

세라믹 사출공정에서 시편의 두께에 따른 기계적 강성 연구

김진호¹, 홍석무^{2*}, 황지훈², 이종찬³, 김낙수⁴

¹삼성전자 첨단 기술 연구소, ²삼성전자 글로벌 기술센터, ³금오공과대학교 기계공학과, ⁴서강대학교 기계공학과

Study for Mechanical Strength according to Thickness of Specimen in the Ceramic Injection Molding Process

Jinho Kim¹, Seokmoo Hong^{2*}, Jihoon Hwang², Jongchan Lee³, Naksoo Kim⁴

¹Samsung electronics Co. Ltd., Advanced Technology Training Institute

²Samsung electronics Co. Ltd., Global Technology Center

³Department of Mechanical Engineering, Kumoh University

⁴Department of Mechanical Engineering, Sogang University

요약 세라믹 사출공정(CIM)으로 성형되는 전자제품 케이스와 같은 판상 제품은 강도 보장을 위한 형상설계가 매우 중요하다. 본 연구에서는 CIM으로 성형된 판상 시편의 두께에 따른 3점 굽힘 시험을 통해 굽힘 강도 및 탄성계수를 도출하여 기계적 특성을 분석했다. 두께 0.48mm 시편은 파단하중이 82.9~94.5N이고, 1.0mm 시편은 233.6~345.8N으로 측정되었다. 시편의 두께가 0.5mm 증가했을 때, 파단하중은 3배가 증가하고 탄성계수는 20%가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 비커스 경도시험을 통해 시편의 두께가 두꺼워질수록 상대밀도와 표면경도가 작아지는 것을 보였다. 이러한 현상은 두께가 두꺼울수록 소결공정 이후 세라믹 혼합물 중 세라믹 분말의 체적분율이 작아지기 때문으로, 이에 따라 기계적 물성이 부분적으로 변할 수 있음을 실험과 해석결과 비교 분석을 통해 밝혔다.

Abstract The importance of shape design for strength is highly regarded when applied to thin plate products in Ceramic Injection Molding (CIM), such as cases for electronic goods. This study analyzed the characteristics of the mechanical strength of CIM product by measuring the flexural strength and elastic modulus through a 3-point bending test according to the thickness of a thin plate test piece prepared by CIM. The specimen with a thickness of 0.48mm required a 82.9~94.5N fracture load, whereas a 1.0mm thick test piece required 233.6~345.8N. The increase in thickness by 0.5mm resulted in a 3-fold increase in the fracture load, whereas the elastic modulus decreased by 20%. The thicker the specimen, the lower relative density and surface hardness of the specimen. This is because the thicker the specimen, the lower the powder fraction of the ceramic mixture, and the material properties partially change after sintering.

Key Words : Bending test, CIM(Ceramic Injection Molding), Mechanical strength, Numerical simulation

1. 서론

세라믹 사출(CIM, Ceramic Injection Molding)은 세라믹 분말에 고분자 결합재(binder)를 혼합하여 유동성과 성형성을 향상시킨 후, 사출하여 부품형상을 만드는 성형공정이다. 이 공정으로 성형되는 세라믹 제품은 경량

구조 재료이면서 동시에 내열성과 내마모성이 우수하다. 특히, 심미적인 재질감으로 인해 인공관절 및 인공치아 등의 의과용 재료, 유전재료, 자성재료, 압전재료, 광학 및 전자 제품의 케이스로 많이 사용되고 있으며 전자제품과 자동차 내장 품에 점점 확장 적용되고 있다. 하지만 취성이 강해 두께가 상대적으로 얇은 판상구조를 제작할

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Samsung electronics)
Tel: +82-31-200-2437 email: seokmoo.hong@samsung.com

Received April 14 2014

Revised May 7 2014

Accepted June 12, 2014

경우 강도를 보장할 수 있는 형상설계가 매우 중요하다.

사출공정에 사용되는 세라믹 혼합 재는 온도와 형상 속도 및 세라믹 분말과 결합제의 혼합비율에 따라 기계적 물성 및 거동이 달라지기 때문에 소재의 기초 물성에 대한 정확한 분석이 필요하다[1]. 이는 사출공정해석을 통해 소재의 거동을 모사하거나[2], 사출공정조건 최적화를[3] 위해 반드시 필요하며, 이는 최종제품에 발생할 수 있는 불량을 예측하는 관점에서 매우 중요하다. 또한 가압을 통한 사출 시 압력분포에 따라 소재의 혼합비율 분포가 달라질 수 있다[2]. 이로 인해 곡면이 있거나 홀이 있는 등 구조가 복잡한 형상일 경우 부분적으로 기계적 강도가 달라질 수 있으며, 이는 소결 공정을 거치면서 최종제품에 심각한 결함을 초래한다. 세라믹 사출로 성형한 부품의 강도는 세라믹 분말이 전체 체적에서 차지하는 비율(체적분율)의 영향을 크게 받는다. 따라서 소결 후 기계적 물성변화를 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 세라믹 사출로 제작된 얇은 판상 시편의 3점 굽힘 시험을 통해 유효한 탄성계수를 측정함으로써 소결 후 최종제품의 기계적 강도 특성의 변화를 분석했다. 또한 비커스 경도시험을 통해 시편의 위치에 따라 표면경도 차이로 인해 밀도가 다를 수 있음을 확인했다. 3점 굽힘 시험의 결과는 수치해석을 통해 타당성을 검증하였다.

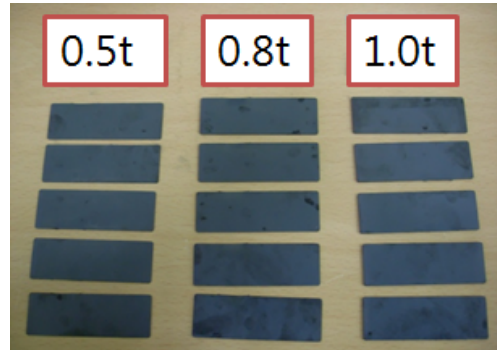
2. 실험방법

2.1 3점 굽힘 시험

세라믹은 주로 분말 상태의 재료를 바인더와 혼합하여 프레스/사출 성형하고, 소결을 통해서 최종 완성된다[3]. 세라믹 분말과 혼합되는 바인더는 소결을 거치면서 증발하기 때문에 기공을 발생시키며, 기공은 제품의 하중 지지 면적을 감소시켜 기공 주위로 응력 집중이 발생한다. 즉, 기공률(Porosity)은 탄성 계수의 감소를 유발시킨다. 미량의 기공을 포함하는 재료에 대해서는 탄성 계수를 명확하게 정의할 수 있지만, 정확한 측정은 어려운 실정이다. 또한, 판상재료의 두께에 따라 상대밀도가 달라지면서 다양한 기계적 물성을 가질 수 있다.

두께에 따른 기계적 물성을 파악하기 위해 지르코니아(Zirconia) 분말과 왁스 혼합 재를 사용해 Fig. 1과 같이 길이 60mm, 폭 20mm, 두께 0.5mm/ 0.8mm/ 1.0mm의 시편을 각각 총 5개씩 제작했다. 금형의 온도는 50℃로

유지하고 초기 소재의 온도는 140℃로 설정했으며 사출 압력은 280MPa로 적용했다.



[Fig. 1] Specimen according to the thickness



[Fig. 2] Jig of bending test

세라믹 사출은 모든 시편 제작에 대해 동일한 조건이었으며, 소결 또한 같은 전기로 내에서 동일하게 진행하였다. 소결 후에는 표면에 미세 다듬질을 수행하여 표면 결함에 대한 영향을 제거한 후 사용했다.

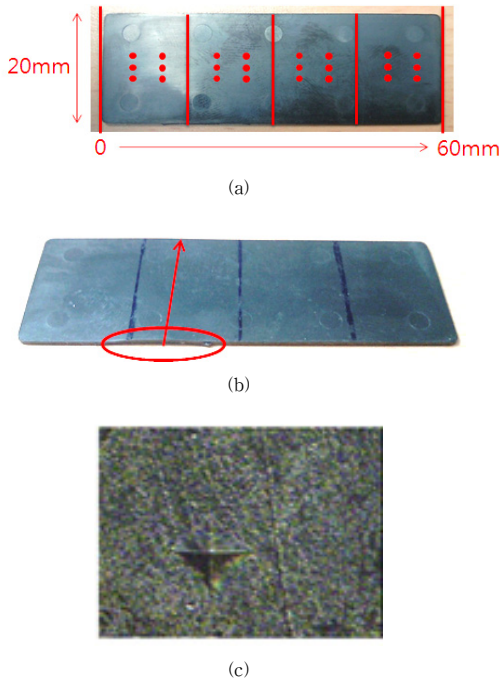
제작된 시편으로 3점 굽힘 시험을 수행하기 위한 지그를 Fig. 2와 같이 제작했고, 만능재료시험기 (UTM, Zwick)를 이용하여 진행하였다. 지그의 시편 안착부는 안정적으로 고정할 수 있도록 동글게 제작했고, 받침대 사이의 거리는 34mm로 설정했다. 각 시편마다 5회씩 실험했고 굽힘 속도는 2mm/min으로 일정하게 유지했다. 실험은 파단 시까지 수행하여 파단하중을 포함하는 하중-변위 그래프를 결과로 얻었다. 이 결과와 이론식을 통해 굽힘 강성 및 탄성계수를 얻을 수 있다.

수치해석은 실험과 동일하게 모델링하여 하중-변위 그래프를 얻었다. 이를 실험결과와 비교함으로써 굽힘

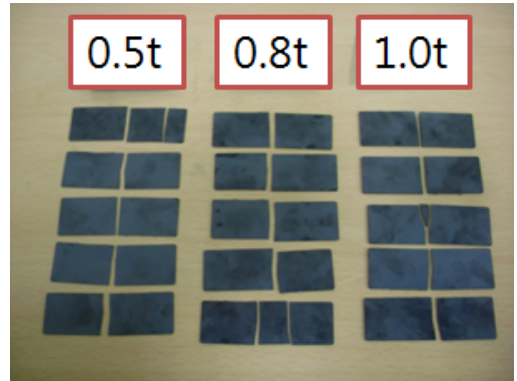
강성과 탄성계수의 타당성을 검증했다. 수치해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Ver. 6.10, Simulia, USA)를 사용했다[4].

2.2 비커스 경도 시험

마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여 두께에 따른 판상제품의 표면 경도를 측정했다. Fig. 3(a)와 같이 가로 방향으로 24개의 위치를 선정하고, Fig. 3(b)와 같이 사출 입구에서부터 먼 방향으로 경도시험을 수행했다. 비커스 경도시험은 Fig. 3(c)와 같이 다이아몬드 형태의 압흔으로부터 경도를 측정한다. 시편 두께에 따른 표면경도와 탄성계수를 비교해, 두 물성에 대한 경향 및 관계를 분석할 수 있다. 이 방법을 통해, 얇은 판상으로 구성된 복잡한 형상에서 밀도차로 인해 발생하는 기계적 물성의 부분적 차이와 그에 따른 취약부위를 예측할 수 있게 된다.



[Fig. 3] Hardness test for the plate specimen :
 (a) indentation position about the direction of specimen length
 (b) indentation position about the distance from gate
 (c) indentation mark



[Fig. 4] Result of 3-point bending test

3. 결과 및 고찰

3.1 3점 굽힘 시험

두께가 다른 세라믹 사출성형 판상 시편에 대해 3점 굽힘 시험을 수행한 결과, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 모든 시편의 파단 양상은 시편의 중앙부에서 발생함을 알 수 있다. 즉, 3점 굽힘 시험에 의해 최대 모멘트가 걸리는 위치에서 파단이 발생하므로, 시험기나 지그의 영향이 발생하지 않음을 알 수 있다.

시편제작 방법 및 굽힘 시험 조건이 모두 동일함에도 불구하고 시편의 두께가 증가할수록 파단 하중의 편차가 비교적 크게 나타남을 확인할 수 있다. 실험을 통해 얻은 파단하중 결과로 기본 역학이론을 통해 굽힘 강성(EI) 및 탄성계수를 유도할 수 있다. 3점 굽힘 시험에서 중앙부에 걸리는 최대 모멘트는 다음과 같다[5].

$$M_{max} = \frac{LP_f}{4} \quad (1)$$

여기서 L 은 하부 지그의 받침대 사이 거리를 의미하고 P_f 는 파단하중을 의미한다. 중앙부 표면에 걸리는 최대인장응력으로 표현하면 굽힘 응력이 되며, 이는 파단 하중에 비례하고 두께의 제곱에 반비례한다. 또한 굽힘 변형을 이용하여 탄성계수를 유도할 수 있는데 파단 시 중앙부의 최대변위를 계산하여 탄성계수(E)를 나타낼 수 있다[5].

$$E = \frac{L^3}{48I} \left(\frac{P_f}{u_f} \right) \quad (2)$$

여기서 I 는 단면 2차 모멘트를 의미하고 u_f 는 파단 시 중앙부의 변위를 의미한다. 탄성계수는 하중에 비례함을

알 수 있다. 단면 2차 모멘트는 두께의 세제곱에 비례하므로 결과적으로 탄성계수는 두께의 세제곱에 반비례한다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 두께에 따른 세 가지 시편에 대해 굽힘 시험 전 시편의 두께 및 폭을 측정 한 후 겹보기 밀도를 계산했다. 겹보기 밀도는 각 시편의 질량을 측정 한 후 형상 부피로 나눈 값으로 시편이 두꺼워짐에 따라 겹보기 밀도는 작아짐을 확인할 수 있는데, 이는 질량이 부피에 비례하여 증가하지 않기 때문이다. 부피가 증가한 만큼 질량이 증가하지 않은 것은 사출 시에 두께가 다른 각 급형마다 내부 압력분포가 달라, 성형품의 체적 분율이 달라질 수 있음을 의미한다.

과단 하중 결과로부터 얻은 기계적 물성 치를 살펴보면 0.2~0.3mm의 두께 차이로 굽힘 강성과 탄성계수가 유효한 차이를 가짐을 알 수 있다. 즉, 두께가 증가할수록 최대하중 및 굽힘 강성은 증가하나 탄성계수는 오히려 작아짐을 알 수 있다. 두께 0.48mm의 시편은 과단하중 82.9~94.5N을 필요로 했지만 1.0mm 두께의 시편은 233.6~345.8N으로 두께가 약 0.5mm 증가할 때, 과단하중은 약 3배만큼 증가했다. 두께가 증가하여 단면 2차 모멘트가 증가했으므로 굽힘 강성 또한 증가하게 된다. 하지만 탄성계수는 동일한 재료에서 동일한 값이 나와야 함에도 불구하고 두께가 증가할수록 오히려 탄성계수가 작아짐을 알 수 있다. 이는 두께가 두꺼워질수록 체적분율은 오히려 작아져서 재료의 유효 탄성계수의 값이 작아짐을 알 수 있다. 이는 각 시편에 대한 겹보기 밀도 결

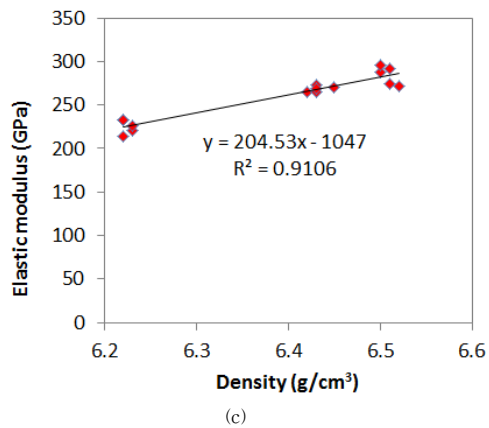
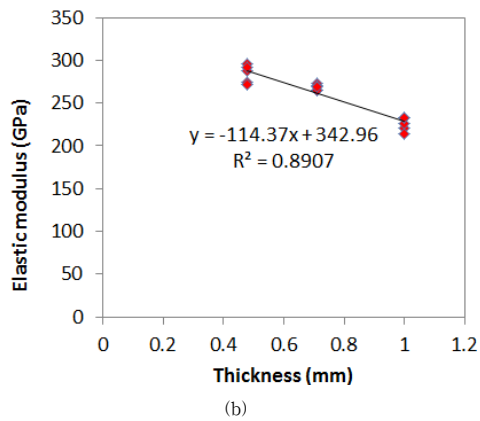
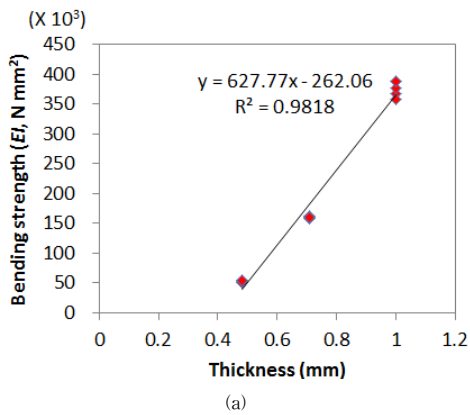
과를 보아도 알 수 있다. 두께 증가에 상관없이 밀도가 일정해야 하지만 두께가 증가할수록 밀도는 점점 낮아진다. 이는 앞에서 언급했듯, 사출공정 시 두께에 따라 급형 내부의 압력분포가 달라져 세라믹 분말의 체적 분율이 달라지기 때문이다.

이러한 시험 결과를 바탕으로 Fig. 5와 같이 최소 자승 곡선 근사 법(Least squares method)을 사용하여 두께별 굽힘 강성 및 탄성계수에 관한 관계식을 도출하였다. 굽힘 강성은 두께가 증가할수록 증가 하고, 탄성계수는 두께가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 또한 두께가 두꺼울수록 굽힘 강성의 분산이 증가함을 알 수 있다. 이는 두께가 증가할수록 세라믹 혼합물에서 분말의 비율이 작아짐과 동시에 그 분포도 불균일하여 소결 후 재료에 대한 기계적 물성이 부분적으로 달라질 수 있음을 의미한다.

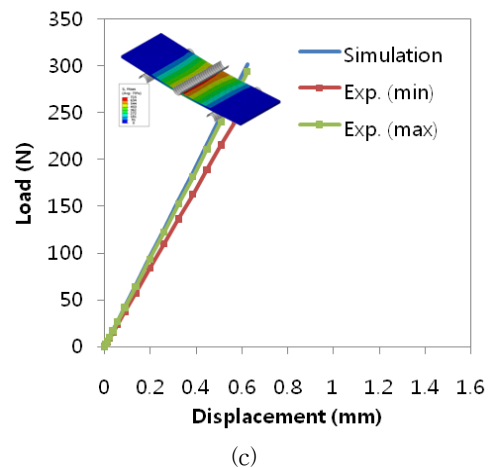
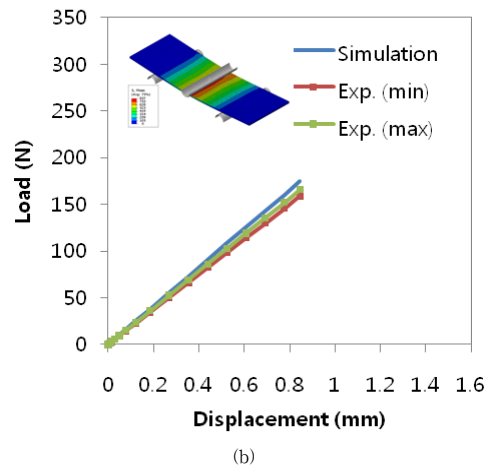
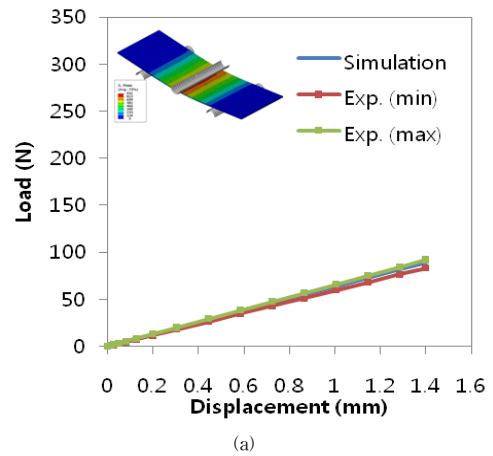
Fig. 5(c)는 상대밀도와 탄성계수의 관계를 나타낸 것으로 상대밀도에 따라 탄성계수가 비례함을 알 수 있다. 얇은 판상시편으로 거의 고른 밀도분포라 가정할 때, 두께에 따라서 유효한 탄성계수가 다를 수 있음을 알려주고 있다. 이는 얇은 판상구조에서 곡면구조나 홀(Hole) 또는 리브(Rib)가 있는 구조의 경우에는 밀도 불 균일이 커지게 되므로 유효 탄성계수는 더 낮아질 수 있음을 알려준다.

[Table 1] Result of bending test for the plate specimen

Type	A					B					C				
Specimen	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
Thickness (mm)	0.48					0.71					1.0				
Density (g/cm ³)	6.51	6.50	6.52	6.50	6.51	6.42	6.43	6.43	6.45	6.43	6.23	6.22	6.23	6.22	6.22
Max. load (N)	94.5	82.9	88.8	91.2	88.1	166.8	194.9	163.3	163.4	186.1	340.3	233.6	345.8	305.2	284.0
Max. displacement (mm)	1.53	1.28	1.45	1.37	1.34	0.865	1.01	0.823	0.828	0.950	0.757	0.535	0.750	0.643	0.598
Stiffness, EI(N·mm ²)	50580	53030	50150	54510	53840	157300	158000	162500	161600	160400	368100	357500	375000	388700	388900
Young's Modulus (GPa)	274	288	272	296	292	265	265	272	271	269	221	216	227	233	233
AVG. Stiffness (N·mm ²)	52,420					160,100					376,100				
AVG. Young's Modulus (GPa)	284					268					226				



[Fig. 5] Result of bending test of Zirconia specimen :
 (a) bending strength vs. thickness (b) elastic modulus vs. thickness (c) elastic modulus vs. density



[Fig. 6] Comparison of bending test and simulation :
 thickness of (a) 0.5t (b) 0.8t (c) 1.0t

3.2 수치해석을 통한 굽힘해석

굽힘 시험에 대한 유용성 및 타당성을 확인하기 위해 굽힘 시험으로부터 얻은 탄성계수를 유한요소해석 모델의 물성으로 입력하여 시험과 동일조건 해석을 수행했다. Fig. 6은 각 두께별 시험 데이터의 최대 및 최소값으로 해석결과와 비교한 것이다. 해석으로 얻은 하중-변위 그래프는 각 시험 데이터의 최대, 최소 결과에 유사하게 나타나고 있으며, 이 결과로부터 계산된 탄성계수의 타당성을 검증할 수 있다.

3.3 비커스 경도시험

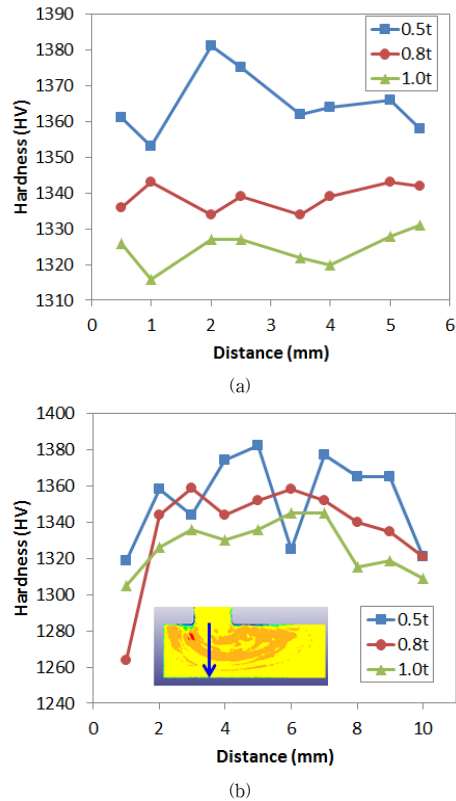
두께가 다른 시편의 경도 측정 결과는 Fig. 7(a)와 같다. 시편의 두께에 따라 유효한 차이를 나타내었으나, 동일 시편에서의 길이방향으로는 편차가 있으나 유효한 차이라고 보기 어렵다. 특히 얇은 굽힘 시험에서 두께가 얇을수록 높은 탄성계수를 보였던 것처럼 경도 측정값에도 얇은 평판일수록 높은 경도를 보였다. 이러한 결과로 볼 때 동일한 사출 조건이라도 소결 시 두께, 형상 등에 따라 기공과 같은 표면 및 내부 결함이 다르게 생길 수 있다고 판단된다. 특히 두께가 얇을수록 탄성계수 및 경도가 높게 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 사출입구에서부터 거리에 따른 경도를 나타낸 것으로 기존 연구에서 얻은 체적 분율의 결과 값과 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다[3]. 그림은 시편 상판에 대한 부분 밀도의 분포를 해석을 통해 나타낸 것으로 체적분율 분포가 위치에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있고 가장자리가 상대적으로 낮게 나타난다. 따라서 사출성형 시 압력의 불 균일은 세라믹 분말의 체적 분율의 분포를 유발하고, 이로 인해 탄성계수 및 표면경도에 영향을 주게 된다.

4. 결론

얇은 판상구조물의 두께에 대한 굽힘 시험결과, 두께가 두꺼워질수록 파단하중 및 굽힘 강성은 커지나 상대 밀도는 작아져 탄성계수가 작아짐을 알 수 있었다. 이는 세라믹 사출공정 시 두께를 두껍게 했을 때, 사출 압력에 의한 세라믹 분말의 체적 분율이 작아지게 되어 재료 자체의 강도가 작아질 수 있음을 의미한다. 경도시험도 유사한 결과를 나타내는데, 두께가 두꺼워질수록 표면경도

는 낮아진다. 이는 사출 후 세라믹 분말의 체적 분율이 판상구조물의 표면경도 및 강도에 영향을 미칠 수 있으므로, 특히 기구 케이스나 곡면 및 홀이 있는 사출품의 경우에 이러한 특성을 더욱 고려해야 한다는 사실을 알려준다. 본 연구의 결과는 세라믹 사출공정을 통해 제조되는 얇은 판상구조물의 설계에 있어 기계적 물성을 파악할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.



[Fig. 7] Result of hardness test for the plate specimen : (a) in the longitudinal direction (b) in the width direction from gate

References

- [1] T. S. Kwark and W. Seo, "Simulation of Ceramic Powder Injection Molding Process to Clarify the Change of Sintering Shrinkage Depending on Flow Direction", *J. Kor. Ceram. Soc.*, Vol. 46, No. 3, pp. 229~233, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.4191/KCERS.2009.46.3.229>
- [2] Y. Lee, "A study on the Battery Case Injection Molding by CAE Analysis", *J. Kor. Academia-Industrial cooperation Soc.*, Vol. 12, No. 1, pp. 55~61, 2011

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.1.055>

- [3] G. Yoon, G. Kim, J. Lee, J. Sohn, T. Seo, Y. Kim, J. Lee, "Optimization of Injection Mold Fluidic System for the Square-type Cosmetic Case by Injection Molding", *Trans. Kor. Academia-Industrial cooperation Soc.*, pp. 514-517, 2011
- [4] H. S. Soykan and Y. Karakas, "Preparation of Homogeneous Feedstocks for Injection Molding of Zirconia-based Ceramics", *Turk. J. Eng. Environ. Sci.* Vol. 25, pp. 315~319, 2001
- [5] M. K. Lee, H. Kim, S. Hong, S. Choi and N. Kim, Simulation of Ceramic Powder Injection Molding Based on the Behavior of Flow Stress Depended on the Thermal Viscosity Flowage Property and the Volume Fraction, *Adv. Mater. Rev.*, Vol. 445, page 368~373, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.368>
- [6] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.11, Dassault Systemes Simulia Corp., USA, 2011
- [7] James M. Gere and Barry J. Goodno, "Mechanics of materials", pp. 984~989, CENGAGE Learning, 2009

김 진 호(Jinho Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 영남대학교 기계공학과 (학사)
- 2009년 2월 : 금오공과대학교 기계공학과 (석사)
- 2011년 2월 : 금오공과대학교 기계설계공학과 (박사과정 수료)
- 1993년 12월 ~ 현재 : 삼성전자 첨단기술연수소 과장

<관심분야>
금형가공, CAM

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[정회원]

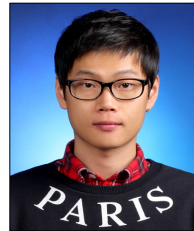


- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
- 2007년 8월 : Technical University of Munich 기계공학과 (박사)
- 2007년 4월 ~ 현재 : 삼성전자 글로벌기술센터 수석 연구원

<관심분야>
금속성형, 하이드로포밍, CAE

황 지 훈(Jihoon Hwang)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
- 2013년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 삼성전자 글로벌기술센터 연구원

<관심분야>
금속성형, 소성가공, CAE, 최적화

이 종 찬(Jongchan Lee)

[정회원]



- 1982년 2월 : 한양대학교 기계공학과(학사)
- 1986년 2월 : University of Michigan 기계공학과 (석사)
- 1991년 2월 : University of Massachusetts 기계공학과(박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계설계공학과 교수

<관심분야>
정밀가공, 신재생 에너지

김 낙 수(Naksoo Kim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서울대학교 기계설계(학사)
- 1984년 2월 : 서울대학교 기계설계(석사)
- 1989년 2월 : U.C. Berkeley 기계공학과 (박사)
- 1989년 3월 ~ 1990년 2월 : The Ohio State University 연구원
- 1990년 3월 ~ 1995년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 부교수
- 2001년 6월 ~ 현재 : 서강대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
소성가공, 공정설계 및 해석, CAE, 최적화