

선박엔진용 고압 분사 밸브의 최적 예압 예측

Prediction of Optical Pre-pressure in Injection Pipe

*전종원¹, #조종태², 장지현³, 최일룡³

*J.W. Jeon¹, #J.R. Cho(cjr@hhu.ac.kr)², J.H. Jang³, I.D. Choi³

¹한국해양대학교 기계공학과, ²한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부,

³한국해양대학교 조선기자재공학부

Key words : High pressure pipe, Pre-pressure, Residual stress, Elastic-plastic boundary, Hoop stress

1. 서론

현재 IMO에서는 선박의 운항에 따른 대기오염 유발물질의 배출계획을 천명한 바 있다. 또한 선박의 운항에 대해 지구 온난화 등 환경문제와 관련된 말들이 자주 오르내리고 있다.

엔진 부문에서는 출력 130kw 이상의 디젤 기관으로 건조되는 선박에는 질소 산화물(NOx)에 대한 규제가 적용되고 있다.

본 연구에서는 연료 공급 시스템의 NOx 저감기술 중 연료 분사 압력의 고압화에 대한 내용을 다루었다. 연료 분사압력을 증가시키면 노즐에서 분사되는 연료입자의 미립화가 촉진되고 증발율이 증가하여 연료-공기 혼합을 향상시켜 연소가 개선되며, 확산 연소율이 급속해져 입자상 물질과 매연이 감소된다. 또한 연소말기의 잔류 미연소 연료량을 줄임으로써 연료소비도 감소시킨다. 여기에 추가로 분사시기를 지연시키면 NOx를 동시에 감소시킬 수가 있다.

일반적으로 파이프에 고압이 흐르게 되면, 예압(pre-pressure)을 주어 파이프 내면에 잔류 압축 응력이 발생하게 하며 이 압축 응력은 고압이 흐를 때 파이프의 내부에 생기는 인장 응력을 상쇄시켜 준다. 잔류응력은 예압에 큰 영향을 받으며, 적절한 예압의 설계는 파이프의 파손 및 파잉 압력에서 발생하는 손실을 막을 수 있다. 본 연구에서는 손쉽게 계산할 수 있는 잔류응력 이론에 대한 타당성을 확인하고 유한요소 해석 결과와 비교하였으며, 최적 예압을 구하는 방법을 제시하였다.

2. 탄완전소성체의 잔류응력 이론

일반적으로 파이프는 조립 전 최종적인 가공 공정으로 유압유를 이용해 정해진 정압으로 최소 1분이상의 예압을 준다. 예압을 주는 이유는 파이프

프 내부 표면에 잔류 압축 응력을 남겨 파이프의 피로 강도를 증가시키는 데 있다. 예압의 조건은 파이프의 내면에 항복이 발생하는 압력(P_s)보다 크고 파이프 전체에 항복이 발생하는 압력(P_f)보다 작아야 한다는 것이다.

$$P_s = \frac{\sigma_Y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right), P_f = \sigma_Y \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$

σ_Y 는 항복강도이며 a 는 내경, b 는 외경이다. 예압이 이 조건을 만족하면 내부로부터 항복이 발생하며, 전체에 항복이 발생하지 않으므로 탄소성경계(elastic-plastic boundary)가 존재하게 된다. 탄소성경계를 c 라고 하면 반경응력(σ_r)과 원주응력(σ_θ)은 아래와 같다.

$$\sigma_r = \sigma_Y \ln \frac{r}{a} - p - p \left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_Y \left(1 + \ln \frac{r}{a} \right) - p - p \left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

[$a < r < c$ 의 경우]

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_Y c^2}{2b^2} - p \left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_Y c^2}{2b^2} - p \left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

[$c < r < b$ 의 경우]

3. 유한요소 해석

탄소성 변형에 대한 연구를 할 때, 사용되는 소재의 응력-변형률 선도는 중요한 요소가 된다. 잔류응력 이론은 소재를 Fig. 1의 탄완전소성체로 가정하였다. 따라서 실제 소재의 거동인 선형경화 강소성체와 탄완전소성체의 잔류응력의 차이에 대한 분석이 필요하며 이를 유한요소 해석을 통하여 비교해 보았다.

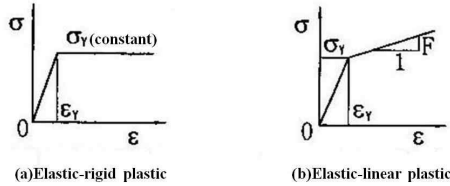


Fig. 1 Stress-strain curves

해석에 적용된 파이프의 외경 및 두께, 소재에 적용된 물성치는 Table 1에 정리해 두었다.

Table 1 Tube dimension and material properties

	O.D	Thickness	Modulus of elasticity	Yield strength
Value	25mm	7.5mm	198GPa	343.3MPa

파이프에 작용된 예압은 275MPa이다. 축대칭 모델을 사용하여 해석을 수행하였으며, 소성 변형이 일어나므로 탄소성 대변형 해석으로 수행하였다.

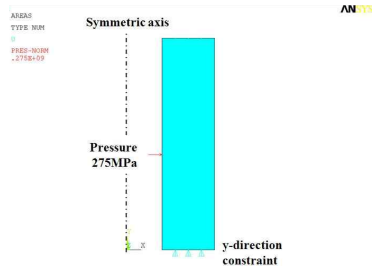


Fig. 2 Geometry and boundary conditions

4. 결과검토

탄완전소성체의 잔류응력 이론과 탄완전소성체 및 선형경화 강소성체에 대한 유한요소 해석 결과는 Fig. 3과 같다.

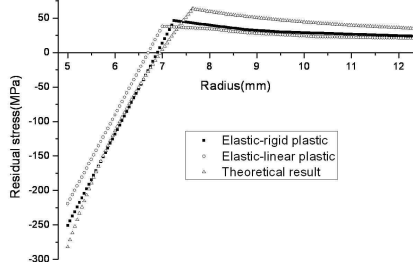


Fig. 3 Residual stresses

결과를 보면 탄완전소성체와 선형경화 강소성체의 응력값은 12%이하의 오차가 발생한 것을 확인할 수 있다. 응력값은 탄완전소성체의 값이 더욱

크므로 선형경화 강소성체의 경우보다 극한의 상태라고 할 수 있다. 따라서 탄완전소성체로 가정을 두는 수식의 타당성을 확인할 수 있다. 잔류응력 이론 및 탄완전소성체의 유한요소해석 결과가 전체적인 경향은 비슷하지만 값에서 차이가 발생했는데, 이는 이론에서 길이방향의 응력을 고려하지 않은 점에서 발생한 것으로 볼 수 있다.

5. 최적 예압 예측

작동 응력은 오로지 작동될 때의 압력에만 의존하기 때문에 바뀔 수가 없다. 따라서 파이프의 안전성을 확보하기 위해서는 적절한 예압을 통해 잔류응력을 잘 조절해 주어야 한다.

반경응력과 원주응력의 차이가 전단응력이기 때문에, 먼저 파이프 내면의 반경응력과 원주응력의 값이 똑같게 되도록 예압 설계를 하였다. 결과를 Fig. 4의 (a)에 정리하였다. 결과를 보면 파이프 내면의 전단응력은 작으나 탄소성경계 및 외면에서의 전단응력이 상당히 커진 것을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위해 Fig. 4의 (b)와 같이 원주응력이 내면에서 0이 되도록 하였다.

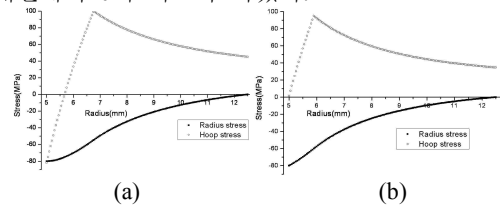


Fig. 4 Optical pre-pressure prediction

내면에서는 압축 응력 상태이므로 피로 파손이 발생하지 않으며 탄소성경계 및 외면에서의 전단응력값은 감소한 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 실제 예압 조건에 대하여 최적 예압 설계를 하였으며, 낮은 예압으로도 충분한 안전성을 확보할 수 있었다. 따라서 예압 공정에 대한 비용을 줄일 수 있고, 정확한 설계 조건을 제시할 수 있음에 이 연구는 실용가치가 높다고 할 수 있다.

참고문헌

1. 김영석, 소성역학, 시그마프레스, 2003
2. 김동원, 소성학, 청문각, 2009
3. Roberto Brighenti, "Axially-cracked pipes under pulsating internal pressure", International Journal of Fatigue, Vol.78, 2001