

맥동관 엔진의 구현 가능성에 대한 연구

Investigation on feasibility of pulse tube engine

기태경^{1,*}, 정상권²

T. Ki and S. Jeong

Abstract: In this paper, configurations and performance of a pulse tube engine (PTE) are investigated. The configuration of PTE is basically designed by using a concept of energy flow. The configurations of PTE are classified as a PTE with two pistons and a PTE with one piston. First, the PTE with two pistons is simulated and the Carnot efficiency is about 41 %. The phase difference of between motion of two pistons located at expander and compressor mainly effects the performance of the PTE. Second, the PTE with one piston is designed. From a concept of analogy, the piston of compressor is replaced by a compliance tube and a resonator. The PTE with one piston is identical with a thermoacoustic engine and has the large volume because the compliance tube and resonator are consisted of large volume tubes. Therefore, we will consider each usefulness of the compact PTE with two pistons and the huge PTE with one piston for PTE applications and the judgement of feasibility.

Key Words: pulse tube engine, pulse tube refrigerator, thermoacoustic engine, stirling engine

1. 서 론

스털링 냉동기와 맥동관 냉동기는 근본적인 작동 원리가 같다. 맥동관 냉동기는 스텔링 냉동기의 극저온부 피스톤을 맥동관과 위상 조절 장치로 대체함으로써 극저온부의 움직이는 기계적인 요소를 배제하여 안정적인 작동이 가능하고 가격 경쟁력을 가질 수 있다. 따라서 스텔링 사이클로 작동되는 스텔링 냉동기가 스텔링 엔진으로도 사용될 수 있듯이, 맥동관 냉동기도 맥동관 엔진 [1,2]으로 구현이 가능할 것이며, 맥동관 냉동기처럼 맥동관 엔진만의 장점을 가질 것이다. 하지만 현재까지 맥동관 엔진에 대한 연구는 극히 드물다. 참고 문헌 [2]에서 제시된 맥동관 엔진의 구조에서 맥동관 엔진이 작동될 수 있다는 가능성을 보이고 있지만, 스텔링 엔진에 비해 미약한 성능을 보이고 있

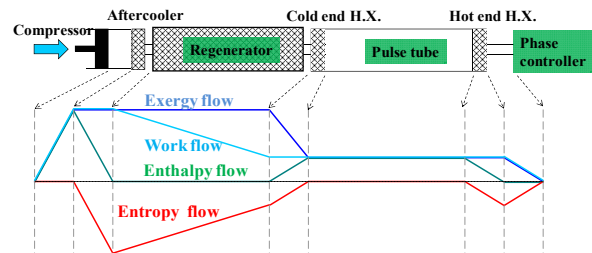


Fig. 1. Energy flow of pulse tube refrigerator.

다. 이는 맥동관 냉동기가 스텔링 냉동기와 비슷한 성능을 나타내기 위해 시도한 접근이 이루어지지 않았기 때문이다. 본 논문에서는 맥동관 엔진의 형상을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 판단하였다. 먼저 에너지 흐름의 개념 [3]을 이용하여 맥동관 엔진의 기본 형상을 제안하였고, 해석 프로그램을 통해 맥동관 엔진을 가상적으로 구현하여 맥동관 엔진의 성능을 판단하였다. 또한 앞서 제안된 맥동관 냉동기의 기본 형상에서 압축부의 기계적인 피스톤 요소를 줄이기 위한 맥동관 엔진의 구조가 제안되었고, 기본적으로 제안된 형상과의 비교를 통해 실질적 실현 가능성을 판단하였다.

2. 맥동관 엔진 형상 및 성능 해석

2.1. 에너지 흐름

새로운 기계 장치의 형상을 설계하기 위해서는 장치 구조의 변화에 따른 에너지 흐름을 통하여 가능하다. 맥동관 냉동기 내부의 이상적인 에너지 흐름은 Fig. 1과 같다. 재생기에서 발생하는 손실이 없으면 재생기를 통한 엔탈피 흐름이 없어, 맥동관의 팽창일이 맥동관 냉동기의 성능과 직접적으로 관련된다. 결국 이상적인 맥동관 냉동기의 성능은 압축기의 입력일이 얼마나 효율적으로 맥동관의 팽창일로 전달되는지에 따라 결정된다.

이 개념은 맥동관 엔진에서도 성립된다. 맥동관 엔진은 재생기와 맥동관 사이의 열교환기에 열에너지를 전달함으로써 작동된다. 따라서 공급된 열이 얼마나 효율적으로 팽창일을 발생시키는 피스톤으로 전달되는지가 맥동관 엔진의 성능을 결정한다. 이상적인 재생기라면 재생기를 통한 엔탈피 흐름이 발생되지 않아, 열역학 1법칙에 의해 열교환기에 공급된 열은 모두 맥동관의 엔탈피 흐름으로 바뀌게 된다. 따라서 맥동관의 엔탈피 흐름을 팽창일로 변화시켜 일을 생성하기 위해서는 맥동관 후단에 팽창부 피스톤이 위치해야 한다. 이는 기존의 맥동관 냉동기의 형상과 다른 점이 되겠다.

¹학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

²정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 교수

*교신저자 : kingcandy@kaist.ac.kr

원고접수 : 2011년 10월 13일

심사완료 : 2012년 03월 02일

게재확정 : 2012년 03월 02일

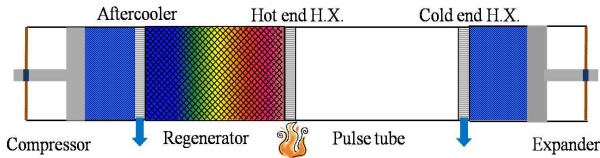


Fig. 2. Basic configuration of PTE.

2.2. 맥동관 엔진 형상

본 논문에서 제안하는 기본적인 맥동관 엔진 형상은 Fig. 2와 같다. 맥동관 엔진의 기본적인 형상은 맥동관 냉동기와 거의 같다. 하지만 피스톤이 맥동관 후단에도 위치한다는 차이점이 있다. 이는 스티어링 엔진에서 고온부 피스톤이 맥동관 후단인 상온부로 이동되었다고 볼 수 있다. 이상적으로 맥동관 내에서의 손실이 없다고 판단하면 피스톤의 위치가 스티어링 엔진의 위치에 있지 않고 맥동관 후단에 위치하여도 같은 원리로 작동될 수 있기 때문이다. 이는 스티어링 엔진이 고온부에 움직이는 기계적 피스톤을 가지고 있어 발생하는 문제를 해결할 수 있다는 점과, 고온부 열교환기로부터 공급되는 열이 작동 유체의 유용 에너지로 바뀌기 위해 필요한 열교환 면적을 다양하게 줄 수 있다는 큰 장점이 있다.

하지만 맥동관 엔진의 고온부에서 받은 열을 맥동관 후단의 피스톤으로 효율적으로 전달하기 위한 맥동관 엔진 형상 설계의 중요성이 커진다. 이는 스티어링 엔진에서 재생기 크기, 압축부와 팽창부 크기, 팽창부 피스톤과 압축부 피스톤의 질량과 위상 차이를 최적화하여 발생하는 일을 향상시키는 것과 같다고 볼 수 있다.

2.3. 성능 해석

Fig.2의 형상을 가지는 맥동관 엔진에 대한 자세한 성능 해석을 위하여 기존의 맥동관 냉동기 해석 프로그램 [4]을 수정하여 맥동관 엔진을 위한 해석 프로그램으로 활용하였다. 기존의 맥동관 냉동기 형상에서 맥동관 후단의 위상 조절 장치를 팽창부와 기계적 피스톤으로 대체하였다. 결국 맥동관 엔진의 고온부 열교환기에서 받은 열이 맥동관 엔진 양단의 피스톤 운동을 유발시켜 일을 발생하는 것으로, 맥동관 엔진의 형상과 양쪽 피스톤의 운동에 따라 생산되는 일의 양은 달라질 것이다.

3. 성능 해석의 결과

Table 1은 성능 해석 프로그램을 통하여 최종적으로 설계된 맥동관 엔진의 형상을 나타내고 있다. 주어진 맥동관 엔진 구조를 이용하여, 공급된 열에너지를 피스톤의 운동에너지로 효율적으로 변화시키기 위해 설계된 맥동관 엔진의 형상이며, 제안된 형상에서 예측된 성능은 카르노 효율 대비 41%이다. 이는 기존의 실현된 스티어링 엔진성능과 비교해보았을 때, 맥동관 엔진의 실현 가능성이 있다는 것을 의미한다. 하지만 앞으로 정확한 성능 예측 및 설계를 위하여 맥동관에서 발생하는 손실에 대한 고려가 필요할 것이며, 보다 높은 성능을 위하여 맥동관 엔진 구조의 개선이 필요할 것이다.

Fig. 3은 팽창부 피스톤의 위상 변화에 따른 맥동관 엔진의 순출력일을 나타내고 있고, Fig. 4는 최적의 위상에서 압력공간과 팽창공간의 P-V 곡선을 나타내고 있다. 팽창부 피스톤은 공급된 열에너지로부터 팽창일

Table 1. Specification of PTE with two piston.

Frequency	3.8 Hz
Charging pressure	6 MPa
Regenerator	5 cm (ID), 4.7 cm (L), 0.7 (porosity), # 50 mesh
Pulse tube	5 cm (ID), 20 cm (L)
Piston of expander	0.487 kg (mass), 35cos(wt-1.91) mm (displacement)
Piston of compressor	0.93 kg (mass), 21cos(wt-0.17) mm (displacement)
Compression volume	0.1 L
Expansion volume	0.1 L
Input heat	1546 W @ 900 K
Net output and Carnot efficiency	402.6 W, 41 %

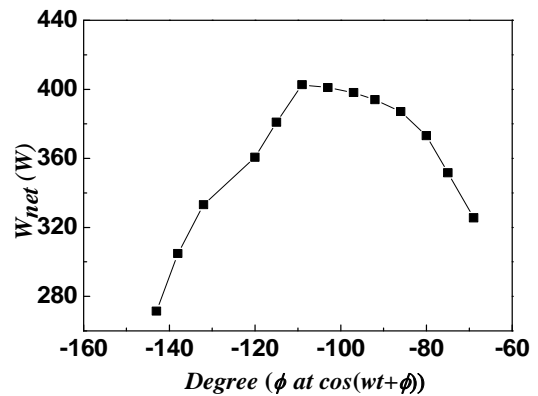


Fig. 3. Net output of PTE according to phase angle of expander piston.

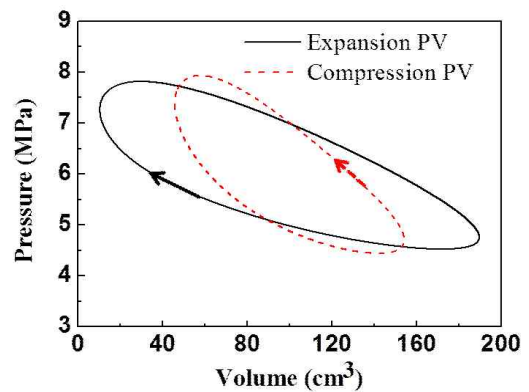


Fig. 4. Pressure-volume diagram in expansion and compression space.

이 생성이 되며, 압축부 피스톤은 맥동관 엔진 내부의 작동 유체의 압축과 팽창 과정을 형성하기 위하여 외부로부터 입력일이 공급된다. 이는 팽창 피스톤에서 생성된 일의 일부가 압축부 피스톤으로 전달되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 두 피스톤의 적당한 위상 차이는 팽창부 피스톤에 생성되는 팽창일은 극대화 하면서, 압축부 피스톤에 공급되어야 할 일은 극소화 할 수 있다. 이는 맥동관 냉동기에서 압축기의 피스톤 운동에 따라 맥동관 냉동기 끝단에 위치하는 위상조절 장치를 조절하여, 극저온부에서 생성되는 팽창일을 극대화 시키는 것과 같은 원리라고 볼 수 있다. 따라서 맥동관 엔진에서 양단 피스톤의 적합한 설계가 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

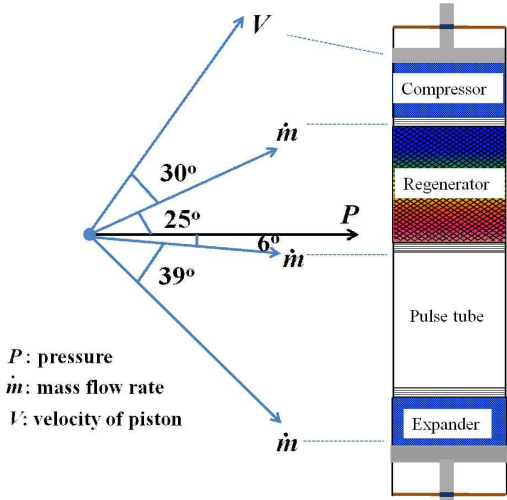


Fig. 5. Phase diagram of pressure and mass flow rate in PTE.

Fig. 5는 맥동관 엔진의 각 부위에서의 압력에 따른 질량 유량의 phase diagram을 나타내고 있으며 양단 피스톤은 약 100도의 위상 차이를 보이고 있다. 이를 통하여 맥동관 엔진의 각 부위에서 필요한 압력과 질량 유량 간의 위상 차이를 알 수 있으며, 압축부와 팽창부 간의 관계 및 피스톤과의 관계를 살펴볼 수 있다.

4. 새로운 맥동관 엔진 형상

맥동관 냉동기의 장점 중에 하나는 스틸링 냉동기의 저온부 피스톤을 상온부에 존재하는 위상조절장치로 대체하였다는 것이다. 이와 같은 원리는 맥동관 엔진에서도 적용이 가능할 것이다. 즉 앞서 설계된 맥동관 엔진의 압축부 피스톤을 맥동관 냉동기의 위상 조절장치와 같이 관성관과 저장소로 이루어진 구조로 대체할 수 있다는 의미이다. 이는 피스톤, 스프링, 댐퍼로 이루어진 시스템과 관성관과 저장소로 이루어진 시스템은 상사성의 원리 [5]에 의해서 동일하게 작동될 수 있다는 것에 기초를 둔다. 하지만 맥동관 엔진의 압축부 피스톤은 팽창부 피스톤에서 생성되는 일의 일부분을 공급받아야 함으로, 이를 위상조절장치와 같은 형상에서 가능하게 하기 위해서는 팽창부와 압축부를 관성관으로 연결하여, 팽창부에서 생성된 팽창일이 압축부로 전달되게 하여야 한다. 이 개념을 기초로 개념화된 맥동관 엔진 형상은 Fig. 6과 같다. 위상조절장치와 팽창부를 관성관으로 연결하여 팽창부에서 생성된 일이 압축부에 전달되게 하였으며 압축부 후단의 관성관과 저장소로부터 압축부의 유동을 조절하게 하여 맥동관 엔진 내부의 압축과 팽창과정이 효율적으로 일어날 수 있게 하였다. 하지만 압축부가 팽창부와 연결된 상

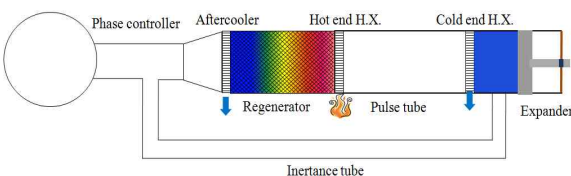


Fig. 6. Conceptual configuration of PTE with one piston.

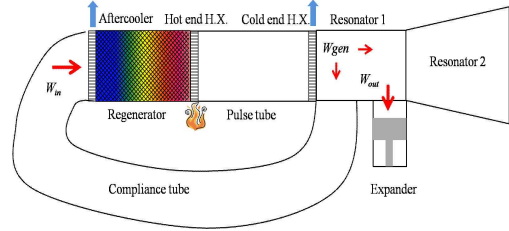


Fig. 7. Real PTE configuration with one piston.

태로, 공급되는 일을 받는 동시에 질량유량의 위상 차이를 가지는 것은 어려운 일이지만 상사성의 원리를 근거로 가능한 일이었다.

Fig. 7은 위의 원리를 실현화 시킬 수 있게 설계된 한 개의 피스톤만을 이용하는 맥동관 엔진의 구조를 나타내고 있다. 맥동관 엔진의 후냉각기는 맥동관 후단의 저온부 열교환기와 compliance 관으로 연결이 되고, 저온부 열교환기 후단에는 팽창부 피스톤과 공진기가 위치한다. 고온부 열교환기에 공급된 열에너지가 맥동관 엔진의 압력 진폭을 형성하고 이는 공진기를 통하여 증폭이 되어서 팽창부에 질량 유량을 공급하여 팽창일을 생성하며, 이 질량 유량은 compliance 관을 통해서 위상 차이를 가지며 후냉각기에 전달되어 작동 유체의 압축과 팽창을 위한 일을 공급한다. 이는 Fig. 6의 개념을 실현시킨 구조로써, 맥동관 냉동기와 같이 맥동관 엔진도 1개의 피스톤으로 작동 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 7의 구조는 현재 많이 연구가 되고 있는 열음향 엔진의 구조와 일치한다 [6]. 이는 맥동관 엔진이 1개의 피스톤으로 작동하는 구조가 열음향 엔진이 된다는 것을 의미한다. 열음향 엔진은 시스템의 크기가 스틸링 엔진에 비해 비약적으로 크다. 이는 압축부에 일을 공급하는 동시에 압축부와 팽창부의 질량유량이 적합한 위상 차이를 가지기 위하여, 팽창부와 압축부 사이에 부피가 큰 compliance 관이 필요하고, 부피가 커진 시스템의 압력 진폭을 크게 하기 위하여 큰 부피의 공진기를 사용해야 하기 때문이다. 이는 1개의 피스톤을 사용하는 맥동관 엔진에서 compliance 관과 공진기의 설계가 성능에 많은 영향을 미칠 것이며 시스템 크기의 제약을 받을 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 맥동관 엔진이 열음향 엔진과 같이 작동 되었을 때, resonator 입구와 expander 그리고 compliance 관을 통해 후냉각기로 공급되는 질량 유량 곡선을 나타내고 있다. expander와 compliance 관 후단의 질량 유량 곡선이 Fig. 5의 압축부와 팽창부 피스톤의 위상 차이와 비슷한 범위인 110도의 위상 차이를 보이는 것을 확인할 수 있어, 기존의 맥동관 엔

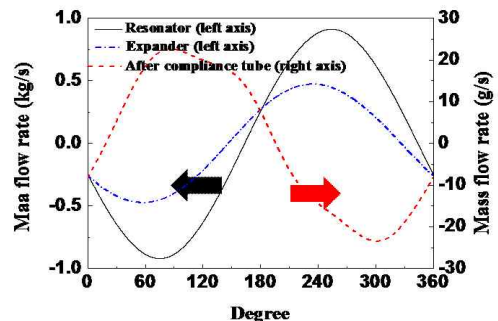


Fig. 8. Mass flow rate curves in PTE with one piston.

진처럼 작동되고 있다는 것을 확인할 수 있다. 성능 해석 결과, 두 개의 피스톤을 사용하는 맥동관 엔진의 성능과 비슷한 성능을 보일 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 맥동관 엔진을 실제로 활용할 때에는 시스템 크기가 작은 대신 두 개의 피스톤을 사용하는 구조를 이용할 것인지와 시스템의 크기는 크지만 1개의 피스톤을 사용할 것인지를 판단해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 맥동관 엔진의 기본적인 구조를 제안하고 시뮬레이션을 이용한 성능 평가를 통하여 가능성을 판단하였다. 맥동관 엔진은 기존의 맥동관 냉동기와 비슷한 형상을 하고 있지만 맥동관 후단의 피스톤에서 팽창일을 생성하며, 압축부의 피스톤은 생성된 팽창부의 일을 공급받아서 작동 유체의 압축과 팽창 과정이 효율적으로 일어나게 한다. 이때 팽창부와 압축부 피스톤의 위상 차이가 맥동관 엔진의 성능의 중요한 요소로 작용하며, 제안된 맥동관 엔진은 최대 카르노 효율 대비 41%의 성능을 가진다. 맥동관 엔진의 압축부 피스톤은 큰 부피를 가지는 관인 compliance 관과 공진기로 대체가 되어, 팽창부의 일을 공급하는 동시에 두 피스톤의 적합한 위상 차이를 유발할 수 있다. 이러한 1개의 팽창부 피스톤만을 가지는 맥동관 엔진은 열음향 엔진과 같은 형상을 가지며, 압축부와 팽창부에 피스톤을 가지는 맥동관 엔진에 비해 시스템의 크기가 비약적으로 크다는 단점이 있다. 따라서 맥동관 엔진을 실제로 활용할 때에는 압축부와 팽창부에 피스톤을 사용하는 구조를 이용할 것인지와 시스템의 크기는 크지만 팽창부 피스톤만을 이용하는 구조를 이용할 것인지를 판단해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018918).

참 고 문 헌

- [1] Ishizski et al, "Pule tube heat engine", United states patent, US005435136, 1995.
- [2] T. Yoshida, T. Yazaki, H. Futaki, K. Hamaguchi, T. Biwa, "Work flux density measurements in a pulse tube engine," Applied Physics Letters, vol. 95, no. 4, 2009.
- [3] P. Kittle, "A model for energy and exergy flow in an orifice pulse tube refrigerator," Cryocoolers 13, pp. 353-362, 2005.
- [4] T. Ki, Y. Kim, H. Kim, S. Jeong, "Development and rotating test of the high temperature superconducting motor with on-board cryocooler," Journal of Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol. 13, no. 1, pp. 12-16, 2011 (in Korean).
- [5] T. Ki and S. Jeong, "Design of compact phase controller for pulse tube refrigerator," Journal of Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, vol. 13, no. 2, pp. 25-28, 2011.
- [6] S. Backhaus and G. W. Swift, "New varieties of thermoacoustic engines," 9th International Congress on Sound and Vibration, 2002.

저 자 소 개



기태경(奇兌京)

1981년 6월 15일생, 2008년 한양대학교 기계공학부 졸업, 현재 KAIST 대학원 기계공학과 석,박사 통합과정.



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일생, 1985년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년-1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 KAIST 기계공학과 교수.