

공기 액화 에너지 저장 장치 발전시스템에 관한 실험적 연구

박정환* · 이정익**†

Experiments on Power Generation System of Liquid Air Energy Storage System

Jung Hwan Park*, Jeong Ik Lee**†

Key Words : Energy storage system(에너지 저장 시스템), Liquid air energy storage system(공기액화 에너지 저장 시스템), Response time(응답시간), Liquid Air Evaporator(액체공기 기화기), Tesla turbine(테슬라 터빈)

ABSTRACT

An experimental study was conducted in a university lab scale to evaluate the power generation performance of a liquid air energy storage system. The experimental setup consists of a liquid nitrogen tank, evaporator, and a Tesla turbine. The experiment was conducted using liquid nitrogen instead of liquid air due to the similarity in thermal properties. First, evaporator test was conducted and it was observed that the evaporator outlet temperature was maintained for at least a half an hour. As a result of a power generation experiment, it succeeded in generating 30W of power, and the time to reach the maximum power was observed to be in 2.6 minutes. The change in generated power with respect to liquid nitrogen mass flow rate was also measured, and it was shown that the generated power increased linearly with respect to the mass flow rate of liquid nitrogen. From this study, it was shown that the response time of the liquid nitrogen power generation system can be quite fast, and the potential of applying cryogenic power generation system as a reserve power is also high.

1. 서론

공기 액화 에너지 저장 장치(Liquid Air Energy Storage System, LAES)는 기존 가압 공기 에너지 저장 장치(Compressed Air Energy Storage System, CAES) 또는 양수발전 시스템(Pumped Hydro Energy Storage System, PHES)에 비해 높은 에너지 밀도를 가지며 설치지역에 지리적 제약 조건이 없다는 점 등의 장점이 있다 [1]. 또한 공기를 사용하는 방식이기에 친환경적이고 안전함으로 도시에 적용하기 적합한 대용량 에너지 저장 장치 (Energy Storage System, ESS)로 분류한다.

LAES는 잉여전력으로 공기를 액화시켜 저장하고 추가

전력이 요구될 시, 공기를 기화시켜 에너지를 생산하는 대용량화 가능한 ESS이다. 에너지 저장 과정에서는 잉여전력을 이용하여 공기를 압축한다. 이때 발생하는 압축열은 열유(熱油) 저장 시스템(Thermal oil storage system)에 저장한 후 방전 과정에서 재사용되게 된다. 압축된 공기는 저온 에너지 저장 장치(Cold energy storage system)에서 냉각하고 이후 팽창과정을 통해 액화되어 액체 공기 탱크에 저장된다. 방전 과정 시에는, 액체 공기를 극저온 펌프로 가압한 후 저온 에너지 저장 장치와 열교환을 통해 기화시킨다. 이후 공기는 열유 저장 시스템에 저장된 열을 통해 가열된 후 공기터빈에서의 팽창과정을 통해 에너지를 생산한다. 그림 1에 이 과정이 도시되어 있다.

* 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과(Department of nuclear and quantum engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과(Department of nuclear and quantum engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

† 교신저자, E-mail : jeongiklee@kaist.ac.kr

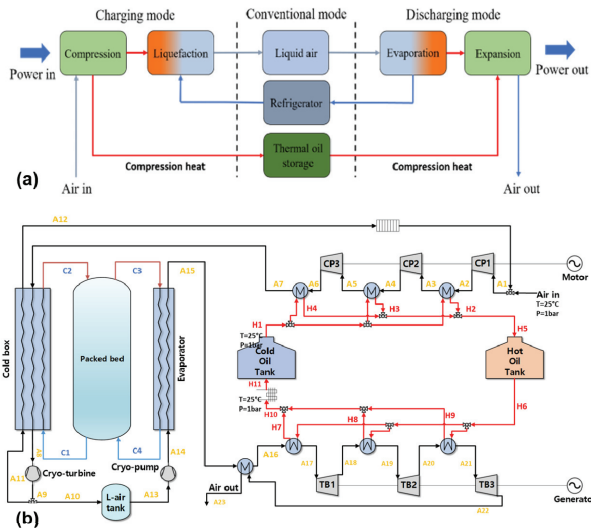


Fig. 1 (a) Process diagram (b) schematic diagram of LAES

현재 세계 각국의 LAES 개발 현황을 살펴보면 영국의 Highview power 사가 2014년에 런던 슬라우 지역에 세계 최초로 350kW/2.5MWh급 LAES 파일럿 플랜트를 건설하였다. 2018년에는 맨체스터 지역에 5MW/15MWh급 데모 플랜트를 건설하여 현재까지 운행 자료를 수집하고 있다. 이후 현재까지는 모듈화 기술을 개발하여 200MW/2GWh급 실증 플랜트를 요크셔 지역에 건설 예정이다. Highview power 사의 LAES 데모 플랜트 건설에 영향을 받아 독일 및 중국 등에서 대규모 LAES 플랜트에 대한 가능성 검토 및 향후 플랜트 설계 프로젝트를 계획 중이다.

한국의 경우에는 2018년부터 2021년까지 한영국제공동연구로 10kW급 LAES 파일럿 플랜트 구축 및 기초실험을 수행하였고 현재 국토교통진흥연구원 주관 2MW/5MWh급 LAES 기술개발 프로젝트를 수행 중이다. 다양한 프로젝트와 더불어 학계에서도 LAES의 실현 가능성에 대한 평가가 진행 중이다. Yoon 등은 다른 외부 에너지와의 열 통합이 없는 독립형 LAES 사이클에 대한 평가를 수행하였고 약 7.2%의 왕복 효율을 얻을 수 있음을 보였다 [8]. Kim 등은 낮은 LAES의 왕복 효율을 개선하고자 다단 저온 에너지 저장 장치를 제안하였고 기존 LAES에 비해 높은 효율을 얻을 수 있음을 보였다 [9]. Go 등은 한국 시장에서의 LAES의 경제성 분석을 수행하였다 [10]. 분석 결과 LAES의 균등화 발전단가는 양수발전보다는 비용이 더 발생하지만 다른 대용량 에너지 저장 장치에 비해서 저렴한 것으로 나타났다. 이처럼 한국전력 시장에 LAES를 도입하기 위한 다수의 연구와 기초실험이 수행되었지만, 전주기 실증 기술개발에 대한 수행 경험은 부족한 것으로 나타났다.

LAES는 액체공기를 기화시켜 에너지를 생산하는 방식으로 응답시간(response time)이 수분 이내이며 화력발전과

Table 1 세계 LAES 기술개발 현황 [2-5]

구분	특징
영국 (Highview power)	<ul style="list-style-type: none"> 세계 최초의 GW급 확장 가능 LAES 모듈 기술 확보 슬라우 지역 350kW/2.5MWh급 파일럿 플랜트 건설 (2014~) 맨체스터 지역 5MW/15MWh급 데모 플랜트 건설 (2018~) 요크셔 지역 200MW/2GWh급 플랜트 건설 예정
독일 (KRYOLENS)	<ul style="list-style-type: none"> KRYOLENS 프로젝트 (2016~2020) Linde 사와 협업하여 LAES 원천 기술 확보 및 기술 성숙도 향상
중국 (SPERI)	<ul style="list-style-type: none"> 50MW/200MWh급 LAES 기술개발 단계 기술 성숙도에 따라 GW급으로 확대 예정
한국	<ul style="list-style-type: none"> 한영국제공동연구로 10kW급 파일럿 구축 및 실험 (2018~2021) 국토교통진흥연구원 주관 ‘공기 액화 기반 에너지 저장 및 활용 시스템 기술개발’ 프로젝트 진행 중 (2022~현재) 현재 전주기 LAES 실증 기술개발 수행 경험 없음

같은 높은 온도의 열원이 필요하지 않아 예비력으로 활용될 가능성이 높다. 국내 운영 예비력을 기준으로 5분 이내 공급되고 30분간 유지하는 것을 목표로 하고 있다 [6]. 하지만 앞서 진행한 선행연구분석과 같이 LAES 발전 시스템의 응답시간 및 가용 출력에 관한 연구가 부족한 상태이므로 LAES의 운영 예비력으로써의 적용 가능성에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 LAES 발전 시스템의 발전 성능 및 응답시간 측정을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 공기의 대부분이 질소로 이루어진 점을 고려하여 액체질소를 유체로 사용하는 액체질소 발전 시스템 루프를 설치하였다. LAES 발전 시스템의 실험적 연구 데이터 확보를 위해 설치된 실험 루프를 사용하여 응답시간 및 터빈 출력에 관해 연구하였다. 본 실험 결과는 향후 대형 LAES 설계와 전체 시스템의 천이해석 등에 사용하는 컴퓨터 프로그램의 검증에도 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험 장치

2.1 실험 장치 사양

본 연구에서 LAES 발전 시스템 모사를 위해 실험 장치를 구성하였으며, 액체 공기와 액체질소의 열역학적 유사성을 고려하여 액체질소를 이용한 실험을 수행하였다. Fig. 2와 같이 공기와 질소의 열 물성이 유사하게 나타남을 알 수 있다.

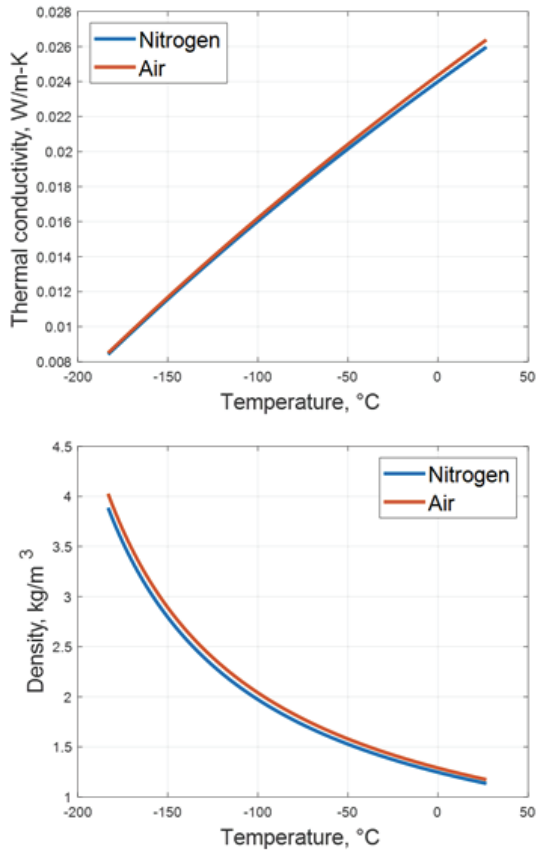


Fig. 2 Comparison of thermal properties of nitrogen and air with respect to temperature (P=1bar)

액체질소 발전 실험 장치는 액체 질소탱크, 대기 기화기, 레귤레이터, 테슬라 터빈으로 구성된다. 극저온 펌프를 이용한 가압 상황을 구현하기 위해 외부 기체 질소를 이용하여 액체질소를 약 6bar까지 가압하여 사용하였다. 액체질소 탱크로부터 공급받은 질소는 대기 기화기에서 기화되고 팽창하여 전력을 생산하게 된다. 대기 기화기의 사양은 Table 2와 같다.

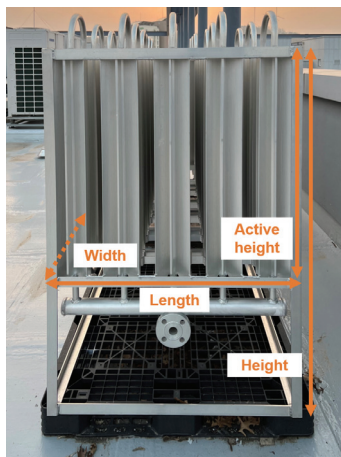


Fig. 3 Picture of air evaporator

Table 2 Design specifications of air evaporator

Specification	Value
Material	SUS304
Type	Fin type
Capacity	100Nm ³ /hr
Design pressure	3.0MPa
Design temperature	-196°C~40°C
Width	1160mm
Length	970mm
Height (active height)	1410mm (910mm)
Allowable fluid	LO ₂ , LN ₂ , LAR

팽창기로는 테슬라 터빈을 사용하였다. 테슬라 터빈은 간단한 형태로 높은 효율을 가지고 있어 lab-scale 실험에서 유용하게 활용할 수 있다 [7]. 테슬라 터빈의 제원은 Table 3과 같다.

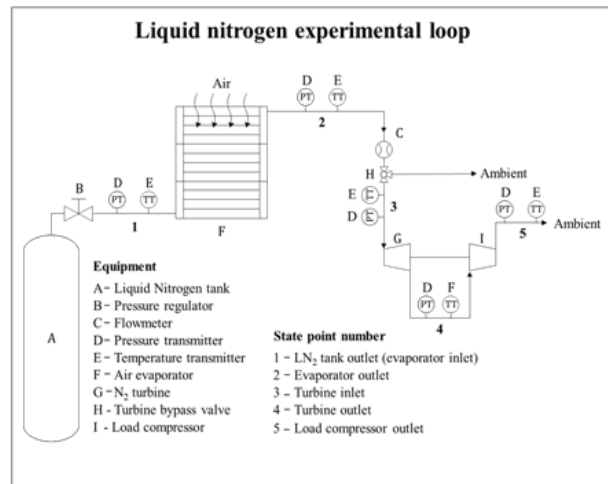


Fig. 4 Schematic diagram of the liquid nitrogen experimental loop



Fig. 5 Tesla turbine open view

Table 3 Design specifications of Tesla turbine

Specification	Value
Turbine diameter	100mm
Turbine length	75mm
Blade/disk diameter	78mm
Blade/disk thickness	1.2mm
Blade/disk gap	1.2mm
Number of blades/disks	10
Over base size	113mm x 185mm
Case	HE30 aluminium
Spindle	303 stainless steel
Disk spacers	HE30 aluminium
Maximum output	150W

압력 측정을 위해서 APC-2000ALW 압력계를 사용하였으며 압력 및 온도 계측 범위는 최대 2.5MPa, -40~85°C이다. 질량 유량계로는 열 분산 원리를 기반으로 설계된 KMSG-8000을 사용하였다. 작동 온도는 -10°C에서 55°C이며 작동 압력은 최대 1.6MPa이다. 정확도는 ±0.5~1.5%이다. Fig. 6은 설치된 발전 실험 장치를 보여준다.

테슬라 터빈의 최대 출력은 150W이며 전류 및 전압을 생산하기 위해 70W/24V 할로겐램프를 사용하였다. 테슬라 터빈의 전력 생산량은 Hioki 3169 Power Analyzer를 사용하여 계측하였다. 실험에 사용된 계측기의 정확도 및 측정 온도, 압력 범위는 Table 4와 같다. 각 계측기의 정확도는

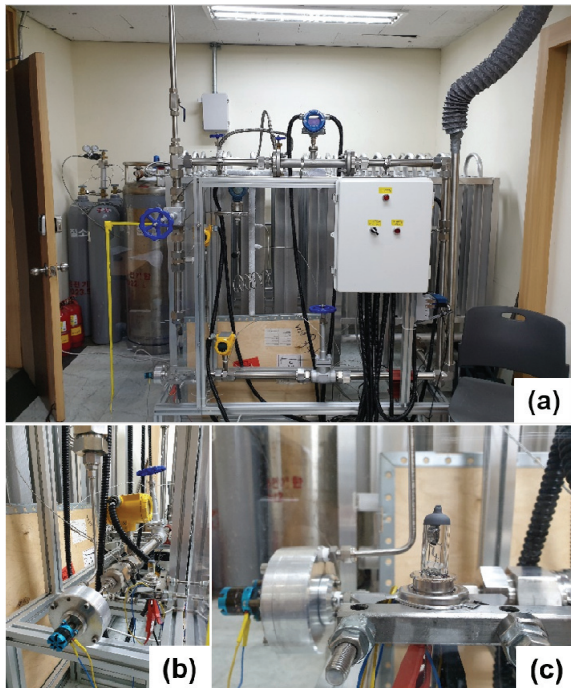


Fig. 6 (a) Pictures of liquid nitrogen experimental loop, (b) Tesla turbine, (c) Load ramp

Table 4 Specification of used measurement

Measurement	Range	Uncertainty
APC-2000ALW (압력계)	0~2.5MPa (-40~85°C)	±0.075%
KMSG-8000 (유량계)	0~1.6MPa (-10~55°C)	±0.5~1.5%
T-type thermocouple (열전대)	-270~400°C	±0.5%
Hioki Power Analyzer (전류 및 전압계)	-	±0.5%

Table 5 Overall test condition of the liquid nitrogen experimental loop

Test condition	Value
Room temperature	25°C
Initial LN2 temperature	-167°C
Initial LN2 pressure	1bar
LN2 maximum pressure	6bar
Mass flow rate of LN2	12g/sec
LN2 tank volume	300L
Volumetric flow rate of GN2	35.0Nm ³ /hr

1% 이내인 것으로 나타났다.

실험조건은 Table 5와 같다. 액체질소 탱크의 온도는 -167°C이며 극저온 펌프의 가압 상황 모사를 위해 기체 질소를 이용하여 액체질소를 가압하였으며, 압력은 6bar로 고정하였다. 응답속도 측정을 위해 액체질소의 유량은 12g/sec로 선정하였다.

3. 실험 결과

3.1 대기 기화기 기화 실험

발전 실험에 앞서 대기 기화기의 기화 성능에 대한 테스트를 수행하였다. 성능 테스트 조건은 Table 5와 같다. 테스트 목표는 기화기의 출구 온도가 일정하게 유지되는 것을 확인하기 위함이다. 기화기의 출구는 터빈의 입구와 연결되기 때문에 기화기 출구 온도는 터빈의 성능과 직결된다.

테스트 결과는 Fig. 7에 나타나 있다. 약 600초부터 1,200초까지의 정상상태에서 계측된 온도 분포를 보면 기화기 출구 온도가 약 23.9°C로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 기화기 입구 온도의 경우 다소 변동이 있으나 최종적으로 기화기를 통과하면 변동성이 사라지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 설치된 기화기의 열용량이 액체질소를 기화시키기에 충분하며 안정적인 기체 질소를 공급할 수 있음을 알 수 있다.

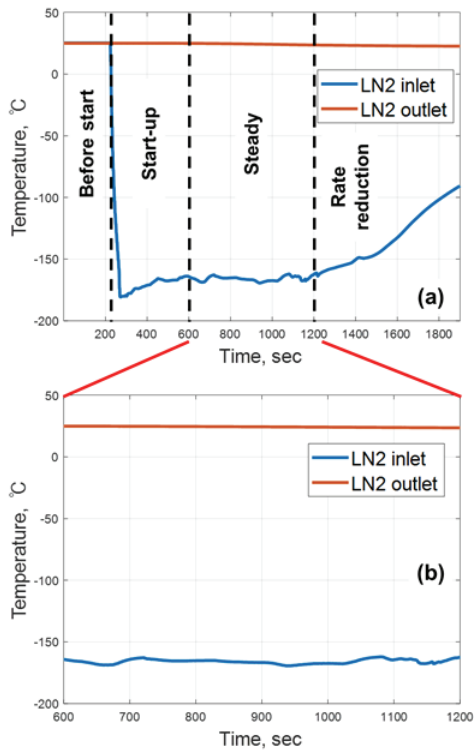


Fig. 7 (a) Inlet and outlet temperature of evaporator experiment, (b) steady-state

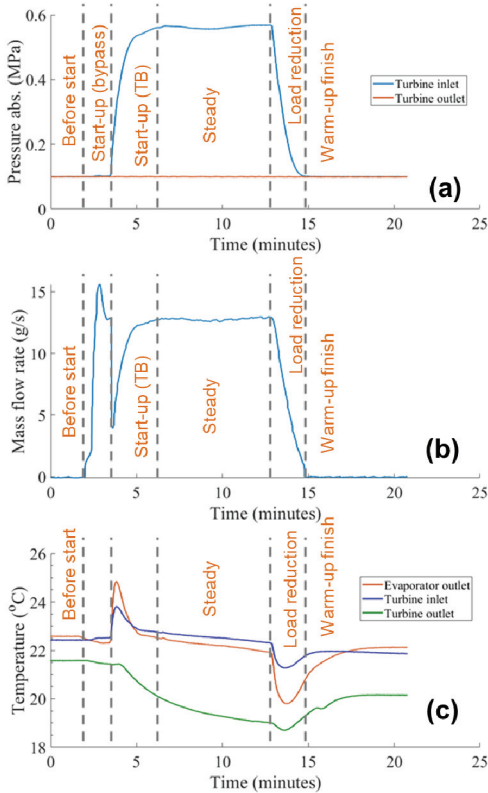


Fig. 8 (a) pressure (b) mass flow rate (c) temperature of liquid nitrogen power generation experiment

3.2 발전 실험

다음으로 테슬라 터빈을 이용한 발전 실험을 수행하였다. 발전 실험조건은 Table 5와 같고 start-up, steady, load-reduction, warm-up finish 순으로 실험을 수행하였다. 초기 start-up 시에는 기화기의 열용량을 고려하여 일정 시간 터빈 바이패스를 시켜 유량을 12g/sec로 유지하였다. 이후 터빈 바이패스 밸브를 닫고 터빈으로 유량을 인가하여 운전조건 압력인 6bar로 실험을 수행하였다. 약 5분간 터빈 출력 및 응동 시간을 관측하였다.

터빈 출력 측정은 전압 및 전류 측정을 통해 계산하였으며, 최대 30W의 출력으로 발전할 수 있음을 보였다. 이때 start-up 시간부터 측정하여 최대 출력에 도달하기까지의 시간으로 응동시간을 계산하였다. 실험을 통해 측정된 결과는 Table 6에 명시하였다.

Start-up부터 steady에 이르기까지의 시간은 약 2.6분이고 최대 출력은 30W로 측정되었다. 이로부터 액체질소 발전 시스템의 평균 출력 변화를 계산하였다. 평균 출력 변화량은 11.5W/min으로 분당 38.4%의 출력 변화가 가능한 것으로 나타났다. 다음으로 액체질소 유량에 대한 발전량

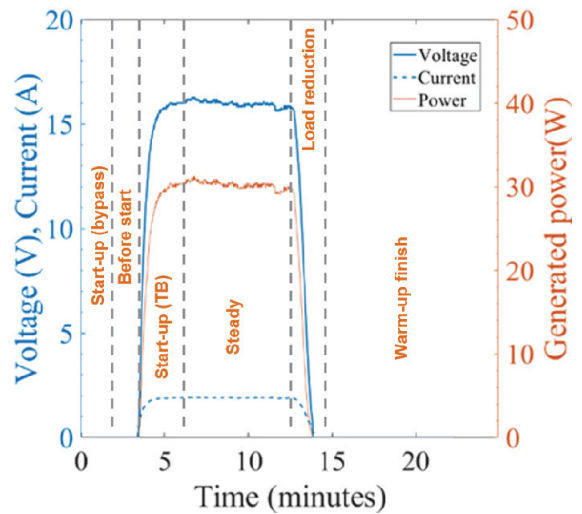


Fig. 9 Voltage, current, and generated turbine power

Table 6 Results of liquid nitrogen power generation experiment

Test condition	Value
LN2 tank inlet pressure	1bar
LN2 inlet temperature	-167°C
LN2 mass flow rate	12g/sec
Turbine power (P)	30W
Response time (t) (from start-up)	2.6min
$\frac{dP}{dt}$ (average power change)	11.5W/min (38.4%/min)

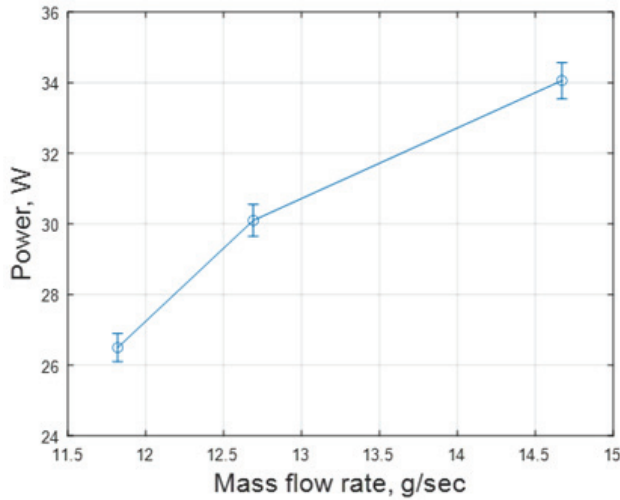


Fig. 10 Power of liquid nitrogen power generation experiment with respect to mass flow rate

평가를 수행하였다. 액체질소의 유량이 증가함에 따라 발전량이 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

다음으로 액체질소 유량에 따른 발전 효율 평가를 수행하였다. 본 실험 장치는 open-loop 장치이고 기체 질소를 이용하여 가압하기 때문에 추가적인 전력 소모는 없다. 하지만 기화기를 통해 액체질소에 전달된 기화열을 이용하여 열효율을 간접적으로 계산하였다. 열효율 계산식은 아래와 같으며 계산 결과는 Table 7에 나타냈다.

$$\eta_{th} = \frac{W_{turbine}}{\dot{Q}_{evp}} \quad (1)$$

이때, η_{th} 는 열효율, \dot{Q}_{evp} 는 기화기 열 투입량, $W_{turbine}$ 는 터빈 발전량이다.

계산 결과 각 유량에 대하여 열 효율은 1% 수준으로 나타났다. 이러한 낮은 효율의 원인은 두 가지 관점에 설명할 수 있다. 첫째, 본 실험에 사용된 테슬라 터빈은 시제작 터빈으로 낮은 성능을 가지고 있기 때문이다. 테슬라 터빈을 이용한 사전연구에서 초임계 이산화탄소를 이용한 실험 결과에 따르면 테슬라 터빈의 등엔트로피 효율이 0.5~1.3%로 매우 낮게 나타남을 알 수 있다 [12]. 이러한 이유는 테슬라 터빈의 형상, 노즐 각도, 및 베어링 등이 최적화되어 있지 않은 부분도 있지만, 운동량을 이용하는 기존의 터빈과 달리

Table 7 Thermal efficiency and evaporator heat

Case	Mdot	Power	η_{th}	\dot{Q}_{evp}
	g/sec	W	%	kW
1	11.8	26.5	1.077	2.46
2	12.7	30.1	1.139	2.64
3	14.7	34.06	1.115	3.05

마찰력에 의해 구동되는 터빈이기 때문이다. 두 번째로는 발전량 대비 기화열이 크기 때문이다. 액체 질소는 잠열을 가지고 있기 때문에 질소 발전량 대비 기화열이 크다. 이러한 두 가지 이유 때문에 액체 질소 발전 실험의 열효율이 낮게 나타난 것으로 예상된다. 하지만 본 실험에 사용된 기화기는 대기 기화기이기 때문에 기화에 사용된 열은 외부에서 공급한 열이 아니라 대기에서 흡수한 열이어서 실질적으로 발전과정에서 투입된 추가적인 열은 없는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 액체 질소 발전 과정에서 열효율 측정보다는 발전 응답속도가 더욱 의미가 있음을 알 수 있다.

다음으로 본 실험 결과를 바탕으로 대기 기화기 형상에 따른 발전 응답속도를 추정하였다. 자연대류를 이용한 대기 기화기의 경우 열전달량과 기화량이 비례하는 관계를 함을 예상할 수 있다. 기화량은 곧 터빈의 발전량을 결정하므로 발전 응답속도는 곧 대기 기화기의 열전달량에 비례함을 알 수 있다. 핀 타입 대기 기화기의 열전달량은 다음의 식으로 계산된다 [11].

$$\dot{Q} = hA \times LMTD \quad (2)$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left(1.0 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$h = \frac{Nu \times k}{L}, Ra = Gr \times Pr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (4)$$

이때, \dot{Q} 는 열전달량, h 는 열전달계수, $LMTD$ 는 Log Mean Temperature Difference, Nu 는 Nusselt 수, Pr 는 Prandtl 수, Ra 는 Rayleigh 수, Gr 는 Grashof 수, k 는 열전도계수, L 은 열교환기의 길이이다.

열교환기의 열 물 성적 특성이 본 실험과 같다고 가정한다

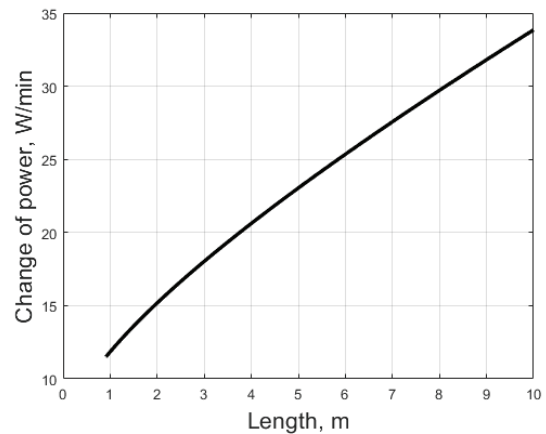


Fig. 11 Change of power with respect to heat exchanger length

다면 이로부터 발전 응답속도와 열교환기의 길이 간의 상관 관계를 아래와 같이 유추할 수 있다. 열교환기의 길이가 길어질수록 열전달량이 증가함으로 발전 응답속도가 증가함을 알 수 있다. 특히 수 MW급 대형 LAES의 경우 액체 공기 유량이 수십kg/sec에 달함으로 이를 기화시키기 위해선 대기 기화기의 길이가 길어져야 함을 알 수 있고 단일 기화기보다는 유량을 분산시켜 기화시키는 다단 기화기가 필요할 것으로 보인다. 만약 본 실험과 같은 용량의 대기 기화기를 다단으로 사용한다면 수분 이내로 반응할 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기 액화 에너지 저장 장치(Liquid air energy storage system, LAES)의 발전 과정이 예비력으로써 활용할 가능성을 평가하기 위해 기초적인 실험결과를 보였다. 공기 대부분이 질소인 점을 고려하여 액체질소를 이용하여 실험을 수행하였으며, 발전량 평가를 위해 테슬라 터빈을 사용하였다. 실험에 대해서는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 대기 기화기를 통한 액체질소 기화 실험을 수행하였다. 액체질소의 기화를 위해선 많은 잠열을 제거해야 하는데 기성품인 대기 기화기만으로 충분히 잠열을 제거하는 것이 가능함을 확인하였다. 약 30분간 기화기 출구 온도가 대기 온도로 일정하게 유지됨을 확인하였으며 이는 곧 터빈의 입구 온도가 정상상태로 잘 유지됨을 나타낸다.
- 2) 테슬라 터빈을 활용하여 액체질소 발전시스템 실험을 수행하였다. 테슬라 터빈의 용량을 고려하여 액체질소의 유량을 12g/sec로 결정하였다. 극저온 펌프를 대체하여 기체 질소로 액체질소를 가압하였으며 이때의 실험압력은 6bar로 선정하였다.
- 3) 초기 선정된 실험조건으로부터 액체질소 발전 실험을 수행하였다. Start-up부터 정상상태에 도달하기까지 약 2.6분이 소요되었으며 최대 출력에서의 발전량은 30W로 계산되었다. 이때 응답시간에 대한 발전량 변화량은 약 11.5W/min으로 나타났다.
- 4) 다양한 액체질소 유량에서 발전량을 계측하였으며, 실험 결과 액체질소 유량과 터빈 발전량 사이에는 비례하는 관계가 있다.
- 5) 열효율 분석을 통해 액체질소 발전 실험 장치의 열효율은 1%대로 나타났다. 이러한 낮은 효율은 테슬라 터빈의 형상, 노즐 각도, 및 베어링 등이 최적화되어 있지 않으며 구동력이 아닌 마찰력을 이용하는 기기이기 때문이다. 또한 질소의 잠열로 인해 액체질소의 기화열이 크게 나타나기 때문이다. 하지만 기화기는 대기 에너지를 소모하는 것이기 때문에 추가적인 전력 소모

가 없으므로 사실상 추가 투입 전력은 없는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 액체질소 발전 장치에서 중요한 변수는 열효율보다는 발전 응답속도임을 알 수 있다.

- 6) 대기 기화기의 열전달 특성을 반영하여 형상 정보에 따른 발전 응답속도를 추정하였다. 대기 기화기의 길이가 길어질수록 발전 응답속도가 증가함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 수 MW급 LAES의 경우 길이가 긴 대기 기화기가 필요하여 단일 기화기보다는 유량을 분산시켜 사용하는 다단 대기 기화기가 필요함을 알 수 있다.

실험 결과 약 2.6분 정도로 최대 출력에 도달할 수 있음을 보였으며 본 실험 장비로 약 30W의 전력 생산에 성공함을 보였다. 또한 대기 기화기의 길이가 증가함에 따라 발전 응답속도가 증가함을 알 수 있었다. 대용량 LAES의 경우 대용량의 단일 기화기를 사용하기보다는 유량을 분산시켜 소형의 다단 대기 기화기가 응답시간 감소에 기여할 것이다. 본 실험과 같은 용량의 대기 기화기를 다중으로 사용할 경우 예비력 기준인 '5분 이내 반응' 기준에 부합할 것으로 예상된다. 두 번째 기준인 '30분 이상 가동'에 대한 부합성은 추가적인 실험이 필요한 것으로 보인다. 또한 실제 공기 액화 에너지 저장 장치는 압축기, 열저장 시스템, 극저온 펌프 등 다양한 구성기기가 포함됨으로 이를 실증할 시에 반응시간은 더욱 증가할 것으로 예상된다.

본 연구를 통해 소용량 발전 시스템의 경우 극저온 펌프가 없을 시에도 대기 기화기만으로 발전할 수 있음을 보였고, 초기 반응 시에는 대기 기화기로 빠른 기동 후 극저온 펌프로 가압하면서 발전한다면 예비력으로써 활용 가능성이 충분할 것으로 보인다. 하지만 대용량 발전 시스템의 경우 기화기의 용량이 필수적으로 증가해야 하므로 발전 용량에 따른 응답 속도에 관한 추가적인 연구가 필요한 것으로 예상된다. 본 연구 결과를 바탕으로 실험 장비 보강 및 시뮬레이션 등을 통해 공기 액화 에너지 저장 장치의 실증 가능성에 대한 평가를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00143652). 본 연구에 도움을 준 허진영 박사에게 감사의 말씀을 전함.

References

- (1) Vecchi, Andrea, et al. "Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives." *Advances in Applied*

- Energy 3 (2021): 100047.
- (2) House, Golden Cross. "Highview Power launches world's first grid-scale liquid air energy storage plant." (2018).
 - (3) Hüttermann, Lars, et al. "Investigation of a liquid air energy storage (LAES) system with different cryogenic heat storage devices." Energy Procedia 158 (2019): 4410-4415.
 - (4) Cui, Shuangshuang, et al. "Techno-economic analysis of multi-generation liquid air energy storage system." Applied Thermal Engineering 198 (2021): 117511.
 - (5) Munkyu Yoon, Chunsik Lee, Dong-Ryul Rhim, Choongsub Yeom, "A Study on Working fluid for Cold thermal Storage of Liquid Air Energy Storage System." The Korean Institute of Gas, (2021), 137-137.
 - (6) Woo-Jung Kim, Yu-Seok Lee, Sung-Eun Kim, Hae-Seong Jeong, Yeong-Han Chun. "An Analysis of the Effect of the Change in Reserve Requirement on System Operation due to the Increase of Renewable Energy." The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers., (2021),583-584.
 - (7) Zuber, Mohammad, Adithya Ramesh, and Darpan Bansal. "The Tesla Turbine-A Comprehensive Review." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 62.1 (2019): 122-137.
 - (8) Munkyu Yoon, Chunsik Lee, Dong-Ryul Rhim, Choongsub Yeom. "Process analysis for Liquid Air Energy Storage." The Korean Institute of Gas, 2021, 173-173.
 - (9) Kim, Jhongkwon, et al. "Enhancement of the round-trip efficiency of liquid air energy storage (LAES) system using cascade cold storage units." Progress in Superconductivity and Cryogenics 22.4 (2020): 45-50.
 - (10) Areum Ko, Sung-Ho Park, Ju-Yeol Ryu, Jong-Po Park.(2020).Economic Evaluation of Liquid Air Energy Storage (LAES) System.New & Renewable Energy,16(1),1-14.
 - (11) Liu, Shanshan, et al. "Thermal resistance analysis of cryogenic frosting and its effect on performance of LNG ambient air vaporizer." Renewable Energy 149 (2020): 917-927.
 - (12) Baik, Seungjoon, et al. "Preliminary study of Friction disk type turbine for S-CO2 cycle application." The Korean Nuclear Society Autumn Meeting. The Korean Nuclear Society, 2016.