

다단 냉간단조품의 자동공정설계시스템과 유한요소법 Automatic Process Planning Design and Finite Element Method for The Multistage Cold Forged Parts

최재찬*, 김병민*, 이인호**, 김동진**

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구 센터, ** 부산대학교 대학원

Abstract

The automatic forming sequence design system can determine desirable operation sequences even if they have little experience in the design of cold forging process. This system is proposed, which generates forming sequence plans for the multistage cold forging of axisymmetrical solid products.

Since the process of metal forming can be considered as a transformation of geometry, treatment of the geometry of the product is a key in planning process. Forming sequence for the part can be determined by means of primitive geometries such as cylinder, cone, convex, and concave. By utilizing this geometrical characteristics(diameter, height, and radius), the product geometry is expressed by a list of the primitive geometries. Accordingly, the forming sequence design is formulated as the search problem which starts with a billet geometry and finishes with a given product one.

Using the developed system, the sequence drawing with all dimensions, which includes the proper sequence of operations for the part, is generated under the environment of AutoCAD. The preliminary choice of some feasible forming sequences can verify by using the finite element simulation.

1. 서론

냉간단조 성형은 제조분야에서 그 역할이 증대되고 있으며, 최근의 진보된 공구재료와 설계에 의해 제품의 기계적 성질을 크게 향상시킬 수 있다. 게다가 단조품의 다품종 소량생산, 생산준비 시간의 단축 및 생산비용의 절감 등에 대응하기 위하여 직각가공을 최소화시키는 정형가공법에 관한 연구가 진행중이며, 확장기술과 경회반으로 제품을 생산하던 기존의 방법이 점차 컴퓨터 지원 기술로 대체되고 있는 추세이다. [1-11]

이러한 관점에서 2가지의 해석방법이 있는데, 첫번째 방법이 전문가시스템(expert system)이고 나머지 한 방법은 소성유동 해석을 위한 수치해석(FEM)이다. 두 접근방법 중에서 전문가시스템만을 사용하는 것은 재료유동이나 응력, 소성변형률, 내부결함, 불완전한 다이 충전성 및 연성파괴 등을 예측할 수 없다. 또한 수치해석적인 방법은 소프트웨어나 하드웨어에 크게 영향을 받고 너무 비싸다. 그리고 모델링을 위한 계산시간이 많이 걸리는 것이 수치해석의 어려운 점이다. 그러나 이러한 문제점들을 해결하고 최적의 공정변수를 찾기 위하여 Osakada[1], Alberti[2] 등은 지식베이스시스템에 의해 실행된 몇가지 가능한 성형절차를 예비선택하여, 그 공정을 유한요소해석을 통하여 최적 성형조건을 결정하는 통합된 방법을 제안하였다.

본 시스템은 제품단면의 형상을 필렛/코너반경을 포함하는 기본형상(원통, 원추, 오목원추, 볼록원추)의 합성으로 표현하여 형상특징을 인식시킴으로써 기하학적 특성(직경, 높이, 반경 등)을

고려한 설계가 가능하며, 또한 형상인식된 제품단면에 대해 단조 가능한 단면으로 변환하는 모퉁이에서는 단조하기 어려운 깊은 홈이나 구멍, 언더컷 등에 대한 형상수정용 하고, 기계가공 허용여유(machining allowances) 및 필렛/코너반경 등을 지정할 수 있다.

본 연구에서는 AutoCAD환경하에서 개발된 다단 냉간단조품의 자동공정설계시스템에 의해 실행된 몇가지 성형순서중에서 가장 적절하다고 생각되는 공정도를 결정된 후, 실제작업조건에 맞는 공정을 사용하여 그 공정을 유한요소해석을 통하여 검증해 보기로 한다.

따라서 필렛/코너반경을 포함하는 단면의 기본형상에 의해서 구해진 기하학적 특성과 유한요소해석의 검증을 통하여 소재로부터 최종제품까지 결함이 없는 공정순서, 공정수, 작업방법 및 성형하중 등이 자동적으로 창출되며, AutoCAD환경하에서 구성하였기 때문에 설계자는 출력된 공정도에 작업도면에 맞도록 화면에서 공차 및 주기 등을 쉽게 기입할 수 있다.

2. 자동공정설계시스템

2.1 시스템의 설계규칙

공정설계 규칙은 "IF [조건부], THEN [결과부]"형태의 생산규칙(production rule)을 사용하여 설계규칙을 구성하였으며, 이에 대한 규칙은 이미 많은 문헌에 잘 알려져 있다. [3-11]

2.2 시스템내의 형상표현

2.2.1 형상입력 및 도면요소표현

본 연구에서 개발된 시스템은 AutoCAD환경하에서 수행되는 AutoLISP을 이용하여 구축되었다. 형상입력 방법은 AutoCAD에 의해 도면화된 파일을 화면상에 적재하거나 혹은 화면상에 사용자가 직접 도면화하여 입력할 수 있다.

입력된 제품단면의 외곽형상은 직선(line)과 원호(arc)로 구성된다. 본 시스템에서는 자동적으로 제품의 다이, 펀치 및 녹아웃에 해당하는 점을 기준으로 단면을 상부와 하부로 분리한 후, AutoCAD drawing data base[14]로부터 기기의 도면요소를 검색하여 직선에 대하여 시작점 및 끝점, 그리고 원호인 경우에는 시작점, 끝점 및 중심점 등으로 단면의 형상을 도면요소표현으로 변환할 수 있다. 단면을 도면요소표현으로 변환하면 쉽게 재적, 직경 및 높이 등을 계산할 수 있다.

2.2.2 단면의 기본형상(primitive geometry)표현

입력된 단면형상의 특징을 고려한 공정설계를 자동적으로 수행하기 위하여, 단면의 도면요소표현은 제품단면의 기하학적 특성을 고려한 기본형상표현으로 변환된다. 단면의 기본형상표현은 제품의 하부를 다시 다이부와 녹아웃부로 분리한 후 인접한 도면요소가 만나는 점을 이용하여 단조품을 원통(cylinder), 원추(cone), 오목원추(concave) 및 볼록원추(convex) 등과 같은 기본형상의 리스트로 변환시키고, 이 기본형상에는 높이, 하부 직경, 상부 직경, 필렛/코너반경 및 오목/볼록원추의 반경 등의 기하학적 특성이 주어진다. Fig.2(b)와 같은 중실 2단계품에 대해 도면요소표현을 통해 기본형상표현으로 변환하면 다음과 같다.

기본형상표현

	높이	하부 직경	상부 직경	필렛/코너 반경	오목/볼록 원추의 반경
(0.0 ("CONE"	0.0	35.6	0.0	0.0	0.0
("CYLINDER"	20.0	35.6	35.6	2.0	0.0
("CONE"	2.5	41.0	35.6	0.0	2.0
("CYLINDER"	30.0	41.0	41.0	1.0	0.0
("CONE"	2.5	35.6	41.0	2.0	1.0
("CYLINDER"	25.0	35.6	35.6	1.0	2.0
("CONE"	2.5	30.5	35.6	2.0	1.0
("CYLINDER"	16.5	30.5	30.5	3.0	2.0
("CONE"	7.2	26.0	30.5	1.0	3.0
("CYLINDER"	55.0	30.0	30.0	0.0	1.0
("CONE"	0.0	0.0	26.0	0.0	0.0

여기서 원통과 원추인 경우는 오목/볼록원추의 반경이 0.0이다.

2.3 시스템의 구성

본 연구에서 개발된 축대칭 냉간단조품에 대한 자동공정설계 시스템의 구성은 Fig. 1과 같이 크게 6개의 모듈, 즉 입력모듈, 성형성과 결합 검토모듈, 공정순서 결정모듈, 공정해석모듈, 유한요소해석 검증모듈 및 출력모듈 등으로 구성되었다.

입력모듈에서는 AutoCAD환경하에서 도면화된 최종제품을 단

조가능한 제품으로 변환하기 위한 전처리과정으로서 먼저 다이, 펀치 및 녹아웃에 해당하는 단면을 상부와 하부로 나눈 후 Fig. 2(a)처럼 단조하기 어려운 깊은 홈이나 구멍, 인디컷 등의 유무를 확인하여 시스템내에서 자동적으로 단면을 수정하고, 기계가공 허용이유(machining allowances) 및 필렛/코너반경 등을 지정한다. 소재직경, 재질 및 집측면의 미칭(u, m) 등을 입력하며, 만약 재질이 데이터베이스에 없으면 사용자가 등가된소량 및 성형한계 등을 대화식으로 입력한다.

성형성과 결합 검토모듈에서는 입력된 소재직경에 대해 재질 및 공정(비구속·구속 전방압축, 캔 후방압축, 중실·중공 업세팅 등)에 따른 성형성을 검토하고, 길이가 예상되면 소재직경을 재입력하거나 소재재질을 변경하여 결합을 피하도록 한다.

공정순서 결정모듈에서는 기본형상표현에 의한 기하학적 특성을 이용하여 입력된 소재로부터 최종제품까지 결합이 없는 공정순서, 공정수, 중간단계의 기하학적 형상 및 작업방법 등이 자동적으로 창출된다.

공정해석모듈에서는 먼저 공정순서에 의해 구해진 각 작업의 기하학적 형상 및 흐름용력 등을 이용하여 상계값 및 슬래브변 등으로 해석하여 성형순서에 따른 공정변수, 즉 변형률, 펀치압력, 다이내압 및 성형회중 등을 계산한다.

유한요소해석 검증모듈에서는 실행된 공정순서들 중에서 가장 적절하다고 생각되는 공정을 실제작업조건에 맞는 금형형상을 사용하여, 유한요소해석에 의해 재료유동, 재료내부의 유효용력·변형률 분포, 금형내 충만성, 결합 등용 예측할 수 있다.

마지막으로 출력모듈에서는 공정도, 공정변수, 유효용력·변형률 분포, 하중·변위선도 등이 출력된다. 여기서 유한요소해석의 검증용 통해 출력된 공정도는 AutoCAD환경하에서 구성하였기 때문에 설계자는 작업도면에 맞게 화면에서 공차 및 주기 등을 쉽게 수정기입할 수 있다.

3. 적용 및 고찰

본 연구에서는 개발된 자동공정설계시스템에 의해 실행된 몇 가지 성형순서중에서 가장 적절하다고 생각되는 공정도틀 결정 후, 그 공정을 실제작업조건에 맞는 금형을 사용하여 유한요소해석을 통하여 검증해 보기로 한다.

사용된 재질은 AISI 1010강으로 재료의 용력·변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 72.979 \epsilon^{0.220} \quad [\text{Kgf/mm}^2]$$

먼저 자동공정설계시스템을 적용해 보면, Fig. 2(a)의 기계가공품을 단조품으로 변환된 Fig. 2(b)의 중실제품에 대해서 소재직경 $\phi 35.6$ 과 $\phi 41.0$ 을 사용하여 실행한 결과는 다음과 같다. 소재준비작업은 전단(cropping)후 상온에서 풀림치리와 인산염 피막 용

할 처리를 하였다.

Fig. 3, Table 1과 Table 2는 Fig. 2(b)의 중실제품에 대한 공정도 및 출력결과이다. Fig. 3는 소재직경을 $\phi 35.6$ 으로 할 때, 공정순서는 먼저 구속압출과 압출반가 15°로 비구속압출되고, 마지막 단계에서 한번에 일단 압세팅된다. 이때의 공정변수들은 중간단계의 풀림치리 유무에 따라, 각각 Table 1, Table 2와 같이 출력된다.

Fig. 4, Table 3과 Table 4는 소재직경을 $\phi 41.0$ 로 할 때의 출력결과로서, Fig. 4는 먼저 2회의 구속압출과 압출반가 15°로 일단 비구속압출되고, 마지막에 1회의 양단 압세팅으로 최종제품이 완성되는 공정도이다. 이때의 공정변수들은 중간단계의 풀림치리 유무에 따라 각각 Table 3, Table 4와 같이 출력된다.

일반적으로 플랜지가 있는 제품에서 머리부의 강도를 높이려면, Fig. 3과 같이 소재직경 $\phi 35.6$ 으로 머리부의 변형률을 크게 함으로써 요구하는 기계적 성질을 갖게 할 수 있다. 여기서 소재직경 $\phi 41.0$ 로 한 경우는 한 부분이 계속해서 변형을 받으므로 과도한 성형하중이 작용하여 결함이 생길 수 있다. 다만 포머로 성형되는 다만 냉간단조품들은 통상 각 공정에서의 일치리를 하지 않는 경우가 많으므로, Fig. 3과 Fig. 4 및 Table 3과 Table 4를 비교해 볼 때 소재직경 $\phi 35.6$ 이 소재직경 $\phi 41.0$ 에 비해 성형하중 및 공정수가 작으므로 적절한 공정설계라고 생각된다.

여기서 Table 1, 2, 3 및 4는 인산염 피막 윤활상태에서 슬래브법을 적용할 때에는 마찰계수(μ)를 0.05로 하고, 상계법을 적용할 때에는 마찰상수(m)를 0.08, 다이랜드의 길이를 3mm로 할 때, 중간단계의 풀림치리 유무에 따라 각 작업에 대한 공정변수들, 즉 변형률, 펀치압력, 다이내압 및 성형하중 등을 나타낸다.

마지막으로 자동공정설계시스템에 의해 결정된 소재직경 $\phi 35.6$ 의 공정도를 실제작업조건에 맞는 금형을 사용하여 유한요소해석으로 검증해 보기로 한다.

Fig. 5는 중간일치리를 하지 않은 경우로 Fig. 5(a)의 구속압출 공정에서 압출된 끝부분이 볼록원추형상(직경차 +0.14, 높이차 +2.41)으로 성형되며, 압출된 부분의 중간높이에서 유효변형률은 0.90(F부분)로 최대가 되었다. Fig. 5(b)의 비구속압출공정에서 공구사이의 비구속부분의 소재는 압출후 약간의 배불림(최대직경차 +0.38)이 생기는 데, 이는 마지막의 압세팅공정에서 성형되는 부분이므로 별문제는 없다. Fig. 5(c)의 압세팅공정에서는 상부펀치와 하부금형의 틈새(clearance)를 2mm로 하여 시뮬레이션 하였으며, 머리부의 아랫부분(F부분)에서 유효변형률은 2.0으로 최대가 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 중간일치리를 수행한 경우로 Fig. 6(a)의 비구속압출 공정에서 다이랜드부의 유효변형률은 0.40(E부분)으로 Fig. 5(a)의 C부분(0.45)에 비해 작아진 것을 알 수 있다. 공구사이의 비구속

부분의 소재는 압출후 약간의 배불림(최대직경차 +0.38)이 생기는 데, 이는 마지막의 압세팅공정에서 성형되는 부분이다. Fig. 6(b)의 압세팅공정에서는 머리부의 아랫부분(F부분)에서 최대유효변형률 1.0으로 Fig. 5(c)의 F부분(2.0)에 비해 크게 작아진 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5과 Fig. 6에 대한 하중선도는 각각 Fig. 7(a), Fig. 7(b)와 같다.

이와 같이 여러 경우를 다양하게 검토하여 설계지는 최종제품의 기계적 성질, 성형기계의 능력 및 제조성비 등을 고려하여 비용을 최소화 하는 공정설계를 할 수 있다. AutoCAD에 의해 출력된 공정도는 효율적인 도면 관리를 위해 공차, 기호 등을 기입함으로써 현장에 바로 사용할 수 있는 설계 도면으로 사용할 수 있다. 따라서 공정도 및 공정변수들은 바로 시스템내에 저장되므로 금형설계 및 펀치설계에 이용할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 프레스나 다만 포머로 성형되는 축대칭 다만 냉간단조품에 대한 자동공정설계시스템을 개발하여 유한요소해석의 검증과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 시스템은 AutoCAD 환경하에서 도면화된 제품단면의 도면요소표현으로부터 변환된 기본형상을 이용하여 형상특징을 인식시킴으로써 기하학적 특성이 고려된 설계가 가능하였다.
- (2) 필렛/코너반경을 포함하는 단면의 기본형상에 의해서 구해진 기하학적 특성과 유한요소해석을 통하여 소재로부터 최종제품까지 결함이 없는 공정순서, 공정수, 중간단계의 기하학적 형상 및 작업 방법 등이 공정도로 자동 창출된다.
- (3) 결정된 성형순서에 따른 공정변수들(변형률, 펀치압력, 다이내압 및 성형하중)과 출력된 공정도는 바로 시스템내에 저장되므로, 금형설계 및 펀치설계에 이용할 수 있다.
- (4) 유한요소해석의 검증은 통해 성형하중, 유효변형률 분포, 금형내 충만 여부, 결함여부 등을 예측할 수 있어, 설계자는 최종제품의 기계적 성질, 성형기계의 능력 및 제조성비 등을 고려하여 비용을 최소화 하는 공정설계를 할 수 있다.

5. 참고 문헌

1. 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.
2. N.Alberti, L.Cannizzaro and F.Micari, "Knowledge-Based Systems and F.E.Simulation in Metal-Forming Processes Design," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp 295 - 298, 1991.
3. K.Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill, New York, 1985.
4. A.A.Badawy, D.J.Kuhlmann, P.S.Raghupathi and T.Altan,

"Computer-Aided Design of Multistage Forging Operations for Round Parts", J. Mech. Work. Technology, 11, pp 259-274, 1985.

5. K.Sevenler, P.S.Raghupathi and T.Altan, "Forming-Sequence Design for Multistage Cold Forging", J. Mech. Work. Technology, 14-2, pp 121-136, 1987.

6. 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.

7. K.Osakada, T.Kado and G.B.Yang, "Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forging", Ann. CIRP, Vol.37-1, pp 239-242, 1988.

8. K.Nakanishi, O.Takata, T.Yamazaki, A.Danno, T.Shirai, T.Imai and Y.Murc, "Knowledge Based System for Forming-Sequence Design of Multistage Cold Forging", J.of the JSTP, vol.43 No.387, pp 416-421, 1993.

9. 최재찬, 김병민, 진인태, 김형십, "퍼스널 컴퓨터에 의한 냉간 단조공정 및 금형설계의 자동화에 관한 연구(I)", 대한기계학회 논문집, 제12권 제4호, pp 712-720, 1988.

10. 최재찬, 김병민, 김형십, 허민조, "PC에 의한 냉간단조공정 및 금형설계의 진산화에 관한 연구(II)", 대한기계학회 논문집, 제13권 제1호, pp 190-198, 1989.

11. 최재찬, 김병민, 이연호, 김성원, 김호관, "다단 냉간단조품의 자동공정설계시스템", 한국정밀공학회지, 제11권 제4호, pp 77-87, 1994.

12. O.C.Zienkiewicz, "The Finite Element Method," McGraw-Hill, New York, 3rd ed.1977.

13. S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Allan, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press, 1989.

14. 김용성, 서재철 譯, AutoCAD와 DATABASE, 영진출판사, 1989.

Table 1. Output of process variables using billet diameter 35.6 with annealing.

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm ²]	Die pressure [kg/mm ²]	Forming load [tons]
Cropping				41.65
Trapped extrusion	0.63	67.92	46.26	67.61
Open extrusion	0.31	25.08	3.42	24.97
Cylinder upset	0.68	133.76	68.78	176.59

Table 2. Output of process variables using billet diameter 41.0 without annealing.

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm ²]	Die pressure [kg/mm ²]	Forming load [tons]
Cropping				41.65
Trapped extrusion	0.63	67.92	46.26	67.61
Open extrusion	0.31	37.5	15.84	37.33
Cylinder upset	0.68	218.21	153.23	288.08

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

Variables Process	Strain	Punch pressure [kg/mm ²]	Die pressure [kg/mm ²]	Forming load [tons]
Cropping				55.24
Trapped extrusion	0.91	93.24	71.58	123.10
Trapped extrusion	0.59	75.49	53.83	99.67
Open extrusion	0.56	46.22	2.9	61.02
Cylinder upset	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 ²]	Die pressure [kg/mm ²]	Forming load [tons]
Cropping				55.24
Trapped extrusion	0.91	93.24	71.58	123.10
Trapped extrusion	0.59	110.23	88.57	145.53
Open extrusion	0.56	83.04	39.72	109.68
Cylinder upset	0.28	245.16	201.84	323.66

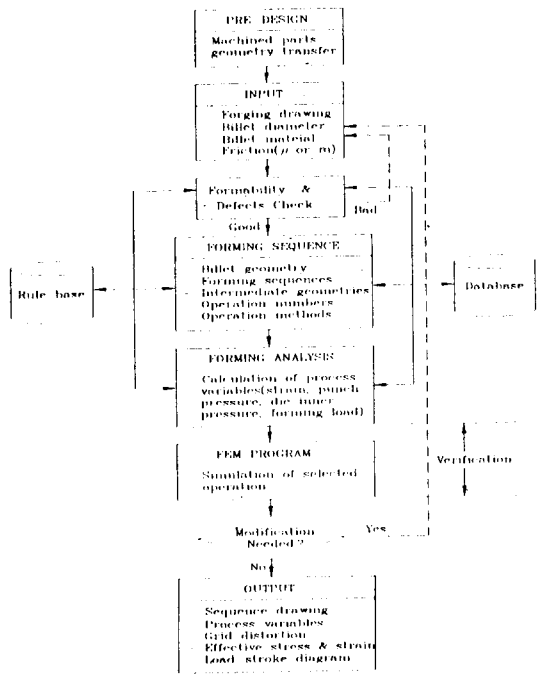


Fig. 1 Structure of an automated process planning design system.

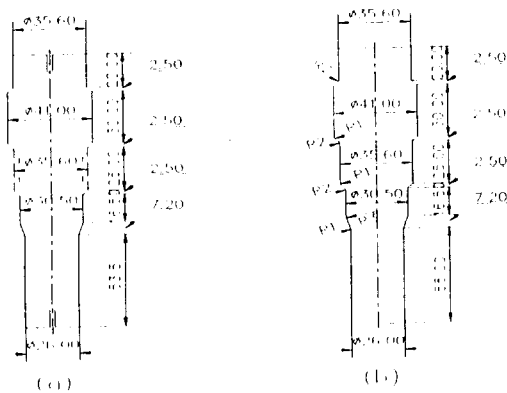


Fig. 2 An example of forging design : (a) assembly ready part; and (b) cold forgeable part.

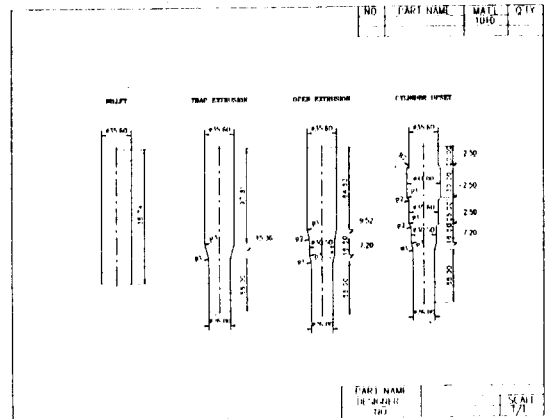


Fig. 3 Sequence drawing using billet diameter 35.6 (AISI 1010).

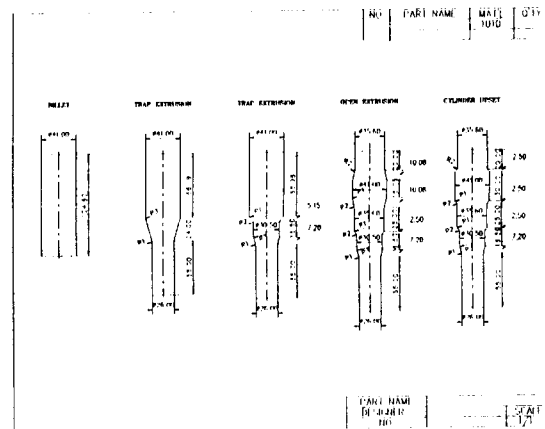
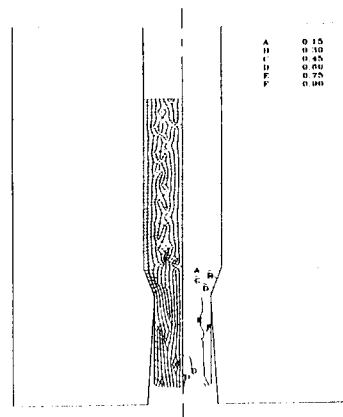
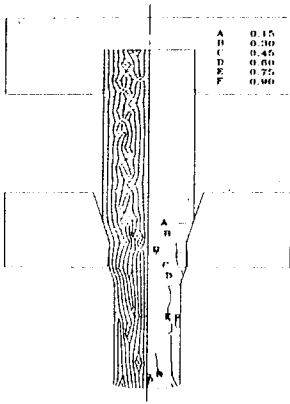


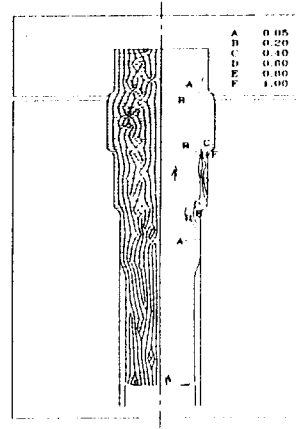
Fig. 4 Sequence drawing using billet diameter 41.0 (AISI 1010).



(a) trapped extrusion

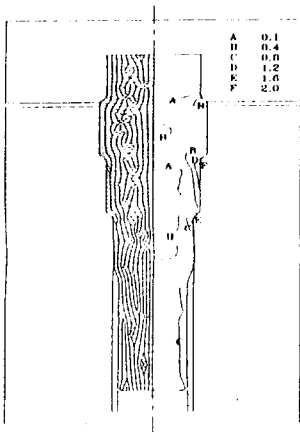


(b) open extrusion



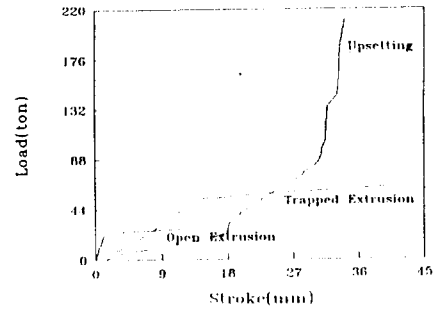
(b) cylindrical upsetting

Fig. 6 Simulation of forming sequences using billet diameter 35.6 with annealing. (left : mesh distortion; right : effective strain)

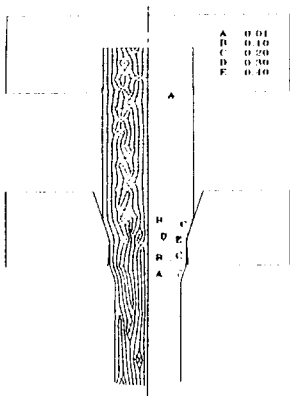


(c) cylindrical upsetting

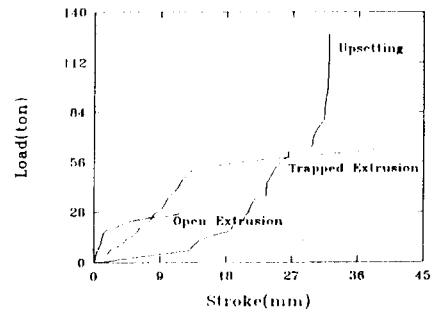
Fig. 5 Simulation of forming sequences using billet diameter 35.6 without annealing. (left : mesh distortion; right : effective strain)



(a) without annealing



(a) open extrusion



(b) with annealing

Fig. 7 Comparison of forming load for forming sequences using billet diameter 35.6 .