

전자 박판 부품의 가공성 평가에 대한 연구
(Estimation of Formability for Sheet Metal Forming of Electronic Parts)

이 병찬***, 강연식**, 양동열*, 문재호***

* 한국과학기술원 기계공학과 (정회원)

** 한국과학기술원 기계공학과 (학생회원)

*** 삼성전자 생산기술센타

ABSTRACT

For the improvement of productivity, the reduction of cost and time for manufacturing is mandatory, especially in the field of electronic industry. The study is concerned with a practical means of systematic assistance to formability estimation and selection of reliable design specification for electronic sheet metal parts. The objective of this research work is to develop a simulation system which helps to analyze the target processes with the finite element method and to acquire available design data quickly and exactly. The simulation system developed in the study consists of design verification, selection of optimal combination of parameters, knowledge acquisition and graphical user interface(GUI). Design verification is automatically carried out by using the finite element method. A data base management system and nomograms are utilized for knowledge acquisition. The developed system has been applied to some major sheet metal forming operations such as flanging, embossing, bending and blanking. According to the simulated results, the validation of the target processes has been confirmed. Analysis data, estimation rules of formability and graphical representation of the analysis have been employed for the designer's understanding and evaluation, thus providing a practical means of robust design and evaluation of formability for producing electronic sheet metal parts.

Key Words : Formability Estimation (성형성평가), Finite Element Method (유한요소해석), Graphical user interface (그래픽 사용자 인터페이스), Data Base Management System (데이터베이스 관리 시스템), Nomogram (노모그램)

1. 서 론

가전제품에 사용되는 박판부품의 설계단계에서 수 많은 설계변수가 실제의 성형 가능성에 맞게 설계되어 있는지를 정확히 그리고 신속하게 판단할 필요가 있으며 이는 생산성에 큰 영향을 미친다. 이를 위해 설정된 설계변수에 대한 최종 성형결과를 해석하고 성형 가능성을 예측하며 공정상 필요한 정보의 획득을 쉽게 함으로써 생산성을 향상시킬 수 있는 시스템의 개발이 요구되어 왔다^[1,2].

본 연구는 Fig.1에서 보는 바와 같이 금형을 제작하기 이전에 금형의 설계를 임의 변경하여 시뮬레이션을 해본 후에 원하는 제품의 성형이 가능한지를 판단한 후 실제로 금형을 제작하므로써 금형의 설계 및 가공의 시행착오를 최대한 줄이도록 하는 데 목적이 있다.

이를 위해 본 연구에서는 효율적인 제품 설계와 설계의 검증을 위해 유한요소해석 모듈을 기반으로 한 설계 해석 기능을 구현하였다. 또한, 사용자 편의도 향상을 목적으로 OSF/MOTIF, X Window System, UIL (User Interface Language) 등을 이용하여 사용자 인터페이스용 그래픽 모듈을 개발하였다. 이러한 해석과정과 그래픽과정을 체계적이고 조직적으로 수행하기 위해 Fig.2에서 보는 바와 같이 전체 설계과정을 계층 구조화하였다. 그리고 문현상의 설계자료 및 유한요소해석 결과를 데이터베이스화하여 통합적으로 관리하는 계층적 DBMS (hierarchical DataBase Management System) 모듈을 개발하여 해석 모듈과의 인터페이스를 구현하였다.

2. 가공성 평가 시스템

가공성 평가 시스템은 Fig.3에서 보는 바와 같이 크게 사용자 인터페이스를 위한 응용 프로그램, 그래픽을 위한 응용 프로그램, 유한요소해석을 위한 응용 프로그램, 데이터베이스 관리를 위한 데이터베이스 관리 시스템, 그리고 통합된 데이터베이스 화일로 구성된다.

2.1 유한요소해석 (Finite Element Method)

축대칭 그리고 평면 변형률 강소성 유한요소법을 이용하여 주어진 공정을 해석하기 위한 모듈로써 유한요소해석 프로그램과 각 공정별 격자 생성 프로그램으로 구성된다.

2.2 노모그램 (Nomogram)

노모그램이란 설계변수간의 관계를 함수적으로 그리고 전방 추론 방식으로 표현한 방법으로 많은 핸드북에 데이터베이스화의 주요 방법으로 이용되어 왔다^[3,4]. 본 가공성 평가에서는 데이터베이스 관리 시스템의 공정별 검색 요소들을 이용하여 데이터베이스를 검색함으로써 설계변수간의 관계를 추론할 수 있도록 하였다. 즉, 유한요소해석을 수행하지 않고도 저장된 데이터화일로부터 직접 필요 한 데이터를 획득할 수 있는 방법을 제공한다. 설계변수간의 관계의 추론은 데이터베이스에 저장된 형상 데이터와 유한요소해석 결과 데이터 그리고 각 공정별로 확립된 규칙인 생산구칙(Production Rules)을 이용한다.

2.3 그래픽 시스템

그래픽 모듈을 위한 응용 프로그램은 UNIX 환경하에서의 ANSI C와 X 원도우 시스템, OSF/MOTIF, UIL (User Interface Language)를 이용하여 사용자가 시스템을 쉽게 사용할 수 있도록 하였다^[9]. 또한 명령어를 외부적으로 제어하여 의도하는 작업을 별도의 프로그램에 의해 자동적으로 실행하는 방식인 개방형 프로그래밍 기법(open programming architecture)을 이용하였으며 아울러 해석용 FORTRAN 프로그램과의 인터페이스를 유지하도록 개발하였다.

2.4 데이터베이스 관리 시스템

데이터베이스 관리 시스템 (DataBase Management System)은 데이터베이스를 정의하고 조직화시키고 레코드의 저장, 검색, 삭제 등을 관리하는 통합 시스템이다^[10]. 데이터 저장 방식은 Fig.4에서 보는 바와 같이 레코드 (Record)라는 단위로 저장되는데 파일 머리부에 파일의 전반적인 정보를 저장하고 그 후미부터 새로운 데이터를 레코드 단위로 저장한다. 파일의 머리부에 저장될 수 있는 정보에는 파일의 제반 정보, 대상공정, 사용 재료, 저장된 레코드의 갯수 등이 있으며 레코드의 길이는 각 공정별로 외부변수로 선언되어 데이터화일내에서 일정한 크기를 갖도록 한다.

3. 공정별 설계 및 가공성 평가 시스템의 적용

전자 박판부품의 성형에 사용되는 공정중 비교적 간단한 공정인 벤딩, 플랜징, 엠보싱, 블랭킹을 선택하여 가공성 평가를 수행하였다. 블랭킹은 테이블에 많은 설계자료가 주어져 있으므로 노모그램만을 이용한 해석을 수행하고 나머지 공정은 유한요소해석과 노모그램해석을 병행해서 수행한다. 유한요소해석 방법으로 플랜징, 엠보싱은 축대칭 해석을 수행하고 벤딩은 평면 변형률해석을 수행한다. 재료물성치와 형상 데이터, 그리고 각 공정별 성형성 평가 규칙은 문현과 논문에서 채록하여 데이터베이스화하였다.

3.1 플랜징 (Flanging)

플랜징 공정은 박판의 옆지부분 또는 구멍을 직선 또는 곡선으로 구부리는 공정으로 벤딩과는 달리 구부리는 부분이 전체에 비해 현저히 작은 특징이 있다. 사용 분야로서는 외관수리, 강성향상, 옆지 강화, 예리한 절단 부위의 제거 그리고 요소면간의 정확한 체결을 위한 체결 요소등이 있다^[8, 9]. 플랜징의 성형성 평가를 위한 경험식은 다음과 같다.

(1) 옆지 스플리팅 (edge splitting) - 국부 네킹 또는 균열 개시^[9, 10]

$$e_x = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (1)$$

여기서 e_x : 플랜지 옆지에서의 원주 변형률
 R_1 : 성형전 플랜지 구멍 반경
 R_2 : 성형후 플랜지 구멍 반경

이다.

(2) 최대 플랜지 폭^[9, 10]

$$W = e_x R_1 \quad (2)$$

(3) 최소 플랜지 폭 - 홀 진직도 보장^[11, 12]

$$F_g \geq R_d + 2t \quad (3)$$

여기서 F_g : 플랜지 폭
 R_d : 다이 어깨 반경 (die shoulder radius)
 t : 재료 두께

이다.

성형 가능 판정을 위한 규칙은 다음과 같이 설정하였고 [3, 10, 12] Fig.5에 개략적인 순서도를 나타내었다.

- i) IF ($\epsilon_L > \epsilon_m$ and $F_L > F_g$ and $F_g > F_{Lmin}$) THEN
성형한계 만족 ---> 성공적인 성형이 가능
- ii) ELSE
성형한계 만족 안함 ---> 성형 실패 가능성 : 파단, 찢어짐, 균열 등.

여기서 ϵ_L : 실험식의 플랜지 옆지의 최대 원주변형률
 ϵ_m : 유한요소해석의 플랜지 옆지의 최대 원주변형률
 F_L : 실험식으로 구한 최대 플랜지 폭
 F_g : 성형 후 플랜지 폭
 F_{Lmin} : 재료의 최소 플랜지 폭

이다.

예제로써 스트레치 홀 플랜징을 해석하였다. 소재의 재질은 AL2024로 설정하였고 일반적인 환경에서의 해석을 고려하기 위해 마찰계수는 0.3으로 가정하였다. 기하학적 형상과 해석에 사용된 데이터는 Fig.6과 같으며 이때의 유효응력과 유효변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 387.0 (\bar{\epsilon})^{0.154} \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

유한요소해석을 행한 결과는 성형성 평가 규칙을 만족하여 (Fig.7) 파단이나 균열, 스플리팅의 바람직하지 않은 결과를 나타내지 않으며 따라서 실제 공정에서도 성공적인 성형이 가능하리라고 보여진다.

Fig.8에 나타낸 것처럼 데이터베이스 관리 시스템을 이용한 노모그램 해석을 수행하였다. 위에서 행한 유한요소해석의 기하학적 형상 데이터와 결과 데이터를 데이터베이스에 저장한 후 동일한 형상 데이터를 이용하여 저장된 유한요소해석 결과 데이터를 획득함으로써 노모그램모듈의 타당성을 입증하였다.

3.2 엠보싱 (Embossing)

엠보싱은 박판 성형 공정에서 주로 비드, 오프셋, 그리고 데코레이션을 만드는 데 많이 사용한다. 비드공정은 박판 부품의 평평한 부위의 강성을 증가시키기 위한 목적으로 행해지며 브이 비드 (V-Bead), 플랫 브이 비드 (Flat V-Bead), 반구형 비드등의 세부공정이 있다. 여기서는 반구형 비드에 관한 해석에 주안점을 두었다.

반구형 비드의 성형성 평가를 위한 규칙은 문현을 통해 획득하였는데 세부공정별 규칙은 다음과 같다^[13].

$$\text{기하학적 부등식} \quad A_0 - 2R_d > 2(R_p + T) \quad (5)$$

$$\text{최대 엠보싱 깊이} \quad T_{max} = cnA_0 \quad (6)$$

여기서 A_0 : 다이 폭

R_p : 편치 반경

R_d : 다이 엔트ランス 반경 (die entrance radius)

T : 재료 두께

n : 가공 경화 지수

c : 1.5 for steel

1.1 for aluminum

이다.

예제로써 세탁기 드럼 측면 비드중 하나인 반구형 비드를 해석하였다. 소재의 재질은 SUS304로 설정하고 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 기하학적 형상과 해석에 사용된 데이터는 Fig.9와 같으며 이때의 유효응력과 유효변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 1451.9 (\bar{\epsilon})^{0.6} \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

Fig.10과 같이 유한요소해석을 행한 결과 반구형 비드의 기하학적 구속조건과 최대 엠보싱 높이의 성형성 평가 규칙을 만족함을 알 수 있으며 따라서 실제공정에서의 성형성에 문제가 없으리라고 예상된다.

3.3 벤딩 (Bending)

벤딩 공정은 평평한 사이트나 스트립 금속등의 재료를, 그 중립 평면에 있는 직선축 둘레에, 또는 그 사이트나 스트립의 세로 방향에 직각으로, 균일하게 변형시키는 것이다. 금속 유동은 그 금속의 소성역안에 있으므로, 굽힘은 적용 응력을 제거한 후에도 영구 변형을 지속한다^[3,13].

간단한 벤딩 공정으로 와이핑(wiping) 벤딩, V-벤딩 그리고 U-벤딩등이 있지만 본 연구에서는 전자 박판 부품성형에 많이 이용되는 와이핑 벤딩에 대한 해석을 주로 수행하였고 벤딩 공정에서 두렷이 나타나는 스프링백에 대한 해석도 아울러 수행하였다.

성형성 평가 규칙은 다음과 같다^[11, 12].

(1) 최소 곡률 반지름

최소 곡률 반지름은 압연 방향에 직각으로 굽힐 때의 바깥면에 균열등이 발생하지 않을 때의 최소 반지름으로 정의하였고 고유물성치로 데이터베이스화하였다.

(2) 최소 굽힘 플랜지 높이

$$H_f \geq R_d + 2t \quad (8)$$

여기서 H_f : 굽힘 플랜지 높이

t : 재료 두께

R_d : 다이 어깨 반경 (die shoulder radius)

이다.

해석 예제로써 S08C를 적용하였고 마찰계수는 0.1로 가정하였다. 유효응력과 유효변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 657.3 (\bar{\epsilon})^{0.24} \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Fig.11에 벤딩공정의 성형성 평가 해석 결과를 나타내었다. 최소 곡률 반경과 최소 굽힘 플랜지 높이의 성형성 평가 규칙을 만족하여 스프링백 각은 5.39도의 값이 얻어졌다.

3.4 블랭킹 (Blanking)

블랭킹 공정은 한번의 프레스 행정으로 완전한 그리고 폐다각형의 외곽선을 가진 부품을 생산하는 절단공정이다. 야간의 재료 손실(Strip)이 존재하므로 비효율적인 공정으로 분류되지만 블랭크 형상의 제품을 대량생산할 경우 가장 빠르고 경제적인 방법으로 여겨진다^[11]. 따라서 설계과정에서 재료 손실을 최소화하는 문제가 중요시되고 있다. 블랭킹의 노모그램 해석에 필요한 실험식은 다음과 같고 해석 과정은 Fig.12의 순서도와 같다.

(1) 블랭킹에 필요한 힘

$$F = AS \quad (10)$$

$$= LtS \quad \text{for any shape} \quad (11)$$

$$= \pi DtS \quad \text{for round holes} \quad (12)$$

여기서

F : 블랭킹 힘 (KN)

A : 전단 면적 (mm^2)

S : 전단응력 (MPa)

L : 절단 길이 (mm)

D : 블랭킹 반경 (mm)

t : 두께 (mm)

이다.

(2) 다이에 전단부 (Shear) 가 있을 경우 블랭킹에 필요한 힘

$$P = \frac{t \times p}{s} \times P_{\max} \quad (13)$$

여기서

P : 전단부가 존재할 경우의 블랭킹 힘

t : 두께

p : 침투량 비 (%penetration)

s : 편치나 다이에 주어진 텔리이프 양 (mm)

P_{\max} : 전단부가 없을 경우의 블랭킹 힘

이다.

(3) 에너지

$$W = t \times p \times F \times 1.16 \quad (14)$$

여기서

W : 에너지 양

F : 블랭킹 힘

1.16 : 프레스의 마찰 보정 상수

이다.

(4) 스트리퍼 판 (Stripper Plates) 의 두께와 필요한 힘

$$T = \frac{W}{30} + 2t \quad (15)$$

$$F = 0.024 \times L \times t \quad (16)$$

여기서

T : 스트리퍼 판의 최소 두께

W : 스탍 (stock) 의 폭

F : 스트리핑에 필요한 힘

L : 절단 옆지의 길이

0.024 : 경험적 상수

이다.

예제로써 S10C의 재료에 대한 노모그램 해석을 하였다. 소재의 물리적 특성치와 기하학적 형상에 대한 간단한 정보를 가지고 설계와 실제 공정에 필요한 데이터를 획득하였다. 즉, Fig.13에서 보는 바와 같이 전단부가 있을 때와 없을 때의 블랭킹 힘과 필요한 에너지 그리고 스트리퍼판의 최소 두께와 스트리핑에 필요한 힘등의 정보 획득이 가능하며 공정의 성패에 크게 영향을 미치는 틈새를 소재 두께와의 비로써 설계자에게 제시한다. 여기서는 0.025 x 0.381 = 0.009525 mm의 틈새를 설계자에게 제시한다. 노모그램 해석의 타당성을 증명하기 위하여 참고문헌^[16]과 비교한 결과를 Table 1에 제시하였다. 문현상의 데이터와 노모그램 해석상의 데이터가 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구의 블랭킹 노모그램 모듈은 설계단계에서 효과적으로 사용될 수 있는 타당성을 가진다.

4. 결 론

유한요소해석, 노모그램, 그래픽 시스템 그리고 데이터베이스 관리 시스템을 이용하여 전자 박판 부품의 가공성 평가 시스템을 개발하였으며 이를 블랭킹, 엠보싱, 벤딩 그리고 블랭킹 공정에 적용하였다. 해당 공정별 해석을 통해 본 가공성 평가 시스템의 타당성을 검증하였고 따라서 설계의 효율성과 생산성 향상에 기여하리라 사료된다. 본 논문에서 얻은 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 전자 박판 부품의 블랭킹, 엠보싱, 벤딩 공정의 유한요소해석을 수행하였고 노모그램 모듈과의 연계를 도모하여 성형 관련 정보의 획득을 일체화하였다.

(2) 블랭킹의 노모그램 개발과 설계 데이터의 획득을 구현하였다.

(3) 사용자 편의도 향상을 위한 그래픽 사용자 인터페이스 (GUI) 시스템을 개발하였다.

(4) 효과적인 유한요소해석과 노모그램해석을 위한 데이터베이스 관리 시스템(DBMS)를 개발하여 평가 대상 공정에 적용하였다.

비교적 간단한 공정에 적용한 가공성 평가 시스템의 성공 여부는 보다 다양하고 복잡한 공정에의 적용 가능성과 다른 설계 해석 시스템과의 효과적인 연계에 달려있다. 정밀 단조 부품, 단단게 디프드로잉, 스템핑 가공, 3차원 성형들을 대상 공정으로 확장하고 뒤틀림, 스프링백등의 예측을 보다 정확히 해야만 설계 평가 시스템으로서의 존재 가치를 가질 것이다.

후기

본 연구를 위해 지원을 아끼지 않아주신 삼성전자 생산기술센타 요소기술연구소 초정밀기술팀 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J. H. Tah and A. D. F. Price, "Interactive Computer-Aided Formwork Design", Computers & Structures, Vol. 41, No. 6, pp. 1157-1167, 1991.
2. 최형우, 이승구, "효율적 제품 개발을 위한 설계 자동화 기법", 대한 기계학회지, 제34권, 제7호, pp. 527-538, 1994.
3. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill, New York, 1985.
4. D. F. Eary and E. A. Reed, "Techniques of Pressworking Sheet Metal - An Engineering Approach to Die Design", Prentice-Hall, New Jersey, 1974.
5. M. J. Sebern, "Building OSF/Motif Applications : A Practical Introduction", Prentice-Hall, New Jersey, 1994.
6. A. Stevens, "C Database Development", 성안당 역, 1994.
7. W. Shoumei, "A Conception of Module Library and Data Base Management System for Finite Element Analysis", Computers & Structures, Vol. 32, No. 5, pp. 1073-1083, 1989.
8. 양동열, 박승교, "플랜징 공정의 성형 한계에 대한 이론 및 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제9권, 제6호, pp. 777-787, 1985.
9. S. C. Tang, "Large Elasto-Plastic Strain Analysis of Flanged Hole Forming", Computers & Structures, Vol.13, pp.363-370, 1981.
10. ASM Handbook Committee, "Metals Handbook : Forging and Casting", ASM, Vol.5, Metals Park, Ohio, 1970.
11. 이승화, 한윤희, 김세환, "프레스 금형설계 자료집", 대광서립, 1989.
12. 일본형기술힙회, "형기술편람", 침단 역, 1989.
13. H. Sunaga and A. Makinouchi, "Elastic-Plastic Finite Element Simulation of Sheet Metal Bending Process for Auto Body Panels", Advd. Tech. Plasticity, Vol. 3, pp. 1525-1530, 1990.
14. D. B. Dalla, "Pressworking Aids for Designers and Dicmakers", SME, 1978.

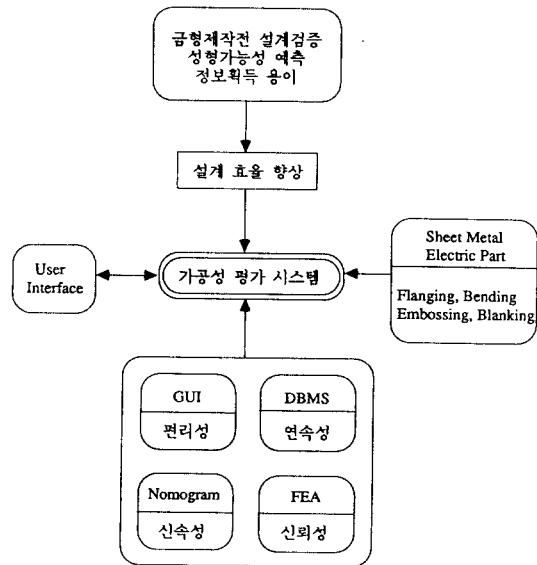


Fig.1 Objective of Estimation of Formability for Sheet Metal Forming of Electric Parts

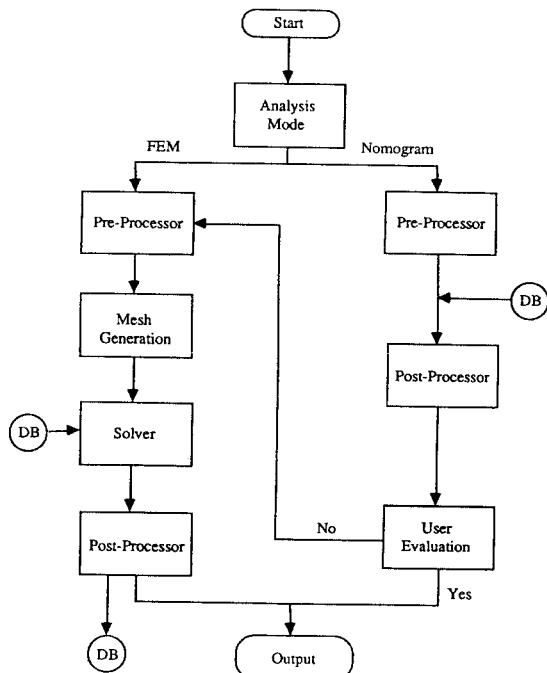


Fig.2 System Hierarchical Structure

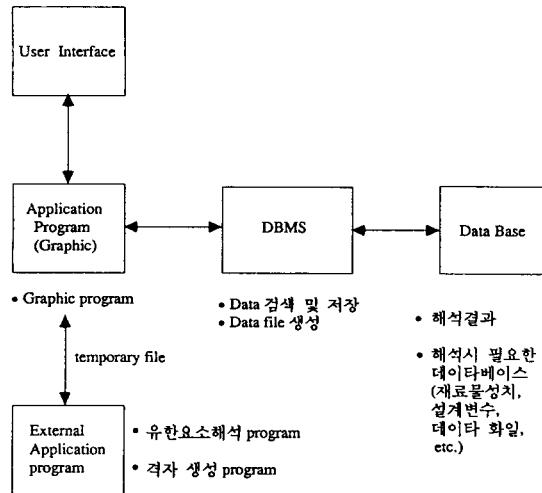
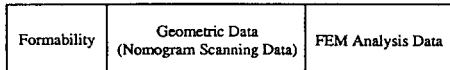


Fig.3 Schematic Arrangement of System



- Formability --- True
False
- Geometric Data --- Material Thickness
Friction Coefficient
Punch Radius
Punch Angle
Hole Radius
Clearance
Die Shoulder Radius
Punch Shoulder Radius
- FEM Analysis Data --- Max. Punch Load
Max. Effective Strain
Max. Thickness Strain
Max. Circumferential Strain
Max. Edge Strain
Springback Angle

Fig.4 Structure of Record

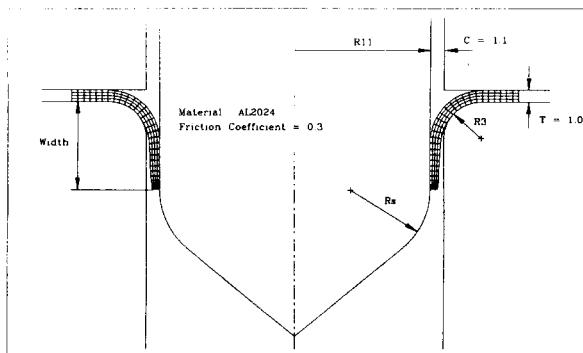
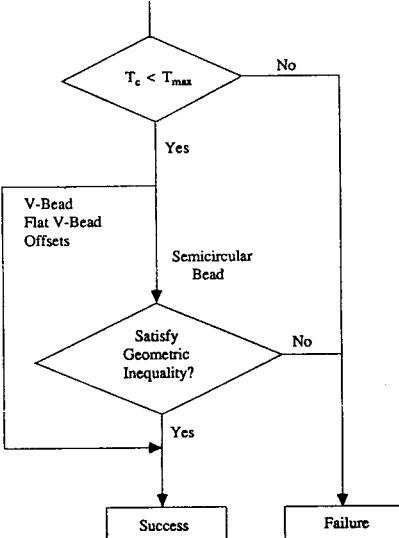


Fig.6 Flanging Analysis



where, T_c : Depth of height after Forming

T_{max} : Max. depth of height

Fig.5 Schematic Representation of Estimation of Formability for Flanging

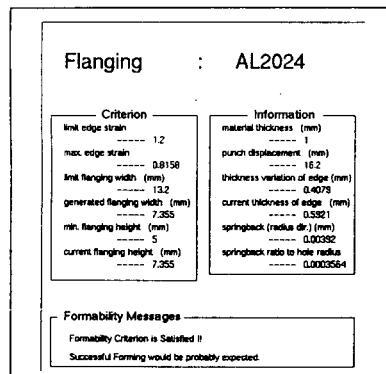


Fig.7 Estimation of Formability for Flanging

This screenshot shows a software window titled "PROCESS 1ID1 : Flanging". It displays a table of input parameters: Material Thickness (1.000), Friction Coefficient (0.300), Punch Stroke (15.20), Punch Radius (11.00), Die Shoulder Radius (3.000), Clearance (6.100), Punch Shoulder Radius (1.000), Punch Angle (50.00), and Hole Radius (3.000). At the bottom are buttons for "OK", "Cancel", and "Help".

Fig.8 (a) Nomogram Analysis of Flanging - preprocessor

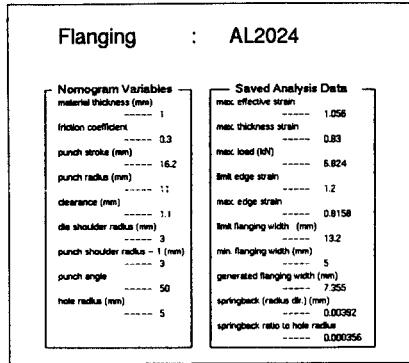


Fig.8 (b) Nomogram Analysis of Flanging

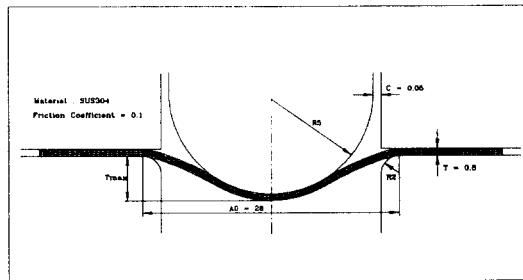


Fig.9 Embossing Analysis

Circular Bead : SUS304

Criterion		Information	
limit embossing height (mm)	..... 25.2	material thickness (mm)	..... 0.8
current embossing height (mm)	..... 4.925	punch displacement (mm)	..... 5
geometric inequality > 0.0	..... 0.1	thickness variation of origin (mm)	..... 0.7055
		springback at origin (mm)	..... 0.06742
		springback ratio to punch disp.	..... 0.01348

Formability Messages

Formability Criterion is Satisfied !!
Successful Forming would be probably expected.

Fig.10 Estimation of Formability for Embossing

Wiping Bending : S08C

Criterion		Information	
min. height of bend (mm)	..... 2.79	material thickness (mm)	..... 0.93
generated height of bend (mm)	..... 12.45	punch displacement (mm)	..... 10
min. bend radius (mm)	..... 0.372	clearance (mm)	..... 1.15
current bend radius (mm)	..... 0.93	friction coefficient	..... 0.1
		springback angle	..... 5.39

Formability Messages

Formability Criterion is Satisfied !!
Successful Forming would be probably expected.

Fig.11 Estimation of Formability for Wiping Bending

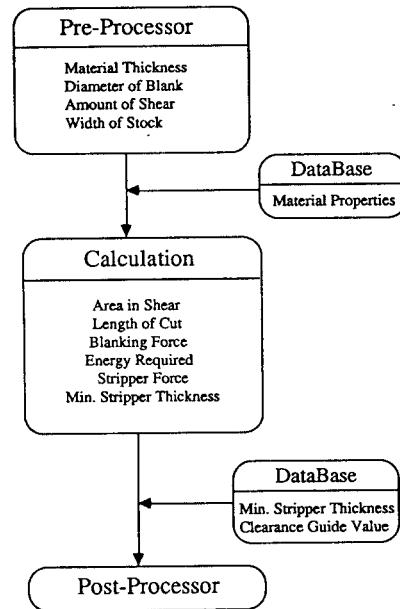


Fig.12 Schematic Representation of Nomogram Analysis of Blanking

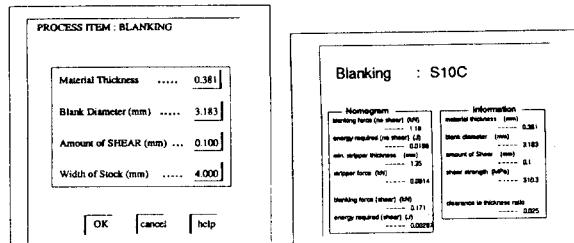


Fig.13 (a) Analysis Data for Blanking Nomogram

Fig.13 (b) Estimation of Blanking Nomogram

	Dalla [16]	Nomogram
Material Thickness (mm)	0.378	0.381
Length of Cut (mm)	10.0	10.0
Blanking Force (No Shear)	1.174	1.18
Stripper Force (kN)	0.0919	0.0914
Min. Stripper Thickness	1.3462	1.35

Table 1 Comparison of Blanking Nomogram with Reference