

# 하이드로포밍을 이용한 후륜 현가장치 최적설계

오진호<sup>#</sup> · 최한호<sup>1</sup> · 박성호<sup>1</sup>

## The Optimization of Rear Suspension Using Hydroforming

J. H. Oh, H. H. Choi, S. H. Park

(Received May 8, 2008)

### Abstract

The subframe type rear suspension consisting of a side member and a front/rear cross member is widely used in a medium car and full car. In the small car case, the beam of tubular type without independent suspension system is used to reduce manufacturing cost. In this study, a subframe type rear suspension by hydroforming has been developed. In designing suspension, a driving stability and durability should be considered as an important factor for the performance improvement, respectively. Thus, we focus on increasing the stiffness of suspension and decreasing the maximum stress affecting a durability cycle life. Several optimization design techniques such as shape, size, and topology optimization are implemented to meet these requirements. The shapes of rear suspension obtained from optimization are formed by using hydroforming process. Through commercial software based on the finite element, the superiority of this design method is demonstrated.

**Key Words** : Rear Suspension, Stiffness/Stress, Durability, Tube Hydroforming, Optimization Method

### 1. 서론

최근 들어, 급격한 유가의 급등으로 인한 높은 연비 등급을 갖는 자동차와 편안하고 안락한 자동차에 대한 소비자의 요구가 맞물리면서, 고효율/연비, 저진동/소음 차량 개발을 위한 연구는 더 이상 미룰 수 없는 당면과제가 되었다. 이러한 차량 개발을 위해서는 기본적으로 고강도/강성, 경량화를 만족시킬 수 있는 재료개발과 부품 최적설계 및 제작방법이 선행 되어야 한다. 본 연구에서는 재료 개발 측면보다는 부품 최적설계 및 제작방법을 이용한 고강도/강성, 경량화 방안에 연구의 목적을 두었다.

반복적인 하중을 받는 자동차 현가 장치[1]는 차체 진동, 소음과 매우 밀접한 부품으로써, 지면

의 충격을 완화시키기 위한 승차감과 주행 시 노면과의 접지력에 따른 조정안정성은 설계단계에서 꼭 고려해야 하는 성능평가 요소들이다. 지금까지, 이러한 요구 성능을 만족시키기 위한 노력으로, 현가장치와 차체 골격(BIW)의 고유모드 공진 회피 최적설계, 열처리를 이용한 내구 수명 부재의 강도 보강 설계방법들이 이용되고 있는 실정이다. 그러나, 다양한 설계를 통한 성능 향상기법이 개발되어도 실제 부품 제작기술을 병행하지 않으면, 최적의 성능을 발휘할 수 없게 된다. 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 부품 제작방법으로 프레스(Stamping)를 이용한 성형 방법이 있다. 그러나, 이 방법은 각각의 부품들을 개별 성형한 후, 용접을 통해 하나의 완성된 부품을 제작하기 때문에, 부품수 및 중량 감소 측면에서 불리하다.

1. 포스코 기술연구소

# 교신저자: 포스코 기술연구소 자동차 가공 연구그룹,

E-mail: jinhooh@posco.com

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 TWB (Tailor Welded Blank), HPF(Hot Press Forming),과 HF(HydroForming)[2-6]등 여러 공법들이 제안되고 있는 실정이다. 이 중 하이드로포밍 기법은 기존 프레스공법(stamping) 대비 부품수를 감소 시키고, 중량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 피로강도 향상, 복잡한 형상제작, 형상/치수 정밀도 증가 등 많은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 부품개발 시 장점을 극대화 시키기 위해, 실제작 방법으로 하이드로포밍을 제안하였으며, 부품 설계방법으로는 구조 민감도 기반 치수(Size), 위상(Topology) 형상(Shape)최적화[7,8]기법을 적용하였다. 치수(Size) 최적화는 고유특성(Property) 변수 중 두께를 설계변수로 하여 민감도를 계산하는 방법을 이용하였으며, 위상(Topology) 최적화는 재료상수를 변수로 하여 요구하는 목적함수를 만족시켰다. 이러한 최적화 기술은 초기에는 전체 차량의 차체설계에 적용을 하였으나 최근에 들어, 차체가 커지고 복잡해짐에 따라 유한요소 모델자체가 방대해져 많은 해석시간 및 프로세스를 요구하기 때문에, 각각의 체결 부품별(Ass'y) 최적설계를 수행하고 있는 실정이다.

## 2. 후륜 현가장치 설계 및 제작

### 2.1 하이드로포밍 후륜 현가장치

일반적인 경우, 자동차의 진동은 노면/외부물체에 의한 외부하중 또는 차체 내부부품(엔진 등)의 가진에 의해 발생하게 된다. 이러한 진동은 승객에게 승차감을 저하시켜 불쾌감을 주거나, 운전자의 의지대로 차량을 제어하는데 어려움을 주기 때문에, 승차감, 조정안정성에 기여하는 후륜 현가장치 설계는 매우 중요하다. 여기서, 승차감과 조정안정성은 상반된 개념으로 고급차의 경우 승차감을 조정안정성 보다 우위에 두고 설계를 하지만, 스포츠카와 같이 핸들링이 매우 중요한 설계인자일 경우 조정안정성을 승차감보다 우선적으로 고려하여 설계를 수행한다.

현가장치는 크게 일체형 차축 또는 독립 현가장치로 나눌 수 있다. 일체형 차축 현가장치는 한 쪽 바퀴의 움직임이 다른 쪽 바퀴에 전달되는 방식으로 설계되며, 독립현가장치는 한 쪽 바퀴의 움직임이 다른 쪽 바퀴에 영향을 주지 않도록 설계가 되며 대부분의 승용차와 경 트럭의 경우에 널리 사용되고 있다.

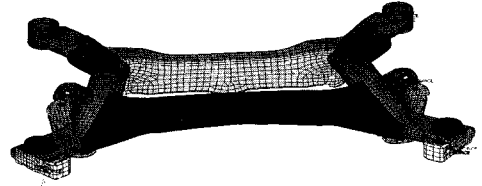


Fig. 1 The rear suspension manufactured by using stamping process

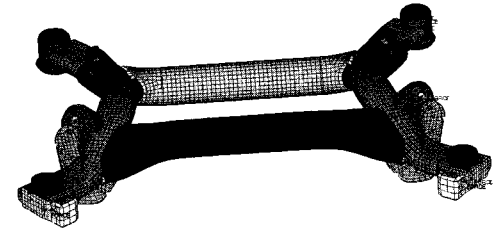


Fig. 2 The rear suspension manufactured by using hydroforming process

Table 1 Comparison of performance between hydroformed cross member and stamped cross member

Weight (stamping)	Weight (hydroforming)	Improvement Ratio
19.5Kg	16.7Kg	14.3%
Maximum Stress (stamping)	Maximum Stress (hydroforming)	Improvement Ratio
370MPa	319MPa	13.8%
First Frequency (stamping)	First Frequency (hydroforming)	Improvement Ratio
240Hz	276Hz	15%

본 논문에서는 기존 프레스(stamping)공법 대비 최적 설계된 후륜 현가장치의 중량 및 성능 향상을 비교해 보았다. Fig. 1은 후륜 현가장치의 체결된 형상을 보여준다. 후륜 현가장치 서브프레임은 프레스(stamping) 기법에 의해 제작되는 것이 일반적이지만, 최근에 들어 Fig. 1에서와 같이 측면 부재의 경우 부품 수 감소 및 경량화를 위해 하이드로포밍 기법에 의해 제작되고 있다. 본 연구에서는 측면 부재뿐만 아니라, Cross MBR(횡 방향 부재)를 하이드로포밍 기법에 의해 제작된 부

재로 바꾸어 경량화 및 성능 향상율을 비교해 보았다. 하이드로포밍 부재로 대체된 형상과 자세한 수치는 Fig. 2와 Table 1에 각각 주어진다. 결과를 살펴 보면 스템핑 횡 방향 부재(8Kg)를 하이드로포밍 부재(5.22Kg)로 대체 할 경우 무게는 대략 14%정도 감량되었으며, 내구 수명과 관련되는 최대응력은 13.8% 감소되었고, NVH 특성과 밀접한 관련이 있는 고유 진동수는 대략 15% 향상하는 효과를 얻을 수 있었다.

### 2.2 민감도 기반 최적설계

초기 항공분야를 중심으로 개발된 최적설계이론은 컴퓨터 산업의 발달과 함께 끊임없이 발전 및 진화를 거듭해 왔다. 최근에 들어, 여러 최적설계 이론들이 개발되어 항공 산업뿐만 아니라, 자동차 산업에 까지 접목되어 복합 융합 기술들이 응용되어 사용되고 있다. 현재까지 민감도 기반 구조최적설계, 표면 반응법(Response Surface Method), 실험계획법(Design Of Experiment), 근사화 방법 등 많은 이론들이 실제 자동차 분야에 적용되고 있다. 각각의 이론들은 여러 특징 및 장단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이 중 가장 널리 사용되고 쉽게 접근이 가능한 민감도기반 최적설계 기법을 후륜 현가장치 서브프레임에 적용해 보았다.

후륜 현가장치 설계 절차는 아래와 같다. 우선, 하중에 대한 개략적 설계 및 HF 성형성 분석을 수행한다. 이후, 위상 최적화(Topology Optimization)를 통해 대체될 부품의 단면을 결정한다. 후륜 현가장치는 크게 3가지 하중을 받는다. 급제동시 부과되는 정면 하중, 좌/우 급격한 핸들링 시 차체가 받는 측면 하중, 마지막으로 요철 또는 급제동으로 차량 전체가 순간적으로 공중에 부양된 후, 착륙하면서 받게 되는 수직하중이 있다. 위의 3가지 하중에 대한 위상최적설계를 수행하면, 강성이 최대가 되는 단면 형상을 결정할 수 있게 된다. 목적함수는 컴플라이언스로 하여 강성을 최대화시켰으며, 구속조건으로는 체적 분포를 25%로 설정하였다. 목적함수와 설계 변수에 대한 자세한 수식은 식(1),(2)에 주어진다. 해석결과를 살펴보면, 횡 방향 부재의 최적 단면형상은 원형단면임을 알 수 있다.

$$C = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} = \frac{1}{2} \int \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (1)$$

$$\begin{aligned} K_e(\rho) &= K_0 \rho_e^p \\ E_e(\rho) &= E_0 \rho_e^p \\ 0 \leq \rho_e &\leq 1, \quad e = 1, 2, \dots, N_e \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $K_0$ ,  $E_0$  는 초기 강성행렬과 탄성계수를 나타낸다.  $\rho_e$  가 각각의 요소들의 밀도를 나타내는 설계변수이다.

위상최적설계를 수행하여 단면을 결정한 후, 치수 최적화(Size Optimization)를 통해 각각 부재와 브라켓 및 부쉬류들의 두께를 결정한다. 목적함수는 질량이며, 수직하중에 대한 응력구속조건을 부과하였다. 설계변수는 쉘의 두께로 설정하여 최적의 두께를 결정할 수 있도록 최적화를 수행하였다. 설계 민감도는 Fig. 3 에 주어지며, 설계 변수는 식(3)에서 보여준다.

$$P = C_0 + \sum dV_i \cdot C_i \quad (3)$$

여기서,  $P$  는 최적화 되어야 할 고유특성(Property)을 나타내며,  $dV_i$  는 두께를 나타내는 설계변수이다.  $C_i$  는 설계 변수들 사이의 연관성을 나타내는 선형 계수이다.

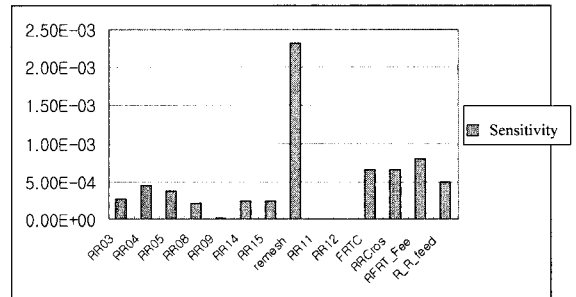


Fig. 3 The size sensitivity of rear subframe

형상 최적화는 비드의 위치, 크기를 결정하기 위해 사용하였다. 비드의 영향력을 살펴보기 위해 노드(설계변수)의 자유도를 쉘의 수직방향으로 구속하여 해석을 수행하였다. 형상최적화에서 메쉬의 변화를 설명하기 위한 방법으로 크게 기초벡터와 섭동벡터 접근법이 있다. 기초벡터(basis vector)는 식 (4)와 같이 노드좌표가 정의되며, 섭동벡터 접근법은 식 (5)에서 처럼 초기 노드좌표에 변화량이 중첩되는 방식으로 노드좌표가 표현된다.

$$x = \sum dV_i \cdot V_{bi} \quad (4)$$

$$x = x_0 + \sum dV_i \cdot V_{pi} \quad (5)$$

여기서,  $x$ ,  $dV_i$  는 노드좌표 와 설계변수이며,  $V_{bi}$ ,  $V_{pi}$  는 기초벡터와 섭동벡터를 나타낸다. 본 연구에서는, 섭동벡터 방법이 적용되었다.

### 2.3 후륜 현가장치 부품 제작시 주의사항

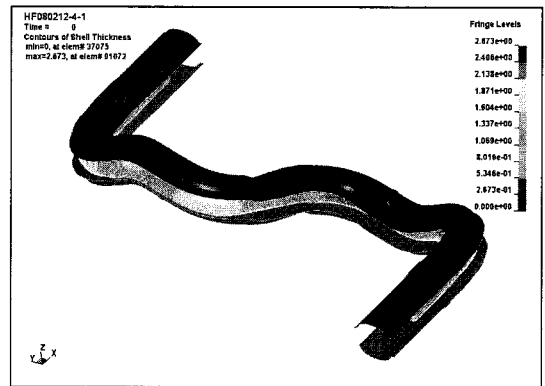
후륜 현가장치는 승용차 뒤쪽 하단부에 위치하여 차체와 휠을 연결하는 역할을 한다. 뒤쪽 휠은 여러 개의 브라켓 및 링크류로 연결이 되어 편안한 승차감을 확보한다. 후륜 현가장치는 크게 프런트 크로스, 리어 크로스, 2개의 사이드 멤버로 구성되어있다. 본 장에서는 최적화된 후륜 현가장치 중에서 사이드 멤버의 하이드로포밍 부품 제작 과정에 대한 소개 및 제작 시 주의사항에 대해 언급하고자 한다. 하이드로포밍 부품을 제작하기 위해서는 우선 부품의 제조가능성 평가를 위해 단면 분석을 수행해야 한다. 그 결과 부품의 최대, 최소 단면 원주길이와 최소 코너반경을 얻을 수 있다. 이러한 정량적 수치를 통해 초기튜브의 길이, 프레스 하중, 튜브성형을 위한 내압 등이 계산된다. 일반적인 하이드로포밍 부품 제작은 3단계에 걸쳐 진행 된다. 첫 번째로 금형에 튜브가 안착되기 위한 벤딩작업이 수행된다. 이 때 적절한 벤딩반경, 벤딩각도등이 중요 인자들이다. 둘째로, 대략적인 형상을 성형하는 프리포밍 단계가 필요하다. 프리포밍금형은 실 부품 제작 시 발생하는 찍힘 현상이 발생하지 않도록 유의하여 제작해야 한다. 마지막으로, 최종 부품을 생산하게 되는 하이드로포밍 성형단계이다. 성형 후에는 형상 및 두께 감소율 분포를 체크하는데, 이 때 형상이 나오지 않거나, 두께감소율이 소재의 기준 감소율 초과시에는 초과량에 따라 벤딩공정 또는 프리포밍 공정단계로 돌아가서 수정작업을 수행해야 한다. Fig. 4와 Fig. 5은 하이드로포밍 상,하 금형과 최종 성형된 부품의 형상을 나타낸다.

### 3. 수치 해석

최적화기법을 이용하여 확관, 비드위치를 결정하였으며, 최종모델은 Fig. 6에 주어진다. 최종모델

**Table 2 Comparison of performance between original and optimized model**

Weight (original)	Weight (optimized)	Improvement Ratio
16.7Kg	15Kg	10.2%
Maximum Stress (original)	Maximum Stress (optimized)	Improvement Ratio
319MPa	276MPa	13.5%
First Frequency (original)	First Frequency (optimized)	Improvement Ratio
148Hz	170Hz	12.9%



**Fig. 4 The configuration of hydroforming die cavity**

의 성능 검증을 위해 강도/내구 및 고유모드 해석을 수행하였다.

#### 3.1 강도 및 내구해석

내구수명을 예측하기 위해서는 구조해석(응력해석)이 선행 되어야 한다. 후륜 현가장치의 응력해석과 내구수명 결과는 Table 2 에 주어진다. 수직 하중에 대한 응력이 대략 14%, 내구수명은 설계 전의 8 만 1 천에서 최적설계 후에는 31 만 사이클로 향상됨을 확인 할 수 있다.

#### 3.2 고유 모드 해석

샤시구조물의 고유진동수는 NVH특성 중에서 가장먼저 고려되어야 할 인자이다. 고유진동수는 질량과 강성의 함수로써, 단순한 두께증가 또는 질량증가에 의해서 향상될 수 없는 수치이다. 본 연구에서는 이러한 고유진동수 값을 최대화 시키는 최적화를 수행하였다. 그 결과는 Table 2에 주어진다. 전체적인 중량은 대략 10%정도 감소하였

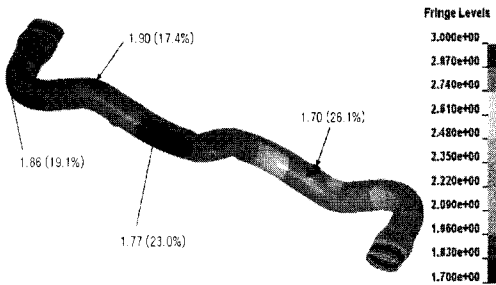


Fig. 5 The configuration of hydroformed final model

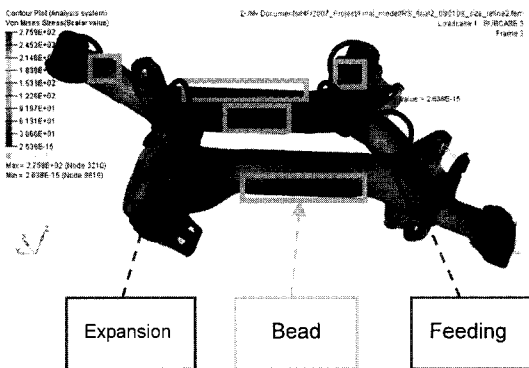


Fig. 6 The configuration of optimized final model

으며, 내구 파손과 관련이 있는 최대 응력값은 14%정도 감소되었다. NVH 특성을 나타내는 고유진동수는 13% 향상됨을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 후륜 현가장치의 내구성 및 NVH특성 향상을 위해 민감도 기반 최적설계 방안을 도출하였다. 특히, 제안된 설계 방안을 정확히 구현하기 위해서 하이드로포밍 기법을 제안하였다. 하이드로포밍을 적용 시, 가장 큰 장점은

자유로운 형상 구현, 정밀도 향상, 중량감소 등이 있다. 수치 예제의 성능 평가를 통해 최적화 방안의 타당성을 보였다. 향후, 이러한 설계/제작 방법은 후륜 현가장치 외 여러 사시부재에 적용이 가능할 뿐만 아니라, 요구 내구수명 및 동강성을 쉽게 만족 할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- [1] H. T. Im, I. S. Oh, J. M. Ko, H. Y. Kim, 2007, Tube hydroforming process design of torsion beam type rear suspension considering durability, Transactions of Materials Processing, Vol. 16, pp. 201~209.
- [2] S. Nakamura, H. Sugiura, H. Onoe, K. Ikemoto, 1994, Hydroforming drawing of automotive parts, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 46, pp. 491~503.
- [3] K. H. Kim, H. H. Choi, G. S. Jung, Y. S. Kang, S. S. Park, 2005, Development of hydroformed high strength steel chassis part, POSCO Research Paper, Vol. 10, pp. 117~122.
- [4] S. T. Kim, S. U. Im, T. G. Lee, Y. S. Kim, 2000, Experimental studies of the forming process for the tubular hydroforming technology, Trans. Mater. Proc., Vol. 9, pp. 35~42.
- [5] S. S. Han, 2006, Forming limit diagram measurement of tube for tube hydroforming process, Trans. Mater. Proc., Vol. 15, pp. 467~472.
- [6] J. Oh, D. J. Kim, H. H. Choi, S. S. Park, 2008, Optimization design of POSCO ULSAB body, POSCO Research Paper, Vol. 13, pp. 107~112.
- [7] J. Arora, 1989, Introduction to optimum design, Mc Graw-Hill.
- [8] R. T. Haftka, Z. Guerdal, 1996, Elements of structural optimization, Kluwer Academic Publisher.