

유도가열 조건에 따른 사출성형품 웰드부의 강도 고찰

손동휘¹ · 서영수¹ · 박 근[#]

An investigation into Weldline Strength According to Induction Heating Conditions

Dong-Hwi Son, Young-Soo Seo, and Keun Park

Abstract

Weldlines are generated during the injection molding process when two or more melt flows are brought into contact. At the welded contact region, a 'V'-shaped notch is formed on the surface of the molded part. This 'V'-notch deteriorates not only surface appearance but also mechanical strength of the molded part. To eliminate or reduce weldlines so as to improve the weldline strength, the mold temperature at the corresponding weld locations should be maintained higher than the glass transition temperature of the resin material. The present study implements high-frequency induction heating in order to rapidly raise mold surface temperature without a significant increase in cycle time. This induction heating enables to local mold heating so as to eliminate or reduce weldlines in an injection-molded plastic part. The effect of induction heating conditions on the weldline strength and surface appearance of an injection-molded part is investigated.

Key Words : : Injection molding(사출성형), Weldline, High-frequency induction heating(고주파 유도가열), Local mold heating(국부 금형가열), Tensile strength(인장강도)

1. 서론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자 제품을 제작할 수 있는 생산기술로서 다양한 산업분야에서의 플라스틱 부품 제조에 널리 사용되며, 제품의 경량화와 생산성 향상을 위해 가전, 이동통신, 자동차 분야의 외관 제품의 제조에 많이 사용되고 있다. 최근 첨단부품의 개발추세를 살펴보면 미세한 패턴이 추가되고 기능성 재료가 함유된 고분자 복합재료의 사출이 증가하고 있으며, 환경규제에 따른 무도장 사출 기술이 요구되면서 웰드라인(Weld line)과 흐름자국(Flow mark) 등 표면 결함을 줄이는 사출기술에 대한 관심이 증가하고 있다.

사출성형에서는 웰드라인 발생 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 많은 연구가 수행되었다. Malguarnera 와 Tomari 등[1-3]은 사출 성형 변수가 웰드라인의 특성과, 기계적 물성에 미치는

영향에 대한 연구를 수행하였다. 일반적으로 수지 온도 및 금형온도를 증가시켜 웰드 발생위치에서의 유동선단의 온도를 높여주는 방안이나 사출압 및 사출속도를 높여 웰드 생성부에서의 유동선단 간의 결합력을 증가시키는 방법이 있다[4,5]. 이중 금형을 유리전이온도 이상으로 가열하는 방법이 소형 제품의 웰드라인 감소에 가장 효과적인 것으로 알려져 있으나[6], 금형의 가열과 냉각에 소요되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 고주파 유도가열(induction heating)을 사용하여 금형 온도를 증가시킴으로써 웰드라인을 개선하는 방법에 대해 연구하고자 한다. 고주파 유도가열은 사출 금형에 고주파 전류를 인가할 때 금형표면에 전류가 집중되는 표피효과(skin effect)를 이용하여 금형 표면을 급속으로 가열하는 기법으로, 최근들어 박

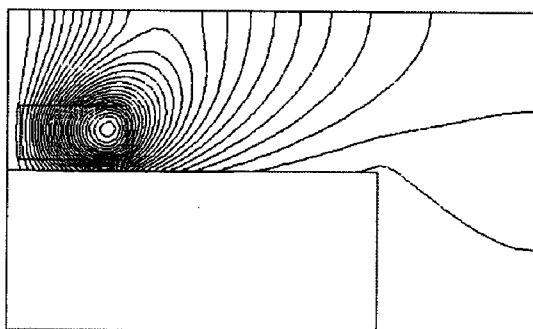
1. 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 원
교신저자: 서울산업대학교 기계설계자동화공학부, E-mail: kpark@snut.ac.kr

육 사출성형 및 마이크로 형상의 성형성 향상, 웰드 라인 향상, 사출성형품의 기계적 물성 향상 등에 응용되고 있다. 본 연구에서는 인장시편 형태의 사출 금형에 고주파 유도 가열 기법을 적용하여 웰드 라인 생성부를 국부적으로 가열하고, 가열 조건에 따른 성형품의 웰드 라인 형상 및 강도 저하 특성을 고찰해보고자 한다.

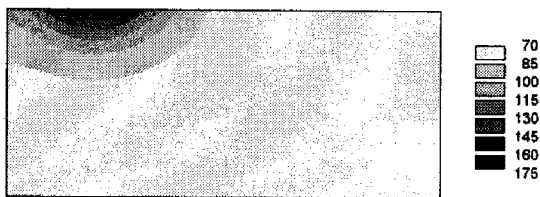
2. 고주파 유도 가열을 사용한 급속 금형 가열

2.1 고주파 유도 가열 시 금형 가열 효과 고찰

본 연구에서는 고주파 유도에 의한 금형 가열 효과를 고찰하기 위해 고주파 유도 가열 과정의 유한 요소 해석을 실시하였다. 유도 가열 과정을 해석하기 위해서는 일차적으로 유도 전류에 의한 전자기장(Electromagnetic field)을 계산하고, 피가열체 내부에 발생하는 저항열을 계산한 후 이를 이용하여 열전달 해석을 수행하는 전자기-열 연계 해석을 실시해야 한다[7]. 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 전자기장 해석과 열전달 해석을 연계하여 수행하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 Finite element analysis results: (a) magnetic flux lines, (b) temperature distribution at the end of heating stage (unit: °C)

피가열체는 금형 평판에 해당하며, 재질은 금형강(NAK50)을 사용하였고 이를 외경 8mm의 구리 코일이 총 6회 권선되어 둘러싸고 있다. 유도 가열 과정을 해석하기 위한 경계 조건으로는 코일에 221A, 160kHz의 고주파 전류를 3초간 인가하였다. 금형의 초기온도는 70°C로 설정하였고, 가열 후에는 자연대류상태에서 4초간 냉각해석을 실시하였다.

Fig. 1(a)에 전자기장 해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였다. 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 금형을 통과하지 못하고 표면에 흡수됨을 알 수 있는데, 흡수된 교변자장은 결과적으로 표면부위에 와전류를 형성하여 표면의 온도 상승을 유발하게 된다. 금형 표면에 유도된 와전류에 의한 저항열 성분을 열원으로 하여 비정상상태 열전달 해석을 수행하였다.

Fig. 1(b)에 가열 직후의 금형의 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 살펴보면 금형 측면부 표면에서 최대 166.5°C까지 상승되는 것으로 나타나는 반면 금형의 하단 및 측면부 온도는 80°C 이하로 나타나 금형 코어의 성형부 표면을 집중적으로 가열하고자 하는 의도에 부합함을 확인할 수 있었다. Fig. 2에 금형의 고주파 가열 실험시 열화상카메라로 측정된 금형 표면의 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 관찰하면 코일 내부의 코어 외측에서 온도 상승이 두드러지게 발생하는 점이 해석결과와 유사함을 알 수 있었다.

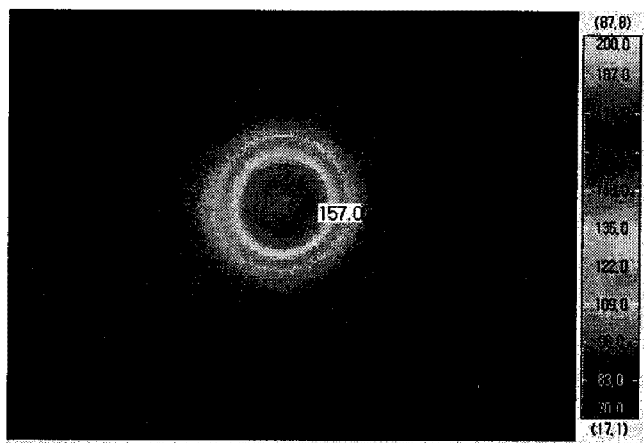


Fig. 2 Experimentally-measured temperature distribution at the end of heating stage

3. 금형가열에 의한 웰드부 강도 개선

3.1 인장시편 금형의 유도가열 및 사출성형

본 연구에서는 고주파유도가열을 적용하였을 경우 웰드라인의 형상 및 강도의 변화를 고찰하고자 한다. 이를 위해 Fig.3 와 같이 인장시편(ASTM D608 규격)을 성형할 수 있는 사출금형을 제작하였다. 이때 웰드라인의 유/무에 따른 강도비교를 위해 게이트를 한쪽/양쪽으로 변경할 수 있도록 금형을 제작하였다. 또한 유동의 균형을 위해 반대측에서 동일한 부피를 갖는 사각 바(bar) 형태의 시편을 추가하였다. 수지는 PC(제일모직 EH-1050)를 사용하였으며, 사출온도는 280℃, 사출시간은 1 초로 설정하였다. 게이트는 양쪽 모두를 사용하여 중앙부에서 웰드라인이 발생하도록 하였다. 고주파가열실험 조건은 주파수는 160kHz, 인가전류는 300A, 가열시간은 3 초로 설정하였다.

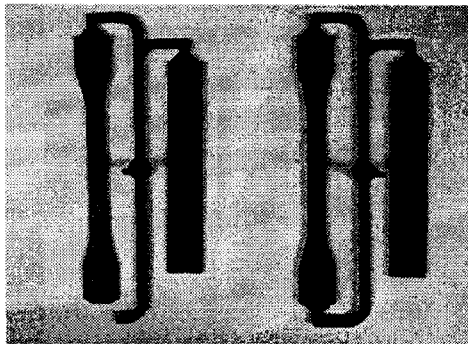


Fig. 3 Tensile specimens with single/double gates

3.2 가열조건에 따른 웰드부 형상비교

고주파 가열에 따른 웰드라인의 감소를 정량적으로 고찰하기 위해 웰드라인 발생부위에 대한 표면조도를 측정하였다. 표면조도 측정에는 TESA 의 RugoSurf 90G(분해능 0.001 μ m)를 사용하였다. Fig. 4 에 고주파가열 유/무에 따른 웰드부의 표면조도 측정결과를 비교하였다. Fig. 4 의 점선은 온수를 사용하여 금형온도를 100℃로 유지한 경우 발생한 웰드부의 표면조도를 측정한 결과이다. 측정된 웰드부의 깊이는 2.27 μ m 이며, 폭은 15.94 μ m 에 해당한다. Fig. 4 실선은 고주파 유도가열을 3초간 실시한 경우 웰드부의 표면조도를 측정한 결과로 깊이는 0.27 μ m, 폭은 5.62 μ m 에 해당하며, 점선의 경우에 비해 획기적으로 감소하였음을 알 수 있다.

가열방법은 가동측만을 가열한 경우(단면가열), 고정측과 가동측 모두를 가열한 경우(양면가열)로 구분하여 실시하였고, 성형품의 상측(고정측 성형부)과 하측(가동측 성형부)에 대해 웰드부의 표면조도를 측정하였다.

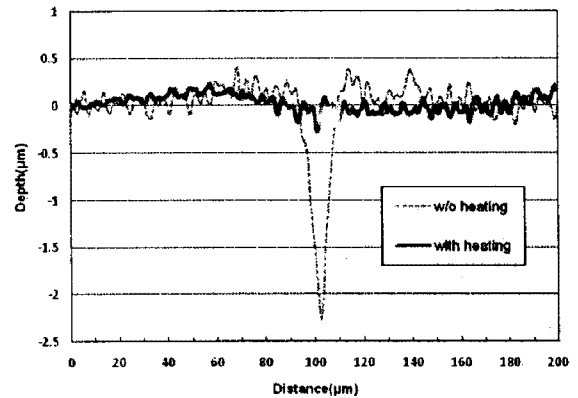


Fig. 4 Measured surface profiles at the weld region

3.3 가열조건에 따른 인장강도 비교

앞절에서 기술된 다양한 가열조건에서 성형된 인장시편을 사용하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 Instron 8516 장비(최대하중 10 ton)를 사용하여 상온에서 실시하였다. 인장시험 속도는 3 mm/min 로 설정하였으며, 조건별 5 회씩 실험을 실시하였다. 우선적으로 웰드라인의 발생으로 인한 강도저하 정도를 분석하기 위해 1 점 게이트일 때(웰드라인 미발생)와 2 점 게이트일 때(시편 중앙부 웰드라인 발생)의 인장강도 결과를 비교하였다. 1 점 게이트의 경우 인장강도가 546.85 kgf/cm² 로 측정된 반면 2 점 게이트, 즉 웰드라인이 발생된 경우 525.19 kgf/cm² 로 측정되어 21.66 kgf/cm² 만큼(4%)의 강도저하를 보였다. Fig. 5 에 각각의 경우에 따른 인장강도를 그래프로 비교하였다.

다음으로는 고주파 유도가열을 적용한 상태에서 2 점 게이트로 사출성형을 수행하여 인장시편을 제작하였다. 3.2 절에 기술된 바와 같이 단면가열과 양면가열로 구분하여 인장시험을 실시하였다. 우선 단면가열을 실시한 경우 인장강도가 539.34 kgf/cm² 로 측정되어 고주파가열을 실시하지 않은 경우에 비해 14.15 kgf/cm² 만큼의 강도향상을 확인할 수 있었다. 한편 양면가열의 경우 542.30 kgf/cm² 로 측정되어 단면가열의 경우에 비해 소폭(2.96 kgf/cm²)

으로 강도가 증가되었음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 고주파유도를 사용한 국부 금형가열이 웰드라인의 외관향상은 물론 웰드부의 응력집중을 완화시켜 성형품의 강도를 향상시킴을 확인할 수 있었다.

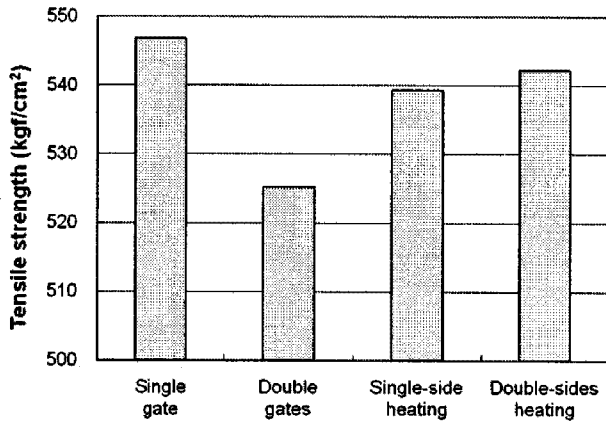


Fig. 5 Comparison of measured tensile strength

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 고주파 유도가열에 의한 급속 금형가열을 적용하여 사출성형품 웰드라인의 외관 및 강도를 향상시키기 위한 연구를 진행하였다. 이러한 연구결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 고주파 유도가열을 사용하여 금형표면을 가열한 결과 3 초간의 가열시 금형표면의 온도가 최대 166.5℃까지 상승되는 반면 금형의 하단 및 측면부 온도는 80℃ 이하로 나타나 금형의 성형부 표면을 집중적으로 가열할 수 있음을 확인하였다.

(2) 고주파 유도가열을 인장시험 금형의 사출성형에 적용한 결과(사용수지: 일반 Polycarbonate 수지) 기존에 2.27μm 였던 웰드라인의 깊이가 최대 0.27μm 로 획기적으로 감소하여 결과적으로 성형품의 외관품질을 개선할 수 있었다.

(3) 2점의 게이트를 사용하여 인위적으로 웰드라인을 발생시킨 경우 인장시험을 실시한 결과 1점의 게이트를 사용한 경우에 비해 21.66 kgf/cm² 만큼의 강도저하가 발생되었으며, 양면 고주파가열을 실시한 경우 17.11 kgf/cm² 만큼 인장강도가 향상되어 웰드라인에 의한 강도저하가 대부분 보완됨을 확인할 수 있었다

향후에는 상기 연구결과를 토대로 플라스틱 사출성형품의 외관품질 개선 및 강도 향상에 활용할 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 중소기업기술혁신사업 및 ㈜모베이스의 지원으로 수행된 연구결과로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Malguarnera, S. C. and Manisali, A., "The effects of processing parameters on the tensile properties of weld lines in injection molded thermoplastics," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 21, pp. 586 – 593, 1981.
- [2] Malguarnera, S. C., Manisali, A., and Riggs, D. C., "Weld line structures and properties in injection molded polypropylene," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 21, pp. 1149 – 1155, 1981.
- [3] Tomari, K., Tonogai, S., Harada, T., Hamada, H., Lee, K., Morii, T., and Maekawa, Z., "The V-Notch at weld lines in polystyrene injection molding," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 30, pp. 931 – 936, 1990.
- [4] Selden, R., "Effect on processing on weld line strength in five thermoplastics," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 37, pp. 205 – 218, 1997.
- [5] Kim, J. K., Song, J. H., Chung, S. T., and Kwon, T. H., "Morphology and mechanical properties of injection molded articles with weld lines," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 37, pp. 1202 – 1210, 1997.
- [6] Tosello, G., Gava, A., Hansen, H. N., Lucchetta, G., and Marinello, Characterization and analysis of weld lines on micro-injection moulded parts using atomic force microscopy (AFM)," *Wear*, Vol. 266 pp. 534 – 538, 2009.
- [7] Park, K., Choi, S., Lee, S. J., and Kim, Y. S., "Injection molding for a ultra thin-wall part using induction heating," *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A)*, Vol. 32, pp. 95 – 102, 2008