

팽창과정에서의 터보익스펜더 영향에 관한 연구

조종현* · 조봉수* · 김재실** · 조수용***

Effect of a Turbo-Expander for Regeneration in the Expansion Process

Chong-Hyun Cho*, Bong-Soo Cho*, Chaesil Kim** and Soo-Yong Cho***

Keywords : Turbo-Expander(터보익스펜더), Regeneration(재생), Turbine(터빈), Expansion(팽창)

Abstract

A turbo-expander is developed for the regeneration in the expansion process. The turbo-expander operates in the partial admission and supersonic flow, and an axial-type single stage turbine is applied to the turbo-expander. Its outer diameter is 82mm and the operating gas is R134a. A 15kW reciprocating compressor is applied in this experiment and the turbo-expander is installed in the expansion process instead of the commonly using expansion valve. Two supersonic nozzles are applied for the expansion process. The high speed of R134a after passing the supersonic nozzles gives the impulse force to the turbo-expander and some powers are generated on this process. A generator is installed at the end of the turbo-expander shaft. The generating output power from the turbo-expander is controlled by the power controller. Pressures and temperatures are measured on the lines for the performance investigation. More than 600W/(kg/sec) are generated in this experiment.

지는 터빈의 설계기술에 의하여 회수 할 수 있는 범위는 점차적으로 확대되고 있는 실정임을 알 수 있다.

1. 서론

히트펌프나 냉동기의 경우 일반적으로 구성되는 기본적인 구성품으로는 압축기, 응축기, 팽창기, 증발기 및 부속기류로 구성된다. 냉매의 유로를 조절하는 4방향 밸브의 조정에 따라서 히트펌프나 냉동기로의 사용이 가능하게 된다. 팽창기의 경우는 압축기에 의하여 고압이 된 냉매를 증발이 쉬운 압력으로 조절하기 위하여 고압에서 저압으로 감압하는 장치가 되며 냉매의 제어의 역할도 한다. 일반적인 냉동기의 경우에 압력을 조절하기 위하여 단순히 교축과정으로 작동하도록 하고 있으나 본 연구에서는 고압에서 저압으로 작동하는 과정에서 터빈을 설치하여 에너지를 흡수하여 전체시스템의 에너지효율을 증대하기 위한 것이다.

캐리어사[1]에서 134a 냉매를 사용하는 터보냉동기에 에너지 재생을 위한 터빈을 채택하여 현재 상품화하여 판매하고 있다. 또한 폐열의 회수나 기타 에너지의 활용을 위하여 이러한 재생형의 터빈의 연구는 활발하게 이루어지고 있다. 일본의 경우 지열이나 폐열 흡수를 위한 이상(two-phase)터빈의 연구를 수행하였다[2] 지열 및 폐열회수와 관련한 이상터빈의 연구로는 미국에서 계속하여 수행되어지고 있다[3] 이들의 연구에서는 30kW급의 연구가 수행되고 있으며 이상터빈에서 흡수하는 에너지를 33% 까지 설정하여 놓고 있다. 따라서 팽창과정에서 흡수하는 에너

2. 장치사양

본 연구는 지열을 이용하는 50RT급의 냉난방용 터보히트펌프를 목표로 하였으며 실제 장치에서의 터보익스펜더의 적용을 위한 설계를 위하여 개발된 설계시스템의 검증을 위하여 원래장치보다는 소규모의 장치를 바탕으로 터보익스펜더를 설계하여 실험을 수행하였다.

핵심부품의 시험을 위한 축소모델의 설계를 위한 설계조건으로 국내 D사에서 생산되는 모델 DBC 503T에서의 냉방능력 28,000kcal/hr (9.25RT, IUSRT=3,024kcal/hr), 무게 303kg, 입력 24DCV/93.5A 이므로 실제 개발하고자 하는 50RT 모델의 1/5-1/6 수준 정도로 예상된다. 유량은 압축기의 작동속도에 따라 달라지나 0.222-0.25kg/sec 이다.

3. 터보익스펜더에서의 출력

장치사양에서 주어진 질유량으로부터 출력을 얻기 위하여서는 노즐에서 충분한 팽창을 얻어서 팽창밸브를 대체할 역할을 얻고 이러한 팽창과정에서 얻어진 높은속도를 사용하여 터빈에서 출력을 얻어야한다. 이러한 경우에 터빈은 충동터빈으로 설계되어야 함을 알 수 있으며 터빈에서 높은 출력을 얻기위하여서는 토오크, 회전수, 효율 등이 중요한 요소가 된다. 하지만 작동유량이 적으므로 터빈은 부분분사에서 작동하여야 한다. 부분분사에서 작동하는 터빈에서의 효율은 부분분사량에 상당히 좌우되므로 각각의 요소가 터빈에서 최대의 출력이 얻어질 수 있도록 선정되어야 함을 알 수 있다.

* 경상대학교 항공우주공학과, air0427@empal.com

* 경상대학교 항공우주공학과, aerocho@hanmail.net

** 창원대학교 기계공학과, kimcs@sarim.changwon.ac.kr

*** 경상대학교 기계항공공학부, sycho@gnu.ac.kr

부분분사에 따른 효율은 Verneau[4]에 의하여 제안된 효율을 사용하였으며 터빈의 크기는 외경과 내경이 80mm와 60mm에서 부분분사가 3.75%로 예상하여 노즐의 분사각도가 65°이면 회전수가 6,031RPM에서 최대출력이 160W 정도 얻어질 것으로 예상되어지는 터빈의 크기가 예상되었다.

4. 노즐설계

장치의 사양을 기준으로 냉매의 팽창으로 충분한 속도와 팽창밸브의 대체역할을 할 수 있는 노즐을 설계하여야 하는데 Kim and Jeong [5]에 의하여 수행된 캐리어사의 노즐에 대한 역설계 결과로부터 본 연구의 사양에 맞도록 노즐을 설계하였다. 해석은 이상유체를 균질모델 및 1차원정상유동으로 가정하고 지배방정식은 연속방정식, 모멘텀방정식, 음속 및 단열가정으로 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho VA \\ dp + \rho VdV + \frac{1}{2}\rho V^2 f \frac{dx}{D} &= 0 \\ a^2 &= \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dh + VdV &= 0 \\ dh &= Tds + vdp \end{aligned}$$

식(1)의 지배방정식으로부터 압력에 대한 방정식을 얻게된다.

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= (1 - M^2)^{-1} \left[\frac{\rho V^2}{A} \frac{dA}{dx} - \{(\rho V)^2 \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \rho T\right\} \frac{V^2}{2T} \frac{f}{D} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 마찰계수 f 는 원통형의 알루미늄의 재질 및 거친표면으로 적용하였다.

$$f = (2 \log \left(\frac{R}{k_s}\right) + 1.74)^{-2} \quad (3)$$

표면조도는 0.2mm를 적용하고 초크지점의 위치계산은 식(4)로부터 얻어진다.

$$\frac{\rho}{A} \frac{dA}{dx} - \{(\rho V)^2 \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p + \rho T\} \frac{1}{2T} = 0 \quad (4)$$

초크지점에서의 압력구배 계산식은 아래같이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{2}{a^2 \rho} + \frac{2}{a} \left(\frac{\partial a}{\partial p}\right)_s \right] \left(\frac{dp}{dx}\right)^2 + \left\{ -2\rho \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p + \frac{2}{a} \left(\frac{\partial a}{\partial s}\right)_p + \frac{T}{a^2} \right. \\ & \left. + \rho \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s + \dot{m} \frac{1}{A^2} \frac{\partial}{\partial p} \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p \right\} \right] \frac{ds}{dx} + \frac{2}{A} \frac{dA}{dx} \\ & + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \left[\left(\frac{dp}{dx}\right) + \left\{ -\dot{m} \frac{3}{A^3} \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p \frac{ds}{dx} + \frac{3\rho a^2}{A^2} \frac{dA}{dx} \right\} \frac{dA}{dx} \right. \\ & \left. + \left\{ \rho \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p - \frac{T}{v^2} \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p + \dot{m} \frac{1}{A^2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial s^2}\right)_p \right\} \left(\frac{ds}{dx}\right)^2 \right. \\ & \left. + \left\{ \dot{m} \frac{1}{A^2} \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p + \rho T \right\} \frac{d^2 s}{dx^2} - \frac{\rho a^2}{A} \frac{d^2 A}{dx^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

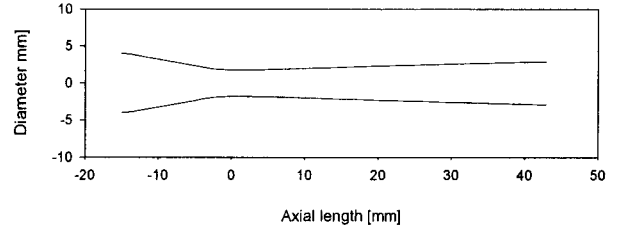
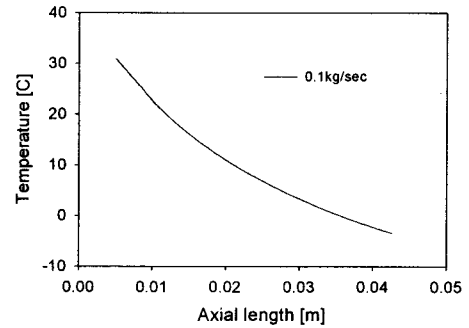
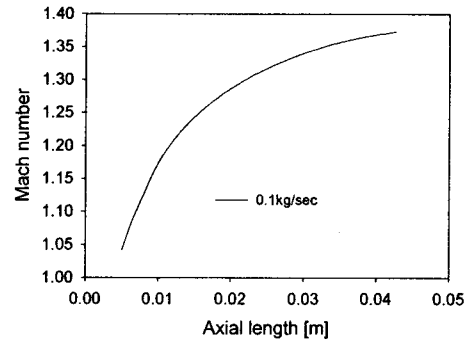


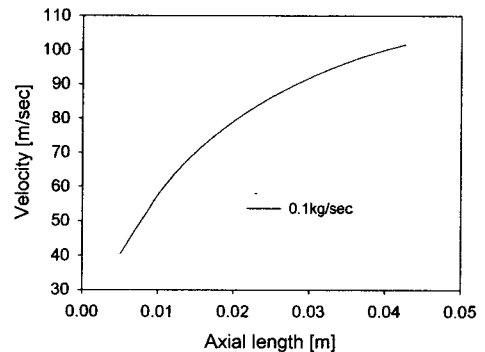
Fig.1 Configuration of supersonic flow nozzle



(a) Temperature



(b) Mach number



(c) Velocity

Fig. 2 R134a properties at the nozzle exit

식(5)에서 초크지점에서의 압력구배를 2차방정식으로부터 구하게 되고 아음속의 압력구배와 초음속의 압력구배를 구하게 되어 출구에서의 냉매의 물성치를 얻게된다. 앞서 장치사양에서 작동유량의 0.2kg/sec를 노즐로 분사하도록 하는 경우 노즐을 하나로 적용할 수도 있고 만일 두 개의 노즐을 적용한다면 각각은 0.1kg/sec에서 작동하게 된다. 앞서의 관계식으로부터 두 개의 노즐을 적용하는 경우에 얻어지는 노즐형상과 노즐 출구에서의 물성치를 Fig.1과 Fig.2에서 보여주고 있다.

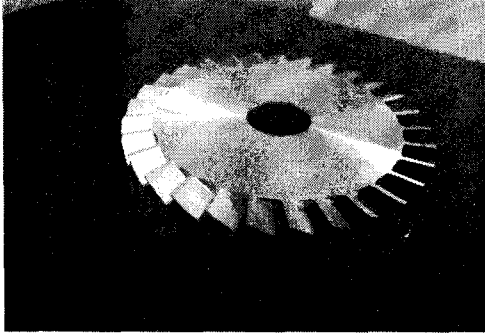


Fig.3 Picture of axial-type supersonic turbine

5. 터빈설계

터빈의 기본형상설계 과정에서 결정되어진 터빈의 입출구 유동각 및 유동속도 그리고 노즐출구에서 얻어진 마하수를 기준으로 초음속터빈의 익형 형상설계를 수행한다. 터빈 유로에서의 초음속 유동에 의한 익형설계를 위하여 이상기체에 의한 2차원 등엔트로피 유동으로 단순화하여 특성곡선법을 적용한다. 유동장은 유로면적에 따라 마하수가 변하게 되는 천이영역과 일정면적에 의한 자유와류영역으로 분류하여 계산한 Goldman and Scullin [6]의 방식을 적용한다. 따라서 익형은 천이영역에서는 직선과 곡선으로 구성되어지고 자유와류영역에서는 원호로 구성되어진다. 특성곡선법의 적용에 따라 천이영역에서의 형성되어지는 각각의 작은 해석영역에서의 유동은 익형의 형상과 동일하도록 설정한다.

마하수는 플란틀-메이어각(Prandtl-Meyer angle)으로 변환되어지며 터빈입구에서의 마하수는 P-R각(Prandtl-Meyer angle) (ν_{in}), 터빈출구에서의 마하수는 P-R각(ν_{out})으로 변환되어진다. 터빈의 입구영역에서 자유와류 이론이 적용되어지는 영역에 도달하기까지의 천이영역에서는 익형의 압력면에서는 압축과가 형성되어지고 흡입면에서는 팽창과가 형성되어지게 된다. 반면에 터빈의 출구 영역에서는 반대로 압력면에서는 팽창과가 형성되어지며 흡입면에서는 압축과가 형성되어져 출구에서의 마하수를 얻게된다. 따라서 설계 시 천이영역이 끝나는 지점의 흡입면에서의 P-R 각(ν_{up})과 압력면에서의 P-R 각(ν_{low})를 설정하게 되면 노즐에서 결정된 입구에서의 유동각(β_i)과 함께 자유와류 영역에서의 회전각(α)을 설정한다. 출구에서의 유동각(β_o)은 입구에서의 유동각(β_i)과 입구에서의 마하수(M_i) 및 출구에서의 마하수(M_o)에 의하여 정하여진다.

익형의 형상설계를 위하여 설정하게 되는 흡입면에서의 P-R 각(ν_{up})과 압력면에서의 P-R 각(ν_{low})은 작동조건에 따라서 적절히 선정하여야 한다. 익형의 형상은 동일한 조건에서 ν_{low} 가 크지게 되면 익형은 얇아지고 익형의 솔리디티는 증가하게 된다. 반면에 ν_{up} 가 크지게 되면 솔리디티는 감소하게 된다. 따라서 설계된 형상은 초음속 유동에서의 설계제한 조건을 만족하여야 한다. Goldman [7]은 설계제한조건으로 초음속 유동 작동조건과 유동박리가 없도록 하는 조건을 나타내었는데 초음속 유동작동 조건은 주어진 입구 마하수에서의 유량은 터빈을 통과할 수 있도록 하는 형상이 되어야 하는 것이다. 따라서 형성된 익형에서 만든 유로에서 입구마하수를 증가하게 되면 수직충격과 형성되어지는 경우보다는 더 이상의 마하수에서는 작동되지 못하므로 선정하는 ν_{low} 와 ν_{up} 가 주어진 입구마하수 이하로 설정될 수 있도록 하여야 한다. 유동박리는 입구영역에서 압력면에서는 압력이 증가하여 역구배가 형성되고 출구영역에서는 흡입면에서 파

찬가지의 현상이 발생되므로 압력회복계수가 0.5이상이 되도록 ν_{low} 와 ν_{up} 를 설정하여야 한다.

진분사에서 작동한다면 유로에서 형성되는 경계층을 고려하여 유로의 단면적을 확대하여야 하나 본 장치에서는 부분분사에서 작동할 뿐만 아니라 이상기체의 작동상태를 고려하였으므로 이러한 경계층에 따른 단면은 보완하지 않았다.

6. 실험장치

실험장치는 장치의 사양에서 언급한 것처럼 9.2SRT급의 에어 컨디션을 사용하여 제작하였다. 터보엑스펜더는 팽창밸브의 라인과 평행하게 설치하여 팽창밸브의 작동에서 터보엑스펜더에서의 작동이 가능하도록 하였다. 작동시 각각의 라인에서 냉매의 물성치를 파악하기 위하여 10개의 압력측정과 10개의 온도측정을 하도록 하였다. 작동유량을 조절할 수 있도록 압축기의 회전수를 인버터로 조절하였으며 터빈에서의 출력은 터빈의 축에 설치한 발전량으로 출력을 측정하였다. 발전기를 사용한 이유는 터빈에서 형성된 작동유체의 고압상태로 실링의 문제가 발생되어 터빈축으로부터 다른 동력계로 연결할 수 없을 뿐만 아니라 발전기를 사용하는 경우에 추가되는 질량을 최소화할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그 외에도 터빈의 회전수 및 터빈에 작동하는 질유량을 측정하였다. Fig.4는 실험에 사용된 장치의 개략도를 보여주고 있으며 Table 1은 사용된 측정장치의 정밀도를 나타내고 있다.

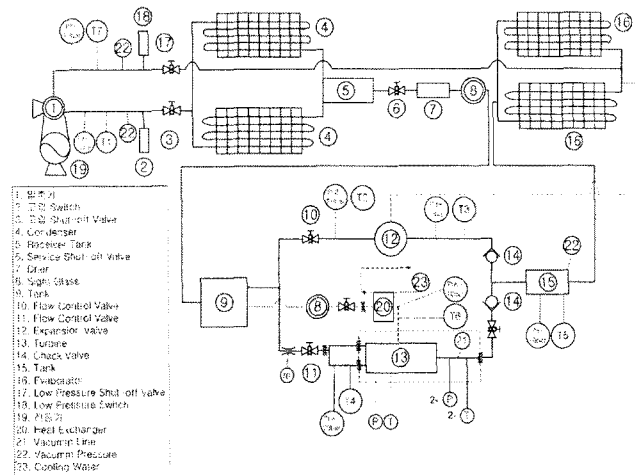
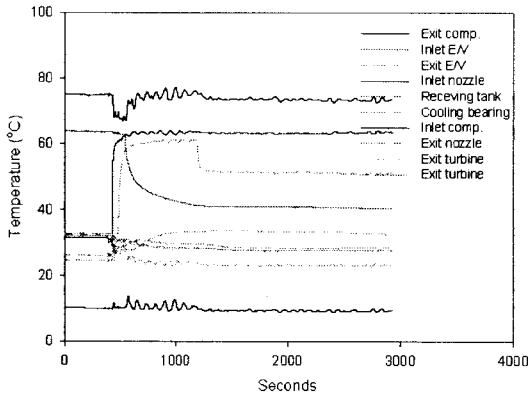


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

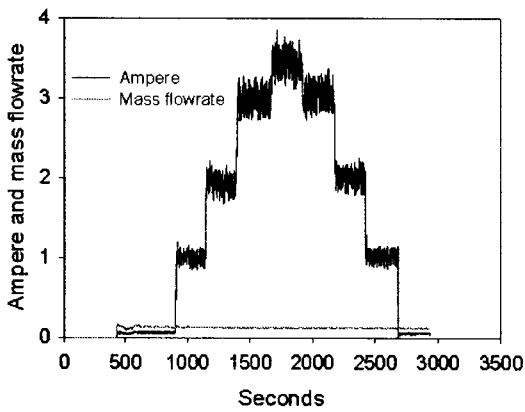
Table 1 Degree of accuracy on measuring device

Measuring equipment	Models	Accuracy
Flowmeter	MFS:3000-30E.K (Corimass)	Less than $\pm 0.15\%$ at measured value normal 0.5kg/sec
Temperature	PT100 Ω	$\pm 0.15^\circ \text{C}$ at 50 C
Pressure gauge	PTX751 (Druck)	Less than $\pm 0.3\%$ at full scale (10, 20bars)
DAQ	Agilent 34970A	0.0035%

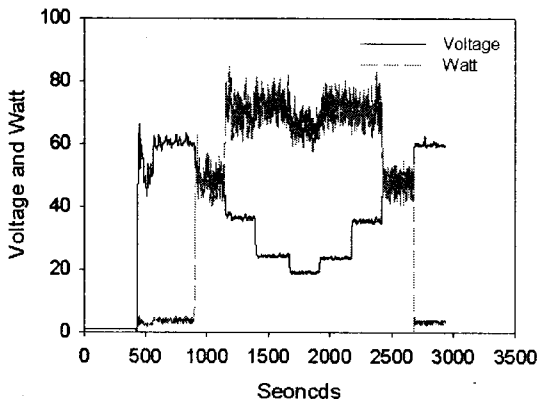
7. 측정결과 및 토의



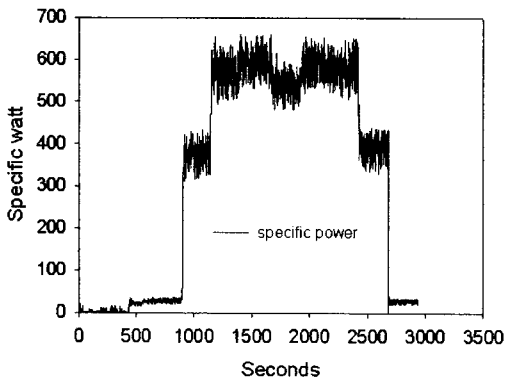
(a) Temperature



(b) Ampere and mass flowrate



(c) Voltage and watt



(d) Specific watt

Fig. 5 Output power on the turbo-expander

Fig. 5는 터보익스펜더에서 측정된 출력, 암페어, 비출력 등을 보여주고 있으며 온도는 전체 시스템에서 작동상태를 보여주고 있다. 터보 익스펜더의 작동을 위하여 실험장치가 충분히 안정된 상태에 도달한 후에 터보익스펜더로의 작업전환이 이루어졌으며 이 순간에 시스템에서 압력이 흔들림이 발생되어짐을 알 수 있다. 이는 작업의 전환에 따라 터보익스펜더에 있는 냉매의 상태가 전체시스템과 순간적으로 불일치가 발생되었으므로 발생한 것이며 어느 정도의 시간이 지난 후에 시스템이 안전화 되어 작동하고 있음을 알 수 있다. 또한 팽창밸브의 역할을 터보익스펜더가 충분히 하고 있음을 보여주고 있다.

본 실험에서는 노즐을 하나만 사용하여 얻어진 결과이다. 노즐을 두 개를 사용한 실험은 계속수행할 계획이며 터보익스펜더에서 출력의 변화가 발생되어도 시스템의 작동에는 전혀 문제를 발생하지 않고 작동함을 알 수 있다. 비출력은 600W/(kg/sec)가 얻어졌으나 이는 입구의 조건에 따라 상당히 달라짐을 확인하였다. 즉 노즐입구에서의 압력이나 온도가 낮아지게 되면 비출력도 낮아지는 현상을 확인하였다. 이러한 현상은 앞으로 실험을 통하여 확인되어 질 것이다. 따라서 노즐의 설계에 상당히 영향을 받음을 알 수 있었다.

8. 결론

터보익스펜더를 사용하여 팽창밸브와 같은 역할을 수행할 수 있었으며 팽창과정에서 버려지는 동력을 회수할 수 있었다. 출력은 작동상태에 따라서 상당히 큰 영향을 받음을 알 수 있었으며 본 장치와 같이 적은 규모에서는 출력이 그 다지 크지는 않다. 하지만 대형에서 작용되는 부분분사량이 증가하게 되어 터빈에서의 효율이 상승하게 되므로 상당한 에너지의 회수가 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 [RTI 04-01-03]의 지원과 지방대학혁신역량강화 누리사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 19XT model, 300-550tons
- [2] Akagawa, K., Fujii, T., Takagi, S., Takeda, M, and Tsuji, K., 1984, "Performance of Hero's turbine using two-phase mixture as working fluid experimental results in an air-water two-phase system," JSME. J. Vol.27, pp.2795-2802,
- [3] Hays, L.G. and Brasz, J.J., 1998, "Two-Phase Flow Turbine As Stand-Alone Throttle Replacement Units in Large 2000-5000 ton Centrifugal Chiller Installations," Proceedings of the 1998 inter. Comp. Engr. Conference Purdue. Vol.11 pp.797-802.
- [4] Verneau, A., 1987, "Small High Pressure Ratio," Von Karman Inst. for Fluid Dynamics, Lecture Series, 1987-07.
- [5] 김근석, 정진희, 1998, "R134a 터보 냉동기에서 사용되는 단일 열 축소 확장 노즐내에서의 마찰을 고려한 천음속 이상유동의 수치해석," 공기조화 냉동공학회 하계학술발표논문집, pp.1216-1223
- [6] Goldman, L.J. and Scullin, V.J., 1968, NASA TN D-4421
- [7] Goldman, L.J., 1968, NASA TN D-4422