

극저온 냉각 챔버 내 냉각 메커니즘 연구

이성우¹ · 나영상² · 김영균² · 전승민² · 이준호² · 최성웅^{1†}

¹경상국립대학교 기계시스템공학과, ²한국재료연구원 극한소재연구소 특수합금연구실

Study on the Cooling Mechanism in a Cryogenic Cooling System

SEONGWOO LEE¹, YOUNGSANG NA², YOUNGKYUN KIM², SEUNGMIN JEON², JUNHO LEE²,
SUNGWOONG CHOI^{1†}

¹Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, 2 Tongyeonghaean-ro, Tongyeong 53064, Korea

²Department of Special Alloys, Extreme Materials Institute, Korea Institute of Materials Science, 797 Changwon-daero, Seongsan-gu, Changwon 51508, Korea

[†]Corresponding author :
younhulje@gnu.ac.kr

Received 19 February, 2024
Revised 8 March, 2024
Accepted 17 April, 2024

Abstract >> The demand for research on materials with excellent cryogenic strength and ductility has been increasing, particularly for applications such as liquid hydrogen (20 K) storage tanks. To effectively utilize liquid hydrogen, a system capable of maintaining and operating at 20 K is essential. Therefore, preliminary research and verification of the cooling system are crucial. In this study, a heat transfer analysis was conducted on a cooling system to meet the cryogenic environment requirements for cryogenic hydrogen chamber, which are conducted at liquid helium temperatures (4 K). The cooling mechanism in a helium cooling system was examined using numerical analysis. The numerical cooling trends were compared with experimentally obtained cooling results. The good agreement between numerical and experimental results suggests that the numerical approach developed in this study is applicable over a wide range of cryogenic systems.

Key words : Cryogenic(극저온), Helium(헬륨), Thermal fluid analysis(열 유동 해석), User defined function(사용자 정의 함수), Property(물성치)

1. 서론

극저온 환경에서 재료의 물리적 특성을 평가하고 해석하는 연구는 냉각 기술, 우주 항공 공학, 에너지 저장 시스템 등 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 현재 주요 에너지원으로 사용되고 있

는 화석연료인 석탄과 석유는 연소 시 아황산가스와 같은 공해 물질이 발생하며 인체에 해로운 물질인 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등이 발생하는 문제가 있다. 또한 기후 변화가 심각한 문제로 대두되는 가운데 전 세계는 기후 변화를 극복하기 위해 화석연료 대신 수소와 같은 청정에너지 사용을 모색하

고 있고 이러한 청정에너지들의 사용이 지속 가능한 에너지 산업의 미래 핵심으로 보고 있다^{1,3)}. 전 세계가 청정에너지의 모색을 고민하는 가운데 미국은 2050년 100% 청정에너지 전환 및 net-zero 달성을 목표로 하고 있으며 일본은 2030년 에너지 자급률 30% 이상이라는 안전을 최우선으로 한 안전적·탄력적 에너지 공급 및 수소 & 암모니아 사회 진입 가속화를 목표로 내세우고 있다. 유럽의 경우 Fit for 55 패키지 발표로 1990년 대비 최소 55% 이상 온실가스 감축이라는 감축 목표 상향 및 European Union (EU) 수소산업 육성전략을 발표하였다. 수소는 대용량으로 효율적으로 저장하기 위해서는 에너지 밀도가 높은 극저온의 상태로 액화시켜 저장하는 과정이 필요하다. 기체수소를 20 K (-253°C)로 액화하여 얻을 수 있는 액체수소는 기체수소 대비 부피가 1/800에 달해 에너지 저장 밀도 및 운송 효율을 7배 이상 향상시킬 수 있다^{4,5)}. 액체수소를 안정적으로 활용하기 위해서는 액체수소를 20 K으로 유지하고 작동 가능한 시스템이 필요하며 해당 시스템에 관한 연구 및 검증이 선행되어야 한다^{6,7)}. 20 K 이하 극저온 기체적 물성에 대한 안정성을 평가하기 위해 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)을 비롯한 선진 연구 그룹들이 다양한 연구를 수행하였으며 다양한 연구 결과들이 발표되었다⁸⁻¹¹⁾. 이에 맞추어 대한민국에서도 탄소 중립을 이루기 위해 수소에너지의 활용과 관련한 연구들을 진행하고 있으며 1987년에 극저온 인장 시험 장비를 개발하고 상용 오스테나이트계 스테인리스강(austenitic stainless steel)에 대한 물성 평가 및 분석을 수행한 연구¹²⁾에서부터 2016년 액화 수소용기 개발을 위한 물성 평가 개발 연구 등의 연구를 진행하고 있다¹³⁾. 그러나 액체수소를 안정적으로 이용하고 활용하기 위해서 극저온 시스템의 안전성과 운용의 효율성 등의 검토가 아직 부족한 실정이다.

액체수소를 활용한 실험을 진행하기 위해서는 환경 온도를 맞추어야 하는데 실험을 유지하기 위한 비용과 시간 소요가 많다는 어려움이 존재한다. 이러한 어려움 때문에 수치해석 방법을 이용하여 열 유

동 거동을 예측하고 시스템을 검증하고 있다. 하지만 수치해석의 경우 수치 모델의 불확실성 때문에 기초 실험을 통한 해석적 방법의 검증과 검토가 필요하다.

본 연구에서는 향후 액체수소를 활용하는 수소 경제 시대를 대비하기 위하여 액체헬륨 온도(4.2 K) 환경까지 냉각이 가능한 챔버에 액체헬륨을 이용한 냉각 거동을 수치해석을 통해 분석하였다. 다양한 헬륨 압력 조건에서 액체헬륨 온도(4.2 K) 환경까지의 냉각 거동을 분석하였다. 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 수치 해석적 결과를 실험으로 진행한 냉각 결과와 비교하였으며 실험 결과와 유사한 참고 논문들의 결과들을 바탕으로 수치 모델을 검증하였다.

2. 모델 및 이론

2.1 극저온 수소 챔버 구조

극저온 챔버 내 온도 냉각 거동을 알아보기 위해서 극저온 인장 시험 장치를 위해 제작한 냉각 챔버를 사용하였다. 본 논문에서 사용된 극저온 수소 챔버의 경우 저온에서 우수한 인성 거동을 나타내며 수소 취성에 강한 오스테나이트계 철강을 재료로 한 환경 챔버를 사용하였다. Fig. 1은 미국재료시험학회(American Society for Testing and Materials, ASTM) 표준 규격인 ASTM E1450에서 4.2 K 수준의 극저온 인장 시험을 수행하기 위해 제시된 도면(Fig. 1[a])과 4.2K 수준의 극저온 인장 시험을 수행하기 위해 만들어진 극저온 수소 챔버(Fig. 1[b])이다.

챔버 내 온도 냉각 거동을 위한 수치해석의 수행 조건은 냉각 실험 시에 진행한 조건과 동일하게 부여하였다. 실험 조건은 gaseous nitrogen (GN2)을 이용하여 약 1시간 내외의 시스템 사전 냉각(약 100 K)을 한 후 온도가 약 100 K에 도달하여 변화가 없는 것을 확인한 뒤 추가 냉각을 진행하였다. 사전 냉각 이후 내부의 잔류 질소의 경우 챔버의 vent line을 통해 외부로 배출된다. 추가 냉각은 액체헬륨을 이용하여 챔버 중간 부분의 시편에 직분사하는 방식으로 진행하였다. 극저온에서의 시편 온도 측정을 위해 사

용한 온도 센서는 실리콘 다이오드 방식의 표준 편차 ± 0.1 K 극저온 열전대를 사용하였다.

2.2 열 유동 해석 모델링

Fig. 2와 Fig. 3에서는 극저온 챔버에 대한 구조와 유동장 영역을 보여준다. 챔버 내 저온 냉각 거동을 살펴보기 위해 유동 해석 모델을 구성하였으며 해석을 위한 총 격자 수는 computational fluid dynamics (CFD) 해석 시간 및 격자 quality 등을 고려하여 약 200,000개 수준으로 구성하였다. 작동 유체 및 챔버

를 구성하는 요소의 물성값(밀도, 점성계수, 열전도

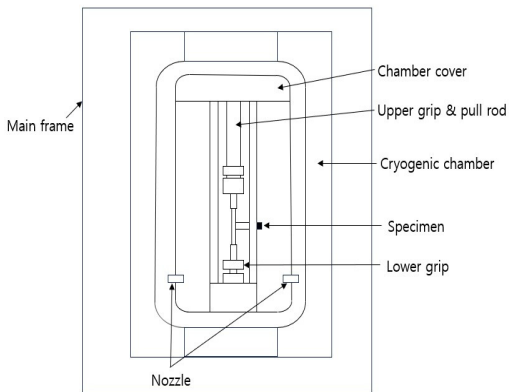
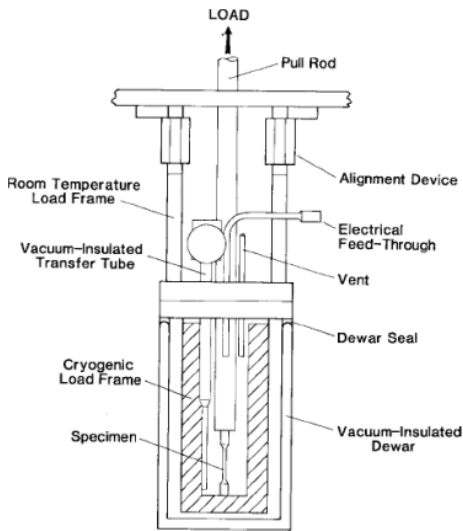


Fig. 1. Schematic illustrations of typical cryostat for tension testing (a), and used in study (b)

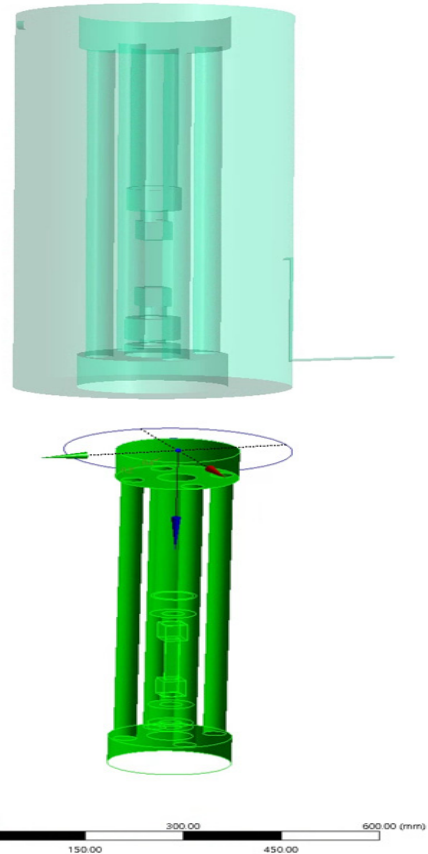


Fig. 2. Geometry model of cryogenic chamber

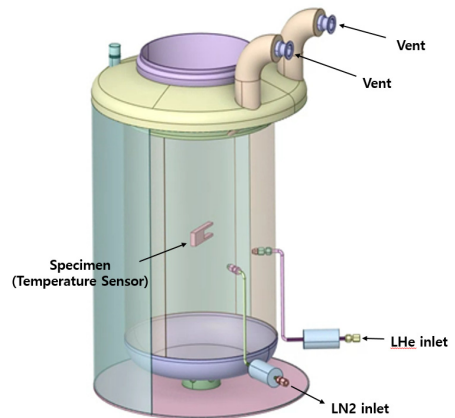


Fig. 3. 3D model of cryogenic chamber

도, 비열 값 등)은 온도에 따라 변하는 물성치이므로 4.2 K에서 100 K의 온도 범위에서 상용 CFD 해석 프로그램인 Ansys(Canonsburg, PA, USA)의 Fluent에 있는 사용자 정의 함수(user defined function, UDF)를 이용하여 온도에 따른 물성값을 구성하여 부여하였다.

냉각 거동의 목표 온도는 중간 부분의 시편 온도가 4.2 K에 도달할 때까지 냉매를 투입하는 조건이며 냉매는 일정 압력 조건으로 부여하였다. 진행한 수치해석은 상용 CFD 해석 프로그램인 Fluent (ver. 2023)를 이용하였다.

3. 열 유동 해석

3.1 해석 조건

Table 1은 극저온 챔버 내 냉각 거동 해석을 위한 해석 조건들을 보여준다. 해석을 위한 조건은 초기 온도 GN2 100 K을 부여하였으며 액체헬륨은 주입 온도 4.2 K의 조건을 부여하였다. 액체헬륨의 주입 조건은 5, 7, 10 kgf/cm²의 조건으로 일정 주입 압력 조건이며 ASTM 표준 규격 및 해당 환경 챔버의 설계 및 제조의 규정에 맞추어 주입 압력의 유효성과 최적의 주입 압력 범위를 선정하였다. 온도 측정은 시편 부분의 온도를 측정하여 온도 변화를 실시간으로 파악하였다. 온도 비교는 초기 온도에서 냉각이 진행되어 최종 온도가 4.2 K에 도달하는 시점까지 추이를 비교하였다. 온도 냉각 거동 해석은 극저온 유동에 따른 열전달 거동 결과를 도출하였다. 해석을

Table 1. The numerical conditions for cryogenic cooling analysis in cryogenic chamber

Contents	Values
Specimen thickness (mm)	10
Specimen width (mm)	10
inlet constant pressure of liquid helium (kgf/cm ²)	5, 7, 10
initial temperature (K)	100
inlet temperature of liquid helium(K)	4.2
Gauge length (mm)	50

위한 압력 및 속도장 해석은 SIMPLE 기법을 이용하였고 압력과 운동량 등을 1차(first order)로 공간 이산화(spatial discretization)하였다. 헬륨의 주입 배관의 외부 표면은 단열 조건(adiabatic condition)을 적용하였다.

3.2 열 유동 해석 결과와 실험 결과의 비교

Fig. 4는 극저온 챔버 내 온도 냉각 거동 해석 결과와 5-8 kgf/cm² 주입 압력 조건에서 실험 결과의 비교 그래프를 보여준다. 실험에서는 약 60초 때 약 72 K이며 600초 때 21.5 K, 1,200초 때 약 6 K에 도달하는 것을 확인하였다. 실험 결과의 경우 외부로부터의 열 손실로 인해 위와 같은 온도가 나타났다. 실험 결과와 해석 결과 사이에 약간의 온도 차이가 발생하는 부분은 실험에서는 냉각 중간 온도가 상승하는 부분(약 300초, 약 410초)들의 영향 때문이다. 중간 부분의 온도가 상승하는 이유는 실험에서 액체헬륨의 주입 과정 중 일정한 주입 압력으로 주입되지 않은 것으로 추측된다. 해당 온도 추이는 Kern 등¹⁴⁾의 연구들에서 볼 수 있듯이 일정 압력 분사 조건에서 부분적으로 분사 유량이 증가하면 온도가 빠르게 떨어짐과 분사 유량이 감소하는 구간에서 온도가 상승함의 연구 결과와 유사한 추이를 보여준다. 다시 말해 실험에서 일정한 유량의 액체 헬륨이 주입되었

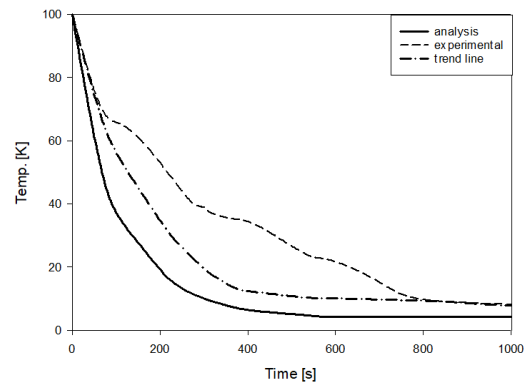


Fig. 4. Comparison between experimental and numerical results

다면 Fig. 4와 같이 냉각 추이가 될 것으로 추정될 수 있다. 추정된 실험 및 수치해석 결과는 이전 연구¹⁵⁻¹⁷⁾의 결과와 비슷한 경향이 나타남을 확인할 수 있다.

3.3 열 유동 해석 결과

Fig. 5는 액체헬륨의 주입 압력이 5, 7, 10 kgf/cm² 조건일 때의 열 유동 해석 결과를 보여준다. 주입 압력이 10 kgf/cm²인 경우 60초 때 약 48.12 K이었으며 5 kgf/cm²일 때보다 약 5.4 K 낮은 것을 확인할 수 있다. 600초 때 약 4.23 K에 도달하였으며 5 kgf/cm²일 때보다 약 0.3 K 낮은 온도를 보였다. 액체헬륨의 주입 압력이 높을수록 약 60초 부근에서 온도가 빠르게 떨어지는 것을 확인할 수 있으며 400초 이후부터는 주입 압력에 상관없이 유사한 온도 냉각 추이를 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 액체수소 환경을 조성하기 위한 챔버에서 액체헬륨을 이용한 냉각 거동을 수치해석적 방법을 통해 살펴보았다. 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 수치 해석적 결과를 실험으로 진행한 냉각 결과와 비교하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은

결론을 얻었다.

1) 극저온 챔버 내 온도 냉각 거동의 실험 결과에서는 60초 부분에서 약 72 K, 600초 부분에서 약 21.5 K, 1,200초 부분에는 약 6 K의 온도 거동을 확인할 수 있었다.

2) 극저온 챔버 내 온도 냉각 거동 해석 결과 주입 압력이 10 kgf/cm²인 경우 60초 부분에서 약 48.12 K를 보이며 5 kgf/cm² 주입 조건과 비교하여 약 5.4 K 더 낮은 것을 확인할 수 있었다. 주입 압력이 10 kgf/cm²인 경우 600초 부분에서는 약 4.23 K에 도달함을 확인하였으며 이는 5 kgf/cm² 주입 압력 조건보다 약 0.3 K 온도가 낮은 것을 확인할 수 있었다.

3) 주입 압력이 높을수록 60초 부근에서 온도가 빠르게 떨어지는 것을 확인할 수 있으며 400초 이후부터는 주입 압력에 상관없이 유사한 온도 냉각 추이를 확인할 수 있었다.

4) 실험 및 해석 결과는 약간의 차이를 보인다. 이는 실험에서 온도가 약간 상승하는 부분들(약 300초, 약 410초)의 영향 때문인데 이는 부분적으로 일정한 주입 압력으로 주입되지 않은 것으로 추측된다.

5) 본 연구의 방법론 및 결과는 향후 액체수소를 활용하는 많은 분야에서 효율적으로 적용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2022730000005A).

References

1. J. O'. M. Bockris, "The hydrogen economy: its history", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 6, 2013, pp. 2579-2588, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.026>.
2. S. Sharma and S. K. Ghoshal, "Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, 2015, pp. 1151-1158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>.

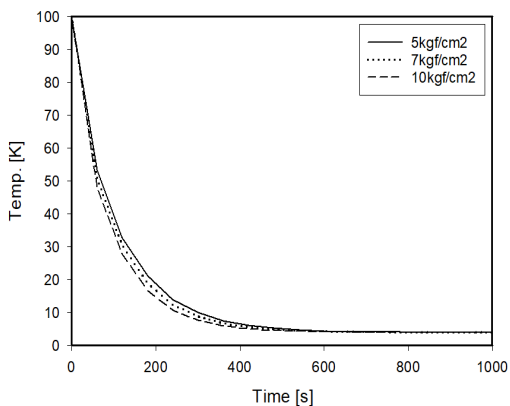


Fig. 5. Temperature results with inlet pressure conditions of 5, 7, 10 kgf/cm²

3. S. Z. S. Al Ghafri, S. Munro, U. Cardella, T. Funke, W. Notardonato, J. P. M. Trusler, J. Leachman, R. Span, S. Kamiya, G. Pearce, A. Swanger, E. D. Rodriguez, P. Bajada, F. Jiao, K. Peng, A. Siahvashi, M. L. Johns, and E. F. May, "Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities", *Energy & Environmental Science*, Vol. 15, No. 7, 2022, pp. 2690-2731, doi: <https://doi.org/10.1039/D2EE00099G>.
4. Z. Chen, Z. Ma, J. Zheng, X. Li, E. Akiba, and H. W. Li, "Perspectives and challenges of hydrogen storage in solid-state hydrides", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 29, 2021, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.024>.
5. K. Sasaki, H. W. Li, A. Hayashi, J. Yamabe, T. Ogura, and S. M. Lyth, "Hydrogen Energy Engineering: a Japanese perspective", Springer, Germany, 2016.
6. C. K. Woo. "Technical guide for materials of containment system for hydrogen fuels for ships." *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 46, No. 5, 2022, pp. 212-217, doi: <https://doi.org/10.5916/jamet.2022.46.5.212>.
7. B. Kim, and K. I. Hwang. "Numerical validation of a hydrogen leakage and dispersion experiment considering ship kinetic characteristics." *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 6, 2023, pp. 352-359, doi: <https://doi.org/10.5916/jamet.2023.47.6.352>.
8. X. Guo, X. Xie, J. Ren, M. Laktionova, E. Tabachnikova, L. Yu, W. S. Cheung, K. A. Dahmen, and P. K. Liaw, "Plastic dynamics of the Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloy at cryogenic temperatures: jerky flow, stair-like fluctuation, scaling behavior, and non-chaotic state", *Applied Physics Letters*, Vol. 111, No. 25, 2017, pp. 251905, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5004241>.
9. J. Tabin, B. Skoczeń, and J. Bielski, "Discontinuous plastic flow in stainless steels subjected to combined loads at extremely low temperatures", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 200, 2021, pp. 106448, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106448>.
10. Z. Pu, Z. C. Xie, R. Sarmah, Y. Chen, C. Lu, G. Anathakrishna, and L. H. Dai, "Spatio-temporal dynamics of jerky flow in high-entropy alloy at extremely low temperature", *Philosophical Magazine*, Vol. 101, No. 2, 2021, pp. 154-178, doi: <https://doi.org/10.1080/14786435.2020.1822557>.
11. J. Moon, E. Tabachnikova, S. Shumilin, T. Hryhorova, Y. Estrin, J. Brechtel, P. K. Liaw, W. Wang, K. A. Dahmen, and H. S. Kim, "Unraveling the discontinuous plastic flow of a Co-Cr-Fe-Ni-Mo multiprincipal-element alloy at deep cryogenic temperatures", *Physical Review Materials*, Vol. 5, No. 8, 2021, pp. 083601, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.083601>.
12. R. M. McClintock and H. P. Gibbons, "Mechanical properties of structural materials at low temperature", Korea Research Institute of Standards and Science, 1987.
13. Y. H. Cho, J. Y. Yoon, S. W. Kang, S. S. Kim, J. H. Kim, S. J. Kim, Y. C. Yoon, S. G. Jeong, and H. J. Chae, "Study on Administration of New Technology Convergency Type Growth Engine Project", Ministry of Science, ICT and Future Planning, 2017. Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?dbt=TRKO&cn=TRKO201800003646>.
14. R. S. Kern, C. Svanberg, K. Fransson, K. Gajewski, L. Hermansson, H. Li, T. Lofnes, M. Olvegård, I. Profatilova, M. Zhovner, A. Miyazaki, and R. Ruber, "Completion of Testing series double-spoke cavity cryomodules for ESS", In: The 21st International Conference on Radio-Frequency Superconductivity; 2023 Jun 25-30; Michigan. Ithaca: arXiv, 2023, pp. 2306.11333, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.11333>.
15. A. E. Salomonovich, T. M. Sidiyakina, A. S. Khaikin, V. N. Bakun, A. A. Nikonov, V. A. Maslakov, E. I. Klimenko, and V. N. Kurkin, "Space helium refrigerator", *Cryogenics*, Vol. 21, No. 8, 1981, pp. 474-478, doi: [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(81\)90069-2](https://doi.org/10.1016/0011-2275(81)90069-2).
16. C. Wang, G. Thummes, and C. Heiden, "A two-stage pulse tube cooler operating below 4 K", *Cryogenics*, Vol. 37, No. 3, 1997, pp. 159-164, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(96\)00112-9](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(96)00112-9).
17. J. Frolec, J. Vonka, P. Hanzelka, T. Kralik, V. Musilova, and P. Urban, "Design and testing of low temperature part of an UHV SPM microscope", In: The 13th Cryogenics 2014 IIR International Conference; 2014 Apr 7-11; Prague. Ithaca: arXiv, 2016, pp. 1610.00433, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.00433>.