

# 냉간단조 공정설계 시스템과 유한요소해석에 의한 검증

이 언 호\*, 김 동 진\*\*, 김 병 민\*\*\*, 최 재 찬\*\*\*

## Computer-Aided Process Planning System of Cold Forging and its Verification by F.E. Simulation

E. H. Lee\*, D. J. Kim\*\*, B. M. Kim\*\*\* and J. C. Choi\*\*\*

### ABSTRACT

This paper describes interactive computer procedures for design the forming sequences in cold forging. This system is implemented on the personal computer and its environment is a commercial AutoCAD system. The programming language, AutoLISP, was used for the configuration of the system. Since the process of metal forming can be considered as a transformation of geometry, treatment of the geometry of the part is a key in process planning. To recognize the part section geometry, the section entity representation, the section coordinate-radius representation and the section primitive geometry were adopted. This system includes six major modules such as input module, forging design module, forming sequence design module, die design module, FEM verification module and output module which are used independently or in all. The sequence drawing with all dimensions, which includes the dimensional tolerances and the proper sequence of operations, can generate under the environment of AutoCAD. The acceptable forming sequences can be verified further, using the FE simulation.

**Key Words:** Process planning(공정설계), Section entity representation(단면의 도면요소 표현), Section coordinate-radius representation(단면의 좌표반경 표현), Section primitive geometry(단면의 기본형상 표현), Forging design(단조품 설계), Sequence drawing(공정도), FEM verification(유한요소해석 검증)

### 1. 서 론

냉간단조는 여러 단계의 예비성형 공정이 필요하며 각 작업단계에서는 이에 상응하는 금형이 필요하다. 특히 냉간단조 금형은 가혹한 작업조건 하에서 사용되므로 금형의 손상

이 심하고 수명이 매우 짧다. 이러한 수명저하는 금형 비용의 증가에 그치지 않고 가동률 저하 및 품질관리 비용 증가 등에 연관되어 제품원가 상승의 원인이 되므로, 구조, 재질, 강도, 정밀도 및 변형 등을 고려하여 종합적으로 설계하여야 한다. 이와 같은 금형설계를 위해서는 각 성형 작업에 대

\* 두원공업전문대학 컴퓨터응용설계과  
 \*\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과  
 \*\*\* 부산대학교 기계설계공학과, ERC for NSDM

한 최적의 공정설계가 선행되어야 한다<sup>(1-3)</sup>.

산업현장에서의 공정설계와 금형설계는 숙련된 설계자의 경험과 판단에 의존하여 수행되고 있는 데, 최근에는 컴퓨터와 수치기법의 발전으로 컴퓨터를 이용한 여러 가지 방법들이 공정설계와 금형설계에 활발히 이용되고 있다. 특히 유한요소해석은 재료유동이나 응력, 소성변형을, 내부결합, 불완전한 다이 충전성 및 연성파괴 등을 예측할 수 있어 생산과정의 시행착오를 줄일 수 있다.

최적공정의 선택을 위해 고려해야 할 중요 인자는 공정수, 각 공정의 금형 수명, 윤활, 열처리, 공장환경, 완성품의 품질 및 후가공 등이며, 전문가시스템의 지식 구축은 이들의 영향을 다각적으로 검토하여 경험지식과 이론지식으로 조합하여 정량적으로 파악할 필요가 있다. 그러나 전문가의 지식에는 한계가 있기 때문에 유한요소법에 의한 수치 시뮬레이션을 이용하여 공정의 중요 인자를 평가할 수 있도록 유한요소법과 결합이 되어야 한다. 이에 관한 연구는 K. Osakada 등<sup>(4)</sup>이 유한요소 시뮬레이션과 전문가시스템을 연계하여 유한요소해석으로 얻은 결과들을 전문가시스템의 지식베이스로 사용하였고, N. Alberti 등<sup>(5)</sup>은 지식베이스 시스템에 의해 실행된 몇 가지 가능한 성형절차를 예비선택하여, 그 공정을 유한요소해석을 통하여 최적의 성형절차를 결정하는 방법을 제안하였다. T. Altan 등<sup>(6)</sup>은 FORMEX 시스템에 상용 CAD시스템과 강소성 FEM 프로그램인 DEFORM을 접목시킨 공정설계 전문가시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 프레스나 냉간포머로 성형되는 냉간단조품에 대해 기계가공 부품으로부터 단조품설계, 공정설계와 금형설계를 자동화할 수 있는 지적인 CAD시스템을 개발하고자 한다. 먼저 본 시스템에 의해 실행된 몇 가지 성형순서 중에서 최대 성형하중, 소재직경 및 기계사양에 따른 공정수의 조절 등을 비교하여 가장 적절한 공정순서를 결정하고, 가공별 치수공차가 고려된 공정도를 자동 창출하고, 다음으로 금형설계 모듈에서 창출된 각 공정별 금형을 사용하여 유한요소 시뮬레이션함으로써 소재로부터 최종부품까지 결합이 없는 공정설계를 하고자 한다.

## 2. 냉간단조 공정설계시스템

### 2.1 부품단면의 형상표현

#### 2.1.1 단면의 도면요소 표현

부품단면의 윤곽형상은 직선과 원호로 구성되는 것으로 하였으며, 형상입력은 다음 2가지 방법을 이용하였다. 첫

번째는 AutoCAD에 의해 도면화된 파일을 화면 상에 적재 (loading)하거나 사용자가 직접 도면화하여 입력할 수 있다. 두 번째는 부품단면의 각 절점을 좌표와 반경으로 입력할 수 있다.

본 연구에서 개발된 시스템은 AutoCAD환경 하에서 수행되는 AutoLISP 언어를 이용하여 구축되었다. 시스템 내에서의 형상표현은 AutoCAD의 도면요소 데이터베이스<sup>(7)</sup>를 이용함으로써 쉽게 표현된다. 규칙베이스 및 데이터베이스의 적용으로 발생하는 단면의 형상수정을 적절히 수행하기 위해서 부품단면의 형상인식은 3가지 형상표현 방법, 즉 단면의 도면요소 표현, 단면의 좌표반경 표현 및 단면의 기본형상 표현 등을 사용하였다. 먼저 본 시스템은 도면요소 데이터베이스를 도면요소 표현으로 재구성하기 위해서 각각의 도면요소를 검색하여 직선에 대해서는 시작점 및 끝점 그리고 원호인 경우에는 시작점, 끝점 및 중심점 등으로 부품단면을 변환한다. 이때 분할선을 기준으로 각각의 도면요소들은 편치부에 해당하는 상단면과 다이부와 녹아웃부에 해당하는 하단면으로 분할하여 저장된다.

#### ○ 도면요소 표현의 형식

— 단면의 상부 : 편치부

(0.0 ("L" Sp Ep) ("A" Sp Ep Cp) ("L" Sp Ep) ..... )

— 단면의 하부 : 다이부 및 녹아웃부

(0.0 ("L" Sp Ep) ("A" Sp Ep Cp) ("L" Sp Ep) ..... )

여기서 "L"은 도면요소가 직선이며, "A"는 원호이다. 그리고 Sp (시작점) : (xs ys zs), Ep (끝점) : (xe ye ze), Cp (중심점) : (xc yc zc)을 나타낸다. 단, 중심점은 도면요소가 원호인 경우이다.

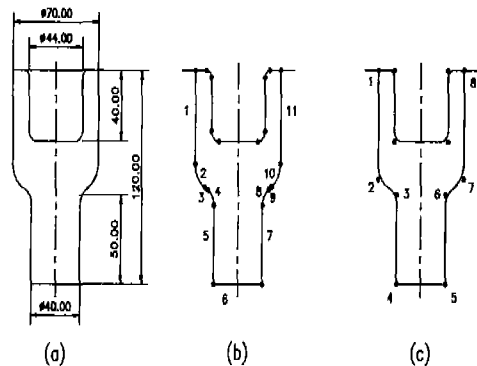


Fig.1 Examples of cross section for geometry representation.

○ Fig. 1 (b)의 하단면에 대한 도면요소 표현

(0.0	도면 요소	시 작 점			끝 점			중 심 점		
		x좌표	y좌표	z좌표	x좌표	y좌표	z좌표	x좌표	y좌표	z좌표
	("L	-35.000	125.000	0.0	-35.000	68.028	0.0			)
	("A	-35.000	68.028	0.0	-28.321	55.547	0.0	-20.000	68.028	0.0)
	("L	-28.321	55.547	0.0	-24.453	52.969	0.0			)
	("A	-20.000	52.969	0.0	-20.000	44.648	0.0	-30.000	44.648	0.0)
	("L	-24.453	44.648	0.0	-20.000	0.0	0.0			)
	("L	-20.000	0.0	0.0	20.000	0.0	0.0			)
	("L	-20.000	0.0	0.0	20.000	44.648	0.0			)
	("A	20.000	44.648	0.0	24.453	52.969	0.0	30.000	44.648	0.0)
	("L	24.453	52.966	0.0	28.321	55.547	0.0			)
	("A	28.321	55.547	0.0	35.000	68.028	0.0	20.000	68.028	0.0)
	("L	35.000	68.028	0.0	35.000	125.000	0.0			)

예를 들어 Fig. 1 (a)와 같은 부품단면의 하단면은 각 도면요소에 따라 도면요소 표현으로 나타내면 다음과 같다.

이까지 단면의 도면요소 표현은 단면의 형상특징을 알 수는 없지만, 중심축을 기준으로 각 도면요소에 대하여 단면의 시작점과 끝점을 이용하여 부품의 체적과 중량, 단면의 최대폭, 최대높이 및 각도 등을 쉽게 계산할 수 있다. 또한 수정된 단면형상의 출력에도 유용하게 이용할 수 있다.

2.1.2 단면의 좌표반경 표현

단면의 도면요소 표현은 단면의 필렛/코너반경을 수정하고 단면의 형상을 부분단면으로 인식시키는 데는 어려움이 있다. 그러나 인접한 두 직선이 만나는 점의 좌표와 그 점에서의 반경으로 표현되는 단면의 좌표반경 표현은 필렛/코너반경을 수정하고 부분단면으로 분할하는 것도 쉽게 구현할 수 있다.

따라서 부품단면의 형상은 단면의 좌표반경 표현에 따라 데이터화일에 저장하면, 시스템 내에서 화일을 입출력함으로써 단면을 좌표반경 표현으로 직접 읽어 들이고 이것을 다시 도면요소 표현으로 변환할 수 있다.

○ 단면의 좌표반경 표현의 형식

— 단면의 상부

(0.0 xyrU1 xyrU2 xyrU3 xyrU4 xyrU5 ..... )

— 단면의 하부

(0.0 xyrL1 xyrL2 xyrL3 xyrL4 xyrL5 ..... )

여기서 N 번째 절점을 나타내는 xyrN (xN yN zN

rN)에서 xN, yN, zN은 단면의 각 절점(분할선과 만나는 점 또는 인접한 직선의 두 도면요소가 만나는 점)의 좌표를 나타내며, rN은 그 절점에서의 반경을 나타낸다.

○ Fig. 1 (c)의 하단면에 대한 단면의 좌표반경 표현

	{x 좌표	y 좌표	z 좌표	반경
(0.0	( -35.00	120.00	0.0	0.0 )
	( -35.00	60.00	0.0	15.00 )
	( -20.00	50.00	0.0	10.00 )
	( -20.00	0.0	0.0	0.0 )
	( 20.00	0.0	0.0	0.0 )
	( 20.00	50.00	0.0	10.00 )
	( 35.00	60.00	0.0	15.00 )
	( 35.00	120.00	0.0	0.0 )

2.1.3 단면의 기본형상 표현

단면의 도면요소 표현이나 좌표반경 표현은 단지 단면의 윤곽형상만을 나타내므로 단면의 기하학적 특성, 예를 들면 단면을 이루고 있는 단(stage)의 수와 내부에 단이 있는 형상인지 외부에 단이 있는 형상인지를 나타낼 수 없다. 대부분의 규칙들을 적용할 때 부품단면에 대한 형상수정은 단면의 기하학적 특성에 기초하여 이루어지므로 이 특성을 표현할 수 있도록 단면을 분할해야 한다.

따라서 형상인식된 부품단면은 원통, 원추, 오목원추 및 볼록원추 등의 축 체적요소를 이용하여 높이, 직경 및

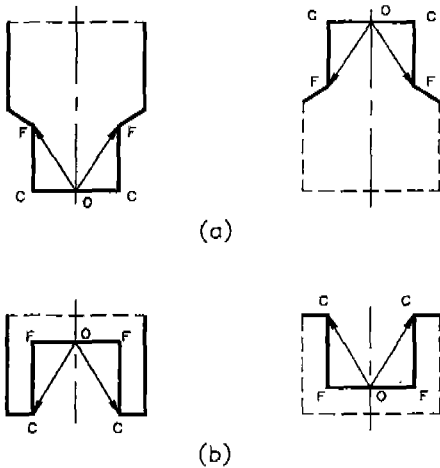


Fig. 2 Example of pattern recognition: (a) external-stages type "FS"; and (b) internal-stages type "BS".

필렛/코너반경이 포함된 기본형상의 합성으로 표현함으로써 기하학적 특성이 고려된 설계가 가능하며, 단면의 형상수정을 적절히 수행할 수 있다. 이와 같이 기본형상의 리스트로 변환된 단면은 Fig. 2와 같이 내부에 단이 있는 형상인지 외부에 단이 있는 형상인지를 나타내기 위해서 중심축을 기준으로 시작점과 끝점의 방향을 이용함으로써 판단할 수 있다.

○ 단면의 기본형상 표현의 형식

(FBsType (PrG1 Hei1 DaU1 DaL1 Ri1 Ro1 Rcv1)  
 (PrG2 Hei2 DaU2 DaL2 Ri2 Ro2 Rcv2)  
 .....  
 )

여기서 FBsType는 내부에 단이 있는 형상인지 외부에 단이 있는 형상인지를 나타내는 단면형상이며, PrG는 기본형상의 리스트이다. 그리고 Hei, DaU, DaL, Ri, Ro

○ Fig. 1 (c)의 하단면에 대한 단면의 기본형상 표현

단면 형상	기본형상	높이	하부 직경	상부 직경	필렛/코너 반경	오목/볼록 원추의 반경
("FS")	("CONE")	0.0	0.0	40.00	0.0	0.0
	("CYLINDER")	50.00	40.00	40.00	0.0	10.00
	("CONE")	10.00	40.00	70.00	10.00	15.00
	("CYLINDER")	65.0	70.00	70.00	15.00	0.0

와 Rcv는 각각 높이, 하부 직경, 상부 직경, 필렛/코너반경 및 오목/볼록원추의 반경 등을 나타낸다.

여기서 원통과 원추인 경우는 오목/볼록원추의 반경이 0.0이다.

2.2 시스템의 구성 및 규칙베이스

냉간단조 공정설계시스템의 구성은 Fig. 3과 같이 입력 모듈, 단조품설계 모듈, 공정설계모듈, 금형설계 모듈, 출력 모듈 및 유한요소해석 검증 모듈 등으로 구성되어 있다. 여기서 유한요소해석 검증 모듈을 제외한 모든 모듈은 하나의 환경에서 수행되며, 각 모듈 사이에서 규칙베이스와 데이터베이스의 공유가 가능하다.

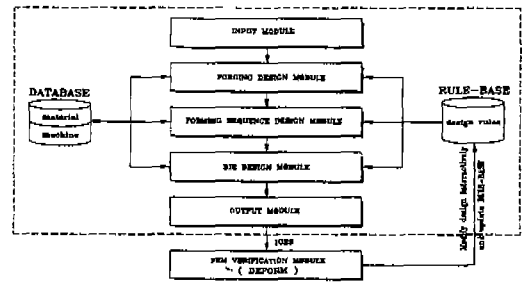


Fig. 3 Block diagram of cold forging system.

입력 모듈에서는 AutoCAD환경 하에서 도면화된 기계 가공 부품, 소재 직경과 재질 및 접촉면의 마찰계수(, m) 등을 대화식으로 입력한다.

단조품설계 모듈에서는 형상인식된 부품단면을 기계가공 부품으로부터 단조 가능한 단면으로 변환할 수 있도록 언더컷의 제거, 가공여유와 필렛/코너반경의 부여, 깊고 좁은 구멍의 제거 및 캔 부품에서 얇은 벽두께와 내부 바닥의 형상수정 등을 행할 수 있다. 단조품설계에 적용된 중요 규칙베이스는 다음과 같으며, 재질과 공정에 따른 성형한계값의 정의와 데이터베이스는 Fig. 4와 Table 1로부터 결정된다.

규칙 1) 언더컷 방지를 위해 분할선의 위치는 부품단면의 최대직경 부분에 있다.

규칙 2) 부품단면에 대하여 언더컷이 존재하면, 부품단면에 부여되는 잉여재료가 최소가 되도록 형상수정한다.

규칙 3) 부품단면에 대하여  $CS \leq LCLS$ 인 얇은 벽두께의 구멍이면, 구멍을 제거한다.

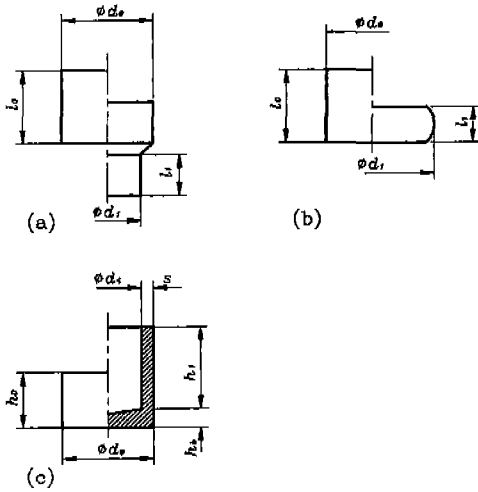


Fig. 4 Dimensions and notations of parts before and after forging process:

$$(a) SS = \ln \frac{d_o^2}{d_i^2}, \quad S L D R = \frac{L_o}{d_o}; \quad (b) \phi_u = \ln \frac{L_o}{L_i}, \quad U L L R = \frac{L_o - L_i}{L_o}, \quad U L D R = \frac{L_o}{d_o}, \quad U D D R = \frac{d_i}{d_o},$$

$$\text{and } (c) CS = \ln \frac{d_o^2}{d_i^2 - d_i^2}, \quad C L D R = \frac{h_o}{d_i}, \quad C W B R = \frac{s}{d_o}, \quad C W B R = \frac{s}{h_o}.$$

규칙 4)  $CS > 1.5$  또는  $d_i < 10$  mm인 깊고 좁은 구멍이면, 구멍을 제거한다.

규칙 5)  $CS > LCUS$ 이면, LCUS까지 구멍직경  $d_i$ 를 감소시킨다.

규칙 6) 부품단면에 예리한 모서리가 존재하면, 모서리에 적절한 필렛/코너반경을 부여한다.

규칙 7) 부품단면에 가공여유를 지정하려면, 압출로 성형되는 단면의 금속유동 방향으로 가공여유를 부여한다.

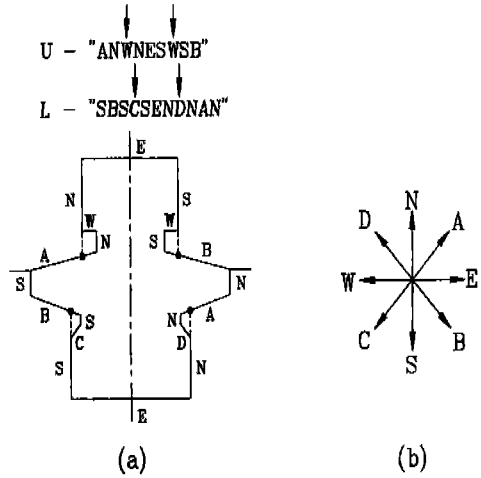


Fig. 5 Example of undercut check: (a) machined part; and (b) pattern primitives.

예를 들어 Fig. 5 (a)와 같은 단면형상의 언더컷 판정 방법은 Fig. 5 (b)처럼 8 가지의 기본형상기호(pattern primitives) <sup>(8)</sup>를 이용하여 단면의 도면요소에 방향을 나타내고, 이들을 조합한 문자열 중에서 "C", "D", "W"의 기호가 있는 부분단면을 수정함으로써 언더컷을 방지할 수 있다. 후방압출로 성형되는 캔 내부의 바닥은 원활한 재료유동과 크랙 방지를 위해 펀치 노우즈의 윤곽 형상을 이용하여 단조품으로 형상수정한다.

공정설계 모듈에서 적용된 규칙베이스는 이미 많은 문헌에 잘 알려져 있고 <sup>(2-6, 9)</sup>, 공정설계 모듈에서 출력된 공정순서들은 한 작업에 하나의 변형영역으로 이루어지기 때문에

Table 1 Forming Limits in Extrusion and Upsetting. [AISI]

Process Limits Material	Solid forward extrusion				Backward can extrusion				Solid upsetting				
	LSOS	LSTS	TRAP	LSLDR	LCUS	LCLS	LCLDR	LCWDR	LCWBR	LSULR	LULLR	LUDDR	LULDR
Steel (A)	0.357	1.194	50.0	8.0	1.065	0.174	3.0	0.04	1.0	0.80	0.70	2.5	2.25
Steel (B)	0.357	0.788	30.0	6.0	0.916	0.288	2.0	0.07	1.0	0.63	0.63	2.5	2.25
Steel (C)	0.357	0.693	25.0	4.0	0.788	0.376	1.5	0.09	1.0	0.60	0.40	2.5	2.25

Steel (A) : Good deformability  $\Rightarrow$  1006, 1008, 1010, 1015, 5115

Steel (B) : Medium deformability  $\rightarrow$  1018, 1020, 1035, 5120, 5140

Steel (C) : Difficult to form  $\Rightarrow$  1045, 1050, 1060, 2317, D2 tool, L6 tool, W1-1.0C, 302SS, 304SS, 316SS, 410SS, 431SS

변형영역 만큼의 성형공정이 출력되므로, 기계사양에 따라 공정수 감소를 위한 복합가공과 성형하중의 분배성을 검토하여야 한다. 여기서 성형순서에 따른 공정변수 즉 변형률, 펀치압력, 다이내압 및 성형하중 등의 계산은 각 작업의 기하학적 형상과 유동응력을 이용하여 상계법과 슬래브법으로 해석한다.

예를 들면 냉간포머로 성형되는 부품들은 기계의 성형단계 수가 제한되어 있으므로 출력된 공정순서들은 공정수를 줄이고 램을 중심으로 성형하중이 균일하도록 수정한다. 그리고 프레스로 성형되는 부품들은 기계의 가용하중을 고려하여 복합가공으로 공정을 배열하여 공정수를 감소시킨다. 따라서 실행된 공정순서들 중에서 최대 성형하중, 소재직경 및 기계사양에 따른 공정수의 조절 등을 비교하여 가장 적절한 공정을 결정하고, 출력모듈에서는 가공별 치수공차가 고려된 공정도를 자동 창출한다.

유한요소해석 검증모듈은 공정설계 모듈에서 창출된 공정도와 금형설계 모듈에서 설계된 금형을 강소성 FEM 프로그램인 DEFORM<sup>(10)</sup>을 이용하여 시뮬레이션함으로써 재료유동과 금형 내의 충전성, 재료내부의 유효응력, 변형률 분포 및 하중변위 선도 등을 예측한다. 본 시스템과 DEFORM과의 인터페이스는 IGES 화일을 통해서 이루어진다.

### 3. 적용 및 고찰

#### 3.1 공정조건

사용된 재질은 AISI 1010이며, 초기 소재는 전단(cropping) 후 상온에서 풀림처리와 윤활처리를 한 것으로 가정하였으며, 각 공정에 대한 공정조건은 Table 2와 같다.

Table. 2 Conditions of process design for multistage cold forging

Conditions	Processes	Values
Phosphate-soap lubricants	Slab method	$\mu=0.04$
	Upper-bound method	$m=0.08$
Die land length	Trapped extrusion die	3.00mm
	Open extrusion die	2.00mm
Clearances	Trapped extrusion	0.20mm
	Upsetting	2.00mm
Die relief angle	Extrusion die	3.00°

#### 3.2 단조품설계 모듈의 적용

단조품설계 모듈의 수행결과를 알아보기 위하여 먼저 Fig. 6 (a)의 부품단면을 선정하여 수행하였다. 첫 번째 과정은 단면의 언더컷의 발생을 예측하고 이를 수정하는 작업이다. Fig. 6 (b)는 언더컷을 방지하기 위해 형상수

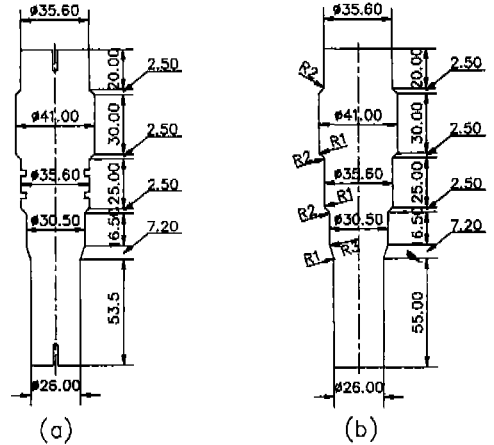


Fig. 6 An example of forging design:(a) assembly ready part;and(b) cold forgeable part.

정을 한 후의 단면형상이다. 두 번째 과정은 부품단면에 예리한 모서리가 존재하여 필렛반경과 코너반경이 부여되었고, 재료유동 방향으로 가공여유를 부여하였다. 마지막으로 부품단면의 깊고 좁은 구멍은 후방압출로 성형할 수 없으므로 구멍이 제거된 것을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 7의 캔 부품단면을 선정하여 수행하였다. 부품단면에 예리한 모서리가 존재하여 반경이 부여되었고, 후방압출로 성형되는 단면의 재료유동 방향으로 가공여유를 부여하였다. 캔 내부의 바닥은 펀치 노우즈의 윤곽 형상을 이용하여 기계가공 부품을 단조품으로 수정하였다.

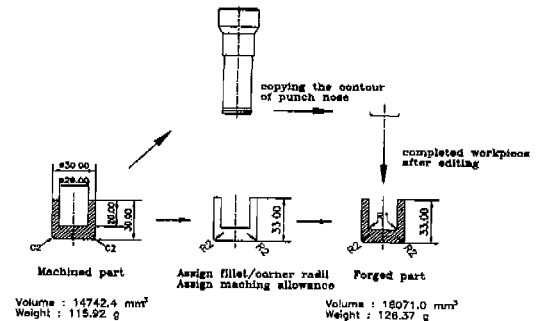


Fig. 7 An example of forging design for can part.

3.3 공정설계 모듈의 적용

단조품으로 변환된 Fig. 6 (b)의 중실부품은 소재직경 41.00과 35.60을 입력하고, 사용기계는 프레스로 선정하여 실행하였다.

입력된 소재직경 41.00에 대해 구속압출 시의 소재와 금형 사이의 간극이 고려된 소재의 최종직경은 40.60로 나타났으며, Fig. 8 (a), Table 3과 Table 4는 소재직경 40.60으로 할 때의 출력결과이다. Fig. 8 (a)는 먼저 2 회의 구속압출과 압출반각 15 로 양단 비구속압출되고, 마지막 공정에서 1회의 양단 업세팅으로 최종부품이

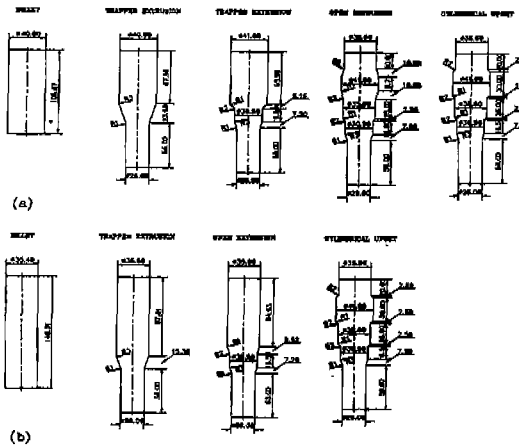


Fig. 8 Sequences generated for solid part(AISI1010):billet diameter (a)41.0mm;and(b)35.6mm

완성되는 공정순서이다. 이때의 공정변수들은 중간단계 열처리의 유무에 따라 각각 Table 3, Table 4와 같이 출력된다.

소재직경 35.60에 대해 구속압출의 간극이 고려된 소재의 최종직경은 35.40이며, Fig. 8 (b)는 소재직경을 35.40으로 할 때의 출력결과이다. 먼저 구속압출과 압출반각 15 로 비구속압출되고, 마지막 단계에서 한번에 양단 업세팅된다. 이때의 공정변수들은 중간단계 열처리의 유무에 따라, 각각 Table 5, Table 6과 같이 출력된다.

여기서 Table 3, 4, 5 및 6은 상계법 및 슬래브법 등에 의해 구해진 각 작업의 공정변수들을 나타낸다.

따라서 Fig. 8 (a)와 Fig. 8 (b) 및 Table 4와 Table 6을 비교해 볼 때 Fig. 8 (b)의 공정순서가 Fig. 8 (a)에 비해 공정수와 성형하중이 작고 중간열처리를 하지 않

Table. 3 Output of process variables using billet diameter 41.0 with annealing.

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Die pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Forming load [tons]
Cropping				54.17
Trapped extrusion	0.90	92.40	70.74	120.80
Trapped extrusion	0.59	75.49	53.83	99.67
Open extrusion	0.56	46.22	2.9	61.02
Cylindrical upsetting	0.28	137.16	93.84	181.1

Table. 4 Output of process variables using billet diameter 41.0 Without annealing.

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Die pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Forming load [tons]
Cropping				54.17
Trapped extrusion	0.90	92.40	70.74	120.80
Trapped extrusion	0.59	110.01	88.35	145.24
Open extrusion	0.56	83.04	39.72	109.68
Cylindrical upsetting	0.28	245.16	201.84	323.66

Table. 5 Output of process variables using billet diameter 35.6 With annealing.

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Die pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Forming load [tons]
Cropping				41.18
Trapped extrusion	0.63	67.92	46.26	67.61
Open extrusion	0.31	25.08	3.42	24.97
Cylindrical upsetting	0.68	133.76	68.78	176.59

아도 되므로 적절한 공정설계라고 생각된다. 구속압출 공정에서의 간극 0.20 mm 와 가공별 치수공차 0.30 mm 을 고려하여 재설계된 공정도가 Fig. 9와 같이 출력된다.

Table. 6 Output of process variables using billet diameter 35.6 Without annealing.

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Die pressure [kg/mm <sup>2</sup> ]	Forming load [tons]
Cropping				41.18
Trapped extrusion	0.63	67.92	46.26	67.61
Open extrusion	0.31	37.5	15.84	37.33
Cylindrical upsetting	0.68	218.21	153.23	288.08

Fig. 10의 공정도는 사용자가 소재직경, 최대 성형하중과 복합가공을 검토하여 공정수를 감소시켜 재설계된 출력결과이다.

출력된 공정도와 공정변수들은 시스템 내에 저장되므로 바로 금형설계에 이용할 수 있다.

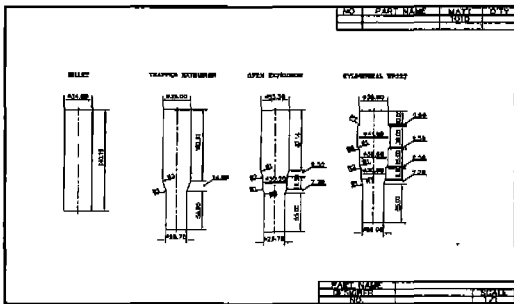


Fig. 9 Sequence drawing considering dimensional tolerance of parts : billet diameter 35.6 mm(AISI 1010).

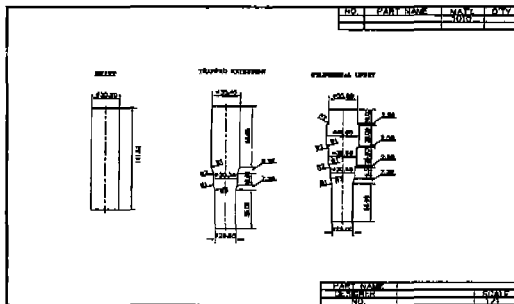


Fig. 10 Redesign sequence by reducing number of process of Fig. 9.

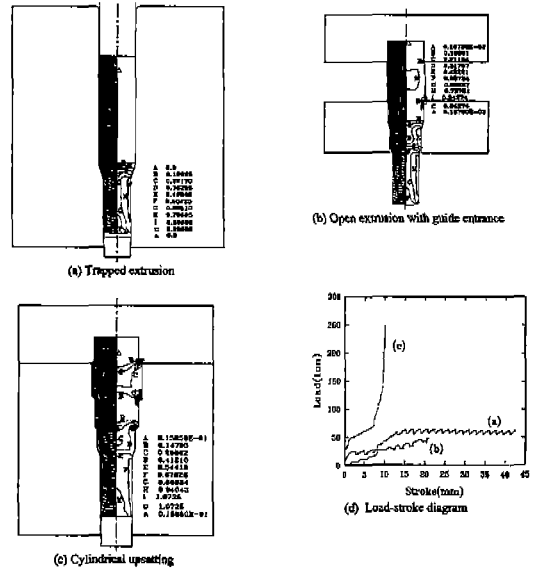


Fig. 11 FEM simulation considering dimensional tolerances of parts of Fig. 9.

### 3.4 유한요소해석 검증 모듈의 적용

먼저 Fig. 9와 같이 간극과 치수공차가 고려된 공정도는 유한요소 시뮬레이션으로 검증해 보기로 한다.

Fig. 11 (a)의 구속압출공정에서 유효변형률은 다이랜드 부근에서 0.80680 (부분)로 최대가 되었다. Fig. 11 (b)의 비구속압출 공정에서는 입구안내부가 있는 금형과 소재의 동심도를 고려한 편치를 사용하였으며, 입구안내부의 위쪽에서 유효변형률이 0.84274 (부분)로 최대이고 공구 사이의 비구속 소재부는 압출 후 약간의 배플림이 생기는데 (11), 이는 Fig. 11 (c)의 업세팅 금형에서 성형되는 부분이므로 별문제는 없었다. 여기서 업세팅공정은 머리부의 아랫부분에서 유효변형률이 1.0725 (부분)로 최대가 됨을 알 수 있다. 그리고 각 공정별 하중-변위선도는 Fig. 11 (d)와 같다.

공정설계 모듈에서 결정된 Fig. 10의 공정도는 금형설계 모듈에서 설계된 금형과 Table 2의 공정조건으로 검증하였다.

Fig. 12 (a)의 구속압출공정에서의 유효변형률은 다이랜드 부근에서 1.0975 (부분)로 최대가 되었다. Fig. 12 (b)의 업세팅공정은 Fig. 12 (a)과 같은 부분에서 유효변형률이 최대가 됨을 알 수 있다. 그리고 각 공정별 하중-변위선도는 Fig. 12 (c)와 같다.



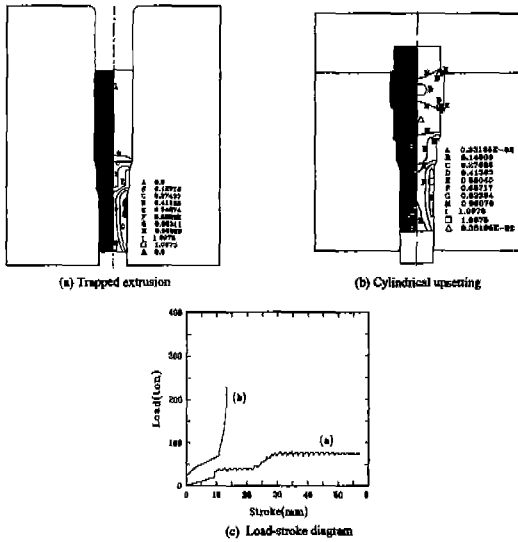


Fig. 12 FEM simulation considering dimensional tolerances of parts of Fig. 10.

따라서 Fig. 11 (c)와 Fig. 12 (b)의 마지막 압제팅 공정을 비교해 볼 때 2단 구속압출로 성형하더라도 중간 열처리 없이 공정수를 감소시킬 수 있으므로, 프레스로 성형되는 Fig. 6 (b)의 종실부품은 Fig. 10의 공정도가 최적의 공정순서라고 생각된다. 이와 같이 공정설계 모듈과 금형설계 모듈에서 자동 창출된 공정도와 금형은 유한요소해석으로 검증함으로써 소재로부터 최종부품까지 결함이 없는 공정설계와 금형설계가 가능하였다. 그리고 설계자는 부품의 가공여유와 필렛/코너반경 및 가공별 치수 공차 등이 고려된 공정도와 금형도면을 작업현장에 맞도록 쉽게 수정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 프레스나 냉간포머로 성형되는 냉간단조품에 대해 단조품설계, 공정설계와 금형설계를 자동화하는 CAD시스템을 개발하였다. 본 시스템은 산업현장에서의 적용이 용이하고 사용자와의 대화식으로 유연성을 가지고 있으며, AutoCAD 환경 하에서 구축되었다.

1. 부품단면의 형상인식은 단면의 도면요소 표현, 좌표반경 표현 및 기본형상 표현 등을 이용하여 높이, 직경 및 필렛/코너반경 등의 기하학적 특성이 고려된 설계가 가능하였다.

2. 단조품설계 모듈을 수행함으로써 기계가공 부품으로부터 언더컷의 제거, 가공여유와 필렛/코너반경의 부여, 깊고 좁은 구멍의 제거 및 켄 부품에서 얇은 벽두께와 내부 바다의 형상수정 등을 행하여 단조품으로 변환할 수 있었다.

3. 공정설계 모듈을 수행함으로써 다이내압, 펀치압력 및 성형하중 등의 공정변수를 계산하였고, 최대 성형하중, 기계사양에 따른 공정수 및 소재직경 등을 비교하여 적절한 공정순서가 결정되었고, 치수공차가 고려된 공정도가 자동 창출되었다.

4. 유한요소해석 검증 모듈을 수행함으로써 재료유동과 금형 내의 층만성, 재료내부의 유효변형을 분포 및 하중변위 선도 등을 예측하였고, 자동 창출된 공정순서와 금형을 검증하여 소재로부터 최종부품까지 결함이 없는 공정설계와 금형설계가 가능하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원하에 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, Metal Forming : Fundamentals and Applications, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983.
2. K. Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw -Hill, New York, 1985.
3. ASM Handbook Committe, Metals Handbook, Vol.4, Forming, ASM, Metals Park, Ohio, 1970.
4. K. Osakada, G.B. Yang, T. Nakamura and K. Mori, "Expert System for Cold Forging Process Based on FEM Simulation," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp.249-252, 1990.
5. N. Alberti, L. Cannizzaro and F. Micari, "Knowledge- Based Systems and F.E. Simulation in Metal -Forming Processes Design An Integrated Approach", Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp.295-298, 1991.

6. H.K. Kim and T. Altan, "Computer-Aided Part and Processing-Sequence Design in Cold Forging", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.33, pp.57-74, 1992.
7. 김용성, 서재철 譯, "AutoCAD와 DATABASE", 영진출판사, 1989.
8. T. C. Chang, "Expert Process Planning for Manufacturing", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
9. 최재찬, 김병민, 이연호, 김성원, 김호관, "다단 냉간단조품의 자동공정설계시스템", *한국정밀공학회지* 제11권 제4호, pp.77-87, 1994.
10. S. I. Oh, Private Communication, SFTC Inc., Columbus, Ohio and DEFORM Manual (Version 4.0).
11. 이호국, 김태형, 김병민, 강범수, 최재찬, "비구속 압출공정의 성형성에 관한 연구", *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp.822-825, 1993.