

고탄성체를 이용한 실린더 튜브의 축관 성형 연구

나원기¹·이근안[#]·이형욱¹·최석우¹·임성주¹·우창수²

Analysis of Cylindrical Tube Forming Process Using Polyurethane

W. K. La, G. A. Lee, H. W. Lee, S. Choi, S. J. Lim, C. S. Woo

(Received February 27, 2006)

Abstract

The elastomer forming process was employed for many operations which included piercing, sheet metal forming and tube metal forming process. This paper presents cylindrical tube forming process using rubber material such as polyurethane. For elastomer forming process, tensile tests at room temperature were performed to obtain the material properties of polyurethane and tube. In particular, biaxial tensile test were carried out to obtain the coefficient of strain energy function of the rubber material. Finite element analyses were also carried out to investigate the forming load and formability of tube. It was compared with the experimental results about the forming load and the formability of tube. From these results, it was investigated a forming process to decrease the forming load for elastomer forming process

Key Words : Elastomer, Elastomer Forming, Polyurethane, Tube Forming, Finite Element Analysis

1. 서 론

최근 자동차 산업은 국내외 시장에서의 경쟁력을 확보하고, 다양한 소비자의 요구에 신속하게 대응하기 위해 개발비용의 절감과 함께 신차종 개발기간의 대폭적인 단축을 추진하고 있다. 즉 부품의 고품질, 고신뢰성을 갖추면서도 비용 상승 요인을 최대한 억제하거나 오히려 비용 절감이 가능하도록 하는 기술 혁신의 필요성이 증대되고, 기능적으로 관련이 있는 일련의 부품군을 통합하여 시너지 효과를 극대화하는 부품 모듈화가 요구되고 있다. 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 기존의 스틸랙 튜브, AI 다이캐스팅 랙하우징, 그리고 AI 주물 벨브하우징의 세부품으로 조립되는 스티어링 어셈블리 부품을 스틸 랙 하우징

(Steel rack housing) 일체형으로 개발하는데 있어서 스틸랙 튜브와 AI 다이캐스팅 랙하우징을 일체화한 랙튜브(Rack tube)를 위한 성형공법을 개발하고자 한다.

일반적으로 튜브 성형을 위한 대표적인 공법으로는 하이드로 포밍(Hydro-forming)[1], 스웨이징(Swaging) 그리고 고탄성체 성형 공법(Elastomer forming) 등이 쓰이고 있다. 이 중에서 본 연구에서 개발하고자 하는 고탄성체 성형 공법은 피어싱, 블랭킹, 벤딩 및 딥드로잉 공정에 많이 사용되었던 고무 성형법(Rubber forming method)으로, 하이드로 포밍과 스웨이징 공정에 비교하여 성형 가능한 형상이 상대적으로 단순한 범위로 국한될 수 있는 단점이 있는 반면에 초기 설비 투자비와 생산성 등이 우수하기 때문에 저원가 고효생산성을

1. 한국생산기술연구원 디지털성형공정팀
2. 한국기계연구원 구조연구부
교신저자 : 한국생산기술연구원 디지털성형공정팀,
E-mail : galee@kitech.re.kr

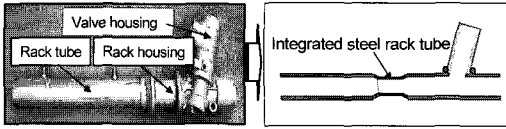


Fig. 1 Steering assembly part

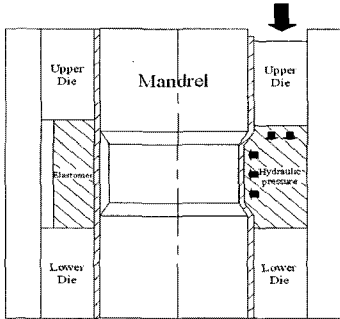


Fig. 2 Schematic diagram of elastomer forming

요하는 본 연구 대상품의 생산에 적합한 기술로 고탄성체를 통해 정수압을 가하여 튜브를 성형하는 방법이다.

Fig. 2 에 나타난 고탄성체 성형 공정을 이용하여 랙튜브의 축관 성형에 관한 연구를 수행하고자 고탄성체의 특성평가 및 튜브 소재의 기계적 성질을 파악하였다. 또한 성형공정 시 튜브 및 고탄성체의 성형성 검토를 위하여 상용 프로그램인 ABAQUS/Standard[2]를 이용하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하였고 금형과 펀치의 설계를 통한 튜브의 성형실험과 해석결과를 비교분석을 하여 공정 개선방향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 고무와 튜브의 물성치

2.1 고무의 특성

일반적인 고무재료는 탄성 대변형, 회복, 완충과 압력의 균일한 전달 등의 특성을 가지고 있어 성형을 위한 고무를 선정하기 위해서는 기계적인 변형에 대한 특성 변화의 이해가 필수적이다[3]. 특히 본 연구에서 사용된 고무는 경도 90HD를 가지고 있는 우레탄으로, Fig. 3과 Fig. 4와 같이 단축/이축 인장시험을 통하여 인장강도, 신율과 변형률 범위에 따른 응력-변형률 선도를 얻었다.

인장 시험으로 얻어진 응력-변형률을 변형률 에너지 함수로 구해진 응력-변형률의 관계식을 Curve

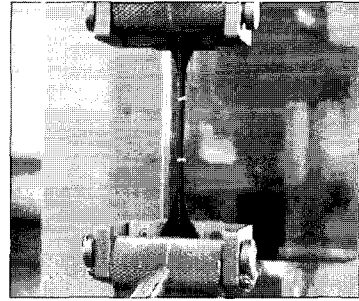


Fig. 3 Uniaxial test for material property of polyurethane

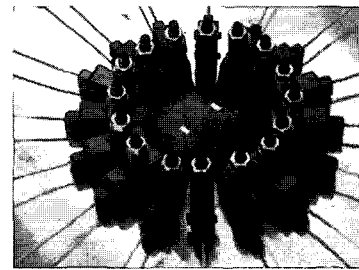


Fig. 4 Biaxial test for material property of polyurethane

fitting 하여 비교한 결과, 고무의 거동특성에 적합한 식(1) 과 같은 변형 에너지 함수 Ogden 3rd 을 선정하여 그 계수들을 Table 1 에 나타내었다[4~5].

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3), n = 3 \quad (1)$$

Table 1 The mechanical properties of used rubber

| Rubber | Urethane (90 HD) | |
|--|-----------------------|-----------------------|
| The range of strain | 50% | |
| Strain energy function | Ogden 3 rd | |
| The coefficient of strain energy function (Ogden 3 rd) | μ_1 | 1.98035 |
| | α_1 | 3.50663 |
| | μ_2 | 21.99 |
| | α_2 | 3.25×10^{-7} |
| | μ_3 | 8.3×10^{-7} |
| | α_3 | 0.6021 |

여기서, W 는 에너지 밀도함수, α_i 와 μ_i 는 재료 상수, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주연신비 (Principal extension ratio)이다.

2.2 튜브의 기계적 특성

유한요소 해석에 적용하기 위하여 단축 인장 시험을 통해 튜브의 기계적 특성을 파악하였다. 정확한 연신율을 측정하기 위하여 Extensometer를 사용하였고 측정된 값은 진응력-진변형을 선도로 나타내었으며, 항복응력은 0.2% offset으로 추정하였다. Fig. 5는 튜브의 진응력-진변형을 선도, Table 2는 튜브의 물성치를 나타내었다.

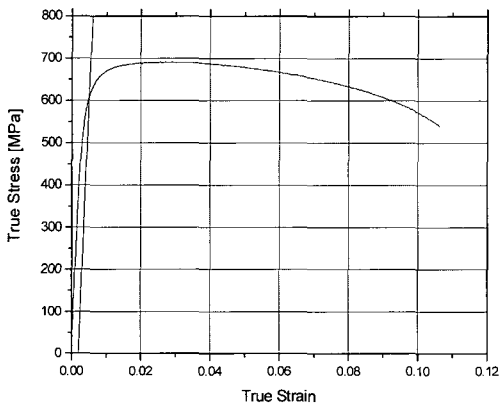


Fig. 5 True stress-strain curve of tube material

Table 2 The mechanical properties of tube material

| | |
|-------------------|---------|
| Young's modulus | 201 GPa |
| Yield strength | 608 MPa |
| Ultimate strength | 691 MPa |

3. 고탄성체 성형을 위한 탄소성 유한요소해석

유한 요소 해석을 통해 튜브의 고탄성체 성형 공정을 설계하고자 Fig. 6과 같이 축대칭으로 유한요소 모델을 구성하였다. 튜브는 탄소성체, 고무는 초탄성체 그리고 금형과 펀치는 강체로 가정을 하였으며, 다이-튜브 사이의 마찰 계수는 0.1, 튜브-고무 사이의 마찰 계수는 0.3으로 가정하였다. 초기 튜브는 외경 44.5mm, 내경 41.2mm, 두께 2.5mm를 가지고 있으며, 성형 하중과 고무의 변형량을 고려한 고무 두께의 결정 및 공정설계를 위해 해석을 수행하였다.

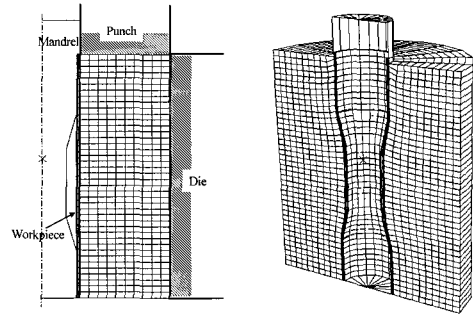


Fig. 6 Initial finite element model for elastomer forming process

Fig. 7은 성형 공정 과정에서 튜브의 변형형상을 보여주고 있으며, Fig. 8은 고무의 두께 20, 55, 그리고 60mm에 따른 성형하중 곡선을 나타내고 있는데, 두께의 변화에 따라 펀치의 변위가 달라지기 때문에 상대적으로 동일한 값인 성형부와 변형된 고무의 부피비를 고려한 해석 후의 성형하중을 나타냈다. 그림에서 보면 초기에는 튜브가 변형을 일으키기 위하여 하중이 상승하다가 펀치의 변위가 약 10% 정도에서 튜브가 성형되면서 완만히 하중이 증가한다. 그리고 펀치의 변위가 약 70% 정도 이르렀을 때 튜브의 코너부를 성형하는 과정에서 하중이 급격히 상승하고 있음을 관찰할 수 있다.

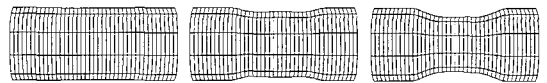


Fig. 7 Deformed shape of tube with elastomer thickness of 2.5mm during elastomer forming process

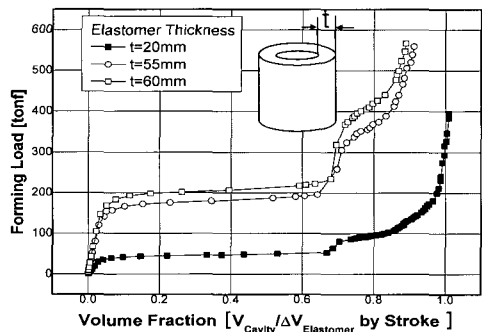


Fig. 8 Forming load according to elastomer's thickness during forming process

특히 두께가 55와 60mm 일 경우는 500톤 이상으로 상승하다가 튜브가 완전히 채워지는 경우에는 1000톤 이상의 하중이 들 것으로 예측되었다. 그러나 고무의 두께가 20mm일 경우에는 약 400톤의 하중이 필요하게 된다.

이상의 결과로부터 튜브 축관시 고무의 두께가 성형하중과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며, 또한 제품 생산시 고무의 반복적인 변형에 따른 고무수명을 고려해서 고무의 두께를 결정해야 한다. 본 연구에서는 프레스 용량 400톤을 기준으로 하중을 최소화하면서 적절한 고무의 변형을 고려하여 보았을 때, 고무 두께가 20mm 정도가 타당함을 알 수 있었고, 이때 펀치의 변위도 약 2mm내에서 성형이 가능할 수 있기에 최종적으로 고무의 두께를 20mm로 결정하였다.

4. 튜브 축관을 위한 성형실험

유한요소해석을 통해 얻은 공정 설계와 고무 20mm의 두께를 토대로 고탄성체 성형 실험을 수행하였다. 성형장비는 성형성 검토를 위하여 양산 장비로 사용할 400톤 프레스를 대신하여 Fig. 9에 나타난 200톤의 Load Cell이 장착된 압축 성형기로 실험하였으며, Fig. 10에 나타난 금형과 펀치 및 고탄성체를 장착하였다. 초기 튜브는 외경 44.5mm, 내경 41.2mm, 두께 1.65mm를 가지고 성형실험을 수행하였다.

실험은 고무의 경도 90HD 로 사용하여 성형 공정에 따른 성형하중과 튜브의 변형 형상을 검토하여 보았다. 성형과정 과정 시 하중의 변화를 Fig. 11에 나타내었고 Fig. 12에는 튜브의 변형 형상을 하중에 따라 나타내었다.

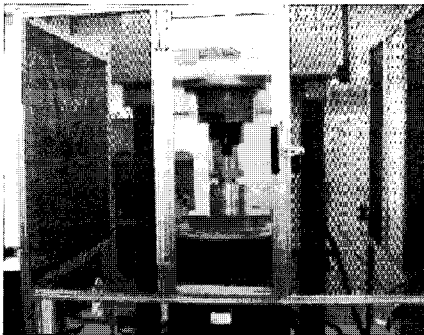


Fig. 9 Equipment for elasto-forming process

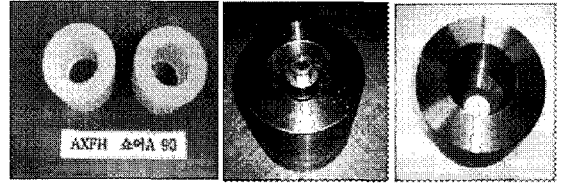


Fig.10 Elastomer, die and punch for elastomer forming process

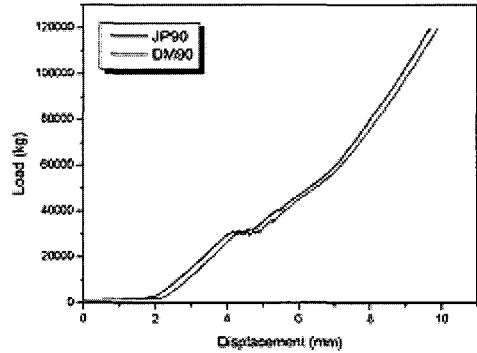
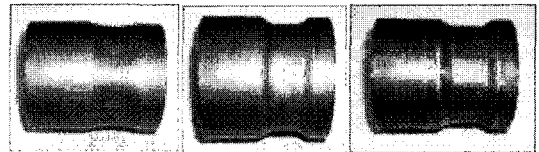


Fig.11 Forming load during forming process according to the elastomer's thickness



(a) 40ton (b) 80ton (c) 120ton

Fig.12 Deformed shapes of tube after elasto-forming process

Table 3 Experimental results

| | | Final product | |
|---------------------------|-------|---------------|------|
| Inner diameter (φ36.19mm) | | 36.2 | |
| Gage length (24mm) | | 24.58 | |
| Ang (30°) | Inner | Up | 26.1 |
| | | Down | 25.2 |
| | Outer | Up | 26.1 |
| | | Down | 25.0 |

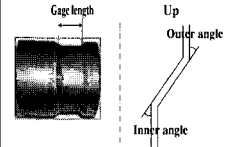


Fig. 12를 보면 하중 40톤에서의 변형 형상을 보면 국부적으로 찌그러진 현상을 볼 수 있다. 이는

소재와 고무 사이의 윤활막의 형성 및 금형과 펀치 사이의 초기간격 등으로 인하여 고무가 완전히 정수압 상태로 가압시키지 못한 점이 원인인 것으로 판단된다. 그러나 하중이 증가하면서 이러한 현상은 감소하면서 120톤 정도에서는 튜브의 축관 성형이 이루어 짐을 볼 수 있었다.

위의 120 톤의 하중에서 성형한 튜브 제품의 정밀도를 파악하기 위하여 축관된 성형부의 길이 축관 지름부와 원래 직경 사이의 성형각도를 측정하여 제품의 Spec.과 비교하여 보았으며 Table 3에 나타내었다.

측정한 결과를 보면 축관에 의한 내경의 지름은 정밀하게 성형되고 있음을 볼 수 있었다. 그리고 축관된 성형부의 길이는 최종형상이 성형되는 120 톤에 이르러 24.58mm 로 실제 Spec.보다 약 2.4%정도 길게 측정되었으며, 이는 성형 후 축관된 부위에서 스프링백 때문에 일어난 것으로 판단된다. 그러나 성형 각도는 120 톤에서도 30°로 성형되어야 하지만 평균적으로 25.6°로 성형되었다. 이는 튜브 축관시 코너부가 완전히 채워지지 않아서 발생한 것으로 확인되었다.

5. 실험과 유한요소해석 결과 비교

Fig. 13은 해석과 실험을 통해 얻은 성형 하중과 변형 형상을 펀치의 변위에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다.

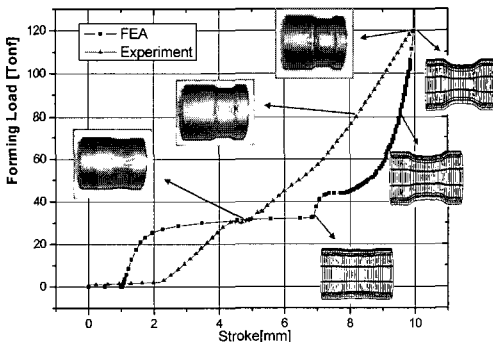


Fig.13 Comparison of the formability of tube after FEA and experiment

성형 실험결과, 하중 변화에 따른 소재의 변형형상과 비교하여 보면 초기에는 금형과 고무의 간격에 의해 빈 공간을 채우는 과정까지 성형하

중이 거의 발생하지 않다가 고무가 빈 공간을 채우는 약 2mm 이상부터 튜브에 압력이 가해지면서 성형하중이 증가한다. 그리고 약 5mm 정도에서 하중곡선에 약간의 진동이 발생하는 구간이 있다. 이때 튜브의 형상을 보면 국부적으로 변형이 일어나고 있다. 이후에는 고무의 변형에 따라 하중 120 톤에서 튜브가 축관되고 있음을 볼 수 있다. 이상과 같은 성형실험 후 튜브의 형상을 보면 초기의 발생한 국부적인 변형이 최종 튜브의 외관에 약간의 자국이 남아 있게 된다. 또한 성형 해석 결과, 하중의 변화에 따른 소재의 변형형상은 초기 고무의 변형에 의해 약 1mm 정도 지난 후부터 하중이 증가하다가 2mm 에서 7mm 정도까지는 하중이 거의 증가하지 않음을 볼 수 있다. 이는 초기 고무의 변형에 의하여 튜브가 축관이 일어나는데 하중의 증가가 있다가, 일단 변형이 일어나고 나면 하중의 큰 변화없이 일정한 양만큼 변형이 발생하기 때문이다. 이후 튜브는 코너부를 형성하기 위하여 하중이 급격히 증가하다가 약 120 톤 정도에서 튜브 코너부분이 약 85% 정도 성형이 됨을 볼 수 있었다.

성형 하중이 120톤 일 때 해석과 실험후 튜브의 성형성을 비교하였고, 성형부의 튜브 내경, 성형 거리, 성형 각도를 측정한 결과가 Table 4에 나타나 있다. 해석과 실험의 비교 결과 하중이 변화되는 과정에서의 해석과 실험결과가 다소 차이가 보이지만 최종 변형된 튜브의 각 부위별 측정치는 최대 오차율 4.4% 정도의 차이를 보이면서 튜브의 변형형상은 어느 정도 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Table 4 Comparison of the formability for FEA and Experiment (Forming load = 120ton)

| | | FEA | Experiment | Error (%) | |
|-------------|-------|--------|------------|-----------|-----|
| Gage length | | 24.582 | 24.572 | 0.04 | |
| Angle | Inner | Up | 26.1 | 27.1 | 3.7 |
| | | Down | 25.2 | 26.3 | 4.2 |
| | Outer | Up | 24.3 | 24.1 | 0.8 |
| | | Down | 26.1 | 25.0 | 4.4 |

지금까지 본 연구에서는 고탄성체인 고무를 이용한 튜브의 축관성형 실험 및 해석을 통하여 성형성을 평가하여 보았고, 튜브 축관 시 코너부위

6. 결론

를 성형하기 위해서는 매우 큰 하중이 필요함을 알 수 있었다. 이는 제품 생산시 큰 프레스 용량과 함께 고무의 수명에도 영향을 줄 수 있기 때문에 하중을 최소화할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다. 즉 고탄성체인 고무로 제품의 80~90% 정도까지 성형을 하고 나서 후공정을 통하여 튜브의 코너부를 최종적으로 원하는 형상으로 성형하는 방법으로 Fig. 14 와 같은 공정을 설계하여 보았다.

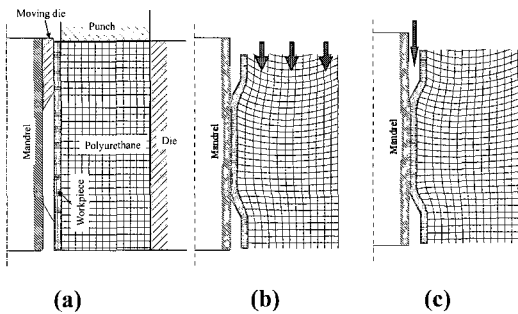


Fig.14 The elastomer forming process using the moving die

Table 5 Load in case of using moving die

| | No use of moving die | Use of moving die | Reduction of load |
|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| Forming load(Tonf) | 277.7 | 145.2 | 47.7% |

그림을 보면 기존의 공정과 다른 점은 일체형 만드렐이 만드렐과 무빙다이(Moving die)로 분리되어 있다. 성형공정은 Fig. 14(b)과 (c)에 나타나 있듯이 펀치로 고무에 변형을 가하여 튜브를 약 90% 정도 성형시킨 후 코너부위를 성형하기 위하여 무빙다이가 하강하여 코너부위를 최종형상으로 변형시킨다. 이상과 같이 성형을 할 경우 Table 5 에 나타난 바와 같이 하중이 약 47% 정도 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나 이러한 방법은 실제 제품 생산을 위한 프레스 작업시 공정이 추가되어 생산성에서 효율이 떨어질 가능성이 있음을 알 수 있었고, 향후 하중과 생산성 등을 고려하여 프레스 설계 및 제작을 통하여 극복할 수 있도록 연구를 수행하고자 한다.

본 논문에서는 고탄성체를 이용한 튜브의 축관을 위해 고무와 튜브의 기계적 특성을 파악하고 유한요소해석을 이용하여 성형 공정을 설계하였다. 이를 실험을 통한 결과와 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 공정 설계 변수 중 하나인 고무의 두께에 따른 공정 결과를 비교하여 고무의 두께가 두꺼울수록 성형하중은 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 고무의 변형량에 따라 수명이 영향을 받을 수 있음을 예측할 수 있었다.

(2) 각 성형 하중에 따른 성형부의 튜브내경, 성형거리, 성형각도를 측정하여 고탄성체 성형 공정의 성형성을 확인하였다.

(3) 해석을 통해 얻은 공정 설계를 실험 결과와 비교하여 공정 설계 방안이 적절하다는 것을 확인하였고, 고무만으로 성형을 할 경우 원하는 튜브 형상을 얻기 위하여서는 매우 큰 하중이 필요함을 알 수 있었다.

(4) 성형하중을 줄이고, 성형성을 확보하기 위하여 무빙다이(Moving die)를 이용한 성형 공정 방법을 제시하였으며, 성형하중이 현저히 감소함을 검토할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 박세승, 손현성, 이영선, 이우식, 김영석, 2002, Hydroformed 튜브 소재의 압축특성에 관한 연구(II), 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 17~20.
- [2] ABAQUS theory and user's manual, 2005, Hibbitt Karles son & Sorensen Inc.
- [3] 신수정, 1998, 3 차원 유한요소 기법을 이용한 고무-금속 복합문제의 해석, 서울대학교 대학원 공학박사학위논문.
- [4] Giuseppe Sala, 2001, A numerical and approach to optimize sheet stamping technologies: part II- aluminium alloys rubber-forming, Material & Design.
- [5] K. C. Valanis, R. F. Landel, 1967, The strain- energy function of a hyperelastic material in terms of the extension ratios, J. of App. Phys., Vol 38, pp. 2997~3003.