

## 헬륨 브레이튼 사이클을 활용한 5TPD급 수소액화 공정의 동적 시뮬레이션

윤하준<sup>\*,†</sup>, 박시우<sup>\*\*,†</sup>, 이현희<sup>\*\*</sup>, 이철진<sup>\*,\*\*,\*†</sup>

\*중앙대학교 화학공학과  
06974 서울특별시 동작구 흑석로 84  
\*\*중앙대학교 지능형에너지산업융합학과  
06974 서울특별시 동작구 흑석로 84

(2025년 11월 10일 접수, 2026년 3월 13일 수정본 접수, 2026년 4월 3일 채택)

## Dynamic Simulation of 5TPD Hydrogen Liquefaction Process with Helium Reverse Brayton Cycle

Ha-Jun Yoon<sup>\*,†</sup>, Si-Woo Park<sup>\*\*,†</sup>, Hyun-Hee Lee<sup>\*\*</sup> and Chul-Jin Lee<sup>\*,\*\*,\*†</sup>

\*Department of Chemical Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea  
\*\*Department of Intelligent Energy Industry, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea  
(Received 10 November 2025; Received in revised from 13 March 2026; Accepted 3 April 2026)

### 요 약

본 연구에서는 헬륨 브레이튼 사이클 기반 수소 액화 공정의 동적 시뮬레이션을 통해 부분 부하 조건에서의 시스템 응답 및 에너지 효율을 분석하였다. 수소 공급 유량을 설계 대비 90%, 80%, 70%로 단계적으로 감소시키며 열교환기 및 회전기기의 온도, 압력, 에너지 소비 변화를 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 헬륨 유량이 수소 부하에 비례하여 충분히 감소하지 않을 경우 과냉각이 발생하여 액체 수소 온도가 20.5K에서 19.5K로 저하되었다. 또한 팽창기의 효율이 압축기보다 낮아, 회수되는 에너지 손실이 더 크게 나타났으며, 이에 따라 단위 질량당 에너지 소비(SEC)가 44.1% 증가하였다. 본 연구는 부분 부하 조건에서 헬륨 유량 및 주요 기기의 운전 조건을 정밀하게 제어해야 함을 제시하며, 회전기기의 효율 향상이 수소 액화공정의 에너지 효율 개선에 핵심적으로 기여할 수 있음을 시사한다.

**Abstract** – This study presents a dynamic simulation of a hydrogen liquefaction process using a helium Brayton cycle under partial load conditions. Hydrogen feed flow was reduced to 90%, 80%, and 70% of the design value and temperature, pressure, and energy consumption across heat exchangers and rotating equipment were evaluated. Results showed that insufficient reduction in helium flow caused subcooling, lowering the liquid hydrogen temperature from 20.5K to 19.5K. Furthermore, due to the lower efficiency of the expander compared to the compressor, the decrease in recoverable energy exceeded the reduction in compression work, resulting in a 44.1% increased specific energy consumption. These findings emphasize the need for precise control of helium flow and operating conditions during partial load operation. Additionally, improving the performance of rotating equipment such as compressors and expanders is essential for enhancing the energy efficiency of hydrogen liquefaction systems.

Key words: Hydrogen liquefaction; Dynamic simulation; Helium Brayton cycle; Cryogenic process; Cold-box

### 1. 서 론

수소 액화는 장거리 및 대규모 수소 운송, 저장 과정에서 체적 에너지 밀도를 획기적으로 개선할 수 있는 유력한 기술로 평가되어

왔다. 특히, 고압 기체 저장 방식에 비해 낮은 저장 압력과 높은 에너지 밀도를 제공할 수 있어, 액화 수소는 수소 기반 에너지 공급망에서 핵심적인 형태로 주목받고 있다. 그러나 수소를 극저온(-253°C) 상태로 액화하는 데 필요한 막대한 에너지 소비는 여전히 기술적 병목으로 작용하고 있다. 실제로 수소 액화 공정의 단위 질량당 에너지 소비(Specific Energy Consumption, SEC)는 전체 공급망의 경제성과 환경성에 중대한 영향을 미치며, 다양한 선행 연구에서도 지속적으로 개선이 요구되는 핵심 지표로 지적되어 왔다[1,2].

SEC 저감을 위한 기술적 접근으로는 고효율 냉동 사이클 적용,

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: cjlee@cau.ac.kr

<sup>‡</sup>These authors contributed equally to this work

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

공정 내 열교환 효율 개선, 최적의 운전 조건 설정 등이 활발히 연구되고 있다. 이 중에서도 헬륨 브레이튼 사이클을 기반으로 하는 고효율 폐루프 냉동 시스템은 높은 열역학적 효율로 인해 유망한 대안으로 주목받고 있다. 특히 다단 압축 및 다단 팽창 구조를 적용한 설계는 극저온까지의 효율적인 냉각을 가능하게 한다[3-6].

역사적으로 수소 액화 사이클의 효율 향상은 클로드(Claude) 또는 역 브레이튼(Reversed Brayton) 사이클의 변형에 예냉공정을 결합하는 방식으로 발전해 왔다. 냉매로는 주로 질소 또는 액화천연가스(LNG)가 사용되었으며, 이를 통해 초기 단계에서 냉각 부담을 분산시켜 전체 사이클의 에너지 소비를 저감하는 효과를 기대할 수 있다. 대표적인 연구로는 Quack이 대용량 수소 액화기에서 엑서지 분석을 바탕으로 최적 피드(Feed) 압력과 오쏘-파라(ortho-para) 수소 전환의 상호 연관성을 논리적으로 제시한 바 있다[7]. 또한, Chang 등은 헬륨 브레이튼 냉동기를 기반으로 한 다양한 수소 액화 사이클의 열역학 성능을 체계적으로 비교하였으며[4], 이후 연구에서는 LNG의 냉열을 통합함으로써 SEC 저감 효과를 수치적으로 입증하였다[5].

하지만 기존의 수소 액화 공정 연구는 주로 정상상태(Steady state) 기반 시스템 설계 및 열역학적 성능 분석에 집중되어 왔으며, 실제 운전 상황에서 발생할 수 있는 시간 의존적 거동, 즉 동특성(Dynamic) 분석에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 부하 변화, 외란 발생, 운전 조건의 비정상 상태 진입 등 실운전에서 빈번히 발생하는 동적 교란에 대한 공정의 응답을 이해하고 제어하는 것은, 안정적인 액화 운전과 에너지 효율 확보를 위해 필수적임에도 불구하고 이에 대한 체계적인 분석은 미비하다.

최근에는 이러한 한계를 보완하기 위한 일부 시도가 이루어지고 있다. 예를 들어, 헬륨 역 브레이튼 단일 단계 구성에 대한 간이 동적 모델을 통해 유량 및 온도 제어 시 과도 응답을 분석한 연구가 보고되었으며[8], 정적 설계를 기반으로 동적 시뮬레이션 최적화를 시도한 사례도 존재한다. 또한 중형 수소 액화기를 대상으로 한

EcosimPro 기반 동적 시뮬레이션 연구, 극저온 수소 저장 탱크의 자가가압(Self-pressurization) 과도 해석 모델, 액화-저장-이송을 아우르는 열-물질전달 기반 과도현상 모델링 등도 점차적으로 축적되고 있다[9-11].

그러나 수소 액화 공정 내부의 다단 열교환기 네트워크, 팽창기, 압축기, 오쏘-파라 전환기 간의 상호작용을 반영한 동적 수준의 분석은 여전히 드물다. 특히, 설계 변수(예:  $\Delta T_{min}$ , 출구 압력, 팽창기 단계 구성)와 제어 구조(FIC/PIC, 팽창기 회전수, IGV 등)를 에너지 성능 지표(SEC, FOM, 엑서지 효율)와 연계하여 일반화된 형태로 규칙화한 프레임워크는 아직 구축되지 않았다[1-6,8-10].

본 연구는 이와 같은 프레임워크를 구축하기 위한 첫 단계로, 질소 예냉-헬륨 주냉매 구조를 갖는 대표적인 수소 액화 공정을 대상으로 부분 부하 조건에서의 동적 거동을 해석하고 부하 변화에 따른 에너지 성능 지표의 변화를 정량적으로 평가하였다. 핵심 장비는 동특성 해석이 가능하도록 모델링 하였고, 구축한 동적 모델은 정상 상태 계산 결과와의 정합성 비교를 통해 검증하였다. 검증된 모델을 기반으로 부하 변화 및 주요 입력 조건 변화에 따른 공정의 응답 특성을 분석하고, 이에 따른 에너지 소비 변화와 운전 안정성에 대한 평가를 수행하였다.

## 2. 방법론

### 2-1. Process description

본 연구에서 분석한 공정은 일일 5톤(5TPD)의 수소를 액화하기 위한 헬륨 기체 기반의 폐루프 브레이튼 냉동 사이클을 중심으로 구성되어 있다[12]. 전체 수소액화공정 도면은 Fig. 1과 같다. 예냉 구간(HX1)과 극저온 냉동 구간(HX2~HX4), 그리고 다단 헬륨 압축시스템으로 나뉜다. 본 시스템은 수소의 기화 잠열을 효과적으로 회수하고, SEC를 11.4 kWh/kgLH<sub>2</sub>에 부합하게 설계되었으며, 주요 유체 흐름은 수소(H1~H5), 헬륨(He1~He11), 질소(N1, N2)로 구성된다.

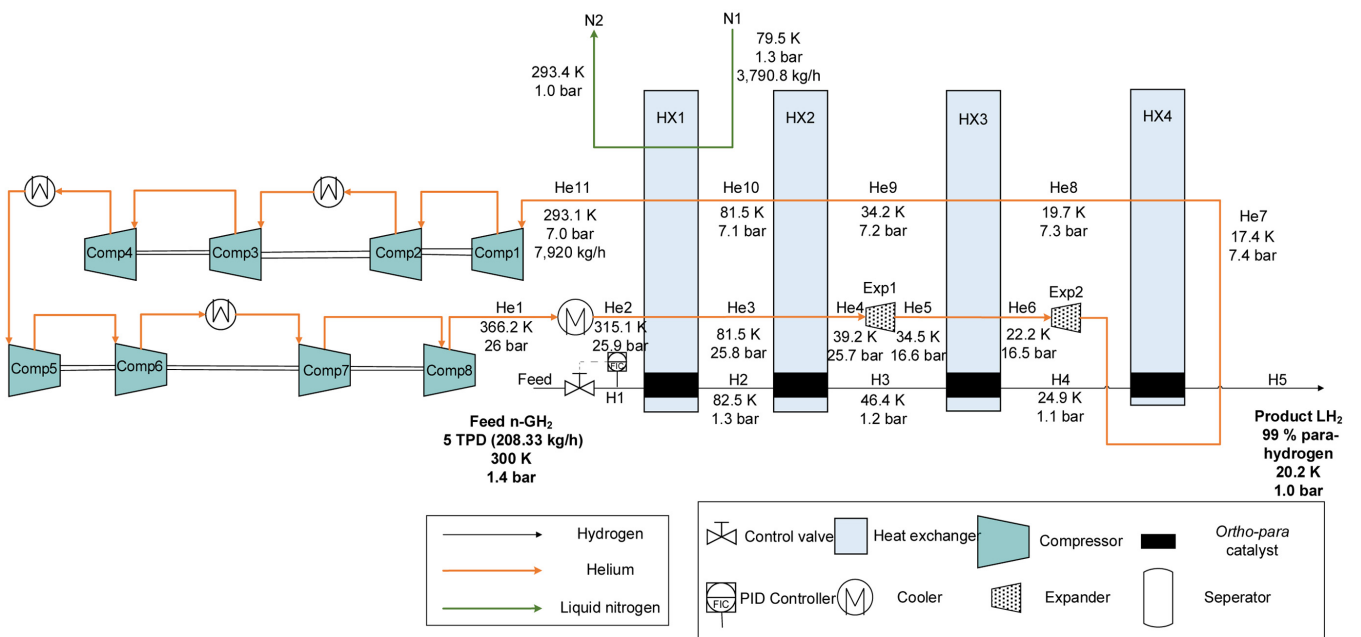


Fig. 1. Process flow diagram of Helium Brayton Cycle for H<sub>2</sub> liquefaction.

상온, 상압의 수소는 피드 스트림을 통해 공정에 유입되며, 이후 HX1~HX4 열교환기를 순차적으로 통과하면서 냉각된다. HX1에서는 액화질소와의 열교환을 통해 예냉이 이뤄지고, 이후 HX2~HX4에서는 헬륨 냉매와의 열교환을 통해, 극저온 상태(20.2K)로 냉각되어 H5 스트림에서 액체수소로 배출된다. 이때, 열교환기 내 산화철기반 촉매를 통해 수소의 오쏘-파라 전환이 동시에 발생한다. 수소의 흐름은 단일방향 흐름으로 구성되어 재순환하지 않는다.

헬륨은 펌프浦 방식으로 순환하며, 냉매 역할을 수행한다. 헬륨 가스는 7 bar의 초기 압력에서 시작하여, 총 8단으로 구성된 원심식 압축기를 통해 26 bar까지 단계적으로 압축된다. 각 압축 단계 사이에는 인터쿨러가 설치되어 있어 압축기 후단 헬륨의 온도를 낮춰 압축기 효율을 개선한다.

압축이 완료된 315.1K, 25.9 bar의 헬륨은 HX1~HX2 열교환기를 순차적으로 통과하면서 저온화되며, 각 열교환기에서 액체질소 및 헬륨과 열교환을 수행한다. 이후 첫 번째 팽창기를 통과하여 온도와 압력을 34.5K, 16.6bar로 낮추고, HX3를 통과하여 온도가 22.2K로 낮아진다. 그 후 두 번째 팽창기를 통과하여 최종 17.4K, 7.4 bar로 온도, 압력이 낮아진 헬륨은 열교환을 통해 복귀하면서 냉열을 회수한 뒤 다시 압축기 전단으로 인입된다.

HX1에서의 예냉 단계는 액체 질소를 기반으로 한 외부 질소 냉동 시스템을 통해 수행된다. 질소 라인도 일방향 흐름으로 작동하며, 외부에서 액화 질소가 공급되어 열교환기 HX1에서 수소와 헬륨의 초기 냉각을 담당한다. 이후 질소는 대기중으로 배출된다.

**2-2. Dynamic simulation and verification**

수소액화 공정의 동적 시뮬레이션을 Aspen HYSYS로 수행하였다. 수소, 헬륨, 질소의 열역학 모델은 Modified Benedict-Webb-Rubin을 기반으로 모사하였다. 수소의 물성 검증 및 오쏘-파라 전환 반응을 반영하는 것은 참고논문[13]의 방법론을 참조하였다. 공정 모델의 흐름도는 Fig. 2와 같고, 주요 장치의 파라미터는 Table 1에 정리하였다.

헬륨 압축기는 8단 다단 압축기로 모델링하였으며, 각 단계의 등엔트로피 효율은 압축기 상세 설계 결과를 바탕으로 약 80% 수준으로 설정하였다[12]. 등엔트로피 효율은  $\eta_{is,c} = (h_{2s} - h_1)/(h_2 - h_1)$ 로 정의되는 내부 효율로서, 베어링, 씰 손실 등을 포함하는 메카니컬 효율과는 구분하여 사용하였다. 동적 시뮬레이션에서는 부분 부하 조건에서도 등엔트로피 효율이 설계점에서 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 한편 1~4단과 5~8단은 각각 동일 샤프트에 연결된 다단 압축기로 구성되어, 각 구간 내 단은 동일한 회전수로 운전되도록 모델링 하였다.

헬륨 팽창기는 등엔트로피 효율은 76%로 설정하였다. 이는 수소액화 공정에서 사용되는 극저온 터빈의 등엔트로피 효율이 통상 70~90% 범위로 보고되는 점을 근거로 한 값이다[14,15]. 본 연구의 SEC(또는 공정 효율) 계산은 HYSYS가 산출하는 회전축 동력(압축기 소비동력과 팽창기 발생동력)을 기준으로 수행하였다.

극저온 열교환기의 동적모델링을 위해 다음과 같은 절차로 모델링을 수행하였다. 우선, 전체 공정의 구성에 따라 각 열교환기 층

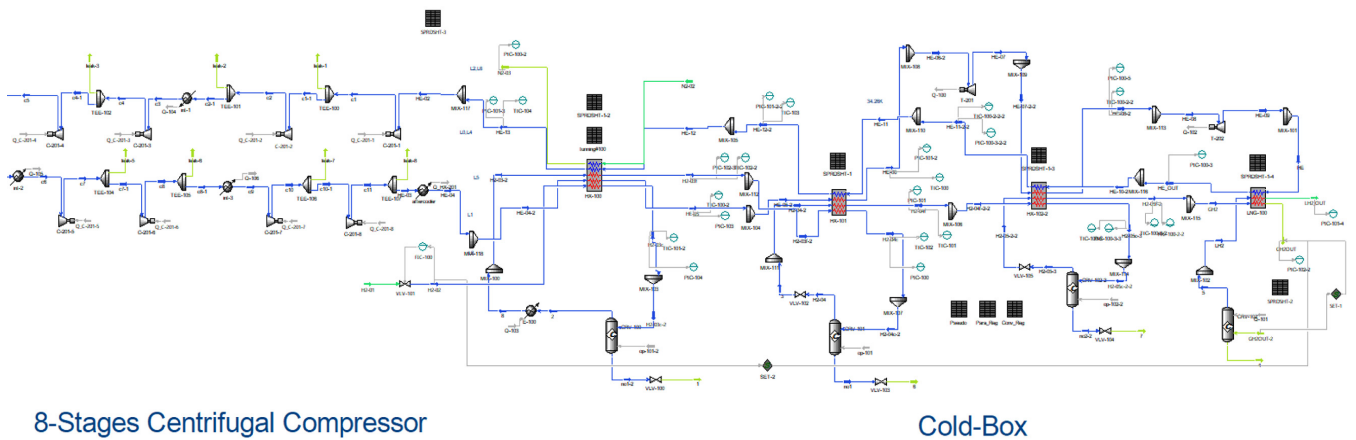


Fig. 2. Dynamic model flowsheet of the H<sub>2</sub> liquefaction process.

Table 1. Modeling specification of H<sub>2</sub> liquefaction process

Equipment	Parameter	Unit	Specification
HX1	Fluid holdup volume of tube of N <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	0.7628
	Fluid holdup volume of tube of H <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	0.0284
	Fluid holdup volume of tube of warmed HE	m <sup>3</sup>	0.8705
	Fluid holdup volume of tube of cold HE	m <sup>3</sup>	0.7628
HX2	Fluid holdup volume of tube of H <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	4.6489
	Fluid holdup volume of tube of warmed HE	m <sup>3</sup>	2.5436
	Fluid holdup volume of tube of cold HE	m <sup>3</sup>	6.2465
HX3	Fluid holdup volume of tube of H <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	0.1901
	Fluid holdup volume of tube of warmed HE	m <sup>3</sup>	0.0963
	Fluid holdup volume of tube of cold HE	m <sup>3</sup>	0.2034
HX4	Fluid holdup volume of tube of H <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	0.0049
	Fluid holdup volume of tube of cold HE	m <sup>3</sup>	0.0045

**Table 2. Results of dynamic model validation of H<sub>2</sub> liquefaction process**

Stream	Parameters	Steady-state	Dynamic	Deviation
He	Mass flow	7,920 kg/h	8,351 kg/h	5.4%
H1	Mass flow	208.3 kg/h	208.3 kg/h	0.0%
H2	Temperature	82.5K	82.6K	0.1%
H5	Temperature	20.2K	20.5K	1.5%
He7	Temperature	17.4K	18.6K	6.9%
He10	Temperature	81.5K	81.2K	-0.4%
He11	Pressure	7.0 bar	7.0 bar	0.0%
He2	Pressure	25.9 bar	25.6 bar	-1.2%
He4	Pressure	25.7 bar	25.5 bar	-0.8%
He5	Pressure	16.6 bar	16.5 bar	-0.6%
He6	Pressure	16.5 bar	16.5 bar	0.0%
He7	Pressure	7.4 bar	7.3 bar	-1.4%

(Layer)의 구조 및 연결 방식을 설계하였고, 각 층에 대해 10개의 구역(Zone)을 설정하였다. 이후, 층의 폭 및 길이를 입력하였으며, 총면적 조건을 만족하도록 각 층의 높이를 조정하였다. 각 구역 및 층에 대해 압력강하 조건을 입력하고 이에 따라 저항계수 k를 산정하였다. 그 후, 계산된 각 구역 및 층의 U 값(열전달계수)과 k 값을 스프레드시트를 통해 모델과 연동하여, 전체 모델의 U 값 및 k 값을 세부적으로 조정하여 정상상태의 열 물질수지에 맞춘다.

동적 모델의 검증은 위해 정상상태 모델의 열 물질 수지와 오차분석을 수행한 결과는 Table 2과 같다.

동적 모델 결과가 정적모델의 공정조건에 적합함을 확인하였으며, 이를 바탕으로 동적 모델을 통한 동특성 분석을 수행하였다.

**2-3. Control structure for dynamic simulation**

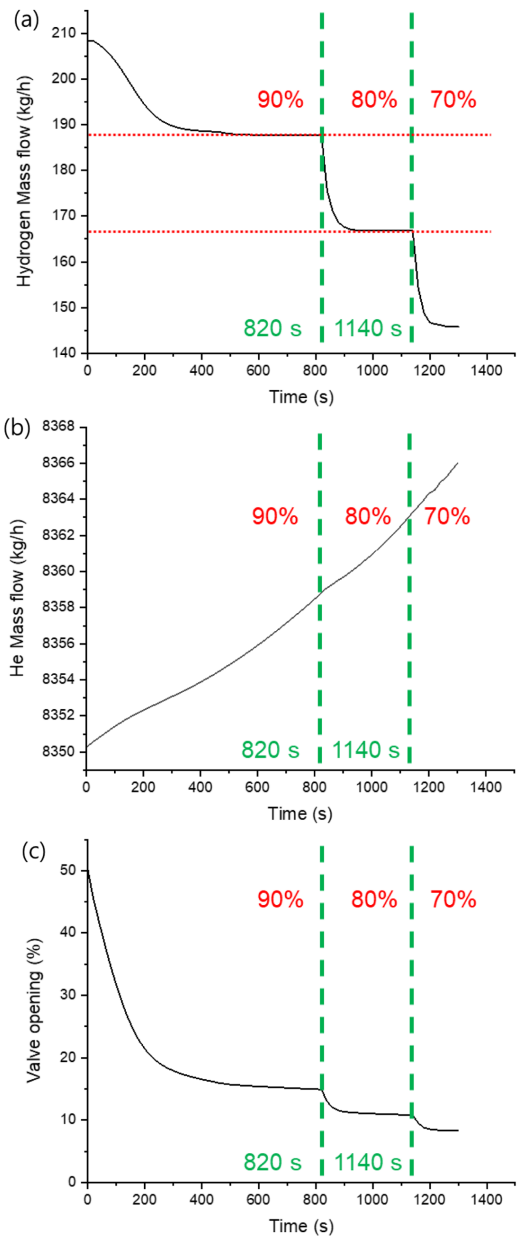
본 연구에서 동적 시뮬레이션은 헬륨 압축기 상세 설계 결과를 반영한 제어구조 하에서 수행되었다. 헬륨의 경우, 8단 헬륨 압축기는 정격 회전수로 고정 운전되며, 1단 흡입압력과 8단 토출 압력은 각각 7 bar와 26 bar로 유지되도록 공정 경계 조건을 설정하였다. 매 2단 이후 설치된 열교환기의 출구 온도는 상세 설계에서 도출된 값을 기준으로, 냉각 용량을 조절하는 이상적인 온도 제어를 가정하였다. 수소의 경우, FIC 제어를 통해, 조작 변수를 수소 유량으로 설정하였으며, 제어기는 Kc=0.2, Ti=0.1 및 역작동으로 설정하였다.

**3. 결과 및 고찰**

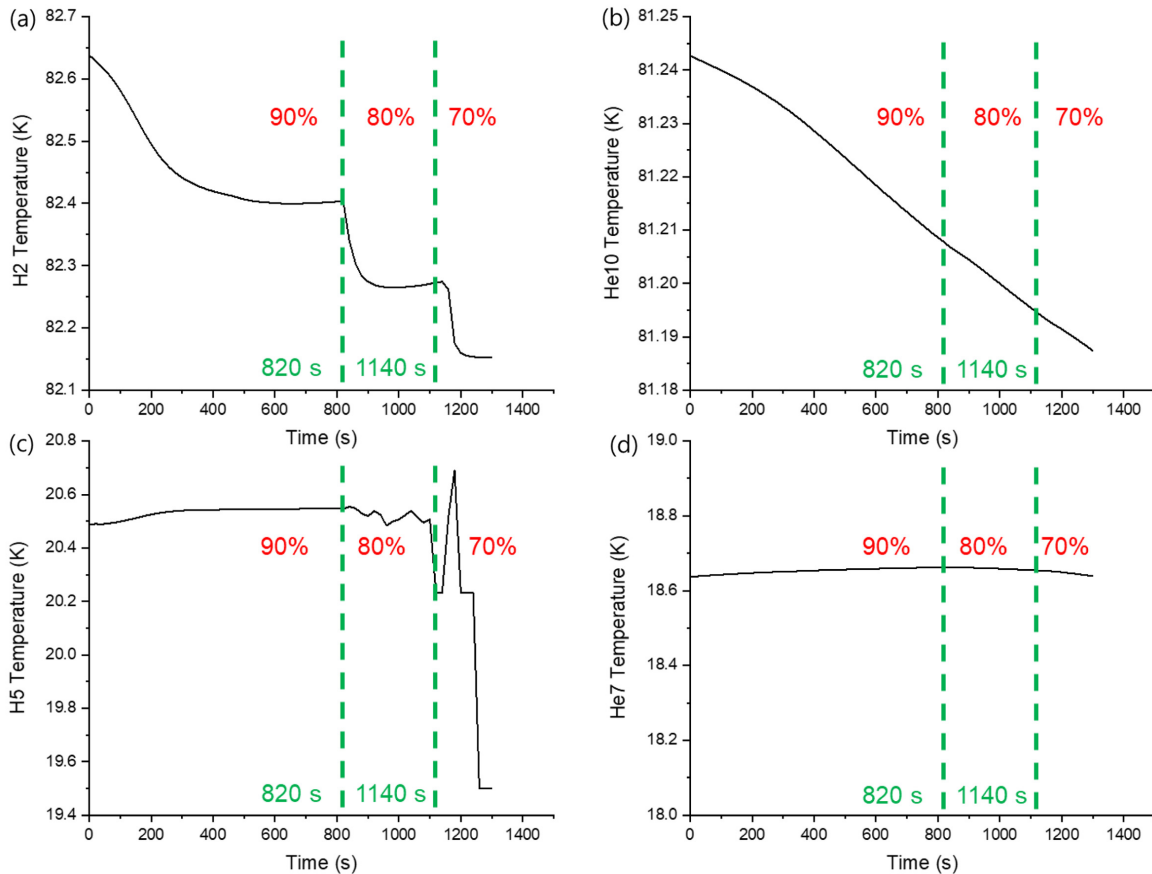
동적 거동을 확인하기 위해, 수소의 유량을 90%, 80%, 70%으로 감소시켜 설정점 추적을 수행한 결과는 다음과 같다.

Fig. 3은 수소 유량제어의 설정값을 100 →90 →80 →70%로 단계적으로 변경했을 때 (a) 수소 유량, (b) 시간에 따른 수소, 헬륨의 유량 변화, (c) 수소 유량 밸브 개도율을 보여준다.

수소의 유량을 100%에서 70%로 감소하였으나, 펄루프 특성상 헬륨의 유량은 감소하지 않았다. 수소를 100%에서 시간에 따라 90%, 80%, 70% 감소시킨 후 정상상태에 도달한 시간은 820초, 1140초, 1300초이다. 즉, 100%에서 90%로 감소시키는 시간이 90%에서 80%로 감소시킨 시간보다 길며, 유량을 감소시킬수록 목표점에 도달하는 시간이 더 단축됨을 보여준다. 그 이유는 밸브 개도율 속도에서 기인한다. 100%에서 90%로 수소 유량을 줄였을 때, 밸브 개도율은 50%에서 14.9%으로 감소하였고, 그때의 시간은 820초이



**Fig. 3. Dynamic response characteristics under varying operating conditions: mass flow response curve of stream (a) H<sub>2</sub>, (b) He<sub>2</sub>, and (c) valve opening of control.**



**Fig. 4. Dynamic response characteristics under hydrogen load reduction: temperature response curve of stream (a) H2, (b) He10, (c) H5, and (d) He7. Each plot shows the system response over time as the load decreases stepwise to 90%, 80%, and 70%.**

다. 반면 90%에서 80%로 수소 유량을 줄였을 때, 밸브 개도율은 14.9%에서 10.8%로 감소하였고, 그때의 시간은 300초가 걸렸다. 마지막으로 80%에서 70%로 수소 유량을 줄였을 때 밸브 개도율이 10.8%에서 8.4%로 감소하였다. 즉, 시간이 지남에 따라 동일한 유량을 줄일 때, 상대적인 밸브 개도율의 변화량이 감소한다.

Fig. 4는 수소 유량이 감소함에 따라, 시간에 따른 HX1, HX4 전후단 수소, 헬륨 온도를 보여준다. 본 수소액화 공정에서, 수소 유량이 1 kg/h 감소할 때 헬륨 유량은 약 38배 수준으로 감소해야 동일한 냉각 성능이 유지된다. 그러나 동특성 분석결과, 수소 유량이 30% 감소한 반면, 헬륨 유량은 감소하지 않았다. 이는 본 동적 시뮬레이션이 수소 유량 변화에 따라 헬륨 압축기 회전수나 냉동계 소비동력이 함께 조정되는 연동 제어 구조를 반영한 것이 아니라, 헬륨 압축기가 정격 회전수로 고정 운전되고 열교환기 출구 온도 또한 상설 설계값 수준의 이상적 제어로 유지되는 조건에서 수행되었기 때문이다. 즉, 수소 측 유량만 FIC 제어를 통해 단계적으로 감소시킨 반면, 헬륨 냉동계의 운전 수준은 사실상 고정되어 있어 유량 감소에 비해 냉열 공급이 충분히 줄어들지 않았다. 그 결과 단위 액화수소 유량당 상대적으로 과도한 냉열이 공급되었고, 액체수소 온도가 일시적으로 감소하는 과냉각 거동이 나타났다. 따라서 Fig. 4의 결과는 유량 변화에 최적으로 연동된 제어 응답이라기보다, 고정된 헬륨 냉동계 운전조건 하에서 수소 유량 감소 시 발생할 수 있는 과도 응답 특성을 보여주는 것으로 해석할 수 있다.

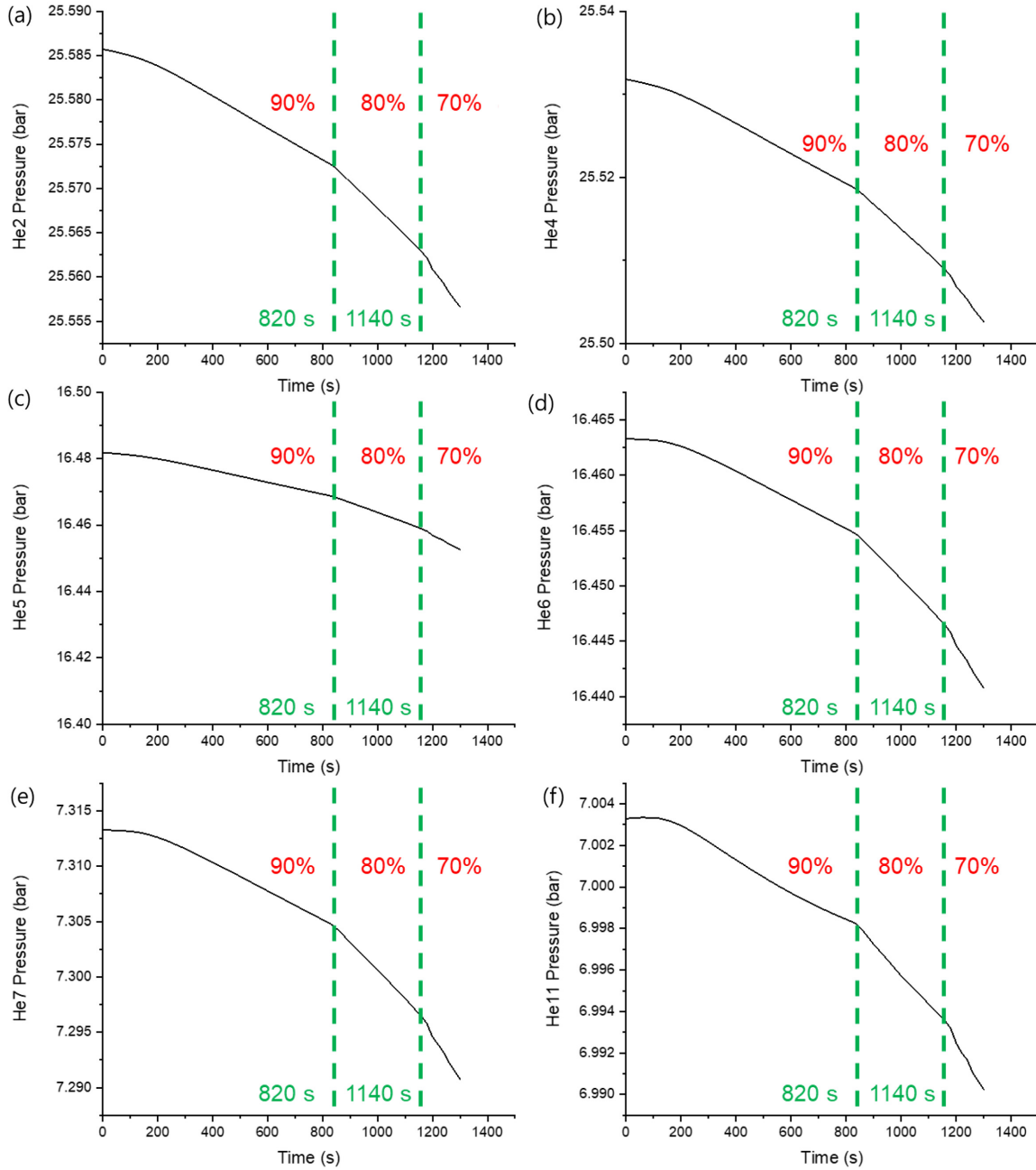
Fig. 5는 시간에 따른 헬륨 라인의 압축기, 팽창기 등 회전기기

의 전 후단의 압력을 보여준다. 시스템 부하가 단계적으로 70%까지 감소함에 따라, 해당 스트림에서 압력이 함께 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 6(a)은 시간에 따른 전체 에너지 사용량을 보여준다. 수소 피드의 유량이 감소함에 따라, 전체 에너지 사용량이 0.34% 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 동특성 분석에 따르면, 압축기는 약 80% 수준의 높은 등엔트로피 효율을 유지하는 반면, 팽창기는 70% 초반에 머무르는 낮은 효율을 나타냈다. 이에 따라, 수소 부하가 감소함에 따라 헬륨 유량이 줄었음에도 불구하고, 압축기에 의해 소비되는 에너지의 감소보다 팽창기를 통해 회수되는 에너지의 감소 폭이 적음으로서 전체 에너지 소비량이 증가하는 결과를 초래한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 에너지 회수 효율이 낮은 팽창기의 영향이 전체 시스템 에너지 성능에 크게 작용함을 보여준다.

Fig. 6(b)는 수소 유량이 단계적으로 70%까지 감소함에 따라 해당공정의 SEC를 나타낸 그래프이다. 본 연구에서 제한한 수소 액화공정의 정격 부하 조건에서의 기준 SEC는 11.4 kWh/kgLH<sub>2</sub>로 산정되었다. 하지만, 정상상태 모델과 동적 모델간 헬륨 유량 오차가 5.4%로 확인되었으며, 이는 동적 모델에서의 헬륨 유량이 증가함을 의미한다. 이에 따라, 전체 에너지 사용량이 설계 값에 비해 증가하였고, 초기 SEC가 11.9 kWh/kgLH<sub>2</sub>로 계산되었다.

수소 유량이 단계적으로 70%까지 감소함에 따라 SEC가 11.9에서 17.2 kWh/kgLH<sub>2</sub>까지 증가하였다. 이는 전체 에너지 소모량이 0.34% 증가에 그친 반면, 액체수소 유량이 70%로 감소하였기 때문



**Fig. 5. Dynamic response characteristics under hydrogen load reduction: Pressure response curve of stream (a) He2, (b) He4, (c) He5, (d) He6, (e) He7 and (f) He11. Each plot shows the system response over time as the load decreases stepwise to 90%, 80%, and 70%.**

이다. 결과적으로 SEC가 44.1%로 크게 증가하였다. 이는 SEC가 전체 에너지 소비량을 액화 수소 유량으로 나눈 지표이기 때문에, 유량 감소가 지표 변화에 지배적으로 영향을 미쳤음을 나타낸다. 반면, 헬륨 유량은 비교적 큰 변화 없이 유지되었는데, 이는 헬륨 라인이 페루프 방식으로 구성되어 있기 때문이다.

선행 연구[1-3,6,8]에 따르면, 헬륨 또는 혼합냉매를 사용하는 대형 수소 액화공정의 개념 설계에서는 공정 구조 최적화와 이상적인 장치 효율 가정을 통해 SEC를 약 5-7 kWh/kgLH<sub>2</sub> 수준까지 줄일 수 있는 것으로 보고된다. 반면, 프렉스에어(Praxair) 및 린데(Linde)에서 운전 중인 수정 클로드 기반 상용 수소 액화플랜트의 SEC는 대략 10-15 kWh/kgLH<sub>2</sub> 범위에 분포하며, 최근 리뷰에서는 대형 플

랜트의 평균 SEC를 약 13.8 kWh/kgLH<sub>2</sub> 수준으로 정리하고 있다 [2,4]. 이러한 문헌 결과와 비교하면, 본 연구에서 도출된 SEC 11.4 kWh/kgLH<sub>2</sub>는 개념 설계에서 보고되는 이상적인 최소값보다는 크지만, 실제 상용 플랜트에서 관찰되는 에너지 소비 범위와 유사한 수준으로 해석된다. 이는 본 공정 모델이 8단 헬륨 압축기의 실제 압력 수준, 보수적인 열교환기 온도 접근 및 배관 압력손실, 오쏘-파라 전환기 및 부대설비를 포함한 현실적인 설계 조건을 반영하고 있기 때문이다. 이러한 비교 결과는 본 논문의 목적이 절대적인 효율 극대화보다는, 이와 같은 현실적인 설계 조건 하에서 부분 부하 운전 시 SEC가 어떻게 변화하는지와 그 물리적 원인을 동적 관점에서 분석하는 데 있음을 뒷받침한다.

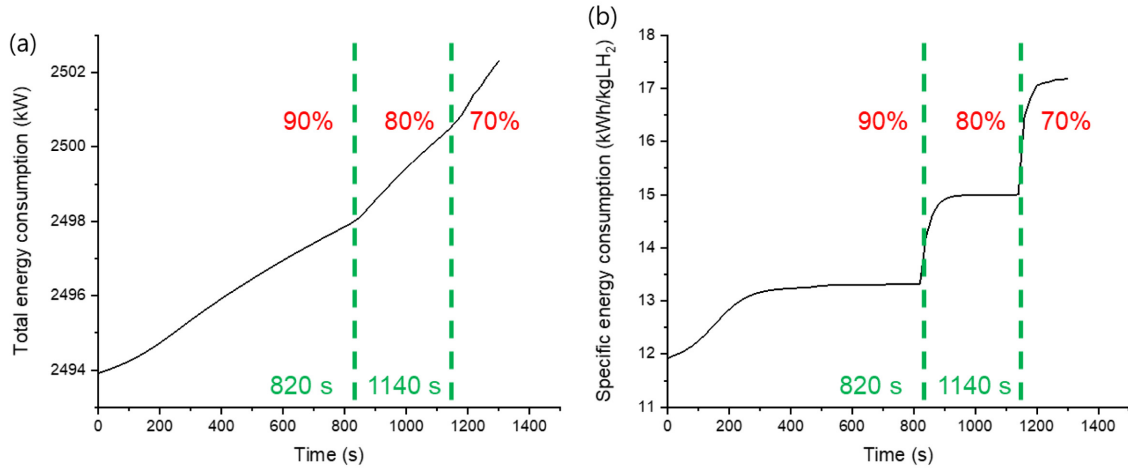


Fig. 6. Dynamic response of (a) total power consumption and (b) specific energy consumption with load reduction.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 헬륨 브레이튼 사이클 기반 수소 액화 공정에 대해 동적 시뮬레이션을 수행하고, 부분 부하 조건에서의 시스템 응답 및 에너지 효율 특성을 분석하였다. 수소 공급 유량을 90%, 80%, 70%로 단계적으로 감소시키는 시나리오를 통해, 열교환기 및 회전기의 전, 후단 온도, 압력, 및 에너지 소비 변화를 정량적으로 비교하였다.

헬륨 순환 루프의 압축기와 팽창기의 효율 차이로 인해, 부하 감소 시 오히려 전체 에너지 소비가 0.34% 증가하였고, SEC는 44.1% 증가하는 비효율적 운전 조건이 나타났다. 이는 팽창기에서 회수되는 에너지 손실이 압축기에서 소비되는 에너지보다 더 크게 감소했기 때문이며, 시스템의 전반적인 에너지 효율에 부정적인 영향을 미친다.

따라서 본 연구는 부분 부하 운전 시 헬륨 유량 및 주요 기기의 운전 조건을 정밀하게 제어할 필요성을 제시한다. 아울러, 회전기의 효율이 시스템 전체의 에너지 성능에 큰 영향을 미치는 만큼, 압축기 및 팽창기와 같은 핵심 기기의 성능 향상을 위한 기술 개발이 병행되어야 할 것이다.

#### 감 사

본 연구는 2022년도 기획재정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2022-00155807, 상용급 액체수소 플랜트용 압축기 핵심기술 개발 및 실증)이며, 지원에 감사를 드립니다.

#### References

- Al Ghafri, S. Z., Munro, S., Cardella, U., Funke, T., Notardonato, W., Trusler, J. P. M., Leachman, J., Span, R., Kamiya, S., Pearce, G., Swanger, A., Dorador Rodriguez, E., Bajada, P., Jiao, F., Peng, K., Siahvashi, A., Johns, M. L. and May, E. F., "Hydrogen Liquefaction: A Review of the Fundamental Physics, Engineering Practice and Future Opportunities," *Energy & Environmental Science*, **15**(7), 2690-2731(2022).
- Zhang, T., Uratani, J., Huang, Y., Xu, L., Griffiths, S. and Ding, Y., "Hydrogen Liquefaction and Storage: Recent Progress and Perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **176**, 113204(2023).
- Yin, L. and Ju, Y., "Review on the Design and Optimization of Hydrogen Liquefaction Processes," *Frontiers in Energy*, **14**(3), 530-544(2020).
- Chang, H.-M., Ryu, K. N. and Baik, J. H., "Thermodynamic Design of Hydrogen Liquefaction Systems with Helium or Neon Brayton Refrigerator," *Cryogenics*, **91**, 68-76(2018).
- Chang, H.-M., Kim, B. H. and Choi, B., "Hydrogen Liquefaction Process with Brayton Refrigeration Cycle to Utilize the Cold Energy of LNG," *Cryogenics*, **108**, 103093(2020).
- Yang, J.; Li, Y. and Tan, H., "Study on Performance Comparison of Two Hydrogen Liquefaction Processes Based on the Claude Cycle and the Brayton Refrigeration Cycle," *Processes*, **11**(3), 932(2023).
- Quack, H., "Conceptual Design of a High Efficiency Large Capacity Hydrogen Liquefier," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, **613**(1), 255-263(2002).
- Fu, J., Tang, J., Zhu, J., Wang, G., Li, Y. and Han, H., "Dynamic Simulation Optimization of the Hydrogen Liquefaction Process," *Natural Gas Industry B*, **12**(1), 16-25(2025).
- Li, K., Wen, J., Xin, B., Zhou, A. and Wang, S., "Transient-state Modeling and Thermodynamic Analysis of Self-pressurization Liquid Hydrogen Tank Considering Effect of Vacuum Multi-layer Insulation Coupled with Vapor-cooled Shield," *Energy*, **286**, 129450(2024).
- Bi, Y. and Ju, Y., "Dynamic Simulation and Analysis of a Hydrogen Liquefaction Process with Single-stage Helium Reverse Brayton Cycle," *International Journal of Hydrogen Energy*, **93**, 403-415(2024).
- Wilailak, S., Yoon, H.-J., Lee, H.-H., Cherif, A. and Lee, C.-J., "Dynamic Analysis Using NARX-based Surrogate Model for Natural Gas and Hydrogen Liquefaction Process," *Applied Thermal Engineering*, 129430(2025).
- Byeon, B., Yoon, H.-J., Lee, J., Choi, J. U., Kim, D., Kim, M. S., Kim, G. D., Kim, J. H., Lee, S., Lee, S. W., Baik, K., Lee, C.-J., and Lee, K. T., "Design and Simulation of a Helium Compressor Testbed for 5 TPD Hydrogen Liquefaction," *J. Hydrogen New Energy*, **35**(5), 515-522(2024).

13. Yoon, H.-J., Choi, J., Cherif, A. and Lee, C.-J., "Integrated Hydrogen Liquefaction with Autothermal Reforming Utilizing Liquefied Oxygen as a Pre-coolant," *Journal of Cleaner Production*, **486**, 144563(2025).
14. Liu, H., Zuo, J., Qiu, S., Liang, Y., Ke, C., Liu, L., Peng, N., Xiong, L., Li, K. and Zhang, X., "Simulative and Experimental Analysis of High-speed Helium Turbo-expanders in a 5t/day Hydrogen Liquefier," *International Journal of Hydrogen Energy*, **133**, 152-164(2025).
15. Zhou, K., Chen, L., Li, S., Zhao, K., Zhang, Z., Chen, S., and Hou, Y., "Comparative Analysis of Energy Losses in Hydrogen and Helium Turbo-expanders for Hydrogen Liquefiers," *Applied Thermal Engineering*, **227**, 120322(2023).

#### Authors

**Ha-Jun Yoon:** Ph.D., Department of Chemical Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974; yhj0117@cau.ac.kr

**Si-Woo Park:** M.S. candidate, Department of Intelligent Energy Industry, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea; mn2931@naver.com

**Hyun-Hee Lee:** Ph.D., candidate, Department of Intelligent Energy Industry, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea; kebi@naver.com

**Chul-Jin Lee:** Professor, Department of Chemical Engineering, Korea; Department of Intelligent Energy Industry, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea; cjlee@cau.ac.kr