

하이드로포밍 엔진 서브프레임의 동특성 개선

Improvement on dynamic characteristics of hydroformed Engine Cradle with FEA

진 경 수† · 김 효 섭* · 김 윤 규* · 나 상 목**
K. S. Jin, H. S. Kim, Y. G. Kim, S. M. Na

Key Words : Hydroforming, Engine Cradle, Normal mode, FRF

ABSTRACT

Application of hydroforming technology for Engine Cradle has done much to reduce the weight of it. In most cases, hydroformed member of Engine Cradle is made in one-piece. And this method cause a limited design that amount of expansion at the center portion of the member is not enough to meet the required performance. This limited design leads to decrease the dynamic characteristics of Engine Cradle. In this paper, comparative analyses of conventional stamped engine cradle and hydroformed cradle of one-piece were conducted using Normal Mode analysis and FRF(Frequency Response Function)analysis. Finally, to improve the disadvantage mentioned above, hydroformed member of 3-pieces was proposed.

1. 서 론

엔진 서브프레임은 차량의 엔진과 미션을 지지하는 역할을 하며 차량의 차체와 서스펜션 부품들을 연결시키는 강도부재 역할을 한다. 현재 대부분의 완성차 업체에서는 FF(Front Engine Front drive)타입의 모노코크 차량에 “井”형상의 서브프레임을 채택하고 있으며, 충돌성능, NVH 특성, 설계자유도 등의 면들에 있어서 장점이 있다. 종래의 서브프레임에서는 메인 부재를 6개의 부품들을 프레스 스탬핑을 이용하여 제조하고 스팟용접 또는 CO₂ 용접을 통해 1개의 부재로 연결하여 사용되어 왔으나, 근래에 하이드로포밍 기술이 도입이 되어 현재는 1개의 강관을 하이드로포밍 공법을 이용하여 적용하고 있다.(Fig.1,2 참조) 하이드로포밍 공법을 적용하게 되면 경량화가 가능하고, 부품구성이 단순해지고, 용접길이가 대폭 축소되며, 용접변형에 의한 품질산포 축소, 가공경화에 의한 강도증대 등의 장점이 있다.⁽¹⁾

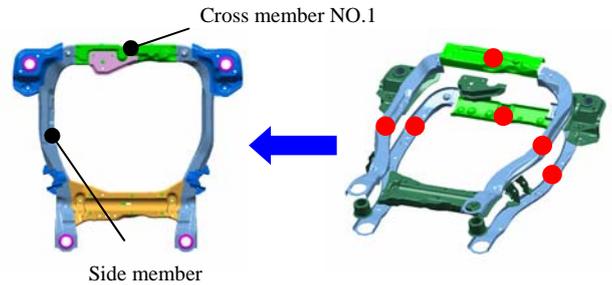


Fig. 1 스탬핑을 이용한 서브프레임 어셈블리

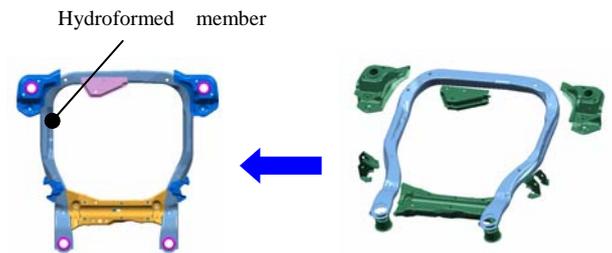


Fig. 2 하이드로포밍을 이용한 서브프레임 어셈블리

차량 전체에서도 물론 그러하지만 서브프레임 어셈블리 자체의 강성을 확보하는 문제 또한 중요시 되고 있다. 그리고 강성문제와 더불어서 서브프레임의 진동전달특성 또한 개선해야 될 부분들의 하나이다. 진동 전달특성은 차량의 각종 진동/소음 현상들과 밀접한 관계가 있으며 이는 바로

†진경수; 현대하이스코 기술연구소 연구개발팀
E-mail : jintogang@hysco.com
Tel : (052) 280-0323, Fax : (052) 287-7800

* 현대하이스코 기술연구소 연구개발팀

** 현대하이스코 기술연구소

승객의 승차감, 안락성과 직결되는 문제이다. 이 연구에서는 하이드로포밍 서브프레임 멤버의 성형성과 공정에 대해 간략히 설명하고, 스탬핑 어셈블리와 하이드로포밍 어셈블리를 Normal Mode Analysis 와 FRF(Frequency Response Function) Analysis 와 같은 유한요소해석을 통해 그 성능을 비교, 분석하고 하이드로포밍 어셈블리에 대한 개선안을 제시하고자 한다

2. 하이드로포밍 멤버의 성형성

2.1 확관율(Expansion rate)

서브프레임 멤버를 하이드로포밍 공법을 이용하여 제조할 때, 밴딩과정, 프리포밍과정, 하이드로포밍과정의 3 단계를 거치게 되는데 각 공정에서는 Tube 가 확관될 수 있는 연신율을 확보하고 있어야 한다. 그러기 위해서는 초기 부품을 설계할 때 최종형상의 단면크기를 정할 필요가 있으며 여기서 확관율이라는 설계인자가 필요하게 된다. 확관율이란 하이드로포밍 부품을 설계할 때, 가장 기본적인 설계인자들 중의 하나이며, 초기에 투입된 강관(Pipe)의 원주에 대한 하이드로포밍 성형 후의 부품 단면의 둘레길이의 비를 나타낸다.⁽²⁾

즉,

$$\text{확관율(Exp.\%)} = \frac{\text{성형후 단면둘레}}{\text{초기Tube의원주}} \times 100$$

Fig.3 은 본 연구에서 사용된 초기 Tube Ø70 의 하이드로포밍 멤버의 확관율을 나타낸다. Axial Feeding 과 가까운 영역에서는 확관율이 10 ~15 % 수준이며 Axial Feeding 영향이 없는 영역은 대체로 0 ~ 5% 수준이 된다. 특히 90 도 밴딩 부위에서는 밴딩공정 후의 잔여 연신율을 확보하기 위해서 확관을 최소화거나 오히려 마이너스 확관으로 설계할 필요가 있다. Table.1 은 본 연구에서 사용된 소재와 그 물성을 나타내고 있다. 이 물성은 시편의 단축인장시험을 통해 얻은 데이터로써, 시뮬레이션에서는 보정된 값을 이용하였다.

2.2 밴딩과정(Pre-bending process)

초기 Tube 를 밴딩하는 과정이며, 실제에서는 CNC Bender 를 이용하여 진행되고, 본 연구에서는 LS-DYNA 를 이용하여 시뮬레이션하였다. 밴딩개소는 6 군데이며 밴딩 R 은 150R, 부스팅력은 약 2Ton 이 적용되었다.

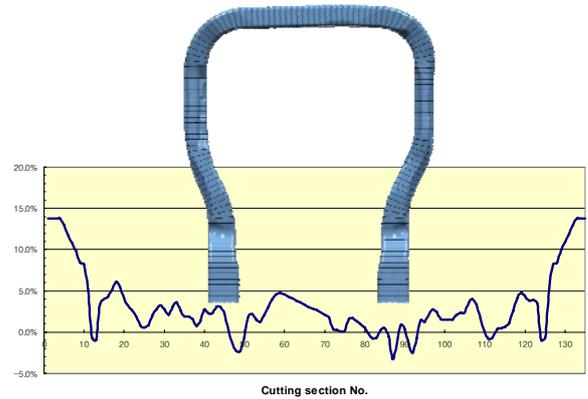


Fig. 3 하이드로포밍 멤버의 확관율

Material name	HF440
Tube size	Dia70mm, Thk: 2mm
T.S(N/mm ²)	497
Y.S(N/mm ²)	405
T-EI(%)	28.2
U-EI(%)	14.3
n	0.12

Table.1 Material property

Fig.4 는 밴딩구조와 밴딩 시뮬레이션 후의 두께 분포를 나타내며 가장 취약한 부분은 90 도 밴딩 부위의 바깥쪽 부분으로 나타났으며, 밴딩 후 두께는 초기 2mm 에서 1.73mm 로 감소되었으며 이 때의 두께감소율(Thinning rate)은 13.5%이다.

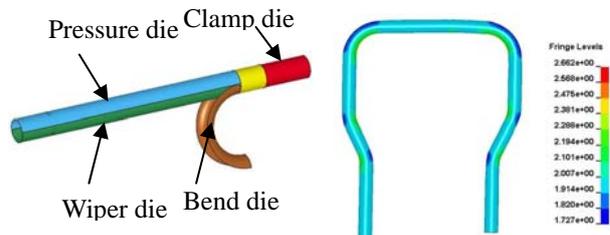


Fig. 4 Bending proces and thinning contour

2.3 프리포밍과정(Pre-forming process)

프리포밍과정은 밴딩된 튜브를 하이드로포밍 금형안에 잘 안착시킬수 있도록, 그리고 하이드로포밍 공정시 내압이 증가되어 확관이 될 때 내압이 골고루 잘 분포될 수 있도록 튜브에 가형상을 주는 과정이다. 프리포밍은 제품의 최종형상에 따라 공정삭제가 가능하기도 하나(밴딩→하이드로포밍) 대부분의 서브프레임의 경우, 단면형상이 복잡하

고 도피형상들이 많이 있기 때문에 프리포밍과정
이 불가피하다. Fig.5 는 프리포밍 금형
형상과 시뮬레이션 후의 두께감소율을 나타내며,
15%의 두께감소를 나타내고 있다.

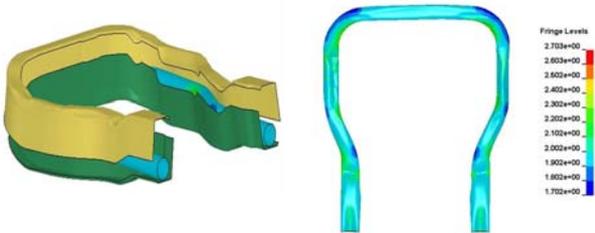


Fig. 5 프리포밍 금형 형상, 프리포밍 후 두께분포

2.4 하이드로포밍과정(Hydroforming process)

서브프레임의 하이드로포밍 공정은 다음과 같은
과정을 통해 진행된다.

- 1) 하이드로포밍 금형안에 공정품 안착
- 2) 다이 클로징(Die-closing)
- 3) 액시얼 피딩(Axial Feeding) 및 내압증대
- 4) 캘리브레이션 및 하이드로피어싱

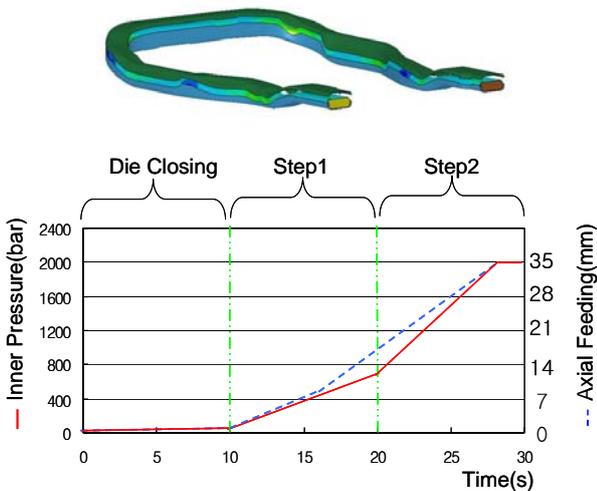


Fig. 6 Loading path: Pressure vs Axial feeding

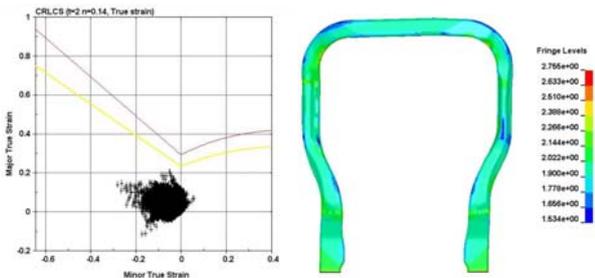


Fig. 7 FLD and Thinning contour

Fig.6 은 시간경과에 따른 내압과 액시얼 피딩

스트로크의 증대를 그래프로 나타낸 것이다. 제품
성형까지 좌,우측 각각 35mm 의 액시얼피딩이
가해졌고 캘리브레이션 내압은 2,000 bar 로 성형
이 되었다. 하이드로피어싱은 캘리브레이션과 동
시에 진행된다. Fig.7 은 FLD(Forming Limit
Diagram)와 하이드로포밍 후의 두께분포를 나타
내며 FLD 에서 보듯이 성형성은 양호한 것으로
판단되고 최소두께는 90 도 밴딩부위의 바깥쪽으
로 약 23%(1.53mm)의 두께감소를 보인다.

3. 서브프레임의 Normal mode 해석

3.1 Normal mode analysis

Normal mode 해석은 구조물의 동특성을 파악
하기 위한 가장 기본적이고 중요한 해석이며 부재
의 강성을 평가하는데 사용되고 있다. 고유진동해
석으로써 각모드의 주파수와 모드 형태를 파악하
는데 그 목적이 있으며, 모달시험과 병행하여 신
뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다. 본 연구에서는
Nastran Sol103 을 이용하여 스탬핑 타입과 하이
드로포밍 타입의 서브프레임을 시뮬레이션한 후
그 결과를 비교한다. 해석조건은 Table.2 에 명기
하였으며 해석결과는 Fig.8 및 9 에 도시하였다.

	Stamping assembly	Hydroforming assembly
Components	31	26
FE Elements	Quad4: 54,152 Tria3 : 3,428	Quad4: 51,161 Tria3 : 2,664
FEM Code	Nastran Sol 103	
NDOF	351,414	326,724
Material property	E: 2.1e4 Kgf/mm ² Nu: 0.3 Rho: 8.0e-10 Kgfs ² /mm ⁴	
Boundary condition	Free-Free	

Table.2 Analysis condition

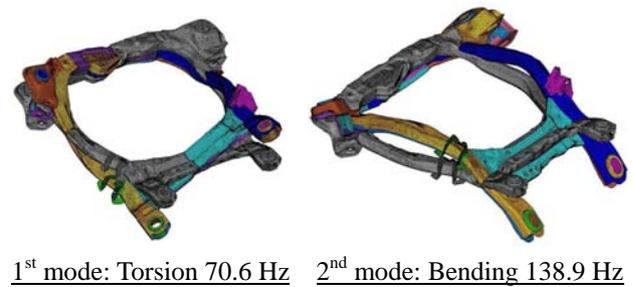


Fig. 8 Deformed shape: Stamping assembly

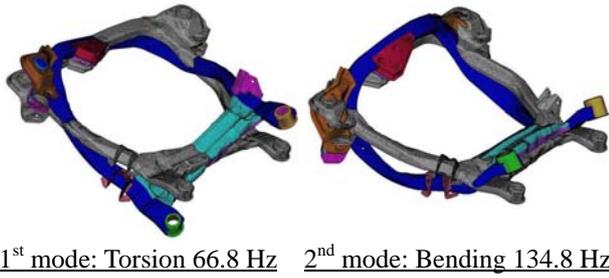


Fig. 9 Deformed shape: Stamping assembly

해석결과에 따르면 1st 주파수는 스탬핑 타입이 70.6 Hz, 하이드로포밍 타입이 66.8 Hz 로써 하이드로포밍 타입이 약 5% 열세인 것을 볼 수 있다. 취약부를 검토하기 위해 Strain 변화에 대한 결과를 보면 Fig.10 에서와 같이 90 도 밴딩부와 Cross member NO.1 의 단면이 보강되어야 함을 알 수 있다.

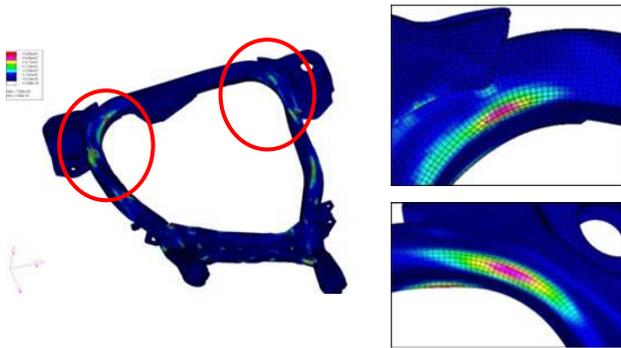


Fig. 10 Strain 변형에 의한 취약부 검토

3.2 하이드로포밍 타입의 취약부 검토

동강성 열세분의 개선을 위해 취약부분인 90 도 밴딩부의 단면을 검토해보면 Fig.11 에서와 같이 스탬핑 타입 대비 단면 높이가 7mm 부족한 것을 볼 수 있다. 그러나 이 부분은 서두에서 언급하였듯이 확관율을 최소화해야 되는 부분이고 만일 단면높이를 7mm 증가시키면 확관율은 약 11%가 되어 성형불가한 수준으로 된다.(Fig.12)

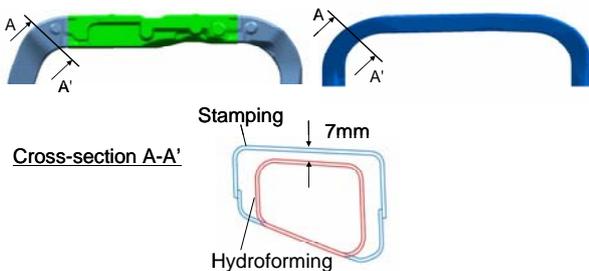


Fig. 11 취약부 단면 비교

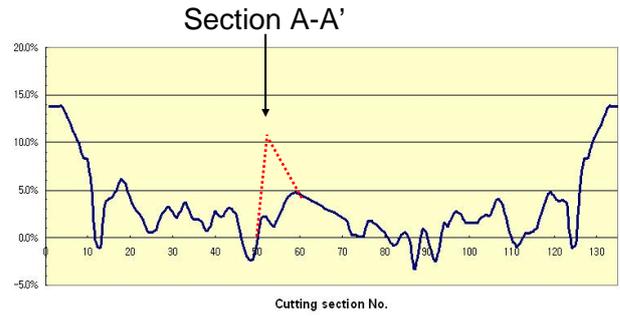


Fig. 12 단면증대후의 확관율

3.3 하이드로포밍 타입의 개선안 검토

하이드로포밍 서브프레임은 보통 하나의 멤버로 이루어져 있다. 그러나 앞에서와 같이 강성을 반드시 확보해야 된다면 멤버를 분할하는 방법이 있다. 부품수는 하나에서 셋으로 증가되지만 앞의 A-A' 단면을 확보할 수 있게 된다. Fig.13 에 개략도를 나타낸다.

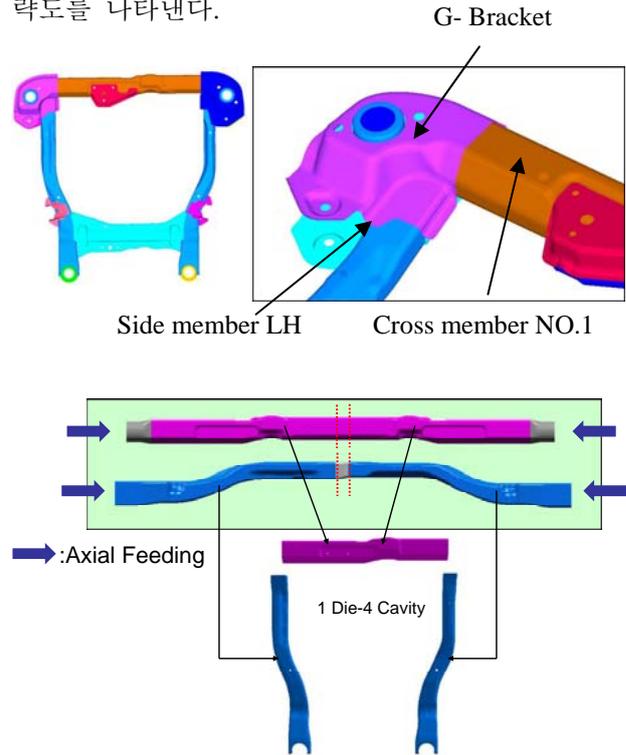


Fig. 13 3-piece 하이드로포밍 구조

Cross member NO.1 은 제품의 단면을 증대시키기 위해서 직경 75mm 의 Tube 가 사용되었으며 Side member 는 직경 70mm 의 Tube 가 사용되었다. 그리고 기존 1-piece 타입에서의 90 도 밴딩공정이 삭제되므로 밴딩공정 사이클 타입을 단축할 수 있게 된다. 또한 각 멤버들을 연결

시킴을 위해서 G-Bracket 의 형상을 보강재의 역할을 할 수 있는 형상으로 구현할 수 있게 된다. 이는 강성보강적인 측면에서 큰 잇점이 있다. 3-piece 타입의 성능을 검증하기 위해 Normal mode 해석을 재 실시 하였다. 그 결과는 Table.3 에서와 같이 스탬핑 대비 1st mode 에서 약 8%, 2nd mode 에서 약 2% 의 향상된 수치를 볼 수 있다.

Freq(Hz)	Stamping	Hydroforming	
		1-piece	3-piece
1 st Torsion	70.6	66.8	75.9
2 nd Bending	138.9	134.8	141.2
Weight(Kg)	23.5	22.1	22.8

Table.3 Normal mode Analysis result

4. 서브프레임의 FRF 해석

4.1 Booming 노이즈와 서브프레임

부밍노이즈(Booming Noise)는 차량의 실내소음들 중에서 여러가지의 소음원을 갖고 있는 복잡한 메커니즘을 갖고 있다. 부밍 노이즈는 300Hz 이하의 대역으로서 귀를 압박하는 듯한 소음으로써 엔진회전수에 따라 발진부밍, 저속부밍, 중속부밍, 고속부밍 등으로 분류되기도 한다.⁽³⁾ 본 연구에서는 그 소음원들중에서 엔진의 가진력에 의한 서브프레임의 차체로의 진동 전달 특성에 대해 고찰하기로 한다. 서브프레임의 엔진진동에 의한 진동 전달 매개체로서의 성능을 평가한다고 할 수 있다. 평가기준은 6 기통 4 사이클 엔진의 3,000 rpm 에서 발생하는 가진력을 기준으로 하여 FRF 해석을 실시후 결과를 비교하였다.

4.2 서브프레임의 FRF 해석

스탬핑 어셈블리, 하이드로포밍 1-piece 타입, 하이드로포밍 3-piece 타입 이 세 가지 타입에 대한 FRF(Frequency Response Function) 해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 물론 이 FRF 해석은 BIW(Body In White)와 서브프레임이 결합되었을 때의 결과가 더 신뢰도가 있다 할 수 있다. Nastran SOL111 을 이용하여 실시되었으며 해석 조건은 서브프레임의 실제 차량에서의 차체와의 고정상태를 반영하기 위해 서브프레임의 마운팅 포인트 4 곳을 부쉬강성을 부여한뒤 고정하

고, 를 엔진 롤마운팅 브라켓을 통해 0 에서부터 300 Hz 까지 차량의 상하방향(Z)으로 가진한 후 바디마운팅 프론트 우측에서의 응답과 바디마운팅 리어 우측에서의 응답을 얻은후 해당 주파수에서의 피크 값을 비교하였다.⁽⁴⁾ (Fig.14)

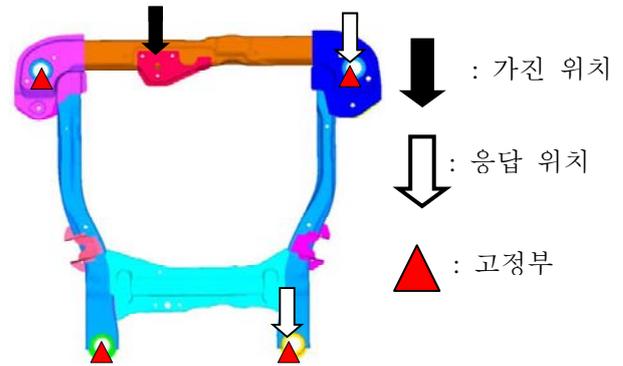


Fig. 14 FRF 해석 조건

Fig.15 와 Fig.16 에 각각의 결과를 나타내었다. Fig.15 는 Roll MTG 을 가진한 후 Body MTG FRT RH 에서의 응답을 도시한 것이며, 그래프에서 보듯이 첫번째 피크는 125 Hz 대 영역이고 두 번째 피크는 150 Hz 영역임을 알 수 있다. 서브프레임 어셈블리 단품만을 가지고 판단할 때 이 150 Hz 영역은 6 기통 4 사이클 엔진의 가진 진동수와 맞아 떨어진다. 즉 이 영역에서의 피크 레벨을 낮추는 것이 엔진 토크변동에 의한 가진주파수와와의 공진현상을 피할 수 있다. 그러나 실제 차량에서는 차체와 서브프레임이 연결되어 있으므로 차체와 서브프레임을 연결시킨 후 FRF 해석을 재 실시하는 것이 바람직하다고 하겠다. 세 가지 타입의 서브프레임의 응답성을 판단할 때, 그 효과를 피크레벨이 낮은 타입이 양호한 수준으로 판단할 수 있으며 하이드로포밍 3 piece 의 피크레벨이 가장 낮고 그 다음 스탬핑, 하이드로포밍 1 piece 의 순으로 나타났다. 그러나 그래프에서 보듯이 세 가지 타입의 피크 레벨차이가 1 dB 이내이므로, 세 타입 모두 동등수준의 응답성을 보인다고 할 수 있다. 이러한 현상은 Body MTG RR RH 에서의 응답에서도 동일한 결과를 볼 수 있으며 (Fig.16), 이 결과들로 볼 때 세가지 타입의 서브프레임의 진동전달 특성은 모두 동등한 수준으로 판단된다.

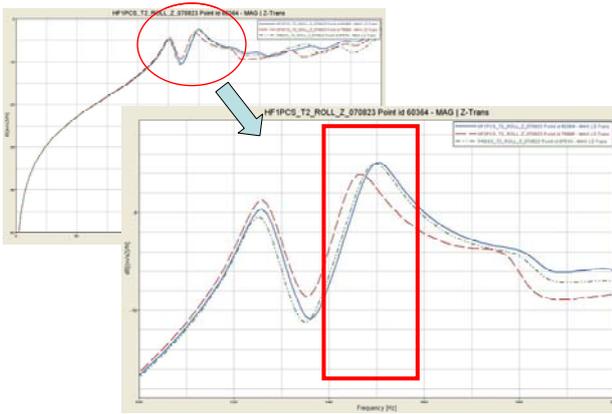


Fig. 15 Roll MTG 가진-Body MTG FRT RH 응답

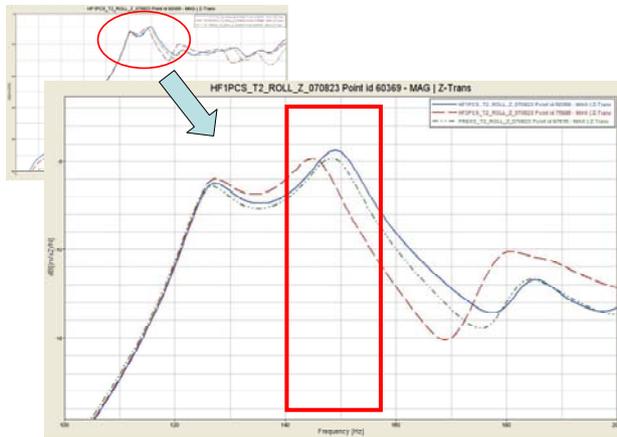


Fig. 16 Roll MTG 가진-Body MTG RR RH 응답

5. 결론

프레스 스탬핑 타입, 하이드로포밍 1 piece 타입, 하이드로포밍 3 piece 타입에 대한 구조와 제조 방식, Nomal mode 해석에 의한 강성 평가, FRF 해석을 이용한 진동 전달 특성 들을 비교, 평가하였다 하이드로포밍 일체형(1-piece) 타입의 강성 불만족 부분을 개선하기 위해서 3-piece 타입으로 재구성 하였고 재평가 결과, 성능을 만족하는것으로 판단 되었다. 강성평가에 의한 성능은 하이드로포밍 3 piece 가 가장 양호하며 그 다음 하이드로포밍 1 piece, 스탬핑 의 순으로 나타났다. 중량 절감 측면에서는 하이드로포밍 1-piece 가 가장 양호하며 그 다음 하이드로포밍 3-piece, 스탬핑의 순으로 나타났다. FRF 해석에 의한 진동전달 특성은 3 가지 타입 모두 동등한 수준으로 평가되었다. 제조 원가 측면에서는 하이드로포밍 1-piece 가 가장 낮았으며 그 다음 하이드로포밍 3-piece, 스탬핑의 순으로 판단되었다. 성능, 중량, 원가 등을 고려할

때 하이드로포밍 3-piece 가 적용 타당한 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국내에서 현재 양산 중인 일체형(1-piece)타입의하이드로포밍 서브프레임 멤버의 설계자유도를 증대시켜 서브프레임 어셈블리의 진동 성능을 보강하기 위한 목적으로 수행되었다. 서브프레임의 진동성능은 차량의 승차감, 안락성 등과 같은 상품성 문제와도 직결되어 있으며 반드시 확보해야 할 차량성능중의 하나이다. 향후에 강도와 신율을 동시에 확보할 수 있는 대체소재의 적용을 통해, 일체형 타입의 설계자유도를 증대시킬 수 있는 개선안에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) F. Dohmann and C. Hartl, 1996, "Hydroforming-A method to manufacture lightweight parts", Journal of materials processing technology, VOL60, pp.669~676.
- (2) H. Singh, Fundamentals of Hydroforming, Hydrodynamic Technologies, The Society of Manufacturing Engineers, July 1, 2003
- (3) 자동차기술핸드북 제 3 권 시험,평가편 1996, 한국자동차공학회, pp. 154 ~ 155.
- (4) MSC.Nastran Version 69 Basic Dynamic Analysis User' s Guide 1997