

미세 사각홀을 갖는 플라스틱 부품의 정밀사출성형해석

이성희¹·정태성²·허영무¹

Precision Injection Molding Analysis of Plastic Part with Rectangular Micro-Holes

S. H. Lee, T. S. Jung, Y. M. Heo

Abstract

In this study, precision injection molding analysis for BGA connector fabrication was performed. A BGA connector model with rectangular micro-holes were introduced to investigate the effect of mirco patterns on the injection molding process. Dual domain(2.5D) mesh and full 3D mesh for BGA connector model were prepared to perform precision injection molding analysis. To verify the present analysis, experiments of injection molding were performed based on the results of the analysis. It was shown that the type of mesh has a significant effect on the flow pattern of BGA connector.

Key Words : Precision injection molding, Micro-holes, BGA connector, Delivery system, 2.5D mesh, Full 3D mesh, Flow pattern

1. 서 론

BGA(Ball Grid Array) 콘넥터는 반도체 I.C칩 제조 과정 중 전수검사 과정에서 사용되는 test socket으로써 이 부품에 I.C칩을 안착시켜 고온 테스트, 전기 테스트 등 여러 가지 테스트를 하여 I.C칩의 이상 유무를 확인할 때 쓰이는 테스트용 socket이다. 이러한 BGA 콘넥터의 경우 형상이 복잡하고 정밀한데, 예를 들면, 금형에 조립되는

코어(core) 두께가 $0.200 \pm 0.0001 \text{mm}$ 인 경우 $0.1 \mu\text{m}$ 의 초정밀 공차를 만족시키고 코어의 휨 없이 가공이 이루어져야 한다. 일반적인 가공방법과 1개씩 측정하는 방법으로는 불가능하므로 코어가 100개인 경우 100개를 동시에 연삭 가공하여 완성시키기 전 100개를 합한 치수를 측정하여 남은 양을 수량으로 나누어 최종적으로 1개당 남은 양을 가공하는 기술로, 여기서는 0.200mm 인 100개를 합한 치수 $20.000 \pm 0.005 \text{mm}$ 로 치수관리가 이루어

1 한국생산기술연구원 정밀금형팀

2 재영솔루텍(주) 플라스틱 용융기술연구소

어지고 있다. 또한 여기에 고정밀도의 연삭기계와 특수한 연마석, 연삭 가공방법, 적합한 재질선택이 필요하다. 모델 형상학적으로도 성형상 기존의 일반사출성형기법으로는 해결하기 어려운 많은 문제점을 내포하고 있다. 즉, 모델 자체가 동전 정도의 작은 크기이며, 여기에 수 백개의 미세 홀을 가지고 있어, 성형상 미충진이 발생되기 쉬운 구조이다. 현재 이러한 미세 홀의 수는 점점 증가추세에 있으며, 모델의 전체적인 크기 증가는 매우 제한적임을 감안할 때 정밀사출성형기술의 필요성은 점점 증대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 난성형성 초미세 패턴형태의 형상을 포함하는 BGA 콘넥터의 정밀사출성형기술에 대해 살펴보기로 한다. 실제 모델의 성형에 앞서 해석기술을 활용하여 사전에 모델의 성형 안정성을 살펴보고, 그 결과를 금형설계 및 모델성형에 반영하고자 한다. 즉, 상용 사출성형해석 전용프로그램을 이용한 3D 사출성형해석으로 delivery system(게이트, 런너 등) 및 가스 벤트 위치 등의 금형설계관련 정보기술을 활용하고, 사출성형과 관련된 공정설계변수가 해석대상 모델의 성형성에 미치는 영향을 사전에 검토하여 모델의 성형과정에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 정확히 예측하고자 한다.

2. BGA 콘넥터의 제작과정

2.1 BGA 콘넥터의 설계

BGA 콘넥터 모델의 삼차원 기하학적 형상을 Fig. 1에 제시하였다. 제시된 BGA 콘넥터는 가로 방향의 최대치수가 25.23mm, 세로방향 최대치수 17.098mm 그리고 베이스 플레이트의 두께 1.8mm, 내부 미세 홈이 있는 부분의 두께치수 1.2mm인 전체 부피가 약 391mm³인 모델이다. 한편 미세 홈들의 치수는 450 μ m \times 220 μ m이다. 또한 홈들의 가로길이들 사이의 피치는 134 μ m이고, 세로길이들의 피치는 257 μ m의 협피치를 가지는 모델이다.

2.2 BGA 콘넥터의 금형설계

BGA 콘넥터를 사출성형하는데 사용되는 금형은 삼단금형형태로 설계하였으며, 설계된 몰드베이스의 조립도 형상은 Fig. 2에 제시하였다. 사출물을 성형하기 위한 delivery 시스템 및 BGA 콘넥터의 형상

을 볼 수 있으며, 일반금형보다는 모델의 성형특성상 고압조건이 되므로, 강건 및 기밀 설계기술이 추가되었다.

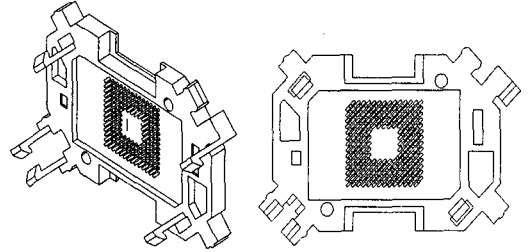


Fig. 1 BGA connector with micro rectangular holes

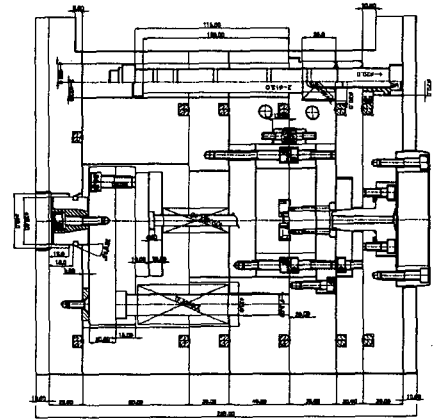


Fig. 2 Moldbase system for BGA connector fabrication

3. BGA 콘넥터의 정밀사출성형해석

일반적으로는 얇은 삼차원 캐비티내에서 용융 고분자 수지의 흐름에 대해 Hele-Shaw 유동 모델^[1]은 비교적 정확한 결과를 제시하여 왔다. 하지만 본 연구에서와 같이 국부적으로 미세 홀을 갖는 모델에 대해서는 2.5D CAE 사출성형 유동해석으로는 그 효과를 보기 어렵다. 왜냐하면 다수개의 홀들로 형성되는 피치사이의 형상은 두께를 정의하기 힘든 삼차원 형상이기 때문이다. 따라서 보다 정밀한 사출성형을 예측하기 위해서는 full 3D 사출성형해석이 필요하다. 현재 3D CAE 사출성형 유동해석은 mesh generation이 어렵고 공정조건 설정이 힘들고 계산시간이 오래 걸려 해석을 시도하기 어려운 실정이다. 그러나 프로그램의 지

속적인 개발과 시스템 향상에 의한 계산속도의 개선으로 인해 3D 사출성형해석이 가능해 지고 있다.

3.1 사출성형과정의 수식화

비탄성, 비등온 비뉴턴 유체유동 가정이 적용된 일반사출성형에 대한 지배방정식은 다음과 같다 [2-4]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) - \nabla p = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p (T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\rho, C_p, k, \eta, \partial \gamma / \partial t$ 는 밀도, 비열, 열전도도, 점성, 전단률을 의미하며, p, T, \mathbf{u} 는 압력, 온도, 속도를 각각 의미한다. 용융고분자수지점도의 비뉴턴 특성은 다음과 같이 수정 Cross-WLF 모델에 의해 표시될 수 있다 [2].

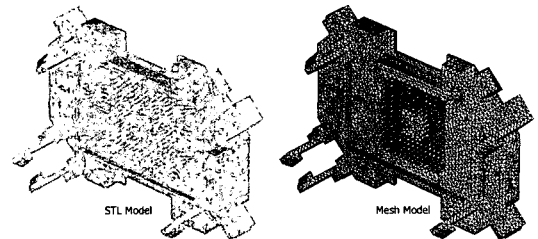
$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_o(T, p)}{1 + (\eta_o(T, p) \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \eta_o(T, p) \\ = D_1 \exp \left(- \frac{A_1 (T - T^*(p))}{\bar{A}_2 + D_3 p + (T - T^*(p))} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 n 은 Power-law지수이고, τ^* 는 Power-law와 뉴턴 유동 사이의 근사 천이 영역에서의 응력레벨이고, $\eta_o(T, p)$ 는 유효전단률이 영일 때의 점도를 의미하며, $T^*(p) = D_2 + D_3 p$ 이다. 식 (4)와 식 (5)는 7개의 상수를 포함한다. BGA 콘넥터를 성형하기 위해서는 기본적으로 고온에서 강성이 유지되어야 하고, 치수안정성이 좋으면서, 유동성 우수한 수지가 사용되어야 한다. 이러한 특성을 만족하는 수지 중 대표적인 종류로는 PES가 있으며, 본 연구에서도 PES중 GF가 20%함유된 일본 三井化學에서 개발된 PES SGP 2020R 그레이드를 사용하여 사출성형 CAE해석을 수행하였다.

3.2 사출성형을 위한 모델링

Fig. 1에서 보듯이 모델 전체적인 형상이 2.5D로 표현되기에는 국부적으로 두꺼운 부분들이 존재한다. 또한 유동길이대비 두께가 상대적으로 작으므로 3D해석을 수행하는 것이 바람직하다. 물론 사출성형과정에서의 유동성을 고려하여 mid-surface를 추출한 후 2.5D를 수행하는 것이 전적으로 부적절하다고 볼 수는 없으나, 이러한 중립면의 추출자체 및 속성을 부여하는 것은 상대적으로 많은 시간을 요한다. 따라서 본 연구에서는 상용 사출성형해석프로그램에서 제시하는 dual domain mesh기법을 이용하여 앞에서 언급된 중립면 추출의 시간을 절약하고, 해석의 신뢰성을 좀 더 보완하기 위해 완전한 삼차원 솔리드 사출성형해석을 수행하기로 한다. 일차적으로 dual domain mesh를 생성하기 위해서는 기하학적 형상 CAD데이터가 필요하며, 이때 사용가능한 CAD데이터 및 중립파일 형태는 prt, parasolid, iges 등 여러 형태가 있으나, 본 연구에서는 STL파일을 사용하여 유한요소 생성을 시도하였다. 이때 사용된 STL파일의 형상을 Fig. 3(a)에서 보여주고 있다.



(a) STL model (b) Dual domain mesh
Fig. 3 STL and mesh model of BGA connector for 3D injection molding analysis(number of dual domain mesh = 20,734)

그림에서 보듯이 STL파일의 특성상 삼각패치들의 조합으로 삼차원 BGA 콘넥터모델이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 STL의 장점은 파일 구조가 매우 간단하며, 곡률이 있는 부분을 표현할 때 조절이 가능하므로 다른 CAD데이터의 사용시보다 메쉬데이터를 생성시 매우 효과적이다. 하지만 작업자에 따라 어떤 경우는 불필요한 부분

에 필요 없는 메쉬들을 형성하여, 전체적으로 비효율적인 작업이 될 수도 있으므로 사용상에 주의를 요한다. 이러한 STL 데이터를 이용하여 생성한 dual domain type의 mesh 결과를 Fig. 3(b)에 제시하였다. 사용된 요소수는 20,734개이다. 이때 유한요소를 생성함에 있어 가장 영향을 준 기하학적 형상치수는 홀 부분의 치수이다.

한편 dual domain mesh를 생성하는 과정에서는 형상을 기준으로 어떻게 두께를 인식하는지 사용자 입장에서는 확인하기가 힘들다. 따라서 전체적인 match ratio로 간접적으로 확인하든지, 일일이 원하는 부위를 확인하거나 조절하는 수밖에 없다. 이렇게 되면 본 모델의 경우는 대표적으로 중심의 여러 개의 미세 홀이 있는 부분의 경우 메쉬 생성 과정에서 프로그램의 알고리즘에 큰 영향을 받을 수 밖에 없는 형상들이 존재하므로, Fig. 4에서와 같이 유동적인 측면에서 두께가 부적절하게 부여될 수 있다.

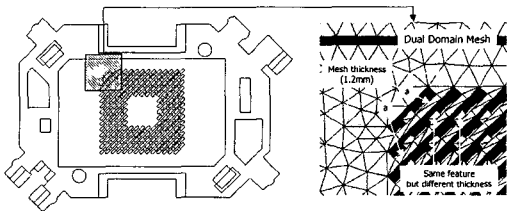


Fig. 4 An example of limitation in thickness presentation with 2.5D mesh for a micro rectangular holes

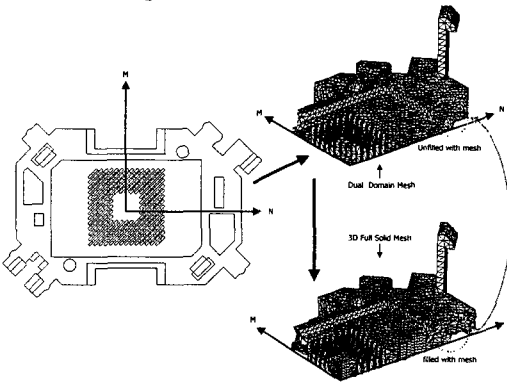


Fig. 5 2.5D & full 3D mesh results of BGA connector

Fig. 4에서 “a”부분의 경우는 홈과 홈사이의 피치이므로 유한요소 생성결과상에서는 이부분이 옆면

의 두께 1.2mm와 동일하게 부여되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림상에는 표현되지 않았으나, 측면들은 피치의 두께가 아닌 피치보다 약 6배 이상의 두께 속성이 부여되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 메쉬 생성과정에서 형상의 두께를 알고리즘으로는 판단하기가 힘들었기 때문이다. 이러한 과도게 부여는 결과적으로 이부분의 유동을 상대적으로 쉽게 만들 것으로 판단된다. 그러므로 보다 정확한 해석을 위해서는 full 3D meshing 작업이 필요하며, 작업한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 그림에서 보듯이 모델의 대표적인 부분의 단면을 dual domain mesh와 full 3D mesh로 제시하여 상호 비교하였다. dual domain mesh의 경우는 내부가 비어있지만 사실상 메쉬가 생성되는 과정에서 보이지 않는 연결성이 존재한다. 하지만 full 3D mesh의 경우는 그림에서 보듯이 사면체 메쉬들로 채워져 있음을 볼 수 있다. 이때 사용된 유한 요소수는 dual domain mesh의 14.5배정도인 약 300,000개이다. 또한 이렇게 생성된 메쉬에 앞 절에서 설계된 Delivery system을 모델링 한 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 제시된 결과는 CAE를 이용하여 여러 번의 T/O를 거쳐 생성된 결과이다.

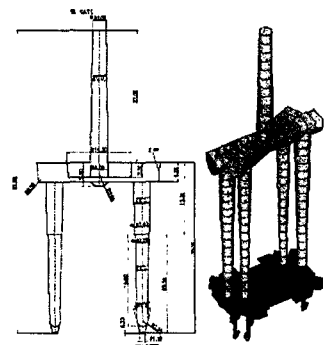


Fig. 6 Result of delivery system design and mesh presentation

3.3 사출성형조건

본 연구에서 BGA 콘넥터의 정밀사출성형에 사용된 사출기는 SUMITOMO SE-50으로 형체력이 50톤이다. 성형조건은 사출시간 0.2초, 금형온도 170℃, 수지온도 370℃, 보압 80% 및 생산성을 고려하여 냉각시간을 8sec로 하였다. 모델의 미세형상 특성

상 BGA 콘넥터의 성형성 확보를 위해서는 가능한 한 빠른 충전이 발생될 수 있도록 성형조건을 설정해야 한다.

3.4 성형공정 최적화 및 비교

성형과정에서의 대표적인 충전 패턴 결과를 Fig. 7에 제시하였으며, full 3D mesh의 경우는 사출시간을 0.2초에서 0.1초로 하여 해석을 수행하고 결과를 비교하였다. 0.2초로 한 경우는 해석상 미충진 결과가 발생되었기 때문이다.

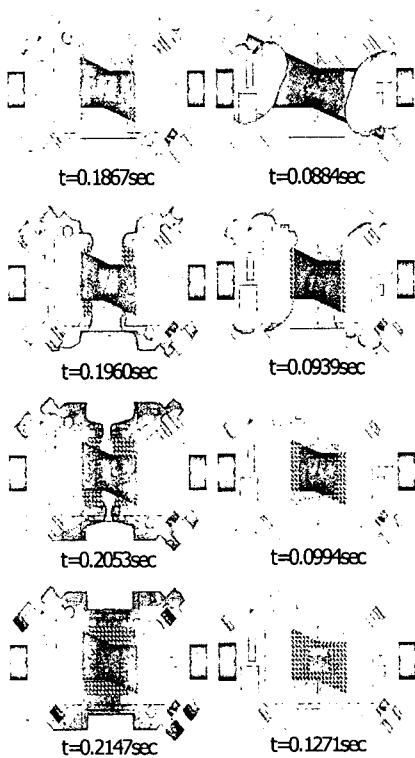


Fig. 7 Comparisons of filling patterns between 2.5D and full 3D analysis for BGA connector

Fig. 7의 왼쪽 열 결과는 dual domain 2.5D mesh를 사용한 결과를 보여주고 있으며, Fig. 7의 오른쪽 열 결과는 full 3D mesh인 사면체 메쉬를 사용한 결과를 보여주고 있다. 상호의 비교에서 보듯이 미세 홀들이 있는 곳에 용융수지가 도달하기 전까지는 서로 비슷한 충전 패턴을 보이고 있으나, 용융수지가 홀들을 지나면서는 상호 다른 결

과를 보여주고 있다. 즉 dual domain mesh를 이용한 결과에서는 홀들의 영향이 거의 없이 충전이 발생하는 것처럼 보이나, full 3D mesh를 사용한 결과에서는 미세 홀들로 인한 hesitation 영향이 확실히 있음을 볼 수 있다. 앞서서와 같이 BGA 콘넥터의 full 3D 사출성형해석을 수행하여 사출 성형성을 조사하였으며, 해석결과를 통하여 모델의 성형성을 확보하기 위해서는 가장 문제가 되는 부분이 미세 홀 부분임을 확인하였다. 이러한 미세 홀의 완전한 성형을 위해서는 용융수지가 캐비티내로 주입시 발생될 수 있는 빠른 열전달을 극복할 수 있는 수지주입속도가 필요함을 알 수 있었다. 즉 고속 사출이 필요하며, 최종적으로 수지의 충전이 발생하는 부분에서의 가스빠기가 중요함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 하여 최종 금형설계를 수행하였으며, 설계 제작된 금형으로 시사출을 하였다. 앞 절에서도 제시되었던 dual domain mesh와 full 3D mesh 사이의 충전패턴의 차이를 실험결과와 비교하기 사출과정에서 임의로 미충진을 발생시켜 상호 충전패턴을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 결과에서 보듯이 본 모델의 경우는 dual domain mesh를 사용한 경우 실제 성형과는 다른 결과를 제시함을 알 수 있다. 따라서 본 모델과 같이 미세 홀들을 많이 가지고 있는 모델의 경우는 보다 정밀한 해석결과 도출을 위해 full 3D 해석이 상대적으로 필요함을 알 수 있다.

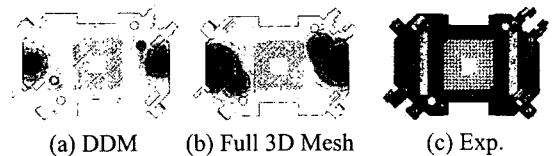


Fig. 8 Comparison of filling patterns between the results of CAE analysis and fabricated result for BGA connector(DDM: Dual Domain Mesh)

4. 결론

본 연구에서는 미세 사각홀을 갖는 플라스틱 BGA 콘넥터의 정밀사출성형에 대한 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충전해석을 통해 모델의 성형성 확보를 위해서는 고속의 충전 및 가스빼기를 위한 추가적인 설계가 필요함을 확인 할 수 있었다.

(2) 다수개의 미세 홀을 갖는 BGA 콘넥터 모델에 대해 기존의 2.5D mesh와 full 3D mesh에 의한 충전 결과를 비교하였으며, 2.5D의 경우는 미세 홀 부분이 실제 유동적인 측면에서의 두께보다 메쉬 생성 과정에서 훨씬 두껍게 생성되어 full 3D에 의한 결과와는 다른 충전 결과를 제시함을 확인하였다.

(3) 정밀사출성형 해석결과의 신뢰성확보를 위해 성형실험을 수행하였으며, 본 연구에서 제시된 모델과 같이 미세 홀들을 많이 가지고 있는 모델의 경우는 정밀한 예측을 위해서는 full 3D 해석이 상대적으로 필요함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부의 ATC사업(1단계 중 2004년

도, 과제번호: 10007747)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Hieber, C.A. and Shen, S.F., "A finite-element /finite-difference simulation of injection-molding filling process," *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 1980, 7. pp.1-32.
- [2] A. I. Isayev and R. K. Upadhyay, "Injection and Compression Molding Fundamentals," Marcel Dekker Inc., New York, 1987.
- [3] C. C. Lee and J. M. Castro, "Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing," Tucker III, C. L. (ed.), Hanser Publisher, New York, 1989.
- [4] K. H. Huebner and E. A. Thronton, "The finite element method for engineers," Chap. 4 & 5, John Wiley & Sons, New York, 1982.