

분말단조용 금형설계 자동화 시스템의 개발

Development of an Automated Die Design System for Powder Forging

박종옥*(부산대 대학원), 김길준(삼성SDI), 김영호(부산대 기계공학부 기계기술연구소)

Jong-Ok Park*(Graduate School, Pusan National University), Kil-Jun Kim(Samsung SDI),
Young-Ho Kim(RIMT, School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to establish an automated die design system for compacting and sizing process required in Powder Metallurgy. Though the Powder Metallurgy(P/M) is a practical and economical forming technology, it needs long time and many trials and errors for die design. Such a problem can be solved by introduction of the automated die design system for P/M. In order to establish the system, collecting, classifying, and systematizing related knowledges from the experts in industries, books, and papers were performed. The system was constructed by AutoLISP, the language operated in AutoCAD atmosphere. This language can efficiently support for user to work on drawings. There are three modules ; P/M part specification input module, P/M part design module, and Die design module. A part for vehicle was applied to the system and satisfied results were achieved

Key Words : Powder forging(분말단조), Powder metallurgy(분말야금), Automated die design system(금형설계 자동화 시스템), Compacting(압분체 성형), Sizing(짜이징)

1. 서론

분말단조법(powder forging)은 분말야금법과 정밀단조법의 장점을 결합시킨 신공법이다. 분말야금법에 의해 제조된 예비성형체(Preform)는 정밀단조를 거침으로써 소결 부품이 가지는 기계적 특성의 한계를 극복하고 합금조성 및 특성의 균일화를 기할 수 있다[1]. 그러므로 분말단조법으로 제품을 생산하기 위해서는 분말야금이라는 전처리 공정을 필수적으로 거쳐야 한다. 분말야금법(Powder Metallurgy)이란 단일 금속분말 또는 합금분말의 제조와 이들 분말을 압분체(Green compact) 성형용 다이(Die)를 이용하여 가압성형(Green Compact)한 후, 용융점 이하의 온도에서 소결(Sintering)하여 제품을 만드는 기술이다[2].

열간단조, 냉간단조, 블랭킹, 닥트포밍 등의 여러 가지 성형법들에 있어서 공정설계 및 금형설계의 자동화에 대한 노력은 여러 성형공정과 제조방법에 대하여 다양하게 연구되어 왔다[3-7]. 그러나 분말단조 및 분말야금 공정에 대한 이 분야의 연구성과는 아직 그 예를 찾아볼 수 없으며, 따라서 본 연구의 목적은 일반 분말단조 공정의 전처리 공정인 분말야금 공정에서 사용되는 압분체 성형 및 사이징용 금형설계를 위한 자동화 시스템을 구

축하는 것이다. 이를 위하여 먼저 산업현장의 압분체 냉간성형용 금형설계 전문가들의 지식과 국내외의 여러 관련자료들로부터 설계와 관련한 지식정보들을 수집, 분류하여 체계화시킴으로써, 자동화 시스템에 적용 가능한 정량화된 설계규칙들을 정립하였다. 이들을 토대로 시스템은 AutoLISP 언어에 의하여 구축되었다. AutoLISP 언어의 장점은 PC에서 구동되는 기계 부품류의 도면 작성 지원 시스템으로 상용화되어 학계와 산업계에서 널리 사용되고 있는 AutoCAD상에서 구동 가능하여, 사용자가 본 시스템의 설계 결과를 바탕으로 쉽게 도면화하여 현장에 바로 적용할 수 있다는 것이다[8].

2. 시스템 구성과 작동원리

2.1 소결품 사양 입력 모듈

소결품 사양 입력 모듈은 사용자가 원하는 소결품의 형상과 재질을 입력받고, 이로부터 선택된 합금 분말재의 이론밀도(ρ_s)와 겉보기밀도(ρ_{app})를 규칙 4.1의 수식으로 부터 구하여, 제품과 관련한 이들 정보를 data file에 저장, 보관하는 기능을 가진다. 소결품의 형상은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 크게 Type A(상 1단 - 하 1단), Type B(상 1단 - 하 2단), Type C(상 2단 - 하 2

단), Type D(상 1단 - 하 3단), Type E(상 2단 - 하 3단)의 5가지 Type으로 분류할 수 있다.[9] 사용자는 이들 5가지 Type중 1가지를 선택하여 제품의 치수를 입력하게 된다. 또한 사용 용도별 금속 분말의 종류, 화학성분비, 밀도, 경도, 인장강도 등 기계적 특성들을 데이터베이스화하여 사용자에게 제공함으로써 분말재 선택에 도움을 주도록 하였다.

Type	Number of Pieces		Shape	
	Upper Part	Lower Part		
A	1	1		
B	1	2		
C	2	2		
D	1	3		
E	2	3		

Fig. 1 Type of P/M part shape

2.2 소결품 설계 모듈

소결품 설계 모듈에서는 사용자로부터 입력된 소결품 형상을 여러 가지 관련 규칙들에 의거하여 성형 가능한 형상인지의 여부를 판단하고 성형이 곤란한 부분들이 발견되면 이를 원활하게 성형이 되도록 수정하는 것을 주요 기능으로 한다. 소결품과 압분체의 형상은 모두 금형으로부터의 취출이 원활하도록, 그리고 가압시 분말의 유동으로 금형 캐비티(Cavity)내에서 원활한 충전이 가능하도록 이루어져야 한다. 또한 본 모듈에서는 수정된 소결품의 체적(V_s)과 중량(W_s)을 구하고 소결품의 밀도(ρ_s)를 계산하여 이들 압분체와 관련된 모든 정보들을 데이터 파일로 저장한다.

2.3 금형 설계 모듈

분말야금 공정에서는 재료가 각 공정을 거치면서 치수변화를 동반하게 된다. 먼저 압분체가 성형후 금형으로부터 취출되면 탄성회복(Spring Back)에 의한 치수변화가 동반된다. 그후 소결공정을 거치면서 압분체는 약간의 밀도상승과 더불어 그 치수가 변하게 되고, 싸이징 공정에서도 마찬가지로 치수변화를 겪게 된다. 그러므로 압분체 성형용 금형설계를 위해서는 소결품의 치수, 싸이징 금형의 치수, 소결체의 치수, 그리고 압분체의 치수 등을 결정해야 하며, 이 압분체의 치수로부터 비로소 압분체 성형용 금형의 치수를 결정할 수 있다. 이들 여러 단계에서의 치수변화는 분말의 종류, 밀도, 입도, 형상, 소결품의 치수와 밀도, 소결방법 등 그 변수가 매우 많고 복잡한 거동을 보이며, 치수의 변화량도 소결품의 부위별로 다르기 때문에 이들 모두를 정확하게 반영하기는

어렵다. 따라서 본 시스템에서는 공정단계별 치수의 변화량을 일반적으로 정량화하여 사용하였다.

금형 설계 모듈은 전술한 소결품 사양 입력 모듈과 소결체 설계 모듈을 거치면서 사용자로부터 입력받고, 규칙들 상의 수식으로 계산되고, 수정된 압분체에 관한 모든 정보들을 바탕으로 압분체 성형용 금형과 싸이징 금형 설계를 수행한다. 또한, 본 모듈에서는 해당규칙들로부터 충전비와 충전깊이를 구하여 충전분말의 채적을 구하고, 최소 성형 압력과 금형 재질 등을 주어진 Table로부터 결정하고 이들을 토대로 금형의 탄성변화량, 인서트(Insert) 외경, 다이의 외경, 코어 로드(Core Rod)의 직경 등 금형 각 부위의 치수들을 결정하고 도면 형태로 사용자에게 보여주는 기능을 한다. 또한 Table 1의 하중대비 밀도 변화관계로부터 필요한 편치압력을 계산한다. 싸이징 금형의 설계는 기본적인 금형의 구조나 치수들은 압분체 성형용 금형과 동일하며, 단동식 프레스용 금형에서 사용하며 인서트와 코어 등의 주요치수는 달리하게 된다.

Table 1 Density Change According to the Compacting Pressure

Compacting Pressure	1	1E	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5E	6	6E	7
Fe	0.8	0.7	0.7	-	0.8	-	0.8	-	0.8	-	0.8	-	0.9
Cu	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	-	0.9	-	0.9	-	0.9
Al	0.8	0.8	0.9	-	0.9	-	0.9	-	0.9	-	0.9	-	-

3. 규칙베이스 및 데이터베이스

본 시스템에 사용된 설계규칙들의 예를 다음과 같이 나열하였다.

3.1 소결품 정보 입력 규칙[2][3][10]

- 1) 분말재료는 시스템이 제공하는 규격별 재료의 조성비, 물성, 용도 등을 참고하여 선택한다.
- 2) 소결품 형상은 축대칭이며, Fig. 1과 같이 Type A (상 1단 - 하 1단), Type B (상 1단 - 하 2단), Type C (상 2단 - 하 2단), Type D (상 1단 - 하 3단), Type E (상 2단 - 하 3단)의 5가지 Type으로 분류한다.

3.2 소결품 설계 규칙[10][11][12]

- 1) 압분체 가압은 상하편치로부터 수직방향 양압식으로 이루어진다.
- 2) 압분체의 취출은 아래에서 위로 수직방향으로 이루어진다.
- 3) 원통형을 축방향으로 가압하여 성형하는 것은 불가능하다. 즉, 언더컷을 가진 제품은 취출을 위하여 특수한 금형구조를 사용해야 하므로 제외한다.

- 4) 가압방향에 수직인 구멍은 중실처리한 후 후가공한다.
- 5) 상편치 측의 단차 높이는 10mm 이하로 한다.
- 6) 상편치 측의 단차에는 50° 이하의 태이퍼를 준다.
- 7) 나사부는 후가공한다.
- 8) 제품의 각 모서리는 직각이나 예각을 피하고 부위별로 필렛(Fillet) 부에는 R0.3 이상을 코너(Corner) 부에는 45~60° 의 모따기를 한다.
- 9) hole이나 모서리의 Edge Distance는 1mm 이상이고, (0.1× 제품 총 Dia) 이상이다.

3.3 금형 설계 규칙[2][4][10][11][13]

- 1) 금형은 다이, 상부 펀치, 하부 펀치, 코어 로드로 구성된다.
- 2) 압분체 성형은 양압식 프레스에 의해 수행된다.
- 3) 금형 재질은 시스템이 제공하는 Table을 고려하여 결정한다.
- 4) 펀치와 금형간 Clearance는 시스템이 제공하는 Table의 성형비(Burr) 높이를 참조하여 0.01~0.1mm 까지로 준다.
- 5) 펀치 가압력 범위는 철계인 경우 3~10t/cm²이고, 동계인 경우 2~5t/cm²이나, Die 마모와 펀치 파손 방지를 위해 7t/cm²이하로 한다.
- 6) 금형의 각 모서리는 직각이나 예각을 피하고 0.3이상의 R을 준다.
- 7) 금형의 박육부 두께는 1mm 이상으로 한다. 단, 함유축수인 경우에는 가압력이 작으므로 최소 0.5mm 까지 성형 가능하다.
- 8) 펀치와 금형의 마모를 방지하고, 금형내의 공기는 유출시키면서 분말의 유출은 방지하기 위하여 펀치의 모서리에는 랜드(Land)부를 부여한다.
- 9) 플랜지와 보스 사이의 단의 길이는 1.5이상으로 한다.
- 10) 다단 펀치를 사용할 경우 최대성형압에서의 각 펀치의 탄성변형량은 다음 식으로 결정한다.

$$\Delta L = L \times \frac{P_p}{E}$$

- 11) 압분체 성형에서의 충전비는 다음과 같이 정의된다.

$$A = \frac{\rho_g}{\rho_{ma}}$$

- 12) 가장 복잡한 형태인 상 2단, 하 3단 금형의 각 해당 치수는 다음과 같으며, 상 1단, 하 1단부터 상 1단, 하 3단까지는 이들중 해당되는 치수만 취한다.

전체 충전깊이 = H × A

상 제1 펀치 충전단차 = (U × A)

하 제1 펀치 충전깊이 = (U × A) + (h₁ × A)

하 제2 펀치 충전깊이 = (U × A) + (h₂ × A)

하 제3 펀치 충전깊이 = (H × A)

상 제1 펀치 최소깊이 = $\frac{1}{2} H \times (A - 1) + \delta L$

상 제2 펀치 최소깊이 = 상 제1 펀치 최소깊이 + L_d

하 제1 펀치 최소깊이 = $\frac{1}{2} H \times (A - 1) + \delta L + L_d$

하 제2 펀치 최소깊이 = 하 제1 펀치 최소깊이 + L_d

하 제3 펀치 최소깊이 = 하 제2 펀치 최소깊이 + L_d

- 13) 다이의 여유길이는 20mm 이상으로 한다.

- 14) 압분체 성형에 필요한 최소의 성형압력은 시스템이 제공하는 Table에서 선택한다.

- 15) 안전율을 고려하지 않은 다이의 최소 외경(B)은 다음 식으로부터 구한다.

$$B = \frac{C}{\sqrt{1 - \frac{2P_p}{\sigma_d}}}$$

- 16) 인서트의 외경(I)은 다음 식으로부터 구한다.

$$I = \sqrt{B \times C \sqrt{\frac{\sigma_i}{\sigma_d}}}$$

- 17) 초경 인서트와 다이의 수축끼워맞춤 클리어런스(Clearance) 량은 (0.003~0.004)× 인서트 외경(I)이다.

4. 시스템의 적용결과 및 고찰

시스템에 Fig. 2와 같은 자동차용 오토 트랜스미션(Auto-Transmission)의 클러치 리테이너(Clutch Retainer)용 부품으로 사용되는 제품의 기본형상을 적용시켜 금형의 설계 결과를 조사했다. 제품의 재질은 SMF 4종으로 조성비(Composition)는 Fe-1.5Cu-0.5C이다. 시스템의 재료 데이터 베이스(Date Base)로부터 선택된 각 성분 분말들의 밀도와 겹보기 밀도 값을 토대로 혼합분말의 이론밀도(ρ_■)와 겹보기밀도(ρ_■) 값이 각각 7.77과 2.45로 계산되었다. 상대밀도는 0.84로 입력하여, 소결품의 밀도가 6.50g/cm³으로 계산되었다.

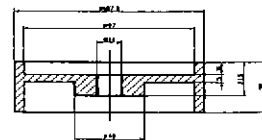


Fig. 2 Shape of applied P/M parts

Fig. 3(b)와 같이 각각의 해당부위에 5°의 예기 구배와 코너 부에 R0.5, 필렛 부에 45°의 모따기가 부가된 형태로 소결품 형상이 수정되었다. 소결품의 체적은 107,742.26 mm³로 계산되었다.

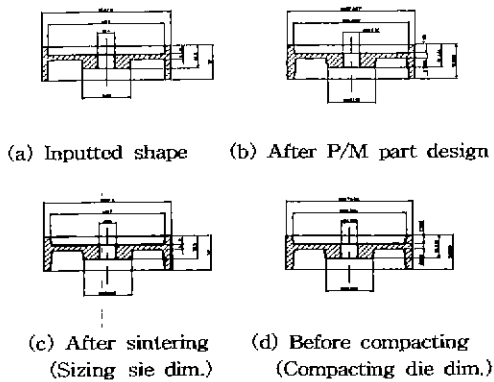


Fig. 3 Dimension change during process

금형재료로는 펀치 재질 SKD1, 다이 재질 SKD61, 코어 로드 재질 SKD1, 그리고 인서트 재질로 V4 초경재료를 선택하였다. Fig. 4와 5에 금형설계의 결과가 나타나 있다. 전체 필요하중은 약 380 ton으로 나타났다.

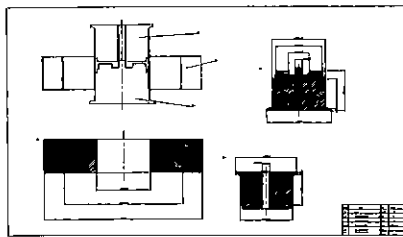


Fig. 4 Drawing of sizing die set produced by the system

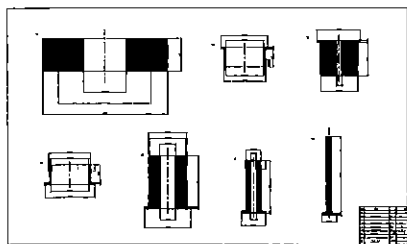


Fig. 5 Part drawing of compacting die set produced by the system

5. 결론

본 연구에서는 분말야금 공정에서 사용되는 압분체 성형용 금형 및 싸이징용 금형 설계를 위한 자동화 시스템을 구축하였고, 상 2단, 하 3단 형상의 자동차용 부품을 시스템에 적용하여 설계 결과를 고찰하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 분말야금 공정에서의 소결품 설계를 위해 필요한 전문적인 설계지식들을 수집하여 정량화와 규칙화하였다.
- 2) 분말야금 공정에서 사용되는 압분체 성형용 금형 및 싸이징용 금형 설계를 위해 필요한 전문적인 설계지식들을 수집하여 정량화와 규칙화하였다.
- 3) 구축된 설계규칙들을 바탕으로 분말야금 공정에서 사용되는 압분체 성형용 금형 및 싸이징용 금형 설계를 위한 자동화 시스템을 구축하였다.
- 4) 복잡한 3차원 형상을 가진 소결품으로 적용범위를 확대하기 위해서는 더 많고, 세부적인 내용의 전문지식들의 확보가 필요하다.

참고문헌

- [1] 이정환, 이상용, 이영선, "자동차 부품의 정밀 단조기술," Proc. of '98 Korean-German Technomart for Automotive Technologies, PNU, pp.275-288, Sept. 22-23, 1998.
- [2] 추현식, 이득용, 권해웅, "분말야금학", 원창출판사, pp.4~7, 2000.
- [3] J. P. Tang, AFD : A Knowledge Based Approach to Automated Forging Design, 1986.
- [4] J. P. Tang, and S. I. Oh, "AFD : An Automated Forging Design System", 16th of NAMRC, pp. 55~62, 1988.
- [5] M. J. Nategh and M. Bakhshi, "A Forging Design Program featuring the Essentials of a Computer Integrated Engineering System for Forging Industries", Advanced Technology of Plasticity, Vol.2, pp.1287~1292, 1993
- [6] H. K. Kim and T. Altan, "Computer-Aided Sequence Design in Cold Forging", Journal of Materials Processing Technology, Vol.33, pp.57~54, 1992.
- [7] J. C. Choi and C. Kim, "An Integrated Design and CAPP System for Cold or Hot Forging", Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.16, pp.720~727, 2000.
- [8] 김갑연, "AutoLISP 플러스 알파", 탐구원, 1995.
- [9] 대한금속학회편, "분말야금학", 희중당, pp.122~126, 1981.
- [10] 日本粉末冶金工業會, "燒結機械部品-その設計と製造-", 技術書院, pp.98~106, 1987.
- [11] M. Randall, "Powder metallurgy science", pp.220~222, 1994.
- [12] Kuhn, H. A., Ferguson, B. L., "Powder Forging," Metal Powder Industries Federation, pp92-99, 1990.
- [13] 류병열, 이국용, 이하성, "형설계편람", 형기술협회, 천만출판사, pp703~716, 1992.