

치과용 스케일러 금형의 분말사출성형 CAE 해석설계

황철진[#], 고영배¹, 박형필^{1,2}, 정성택³, 이병옥²

CAE Analysis of Powder Injection Molding Process for Dental Scaler Mold

C. J. Hwang, Y. B. Ko, H. P. Park, S. T. Chung, B. O. Rhee

(Received May 12, 2005)

Abstract

Powder Injection Molding(PIM) has recently been recognized as an advanced manufacturing technology for low-cost mass production of metal or ceramic parts of complicated geometry. With this regards, design technology of dental scaler tip PIM mold, which has complex shape and small core pin (diameter=0.6mm), with the help of computer-aided analysis of powder injection molding process was developed. Computer-aided analysis for dental scaler tip mold was implemented by finite element method with non-Newtonian fluid, modified Cross model viscosity, PvT data of powder/binder mixture. Computer-aided analysis results, such as filling pattern, weldline formation, air vent position prediction were compared with experimental result, and eventually have been shown good agreement. The core pin (diameter=0.6mm) deflection analysis of dental scaler tip PIM mold during PIM filling process was also investigated before mold fabrication.

Key Words : Dental Scaler Tip, Powder Injection Molding(PIM), Injection Mold, Mold Design, CAE Analysis

1. 서 론

치과용으로 사용되는 스케일러 장비는 초음파 방식으로 장비 끝단에 장착하는 스케일러 팁(scaler tip)을 초음파를 이용하여 진동을 발생시켜 치아표면과의 접촉을 통하여 치아에 발생된 치석을 제거함과 동시에 잇몸을 치료하는 목적으로 사용되는 장비로 치의학에서 널리 사용되는 장비이다[Fig. 1]. 하지만 이러한 스케일러 장비는 국내에서 생산되어 판매되고 있지만 스케일러 팁의 경우는 그 종류가 다양하고 수요가 큰 반면에 대부분의 경우 수입품에 의존하고 있는 실정이다.

이러한 근본적인 이유 중에 가장 큰 것은 제품의 특성상 순수 기계가공에 의존하여 생산하기 때문이

다. 기계가공의 경우에는 제품의 정밀도 측면에서 뛰어나기 때문에 형상이 복잡한 스케일러 팁의 가공이 가능하다는 장점이 있지만, 제작 공정수, 가공가격, 재료 손실률에 따르는 재료비증가, 양산성의 문제점 등의 단점을 가지고 있다. 따라서 다품종 소형 부품의 생산을 위한 방식으로는 어려움이 따른다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고자 기계가공을 대체 할 수 있는 분말사출성형공정을 스케일러 팁 생산에 적용하기 위해 CAE를 통한 금형설계를 하고자 한다.

이를 위해 금형설계 단계에서부터 CAE를 적용하여 금형설계상 문제점 및 성형성을 검증하고 최종적으로 최적의 금형설계 및 성형공정상에서 발생할 수 있는 문제점들을 파악하여 이를 해결하는 것을

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

2. 아주대학교 기계공학과

3. ㈜세타택

교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail:cjhwang@kitech.re.kr

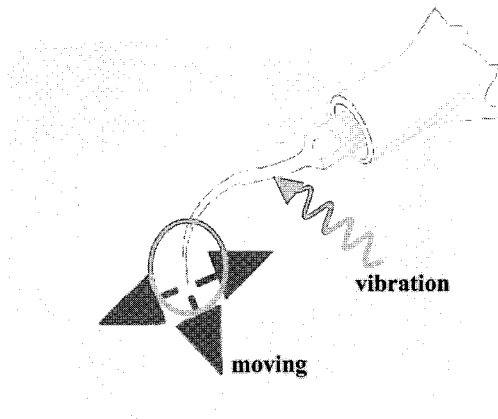


Fig. 1 Schematic view of dental scaler usage

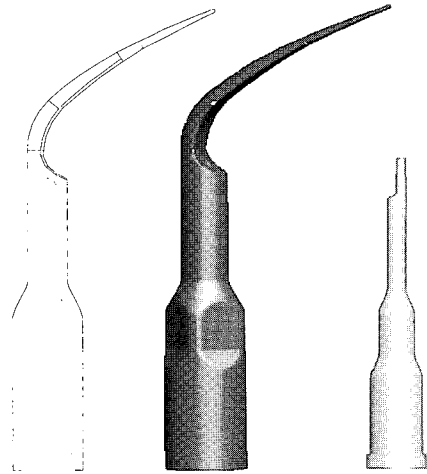


Fig. 2 Final design of dental scaler tip

것을 목적으로 한다[1,2,3].

2. 스케일러 팁 제품 및 금형설계

스케일러 팁의 형상과 기능을 바탕으로 제품의 기능 향상 및 분말사출용 금형 제작을 위한 스케일러 팁의 제품 설계를 진행하였다.

기본적으로 스케일러 팁은 진동발생 장치에 장착하여 사용하는 것이므로 이를 용이하게 하기 위해서 제품의 하단부인 공급수 입구측에 나사산 가공이 필요하게 된다. 이를 위해서는 반드시 일정한 살두께를 확보해야 하고, 스케일러 팁의 크기가 매우 작기 때문에 보관 및 장비 체결시 회전방지를 위해 일정한 단면형상이 유지되어야 한다.

따라서 이러한 요구사항을 고려한 스케일러 팁 제품의 기능 및 디자인 개선을 제품설계에 반영하고 분말사출용 금형을 통한 제품생산을 위한 금형설계도 동시에 고려하여 진행하였다. 제품의 기능과 금형제작의 용이성을 동시에 만족하는 제품 설계를 위하여 스케일러 팁의 유로를 결정하였고, 토출부의 형상을 변화 시켜 1개의 코어핀을 이용하여 제품을 성형하도록 하였으며 공급수가 자연스럽게 유로를 따라 흐를 수 있도록 설계하였다. Fig. 2에 최종적으로 설계된 제품 형상을 보여주고 있다.

Fig. 3에서는 LDPE로 사출한 성형품과 STS 316L의 분말혼합체(Powder/Binder Mixture)로 성형한 소결 전의 성형품 및 소결이 완료된 제품을 보여 주고 있다. 제품크기가 차이가 크게 나타나는 것은

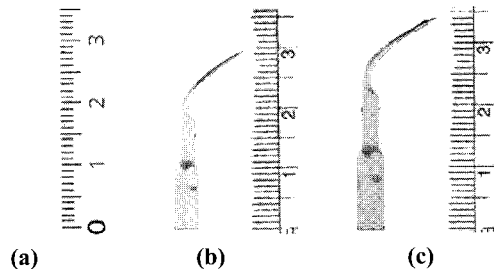


Fig. 3 Photos of injection molded dental scaler tip with (a) LDPE, (b) PIM feedstock, and (c) that of after sintering

분말사출성형공정의 경우 탈지 공정 중 바인더 재료로 사용된 고분자 재료가 제거되고 금속 분말체들이 소결공정 중에 고온에서 결합하여 부피 수축이 발생하였기 때문이다.

3. 스케일러 팁 분말사출성형해석

본 연구에서 사용한 CAE 해석 프로그램은 사출 성형공정해석에 널리 사용되고 있는 Moldflow™를 사용하였으며[3], 이 때의 연속방정식, 운동방정식, 에너지 방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} + (\eta \frac{\partial v_x}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} + \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\rho C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(x(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

이때 점성(η)은 7 개의 재료상수(n, τ*, D₁, A₁, \tilde{A}_2 , D₂, D₃)를 갖는 modified Cross model 을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{(1-n)}} \quad (5)$$

여기서 n 은 지수, τ* 는 전단 전이응력(transition stress), η₀ 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성 계수로 다음과 같다.

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)}\right] \quad (6)$$

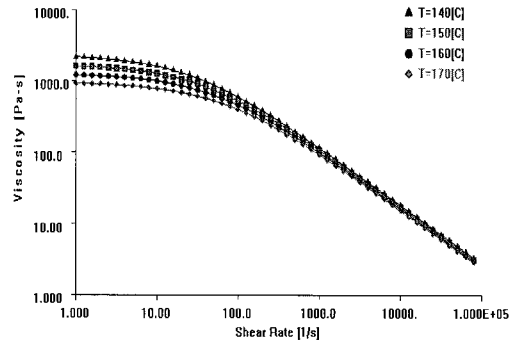
$$T^* = D_2 + D_3 * P, \quad A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 * P \quad (7)$$

분말사출성형에 사용된 분말혼합체인 STS316L 의 물성치는 실험에 의해 얻어진 데이터를 직접 프로그램에 적용하기 위하여 user material DB를 작성하여 사용하였고, 이에 따른 STS316L의 성형 온도 범위에서 전단률 변화에 따른 점도 특성 변화와 압력, 온도, 부피와의 관계를 나타내는 PvT선도를 Fig. 4 에 제시하였고, 점성모델에 사용된 상수값은 Table 1 에 나타나 있다.

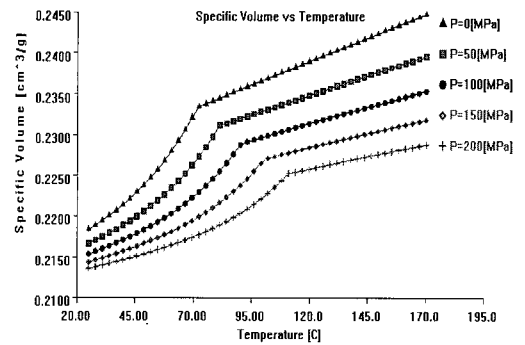
유한요소모델의 결과는 Fig. 5 에 도시하였다. 유한요소 생성 결과에서 보듯이 분말혼합체를 이송시키기 위한 이송부(delivery system)는 일차원 요소로 모델링 하였으며, 제품의 모델은 fusion 요소로 모델링 하였다[4]. 또한, 전체적으로 사용한 유한요소와 절점의 수는 각각 26,668 개와 13,456 개이고, 적용된 사출기는 실제 시험사출과 양산을 위한 분말사출전용 사출기 Boy 55M 의 사양을 적용하여 해석을 진행하였다[4].

3.1 유동해석

본 연구에서는 충전시간(filling time)을 변수로 적용하여 다양하게 변화시켜가면서 각각의 경우



(a) Viscosity



(b) PvT

Fig. 4 Rheological and PvT properties of STS316L powder/binder mixture

Table 1 Parameters in cross model

n	0.180
τ* (Pa)	63,684
D ₁ (Pa-s)	73,963
D ₂ (K)	326
D ₃ (K/Pa)	0.00
A ₁	16.472
\tilde{A}_2 (K)	326

에서 완전히 충전이 완료된 시점에서의 압력(pressure at end of fill)을 관찰하였고, Fig. 6 은 해석된 결과를 충전시간에 따른 최대사출압력을 그래프로 도시하고 있다.

분말사출성형 해석에서도 일반 사출성형 해석

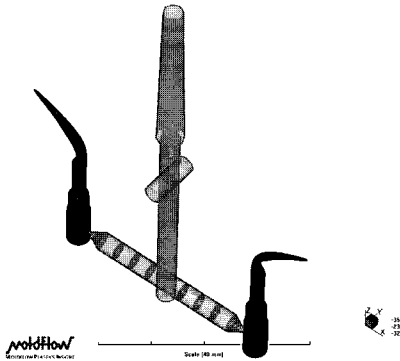


Fig. 5 Finite element modeling with delivery system

에서 나타나는 U자 모양의 곡선 형태가 나타나고 있지만, 뚜렷하게 낮은 사출압력이 발생하는 충전 시간이 0.4~1.0초 사이에서 거의 비슷하게 낮은 압력값이 나타나는 현상을 보였다. 이 점은 일반 수지의 사출성형과 차이점을 보인다. 하지만 수치적으로는 최소값이 발생하는 사출시간은 0.7초에서 최소 압력 값인 31.40MPa 이 발생하였고, 따라서 이러한 해석결과를 바탕으로 최적의 사출시간은 0.7초라고 할 수 있다[5].

그러나 이 구간에서의 압력값의 차이는 최대 0.3%에서 최소 0.03%이므로 최소 압력이 발생하는 충전시간의 선정은 명확하게 구분하기 어렵다. 하지만 충전시간의 증가로 인하여 충전이 끝나기 전에 고화가 이루어져 미성형이 발생하는 최소 사출성형시간은 2.0 초 이후에서 발생함을 알 수 있었다.

해석결과를 통해 얻어진 최적의 충전시간은 0.7초이지만 양산성 측면에서 사출성형의 사이클타임(cycle time)을 고려한다면 사출압력의 차이가 거의 없는 구간에서의 최단 시간인 0.4초가 최적의 조건이 될 것이며 본 연구에서도 이러한 측면에서 최적의 충전시간으로 0.4초를 실제 시성형에도 적용하였다.

이렇게 얻어진 충전시간을 기준으로 사출성형시 변화하는 유동선단속도(melt front velocity, MFV)를 일정하게 유지하기 위한 최적의 사출속도를 위한 성형해석을 수행하였다.

충전 중에 유동선단속도는 동일한 램속도(일정한 유량, Q)를 유지하는 경우 식(8)에 보듯이 제품의 다양한 두께 변화에 의해 유동선단면적(melt front area, MFA)이 변화하기 때문에 유동선단속도

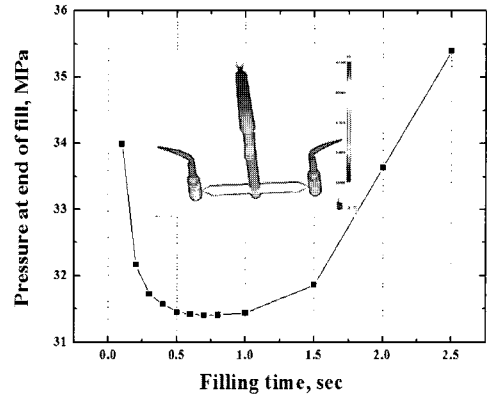


Fig. 6. Pressure at end of fill vs, filling time (Optimum filling time = 0.7sec)

는 계속 변화하게 된다. 이러한 유동선단의 속도 변화로 인하여 수지의 분자 및 섬유배향의 변화를 유발시키며 이로 인하여 수축의 차이가 발생하여 제품의 변형을 발생시킨다. 그러므로 제품 전체에서 균일한 분자 및 섬유배향을 가지게 하기 위해서는 유동선단의 속도를 일정하게 유지하는 것이 바람직하다[5].

$$MFV = \frac{Q}{MFA} \quad (8)$$

하지만 사출해석을 통해 얻는 램속도 분포는 수치적으로 이를 최적화하기 위하여 제품의 형상에 따라서 매우 단순하기도 하고 무수히 많은 속도의 변화를 주기도 하지만 실질적으로 제품생산을 위해 현장에서 적용하는 경우에 있어서는 사출기의 성능에 따라 속도제어가 있다. 따라서 해석된 결과를 바탕으로 실제 사출기의 성능을 고려하여 성형조건을 결정하여야 할 것이다.

분말사출성형 해석의 결과를 바탕으로 결정된 이상적인 램속도 분포를 Fig. 7에 도시하였고, 만약의 경우 실제 사출기가 5단 제어가 가능한 경우에 Fig. 7에서 은선으로 표시한 5단계로 사출속도가 변하도록 램속도 적용할 수 있다.

충전시간 0.4초와 램속도 분포를 이용한 다단사출공정을 적용하여 해석을 적용하여 얻어진 압력과 충전패턴을 Fig. 8과 Fig. 9에서 보여주고 있다. 다단으로 사출속도를 유지함으로써 유동선단의 속도를 일정하게 유지할 수 있었고 이로 인하여 30.84 MPa로 0.56 MPa 이 감소한 것을 알 수 있었다[6~7].

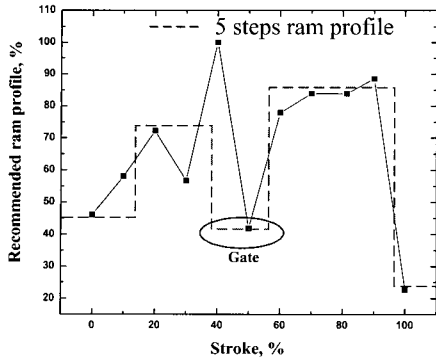


Fig. 7 Recommended ram profile (Injection velocity profile)

3.2 코어핀(Core Pin)의 휨 해석

스케일러 팁 형상의 특성상 ϕ 0.6mm 의 매우 작은 코어핀(core pin) 구조로 설계함에 있어서 금형 구조상에 사출성형시에 코어핀의 휨정도를 확인하여야 한다.

만약, 코어핀 끝단이 고압의 사출압으로 휨이 발생하면 이로 인하여 스케일러 팁 내부에 형성되어야 하는 유로의 토출부 형상이 완벽하게 형성되지 못하는 불량이 발생하고, 이러한 문제점이 지속적으로 발생하여 코어핀이 영구적으로 변형되어 결국에는 금형이 작동할 때 내부의 캐비티와 코어핀이 맞물려서 금형의 손상이나 코어핀이 파손되는 결과를 초래하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 코어핀의 휨정도를 확인하기 위하여 코어핀의 구조해석을 수행하였고 그 결과는 Fig. 10 에 도시하고 있다[8~10].

전체적으로 y 축방향으로의 최대 0.005mm 가 발생하였고 최종적으로 코어핀의 간섭이 발생하지 않는 범위로 판단된다.

즉, 본 해석을 통해서 설계상에 문제점으로 검증할 수 없었던 코어핀의 휨정도를 미리 예측하고 이를 설계에 반영할 수 있었다. 또한, 본 연구에서는 문제점이 발생하지 않았지만 만약에 문제가 발생하더라도 설계단계에서의 발견된 문제점이기 때문에 간단한 도면 수정과 해석을 통해 신속하게 해결할 수 있을 것이다.

3.3 충전 패턴 분석(유동선단의 이동)

스케일러 팁 하단부에 위치한 게이트를 통해 충전되는 분말혼합체는 코어핀에 의해 형성된 제품 두께를 채워지면서 코어핀을 감싸면서 충전된다. 이때 게이트를 통해 유입되는 분말혼합체의

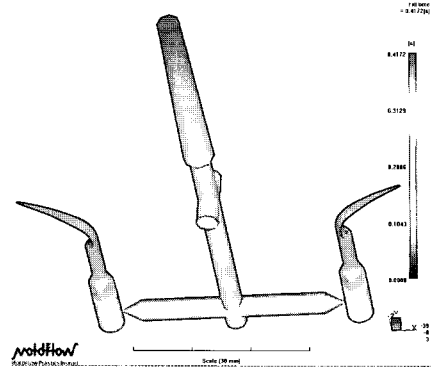


Fig. 8 Distribution of pressure at end of fill (30.84MPa)

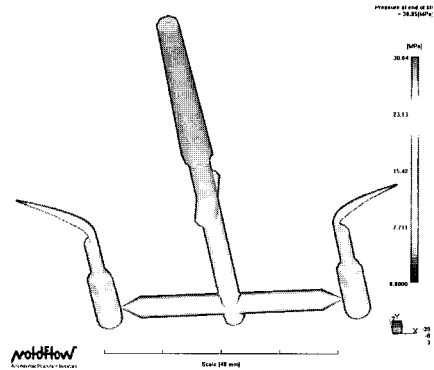


Fig. 9 Distribution of fill pattern (fill time = 0.417sec)

유동선단은 양방향으로 분기되어 이동 하다가 다시 만나게 되는데 이로 인하여 제품에 웰드라인(weldline)이 형성되게 된다. 이러한 웰드라인을 따라서 공기간힘(air trap) 현상도 동시에 발생하게 되는데 Fig 11 과 Fig. 12 에서 충전패턴을 해석하여 예측된웰드라인과 공기간힘이 발생하는 부분을 도시하고 있다. 웰드라인의 경우 최종 제품의 강도나 외관이 중요한 부위에 형성된다면 금형설계 변경이나 사출성형조건(변경(사출압,금형온도, 사출속도 등)을 통하여 해결하여야 하며, 공기간힘의 경우 에어벤트(air vent)를 적용하여 해결하여야 한다. 본 연구에서는 해석으로 예측된 결과를 바탕으로 에어벤트를 금형설계 시 적용하였고, 웰드라인의 위치를 확인 하였다.

가공이 완료된 금형의 작동 여부 판단을 위하여 성형성이 좋은 범용 플라스틱 재료인 LDPE (low density polyethylene)로 수지 계량을 조정하며

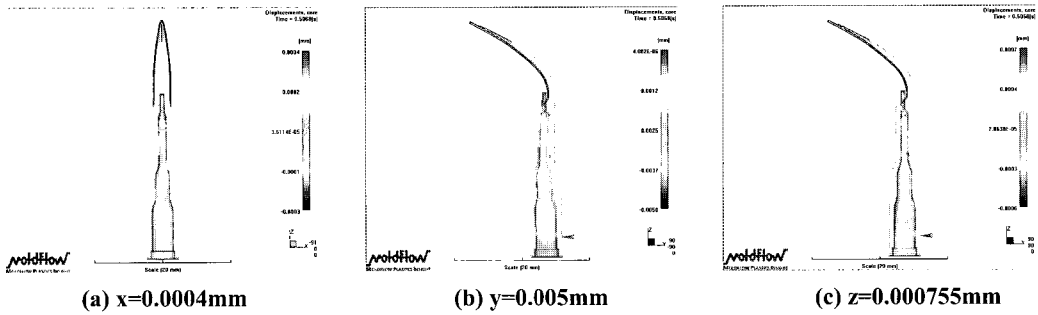


Fig.10 Distribution of core deflection (scale factor=100)

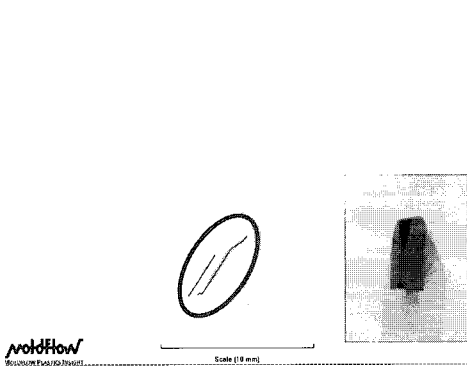


Fig.11 Prediction of weld line formation on dental scaler tip using CAE analysis

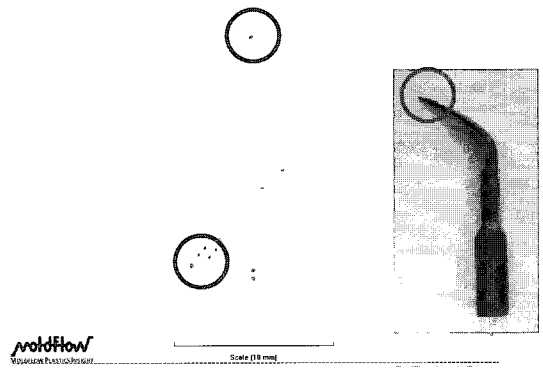


Fig.12 Prediction of Air trap formation on dental scaler tip using CAE analysis

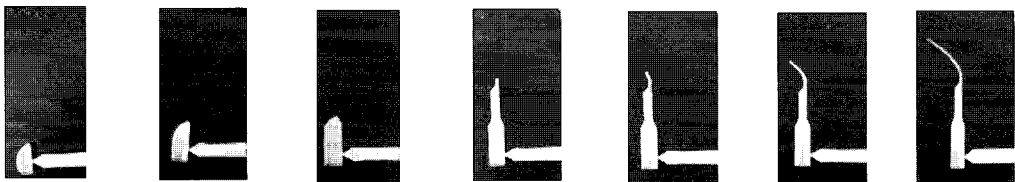


Fig.13 Short shot experiment of dental scaler tip using LDPE(conventional polymer)

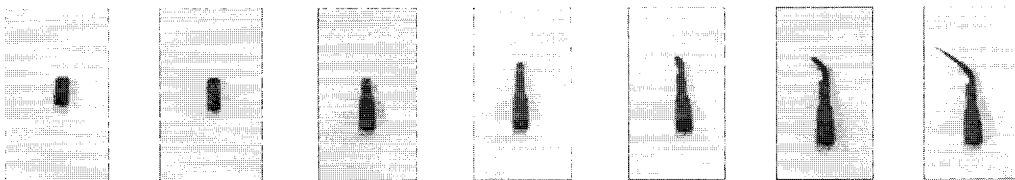


Fig.14 Short shot experiment of dental scaler tip using PIM feedstock

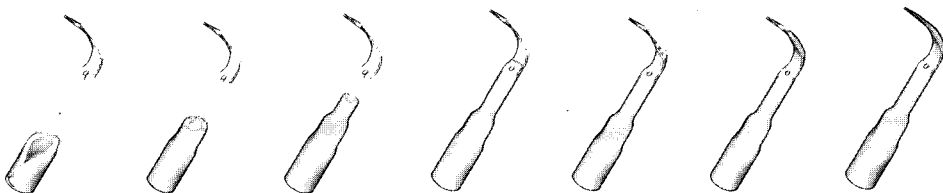


Fig.15 Filling pattern of dental scaler tip using CAE analysis

미충전 실험(short shot test)한 결과를 Fig. 13에 도시하였다. 이를 통해서 최종적으로 LDPE 성형품을 얻을 수 있음을 확인하였으며, 금형설계 및 제작이 훌륭히 수행되었음을 확인하였다.

최종적으로 제작된 금형을 이용하여 동일한 방법으로 STS316L의 분말혼합체의 미충전 실험 결과와 분말사출성형 해석결과를 Fig. 14와 Fig. 15에서 보여주고 있다. 분말사출성형 해석과 미충전 실험을 통해서 웰드라인의 위치를 직접 확인하였으며, 플라스틱 사출성형과 분말사출성형의 미충전 실험결과, 웰드라인이 발생하는 위치는 동일하지만 코어핀에 의해 분기된 유동선단이 만나는 형태가 서로 다르게 나타났으며, 분말사출성형 해석과 실험을 통한 결과에서 스케일러 팁 형상의 유동 패턴이 잘 일치하였다[11].

4. 결 론

본 연구에서는 분말사출성형용 스케일러 금형의 사출성형해석을 수행하였다. 이를 통하여 실제 사출 시에 발생할 수 있는 문제점을 CAE 해석을 통하여 파악하고 검증하였다.

(1) 최적의 사출시간을 성형 최대압력의 관점에서 압력이 최소가 되는 충전시간을 결정하였다.

(2) 적절한 램속도 분포를 통한 유동선단의 속도제어는 전반적인 사출성형조건의 최적화를 가져올 수 있는 것을 성형해석을 통하여 확인하였고, 이는 실제 사출공정에 있어서 제품의 품질에 있어서 매우 중요한 요인이 된다.

(3) 금형설계 시 코어핀을 사용하는 경우 코어핀의 힘해석을 통하여 금형구조를 검증하고 설계에 반영하였다.

(4) 다양한 사출해석을 통하여 실제 사출성형 시 발생하는 불량대책을 금형 설계 단계부터 적용하여 실제제작과 성형에 있어서 많은 시행착오를 줄일 수 있음을 보였다.

후 기

본 과제는 한국생산기술연구원이 주관하는 생산기술연구사업 및 2010 생산기반기술 혁신사업 생산기반인력양성사업의 지원으로 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. M. German, 1997, Injection Molding of Metals and Ceramics, MPIF, pp. 99 ~ 132.
- [2] R. M. German, 2003, Powder Injection Molding-Design and Applications, Innovative Material Solutions.
- [3] 황철진, 박형필, 고영배, 허영무, 2005, 분말사출성형에 의한 치과용 스케일러 팁의 제조방법과 금형 및 그 스케일러 팁, 특허출원/10-2005-0035138, 실용신안출원/ 20-2005-0011794, 의장출원/30-2005-0014114.
- [4] MOLDFLOW™ software, trademark of Moldflow Pty, Ltd., Victoria, Australia.
- [5] 권태현, 박성진, 윤경환, 이상봉, 정영득, 2001, 사출성형 CAE 설계지침, 문운당.
- [6] 1993, 사출금형설계Ⅱ, 한국생산기술연구원.
- [7] 조웅식, 1997, 사출성형 금형설계기술, 기전연구사.
- [8] Shepard T. A et al., 1996, Minimising Coreshift in Injection Moulded Containers, *Plastics Engineering*, Vol. 52, pp. 27~29.
- [9] Shepard T. A et al., 1995, Mechanism For Core Shift In Injection Moulded Containers, *Proceedings of Medical Design & Manufacturing*, pp. 107~113.
- [10] Alexander Bakharev et al., 2004, Prediction Of Core Shift Effects Using Mold Filling Simulation, ANTEC.
- [11] 황철진, 박형필, 고영배, 정성택, 이병욱, 2005, Dental Scaler 분말사출용 금형설계, 한국소성가공학회 2005년도 춘계학술대회, pp. 270~274.