

극저온용 냉동기 개발

Development of the Small Cryocooler

김 영 인*, 강 보 선**, 김 용 찬**
Y. I. Kim, B.S. Kang, Y. C. Kim

개 요

과학산업의 육성책으로서 정부에서는 1988년도부터 특정출연연구 개발과제로 극한기술 개발을 시작하였다. 본 연구개발 과제는 극한기술의 5개 분과중 하나인 극저온 기술 분야에서 연구개발목표인 SQUID(Superconductive Quantum Interference Device)의 냉각장치로 사용되는 극저온용 냉동기 개발이다.

1988년부터 3년간, 연구개발비 약 3억원을 투자하여 작동온도 4.2 K에서 약 100mW의 냉각능력을 갖는 냉동기에 대한 시제품을 개발함이 목적이다.

본 기술논문에는 지난 6개월간의 연구수행 내용을 개략적으로 기술하여 연구진행상황을 파악할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

1950년대 및 1960년대의 우주개발 경쟁에 의해 rocket 추진체, 측정장치의 냉각 등을 위해 극저온 기술이 필요하게 되었으며, 특히 정밀 측정을 위해 극저온에서 작동하는 기기의 사용이 요구되어, 고효율이며 신뢰성있는 극저온 발생기술이 필요하게 되어, 미국을 비롯한 선진각국에서의 연구개발 투자가 활발히 진행되고 있다. 많은 극저온 냉동기가 상용화되고 있으나 미국, 일본 및 스웨덴 등 극소수의 나라가 고가로 제품을 팔고 있으며 극저온

생성기술이 국방산업 및 우주산업과도 관련이 있어 극저온 기술이전을 기피하고 있는 실정이다.

국내에서도 한국표준연구소에서 SQUID 개발을 위한 연구를 수행하고 있으나 한국표준연구소에서는 SQUID의 감지부분만을 연구할 뿐 냉각시스템에 대한 연구를 수행치 않고 있으므로 본 연구팀은 한국동력자원연구소와 공동으로 극저온용 냉동기 개발을 수행하고 있다

본 연구의 개발내용과 연구개발비는 Table 1과 같다.

* 정회원, 한국과학기술원, 기계공학연구부

** 한국과학기술원, 기계공학연구부

Table 1. 연구개발내용, 범위 및 연구개발비

구 분 년차별	연구 개발 내용	연구 개발 범위	연구개발비 (천원)
1988년 (1 차년도)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소형 극저온 냉동기 기술분석 · 열역학적 사이클 분석 · 극저온용 열교환기 설계 · 고성능 단열 기술 · 저온 구조 재료 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자료수집 · Stirling cycle type · Gifford-McMahon type · Joule-Thomson type 	55,000
1989년 (2 차년도)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소형 극저온 냉동기 설계 ○ 성능실험장치 설치 	○ 모델 정립	120,000 (신청액)
1990년 (3 차년도)	<ul style="list-style-type: none"> ○ SQUID 냉각장치용 소형 극저온 냉동기 제작 및 실험 ○ 극저온 응용기술 보급 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시제품 제작 ○ 냉각능력과 도달 가능 온도측정 및 분석 	155,000 (신청액)
총 연구 개발 비			330,000

2. 연구수행 내용

극저온용 냉동기 개발을 위해서 구체적으로 연구기간중에 수행한 내용은 설계 및 제작기술의 분석이었다. 관련자료(책, 논문, 특허, 제품 catalog 등)를 통해서 냉동시스템의 열역학적 사이클 해석과 주요구성부품(압축기, 팽창기, J-T valve, 열교환기, 재생기 등)에 대한 원리 및 설계, 전체시스템 구성에 관한 연구를 수행하였다.

2.1 열역학적 사이클 해석

이론적인 열역학적 사이클로서는 다음의 2가지가 검토되었다.

- Thermodynamically ideal isothermal - source system (그림 1)
- Thermodynamically ideal isobaric - source system (그림 2)

그림 1은 잘 알려진 Carnot cycle로서 주위에서 열을 흡수하는 과정이 등온과정(3→4)에서 이루어지기 때문에 Thermodynamically ideal isothermal-source system이라 불리워

지며, 그림 2는 주위에서 열을 빼앗는 과정이 등압과정(1→2)에서 이루어지기 때문에 Thermodynamically ideal isobaric-source system이라 불리워진다. 상기 2가지의 이론적 열역학적 사이클이 극저온용 냉동기의 성능을 나타내는 기본 사이클로서 이용되고 있다.

실제 응용사이클에서는 Carnot cycle의 성능에 근접하는 사이클을 얻기 위해 Carnot cycle의 단열팽창과정 대신에 재생열전달과정을 이용하는 사이클들이 주로 사용되고 있다.

그림 3은 일반적인 Reitlinger isothermal cycle로서 Polytropic 재생과정을 거치는 사이클이다. 이 Reitlinger isothermal cycle의 특별한 경우가 재생과정이 정적과정(constant volume)에서 이루어지는 Stirling cycle(그림 4)과 재생과정이 정압과정(constant pressure)에서 이루어지는 Ericsson cycle이다(그림 5). Stirling cycle이나 Ericsson cycle은 Carnot cycle(그림 6)과 같은 성능을 보여준다. 그 밖에도 Carnot cycle의 성능에 접근하기 위한 실제 재생사이클로서 Rallis isothermal regenerative cycle(그림 7)과 Rallis adiabatic regenerative cycle(그림 8)이 사용

된다.

상기의 사이클을 이해하기 쉽게 나열하면 아래와 같다.

Reitlinger Cycle T-(polytropic)-T-(polytropic)

Carnot Cycle T-(S)-T-(S)

Stirling Cycle T-(V)-T-(V)

Ericsson Cycle T-(P)-T-(P)

Rallis isothermal regenerative Cycle T-(P-V)-T-(P-V)

Rallis adiabatic regenerative Cycle S-(P-V)-S-(P-V)

* ()안은 재생과정을 나타낸다.

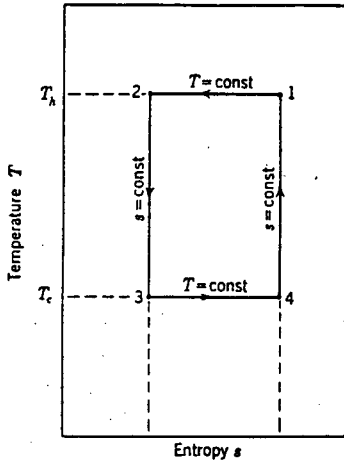


Fig. 1. Thermodynamically ideal isothermal-source system

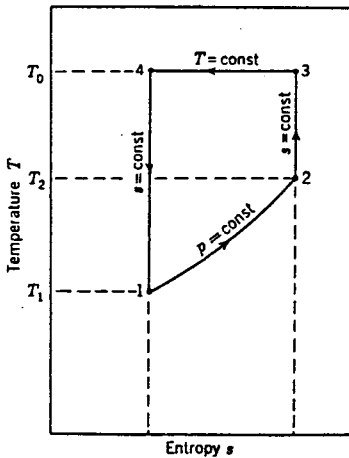


Fig. 2. Thermodynamically ideal isobaric-source system

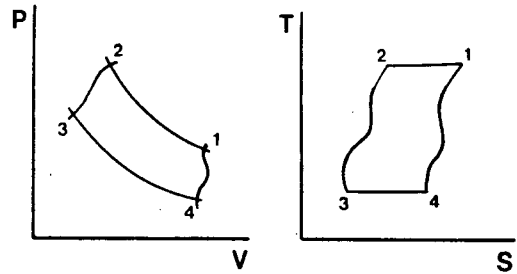


Fig. 3. The generalized Reitlinger isothermal cycle

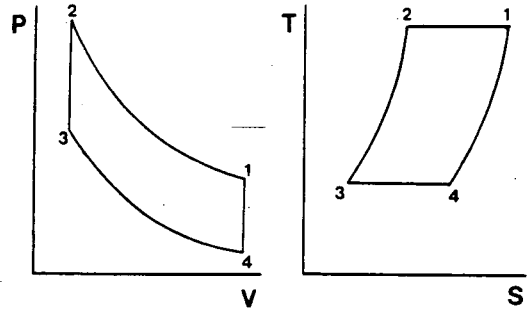


Fig. 4. Stirling Cycle

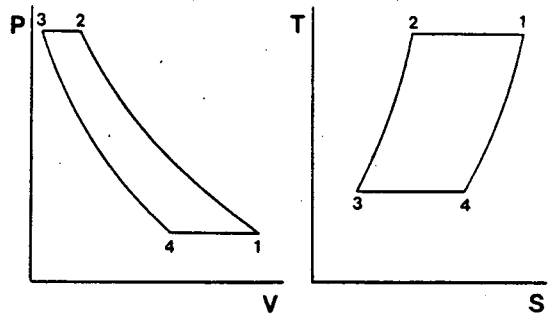


Fig. 5. Ericsson Cycle

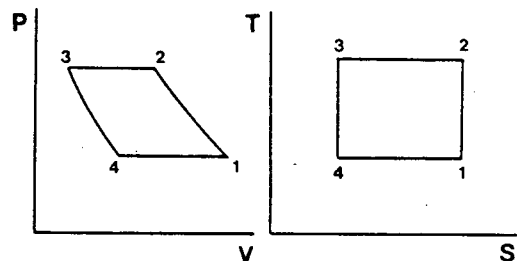


Fig. 6. Carnot Cycle

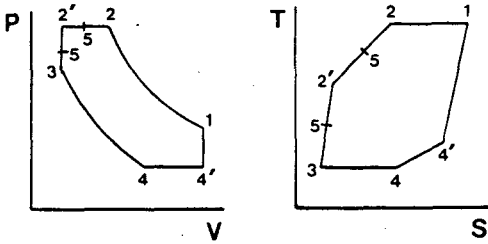


Fig. 7. Rallis isothermal regenerative cycle

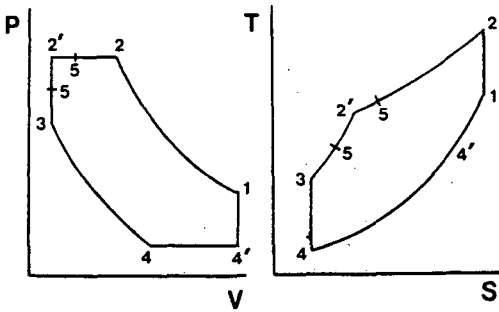


Fig. 8. Rallis adiabatic regenerative cycle

2.2 주요구성부품

주요부품은 압축기, 팽창기, 팽창밸브, 열교환기 및 재생기 등이다.

(1) 압축기(Compressor)

· 기능 : 작동매체로서 Helium gas를 사용하며 압축비는 약 15 ~ 20 정도이며 상온에서 작동한다.

· 종류

· Reciprocating compressor

Massive, bulky, slow running machine
Unrestricted range of pressure ratio
Small mass flow

· Rotary compressor

Axial flow, centrifugal flow, screw type
Small, light weight, fast running machine
Limited range of pressure ratio
High mass flow rate

(2) 팽창기(Expansion machine)

· 기능 : 등엔트로피 과정을 통해 온도를 강하시켜 냉동효과를 얻으며 기체의 팽창과정에서 얻는 유효한 일을 회수하기 위하여 사용되며 비교적 저온에서 사용된다.

· 종류

· Turbo expander

Major component : turbine rotor, rotating shaft, brake impeller

· Piston expander

Control of engine :
variable inlet cut-off
variable speed transmission
oil pump
inlet throttling

(3) 팽창밸브(Joule-Thomson valve)

· 기능 : 고압의 기체가 restrictor를 통과하면서 등엔탈피 팽창에 의해 온도강하를 얻는다. 저온에서 작동해야 하므로 극저온 냉동기에서 고장이 가장 빈번히 일어나는 부품이다.

· 문제점 : flow rate의 조절

orifice의 blockage problem(불순기체의 고체화 화에 인한)

· 종류

i) fixed orifice

ii) demand flow cryostat : flow rate 조절 가능

temperature responsive bellows이용
서로 다른 열팽창계수를 갖는 재질을 이용

(4) 열교환기(Heat Exchanger)

· 종류 :

Coaxial tube
Double pipe
Shell and tube
Hampson coiled tubular exchanger
Collins heat exchanger
Finned tube exchanger
Plate fin exchanger
Perforated plate exchanger

(5) 재생기(Regenerator)

· 기능 : 일반적인 열교환기(recuperative type)는 열유동매체가 두개의 다른 통로를 통해 흐르기 때문에 벽을 통해 서로 열을 교환하지만, 재생열교환기(regenerator)는 하나의 같은 통로를 사용하여 고온과 저온의 유체가 주기적으로 교대로 흐르게 되어있다. 고온의

유체가 흐를 때에 재생기재료 (matrix material)에 열을 흡수 저장하였다가 저온의 유체가 흐를 때에는 저장된 열을 방출하여 열교환 효율을 높이는 열교환 기능을 갖고 있다.

- 특징 : 열전달 면적이 큼
- 경제적
- Self-cleaning 효과가 있음.

고온유체와 저온유체의 혼합

- 구조와 형상 : Packed bed type
- Annulus type (Gap type)

2.3 실제 시스템

실제 냉동시스템으로서의 다음과 같은 시스템들이 사용되고 있다 (Fig. 9).

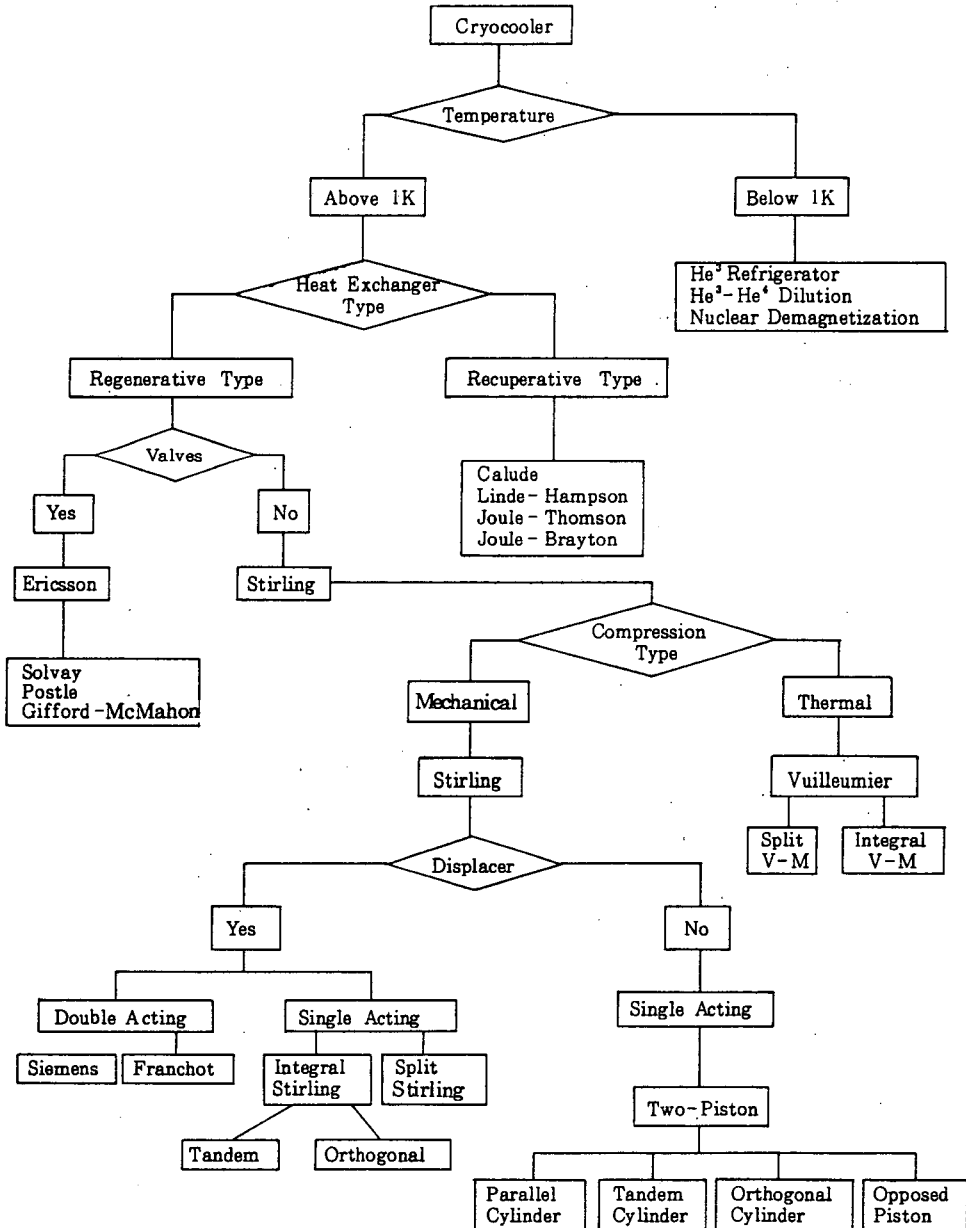


Fig. 9. Classification of Cryocoolers

- Recuperative System
 - Joule-Thomson System (Linde-Hampson System)
 - Precooled Linde-Hampson System
 - Cascade Joule-Thomson System
 - Expansion engine cold gas System
 - Claude system
- Regenerative System
 - Stirling refrigerator
 - Vuilleumier refrigerator
 - Solvay refrigerator
 - Gifford-McMahon refrigerator

재생기를 사용한 시스템은 작동매체의 조절 방법에 따라서 Valve를 사용하여 체적을 조절하는 시스템은 Ericsson type이며, Valve를 사용하지 않은것은 Stirling type으로 불리워진다. 또 Stirling type은 가스의 압축을 기계적 압축기(compressor)를 사용하는 방식인 Stirling type과 가스의 압축을 열에 의해서 압축하는 Vuilleumier 방식으로 나뉘어진다.

3. 극저온용 냉동기 기본설계

일반적인 극저온용 냉동기는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 열교환기의 형식에 의해 크게 두가지로 대별된다. 즉 일반적인 열교환기(Recuperative type)를 사용한 것과 재생기(Regenerative type)를 사용한 것으로 구분된다. 6개월간의 연구결과에 의해 두가지를 결합하여 냉각 시스템을 구성하는 것이 효율적인 것으로 판단하여 재생기를 사용한 2-stage의 Gifford-McMahon 냉동기와 Recuperative type의 Joule-Thomson 냉동기를 결합하여 냉각능력이 4.2 K에서 100 mW가 되도록 시스템을 구성하였다.

Fig. 10은 극저온냉동기의 원리도를, Fig. 11은 구성도를, Fig. 12는 극저온 냉동기의 온도-엔트로피 선도를 보여주고 있다.

Fig. 12의 사이클상의 1~16은 Joule-Thomson 냉동기의 사이클을 표시하며 a-h는 Gifford-McMahon 냉동기의 사이클을 표시한다.

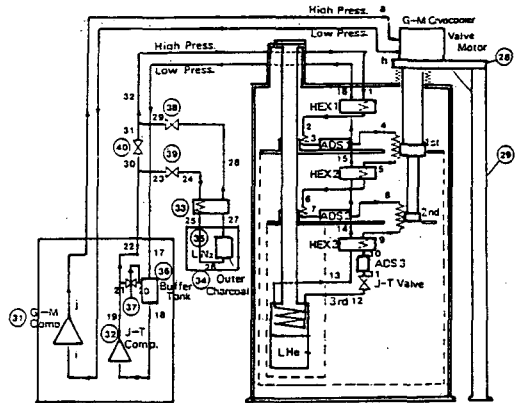


Fig. 10. Flow diagram of system

4. 국내 극저온 냉동기 사용현황

1987년의 고온초전도체의 개발 연구의 증대에 의해 국내의 극저온 냉동기의 수요가 급격히 상승하여 많은 소형 극저온 냉동기가 수입되어 사용되고 있다.

본 연구팀의 조사에 의하면 1988년도 말에 60여대의 냉동기가 사용되어 있음을 파악하여 상세조사를 위해서 설문서를 59곳에 보내었으나 단지 19개 연구팀만이 설문서에 응답을 해서 다음 표들과 같은 자료를 얻을 수 있었다.

4.1 제작자별 분류

제 작 자	대수
Air Products & Chemicals Inc.	14
Cryosystems Inc.	1
Janis Research Co.	3
CTI-Cryogenics	1
총 계	19

4.2 응용분야에 따른 분류

항 목	대수
초전도재료의 저항측정실험	7
반도체의 광학적(Photoluminescence), 전기적(Conductivity) 성질의 온도 의존성 측정	7
Mossbauer Spectroscopy	4
Hall Effect	4
유전체의 Curie Temperature 측정	1
시료의 저온유지	1

4.3 작동온도 및 용량에 따른 분류

용량 온도	0.25 W	0.5 W	1 W	1.5 W	2 W	2-5 W	5-10 W
5 K 이하							
5 K							
10 K	2 대						
15 K							
20 K			6 대				
20-50 K					2 대		1 대
50 K 이상							1 대

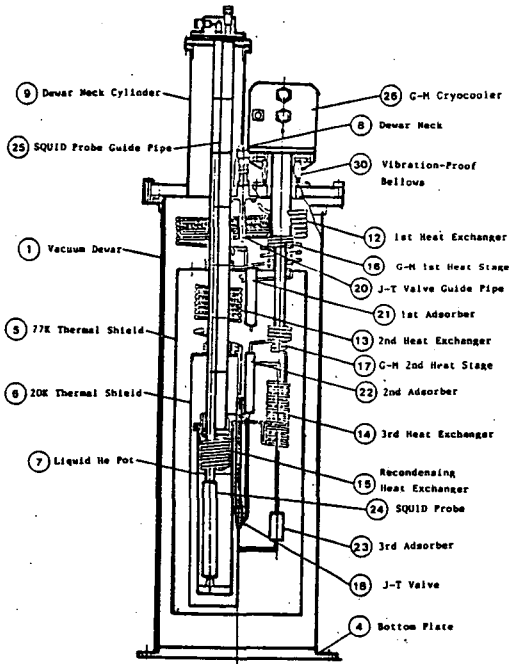


Fig. 11. Construction of cryocooler

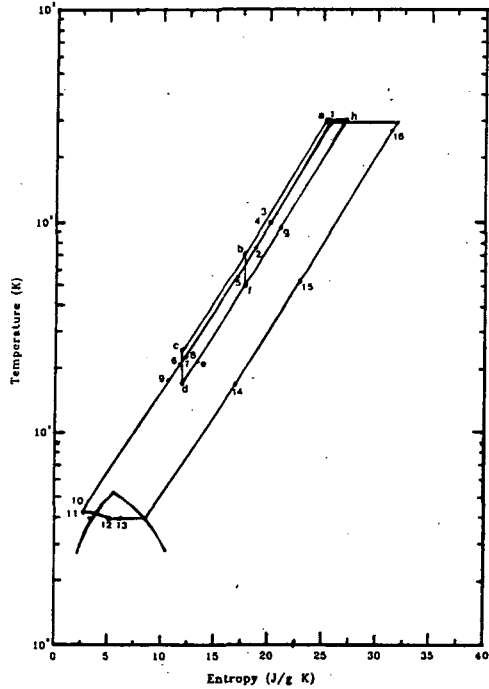


Fig. 12. Temperature-Entropy diagram of cryocooler

4.4 고장발생형태에 따른 분류

항 목	대수
액체 헬륨 누출	3
오일 누출에 의한 냉각순환계통 오염	1
냉각수 온도감지 센서고장	1
He Compressor의 이상(He 압력변화 및 capacity 이상)	2

5. 차기 연구내용

극저온 냉동기 개발의 1 차년도중 후반기에 수행될 주요 연구내용은 아래와 같다.

- (1) 극저온 냉동기 구성부품에 대한 상세설계
- (2) 전체시스템의 제어방법
- (3) 냉동기의 성능측정방법

4.5 구입년도에 따른 분류

년 도	80	82	83	84	85	86	87	88	89(예정)	계
대 수	2	2	3	1	1	1	2	5	2	19

(4) 주요 구성부품에 대한 국외 연구개발 동향

간섭소자, 초고진공 펌프 시스템, 우주환경 실험장치 등에 꼭 필요한 기술이다.

6. 결 론

극저온 기술은 핵융합로, 자기유체 발전, 전력저장, 자기부상 열차, 초고속 컴퓨터 조셉슨 소자, 핵자기 공명촬영기기, 초전도 양자

또한 극저온 기술은 선진 각국들이 기술이전을 기피하고 있는 기술이므로 국내 연구팀에 의한 연구가 꼭 필요하다. 따라서 장기적인 연구개발 계획에 의한 정부의 적극적인 연구개발 및 투자의욕이 필요하다.