

# 다구찌방법을 이용한 디프드로잉 공정의 가공성평가에 대한 연구

## A Study on the Formability Estimation of Deep Drawing Process by using Taguchi Method

이 병찬(삼성전자), 강 연식(한국과학기술원), 양 동열(한국과학기술원), 문 재호(삼성전자)  
LEE Byoung-Chan(SAMSUNG Electronics Co.), KANG Yeon-Sick(KAIST),  
YANG Dong-Yol(KAIST), MOON Jae-Ho(SAMSUNG Electronics Co.)

### ABSTRACT

Despite the increasing demand for improved product design, a limited number of works have been reported in the field of sheet metal forming. In the present study, introducing the Taguchi method, an optimal and robust combination of parameters is found and a data base management system and nomograms are utilized for knowledge acquisition. The developed system is applied to a deep drawing process. Through the present study, it is shown that the developed system is useful for the design and the formability estimation of sheet metal forming processes.

**Key Words:** Taguchi method(다구찌 방법), Formability estimation(가공성 평가), Deep drawing(디프드로잉)

### 1. 서론

박판부품의 성형시 생산성 향상을 위해 설정된 설계변수에 대한 최종 성형결과를 해석하고 성형 가능성을 예측하며 공정상 필요한 정보의 획득을 쉽게 할 수 있는 시스템의 개발이 요구되고 있다.

제품 및 공정의 설계단계에서 가장 어려운 작업이 설계목적에 부합하는 설계변수들의 조합들의 값을 정하는 일이다. 기존의 실험계획법은 가능한 모든 경우에 대해 실험과 해석을 하기 때문에 많은 시간과 경비가 요구된다. 잡음인자를 고려하지 못하여 결과의 신빙성이 결여된다. 또한 설계변수가 많아질 경우 변수들의 최적화가 쉽지 않다. 이에 비해 다구찌방법은 품질에 손실의 개념을 도입하여 손실을 정량화, 공학적 객관화 시켰으며 기존의 실험계획법보다 훨씬 적은 실험횟수로 제품성능의 변동을 최소화하는 즉, 손실을 최소로 하는 변수들의 조합을 결정할 수 있으며 별도의 랜덤화 기법이 필요 없고 현장의 잡음인자까지도 고려함으로 인해 실험적 결론의 재현성이 우수하다<sup>(1,2)</sup>.

본 연구의 목적은 가전제품에 사용되는 박판부품의 설계단계에서 수많은 설계변수가 실제의 성형 가능성에 맞게 설계되어 있는지를 정확히 그리고 신속하게 판단할 수 있도록 다구찌방법과 유한요소해석 그리고 노모그램해석의 알고리즘화를 통해 금형설계의 타당성을 검증하는 것이다. 본 연구에서는 효율적인 제품설계와 설계의 검증을 위해 유한요소해석 모듈을 기반으로 한 설계해석기능을 구현하였고 데이터베이스 모듈, 그리고 다구찌방법을 도입하여 설계자의 설계목적에 알맞은 설계변수들의 최적조합을

선정하는 변수설계 모듈을 구현하여 사용자 편의도가 뛰어나고 체계적인 해석용 시스템인 박판부품의 가공성평가 시스템을 개발하였다.

### 2. 이론해석

#### 2.1 인자

인자는 제어인자(설계인자)와 잡음인자로 크게 분류할 수 있다. 제어인자는 설계자가 그 수준을 결정하고자 하는 인자이며 잡음인자는 다시 오차, 신호, 표시인자등으로 나누어지며 그 중 오차인자는 내란, 외란, 불완전 제조와 관계된다.

#### 2.2 직교배열과 강건설계<sup>(1,2)</sup>

다구찌방법의 특징중의 하나인 직교배열은 특성치에 영향을 미치리라고 여겨지는 설계변수의 수가 너무 많아서 제한된 자원으로는 인자수준의 모든 조합에 대해 실험을 행하기 어려울 때 제품이나 공정의 수행에 지장이 없는 범위 내에서 적은 실험횟수로 각 설계변수의 영향을 분석하기 위해 사용된다. 직교배열표를 사용하는 주목적은 인자조합의 높은 재현성에 중점을 두며 인자 배치에 있어서 직교성과 데이터해석에 있어서 분산분석을 통해 데이터의 전변동을 인자별의 변동함으로 분해하는 것이다.

강건설계란 인자수에 적당한 직교배열표상에 제어인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 S/N비를 최대화하는 제어인자(설계변수)의 조건 즉, 잡음하에서도 성능특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 근접하는 제어인자의 조건을 찾아내는 것이다. 설계변수의 조건에서 특성치의 산표가 아직 만족할 만한 상태가

아닐 때에는 허용차설계를 통하여 산포에 큰 영향을 끼치는 설계변수를 선택하여 그 허용차를 줄인다.

### 2.3 손실함수와 S/N비

다구찌는 오랜경험에서 고품질은 사용상 적은 손실을 초래한다는 소비자 입장에서의 접근을 통해 손실함수를 정의하고 있다. 어떤 제품이든 부품이든 목표로 하는 목표치가 있으며 목표치에서 멀어질수록 손실의 비중을 더 주자는 의미에서 목표치의 손실함수가 정의되며 그에 따른 S/N비는 제품의 기능을 판단하기 위해 통계적으로 계산된 수치로서 목표치에 얼마나 근사한지를 판단하는 기준이 된다. 품질평가를 위한 특성치의 분류는 계량치, 계수치, 계량분류치등으로 나눌 수 있으며 본 연구에서는 비교적 접근하기 쉬운 계량치중 망대특성, 망소특성 그리고 망목특성에 관심을 두며 그에 관련된 식은 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

#### (1) 망대특성

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right] \quad (1)$$

#### (2) 망소특성

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right] \quad (2)$$

#### (3) 망목특성

$$SN = 10 \log \left[ \frac{\left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \right\}^2}{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - m)^2} \right] \quad (3)$$

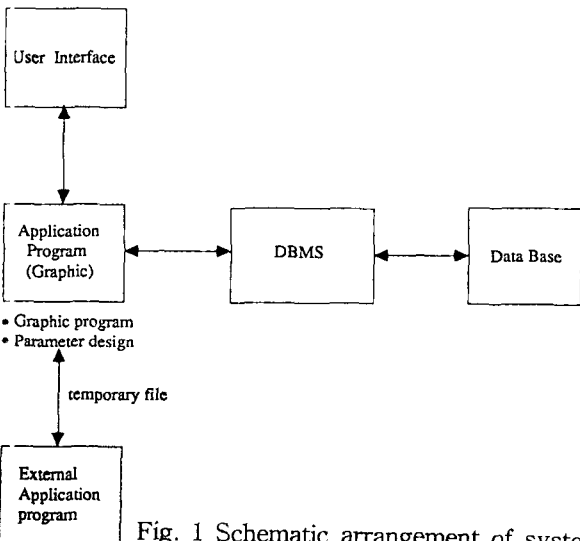


Fig. 1 Schematic arrangement of system

여기서  $i$ 는 직교배열에서 설계변수 조합의 실험 번호이고  $j$ 는 직교배열에서 잡음인자 조합의 실험번호이다.  $n$ 은 직교배열에서 한 설계변수 조합의 실험번호에서의 특성치의 반복수이고  $y$ 는 특성치이다

### 3. 가공성평가시스템

가공성평가시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 사용자 인터페이스를 위한 응용프로그램, 그래픽과 변수설계를 위한 응용프로그램, 유한요소 해석을 위한 응용프로그램, 데이터베이스 관리시스템 그리고 통합된 데이터베이스파일로 구성된다.

#### 3.1 시스템 알고리즘

가공성평가 시스템에 적용된 다구찌방법의 시스템알고리즘을 Fig. 2에 적용 흐름도로 예시하였다.

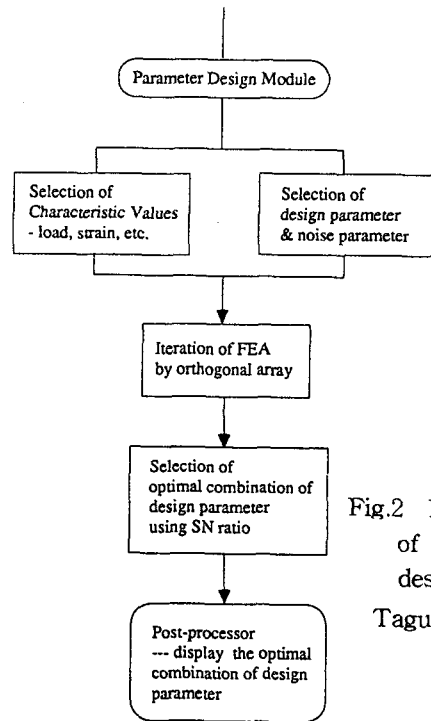


Fig.2 Flow chart of parameter design using Taguchi method

#### 3.2 가공성 평가 시뮬레이션 모듈

##### 3.2.1 유한요소해석(Finite Element Method)

공정을 해석하기 위한 모듈로서 강소성 유한요소 해석 프로그램과 격자 생성 프로그램으로 구성되며 그래픽 응용프로그램과의 인터페이스를 통해 모듈의 일체화를 추구하였다.

##### 3.2.2 그래픽 시스템

그래픽 모듈을 위한 응용프로그램은 UNIX 환경하에서 ANSI C와 X 윈도우시스템, OSF/MOTIF, UIL(User Interface Language)를 이용하여 개발하였다<sup>(3,4)</sup>. 또한 명령어를 외부적으로 제어하여 의도하는

작업을 별도의 프로그램에 의해 자동적으로 실행하는 방식인 개방형 프로그래밍 기법을 이용하였으며 해석용 프로그램과의 인터페이스를 유지한다.

### 3.2.3 데이터베이스 관리시스템(DBMS)

데이터베이스 관리시스템은 데이터베이스를 정의하고 조직화시키고 레코드의 저장, 검색, 삭제 등을 관리하는 통합 시스템이다<sup>(5,6)</sup>. 데이터 조작어로는 ANSI C언어를 사용하였고 데이터의 저장방식 레코드라는 단위로 저장된다. 그래픽 응용프로그램과의 인터페이스를 통해 데이터 저장, 데이터 검색, 파일 생성, 파일 검색, 파일 저장 등의 기능을 수행한다.

### 3.2.4 변수설계 모듈

제품 및 공정의 설계단계에서 가장 어려운 작업이 설계 목적에 부합되는 설계변수들의 값을 결정하는 일이다. 가능한 모든 경우에 대해 실험과 해석을 한다는 것은 너무나 무의미한 것이기 때문에 최근에 많은 관심을 끌고 있는 다구찌방법을 이용하여 설계자의 목적에 부합하는 설계변수들의 최적조합을 찾는 모듈을 개발하였다. 수준은 2수준, 3수준을 고려하였고 인자수는 2수준일 경우 최대 7개, 3수준일 경우 최대 13개의 인자수를 갖도록 설계하였다.

## 4. 디프드로잉 공정에의 적용

디프드로잉 공정<sup>(7,8)</sup>에는 여러가지 모양의 것이 있는데 여기서는 원통형 디프드로잉의 해석에 초점을 두었다. 성형성평가를 위해 사용한 경험식은 다음과 같다<sup>(9)</sup>.

(1) 한계 드로잉비(limiting drawing ratio: LDR)

$$LDR = \frac{D_o}{d} \quad (4)$$

여기서  $D_o$ 는 초기 블랭크 지름이고  $d$ 는 성형후 제품 지름이다.

(2) 한계 높이 대 지름비(limiting cup height to diameter ratio: LHDR)

$$LHDR = \frac{h_{cup}}{d} \quad (5)$$

$$h_{cup} = \frac{(D_o^2 - d^2)}{4d} \quad (6)$$

여기서  $h_{cup}$ 는 성형후 제품 높이이다.

(3) 다이 어깨 반경 (die shoulder radius) :  $R_d$

$$4 \cdot t < R_d < 10 \cdot t \quad (7)$$

(4) 펀치 어깨 반경 (punch shoulder radius) :  $R_p$

$$4 \cdot t < R_p < 10 \cdot t \quad \& \quad R_p < \frac{D_p}{3} \quad (8)$$

여기서  $D_p$ 는 펀치 지름이다.

(5) 파단 한계 (fracture limit for circular deepdrawing)

$$r_{df} \geq 0.8 d \sqrt{\frac{D_o}{d} - 1} \sqrt{\frac{t}{d}} \quad (9)$$

$$r_{pf} \geq 0.8 d_p \sqrt{\frac{D_o}{d} - 1} \sqrt{\frac{t}{d}} \quad (10)$$

여기서  $r_{df}$ 는 파단 한계에서의 다이 어깨 반경이고  $r_{pf}$ 는 파단 한계에서의 펀치 어깨 반경이다.

(6) 주름 한계(wrinkling limit for circular deepdrawing)

$$r_{dw} \leq \frac{(\frac{t}{d} - 0.01)}{0.04} d \quad (11)$$

$$r_{pw} \leq \frac{(\frac{t}{d} - 0.01)}{0.04} d_p \quad (12)$$

여기서  $r_{dw}$ 는 주름 한계에서의 다이 어깨 반경이고  $r_{pw}$ 는 주름 한계에서의 펀치 어깨 반경이다.

(7) 적정 틈새 (clearance) :  $c$

$$c = (1.4 \sim 2.0) \cdot t \quad (13)$$

성형가능성 평가를 위한 판정 규칙은 다음과 같이 설정하였다.

- i) IF( CDR < LDR and CHDR < LHDR and  $r_{df} < r_d < r_{dw}$  and  $r_{pf} < r_p < r_{pw}$  ) THEN  
성형한계 만족 ---> 성공적인 성형이 가능
- ii) ESLE  
성형한계 만족 안함 ---> 성형 실패 가능성 : 파단, 찢어짐, 주름 등.

여기서 CDR는 고려중인 제품의 드로잉비이고 CHDR는 고려중인 제품의 높이 대 지름비이다.

해석 예제인 Fig.3과 동일한 형상의 디프드로잉 공정에 대한 성형성 평가 해석을 위한 순서도를 Fig.4 에 해석 수행 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 재료는 S06C, 마찰계수는 0.2로 가정하였고 이때 재료의 유효응력과 유효변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 618.0 (\bar{\epsilon})^{0.31} \text{ N/mm}^2 \quad (14)$$

성형성 평가 규칙을 모두 만족하고 있으므로 설계 데이터 선정에 무리가 없음을 알 수 있었다. 그러나 두께 대 지름비의 값이 주름이 없을 때의 값보다 작으므로 주름이 생길 가능성이 있다. 이는 적절한 블랭크 호울더를 사용하면 해결이 가능하다.

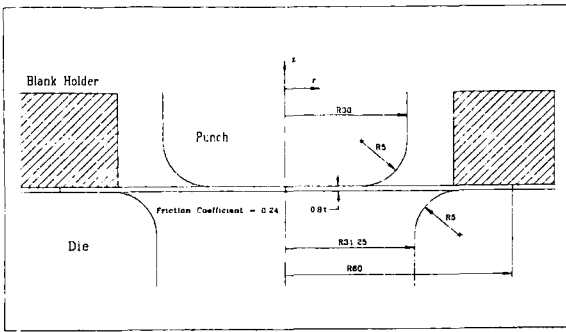


Fig. 3 Deep drawing analysis

Basic Parameter	Material Thickness : 0.8 mm		
	Blank Radius : 30 mm Punch Stroke : 40 mm		
Design Parameter	Friction Coefficient	0.1	0.12
	Punch Radius (mm)	16.0	17.0
	Die Shoulder Radius (mm)	6.5	6.0
	Punch Shoulder Radius (mm)	6.0	6.5
	Clearance (mm)	1.2	1.3
Noise Factor	Blank Holding Force (N)	2000	2200
	Material Thickness	-3.0 ~ 3.0	%
Friction Coefficient	-3.0 ~ 3.0		

Table 1 Classification of design parameter and noise factor

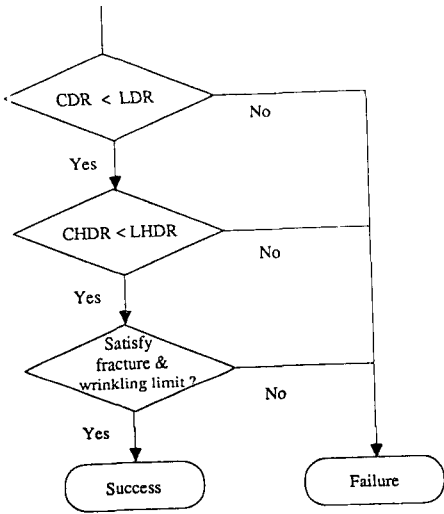


Fig. 4 Schematic representation of estimation of formability

펀치 어깨 반경, 다이 어깨 반경, 블랭크 지지력, 다이 틈새의 6가지로, 또한 현장에서의 잡음인자로 재료 두께의 불균일성과 마찰계수의 가변성을 가정하여 임의로 -3.0 ~ 3.0 %의 오프셋을 고려하였다. 변수 수준을 2수준으로 가정하여 변수설계기능을 수행한 결과 Fig. 6 와 Table.2 에서 보는 바와 같은 결과를 얻었다. 이때의 최대하중은 16.48kN 이고 최대 유효변형률은 0.5288이다. 이 값은 설계 변수들이 가질 수 있는 조합중 가장 작은 하중을 가질 때의 변수 조합의 해석값으로 설계시 고려되어야 할 설계치이다.

각각의 설계변수들이 최소 성형하중에 미치는 영향을 개별적으로 구분할 수는 없지만 설계자가 제시한 설계변수들의 값중에서 가장 적합한 값을 유추해 낼 수는 있기 때문에 유용한 해석이라고 사료된다.

Drawing : S06C	
<b>Criterion</b> limiting drawing ratio (LDR) ----- 2.2 current drawing ratio ----- 1.391 limiting height to diameter ratio (LHDR) ----- 0.35 current height to diameter ratio ----- 0.5433 recommended die shoulder radius (mm) ----- 3.2 radius limit of die shoulder radius (mm) ----- 4.326 wrinkling limit of die shoulder radius (mm) ----- 3.568 current die shoulder radius (mm) ----- 6	<b>Information</b> recommended punch shoulder radius (mm) ----- 3.2 fracture limit of punch shoulder radius (mm) ----- 4.308 wrinkling limit of punch shoulder radius (mm) ----- 3.294 current punch shoulder radius (mm) ----- 6 limiting thickness / diameter * 100 no wrinkling ----- 2.5 current thickness / diameter * 100 ----- 1.028 cup height (mm) ----- 26.56 clearance (mm) ----- 1.25
<b>Formability Messages</b> Formability Criterion is Satisfied ? Successful Forming would be probably expected.	

Fig. 5 Estimation of formability for deep drawing

Drawing : S08C	
<b>Basic Variables</b> punch velocity ----- 0.5 punch stroke ----- 39.4 time step size ----- 0.4 deceleration coefficient ----- 0.1	<b>Geometric Variables</b> material thickness ----- 0.8 friction coefficient ----- 0.1 die shoulder radius ----- 6 die clearance ----- 2.1 punch radius ----- 17 punch shoulder radius ----- 6.5 blank holding force ----- -2200 blank size ----- 30
<b>Characteristic Value</b> Min. Punch Load ----- 16.48 Min. Effective Strain ----- 0.5288	

Fig. 6 Application of parameter design for deep drawing using Taguchi method

다꾸찌 방법을 이용한 변수설계 모듈을 디프드로잉 공정에 적용하였다. 해석 재료를 S08C 로 선택하여 설계자의 설계 목적을 최소 성형하중을 갖는 설계변수의 조합의 결정으로 보고 주요 설계변수는 Table. 1에서 보는 바와 같이마찰계수, 펀치 반경,

	Parameter	1수준	2수준	
Design Parameter	Friction Coefficient	0.1	0.12	
	Die Shoulder Radius	6.5	6.0	
	Die Clearance	1.2	1.3	
	Punch Radius	16.0	17.0	
	Punch Shoulder Radius	6.0	6.5	
	Blank Holding Force	2000	2200	
Noise Factor	Material Thickness	-3.0	3.0	(%)
	Friction Coefficient	-3.0	3.0	

잡음인자조합	1	1	2	2
설계변수조합	1	2	1	2
	1	2	2	1
1 1 1 1 1 1	18.04	18.10	19.12	19.19
1 1 1 2 2 2	15.44	15.51	16.34	16.41
1 2 2 1 1 2	18.50	18.58	19.41	19.47
1 2 2 2 1 1	16.06	16.13	17.06	17.11
2 1 2 1 2 1	16.76	16.76	17.49	17.70
2 1 2 2 1 1	18.47	18.57	19.33	19.70
2 2 1 1 2 2	15.75	15.82	16.82	16.92
2 2 1 2 1 1	17.87	18.22	18.99	19.05

설계변수 최적 조합 : 1 2 ① 2 ② 2      특성치 : 16.48 kN

Table 2 Parameter design of deep drawing

## 5. 결론

제품의 설계 및 공정설계 단계에서 다구찌방법을 이용하여 설계목적에 가장 잘 부합하는 효과적인 설계변수의 조합을 획득할 수 있는 시뮬레이션 모듈을 개발하여 가전제품의 박판부품의 디프드로잉공정에 적용하여 보았다. 비교적 간단한 공정인 축대칭 공정에 적용해 보았지만 그 실용성을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 이종원, 김추호, "다구찌 방법을 이용한 컴퓨터 원용 강건설계 기법의 개발", 대한기계학회논문집, 제18권, 제2호, pp. 278-291, 1994.
2. 염봉진, 서순근, 변재형, "실험계획 및 분석 : 다구찌 방법과 직교배열의 활용", 한국과학기술원 산학협동강좌, 1993.
3. M. J. Sebern, "Building OSF/Motif Application : Practical Introduction", Prentice-Hall, New Jersey, 1994.
4. D. A. Young, "The X Window System Programming and Applications with Xt

OSF/Motif Edition", Prentice-Hall, New Jersey, 1990.

5. A. Stevens, "C Database Development", 성안당역, 1994.
6. W. Shoumel, "A Conception of Module Library and Data Base Management System for Finite Element Analysis", Computers & Structures, Vol. 32, No. 5, pp. 1073-1083.
6. D. F. Eary and E. A. Reed, "Techniques of Pressworking Sheet Metal - An Engineering Approach to Die Design", Prentice-Hall, New Jersey, 1974.
7. ASM Handbook Commitee, "Metals Handbook : Forging and Casting", ASM, Vol. 5, Metals Park, Ohio, 1970.
9. G. Eshel, M. Barash and W. Johnson, "Rule-Based Modelling for Planning Axisymmetric Deep-Drawing", J. Mech. Working Tech., Vol. 14, pp. 1-115, 1986.

## 후 기

본 연구를 위해 지원을 아끼지 않아 주신 삼성 전자 생산기술센터 생산요소기술팀 관계자 여러분께 감사드립니다.