

# Investigation on helix type labyrinth seal to minimize leakage flow of cryogen for rotating superconducting machines

Yubin Kim<sup>a</sup>, Kihwan Kim<sup>a</sup>, Seungcheol Ryu<sup>a</sup>, Hojun Cha<sup>a</sup>, and Seokho Kim<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

<sup>b</sup> Mechanical engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

(Received 4 March 2024; revised or reviewed 27 March 2024; accepted 28 March 2024)

## Abstract

High-temperature superconducting rotors offer advantages in terms of output-to-weight ratio and efficiency compared to conventional phase conduction motors or generators. The rotor can be cooled by conduction cooling, which attaches a cryocooler, and by refrigerant circulation, which uses circulating liquid or gas neon, helium and hydrogen. Recent work has focused on environmental issues and on high-temperature superconducting motors cooled with liquid hydrogen that can be combined with fuel cells. However, to ensure smooth supply and return of the cryogenic cooling fluid, a cryogenic rotational coupling between the rotating and stationary parts is necessary. Additionally, the development of a sealing structure to minimize fluid leakage applicable to the coupling is essential. This study describes the design and performance evaluation of a non-contact sealing method, specifically a labyrinth seal, which avoids power loss and heat load caused by friction in contact sealing structures. The seal design incorporates a spiral flow path to reduce leakage using centrifugal force, and computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to analyze the flow path and rotational speed. A performance evaluation device was configured and employed to evaluate the designed seal. The results of this study will be used to develop a cryogenic rotational coupling with supply and return flow paths for cryogenic applications.

**Keywords:** non-contact seal, labyrinth seal, cryogenic, computational fluid dynamics (CFD), HTS motor

## 1. INTRODUCTION

산업의 빠른 발전은 기술적 혁신을 이끌었지만, 여기에는 과도한 에너지 생산과 지속적인 에너지 소비 증가가 수반되었으며, 이는 지구 환경에 부정적인 영향을 미치고 있다. 이와 같은 환경적 문제는 현재 전 세계적인 이슈로 대두되었으며, 이를 해결하기 위한 대안으로서 에너지의 효율성 향상 및 대체 에너지 소스의 개발이 중요시되고 있다 [1].

특히, 초전도 현상의 발견 이후, 이를 기존 산업기기에 적용하는 노력이 지속되고 있다. 초전도 현상이란 특정 물질이 임계온도 이하에서 일정 임계값 이하의 전류를 통과시킬 때 저항이 0이 되는 현상을 말하며, 이를 통해 산업에서 발생하는 에너지 손실을 줄일 수 있다 [2]. 이는 곧 고효율 초전도 전력기기의 개발로 연결될 수 있다.

현재 국내에서는 전체 전력의 약 60%를 석탄 및 LNG와 같은 화석연료로 발전하고 있으며, 이 중 약 55%는 모터에 의해 소비되고 있다. 이러한 배경 하에서 모터의 효율이 1%만 상승한다 하더라도, 연간 전력 소비량을 크게 줄일 수 있으며, 이는 대량의 전력 절감과 함께 CO<sub>2</sub> 배출량 감소에도 기여할 수 있다. 이로써 고효율 모터의 개발의 중요성이 강조된다 [3].

초전도 모터는 기존 모터에서 사용하는 구리 코일을 초전도 선재로 대체함으로써, 여러 가지 이점을 가지게 된다. 이는 구리 선재에 비해 저항이 없어 더 많은 전류를 통과시킬 수 있으며, 이 특성 덕분에 초전도 모터는 같은 출력을 제공하는

기존 모터에 비해 더 작은 크기로 제작될 수 있다. 이는 공간 절약뿐만 아니라 장비 비용 절감에도 기여하며, 또한 저항이 없기 때문에 에너지 손실이 거의 없어 효율성이 크게 향상된다.

초전도 모터는 기존 모터에 비해 2% 이상의 성능 향상을 보여주며, 이는 냉동기의 에너지 손실을 고려해도, 초전도 모터는 기존 모터에 비해 약 68%의 에너지 손실을 줄일 수 있다. 초전도 모터의 회전자에 사용되는 계자 코일은 초전도 선재로 구성되어 있으며, 이는 극저온 상태에서 운동하면서 전기 저항이 사라져, 에너지 손실 없이 전류를 전달할 수 있다. 그 결과, 초전도 모터는 전류를 전달하는 과정에서 발생하는 열에 의한 손실이나 교류에 의한 손실 등이 크게 감소한다. 이는 모터 부하가 15% ~ 20% 범위에서도 기존 모터와는 달리 98% 이상의 높은 효율을 보여줌으로써, 운영 비용을 크게 줄일 수 있음을 보여준다.

초전도체를 사용한 모터는 무게 대비 출력과 효율성 측면에서 기존 모터에 비해 우월한 장점을 가지고 있지만, 초전도 회전기의 상용화는 작동을 위해 극저온으로 냉각해야 한다는 단점 때문에 큰 어려움이 있다.

회전하는 초전도 회전자를 냉각하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 냉동기와 같은 냉각체를 직접 부착하는 '직접 냉각 방식'이며, 두 번째는 네온, 헬륨, 수소 등을 액체 또는 기체 상태로 순환시켜 냉각하는 '순환 냉각 방식'이다.

먼저, 회전자와 함께 회전하는 냉동기를 직접 부착하여 사용하는 '직접 냉각 방식'은 작동 유체가 없어 누설의 위험이 없다는 장점을 가지고 있다. 또한, 냉동기를 통해 일정한 온도로 냉

\* Corresponding author: seokho@changwon.ac.kr

각이 가능하다는 것도 큰 장점이다. 그러나, 이 방식은 냉동기를 직접 부착하여 냉각하기 때문에 비교적 큰 에너지 전달이 필요하다는 단점이 있다. 또한 부착된 냉동기가 회전해야 하므로, 회전 질량이 커져서 고회전에는 어려움을 겪을 수 있다 [5].

AMSC 사의 5000 hp 모터와 같이 용량이 큰 모터들은 '가스 순환 방식'을 사용한다. 이 방식은 기체 상태의 냉매를 초전도 회전자로 이동시켜 냉각시킨 후, 가열된 기체를 다시 냉각하여 순환시키는 방식이다. 이 방식의 장점은 기체 냉매의 온도를 냉동기를 통해 조절할 수 있어, 회전자의 온도를 원하는 수준으로 유지할 수 있다는 점이다. 그러나 공급 배관은 정지 상태로 유지되어야 하므로, 회전 부와 정지 부 사이에서 기체 누설을 방지하기 위해 회전 커플링이 필요하다는 단점이 있다.

또 다른 방식으로는 액체 네온이나 액체 수소가 같은 액체 냉매를 순환시키는 방법이 존재한다. 이 방식은 액체 냉매의 비등 온도를 활용하여 회전자를 비교적 일정한 온도로 유지하며 냉각하는 것이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 더불어, 잠열의 효과를 이용하여 기체보다 우수한 열전달 성능을 기대할 수 있다. 그러나, 기체 냉매와 마찬가지로 냉매의 누설을 방지하기 위해 회전 커플링이 필요하며, 회전자의 작동 온도는 순환하는 유체의 비등 온도에 의해 제한되는 문제점이 있다 [6].

본 연구에서는 연료전지에 사용될 액체수소를 이용하여 냉각하고자 하며, 이 경우는 회전하는 초전도 코일에 액체수소를 공급하기 위한 시스템이 필요하다. 액체네온을 사용하는 냉각 시스템의 경우 회전자 내부에 액체 네온을 저장하기 위한 공간이 필요하며 이 경우 공급 액체 유로와 회수 기체 유로가 자동으로 분리되기 때문에 회전체의 진공유지를 위한 자성 유체 씌만을 필요로 하게 된다. 그러나, 초전도 모터의 소형화 및 냉각 효율 향상을 위해서는 회전체에 직접 냉매 배관을 설치하는 것이 유리하며 이를 위해서는 정지된 공급배관과 회전하는 회수 배관 사이에 냉매 유출 방지를 위한 씌이 필요하게 된다. 액체를 회전하면서, 액체수소를 공급하고 회수하는 구조는 동심형 구조로 이루어져야 하며, 정지되어 있는 공급 관로와 회전하는 회수 관로는 극저온 환경에서 상대운동을 해야 한다. 이 경우 두 관로 사이에 적절한 씌이 필요하며 일반적인 회전기기에서 이러한 경우에 많이 사용되는 것이 라비린스 씌이다.

본 연구에서는 극저온 회전 유체 씌로서 라비린스 씌를 적용하고, 평행 라비린스 씌를 개선하여 나선형 라비린스 씌를 적용함으로써, 회전 시 원심력을 이용하여 누설량을 최소화하고자 한다. 라비린스 씌는 형상에 따라 다양한 형태가 존재할 수

있으나, 평행 홈 씌와 나선형 씌는 밀봉 특성이 우수하여 널리 적용되고 있다. 나선형 씌는 일반적으로 하나의 나선으로 구성되지만, 펌프 효과를 생성하는 스크류 펌프에서는 다중 날개 구성이 흔히 사용된다. 스크류의 날개 수가 증가할수록 유량이 증가하는 것이 알려져 있으며, 하나의 나선에 비하여 두 개 혹은 세 개의 나선이 유량 계수가 훨씬 크게 나타나므로, 다중으로 구성된 나선의 사용 가능성을 검토할 필요성이 있다 [7]. 따라서 기존에 흔히 사용되는 평행 홈 씌와 나선형 씌에 더불어 삼중나선으로 구성된 다중나선 씌 3가지의 형상의 라비린스 씌의 차압에 따른 누설특성을 해석 및 실험을 통해 비교하고자 한다.

### 2. 극저온 회전 커플링

액체수소를 활용한 고온 초전도 모터의 대략적인 구조는 Fig. 2와 같다. 여기서는 회전자 내부에 위치한 계자 코일이 고온 초전도체로 구성되어 있으며, 이를 냉각하여 초전도 상태를 유지하는 방식으로 작동한다. 극저온 냉각 시스템과 고진공 단열 구조를 제외하면, 기본적으로 기존 모터와 유사한 구조로 구성되어 있다.

회전자를 냉각하는 방식은 다음과 같다. 액체수소가 저장된 챔버에서 동축 삼중관을 통해 고온 초전도체가 부착된 레저버로 이동한다. 이렇게 이동한 액체수소는 회전자가 부착된 레저버에서 원심력을 이용하여 균일하게 냉각한다. 열 교환을 완료한 후 기체 상태로 변한 수소는 다시 삼중관을 통해 연료전지로 이동하여 전력생산에 활용된다. 그러나 이 구조에서는 정지 상태의 동축 삼중관과 회전하는 레저버 사이의 커플링 구조가 시스템의 안전을 위해 반드시 고려되어야 한다. 진공 상태를 유지하기 위해 설치된 자성 유체 씌이 상온에서 작동하므로, 작동 유체로부터 분리되어야 한다. 이를 위해 상온에서 작동하는 컴포넌트와 극저온 유체를 격리할 수 있는 극저온 회전 커플링의 적용이 필요하다.

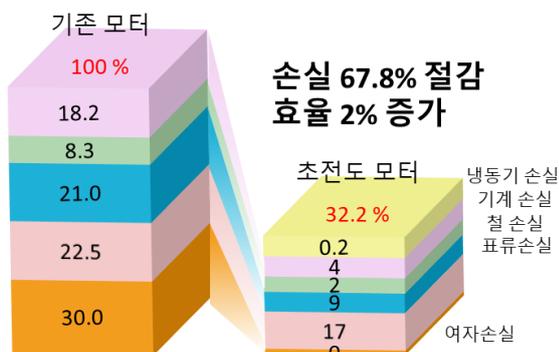


Fig. 1. Loss and efficiency of superconducting motors compared to conventional motors [4].

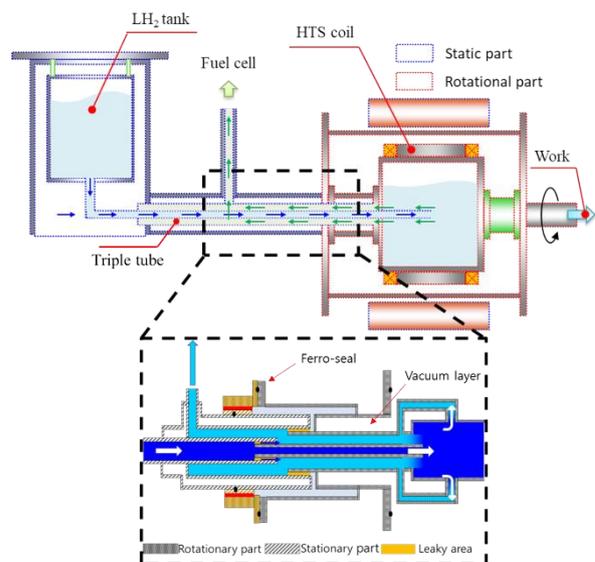


Fig. 2. schematic diagram of HTS motor cooling system using liquid hydrogen.

극저온 회전 커플링의 내부 유로는 자성 유체질의 내압 성능에 따라 상대압 1 bar 부근의 압력에서 운행하며, 내부 냉각 액체 수소는 약 20 K의 포화온도를 가진다. 수소 탱크로부터 가압된 액체수소는 동축 관을 통해 고온초전도 자석이 부착된 레저버로 공급된다. 이렇게 공급된 액체수소는 초전도자석을 냉각한 후 반환되어 다시 동축 관의 최외곽을 통해 연료전지로 운송된다. 이런 커플링 구조는 회전부와 정지부를 안정적으로 분리할 수 있게 해주며, 씰을 회전부 연결 배관과 정지부 연결 배관에 배치함으로써 안정성을 높일 수 있다. 이때, 누설이 발생할 수 있는 취약부의 씰링 구조는 매우 중요한 요소가 된다. 이 부분에 비접촉 씰인 라비린스 씰을 적용하여 누설을 방지할 수 있다.

라비린스 씰은 내부 유로를 복잡하게 구성함으로써 압력 강하를 증가시키는 방식을 사용하므로, 다양한 형상이 가능하다. 본 논문에서는 가장 기본적인 형태인 평행홈 씰(Parallel-Grooved labyrinth seal)과 나선형 씰(Spiral labyrinth seal)을 적용하였다. 축 방향에 대한 비틀림 각을 가진 나선형 씰은 회전자의 회전에 따른 나선 홈의 펌프 작용을 활용하여 유체의 압력을 증가시킨다. 이 증가된 압력은 씰의 양단에 발생하는 압력차와 상쇄되므로, 실제로 씰의 양단에 걸리는 압력 차를 저감시킨다. 이러한 메커니즘은 누설량을 크게 줄이는데 기여하며, 이로 인해 누설량을 거의 0으로 유지할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특성은 시스템의 효율성과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 특히 본 논문에서는 이러한 펌프 작용을 키우기 위하여 다중나선으로 구성된 씰을 함께 검토하여 성능을 비교하고자 한다.

### 3. 누설 유동 해석

#### 3.1. 해석 모델

각 형상에서 유체학적 특성은 중요한 역할을 수행하므로, 이를 분석하기 위해 유체 해석방법인 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 사용하였다. 본 연구에서는 수치 해석 도구로 ANSYS Fluent 2021 R2를 활용하였으며, 해석은 씰의 고체부를 고려하지 않은 유동장만을 모사하여 모델링하였으며, Fig. 3과 TABLE 1에 나타내었다. 해당 모델링의 상세 치수는 초전도 모터의 유로에 대한 치수 기준이 존재하지 않아, 실험 및 해석에 용이한 치수를 선정하였다. 작동 유체로는 표준 온도 압력의 기체질소를 사용하였고, 현재 계획한 연구에서 목표로 한 초전도 모터의 정격 회전속도를 2000 RPM 을 우선적으로 고려하고 있으며, 보다 고 RPM 에서 사용가능한지 고려하기 위해서 최대 3000rpm 까지 실험을 진행하였다. 또한, 씰의

TABLE 1  
ANALYSIS MODEL DIMENTIONS.

Parameter	Value [mm]	
Pitch	Parallel	5
	1 Helix	5
	3 Helix	15
Clearance	0.2	
Cavity height	2.88	
Cavity width	2	

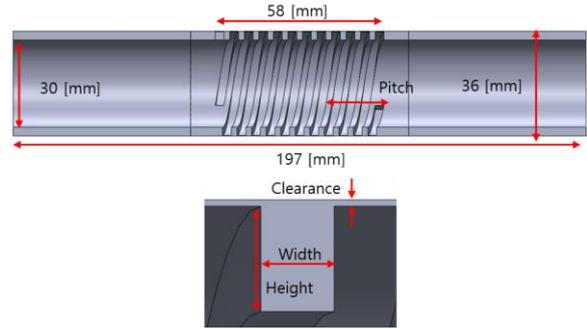


Fig. 3. Flow analysis modeling.

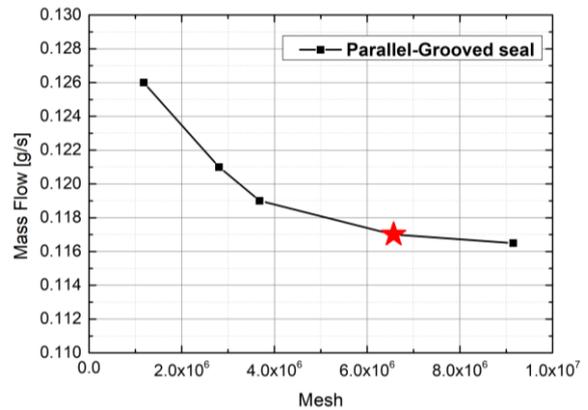


Fig. 4. mesh dependency test.

양단 차압 조건에서 해석이 수행되었다. STS 304로 제작된 씰은 기계 가공에 의해 표면조도가 충분해 매끄러우므로, Smooth wall 조건으로 수행하였다. 씰 양단에는 완전 발달된 유동을 분석하기 위해, 수력 직경의 10배에 해당하는 길이의 가이드를 설정하였다. 레이놀즈 수는 층류로 볼 수 있을 만큼 매우 작지만, 내부에 발생하는 유동 형상이 와류를 발생하는 난류에 가까우므로, 일반적으로 널리 사용되는 2-equation 모델의 k-epsilon 난류모델을 사용하였고, 강화된 벽처리 기법을 적용하였다 [8, 9].

#### 3.2. 메시 의존성 테스트

유효한 수치해석 결과를 얻기 위해 메시 의존성 테스트를 수행하였다. 메시는 영역을 이산화하여 수치해석 가능하게 만드는 격자를 의미한다. 메시가 충분히 조밀하지 않으면 유동을 제대로 모사하지 못해 신뢰성이 떨어지고, 반대로 과도하게 조밀한 메시는 해석 시간을 늘리며, 높은 신뢰성을 항상 보장하지 않는다. 그러므로 해석의 목적에 맞는 적절한 메시 형성이 중요하다.

Fig. 4의 메시 의존성 테스트 결과, 조밀하지 않은 메시에서는 누설유량이 더 크게 예측되었으며, 약 6,000,000개 이상의 메시 수에서는 비교적 수렴하는 것을 확인하였다. 따라서 적절한 해석 시간과 수렴도를 판단하여 약 6,800,000개를 해석 메시로 선정하였다.

#### 3.3. 해석 결과

Fig.5~7는 기체질소를 적용한 환경에서의 해석결과이다. 모든 환경에서 평행홈 씰이 나선형 씰들에 비하여 우수한 누설

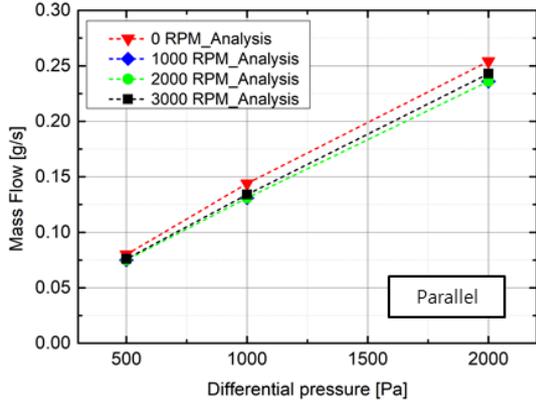


Fig. 5. Analysis of GN2 Leakage @Parallel.

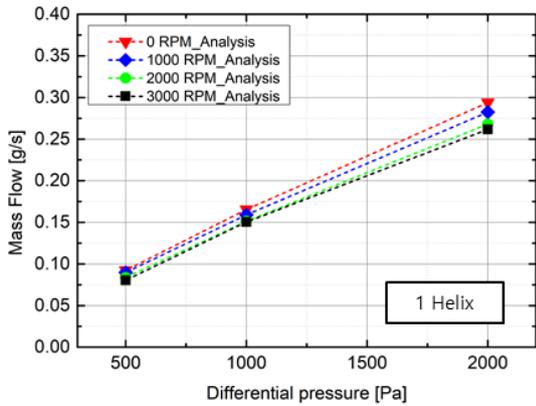


Fig. 6. Analysis of GN2 Leakage @ 1 Helix.

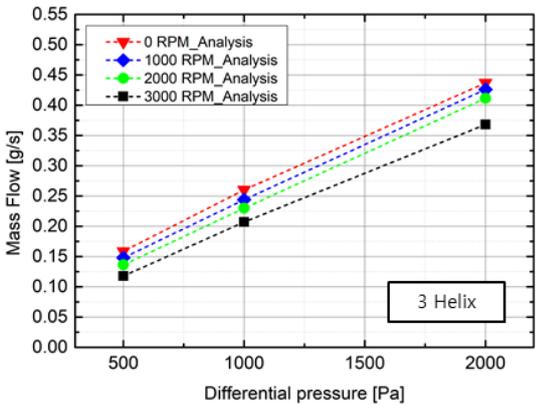


Fig. 7. Analysis of GN2 Leakage @ 3Helix.

차단 성능을 보임을 알 수 있다. 하지만 회전에 따른 성능 향상은 평행홈 씰은 회전속도에 따라서 정지상태에 비해 최대 7%의 성능 향상을 보였지만 나선형 씰은 단일나선은 최대15%, 삼중나선은 최대 35%의 성능향상을 보였다. 이를 통해 비교적 밀도가 낮은 기체상태에서도 두 관로사이의 상대운동을 통한 펌프효과가 누설 유량에 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 해석 모델의 실험적 검증을 위해서 기체질소의 밀도 및 물성을 활용하여 해석을 진행하였으며, 실제 시스템상태의 수소 또는 액체/기체 혼합상의 수소이기때문에 원심력에 의한 누설 차단 효과가 훨씬 더 크게 나타날 것으로 예상된다.

#### 4. 해석 모델의 실험 검증

##### 4.1. 실험 장치 구성

상온 기체 질소를 이용한 장치를 통해 씰의 기본적인 차압 성능과 누설률을 측정하고, 이를 해석모델과 비교하여 모델의 검증을 실시하였다. 상온의 기체 질소를 이용한 실험장치는 Fig.8에 나타났듯이 이전 해석을 통해 선정된 3가지 실험 검증용 씰에 대해 모터와 결합되는 축과 결합된 상태로 제작되었다. 성능 평가를 위해, 씰의 양단은 자성 유체 씰을 이용하여 다른 간극으로의 유출을 차단하여 씰을 통해 흐르는 유체의 양단 차압을 정확하게 측정할 수 있다. 실험은 정지 상태 실험과 축 회전 실험으로 구분하여 진행하였다. 정지 상태 실험에서는 모터가 정지된 상태에서 GN<sub>2</sub> 분배의 레귤레이터를 이용하여 유체를 통과시키며 수행되었다. 씰의 양단에 별도의 포트를 통해 차압계를 설치하였고, 이를 통해 씰 양단의 차압이 목표로 한 차압에 도달하도록 하였다. 이후 충분한 수렴이 확인된 후에는 후단의 유량계를 통해 출구 유량을 확인하였다. 이 실험은 양단 차압 500 Pa, 1000 Pa, 2000 Pa의 압력에서 수행되었다. 축 회전 실험의 경우에도 정지 상태 실험과 동일한 진행 순서를 가지지만, 모터를 이용하여 씰이 연결된 축을 회전시키는 과정이 추가되었다. 이 때, 회전 속도는 1000 RPM 간격으로 3000 RPM까지 측정하였다. 회전 속도가 목표치에 도달한 이후에는, 측정 그래프가 수렴한 상태에서 누설 유량의 변화를 확인하였다. 이를 통해 씰의 회전 상태에서의 성능을 평가하였다.

##### 4.2. 실험 결과 분석

평행 홈 씰의 경우, 해석에서 나타난 바와 같이 회전에 의한 영향이 거의 미미하게 나타났다. 특히, 차압이 적은 환경에서는 거의 차이를 보이지 않았지만, 2000 Pa의 환경에서는 약 5%의 성능 향상을 보였다. 나선형 씰의 경우, 회전수가 증가함에 따라 감소하는 유량의 비율은 나선의 수가 늘어날수록 크게 나타났다. 단일 나선 씰의 경우에는는 12%, 3중 나선의 경우에는 19%로 가장 큰 회전에 의한 성능 향상 폭을 보였다. 그 결과, 모든 경우의 실험에서 평행 홈 씰의 성능이 가장 우수하게 측정되었다.

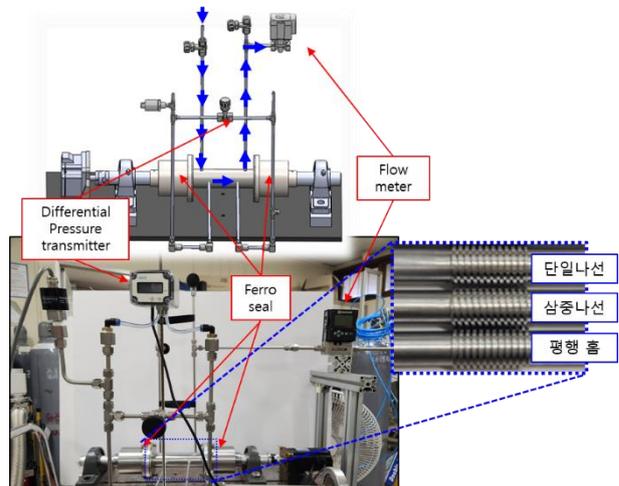


Fig. 8. Test device set-up.

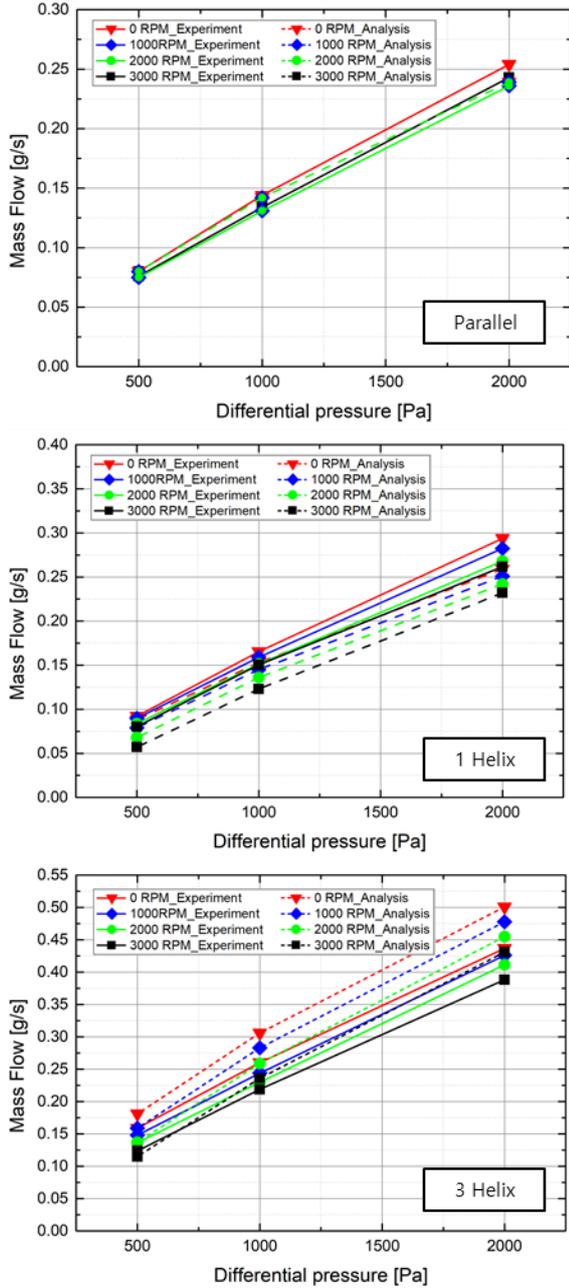


Fig. 9. Leakage flow rate according to differential pressure.

해석의 경우 Clearance는 매우 중요한 변수로, 회전부와 정지부 사이의 간격의 크기에 따라 성능이 크게 변화한다. 그러나, 기계 가공의 특성상 3가지의 축을 완벽하게 동일한 치수로 가공하는 것은 불가능하였으므로, 제작 공차를 고려하여 해석을 수행하였다. Fig.9를 살펴보면 평행 홈 씰의 경우 해석과 실험 간의 오차가 약 6%로, 이를 통해 해석 모델의 검증이 이루어졌다. 반면, 회전력이 성능에 영향을 미치는 나선형 씰에서는 평행 홈 씰에 비해 상대적으로 오차가 크게 나타났다. 특히 삼중 나선의 경우, 실험 결과와 해석 결과 간의 누설 유량 차이가 최대 13%로 확인되었다. 이러한 오차는 고려되지 않은 제작 오차나 실험 장치에서 발생할 수 있는 편심, 진동 등에 의한 것으로 판단되었다. 실험 결과와 해석 결과를 종합적으로 살펴보면, 평행 홈 씰의 성능이 나선형에 비해 우수하게 나타났다.

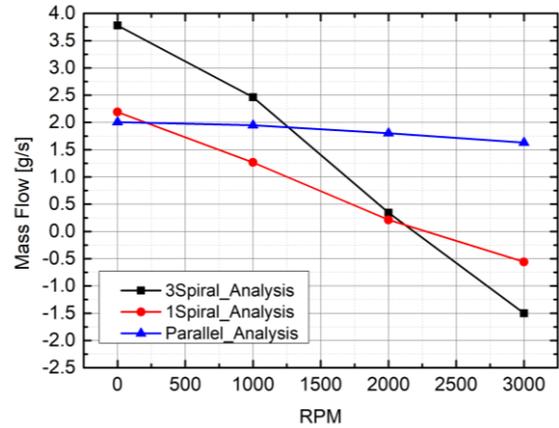


Fig. 10. Results of liquid hydrogen analysis.

그러나 이는 밀도가 낮은 기체에서 펌프 효과를 적게 받았기 때문에 발생한 결과로 분석되었다. 실제로 적용될 액체인 수소 환경에서는 밀도가 기체에 비해 크게 나타나므로, 회전에 의한 영향이 더욱 증대될 것이다. 이는 물질의 밀도가 높을수록 단위 부피당 더 많은 질량을 가지고 있고, 이로 인하여 회전력을 받게 되면 이동하는 물질의 양과 관련하여 같은 부피에서 액체는 더 많은 질량을 이동시킬 수 있다. 따라서 회전에 의한 성능 감소 폭이 크게 나타난 삼중 나선이 평행 홈 씰에 비해서 더 우수한 성능을 보일 것으로 예상된다.

#### 4.3. 액체수소 적용시 누설 특성 해석

앞선 해석 및 검증 실험을 통해, 해석 모델의 유효성을 확인하였다. 이에 기반하여, 실제로 채택될 액체수소의 조건에서 검토를 수행하였다. Fig. 10은 양단 차압이 1000 Pa인 상황에서의 회전속도에 따른 1기압의 포화 액체수소의 대해 해석한 결과이다. 해석결과, 회전하지 않는 상태에서는 평행홈 씰의 성능이 뛰어난 것을 확인하였으며 이는 씰을 통해 생성되는 유로가 폐쇄된 상태로 구성되어 있기 때문이다. 또한 나선의 피치가 증가함에 따라 각 유로의 길이가 감소하므로, 정지 상태에서의 누설 유량이 보다 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 회전 시 액체의 높은 밀도로 인해 씰의 펌프 효과가 상당히 증가하였고, 이를 통해 나선형 씰의 뛰어난 누설 차단 성능을 확인하였다. 특히 2000 RPM을 초과하는 회전 속도에서는 누설이 전혀 발생하지 않았으며, 오히려 입구 방향으로 역류하는 현상이 관찰되었다.

### 5. 결론

본 논문은 극저온 환경에서 작동 가능한 라비린스 씰의 형상적 특성에 대한 해석 및 실험을 통해 연구를 수행하였다. 초전도 회전 기기의 작동은 극저온 냉각 요구 사항으로 인해 상용화에 어려움이 존재하며, 이에 대응하는 방안으로 친환경 에너지인 수소를 사용한 냉각 방식이 제안되었다. 이 방식은 초전도체의 작동 온도를 액체질소보다 낮추어 더 높은 자장 생성을 가능케 하며, 냉각에 사용된 수소는 연료전지의 연료로 재활용하여 추가 전력 생산을 가능케 한다. 그러나, 회전부와 정지부 사이에서 발생하는 냉매 누설을 방지하기 위해서는 적절한 회전 커플링이 필수적이다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위한 극저온에서 활용 가능한 씰링 방안을 제시하였다. 비접촉 라비린스 씰을 활용하여 회전 커플링 구조를 설계하였으며, 나선형 라비린스 씰의 형상적 특성을 활용하여 액체 수소의 누설을 효과적으로 방지하였다. 상온에서의 실험 결과를 바탕으로 해석 모델은 최대 13%의 오차를 보이며 검증되었다. 기체질소가 작동 유체로 사용되는 환경에서는 모든 실험 조건에서 평행 홈 씰이 나선형 씰에 비해 높은 씰링 성능을 보였다. 이는 기체의 밀도가 낮은 환경에서는 회전에 의한 영향이 미미하기 때문이다. 그러나, 회전 시 액체의 높은 밀도로 인해 씰의 펌프 효과가 크게 증가하였고, 이를 통해 나선형 씰의 누설 차단 성능이 뛰어남을 확인하였다. 특히 2000 RPM을 초과하는 회전 속도에서는 누설이 전혀 발생하지 않았으며, 오히려 입구 방향으로 역류하는 현상이 관찰되었다. 이러한 결과로 인해, 액체 냉매가 적용된 환경에서는 나선형 씰의 성능 향상이 기대된다. 하지만 실제 모터의 사용을 고려할 때 운전환경에 따라 RPM은 가변된다. 이러한 환경에 대한 영향에 대해서는 추후 진행될 연구에서 실제 운전 시나리오에 대한 씰 성능변화에 대해 고려할 예정이다.

이 연구의 결과는 액체 수소 등의 냉매를 사용하는 초전도 모터 등의 회전 기기에서의 커플링 및 씰링 구조의 개발 및 상용화에 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

#### ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by National R&D Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(2022M3I9A1073187), (No. 2019R1A5A808320112)

#### REFERENCES

- [1] Kim Young-chun, "Current Status of Superconducting Motor R&D," *Monthly Electrical Technology & Information*, July 1, 2009.
- [2] "Publication Committee on the Dictionary of Superconducting Terms (n.d.), a dictionary of superconducting terms (1st ed.)," The Korean Society of Superconductivity and Cryogenics.
- [3] "Coal-fired power generation ratio," *National Indicator System*, 2021, <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4292>
- [4] Korea Electrotechnology Research Institute, "Development of Industrial Superconducting Motor (2004-005)," 2007, [https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TR\\_KO201000012609#;](https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TR_KO201000012609#;)
- [5] Y. Kim, T. Ki, H. Kim, S. Jeong, J. Kim, and J. Jung, "High Temperature Superconducting Motor Cooled by On-Board Cryocooler," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2217-2220, 2011.
- [6] Heecheol Park, Hwanjun Jung, Seokho Kim, and Minwon Park, "Development of Neon re-condensing cooling system for HTS power generator," *KSME Korean Society of Mechanical Engineers a spring and autumn conference*, pp. 245-249, 2012.
- [7] Jong-Soon Lim, "Flowrate characteristics and application of screw pump," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, pp. 614-625, 2004.
- [8] Anas el maakoul, "Numerical Comparison of Shell-Side Performance for Shell and Tube Heat Exchangers with Trefoil-Hole, Helical and Segmental Baffles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, pp. 175-185, 2016.
- [9] Xiaozhi Kong, "Experimental testing for the influences of rotation and tip clearance on the labyrinth seal in a compressor stator well," *Aerospace Science and Technology*, vol. 71, pp. 556-567, 2017.