

열 및 구조해석을 통한 사출성형기용 바이메탈 실린더의 구조적 안정성 연구

박성열 · 이강혁* · 남윤효* · 류민영**†

서울과학기술대학교 일반대학원 제품설계금형공학과,

*(주)우진플라임, **서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2015년 3월 1일 접수, 2015년 4월 17일 수정, 2015년 5월 11일 채택)

Structural Stability Study Using Thermal and Structural Analysis of a Bimetal Cylinder in an Injection Molding Machine

Seong Yeol Park, Gang Hyuck Rhee*, Yun Hyo Nam*, and Min-Young Lyu**†

Department of Product Design & Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*Woojin Plaimm Co., Ltd., 100 Woojinplaimm-ro, Jangnang-myeon, Boeun-gun, Chungbuk-do 376-840, Korea

**Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received March 1, 2015; Revised April 17, 2015; Accepted May 11, 2015)

초록: 사출성형기는 사출장치와 형체장치로 구분된다. 사출장치에서 고체의 플라스틱 수지는 밴드히터에 의한 열과 수지간, 스크류 면, 그리고 실린더 내부 면과의 마찰로 인해 발생하는 열로 인해 용융된다. 용융된 수지가 특정한 형상을 가진 몰드 내로 사출될 때 실린더 선단부에는 높은 압력이 형성된다. 높은 압력으로 인해 실린더의 내부 면에 크랙이 발생한다. 실린더 내부의 압력을 지지하고 마모를 방지하기 위해 2개의 층으로 구성된 바이메탈 실린더가 제작되고 있다. 본 연구에서는 2개의 층으로 구성된 바이메탈 실린더의 구조적 안정성에 관하여 연구하였다. FEM 프로그램을 사용하여 열해석과 구조해석을 연계하여 분석하였다. 열해석을 통해서 바이메탈 실린더의 온도분포를 얻었다. 이 온도분포를 구조해석으로 연계하여 열과 사출압력에 따라 나타나는 실린더 선단에 발생하는 응력과 변형을 관찰하였다. 해석결과 실린더의 응력은 사출압력에 지배적이며 변형은 고온의 열에 지배적인 것으로 나타났다.

Abstract: There are two sections in an injection molding machine: the injection unit and the clamp unit. Solid plastics are melted in the injection unit using heat from a band heater and from frictional heat between the resins and between the resin and the inside surface of the cylinder or screw surface. When the melted resin is injected into the mold, which has a unique geometry, high pressure is developed at the fore-end of the cylinder, which can cause damage to the cylinder. The bimetal cylinder consists of two layers and is manufactured to sustain the pressure inside the cylinder and prevents abrasion. This study was conducted to analyze the structural stability of the bimetal cylinder. Computer simulation has been performed through structural analysis coupled with thermal analysis using a commercial FEM program. Thermal analysis showed that a temperature distribution occurred within the bimetal cylinder. Structural analysis was used to obtain stress and deformation occurring at the fore-end of the bimetal cylinder in relation to heat and injection pressure, and showed that the stress in the bimetal cylinder is influenced by the injection pressure more than the high temperature. However, the deformation of the bimetal cylinder was found to be dominated by thermal expansion in relation to high temperature, more than by injection pressure.

Keywords: bimetal cylinder, injection molding, injection molding machine, structural stability, thermal and structural analysis.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

©2015 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

서 론

사출성형기는 고체의 플라스틱 수지를 용융시키고 실린더 앞 쪽으로 이송시키는 사출장치(injection unit)와 상하 두 개의 금형을 열고 닫는 역할을 하는 형체장치(clamp unit)로 구분된다.^{1,2} 사출장치의 실린더 내부에서 고체의 플라스틱 수지는 수지간, 스크류 표면, 그리고 실린더 내부 면과의 마찰로 인한 열과 밴드히터에 의해 가열된 실린더의 열로 인해 용융된다. 용융된 수지는 특정한 형상을 가진 몰드 내로 사출된다. 이 때 스크류와 실린더 선단부에는 높은 압력이 형성된다. 높은 압력으로 첨가제가 혼합된 수지를 연속하여 사출할 경우 실린더 선단에서 내부 면에 마모가 발생할 가능성이 높아진다.

실린더 내부 면의 내마모성을 높이기 위해 기계구조용 합금강으로 구성된 실린더의 내부 면에 질화 처리를 하여 가공한다.³ 반면에 bimetal cylinder는 기계구조용 합금강으로 구성된 외부 층과 바이메탈 합금으로 구성된 내부 층으로 구분된다. 가공된 실린더 구멍에 바이메탈 합금 분말을 투입하여 실린더 양끝 단을 밀봉한 후 바이메탈 합금이 용융되는 온도로 실린더를 가열한다. 실린더의 중심축을 기준으로 고속 회전시켜 용융된 바이메탈 합금이 실린더 구멍에 융착되어 기계구조용 합금강과 바이메탈 합금은 야금학적 결합을 한다.⁴ 사출성형 시 실린더의 온도는 수지의 특성에 따라 200 °C 내지 300 °C로 매우 높게 설정한다. 이때 두 개 층으로 구성된 bimetal cylinder는 구조용 합금강과 바이메탈 합금의 고유한 열팽창 차이로 인하여 열변형과 열응력이 발생한다. 사출성형기에 관한 연구 중 스크류에 관한 연구와^{5,6} 사출성형 시 금

형 내부에서 발생하는 압력에 관한 연구는 있지만,⁷⁻⁹ 사출성형기용 실린더의 구조적 안정성에 관한 연구 발표는 매우 미미하다.^{10,11}

본 연구는 Figure 1과 같은 bimetal cylinder의 선단 부에서 발생한 크랙의 원인 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 시도하였다. 열만 고려했을 때와 사출압력만이 작용했을 때 발생하는 응력과 변형을 관찰하였다. 그리고 실린더의 열과 사출압력을 모두 고려하였을 때 실린더 선단부의 응력과 변형을 관찰하여 실린더의 구조적 안정성을 검토하였다.

열해석 및 구조해석

해석모델. Figure 2(a)는 해석에서 사용한 cylinder housing, cylinder head, 그리고 nozzle로 구성된 bimetal cylinder의 형상을 보여준다. Bimetal cylinder의 외경은 130 mm이며 내경은 28 mm, 그리고 총 길이는 929 mm이다. Figure 2(b)는

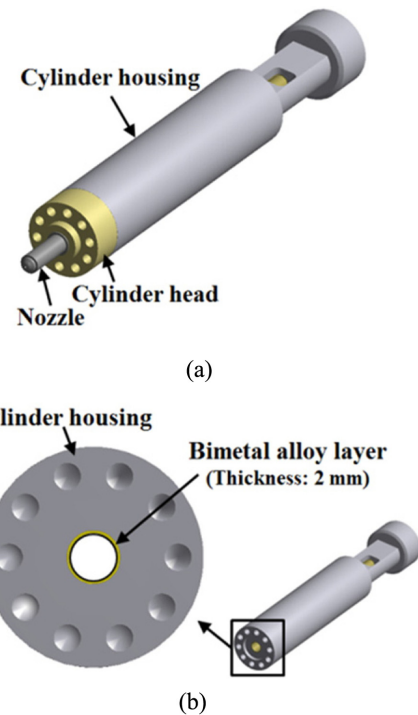


Figure 2. Analysis model of bimetal cylinder: (a) assembly of bimetal cylinder; (b) internal structure.

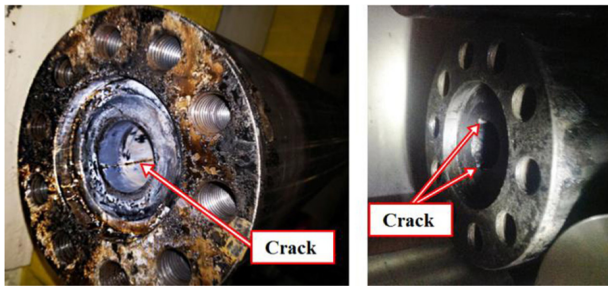


Figure 1. Cracks in a bimetal cylinder of injection molding machine.

Table 1. Material Property of Parts

Parts	Material	Property		
		Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Cylinder housing, cylinder head	SCM440	193	0.29	13
Bimetal alloy layer	SSB100	181	0.2	12.4
Nozzle	SKD61	200	0.28	16

bimetal cylinder의 내부 구조를 보여준다. 기계구조용 합금강으로 구성된 외부층과 바이메탈 합금으로 구성된 두께 2 mm의 내부층으로 구분된다.

재료물성. Cylinder housing과 cylinder head는 SCM440, bimetal alloy layer는 철(Fe)을 베이스로 한 Ni-B 바이메탈 합금 SSB100, 그리고 nozzle는 SKD61이다. 각 부품의 물성은 Table 1과 같다.

열해석. 열해석에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH를 사용하였다.

Figure 3은 bimetal cylinder의 유한요소모델을 보여준다. 메시형상은 3차원 tetrahedral mesh를 사용하였다.

Figure 4는 부품간의 접촉조건을 보여준다. Cylinder housing과 bimetal alloy layer는 원심주조법을 통해 야금학적으로 결합하므로 두 부품간에는 bonded 조건을 적용하였다. Bimetal cylinder와 cylinder head는 볼트에 의해 완전히 고정된다. 본 연구에서는 볼트를 제거한 후 bimetal cylinder와 cylinder head는 완전히 접촉되어있다고 가정하여 bonded 조건을 적용하였다. Cylinder head와 nozzle는 조립에 의해 접촉된 상태이기 때문에 bonded 조건을 적용하였다.

열해석에서는 bimetal cylinder의 외부와 내부 표면에 대해서 온도조건과 대류조건을 적용하여 실린더의 온도분포를 관

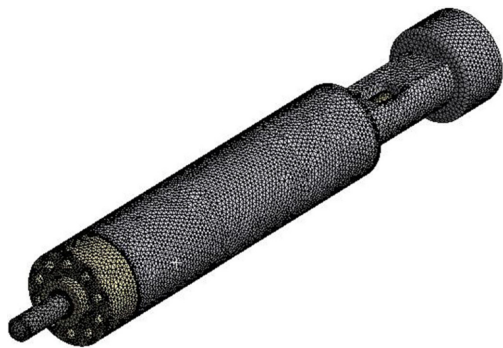


Figure 3. Finite element model and three dimensional tetrahedral mesh for simulation.

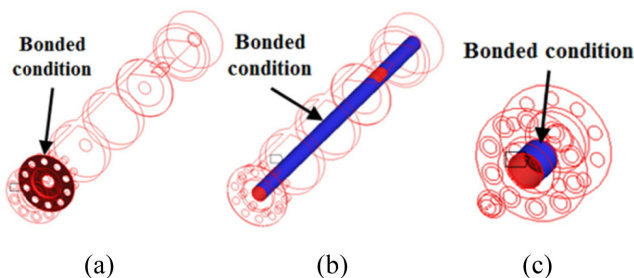


Figure 4. Contact conditions: (a) bonded condition: cylinder housing to bimetal alloy layer; (b) bonded condition: cylinder housing to cylinder head; (c) bonded condition: cylinder head to nozzle.

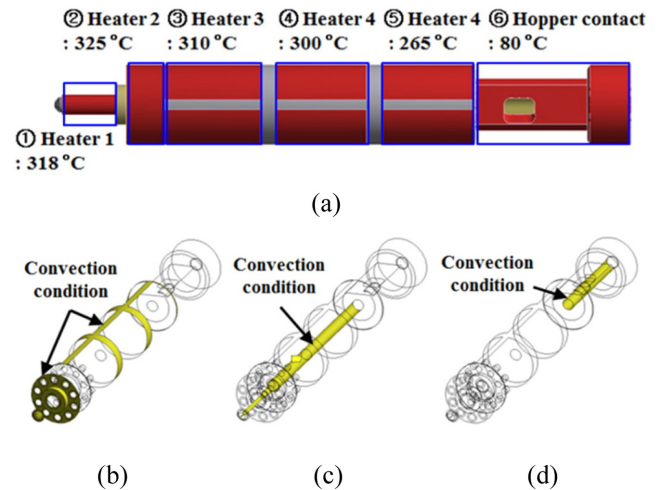


Figure 5. Thermal boundary conditions: (a) imposed temperature in each section of band heater; (b) convection between steel and air (25 °C); (c) convection between steel and air (80 °C); (d) convection between steel and molten polymer (300 °C).

찰하였다. Figure 5는 bimetal cylinder의 열적 경계조건을 보여준다. Cylinder housing은 공급부, 압축부, 계량부로 구분되어 3개의 밴드히터를 통해서 열을 공급받으며 cylinder head와 nozzle는 각각 1개의 밴드히터를 통해 열을 공급받는다. 밴드히터와 접촉하는 위치는 온도조건으로 밴드히터의 온도를 적용하였다. 호퍼와 접촉하는 위치는 호퍼 드라이어의 온도를 적용하였다. 본 연구에서 적용한 온도는 polycarbonate로 사출성형할 때 크랙이 발생한 실린더의 온도조건과 동일하다. 밴드히터를 통해 열을 공급받지 않는 부분은 대류조건을 적용하였다. 실린더 외부에서 밴드히터와 접촉하지 않는 위치는 상온(25 °C)과 스틸간의 대류조건이며 대류계수는 $19 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 이다.¹² 실린더 내부 면에서 호퍼와 접촉하는 위치에서 수지는 고체상태이므로 공기(80 °C, 호퍼 드라이어의 온도)와 스틸간의 대류조건을 적용하였으며 대류계수는 $70 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 이다.¹³ 호퍼 접촉부를 제외한 실린더 내부 면에서는 수지가 완전히 용융된 상태로 존재한다고 가정하고 용융된 수지(300 °C)와 스틸간의 대류조건을 적용하였으며 대류계수는 $6000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 이다.¹⁴

구조해석. 구조해석에서는 열과 사출압력으로 인해 발생하는 bimetal cylinder 선단부의 응력과 변형을 관찰하였다. 유한요소모델과 부품간의 접촉조건은 열해석과 동일하다. Figure 6은 구조해석의 경계조건을 보여준다. Figure 6(a)는 bimetal cylinder에서 fixed한 위치를 보여준다. Bimetal cylinder는 호퍼에 고정되므로 fixed로 적용하였다. Figure 6(b)는 사출압력을 적용한 부분을 보여준다. 사출성형에서 계량 시 스크류는 회전하며 호퍼 쪽으로 후퇴하게 되고 사출 시 후퇴한 스크류는 빠른 속도로 선단부로 전진하며 용융된 수지가 nozzle를 통과하면서 높은 사출압력이 발생한다. 실험 사출성형기의 최

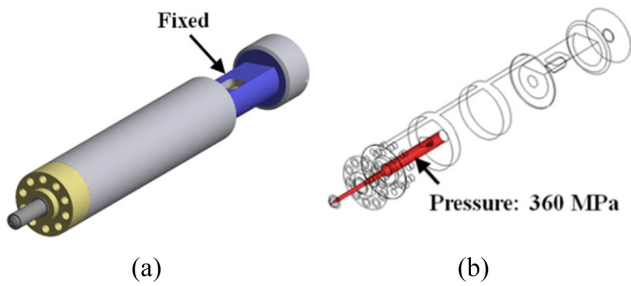


Figure 6. Boundary conditions: (a) fixed condition; (b) pressure imposed.

대 계량 거리인 130 mm까지 균일한 사출압력이 작용한다고 가정하고 최대 사출압력인 360 MPa를 적용하였다.

결과 및 토론

실린더 내부의 온도분포. Figure 7은 열해석 결과로 나타난 bimetal cylinder의 내부 온도분포를 보여준다. 실린더 선단부에서 327 °C로 가장 높은 온도가 발생하고 호퍼와 접촉하는 부분에서 80 °C로 가장 낮은 온도가 발생한다. 열해석 결과로 나타난 bimetal cylinder의 온도분포를 구조해석과 연계하였다.

실린더 외경에 발생하는 응력. Figure 8은 최대전단응력의



Figure 7. Temperature distribution of the bimetal cylinder.

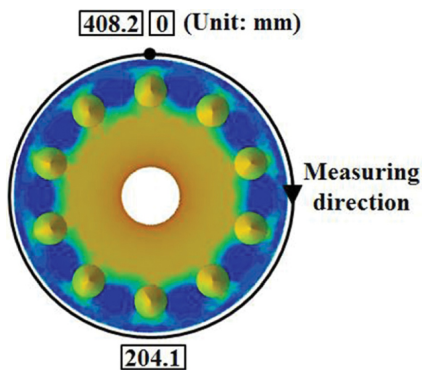


Figure 8. Measured location of maximum shear stress at outer diameter of cylinder.

측정위치를 보여준다. Figure 8에 표시된 실린더 외경의 0 mm 부터 시계방향으로 408.2 mm까지의 응력을 측정하였다.

Figure 9는 실린더 외경에 나타나는 최대전단응력을 보여준다. 열만 고려했을 때는 최대 10.0 MPa, 사출압력만 고려했을 때는 최대 16.4 MPa, 열과 사출압력을 모두 고려했을 때는 6.5 MPa이 발생한다. 열과 사출압력을 모두 고려하였을 때 최대전단응력이 감소하는 이유를 파악하기 위해 열만 고려했을 때와 사출압력만 고려했을 때의 최대 및 최소 주응력을 관찰하였다. Figure 10을 보면 열만 고려했을 때의 최대 및 최소 주응력이 압축응력으로 나타남을 확인할 수 있다. 반면에 Figure 11을 보면 사출압력만 고려했을 때에는 최대 및 최소 주응력이 인장응력으로 나타남을 확인할 수 있다. 따라

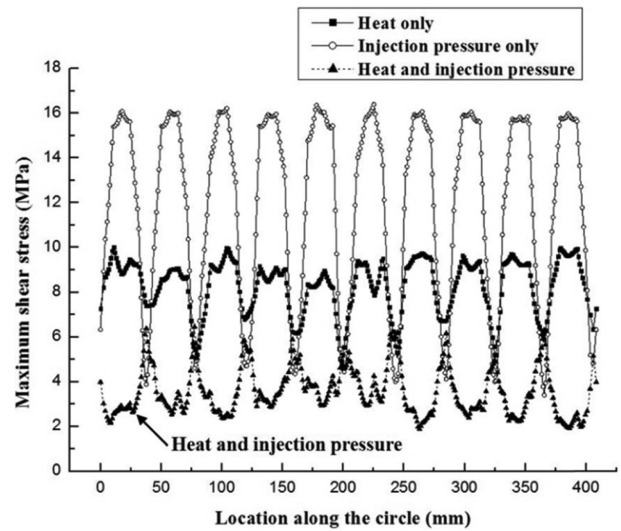


Figure 9. Maximum shear stresses at outer diameter for each simulation condition.

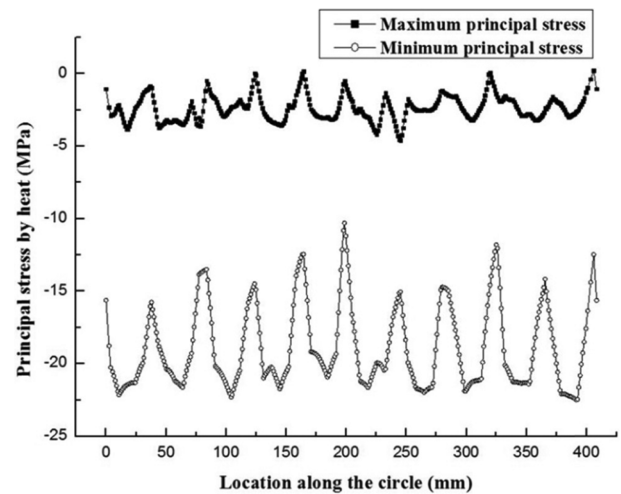


Figure 10. Maximum and minimum principal stresses at outer diameter by heat.

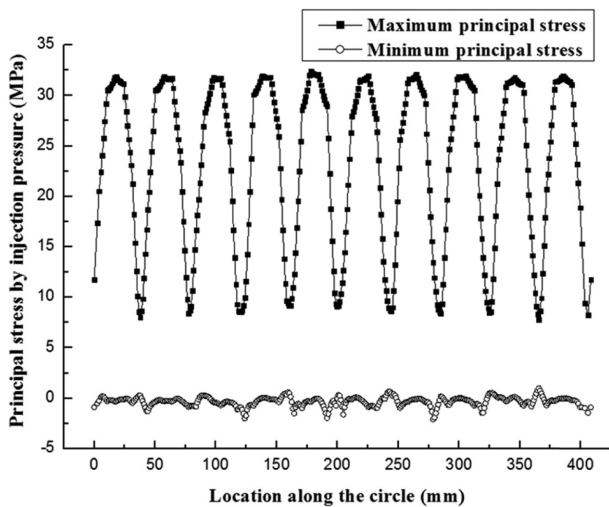


Figure 11. Maximum and minimum principal stresses at outer diameter by injection pressure.

서 Figure 9에서 열과 사출압력을 고려했을 때는 응력이 상쇄되어 감소된다고 판단된다.

Cylinder Housing과 Bimetal Alloy Layer 경계 면에 발생하는 응력. Figure 12는 cylinder housing과 bimetal alloy layer의 경계 면에서 최대전단응력의 측정위치를 보여준다. Figure 12에 표시된 0 mm부터 시계방향으로 100.48 mm까지의 응력을 측정하였다.

Figure 13은 cylinder housing과 bimetal alloy layer의 경계 면에서 발생하는 최대전단응력을 보여준다. 열에 의해서는 최대전단응력은 최대 19.2 MPa, 사출압력에 의해서는 최대 235.3 MPa이 발생한다. 열과 사출압력을 모두 고려할 때에는 최대 239.2 MPa이 발생한다. 열에 의한 응력보다 사출압력에 의한 응력이 지배적으로 나타나며 열과 사출압력을 모두 고려했을 때 경계면에서 발생하는 최대전단응력은 바이메탈 합금의 인장강도인 343 MPa의 78%이므로 구조적으로 안전하다.

실린더 내경에 발생하는 응력. Figure 14는 실린더 내경에서 발생하는 최대전단응력의 측정위치를 보여준다. Bimetal

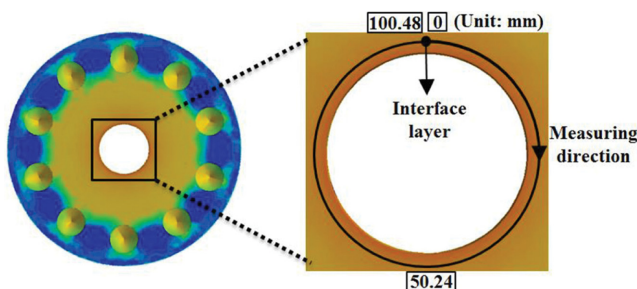


Figure 12. Measured location of maximum shear stress at interface between cylinder housing and bimetal alloy layer.

cylinder 내경의 0 mm부터 시계방향으로 87.92 mm까지의 응력을 측정하였다.

Figure 15는 실린더 내경의 최대전단응력을 보여준다. 열만 고려했을 때는 최대 46.5 MPa, 사출압력만 고려했을 때는 최대 339.1 MPa, 그리고 열과 사출압력을 모두 고려했을 때는 최대 360.4 MPa의 최대전단응력이 발생한다. 실린더 선단에서 발생하는 최대전단응력은 외경에서 내경으로 가까울수록 증가하며 열에 의한 것보다 사출압력에 의해 지배된다. 바이메탈합금의 인장강도는 343 MPa이므로 사출압력 360 MPa로 사출할 경우 실린더 선단부의 bimetal alloy layer에 파손이 발생한다.

Figure 16은 사출압력의 크기에 따라 실린더 내경에 발생하는 최대전단응력을 보여준다. 실제 사출 성형과 같도록 실린더의 열과 사출압력을 고려한 조건으로 최대전단응력을 비교하였다. 크랙이 발생한 실제 사출성형기의 최대사출압력인 360 MPa을 기준으로 100 MPa의 편차를 두어 260 MPa, 460 MPa로 변경하였다. 260 MPa일 때는 267.4 MPa, 460 MPa일 때 최대전단응력은 453.4 MPa이 발생하였다. 사출압력이

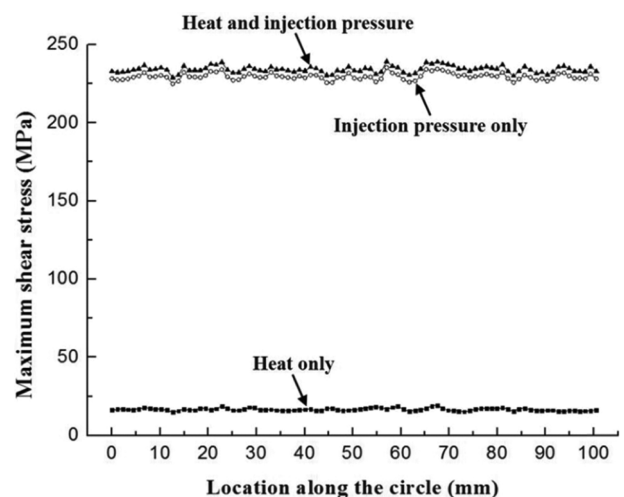


Figure 13. Maximum shear stresses at interface between cylinder housing and bimetal alloy layer for each simulation condition.

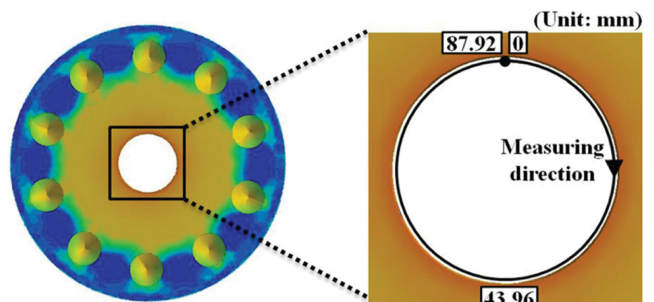


Figure 14. Measured location of maximum shear stress at inner diameter of cylinder.

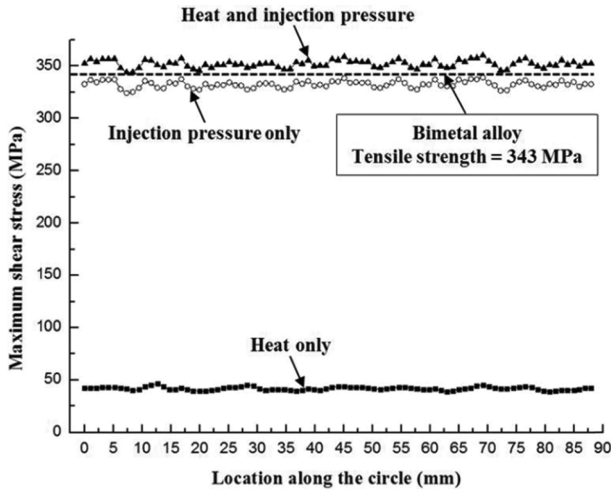


Figure 15. Maximum shear stresses at inner diameter by location for each simulation condition.

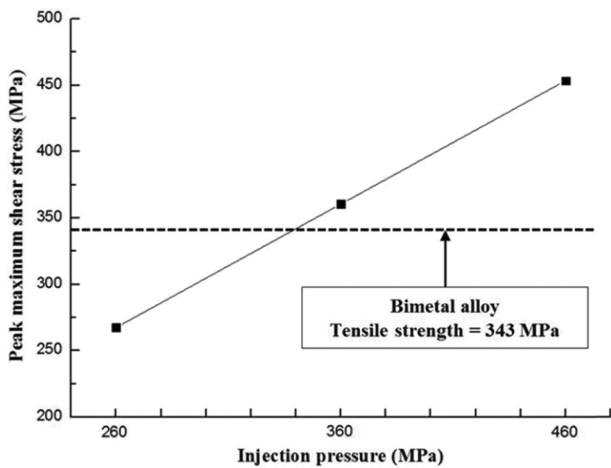


Figure 16. Maximum shear stress at inner diameter by injection pressure (260, 360, 460 MPa).

100 MPa 증가할수록 실린더 내경에 작용하는 최대전단응력은 93 MPa씩 증가하므로 응력 발생은 사출압력에 선형적으로 의존됨을 확인할 수 있었다.

실린더 선단에서 반경 방향 변형. Figure 17은 실린더 외경, cylinder housing과 bimetal alloy layer의 경계면, 그리고 실린더 내경에서 실린더의 중심으로부터 반경 방향으로 변형의 측정 위치를 보여준다. Figure 18은 실린더 외경, cylinder housing과 bimetal alloy layer의 경계면, 그리고 실린더 내경에 나타나는 반경 방향 변형의 평균 값을 보여주고 있다. 변형은 사출압력보다 열에 지배적으로 나타난다. 실린더 외경에서 내경으로 가까울수록 열에 의한 변형은 감소하며 사출압력에 의한 변형은 증가한다. 열과 사출압력을 모두 고려하였을 때 실린더 내경에서 반경 방향의 변형은 평균 0.080 mm

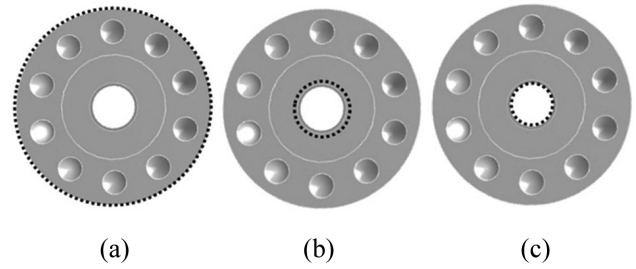


Figure 17. Measured locations of deformation in radial direction (a) outer diameter of cylinder; (b) interface between cylinder housing and bimetal alloy layer; (c) inner diameter of cylinder.

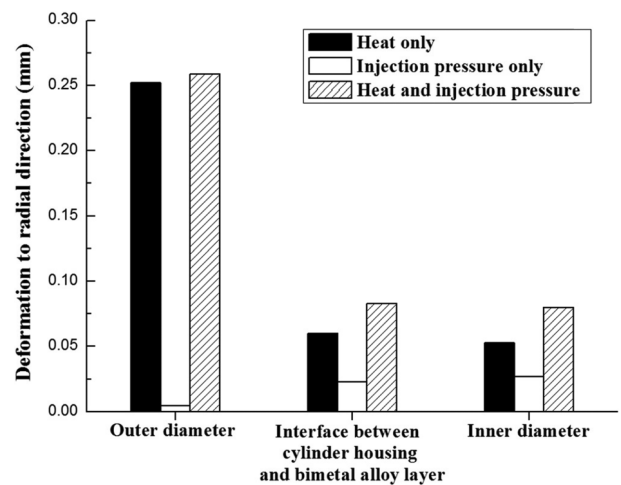


Figure 18. Average deformation in radial direction for each region.

가 증가한다. 실린더와 screw flight간의 간극이 커지면 실린더 내측 면에 고분자 필름 층이 발생하여 수지 용융에 불리하게 작용될 수 있다.¹⁵

Figure 19는 실린더의 초기 형상과 변형 후 형상을 보여준다. 열과 사출압력을 모두 고려했을 때 초기 실린더 외경의 반경은 65에서 65.259 mm로 증가하며 내경의 반경은 14에서 14.080 mm로 증가한다. 따라서 실린더의 두께는 초기 51에서 51.179 mm로 증가한다.

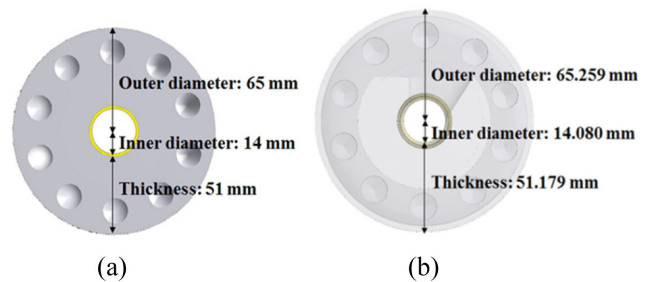


Figure 19. Deformation result of heat and injection pressure condition: (a) initial geometry; (b) deformed geometry.

결 론

본 연구에서는 열 및 구조 연계해석을 통하여 bimetal cylinder의 구조적 안정성을 평가하기 위해 열과 사출압력에 따른 응력과 변형을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실린더에 발생하는 응력은 열보다 사출압력에 지배적으로 나타났다. 실린더의 외경에서 내경으로 가까워질수록 실린더에 발생하는 응력이 증가하였다. 본 연구에서 고려한 사출성형기의 최대사출압력인 360 MPa로 사출성형할 경우 실린더 내경에 파손이 발생할 것으로 판단된다.

(2) 실린더 내부 층에는 내마모성을 가지며 높은 항복강도를 가진 재료의 설계가 필요하다. 또한 외부층과 내부층 사이에 두 재료의 열팽창 계수의 중간 값을 가지는 재료로 layer를 추가하여 열 응력을 줄이는 구조설계가 필요하다.

(3) 실린더의 변형은 사출압력에 비해 실린더의 온도에 지배적이다. 실린더의 변형을 감소시키기 위해서는 수지의 용융상태에 영향을 주지 않는 내에서 실린더의 낮은 온도 조절이 필요하다. 또한 열팽창계수가 작은 소재의 실린더가 유리하다.

감사의 글: 본 논문(연구)은 지식경제부의 지식경제 기술 혁신사업(WC-300) 지원으로 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

1. T. A. Osswald, L. S. Turng, and P. J. Gramann, *Injection Molding Handbook*, Hanser, Munich, 2002.
2. M.-Y. Lyu and H. Y. Kim, *Polymer Science and Technology*, **20**, 157 (2009).
3. W. G. Cox, Jr. and S. F. Chou, U.S. Patent 5,565,277 A (1996).
4. W. D. Maddy and G. Rajendran, E.P. Patent 0202208 B1 (1991).
5. C. L. Kim and S. H. Cho, *Trans. of the KSME*, **11**, 30 (2002).
6. N. B. Nagrale and R. N. Baxi, *Int. J. Eng. Technol.*, **3**, 191 (2011).
7. D. W. Kim, M. A. Kang, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **36**, 685 (2012).
8. Y. Huang and S. Zhao, *J. Mater. Sci. Res.*, **2**, 43 (2013).
9. A. Lutchman, R. Dubay, J. M. Hernández, and C. A. C. Imbert, *SPE ANTEC Proc.*, **1**, 364 (2008).
10. S. H. Cho, C. K. Kim, and I. K. Lee, *Proc. of the 37th KSTLE Annual Conference 2003*, **37**, 341 (2003).
11. C. K. Kim and K. S. Kim, *J. of the KSMTE*, **20**, 401 (2011).
12. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed., John Wiley & Sons, New York, 2001.
13. J. H. Bae and J. H. Lee, *Trans. of the KSME. B*, **22**, 79 (1998).
14. S. Johnston, D. Kazmer, Z. Fan, and R. Gao, *ANTEC Conference Proceedings*, **2**, 1098 (2007).
15. J. R. Vermeulen, P. G. Scargo, and W. J. Beek, *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 1457 (1971).