜씩 삽입하면서 DFB를 측정하였다.

대상수지는 PP(M580), PA6(BASF B3S), ABS(BASF GP22), PMMA (IF850)를 사용하였다.



(a) Schematic view of adjustable RC pin mold



(b) Magnification of section "A"

Fig. 4-9 Adjustable RC pin mold

Table 4-1 Experimental conditions for RC pin mold

Factor	Unit	PP	PA6	ABS	PMMA
Mold temp.	℃	35	45	45	40
Melt temp.	℃	205	240	240	235
Injection rate	%	50	70	70	70
Injection pressure	%	60	50	60	50

4.3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 4-10은 PP, PA6, ABS, PMMA 수지의 성형공정조건 중 가장 균형충전이 좋은 표준 성형조건하에서 조절형 RC pin을 5㎜씩 단계적으로 전진시키면서 DFB를 측정한 결과이다.

RC pin의 삽입길이에 따라 각 수지의 DFB의 최대값으로 97%~99.5%가 존재한다는 것을 확인할 수 있었으며, 이것으로 조절형 RC pin 금형구조는 유효하다고 할 수 있다. 또한 수지별로 최대값이 다르며, 최대값에서의 RC pin의 삽입 길이가 다름은 각 수지의 고유점도(η_0)와 온도민감도(T_b)에서의 차이와 그로 인한 표준성형조건 차이가 복합적으로 나타난 결과라고 생각된다.

미세한 차이이긴 하나 여기서도 결정성수지는 비결정성수지에 비해 균형충전도의 최대값이 높음을 확인할 수 있었다.

실용가능한 DFB의 값은 요구되는 성형품의 치수정밀도에 따라 달라질 것이며, 향후 연구가 필요할 것으로 사료된다.

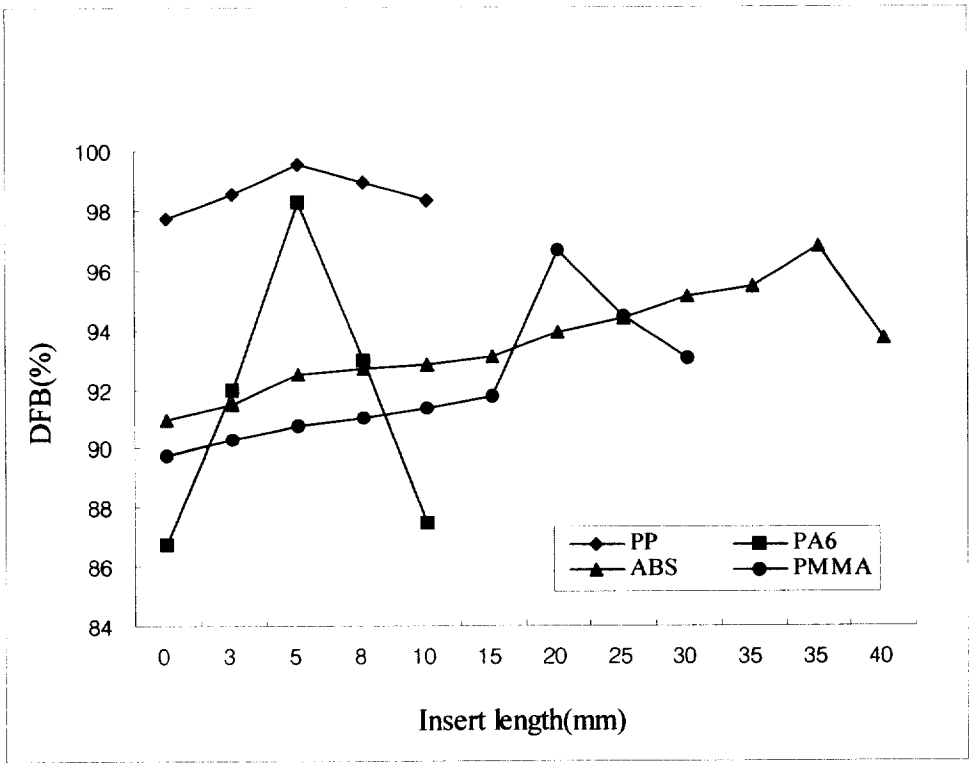


Fig. 4-10 DFB according to insert length of RC pin in various polymers

5. 결론

본 연구에서는 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 배열을 가진 다수 캐비티 사출금형에서 PP, PA6, ABS, PMMA, PC 등의 수지와 PA6에 유리섬유보강제를 첨가한 수지를 대상으로 2매구성 금형, 3매구성 금형, 핫러너 금형의 구조에서 편측분기형 러너배열과 양측분기형 러너배열에 대하여 균형충전도에 대한 실험연구를 수행하였다. 또한, 성형공정조건이 충전불균형에 미치는 영향도를 파악하기 위해 다구찌의 실험계획법을 이용하여 그 성형공정 인자들의 영향도를 알아보았다.

충전불균형에 대한 이론적 고찰과 실험연구결과를 이용하여 3매구성형 핀포인트 게이트 금형에서 균형충전이 가능한 새로운 금형구조인 4BF 금형구조를 제안하고 실험적으로 그 유효성을 확인하였으며, 또한, 새로운 4캐비티 이상의 사출성형용 금형에서 금형외부에서 RC pin을 미세조절할 수 있는 RC pin 금형구조를 제안하였으며, 그 유효성에 대해 실험한 결과 실용성을 검증할 수 있었다.

다음은 본 연구에서 얻은 주요 연구결과들이다.

(1) 비결정성수지(ABS, PC, PMMA)의 균형충전도는 약 60%~70%이며, 결정성수지(PA6, LDPE, PP)는 약 80%~90%로서 결정성수지가 비결정성 수지에 비해 균형충전도가 약 30%정도 높았으며, 이것은 각 수지의 온도민감도에 대하여 거의 반비례함을 나타낸다.

(2) 균형충전도에 가장 크게 영향을 미치는 성형공정조건은 사출속

도이며, 그 다음으로는 수지온도, 금형온도, 사출압력 순으로 나타났으며 그 비율은 대략 5 : 3 : 1 : 1 이다.

(3) 편측분기형 러너배열에서도 양측분기형 러너배열에서와 마찬가지로 충전불균형 현상이 발생하였다. 그러나 편측분기형 러너배열에서는 양측분기형 러너배열에 비하여 균형충전도가 약 10% 정도 개선되었다.

(4) PA6수지에 유리섬유보강제의 함유량을 증가시키면 균형충전도는 향상되며, 유리섬유의 함유량이 10% 정도 증가하면 균형충전도도 약 10% 정도 증가하였다.

(5) 핫러너 금형에서도 사출속도가 증가하면 균형충전도가 증가한다. 핫러너 금형에서의 균형충전도가 콜드러너 금형의 균형충전도에 비해 대략 10% 정도 향상되었다.

(6) 3매구성형 핀포인트게이트 금형에서 균형충전용으로 개발한 4BF몰드 구조를 적용한 결과 균형충전도가 약 60%에서 90%로 증가하여 그 유효성을 확인할 수 있었다.

(7) 금형외부에서 러너 코어핀의 삽입길이 조절이 가능한 외부 조절형 RC pin 금형구조에서 삽입길이에 따라서 PP, PA6, ABS, PMMA수지의 균형충전도가 97%~99.5%까지 나타났다.

참고문헌

1) 제덕근, “사출금형에 의한 스퍼드미터의 피동기어 슬리브 개발에 관한 연구” , 부산대학교 산업대학원, pp.5-6, 1997

2) 정영득, 박태원, 김현필 공역, “플라스틱 성형을 위한 알기 쉬운 금형설계” , 도서출판 인터비젼, pp. 224-227, 2003

3) Jack H. Young and J. P. Beaumont, "Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner System", Journal of Injection Molding Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 133-143, 1997

4) John P. Beaumont, Jack h. Young, and Matthew J. Jawoski, "Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds", Journal of Injection Molding Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 47-58, 1998

5) Ashwini Kumar, Aleksandra Egelja, Eric W. Grald and J. P. Beaumont "Experimental and Numerical Analysis of the Flow Imbalance in Runner System", ANTEC 2002, pp. 541-550, 2002

6) Heath E. Casaldi and Timothy Michel, "Process Window as Effected by Shear Induced Flow Imbalance in Multi-cavity Molds", ANTEC 2001, pp. 3112-3115, 2001

7) Christopher W. White, "Development of Filling Imbalances in Hot Runner Mold", ANTEC 99, pp. 3672-3676, 1999

8) Brock Allen and Tomas Lacey, "The Affects of Shear Induced

Imbalance on the Concentricity of Injection Molded Gears", ANTEC 2003, pp. 3757-3761, 2003

9) Louis G. Reifscheider, "Documenting Flow Segregation in Geometrically Balanced Runner", ANTEC 2001. pp. 3356-3360, 2001

10) Patrick Auell and Michel Bailey, "Effect of Thermoplastic Elastomer Material Properties on Mold Filling Imbalances", ANTEC 2002, pp. 3495-3499, 2002

11) David A. Hoffman and J. P. Beaumont, "Thermoset Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems", ANTEC 2001, pp. 842-846, 2001

12) J. P. Beaumont, "Runner and Gating Design Handbook", Hanser Publishers, pp. 114-119, 2004

13) J. P. Beaumont, "Runner and Gating Design Handbook", Hanser Publishers, pp. 115, 2004

14) Kevin Boell and J. P. Beaumont, "Controlling Balanced Molding through New Hot Runner Manifold Designs", ANTEC 2001, pp. 932-936, 2001

15) J. P. Beaumont, "Runner and Gating Design Handbook", Hanser Publishers, pp. 122, 2004

16) 강철민, 정영득, "다수 캐비티 사출금형에서 유리섬유보강제가 충전불균형에 미치는 영향", 대한기계학회 부산지부 2004년 춘계학술대회 논문집, pp. 120-123, 2004

17) K. T. Han, Y. Goo, B. T. Kim, Y. D. Jeong and S. R. Han, "A study on the filling imbalance in a geometrically balance injection mold", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 931-937, 2004

18) D. K. Je and Y. D. Jeong, "Filling imbalance in 3plate type injection molds with multi-cavity", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 2, No. 6, pp. 117-121, 2004

19) C. M. Kang and Y. D. Jeong, "The filling imbalance in multi-cavity injection molds with unary branch type runnner lay-out", Transaction of Material Processing, Vol. 13, No. 7, 2004

20) Jaime A. Cypher and Amanda M. Neely, "Examination of Method for Diagnosing Mold Filling Imbalances in New Multi-Cavity Molds", ANTEC 2003, pp. 3363-3367, 2003

21) J. P. Beaumont, "Revolutionizing Runner Design in Hot & Cold Runner Molds", ANTEC 2001, pp. 3680-3687, 2001

22) J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 56-58, 2002

23) J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 210-212, 2002

24) J. P. Beaumont, "Runner and Gating Design Handbook", Hanser Publishers, pp. 70, 2004

25) http://meltflipper.com/p&s/mf/cold/cause.html

26) Edited by Avraam I. Isayev, "Injection and Compression Molding Fundamental", Marcel Dekker. inc, pp. 80-85, 1987

27) J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 182-184, 2002

28) J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 100-101, 2002

29) G. Menger and P. Mohren, "How to make injection molding", Hanser, pp. 208-245, 1993

30) http://www.lsinjection.co.kr/kr/prod/sm3_n140_1.asp

31) J. P. Beaumont, R. Nagel and R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 118-128, 2002

32) Ranjit K. Roy, "Design of Experiments Using the Taguchi Approach", pp. 369-404, 2001

33) J. P. Beaumont, R. Nagel and R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 228-230,304, 2002

34) 송준엽, 박태원, 제덕근, 정영득, "재생 관통형 형판구조의 사출금형 개발", 한국 정밀공학회지, Vol. 20, No. 6, 2003

35) (주)브이엠테크, CAPA 사출성형해석 시스템, 2003

감사의 글

학문의 길에서 부족한 저를 고비마다 질책과 격려로 이끌어 주시고 학문하는 자세와 방향을 일깨워 주신, 그리고 본 논문의 시작부터 완성에 이르기 까지 온갖 배려와 지도를 아끼지 않으신 정영득 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 가운데서 본 논문의 주심을 맡아 지도해 주신 하만경 교수님과 세심한 지도와 엄격한 심사로 논문을 다듬어주신 구양 교수님, 곽재섭 교수님 그리고 정말로 바쁘신 일정 중에서도 세심하게 지도하여 주신 동의대학교 민병현 교수님께 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 학위기간동안 지도해 주신 부경대학교 기계공학과 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

또한 언제나 같이 있으면 즐거워지는 창원기능대학 박태원 교수님, 항상 사람좋은 부산기능대학 최윤식 교수님께 감사드립니다. 기계공학부 정밀성형실험실에서 학문과 함께 사진촬영을 좋아하는 한성렬 선생, CAE의 전문가 천윤석 선생, 언제나 열심인 한동엽 선생, 실험 및 자료정리를 도와주고 삼성전자로 간 강철민군, 마지막 실험을 함께했던 듬직한 석사과정 새내기 노병수군, 끝까지 함께 자료를 정리하고 논문작성을 도와주었던 슈퍼맨 문영배군, 모두 모두에게 좋은 학문적 결실을 기대하고 무조건 도와주었던 따뜻한 정들을 기억하겠습니다.
바쁜 중에도 실험 기자재를 만드는 데 애써 준 제산정공사 조병주 과장외 임직원들에게도 감사드립니다.

이 못난 자식을 언제나 자랑스러워하시고, 걱정해 주시고, 잘 되기를 기원해 주시는 아버님, 어머님께 내내 건강하시기를 빌면서 이 논문을 바칩니다. 그리고 삼척의 큰 여동생 내외, 서울의 작은 여동생, 부산의 동생 내외의 각 가정과 우리 가족 모두의 화목함이 오늘의 결실에 큰 힘이 되었음을 감사히 생각하고 있습니다. 믿음과 격려로 지켜봐 주신 장모님과 지금은 고인이 되신 장인어른께 감사드리고 처형, 처남에게도 감사드립니다.

석박사 과정의 뒤늦은 공부에 힘들어 할 때마다 특유한 격려로 힘내게 하고 가정에서나 회사에서나 항상 곁에서 그림자처럼 도와주는 아내 이미경에게 항상 감사한 마음을 갖고 있음을 전하고 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.

저를 아는 모든 분들께 감사의 말씀을 올리며 하시는 일들 모두 이루시길 빕니다.

2006년 1월 초순

제 덕 근