

MAT사이클을 이용한 분리축 가스터빈 엔진의 성능향상에 관한 연구

공 창 덕*, 김 경 두**

Performance Improvement of Free Power Gas Turbine Type Gas Turbine Engine by Using of a MAT Cycle

C.D. Kong*, G.D. Kim**

ABSTRACT

In order to improve the performance of a free power turbine type gas turbine engine by injecting the atomized water into a compressor inlet, a study on Moisture Air Turbine (MAT) cycle was proposed. Compressor work by air-water mixtures in phase change was theoretically considered, and it was found that the water evaporation might reduce the compressor work. Cycle model calculations predicted that power increments of 16.2%, 14.9% and 12.6% by 1.0% water to the air flow rate at the compressor intake with rotational shaft speeds of 1000, 1210, 1350 rps were obtained, and also thermal efficiency due to the reduction of compressor work was improved.

초 록

본 연구에서 MAT(Moisture Air Turbine) 사이클은 압축기 입구에 미세한 액적을 분무함에 따라, 가스터빈 엔진의 성능을 향상시킬 수 있음을 제시하였다. 혼합물이 상변화하는 동안의 압축기 일은 이론적으로 등 엔트로피 압축 일로 고려하였다. 상변화 과정에서 증발잠열의 영향으로 압축기 일은 감소함을 알 수 있다. 성능해석 프로그램을 이용해서 1000, 1210, 1350 rps 조건에서, 압축기 유입공기에 대한 1.0%의 물을 분무했을 경우, 각각 16.2%, 14.9%, 12.6%의 출력이 증가함을 확인하였다. 또한 압축기 일의 감소에 의해 열 효율도 증가함을 확인하였다.

기 호 설 명

T : Temperature(K)

P_{cd} : Compressor discharge pressure (Pa)

\dot{m}_a : Compressor intake air flow (Kg/s)

\dot{m}_f = fuel flow (kg/s)

f : Specific fuel heat (J/kg)

g : Water content to dr

h : Specific enthalpy of saturated water(J/kg)/y
air ratio

* 조선대학교 우주항공공학과 (Chosun University, Dept. of Aerospace Eng.)

** 조선대학교 대학원 항공우주공학과(Chosun University, Graduate School, Dept. of Aerospace Eng)

h'' : Specific enthalpy of saturated steam (J/kg)
 H : Eenthalpy (W)
 HV : Heating value(W/(kg/s))
 W_{ij} : Specific compressor work (J/Kg)
 C_p : Isobaric specific heat (J/(kgK))
 Q :Gas turbine power output (W)
 x : Dryness $(h - h')/\rho$
 ρ : Latent heat of evaporation $(h'' - h')$ (J/kg)
 ϕ_{ij} : Pressure ratio of state j to state i
 p : Specific power output (W/(Kg/s))
 R : Compressor work ratio
 η_b : Combustor efficiency
 η : Gas turbine thermal efficiency

1. 서 론

본 연구에서 제시한 MAT(Moisture Air Turbine)사이클엔진은 압축기로 유입되는 공기유량에 대한 일정한 액적량과 크기(유입되는 공기유량에 대한 1%내외, 10~20microns⁴)의 미세액적(Moisture)을 분무함으로써, 지상용 산업 발전용 가스 터어빈엔진의 출력증가 및 효율을 향상시킬 수 있는 사이클 해석이다. 연구 배경을 살펴보면, 1948년Hensley는 습증발 고려시 펠러 다이어그램의 유용함과 이용방법을 연구했으며¹⁾, 1950년 Clinton Wilcox는 건습구 차트를 이용하여 습증발이 터보제트엔진의 추력이 증가됨을 제시하였으며²⁾. 같은 해, Trout는 펠러 다이어그램을 이용하여 습증발을 고려한 터보제트엔진의 추력 증가를 연구하였다³⁾. 1998년 Utamura는 기존의 이론적 연구배경을 토대로 터보기기의 성능특성에 크게 영향을 미치지 않을 정도의 액적량과 크기 미세액적(Moisture)를 압축기 입구에 분무했을 때, 출력증가 및 열 효율이 향상될 수 있다는 새로운 MAT사이클 이론을 제시하였으며, 실제 15MW급 산업용 가스 터어빈 시험을 통해 약 1% 내외의 물을 분무했을 때 출력증가 및 효율이 증가함을 입증하였다⁴⁾.

국내 연구배경을 살펴보면, 1998년 이도형은 수분이 가스터빈 엔진 성능에 미치는 영향을 연구 수행 하였으며⁷⁾, 같은 해, 서정원은 다목적 쌍발 헬리콥터엔진에 습도를 고려한 성능해석을 수행하였다⁸⁾. 한편, 1997년 공창덕등은 소형 분리축 방식의 터보축엔진의 시험장비의 정상상태 해석 프로그램과 시험을 수행 비교하였다⁶⁾.

이에 본 연구는 소형 분리축 방식의 터보축엔진의 시험장비의 'P9008 Data Logging Option' 및 시험데이터를 이용하여 MAT사이클의 성능해석을 수행하였다.

2. MAT 사이클 이론

MAT사이클은 미세액적을 압축기 입구에 분무함으로써 압축기 입구로 유입되는 대기 온도를 떨어뜨리며, 계속해서 압축기 내로 유입된 미세액적은 압축기 안의 어느 특정지점까지 압축되는 과정에서 증발잠열에 의해 압축기 일을 감소시킨다. 연소기에서는 미세액적의 유입에 따른 정압 비열이 증가하는데, 이는 높은 정압비열을 가진 증기 때문이다. 이것은 증기분사 가스터빈 사이클(Steam-injected gas turbine cycle), 증발 재생 가스터빈사이클(Evaporative-regenerative gas turbine cycles)에서 가질 수 있는 높은 정압비열 효과과 비교 될 수 있다. 본 연구에서는 미세액적을 고려하지 않았을 경우와 비교해서 터빈입구온도의 변화는 없는 것으로 가정하였으며, 실제 압축기 출구의 압력, 효율에 영향이 있으나, 폴리트로픽 과정으로 놓고 해석할 때, 출구의 압력변화와 효율에는 크게 영향을 미치지 않는다^{2,3,4)}고 가정하였다. 본 연구에서는 일반 사이클 효율을 이용하였다. 그림 1은 본 연구에서 이용된 MAT 사이클 개념도 이다.

MAT사이클의 주요 특징은 압축기 입구로 유입되는 공기의 외부 냉각, 압축기 내부에서의 냉각, 유량증가, 높은 정압비열등이다.⁴⁾

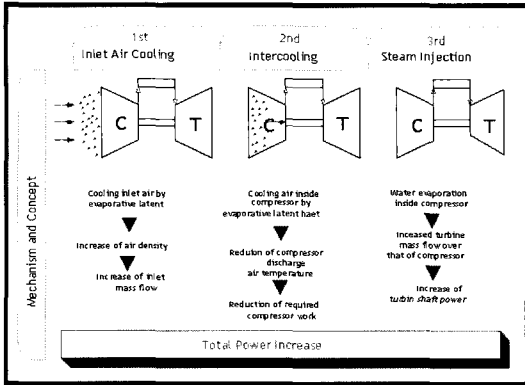


그림 1. MAT사이클 개념

2.1 이론적인 사이클 열 효율

가스터빈 엔진의 손실된 (열)효율을 보면, 아래 그림과 같이 설계자체 손실이 있는 반면, 에너지 열 손실 또한 상당하다. 본 연구의 MAT사이클 열 효율의 기본원리는 손실되는 열 에너지를 일부 회수하여 사이클의 열 효율을 회복시키는 것이다.(그림2 참조)

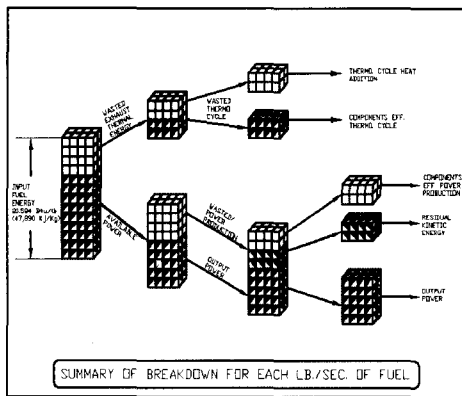


그림 2 사이클 엔진 열효율 개념

2.2 MAT사이클 열 효율

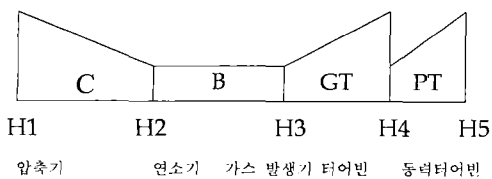


그림 3 터보축 엔진의 각 단 번호

MAT사이클 효율을 식으로 표현하면 다음과 같다

$$Q = (\text{Turbines output}) - (\text{Compressor Work}) = (H_3 - H_5) - (H_2 - H_1)$$

MAT사이클에서 비출력증가 Δp 는 압축기 출구의 비엔탈피 (h'_2)가 감소함에 따라 비압축기 일(압축기 터빈 일)이 감소하며, 비유용 일은 증가한다.

$$\Delta p = h_2 - h'_2$$

한편, 연료 발열량 f 는 $f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} HV \eta_b$ 이므로

$h_3 - h_2$ 와 같다. 그 때 연료증가 (Δf)는 아래와 같다.

$$\Delta f = h_2 - h'_2, \text{ 여기서}$$

- T_1 : 포화된 온도
- h_3 = 일정
- h_5 = 미세액적 분무시 일정
- C_p : 미세액적 분무시 일정하다고 가정한다.

따라서, 관련식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$f = C_p(T_3 - T_2) \tag{1}$$

$$f + \Delta f = C_p(T_3 - T_2)' \tag{2}$$

$$p = C_p(T_3 - T_4) + C_p(T_4 - T_5) - C_p(T_2 - T_1) \tag{3}$$

$$p + \Delta p = C_p(T_3 - T_4') + C_p(T_4' - T_5) - C_p(T_2' - T_1) \tag{4}$$

(2)식 - (1)식로 부터,

$$\Delta f = -C_p T_1' + C_p T_2 = -C_p \Delta T \tag{5}$$

(4)식 - (3)식로 부터,

$$\Delta p = -C_p T_2' + C_p T_2 = -C_p \Delta T \tag{6}$$

(5)식과 (6)식으로부터, $\Delta p = \Delta f$ 로 표현 할 수 있다. 열 효율은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\eta = \frac{p}{f} < 1 \tag{7}$$

MAT사이클의 열 효율(η') 증가는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta_{MAT}' &\equiv \frac{p + \Delta p}{f + \Delta f} = \frac{p + \Delta p}{f + \Delta p} \\ &= \frac{p}{f} \cdot \frac{(1 + \frac{\Delta p}{p})}{(1 + \frac{\Delta p}{f})} \\ &= \eta \cdot \frac{(1 + \frac{\Delta p}{p})}{(1 + \frac{\Delta p}{f})} > \eta \end{aligned}$$

따라서, $\eta_{MAT}' > \eta$ 임을 알 수 있다.

압축기의 전 압력은 아래와 같은 조건을 이용한다.

• $P = P_{air} + P_{steam}$ 이고 $P = \frac{0.622 + g}{g} \cdot P_{steam}$ 이다.

(2) 압축기 내에서 상변화가 일어나는 동안 전 엔트로피(s)는 변하지 않는다고 가정한다.

2.3 혼합성분의 압축과정에서의 일

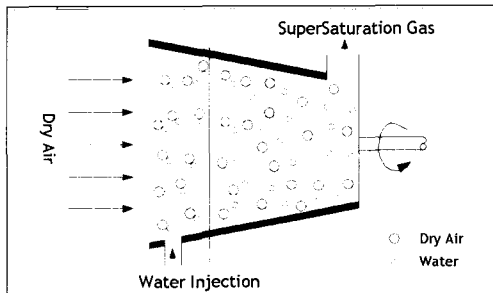


그림 4 압축기 내 혼합성분의 상변화 과정

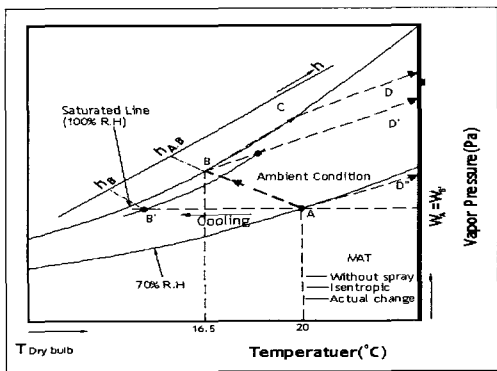


그림 5 단열 포화 과정의 건습구 차트

습공기를 포함한 작동유체가 대기 공기조건으로부터 압축기 내의 임의의 지점까지, 즉 두 성분(two-component), 두 상(two-phase)이 두

성분(two-component), 단 상(single-phase)으로 되는 지점까지, 압축되는 과정을 그림5의 건습구차트(Psychrometric chart)를 이용하여 설명할 수 있다.

대기의 습공기조건이 20 °C , R.H 70%일 때, 상태A~B과정을 거치면서 압축기로 유입되는 공기의 온도는 낮아진다. 이 과정은 단열과정으로 본다. 압축기 내로 유입된 공기는 계속해서 증발(B~C과정)하며, 상변화가 있는 압축기 내의 임의의 지점에서 포화라인을 이탈할 것이다. 즉 압축과정에서 포화상태를 유지하기위한 습증기량은 제한되어 있기 때문에 포화라인을 벗어난다. C~D과정을 거쳐 압축기 출구를 빠져나오는 온도는 낮아 질 것이며, 압축기 일은 감소할 것이다.

위의 두 혼합성분이 습증발과정에서 압축일 (W_{12})은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{12} &= g [h_C'' - (h_B + x_B \rho_B)] + \quad (5) \\ &C_p (T_c - T_B) + C_p (\phi_{CD}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) (1 + g) \end{aligned}$$

건 공기의 단열 압축 일 W_{12} 은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$W_{12} = C_p T (\phi_{AD}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) \quad (4)$$

압축기 일의 비 R은 다음과 같이 정의한다(4).

$$R = W_{12}' / W_{12} \quad (6)$$

3.연구대상 엔진

압축기 구성품 내에서 상변화가 일어나는 임의의 지점을 본 연구에서는 확인 할 수 없었으므로 공기유량에 대한1%의 분무량을 유입했을 시 6.8%압축기 일 감소4)와 유사하게 압축기 일이 약 6.6%감소함을 확인한 후, 그림6은 Utamura등4)이 유사티보축 엔진에 대해 제시한 결과로 본 연구대상 엔진에 적용 해석 하였다.

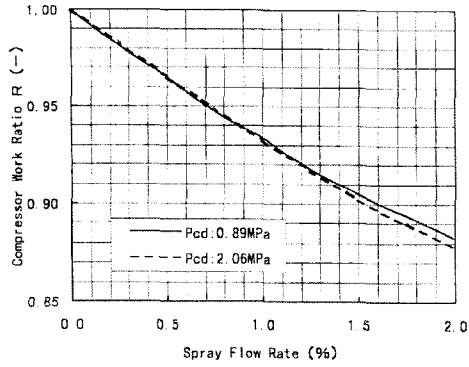


그림6 분무량에 대한 압축기 일 비

본 연구에서 이용된 대상 엔진은 동력터빈이 가스발생기와 기계적으로 분리되어 있는 분리축 방식의 터보축 엔진으로서 1단 원심압축기, 원통형 연소기, 1단 원심형 압축기 터어빈, 동력터어빈으로 구성되어 있다. 해석에 사용된 주요 구성품의 성능곡선은 시험장치 제작자로부터 획득된 자료를 이용하였다. 본 성능해석에서는 압축기, 압축기 터어빈, 동력 터어빈의 성능선도를 이용하였다⁶⁾.(그림7,8참조)

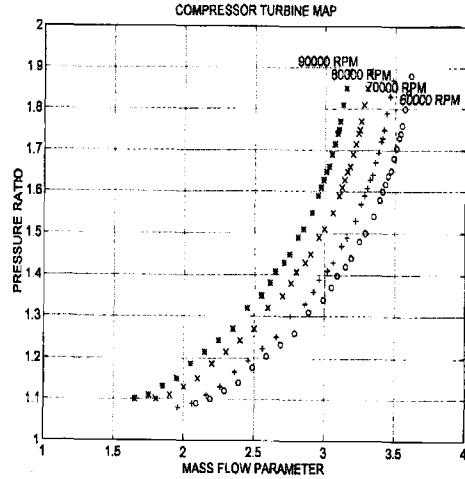


그림 8 압축기 터빈 성능 선도

4. MAT사이클을 적용한 성능해석

회전속도 1000, 1210, 1350 rps조건에서 SFR(Spray Flow Rate (%) : spray flow .vs. mass flow) 0%, 0.5%, 1%, 1.5% 조건에서 성능 해석 하였다. 증가한 출력 및 열 효율의 결과는 Table 1, 2, 3과 같다.

1,000 rps 조건에서는 SFR이 1.0% 일 때, 압축기 일은 6.61% 감소하였으며, 출력증가는 16.2%, 열 효율 증가는 16.0%임을 확인하였다.

Table 1. Performance vs. SFR(%) at 1,000 rps

$$T_3 : 618.1[K] \quad \dot{m}_a : 113.28 (g/s)$$

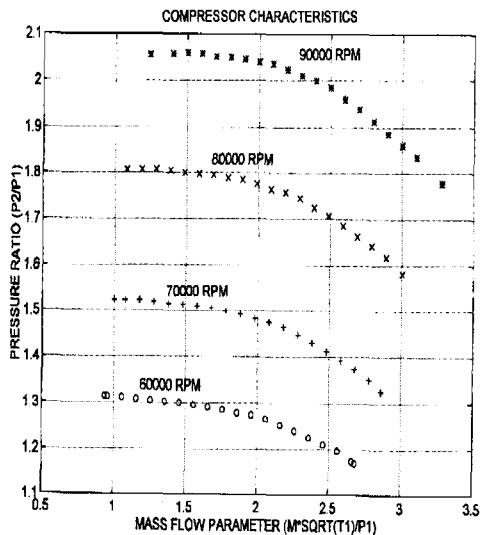


그림 7 압축기 성능 선도

Variable \ RPS	1,000			
	0	0.5	1.0	1.5
SFR(%)	0	0.5	1.0	1.5
R (CW/MCW)	1	0.965	0.934	0.905
T ₂ [K]	322.9	321.8	320.9	320.0
T ₄ [K]	590.4	591.3	592.2	593.0
CW(Kw)	3.526	3.402	3.293	3.191
[%]			[6.61]	[9.51]
POWER(Kw)	0.594	0.655	0.709	0.759
[%]		[9.31]	[16.22]	[21.74]
Efficiency	7.36	8.10	8.75	9.36
[%]		[9.4]	[16.0]	[21.4]

1,210 rps 조건에서는 SFR이 1.0% 일 때, 압축기 일은 6.59% 감소하였으며 출력증가는 14.95%, 열 효율 증가는 16.02%임을 확인하였다

Table 2. Performance vs. SFR(%) at 1,210 rps

$T_3 : 648.24[K]$ $\dot{m}_a : 137.13 \text{ (g/s)}$

RPS Variable	1,210			
SFR(%)	0	0.5	1.0	1.5
R (CW/MCW)	1	0.965	0.934	0.905
$T_2[K]$	341.9	340.2	338.6	337.2
$T_4[K]$	603.6	605.1	606.5	607.8
CW(KW) [%]	6.884	6.643	6.430 [6.59]	6.230 [9.50]
POWER(KW) [%]	1.274	1.393 [8.54]	1.498 [14.95]	1.597 [20.22]
Efficiency [%]	12.757	13.91 [9.4]	14.93 [16.02]	15.88 [21.4]

1350 rps 조건에서는 SFR이 최대 1.5% 일 때, 압축기 일은 6.59% 감소하였으며 출력증가는 12.55%, 열 효율 증가는 13.05%임을 확인하였다.

Table 3. Performance vs. SFR(%) at 1350 rps

$T_3 : 675.56[K]$ $\dot{m}_a : 155.51 \text{ (g/s)}$

RPS Variable	1,350			
SPR (%)	0	0.5	1.0	1.5
R (CW/MCW)	1	0.965	0.934	0.905
$T_2[K]$	357.8	355.5	354.4	3550.5
$T_4[K]$	617.7	619.8	621.6	623.3
CW(Kw) [%]	10.28	9.924	9.605 [6.59]	9.307 [9.49]
POWER(Kw) [%]	2.140	2.319 [7.72]	2.477 [12.55]	2.624 [18.45]
Efficiency [%]	18.46	19.94 [7.39]	21.23 [13.05]	22.44 [17.72]

압축기 일 비(R)에 대한 압축기 출구 온도, 압축기 일, 동력 터빈 입구 온도, 출력, 사이클 열 효율의 계산 결과는 그림9,10,11,12,13과 같다.

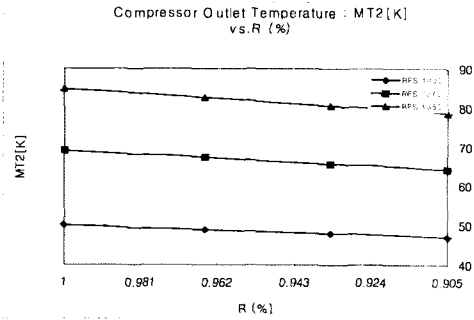


그림 9 R[%]에 대한 압축기 출구 온도

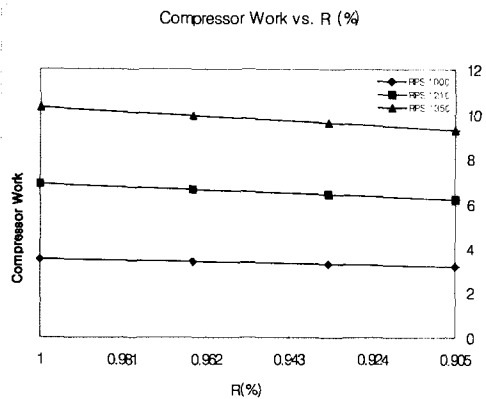


그림 10 R[%]에 대한 압축기 일

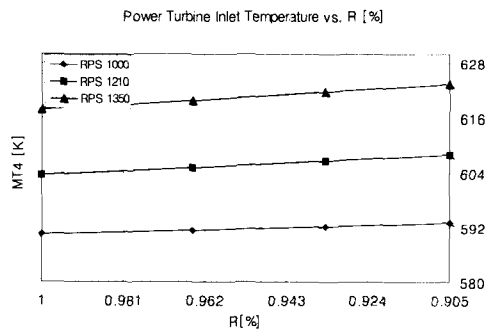


그림 11 R[%]에 대한 동력 터빈 입구 온도

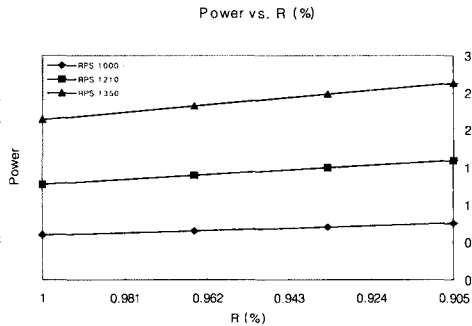


그림 12 R[%]에 대한 엔진 출력

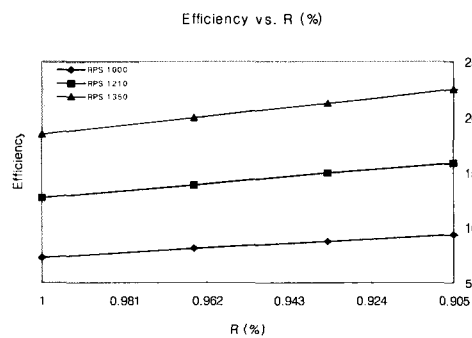


그림 13 R[%]에 대한 사이클 열 효율

5. 결 론

무더운 대기온도 30 ℃이상의 대기 조건에서 엔진을 운용할 때, 공기유량의 감소로 인한 엔진의 출력과 효율은 감소할 것이다.

이렇게 감소한 출력 및 열 효율을 회수할 수 있는 MAT사이클엔진을 제시하였다. 일정량, 크기의 미세액적(Moisture)을 분무 했을 때, 엔진의 출력 및 효율이 증가하는 원리를 제시하였다. 또한, 압축기 내의 증발과정중 상변화가 일어나는 임의의 지점을 본 연구에서는 확인 할 수 없었으므로 Utamura등⁴⁾의 결과를 이용하였다.

엔진 로터 회전수가 1000, 1210, 1350 rps 일 때 수증기 분무량(SFR) 0, 0.5, 1, 1.5% 다른 조건으로 성능해석 하였다. 분무량이 1.0%에서 출력은 각 회전수에서 16.22%, 14.95%, 12.55% 증가하였으며, 열효율은 16.02%, 16.02%, 12.55% 증가

하였다. 결론적으로, 분무량이 증가할수록 출력과 열효율이 증가함을 확인하였다. 그러나 미세한 입자를 가진 물을 터보기기 및 연소기의 성능에 영향을 미치지 않도록 분무해야만 엔진의 출력뿐만 아니라 효율도 증가시킬 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

1. Reece V. Hensley., "Mollier Diagrams for Air Saturated with Water Vapor at Low Temperatures", NACA, 1948
2. E. Clinton Wilcox., "Turbojet Thrust Augmentation by Evaporation of Water Prior to Mechanical Compression as Determined by Use of Psychrometric Chart", NACA, 1950
3. Arthur M. Trout., "Theoretical Turbojet Thrust Augmentation by Evaporation of Water During Compression as Determined by Use of a Mollier Diagram ", NACA, 1950
4. M. Utamura, I. Takehara and H. Karasawa., "Mat, a Novel., Open Cycle Gas Turbine for Power Augmentation", 1998
5. John C. Samuels and B. M. Gale., "National Advisory Committee for Aeronautics" NACA, 1950
6. 공창덕., 기자영., 고광웅., "분리축방식 터보축 엔진의 정상상태 모사 및 실험연구", Chosun Univ, 1997
7. 이도형, "수분 흡수가 가스터빈 엔진성능에 미치는 영향에 대한 연구", KAIST(Taejon) 1997.11
8. 서정원, "多目的 쌍발 헬리콥터 엔진의 基本設計 및 性能解析", Changwon Univ, 1998, pp.48 ~ 69
9. Richard E. Sonntag., Gordon J. Van Wylen., "Introduction to Thermodynamics", 3rd ed.
10. Yunus, A., Cengel., Michael A., and Boles., "Thermodynamics an Engineering Approach",

- 2rd ed, 1994
11. Philip P. Walsh., and Paul Fletcher., "Gas Turbine Performance", 1998. pp.564 ~ 586.
12. William W. Bathie., "Fundamentals of Gas Turbines ", Second Edition. pp.134 ~ 147.
13. 공창덕. 구자예. 김귀순. 정홍철., "항공가스터빈엔진"., 동명사, 2000. pp.219 ~ 256
14. Jon Gould., "Cycle Analysis" 자료