

300 W급 브레이튼 냉동기용 극저온 터보 팽창기 구동축 설계

김만렬*, 이창형*, 김동민, 양형석**, 김석호*^{*,#}

*창원대학교 기계공학부, **한전 전력연구원

Design of a Cryogenic Turbo Expander Drive Shaft for 300 W Class Brayton Refrigerators

Manryeol Kim*, Changhyeong Lee*, Dongmin Kim*, Hyeongseok Yang** and Seokho Kim*^{*,#}

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University

**Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

(Received 11 November 2016; received in revised form 4 December 2016; accepted 6 December 2016)

ABSTRACT

There have been many types of development and commercialization efforts for superconducting power applications with the continuous development of High Temperature Superconducting (HTS) conductors. In particular, HTS power cables are going to be commercialized in real power grids. A cryogenic refrigeration system should be used to keep it below 77 K, and its required cooling capacity continuously increases as the unit length of the HTS power cable increases. Among the many kinds of cryogenic refrigerator, a reverse Brayton refrigerator that uses turbo expanders is a promising refrigerator due to its efficiency and reliability. Among the various components in refrigerators, the cryogenic turbo-expander is the most important part for increasing efficiency and assuring reliability. The design of a 300 W class turbo-expander is described in this paper prior to the development of a 10 kW class turbo expander, which is the required capability for the commercialization of a HTS power cable. The impeller shape and rotation speed are determined based on the cycle analysis. The Eigen frequency and harmonic analysis are conducted with gas bearings at cryogenic temperatures to determine the operational stability.

Key Words : Cryocooler(극저온 냉동기), Cryogenic Turbo Expander(극저온 터보 팽창기), Drive Shaft(구동축), Rotor Dynamics (회전체 동역학), Reverse Brayton Cycle(역 브레이튼 사이클)

1. 서 론

1.1 국내외 연구 동향

최근 초전도 선재(HTS Conductor)의 지속적인 성능

향상으로 인해, 초전도 전력기기의 상용화에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다^[1-3]. 초전도 전력 케이블의 상용화를 위해서는 초전도 현상이 일어날 수 있는 온도(77 K)로 유지 가능한 대용량 고 효율 고 신뢰성의 극저온 냉각 시스템이 갖추어져야 한다.

대용량 극저온 냉동기로는 역 브레이튼, Claude, Joule-Thomson, 등의 냉동기가 있다. 이 중에서는 시스템

Corresponding Author : seokho@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3607, Fax: +82-55-275-0101

의 신뢰성과 효율, 유지보수 측면에서 가장 유리한 시스템은 역 브레이튼 냉동기이다.^[1]

현재 국내에서는 자체 기술로 극저온 브레이튼 냉동기를 개발한 바가 없어 해외 선진사로부터 극저온 냉동기를 고가의 가격으로 전량 수입하고 있다. 특히 선진사에서는 완제품에 대한 판매만 할 뿐, 개별 부품이나 시스템 일부 단위에 대해서는 개별적인 판매를 하지 않음과 동시에 기술 이전 역시 하고 있지 않다.

국내 초전도 전력 케이블의 상용화를 위해서는 극저온 역브레이튼 냉동기의 국내 기술 개발을 통해 자체 설계 및 제작 기술 확보가 필요시 되고 있으며, 한국전력공사 주관으로 초전도 케이블의 상용화에 대한 연구가 진행 중이다^[1].

2011년부터 한전 전력연구원 주도로 10 kW급 초전도 케이블용 역 브레이튼 냉동기가 개발 중에 있으나 핵심 부품인 터보 팽창기에 대한 연구는 아직 미흡한 상황이며, 축소모델에 대한 시제품으로서 300 W급에 대한 연구가 2015년에 수행된 바가 있다.^{[4],[5]}

1.2 연구목적

역 브레이튼 냉동기의 구성은 대항류 열교환기, 압축기, 극저온 팽창기로 이루어져 있으며, 이 중 시스템의 효율을 결정하는 핵심 부품은 극저온 터보 팽창기이다.^[2]

극저온 터보 팽창기를 설계를 위해서 역 브레이튼 냉동 사이클을 기체의 팽창을 이용하는 것으로 등엔트로피 과정을 통하여 외부와 열을 교환하지 않는 단열 과정으로 외부에 일을 하여 더 낮은 온도를 얻게 된다.^[5]

역 브레이튼 사이클 설계 시 필요 요구 조건은 다음과 같다.

초전도 전력 케이블의 운전 시 냉각에 대한 안정성을 위해서는 냉각부의 최대 온도가 액체질소의 비등점보다 낮아야 하며, 냉매 누설 등의 긴급한 상황에서도 시스템을 보호하기 위해 대기압보다 높은 압력에서 운전해야 한다. 또한 시스템의 손상 또는 파괴가 일어나지 않기 위해 유속이 느린 것이 유리하므로, 움직이는 부피유량을 줄여야 한다.

극저온 환경을 조성하기 위한 역 브레이튼 냉동기에 사용하는 냉매로는 헬륨, 네온, 질소, 아르곤 등이 있다. 이중에 초전도 전력 케이블 시스템 작

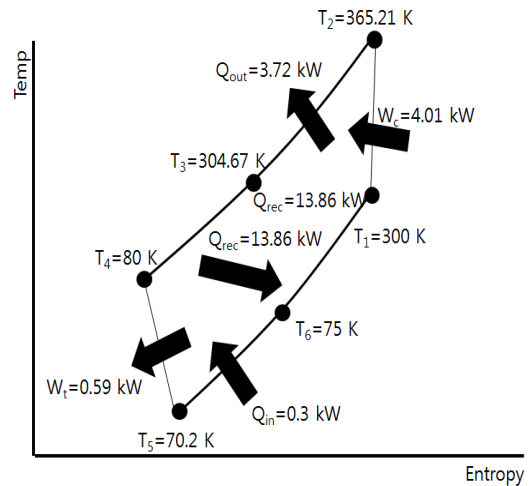


Fig. 1 300 W class Brayton refrigeration cycle

Table 1 Criteria of Brayton refrigeration cycle

Parameter	Value
Inlet total pressure [bar]	4.5
Outlet static pressure [bar]	3.0
Cooling power [W]	300
Mass flow rate [g/s]	59.6
Target temperature [K]	under 75
Operating refrigerant	Neon
Rotating speed [rpm]	70,000

동온도인 75 K영역에서의 과열 기체인 냉매는 네온, 헬륨이 있다. 역 브레이튼 냉동 사이클에서 네온의 경우 헬륨에 비해 밀도가 5배 크기 때문에 부피 유량을 헬륨 대비 20% 수준으로 줄일 수 있다.

Table 1은 10 kW급 초전도 케이블용 역 브레이튼 냉동기의 축소모델인 300 W급 역브레이튼 냉동기의 설계 기준이다. 80%의 압축·팽창 효율을 가정하여 압력비는 1.5 bar, 저압부에서의 압력은 3 bar, 고압부 압력은 4.5 bar 적용하였을 때의 역 브레이튼 냉동사이클은 Fig. 1(와) 같다.^[5]

일반적으로 회전기기는 상세 설계과정에서 다양한 수학적 해석을 필요로 하며, 동적 특성에 대한 평가를 수행한다. 하지만 기본적인 평가 없이 제작할 경우, 불안정한 움직임으로 인해 진동과 소음이 발생할 수 있다. 또한 고속 회전기기의 경우 진동에 의해 손상이 가속화되고, 안정성이 저하되는 문제가 있으므로, 보다 정확한 예측 및 상세 설계를 필요로 한다. 따라서 고속으로 회전하는 극저온 터보 팽창기는 동특성 해석을 통하여 신뢰성을 검증해야 한다.

본 연구에서는 초전도 전력 케이블의 냉각에 요구되는 10 kW급 역 브레이튼 냉동기의 축소모델인 300 W급 역 브레이튼 냉동기의 설계 기준^[5]을 바탕으로 극저온 터보 팽창기의 구동 축부 설계 및 동특성 해석을 수행하였다. 이를 통해 실제 운전속도에서의 안정성을 확립하고자 한다.

해석을 바탕으로 고효율의 극저온 터보 팽창기를 설계하여 향후 대용량의 역 브레이튼 냉동기용 터보 팽창기의 구동축 설계에 기여하고자 한다.

2. 축계 동특성 해석

2.1 구동 축 모델 정보

초전도 전력 케이블의 냉각에 요구되는 10 kW급 역 브레이튼 냉동기의 축소모델인 300 W급 역 브레이튼 냉동기의 설계 기준을 바탕으로 설계하였다. 설계된 극저온 터보 팽창기의 임펠러 형상은 Fig. 2과 같으며, 임펠러 깃은 총 7개로 설계 하였다.^[5]

축의 중앙에 Rotor가 위치하며 우측 끝단에 임펠러가 위치한다. 또한 구동축의 원활한 구동 환경을 위해 양단에 Gas Bearing 형태의 Journal-Thrust bearing 2개가 설치되어 있다.

로터는 Gem-motor사의 A2P-S40 type CU/LD V90 모델을 적용하여 최대 90,000 rpm까지 사용이 가능한 Rotor를 적용하였다.

Gas Bearing의 경우 LNK 사의 특수 제작품을 사용하였으며, Journal 방향 강성은 가스 압력에 따라 최소 7 kN/mm, 최대 12 kN/mm이다. Thrust 방향 강성은 가스

압력에 따라 최소 17 kN/mm, 최대 22 kN/mm까지 사용이 가능하다.

Gas Bearing은 비접촉식 베어링이므로 해석상에서는 강성만 적용하여 해석을 수행하였다.

극저온 터보 팽창기의 전체 조립 형태는 Fig. 3과 같이 설계되었으며, 전체 구동축의 총 길이는 205.5 mm이며, 중량은 0.22 kg이다. 이를 바탕으로 극저온 터보 팽창기의 구동축의 동특성 해석을 수행하였다.

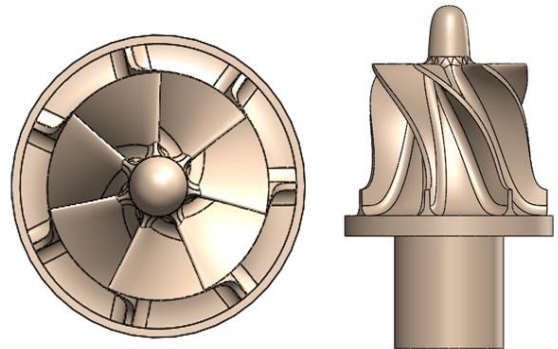


Fig. 2 Impeller 3D model

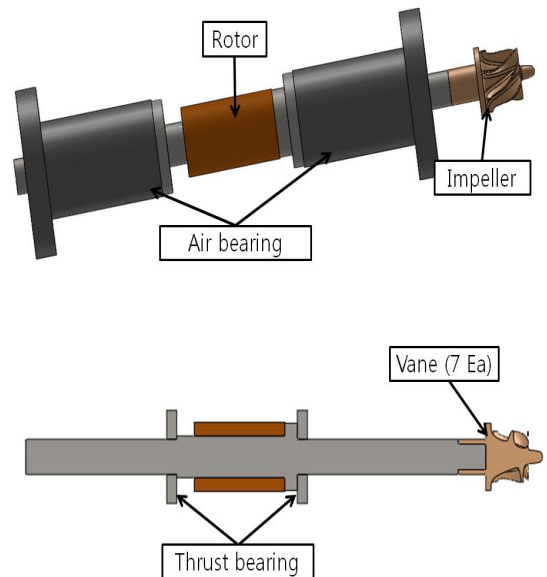


Fig. 3 Analysis model

2.2 경계조건

구동축의 동특성 해석을 알아보기 위해 3D 해석 프로그램인 ANSYS Workbench의 modal 모듈을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 4는 300 W급 역브레이크 냉동기 설계 기준을 바탕으로 설계된 극저온 터보팽창기 구동축을 해석 모델이다. 구동축 부 운전영역을 0 ~ 90000 rpm이며, 구동축 동특성 해석을 위하여 Gas Bearing 적용 되는 양단에 스프링 조건을 추가하여 베어링 강성을 적용하였다. 해석에 사용된 재료의 상수는 Table 2와 같다. Rotor의 경우 밀도를 실제 Rotor의 중량을 부피로 나누어 계산한 값을 적용하였다.

그 외의 부분에는 소재가 모두 스테인리스 강 304이므로, 304 강의 재료 상수를 적용하였다. 구동축의 운전영역을 0 rpm에서 로터의 최대 회전수인 90,000 rpm으로 선정하였다. 또한 Journal-Thrust Bearing의 가스 압력에 따른 강성을 적용하여, 해석을 수행하였다.

Table 3은 구동축 동특성 해석을 위한 경계조건이다.

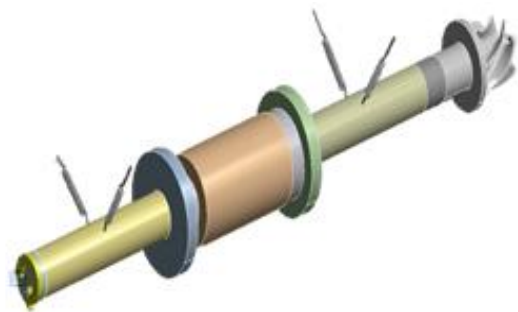


Fig. 4 Boundary condition

Table 2 Material constants

Part	Density [kg/m ³]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio
Rotor	5040	110	0.34
Impeller shaft	7999.5	193	0.29

Table 3 Boundary conditions of modal analysis

Parameter	Value			
	Case. 1	Case. 2	Case. 3	
Gas Bearing stiffness [kN/mm]	Journal	7	10	12
	Thrust	17	20	22
Rotational velocity [rpm]	0 ~ 90,000			
Operating speed [rpm]	70,000			

2.3 해석 결과

Table 4는 Journal-Thrust bearing의 가스압력에 따른 강성을 적용하여 해석 결과이다.

Journal-Thrust Bearing의 강성에 따른 1차 고유진동수가 각각 64,680 rpm, 76,980 rpm 84,000 rpm에서 발생한다.

Case. 1은 운전속도인 70,000 rpm 이전에서 1차 고유진동수가 발생하여 공진에 의한 문제가 발생한다. 하지만 Case. 2, 3의 경우에는 70,000 rpm 이후 1차 고유진동수가 발생하여, 문제가 발생하지 않는다.

Fig. 5은 Journal-Thrust bearing의 Journal과 Thrust 방향의 강성이 12 kN/mm과 22 kN/mm일 때의 1, 2차 고유진동수에서의 거동 해석 모습이다.

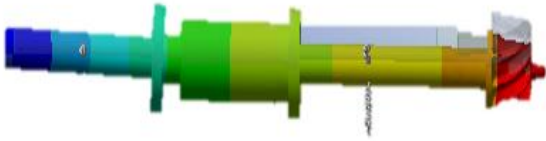
1차 고유진동수의 경우 84,000 rpm 에서 임펠러 부분이 whirling 하는 conical mode의 거동이 나타나며, 2차 고유진동수의 경우 97,140 rpm 에서 축 전체적으로 banding mode의 거동이 발생한다.

Fig. 6은 Journal-Thrust bearing의 강성에 따른 구동축 해석 결과를 Campbell diagram으로 나타낸 것이다. 구동축의 Critical Speed가 어느 시점에서 발생하는지를 확인 할 수 있다.

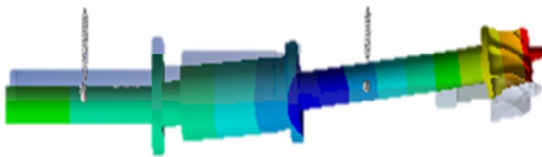
Critical Speed에 근접하게 될 경우 시스템에 큰 진동을 유발하게 되어 구조물이 크게 손상을 입을 수 있어, 이를 방지하기 위하여 Critical Speed발생 시점을 확인하여 피하도록 설계를 진행 하여야한다.

Table 4 modal analysis

Parameter	Value	
	1st mode	2nd mode
Case. 1 [rpm]	64,680	78,180
Case. 2 [rpm]	76,980	89,520
Case. 3 [rpm]	84,000	97,140



(a) 1st mode shape



(a) 2st mode shape

Fig. 5 Mode Shape

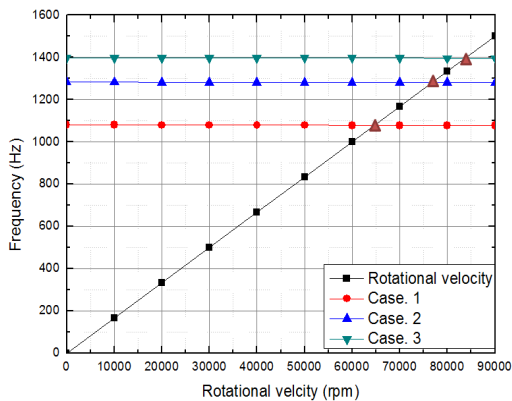


Fig. 6 Campbell Diagram

3. 불평형 응답 해석

3.1 경계조건

본 연구모델의 불평형 응답의 경우 국제 규제 ISO1940^[6]을 따르며, 회전체의 종류에 따라 밸런싱 정도의 등급이 달라진다. 극저온 터보 팽창기의 경우 G2.5의 등급이며 밸런싱 정도의 상한은 최대 2.5 mm이다. 규격에 제시된 방법에 따라 정적 처짐이 가장 심한 부분인 임펠러에 식 (1), (2)을 통해 계산한 불평형량(U_m)을 적용하였다.

$$U_m = \text{Rotor weight} \times \text{허용 잔류 불평형 량} \dots(1)$$

$$U_m = 0.22 \text{ kg} \times 2.5 \mu\text{m} = 0.55 \text{ g} \cdot \text{m} \dots\dots\dots(2)$$

구동축의 회전영역으로 0 ~ 90,000 rpm이며, 축계 동특성 해석과 동일하게 Journal-Thrust bearing의 가스압력에 따른 강성을 적용하였다.

임펠러와 하우징의 최대 간극은 0.1 mm로 선정하여 해석을 수행하였다.

3.2 해석 결과

Fig. 7는 ISO 1940^[6]에 의거한 불평형량 0.55 g/mm을 적용한 나온 결과이다. 임펠러와 하우징 간격의 최대 허용변위를 0.1 mm이상 넘지 않도록 하였다.

Case. 1의 경우 운전속도 이전인 63,000 rpm에서 0.1 mm 이상 발생하며, Case. 2, 3은 운전속도인 70,000 rpm 이후에 최대변위가 0.1 mm 이상 나타난다. 하지만 Case. 2의 경우 75,000 rpm에서 변위가 0.1 mm 이상 증가하는 것을 보이지만, 공진분리 여유가 충분하지 않아 운전시 안전성에 문제가 있다. Case. 3은 82,000 rpm에서 변위가 0.1 mm 이상 증가하며, 공진 분리 여유가 충분하므로 문제가 발생하지 않는다.

Fig. 8는 Case.3의 해석 결과로써 82,000 rpm에서 임펠러부분의 x축의 변형을 5배 가량 확대해석 한 결과이며, 실제 82,000 rpm에서의 변위는 0.1 mm이다.

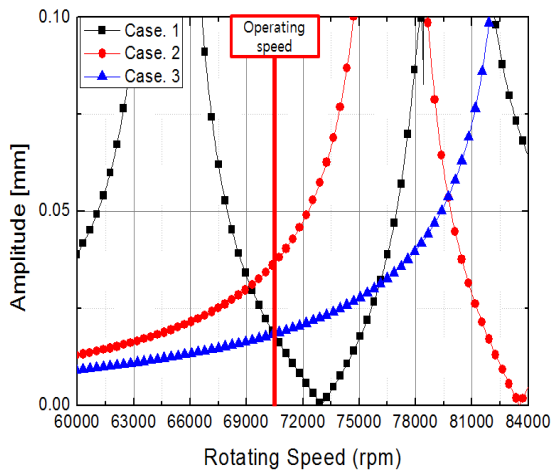


Fig. 7 The amplitude according of the change in rpm

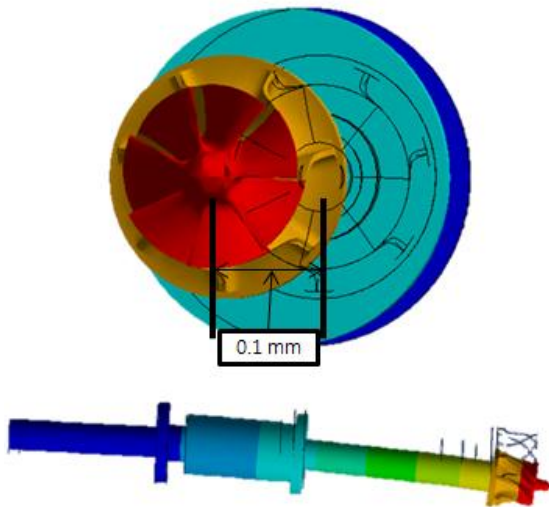


Fig. 8 X-directional amplitude

4. 결 론

본 논문에서는 극저온 터보 팽창기의 구동축부 설계를 위해 초전도 전력 케이블의 냉각에 요구되는 10 kW급 역 브레이튼 냉동기의 축소모델인 300 W급 역 브레이튼

냉동기의 설계 기준^[5]을 바탕으로 해석을 진행하였다.

축계 동특성 해석을 통해 Journal-Thrust bearing의 강성에 따른 1차 고유진동수의 변화가 나타나며 베어링 강성이 Journal-Thrust 방향으로 10 kN/mm, 20 kN/mm의 경우 1차 고유진동수가 76,980 rpm으로, 운전속도인 70,000 rpm 이후에 발생한다.

불평형 응답해석 결과 Journal-Thrust bearing의 강성이 최대인 12 kN/mm, 22 kN/mm일 경우 82,000 rpm에서의 최대 허용 변위인 0.1 mm이상 발생하여 공진분리여유가 구동속도 대비 15%이상으로 공진 문제가 발생하지 않는다.

본 연구에서 설계한 300 W급 역 브레이튼 냉동기용 극저온 터보 팽창기의 구동축 설계 방법을 바탕으로 향후 10 kW급 역 브레이튼 냉동기용 극저온 터보 팽창기의 설계에 활용할 계획이다.

후 기

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구 과제 연구비지원으로 수행된 연구 결과임

REFERENCES

1. Kim, T. M., Yim, S. W., Sohn, S. H., Lim, J. H., Han, S. C., Ryu, K. W., & Yang, H. S. , "Investigation on Effective Operational Temperature of HTS Cable System considering Critical Current and AC loss.", KEPCO Journal on Electric Power and Energy, 2(2), pp.307-310, 2016.
2. Zhang, H., & Wang, Y. "A Self-shielding DC HTS Cable Using Co-axial Configuration with Large Current Capacity.", IEEE transactions on applied superconductivity, Vol.26 no.3, pp.1-4, 2016
3. Dhara, S., Shrivastav, A. K., Sadhu, P. K., & Ganguly, A. . "A Fault Current Limiter Circuit to Improve Transient Stability in Power System. International Journal of Power Electronics and Drive Systems", International Journal of Power

- Electronics and Drive Systems, 7(3), 2016
4. Lee, C. H., Kim, D. M., Yang, H. S., & Kim, S., "Conceptual design of cryogenic turbo expander for 10 kW class reverse Brayton refrigerator.", Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol.17, No.3, pp.41-46. 2015
 5. Lee, C., Kim, D., Yang, H., & Kim, S., "Design and Analysis of Cryogenic Turb Expander for HTS Power Cable Refrigeration System.", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.14, No.3, pp.141-148, June, 2015
 6. ISO-1940, 1973, Balance Quality of Rotating Rigid Bodies (JUS B 0905, KS B 0612)