

# 하이드로포밍을 이용한 후륜 현가장치 설계

오진호<sup>#1</sup>, 최한호<sup>1</sup>, 이규민<sup>1</sup>, 박성호<sup>1</sup>

## The Design of Rear Suspension Using Hydroforming

J. H. Oh, H. H. Choi, G. M. Lee, S. H. Park

### Abstract

Generally, there are several types in rear suspension. The rear suspension of subframe type consisting of side member and 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. The optimized rear suspension of subframe type using hydroforming method has been developed in this study. In designing suspension, the driving stability and durability performance should be considered as an important factor. The stability is related to dynamic frequency and durability is connected with stress analysis of structure. We focus on increasing the stiffness of suspension and decreasing the maximum stress relating to durability cycle life. For making use of the merits of hydroforming which is possible to make the bead, tube expansion, and feeding in desiring position, several optimization design techniques such as shape, size, and topology optimization are proposed. This optimization scheme based on the sensitivity can provide distinguished performance improvement in using hydroforming. 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, 고급 차량에 대한 소비자의 수요가 증대 됨에 따라, 저진동/소음 차량 개발을 위한 연구는 더 이상 미룰 수 없는 필수과제가 되었다. 이러한 차량 개발을 위해서는 필수적으로 고강도, 고강성, 경량화를 만족시킬 수 있는 재료 개발 및 부품 제작 방법이 필요하다. 고강도/강성과 경량화는 서로 상반되는 경향이 있기 때문에, 동시에 만족시키기에는 많은 어려움이 존재한다.

자동차 현가 장치는 차체 진동, 소음과 매우 밀접한 부품으로써, 반복적인 하중을 받기 때문에 지면의 충격을 완화시키기 위한 승차감, 주행시 노면과의 접지력에 따른 조정안정성은 매우 중요

한 설계 인자들이다. 지금까지, 이러한 요구 성능을 만족시키기 위해, 차체 골격(BIW) 고유모드와의 공진 회피 설계, 내구 수명 부재의 열처리 등 여러 방법이 이용되고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 다양한 성능 향상기법이 개발되어도 실제 부품 제작 기술이 병행하지 않으면, 최적의 성능을 발휘할 수 없게 된다. 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 부품 제작 방법으로 Stamping성형 방법이 있다. 그러나, 이러한 방법은 형상이 복잡한 부품일 경우 정확한 부품을 제작할 수 없고, 부품들을 볼팅(bolting)에 의해 차체에 직접 체결해야 하기 때문에(모듈화방식) 진동성능이 급격하게 저하되는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 TWB

1. POSCO 기술연구소 자동차 가공 연구그룹  
# 교신저자: POSCO 기술연구소, E-mail: Jinhooh@posco.com

(Tailor Welded Blank), HPF(Hot Press Forming), 와 HF(HydroForming)[1]등 여러 공법들이 제안되고 있는 실정이다. 이 중 하이드로포밍 기법은 기존 스탬핑 대비 부품 수를 감소 및 중량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 피로 강도 향상, 복잡한 형상 제작, 형상/치수 정밀도 증가 등 많은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 하이드로포밍의 장점을 최대한 활용하기 위해서 민감도 기반 Size(두께), Topology(밀도) 구조 최적화[2,3]를 적용하였다. Size 최적화는 Property 변수 중 두께를 설계변수로 하여 민감도를 계산하는 방법을 이용하였으며, 토폴로지 최적화는 재료 상수를 변수로 하여 요구하는 목적함수를 만족시켰다. 이러한 최적화 기술은 초기에는 전체 차체설계에 적용하였으나 최근에 들어, 차체가 커지고 복잡해짐에 따라 유한 요소 모델자체가 방대해져 많은 해석시간 및 프로세스를 요구하기 때문에, 각각의 Ass'y부품별 최적설계를 수행하고 있는 실정이다.

## 2. 후륜 현가장치

### 2.1 하이드로포밍 후륜 현가장치

보통의 경우, 노면/외부물체에 의한 외부하중 또는 차체 내부 부품(엔진 등)의 가진에 의해 진동이 발생 하게 되는데, 이러한 진동은 승객에게 승차감을 저하시켜 불쾌감을 주거나, 운전자의 의지대로 차량을 제어하는데, 어려움을 준다. 후륜 현가장치는 위에서 언급한 승차감, 조정안정성, 제동 성능에 기여하는 매우 중요한 Ass'y 부품이다. 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 경트럭의 경우에 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 중형차에 널리 사용되고 있는 독립형 후륜 현가장치의 프레임에 대해 기존 스

템핑으로 가공 한 제품 대비 중량 및 내구 성능 향상을 목표로 하여 연구를 진행하였다. Fig. 1은 후륜 현가장치의 체결 형상을 보여준다. 후륜 현가장치 서브프레임은 스탬핑기법에 의해 제작되는 것이 일반적이다. 최근에 들어, Fig. 1에서 보여 지듯이, 측면 부재의 경우 하이드로 포밍 기법에 의해 제작함으로써, 부품 수 감소 및 경량화를 시키는 추세이다. 본 연구에서는 측면 부재 뿐만 아니라, Cross MBR(횡방향 부재)를 하이드로 포밍 기법에 의해 제작된 부재로 바꾸어 경량화 및 성능 향상율을 비교해 보았다. 하이드로 포밍 부재로 대체된 형상은 Fig. 2에 보여진다. 자세한 수치는 Table 1에 주어진다. 결과를 살펴 보면 스탬핑 횡방향 부재(8Kg)를 하이드로 포밍 부재(5.22Kg)로 대체 할 경우 무게는 대략 14%정도 감량 되었으며, 내구 수명과 관련되는 최대응력은 13.8% 감소 되었고, NVH 특성에 밀접한 관련이 있는 고유 진동수는 대략 15% 향상하는 효과를 얻을 수 있었다.

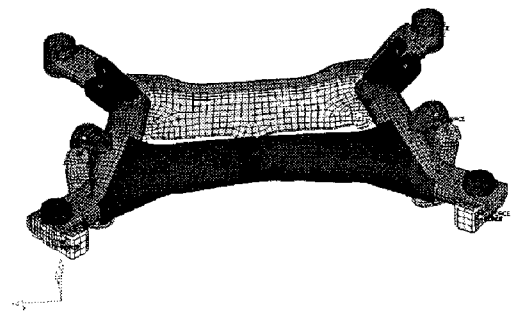


Fig. 1 The configuration of stamping rear suspension

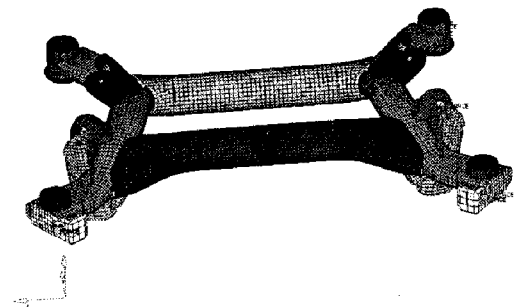


Fig. 2 The configuration of hydroforming rear suspension

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

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

## 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 사용되고 있다. 각각의 이론들은 여러 특징 및 장단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이 중 가장 널리 사용되고 쉽게 접근이 가능한 민감도기반 최적설계 기법을 후륜 현가장치 서브 프레임에 적용해 보았다.

후륜 현가장치 설계 절차는 아래와 같다. 우선, 2장에서 언급했던 하이드로포밍 설계를 수행한다. 물론, 하중에 대한 개략적 설계 및 HF 성형성 분석이 기반이 되어야 한다. 이후, 대체될 부품의 단면을 위상(Topology Optimization) 최적화를 통해 결정한다. 후륜 현가장치는 크게 3가지 하중을 받는다. 급제동시 부과되는 정면 하중, 좌/우 급격한 핸들링시 차체가 받는 측면 하중, 마지막으로 요철 또는 급제동으로 차량 전체가 순간적으로 공중에 부양되었다가 착륙하면서 받게 되는 수직하중이 있다. 위의 3가지 하중에 대한 위상 최적 설계를 수행하면, 강성이 최대가 되는 단면 형상을 결정할 수 있게 된다. 목적함수는 컴플라이언스로 하여 강성을 최대화 시켰으며, 구속조건으로는 체적 분포를 25%로 설정하였다. 목적함수와 설계 변수에 대한 자세한 수식은 식(1),(2)에

주어진다. 해석 결과를 살펴보면, 횡방향 부재의 최적 단면 형상은 원형단면임을 알 수 있다.

$$C = \frac{1}{2} u^T K u = \frac{1}{2} \int \epsilon^T \sigma dv \quad (1)$$

$$K_e(\rho) = K_0 \rho_e^p$$

$$E_e(\rho) = E_0 \rho_e^p \quad (2)$$

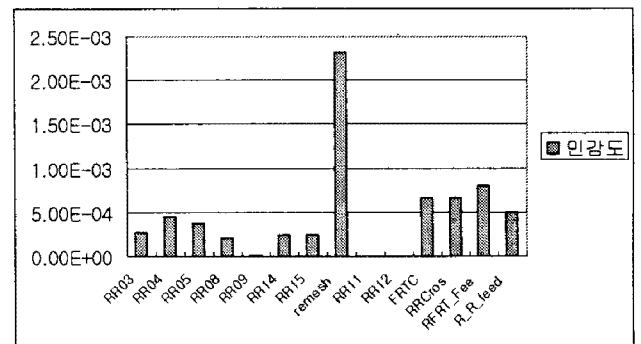
$$0 \leq \rho_e \leq 1, \quad e = 1, 2, \dots, N_e$$

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. 형상최적화 매쉬의 변화를 설명하기 위해 사용되는 방법은 크게 기초

벡터와 섭동벡터 접근법이 있다. 기초벡터(basis vector)는 식 (4)와 같이 노드 좌표가 정의되며, 섭동 벡터 접근법은 식 (5)에서 처럼 초기 노드좌표에 변화량이 증첩되는 방식으로 노드좌표가 표현된다.

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

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

### 3. 수치 해석

최적화 기법을 이용하여 확관, 비드, 피딩을 적용한 최종 모델은 Fig. 4에 주어진다. 최종 모델의 성능 검증을 위해 강도/내구 및 고유모드 해석을 수행하였다.

#### 3.1 강도 및 내구 해석

내구 수명을 예측하기 위해서는 구조해석(응력해석)이 선행 되어야 한다. 후륜 현가장치의 응력해석 결과는 Table 2에 주어진다. 최적설계 후의 응력이 대략 14% 향상됨을 확인 할 수 있다.

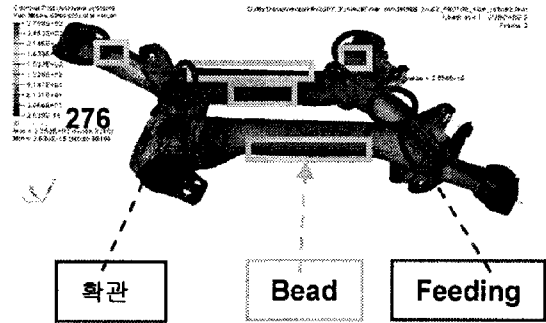
**Table 2 Comparison of performance between original and optimized model**

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

#### 3.2 고유 모드 해석

샤시 구조물의 고유진동수는 NVH특성에서 제일

먼저 고려 되어야 한다. 고유진동수는 질량과 강성의 함수로써, 단순한 두께 증가 또는 질량증가에 의해서 향상될 수 없는 값이다. 본 연구에서는 이러한 고유진동수 값을 최대화 시키는 최적화를 수행했다. 그 결과는 Table 2.에 주어진다.



**Fig. 4 The configuration of optimized final model**

### 4. 결론

본 연구에서는 내구, 강성 부재인 후륜 현가장치의 내구성 및 NVH특성 향상을 위한 민감도 기반 최적설계 방안을 제안하였다. 특히, 제안된 설계 방안을 정확히 구현하기 위해서 하이드로포밍 기법을 이용하였다. 하이드로포밍을 적용 시, 가장 큰 장점은 자유로운 형상 구현, 정밀도 향상, 중량감소 등이 있다. 수치 예제를 통해 비드, 확관, 피딩의 위치 크기를 결정하는 최적화 방안의 타당성 및 성능 향상을 확인 하였다. 향후, 이러한 설계/제작 방법은 후륜 현가장치 외 여러 샤시 부재에 적용이 가능하며, 내구 수명 및 요구 동강성을 쉽게 확보 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] K. J. Kim, J. S. Kim, 2007, Development of automotive engine cradle by hydroforming process, J. Mech. Sci. and Tech., Vol. 21, No. 10, pp. 1523 ~ 1527.
- [2] J. Arora, 1989, Introduction to optimum design, Mc Graw-Hill.
- [3] R. T. Haftka, Z. Guerdal, 1996, Elements of structural optimization, Kluwer Academic Publisher