

3차원 입체요소를 사용한 정밀 전자부품의 사출성형해석

박 근* · 박제현** · 최상련**

Numerical Analysis for Injection Molding of Precision Electronics Parts using Three-Dimensional Solid Elements

K. Park, J. H. Park and S. R. Choi

Abstract

Most of numerical analyses for injection molding have been based on the Hele Shaw's approximation: two-dimensional flow analysis. In some cases, that approximation causes significant errors due to loss of geometrical information as well as simplification of the flow characteristics along the thickness direction. The present work covers numerical analyses of injection molding using three-dimensional solid elements. The accuracy of the analysis results has been verified through some numerical examples in comparison with the classical shell-based approach. The proposed approach are then applied to predict product defects and to improve flow characteristics for a precision electronics part. In addition, design of experiment has been utilized in order to find the optimal process conditions for better product quality.

Key Words : Finite Element Analysis, Injection Molding, Solid Element, Design of Experiment

1. 서 론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자제품을 제작하는 생산기술로서, 높은 품질과 신속한 납기가 요구된다. 이를 위해서는 게이트의 위치 및 크기, 러너의 배열, 냉각회로의 구성 등의 금형설계 조건과 사출압, 사출온도, 금형온도, 냉각시간 등의 성형조건을 모두 고려해주어야 한다. 이러한 인자들은 각각 독립적인 요소로서만이 아니라, 여러 인자들간의 상호 복합적인 작용으로 제품의 품질 및 생산성에 영향을 미치게 된다. 따라서 상기의 모든

인자에 대한 영향을 분석하여 최적의 공정조건을 도출하기에는 많은 시간과 노력이 소요된다.

이러한 시간과 비용을 줄이기 위하여 컴퓨터 원용 수치해석(Computer Aided Engineering; CAE)기법이 사출성형 분야에도 제품설계, 금형설계 및 성형조건 분석 등 다양한 목적으로 활용되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나 대부분의 사출성형 유동해석은 평면방향 2차원 유동으로 가정된 유한요소 모델을 적용하고 있다. 따라서 사출성형 해석을 위해서는 입체적으로 정의되어 있는 제품의 형상을 평면 혹은 곡면을 사용하여 단순화시켜주고, 이에 기반

* 정회원, 삼성전기(주) 금형개발실

** 삼성전기(주) 금형개발실

하여 2차원 박막(shell)요소를 사용한 유한요소 격자를 생성해주어야 한다. 이러한 제품형상의 단순화는 제품 모델의 변환과정에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 경우에 따라 제품의 기하학적 형상정보가 왜곡되는 단점을 가지고 있다. 특히 소형 제품의 경우 두께에 대한 특성 길이의 비가 그다지 크지 않아 두께방향의 유동이나 압력구배를 무시할 경우 해석의 신뢰성에 심각한 영향을 미치게 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 최근들어 3차원 입체 요소를 사용한 사출성형 해석에 관한 연구가 진행되어왔다.^(5,6) 본 연구에서는 Moldflow社에서 개발한 Flow3D⁽⁶⁾를 도입하여 3차원 입체요소를 사용한 사출성형 해석의 특성에 대해 고찰하고, 기존의 박막요소를 사용한 결과와 실험을 통해 비교해보았다. 또한 정밀 전자부품의 성형과정에서 웰드라인(weldline)의 예측 및 개선과정에 적용하고, 이와 병행하여 실험계획법을 도입한 최적의 사출조건 선정을 통해서 제품의 품질 개선을 위한 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 사출성형의 지배방정식

고분자의 유동은 일반적으로 점성이 전단변형을 속도 (shear rate), 온도, 그리고 압력에 따라 변하는 비뉴토니안(non-Newtonian) 유체로 알려져 있다. 고분자의 유동을 수학적으로 묘사하기 위한 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

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

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot (\eta \vec{\gamma}) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T \right) = k \nabla^2 T + \eta \vec{\gamma} : (\nabla \vec{V}) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도이고, η 는 점성계수로서 5개의 재료상수를 갖는 수정된 Cross-exp 점성모델이 널리 사용되며 다음과 같이 표현된다.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (4)$$

여기서 n 은 지수, τ^* 는 전단 전이응력(transition stress), η_0 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)이다. 한편 중력의 영향 및 전도에 의한 열전달 성분을 무시하면 식 (1)부터 (3)은 직교좌표계에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (6c)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (7)$$

일반적으로 사출성형에 의해 성형되는 제품의 두께는 유동평면의 특성길이에 비해 매우 작기 때문에 평면방향에 비해 두께방향의 유동은 상대적으로 무시할 수 있다. 이러한 가정 하에 두께방향의 압력구배를 무시한 Hele-Shaw의 모델이 사출성형의 수치해석에 널리 사용되고 있으며, 이때 식 (6c)와 (7)은 다음과 같이 단순화된다.⁽⁴⁾

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \approx 0 \quad (8)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (9)$$

2.2 부분요인실험에 의한 실험계획

실험계획법(Design of Experiments; DOE)은 공정의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 체계적으로 조사하기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 이를 분석함으로써 최적의 공정변수를 경제적으로 찾아내고자 하는 방법이다.⁽⁷⁾ 제품을 제작한다는 관점에서 볼 때 실험계획법은 제품에 영향을 미치는 인자를 체계적으로 분석함으로써 제품의 품질과 신뢰성, 생산성 및 가격의 향상에 기여하고 있다. 이러한 실험계획법은 크게 완전요인(full factorial)에 대한 실험계획과 부분요인(fractional factorial)에 대한 실험계획으로 구분될 수 있다. 완전요인 실험은 모든 인자의 주효과(main

effect) 및 각 인자간의 교호작용(interaction)을 고려할 수 있다는 장점이 있으나, 인자의 모든 조합에 대해 실험을 실시해야 하므로 실험의 수가 증가하는 단점이 있다. 반면에 부분요인 실험은 완전요인 실험의 일부를 실행하여 주요요인을 선별하기 위해 사용되는 방법으로, 주효과 및 저차원 교호작용에 의한 영향만을 고려하는 방법이다.

본 연구에서는 직교배열표에 기초한 부분요인 실험계획을 적용하였다. 실험계획법에 의거하여 실시된 결과를 분석하기 위해서는 각각의 인자에 대한 주효과 및 2차원 교호작용의 영향을 비교해주어야 한다. j -번째 인자의 주효과 및 j -번째 인자와 k -번째 인자간의 교호작용은 각각 다음과 같이 계산된다.⁽⁶⁾

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{ij} \times R_i)}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (10)$$

$$I_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^N [(I_{ij} \times I_{ik}) \times R_i]}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (11)$$

여기서 R_i 는 i -번째 실험에 대한 결과치, E_j 는 j -번째 요인에 대한 주효과, I_{jk} 는 j -번째 인자와 k -번째 인자간의 교호작용의 효과를 의미하며, I_{ij} 는 j -번째 인자의 수준을 -1과 1 사이에서 정규화시킨 값으로, 다음과 같은 직교성이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^N I_{ij} = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

3. 입체요소를 사용한 사출성형의 유동해석

3.1 스피커 그릴 성형공정의 유동해석

일반적으로 사출성형품의 특성길이가 두께에 비해 10배 이상이 되면 해당 제품은 Fig. 1(a)와 같이 얇은 제품으로 정의할 수 있으며, 전술한 Hele Shaw의 가정에 의해 평면유동에 기초한 해석으로 단순화할 수 있다. 반면에 상대적으로 두꺼운 제품의 경우는 Fig. 1(b)와 같이 형상을 중간면으로 가정하는데 많은 문제가 있다. 이러한 두께비에 따른 유동의 차이를 효과적으로 비교해보기 위해 Fig. 2와 같은 스피커 그릴(speaker grill)을 예제로 선정하였다. 제품의 형상을 살펴보면 중앙의 그릴부는 특성길이, 즉 그릴의 폭(2.23mm)과 두께(2.0mm)가 큰 차이가 없는 반면, 나머지 부분은 두께에 비해 형상길이

가 훨씬 길어 대조를 이루고 있다. 이러한 형상조건에서의 유동의 차이를 비교하기 위해 각각 박막요소와 입체요소를 사용한 해석을 수행하였으며, Table 1에 해석 조건을 요약하였다.

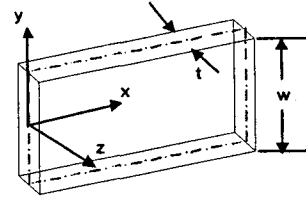


Fig. 1(a) Schematic description of Hele Shaw's model : thin geometry

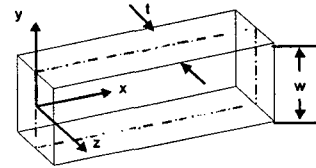


Fig. 1(b) Schematic description of Hele Shaw's model : thick geometry

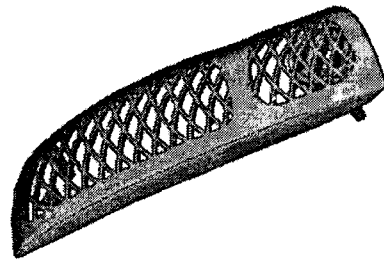


Fig. 2 Three-dimensional view of a speaker grill

Table 1 Injection molding conditions for speaker grill

Material	ABS
Nozzle temperature (°C)	225
Mold temperature (°C)	50
Injection time (sec.)	4.0
Gate type	side gate

Fig. 3(a)는 박막요소를 사용하였을 경우의 단계별 유동패턴으로, 그릴부의 유동이 주변에 비해 다소 더디게 진전되고 그릴부를 지난 후에 마지막으로 충전됨을 알 수 있다. 반면에 입체요소를 사용한 경우에는(Fig. 3(b) 참조) 그릴부에서 유동의 정체현상(hesitation)이 발생되

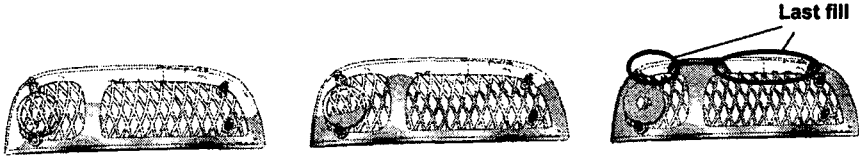


Fig 3(a) Filling pattern: CAE analysis using shell elements

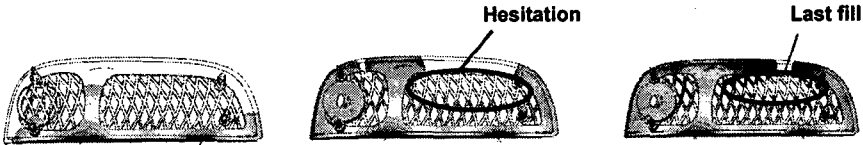


Fig 3(b) Filling pattern: CAE analysis using solid elements

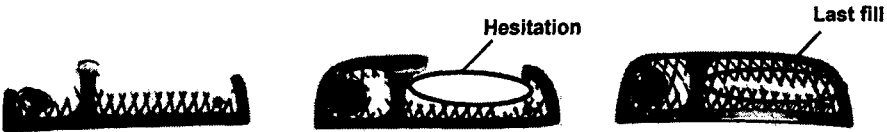


Fig 3(c) Filling pattern: Experimental result

어 결과적으로 그릴부에서 최종 충전이 이루어지는 것으로 예측되었다. 이를 검증하기 위해 실험을 수행하였고, 단계별 유동양상을 Fig. 3(c)에 도시하였다. 실험결과를 보면 역시 그릴부에서 유동의 정체현상이 심하게 나타나 그릴의 중앙부에서 최종 충전이 이루어졌으며, 이러한 현상은 입체요소를 사용하였을 경우에 보다 정확하게 예측할 수 있었다.

3.2 제품 형상에 따른 유동특성 고찰

유동패턴의 차이가 생기는 원인을 분석하기 위해 Fig. 4에 입체요소를 사용한 경우 충전 완료시점에서 임의의 단면에 대한 온도분포를 도시하였다. 충전중에 고온의 고분자수지는 상대적으로 온도가 낮은 금형면과 접촉하며 열을 빼앗기게 된다. 이때 제품의 두께방향으로 손실되는 열량을 Q_n , 평면방향으로 손실되는 열량을 Q_s 라 하면, 두께(t)와 제품의 특성길이(w)에 비해 따라 두께에 비해 특성길이가 아주 큰 경우 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\alpha(Q_n) \gg \alpha(Q_s), \text{ if } w \gg t \quad (13)$$

따라서 평면방향으로의 열량은 상대적으로 무시할 수 있어 금형에 수직한 방향의 열전달만이 고려된다. 그러

나 그릴부와 같이 두께와 특성길이가 비슷한 수준일 경우는 Q_n 과 Q_s 의 크기에 큰 차이가 없어 식 (13)과 같은 가정이 성립할 수 없다. 즉 박막요소를 사용한 경우에는 평면방향으로 손실되는 열량이 무시되기 때문에 그릴부에서 발생하는 정체현상을 정확하게 묘사할 수 없었던 것으로 판단된다. 반면에 입체 요소를 사용한 경우에는 모든 방향으로의 열전달 효과가 고려되어 보다 정확한 유동의 예측이 가능했으며, 결과적으로 그릴부에서의 정체현상을 보다 정확하게 묘사할 수 있었다.

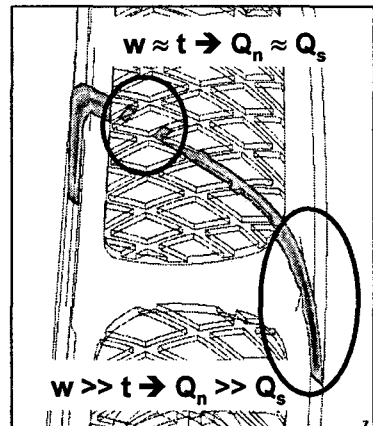


Fig. 4 Sectional view for the temperature distribution

4. 정밀 전자부품의 결함 개선에의 적용

4.1 사출성형 해석을 통한 결함예측 및 개선

정밀 전자부품의 경우 일반 사출성형품에 비해 크기가 작고, 제품의 특성길이가 두께에 비해 그다지 크지 않은 경우가 많아 기존의 박막요소 기반의 해석기법으로는 적용상의 어려움이 존재해왔다. 본 절에서는 이러한 관점에서 정밀 전자부품의 결함 개선 과정에서 박막요소 기반 접근방법과 입체요소 기반 접근기법을 적용하여 결과를 비교해보도록 하겠다. Fig. 5에 플로피디스크 드라이버용 정밀부품의 형상을 도시하였다. 그림에서 표시된 구멍부 하단에서 웰드라인이 발생되었으며, 실제 제품의 조립성 검사시에 해당 부위에서 파단이 발생하는 경우가 잦아 개선을 위한 설계변경이 요구되었다. 사출성형 조건은 Table 2와 같으며, 역시 박막요소 및 입체요소 기반 해석을 적용하여 결과를 비교해보도록 하겠다.

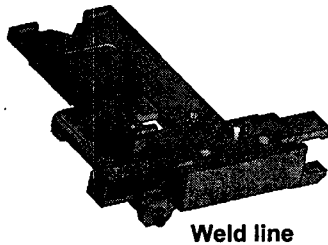


Fig. 5 Three-dimensional view of a FDD part

Table 2 Injection molding conditions for the FDD part

Material	PC (GF 30%)
Nozzle temperature (°C)	300
Mold temperature (°C)	60
Injection time (sec.)	1.0
Gate type	pinpoint gate

Fig. 6(a)와 (b)에 각각 박막요소와 입체요소를 사용하였을 경우의 단계별 유동패턴을 도시하였으며, 실험결과를 Fig. 6(c)에 비교하였다. 전체적인 유동패턴은 박막요소와 입체요소 모두 실험결과와 유사하게 나타났고, 특히 하단부 충전시 발생하는 유동의 정체현상을 모두 정확하게 예측할 수 있었다. 그러나 Fig. 7에 도시한 바와 같이 구멍 주위에서 형성되는 웰드라인의 위치를 파손 위치와 비교해보면 박막 요소의 경우보다는 입체요소를 사용한 경우가 보다 정확한 예측이 가능하였음을 알 수

있다. 따라서 현재 설계를 기준으로 구멍부 주위 웰드라인의 위치를 개선하기 위해 입체요소에 의한 해석방법을 적용하였다.

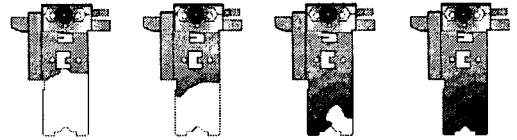


Fig 6(a) Filling pattern: using shell elements

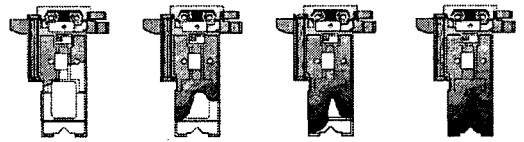


Fig 6(b) Filling pattern: using solid elements



Fig 6(c) Filling pattern: experimental result

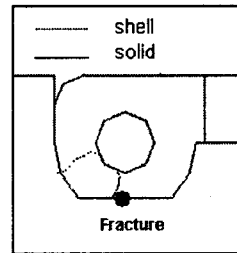


Fig. 7 Comparison of weld line locations

Fig. 8에 웰드라인의 각도 및 유효 두께(l_{eff})의 정의를 도시하였다. Fig. 7의 파단 위치에서 유추할 수 있듯이 웰드라인은 수직 방향에 가깝게 존재하며, 이는 제품의 유효두께가 가장 얇은 부위에 해당한다. 따라서 웰드라인의 각도를 이동시켜준다면 그만큼 해당 부위의 유효두께가 증가하여 강도를 향상시켜줄 수 있을 것이다. 이를 위해 Fig. 9과 같이 제품 설계를 수정하였다. 즉 구멍 상단의 빗금친 부분(①)에 대해 높이 0.5mm만큼 단차를 부여하고, 우측에 빗금친 부분(②)과 같은 리브를 추가하여 구멍 좌측으로 진행되는 유동은 감소시키고, 우측으

로 진행되는 유동은 증가시켜 결과적으로 웰드라인의 위치를 이동시키고자 하는 방안으로 형상을 변경해주었다.

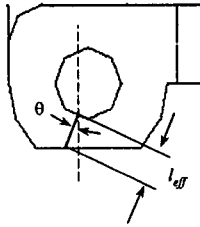


Fig. 8 Definition of the effective thickness

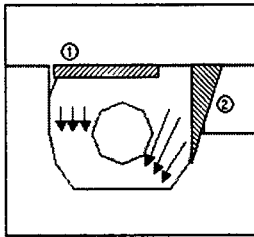


Fig. 9 Design modifications to improve weld location

변경된 설계안에 대해 입체요소를 사용한 유동해석을 수행한 결과 Fig. 10과 같이 웰드라인의 각도(weld angle)가 이동됨을 확인하였고, 이러한 결과를 적용하여 제품의 결함을 획기적으로 개선할 수 있었다. Table 3에 변경전과 변경후의 해석결과를 비교하였다.

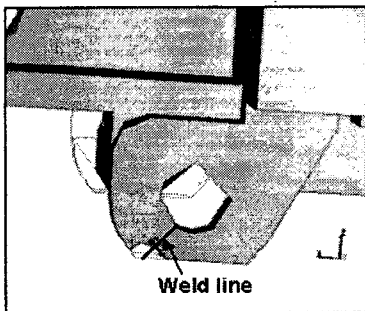


Fig. 10 Predicted weld locations using solid elements

Table 3 Comparison of the results

Analysis results	Original design	Modified design
weld angle (degree)	3.1	28.7
effective thickness (mm)	0.81	1.43

4.2 실험계획법을 이용한 성형조건 최적화

앞절에서는 CAE 해석을 통해 웰드의 각도를 이동시키기 위한 설계변경을 적용하여 웰드부의 유효두께를 증가시킴으로써 제품의 파단을 방지하기 위한 내용에 대해 기술하였다. 본 절에서는 이와 병행하여 개선된 금형을 사용하여 적절한 사출성형 조건 선정을 통해 구멍부로 유입되는 유동특성을 개선함으로써 결과적으로 웰드부의 유효두께를 보다 증가시키고자 한다.

사출성형 조건으로는 사출 및 보압과정에서의 압력, 속도 및 시간, 수지와 금형의 온도 등 많은 변수들이 존재하며, 상기 인자들은 상호간에 서로 연관되어 있는 경우가 많아 특정 인자만을 고려해서는 최적의 조건을 도출하기가 어렵다. 실험계획법(Design of Experiments; DOE)은 공정의 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정하고 이들의 관계를 체계적으로 조사하기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 이를 분석함으로써 최적의 조건을 경제적으로 찾아내고자 하는 방법으로, 사출성형 분야에 있어서도 최적 공정변수를 도출하기 위한 방안으로서 적용되어 왔다.^(9,10)

본 연구에서는 웰드부의 유효두께 증가를 위해 실험계획법을 통한 최적의 사출성형 조건을 도출하였다. 이를 위해 사출압, 보압, 사출속도, 금형온도 4가지의 성형조건을 입력변수로 선정하여 Table 4와 같이 2 수준으로 실험계획을 수립하였다. 실험계획은 부분요인 실험계획법에 기초하여 총 16번의 실험을 수행하였으며, 각 조건의 경우에 4번씩 반복실험을 수행하여 실험결과와 신뢰도를 확보하였다. Table 5에 직교배열 특성에 의거하여 수립된 실험계획 및 실험결과를 요약하였으며, 이때 측정된 구멍의 직경이 작을수록 웰드부의 유효두께가 큰 것으로 유추할 수 있다.

Table 4 Design parameters for experiments

Factor	Description	Level 1	Level 2
A	Injection pressure	56kgf/mm ²	64kgf/mm ²
B	Injection speed	48%	58%
C	Packing pressure	36kgf/mm ²	44kgf/mm ²
D	Mold temperature	50℃	80℃

Fig. 11에 구멍직경에 대한 4개의 인자의 주효과를 도시하였으며, 여기서 사출속도(B)는 결과에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판명되었다. Fig. 12에 인자간의 2원 교호작용(two-way interaction)을 도시하였는데, 여기서 2개의 직선그래프의 기울기가 차이가 클수록 교호작용이 크게 작용하는 것으로 해석할 수 있다.

Table 5 Result of the DOE for hole diameter

No	A	B	C	D	Diameter(mm)
1	56	48	44	80	2.028
2	64	58	44	80	2.022
3	56	58	44	50	2.032
4	56	58	44	80	2.029
5	64	58	36	50	2.027
6	56	58	36	50	2.040
7	56	48	44	50	2.033
8	64	48	44	80	2.021
9	56	48	36	80	2.036
10	56	48	36	50	2.041
11	64	48	36	50	2.027
12	64	48	44	50	2.026
13	56	58	36	80	2.035
14	64	48	36	80	2.028
15	64	58	36	80	2.028
16	64	58	44	50	2.026

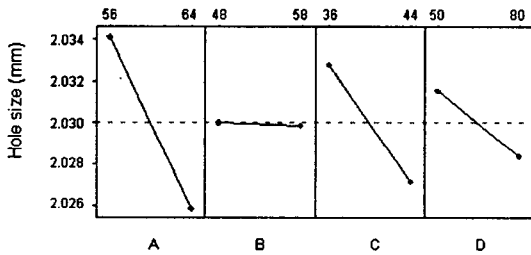


Fig. 11 Main effect plots for hole size

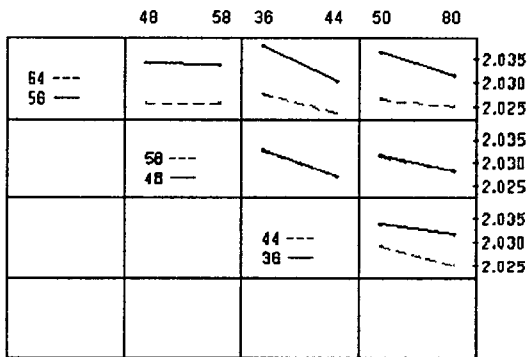


Fig. 12 Two-way interaction plots for hole size

상기 결과로부터 인자간의 교호작용은 유의하게 작용하지 않음을 알 수 있으며, 따라서 A, C, D의 3개 변수

만을 구멍의 직경에 대해 유의한 인자로 선정할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 3개의 변수에 대한 회귀식을 도출하여 최적의 결과를 얻기 위한 회귀분석(regression analysis)을 실시하였다. 회귀분석 결과 얻어진 최적의 공정변수는 Table 6에 요약하였으며, 이러한 공정조건을 적용하여 양산에 투입한 결과 기존 8.6%였던 제품의 불량율을 1.0% 미만으로 감소시킬 수 있었다.

Table 6 Selected value for process parameters

Factor	Description	Selected value
A	Injection pressure	61kgf/mm ²
B	Injection speed	58%
C	Packing pressure	42kgf/mm ²
D	Mold temperature	70℃

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 사출성형 해석의 정밀도 향상을 위해 입체요소를 사용한 유동해석에 관한 연구를 진행하였다. 이러한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 사출성형의 이론적 배경을 분석하여 기존의 Hele Shaw 모델에 기초한 박막요소 기반 수식화의 문제점을 고찰하였고, 이를 해결하기 위한 방안으로 3차원 입체요소를 사용한 해석을 도입하였다.

(2) 입체요소를 사용하여 스피커 그릴에 대해 유동해석을 수행하였고, 실험결과와의 비교를 통해 기존의 박막요소로는 정확한 묘사가 어려웠던 그릴부에서의 유동의 정제현상을 보다 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

(3) 정밀 전자부품의 결합 개선을 위해 입체요소를 사용한 유동해석을 통해 웰드라인을 정확하게 예측하였고, 이를 토대로 웰드라인의 개선을 위한 설계변경 방안을 검증하였다. 이와 병행하여 실험계획법에 의거한 최적성형조건을 도출함으로써 제품 품질의 개선에 기여할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Heiber, C. A. and Shen, S. F., 1980, "A finite element/ finite difference simulation of the injection molding filling process", *J. Non-Newton.*

Fluid Mech. Vol. 7, pp. 1~32.

- (2) Wang, V. W., Heiber, C. A., and Wang, K. K., 1987, "C-Flow: A CAE package with high-level interactive graphics", *Appl. Comp. Aided Engng. In Injection Molding*, pp. 230~246.
- (3) Chiang, H. H., Heiber, C. A., and Wang, K. K., 1991, "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding, Part I: Formulation", *Polym. Eng. Sci.* Vol. 31, pp. 116~124.
- (4) Kennedy, P., 1993, *Flow analysis reference manual*, Moldflow Pty. Ltd.
- (5) Pillai, K. M., Tucker III, C. L., and Phelan, F. R., 2000, "Numerical simulation of injection/compression liquid composite molding", *Composites: Part A*, Vol. 31, pp. 87~94.
- (6) Moldflow Co., 2000, *MPI/Flau3D Training Manual: Release 2.0*, Moldflow Pty. Ltd.
- (7) Krottmaier, J., 1993, *Optimizing engineering designs*, McGraw-Hill, New York.
- (8) Schmidt, S. R. and Launsby, R. G., 1997, *Understanding industrial designed experiments*, Air Academy Press, Colorado.
- (9) Park, K., Ahn, J. H., and Choi, S. R., 2000, "Optimal design for injection molding process using design of experiments and finite element analysis" *CAE and Related Innovations for Polymer Processing, IMECE 2000*, Orlando, USA, pp. 63~74.
- (10) Lu, X. and Khim, L. S., 2001, "A statistical experimental study of the injection molding of optical lenses", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 189~195.