

공학석사학위논문

사출성형시
웰드라인 최소화에 관한 연구



2009년 12월

부경대학교 산업대학원

자동차공학과

신 성 호

공학석사 학위논문

사출성형시
웰드라인 최소화에 관한 연구



2009년 12월

부경대학교 산업대학원

자동차공학과

신 성 호

이 논문을 신성호의 공학석사
학위논문으로 인준함

2009 년 12월 16일



주 심 공학박사 강 대 민 인

위 원 공학박사 김 태 완 인

위 원 공학박사 정 영 득 인

목 차

1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	3
2. 사출 성형 공정	6
2.1 사출성형 공정의 개요	6
2.2 사출성형 공정의 과정	7
3. 웰드 라인	14
3.1 웰드 라인의 정의	14
3.2 웰드 라인의 종류	15
3.3 웰드 라인의 강도	17
4. 웰드 라인에 대한 실험 연구	22
4.1 서론	22
4.2 실험 내용 및 실험 방법	22
4.2.1 시편 금형 및 금형형상	38
4.2.2 사출 성형 해석 조건	38
4.3 실험결과 및 고찰	30
5. 사례 연구	36
5.1 Side protector 제품의 외관특성(제품소개)	36
5.2 Side protector 사출 성형 해석	38
5.2.1 사출 성형 해석 조건	38
5.2.2 사출 성형 해석 결과	42
5.3 Side protector의 금형 설계 및 제품	48

6. 결론 50

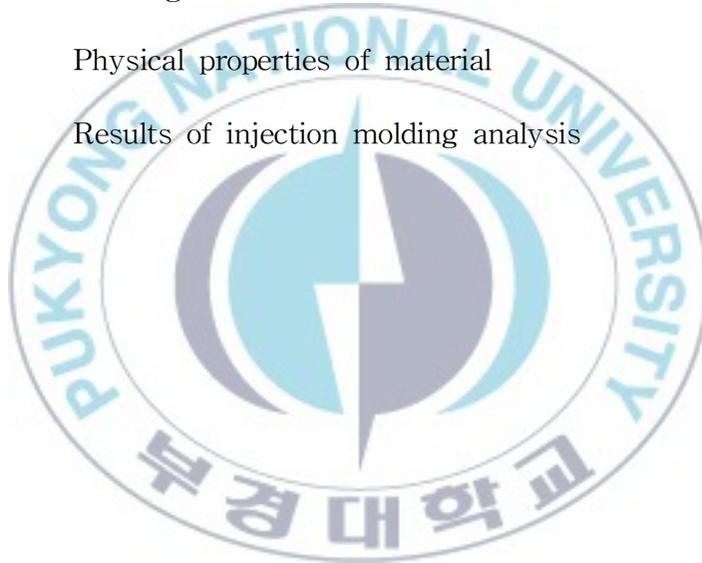
◎ 참고문헌 51

Abstract 53



List of tables

Table 3-1	Strength according to material type
Table 3-2	Weld line strength according to GF. wt
Table 4-1	Physical properties of PP and PA6
Table 4-2	Injection molding conditions
Table 5-1	Valve gate on-off time
Table 5-2	Physical properties of material
Table 5-3	Results of injection molding analysis



List of figures

- Fig. 1-1 Crack on the weld line
- Fig. 2-1 Injection molding cycle
- Fig. 2-2 Plasticization phase
- Fig. 2-3 Process of injection molding
- Fig. 3-1 Comparison between weld line and meld line
- Fig. 3-2 Formation of transient weld line
- Fig. 3-3 Weldline form with glass fiber
- Fig. 4-1 Experimental specimens
- Fig. 4-2 Experimental mold with 2 cavities
- Fig. 4-3 A shape of mesh model
- Fig. 4-4 Universal test machine
- Fig. 4-5 Surface roughness tester
- Fig. 4-6 Length of weldline according to flow rate
- Fig. 4-7 Angle of weldline according to distance
- Fig. 4-8 Depth of weldline according to distance
- Fig. 4-9 Tensile strength according to melt temperature
- Fig. 4-10 Tensile strength according to flow rate
- Fig. 4-11 Retention rate of tensile strength according to weldline
- Fig. 5-1 Side protector

- Fig. 5-2 Part, gate and runner model
- Fig. 5-3 Cooling channel
- Fig. 5-4 Properties of material
- Fig. 5-5 Flow pattern
- Fig. 5-6 Pressure distribution
- Fig. 5-7 Weld line
- Fig. 5-8 Total deflection
- Fig. 5-9 Side protector molding product
- Fig. 5-10 2D drawing of side protector mold



1. 서론

1.1 연구배경

최근 플라스틱의 사용이 급증함에 따라 플라스틱 산업에 많은 관심이 기울어지고 있다. 플라스틱 사출성형은 고분자 수지를 가열하여 유동상태가 된 재료를 금형의 캐비티(cavity)내로 가압, 주입하여 금형 내에서 냉각시킴으로써 성형품을 만드는 방법이다.^[1] 이전에는 플라스틱 제품의 외관품질에 대한 기대도가 중요시 되지 않았으나, 산업 고도화와 더불어 제품의 품질이 요구되는 현시점에서는 제품의 외관의 미려함과 제품의 강도 부분의 기능성이 품질의 기준으로 요구되고 있다. 품질의 향상을 위해서는 사출성형 시 발생하는 결함을 최소화하는 것이 요구되는 데, 성형불량의 예로는 웰드 라인(weldline), 플로우 마크(flow mark), 싱크 마크(sink mark), 보이드(void), 젯팅(jetting), 에어 트랩(air trap) 등이 있다.

이러한 성형불량중의 하나인 웰드 라인(weld line)은 수지의 서로 떨어져 있는 유동 선단이 만나면서 생성되는 현상으로 외관을 중요시하고 하는 제품의 표면부에 발생될 경우 품질저하의 원인이 되고, 제품의 강도도 급격히 저하되기 때문에 설계자에게는 심각한 문제점으로 인식되고 있다.^[2,3] 사출성형품의 성형과정에서 제품내의 구멍이 있거나 수지가 진행하다가

방향이 바뀌고 다시 만나게 되면 특히 웰드 라인이 형성되는데 이는 성형품의 품질부분에 기계적, 구조적으로 더 많은 품질불량을 야기 시킨다.^[4,5]

일반적으로 사출 성형품의 품질은 수지(material), 금형(mold), 제품(part), 공정 조건(process conditions) 등의 다차원 설계 공간(multi-dimensional design space)에 의해 총체적으로 결정된다. 따라서 웰드 라인과 같은 성형 불량이 최소화되는 고품질의 성형품을 얻기 위해서는 각 설계 변수들을 동시에 제어할 수 있어야 하며 이는 이들 변수들의 최적 설계에 달려있다고 하겠다.^[6] 본 연구는 성형완제품의 품질저하의 원인이 되고 있는 웰드 라인(weld line)의 최소화에 목적을 두었으며, 본 연구결과는 사출성형품의 외관품질 불량을 최소화하여 완성 제품의 품질향상에 기여하고, 또한 완성제품의 품질향상으로 인해 국내 자동차 메이커의 브랜드 이미지를 향상 시키는데 기여 할 것이다.

1.2 연구목적 및 내용

1.2.1 연구 목적

산업분야에서 플라스틱 제품이 주로 사용되는 제품으로는 통신 분야의 하우징(housing), 장식부품(decoration part), 의료용의 주사용품(syringe component), 그리고 자동차 분야의 노브(knob), 계기판(instrument panel) 등에 응용되고 있고, 그 외 다수의 제품에 플라스틱이 많이 사용되고 있다.

플라스틱 사출성형에 있어서 제품의 외관 품질보증 및 안정성을 위해서는 최초 금형 설계 시 제품에서 발생하는 여러 가지 결함들이 고려되어 설계되어야 하고, 그 후 최적화된 사출공정에 의해 이러한 결함들을 최소화 시켜야 한다. 특히, 웰드 라인은 제품디자인 시 균일한 살두께를 유지하여 유동 지체가 없도록 설계되어야 하며, 웰드 라인을 피할 수 없다면 금형 설계 시 게이트 위치 및 크기를 변경하여야 한다.

산업현장에서는 지금도 웰드 라인이 발생하는 금형이 적용되고 있으며, 웰드 라인 최소화를 위하여 시행 착오법에 의하여 사출조건을 변경하거나 후 공정에서 도장을 하여 사용되고 있지만, 이는 원론적인 해결책이 되지 못한다. 웰드 라인이 높은 응력이 발생하는 곳에 생성되면 극단적인 경우, Fig. 1.1과 같이 웰드 라인 발생부에 크랙(crack)이 발생하고, 웰드 라

인의 깊이가 깊게 생성될 경우, 도장 공정 이후에도 외관 품질을 보증할 수 없다.

이에 본 연구에서는 웰드 라인 생성에 관한 기초 실험연구를 거친 후 차량의 Side protector에 대하여 Mold flow 6.1을 통하여 유동, 보압, 냉각 해석을 실시하여 그 결과를 분석하고 웰드 라인을 최소화 할 수 있는 방안을 제시하였으며, 실제의 성형 실험을 통하여 결과를 비교, 분석하여 Side protector 표면에 발생하는 웰드 라인을 최소화하고자 한다.



Fig. 1.1 Crack on the weld line

1.2.2 연구 내용

본 연구에서 수행한 연구내용으로는 첫째, 사출성형 공정에 웰드 라인 최소화에 대한 기존의 연구결과를 문헌 및 자료연구를 통하여 사출성형의 이론 정리, 이를 기반으로 하여 게이트 위치조절 및 금형의 온도조절을 통하여 웰드 라인을 최소화 시킬 수 있는 대안을 제시하였다.

두 번째로는 ABS, PP, 2가지 종류의 수지를 대상으로 하여 시편을 추출하여 발생하는 웰드 라인을 측정하는 방법을 사용하여 Mold flow MPI 6.1 해석 프로그램의 결과 값과 동일한 위치에 웰드 라인이 생성되는 것을 확인하였고, 인장실험을 수행하여 웰드 라인이 생긴 부분의 플라스틱의 강도를 실험하고 그 결과에 대해 고찰하였다.

마지막으로 차량의 외관품으로 사용되고 있는 Side protector 제품을 대상으로 다점 게이트에서 발생하는 웰드 라인을 제거할 수 있는 방안을 제시하고 성형 해석을 통하여 러너 시스템 및 냉각 시스템 결정에 대한 방법을 제시하고자 한다.

2. 사출 성형 공정

2.1 사출성형 공정의 개요

고분자 재료는 용융상태에서 압력에 의해 압축성 점탄성 유동을 하며 동시에 심한 열전달 및 상변화를 하게 된다. 열가소성 수지의 사출성형은 플라스틱 수지를 유용한 제품으로 변환시키는 가장 보편적인 공정이다. 이러한 플라스틱 사출성형은 큰 생산성을 보장하지만, 성형품질을 결정하기 어려우며 사출 과정을 제어하기 어려운 단점이 있다.

사출성형공정은 Fig. 2-1과 같이 수지의 충전, 보압, 냉각, 형개, 이젝팅, 형폐의 기본공정 단계로 나뉘어 진다.

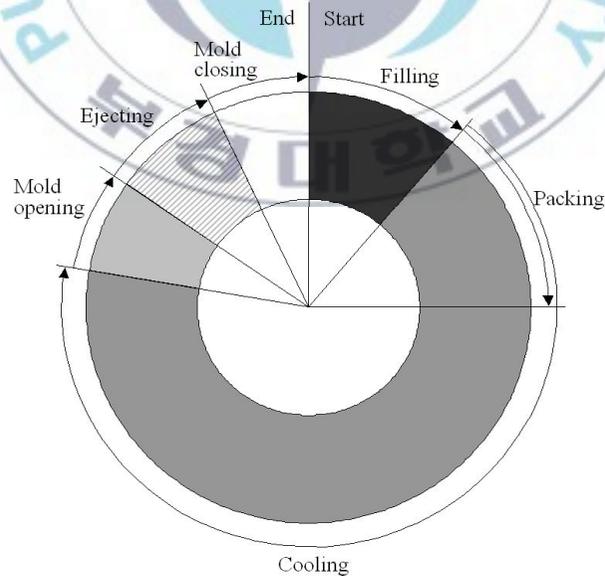


Fig. 2-1 Injection molding cycle

2.2. 사출성형 공정의 과정

Fig. 2.2 는 가소화 과정(plasticization phase)을 나타내어 놓은 것으로, 가소화 과정은 2mm ~ 3mm 크기의 펠릿(pellet)으로 공급되는 수지 컴파운드를 사출성형기의 호퍼에 투입되는 것으로 시작되는 것으로 다음 사이클을 위해 필요한 만큼의 수지를 용융시키는 동작이다. 컴파운드의 수분 제거와 청결을 유지하기 위해 여러 가지의 예비조치가 필요하며, 이후 중력 혹은 기계적 방법으로 호퍼(hopper)에 주입된 분말이나 고체상태의 수지가 스크류의 회전과 병진운동으로 배럴(barrel)을 따라 진행하면서 전단력과 가열기(heater)에 의한 열로 용융된다. 이 과정에서 건조기를 설치하여 수지 내의 습기를 충분히 제거한다.

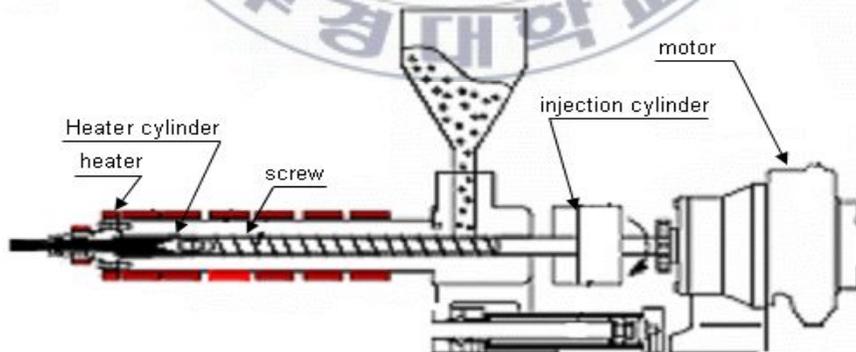


Fig. 2-2 Plasticization phase

Fig. 2-3은 각 사출성형공정 중에 일어나는 사출유닛에서의 스크류의 위치와 금형내의 충전상태를 공정별로 나타낸 것이다.

(1) 충전 단계(filling phase)

스크류 구동장치에 연결된 유압 실린더가 용융된 수지를 스프루 부싱(sprue bushing)을 통하여 캐비티에 연결된 러너(runner)속으로 밀어 넣는 단계이다.

(2) 압축 단계(packing / compression phase)

사출속도 제어 단계에서 보압력 제어로 넘어가는 천이과정으로서, 캐비티가 충전됨(통상 95%~97% 정도의 충전)과 동시에 고압을 작용하여 수지를 압축한다. 통상 이때 최대압력(peak pressure)이 작용한다.

(3) 보압 단계(holding phase)

냉각을 통한 수지의 수축률을 보상하기 위해, 수지가 고화되어 유동성이 없어질 때까지 고압을 유지시켜서 캐비티 체적 이상의 추가의 수지를 Cavity 내로 밀어 넣는다.

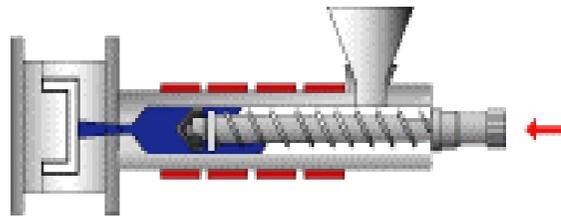
(4) 냉각 단계 및 이젝팅 (cooling phase & ejecting)이 반대편의 금형과 성형품을 밀어내어 탈착한다. 이 과정과 동시에 다음의 성형을 위한 1단계 작업이 진행된다.

사출성형 공정해석 프로그램 및 사출기에 따라서는 충전 단계와 보압

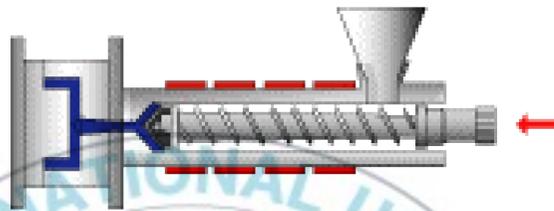
단계를 합쳐서 보압 과정(holding process, packing process)이라 하기도 하고, 충전단계와 보압 단계를 연이은 공정으로 함께 고려하는 경우도 있다. 충전단계의 냉각은 냉각단계의 보압 과정에서 실제로 시작되며, 전 공정에 걸쳐서 금형 및 캐비티에 냉각효과를 가지고 있다.

냉각단계의 설정은 사출성형기에 따라 시간, 스크류 스트로크(screw stroke), 압력, 형체력 등 4가지 중 한 가지 방법으로 정하게 되어있으며, 각각 미리 정해진 값에 도달하면 전환을 하게 된다.

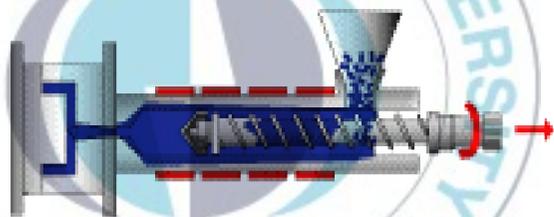




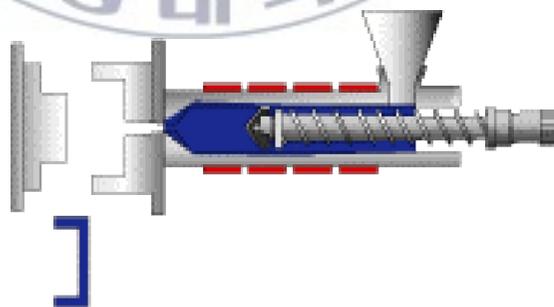
(a) Filling process



(b) Packing process



(c) Cooling process



(d) Ejecting process

Fig. 2-3 Process of injection molding

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

유동을 보장하기 위해서는 스크류 선단과 유동선단 사이에 압력구배가 유지되어야 한다. 캐비티에 충전되었을 때에도 게이트 근처에는 가장 높은 압력을 가지며 성형품 내에는 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 고화층 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, 강제 대류와 두께별 온도구배는 제로(zero)로 된다. 플라스틱 유동 중에 생

긴 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 넣어야 한다. 이와 같은 유동은 유동경로가 유체상태를 지속하는 한 계속된다. 낮은 압력구배와 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 취출 온도까지 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. 성형

제품이 취출 온도까지 냉각되면 성형기는 금형을 열게 하여 제품을 캐비티로부터 취출시킨다.^[7]



3. 웰드 라인

3.1 웰드 라인의 정의

웰드 라인(weld line)은 2개 이상의 용융수지의 유동선단들이 서로 만나게 될 때 형성되는 선^[8]으로서 제품의 홀(hole)이나 인서트(insert), 다점 게이트 시스템(multi-gate-system) 또는 정체(hesitation)나 레이스-트래킹(race-tracking)이 일어나는 제품의 두께 변화에 의해 일어날 수 있으며 유동경로의 길이가 서로 다를 경우 또한 일어날 수 있다. 이러한 웰드 라인이 외관을 중시하는 제품의 표면위에 나타날 경우에는 외관품질이 떨어지고 특히, 웰드 라인이 발생하는 곳에는 강도 저하가 일어나 기계적, 구조적 특성에 큰 영향을 미친다.

이러한 웰드 라인의 형성을 피하기 위하여 여러 가지 연구^[9,10,11]가 진행되고 새로운 사출공법이 개발되고 있으며, 부득이 웰드 라인을 피할 수 없다면, 웰드 및 멜드 라인은 게이트의 위치와 크기를 조정함으로써 낮은 응력이 발생하는 곳과 잘 안 보이는 곳에 위치하도록 하고 있다. 또한 웰드 라인의 강도를 향상시키기 위하여 웰드 라인의 생성 위치에 국부적인 온도와 압력을 증가시키고 있다.

3.2 웰드 라인의 종류

웰드 라인의 종류는 크게 웰드 라인, 멜드(meld) 라인 및 천이(transient) 웰드 라인의 총 3가지로 구분된다. 웰드 라인과 멜드 라인의 구분은 수지의 선단이 만나는 접촉각의 크기로 구분하며, 일반적으로 접촉각의 크기가 135° 보다 적으면 웰드 라인이라 하고 접촉각의 크기가 135° 보다 크면 멜드 라인이라 한다. 웰드 라인은 멜드 라인에 비해 상대적으로 적은 분자 확산이 일어나므로 품질 저하의 정도가 높다.^[12]

천이 웰드 라인은 유동 선단이 서로 만난 후 유동 방향이 변경될 때 생성하는 것으로 유동 선단이 최초 접촉 시 그 위치에 웰드 라인이 발생하나 유동시 고화층이 증가하여, 그 부위에서 마찰열에 의한 재용융이 되어 다른 방향으로 유동이 시작되어 웰드 라인의 위치도 변경되는 현상을 말한다.

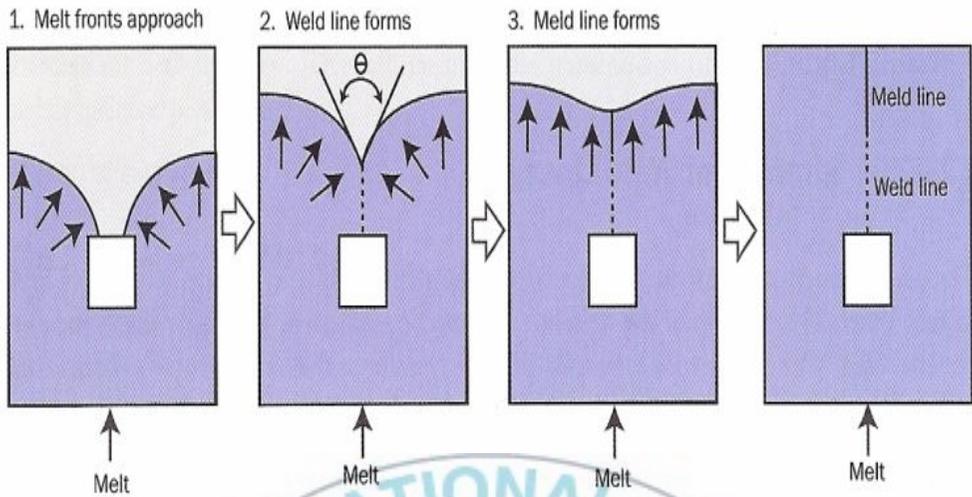


Fig. 3-1 Comparison between weld line and meld line

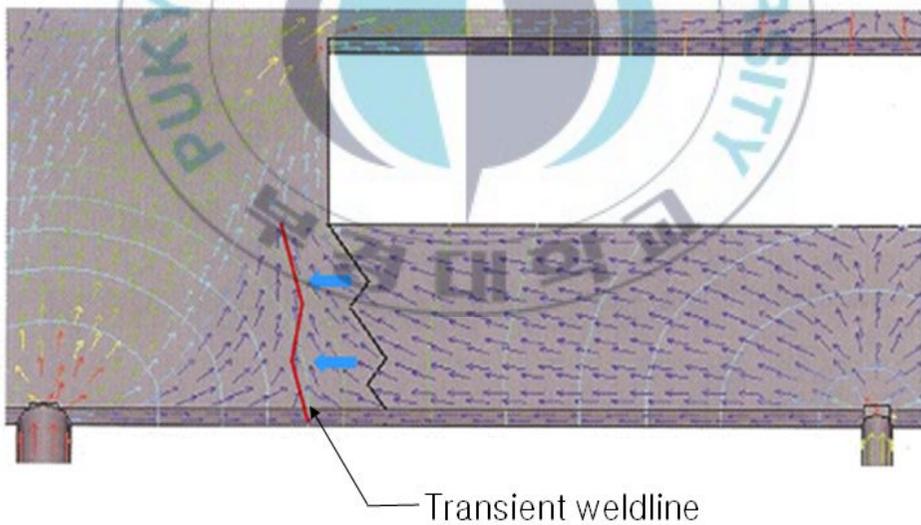


Fig. 3-2 Formation of transient weld line

3.3 웰드 라인의 강도

웰드 라인의 강도는 서로를 결합시키는 유동선단의 성능에 의해 좌우된다. 웰드 라인 부근의 강도는 일반적인 순수 수지의 10 ~ 90 % 정도이다. 이렇게 넓은 범위가 가능하기 때문에 더 나은 웰드 라인 수주에 도달하기 위한 조건은 매우 중요하며, 이를 결정하는 중요한 요소는 재료, 성형조건, 제품설계이다.

3.3.1 재료

웰드 라인의 강도는 성형품의 재료의 특성에 따라 크게 달라진다. 일반적으로 비결정성 수지(amorphous)에 비하여 결정성 수지(semi-crystalline)가 웰드 라인의 인장강도가 높게 나타나며, 특히 Polysulfone, PA66, PC는 아주 강한 인장 강도를 가지고 있다. Table 3-1은 일반적인 수지에 대한 웰드 라인의 강도를 나타내어 놓은 것이다. 비결정성 수지에 비하여, 결정성 수지가 웰드 라인의 강도가 높게 나타나며, 섬유보강제가 함유된 수지는 웰드 라인의 강도가 저하됨을 볼 수 있다.

웰드 라인의 강도는 재료에 안료, 윤활제, 난연제와 같은 섬유재료가 함유될 때 강도 저하를 발생시킨다. Fig. 3-3은 섬유재료가 함유될 때의 웰드 라인 형성 모습을 나타낸 것이다. 섬유가 웰드 라인을 연결시키지 못

하고 웰드 라인에 대해 평행하게 배향됨을 볼 수 있는데, 이러한 현상 때문에 섬유재료가 포함된 수지의 웰드 라인 강도는 감소하게 된다.

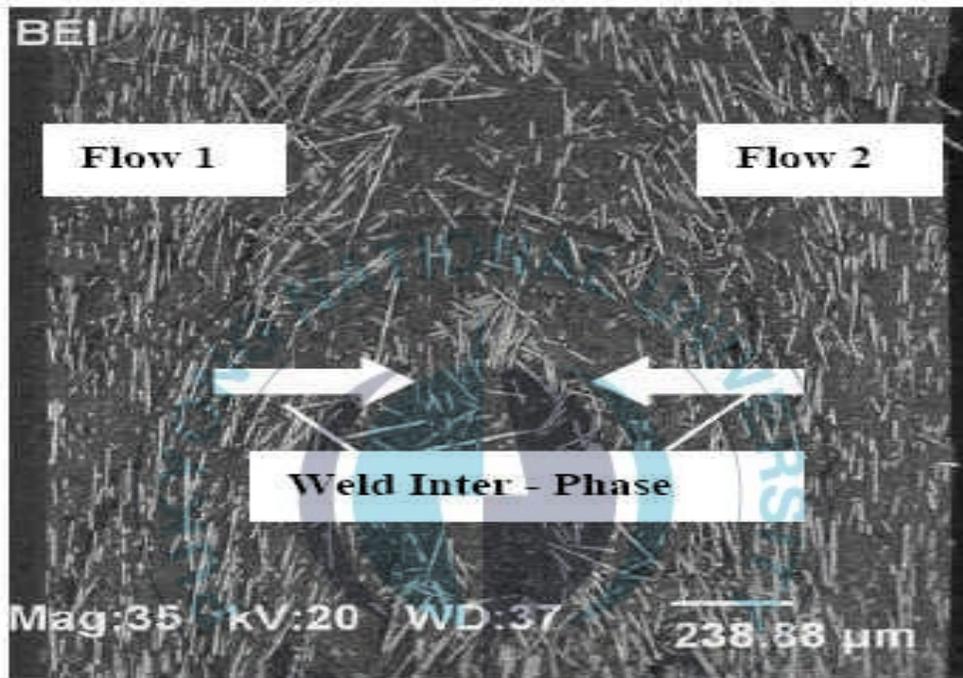


Fig. 3-3 Weldline form with glass fiber

Table 3-1 Strength according to material type

Material Type	strength	Resin	Strength
Amorphous	0.4~0.95	PS	0.75
		PC	0.85
		PPS	0.83
		SAN(AS)	0.8
		ASA	0.85
Semi-crystalline	0.85~1.0	PP	0.86
		POM	0.8~0.9
		HDPE	0.92
GF reinforced (dep. On fiber content)	0.5~0.95	PA6-GF	0.6
		PC-GF	0.55 ~ 0.65

Table 3-2 Weld line strength according to GF. wt^[13]

Resin	GF wt. [%]	Tensile strength [%]
PA6	0	99.2
	14	66.6
	33	46.2
	50	37.8
	63	36.5
PSU	30	62
SAN	30	40
PP	20	67
	30	64
PPS	10	38
	40	20
PA66	10	87~93
	30	56~64

3.3.2 성형 조건

웰드 라인의 강도는 성형조건에 의하여 크게 변화한다. 웰드 라인의 강도를 강하게 하기 위해서는 수지온도를 높이고, 사출속도를 빠르게 하며, 사출압력을 증가시키는 것이 일반적인 방법이다. 사출속도와 수지 및 금형 온도의 증가는 웰드 라인의 품질을 향상시키며, 빠른 사출속도는 수지가 고화되기까지의 시간을 줄이고, 마찰열을 발생시켜 웰드 라인의 강도를 향상시키고, 높은 수지온도는 수지가 서로 잘 섞이도록 한다. 비결정성 수지의 경우는 수지온도가 웰드 라인의 강도에 가장 크게 영향을 나타내며, 결정성 수지의 경우에는 수지온도, 금형온도, 사출율은 웰드 라인에 미치는 영향력이 작게 나타난다.

3.3.3 제품 설계

웰드 라인의 강도는 제품 및 금형의 설계에 따라서도 크게 영향을 미친다. 웰드 라인이 발생하는 제품은 금형 설계시 게이트 또는 러너의 크기를 증가시켜 웰드 라인의 발생을 최소화 하고, 웰드 라인이 형성되는 부분에 통기 구멍을 설치하여 웰드 강도가 악화 되는 것을 방지한다.

또한 웰드 라인을 게이트 부에서 가까운 부분에 발생하도록 하여 웰드 라인이 발생 시 접촉 온도를 높게 한다. 제품 설계 시에는 제품의 살두께

를 균일하게 하여 유동 정체나 레이스 트랙킹 효과에 의한 월드 라인 형성을 피한다.



4. 웰드 라인에 대한 실험 연구

4.1 서론

본 연구는 결정성 수지 PP(polypropylene)와 비결정성 수지 ABS(acrylonitrile butadiene styrene)를 대상으로 하여 몇 가지 성형조건에 따른 웰드 라인의 길이 및 웰드부의 유동선단의 접촉각에 따른 웰드 라인의 변화를 사출성형 CAE 프로그램을 이용하여 실험하였으며, 이 결과를 참조하여 실제 사출성형실험을 통하여 웰드 라인의 길이, 깊이 및 기계적 강도 변화를 조사하였다.

본 연구의 결과는 사출성형품의 웰드 라인의 생성을 최소화하고, 웰드 부위의 강도를 최대로 할 수 있는 성형조건을 찾아내어 실제 금형설계와 성형현장에서 적용할 수 있는 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

4.2 실험 내용 및 실험 방법

4.2.1 시편 및 금형형상

사출 성형된 제품에서 웰드 라인의 깊이와 길이, 기계적 특성을 알아보기 위하여 Fig. 4-1 과 같이 두 가지 시편을 사용하였다. Fig. 4-1 (a)는 인장시험용 시편(이하 인장시편)으로써 ASTM D638의 규격을 따랐다. 성형조건에 따른 웰드 라인의 강도를 비교하기 위해 양측에 게이트를 두었

고, 웰드 라인이 없는 시편을 성형하기 위해 한쪽 러너를 막아서 성형할 수 있는 구조의 실험금형을 설계, 제작하였다. Fig. 4-1 (b)는 성형조건에 따른 사각구멍 뒤에 생기는 웰드 라인의 길이와 깊이를 파악하기 위한 시편(이하 인서트코어 시편)으로써 사각구멍은 게이트에서 시편길이의 약 1/3 지점에 두었다. Fig. 4-2는 콜드슬러그웰(cold slug well)이 있는 사다리꼴 단면의 러너를 갖는 금형의 캐비티 형상을 나타낸다. 사다리꼴 러너는 상측 폭은 6.2 mm, 하측 폭은 5 mm, 높이는 4 mm이다. 게이트는 모든 시편에서 팬게이트(fan gate)를 사용하였고 폭은 12.2 mm, 두께는 2 mm이다.



Fig. 4-1 Experimental specimens



Fig. 4-2 Experimental mold with 2 cavities

4.2.2 재료

사출성형에 사용되는 플라스틱 재료는 대부분 열가소성 수지 (thermoplastic resin)로 열가소성 수지는 다시 결정성 수지 (semi-crystalline resin)와 비결정성 수지(amorphous resin)로 나뉜다. 결정성 수지는 명확한 용점을 갖고, 고분자 폴리머(polymer)가 조밀한 결정을 이루기 때문에 냉각 시 수축이 큰 특성이 있다. 이에 반해 비결정성 수지는 용점이 불분명하고 비교적 수축이 작은 특성이 있다. 본 연구에서는 결정성 수지와 비결정성 수지의 웰드 라인 특성을 관찰하기 위하여 결

정성 수지는 PP를, 비결정성수지는 ABS를 사용하였다. PP수지는 GS Caltex 사의 Hi-Prene M540을, ABS수지는 Basf 사의 Terluran GP-22를 사용하였다. 실험에 사용된 수지의 물성치는 Table 4-1에 나타내었다.

Table 4-1 Physical properties of PP and ABS

Physical properties	Unit	Test Method	PP	ABS
			M540	GP22
Tensile Strength	MPa	ISO527	33	41
Flexural Modulus	MPa	ISO178	1,450	2,100
Rockwell Hardness	MPa	ISO2039-1	71	84
IZOD Impact Strength (Notched 23°C)	KJ/m ²	ISO179	13	37
Specific Gravity	g/cm ³	ISO1183	0.91	1.04
Melting temperature	°C	ISO3146-C	200	220
Heat Distortion Temperature (18.6kg Load)	°C	ISO75	95	97
Rate of Molding Shrinkage	%	DIN16901	1.0~2.5	0.4~0.7
Flammability	-	UL-94	HB	HB

4.2.3 실험 조건

성형 조건 중에서 웰드 라인에 영향을 주는 인자로는 금형온도, 수지온도, 사출속도, 보압 등이 있는 것으로 알려져 있다.^[14] 본 연구에서는 웰드 라인의 길이와 깊이를 알아보기 위해 수지온도, 사출속도, 보압의 세 가지 성형조건을 실험조건으로 선택하고 그 외 금형온도, 사출압력 등의 조건은 각 수지가 성형될 수 있는 기본조건으로 고정하고 LG 기계에서 제작한 형체력 140톤의 직압식 수평형 타입을 사용하여 실험을 실시하였다.

각 조건별로 수지에 맞는 기준조건을 선정하여 수지온도는 기준조건에서 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 범위를, 사출속도는 $\pm 30\%$ 범위를, 보압은 $\pm 40\%$ 범위를 실험조건으로 선정하였다. Table 4-2는 실제 성형조건을 정리한 것이며, 음영 처리된 조건은 각 수지별 기준조건을 나타낸 것이다.

Table 4-2 Injection molding conditions

Condition	Unit	ABS	PP
Melt Temperature	℃	230	210
		240	220
		250	230
Flow Rate (Max.206 cm ³ /s)	%	35	35
		50	50
		65	65
Packing Pressure (Max.1550 kg/cm ²)	%	40	40
		60	60
		80	80

4.2.4 사출성형 CAE

사출성형 CAE 프로그램은 Mold flow MPI 6.1을 사용하였으며 실험에서 선정된 조건 변화에 따른 모든 경우에 대하여 실제 실험과 같은 성형 조건 하에 해석을 수행하였다. 또한, 사출성형시 발생하는 웰드 라인 현상과 성형 조건과의 관계를 알아보기 위하여 실제 금형과 동일한 시편과 러너를 모델링 하였으며 메쉬 타입은 1차원 미드플랜 메쉬(midplane mesh)를 사용하여 성형해석을 수행하였다. Fig 4-3은 사출성형해석에 사용된 메쉬모형을 나타낸 것이다.

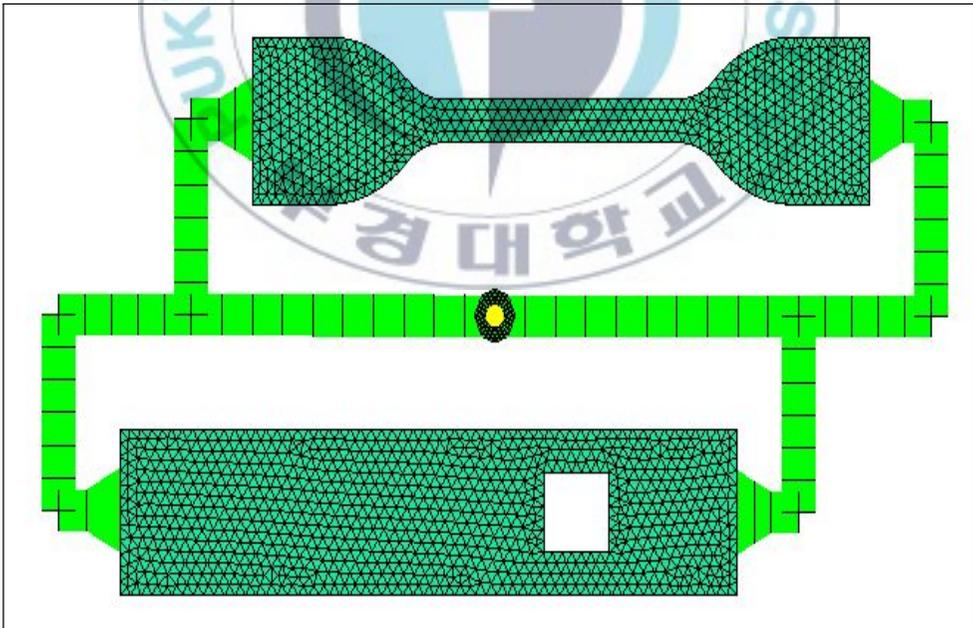


Fig. 4-3 A shape of mesh model

4.2.5 결과 측정 방법

웰드 라인의 강도 측정을 하기 위하여 플라스틱 만능 시험기(universal test machine)을 사용하여 인장 시험시 시험 속도는 50 mm/min, 최대 인장하중은 2000N, 최대 인장길이는 150mm로 모든 시편에 동일하게 적용하였다. 웰드 라인의 깊이를 측정하기 위해서는 Time group Inc.의 Hand-held Roughness Tester TR200을 사용하였고, 웰드 라인의 깊이와 길이 측정을 위하여 웰드 라인의 시작 시점인 사각 구멍에서부터 1mm 씩 간격을 두어 표면 조도를 측정하여 웰드 라인이 없는 부위의 표면 거칠기 값이 나타날 때 까지 측정하였다. Fig. 4-4와 Fig. 4-5는 측정 장비를 나타내고 있다.

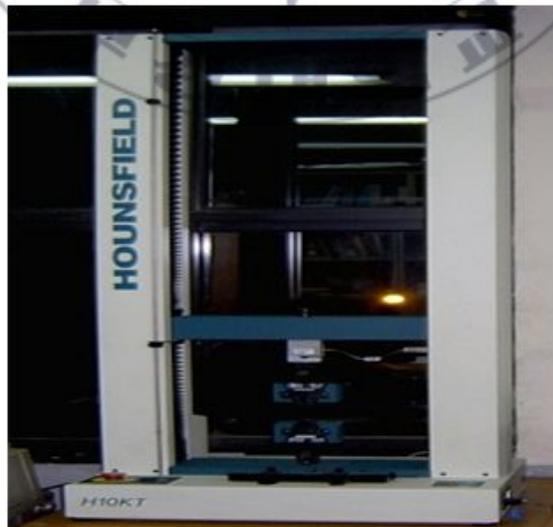


Fig. 4-4 Universal test machine



Fig. 4-5 Surface roughness tester

4.3 실험 결과 및 고찰

4.3.1 인서트 코어 시편의 웰드 라인 길이

Fig. 4-6은 인서트코어 시편의 사출속도에 따른 웰드 라인 길이변화를 나타내고 있다. ABS와 PP 수지 모두 사출속도가 빠를수록 웰드 라인의 길이가 증가하는 경향을 보였으며, PP보다 ABS가 그 증가폭이 더 크게 나타났다. 그러나 수지 온도와 보압은 웰드 라인의 길이에 별다른 영향을 주지 않았다. 사출속도가 빠를 때 웰드 라인의 길이가 길어지는 것은, 빠른 사출속도가 용융수지의 유동선단의 온도의 감소 없이 빠른 유동이 진행되어 유동선단의 접촉 길이를 더 연장시킬 수 있기 때문이라 예측된다.

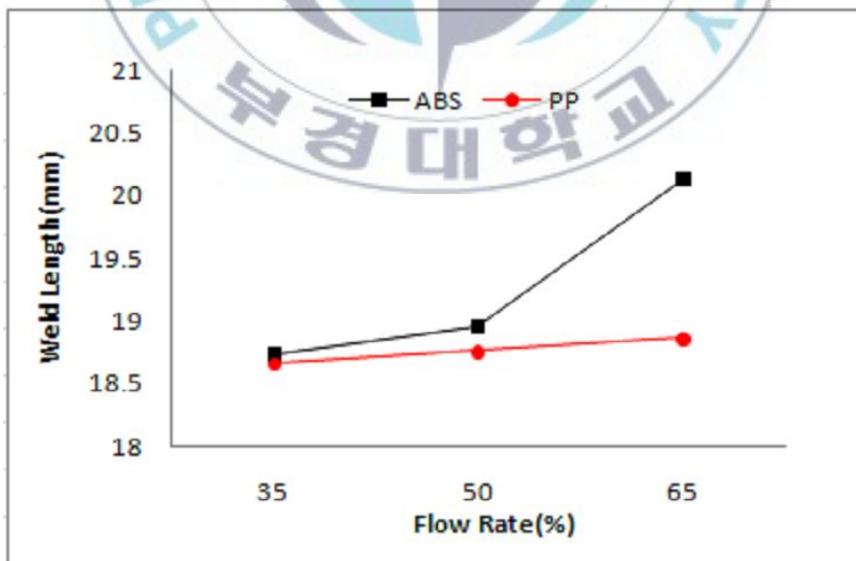


Fig. 4-6 Length of weldline according to flow rate

4.3.2 인서트 코어 시편의 웰드 라인 깊이

Fig. 4-7은 사출성형 CAE 해석결과에서 나타난 웰드 라인의 각 위치별 접촉각을 나타낸 것이다. ABS와 PP 수지 모두 사각 구멍의 후면으로부터 3 mm 떨어진 지점에서 접촉각이 가장 작은 값을 나타내었다. 수지온도와 보압은 웰드 라인의 접촉각에 영향을 주지 않았으며, PP와 ABS의 수지종류의 차이에 따라서는 접촉각의 변화에 크게 영향을 주지 않았다.

Fig. 4-8은 웰드 라인의 각 위치별 깊이를 보여준다. ABS와 PP 모두 웰드 라인의 깊이가 사각구멍의 후면으로부터 3 mm 떨어진 지점에서 가장 깊게 나타났다. 웰드 라인 접촉각에 대한 CAE 해석결과는 수지의 종류와 관련이 없었던 것과는 달리 ABS의 웰드 라인의 깊이가 PP보다 더 깊게 나타나는 경향을 보였다.

기존의 연구^[13]와 동일하게 수지의 접촉각이 작을수록 웰드 라인의 깊이는 깊어지는 것으로 나타났다. 또한 최초 웰드 라인 형성 후 웰드 라인을 따라 계속 유동이 발생하면서 웰드 라인의 깊이가 얕아지는 웰드 라인의 발생 메커니즘에 따라 웰드 라인의 깊이가 가장 깊은 위치는 웰드 라인이 형성된 후 가장 빨리 고화되는 용융수지의 최초 합류지점인 것으로 나타났다.

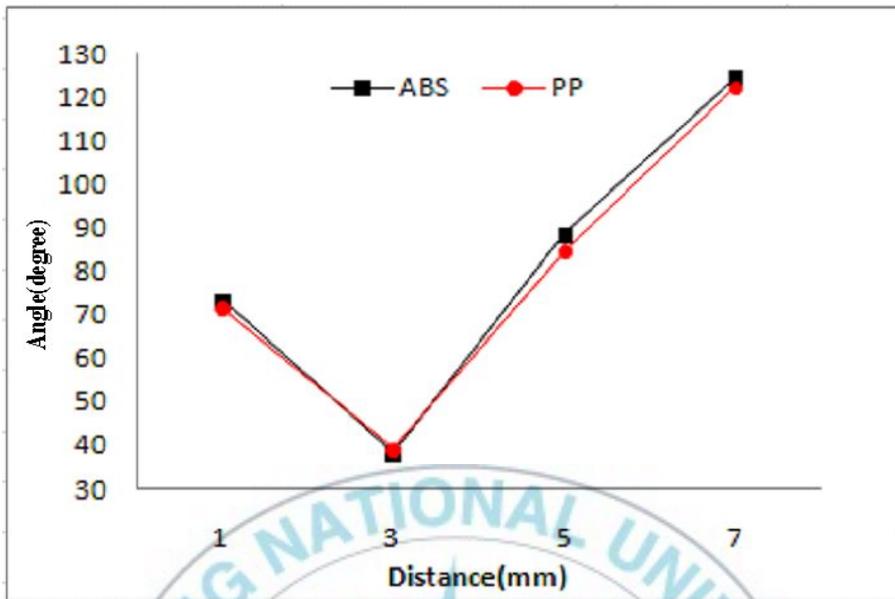


Fig. 4-7 Angle of weldline according to distance

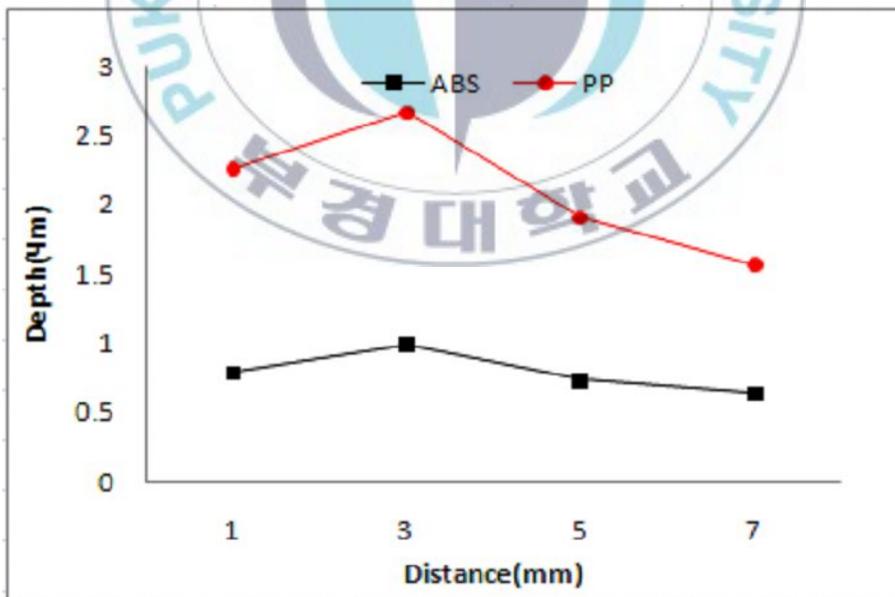


Fig. 4-8 Depth of weldline according to distance

4.3.2 인장 시편의 강도 측정

Fig. 4-9는 수지온도에 따른 ABS와 PP 인장시편의 인장강도를 나타낸 것이다. ABS와 PP 모두 수지온도가 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 보였다. PP의 경우 수지온도가 너무 높으면 강도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 웰드 라인 강도에 대한 다른 연구^[5] 결과와 유사한 것으로 PP수지의 경우 비교적 온도에 민감하기 때문에 높은 수지온도에서 점도 변화율이 커지므로, 이에 따라 웰드 라인 부위의 접합성이 감소하여 강도가 감소되는 것으로 사료된다.

Fig. 4-10은 사출속도에 따른 인장강도를 나타낸 것이다. ABS와 PP 모두 사출속도가 빠를수록 인장강도가 증가하는 경향을 보였다. 사출속도가 빠를 때 웰드 라인 강도가 더 강해지는 것은 용융수지가 더 빨리 캐비티 내부를 채우므로 용융수지의 온도가 높은 상태로 유지되어 고화층이 더 얇게 형성되기 때문에 웰드 라인의 깊이가 얕아지게 되어 인장강도가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 4-11은 각 수지별 인장시편의 웰드 라인 유무에 따른 인장강도를 비교하여 나타낸 것이다. 알려진 바와 같이 웰드 라인이 발생하였을 때는 웰드 라인이 없을 때의 90 %이상의 강도를 유지하였으며, 실험 조건 내에서는 수지별로 3~5 %의 강도변화를 보였다.

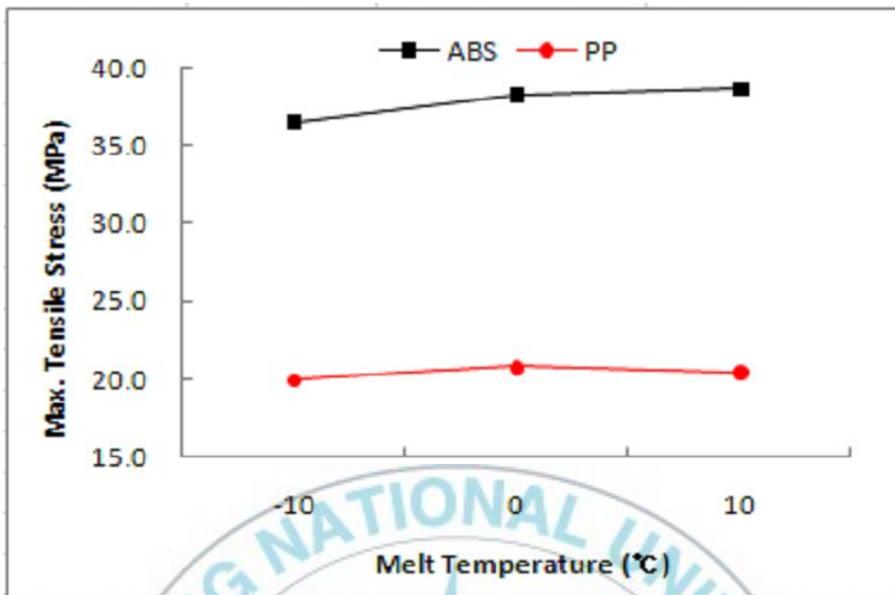


Fig. 4-9 Tensile strength according to melt temperature

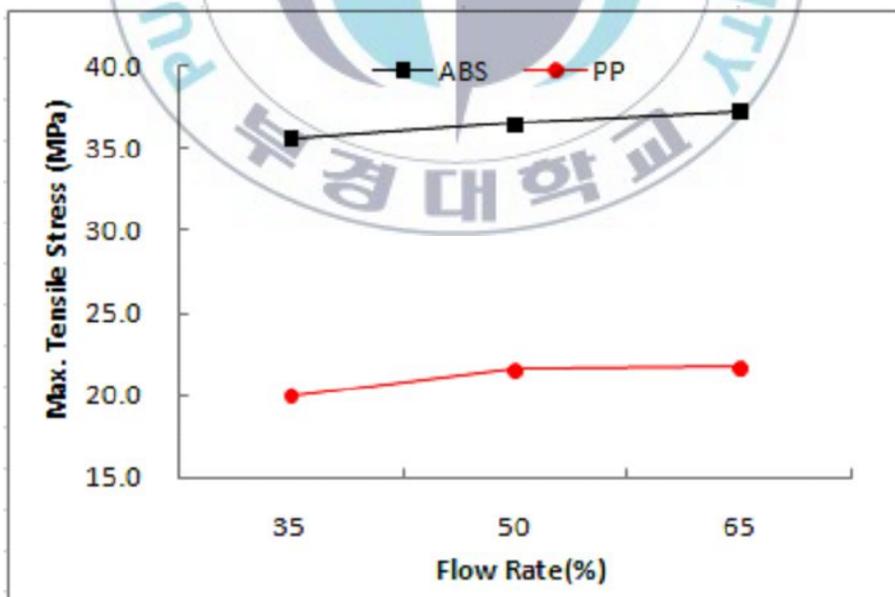


Fig. 4-10 Tensile strength according to flow rate

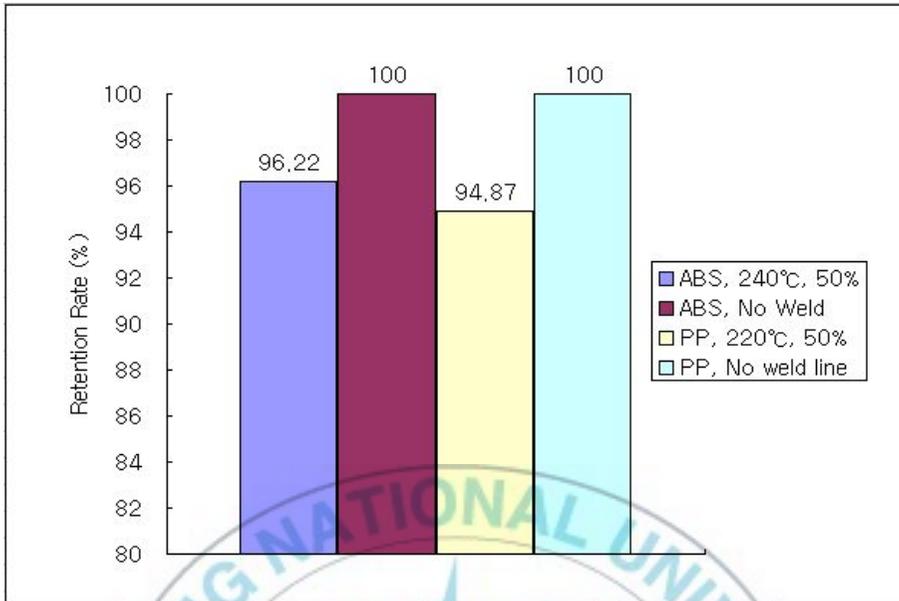


Fig. 4-11 Retention rate of tensile strength according to weldline



5. 사례 연구

5.1 Side protector 제품의 외관 특성(제품소개)

플라스틱 사출 성형은 산업이 고도화됨에 따라 적용 범위가 넓고 다양해지고 있다. 사출성형 공정은 대량생산이 가능하며, 복잡한 형상이 표현 가능하고, 반복 치수정밀도가 높아 대량 생산이 이루어져야 하는 외관 제품에 많이 적용되고 있다. 특히, 자동차의 외관 및 내장 부품에도 사출공정에 의한 플라스틱 제품이 넓게 적용되고 있는 상황이다.

자동차 외관 부품 중의 하나인 Side protector 제품도 사출성형 공정에 의해 성형되는 제품으로 Fig. 5-1과 같이 Side protector 제품은 자동차의 도어 외관에 위치하여 차량의 보호뿐만 아니라 디자인 측면에서도 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 Side protector 제품은 단축과 장축의 길이가 약 10배 이상 차이가 나는 제품으로 성형 조건 설정 및 힘의 문제가 까다롭고, 특히 이 제품은 다점 게이트를 가지는 금형 구조에 의해 성형되므로 다점 게이트에서의 공정상에 피할 수 없는 웰드 라인이 발생하여 외관 품질에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 현재 차량에 적용되고 있는 Side protector 제품에 대하여 웰드 라인을 해소할 수 있는 방안으로 밸브 게이트(valve gate)에 의한

시퀀스 제어(sequence control) 방법을 제안하고 이에 대하여 Mold flow 6.1 사출 성형 해석 프로그램을 이용하여 유동해석(flow), 냉각해석(cool) 및 휨(warpage) 해석을 수행하여 그 결과를 금형 설계에 적용하고 최적 성형 조건을 도출 하였다.



Fig. 5-1 Side protector

5.2 Side protector 사출 성형 해석

5.2.1 사출 성형 해석 조건

사출성형 해석프로그램은 플라스틱 대형제품에 가장 널리 쓰여 지는 Mold flow insight 6.1을 사용하였으며, Side protector 제품에 대하여 2D 미드플랜(midplane) 메쉬(mesh)를 모델링하였고 러너 시스템은 1D 빔(beam) 메쉬를 생성하여 성형해석을 실시하였다.

제품의 형상은 긴 평판형 제품이며 장축의 길이는 약 944mm, 단축의 약 100mm이며, 제품의 평균 살두께는 2.8mm 이다. 러너와 게이트는 Fig. 5-2와 같으며, 직경 12mm 의 핫러너와 밸브게이트를 채용하였다.

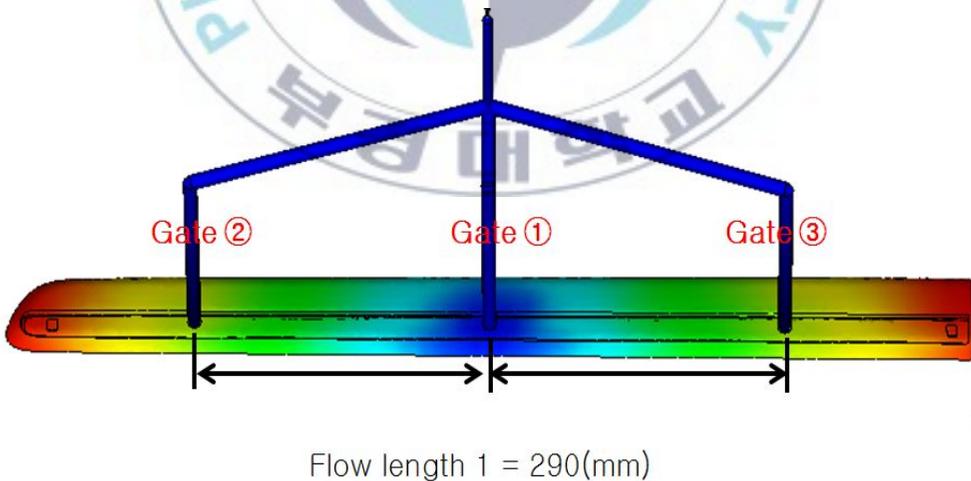


Fig. 5-2 Part, gate and runner model

냉각 채널은 Fig. 5-3과 같이 캐비티측, 코어측 모두 배플(baffle) 타입의 냉각 채널로 설계되었으며, 캐비티측과 코어측의 냉각수 입수 온도를 각각 다르게 설정하였다.

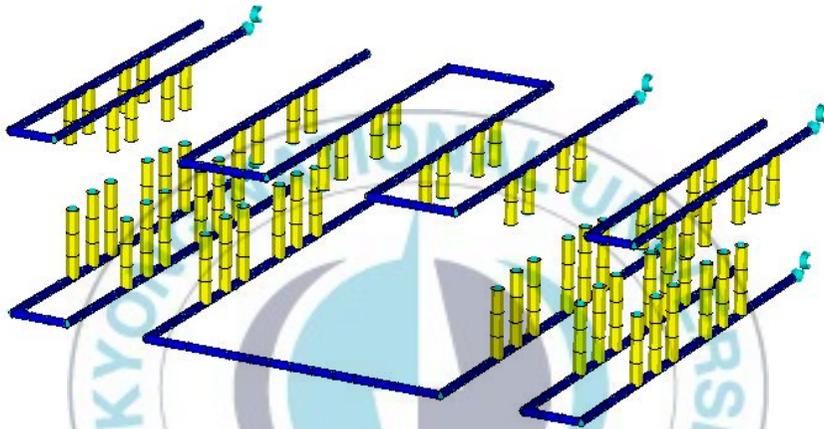


Fig. 5-3 Cooling channel

밸브 게이트의 제어 조건은 2가지 조건에 대하여 설정하였으며 조건 1에서는 중앙(1번 게이트)를 먼저 열고 1.47초 후 양쪽 게이트를 동시에 닫았다. 조건 2에서는 2번 게이트를 먼저 열고 난 후 순차적으로 1번, 3번 게이트를 열었다. Table 5-1은 성형 해석상의 밸브게이트의 열리고 닫히는 시간을 나타낸 것이다. 해석에서 사용된 수지는 ABS(LG chemical ABS XR-401)이며 Table 5-2는 이 수지의 물성치를 나타내

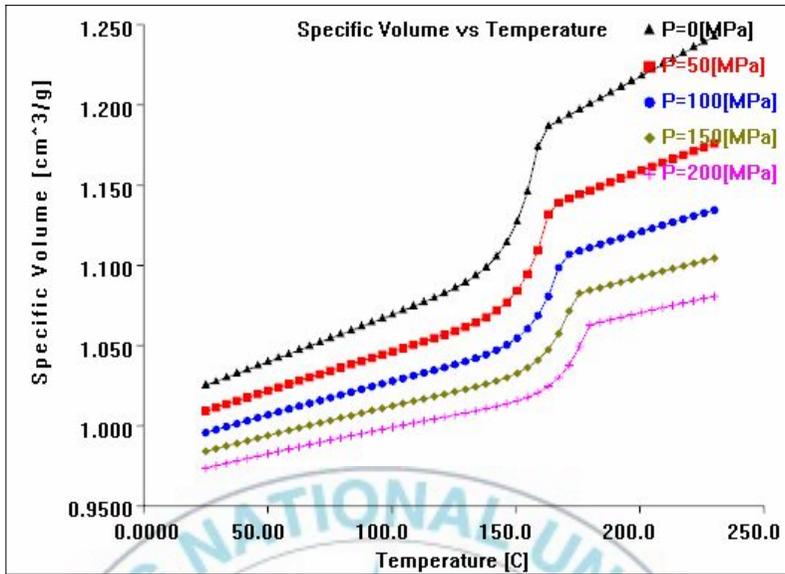
었다. 또한, Fig. 5-4는 ABS XR-401의 PvT 선도와 점도모형을 각각 나타낸 것이다.

Table 5-1 Valve gate on-off time

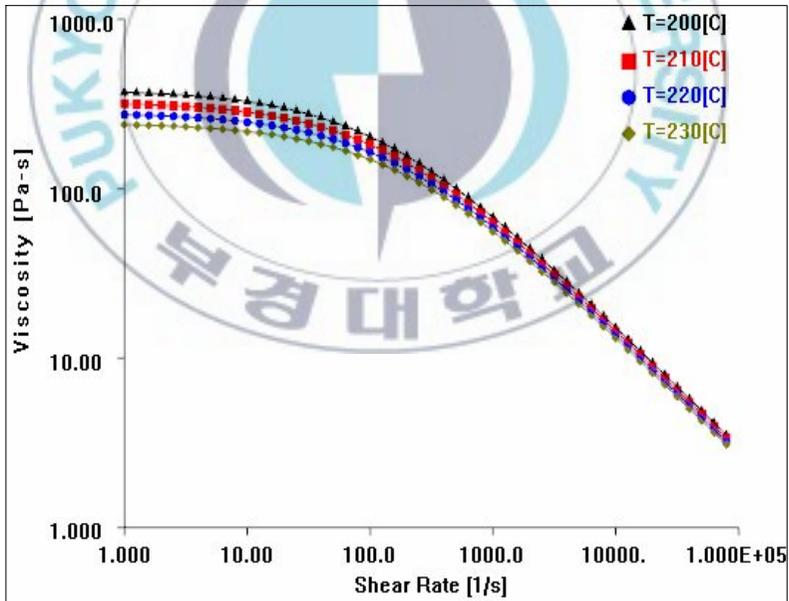
	Gate 1		Gate 2		Gate 3	
	open	close	open	close	open	close
Condition 1	0 sec	30.1 sec	1.47 sec	30.1 sec	1.47 sec	30.1 sec
Condition 2	1.25 sec	30.1 sec	0 sec	30.1 sec	1.84 sec	30.1 sec

Table 5-2 Physical properties of material

Manufacturer		LG chemical	
Trade name		ABS XR-401	
Family Name		ABS	
Density	Melt	g/cm ³	0.92192
	Solid	g/cm ³	1.0429
Melt Mess-Flow Rate		g/10min	-
Ejection Temperature		℃	90
Transition Temperature		℃	103
Melt Temperature	Min.	℃	235
	Max.	℃	275
	Suggested	℃	255
Mold Temperature	Min.	℃	40
	Max.	℃	80
	Suggested	℃	60
Max. Shear Stress		MPa	0.3
Max. Shear Rate		1/s	50,000



(a) PvT diagram



(b) Viscosity diagram

Fig. 5-4 Properties of material

5.2.2 사출 성형 해석 결과

Side protector 성형품을 밸브 게이트 조건에 따라 성형해석을 한 결과, 모든 조건에 대하여 미충전 현상은 발생되지 않았다. Fig. 5-5에서 보는 바와 같이, 조건 1에서는 양 끝단이 동시에 충전되는 양호한 패턴을 보였으나 조건 2에서는 밸브게이트의 제어 방식이 제품의 가장 좌측부터 먼저 열리고 중앙, 우측 순으로 열리게 되었으므로 좌측이 충전되어 100% 충전 될 때까지 좌측에 유동정체가 발생하게 된다. Fig. 5-6은 성형 압력을 나타낸 것으로 조건 1에서는 49.81 MPa 로 낮게 나타났으며, 조건 2에서는 60.15 MPa 로 나타났다. 충전 100% 완료시 캐비티 내의 압력 분포는 모두 약 30 MPa 이하로 양호하게 나타났다.

제품 성형 시 가장 고려되어야 할 부분 중의 하나인 웰드 라인의 결과를 Fig. 5-7에 나타내었다. 조건 1과 조건 2의 해석 결과 모두 밸브 게이트 순차 제어를 통하여 다점 게이트에서 나타나는 웰드 라인의 문제점을 개선 할 수 있었다. 미미하게 나타나는 웰드 라인은 리브와 모서리 부위이며 이 부위는 제품 외관상 보이지 않는 부분으로 성형 시 문제가 없을 것으로 판단되었다.

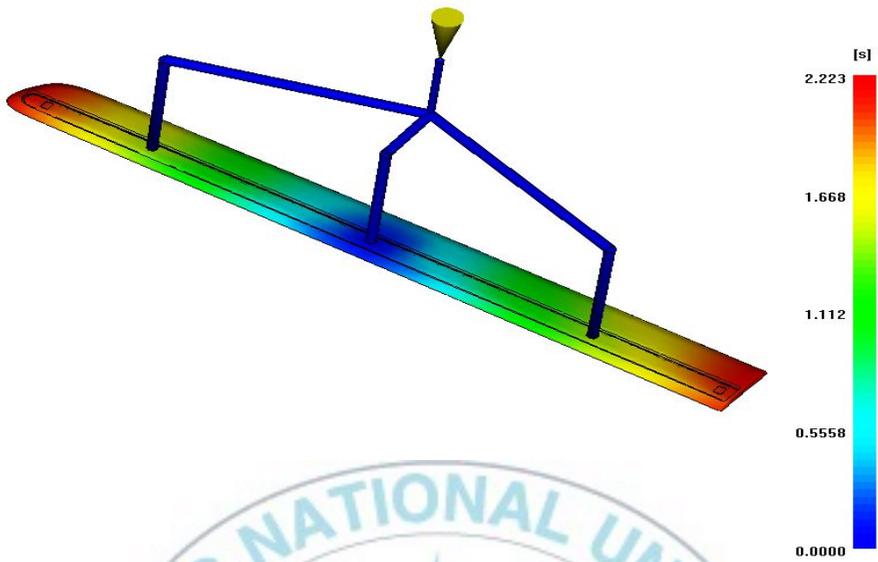
Fig. 5-8은 변형량의 결과를 나타낸 것으로 조건 1에서는 4.985 mm로 나타났으며, 조건 2에서는 8.758 mm 로 나타났다. 이는 조건 2에서는 좌

측부터 충전되어 오면서 유동 정체가 발생하여 보압이 제품의 끝단까지 충분히 전달되지 않은 것으로 사료된다.

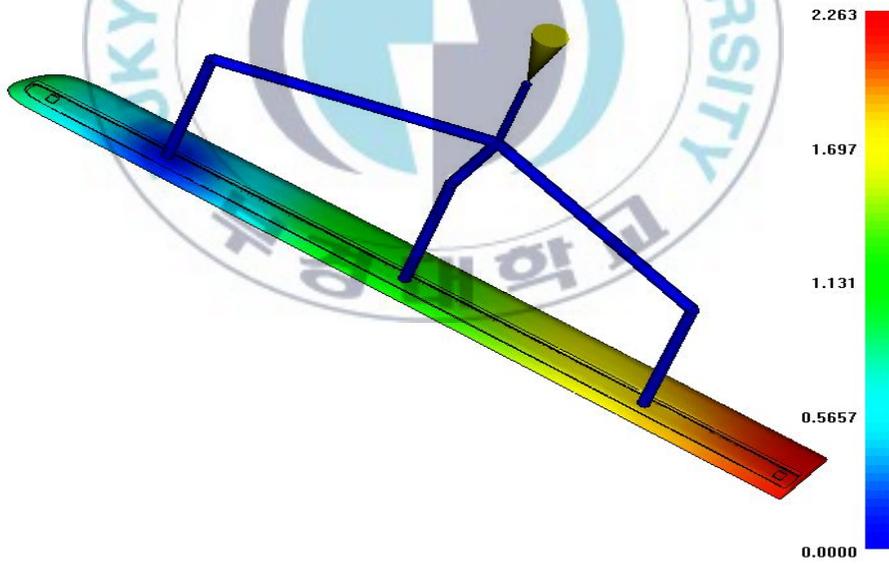
Table 5-3은 해석 결과 값을 비교하여 나타내었다. 그 결과 1차 해석결과가 가장 양호하게 나타났으며 이 설정값을 실제 설계에 반영하였다.

Table 5-3 Results of injection molding analysis

			1st simulation		2nd simulation	
condition	melt temp.(°C)		255		255	
	mold temp.(°C)	cavity	40		50	
		core	60		50	
result			measure	level	measure	level
	fill time (sec)		2.22	great	2.26	great
	cycle time(sec)		35.1	good	60.14	poor
	pressure(MPa)		49.81	great	60.15	good
	clamp force(ton)		435.92	great	595.26	good
	deflection(mm)		4.985	great	8.758	poor
	weld line		-	great	-	great
synthesis valuation			great		poor	

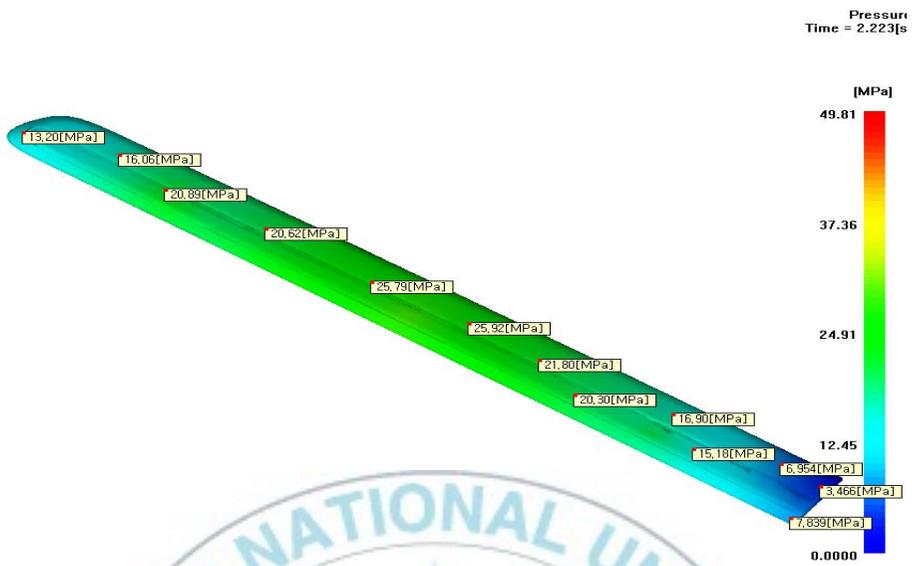


(a) 1st simulation



(b) 2nd simulation

Fig. 5-5 Flow pattern

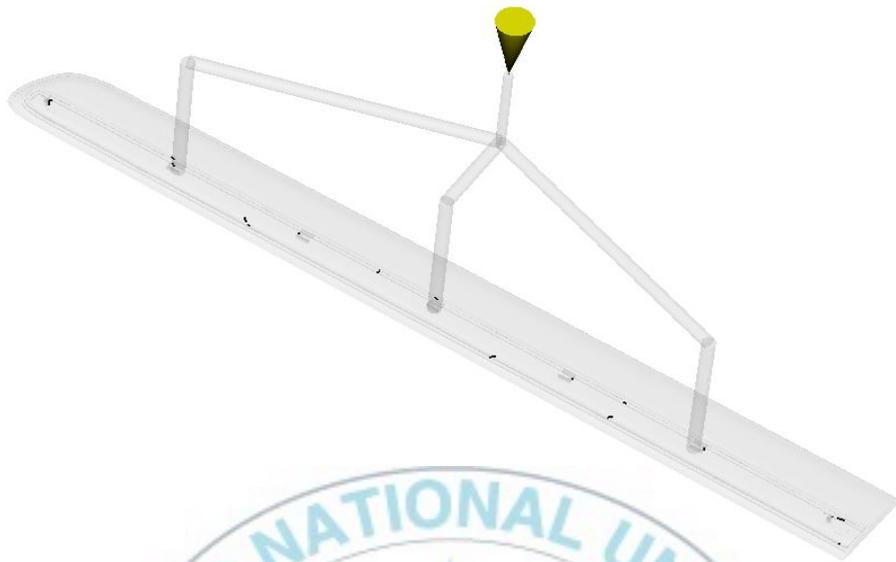


(a) 1st simulation



(b) 2nd simulation

Fig. 5-6 Pressure distribution

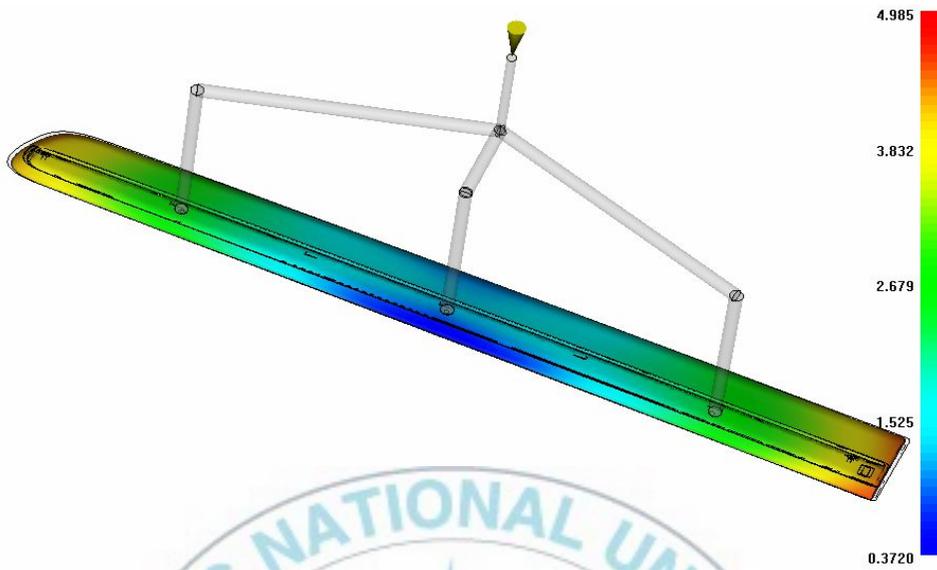


(a) 1st simulation

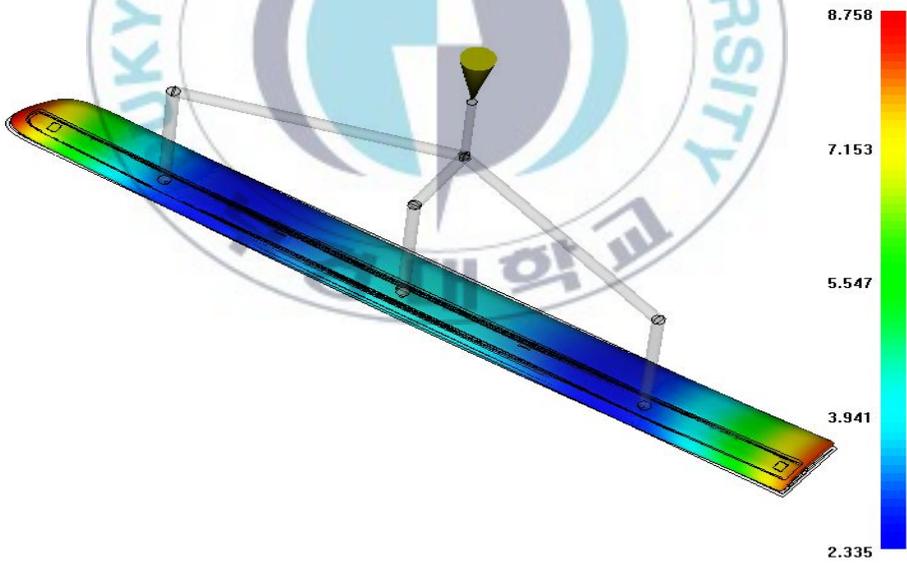


(b) 2nd simulation

Fig. 5-7 Weld line



(a) 1st simulation



(b) 2nd simulation

Fig. 5-8 Total deflection

5.3 Side protector의 금형 설계 및 제품

Side protector 금형은 Fig. 5-9와 같이 매니폴드와 핫드롭을 채용하였으며, 6점의 밸브게이트를 갖춘 2캐비티 구조의 핫러너 금형으로 설계하였다. 냉각수와 러너 구조는 성형해석 결과를 토대로 설계하였으며 해석 상에서 도출된 휨 값을 이용하여 역설계를 실시하였다. 수지는 성형해석에서 사용한 ABS XR-401을 사용하였다. 시험사출 결과물을 Fig. 5-10에 나타내었으며 양호한 제품을 나타내었다. 외관상의 결함으로 의심되던 웰드 라인은 나타나지 않았으며, 휨의 값은 1mm 이내로 아주 양호하게 나타났다. 결함의 문제가 약간 나타났으나, 이후 공정단계에서 수정 보완할 수 있었다.

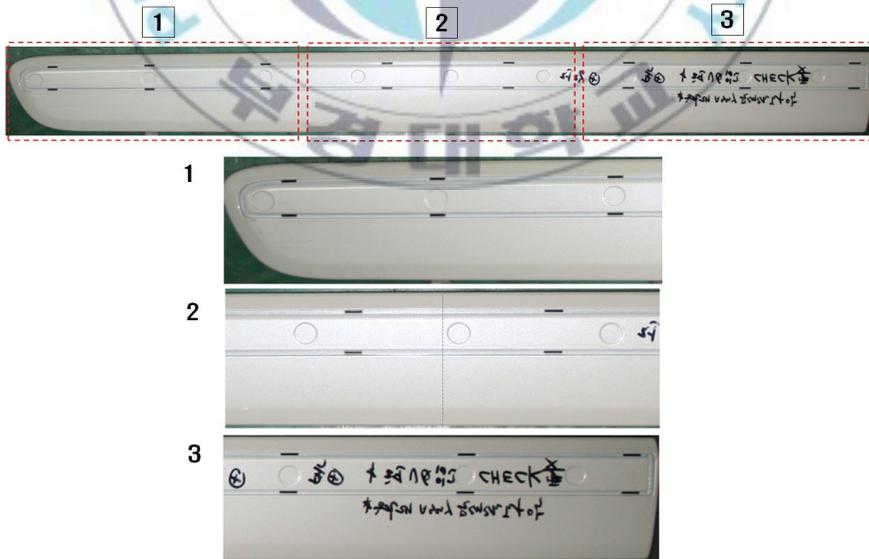


Fig. 5-9 Side protector molding product

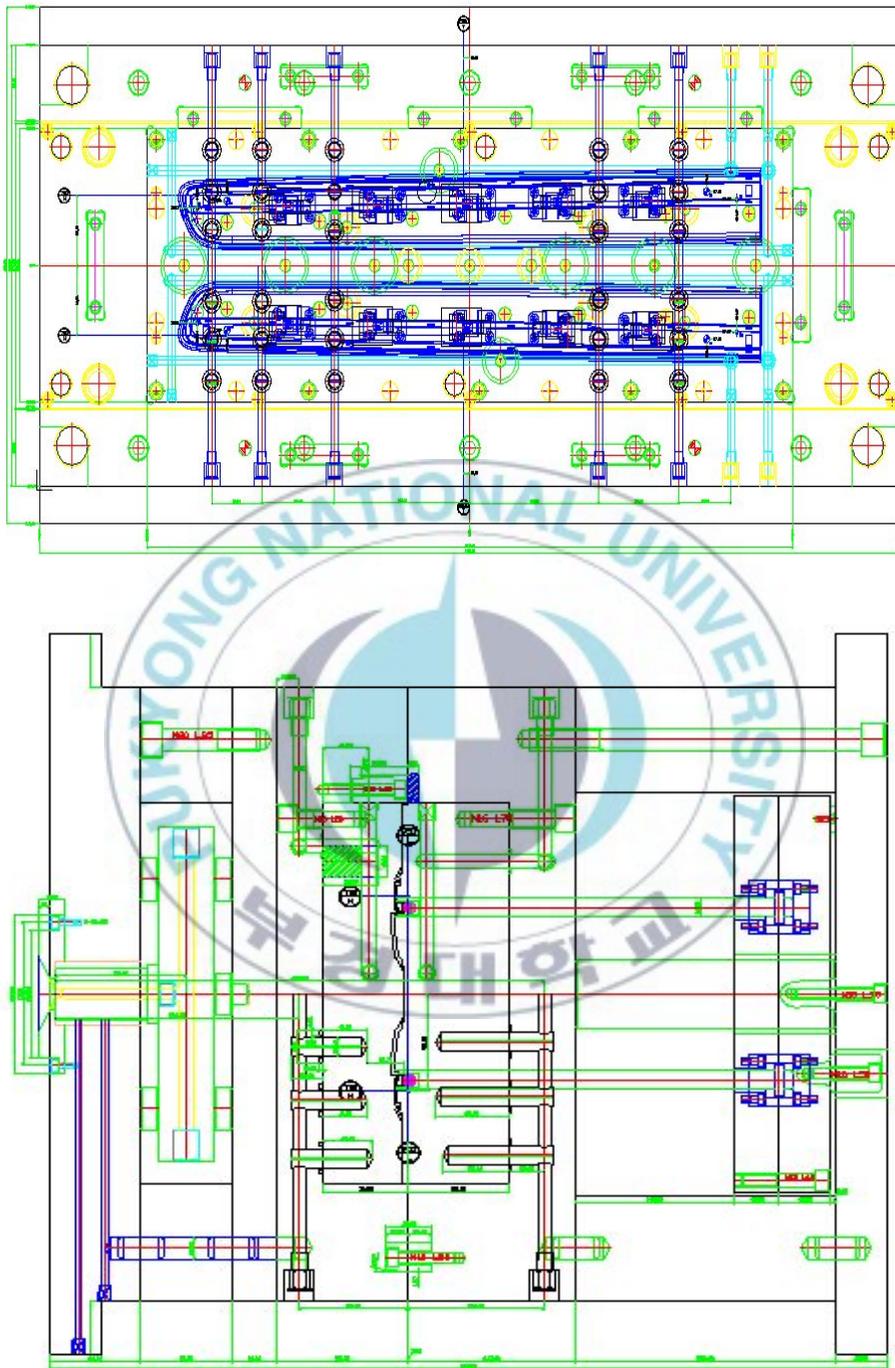


Fig. 5-10 2D drawing of side protector mold

6. 결 론

본 연구에서는 사출성형에서 발생될 수 있는 웰드 라인에 대하여 이론적인 고찰을 실시하고, 수지에 따른 웰드 라인의 강도와 사각형 형태를 지나서 생성되는 웰드 라인 시험편에 대하여 실험을 실시하여 조건에 따른 웰드 라인 깊이 및 생성 각도를 알아보았다. 또한 사례 연구를 통하여 실제 제품에서 발생하는 웰드 라인을 피할 수 있는 방법을 제시하고 성형 해석을 실시하여 금형을 제작하고 시험 서출을 실시하였다. 본 연구의 주요한 결과들은 다음과 같다.

(1) 웰드 라인의 깊이는 사출속도가 증가할수록 깊어지며, 수지온도와 보압에는 영향을 받지 않았다. 웰드 라인의 깊이는 용융수지의 최초합류지점 위치에서 가장 깊으며, 수지온도, 사출속도 및 보압에는 큰 영향을 받지 않았다. 또한, PP가 ABS 수지보다 웰드의 깊이가 더 깊게 나타났다.

(2) 웰드 부위의 인장강도는 사출속도와 수지온도가 높을수록 증가하며, 보압에는 영향을 받지 않았다.

(3) Side protector 제품에 대하여 웰드 라인을 피할 수 있는 방법으로 밸브 게이트 순차 제어 방법을 제시하였으며, 성형 해석을 통한 금형 설계 및 사출 공정으로 성공적인 제품을 확보할 수 있었다.

◎ 참고문헌

- (1) E. C. Bemhardt, "CAE-computer Aided Engineering for Injection Molding", Hanser Publishers, pp. 275~324, 1983
- (2) S. Fellahi, A. Meddad, B. Fisa, and B. D. Favis, "Weldlines in Injection-Molded Parts : A Review", Adv. Polym. Tech, Vol. 14, No. 3, pp. 169~195, 1995
- (3) D. Yao, "Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage and Weldlines in Injection Molded Parts", Masters Thesis, University of Massachusetts, MA., pp. 40~43, pp. 80~88, 1998
- (4) G. P. Gardner, R. A. Malloy, "Use of the Moving Boundary Molding Technique to Strengthen Weld Lines", ANTEC 96, pp. 685~691
- (5) T. Titchner, "The effect of Transient Flow on Weld Line Strength and Visibility", ANTEC 95, pp. 4247 ~ 4251
- (6) J. P. Beaumont, "Runner and Gating Design Hand book", Hanser Publishers, pp. 268~270
- (7) J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, "Successful Injection Molding", Hanser Publisher, pp. 56~58, 2002
- (8) G. Menges, P. Mohren, "How to Make Injection Molds", Hanser,

- Munich, pp. 153~171, 1999
- (9) S. Fellahi, "Weld line Strength in Injection Molded HDPE/PA6 Blends : Influence of Interfacial Modification", J. Appl. Polym. Sci., Vol. 57, pp. 1319, 1995
- (10) S. J. Liu, "Optimization of the Weld line Strength in Gas-assist Injection Molded Thermoplastics", intern. polymer Processing, Vol. 14, No. 2, pp. 191, 1999
- (11) TAO C. CHANG and ERNEST FAISON, " Optimization of Weld Line Quality in Injection Molding an Experimental Design Approach", Journal of injection molding technology, Vol. 3, No. 2, pp. 61~68, 1999
- (12) 권태현 · 박성진 · 윤경환 · 이상봉 · 정영득, "사출성형 CAE 설계지침", 문운당, pp. 216 ~ 219, 2001.
- (13) Kohan, M., "Nylon Plastic Handbook", Haser Publications, Inc., New York, pp. 598, 1997.
- (14) 모정혁 · 홍영식 · 류민영, "사출성형품의 웰드라인 강도에 관한연구" 한국소성가공학회 논문집, pp. 211 ~ 216, 2003.

A study on the minimizing of weld line in injection molding

Seong-Ho Shin

Department of Automotive Engineering, Graduate School, Pukyong

National University



Abstract

Plastic injection molding is the way of molding products by freezing in a mold with pressurization and injection. At that time, the quality of plastic product wasn't important, but nowadays, it is required that the magnificence of appearance and mechanical strength of product are on the basis of plastic products. It is required to minimize some flaws, such as weldline, flow mark, sink mark, void, jetting, air trap, in order to improve the quality of products.

Weldline, one of the poor maintenance, is recognized very serious problem, in case of combining between a separated flow front on the appearance of product, that is reason of deterioration, relating

to quality and magnitude. If there are some holes in the process of molding, weld lines are formed, which brings about more mechanical and structured deterioration.

In general, the quality of injection molding is decided by multi-dimensional design space, such as material, mold, part, process conditions. So, we have to control all variables in order to make a high-quality injection molding, and it depends on a optimum design. This research is objective to minimize Weldline, one of the deterioration, and contributes to improve the quality of completed products, brand image of domestic motor corporations.

