

## 40K급축랭기의 설계최량화를 위한 수값모의연구

한정애, 김광선, 김영환

스터링랭동기, GM랭동기, 팔스판랭동기와 같이 기체랭동순환을 리용하는 극저온랭동기들에서 축랭기는 가장 중요한 구성요소로서 랭동기의 랭동성능에 결정적인 영향을 미친다. 이로부터 축랭기를 최량설계하는것은 성능결수가 높은 극저온랭동기를 개발하기 위하여 선차적으로 제기되는 매우 중요한 문제이다.

선행연구[1-3]에서는 REGEN, Sage, Fluent 등 여러가지 응용프로그램들을 리용하여 팔스판랭동기에 대한 수값모의연구는 진행하였지만 압축기출력이 정해진 조건에서 축랭기를 최량설계하는 구체적인 방법론에 대해서는 거의나 소개된것이 없다.

본문에서는 REGEN 3.3을 리용하여 입구전력이 1kW정도로 작은 압축기에 의해 구동하는 GM형팔스판랭동기의 40K급축랭기를 최량설계하고 그 성능을 평가하기 위한 수값모의연구를 진행하였다.

### 1. 축랭기의 수값계산을 위한 이론적모형

축랭기에서는 작업기체인 헬륨의 주기적인 진동흐름이 존재하며 축랭재와 작업기체사이에 열교환이 부단히 진행된다. 축랭기에서 진행되는 물리적과정을 표시하는 기본방정식은 질량보존방정식과 운동량보존방정식, 에네르기보존방정식으로 구성된다. 즉

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial((e + p)v)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

축랭기모의 및 설계프로그램인 REGEN 3.3으로는 계차법과 몇가지 경험적관계식들을 결합하여 방정식 (1)–(3)을 수값적으로 푼다. 축랭기에서 헬륨기체의 압력과 질량흐름속도의 시간에 따르는 변화는 시누스적이라고 보며 방정식계에서의 비선형성을 피하고 계산을 간단히 하기 위해 반경험적방법을 리용하여 방정식계를 최종적으로 다음과 같은 형태로 변형한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{4G_r H(p, T, v)}{D_h} (T_m - T) - G_r k_g \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{4G_r H(p, T, v)}{D_h} (T_m - T) - G_r k_g \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} + G_r T \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{4H(p, T, v)}{\rho c_v D_h} (T_m - T) - \frac{k_g}{\rho c_v} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} + \frac{4\phi H(p, T, v)}{(1-\phi)c_m D_h} (T_m - T) - \frac{1}{c_m} \frac{\partial (k_m \partial T_m / \partial x)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

이상의 기본방정식계를 풀기 위해 요구되는 기본적인 입력파라미터들은 운전주파수, 평균압력, 축랭재(재료, 기공률, 선직경 또는 수력직경), 축랭기의 기하학적크기이다. 이와 함께 경계조건으로는 축랭기의 고온단 및 저온단온도, 저온단에서 헬리움기체의 압력과 질량흐름속도사이의 위상차, 평균압력과 압력비, 질량흐름속도가 있다.

## 2. 모의계산결과 및 분석

압축기의 출력에 맞게 GM형팔스판랭동기의 축랭기를 최량설계하자면 입력파라미터들을 합리적으로 설정하는것이 중요한데 그것은 대표적으로 운전주파수와 압력비, 저온단온도이다. 현재까지 액체헬리움온도급 GM형팔스판랭동기를 구동하는 헬리움압축기의 입구전력은 1.7~11kW의 범위에 있다. 변구동형압축계통에 의해 구동되는 GM형팔스판랭동기의 운전주파수는 대체로 1~2Hz로서 비교적 낮다. 이때 압력비는 1.5이상이며 예랭온도는 40K으로부터 60K사이에 있다. 입구전력이 1kW정도로써 매우 작은 압축기로 구동하는 기체결합형2단팔스판랭동기의 경우에 1단축랭기에서의 최대압력비는 1.5로, 예랭온도는 랑단이음에서 음향학적일의 분배특성을 고려하여 40K으로 정하는것이 타당하다.

변구동형헬리움압축기의 출구에서 헬리움의 압축, 팽창과정을 단열과정으로 볼 때 다음의 관계식을 리용하여 축랭기입구에서의 질량흐름속도를 평가할수 있다.

$$P\dot{V}_{\text{입}} = \dot{W}_e \eta = \dot{m}_{\text{입}} \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_{\text{입}} \left[ \left( \frac{P_{\text{출}}}{P_{\text{입}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (8)$$

그림 1에 압축기의 입구전력이 1~1.3kW정도인 경우에 평균압력을 파라미터로 하여 압축기출구에서의 압력차에 따르는 헬리움기체의 질량흐름속도의 계산결과를 보여주었다.

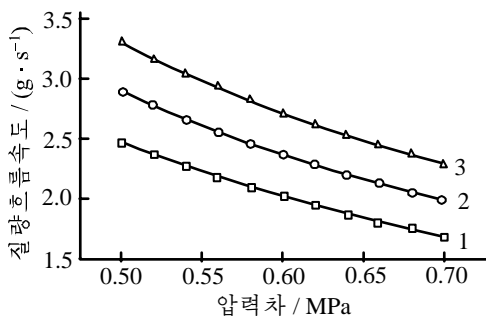


그림 1. 압축기출구에서의 압력차에 따르는 헬리움기체의 질량흐름속도

1-3은 평균압력이 각각 1.3, 1.5, 1.7MPa인 경우

그림을 통하여 축랭기입구(즉 축랭기고온단)에서의 질량흐름속도의 변화범위를 2~3g/s로 정하는것이 타당하다는것을 알수 있다.

REGEN에 의한 축랭기의 수값모의계산에서는 엔탈피흐름, 음향학적일, 팽창능력 등 여러가지 결과들이 얻어지는데 축랭기의 성능결수 COP를 기본목적량으로 하였다. 축랭재로는 1단축랭기에서 대표적으로 많이 리용하는 기공률이 0.686, 수력직경이 88.7 $\mu$ m 인 250목볼수강금망을 선정하였다. 저온단의 위상은 0°로 설정하였다.

우선 운전주파수를 파라미터로 하고 축랭기의 길이와 자름면적에 따르는 COP를 모의계산하였다. 그림 2에서 보여준것처럼 각이한 주파수에 해당하는 최대COP는 1.2Hz이상에서 감소한다.

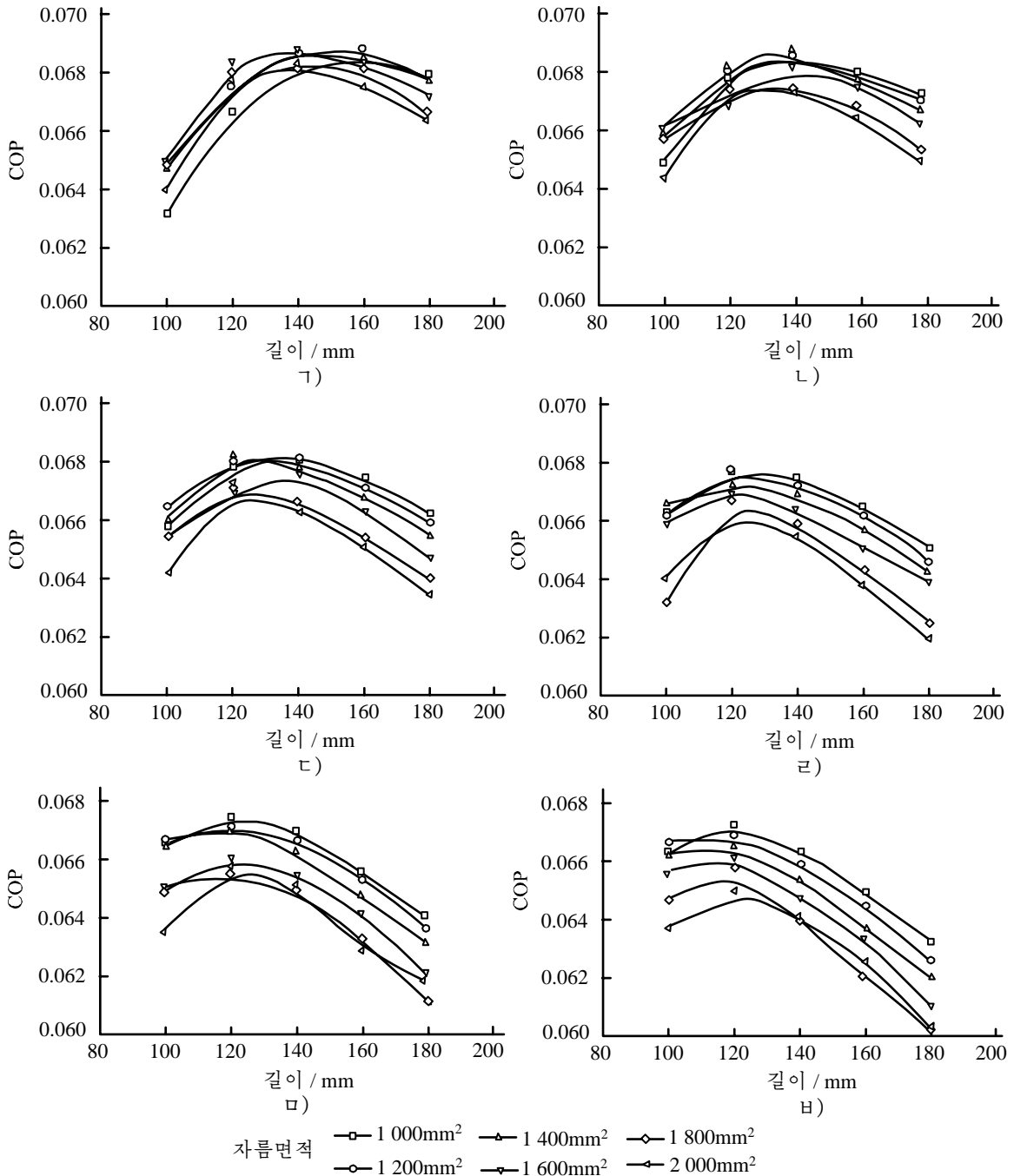


그림 2. 축랭기의 길이에 따르는 COP

평균압력 1.5MPa, 압력비 1.5, ㉠)~㉦)는 각각  $f=1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0\text{Hz}$ 인 경우

또한 그림 3을 통하여 운전주파수가 증가하는데 따라 COP가 최대가 되는 축랭기의 최적 길이가 짧아지고 최적자름면적이 작아진다는 것을 알 수 있다. 운전주파수 1~2Hz의 전체 대역에서 COP가 최대가 되려면 축랭기의 길이와 자름면적을 130mm와 1 400mm<sup>2</sup>로 정하는 것이 합리적이라고 볼 수 있다.

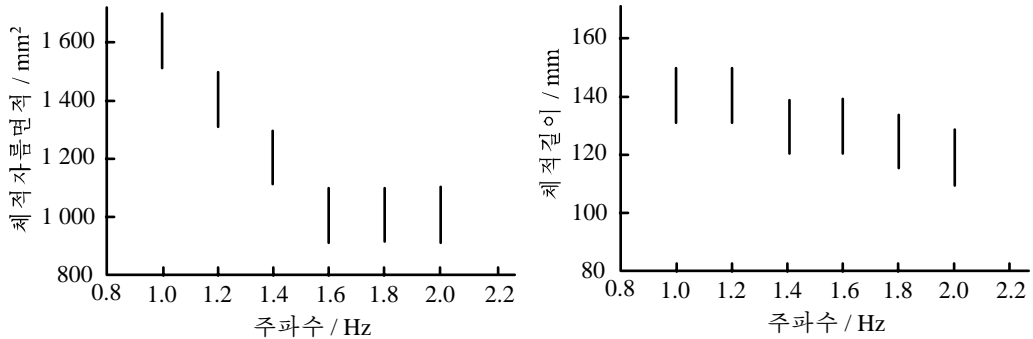


그림 3. 운전주파수에 따르는 축랭기의 최적자름면적과 최적길이  
평균압력 1.5MPa, 압력비 1.5

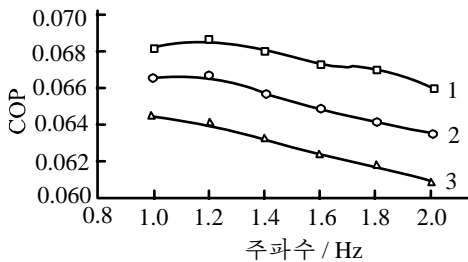


그림 4. COP의 주파수의존성  
압력비 1.5

1—3은 평균압력이 각각 1.5, 1.7, 1.9MPa인 경우

다음으로 평균압력을 파라미터로 하여 COP의 주파수의존성을 고찰하였다. 그림 4를 통하여 알수 있는것처럼 최적주파수는 평균압력이 증가하는데 따라 낮아진다. 또한 COP는 평균압력이 증가하는데 따라 감소한다. 이것은 온도 40K이상에서 헬륨의 체적비열이 압력이 증가하는데 따라 커지므로 평균압력이 증가할 때 불수강금망축랭재와 헬륨기체사이의 불완전열교환으로 인한 축랭기손실이 커지는것과 관련된다.

## 맺는 말

입구전력이 1kW정도로 작은 헬륨압축기로 구동하는 GM형펄스관랭동기의 축랭기를 최량설계하기 위한 방법론을 확립하고 축랭기의 자름면적과 길이를 각각 1 400mm<sup>2</sup>, 130mm로 확정하였다.

## 참고 문헌

- [1] J. M. Pfortenhauer et al.; Cryocoolers, 13, 463, 2004.
- [2] D. L. Liu et al.; Cryogenics, 81, 1, 8, 2017.
- [3] Y. P. Banjare et al.; Cryogenics, 50, 3, 271, 2010.

주체108(2019)년 6월 5일 원고접수

## Numerical Simulation Research for the Optimal Design of 40K Regenerator

Han Jong Ae, Kim Kwang Son and Kim Yong Hwan

We have established the method to design optimally the regenerator of GM type pulse tube cryocooler driven by helium compressor with about 1kW of input power. It has been confirmed that the optimal cross section and the length of the regenerator are 1 400mm<sup>2</sup> and 130mm, respectively.

Key words: regenerator, optimal design, helium compressor