

반응표면법을 이용한 알루미늄 튜브 하이드로포밍의 하중경로 최적화

임희택¹·김형종²·김현영[#]

Loading Path Optimization in Aluminum Tube Hydroforming using Response Surface Method

H. T. Lim, H. J. Kim, H. Y. Kim

Abstract

Automotive rear subframe of aluminum tube was developed by using hydroforming process, based on the numerical analysis and physical tryouts. In the previous study, the effect of prebending was evaluated on the basis of forming limit diagram which had been obtained from free bulging, T-shape forming and cross-shape forming, using the developed tube hydroformability testing system. In order to get the sound products, appropriate internal pressure is to be imposed corresponding to the axial feeding. In this study, the loading path, the combination of internal pressure and axial feeding during the process, was optimized to ensure minimum thickness variation and dimensional accuracy, by using response surface method.

Key Words : Aluminum Tube Hydroforming, Loading Path, Internal Pressure, Axial Feeding, Response Surface Method

1. 서 론

최근 자동차 산업은 저연비 및 배출가스감소, 그리고 높은 충돌 안전성 등의 다양한 소비자 요구를 만족시키기 위해 고강성 및 경량화 설계에 역량을 집중하고 있다. 이런 추세에 맞춰 고장력 강판, 알루미늄 합금, 레이저 용접판재(tailor welded blank) 등의 고강성 및 경량화 소재들의 사용이 점진적으로 증가하고 있는 실정이다. 또한 자동차 부품의 경량화 및 공정감소를 위해 튜브를 사용하는 하이드로포밍 공법 등 새로운 제조 기술 개발을 위해 노력하고 있다. 특히 비철계 경량화 금속인 알루미늄 소재와 경량화 가공 기술인 튜브 하이드로포밍 공법을 결합한 알루미늄 튜브 하이드로포밍은 자동차의 경량화를 위해 많은 적용과 연구가 이루어지고 있다[1, 2].

차량 성능 및 중량의 큰 비중을 차지하고 있는 현가장치의 경량화는 매우 중요하다. 자동차 현가

장치는 차량의 승차감, 외부 충돌에 의한 안전성, 주행 차량의 조정 안정성을 담당하는 부품이지만 다른 부품에 비해 경량화가 느리게 진행되고 있다. 그러나 현가 부품의 경량화는 차체를 비롯한 sprung mass의 경량화에 비해 약 2~3배의 연비 향상을 기대할 수 있기 때문에 지속적인 경량화가 요구되고 있는 실정이다. 그리고 현가장치의 경량화 요구에 부합하고자 여러 선진 자동차 업체에서는 점차적으로 중대형 차량의 서브프레임(subframe) 등에 알루미늄 합금을 적용하여 기존 강재 부품보다 약 20~30% 정도의 경량화를 달성하고 있다. 그러나 알루미늄 튜브 하이드로포밍 기술은 부품수와 용접 감소 등으로 차량 경량화에 효과적이지만 알루미늄의 낮은 연성, 높은 스프링백(springback), 낮은 용접성 등 낮은 성형성으로 인해 확관을 약 10% 미만으로 설계해야 한다는 단점을 갖는다. 이와 같이 낮은 확관률로 인해 부품 통합화 및 일체화를 적용하기가 매우 어려운 상황이다[3].

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과
2. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부
교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부
E-mail: khy@kangwon.ac.kr

이러한 상황을 극복하기 위해 알루미늄 소재의 성형한계를 극대화하는 소성이론, 유한요소해석, 재료시험 등 많은 이론적, 해석적, 실험적 연구가 진행되고 있다. 특히 유한요소법을 이용한 해석적 연구 중 하중경로 최적화에 대한 연구는 M. Imaninejad[4], K. Manabe[5] 등에 의해 수행되었으며 성형성 개선에 매우 효과적임을 증명하였다.

본 연구는 최대경사법과 반응표면법을 이용한 알루미늄 튜브 하이드로포밍 공정의 하중경로 최적화를 수행하였다. 그리고 알루미늄 리어 서브프레임의 성형 요구특성을 만족할 수 있도록 목적함수를 정의하였으며 반응표면법을 이용한 성형성 개선 효과를 살펴보았다.

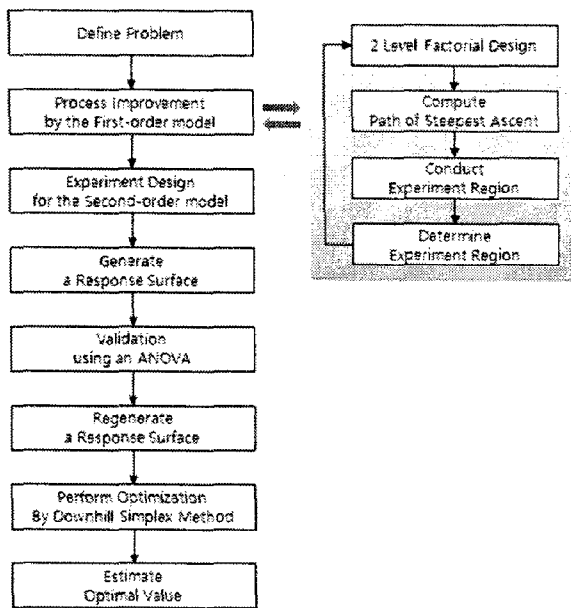


Fig. 1 Optimization process using response surface method

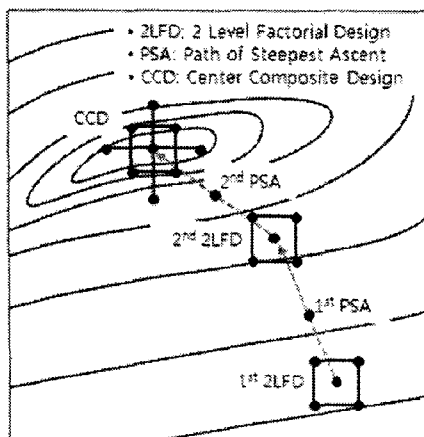


Fig. 2 Process improvement by the path of steepest ascent

2. 반응표면법을 이용한 최적화 설계

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 최대경사법과 반응표면법을 이용하여 하중경로를 최적화하였으며 만족도 함수(durability function)에 의해 다중 반응을 단일 반응으로 나타내었다. Fig. 2는 최대경사법(steepest ascent method)과 반응표면법(response surface method)으로 최적설계영역과 최적변수값을 찾는 방법을 보여준다.

2.1 최대경사법

최대경사법은 1차 회귀모델에서 정의된 목적함수의 응답을 최대화하는 방향벡터를 구하여 최적설계영역으로 유도하는 역할을 한다. 회귀모델은 2ⁿ 요인배치법(2-level factorial design)을 이용하여 구하였으며 교호작용의 영향이 작다고 가정하면 식(1)과 같이 1차 회귀모델로 나타낼 수 있다. 그리고 최적 설계영역에 근접할 때까지 식(2)에 의해 최적화 경로 $\mathbf{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_k)$ 를 반복적으로 구하게 된다[6].

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \cong b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (1)$$

$$\Delta x_j = \frac{b_j}{b_j / \Delta x_j} \quad (2)$$

2.2 반응표면법

반응표면법은 해당 설계영역에서 정의된 목적함수의 응답을 표현하는 반응표면을 구하고 반응표면에서 최대·최소 응답을 찾는 확률론적인 최적화 방법이며 비교적 넓은 범위의 설계영역에 적용되는 전역근사화기법이다. 반응표면은 2차 회귀모델을 이용하였으며 실험계획법은 1951년에 Box와 Wilson이 소개한 중심합성계획법(central composite design)을 사용하였다[6].

2.3 만족도 함수

1995년에 Myers와 Montgomery가 소개한 만족도 함수(durability function)는 여러가지 목적함수의 응답을 고려하는 다중반응표면법(multiple response surface)에서 공정변수의 최적 조합을 찾기 위해 사용되며 식(3)과 같다. d_i 는 각 목적함수의 응답이 주어진 조건에 적합한지를 나타내는 지표이며 0과 1사이의 값을 갖는다. r_i 는 d_i 에 서로 다른

중요도를 부여하고 싶을 때 적용할 수 있다[6].

$$D = (d_1^{r_1} \times d_2^{r_2} \times \dots \times d_n^{r_n})^{1/\sum r_i} \quad (3)$$

3. 알루미늄 리어 서브프레임의 하중경로 최적화

반응표면법을 이용한 하중경로 최적화가 적용된 알루미늄 리어 서브프레임은 Fig. 3과 같다. 알루미늄 튜브 성형한계도를 이용한 성형해석으로 초기 하중경로를 결정하고 반응표면법을 이용하여 초기 하중경로를 최적화하였다. Fig. 4는 알루미늄 튜브 하이드로포밍 공정 설계를 위한 최적화 개념도이다.

3.1 알루미늄 리어 서브프레임의 성형해석
알루미늄 리어 서브프레임 성형해석을 수행하고 성형성 평가를 위해 Fig. 5와 같은 알루미늄 튜브 성형한계도를 이용하였다. 성형한계도는 단순 확관, T성형, +성형을 다양한 하중경로에 의해 시험하여 구하였다. Fig. 6은 알루미늄 리어 서브프레임 성형해석에 사용된 공정 및 하중경로이다.

3.2 반응표면법을 이용한 하중경로 최적화
최적화를 위한 목적함수는 알루미늄 튜브 하이드로포밍의 장점을 최대화하도록 정의하였다. 식 (4)는 치수정밀도, 성형결함, 두께분포 개선을 위해 정의된 목적함수이다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } f_1(p) &= \text{Surface Area} \\ \text{Minimize } f_2(p) &= \text{Max. Thinning} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{Minimize } f_3(p) = \sqrt{\sum \left(\frac{t_i - t_0}{t_0} \right)^2}$$

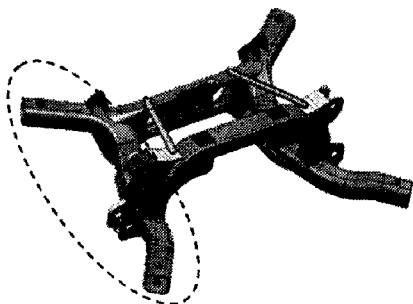


Fig. 3 Rear subframe for aluminum tube hydroforming

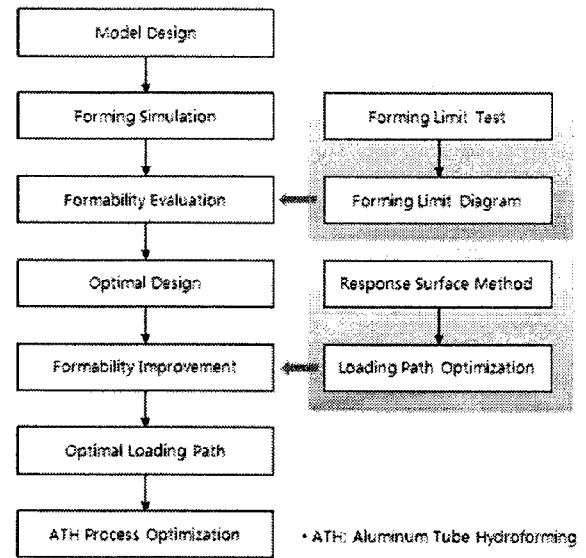


Fig. 4 Loading path optimization process for aluminum tube hydroforming

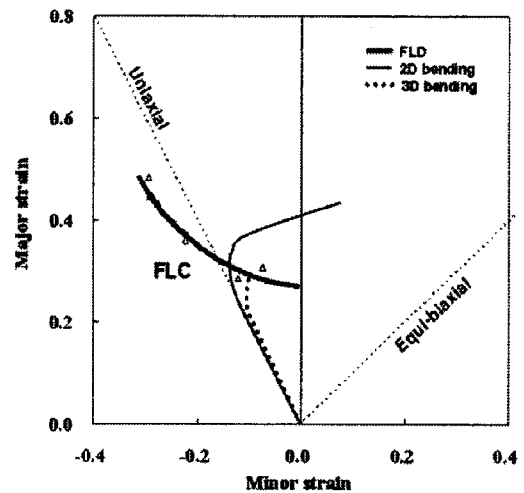


Fig. 5 Strain path comparison of hydroforming using various bending

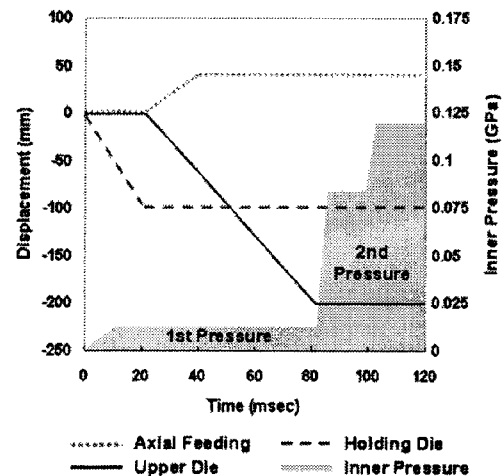


Fig. 6 Standard loading path for hydroforming process optimization

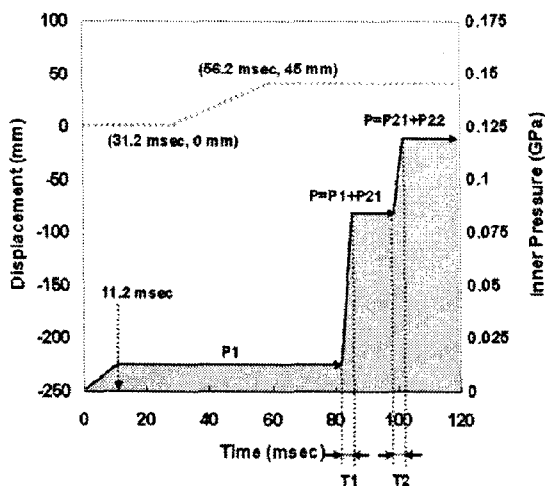


Fig. 7 Design variables for internal pressure optimization

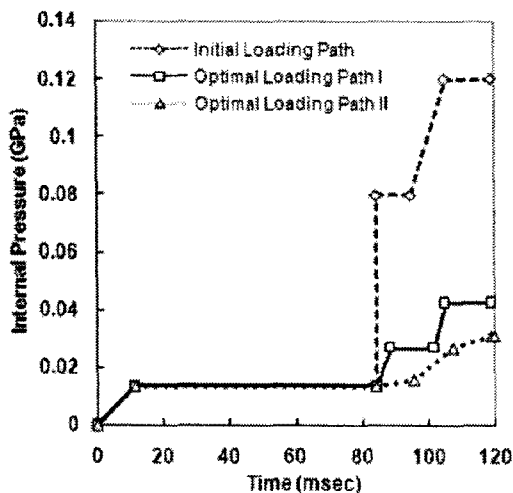


Fig. 8 Optimal loading path by internal pressure optimization

초기 하중경로를 Fig. 7과 같이 다양한 설계변수로 분리시켰으며 실행영역을 결정하고 중심합성 반응표면을 위한 실험계획으로 성형해석을 수행하였다. 성형해석 결과에서 목적함수 정의에 의해 응답을 계산하고 최적 반응표면을 구하였다. Fig. 8은 기본 하중경로와 반응표면법으로 최적화된 하중경로이다. 최적화된 하중경로가 초기 하중경로와 크게 다른 것은 초기 모델이 두께분포를 고려하지 않고 성형한계에 근접하게 성형되었기 때문이다. 최적화된 하중경로에 의해 제작된 알루미늄 리어 서브프레임은 초기 모델과 비슷한 치수정밀도(99.71%)를 보여주었으며 두께분포 약 30%, 최대 두께변형률 약 20%가 개선되었다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 튜브 하이드로포밍 기술이 적용된 리어 서브프레임의 성형해석을 수행하였으며 알루미늄 튜브 성형한계도를 이용하여 성형성을 평가하였다. 그리고 반응표면법을 이용한 하중경로 최적화를 통해 리어 서브프레임의 성형결함 및 두께분포를 개선하였다.

(1) 알루미늄 튜브 성형한계도를 이용하여 알루미늄 튜브 성형해석의 성형성을 평가하고 공정 및 하중경로를 결정하였다.

(2) 최대경사법을 고려한 중심합성 반응표면법으로 알루미늄 튜브 하이드로포밍 공정의 하중경로를 최적화하였다.

(3) 성형 요구특성에 맞는 목적함수를 정의하여 치수정밀도를 유지하면서 두께분포와 최대 두께변형률을 개선시켰다.

(4) 알루미늄 튜브 성형한계도에 의한 파단예측과 반응표면법을 이용한 하중경로 최적화로 성형결함뿐만 아니라 다양한 특성을 만족하는 하중경로를 결정하는 방법을 제안하였다.

참고 문헌

- [1] 임희택, 김현영, 김형중, 이동재, 2005, 알루미늄 튜브 하이드로포밍 성형해석 및 성형성평가, 한국소성가공학회지 Vol. 15 No. 2, pp. 138~142.
- [2] 김현영, 임희택, 2003, 예비성형을 적용한 튜브 하이드로포밍 금형설계, 한국소성가공학회지 Vol. 12 No. 5, pp. 433~439.
- [3] 권태우, 김종철, 전진화, 장계원, 이우식, 2006, 자동차용 경량 알루미늄 서브프레임 개발, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 292~294.
- [4] M. Imaninejad, G. Subhash, A. Loukus, 2005, Loading path optimization of tube hydroforming process, Internal Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 45, pp. 1504~1514.
- [5] K. Manabe, M. Suetake, H. Koyama, M. Yang, 2006, Hydroforming process optimization of aluminum alloy tube using intelligent control technique, Internal Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 46, pp. 1207~1211.
- [6] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, 2004, Response Surface Methodology second edition, Wiley co.