하이드로포밍을 이용한 엔진크래들 최적설계

오진호† · 이규민* · 최한호* · 박성호*

The Optimization Design of Engine Cradle using Hydroforming

Jinho Oh, Gyumin Lee, Hanho Choi, and Sungho Park

Key Words : Optimization(최적화), NVH(진동특성), Hydroforming(하이드로포밍), Bead(비드)

Abstract

An engine cradle is a quite important structural assembly for supporting the engine, suspension and steering parts of vehicle and absorbing the vibrations during the drive and the shock in the car crash. Recently, the engine cradle having structural stiffness enough to support the surrounding parts and absorbing the shock of collision has been widely used. The hydroforming technology may cause many advantages to automotive applications in terms of better structural integrity of parts, reduction of production cost, weight reduction, material saving, reduction in the number of joining processes and improvement of reliability. We focus on increasing the durability and the dynamic performance of engine cradle. For realizing this objective, several optimization design techniques such as shape, size, and topology optimization are performed. This optimization scheme based on the sensitivity can provide distinguished performance improvement in using hydroforming.

1. 서 론

최근 들어, 운송수단의 발전과 더불어 자동차에 대한 수요는 기하급수적으로 증가하고 있다. 자동차 보유 대수가 7 억대 이상으로 인구 1 인당 0.1 대 이상 차량을 보유 하고 있는 실정이다. 이처럼 차량이 보편화 대중화 되면서, 차량의 안정성, 연비, 진동, 소음과 더불어 환경문제에 대한 요구가 더욱 세분화 다양화 되고 있다. 특히 환경문제는 세계적으로 관심이 고조되고 있는 상황에서 배기가스 규제 및 에너지 절감과 관련한 차량경량화가 기본적인 솔루션으로 제시되고 있다.

경량화 차체 개발은 크게 두 가지 측면에서 접근을 해야 한다. 첫째는 재료적 측면으로 복합재료, 알루미늄 합금과 같은 가벼운 소재를 사용하는 방안이다. 그러나, 위의 재료는 경제성으로 인해 고급차량을 제외하고는 쉽게 접근할 수 없는 단점이 있다. 최근에 이러한 문제점을 극복하기 위한 방안으로 자동차사들은 저가이면서 재활용성이 큰 고강도 강(AHSS)을 사용하고 있는 실정이다. 두 번째로 구조 설계적 관점에서 접근할 수 있다. 차량 설계 시 최적설계 기법[1-3]을 적용하여 구조적으로 취약한 부위의 두께 및 형상을 변경 하는 방법이다. 이는 응력을 분산시킬 수 있는 효과가 있기 때문에, 민감도가 낮은 부위의 소재 두께를 줄여, 중량을 감소 시킬 수 있다. 그러나, 구조 설계적 기법을 적용 시, 최적의 두께, 형상을 얻을 수는 있지만, 이를 구현하기 위한 제작 방법이 수반되지 않으면 효과가 반감된다. TWB (Tailor Welded Blank), HPF(Hot Press Forming),와 HF(HydroForming)[4,5] 등 현재 신 가공 공법들이 해결방안으로 제안되고 있는 실정이다. 이 중 하이드로포밍 기법은 기존 스탬핑 대비 부품 수를 감소 시키고, 중량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 피로 강도 향상, 복잡한

† 포스코 기술연구소
E-mail : Jinhooh@posco.com
TEL : (061)790-6808 FAX : (061)790-9370
* 포스코 기술연구소

형상 제작, 형상/치수 정밀도 증가 등 많은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 소음, 진동, 충돌과 직접적인 연관이 있는 엔진크래들의 구조적 특성을 유지하면서 경량화를 만족하기 위한 최적 설계 방안을 제시하였다. 특히, 최적화된 부품을 구현 하기 위한 방법으로 하이드로포밍을 제안함으로써 부품 개발 시 장점을 극대화하였다.

고강도/강성 엔진크래들 설계를 위한 최적 설계 방법으로 구조 민감도 기반 치수(Size), 위상(Topology) 최적화[1-3]를 도입하였다. 특히, 위상 최적설계를 적용하여, 비드 및 확관 위치를 결정 하였고, Size 최적화는 Property 변수 중 두께를 설계변수로 하여 민감도를 계산하는 방법을 적용하였다. 이러한 최적화 기술은 초기에는 전체 차체설계에 적용하였으나 최근에 들어, 차체가 커지고 복잡해짐에 따라 유한요소 모델 자체가 방대해져 많은 해석시간 및 프로세스를 요구하기 때문에, 각각의 Ass'y 부품별 최적 설계를 수행하고 있는 실정이다.

2. 튜브형 엔진크래들

2.1 하이드로포밍용 엔진크래들

일반적인 경우, 차체에 작용하는 하중으로는 노면/외부물체에 의한 외부하중 또는 차체 내부 부품(엔진 등)의 가진에 진동하중이 있다. 이러한 하중에 의해 발생하는 진동은 승객에게 승차감을 저하시켜 불쾌감을 주거나, 운전자의 의지대로 차량을 제어하는데, 어려움을 준다. 엔진크래들은 앞서 언급한 승차감, 조정안정성 및 충돌성능에 매우 중요한 Ass'y 부품이다. 그 외에도 자동차 차체 앞쪽 아래에 고정되는 부품으로써, 엔진, 현가 장치, 그리고 조향장치를 설치하는데 필요한 강도와 부착점을 제공한다. Fig.1 은 자동차에 장착된 엔진크래들의 형상 및 장착위치를 보여준다. 최근, 자동차 산업의 발전으로 엔진의 중요성이 더욱 부각되면서, 엔진크래들의 내구강도, 강성 및 진동 특성은 반드시 고려해야 할 요소가 되었다. 기존의 엔진크래들은 프레스 성형(Stamping), 용접 또는 Pipe 의 벤딩만을 이용하여, 제작을 하였기 때문에 많은 문제점을 가지고 있다. Stamping 후 용접을 하는 공정은 용접부의 무게를 증가시키기 때문에 자동차의 경량화 측면에 문제가 있으며, 용접 부위에서의 파손 또한 빈번하게 발생하기 때문에 구조강도를 보장 할 수 없다. 뿐만 아니라, 기존의 방법으로는 여러가지의 성형한계로 인해 다양한 엔진크래들 제작이 불가능하였다.

본 연구에서는, 이를 해결하기 위해서, 부품수 감소를 통한 경량화, 복잡한 형상 제작 등 여러가지 장점을 가지고 있는 하이드로포밍 기법을 제안한다.

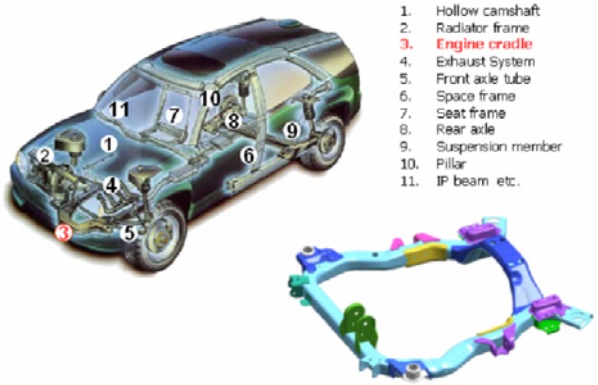

Fig. 1 The tube hydroforming engine cradle

2.2 엔진크래들 경량화 설계

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, 표면반응법(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 자동차용 엔진크래들에 적용해 보았다.

엔진크래들 최적설계 절차는 아래와 같다. 하중에 대한 개략적 설계 및 HF 초도 성형성 분석을 수행하여 대체될 부품 및 단면을 결정한다. 이후 성능평가에 기반을 둔 최적화를 수행한다. 엔진크래들은 크게 3 가지 하중을 받는다. 급제동시 부과되는 정면 하중, 좌/우 급격한 핸들링시 차체가 받는 측면 하중, 마지막으로 요철 또는 급제동으로 차량 전체가 순간적으로 공중부양 된 후, 착륙하면서 받게 되는 수직하중이 있다. 특히 마지막의 수직하중은 엔진크래들 내구, 강도에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 최적 설계 시 기본 하중으로 설정을 하여 수행을 하였다. Fig. 2 는 엔진크래들에 작용하는 수직하중의 크기 및 방향을 보여준다.

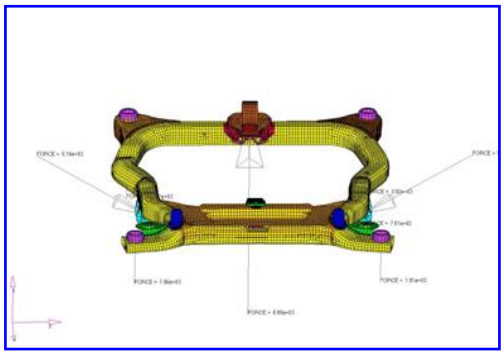

Fig. 2 The vertical loading applied in engine cradle

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(1)에서 보여준다.

$$P = C_0 + \sum dV_i \cdot C_i \qquad (1)$$

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.

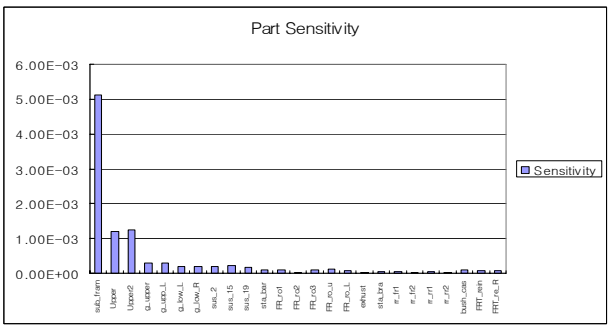

Fig. 3 Part sensitivity of engine cradle

엔진크래들의 설계 민감도의 크기는 메인 부재, 크로스 멤버류 순으로 나타났으며, 각 부재 및 브라켓의 두께분포는 Fig. 4 에서 보여준다. 치수 최적화 결과는 Table 1 에 주어지며, 전체적으로 4.5% 의 경량화 효과를 얻을 수 있었으며, 응력은 3.3% 감소되었고, 고유진동수는 대략 10% 정도 이동 되었음을 확인할 수 있다.

위상 최적설계를 수행하면, 강성이 최대가 되는 엔진크래들 형상을 결정할 수 있게 된다. 목적함수는 컴플라이언스로 하여 강성을 최대화 시켰으며, 구속조건으로는 체적 분포를 25%로 설정하였다. 목적함수와 설계 변수에 대한 자세한 수식은 식(2),(3)에 주어진다.

$$C = \frac{1}{2}\mathrm{u}^{\mathrm{T}}\mathrm{K}\mathrm{u} = \frac{1}{2}\int \varepsilon^T \sigma dv \qquad (2)$$

$$\mathrm{K}_e(\rho) = \mathrm{K}_0 \rho_e{}^p$$

$$E_e(\rho) = E_0 \rho_e{}^p \qquad (3)$$

$$0 \le \rho_e \le 1, \qquad e = 1, 2, \cdots, N_e$$

여기서, K_0 , E_0 는 초기 강성행렬과 탄성계수를 나타낸다. ρ_e 가 각각의 요소들의 밀도를 나타내는 설계변수이다. 위상 최적설계의 결과로 부재의 최대 강성 부위가 결정이 되면 이 부위에 비드를 생성 시켜서 고강도, 강성 하이드로포밍 엔진크래들을 제작하게 된다. Fig. 5 는 엔진크래들의 강성을 높이기 위한 비드위치를 보여준다. 빨간색으로 표시된 영역이 최대강성부위로써, 이 부위에 비드를 생성하게 되면 응력 및 주파수개선 효과를 얻을 수 있다.

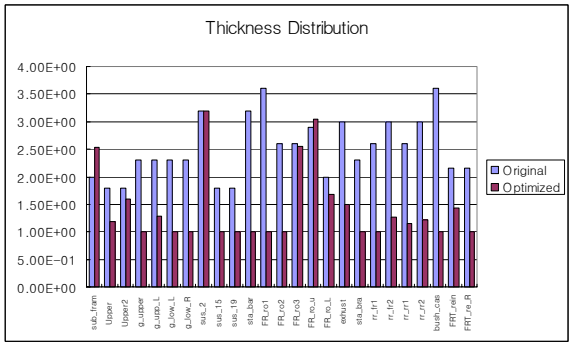

Fig. 4 Thickness distribution of assembled engine cradle

Table 1 Comparison of performance between original and optimized model using size optimization

Weight (original)	Weight (optimized)	향상율
22.3 Kg	21.3 Kg	4.5 %
Maximum Stress (original)	Maximum Stress (optimized)	향상율
299 MPa	289 MPa	3.3 %
First Frequency (original)	First Frequency (optimized)	향상율
86.7 Hz	96 Hz	10.7 %

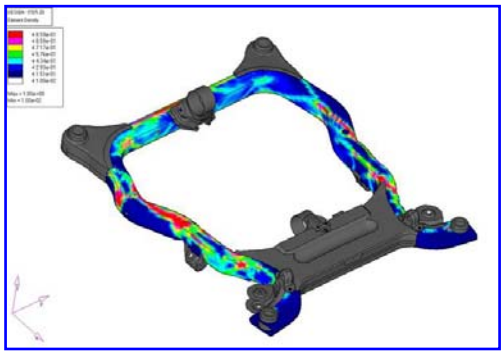

Fig. 5 Bead position of engine cradle

Table 2 Comparison of performance between original and optimized model using size and topology optimization

Maximum Stress (original)	Maximum Stress (optimized)	향상율
299 MPa	234 MPa	22 %
First Frequency (original)	First Frequency (optimized)	향상율
86.7 Hz	96 Hz	10.7 %

엔진크래들에 비드를 생성시킨 후, 최종 모델의 응력 및 주파수는 Table 2 에 주어진다. 응력은 대략 22% 감소하였으며, 고유진동수는 대략 10% 이상 향상됨을 확인할 수 있다.

3. 수치해석

3.1 강도 및 내구해석

엔진크래들은 외부하중에 직접적인 영향을 받는 내구, 강성 부재이다. 특히 엔진에 의한 가진력은 크래들을 혹독한 환경에 노출시키기 때문에 정확한 내구수명을 예측하는 해석방법은 매우 중요하다고 할 수 있다. 차체 내구 해석 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째로, 동적 특성을 고려한 내구해석 기법으로 이 방법은 시간영역에서의 하중이력을 고려하여 과도응답해석을 하는 Dynamic Fatigue 기법과 퓨리에 변환을 통해 주파수영역에서 PSD(Power Spectral Density) Function 을 이용하는 Vibration Fatigue 기법으로 나눌 수 있다. 최근에 들어, Dynamic Fatigue 해석 시, 계산시간 및 방대한 데이터량으로 인해, 고유모드 기반 비연성 방정식을 만들어 계산을 하는 Modal Transient 해석기법을 적용하고 있는 실정이다. 둘째로, 정적해석기반 내구해석 방법이 있다. 이 방법은 우선, 동역학해석을 통해서 각각의 하드포인트에서 하중력을 계산한다. 그리고, 정적해석을 통해 얻어진 응력분포의 조합으로 내구수명을 예측하는 방법이다.

후륜 현가장치의 내구 수명 결과는 Fig. 6 에 주어진다. 국내 자동차사 양산 모델의 경우 내구수명은 8 만 정도이지만, 최적화된 하이드로포밍 엔진크래들의 내구수명은 대략 13 만 사이클로 향상됨을 확인 할 수 있다.

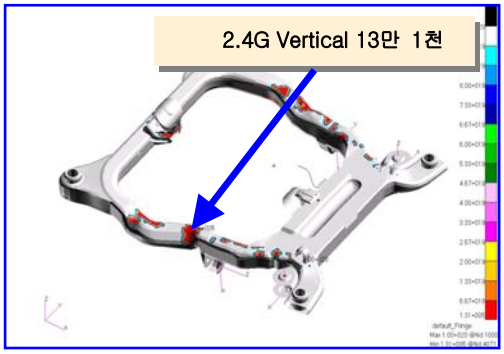

Fig. 6 Durability life of engine cradle

3.2 주파수응답 해석

샤시구조물 고유진동수는 NVH특성에서 제일 먼저 고려 되어야 할 인자이다. 고유진동수는 질량과 강성의 함수로써, 단순한 두께증가 또는 질량증가에 의해서 향상될 수 없는 값이다. 본 연구에서는 최적설계된 엔진크래들의 고유진동수를 주파수영역에서 측정함으로써 기준모델 대비 공진회피설계 정도를 평가해 보았다.

엔진크래들의 입력점 동강성을 평가하기에 앞서 각각의 축방향 하중에 대한 강성을 평가해보았다. Z축(수직방향) 하중에 대한 강성이 가장 낮게 평가되어, 수직하중에 대한 공진 회피 설계를 수행하였다. Fig. 7은 엔진크래들의 입력점에서 가진방향과 위치를 나타낸다. Fig. 8은 주파수영역에서 강제진동에 따른 가속도 그래프를 나타낸다. 전체적으로 공진주파수가 320Hz에서 380Hz로 회피 설계가 되었으며, 진폭 응답함수가 큰 폭으로 낮아졌음을 확인 할 수 있었다.

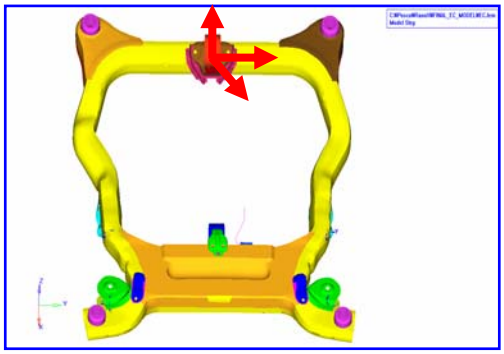

Fig. 7 Excitation position and direction at input point

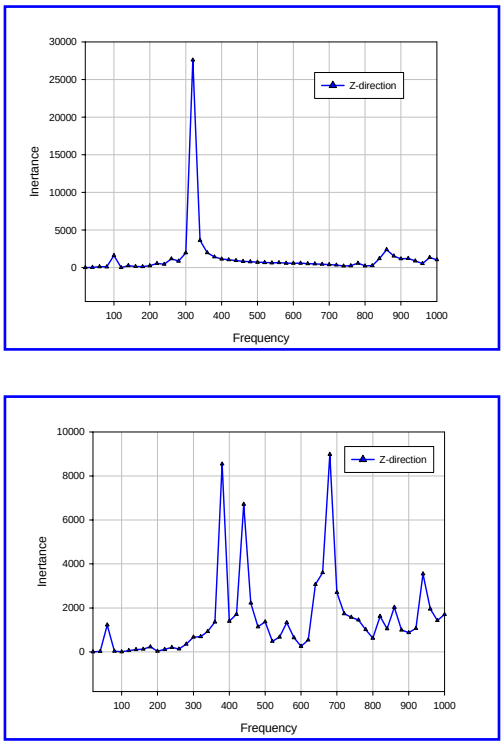

Fig. 8 IPI Response Plot

4. 결 론

본 연구에서는 내구, 진동 부재인 엔진크래들의 강도, 강성 및 NVH 성능을 향상시키기 위해 최적설계를 수행하였으며, 이를 제작하기 위한 방안으로 하이드로포밍 공법을 제안하였다.

하이드로포밍 공법을 사용함으로써, 얻을 수 있는 이득은 자유로운 형상 구현, 정밀도 향상, 중량감소등의 효과가 있다. 위상(Topology)최적화를 통해 비드, 확관 위치를 결정하였으며, 치수 최적화는 동일 성능을 나타내면서 중량 감소 부품 수를 줄일 수 있는 전체적인 두께를 결정하였다. 최적화된 엔진크래들의 성능 평가를 위해 내구, 진동해석을 수행하였다. 주파수영역에서의 응답함수를 통해 공진회피 설계 정도를 평가해 보았다.

향후, 이러한 설계/제작 방법은 경량화 차체 개발에 있어서 내구 수명 및 요구 동강성을 쉽게 만족시킬 수는 적절한 설계방법으로 이용될 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) Arora, J., 1989, “Introduction to Optimum Design,” *Mc Graw-Hill*.

(2) Haftka, R. T. and Guerdal, Z., 1996, “Elements of Structural Optimization,” *Kluwer Academic Publisher*

(3) Arora, J. S. and Haug, M. W., 1994, “Methods for Optimization of Nonlinear Problems with Discrete Variables – A Review,” Structural Optimization, Vol. 8, pp. 69~85.

(4) Kim, K. J. and Kim, J. S, 2007, “Development of Automotive Engine Cradle by Hydroforming Process,” *J. Mech. Sci. and Tech.*, Vol. 21, No. 10, pp. 1523～1527.

(5) Kim, K. H., Choi, H. H., Jung, G. S., Kang, Y. S., and Park, S. S., 2005, “Development of Hydroformed High Strength Steel Chassis Part,” *POSCO research paper*, Vol. 10, No. 1, pp. 117~122.