산화제 펌프 회전부의 정적 구조해석

윤종훈*, 최창호**,장영순***, 이영무****

Static Structural Analysis on Rotating Parts of LOX Pump

Jong-Hoon Yoon*, Chang-Ho Choi**,Young-Soon Jang***, Yeong-Moo Yi****

Abstract

LOX pump is one of the sub-assemblies constructing turbopump unit. In the current study, static structural analysis on such rotating parts as impeller and inducer has been carried out. Three major factors which can affect the structural stability of the rotating parts of LOX pump, are temperature, pressure, and centrifugal force. The effect of each factor was preliminarily investigated, then the analysis under the consideration of the combined loading conditions has been carried out. The major factor that affects the structural stability was proved to be temperature. The analyses of the combined cases showed that the designed impeller and inducer had reasonable safety margins, which means that the impeller and the inducer will be stable in static structural strength. Although there was no problem in the structural strength of the impeller and the inducer, a modal analysis should be followed in order to verify the interference between the rotating part and the inner surface of casing.

초 록

터보펌프를 구성하는 부분 조합체 중의 하나인 산화제 펌프의 인듀서와 임펠러에 대해서 정적 구조해석을 수행하였다. 먼저 온도, 원심력 및 압력의 영향을 각각 독립적으로 파악한 후 조합된 하중이 작용하는 경우에 대해서 인듀서와 임펠러의 거동을 살펴보았다. 설계된 형상과 재질에 대해서 구조적으로 가장 큰 영향을 미치는 요소는 온도였으며, 모든 경우에 대해서 적절한 안전 여유를 갖는 것으로 예측 되었다. 하지만 진동의 영향은 고려되지 않았기 때문에 회전부와 케이싱과의 간섭 여부를 정확히 파악하기 위해서는 추가적으로 진동 해석이 수행되어야 할 것이다.

키워드 : 터보펌프(turbopump), 산화제펌프(LOX pump), 인듀서(inducer), 임펠러(impeller), 안전계수(safety factor), 온도(temperature), 압력(pressure), 원심력(centrifugal force)

* 구조그룹/yjh@kari.re.kr
** 터보펌프개발그룹/cch@kari.re.kr
*** 구조그룹/ysjang@kari.re.kr
**** 우주발사체기술실/ymy@kari.re.kr

1. 서 론

일반적으로 펌프(pump)라 함은 유체에 에너지를 부여하는 기능을 하는 기계적 요소이며, 터빈(turbine)은 유체로부터 에너지를 공급받아 다른 기계적 에너지로 변환하는 기능을 갖는 기계요소이다. 따라서 발사체에 사용되는 터보펌프(turbopump)는 터빈에서 고온 고압으로 압축된 유체로부터 에너지를 공급받아 연료펌프와 산화제 펌프의 임펠러(impeller)와 인듀서(inducer)를 회전시킴으로써 저압의 연료와 산화제를 승압시켜 엔진 연소실로 보내는 기능을 갖게 된다. 이 때문에 터보펌프의 성능이 발사체의 성능을 좌우하는 중요한 요소가 되는 이유이다.

또한, 터보펌프의 구조적 안정성은 터보펌프의 성능을 보장하기 위해서 가장 먼저 해결해야 할 문제이며 본 연구에서는 터보펌프를 구성하는 부분체중의 하나인 산화제 펌프의 인듀서와 임펠러에 대해서 정적 구조해석을 수행하였으며 그 결과에 대해서 검토하였다.

2. 인듀서의 정적 구조해석

2.1 3차원 솔리드 모델링

산화제 펌프는 극저온의 액화 산소를 작동 매체로 사용하기 때문에 재질 선정에 있어서 산화제와의 반응성과 극저온 강도를 고려하여야 한다. 따라서 산화제 펌프의 인듀서 재질은 석출경화형으로서 준오스테나트(semi-austenite) 계열의 스테인리스강인 17-7PH TH1050으로 선정하였으며, 화학적 조성과 상온에서의 기계적 성질은 표 1과 2에 각각 나타내었다.

일반적으로 17-7PH는 극저온 환경에서 강도는 더 증가하는 것으로 알려져 있기 때문에 실제 구조해석에 적용한 값은 보수적인 관점에서 상온의 물성치를 적용하였다.

그림 1은 인듀서의 3차원 솔리드 모델을 나타내는 것으로서, leading edge의 날카로운 부분은 0.1mm의 곡률을 주었으며, 블레이드(blade)와 축이 만나는 곳은 R0.5, trailing edge는 R0.3, trailing edge와 블레이드면이 만나는 부분은 R5.0을 주어 응력 집중을 분산시킴과 동시에 유연한 곡면이 되도록 설계 하였다.

설계된 솔리드 모델의 해석적인 무게는 약 1.81kg으로 추정되었다.

표 1. 17-7PH의 화학적 조성

Chemical Composition(wt%)								
C	Si	Mn	Ni	Cr	P	S	Other	Base
≤ 0.09	≤ 1.0	≤ 1.0	6.5~ 7.75	16~ 1.8	≤ 0.04	≤ 0.03	0.75~ 1.0 Al	Fe

표 2. 17-7PH TH1050의 상온에서의 기계적 성질

Density, kg/m3	Poisson's ratio	Elastic Modulus, GPa	Tensile Strength, MPa	Ultimate Strength, MPa
7640	0.28	199.955	1030	1220

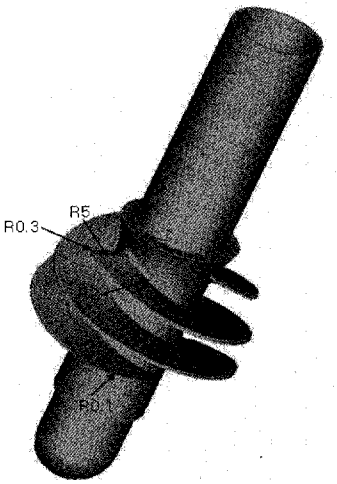


그림 1. 인듀서의 3차원 모델링

2.2 해석조건

인듀서에 작용하는 하중은 압력, 온도 및 원심력이며 압력 하중의 경우 블레이드의 앞면과 뒷

면에 작용하는 압력의 상대적인 차이가 중요하므로 실제 구조해석에서도 블레이드의 앞면에 압력의 상대값만을 부여하여 해석 하였다. 또한, 압력은 블레이드면을 따라서 구배가 존재하지만 보수적인 관점에서 상대압력차의 최대값이 균일하게 작용한다고 가정하였다. 각 하중들의 구체적인 값은 다음과 같다.

◎ 상대 압력차이의 최대값 : 4.4MPa
◎ 회전속도 : 20,000 RPM
◎ 인듀서 표면의 초기 온도 : -180℃

또한, 인듀서의 블레이드는 120° 등간격으로 3개가 배치되어 있으므로 해석상에서는 1개의 블레이드가 축에 연결되어 있는 형상으로 해석하였고 축은 중실축이지만 작용하는 하중에 비해서 직경이 큰 편이므로 적당한 내경을 가지면서 내면의 병진 및 회전 변위는 고정된 중공형으로 모델링하여 요소수의 불필요한 증가를 줄이고자 하였다.

인듀서 해석은 정적 탄성 구조해석이며, 선형 4면체 요소를 이용하였고, 기하학적 비선형성을 고려하였다. 그림 2는 인듀서의 해석 대상을 나타내는 그림이다.

해석의 경우의 수는 표 3에 나타낸 것처럼 총 5가지로서 온도, 원심력, 압력이 각각 따로 작용하는 경우 3가지와 원심력과 압력이 동시에 작용하는 경우, 그리고 온도, 원심력 및 압력이 모두 작용하는 경우에 대해서 해석하였다.

표 3. 해석 조건

CASE	Loading Condition
1	Thermal Loading
2	Centrifugal Force
3	Pressure
4	Centrifugal Force + Pressure
5	Thermal Loading + Centrifugal Force + Pressure

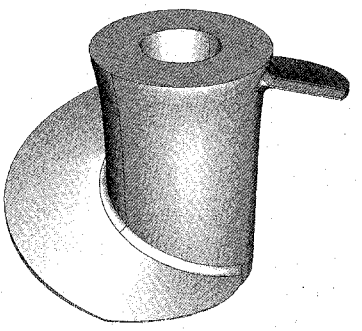
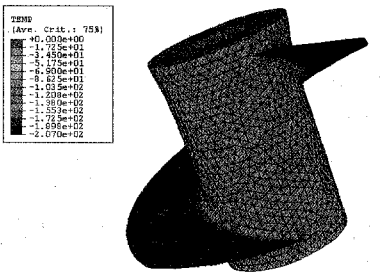


그림 2. 인듀서 해석 대상 영역

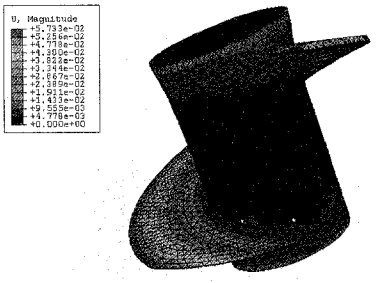
2.2 해석결과

그림 3은 열응력 해석 결과로서 인듀서의 표면 온도가 초기에 -180℃이고 내부는 상온이라고 가정하였을 경우 정상상태에 도달한 후 인듀서의 온도분포, 변위 및 응력분포를 각각 나타내는 그림이다. 그림 3(b)에서 변위는 크기를 나타낸 것이기 때문에 양(+)의 값으로 나타난 것이며 실제는 반경방향으로의 수축을 의미한다. 또한, 그림 3(c)의 응력분포는 trailing edge와 축이 만나는 곳에서 506MPa 정도의 응력이 집중되는 현상을 나타내었으나 17-7PH TH1050의 항복응력(1030MPa)에 비해 상당히 낮음을 알 수 있을 뿐만 아니라 응력 집중부위를 확대한 그림에서 알 수 있듯이 506MPa은 수치적 오차로 간주 될 수 있고, 실제로는 약 420~460MPa 정도일 것으로 예상된다.

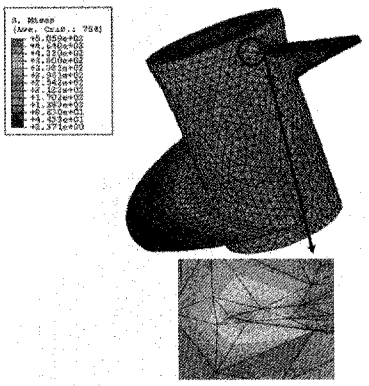


(a) temperature distribution

그림 3. 인듀서 열응력 해석 결과



(b) displacement

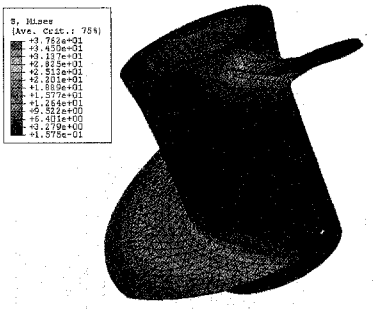


(c) Von Mises stress

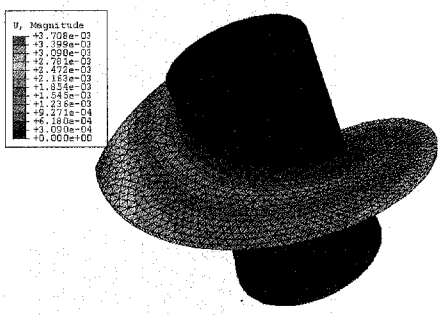
그림 3. 인듀서 열응력 해석 결과-계속

그림 4는 원심력에 의한 인듀서 내부의 응력 분포와 변위를 나타내는 그림으로서, 그 영향은 열응력의 약 55% 수준임을 알 수 있다. 최대응력은 열응력 해석의 경우와 마찬가지로 tailing edge와 축이 만나는 곳이며, 수치적 오차를 무시할 경우 그 크기는 약 250~280MPa일 것으로 예측된다. 한편, 원심력으로 인한 최대변위는 반경방향으로 3.71×10^{-3}mm으로 나타났으며 변위의 방향이 열응력의 경우와는 반대이므로(팽창) 열응력의 영향과 상쇄되는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 블레이드 앞면에 상대 압력차만 작용할 경우에 대한 해석결과를 나타내는 그림이다. 최대응력은 블레이드의 앞면과 축이 만나는 근처이며, 그 크기는 수치적 오차를 무시할 경우 약 300~350MPa이 될 것으로 예상된다. 변위는 약 0.35mm로서 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 축방향 변위가 주된 변위의 방향으로 나타났다.



(a) Von Mises stress



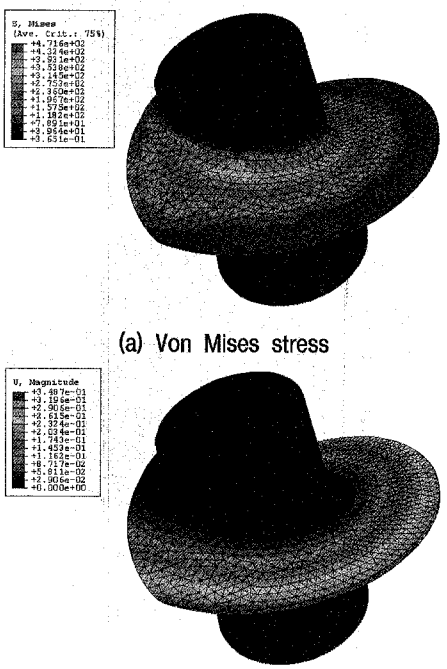
(b) displacement

그림 4. 인듀서 원심력 해석 결과

그림 6은 원심력과 압력이 동시에 작용할 경우 인듀서의 거동을 살펴본 그림이다. 최대응력의 발생위치는 블레이드의 뒷면과 축이 만나는 곳이며 수치적 오차를 무시할 경우 상대 압력차만 고려한 경우와 유사하게 약 300~350MPa이 될 것으로 예상 되며, 그때의 안전계수는 약 2.94가 된다. 변위 또한 0.35mm로서 상대 압력차 해석의 경우와 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서 원심력과 압력이 동시에 작용할 경우 압력의 영향이 최대응력과 최대변위의 방향을 결정하는 주된 인자임을 알 수 있다.

그림 7은 열응력, 원심력 및 압력을 모두 고려하였을 경우에 대한 해석 결과를 나타내는 그림

이다. 최대응력 발생위치는 열응력의 경우와 유사하게 trailing edge와 축이 만나는 곳이며 그 크기는 약 805MPa로 계산되었다. 하지만 이 경우에도 수치적 오차를 무시할 경우 470~530MPa 정도일 것으로 추정되며, 이때의 안전계수는 약 1.94이다. 최대변위는 블레이드의 외경 근방에서 발생하였고 그 크기는 약 0.34mm로서 축방향이 변위의 주된 방향임을 알 수 있다.



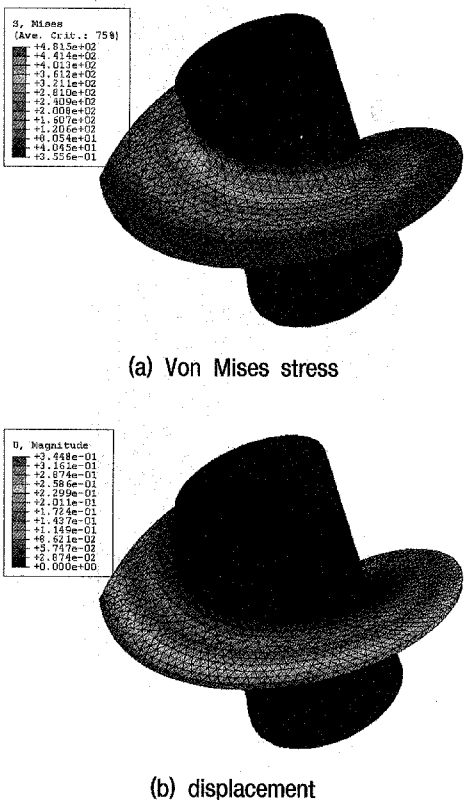
(a) Von Mises stress

(b) displacement

그림 5. 인듀서 상대 압력차 해석 결과

이상의 해석 결과로부터 알 수 있는 것은 인듀서에 작용하는 하중들 중에서 인듀서의 구조적 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 온도임을 알 수 있고 모든 해석의 경우에 대해서 인듀서는 구조적으로 안전하다고 할 수 있다.

또한, 인듀서의 블레이드 팁(tip)과 케이싱과의 간격이 1.0mm임을 고려할 때 상기 해석에서 계산된 변위는 축방향 변위가 주된 변위의 방향이기 때문에 안전 여유를 충분히 가지고 있다고 판단은 되지만 진동의 영향을 고려하지 않았기 때문에 진동해석을 통해서 반경방향 변위를 정확히 파악할 필요가 있을 것으로 생각된다.



(a) Von Mises stress

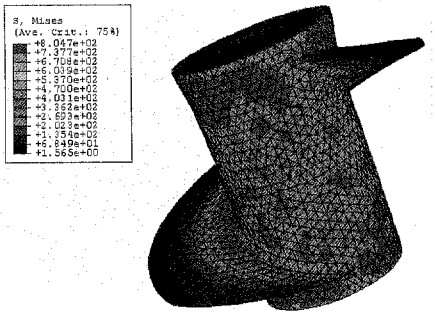
(b) displacement

그림 6. 원심력과 압력이 동시에 작용할 경우에 대한 인듀서의 구조해석 결과

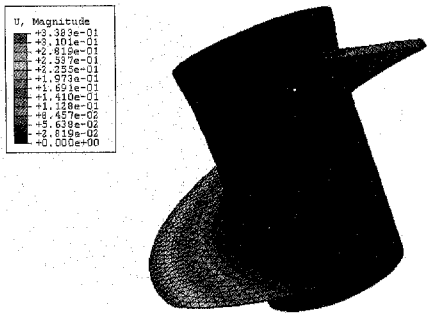
이상의 결과를 정리하면 표 4와 같다.

표 4. 인듀서 정적 구조해석 결과

Case	Max. Stress, MPa			Max. Displ., mm
	Including Numerical Error	Excluding Numerical Error	Safety Factor	
1	506	420~460	-	5.73×10^{-2}
2	373	250~280	-	3.71×10^{-3}
3	472	300~350	-	3.50×10^{-1}
4	482	300~350	2.94	3.50×10^{-1}
5	805	470~530	1.94	3.40×10^{-1}



(a) Von Mises stress



(b) displacement

그림 7. 열응력, 원심력 및 압력의 영향을 모두 고려한 경우의 인듀서 구조 해석 결과

3. 임펠러의 정적 구조해석

3.1 임펠러 3차원 솔리드 모델링

임펠러 역시 극저온 액화 산소를 작동 매체로 하기 때문에 인듀서와 동일한 재질인 17-7PH TH1050을 적용하였으며, 3차원 솔리드 모델은 그림 8에 나타낸 바와 같다.

3.2 해석조건

임펠러의 해석조건은 상대 압력차의 값을 제외한 모든 조건이 인듀서와 동일하며, 해석의 경우의 수 또한 동일하다. 임펠러의 블레이드 앞면과 뒷면에 작용하는 최대상대 압력차는 3.93MPa이며, 임펠러 덮개의 윗면과 아랫면에 작용하는 절대 압력은 1.96MPa이다.

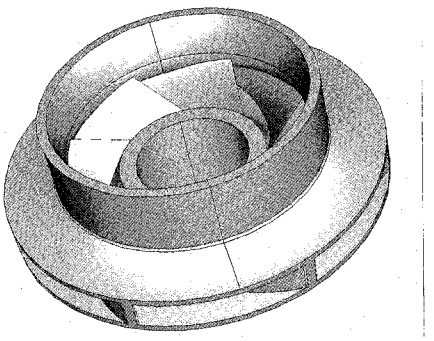
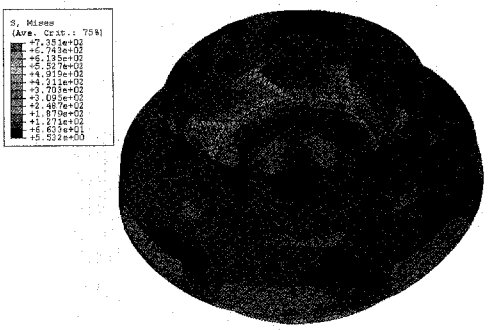


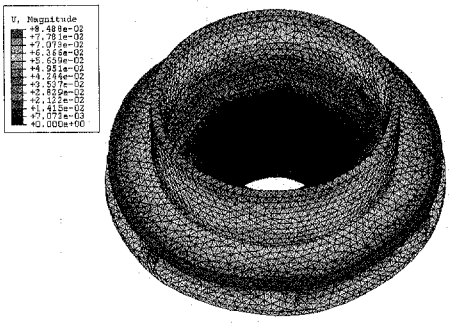
그림 8. 임펠러 솔리드 모델

3.2 해석결과 및 검토

그림 9는 임펠러의 열응력을 해석한 결과로서, 최대응력이 발생한 위치는 블레이드의 leading edge와 덮개의 아랫면이 만나는 곳이다.



(a) Von Mises stress



(b) displacement

그림 9. 임펠러의 열응력 해석 결과

최대응력의 크기는 수치적 오차를 무시할 경우 약 430~500MPa이 될 것으로 예상되며, 최대변위는 임펠러의 외경쪽에서 반경방향으로 8.5×10^{-2}mm 수축되는 것으로 예측되었다.

그림 10은 임펠러에 작용하는 원심력의 영향을 파악한 결과로서 최대응력 발생 위치는 열응력 해석의 경우와 동일하며 그 크기는 287MPa을 나타내었으나 수치적 오차를 무시할 경우 170~200MPa의 범위가 될 것으로 예상된다. 한편, 최대변위는 반경방향으로 2.1×10^{-2}mm 팽창하였으며 열응력과 원심력의 영향을 동시에 고려할 경우 원심력으로 인한 팽창변위는 열응력으로 인한 수축 변위에 의해 상쇄될 것으로 예상된다.

그림 11은 블레이드의 뒷면에 상대 압력차 3.93MPa과 덮개 아래와 윗면에 절대 압력 1.96MPa이 작용한 경우에 대한 구조해석 결과로서 최대변위 발생 위치는 블레이드의 leading edge 중간 부분이며 수치적 오차를 무시할 경우 180~210MPa 정도로 예측된다. 최대변위의 발생 위치는 임펠러의 외경쪽 이지만 그 방향은 축방향 즉, 임펠러의 덮개 윗면과 아랫면이 벌어지는 형상이며 2.4×10^{-2}mm로 예측되었다.

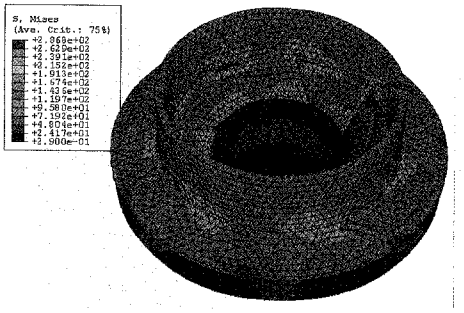
이상의 세 경우에 대한 해석 결과로부터 임펠러의 구조적 안정성에 가장 큰 영향을 주는 인자도 역시 온도임을 알 수 있다.

그림 12는 원심력과 압력이 동시에 작용한 경우에 대한 해석 결과로서 최대응력은 수치적 오차를 무시할 경우 200~240MPa 으로 추정되며 이 경우 안전계수는 약 4.3이 된다.

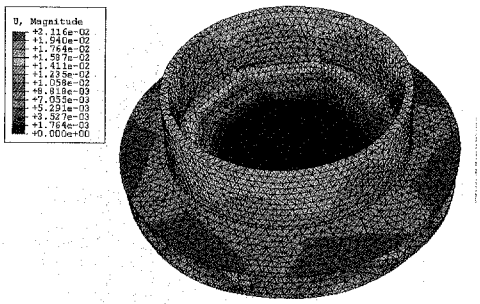
그림 13은 열응력, 원심력 및 압력을 모두 고려한 경우에 대한 해석 결과로서 최대응력 784MPa(안전계수 1.31), 최대변위 7.3×10^{-2}mm 이며, 수치적 오차를 무시할 경우에는 400~450MPa(안전계수 2.29)로 추정된다.

이상의 결과를 정리하면 다음의 표 5와 같다.

4. 결 론

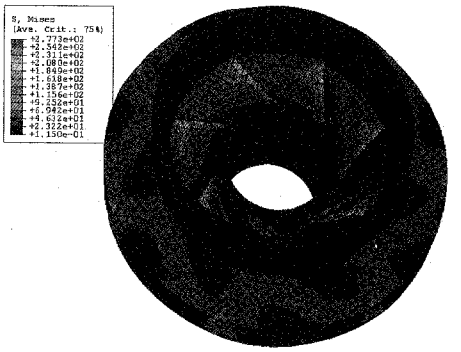


(a) Von Mises stress



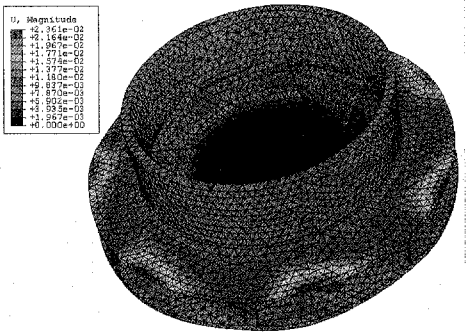
(b) displacement

그림 10. 임펠러 원심력 해석 결과



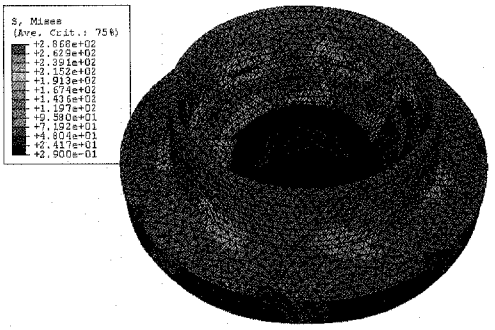
(a) Von Mises stress

그림 11. 임펠러 상대 압력차 해석 결과

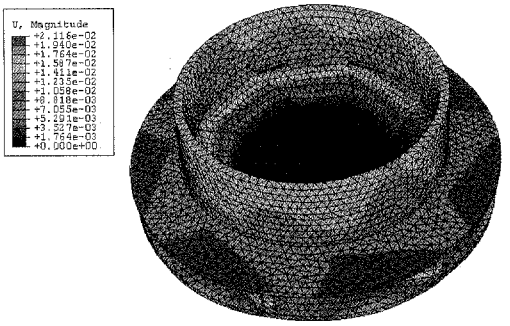


(b) displacement

그림 11. 임펠러 상대 압력차 해석 결과-계속

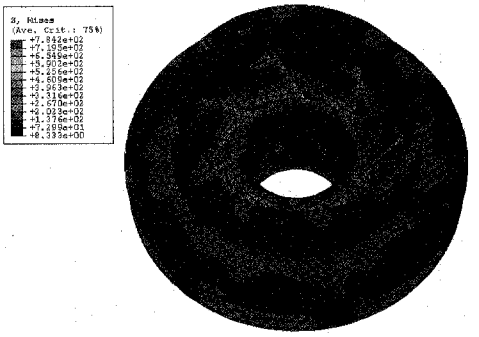


(a) Von Mises stress

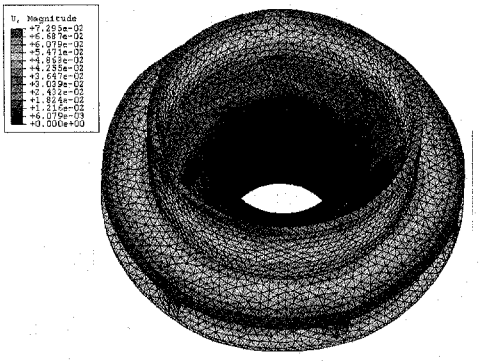


(b) displacement

그림 12. 원심력과 압력이 동시에 작용하는 경우에 대한 임펠러 해석 결과



(a) Von Mises stress



(b) displacement

그림 13. 열응력, 원심력 및 압력이 모두 작용하는 경우에 대한 임펠러의 정적 구조해석 결과

표 5. 임펠러 정적 구조해석 결과

Case	Max. Stress, MPa			Max. Displ., mm
	Including Numerical Error	Excluding Numerical Error	Safety Factor	
1	736	430~500	-	8.5×10^{-2}
2	287	170~200	-	2.1×10^{-2}
3	277	180~210	-	2.4×10^{-2}
4	354	200~240	4.30	2.1×10^{-2}
5	784	400~450	2.29	7.3×10^{-2}

이상의 해석 결과로부터 인듀서와 임펠러의 두 경우 모두 온도가 구조적 안정성에 영향을 미치는 주된 인자임을 알 수 있었으며 우려하였던 압력의 영향은 온도에 비해 상대적으로 작은 결과를 나타내었다. 또한, 온도, 원심력 및 압력을 모두 고려하였을 경우 온도의 영향은 수축응력이 주된 성분이기 때문에 압력과 원심력의 영향과 부분적으로 상쇄되는 결과를 나타내었고 결론적으로 강도에서는 안전한 것으로 판단된다.

변위의 경우 임펠러는 진동의 영향을 고려하지 않더라도 케이싱과 접촉하지 않을 정도로 충분한 여유를 갖는 것으로 판단되지만 인듀서의 경우는 진동의 영향에 따라 간섭이 발생할 가능성도 존재할 것으로 보이며 진동 해석이 추가적으로 보충되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 우유철 외, 고압 터보펌프 개발, 현대모비스, 과학기술부.
2. C. E. Nielson, Liquid Oxygen Turbopump Technology, NASA-CR-165487, NASA.
3. Dieter K. Huzel and David H. Huang, Modern Engineering for Design of Liquid -Propellant Rocket Engines, AIAA.
4. George P. Sutton, Oscar Biblarz, Rocket Propulsion Elements, 7th Ed., John Wiley & Sons.