

휠볼트 제작을 위한 공정설계 자동화 시스템 개발

박성관*, 박종욱, 이준호, 정성운(부산대원), 김문생(부산대 기계공학부)

Development of an Automated Process Planning System for Manufacturing Wheel Bolt

S.G. Park, J.O. Park, J.H. Lee, S.Y. J.(Graduate School, Pusan Nat'l Univ.), M.S. Kim(Pusan Nat'l Univ.)

ABSTRACT

This paper deals with an automated computer-aided process planning system by which designer can determine operation sequences even if they have little experience in process planning of wheel bolt products by a multi-stage former. The approach to the system is based on knowledge-based rules and a process knowledge base consisting of design rules is built. Knowledge for the system is formulated from plasticity theories, empirical results and the empirical knowledge of field experts. Programs for the system have been written in AutoLISP for the AutoCAD using a personal computer and are composed of two main modules. An attempt is made to link programs incorporating a number of expert design rules to form a useful package. Results obtained using the modules enable the designer and manufacturer of wheel bolt product to be more efficient in this field.

Key Words . Computer Aided Process Planning(CAPP), Multi-stage Former, Cold Forging, Forming Sequence Design, Process Variable, Sequence Drawing, Knowledge-based Rules

1. 서론

오늘날의 생산시스템은 산업계가 직면하고 있는 생산의 다양화, 합리화, 효율화, 숙련 기능인의 부족, 노동 가치관의 변화 등에 대처하기 위해 생산시스템의 자동화가 필연적인 과정이며, 이를 위해 컴퓨터 기술의 이용이 요구되어진다. 기계공업 분야에서의 자동화 생산시스템은 컴퓨터지원에 의한 설계의 자동화(Computer Aided Design;CAD), 제조의 자동화(Computer Aided Manufacturing;CAM), 설계와 제조를 연결시키는 공정계획의 자동화(Computer Aided Process Planning;CAPP) 및 관리의 자동화(Computer Aided Planning;CAP)가 토털시스템적 관점에서 최적화, 통합화가 된 컴퓨터 통합시스템(Computer Integrated Manufacturing System;CIMS)의 실현이다[1-2]. 이를 위해 컴퓨터와 관련 정보처리 기기를 이용해서 적절한 공학설계(Engineering Design)를 자동으로 하는 컴퓨터 지원설계(CAD)에 대한 연구가 진행되고 있다. 이런 시스템들이 사용자의 요구를 충족시키기 위해서는 먼저 실제 생산현장에서 적용이 용이하고 비용이 저렴해야 하며, 기존의 개발된 시스템들과

인터페이스를 할 수 있도록 범용성이 있어야 한다. 또한 개선된 기술과 경험들이 쉽게 통합될 수 있도록 유연성(Flexibility)을 가진 시스템의 개발이 필요하다. 그리하여 이러한 숙련된 기술자의 경험, 축적되어온 관련 연구결과, 소성역학이론, FEM simulation을 통한 최적의 공정변수 등을 경식화하여 컴퓨터를 이용한 공정설계 자동화에 관한 연구가 요구되고 있는 실정이다[3-6]. 따라서, 본 연구에서는 현장경험이 없는 초보자라도 쉽게 공정설계를 수행할 수 있고, 준 축대칭 냉간단조 제품인 휠볼트에 대한 공정 시간의 단축으로 수요자의 요구에 능동적으로 대응할 수 있도록 숙련된 기술자의 경험, 축적되어온 관련 연구결과, 소성가공이론, FEM simulation을 통한 최적의 공정변수로 기술 지식베이스를 구축한 후, 컴퓨터를 이용한 휠볼트 제품의 공정 설계 자동화 시스템을 개발했다.

2. 시스템의 구성 및 작동원리

본 연구에서는 AutoCAD 환경하에서 수행되는 API(Application Programmer Interface)인 AutoLISP언어

를 이용하여 준 축대칭 제품인 휠볼트 제조를 위한 공정설계 자동화 시스템을 구축했다. 시스템은 입력 및 형상처리 모듈, 공정설계 모듈로 구성되었다. 사용자가 제품에 대한 치수 및 치수 공차를 프로그래밍 대화 상자 기능(DCL - Dialog Control Language)을 통해 대화상자에 입력하면, 입력 및 형상처리 모듈에서는 제품을 자동으로 인식하고, 소재의 물성치와 공정 설계시 요구되는 성형 한계치를 데이터베이스로부터 자동으로 추출하여 공정설계 모듈에 전달한다. 공정설계 모듈에서는 인식된 제품에 대해 소재직경을 계산하기 위한 기준이 되는 부분을 선택하여 자동으로 체크되어지는 공정 변수들에 의해 가공 가능한 공정도면을 창출시킨다. 시스템을 구성하는 각 모듈의 기능적인 설명은 아래에서 다루고자 한다.

2.1 입력 및 형상처리 모듈

2.1.1 입력 모듈

입력 모듈은 냉간 가공될 제품의 재질과 치수 및 공차를 입력하는 모듈로서, 소재 리스트에서 사용자가 원하는 소재의 규격을 선택하면 하중 계산에 이용될 소재의 물성치와 공정설계시 요구되는 성형 한계치가 데이터 베이스로부터 자동으로 입력된다. 이 모듈에서는 제품의 각 부분이 변수로 처리되어 있어 치수와 공차를 입력함에 따라 크기가 결정되고 최종제품의 형상이 화면상에 나타난다. 입력될 제품의 치수는 직경(diameter), 높이(height), 경사각(angle), 필렛반경(filet radius), 제품의 각 치수에 대한 +공차량(positive tolerance) 및 -공차량(negative tolerance)으로써 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Variables to be inputted in the input and shape treatment module

diameter	d
height	h
angle	a
filet radius	r
+ tolerance	d_u, h_u
- tolerance	d_d, h_d

2.1.2 형상처리 모듈

사용자가 제품의 치수를 입력시키면 형상처리 모듈에서는 제품의 형상 데이터를 설계에 용이한 수치 데이터로 변환시키고 변환된 수치 데이터로부터 형상에 관한 데이터를 찾아내어 리스트를 구성한 후 그 리스트를 자동적으로 인식한다.

- 도면요소 표현

입력된 제품의 치수를 직선(line)과 원호(arc)를 이용하여 제품단면의 외각형상을 표현하고 제품의 치수는 다음과 같은 도면요소표현으로 변환되어 진다.

("LINE" Sp Ep)

("ARC" Sp Ep Cp)

여기서, Sp(시작점) (xs ys zs), Ep(끝점):(xe ye

ze), Cp(중심점):(xc yc zc)을 나타낸다. 단, 중심점은 도면요소가 원호인 경우이다.

- 기본형상(Primitive Geometry) 표현

제품의 형상은 Fig. 1과 같이 중심부분인 외형과 중공부분인 내형으로 구분한다. 외형 및 내형에 대하여 높이에 따라 윗부분부터 단수번호를 지정한다. 제품 단면의 기하학적 특성이 각 단의 도면요소 표현으로부터 고려되어지므로, 기본형상 표현은 제품을 원통(cylinder), 원추(cone), 오목원추(concave) 및 볼록원추(convex)이고 헤드부의 특수형상인 육각 볼트형(hexagon head bolt), 플랜지 볼트형(flange bolt) 등과 같은 형상의 리스트로 변환하는 것이며, 각 단의 기본형상은 높이, 외경, 내경, 필렛/코너반경 및 오목/볼록원추반경 등의 기하학적 특성을 가진다. 도면요소표현을 통해 기본형상으로 변환되는 변수의 LIST는 다음과 같다

(list n (pg h_j d1_j d2_j r_j))

여기서, n 외형단수, pg 각 단의 기본형상 (cy-원통, cn-원추, cc-오목원추, cv-볼록원추, hb-육각볼트형, fb-플랜지볼트형), h 높이, d1:상부직경, d2:하부 직경, r 필렛/코너 반경 및 오목/볼록 원추반경, j:단. 각 단의 외부형상에 의한 체적에서 내부형상에 의한 체적을 감하여 각 단의 체적계산을 수행하고 이에 따라 변경된 직경 및 높이 등을 계산할 수 있다.

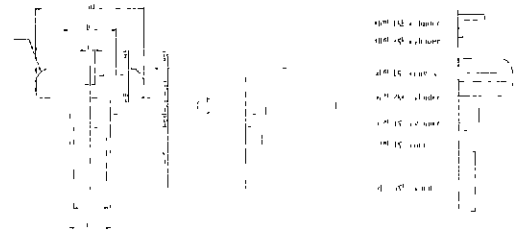


Fig. 1 Example of primitive geometry representation

2.2 공정설계 모듈

공정설계 모듈은 공정순서를 결정하는 모듈로서 기본형상표현으로 변환된 LIST를 설계자동화를 위해 각 단의 형상 리스트를 다음과 같이 재구성한다.

(list n (pg h_1j d1_1j d2_1j r_1j))

여기서, n, 외형단수, pg, 각 단의 기본형상 (cy-원통, cn-원추, cc-오목원추, cv-볼록원추, hb-육각볼트형, fb-플랜지볼트형), h: 높이, d1:상부직경, d2:하부 직경, r: 필렛/코너 반경 및 오목/볼록 원추반경, j: 단

각 공정 단계마다 주어지는 clearance을 입력하면, 이 모듈에서는 자동적으로 소재직경 결정규칙(규칙 13~18)에 의해 소재직경의 범위가 제시되고 이에 따라 사용자가 입력한다. 소재직경이 결정되면 체적 일정 조건에 따라서 최종 제품의 형상에서 구한 체적을 이용하여 소재의 길이를 구한다. 예비업세팅시 원추형 예비성형체의 원추각을 사용자가 입력하면 기본 형상 표현에 의한 기하학적 특성과 공정설계 규칙을 이용하여, 소재로부터 최종제품까

지 결함이 없는 공정순서, 공정수, 중간단계의 기하학적 형상 및 작업방법(절단, 압출, 업세팅 등) 등을 결정한 후 공정도면을 창출한다.

3. 설계규칙

3.1 일반규칙

규칙1) 다음 단계의 형상이 성형되려면 예비 성형 제품은 변형영역(deformation zone)과 비변형영역(no deformation zone)으로 구성된다.

규칙2) 중간단계의 예비성형품의 치수 결정은 체적 일정조건을 사용한다.

규칙3) 중실제품의 소재형상은 원형선재 혹은 봉재이다.

3.2 성형성 및 결함 판정조건에 대한 규칙

규칙4) 나사부와 나사부 상단의 압출비가 18%이하인 경우에는 전방압출과 예비업세팅을 동시에 수행할 수 있다.

규칙5) 재질에 따른 성형한계값에 대한 데이터베이스는 Table 2와 같다.

Table 2 Forming limit in solid extrusion and upsetting (AISI)

Limit Material	LSOS	LSIS	TRAP	LSLDR	LULDR	LUDDR	LULDR
Steel (A)	0.357	1.194	50.0	8.0	1.61	2.237	2.25
Steel (B)	0.357	0.789	30.0	6.0	0.99	1.64	1.64
Steel (C)	0.357	0.693	25.0	1.0	0.92	1.58	1.58
Aluminum	0.288	3.912	80.0	10.0	3.22	5.0	5.0
Copper	0.357	1.609	65.0	10.0	1.77	2.123	2.123
Brass	0.357	1.386	55.0	10.0	1.61	2.237	2.237

규칙6) 중실 변형률(SS)이 한계 비구속 변형 (LSOS)보다 작으면 비구속압출로 성형한다.

규칙7) 중실 변형률이 한계 비구속 변형률보다 크고 한계구속 변형률(LSTS)보다 작으면, 구속 압출로 성형한다.

규칙8) 소재 좌굴을 방지하기 위해 중실 업세팅 길이대 직경비(ULDR)가 한계 업세팅 길이 대 직경비(LULDR)보다 작아야 한다.

3.3 소재직경의 결정에 대한 규칙

규칙9) 소재직경은 제품의 최대직경과 최소직경 사이에 있다.

규칙10) 중실제품에서 제일 작은 직경의 중실 변형률이 LSIS + 2x LSOS보다 크면, 소재직경을 줄여야 한다.

규칙11) 구속압출시 제일 큰 직경의 중실 길이 대 직경비 (=L₁/d₀)가 한계 중실길이대 직경비(LSLDR)보다 크면, 소재 직경을 늘여야 한다.

규칙12) 중실업세팅에서 제일 큰 직경의 중실 업세팅 직경비가 한계 업세팅 직경비(LUDDR)보다 크면, 소재직경을 늘여야 한다.

3.4 공정순서 결정에 대한 규칙

규칙13) 규칙 9~11에 의해 결정된 소재직경으로부터 최종제품을 만들기 위해서는 소재직경보다 작은 제품직경은 압출공정을 한다.

규칙14) 중실제품의 성형순서는 압출공정, 업세팅공정이며, 규칙 1에 해당하는 경우는 이들을 동시에 성형한다.

규칙15) 다단 압출이 요구될 때 1회 가공한계를 만족하면, 즉 SS ≤ LSOS 혹은 LSTS 제일 작은 직경부터 순차적으로 압출한다.

규칙16) 중실압출시 한 부분의 최대 성형한계는 LSTS+2x LSOS를 초과할 수 없다.

규칙17) 구속압출로 성형되는 부분의 형상은 최종제품의 형상에 맞추어 성형한다.

규칙18) SS가 LSTS보다 크면, 처음 압출공정은 내부 결함을 피하는 직도(TRAP)로 압출하고, 다음 작업에서 최종제품의 각도를 맞춘다.

규칙19) SS가 LSTS + LSOS보다 작으면, 먼저 LSTS까지 예비성형하고 그 다음 비구속압출한다.

규칙20) SS가 LSTS+2x LSOS보다 작으면, 먼저 LSTS까지 예비성형하고 그 다음 비구속압출과 비구속압출로 작업을 완성한다.

규칙21) 한 부분이 두 번의 구속압출을 받을 수 없다.

규칙22) 규칙 9, 12를 만족한 소재로부터 최종제품을 만들기 위해서 소재직경보다 큰 제품직경은 업세팅공정을 한다.

규칙23) 강(steel)에서 ULDR ≤ 2.25이면 한번에 업세팅한다.

규칙24) 강에서 2.25 < ULDR ≤ 4.5이면 한번에 업세팅되어서 만들어 질 직경이 소재 직경의 1.3배를 초과하지 않으면 한번에 가공이되며, 그렇지 않으면 예비 업세팅공정이 필요하다.

규칙25) 예비 업세팅공정이 필요하면 그 형상은 끝부분에 원추형이 있는 형상이다.

규칙26) 강에서 4.5 < ULDR ≤ 6.5일 경우 업세팅되어서 만들어 질 직경이 소재직경의 1.3배를 초과하지 않으면 한번에 가공이되며, 그렇지 않으면 예비 업세팅공정이 필요하며 업세팅되는 길이가 직경의 2배가 되도록 한다. 예비 업세팅공정시 등가직경을 사용하며, 등가직경(ED)은 다음과 같이 계산된다.

$$ED = \sqrt[4]{\frac{d_0^4 + d_1^4}{2}}$$

3.5 유동응력에 대한 규칙

규칙27) 소재가 인발된 후에 절단되어서 업세팅된다면 업세팅시 인발에 의한 예비변형률은 더하지 않고 유동응력을 계산한다.

규칙28) 소재가 인발된 후에 절단되어서 압출된다면 예비변형률을 그대로 더하여 유동응력을 계산한다.

규칙29) 업세팅시의 유동응력은 최종상태의 변형률일 때의 유동응력이며, 압출시의 흐름응력은 평균상태의 변형률일 때의 유동응력이다.

규칙30) 중간 단계의 열처리가 수행되면 변형률 이력이 무시된다.

4. 시스템의 적용 및 고찰

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 재질이 S45C인 M18 휠 볼트 제품을 적용시켜 각 모듈에서 수행된 결과를 고찰하고자 한다

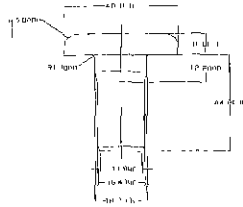


Fig. 2 A sample forging product for running the system

4.1 입력 및 형상처리 모듈

사용자가 AutoCAD상에 Fig. 3의 소재입력 대화상자에서 소재를 선택하고 Fig. 4의 최종제품 치수 입력 대화상자에서 제품의 직경, 높이, 경사각, 펠렛반경 및 공차량을 입력시키면, 제품의 형상은 자동으로 인식되어져서 설계에 용이한 수치 데이터의 리스트로 변환되어지고 이를 Table 3에 나타내었다. 이들은 규칙 및 데이터 베이스를 공유한 각 모듈에서 프로그램을 수행시키기 위하여 사용되어진다.

Table 3 Alphanumeric list of the product

단수	LIST
1	(list 1 (cv 5.0 30.0 40.0 5.0))
2	(list 2 (cy 5.0 40.0 40.0 0.0))
3	(list 3 (cc 1.0 20.23 18.23 1.0))
4	(list 4 (cy 6.8 18.23 18.23 0.0))
5	(list 5 (cn 5.0 18.23 16.48 0.0))
6	(list 6 (cy 30.7 16.48 16.48 0.0))
7	(list 7 (cn 1.93 16 48 14.68 0.0))

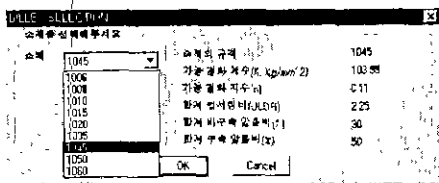


Fig. 3 Selection of the billet material

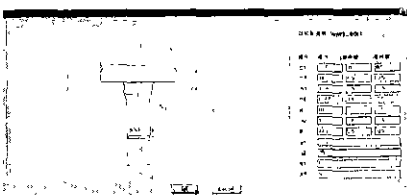
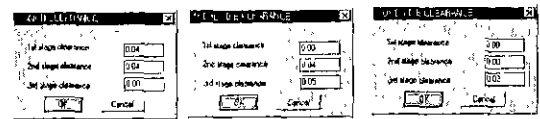


Fig. 4 Input of dimensions and tolerances of the product

4.2 공정설계 모듈

공정설계 모듈에서는 입력 및 형상처리 모듈에서 인식된 단조품의 형상과 관련한 각 치수들을 기준으로 체적일정조건에 따라서 소재직경을 계산한다. 이때, 각 공정 단계마다 제품과 금형 사이에는 Fig. 5(a)와 같이 0.02~0.04의 클리어런스를 적용했다. 최종제품의 형상에서 구한 체적(21932.0 mm³)으로부터 소재 직경을 Fig 5(b)와 같이 ϕ 19.68을 적용했다. 이 모듈에서는 Fig 5(b)와 같이 예비 업세팅 시 원주형 예비 성형체의 원주각 25°를 입력한 후, 기본 형상 표현에 의한 기하학적 특성과 각 성형단계의 공정설계 규칙을 이용하여 자동으로 창출된 공정도면을 Fig. 6에 나타내었다.



(a) Input of clearances



(b) Input of billet diameter and cone angle
Fig 5 Input data for carrying out the process planning module

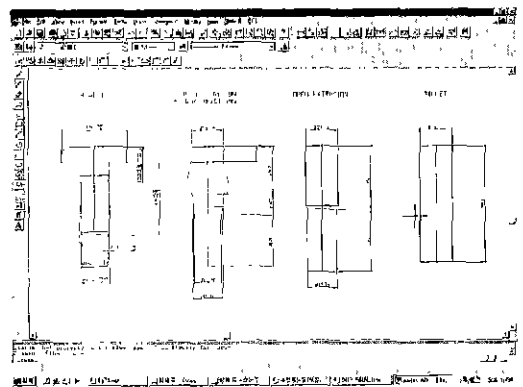


Fig. 6 Automatic process planning generated in the process planning module

첫 번째 공정에서는 SS(중실 변형률)가 0.16으로 LSOS(한계 비구속 변형률) 0.357 보다 작으므로 펠렛은 압출부의 직경이 ϕ 18.14인 비구속 전방압출을 수행한다. 두 번째 공정에서는 전방압출 부위의 압출비가 15%로서 소재 하부의 전방압출이 완료된 후 다이 내부에 재료가 응만됨으로써 발생한 지지력에 의해 소재 상부의 예비업세팅이 행해진다. 이로써 최종 공정에서는 볼트의 헤드부위가 업세팅되는데, 일반적으로 볼트의 헤드부위는 강도를 높이기 위하여 변형률을 크게 함으로써 요구되는 기

계적 성질을 갖게 할 수 있다. 이 모델에서 창출된 공정설계의 타당성을 검증하기 위하여 DEFORM으로 각 공정의 시뮬레이션을 수행했다. 특히 두 번째 단계의 복합공정(전방압출 + 예비업세팅)시 제품에 적용하는 용력분포를 Fig 7에 나타내었으며, 원활한 성형이 이루어짐을 확인할 수 있다.

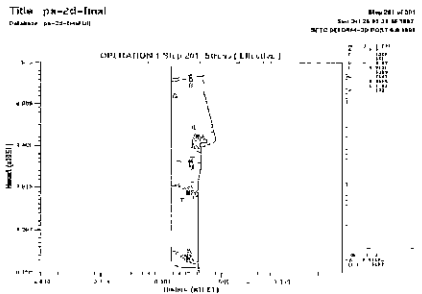


Fig. 7 Results of FE Simulation for the forming of the second stage (Open Extrusion and Pre Upsetting)

개발된 시스템은 생산성의 향상과 생산비를 절감시킬 수 있고 AutoCAD에 의해 출력된 공정도는 공차 및 기호 등이 기입되어 현장에서 바로 사용할 수 있는 설계 도면이다. Fig 8은 공정설계 경험이 풍부한 숙련된 설계자에 의한 공정설계 결과이며, 이 모델에서 창출된 도면과 비교해 볼 때 4단계의 공정으로 공정수가 증가했음을 알 수 있다.

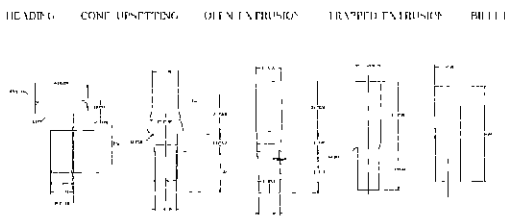


Fig. 8 Process planning carried out in the field expert

5. 결론

본 연구에서는 소성이론, 권원자료를 그리고 산업체 설계전문가들의 경험적 지식과 FEM Simulation을 통한 최적의 공정변수를 토대로 다단 포머에 의한 휠볼트 제품의 냉간단조 성형을 위한 공정설계 자동화 시스템을 구축했다. 소성가공 해석용 툴인 DEFORM을 이용하여 공정설계 모델에서 자동으로 창출된 공정도면의 타당성을 검증하였고 산업체에서 행해지고 있는 공정설계의 해석결과와도 비교하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 다단 포머에 의한 휠볼트 제품의 냉간단조 성형시 공정 및 금형설계에 필요한 설계규칙과 경험을 체계적으로 규칙베이스 및 데이터 베이스로 정량화

하였다.

2) 본 시스템을 산업체에서 행해지고 있는 휠볼트의 공정설계에 적용시킨 결과 4단계로 행해지던 기존의 공정을 3단계로 단축시켜 공정수의 감소로 인한 생산성의 향상과 생산비의 절감이 가능하게 했다.

3) 본 시스템은 AutoCAD 환경하에서 도면화된 제품 단면의 도면요소 표현으로부터 변환된 기본명상을 이용하여 제품을 형상인식시킴으로써 기하학적 특성이 고려된 설계가 가능하다.

4) 공정설계 모델에서는 필렛/코너반경을 포함하는 단면의 기본형상에 의해서 구해진 기하학적 특성을 이용하여 소체로부터 최종제품까지 결함이 없는 공정순서, 공정수, 중간단계의 기하학적 형상 및 작업방법 등이 포함된 공정도면을 자동으로 창출시킬 수 있다.

본 시스템의 개발을 통하여 공정 설계의 표준화로 공정설계시간이 단축되며 시행착오 감소 및 미숙련자의 설계 가능에 의한 생산성 향상을 꾀할 수 있다. 또한 현장에서는 필요한 기술과 경험을 정량화하고 설계철학을 공식화시킴으로써 설계지침의 표준화를 이룰 수 있고, 초보자의 교육에 쉽게 활용될 수 있다. 개발된 시스템은 AutoCAD 환경에서 구현됨으로써 시스템의 결과를 다른 CAE 소프트웨어 및 CAM 기술을 소프트웨어와 원활한 연결을 할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- 1 MP Groover and E W Zimmers, CAD/CAM Computer-Aided Design and Manufacturing, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1984.
- 2 D.Sherif and E.Wakil, "Processes and Design Manufacturing, Prentice Hall, Inc, Engleweed Cliffs, 1989
- 3 A A Badawy, D J Kuhlmann, P.S.Raghupathi and T. Altan, "Computer-Aided Design of Multi-stage Forging Operations for Round Parts". J.Mech. Work. Technology, 11, pp 259-274, 1985
- 4 K Sevcnler P S Raghupathi and T. Altan. "Forming-Sequence Design for Multistage Cold Forging", J Mech Work Technology, 14-2, pp 121-136, 1987.
5. P. Bariani, W.A. Knight, "Computer Aided Cold Forging Process Design "A Knowledge-Based System Approach for Forming Sequence Generation", Ann. CIRP, 37, pp 243-246, 1988
- 6 J.C Choi and C. Kim "An Integrated Design and CAPP System for Cold or Hot Forging" Products Int.J Adv. Manuf Technol 16, pp720-727, 2000