

극저온 냉동기용 냉매압축기의 개발

김승우, 박기철*, 이기호, 김경수, 김동권

Development of Neon Compressor for Reverse Brayton Cryocooler

Seungwoo Kim, Kicheol Park*, Kiho Lee, Kyungsoo Kim, Dongkwon Kim

Key Words: Turbomachinery(터보기계), Cryocooler(극저온 냉동기), High Speed PMSM(고속모터), Gas Bearing(가스 베어링), Hermetic Gas Compressor(밀폐형 가스압축기)

ABSTRACT

A centrifugal compressor of 50HP for reverse brayton cryocooler using neon as a coolant has been developed. It has relatively low total-to-total pressure ratio but mass flow rate is very small and the working gas, neon, has greater specific heat ratio than air. It was essential to have very high rotational speed of 100,000 RPM. The efficiency of compressor has great effects on overall system and the COP of cryocooler. To meet the design requirement of the compressor efficiency and to minimize the required rotational speed, highly efficiency impeller having low specific speed was designed. To maintain the overall system efficient high, gas bearing of bump type and high speed permanent magnet synchronous motor was developed and adopted. In this paper, design and performance prediction results of the compressor impeller is presented.

1. 서론

청정 고급에너지인 전력의 수요는 산업설비의 고속화 및 고출력화에 따라 날이 급증하고 있으며, 이의 효과적인 이용을 가능케 하는 초전도응용기술은 생산된 전력에너지의 이송, 변환, 손실을 극도로 절감함으로써 전력 생산을 위한 저급에너지의 사용을 억제할 수 있는 환경친화적인 첨단기술로 인식되고 있다. 일반적으로 120K 이하의 온도를 의미하는 극저온 영역에서는 물질의 열적, 물리적, 기계적 특성이 그 이상 온도에서와는 다른 양상을 보이게 되며 일부 물질의 경우 저항이 급격히 감소하여 거의 없어지는 초전도(Superconductivity) 현상이 나타나게 된다. 특히, 초전도 케이블, 초전도 모터 및 변압기에 관련된 초전도 기술은 대용량의 전력을 이송·변환하는 핵심기술로서

기존의 대형 설비들을 축소시키면서 고출력 화와 변환 효율의 극대화를 기할 수 있는 에너지 관련 핵심기술 일 뿐 아니라, 신 물질 및 신소재의 합성, 분리, 추출에도 필수적인 기반기술이다. 이러한 초전도 시스템의 구성에 있어서 고온 초전도체(High Temperature Superconductor, HTS) 및 이를 이용한 케이블의 초전도 현상을 유지시킬 수 있는 온도(20~130K)의 확보를 위한 냉각기술 및 장치의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 이처럼 초전도 현상이 나타나는 온도 이하로 물체를 냉각하는 기기인 극저온 냉동기는 사용하는 온도영역 및 냉동 용량에 G-M(Gifford-McMahon) 냉동기, 맥동관(Pulse Tube), 스티어링(Stirling)냉동기 등이 현재 활발하게 연구 개발되고 있으며 최근에는 역 브레이튼 사이클(Reverse Brayton Cycle)을 사용한 터보 역 브레이튼(Turbo Reverse Brayton) 냉동기 등이 연구되고 있다. 역 브레이튼 냉동기는 Cycle 특성상 냉각은

* (주)뉴로스 터보에너지 연구소
E-mail : kcpark@neuros.co.kr

도 범위가 넓고, 효율이 우수하며, 왕복 운동이 없어 신뢰도와 수명 측면에서 유리하다. 또한, 회전체에 의한 연속적인 운동으로 냉각온도에 도달하는 시간이 짧고 급속 냉각이 가능하며, 크거나 무거운 측면에서 가장 컴팩트한 제품이라고 할 수 있다. 또한 헬륨(Helium) 또는 네온(Neon) 등 저온의 냉매 개스가 직접 분사되는 시스템도 가능하여 Cold Finger를 사용한 점점 냉각이 아닌 극저온 용기(Cryostat)를 활용하는 시스템과 같이 넓은 범위의 면적이나 부피의 냉각에 유리한 장점을 갖고 있다. 아래의 그림 1에 역 브레이튼 극저온 냉동기의 열역학적 선도를 나타내었는데 “역 브레이튼”이라는 이름에서 암시하듯 가스터빈 엔진에 적용되는 브레이튼 사이클의 반대로 작동하는 것을 알 수 있다.

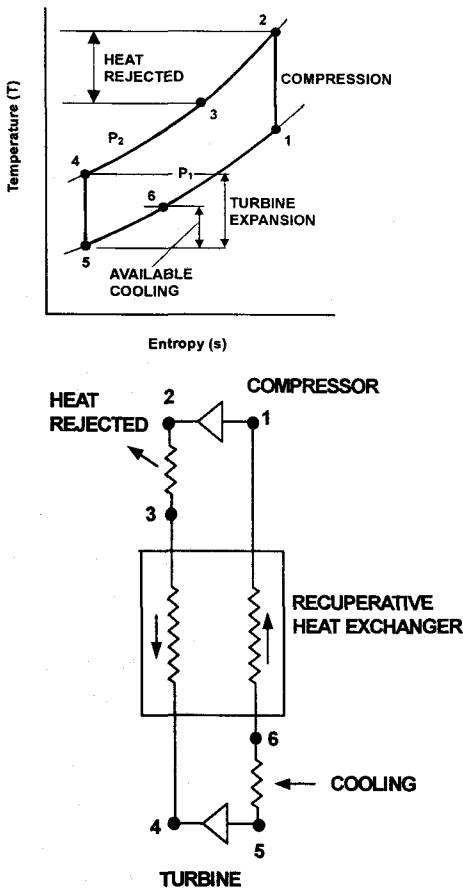


그림 1. 역브레이튼 냉동사이클의 열역학 선도

본 논문에서는 네온을 냉매로 사용하는 역 브레이튼 극저온 냉동기용 냉매압축기 임펠러의 설계 및 성능해

석 과정에 대하여 언급하고 그 결과를 제시하고자 한다. 설계된 압축기는 원심형 임펠러를 사용하며 2.6의 비교적 낮은 전압축비를 가지나 유량이 0.120kg/sec로 매우 작고 네온의 물리적 특성으로 인하여 100,000 RPM의 매우 높은 회전수를 요구한다. 냉매압축기의 효율은 적용되는 극저온 냉동기의 열효율에 큰 영향을 미치게 되므로 고효율의 임펠러 설계가 요구된다. 소형이면서 필요한 회전수를 가능한 적게 하기 위해서 저비속(Low Specific Speed)이면서도 충분한 효율을 유지할 수 있는 임펠러 설계를 수행하였으며, 냉매압축기 전체 시스템의 효율을 높이고 요구되는 회전수를 확보하기 위하여 영구자석을 사용한 초고속 모터 및 포일 가스베어링을 설계 적용하였다.

2. 냉매압축기의 설계 사양

아래의 표 1에 본 논문에서 설계하고자 하는 압축기의 설계 사양 및 설계결과를 나타내었다. 냉동기의 성능해석 결과 사용되는 열교환기의 효율이 높아짐에 따라 압축기의 최적 압축비가 낮아지는 경향을 가지는 것을 알 수 있었다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 열교환기의 효율 변동에 따른 냉동기의 성능저하가 크지 않은 범위에서 최적 압축비를 선정함으로써 향후 열교환기의 성능이 변하더라도 동일한 압축기를 적용할 수 있도록 하였다.

표 1. 냉매압축기의 설계사양 및 설계결과

Design Point 7.0	Design Parameters	
	Statement	Result
$P_{inlet} (P_a)$	101,325	101,325
$T_{inlet} (^{\circ}K)$	328.04	328.04
$\dot{m} (kg/sec)$	0.120	0.123
$\dot{m}_c (kg/sec)$	0.128	0.131
PR	2.6	2.6
$\eta_{ad} (\%)$	75.0	78.5
α_1	0.0	-
RPM	-	95,000
$T/D \text{ Ratio} (\%)$	> 20	> 20

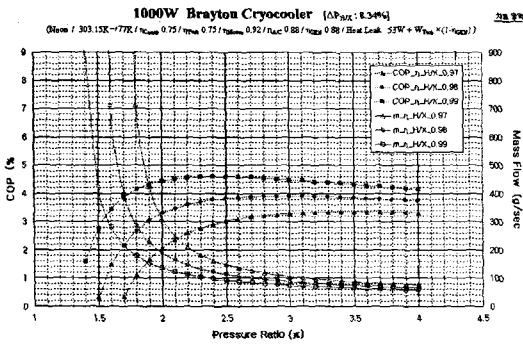


그림 2 압축비에 및 열교환기의 성능 변화에 따른 냉동기 성능 변화

다음으로는, 주어진 설계 사양을 만족할 수 있는 최적의 압축기 형식에 대하여 효율, 크기 및 안전성의 세 가지 측면에서의 검토가 이루어 졌다.

2.1 효율적 측면

압축기 형식은 크게 나누어 Positive Displacement Type, Sliding Vane Type 및 Dynamic Type으로 나눌 수 있다. 이 중 어떤 형식을 사용할 것인가는 압축기 입구 볼륨 유량, 압축비 및 회전수로부터 결정되는 비속도(Specific Speed) N_s 에 따라 결정하게 된다. 만약 볼륨 유량이 작고 압축비가 높은 경우 비속도가 낮은 Positive Displacement Type 의 압축기를 사용하게 되며 볼륨 유량이 크고 압축비가 작은 경우 비속도가 큰 Dynamic Type의 압축기를 사용하게 된다. 그림 3 에 Positive Displacement 형식의 압축기인 Screw/Rotary 압축기 와 Dynamic Type의 압축기인 원심압축기가 비속도에 따라 얻을 수 있는 효율의 분포를 나타내었다.

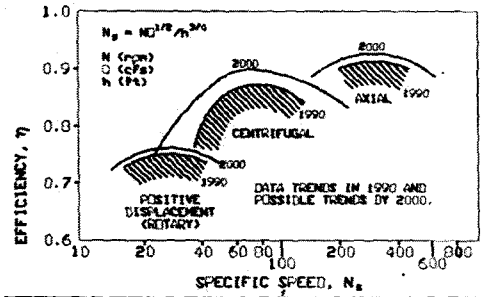


그림 3. 비속도에 따른 압축기 효율 변화

현재 Cryocooler 용 압축기의 비속도를 계산하면

$$N_s = \frac{N(RPM)\sqrt{Q(ft^3/sec)}}{H(ft)^{3/4}} = \frac{100,000\sqrt{5.1288}}{(73584.6)^{3/4}} = \underline{50.69}$$

따라서 그림 3으로 부터 Dynamic Type인 원심압축기를 사용하는 것이 보다 높은 효율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.2 용량 및 크기 측면

그림 4에는 다양한 압축기 입구 볼륨 유량 및 압축비 범위에 대하여 적절한 압축기 형식을 나타내고 있다. 현재 Cryocooler 용 압축기의 경우 입구 볼륨 유량은

$0.16378 m^3/sec (=307.73 ft^3/min)$, 압축비는 2.6

이므로 그림 4에서 보면 원심압축기 또는 Screw/Rotary 압축기의 사용이 가능한 영역임을 알 수 있다. 그러나 Screw/Rotary 압축기의 경우 사용 가능 영역의 우측에, 원심압축기의 경우 사용 가능 영역의 좌측에 위치하고 있는데 이는 현재 Cryocooler 용 압축기의 사양이 Screw/Rotary 압축기로서는 대형/고용량의 사양이나 원심압축기로서는 소형/저용량의 사양으로 볼 수 있다. 따라서 비속도에 따른 효율 측면 외에도 Cryocooler 의 전체적 크기를 소형화하는 측면에서는 원심압축기를 냉매 압축기로 선정하는 것이 보다 타당하다고 판단된다.

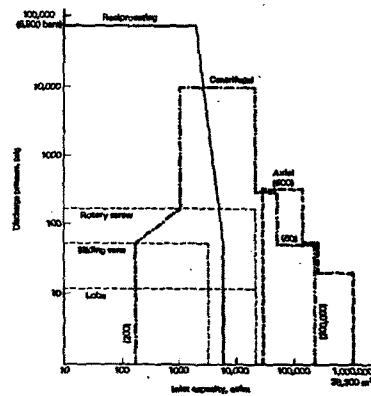


그림 4. 볼륨유량 및 압축비에 따라 사용가능한 압축기 형식

2.3 신뢰도 및 수명

극저온 냉동기용 원심압축기의 경우 소형 고속의 특징을 가지므로 가스베어링과 같은 무급유 시스템을 적용하기에 매우 적합하며 이 경우 기존의 Screw/Roraty 압축기에서 해결해야 하는 오일/냉매 분리 문제를 손쉽게 해결 할 수 있다. 또한 가스베어링을 채택한 원심압축기의 경우 Screw/Rotary와 같은 Positive Displacement 압축기와는 비교할 수 없을 정도로 우수한 신뢰도와 정비성 및 높은 수명을 가지고 있다. 현재 개발하고자 하는 극저온 냉동기의 1차적인 응용 분야인 초전도 케이블 냉각의 경우 상용화를 위해서는 매우 신뢰도가 높은 냉각 시스템을 필요로 한다(예를 들어 매우 먼 거리를 연결하는 극저온 케이블의 중간 중간에 있는 냉각시스템 모두에 관리 인력이 배치되어 있을 수는 없다). 그러나 일반적으로 Screw/Rotary 압축기의 경우 고장이 잦아 가까운 거리에 관리 인력이 위치해야 하는 등의 장시간 연속 운전에는 적합하지 않아 긴 정비 주기를 요구하는 극저온 냉동기 용 냉매 압축기로는 적합하지 않을 것으로 판단된다.

3. 임펠러 설계

임펠러의 공력설계 및 탈설계점에서의 성능해석을 위하여 준 3차원 유선 곡률법에 기초한 원심압축기 설계 S/W를 사용하였다. 이 방법의 경우 반경방향으로 일정한 개수의 유선을 분포시키고 각 유선에서의 손실을 각각 계산하게 되므로 기존의 Two-Zone Modeling 등 1차원 실험식에 기초한 방법에 비하여 반경 방향으로의 분포를 계산할 수 있는 장점이 있다. 특히 탈설계점에서의 임펠러 성능 예측시 기존의 설계 S/W의 경우 일정한 미끄럼 계수를 사용하는데 비하여 유량 및 속도에 따라 변화는 가변 미끄럼 계수를 사용하여, 씨지점 근방에서 압력이 실제보다 증가하는 현상을 방지하였다. 또한, FRE(Full Radial Equilibrium) 방정식을 풀어 임펠러 출구조건을 구하므로 보다 실제에 가까운 계산의 수행이 가능하며, 2차원 성능해석에 이어 계속하여 이어지는 3차원 유동해석에 필요한 기본적인 입력값을 결정하기 쉬운 장점이 있다. 임펠러의 설계는 2차원 자오면 유로 설계 및 3차원 블레이드 설계를 병행함으로 이루어지며 원하는 설계점 성능이 확보되면 블레이드 설계를 확정된 상태에서 성능해석을 수행하

게 된다. 그림 5와 6에 에 최종적인 자오면 상에서의 유로 및 성능해석 결과를 나타내었다.

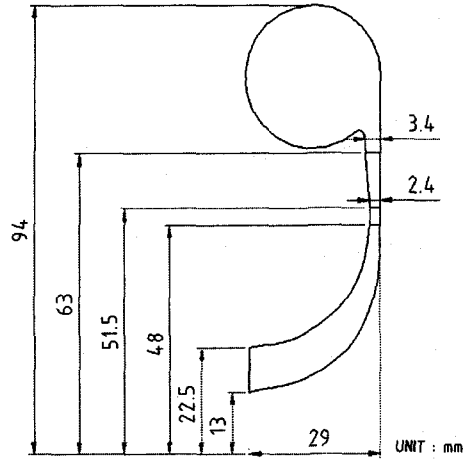


그림 5. 자오면상에서의 원심압축기 유로형상

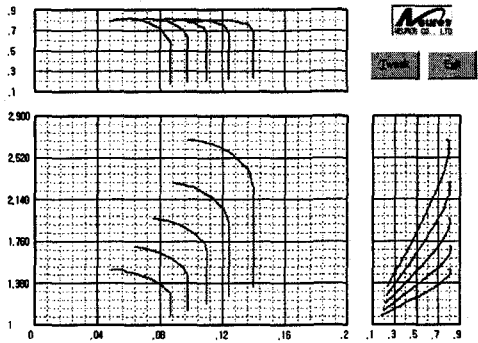


그림 6. 준 3차원 성능해석 방법에 의한 성능곡선도

성능해석이 완료되면 다시 3차원 성능해석을 수행하여 계산의 정확도를 다시 한번 검증하게 되는데, 본 논문에서 사용된 3차원 유동해석 방법은 유한 체적법에 의한 공간이산화와 4-Stage Runge-Kutta 시간 전진법을 사용하여 점성-난류 유동장을 해석 하였다. 난류모델은 Baldwin-Lomax 모델을 사용하였다. 본 논문에서의 계산에 사용된 임펠러의 3차원 형상 및 계산격자를 그림 7 에 나타내었으며, 그림 8에 설계점 유량에 대한 임펠러 블레이드 표면에서의 정압력을 나타내었다. 마찬가지로 그림 9에 설계점 유량에 대한 평균

유선면에서의 마하수 분포를 나타내었는데, 블레이드 흡입면에서 유동의 박리현상 등이 없이 부드러운 유동 현상을 보이고 있음을 알 수 있다.

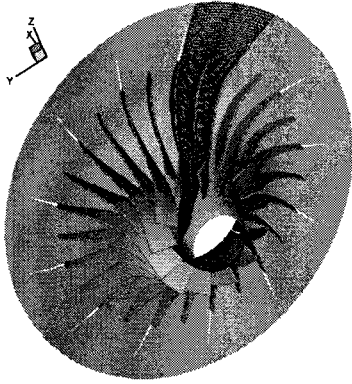


그림 7. 설계된 임펠러의 3차원 형상 및 계산격자

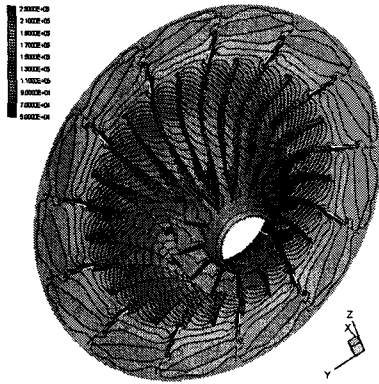


그림 8. 임펠러 표면에서의 정압력 분포

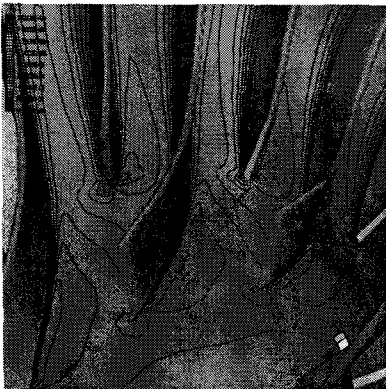


그림 9. 임펠러 내부의 마하수 분포

표 2에 3차원 유동해석에 의한 임펠러의 성능예측 값과 준 3차원 유선곡률법에 의한 성능해석 방법에 의한 성능예측값을 비교하여 보았다. 압축비의 경우 비슷한 값을 예측하고 있으나 효율의 경우 차이를 보이고 있는데, 준 3차원 방법에 의한 예측이 보다 보수적임을 알 수 있다.

표 2. 3차원 유동해석에 의한 성능예측결과와 준3차원 성능예측결과와의 비교 (임펠러)

항 목 예측방법	유량 (Kg/sec)	압축비	효율 (%)
3차원 유동해석	0.123	2.7	86.0
준 3차원 성능예측	0.120	2.7	84.0

그림 10에 본 논문에서 설계된 임펠러를 포함한 냉매 압축기 전체 시스템의 단면도를 나타내었다. 영구자석을 사용한 회전수 100,000RPM의 고속 모터와 무급유 시스템을 구현하기 위한 가스베어링을 개발 적용하고 있다.

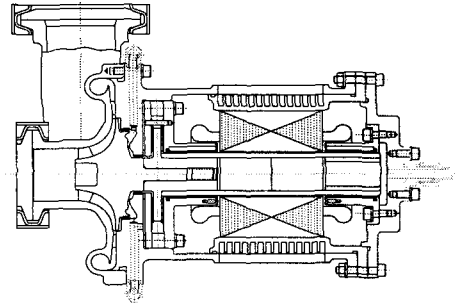


그림 10. 설계된 임펠러가 장착된 냉매압축기 단면도

3. 구조설계

공력설계를 통하여 결정된 임펠러 형상은 구조 및 진동해석을 통하여 최종적으로 확정되게 된다. 설계된 임펠러는 총 26개의 블레이드를 사용하였는데 임펠러의 크기에 따른 제작성을 감안하여 13개의 블레이드는 스플리터로 구성하였다. 임펠러는 블레이드와 스플리터의 고속회전에 의해서 발생하는 원심력을 감당할 수 있도록 적절한 형상의 디스크가 설계 되어야 함과 동시에 임펠러의 무게는 앞에서 설명한 로터의 위험속도

에 영향을 주기 때문에 적절한 강도를 가지면서도 무게를 최소화할 수 있는 최적화 설계가 요구된다. 무게 최소화를 위해서 소재를 티타늄으로 선정하였으며, 수차례의 설계변경을 통하여 그림 11과 같은 디스크의 형상을 확정하였다. 디스크의 형상 설계를 위해서 2차원 응력해석을 수행하였으며, 디스크에는 축대칭 유한요소를 적용하였고 블레이드 및 스플리터에는 평면응력 요소를 사용하였다.

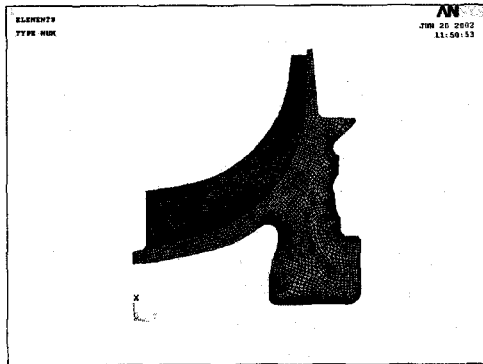


그림 11. Impeller 2D 해석 모델

그림 12, 그림 13은 각각 원심력에 의해서 발생하는 반경방향 및 축방향의 변위를 나타내고 있으며, 그림 14 ~ 그림 16은 반경방향, 원주방향 및 Von Mises 등가응력을 보이고 있다. 여기에서 온도분포에 의한 열변형은 고려되지 않은 상태이며, 회전에 의한 원심력만 고려되었다. 계산결과 반경방향 및 원주방향 최대 변위는 각각 0.054mm, 0.036 mm이 발생하며, 임펠러의 팁부위가 앞쪽으로 숙여지는 변형 형태를 보이고 있다. 임펠러의 온도분포가 적용되면 이러한 현상은 좀 더 크게 나타날 것이다. 디스크의 응력을 살펴보면, 반경방향으로는 최대 492 MPa, 원주방향으로는 558 MPa, Von Mises 등가응력은 546 MPa이 발생한다. 티타늄 Ti-6M-4V를 사용할 경우, 100 °C에서 소재의 항복응력이 약 700 MPa 정도이므로 충분한 강도 여유를 가지고 있다. 임펠러의 무게 특성은 로터의 위험속도 해석에 사용되는데, 본 논문에서 사용된 무게 특성을 아래에 정리하였다.

- 소재 : Titanium
- 무게중심 : 앞쪽 끝에서부터 29.3 mm
- 질량 : m = 280 g

- Polar Moment of Inertia : $I_p = 1.86e-4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- Transverse Mnt. of Inertia : $I_t = 1.10e-4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

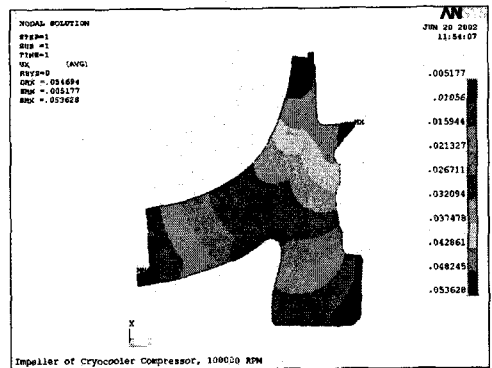


그림 12. 반경방향 변위

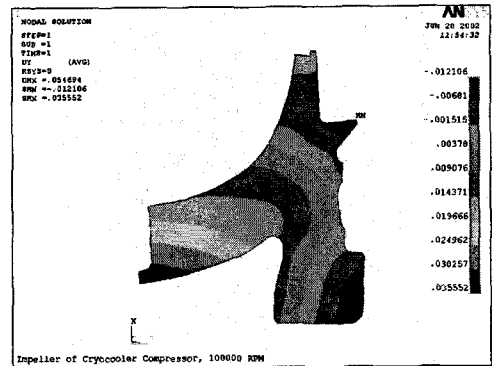


그림 13. 축방향 변위

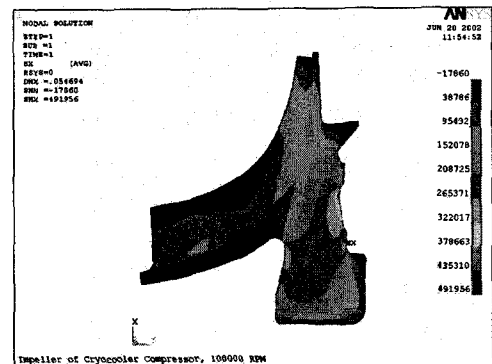


그림 14. 반경방향 응력

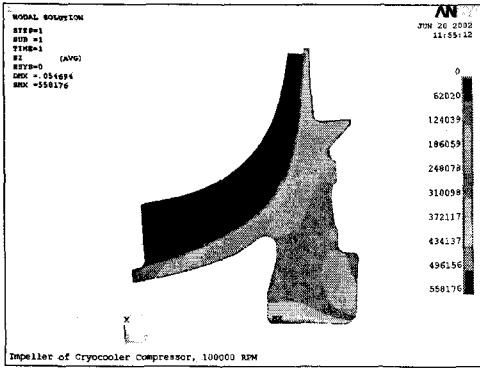


그림 15. 원주방향 응력

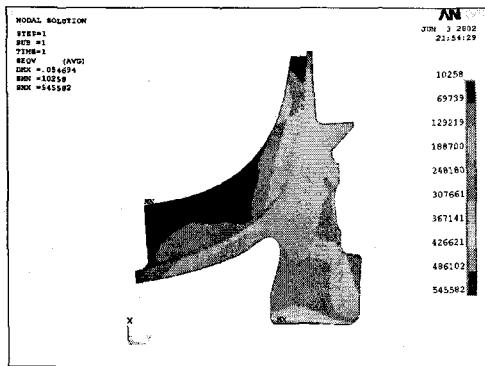


그림 16. Von Mises 등가응력

4. 결론

네온을 냉매로 사용하는 터보 역 브레이튼 방식의 극

저온 냉동기 용 냉매압축기의 임펠러를 설계하였다. 설계된 임펠러의 공력효율은 84% 이상이 예측되고 있으며, 디퓨저 및 스크롤에서의 추가적인 손실을 감안 하더라도 설계요구사양인 75%의 단열 단효율은 만족 할 수 있을 것으로 판단된다. 설계점 성능 및 탈설계 점에서의 성능예측을 위하여 준 3차원 곡률 유선법을 적용하였다. 탈설계점 성능예측시 씨지점 부근에서의 압력을 과도하게 예측하는 문제점을 해결하기 위하여 유량 및 회전수에 따라 미끄럼 계수를 계산하여 사용 하였다. 설계된 임펠러는 영구자석을 사용한 고속모터 및 가스베어링과 함께 밀폐형 압축기 시스템을 구성하게 된다. 여기에서 설계된 임펠러는 향후 성능시험을 통하여 설계된 성능을 확인할 예정이다.

참고문헌

- (1) Bogdanov, B.V., 1987, "User's Manual of Centrifugal Compressor Design System CHARBOG 4.0"
- (2) 차세대 초전도 응용기술 개발사업 2차년도 실적보고서, (주)뉴로스, 2002
- (3) Roger, C., 1988, "Effieicncy of Centrifual Compressors", ASME Paper GT
- (4) Cumpsty, N.A., 1989, Compressor Aerodynamics, Longman Scientific & Technical, 1989
- (5) 고성능핵심 유체기계개발 보고서, 효성 EBARA, 1997
- (6) 핵심기계설계 고도화시스템 기술개발 보고서, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 1998