

나노분말 분쇄 및 분산용 고성능 초경합금 볼의 제조를 위한 분말사출성형 공법

정성택* · 조주현† · 이민철** · 권영삼* · 전만수***

A Powder Injection Molding Technique of Fabricating Cemented Tungsten Carbide Balls for Milling and Dispersing Nano-Powder

SeongTaek Chung, JuHyun Cho, MinCheol Lee, YoungSam Kwon and ManSoo Joun

Key Words : Cemented Tungsten Carbide Ball(초경볼), Nano-Powder(나노분말), Density Homogeneity(밀도 균질성), Powder Injection Molding(분말사출성형)

Abstract

We present a powder injection molding technique of fabricating cemented tungsten carbide(WC) balls for milling and dispersing nano-powder in this paper. The conventional powder metallurgy approach is investigated to reveal its drawbacks of density non-homogeneity. New procedures of powder injection molding for the homogeneous high-precision WC balls, involving the binding process, powder injection molding process and sintering process, are presented in detail. Each process is investigated empirically and numerically to obtain its engineering information, which can be used for process optimization.

1. 서 론

초경합금은 절삭공구 및 금형 소재로 널리 사용되고 있으며, 전통적으로 분말야금(powder metallurgy) 공법에 의하여 제조되어 왔다. 그러나, 분말 압축 성형 후 소결하여 제품을 제조하므로 제조단가가 높고 프레스 성형시 발생하는 밀도구배로 인하여 소결후 변형이나 크랙을 유발하는 것으로 알려져 있다. 최근에는 기존 공법이 안고 있는 형상의 한계와 품질상의 문제를 해결하기 위하여 분말사출성형(powder injection molding) 공법[1-3]에 관한 연구와 적용이 활발하게 이루어지고 있다.

분말야금 및 분말사출성형에서 우수한 물성을 갖는 부품의 제조를 위해서는 가능한 한 입자 크

기가 작은 분말을 사용하여야 한다[4]. 그리고 일반적으로 입자 크기가 매우 작은 금속 및 세라믹 분말들은 분말의 특성상 서로 응집되어 있으므로 [5] 미세 분말 재료를 사용하여 부품을 성형하기 위해서는 이러한 응집된 상태를 분산시켜야 한다. 따라서 분말야금 및 분말사출성형에서 분산 및 분쇄 공정은 제품의 품질을 좌우하는 매우 중요한 공정이다. 현재 널리 활용되고 있는 미세분말의 분산 및 분쇄 목적의 장치로는 미립분쇄기(Attrition mill), 볼밀(Ball mill), 진동밀(Vibration mill) 등이 있으며, 최근 나노기술이 산업전반의 큰 이슈로 부각된 이후 나노 분말의 제조를 위한 초미립 분쇄 목적으로도 유사한 방법이 널리 활용되고 있다. 현재 여러 종류의 분쇄기중 미립분쇄기가 가장 효율적인 분산 및 분쇄 장치로 평가되고 있으며 국내에도 수백 대 이상 보급되어 있다. 최근 나노 분말을 제조하는 여러 가지 방법 중 기존 상용 분말을 분쇄하여 나노 크기로 만드는 고에너지 볼밀(High energy ball mill)과 더불어 미립분쇄기도 세계적으로 널리 사용되고 있다. 이러한 미립분쇄기나 고에너지 볼밀을 이용하여 분말의 분산 및 분쇄를 하는 경우 효율을 높이고 볼의 마모로부터

† 경상대학교 기계공학과 대학원생
E-mail : hyuni_babu@lycos.co.kr
TEL : (055)751-5316 FAX : (055)751-5316

* (주) 씨타텍

** 경상대학교 기계항공공학부
2 단계 BK21 항공기부품기술연구소

*** 경상대학교 기계항공공학부

발생하는 원재료의 오염을 줄이기 위해서는 밀도와 경도가 높은 초경 볼의 사용이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.

효과적인 분말의 분산 및 분쇄를 위해서는 볼의 선정이 매우 중요한데, 볼의 비중이 높을수록 운동에너지가 크기 때문에 분산 및 분쇄 효율이 높으며, 특히 점성이 높은 물질의 분쇄에 비중이 큰 볼이 요구된다. 원하는 최종 생산 분말의 입자가 작을수록 볼의 크기가 작아져야 하며, 볼의 경도가 높을수록 마모량이 작아지며 분쇄효율이 좋아진다. 분쇄에 사용되는 볼의 소재로는 주로 스텔, 스테인리스스틸, 초경합금, 알루미늄 및 지르코니아 등이 있다. 그러나 현재 국내에서 사용중인 분쇄용 볼은 모두 분말야금 공법으로 제조된 것으로 볼의 각 부위별로 밀도가 다르므로 비교적 저급품에 속한다. 이 점은 기존의 공법이 가지고 있는 한계이며, 크기가 작은 구의 제조에도 매우 불리한 면이 있다.

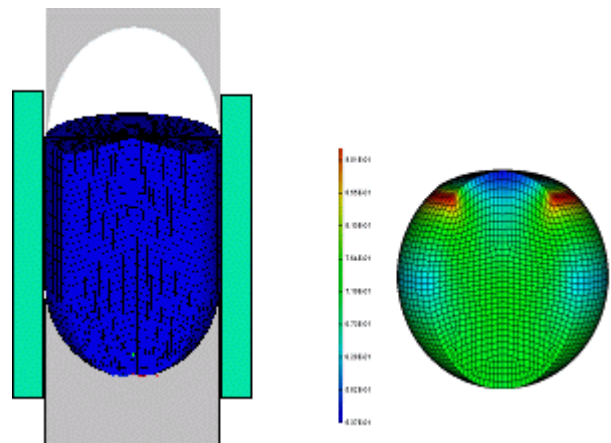
본 연구에서는 분말사출성형 공법을 이용하여 분쇄 및 분산용 직경 6.35 mm(1/4 inch) 내외의 초경 볼의 제조 공정을 개발하고, 그 과정에서 습득한 기술적 내용과 결과물을 정량적 관점에서 정리하고자 한다.

2. 기존공정과 신공정의 개념

분말야금 공법에서 초경 볼은 적당량의 바인더와 혼합된 원료 분말을 금형을 이용하여 프레스 성형한 후, 진공분위기 하에서 1400℃ 내외의 온도로 소결하여 만들어진다. 그러므로 분말투입 오차에 따라 볼 크기와 균질도가 영향을 받고 프레스 성형 시 발생하는 밀도 구배로 인하여 진원도가 좋지 않으며 프레스 금형의 수리 비용이 높은 단점을 갖고 있다. 이러한 점을 Fig. 1의 분말야금 공법으로 만들어진 초경 볼의 형상과 공정 시뮬레이션[6] 결과가 잘 말해 주고 있다. 결과적으로 그림에서 보는 바와 같이 비균질성이 불가피하므로 분말야금 공법은 고급 볼을 제조하는 데는 적합하지 않다.



(a) Product



(b) Finite element analysis result
(density distribution: 0.54-0.95)

Fig. 1 Cemented Tungsten carbide ball manufactured by powder metallurgy

분말사출성형 공법은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 금속 또는 세라믹 분말과 플라스틱, 왁스 등의 유기바인더의 혼합체를 사출공정을 통해 성형한 후에, 탈지공정을 통해 유기바인더를 제거하고 최종적으로 소결공정을 통하여 금속 또는 세라믹 부품을 제조하는 특수성형기술로서 매우 복잡한 형상의 부품을 저렴하게 양산할 수 있는 장점을 지니고 있다. 기존 분말야금 공법의 프레스 성형 대신 분말사출성형공법을 사용하여 초경합금 볼을 제조하는 경우에 성형 중 발생하는 밀도구배를 없앨 수 있으므로 치수 정밀도가 매우 높을 뿐만 아니라 한번의 사출로 수십 개 정도의 볼 성형이 가능하다.

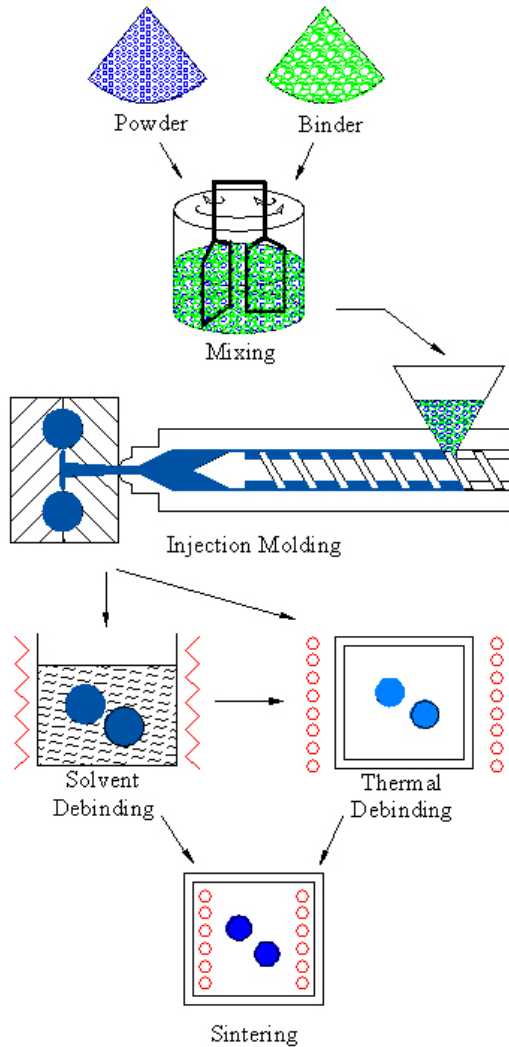


Fig. 2 Conceptual diagram of a powder injection molding process

3. 피드스탁의 제조 공정 설계 및 개발

3.1 바인더의 결정

분말사출성형 기술을 이용한 고밀도 정밀 초경 불 제조를 위해서는 사출성형성이 우수하고 탈지 공정에서도 안정적인 분말혼합체(feedstock)의 제조가 필수적이다. 분말혼합체의 성질은 왁스 및 플라스틱 재료로 이루어진 바인더 시스템(binder system)의 구성과 혼합되는 분말의 특성 및 부피분율에 따라 결정된다. 본 연구에서는 파라핀 왁스(paraffin wax), 스테아릭 에시드(stearic acid), 폴리에틸렌(polyethylene), 폴리프로필렌(polypropylene)으로 구성된 바인더 시스템을 사용하였다. 본 연구에 사용된 초경분말은 평균입경이 3 μm 인 탄화텅스텐(WC)분말에 무게분율로 10%의 코발트(Co)분말을 터블러 믹서(Turbular Mixer)를 사용하여 30

분간 혼합하여 만든 것이다.

초경 분말혼합체(feedstock)의 최적 부피분율을 결정하기 위해서 Torque Rheometer 실험을 수행하였다. 바인더 시스템을 일정량 투입하고 일정한 온도를 유지한 상태에서 분말의 양을 조금씩 늘려가면서 혼합 도중에 발생하는 토크의 변화를 시간에 따라 측정하였다. Fig. 3 은 분말의 부피분율(Volume fraction)에 따른 토크값의 변화를 나타낸 그래프이다. 예를 들어 설명하면, 부피분율이 50%인 경우, 초기의 토크값이 약 6.5 mN 를 나타내다가 혼합시간이 증가함에 따라, 즉 균일한 혼합 상태에 도달함에 따라 토크값이 작아지면서 수렴하는 것을 알 수 있다. 부피분율을 조금씩 증가시키는 경우에 토크의 초기 최대값과 시간에 따른 수렴값이 모두 증가하고 있다. 그러나 57%와 58%의 부피분율에서는 초기 최대값이 오히려 감소했고, 58%에서는 수렴값을 나타내지 못하고 불안정한 양상을 띠었다. 이것은 분말부피분율이 56% 이상인 경우에 균일하게 혼합이 이루어지지 못하고 있기 때문이다. 본 연구에서는 원활한 사출 성을 위해서 최대치보다 두 단계 낮은 54%를 초경 분말의 혼합 부피분율로 결정하였다.

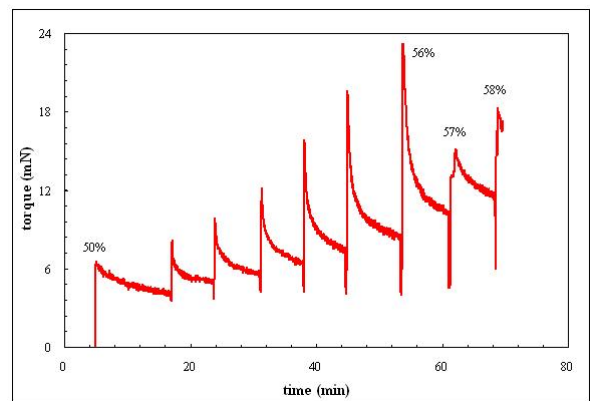


Fig. 3 Torque rheometer test results

3.2 초경 피드스탁을 위한 혼합 공정의 개발

분말과 바인더 시스템의 혼합은 두날 혼합기(Double Planetary Mixer)를 이용한 1 차 혼합과 이축 압출형혼합기를 이용한 2 차 혼합으로 이루어졌다. 1 차 혼합은 다음과 같이 3 단계의 혼합 공정으로 이루어져 있다. 1 단계에서 챔버의 온도를 80도로 설정한 후에 텅스텐 분말과 스테아릭산을 두날 혼합기 용기에 넣고 분당 회전수 20 rpm 상태에서 30 분간 혼합하고 난 뒤, 2 단계에서 왁스를 넣고 15 분 혼합한다. 마지막 단계에서는 폴리에틸렌과 폴리프로필렌을 함께 넣고 15 분간 혼합한다. 2 차 혼합에서는 이축압출형혼합기[7]를 이용하여

배럴 설정온도 160 도와 스크류 회전수 60 rpm 상태에서 1차 혼합체를 혼합한다. 균질한 혼합을 위하여 이축압출형혼합기를 이용한 혼합을 2 회 수행한다. Fig. 4 는 제조된 초경 피드스탁을 보여주고 있으며, 이 피드스탁은 이후 공정에서 사출성형기의 호퍼(hopper)에 투입되어 볼의 성형체를 제조하는데 쓰이게 된다.



Fig. 4 Cemented tungsten carbide feedstock manufactured by the presented approach

4. 제조 공정 설계 및 시뮬레이션

제조 공정의 설계 목적으로 공정 시뮬레이션 기술은 매우 유용하다. 중요한 설계상의 오류를 방지할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 분말사출성형 공정 시뮬레이션 전용 소프트웨어인 PIMsolver[8]를 이용하여 설계된 공정을 평가하고 개선시키는 과정을 통하여 최적에 가까운 공정 설계를 획득하였다. 공정 시뮬레이션에서 재료의 거동특성에 관한 정보는 매우 중요하다. 그런데 초경-바인더 혼합물에 대한 물성치 정보는 문헌으로부터 구할 수가 없었고, 직접 획득하는데 많은 비용이 소요되는 문제가 있다. 본 연구에서 공정 시뮬레이션의 목적이 유동 특성을 거시적으로 조사하자는데 있으므로 스테인레스 스틸 피드스탁의 물성치 정보[9]를 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 경험적으로 볼 때, 세부적으로는 맞지 않을 것으로 예상되지만, 전체적인 유동 특성을 예측하는 목적으로는 크게 부족하지 않을 것으로 사료된다.

일정한 크기의 볼을 한 번의 사출공정을 통해 가능한 많이 생산하기 위해서는 사출금형의 스프루, 런너, 게이트, 캐비티 등의 레이아웃 설계가

매우 중요하다. 주어진 사출성형기의 사양 범위 내에서 최대한 고품질의 성형체를 많이 생산할 수 있는 최적의 금형 설계를 위하여 CAE 해석을 수행하였다. CAE 해석을 통한 금형 설계 과정에서 최우선적으로 고려한 사항은 균일한 충전 패턴을 이루는 것이다. 금형 캐비티 내의 불균일한 충전이 발생하는 경우에는 성형체의 물성이 불균일해질 뿐만 아니라, 과도한 사출압과 형체력(Clamping force)을 유발하게 된다. Fig. 5 은 소결체 기준 직경 6.35 mm(사출금형 캐비티 직경 7.93 mm, 소결 시의 수축을 고려한 치수임) 초경 볼의 초기 금형 설계안에 대한 충전 패턴의 CAE 해석 결과이다. 외곽 부위에서 미성형이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 최외곽 부위의 캐비티들이 동시에 충전되지 못함을 알 수 있다.

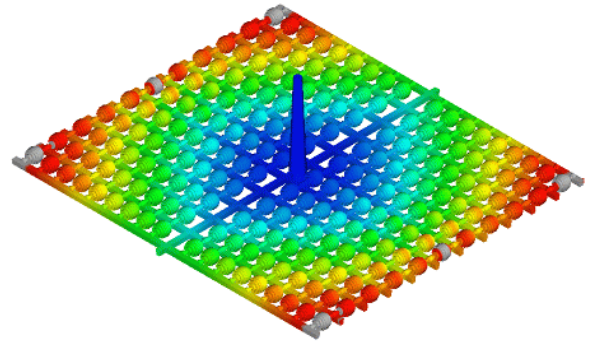


Fig. 5 CAE analysis result of filling pattern for the initial design

위와 같은 여러 차례의 수정 설계에 대한 CAE 해석을 통하여 Fig. 6 의 최적 설계안을 도출하였다. 이 그림은 시간에 따른 사출성형 충전 패턴을 나타내는데, 최외곽에 배치된 캐비티들이 동시에 충전되고 있는 것을 확인할 수 있다. 한 번에 사출할 수 있는 볼의 수는 60 개이다. Fig. 7 은 폴리에틸렌 수지로 사출한 제품을 나타내고있다. 해석결과와 마찬가지로 수지의 흐름 패턴이 해석결과와 유사하게 나타났다. 직접 초경 분말 혼합체를 투입하였을 경우, 취출 과정에서 사출성형체의 게이트 부위가 자동으로 절단되어 Fig. 7 과 같은 전체 모양을 갖출 수가 없기 때문에 초경 대신 폴리에틸렌 재료를 사용하여 얻은 전체 사출성형체에 대한 실험결과를 제시하였다.

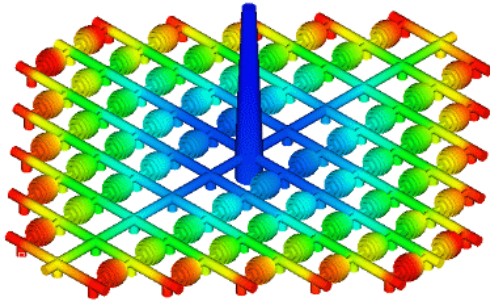


Fig. 6 CAE analysis result of the filling pattern for the final design

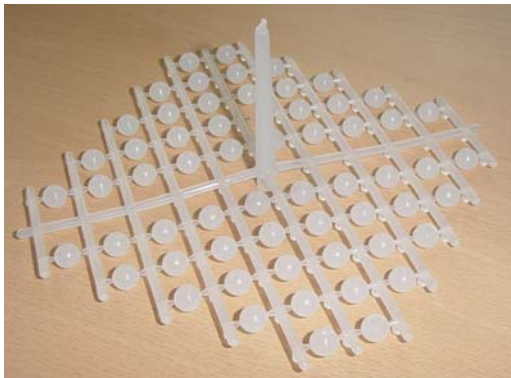


Fig. 7 Injection molded polyethylene product involving sprue, runner, gate and cavity

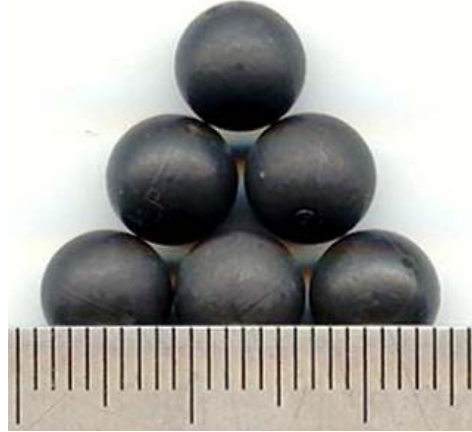


Fig. 8 Injection molded balls before sintered

5. 사출성형 및 소결 공정

5.1 사출성형 공정

사출성형은 Dr. Boy(독일) 55 톤 사출성형기를 이용하였다. CAE 해석 및 사출성형 실험을 통하여 미성형과 플래쉬(flash)와 같은 성형 불량 발생하지 않으며, 스프루, 런너 및 볼의 취출 과정에서 문제점이 없고, 사출압력을 최소화하는 성형 조건을 선정하였다. 직경 6.35 mm 초경 볼의 사출성형 조건은 Table 1 과 같다. Fig. 8 에 사출된, 소결 이전의 초경 볼의 사출성형체를 나타내고 있다.

Table. 1 Conditions of the injection molding process

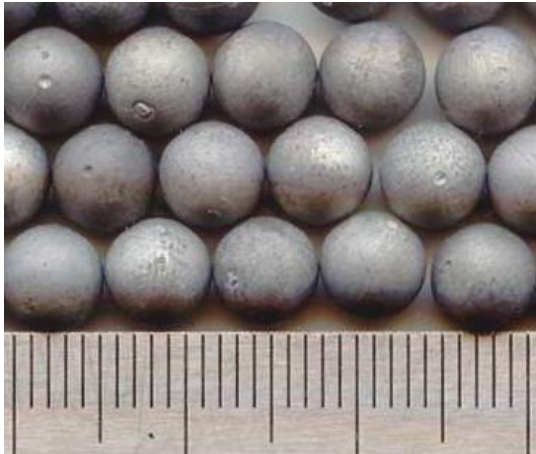
Injection Temperature	Injection time	Holding pressure
160℃	0.46s	80bar
Holding time	Mold Temperature	Cooling time
0.1s	50℃	40s

5.2 소결공정

분말사출성형체의 탈지공정은 용매탈지와 열간탈지의 2 가지 단계로 구성되는데 용매탈지공정은 성형체 내부의 왁스 성분을 노말 헥산(N-Hexane) 등의 용매(solvent)를 사용하여 제거하는 단계이며 이후 열간탈지공정은 성형체 내부의 폴리머 성분을 제거하는 단계로 열간탈지이후 분말사출성형체를 최종 소결단계로 이동하기에 적당한 기계적 강도를 갖도록 하기 위하여 900 도 정도의 온도에서 예비소결을 수행하게 된다. 본 연구에서 용매탈지공정은 50 도의 용매온도에서 10 시간의 탈지시간 동안 용매탈지를 수행하였다.

초경의 열간탈지 공정은 탈지온도 뿐만 아니라 적정 탄소 함유량을 유지하기 위해 탈지 분위기가 매우 중요하다. 본 연구에서는 수소와 질소의 비율을 1:3 으로 하여 열간탈지를 수행하였다. 열간탈지 온도는 250 도와 450 도이며 각각의 온도에서 3 시간씩 유지하였다. 승온 속도는 2 도/분으로 하였으며 900 도에서 1 시간동안 예비소결을 실시하였다.

초경분말의 소결은 일반적으로 진공분위기에서 수행된다. 본 연구에서는 열간탈지가 끝난 초경 볼 탈지체를 흑연시료받침을 사용하여 진공분위기에서 1400 도에서 1 시간 동안 소결을 수행하였다. 소결 후 초경 볼의 경우 표면은 그림 9 와 같이 매끄럽지 않기 때문에 소결된 초경 볼을 미립분쇄기(Attrition mill)를 사용하여 연마하였다.



(a) Non-polished



(b) Polished

Fig. 9 Balls sintered

6. 결 론

본 연구에서는 분쇄 및 균질화(또는 분산)용 초경 볼의 제조 공법에 관한 실험적 연구와 해석적 연구가 실시되었다. 기존의 분말야금에 의한 볼 제조 기술의 단점을 체계적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 분말사출성형 공법에 의한 초경 볼의 제조 기술을 제안하였다.

기 축적된 경험과 실험을 통하여 바인더 및 피드스탁의 제조 공정을 확립하였으며, 분말사출성형 공정 시뮬레이션 기술을 활용하여 공정 설계가 이루어졌다. 그리고 소결 공정에 관한 실험적 연구가 이루어졌으며, 초경 볼의 소결공정이 제시되었다.

본 연구를 통하여 경험에 의존하던 일련의 제조 공정을 정량화하거나 체계화하는데 다소 공헌을 하였다고 사료된다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 2 단계 BK21 사업과 산업자원부의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 실시되었음

참고문헌

- (1) Randall M. German, 1990, "Powder injection molding", *Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ*, pp. 61-95
- (2) Xuanhui Qu, Jianxiang Gao, Mingli Qin, Changming Lei, 2005, "Application of a wax-based binder in PIM of WC-TiC-Co cemented carbides", *Refractory metals & Hard Materials* 23, pp. 273-277
- (3) Johnny Bruhn, 1999, "MIM offers increased applications for submicron WC-10%Co", *Metal Powder Report* 54(1), pp.30-33.
- (4) Randall M. German, Animesh Boss, 1997, "Injection Molding of Metals and Ceramics", *Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ*
- (5) Pavan Suri, Sundar V. Atre, Randall M. German, Jupiter P. de Souza, 2003, "Effect of mixing on the rheology and particle characteristics of tungsten-based powder injection molding feedstock", *Materials Science & Engineering A356*, pp. 337~344.
- (6) PMSolver™, software, trademark of Cetatech, Inc., Korea, <http://www.cetatech.com>
- (7) <http://gtic.or.kr>
- (8) PIMSolver™, software, trademark of Cetatech, Inc., Korea, <http://www.cetatech.com>
- (9) C. J. Hwang, T. H. Kwon, 2002, "A full 3D finite element analysis of powder injection molding filling process including slip phenomena", *Polymer Engineering and Science*, Vol.42, No. 1, pp.33~50