

## 고무 패드 성형 공정의 유한요소 모델링

신수정\*, 이태수\*\*, 오수익\*\*\*

## Finite Element Modeling of Rubber Pad Forming Process

S. J. Shin\*, T. S. Lee\*\*, S. I. Oh \*\*\*

## ABSTRACT

For investigating rubber pad sheet metal forming process, the rubber pad deformation characteristics as well as the contact problem of rubber pad-sheet metal has been analyzed. In this paper, the behavior of the rubber deformation is represented by hyper-elastic constitutive relations based on a generalized Mooney-Rivlin model. Finite element procedures for the two-dimensional responses, employing total Lagrangian formulations are implemented in an implicit form. The volumetric incompressibility condition of the rubber deformation is included in the formulation by using penalty method. The sheet metal is characterized by elasto-plastic material with strain hardening effect and analyzed by a commercial code. The contact procedure and interface program between rubber pad and sheet metal are implemented. Inflation experiment of circular rubber pad identifies the behaviour of the rubber pad deformation during the process. The various form dies and scaled down apparatus of the rubber-pad forming process are fabricated for simulating realistic forming process. The obtaining experimental data and FEM solutions were compared. The numerical solutions illustrate fair agreement with experimental results. The forming pressure distribution according to the dimensions of sheet metal and rubber pads, various rubber models and rubber material are also compared and discussed.

**Key Words** : Finite Element Method(유한요소법), Hyper-elasticity(초탄성), Mooney-Rivlin Model(무니-리브린 모델), Rubber Pad forming(고무 패드 성형법), Penalty Method(벌칙 법)

## 1. 서 론

고무 패드 성형법은 일반적인 판재 성형시 필요한 두 개의 금형중에서 한 개를 고무패드로 대체하여 고무 패드에 가해지는 압력으로 성형하는 방법을 말한다. 따라서

이러한 성형법은 일반적인 성형법에 비하여 금형이 한쪽만 필요하므로 금형 제작 비용이 저렴한 점, 공구비가 적게 들고 장치의 설치 시간이 짧으므로 다품종 소량 생산이 가능한 점, 공구 흔적이 생기지 않고 완제품의 표면 상태가 좋은 점등의 장점들로 인하여 항공기 부품과 같은

\* 삼성 SDS CAD/CAM사업부  
 \*\* 서강대학교 기계공학과  
 \*\*\* 서울대학교 기계설계학과

고 부가치 소량생산에 효과적으로 쓰일 뿐 아니라 그의 성형하기 힘든 자동차 부품등을 생산하기 위하여 사용되고 있다<sup>(1)</sup>. 이 방법으로 성공적인 제품을 성형하기 위해서는 판재에 걸쳐 작용하는 성형압력의 역할, 고무 패드부의 변형, 판재의 크기와 변형등에 대한 지식이 필요하다.

고무패드 성형법을 수치적으로 모사하기 위해서는 전체 성형과정동안 연속적으로 가해지는 성형압력에 따른 고무 패드의 변형특성에 대한 이해가 가장 중요하다. 또한 고무패드와 판재 그리고 고무패드와 다이간의 인터페이스의 접촉문제에 대한 해석이 필요하다. 이러한 문제들을 고려한 고무패드 성형법에 관한 해석이나 모델링은 드물게 이루어져 왔으며, 주로 MARFORM 공정을 이용한 고무패드 성형법을 중심으로 DYNA2D 및 PAM-STAMP를 이용한 성형 해석등<sup>(2,3)</sup>으로 제한되고 있다. 고무에 유압을 가하여 판재를 성형하는 유막성형(fluid-cell forming) 공정을 이용한 성형법의 유한요소 해석은 패드부 거동을 초점으로 저자들에게 의해 2차원 축대칭 문제를 중심으로 검토되어 왔다<sup>(4,5)</sup>. 본 연구는 이를 토대로 유막성형 공정의 모델링을 수행하고 특히 성형압력의 측면에서 해석결과를 고찰하였다. 이에따라 판재두께, 고무 두께와 재질 및 고무 모델에 따른 성형압력에 대한 영향 등을 해석하였다.

고무의 거동은 일반적인 Mooney-Rivlin 모델을 기초로 하였다<sup>(6)</sup>. 이 모델을 토대로 접촉모듈을 포함한 유한요소 프로그램을 Total Lagrangian 공식화와 내연적 시간적분기법을 사용하여 개발하였다. 고무의 체적 비압축성 조건을 만족시키기 위해 벌칙법(penalty method)을 사용하여 공식화하였다<sup>(7-9)</sup>. 또한 고무와 판재사이의 접촉탐색 기법으로는 Hallquist의 알고리즘이 사용되었으며, 접촉력은 벌칙법으로 계산되었다<sup>(10)</sup>. 고무의 대변형과 관련한 비선형 방정식을 수치적으로 풀기위해 Full-Newton 방법에 기초를 둔 반복기법이 적용되었다.

판재의 성형과정은 고무패드부의 유한요소 해석결과로 얻어지는 접촉력을 외력으로 하여 판재의 변형양상을 예측함으로써 모사하였다. 판재는 알루미늄으로 하였고 변형거동은 변형경화 효과를 가진 탄소소재로서 특성화되어 ABAQUS<sup>(11)</sup>로 해석되었다. 변형된 판재부의 형상은 다시 고무패드부의 변형과 접촉해석에 사용되었고, 이러한 반복과정을 통하여 성형과정에 대한 수치해를 구했다.

고무 패드 성형과정의 실험을 위해 먼저 적절한 고무 구성모델과 그 계수를 구하기 위한 실험이 수행되었다.

또한 원형 고무 패드의 변형 실험을 통해 성형과정동안의 고무패드의 거동을 특성화하였다. 고무패드성형법을 위한 형상 다이들과 실험장치가 실제적인 고무패드 성형공정을 모사하기 위해 고안되었고 각 형상 다이들에 대한 실험결과가 유한요소해석의 결과와 비교되었다. 비교결과 수치해와 실험결과는 좋은 일치치를 보였다. 또한 판재 두께에 따른 성형 압력분포의 영향 및 고무의 재질과 모델, 고무의 치수에 따른 성형 압력의 변화가 비교, 논의되었다.

## 2. 고무 패드의 유한 요소 모델링

### 2.1 초탄성체 유한요소 해석

고무재료와 같은 비압축성 재료는 초탄성체로서 그 거동은 변형에너지 함수로 표현된다. 이 변형 에너지 함수  $W$ 는 Cauchy-Green 변형 텐서(deformation tensor)의 불변량  $I_1, I_2, I_3$ 의 함수로 표시된다. 이때 비압축성 재료의 경우  $I_3$ 는 1의 값을 가짐으로  $W$ 는  $I_1, I_2$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 비압축성 제한조건을 벌칙법으로 처리한, 초탄성체의 전체 포텐셜(potential)은 다음과 같이 나타낸다.

$$\Pi = \int_V W(I_1, I_2) dV + \int_V \frac{1}{2\epsilon} U(I_3)^2 dV - \int_S t \cdot u dS \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$  은 벌칙계수,  $U$ 는 제한함수(Constraint function) 또는 벌칙함수,  $t$ 는 표면력,  $u$ 는 변위벡터이다.

식 (1)의 적용을 위해서는 비압축성 거동을 효과적으로 처리하기 위한 제한함수를 적절히 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 제한 함수로 Haggbladh<sup>(6)</sup>에 의해 제안된

$$U(I_3)_{penalty} = \ln(I_3)/2 \quad (2)$$

형태를 사용하였다. 또한 벌칙계수  $\epsilon$  값을 평가하기 위해서 Peeken<sup>(6)</sup>에 의해 제안된 포아송비와 벌칙계수와의 관계를 사용하였다. 이 관계를 통해 포아송비에 따른 벌칙계수값을 조정함으로써 약간의 압축성을 가진 고무에 대한 해석에도 적용하였다.

Oden등은 벌칙법의 안정성에 대한 일반적인 조건을 제시하였다. 이 조건은 Ladyshenskaya-Brezzi-Babuska 또는 줄여서 LBB조건이라 불리운다<sup>(7)</sup>. 이 조건은 변위장과 정수압장의 에너지 norm의 식의 형태로 표현되

고, 이 식을 만족시키는 속도장과 압력장 및 벌칙항의 적분차수는 벌칙법의 안정성을 보장한다. 에에따라 본 연구에서는 벌칙법의 안정성을 보장하기 위해 LBB조건을 만족시키는 변형장과 적분 차수를 사용하였다.

### 2.2 변형 에너지 함수

고무의 응력-변형률관계는 변형에너지 함수 W로부터 유도되는데 이러한 변형 에너지 함수의 형태는 아주 다양하다. 본 연구에서는 그 중 가장 널리 사용되는 일반화된 Mooney-Rivlin모델(Generalized Mooney-Rivlin model)을 사용한다.

일반화된 Mooney-Rivlin 모델은 연신을 불변량의 함수로 표현되며, 무변형시 응력이 0이 되도록 보장된 변형 에너지 함수<sup>(8),(9)</sup>는 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$\bar{W}(I_1, I_2, I_3) = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{s=0}^{\infty} C_{rs} (I_1 - 3)^r (I_2 - 3)^s - (2C_{10} + 4C_{01}) \frac{1}{2} \ln(I_3) \quad (3)$$

여기서  $C_{rs}$ 는 재료계수들이다. 식 (3)에서  $I_1, I_2$ 의 선형항만을 취한 형태는 단순 Mooney-Rivlin모델 또는 1차모델이라고 불리며 일반적으로 가장 널리 사용되고, 식 (3)의 3차 급수전개 형태는 3차 모델이라고 불리고 연신율이 큰 영역의 예측에 가장 좋은 결과를 보이는 것으로 알려져 있다<sup>(12)</sup>.

### 2.3 접촉이론

접촉력 계산을 위해서는 벌칙법을 사용하였다. 벌칙법은 타격 절점과 표적 선분 사이에 가상의 스프링력이 작용하는 것으로 해석하는 방법으로서 계산이 단순하다는 장점이 있다. 벌칙법에 의한  $n+1$ 단계 ( $t + \Delta t$  시간)에서의 접촉력 계산은 다음과 같다. 먼저  $n+1$ 단계에서 표적부에 타격 절점이 침투할때(즉  $l_c > 0$ 일때), 타격절점에 작용하는 수직 접촉력은 수직 침투량  $l_c$ 에 벌칙 상수  $\epsilon_c$ 를 곱한 다음과 같은 식으로 결정된다(Fig.1 참조).

$$f_{n+1}^{nc} = -\epsilon_c l_{c(n+1)} \quad (4)$$

식 (4)에 따른 절점 하중 벡터는 다음과 같이 결정된다<sup>(10)</sup>.

$$P_{\alpha(n+1)} = -K_{\alpha} u - P_{\alpha(n)} \quad (5)$$

여기서

$$K_{\alpha} = \sum_m [Q_c^T n_{N(n+1)} \epsilon_c n_{N(n+1)}^T Q_c]_m \quad (6)$$

$$P_{\alpha(n)} = \sum_m [Q_c^T n_{N(n+1)} \epsilon_c l_{c(n)}]_m \quad (7)$$

로 구하여지고,  $Q_c$ 는 접촉절점들의 변위벡터  $u_c = [u_x^h, u_y^h, u_x^{t,1}, u_y^{t,1}, u_x^{t,2}, u_y^{t,2}]$ 에 대응되는 접촉 절점에 대한 형상 함수 행렬로서  $Q_c = \begin{bmatrix} -1 & 0 & (1-l_N) & 0 & l_N & 0 \\ 0 & -1 & 0 & (1-l_N) & 0 & l_N \end{bmatrix}$ 로 정의되고,  $m$ 은 접촉 절점의 개수를 나타낸다(Fig.1 참조). 이때 표적 선분에 작용하는 힘은 접촉 절점에 작용하는 힘을 표적선분의 양쪽 절점에 배분시킴으로써 구하여진다.

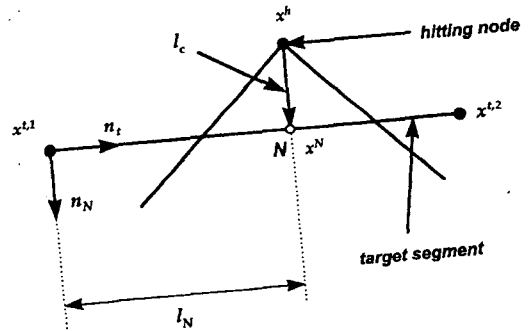


Fig. 1 Target segment and hitting node in contact algorithm

위의 접촉처리를 기초로 하여 고무부에서 계산된 접촉력을 판재부로 넘겨주어 판재부의 변형은 ABAQUS<sup>(11)</sup>를 사용하여 계산하고, 계산된 형상을 다시 고무 프로그램으로 넘겨주는 방식의 가압에 따른 고무부의 접촉처리의 반복적인 과정을 통하여 고무와 판재간의 변형과정의 모델링을 시도하였다. 이 방법에서는 고무부와 판재부에 대해 각 시간 단계마다 서로 독립적으로 계산이 이루어지므로 각 반복마다 계산이 이루어지는 완전한 고무-판재 통합 프로그램에 의한 계산결과에 비해 오차가 존재할 수 있다. 그러나 시간증분이 충분히 작은 경우 그 오차는 크게 감소하고 이에따라 실용적인 해를 얻을 수 있다.

### 2.4 Solution scheme

접촉문제를 고려한 유한요소해석은 다음과 같은 형태로 요약된다.

$$(K_L + K_{NL} + K_\alpha)\Delta U = R - F - P_\alpha \quad (8)$$

여기서 이때  $K_L$ 과  $K_{NL}$ 은 각각 강성 행렬의 선형항과 비선형항이며  $R$ 은 외력벡터  $F$ 는 요소응력에 증가하는 절점응력 벡터이고  $K_\alpha$ 와  $P_\alpha$ 는 각각 식 (6),(7)로 표현된 접촉 강성행렬 및 접촉력 벡터이다<sup>(10),(13)</sup>. 이때  $\Delta U$ 는 구하려는 변위벡터의 증분이다. 위의 비 선형 방정식을 수치적으로 풀기위해 Full-Newton 방법에 기초를 둔 반복법이 적용되었다.

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 재료 특성화

큰 연신을 특성 및 적절한 경도와 좋은 내찢김성을 가지고 있는 상용 우레탄 고무 ADIPRENE L-42가 패드부의 재료로 사용되었다. 이 재료에 대해 식 (3)에 나타난 변형 에너지 함수의 재료상수를 구하기 위해서 본 연구에서는 단순인장, 단순압축, 순수전단의 3가지 시험을 실시하였다. 제시된 시험과 곡선접합 방법을 통하여 두 가지 다른 성분의 고무에 대해 재료계수를 구하였다. 첫 번째 종류의 고무 (Type 1)에 대한 재료 계수로는 Mooney-Rivlin 1차모델에 대해서는  $C_{10}=371.8$ ,  $C_{01}=70.6$ (단위:kPa)로, 3차모델의 경우는  $C_{10}=306.1$ ,  $C_{20}=8.14$ ,  $C_{30}=0$ ,  $C_{02}=3.04$ ,  $C_{01}=96.1$ ,  $C_{11}=-5.20$ (단위:kPa)로 구하여졌고, 두 번째 종류의 고무 (Type2)에 대한 1차모델 계수값은  $C_{10}=617.0$ ,  $C_{01}=229.6$ (단위:kPa)로 구하여졌다.

대표적으로 Type 1 고무에 대한 단순인장 시험결과와 Mooney-Rivlin 1차, 3차모델의 곡선접합 결과 그리고 유한요소 해석결과가 Fig.2 에 비교, 도시되어있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 3차모델의 곡선접합 결과가 1차 모델에 비해 더 시험결과에 근접하였으며, 유한요소 해석 결과는 정확하게 곡선접합결과와 일치하였다.

#### 3.2 고무 패드 변형

반경 12.5cm, 두께 0.4cm의 치수를 가진 고무패드가 실험장치에 맞도록 주어진 모양에 따라 다이캐스트되었다. 또한 고무의 변형 연신을 측정을 위한 원형 격자무늬가 필름을 이용하여 고무패드에 음화현상(negative film printing)으로 인쇄되었다. 고무패드부의 중심점에 다이알게이지를 설치하고 펌프에서 압력을 가하여 압력게이지로부터 나오는 값을 측정하여 압력과 변위의 관계를 구하고 3차원 측정기를 이용하여 변형된 그리드를 측정하였다.

최초 반경이 12.5cm인 고무패드부의 변형해석은 20개의 8절점 축대칭요소와 Type1 고무를 재료상수값을 사용하여 수행되었고, 포아송의 비로는 0.499의 값이 사용되었다. 내압과 중심부에서의 변위사이의 관계에 대한 수치해석결과와 실험결과가 Fig. 3에 도시되었다. 대체로 실험과 비슷한 양상을 보이지만 변위가 큰 부분에서는 실험값이 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 고무의 연화와 관련이 있을 것으로 추정된다. 저차모델과 고차모델간에 실험과 큰 차이를 보이지 않았는데 이는 고무패드의 변형 연신을 영역이 2.5이하의 낮은 연신을 영역이기 때문이

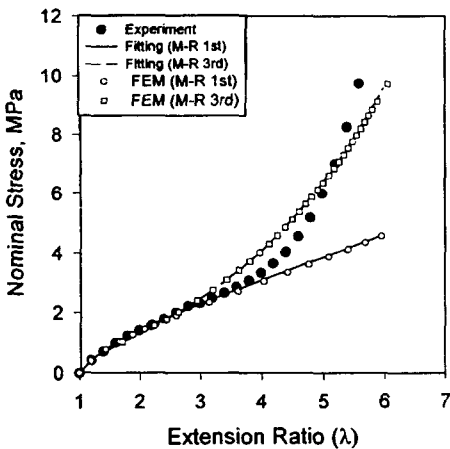


Fig. 2 Fitting and FE results for simple tension test

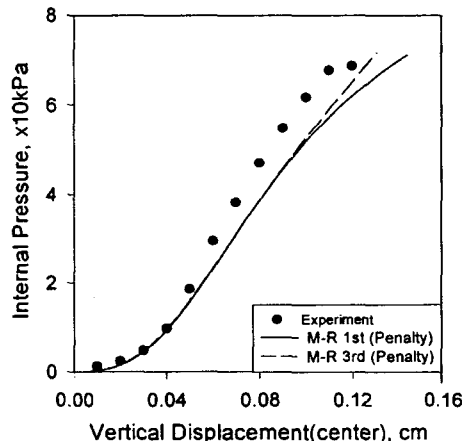


Fig. 3 Comparison of inflation pressure vs. vertical displacement of pad center

다. 가압에 따른 고무 패드의 변형양상이 각각 가해진 내압이  $p=9.8, 19.8, 29.4, 49.0, 70.5$  (단위는 모두  $kPa$ )일 경우에 대해 Fig. 4에 도시되어 있다.

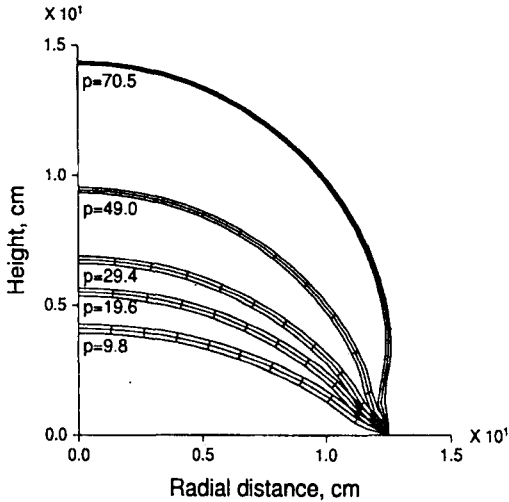
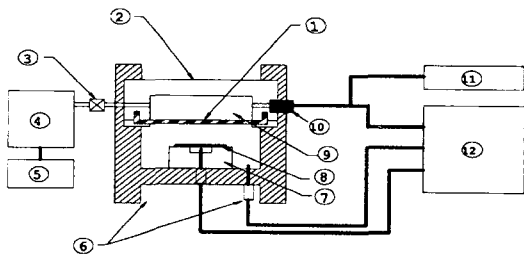


Fig. 4 Inflated profiles of rubber pad

### 3.3 고무패드 판재성형

고무 패드 성형과정의 모사를 위해, 큰 압력 작용에 따른 고무 패드의 이탈방지, 강한 압력을 전달하기 위한 고무 부의 완전한 밀폐, 고무에 걸리는 힘을 충분히 지탱할 수 있는 압력용기의 설계의 사항을 고려하여 실험장치를 개발하였고 그 개략도는 Fig. 5에 나타나 있다. 이때 PC를 통한 압력과 변위간의 관계측정을 위해 압력용기 부에는 압력 게이지를, 형상 다이(form die)에는 LVDT를 연결하여 data acquisition board를 통해 PC와 연결하였다.



① Rubber Pad ② Pressure Die ③ Valve ④ Pump ⑤ Reservoir ⑥ LVDT ⑦ Form Die ⑧ Sheet metal ⑨ Oil ⑩ Pressure Transducer ⑪ Power Supply ⑫ PC

Fig. 5 Schematic of experimental set-up for rubber pad forming process

형상 다이는 성형하고자 하는 모양을 가진 다이로서 일반 성형공정에 있어서는 두 개의 형상 다이가 필요하지만 고무패드 성형 공정에 있어서는 한쪽 다이부의 역할은 고무가 담당하므로 다른 한 쪽의 형상 다이만이 필요하다. 본 실험에서 Fig. 6에 나타난 2가지 종류, 즉 반구형(Spherical cavity type) 및 실린더형(Cylindrical cavity type)의 형상 다이를 제작하였다

성형대상 판재로는 알루미늄 판재를 사용하였고, 0.8mm에 해당하는 표준시편에 대한 단순 인장 시험을 통해 응력-변형을 관계를 구하였다. 이러한 실험결과로 구하여진 관계는  $\sigma = 151.1 \epsilon^{0.029} MPa$ 이고, 탄성계수  $E = 662.7 GPa$ 이다. 판재시편의 초기 치수는 두께 0.6, 0.8mm와 지름 10cm이며, 원형다이로 절단되어 제작되었다. 또한 판재 시편의 압력에 따른 변형양상을 측정하기 위해 에칭(Etching)으로 각 시편에 그리드를 입혔다.

성형실험 과정과 이에따른 압력-변위측정 과정은 다음과 같다. 먼저 판재 시편을 형상 다이에 부착한 후 밀폐역

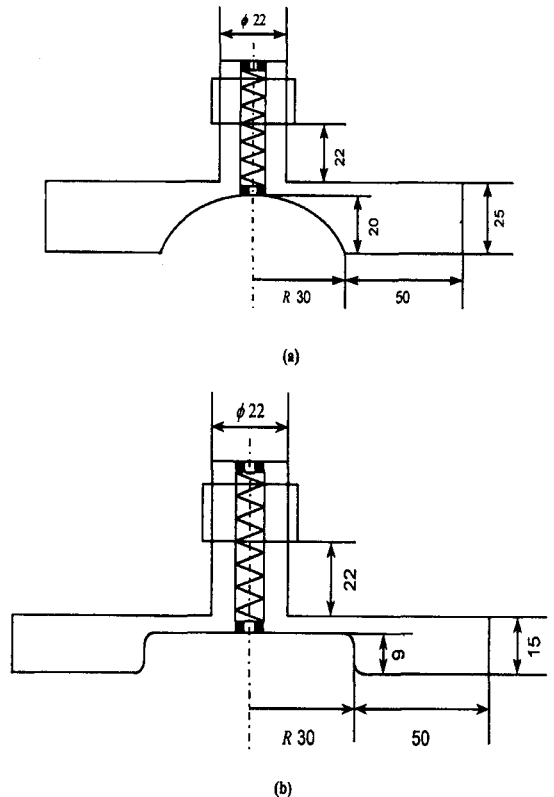


Fig. 6 Dimensions of form dies (a) Spherical cavity type (b) Cylindrical cavity type

할을 하는 다이로 고무패드부와 형상 다이부를 완전히 밀폐시킨다. 이후 유압펌프를 통해 압력을 가압하면서 PC의 data acquisition board에 연결된 압력 게이지와 LVDT로부터 압력과 변위의 데이터를 받아서 data acquisition software를 통해 압력과 변위간의 그래프를 작성한다(Fig. 5 참조). 또한 각 압력에 따른 판재의 변형모양을 관측하기 위해 미리 정한 압력에 도달했을 때 가압을 멈추고 시편을 꺼내어 그리드 측정장치를 통해 변형모양을 측정하도록 하였다.

반구형 형상 다이를 사용한 경우 각 압력 단계에 따른 고무패드 성형 과정의 시뮬레이션 결과는 Fig. 7에 도시되어 있다. 이때 사용된 마찰계수값은 0.2이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 성형과정 초기에는 고무가 원형으로 부풀어 중심부부터 판재에 접촉하기 시작하여 이후 압력이 100kPa 이상에서는 고무가 밀폐다이에 완전히 밀착되어

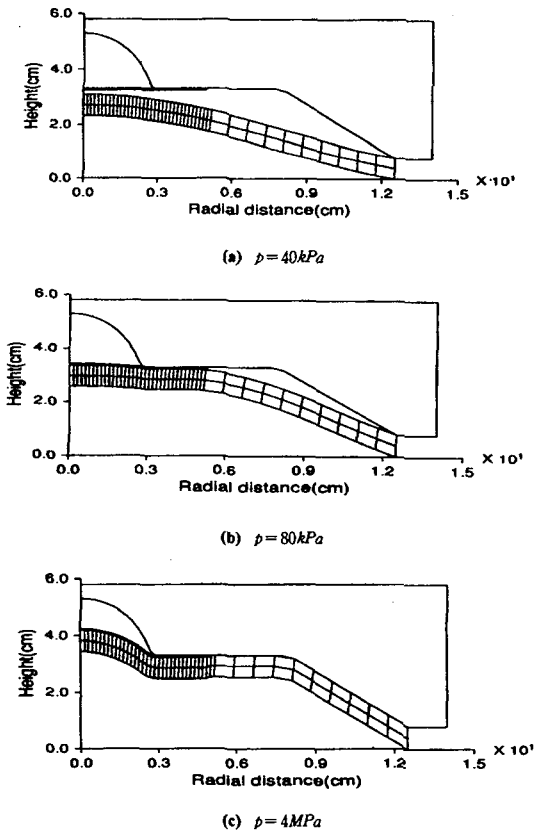


Fig. 7 FE simulation of rubber pad forming for the spherical cavity type die (thickness of Al sheet = 0.8mm)

판재부에 압력을 집중적으로 가하여 판재를 성형한다. 시편의 두께가 0.6 및 0.8mm 일때 고무패드에 가해지는 압력과 시편 중심부의 변위와의 관계에 대한 실험 및 해석결과가 비교되어 Fig. 8, 9에 도시되었다. 실험과 해석의 결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 변형초기와 파단지점부에 오차가 발생했는데 이는 실험시 큰 힘의 전달에 따른 덮개 다이의 변형, 판재 및 다이간의 마찰 등의 차이에 기인한다. 성형압력에 따른 알루미늄 시편의 변형률 분포가 원주방향과 두께방향에 대해 Fig. 10, 11에 도시되었다.

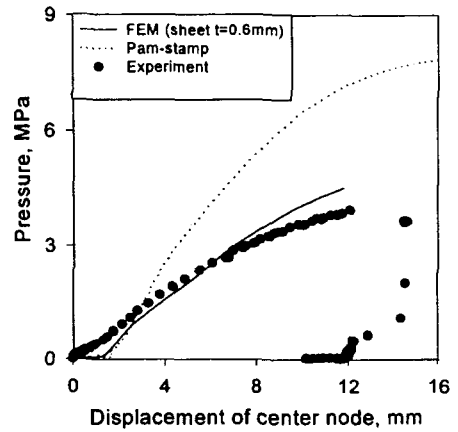


Fig. 8 Computed and measured vertical displacements of blank center (thickness of Al sheet = 0.6mm)

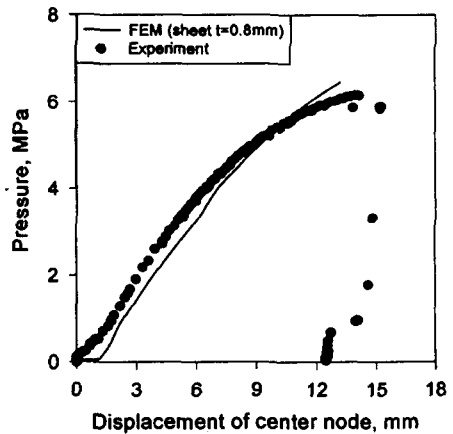


Fig. 9 Computed and measured vertical displacements of blank center (thickness of Al sheet = 0.8mm)

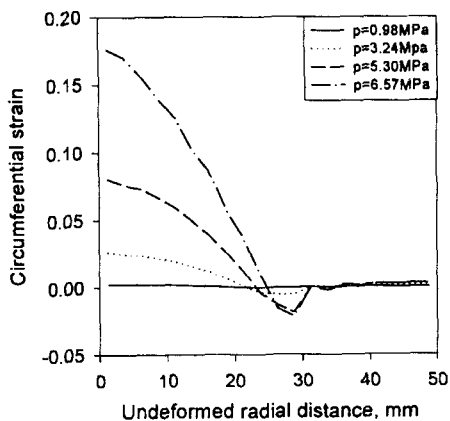


Fig. 10 Radial distribution of circumferential strain (thickness of Al sheet = 0.8mm)

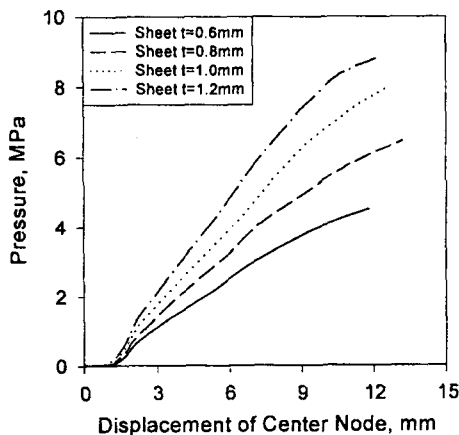


Fig. 12 Computed vertical displacements of blank center according to various blank thicknesses

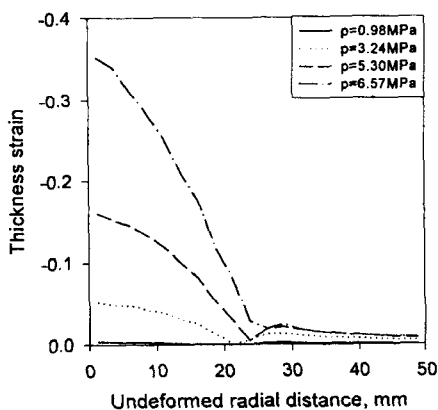


Fig. 11 Radial distribution of thickness directional strain (thickness of Al sheet = 0.8mm)

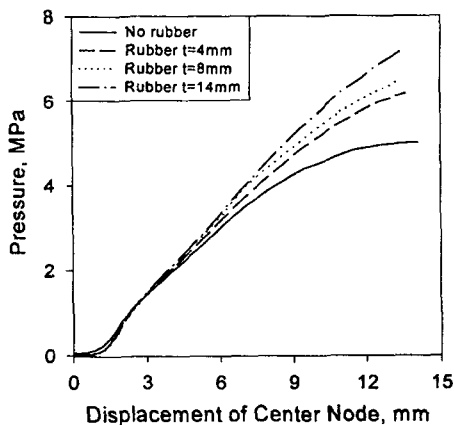


Fig. 13 Computed vertical displacements of blank center according to various rubber thicknesses

판재의 두께에 따른 성형압력의 영향을 고찰하기 위해 판재시편의 두께가 각각 0.6, 0.8, 1.0, 1.2mm 경우 성형압력에 따른 시편 중심부의 변위를 Fig. 12에 도시, 비교하였다. 시편중심부 변위가 12mm일 때 소요되는 압력은 각 두께에 대해서 각각 4.5, 6.0, 7.7, 8.7MPa의 값을 보였다. 그림에서 볼 때 판재의 두께의 증가에 대해 동일한 변위의 변형을 가져오기 위한 성형압력은 거의 선형적으로 비례하여 증가함을 확인할 수 있다.

고무패드의 두께에 따른 성형압력의 영향은 Fig. 13에 비교되어 있다. 그림에는 고무패드의 두께가 각각 4.0, 8.0, 14.0mm일 경우와 고무패드가 없이 판재만에 일정 유압을 가한 경우에 따른 성형 해석 결과들이 서로 비교

되었다. 동일한 가압력에 따른 판재부의 변위는 고무패드의 두께가 얇을수록 큰 값을 보이고, 패드부가 없이 직접 유압으로 판재를 성형하는 경우에는 동일한 가압력에 대해 가장 큰 판재부의 변위값을 보였다. 이는 고무패드가 얇을수록 고무내부에 가해지는 압력이 판재에 전달되는 것이 더욱 용이하기 때문에 발생하는 현상이다. 그러나 고무패드 두께의 증가에 대해 동일한 변위를 가져오기 위한 성형압력의 증가의 폭은 그리 크지 않음을 볼 수 있다. 그러므로 효과적인 판재 성형을 위한 고무패드의 두께값에 대한 선택은 성형압력의 조절의 관점에서보다는 고무의 파단 및 판재의 성형성의 관점에서 결정하는 것이 필요하다. 즉 고무가 두꺼울수록 성형시 고무의 파단현상을

억제하고 판재의 주름발생을 띄우는 장점이 있는 반면, 고무 변형이 용이하게 이루어지지 않고 구석부분 등의 변형전달이 용이하지 않은 단점이 있으므로 이러한 점들이 고려되어야 한다.

고무 모델에 따른 성형압력을 고찰하기 위해 Type 1의 고무에 대한 Mooney-Rivlin 1차모델, 3차모델과 더 경한재질의 고무 (Type 2)에 대한 Mooney-Rivlin 1차모델 등의 세 경우를 적용하여 해석하였고 그 응답을 Fig. 14에 비교, 도시하였다. Mooney-Rivlin의 1차와 3차모델간의 응답차이는 거의 없었으며, 다른 재질의 고무를 사용한 경우의 응답도 큰 차이를 보이지 않았다. 그러므로 이와같이 고무가 완전히 밀착하여 성형하는 공정에서는 고무재질의 차이가 성형압력과 큰 관련이 없음을 알 수 있다.

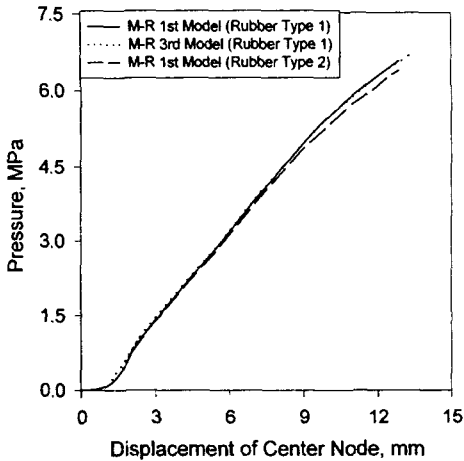


Fig. 14 Computed vertical displacements of blank center according to various rubber models

실린더형 형상 다이를 사용한 경우 각 압력 단계에 따른 고무패드 성형 과정의 시뮬레이션 결과는 Fig. 15에 있다. 이때 사용된 마찰계수값은 0.2이다. 또한 고무패드에 가해지는 압력과 시편 중심부의 변위와의 관계에 대한 실험 및 해석결과가 판재의 두께가 0.6mm일 경우 Fig. 16에 비교되었고, 판재가 형상 다이의 아랫면에 접촉한 후 압력에 따른 성형 시편의 다이와의 접촉 반지름의 관계는 Fig. 17에 비교되었다. 압력이 4.5MPa이하에서는 실험과 해석 결과가 거의 일치하였고 그 이상의 압력에서

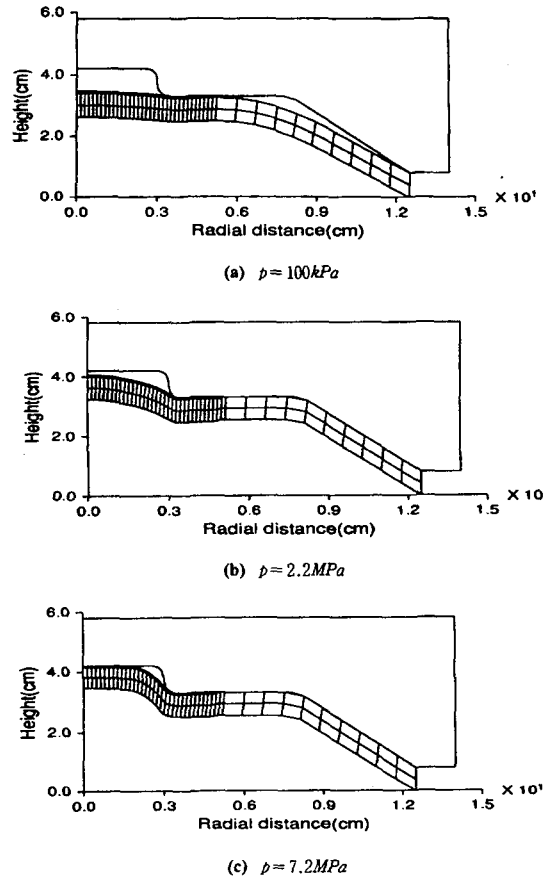


Fig. 15 FE simulation of rubber pad forming for the cylindrical cavity type die (thickness of Al sheet = 0.6mm)

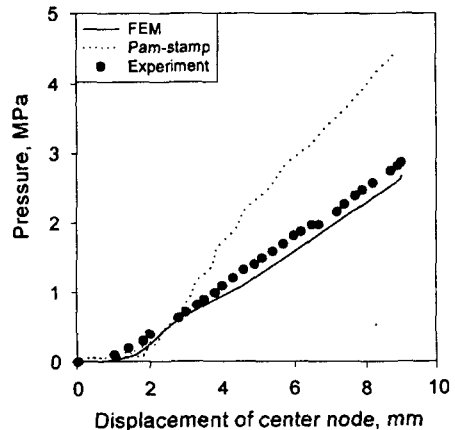


Fig. 16 Computed and measured vertical displacements of blank center ( thickness of Al sheet = 0.6mm)



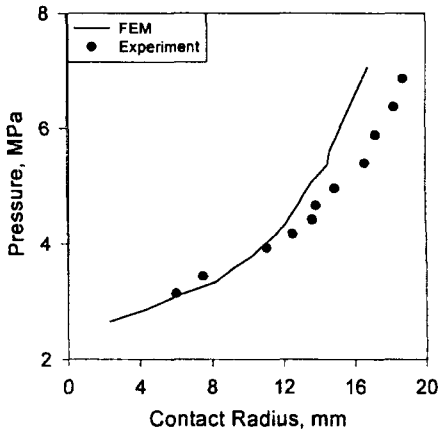


Fig. 17 Computed and measured contact radius of blank (thickness of Al sheet = 0.6mm)

는 실험의 경우가 해석에 비해 동일한 압력에서 변형이 크게 나타나는 현상을 보였다. 이는 해석과 실험조건간의 마찰계수값의 차이, 동적 효과에 대한 고려 등의 차이에서 나타나는 현상이라고 고찰된다.

이때 본 프로그램으로 해석된 결과를 상용 유한요소 소프트웨어 PAM-STAMP<sup>(14)</sup>를 사용하여 해석한 결과와 비교하였다. PAM-STAMP는 외연 시간 적분 기법을 적용한, 3차원 성형공정 해석에 널리 사용되는 상용 프로그램중 하나이다. PAM-STAMP는 동적 해석에 유용한 외연법을 기초로 하고 있기 때문에 가압과정이 느린 본 성형공정을 해석하기 위해서는 적절한 가압 기술기의 선택이 요구된다. 고무패드 성형과정의 해석을 위해서 고무와 판재의 접촉이전은 1초에 10MPa의 기술기를, 고무와 판재접촉이후는 1초에 100MPa의 기술기로 채택하였고 이에따른 해석 결과를 실험 및 본 프로그램에 의한 해석 결과와 비교하여 반구형 형상 다이에 대해서는 Fig. 8에, 실린더형 형상 다이에 대해서는 Fig. 16에 도시하였다. 그림에서 보듯이 동일한 변형을 이루는데 있어서 PAM-STAMP는 압력을 상당히 과대평가 하였다. 뿐만 아니라 소요되는 계산시간도 본 프로그램에 비해 10~20배 더 소요되었다. 이러한 현상을 줄이기 위해서는 더욱 미세한 메시를 사용하고 더욱 느린 속도의 가압 조건을 부여해야 하는데, 이러한 조건에 대한 해석에는 상당한 계산시간이 요구되므로 PAM-STAMP의 사용은 가압 속도가 급속하지 않은 축대칭 고무패드 성형법의 해석에 있어서는 그 유용성이 떨어진다고 볼 수 있다. 그러나 일반적인 3차원

성형 공정에 대한 해석에 대해서는 외연법의 적용이 있음을 보일 수 있고 이에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

고무패드를 이용한 판재성형의 유한요소 해석에 대한 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약, 결론을 내릴 수 있다.

첫째 고무의 변형거동을 예측할 수 있는 축대칭 유한요소 코드를 개발하였고 고무 패드 성형법에서의 패드부의 변형 해석에 적용하였다. 또한 고무 패드부 변형 실험장치를 개발하여 그 실험 결과를 해석결과와 비교하였다. 비압축성의 해석을 위한 벌칙법에서의 벌칙계수값을 위한 포아송비는 0.499값이 적합했다. 이때 고무 패드의 변형은 큰 연신율을 가지지 않으므로 Mooney-Rivlin의 저차(1차)모델과 고차(3차)모델의 응답은 큰 차이를 보이지 않았다.

둘째 고무패드 성형장치를 제작 실험하였고 두가지 형태의 축대칭 다이를 통한 성공적인 판재성형을 이루었으며 개발된 유한요소코드를 통한 해석 결과와 실험 결과를 비교하였고, 두 결과사이에 전반적인 일치성을 보였다. 또한 실험과정의 실제 고무 변형양상에 근사한 변형양상을 얻을 수 있었다. 이를 통해 개발된 본 프로그램(개발된 고무해석용 코드와 판재해석용 상용코드가 연결된 loosely coupled 프로그램)을 이용하여 2차원 축대칭 고무패드 성형 해석의 모사에 대한 유용성을 검증할 수 있었다

셋째 판재두께에 따른 성형압력의 고찰을 통해서, 판재 두께의 증가에 따른 동일 변위의 변형을 가져오기 위한 성형압력은 거의 선형적으로 비례하여 증가함을 확인하였다.

넷째 동일한 가압력에 따른 판재부의 변위는 고무패드의 두께가 얇을수록 큰 값을 보이고, 패드부가 없이 직접 유압으로 판재를 성형하는 경우에는 가장 큰 판재부의 변위값을 보였다. 이에따라 고무패드의 두께에 따른 성형압력 영향 및 적절한 패드치수에 대한 조건을 논의하였다.

다섯째 고무가 완전히 밀착하여 성형하는 공정에서는 고무재질 및 고무모델의 차이가 성형압력과 큰 관련이 없음을 보였다.

여섯째 본 프로그램을 이용한 축대칭 해석을 Pam-stamp를 이용한 해석과 비교하였다. 가공 속도가 급격하지 않은 고무패드 성형과정에 있어서는 본 프로그램이

Pam-stamp보다 훨씬 효과적임을 밝혔다. 그러나 일반적인 3차원 해석의 경우에는 그 수렴성과 비용에 대한 상호보완 관계가 있으며 이에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

### 참고문헌

1. ASM international, Metal Handbook 9th ed. edited by Semiatin, S. I. , Vol. 14, pp. 605-615, 1988.
2. Holzner, M. and Mannl, V., "Mechanics of drawing with rubber pads," Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1151-1157, 1988.
3. Haug, E., Lefebvre, D., Dammak, Y., Taupin, L., and Luca, P. "Numerical simulation of industrial sheet forming processes with PAM-STAMPTM," PAM Users conference in Korea 95, pp. 205-222, 1995.
4. Shin, S. J., Oh, S. I. and Lee, T. S., "Finite Element Investigation of pad deformation in rubber-pad sheet metal forming process," 3rd APCOM Vol. 1, pp. 141-146, 1996.
5. 신수정, 이태수, 오수익, "고무 패드 성형법의 유한 요소 모델링," 대한기계학회 춘계학술대회, A권, pp. 576-582, 1997.
6. Rivlin, R. S., "Rheology Vol.1 - Large elastic deformations," Academic Press. New York, 1956.
7. Gadala, M. S., "Alternative methods for the solution of hyperelastic problems with incompressibility," Comput. Struct. , Vol. 42, pp. 1-10, 1992.
8. Haggbland, B. and Sundberg, J. A., "Large strain solutions of rubber component," Comput. Struct., Vol. 17, pp. 835-843, 1983.
9. Peeken, H., Dopfer, R. and Orschall, B., "A 3-D Rubber material model verified In a user-supplied subroutine," Comput. Struct., Vol. 26, pp. 181-188, 1987.
10. Zhong, Z., "Finite element procedures for contact-impact problems," Oxford University Press, 1993.
11. ABAQUS theory and user manual, Hibbitt Karleson & Sorensen Inc., 1994.
12. James, A. G., Green, A., and Simpson, G. M., "Strain energy function of rubber. I. Characterization of gum vulcanizates," J. Appl. Poly. Sci., Vol. 19, pp. 2033-2058, 1975.
13. Bathe, K. J., "Finite element procedures in engineering in engineering analysis," Prentice-Hall, 1996.
14. Pamstamp Theory and user manual, ESI, 1990.