

PAM-STAMP를 이용한 박판성형성 및 소성변형 특성에 관한 연구

강 대 민*
(98년 8월 7일 접수)

A Study on the Sheet Metal Forming and the Plastic Deformation
Characteristic by Using PAM-STAMP

Dae-Min Kang*

Key Words : Sheet Metal Forming(판재성형), Plasticity Deformation(소성 변형), Moiré Method(모아레 법), Finite Element Method(유한요소법), Instability Condition (불안정 조건)

Abstract

In this paper the forming simulation of circular bulge by using PAM-STAMP has been performed to estimate the sheet metal forming and the plastic deformation characteristic of circular bulge. The uniaxial tension tests and bulge tests are carried out for studying the forming characteristics of materials, and also Moiré experiment are carried out for measuring the radius of curvature of the bulge and the polar compressive thickness strain.

In order to compare the simulation results with the experiment and Hill's theory, the relationships between radius of curvature and polar height of the bulge, between hydraulic pressure and polar height, and between polar compressive thickness strain and polar height, are used.

According to this study, the results of simulation and Hill's theory are good agreement to the experiment. So, the results of simulation by using PAM-STAMP and Hill's theory will give engineers good information to assess the formability and plastic deformation characteristic of hydraulic circular bulge test.

* 종신회원, 부경대학교 기계자동차공학부

1. 서론

최근 자동차 산업에 있어서 양적인 팽창이 어느 정도 완료됨에 따라 생산비용 절감과 품질 향상에 대한 중요성이 매우 증가하고 있고 특히 자동차의 외관의 경우 자동차 판매에 매우 중요한 역할을 차지하게 되어 자동차사들은 자동차의 외관 개선에 더욱 힘을 기울이고 있다. 자동차의 외관은 자동차 디자인뿐만 아니라 적절한 조립 상태 및 표면 도장 상태 등에 의해서 결정되고 자동차 각 부품 사이의 조립정밀도는 프레스 성형에서 성형 제품을 어느 정도의 치수 정밀도를 갖게 성형할 수 있는가에 달려 있다. 그러나 최근 자동차 차체의 경량화와 안전성 향상을 위한 고장력 강판의 사용이 증가하고 이에 대한 문제해결은 주로 수치 해석 방법에 의존하고 있다.

수치해석 방법중 유한요소법은 다른 수치해법에 비해 적용이 일반적이면서 응력이나 변형에 대하여 정도 높은 정보를 제공하기 때문에 여러 공학 분야에서 널리 사용하는 방법이고, 이것은 시간적분 방법에 따라 내연적 및 외연적 시간적분 유한요소법으로 나눈다. 이중 외연적 시간적분 유한요소법⁽¹⁾은 고속 충돌, 폭발 현상 등의 재료의 고속 변형 거동을 해석하기 위하여 1970년대 이후 구미 각국에서 연구되어 왔다. 최근 자동차 충돌 해석^(2,3), 고속 성형 공정 해석⁽⁴⁾ 등에 효과적으로 적용되었으며 박판성형⁽⁵⁻⁷⁾이나 체적물의 금속성형⁽⁸⁾ 시 준정적 거동의 예측에 적용하려는 연구가 활발히 이루어지 있다. 이러한 방법으로 박판 성형 해석하는 대표적인 상용 프로그램에는 PAM-STAMP가 있다.

한편 박판성형법에는 유압 벌지 시험을 비롯하여 다이프드로잉, 커핑시험, 스트레치 포밍등 여러 가지가 있고 이중 유압 벌지가공은 박판을 소재로 하여 바깥 부분을 고정시키고 판의 한쪽면을 유압을 가하여 요소의 형상 및 치수를 매끄럽게 성형하는 판재 성형법이다. 이러한 유압벌지시험에 관한 연구 중 원형 벌지에 대한 연구로는 Hill⁽⁹⁾은 Levy-Mises 증분응력-변형도 관계를 사용하여 선형 가공재료에 대한 해를 유도했고 Weil과 Newmak⁽¹⁰⁾ 그리고 Woo⁽¹¹⁾는 Hencky이론에 근거하여 여러가지 수치해를 구했다. 재료 특성에 따

라서는 등방성 재료의 Tresca와 Mises의 항복조건이 사용되어 왔으나 이방성 재료의 경우에 대해서 Hill의 이방성 이론을 적용한 연구가 수행되어 왔다. 또한 광학적인 실험방법으로는 모아레 무늬를 이용하여 山田⁽¹²⁾에 의하여 변형된 정점-근방의 곡률반경과 변형도가 측정되었으나 아직도 정수압 벌지시 소성변형거동에 대한 연구는 지속적으로 필요한 실정이다.

본 연구에서는 PAM-STAMP를 이용하여 정수 유압벌지시 극높이-곡률반경, 유압-극높이 및 극높이-두께 변형률관계등의 해석결과를 Hill 이론치, 그리고 모아레 실험치와 서로 비교, 분석하므로써 원형 벌지시 박판 성형성 및 소성 변형특성을 예측하고자 한다.

2. 이론

2-1. 유한요소해석

셀모델, 재료 거동 모델, 유한 요소 형상함수와 강체 요소의 동역학을 가상일의 원리에 도입하면 다음과 같은 비선형 유한요소 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=1}^{N^e} (m^e \ddot{u}^e + c^e m^e \dot{u}^e + p^e - f^e + r_c^e) = 0 \quad (1)$$

여기서

- N^e : number of elements
- r_c^e : contribution of contact forces
- m^e : consistent mass matrix
- $c^e m^e$: mass proportional damping matrix
- p^e : internal force vector
- f^e : body force + surface loading

을 나타낸다.

비선형 유한 요소 방정식은 시간 n단계에서 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + [K]\{u_n\} = \{R_n\} \quad (2)$$

위 식으로부터 시간 증분 n+1에서의 해를 얻기 위해 다음과 같은 중앙차분법을 사용한다.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{u}_n &= \frac{u_{n+\frac{1}{2}} - u_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{\Delta t^2} \\ \dot{u}_{n+\frac{1}{2}} &= \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} \text{ or } \dot{u}_n = \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{\Delta t^2} \end{aligned} \right\} (3)$$

(3)식은 u_{n+1} 과 u_{n-1} 에 대한 테일러 급수로 부터 유도된다.

$$\left. \begin{aligned} u_{n+1} &= u_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_n + \frac{\Delta t^3}{6} \ddot{\dot{u}}_n + \dots \\ u_{n-1} &= u_n - \Delta t \dot{u}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_n - \frac{\Delta t^3}{6} \ddot{\dot{u}}_n + \dots \end{aligned} \right\} (4)$$

이때 3차이상의 항을 무시한다.

중앙 차분 방법은 Δt 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며 정확성과 수렴성은 Δt 의 제곱에 비례한다.

3. 유한요소해석

3-1. 모델링 및 재료 물성치

유한 요소 해석의 전처리 과정으로 HYPER-MESH를 이용하여 블랭크 호올더와 블랭크의 1/4 유한요소 모델링을 하였다.

Figs.1-2는 각각 변형전 초기의 블랭크와 블랭크 호올더의 접촉된 형상과 변형후 성형된 모양을 출력한 것이다. 또한 유한요소 모델의 절점수와 요소수, 그리고 요소형태등은 Table 1과 같다.

Table 1 Detail characteristics of finite element model

	Blank	Blank Holder
Num. of nodes	560	260
Num. of elements	480	225
Length of x-axis	70	-
Length of z-axis	70	-
Element type	shell	

해석에 사용된 재료는 실험재료와 동일한 재료로서 연강, 구리, 및 알루미늄등으로 Table2에 표시한 것과 같이 셸 요소의 material type선택을 블

랭크는 Type107인 이방성 탄소성체으로 선택하고, 블랭크 호올더는 Type 100인 null material으로 선택했다. 여기서 null material은 재료 정의에 있어 강체와 같이 기계적 저항이 없고 segment로 구성된 강체벽이나 강체의 정의에 적합한 재료로서 내력과 변형이 중요하지 않는 접촉면의 정의에 적합한 재료로 알려져 있다. Table2에 인장시험에서 구한 탄성계수(E), 강도계수(K),가공경화 지수(n) 및 이방성계수(R)값을 나타내었으며 블랭크 호올더 두께는 0.8mm보다 약간 큰 1.0 mm를 입력하였다. 재료의 소성거동은 Hill(1948)의 소성조건에 의한 탄소성 거동 및 변형을 경화 거동으로서 식(5)과 같이 표시되는 Krupkowsky 모델을 사용하였다.

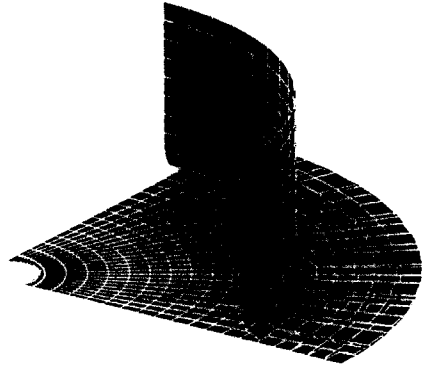


Fig. 1 F.E. model used for circular bulge analysis

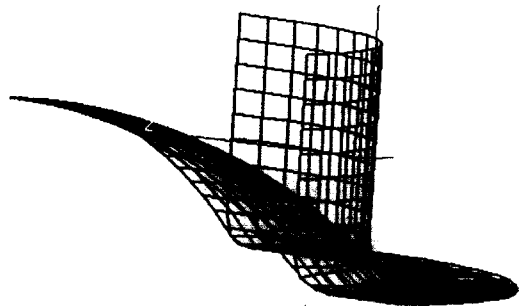


Fig. 2 Deformation profile of circular bulge analysis by used PAM-STAMP

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (5)$$

여기서 σ 는 응력이며 ϵ 는 변형률, K 와 ϵ_0 , n 은 재료의 고유계수이다.

PAM-STAMP에서는 등방성($R=1.0$), 수직이방성(평면 등방성) 및 평면 이방성으로 R 값을 부가할 수 있으며 본 연구에서는 수직 이방성으로 입력하였다.

Table 2 Mechanical properties used for models

Element	Blank			Blank Holder
	Mild steel	Cu	Al	
Material Type	Ani. ela/plastic	Ani. ela/plastic	Ani. ela/plastic	Null
Density(kg/mm ³)	7.8e-06	8.96e-06	2.7e-06	7.8e-06
E (GPa)	210	129.8	70.6	210
Poisson's ratio	0.3	0.343	0.345	0.3
K (GPa)	0.538	0.35	0.1483	-
Strain offset(ϵ_0)	0.016	0.01	0.009	-
Hardening exponent (n)	0.23	0.08	0.024	-
R (Rankford coefficient)	1.37	0.94	0.53	-
Thickness	0.8			1.0

3-2. 경계조건 및 하중조건

유한 요소 해석에서 정밀도가 높은 해석결과를 얻기위해 실제 실험 조건과 같은 성형초기조건을 부가 하였다. Table3에서 보는바와 같이 벌지 성형 해석에 사용된 경계조건중 contact interface 형태는 우선 전체모델을 포함하는 3차원 박스를 균일한 서브박스(sub-box)들로 나누고 각 서브박스에 속하는 점들을 선별하여 어떤 서브박스에 속하는 slave node의 접촉상태를 조사할 경우 그 서브박스와 주변의 서브박스들이 속해있는 master node들에 대해서만 조사하도록 하여 계산의 횟수를 줄이도록 하는 방법으로 최근 가장 많이 사용하는

박스선별(box sorting type15)방법으로 설정하였다. 그리고 master-slave 접촉조건으로는 블랭크 호우더를 master, 블랭크를 slave으로 지정했으며, 또한 경계조건을 유압을 가할때 블랭크가 안으로 빨려 들어오지 않게 블랭크 호우더와 블랭크의 변형전의 접촉부분을 완전 고정했다. 유압이 가해지는 블랭크 부분의 중앙점은 자유도를 유압의 방향인 y축에 대해 움직일 수 있게 하고 나머지를 고정했다. 그리고 x축상에 있는 node의 운동은 z축 방향으로는 고정시키고 나머지 방향은 움직일 수 있게 했으며, z축상에 있는 node의 운동은 x축 방향으로는 고정시키고 나머지는 움직일 수 있게 하였다.

3-3 시간 조정 조건 (Time control condition)

Table 4는 해석에 사용된 시간 조정조건을 정리한 것이다.

Table 4 Time control condition

	Condition
Termination	1
Number of state for time history	1000
Number of state for plot history	10
Scale factor for time step	0.9
Subcying	No
Time step	Large, Bend

여기서 Time scale factor가 0.9인 것은 시간 증분 n+1에서의 절점 변위가 구해지면 변형영역을 수정하여 그에 따라 수렴성이 보장되는 새로운 시간 증분의 크기를 결정해야 하고 전체적인 시간 증분의 크기는 모든 요소에 대해 각각의 시간 증분크기를 계산한 후 다음과 같이 식(6)에 의해 결정한다.

Table 3 Boundary conditions and process conditions used in the finite element method

contact interface type : 15-contact blank/tool	BLANK			BLANK HOLDER	
	slave			master	
Boundary condition	center node	node of x-axis	node of z-axis	blank holder and clamping part	
	x-displacement	fixed	free	fixed	fixed
	y-displacement	free	free	free	fixed
	z-displacement	fixed	fixed	free	fixed
	x-rotation	free	fixed	free	fixed
	y-rotation	fixed	fixed	fixed	fixed
	z-rotation	free	free	fixed	fixed
Loading condition	friction:0.3	penalty:0.03	search freq:10	contact damping:0.1	type:static pressure

$$\Delta t_{N+1} = \alpha \text{Min}(\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N) \quad (6)$$

위 식에서 N은 총 요소 수이며 Δt_i 는 i 요소에 대한 시간 증분의 크기를 나타낸다. α 는 안정성을 위한 상수로 일반적으로 판재 성형해석시는 0.9값을 사용한다. 그리고 셀 요소의 시간간격은 식 (7)과 같이 일반적으로 L_c (Characteristic length)와 C (elastic wave)에 의해 구해진다.

$$\Delta t_c = \frac{L_c}{C} \quad C = \sqrt{\frac{E}{A(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

여기서 L_c 는 요소의 크기에 좌우되고, A 는 재료의 밀도, ν 는 재료의 poisson의 비 그리고 E 는 재료의 탄성계수이다.

4. 실험 및 해석결과

4-1. 실험

4-1-1. 인장시험 및 액압벌지 시험

인장시험은 액압으로 작동되는 최대용량 25톤인 만능 재료 시험기를 사용했다. 크로스헤드속도는 1mm/min으로 하여 하중 500kg하에서 신장계를 부착하여 실온에서 행했고 실험에 사용된 시편의 형상 및 치수는 ASTM 표준시편 규격에 준했다. 이방성 계수인 R값은 연강, 구리는 15% 신장위치에서 하중을 제거한 후 시편의 두께나 폭의 변화를 측정하여 구했고 알루미늄은 Table5에서 나타난 바와같이 연신율이 적게 나타나 시편을 파단시킨 후 파단부가 균일하게 변형된 부분에서 측정하여 식 (8)로 표현되는 R값을 구했다.

$$R = \frac{\ln(W_0/W)}{\ln(l/l_0) - \ln(W_0/W)} \quad (8)$$

여기서 W_0 는 시험전 시편의 폭, W 는 시험후

시편의 폭, l_0 는 시험전 시편의 표점거리, 그리고 l 은 시험후 시편의 표점거리로 나타낸다.

그리고 가공경화지수 n 값은 인장시험 결과로부터 식(10)과 식(11)으로 표현되는 공칭응력-진 응력의 관계식, 공칭 변형도 - 진 변형도의 관계식을 이용하여 진 응력-진 변형도 곡선의 근사식인 식 (9)에서 진 변형률에 대한 진 응력의 대수 그래프상의 기울기로부터 구했다.

$$\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n \quad (9),$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + e) \quad (10),$$

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (11)이다.$$

여기서 $\sigma, \sigma_0, \epsilon, e$ 등은 각각 진응력, 공칭응력, 진변형률 및 공칭변형률등을 나타낸다. Table5에 정리된 모든 값들은 시편의 압연방향을 고려한 아래 식 (12)에 의해서 구했다.

$$A = \frac{1}{4} (A_0 + 2A_{45} + A_{90}) \quad (12)$$

여기서 A_0 는 압연방향에 대한 0도 방향, A_{45} 는 압연방향에 대한 45도 방향, 그리고 A_{90} 는 압연방향에 대한 90도 방향에 해당하는 값을 나타낸다.

액압 벌지 시험장치는 Torsee hydraulic bulge testing M/C(type HB-100)으로 여기에 다이직경이 100mm이고 다이 형상반경이 4.5mm인 금형다이를 부착했다. 여기서 압력과 극높이는 벌지 시험장치에 연결되어 있는 X-Y 레코드와 시험기에 부착되어 있는 부로돈관 압력계, 그리고 시험기 상단부분에 다이알게이지를 이용하여 구할 수 있고 본 실험은 이 시험기에 가로측을 벌지된 극높이, 세로측을 벌지압력으로 표시되는 X-Y기록계를 부착시킨 후 클램핑 압력을 60kg/cm²으로 하여 측정했다.

Table 5 The results of uniaxial tension test

	Heat-treatment	Y.P (kgf/cm ²)	T.S (kgf/cm ²)	e_f (%)	R	K	n	ϵ_0
Mild-steel	as-received	23.1	30.8	35.1	1.37	53.8	0.23	0.016
Cu	as-received	20.97	22.5	19.5	0.94	35.0	0.08	0.010
Al	as-received	11.07	12.51	3.5	0.53	14.83	0.024	0.009

4-1-2. 모아레 시험

모아레의 시험순서는 다음과 같다.

- (1) 시편의 연마 및 탈지
- (2) 시편의 건조
- (3) 회전도포전조기를 사용하여 시편에 현상액을 도포하여 건조
- (4) 진공소부장치를 이용하여 시편위에 기준격자 부착하여 현상 및 염색시킴
- (5) 격자의 합격 유무를 판정하기 위하여 형상기에서 격자점토
- (6) 벌지 시험기에서 단계별로 변형을 준다
- (7) 카메라앞에 변형된 시편을 설치한다
- (8) 기준격자선과 모델격자선으로서 적당한 미스매취와 미스어라인먼트를 이용하여 모아레 무늬를 찾아 사진촬영을 한다
- (9) 필름을 현상하여 측정한다

실험재료는 두께가 0.8mm인 시판되는 알루미늄, 구리, 및 연강 등을 실험순서에 따라 격자를 입혀 시편의 극 높이를 단계적으로 나누어 측정했고 여기서 사용한 격자선의 종류는 200lines/inch ($p=0.127\text{mm}$), 입사각은 30° 이다. 여기서 p 는 격자의 피치를 나타낸다.

곡률반경은 부록의 식(18)에서 모아레 차수를 1, 2, 3, 4에 해당하는 모아레 직경 d_1, d_2, d_3, d_4 를 측정하여 식(13)에서 구한 값의 산술평균 값으로 계산했다.

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= 1.136 d^2 + 0.055 \\ \rho_2 &= 0.038 d^2 + 0.275 \\ \rho_3 &= 0.227 d^2 + 0.275 \\ \rho_4 &= 0.160 d^2 + 0.385 \end{aligned} \right\} \quad (13) \text{이다}$$

여기서 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ 는 각각 d_1, d_2, d_3, d_4 에서 의 곡률 반경을 나타낸다

4-2. 해석결과

원형 벌지시 성형 해석하기위해 유한요소 해석의 전처리 과정으로 Hyper-Mesh에서 블랭크와 블랭크 호울더의 1/4 유한요소 모델링 한 후 변형전 초기 상태의 경계조건은 성형후 빨려들어오거나 주름이 생기지 않게 하기위해 블랭크의 가장자리 부분은 완전 고정했다. 블랭크와 블랭크 호울더의

법선방향은 서로 바라보는 방향으로 설정하였고 블랭크중 유압이 가해지는 부분의 법선 방향은 유압이 가해지는 반대방향으로 지정하였다. 중력효과 해석(처짐 해석)은 블랭크와 블랭크 호울더와의 초기 안착상태를 보기 위한 해석으로 일반적으로 성형에 미치는 영향은 극히 작은 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 박판의 두께를 부가하여 초기부터 블랭크와 블랭크 호울더를 접촉시켜 해석상 안정을 위해 중력효과를 없앴다.

Table 6은 R. Hill의 논문에서 근거한 이론식 중 constant strain hardening rate H' 값을 계산하기 위해서 재료의 종류, 압연방향에 따라 인장시험결과를 토대로 계산된 H' 값의 결과이다. 여기서 Al의 상수 H' 값은 16.85, Cu의 상수값은 2.0, 그리고 연강의 상수 H' 값은 4.12 로 나타났다.

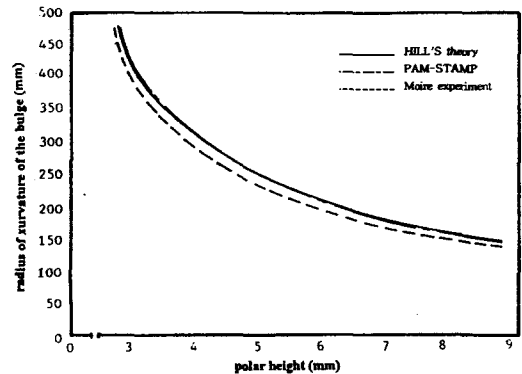


Fig. 3 Variation of radius of curvature with polar height of circular bulge for mild steel

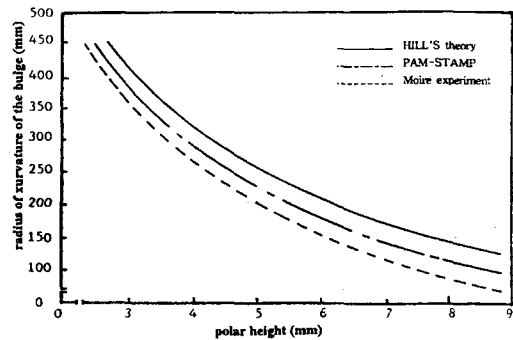


Fig. 4 Variation of radius of curvature with polar height of circular bulge for Al

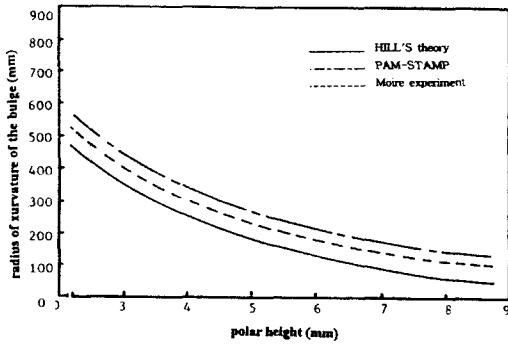


Fig. 5 Variation of radius of curvature with polar height of circular bulge for copper

Figs.3,4,5등은 연강, 알루미늄, 및 구리에 대해 극 높이-곡률반경의 관계에서 유한요소법 결과를 R. Hill이론치, 그리고 모아레 실험치와 서로 비교한 결과로 극 높이가 증가할수록 곡률반경은 작아진다는 것을 알 수 있다. 이 결과에서 연강의 경우 유한요소 해석 결과는 거의 Hill 이론식과 잘 일치하고 알루미늄인 경우 모아레 실험치는 Hill 이론치 결과보다 유한요소 해석결과와 잘 일치함을 보였다. 그러나 구리는 유한 요소 해석결과와 Hill의 이론치와

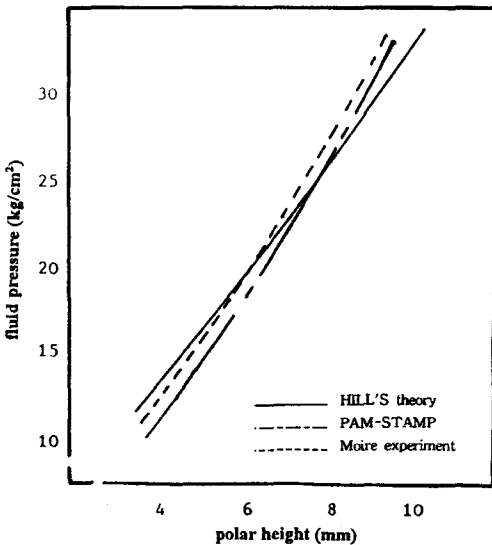


Fig. 6 Variation of fluid pressure with polar height of circular bulge for mild steel

거의 일정한 오차를 보이고 있으나 극높이가 증가함에 따라 유한요소해석결과가 Hill의 이론치보다 모아레 실험치에 잘 일치된다는 것을 알 수 있다.

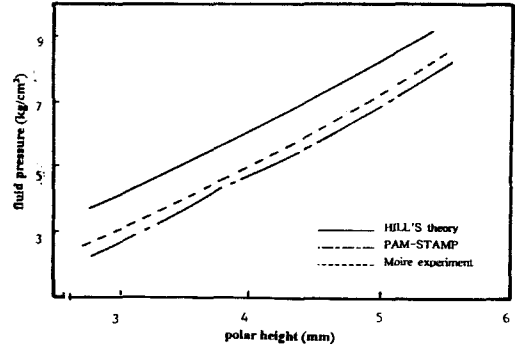


Fig. 7 Variation of fluid pressure with polar height of circular bulge for Al

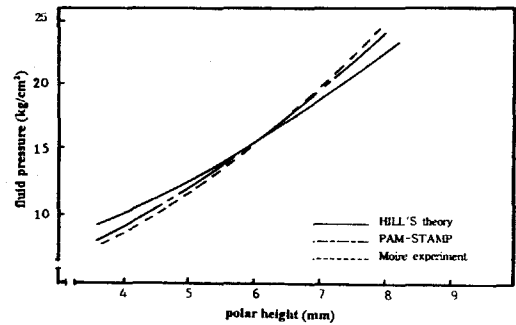


Fig. 8 Variation of fluid pressure with polar height of circular bulge for copper

Figs.6,7,8등은 연강, 알루미늄, 및 구리에 대해 유압-극높이의 관계에서 유한 요소 결과치를 R. Hill이론치, 그리고 모아레 실험치와 서로 비교한 결과로 극 높이가 증가할수록 유압은 점차 증가하였다.

이 결과에서 연강과 구리의 경우 모아레 실험치는 유한요소 결과에 Hill의 이론치보다 대체적으로 잘 일치하고 Hill의 이론치는 극높이가 증가함에 따라 모아레 실험치와 잘 일치하다가 극높이가 대략 6mm정도 이후는 오차가 증가함을 보였다.

알루미늄의 경우 모아레 실험치는 유한 요소 결과가 Hill의 이론치보다 더 잘 일치하였고 Hill의 이론치는 연강과 구리에 비해 오차가 더 큰 것으로 나타났다.

Figs. 9,10,11등은 연강, 알루미늄, 및 구리에 대해 극높이-두께 변형을 관계를 유한요소법 결과와 Hill이론치를 모아레 실험치와 서로 비교된 결과이며 이 결과에서 극높이가 증가할수록 극 두께 변형률은 증가하였다. 그리고 연강인 경우 Hill의 이론치가 유한 요소 결과치보다 모아레 실험치에 잘 일치하였고 알루미늄 및 구리인 경우는 유한 요소 결과가 Hill의 이론치보다 모아레 실험치에 더 잘 일치하였다.

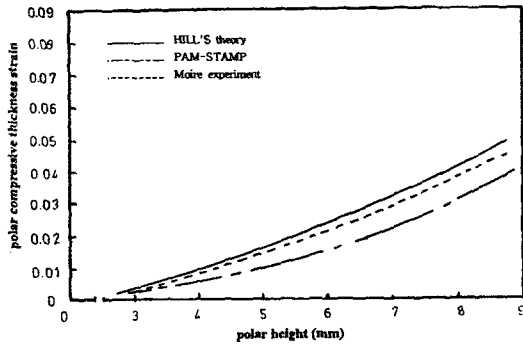


Fig. 9 Variation of polar thickness strain with polar height of circular bulge for mild steel

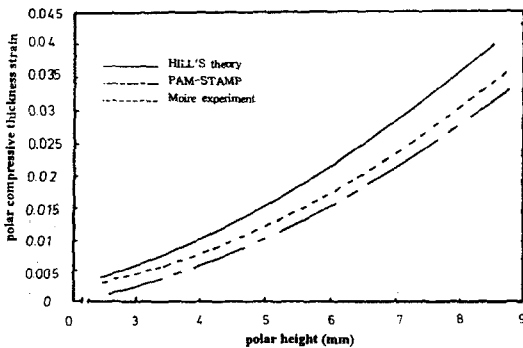


Fig. 10 Variation of polar thickness strain with polar height of circular bulge for Al

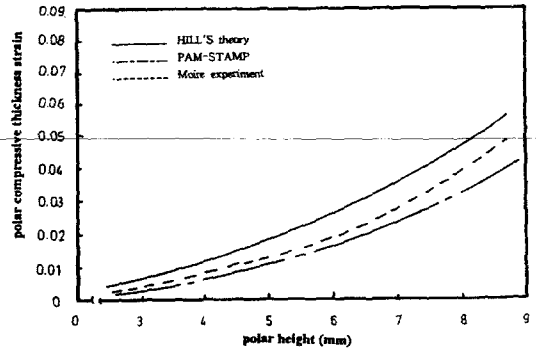


Fig. 11 Variation of polar thickness strain with polar height of circular bulge for copper

Fig. 12는 연강에 대해 극높이가 7mm인 경우의 모아레 사진이다.

이 모아레 사진을 관찰해 보면 원으로 된 모아레 무늬와 곡선으로 된 모아레 무늬가 나타나 있음을 알 수 있다. 여기서 원으로 된 모아레 무늬의 직경은 극높이가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있고 이러한 모아레 직경을 측정해서 식 (13)을 이용하여 정점부근의 곡률반경을 측정할 수 있다.

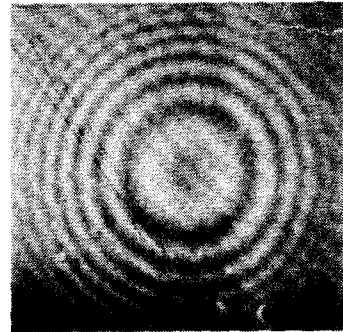


Fig. 12 Moiré fringe of mild steel at polar height of 7mm.

정점의 변형도는 정점부근이 평면-변형도 변형을 받는다고 가정해서 모아레 무늬간격을 측정하므로써 정점근방의 변형도를 구할 수 있다.

Table 6 Results of H' for experimental material

Material	Rolling direction	σ/Y	ϵ	H'	
Al	0	1.05	0.0029	18.1	
		1.13	0.0069		
		1.18	0.0099		
	45	1.06	0.0029	20.06	
		1.14	0.0069		
		1.19	0.0099		
	90	1.04	0.0029	14.62	
		1.11	0.0069		
		1.14	0.0099		
AverageH'	$H'=1/4 \times (14.62+2 \times 20.06+18.1)=16.85$				
Cu	0	1.06	0.029	1.9	
		1.12	0.058		
		1.16	0.086		
		1.20	0.113		
		1.24	0.139		
	45	1.06	0.029	2.0	
		1.12	0.058		
		1.17	0.086		
		1.22	0.113		
		1.24	0.113		
	90	1.06	0.029	2.1	
		1.12	0.058		
		1.18	0.086		
		1.24	0.113		
		1.24	0.113		
AverageH'	$H'=1/4 \times (1.9+2 \times 2.0+2.1)=2.0$				
Mild steel	0	1.07	0.035	4.1	
		1.201	0.067		
		1.328	0.098		
	45	1.07	0.035	4.1	
		1.201	0.067		
		1.328	0.098		
	90	1.07	0.035	4.17	
		1.203	0.067		
		1.332	0.098		
	AverageH'	$H'=1/4 \times (4.17+2 \times 4.1+4.1)=4.12$			

5. 결론

연강, 구리 및 알루미늄등의 박판을 사용해서 측정된 모아레 실험치를 PAM-STAMP을 이용하여 해석된 유한요소 결과 및 R. Hill이론치와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 곡률 반경에 대한 극높이와의 관계에 대해 유한요소 결과와 R. Hill이론치, 그리고 모아레실험

치를 서로 비교한 결과 유한 요소 결과와 R. Hill 이론치는 연강, 구리, 알루미늄의 순으로 모아레 실험치와 잘 일치하였다.

2) 벌지압력에 대한 극높이와의 관계에 대해 유한요소 결과와 R. Hill이론치, 그리고 모아레 실험치를 서로 비교한 결과 연강, 구리 및 알루미늄의 경우 모아레 실험치는 Hill의 이론치보다 유한 요소 결과에 대체적으로 잘 일치하였다.

3) 극 두께 변형도에 대한 극높이의 관계를 유한요소 결과와 R. Hill이론치, 그리고 모아레 실험치를 서로 비교한 결과 연강인 경우 모아레 실험치가 유한 요소 결과치보다 Hill의 이론치에 잘 일치하였고 알루미늄 및 구리의 경우 모아레 실험치는 Hill의 이론치보다 유한요소 결과에 더 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 1997년도 부경대학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) D.J. Benson. "Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes", Comput. Methods Appl.Mech.Engrg., Vol.99 ,pp.235-394, 1992
- 2) Z.H.Zhong, "Finite element Procedures for contact - impact problem", Oxford University Press, p.316,1993.
- 3) 유요한, 정동택, "엑스플리시트 시간 적분 유한 요소법을 이용한 고속 성형 해석(1)", 대한 기계학회 논문집, 제 15권, 제1호, pp.1-10, 1991.
- 4) 유요한, 정동택, "엑스플리시트 시간 적분 유한 요소법을 이용한 고속 성형 해석(2)", 대한 기계학회 논문집, 제 15권, 제5호, pp.1552-1562, 1991.
- 5) A.Honecker and K. Mattiasson, "Finite element procedures for 3D sheet forming

simulation", in Proc.NUMIFORM '89 ed. E.G.Thomson et.al., Fort Collins, Balkema,, pp.457-463,1989

6) K.Mattiasson et. al., "Evaluation of a dynamic approach using explicit integration in 3D sheet forming simulation", in Proc. NUMIFORM '92 ed. Chenot et.al., Rotterdam, Balkema, pp.55-67,1992

7) A.M.Prior,"Application of implicit and explicit finite element techniques to metal forming", J.Mater,Process Technol., Vol,45,pp.647-656, 1994

8) H.Bauer, "FE-Simulation of the production process of builded camshafts". in Proc. NUMIFORM '92 ed. Chenot et.al., Rotterdam, Balkema, pp.592-600,1992

9) R. Hill, Philosophical Magazine 7th Series, Vol, 41, pp.1133-1142,1950

10) N.A. Weil and N.M.Newmark,J.Appl.Mech., Dec,pp.533, 1955

11) D.M.Woo, Int.J.Mech.Sch., Vol,6, pp.303-317,1964

12) 山田, 花井, 曲本, 第十八面 塑性加工 聯合 講演會(昭和 四二年 十一月 十九日) 東京

- 부 록 -

1) Hill의 이론식

- 가정 : 1) 재료의 변형은 Von-Mises항복조건을 따른다.
- 2) 박판의 두께가 블랭크 반경에 비해서 매우 작다.
- 3) 임의의 변형단계에서 원주방향에 대한 곡률반경의 크기와 자오선 방향의 곡률 반경크기는 동일하다.
- 4) 인장시험에서 응력과 변형도 관계는 $\sigma/Y = 1 + H'\epsilon$ 에 따른다.

이 가정에서 다음 관계식을 얻을 수 있다.

(1) 액압 - 극 높이의 관계식

$$\frac{P}{Y} = \frac{4ht_o}{a} \left[1 - \frac{1}{4}(3H-5) \frac{h^2}{a^2} \right] \quad (14)$$

(2) 극 높이 - 극 변형률의 관계식

$$\epsilon_o = \frac{2h^2}{a^2} \left[1 - \frac{1}{4}(3H-1) \frac{h^2}{a^2} \right] \quad (15)$$

(3) 곡률반경 - 극 높이의 관계식

$$\rho = \frac{2h^2}{a} \left[1 - \frac{1}{2}(H+1) \frac{h^2}{a^2} \right] \quad (16)$$

2) 모아레 법에 의한 곡률반경 및 변형도 계산

가정 : 1) 변형된 정점 근방은 근사적으로 일정한 곡률을 가진 구의 일부이다.

2) $z=z'$ 의 위치에서 기준격자의 격자선이 y 축 방향에 평행하게 놓여있다.

3) 기준격자선과 빛의 투사시킨 거리 H 와 기준점에서 기준격자사이의 거리 x 사이의 관계는 $H \tan i \gg x$ 이다.

(여기서 i 는 빛의 입사각)

이 가정에 의하여 다음 관계식을 구할 수 있다.

(1) 모아레 차수(n')와 기준 격자선의 번호(m)와의 관계식

$$n' - \frac{1}{2} = r' - m \quad (17)$$

(2) 곡률반경(ρ)와 모아레 차수(n')와의 관계식

$$\rho = \frac{\tan i(x^2 + y^2)}{(2n' - 1)p} + \frac{(2n' - 1)p}{4 \tan i} \quad (18)$$

(여기서 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 는 모아레 무늬의 반경이다.)

(3) 모아레 법에 의한 변형도 계산식

$$e_x = 1 - (1 + \lambda) \cos \theta_o + g/\delta_{xx}$$

$$e_y = 1 - (1 + \lambda) \cos \theta_o + g/\delta_{yy} \quad (19)$$