

MAT사이클을 이용한 분리축 가스터빈 엔진의 성능향상에 관한 연구

공 창 덕*, 김경두**, 기자영**, 최인수**

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

C.D. Kong*, G.D. Kim**, J.Y. Ki**, I.S. Choi**

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 21.7%, 20.2% and 18.4% by 1.5% 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 연구에서는 MAT(Moisture Air Turbine) 사이클이 압축기 입구에 미세한 물방울을 분무함에 따라, 가스터빈 엔진의 성능을 향상시킬 수 있음을 제시하였다. 혼합물이 상변화하는 동안의 압축기 일은 이론적으로 등 엔트로피 압축 일로 고려하였다. 여기서 습증발의 영향을 고려함에 따라 압축기 일이 감소함을 알 수 있었다. 성능해석 프로그램을 이용해서 1000, 1210, 1350 rps 조건에서, 압축기 유입공기에 대한 1.5% 의 물 분무시 사이클 모델 계산을 이용해서 각각 21.7%, 20.2%, 18.4%의 출력이 증가함을 확인하였다. 또한 효율도 압축기 일의 감소에 의해 개선되어짐을 확인하였다.

기 호 설 명

T : Temperature(K)	γ : Specific heat ratio
P_s : Compressor discharge pressure (Pa)	C_p : Isobaric specific heat (J/(kgK))
\dot{m}_a : Inlet mass flow	P : Power
f : Specific fuel heat (J/kg)	x : Dryness $(h'' - h')$ / ρ
g : Water content to dry air ratio	ρ : Latent heat of evaporation $(h'' - h')$ (J/kg)
h' : Specific enthalpy of saturated water(J/kg)	ϕ_{ij} : Pressure ratio of state j to state i
h'' : Specific enthalpy of saturated steam (J/kg)	p : Specific power output (W/(Kg/s))
W _{ij} : Specific compressor work (J/Kg)	R : Compressor work rat
η : Gas turbine thermal efficiency)	

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

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

1. 서 론

본 연구에서 제시한 MAT(Moisture Air Turbine)사이클은 압축기 입구에 미세한 물방울을 분무함으로써, 지상용 산업 발전용 가스 터빈의 출력증감 및 효율을 향상시킬 수 있는 사이클 해석이다. 연구 배경을 살펴보면, 1948년 Hensley는 습증발 고려시 필러 다이어그램의 유용함과 이용방법을 연구했으며¹⁾, 1950년 Clinton Wilcox는 건습구 차트를 이용하여 습증발이 터보제트엔진의 추력이 증가됨을 제시하였다²⁾. 1950년 Trout는 필러 다이어그램을 이용하여 습증발을 고려한 터보제트 엔진의 추력 증가를 연구하였다³⁾. 1998년 Utamura는 기존의 이론적 연구배경을 토대로 한층 나아가 여기에 터보기기의 성능특성에 크게 영향을 미치지 않을 정도의 물방울 양과 물 입자의 크기를 고려했을 시 출력증가 및 열 효율이 향상될 수 있다는 새로운 MAT사이클 이론을 제시하였으며, 실제 산업용 가스 터빈 시험을 통해 약 1% 내외의 물을 분무했을 시, 출력증가 및 효율향상이 있음을 확인하였다⁴⁾.

국내에서도 1998년 이도형은 수분이 가스터빈 엔진 성능에 미치는 영향을 연구한바 있다⁷⁾. 또한 1998년 서정원은 다목적 쌍발 헬리콥터엔진에 습도를 고려한 성능해석을 수행하였다⁸⁾. 1997년 공창덕 등은 소형 분리축 방식의 터보축엔진의 시험장비의 정상상태 해석 프로그램을 개발하고 시험결과와 비교하였다⁶⁾.

이에 본 연구는 교육용 분리축 방식의 터보축엔진의 시험장비에 MAT 이론을 적용하며 성능해석을 수행하였다.

2. MAT 사이클 이론

MAT사이클은 먼저 압축기 입구에 물방울을 분무함으로써 압축기입구 온도를 떨어뜨린다. 이때 압축기 내부로 유입된 물방울의 물성치는 압축기 내 어느 특정지점 (물방울이 완전 포화되는 지점)까지의 과정을 단일 및 정압 과정으로 본다. 압축되는 과정에서 압축기 출구에서 공기를 포화하기 위해 필요한 물방울 양보다 압축되는 동안 분사된 물방울의 양이 적다. 이 과

정에서 두 성분 사이의 증발 잠열에 의해 압축기의 일을 감소시킨다. 그리고 압축기 내의 특정지점 이후 계속해서 단상압축(Single-Phase Compression)과정을 걸친다. 결국 온도가 상승하며 압축기 출구로 빠져나간다.

이 과정에서 압축기 출구의 압력의 영향은 무시할 수 있을 만큼 적으며, 이때 압축기에 유입된 물방울 양과 입자 크기는 공기와 함께 압축기 내에서 유동할 수 있도록 고려되어야만 한다. 연소기에서 혼합물의 등압 비열의 증가는 높은 정압비열을 가진 증기의 증가에 의한 것이다. 이로 인하여 터빈입구온도의 변화가 있을 것이나 본 연구에서는 입구유량에 대한 물방울의 유입량이 매우 적으며(유입되는 유량의 약 1% 내외) 연소기의 성능에 거의 영향을 미치지 않을 정도의 물방울 입자 크기가 고려된 것으로 가정하였으므로, 이에 따라 터빈입구온도는 변화가 없는 것으로 가정한다.

MAT사이클의 출력 증가 요인은 압축기 입구에서의 외부 냉각, 압축기 내부의 냉각, 유량증가, 비열 증가 등이다⁴⁾.

2.1 이론적인 사이클 열 효율

비출력은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \frac{p}{f} < 1 \quad (1)$$

이 때 증가된 효율은 아래와 같다.

$$\Delta\eta \equiv \frac{\Delta p}{\Delta f}, \quad \eta \equiv \frac{p}{f} < 1 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \eta' &\equiv \frac{p + \Delta p}{f + \Delta f} = \frac{p + \Delta p}{f + \Delta p} \\ &= \frac{p}{f} \cdot \frac{(1 + \frac{\Delta p}{p})}{(1 + \frac{\Delta p}{f})} = \eta \cdot \frac{(1 + \frac{\Delta p}{p})}{(1 + \frac{\Delta p}{f})} > \eta \end{aligned} \quad (3)$$

$$(\because \frac{\Delta p}{p} > \frac{\Delta p}{f})$$

2.2 공기-물 혼합성분의 압축과정에서의 일

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

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

반면에, 두 혼합성분이 액체 증발과정에서

의 압축일(W_{12})은 아래 식과 같다.

$$W_{12}' = g [h_C'' - (h_B' + x_B \rho_B)] + \quad (5)$$

$$C_p (T_C - T_B) + C_p \left(\phi_{ij}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) (1 + g)$$

압축기 일의 비 R은 다음과 같이 정의한다⁴⁾.

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

3. 연구대상 엔진

본 연구에서 이용된 대상 엔진은 동력터빈이 가스발생기와 기계적으로 분리되어 있는 분리축 방식의 터보축 엔진으로서 1단 원심압축기, 원통형 연소기, 1단 원심형 압축기 터빈, 동력터 어빈으로 구성되어 있다. 해석에 사용된 주요 구성품의 성능곡선은 시험장치 제작자로부터 획득된 자료를 이용하였다. 본 성능해석에서는 압축기, 압축기 터빈, 동력 터빈의 성능선도를 이용하였다⁶⁾.

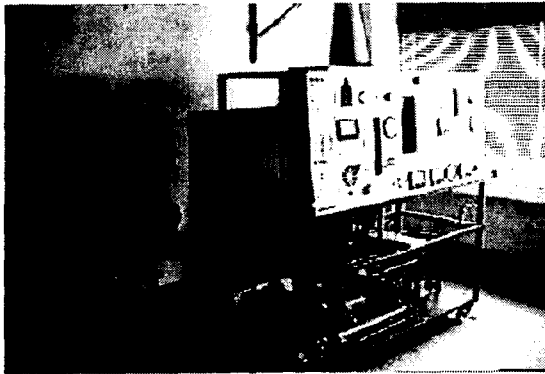


Fig. 3-1. 가스터빈 시험장치

4. MAT사이클을 적용한 성능해석

회전속도 1000, 1210, 1350 rps 조건에서 SFR(Spray Flow Rate (%) : spray flow .vs. mass flow)을 0%, 0.5%, 1%, 1.5% 고려한 후 성능을 해석하였다⁴⁾. 이 때 출력 및 열 효율은 Table 1, 2, 3와 같다.

Table 1. Performance vs. SFR(%) at 1000 rps
 $\dot{m}_a : 113.28 \text{ (g/s)}$

Variable \ RPS	1000			
	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
CW(KW)	3.526	3.402	3.293	3.191
POWER(KW)	0.594	0.655	0.709	0.759
Efficiency	7.362	8.103	8.756	9.366

1000 rps 조건에서는 SFR이 최대 1.5% 일 때, 압축기 일은 9.51% 감소하였으며 출력증가는 21.7%, 열 효율 증가는 21.4%임을 확인하였다.

Table 2. Performance vs. SFR(%) at 1210 rps
 $\dot{m}_a : 137.13 \text{ (g/s)}$

Variable \ RPS	1210			
	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
CW(KW)	6.884	6.643	6.430	6.230
POWER(KW)	1.274	1.393	1.498	1.597
Efficiency	12.757	13.916	14.936	15.885

1210 rps 조건에서는 SFR이 최대 1.5% 일 때, 압축기 일은 9.50% 감소하였으며 출력증가는 20.2%, 열 효율 증가는 19.7%임을 확인하였다.

Table 3. Performance vs. SFR(%) at 1350 rps
 $\dot{m}_a : 155.51 \text{ (g/s)}$

Variable \ RPS	1,350			
	0	0.5	1.0	1.5
SPR (%)	0	0.5	1.0	1.5
R (CW/MCW)	1	0.965	0.934	0.905
CW(KW)	10.283	9.924	9.605	9.307
POWER(KW)	2.140	2.319	2.477	2.624
Efficiency	18.467	19.942	21.239	22.444

1350 rps 조건에서는 SFR이 최대 1.5% 일 때, 압축기 일은 9.49% 감소하였으며 출력증가는 18.4%, 열 효율 증가는 17.7%임을 확인하였다.

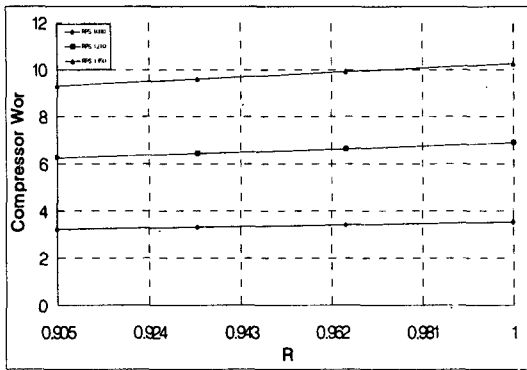


Fig. 4-1. Compressor work vs. Compressor work Ratio (R)

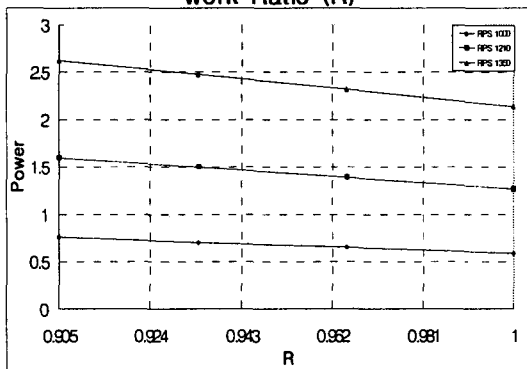


Fig. 4-2. Useful power vs. Compressor work Ratio (R)

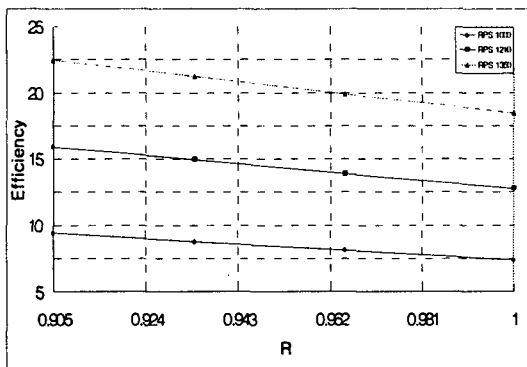


Fig. 4-3. Efficiency vs. Compressor work Ratio (R)

5. 결 론

본 연구에서는 1단 원심압축기, 원통형 연소기, 1단 원심형 압축기 터어빈, 동력 터어빈으로 구성되어 있는 분리축 방식의 터보축 엔진에 MAT사이클 이론을 적용하였다.

엔진 로터 회전수가 1000, 1210 그리고 1350 rps 일 때 수증기 분무량(SFR)을 0, 0.5, 1, 1.5%로 다르게 하여 성능해석을 수행하였다. 이 때 분무량이 증가할수록 출력과 열효율이 증가함을 확인하였다. 최대 분무량인 1.5%에서 출력은 각 회전수에서 21.7%, 20.2%, 18.4% 증가하였으며, 열효율은 21.41%, 19.7%, 17.7% 증가하였다.

결과적으로 미세한 입자를 가진 물을 터보기기 및 연소기의 성능에 영향을 미치지 않도록 분무한다면 엔진의 출력과 효율을 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

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 Noves., Open Cycle Gas Turbine for Power Augmentation", 1998
5. John C. Samuels and B. M. Gale., "National Advisory Committee for Aeronautics" NACA, 1950
6. Chang Duk Kong., Ja Young Ki., and Kwang Woong Koh., "A Steady-State Simulation and Experimental Study of Turbohaft Engine with Free Power Turbine", Chosun Univ, 1997
7. Doh Hyung Lee., "A Study on the Effects of Water Ingestion on the Performance of

Gas Turbine Engines" KAIST 1997

8. Joung Won Seo., "Preliminary Design and Performance Analysis of the Multi-Purpose Helicopter Engine", 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