

일체형 배기다기관 설계 및 성능 평가

오진호*†, 류정수*, 김재현**, 최한호**

* 한국원자력연구원, ** POSCO

Design and Performance Evaluation of Integrated Exhaust Manifold

Jinho Oh*†, Jaehyun Kim*, Hanho Choi*, and Jeong-Soo Ryu*

* Korea Atomic Energy Research Institute

** POSCO Technology Research Institute

(Received January 5, 2010 ; Revised May 6, 2010 ; Accepted May 10, 2010)

Key Words : Exhaust Manifold(배기다기관), Hydroforming(하이드로포밍), Finite Element Method (유한요소법), Flow analysis(유동해석), Heat stress(열응력), Fatigue analysis(피로해석)

초록: 일체형 배기다기관은 하이드로 포밍 대량 생산이 가능한 부품으로 국내, 국제적인 환경문제에 따른 배출 규제와 매우 밀접한 관계에 있기 때문에, 국내 완성차 업체에서 큰 관심을 가지고 있다. 일반적인 주조 부품과 비교해서 관형 배기다기관은 용접공정 감소에 따른 단순화된 제작 공정 뿐만아니라, 엔진 시동시 가스 분해능이 우수한 특징을 가지고 있다. 본 연구는 부품, 공정, 금형 설계를 포함하는 배기다기관을 개발하는데 목적이 있다. 배기 시스템의 성능은 유동해석, 열전달, 열응력, 내구해석 시뮬레이션을 통해 평가하였다.

Abstract: Exhaust manifolds are the first structures to be developed by hydroforming; mass production of exhaust manifolds by this method will be possible soon. This is obviously related with tight emission regulation induced by environmental problems commonly for both domestic and worldwide and standards, thus evoking its solution for domestic automakers. Compared to conventional cast products, thin-gauge tubular hydroformed exhaust manifold have superior features; for example, in the hydroformed exhaust manifold, gas decomposition during the cold-start period of the engine is reduced by lowering the heat sink, and manufacturing process is simplified since less welding is involved. The aim of this study is to develop a hydroformed exhaust manifold; the study deals with the components, the hydroforming process, and tool design of the manifolds. The performance of the exhaust system is evaluated by performing flow analysis, heat-transfer analysis, heat-stress analysis, and fatigue analysis by using a computer.

1. 서 론

배기다기관(exhaust manifold)은 자동차 운행시 성능의 제고 및 최근 규제가 강화되고 있는 유해 배출 가스에 의한 환경오염과 관련하여 그 중요성이 널리 인식되고 있는 중요 시스템 중의 하나이다. 초기에는 제작의 편의성으로 주물 일체형 타입의 배기다기관이 제작되었으나, 이후에 부품 경량화 및 제작 시간 단축과 같은 효율성 측면이 대두 되면서, 프레스 성형 및 튜브 벤딩에 의한 스테인리스 배기다기관 제품이 유럽과 일본 등에서 널리 사용되었다. 그러나, 이 방법 또한 소재비, 부품 제작 및

용접비 상승과 부품 치수 정밀도 및 용접 품질을 확보하는데 어려움이 있다. 최근에 들어 이러한 단점을 보완하기 위해 튜브 하이드로포밍 방법에 의해 스테인리스 배기 매니폴드를 제작하는 방법이 제안되고 있다. 하이드로포밍(hydroforming) 공법을 사용한 스테인리스(SUS) 배기 다기관 제품은 기존 공법으로 제작된 제품 대비 경량화가 가능하고, 치수정밀도 향상, 소재의 국부적 변형 방지, 부품 제조 공정수 감소, 용접 부위의 감소 및 우수한 내구성 등 여러 가지 장점을 가지고 있다.

배기다기관은 엔진에서 발생하는 고온의 배기 가스가 가장 먼저 지나가는 유동관으로 고온, 고압의 환경하에 놓여 있기 때문에 부품 성능 평가는 매우 중요한 분야이다. 배기다기관의 성능평가⁽¹⁻³⁾는 기본적으로 유동해석, 열전달, 열응력

† Corresponding Author, Jinhooh@kaeri.re.kr

해석 및 피로 평가⁽⁴⁾로 구성된다. 특히, 반복적인 열하중 부과로 인한, 피로 파손 특성 분석은 매우 중요한 평가 분야이다.

본 연구에서는 주조로 제작된 배기 다기관을 하이드로포밍 부품으로 대체하기 위한 연구를 수행하였다. 성형성 평가를 위해 유한요소 성형해석, 공정설계, 금형설계, 개발된 하이드로포밍 매니폴드의 성능평가를 수행하여 타당성을 살펴 보았다.

2. 하이드로포밍 부품 형상 설계

2.1 하이드로포밍 금형 틀 설계

배기다기관 하이드로포밍 부품설계의 첫단계는 주조품의 형상으로부터 하이드로포밍 금형틀(Cavity)를 설계하는 단계이다. 이 경우 주조품의 내부 공동면의 형상을 토대로 설계가 진행된다. 이때 튜브의 확관률, 튜브의 벤딩각 등을 고려하여 초기 튜브의 선정이 이루어지며, 하이드로포밍 금형틀(Cavity) 설계가 진행 된다. 하이드로포밍 금형틀(Cavity)의 완성 후, 성형해석으로 성형가능성의 검토가 이루어지며, 해석결과를 토대로 최종 하이드로포밍 형상의 설계가 완성된다. Figure 1은 주조품의 형상을 토대로 하여 하이드로포밍 부품형상 설계를 수행한 결과이다. 엔진의 배기흡과 결합되는 4 개의 런너와 4 개의 런너를 하나로 모아주는 Y 형의 콜렉터(collector)로 구성되어져 있다. 최종 배기다기관은 이들 다섯 개의 부품들이 용접으로 결합된다.

2.2 FEM 이용한 하이드로포밍 성형해석

배기다기관 하이드로포밍 부품은 첫번째 런너(이하 런너 1로표기)와 두번째 런너(런너 2)를 붙여서 함께 하나의 금형에서 만들어지며, 가운데를 절단하여 사용한다. 세번째 런너(런너 3)와 네번째 런너(런너 4)도 같은 방식으로 만들어진다. 네 개

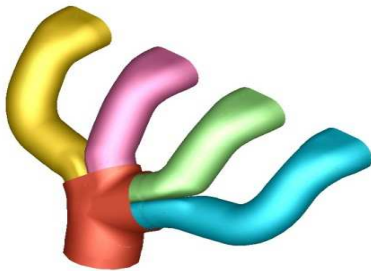


Fig. 1 The tube hydroformed product configuration of exhaust manifold

의 런너를 하나로 모으는 콜렉터는 두 개를 붙여서 동시에 성형하여 사용한다.

설계된 금형틀(Cavity)의 하이드로포밍 성형성 분석을 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 LS-Dyna 이다. 하이드로포밍 성형시 Stamping 보다 스프링백 발생이 적기 때문에, 본 연구에서는 스프링백 현상을 고려하지 않았다. 소재는 SUS304이며 외경은 34 mm, 두께 2 mm의 튜브를 사용하였다. 이 소재의 연신율은 약 54% 정도이다. Figure 2(a)는 런너 1-2에 대한 하이드로포밍 성형해석 후 두께 감소율(Thinning) 분포를 나타낸 그림이다. Figure 2(b)는 런너 3-4에 대한 두께 감소율(Thinning)분포를 나타내고 있다. 벤딩부분의 확관률은 크지 않아 벤딩 해석은 생략하였으며, 그림은 하이드로포밍 해석만 수행한 결과이다.

최대 두께감소율(Thinning) 분포값은 런너 1-2의 경우는 26% 런너 3-4의 경우는 27%의 값을 보였으며, 그 위치는 Figure 2의 붉은색으로 표시된 부분으로 벤딩부와는 무관한 영역이다. 이 소재의 연신율이 54% 정도 이므로 확관에 의한 파괴는 없을 것으로 판단된다. 또한 지금의 성형해석은 강제 재료유입(Feeding)을 수행하지 않았으며, 최대확관부가 재료유입(Feeding)부 영역에 속하므로, 실제의 경우 재료유입(Feeding)을 수행한다면 최대 두께감소율(Thinning)값을 줄일 수 있을 것이다.

또한 다이 결합(Closing) 해석을 통해 예비성형(Preforming) 없이 성형이 가능한 것으로 판단되어지며, 각각의 경우 4 번의 튜브벤딩이 필요하였다. 벤딩의 경우 형상의 복잡성으로 포밍벤딩(forming bending)이 필요하였다.

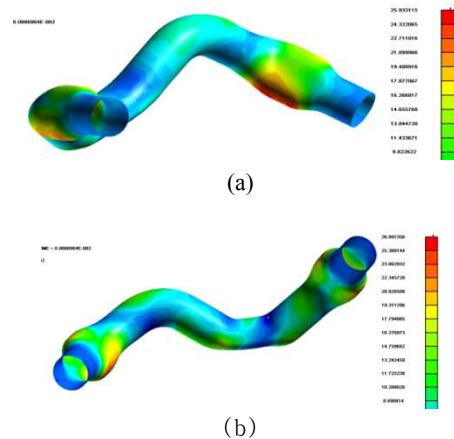


Fig. 2 The thinning contour of hydroformed manifold (a) runner 1-2, (b) runner 3-4

3. 공정분석 및 금형설계

앞의 형상설계 및 유한요소해석을 통해 얻은 부품의 금형틀(cavity)로부터 실제 공정 분석을 수행한다. 공정 분석의 내용은 수학적 분석을 통해 현재 보유장비로서 성형이 가능한지를 판단하며, 여기서 얻은 값들을 바탕으로 성형에 견딜 수 있는 금형을 설계하게 된다.

하이드로포밍 성형에 소요되는 내부 압력은 소재의 높은 인장강도로 인해 3300bar 정도의 높은 값을 가진다. 내부압력에 비해 부품의 형상은 크지 않아 다이 결합(Closing)력은 1040ton 정도의 값이 필요하다. 그리고 재료유입(Feeding)력은 150ton이 필요한 것으로 계산되었다. 이러한 분석값으로부터 금형을 설계하였으며 그 형상은 Figure 3에 나타나 있다.

4. 배기다기관 성능평가

설계된 부품의 성능을 검증하기 위해 유동해석, 열응력해석, 진동해석을 수행하였다.

4.1 유동해석

배기다기관의 콜렉터 다음에 바로 삼원촉매(three way catalytic converter)가 위치하고 있으며, 배

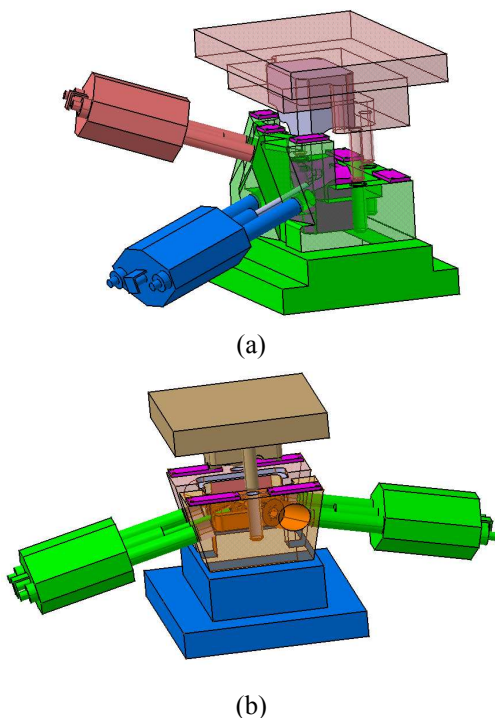


Fig. 3 The hydroforming die, (a) The die of runner 1-2 and runner 3-4, (b) The die of collector part

기가스가 불균일하게 이 촉매장치에 들어올 때 촉매장치의 수명 및 성능을 저하시킨다. 그러므로 배기가스의 균일한 배출은 매우 중요하다. 이러한 배출가스의 균일성을 알아보기 위해 속도 균일성 해석을 수행하였다. 속도균일성을 평가하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\sum V_i \cdot dS_i}{\sum S_i}$$

여기서, V_i 는 평균속도, S_i 는 i 번째 격자의 면적이다. 각 런너에 일정 유량 유입시 정상상태 압축성 난류 유동 해석을 수행하였으며, 해의 안정성을 위해 배기 출구쪽에 가상의 격자를 만들어 해석을 수행하였다. 입구쪽 온도는 839.4℃, 유량은 0.0232 kg/s/runner 이며, 출구쪽의 압력은 1atm 조건으로 수행하였다. 해석은 각 런너별로 수행하였고 Figure 4는 런너 1에 대한 유동해석 결과를 보여주고 있다.

최대속도값은 런너 1의 경우 152m/sec 값을 가지며, 나머지 런너의 경우는 155m/sec(런너 2), 134m/sec(런너 3), 149m/sec(런너 4)의 값을 얻었다. 속도 균일성은 70-85% 사이의 값들의 결과를 보였다.

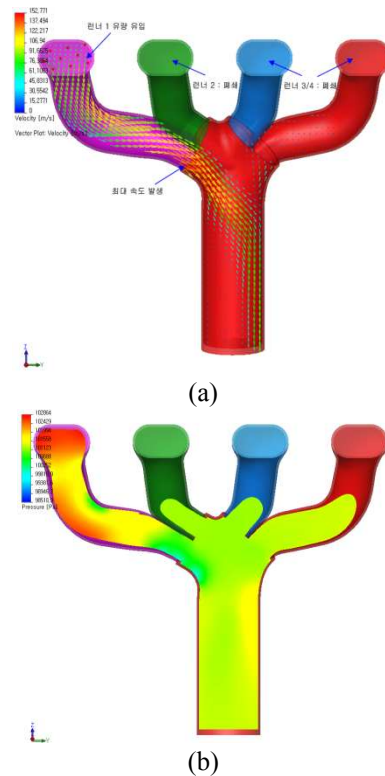


Fig. 4 The result of runner 1 flow analysis (a) velocity contour (b) pressure contour

4.2 모달해석

고유 진동수 해석은 접촉 처리된 부분을 제외한 현재 시스템의 최저차 고유 진동수 및 각 모드를 구하는 것이다. ANSYS 5.7 의 Block Lanczos 법을 사용했으며 구조 요소인 Solid45 및 Shell43 요소가 사용되었다. 1 차 모드부터 4 차 모드까지의 결과를 얻었다. 1 차 모드는 outlet flange 가 x 방향으로 움직이는 모드 형상을 가지며 고유 진동수는 640.14Hz 가 산출되었다. 최저차 모드의 고유 진동수가 일반적으로 200Hz 이상이 요구되므로 조건을 충족시켰다고 판단된다. 2 차 모드는 고유진동수 1,399Hz 가 계산되었다. 2 차 모드의 형상은 outlet flange 가 y 방향으로 운동하면서 자신의 평면에서 변형되는 모습이다. 3 차 모드의 고유 진동수는 1,917Hz, 4 차 모드는 2,408Hz 를 얻어졌다.

4.3 열전달 해석

열응력 해석 및 반복적인 가열, 냉각(heating - up/cooling-down) 과정에 의한 배기 다기관외 피로 평가를 수행하기 위해서는 가열(heating-up) 상태에서의 열전달 해석에 의한 시스템의 온도 분포가 필요하다. 적절한 가정 및 기존 문헌을 참고하여 열전달(heat conduction) 및 대류(convection)를 고려한 열전달 해석을 수행하였다.

열전달 해석을 위한 경계 조건은 볼트 헤드 표면 및 실린더 헤드 상면은 각 절점에 각각 180℃ 및 95℃의 온도를 적용했으며 나머지 부분은 대류 경계 조건으로 경막전열계수(convection film coefficient) 및 벌크 온도를 지정하였다. 열전달 해석이므로 런너 및 콜렉터는 shell 57 요소를, 나머지 영역은 solid 70 요소를 사용하였으며 해석 결과 파일은 추후 진행되는 열응력 해석에서 input 으로 이용되는데 각각 shell63 및 solid45 구조 해석용 요소로 전환된다.

열전달 해석을 수행한 결과로서 최고 온도를 갖는 부위의 온도 분포를 Figure 5 에 도시하였다. 그림에서 MX 로 보이는 지점은 최고 온도 808.5℃ 가 발생한 지점이다.

열전달 해석 결과, 모델 및 경계 조건에 관한 모든 정보를 갖고 있는 데이터베이스 파일과 온도 분포 정보를 가진 결과 파일을 얻으며 이 두 개의 파일은 추후 진행되는 열응력 해석에서 입력 데이터 파일로 이용된다.

4.4 열응력 해석 및 구조 피로 평가

4.4.1 열응력 해석

앞서 수행된 열전달 해석 결과인 전체 모델의

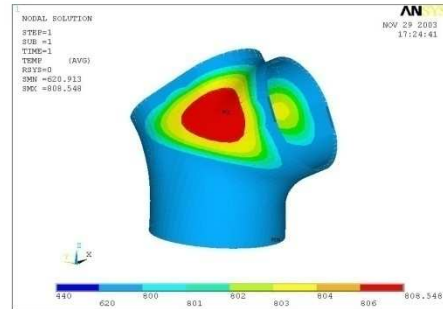


Fig. 5 The result of heat transfer analysis

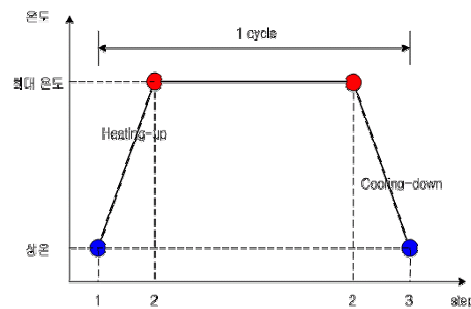


Fig. 6 Thermal shock cycle(thermal stress analysis)

온도 분포를 사용하여 열응력 해석을 수행하고 최종적으로 변형률을 사용한 피로 평가를 하였다. 전체 모델은 런너, 콜렉터 외에 유입/유출 플랜지(inlet/outlet flange) 및 실린더 헤드로 구성되어 있다.

하중 조건은 3 단계로 구분하여 해석을 진행하였는데 1 단계는 상온에서 유입플랜지(inlet flange)와 실린더 헤드 체결에 사용되는 볼트 하중만을 고려하고, 2 단계는 열전달 해석 결과 파일을 읽어 들여서 heating up 상태에서의 열응력 해석을, 그리고 3 단계는 전체 시스템의 온도가 상온으로 냉각(cooling down)하였을 때의 열응력 해석을 수행하였다. 또한 2 단계와 3 단계의 결과를 사용하여 해당 시스템이 반복 열하중을 받을 때의 피로 평가를 수행하였다.

Figure 6 은 상기 설명을 개념적으로 나타낸 것으로 열응력 해석에서 사용된 열충격 사이클을 표시한 것이다.

열응력 해석에 사용된 유한요소 모델에는 총 3 종류의 요소가 사용되었으며 이는 플랜지(flange)와 실린더 헤드에 사용된 Solid45 요소와 런너 및 콜렉터에 사용된 Shell43 요소, 그리고 contact 처리에 사용된 Contac52 요소로 구성된다. 시스템을 구성하는 각 영역의 재질은 런너 및 콜렉터는 SUS304 로 구성되어 있으며, 실린더 헤드와 유입/유출 플랜지(inlet/outlet flange)는 알루미늄 4032, 볼트는 SS400 으로 각각 가정하였다.

1 단계에서는 볼트 체결력에 의한 구조 해석(step

1)을 수행하였다. 이 때, 개별 볼트 체결 토오크는 25Nm 이며, 실린더 헤드의 움직임을 구속하였다. 용접부는 셸요소로 모델링 하였다, 2 단계에서는 열충격 사이클 하중의 하나인 가열(heating-up) 단계에서의 열응력 해석을 수행하였다. 이는 step 2 에 해당되며 온도 하중은 열전달 해석을 수행한 결과를 사용하여 전체 시스템 온도 분포로 적용하였다. 가열(heating-up) 단계는 열충격 사이클에 의한 피로 평가를 위한 중간 과정으로서 통상적으로 6,000rpm 이상의 엔진 작동 환경으로 가정시 구현된다. 따라서 응력 해석 결과를 참고할 때, 항복 강도를 넘는 영역에 대한 위험성은 여기에서는 중시되지 않으며 뒤에 설명하는 피로 평가를 위한 중간 계산 과정으로 이해되어야 한다. Figure 7 은 볼트 체결력을 고려한 본 미세스 응력의 최대값분포를 보여준다.

3 단계는 열충격 사이클의 최종 단계인 냉각(cooling-down)(step 3) 상태에 대한 열응력 해석을 수행하였다. 이는 앞서 수행된 볼트 체결력만을 고려한 step 1, 가열(heating-up) 상태인 step 2 결과에 의해서 영향을 받는 단계로서 궁극적으로는 다음에 설명할 피로 평가를 위한 잔류 등가 소성 변형률을 얻는 것이 목적이다. 즉, 전체 시스템 온도가 상온 20℃로 냉각되었을 때의 잔류 응력 및 잔류 변형률을 계산한다. Figure 8 에 step 3 에서의 등가 소성 변형률 분포를 시스템 전체에 대해서 도시하였다.

Figure 8 로부터 등가 잔류 응력의 최대값은 458MPa 임을 알 수 있으며 그 위치는 런너 1 과 2 의 종단부와 콜렉터 사이 이다. 열충격 사이클의 최종 단계인 step 3 에서, 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain) 은 콜렉터와 연결되는 런너 1 의 종단 부근에 최대값인 0.0164 가 발생하였다. step 3 에서의 등가 소성 변형률은 시스템이 열충격 사이클

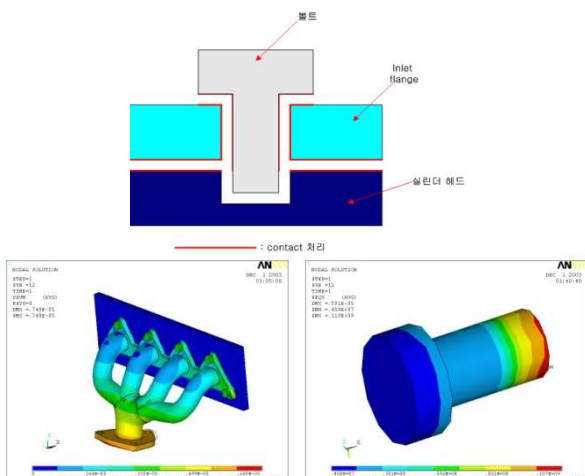


Fig. 7 Maximum stress contour considering bolt force

을 일주하면서 가지게 되는 잔류 소성 변형률이므로 뒤에서 수행되는 피로 평가에서 사용되는 값으로서 가장 중요한 역할을 한다.

4.4.2 피로 평가

앞서 수행된 해석 결과를 사용하여 열충격 사이클에 대한 피로 평가를 수행하였다. 특히 본 해석 대상은 고회피이수 피로(high cycle fatigue)가 아닌 저회피이수 피로(low cycle fatigue)에 해당되므로 Coffin-Manson 법을 통한 평가를 수행하였다. 피로 평가에서 필요한 물성 데이터는 입수한 다양한 문헌을 통하여 채택 및 비교하였다.

본 해석에서 얻은 잔류 등가 소성 변형률 0.01643 과 피로 연성 지수 -0.6 을 사용하면 Coffin-Manson 식 (1)은 다음과 같다.

$$\frac{0.01643}{2} = 0.6931(2N_f)^{-0.6} \quad (1)$$

$$2N_f = 1623$$

즉, 피로 파손에 대한 예측으로 1,623 사이클이 얻어진다. 이 계산에서 사용된 단면 감소율은 단축 인장 시험 등을 통해 얻어지는 기계적 물성치인데 여기에서는 0.5(=50%)로 가정하였다. 또한 피로 연성 지수를 -0.6 으로 설정했는데 이는 여러 문헌을 참고한 것으로 그 영역은 -0.360~0.582 였으며 -0.6 을 넘지 않았다. 따라서 기본 이론을 사용하여 피로 연성 지수는 -0.5~0.6 으로 가정하였다. 또한 SUS304 의 단면 감소율도 50% 이상으로 알려져 있어서 가장 보수적인 값으로 이를 이용하였다.

Figure 9 은(5,6) 소성 변형률에 대한 피로 수명 선도로써 단면 감소율 0.5 일 때, 두 가지 피로연성지수에 대하여 도시한 것이다. 본 해석 결과인 소성 변형률 0.01643 의 경우 1,000 사이클을 상회하는 것으로 계산되었지만, 약 0.02 가 넘는 경우 수명 사이클이 요구 조건을 충족시키지 못하는 것을 알 수 있다.

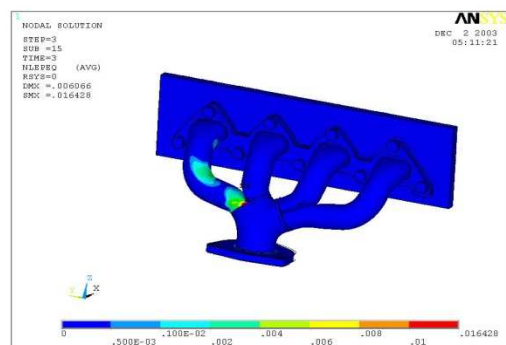
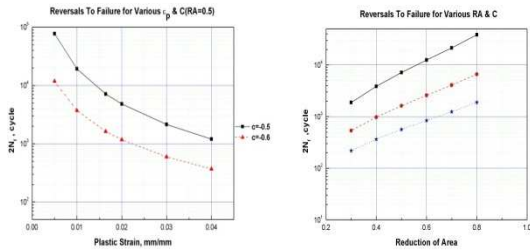


Fig. 8 Equivalent plastic strain contour(step 3)



(a) Plastic strain-life cycle (b) Cross section decrement

Fig. 9 Fatigue evaluation

5. 결론

본 연구에서는 하이드로포밍 배기다기관 부품을 개발하였으며, 공정설계 및 금형설계를 수행하였다. 또한 시스템에 대한 각종 해석을 수행하여 하이드로포밍 매니폴드의 적용가능성을 보여주었다. 본 연구에서 제안한 하이드로포밍 제작 방법은 부품수 감소, 온도편차에 의해 발생하는 잔류응력 감소등 기존 주조 및 스탬핑(stamping) 에서 발생하는 여러 어려움을 해결할 수 있는 방안으로 제시하였다. 관련 해석내용을 정리하면 아래와 같다.

(1) 유동해석 : 각 런너에 0.0232kg/s 의 유동 유량이 발생하는 경우에 대해서 정상 상태, 압축성 난류 유동해석을 수행하였으며 각 경우에 대해서 유속 및 압력 분포를 계산하였다. 각 경우에 대해서 최대 유속은 130~160m/s 로 계산되었으며 기하학적으로 비대칭이므로 런너별 유입시 서로 다른 속도 분포가 얻어졌다.

(2) 고유진동수 해석 : ANSYS 를 사용하여 고유진동수 해석을수행하였으며, 그 결과 1 차 고유 진동수는 640.14Hz 가 계산되었다. 1 차 고유 진동수가 200Hz 이상이 요구되는 점을 감안할 때, 현 설계 제품이 고유 진동수와 관련된 문제점은 없을 것으로 판단된다.

(3) 열전달 해석 : 열충격 사이클 해석을 위한 1 차 단계로서 전체 시스템에 대한 열전달 해석을 수행하였으며 최고 온도 809℃가 콜렉터 중앙부근에서 산출되었다.

(4) 열응력 해석 : 체결 볼트에 적용되는 경우에 대해서 구조해석을 수행하였다.(step 1) 그리고 최대 열부하가 적용되는 step 2 는 열전달 해석 결과를 초기 온도 분포로 사용하며 응력 및 변형률을 계산하였다. step 2 는 독립적인 해석 결과로서의 의미는 없으며 step 3 에서의 잔류 응력 및 변형률을 계산하고 최종적으로 피로 수명을 평가하기 위한 중간 과정이다. step 3 은 상온으로 냉각된 상태

에서의 잔류 응력 및 소성 변형률을 계산한다. 현재 모델에서 최종 잔류 소성 변형률은 0.0164 로 얻어졌으며 발생 위치는 런너 1 과 콜렉터 연결부였다. 또한 잔류 응력은 458MPa 로서 런너 1 과 2 그리고 콜렉터가 연결되는 부분에서 발생하였다.

(5) 피로 평가 : 열응력 해석 step 3 의 결과인 잔류 소성 변형률 0.0164 와 문헌 등을 참고한 피로연성지수와 단면 감소율 RA=0.5 를 사용하여 피로 평가를 수행하였다. 작동 환경이 LCF(Low Cycle Fatigue)에 해당되므로 Coffin-Manson 법을 사용하여 평가⁽⁷⁾하였으며 피로수명은 1,683 사이클이 얻어졌다. 이는 통상적으로 사용되는 1,000 사이클을 상회하므로 개발 모델은 기존 수명을 만족하는 것으로 판단된다.

일반적으로, 내구/강도에 해석시 영향을 주는 인자는 두께, 잔류응력, 소성경화 효과가 있다. 이 중 가장 큰 영향인자로 알려진 소성경화효과를 고려하기 위해, 본 연구에서는 튜브상태의 인장물성을 사용하였다. 향후, 보다 정밀한 해석을 위해서 잔류응력, 두께, 소성경화 효과를 고려한 해석을 수행할 계획이다.

참고문헌

- (1) Seo, T. W., 2007, "thermal fatigue life prediction of engine exhaust manifold," KSAE, Vol. 15, pp. 139~145.
- (2) Kim, B. G. and Lee, E. H., 2007, "Thermal Deformation Analysis of Exhaust Manifold for Turbo Diesel Engine," KSAE, Vol. 31, No. 3, pp. 338~343.
- (3) Lee, G. D., Ha, T. K. and Jung, J. Y., 2009, "Characterization of High Temperature Mechanical Properties of Cast Stainless Steels for Exhaust Manifold," KSTP, Vol. 18, No. 3, pp. 217~222.
- (4) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handrock, 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall.
- (5) Ganesh Sundara Raman S. and Radhakrishnan V. M., 2002, "On cyclic stress-strain behavior and low cycle fatigue life," Materials and Design, Vol. 23, pp. 249~254.
- (6) S Ganesh Sundara Raman and Padmanabhan, K. A., 1995, "A comparison of the room-temperature behavior of AISI 304LN stainless steel and Nimonic 90 under strain cycling," Int. J. Fatigue, Vol. 17, No. 4, pp. 271~277.
- (7) Vareda, L. V. and Spinelli D., 2001, "Fatigue, monotonic and fracture toughness properties of a Cr-Mn-N steel," International Journal of Fatigue, Vol. 23, pp. 857~863.