

원형소재 다단 형상인발 공정설계 프로그램

Process Design Program for Multistage Profile Drawing from Round Material

김성민¹, 이상곤², 이태규¹, 이선봉³, 김병민⁴✉
Sung Min Kim¹, Sang Kon Lee², Tae Kyu Lee¹, Seon Bong Lee³ and Byung Min Kim⁴✉

1 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (Graduate School of Precision Manufacturing System Division, Pusan National Univ.)

2 한국생산기술연구원 대경권지역본부 녹색전환기술센터(Green Transformation Technology Center, Daegyeong Regional Division, KITECH)

3 계명대학교 기계자동차공학부 (Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)

4 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bmkim@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2319

Manuscript received: 2010.11.24 / Revised: 2010.12.31 / Accepted: 2011.1.8

Up to now, process design of multistage profile drawing from initial round material is performed through trial-and-error based on experience of industrial experts. This means the increase in production cost and excessive time consuming. In this study, process design program was developed for multistage profile drawing from initial round material. The program was made using VisualLISP. Therefore, the program can be operated by AutoCAD program. In order to verify the effectiveness of the program, two stage profile drawing process for producing heavy duty guide rail was design by using the program. In addition FE analysis and profile drawing experiment were performed. As a result, the program can be used in order to design profile drawing process design.

Key Words: Multistage Profile Drawing (다단 형상인발), Process Design Program (공정설계 프로그램), FE Analysis (유한요소해석), Profile Drawing Experiment (형상인발 실험)

기호설명

F = difference in the area between the die inlet and exit

f_1 = area of material at die inlet

f_2 = area of material at die exit

k_{fm} = mean yield strength of material

k_m = average deformation resistance of material

n = pass number

Q = contact area between material and die

r_{avg} = average reduction ratio

r_t = total reduction ratio

Z = drawing load

α = semi-die angle

1. 서론

다단 형상인발공정은 단면형상이 복잡하고 길이가 긴 기계부품 생산을 위한 대표적인 가공방법이다. 이러한 다단 형상인발제품의 단면치수정도 및 진직도 향상을 위해서는 적절한 공정설계가 매우 중요하다. 현재까지 다단 형상인발공정의 공정설계는 대부분 현장 숙련자의 경험에 의존하고 있는 실정으로, 신제품 개발 시 과도한 개발비 및 시간이 소요되고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 비숙련자도 효과적으로 활용할 수 있는 다단 형상인발공정설계 시스템이 요구되고 있다. 지금까지 다단 형상인발 공정설계에 관한 몇몇 연구들이 수행되었다. Kim 등은 다단이형인발공정

중간패스 단면형상설계 시스템을 개발하였으며, Lee 등은 프로그램을 개발하였다.^{1,2} Brücker 등은 컴퓨터를 이용한 이형인발공정 설계를 수행하였다.³ Yoshida 는 LM-guide 이형인발공정설계를 수행하였으며, Lee 등은 크로스 롤러 가이드 생산을 위한 이형인발공정설계를 수행하였다.^{4,5} 또한, Kwon. 등은 VisualLISP 을 이용한 인발금형설계 자동화 프로그램을 개발하였다.⁶ 그러나 대부분 성형해석 혹은 최적화 기법이 적용되고 있어 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 실제 현장적용에는 한계가 있는 실정이다. 따라서 현장적용을 위한 보다 효과적인 공정설계 시스템이 요구되고 있다.

본 연구에서는 VisualLISP 언어를 이용하여 초기원형소재를 이용한 다단 형상인발 공정설계 프로그램을 개발하였다. AutoCAD 에서 구동이 가능하며, 개발된 설계 프로그램을 이용하여 직선형 가이드레일 형상인발 공정설계를 수행하였으며, 성형해석 및 현장 테스트를 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. 형상인발공정설계 프로그램

공정설계 절차는 Fig. 1 에 나타내었다. 먼저 AutoCAD 로 작성된 최종제품의 단면형상을 인식한다. 최종제품 형상인식 후 적용소재를 선택한다.

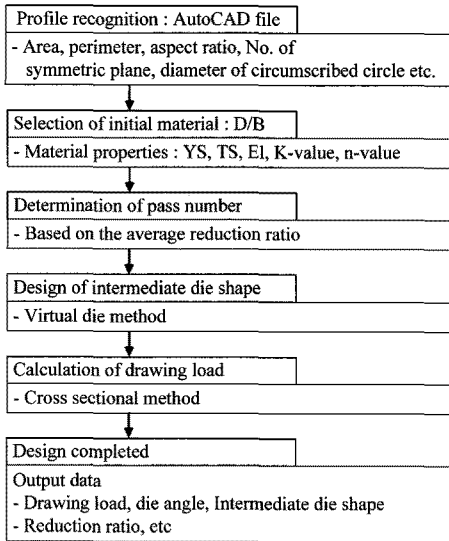


Fig. 1 Procedure of the process design program

적용소재는 실제 현장에서 적용되는 소재로 단축인장시험을 통해 각 소재의 물성치가 D/B 화 되어 있다. 이후 인발공정 패스 수를 결정하고 각 패스의 단면형상이 설계된다. 설계된 단면형상에 대한 각 패스별 인발하중을 계산하고, 마지막으로 설계된 공정에 대한 공정정보를 출력하게 된다.

2.1 최종제품 형상인식

Fig. 2 에서 보듯이 최종제품 형상이 주어지면 최종제품의 단면형상을 인식한 후 최종제품 단면적, 둘레길이, 세장비(aspect ratio), 대칭면의 수, 형상계수(shape factor), 최소외접원 직경 등이 계산된다.

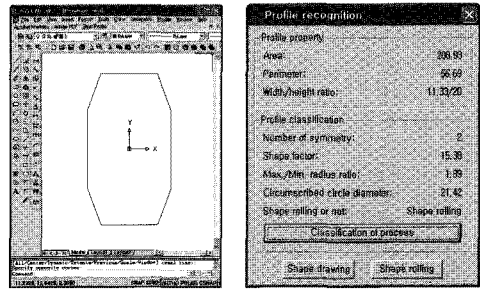
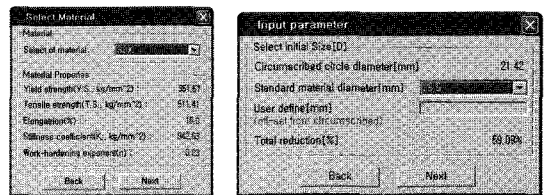


Fig. 2 Recognition of the final product shape

2.2 초기 소재 재질 및 직경 선정

Fig. 3(a)에서 보듯이 본 연구에서는 인장시험을 통해 실제 현장에서 적용되고 있는 다양한 소재에 대한 물성치를 D/B 화 하였다. 또한, 새로운 소재는 직접 인장시험결과를 입력할 수 있다. 소재선정 후 초기소재 직경을 결정하게 된다. 초기소재 직경은 최종제품의 최소외접원보다 반드시 커야만 한다. 따라서 현장속련자의 노하우를 토대로 최소외접원 직경보다 패스당 1.5~2.0 mm 크게 설정하였다. Fig. 3(b)와 같이 초기소재 직경 또한 실제현장에 공급되는 치수를 D/B 화 하였으며, 사용자가 직접 입력도 가능하다.



(a) Material

(b) Diameter of the initial material

Fig. 3 Selection of material

2.3 패스 수 설정

다단 형상인발 공정설계를 위해서는 적절한 패스 수를 설정해야만 한다. 본 연구에서는 평균 단면감소율을 이용하여 패스 수를 설정하였다. 일반적으로 탄소강 다단 형상인발공정 시 패스당 최대 단면감소율은 40% 이내로 설정한다.¹ 따라서 식(1)의 평균단면감소율 계산식을 이용하여 패스 수를 설정하였다. 식(1)에서 총단면감소율과 패스 수를 이용하여 평균 단면감소율이 40% 이하가 되는 패스 수를 선정하였다.

$$r_{avg} = \left\{ 1 - (1 - r_i / 100)^{1/n} \right\} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

2.4 중간패스 다이 단면형상 설계

다단 형상인발 공정설계 시 중간패스 다이단면형상설계는 매우 중요하다. 본 연구에서는 이전 연구에서 제안한 가상다이를 이용한 설계방법을 적용하였다.² Fig. 4 에서 보듯이 초기원형소재와 최종제품의 도심을 일치시킨 후 선형 보간으로 가상의 다이를 생성할 수 있다.

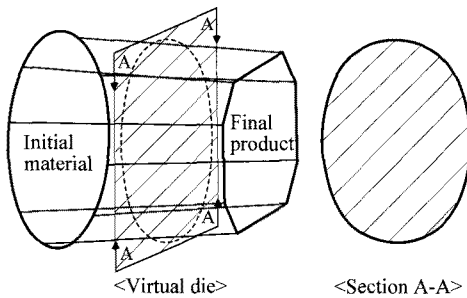


Fig. 4 The virtual die method

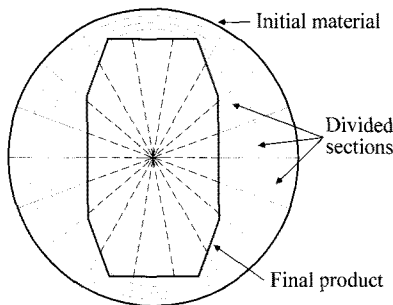


Fig. 5 Divided sections of a virtual die

생성된 가상다이를 길이방향으로 절단하면 다양한 단면형상들이 추출된다. Fig. 5 에 절단된 다양

한 절단면 예를 나타내었다. 이렇게 추출된 가상다이의 절단면을 이용하여 중간패스 단면형상을 설계하게 된다. 또한, Fig. 6 에서 보듯이 절단된 단면들에 대한 각각의 단면감소율 및 누적단면감소율이 계산되며, 요구되는 단면감소율을 가진 절단면을 중간패스 단면 형상으로 선정한다.

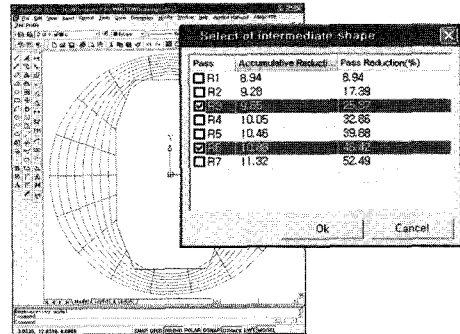


Fig. 6 Selection of the intermediate die shapes

2.5 형상인발공정 하중 예측

본 연구에서는 형상인발공정 하중 평가를 위하여 이전 연구에서 제안한 단면분할법을 적용하였다.⁷

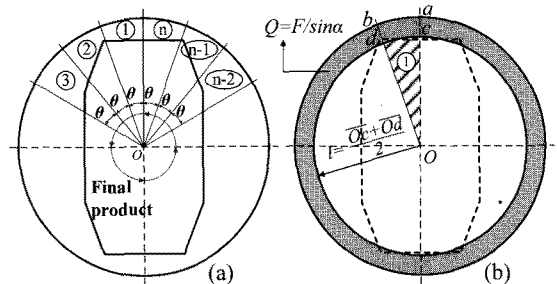


Fig. 7 Divided cross sections

Fig. 7(a)에서 보듯이 형상인발 시 인발 전후의 단면의 도심을 일치시킨 후 중심각이 일정한 유한개의 요소로 나누어 각 요소에 대하여 축대칭 인발하중예측 모델을 적용하여 형상인발하중을 예측할 수 있다. Fig. 7(b)는 절단된 요소 ①을 나타낸 것이다. 중심 O에서 인발제품의 외곽선 cd까지의 평균거리를 l 이라고 하면 인발 전 반경이 Oa, 인발 후 반경이 l 인 축대칭 인발로 가정할 수 있다. 분할된 각 요소에 대한 축대칭 인발하중은 A. Geleji 가 제안한 식(2)로 계산하였다.⁸ Fig. 8 에 요소 ①에 대한 3 차원 형상을 나타내었다.

$$Z_i = (k_{m,i}(F_i + Q_i \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i) / \theta \quad (2)$$

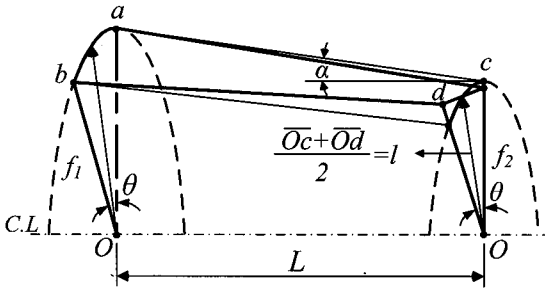


Fig. 8 The divided 1st section

3. 직선형 가이드레일 공정설계

Fig. 9 는 본 연구에서 적용한 직선형 가이드레일 단면형상 및 치수를 나타낸 것이다.

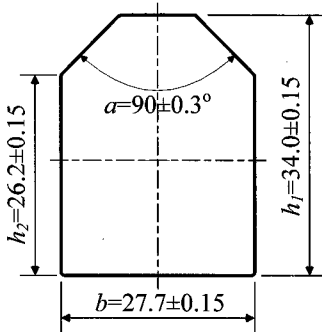


Fig. 9 Heavy duty linear guide rail

최종제품의 최소외접원 직경은 38.7 mm 이다. 총 2 패스공정으로 설정하였으며, 초기소재 직경은 최소외접원 직경을 패스 당 1.5~2.0 mm 키워 42.0 mm 로 결정하였다. 따라서 총단면감소율은 41.4% 이며, 식(1)로부터 2 패스 평균단면감소율은 약 23.4%로 적합함을 알 수 있다.¹ 소재는 58CrMoV4 로 물성치는 인장시험을 통해 확보하였으며, Table 1 에 나타내었다.

Table 1 The result of the tensile test

Yield strength[MPa]	495.3
Tensile strength[MPa]	786.5
Elongation[%]	19.0
Flow stress[MPa]	$\bar{\sigma} = 1068.5 \bar{\epsilon}^{0.179}$

Fig. 10 은 개발된 프로그램으로 생성된 단면형

상들을 나타낸 것으로 본 연구에서는 첫 번째 및 두 번째 패스의 단면감소율이 각각 26.0%와 22.9% 가 되는 형상을 중간 및 최종패스 다이단면형상으로 선정하였다. 또한, 공정해석결과 첫 번째 및 두 번째 패스의 인발하중은 각각 41.2 ton, 31.5 ton 이었다. 선정된 형상에 대하여 Fig. 11 에서 보듯이 최종제품과 간섭이 발생하는 모서리 부분은 미세한 형상수정을 하여 최종 형상을 결정하였다. 수정된 형상의 첫 번째 및 두 번째 패스 단면감소율은 각각 25.7%와 23.2%이다.

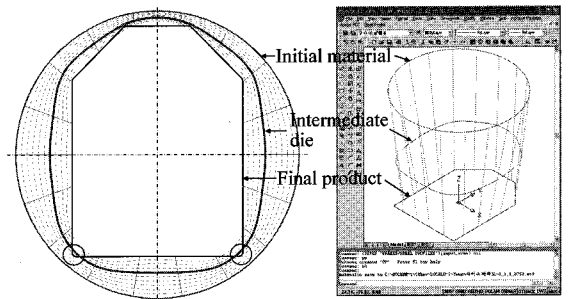


Fig. 10 The intermediate die shape

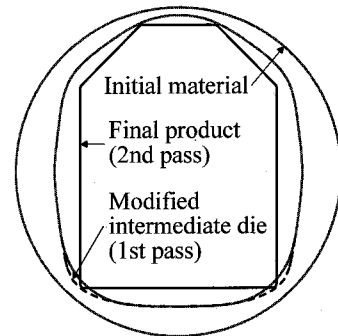


Fig. 11 The modified intermediate die shape

4. 유한요소해석 및 형상인발 실험

4.1 이형인발공정 유한요소해석

설계된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 12 에서 보듯이 제품의 대칭성을 고려하여 1/2 단면해석을 수행하였다. DEFORM-3D 를 이용하였으며, 유한요소개수는 약 50,000 개이다. 인발속도는 100 mm/s 이며, 실험으로 구한 소재와 다이 사이의 마찰계수는 0.06 이다.⁹ 패스 사이의 풀림열처리 효과를 고려하여 첫 번째 패스 통과 후 소재의 유효변형률은 "0"으로 재설정 후 최종패스 인발을 수행하였다.

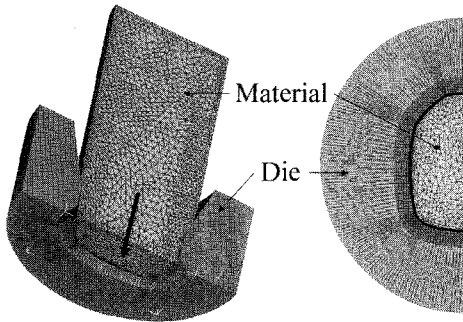


Fig. 12 The initial FE analysis model

Fig. 13 은 해석결과 각 패스 통과 후 제품형상과 제품단면의 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 해석결과 다이 내에서 소재 미층만은 거의 발생하지 않았으며, 두 패스 모두 상대적으로 변형량이 많은 모서리부에서 유효변형률이 높음을 알 수 있다. 또한, 첫 번째 패스와 두 번째 패스의 인발하중은 각각 42.8 ton 과 30.6 ton 이었다. 두 번째 패스의 단면감소율이 상대적으로 작기 때문에 인발하중 또한 낮음을 알 수 있다.

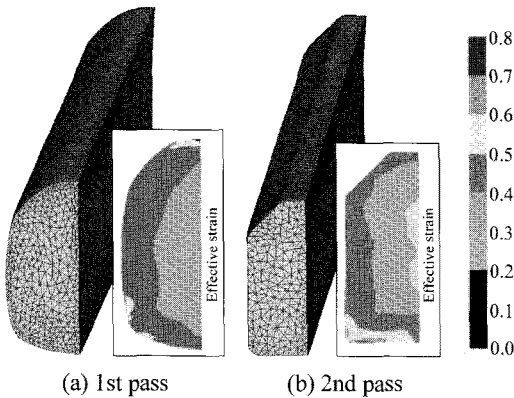


Fig. 13 Deformed shapes and effective strains

4.2 형상인발 실험

최종적으로 다단형상인발 실험을 수행하였다. Fig. 14 에 실험을 위해 제작된 형상인발 다이스를 나타내었다.

Fig. 15 는 각 패스 통과 후 제품의 단면형상을 나타낸 것이다. Table 2 는 공정설계 프로그램, 유한요소해석 그리고 인발실험 결과 인발하중을 비교한 결과이다. 세 결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 공정설계 프로그램으로 예측한 인발하중의 타당성을 확인할 수 있다.

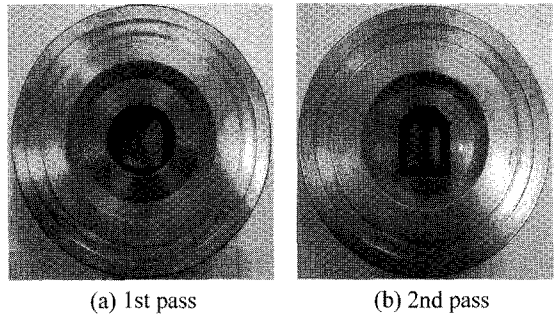


Fig. 14 Shape drawing dies

Table 2 Comparison of the drawing loads (ton)

Pass	Program	FEA	Experiment
1st	40.3	42.8	42.1
2nd	31.8	30.6	29.7

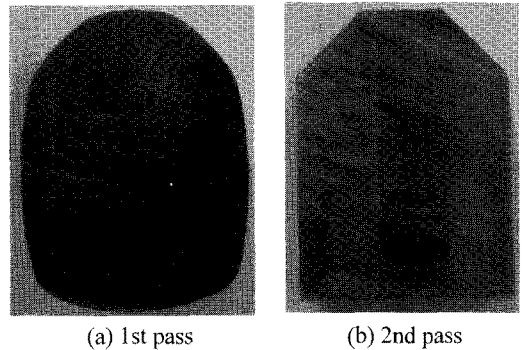


Fig. 15 The cross section after each pass

최종제품에 대하여 3 차원 레이저형상측정기를 이용하여 치수정도를 평가하였다. Table 3 에 최종제품의 진직도 및 각 부의 치수측정공차를 나타내었다. Table 3 에서 알 수 있듯이 생산된 최종제품의 치수공차는 모두 허용공차 이내인 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 형상인발 공정설계 프로그램의 타당성을 확인할 수 있었다.

Table 3 Dimensional tolerance of the final product (mm)

Dimension	Allowable	Measured
h_1	± 0.150	± 0.035
h_2	± 0.150	± 0.032
b	± 0.150	± 0.130
a	$\pm 0.30^\circ$	$\pm 0.15^\circ$

5. 결론

본 연구에서는 초기 원형소재를 이용한 다단 형상인발 공정설계 프로그램을 개발하였으며 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서는 VisualLISP 언어를 이용하여 AutoCAD 에서 구동이 가능한 다단 형상인발 공정설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램으로 초기 원형소재직경을 결정할 수 있으며, 종단면 감소율을 토대로 패스 수를 설정할 수 있다. 패스 수 설정 후 가상다이를 이용하여 요구되는 중간패스 다이형상 설계가 가능하다. 또한 D/B 화되어 있는 소재물성치를 이용하여 각 패스의 인발하중 예측이 가능하며, 최종적으로 AutoCAD 로 각 패스의 공정정보 및 다이형상 출력이 가능하다.

(2) 공정설계 프로그램의 효용성을 확인하기 위하여 직선형 가이드 레일 생산을 위한 형상인발 공정설계를 수행하였다. 최종제품 형상을 기초로 초기 원형소재 직경은 38.7 mm, 종단면감소율은 41.4%, 요구되는 패스 수는 2 패스였다. 이를 기초로 가상다이의 절단면을 이용하여 적절한 중간패스 다이형상을 설계할 수 있었다.

(3) 설계된 공정에 대한 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석 및 형상인발 실험을 실시하였다. 공정설계 프로그램, 유한요소해석, 그리고 형상인발 실험결과 첫 번째 패스의 인발하중은 약 42.1~44.2 ton, 두 번째 패스의 인발하중은 약 29.7~31.3 ton 세 경우 모두 유사한 값을 나타내었다. 인발실험으로 생산된 최종제품에 대한 치수평가 결과 모든 치수가 허용 치수공차 이내로 건전한 제품생산이 가능하였다.

이상의 결과로부터 본 연구를 통해 개발된 공정설계 프로그램을 적용함으로써 다단 형상인발 공정설계를 보다 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단되면, 신제품 개발에도 유용하게 활용 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 부품소재기술개발사업 및 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관유치사업 연구임(No. K20902001420-10E0100-00210).

참고문헌

1. Kim, Y. C., Kim, D. J. and Kim, B. M., "Intermediate Die Design System for The Multi-stage Drawing Process," Trans. NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 69-74, 2000.
2. Lee, S. K., Lee, S. B. and Kim, B. M., "Development of Intermediate Die Shape Design Program for Multi-pass Shape Drawing by Using VisualLISP," Official J. of Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 19, No. 4, pp. 244-247, 2010.
3. Brücker, M., Keller, D. and Reissner, J., "Computer-Aided Drawing of Profile from Round and Square Bar," Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 247-250, 1988.
4. Yoshida, K. and Tuihiji, S., "Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide," Proc. the 7th ICTP, pp. 367-372, 2002.
5. Lee, S. K., Lee, J. E., Lee, T. K., Lee, S. B. and Kim, B. M., "Process Design of Multi-stage Shape Drawing Process for Cross Roller Guide," J. of the KSPE, Vol. 26, No. 11, pp. 124-130, 2009.
6. Kwon, H. H. and Lee, B. K., "Development of Automatic Program for Drawing Die Design," Trans. of the KSMTE, Vol. 14, No. 3, pp. 60-66, 2005.
7. Lee, T. K., Lee, C. J., Lee, S. K. and Kim, B. M., "Prediction of Drawing Load in The Shape Drawing Process," Official J. of Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 18, No. 4, pp. 323-328, 2009.
8. Geleji, A., "Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch (II)," Akademie Verlag GmbH, p. 10, 1960.