

증기 분사 방식에 따른 가스터빈 시스템의 엑서지 해석

다시카¹ · 임석규¹ · 정영관² · 김경훈^{2,†}

¹금오공과대학교 대학원, ²금오공과대학교 기계공학과

Exergy Analysis of Gas Turbine System Depending on Steam Injection Method

DASHTSEDEN MIJIDDORJ¹, SOK KYU LIM¹, YOUNG GUAN JUNG², KYOUNG HOON KIM^{2,†}

¹Graduate School of Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

†Corresponding author :
khkim@kumoh.ac.kr

Received 13 September, 2017

Revised 16 October, 2017

Accepted 19 October, 2017

Abstract >> Gas turbine system with steam injection has shown outstanding advantages such as high specific power and NO_x reduction. In the present work, a comparative exergetic analysis was carried out for Steam Injected Gas Turbine (STIG), Regenerative Steam Injected Gas Turbine (RSTIG), and Regenerative After Fogging Gas Turbine (RAF). Effects of pressure ratio, steam injection ratio and steam injection method on the system performance was theoretically investigated. The results showed that the order of the highest exergy efficiency is RSTIG, RAF, and STIG for low pressure ratios but STIG, RSTIG, and RAF for high pressure ratios. In each arrangement, the combustion chamber has the highest exergy destruction and the compressor has the second one.

Key words : Gas turbine(가스터빈), Steam injection(증기분사), Exergy(엑서지), Exergy destruction(엑서지파괴)

Nomenclature

m : mass flow [kg/s]
 T : temperature [$^{\circ}C$]
 P : pressure [kPa]
 h : enthalpy [kJ/kg]
 s : entropy [$kJ/kg \cdot K$]
 R_p : pressure ratio
 E : exergy [kJ/kg]

D : exergy destruction [kJ]

η_{ex} : exergetic efficiency [%]

1. 서론

가스터빈 엔진은 육상용 발전기에서부터 항공기나 선박 등 다양한 용도로 사용되고 있다^{1,2)}. 증기분사 가스터빈은 터빈 배기가스의 회수 열을 이용하여 물을 증기로 만들어 연소기에 분사하며 기

존의 시스템에 비해 효율을 향상시킬 수 있다. 이러한 증기분사는 압축기를 나온 공기의 유량보다 터빈에 들어가는 작동유체의 유량을 증가시켜 시스템의 출력을 향상시킬 수 있다. 또한 배기가스의 NOx 배출을 감소시키고, 높은 외기온도나 낮은 대기압 환경에서의 성능 저하도 감소시키며, 부분 부하 운전시의 성능을 향상시키는 등 많은 장점들을 가지고 있다^{3,4)}.

최초의 증기분사 가스터빈 시스템은 1985년에 캘리포니아의 제지 공장에서 가동되었다. 이 시스템은 LM5000 가스터빈의 압축기 출구와 연소실에 고압의 증기 분사 장치를 장착하여 제작되었다. 운전 결과 출력은 29.9 MW에서 41.9 MW로 증가하고 열효율은 36%에서 41.8%로 증가하였으며 NOx는 25 ppm 수준 이하를 유지하였다³⁾.

Kim 등⁵⁾은 증기분사 가스터빈 시스템의 해석 모델을 통해 시스템의 주요 설계변수들이 시스템의 열역학적 성능에 미치는 영향을 해석하였다. Jeon 등⁶⁾은 증기분사가 있는 경우와 없는 경우의 가스터빈 시스템에서 블레이드의 온도 변화를 비교 분석하고 최적의 운전조건을 제시하였다. Nishida 등⁷⁾은 증기분사 가스터빈 시스템의 해석을 통해 터빈의 배기열이 NOx의 요구 사항을 충족시키기 위한 증기를 생산하기에 충분한 사실을 보고하였다. Mokhtari과 Abdala⁸⁾은 Damavand 발전소에서 heat recovery steam generator (HRSG)를 이용한 증기 분사 복합 사이클의 최적 설계 및 4E 분석을 보고하였다. Elwekeel 등⁹⁾은 스프레이 냉각을 채용한 증기 분사 가스터빈 시스템의 해석을 수행하였으며, Kim 등¹⁰⁾은 압축기에 물 스프레이를 분사하는 가스터빈 시스템에서 재생기가 있는 경우와 없는 경우 시스템의 엑서지 성능 해석 결과를 보고하였다.

최근 들어 Kayadelen과 Ust¹¹⁾은 증기분사 가스터빈 시스템에서 재생기가 있는 경우와 없는 경우, 즉 STIG와 RSTIG의 열역학적, 환경적 및 경제적인 특성에 대한 해석결과를 보고하였다. 본 논문에서는 압축기 출구에 물을 분사하는 regenerative after fogging gas turbine (RAF)와 steam injected gas

turbine (STIG) 및 regenerative steam injected gas turbine (RSTIG)에서 압력비와 증기 분사량의 변화에 따른 시스템의 엑서지 성능 특성을 비교 해석하고자 한다. 각 시스템의 엑서지 효율뿐만 아니라 각

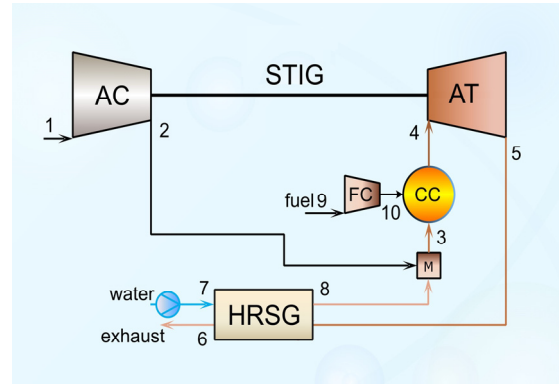


Fig. 1. Schematic diagram of STIG

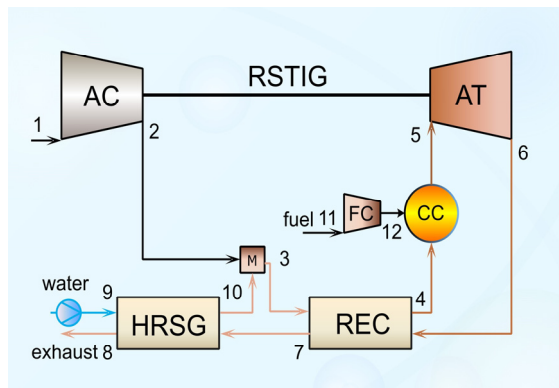


Fig. 2. Schematic diagram of RSTIG

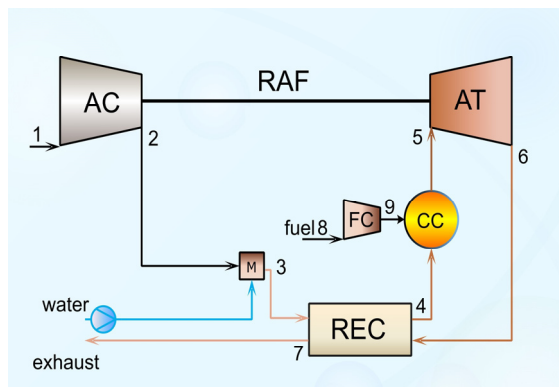


Fig. 3. Schematic diagram of RSTIG

구성 요소의 엑서지 파괴(exergy destruction) 분석을 통해 증기 분사 방법에 따른 성능특성과 성능 개선 방향을 제시하고자 한다.

2. 시스템 해석

2.1 시스템의 구성

본 연구에서 해석하는 STIG, RSTIG 및 RAF의 시스템 구성은 Figs. 1-3에서 보는 바와 같다. 대기 공기를 압축기로 가압시킨 압축공기는 시스템에 따라 터빈입구까지 각각 다른 위치에서 물이나 증기와 혼합되어 연소실로 공급된다. STIG에서는 HRSG에서 터빈의 배기가스 배열을 이용하여 공급된 물을 증발시켜 압축기 출구의 압축공기와 혼합시켜 연소기에 공급한다. RSTIG에서는 STIG에서와 같이 HRSG를 나온 증기와 압축기 출구의 압축공기와와의 혼합 가스를 재생기에서 터빈의 배기가스 배열을 이용하여 다시 한번 예열시켜 연소기에 공급한다. RAF에서는 압축기를 나온 공노의 압축공기에 물을 분사시킨 다음 재생기에서 터빈 배기가스를 이용하여 예열시켜 연소기에 공급한다.

2.2 가스터빈 모델링

본 연구에서 해석을 위한 기본 가정은 다음과 같다. 1) 기체들은 이상기체이다. 2) 연소는 단열 완전연소과정이다. 3) 연료는 메탄(CH₄)을 사용한다. 4) 압축기와 터빈의 등엔트로피 효율은 일정하다. 5) 열교환기는 핀치포인트 온도차 조건으로 운전된다. 6) 압축기와 터빈 이외의 압력강하는 무시된다⁹⁾.

*i*성분 기체의 정압비열 $c_{p,i}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$c_{p,i} = M_i^{-1} \sum_{j=0}^3 c_{i,j} T^j \quad (1)$$

여기에서 T 는 절대온도이며 M_i 는 O₂, N₂, CO₂, H₂O 및 CH₄의 기체상수이고 $c_{i,j}$ 는 *i*성분 기체의 T^j

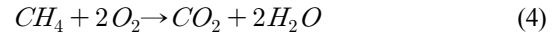
항의 계수이다¹²⁾. 엔탈피 h_i 와 엔트로피 함수 s_i^0 는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 구한다¹¹⁾.

$$h_i(T) = M_i^{-1} \sum_{j=0}^3 \frac{c_{i,j}}{j+1} T^{j+1} \quad (2)$$

$$s_i^0(T) = M_i^{-1} (s_i^{-0} + c_{i,0} \ln(\frac{T}{T_{ref}}) + \sum_{j=1}^3 \frac{c_{i,j}}{j} (T^j - T_{ref}^j)) \quad (3)$$

여기서 T_{ref} 는 기준 온도, s_i^0 는 *i*성분 기체의 몰 표준 엔트로피이다.

연소실에서 메탄의 연소식은 다음과 같다¹⁰⁾:



단열 완전 연소과정을 가정하고 형성엔탈피를 고려하면 연소기 출구에서의 온도가 원하는 터빈 입구온도와 같아지도록 하는 연료소비량은 각 성분의 형성엔탈피를 이용하여 구할 수 있다.

2.3 엑서지 해석

엑서지는 시스템의 어떤 상태에서 사장상태에 도달할 때까지의 변화시켜 얻을 수 있는 최대한 일의 양이다. 엑서지는 물리적 엑서지 e^{PH} , 화학적 엑서지 e^{CH} , 운동 엑서지와 위치엑서지로 이루어 지는데, 본 연구에서 운동 엑서지와 위치 엑서지는 상대적으로 작기 때문에 무시한다.

$$e^{PH} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

$$e^{CH} = M^{-1} \left(\sum_i x_i e_i^{CH} + R_u \sum_i x_i \ln x_i \right) \quad (6)$$

$$e = e^{PH} + e^{CH} \quad (7)$$

여기서 h 는 엔탈피, s 는 엔트로피, 하첨자 0은 사장상태를 나타내며 x_i 는 혼합기체 중 *i*성분의 몰 분율이다.

연료에 의해 시스템에 공급되는 엑서지가 E_{in} 일 때 시스템의 엑서지 효율 η_{ex} 는 시스템 공급 엑서지 E_{in} 에 대한 시스템의 순생산동력 W_{net} 의 비로 정의된다.

$$\eta_{ex} = W_{net} / E_{in} \quad (8)$$

시스템의 각 요소에서 엑서지 파괴는 들어오는 엑서지에서 나간 엑서지의 차이로 정의되며 엑서지 파괴율 D_i 는 엑서지 입력에 대한 엑서지 파괴의 비로 정의된다. 그러면 엑서지 효율과 각 요소에서 엑서지 파괴율의 합은 다음과 같이 1이 된다¹⁰⁾.

$$\eta_{ex} + D_{com} + D_{cc} + D_t + D_{mix} + D_{hr} + D_{he} + D_{sc} = 1 \quad (9)$$

여기에서 하첨자 com, cc, t, mix, hr, he, se는 각각 압축기, 연소기, 터빈, 혼합기, 재생기, 열교환기 및 배기가스를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 압축기에 유입하는 건공기 유량이 1 kg/s인 경우에 대해 시뮬레이션을 위한 기본적인 계산 조건은 다음과 같다: 대기압 $P_1=101.325$ kPa, 주위온도 $T_1=25^\circ\text{C}$, 상대습도 $RH=60\%$, 터빈입구 온도 $TIT=1000^\circ\text{C}$, 열교환기 핀치포인트 $\Delta T_{pp}=10^\circ\text{C}$, 압축기효율 $\eta_c=80\%$, 터빈효율 $\eta_t=90\%$. 여기에서 터빈입구온도는 터빈입구에서 기체의 열역학적 상태를 그리고 핀치온도차는 리큐퍼레이터나 HRSG에서 유체의 출구온도를 결정해주는 중요 시스템 파라미터이다.

압력비 R_p 나 증기분사율 f_w 의 변화에 따라서 압

축기에 유입하는 건공기 질량에 대한 연료소비율 m_f 의 변화가 Fig. 4에서 보인다. 같은 증기분사율 조건에서 연료소비율은 압력비가 증가함에 따라 STIG의 경우에는 감소하나 RSTIG와 RAF의 경우에는 증가한다. 이에 따라 연료소비율은 STIG 경우에 낮은 압력비에서는 높고 높은 압력비에서는 낮다. 같은 압력비에서는 모든 경우에 연료분사율은 증기분사율이 커짐에 따라 증가하며 RSTIG보다 RAF의 경우에 더 높다.

Fig. 5에서는 압력비와 증기분사율이 시스템의

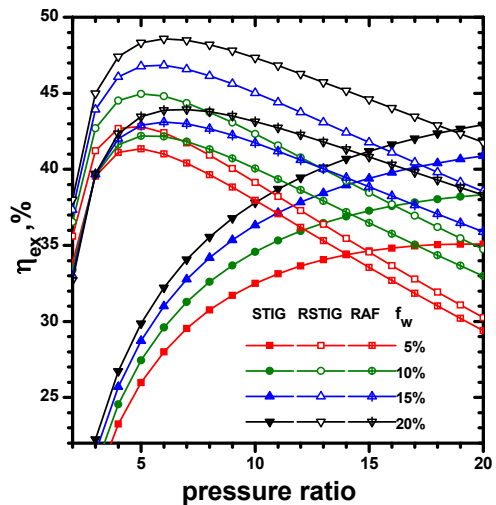


Fig. 5. Exergy efficiency as a function of pressure ratio

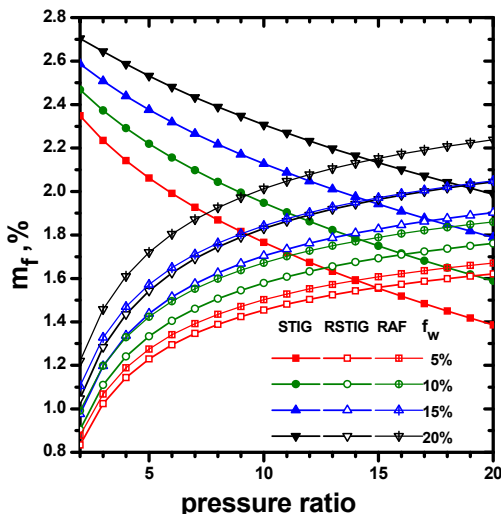


Fig. 4. Fuel consumption as a function of pressure ratio

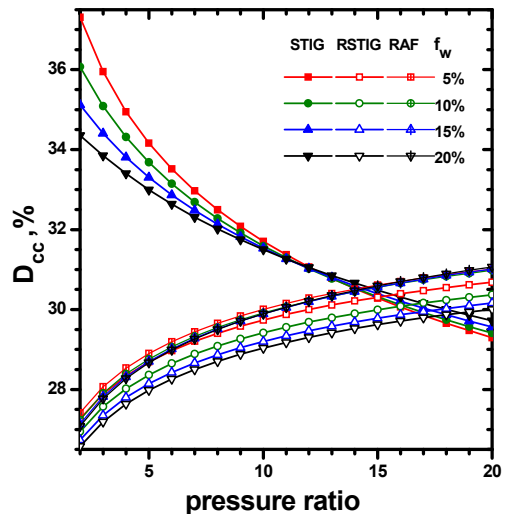


Fig. 6. Exergy destruction of Combustion Chamber as a function of pressure ratio

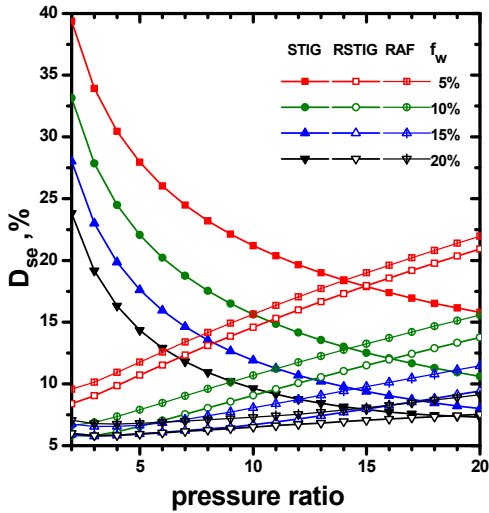


Fig. 7. Exergy loss through exhaust gas as a function of pressure ratio

엑서지 효율에 미치는 영향을 보여준다. STIG의 경우에 엑서지 효율은 압력비의 증가에 따라 높아지며, 이는 압력비의 증가에 따라 터빈에서의 열낙차가 커지기 때문이다. 그러나 RSTIG와 RAF의 경우에는 압력비에 따라 증가하다가 감소하여 최대값을 갖는데, 이는 압력비에 따라 터빈출구온도가 높아지고 재생기에서의 열전달이 늘어나기 때문이다. 엑서지 효율은 STIG 경우에 낮은 압력비에서는 낮고 높은 압력비에서는 높아진다. 같은 압력비에서는 모든 경우에 엑서지 효율은 모든 사이클에서 증기분사율이 커짐에 따라 증가하며 RAF보다 RSTIG의 경우에 더 높다.

압력비의 증가에 따른 연소실의 엑서지 파괴율의 변화를 Fig. 6에서 볼 수 있다. 연소실에서의 파괴율은 압력비가 증가할수록 STIG에서는 감소하나 RSTIG나 RAF에서는 증가한다. 고정된 압력비에 대해서 연소실의 파괴율은 RSTIG나 RAF에서는 증기분사율에 따라 감소하나 STIG에서는 압력비가 높은 경우에는 증기분사율에 따라 증가한다.

Fig. 7에서 압력비에 따라 배기가스의 엑서지 손실률의 변화가 보인다. STIG에서 배기가스의 파괴율은 압력비가 증가할수록 감소하는데, 이는 압력비에 따라 연료소비율이 증가하고 이에 따라 엑서

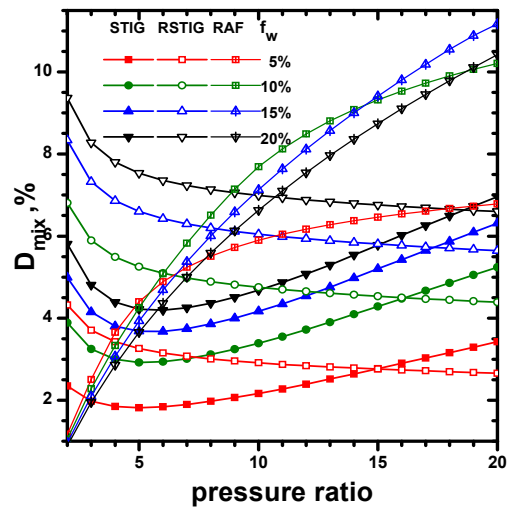


Fig. 8. Exergy destruction of mixer as a function of pressure ratio

지 유입이 늘어나기 때문이다. 그러나 RSTIG나 RAF에서 엑서지 파괴율은 압력비에 따라 증가하며, 이는 STIG와 반대로 압력비에 따라 연료소비율과 엑서지 유입이 감소하기 때문이다. 또한 배기가스의 파괴율은 모든 사이클에서 증기분사율에 따라 감소하며 RAF의 경우가 RSTIG의 경우에 비해 파괴율이 높다.

Fig. 8에서는 압력비와 증기분사율에 따라 혼합기에서의 엑서지 파괴율의 변화를 볼 수 있다. 혼합기에서의 파괴율은 압력비의 증가에 따라 RSTIG에서는 감소하고 RAF에서는 증가하며, STIG에서 감소하다가 증가하여 압력비에 대해 최소값을 갖는다. 고정된 압력비에 대해 엑서지 파괴율은 STIG와 RSTIG에서는 증가하나 RAF에서는 복잡한 상관관계를 보인다.

Fig. 9에서는 압력비와 증기분사율의 변화에 따라 엑서지 효율과 비동력의 상관관계를 볼 수 있다. 그림에서 STIG, RSTIG 및 RAF의 모든 사이클에서 엑서지 효율은 비동력에 대해 그리고 비동력은 엑서지 효율에 대해 최대값을 가짐을 알 수 있다. 또한 모든 사이클에서 최대 엑서지 효율과 최대 비동력은 증기분사율에 따라 증가한다. 그리고 최대 엑서지 효율은 STIG가 가장 낮고 RAF가 그

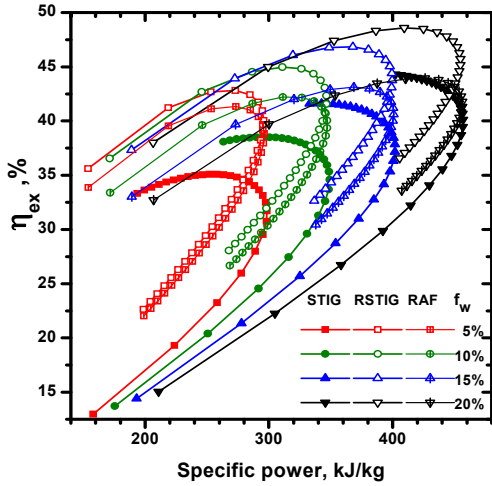


Fig. 9. Exergetic efficiency as a function of specific power

다음이며 RSTIG의 경우가 가장 높다. 그러나 세 사이클간에서 최대 비동력의 차이는 미미하다.

Fig. 10에서는 압력비와 증기분사율의 변화에 따라 엑서지 효율과 연료소비율의 상관관계를 볼 수 있다. 그림에서 STIG, RSTIG 및 RAF의 모든 사이클에서 엑서지 효율은 연료소비율에 대해서 최대값을 가짐을 알 수 있다. 또한 연료소비율에 대한 최대 엑서지 효율도 STIG가 가장 낮고 RAF가 그 다음이며 RSTIG의 경우가 가장 높다.

Fig. 11에서는 증기분사율이 5%일 때 STIG, RSTIG 및 RAF의 세가지 구성의 사이클에서 압력비의 증가에 따라 엑서지 파괴율과 엑서지 효율을 비교해서 보여준다. 세가지 모든 사이클에서 가장 큰 엑서지 파괴는 연소실에서 발생함을 알 수 있고, 따라서 시스템의 열역학적 성능을 개선하기 위해서는 연소실에서의 엑서지 파괴를 줄이는 것이 가장 중요하다. 압력비가 낮은 경우에 연소실 다음으로 엑서지 파괴율이 큰 요소는 STIG의 경우에는 HRSG이며, RAF와 RSTIG의 경우에는 재생기이다. 그러나 압력비가 높은 경우에는 세 사이클 모두 압축기에서의 엑서지 파괴율이 연소실 다음으로 높다.

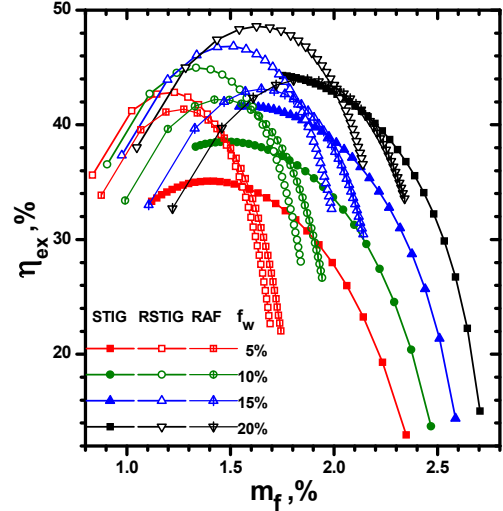


Fig. 10. Exergetic efficiency as a function of fuel consumption

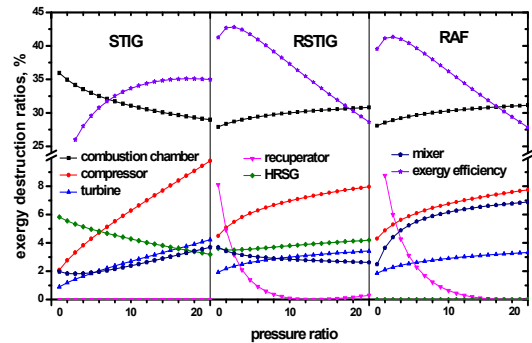


Fig. 11. Exergy efficiency and exergy destructions as a function of pressure ratio

4. 결론

본 연구에서는 압력비와 증기분사율의 변화에 따라 STIG, RSTIG 및 RAF의 세가지 증기분사 가스 터빈 시스템의 엑서지 특성을 동일한 압축기 유량 조건에서 비교 분석하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

1) 압력비가 높아짐에 따라 연료소비율과 연소기에서의 엑서지 파괴율은 STIG의 경우에는 감소하나 RAF와 RSTIG의 경우에는 증가한다. RAF와 RSTIG의 경우에 증기분사율이 높아지면 연료소

비율은 높아지나 연소기에서 엑서지 파괴율은 낮아진다.

2) 엑서지 효율은 압력비가 높아짐에 따라 STIG의 경우에는 증가하나 RAF와 RSTIG의 경우에는 최대값을 가진다. 엑서지 효율은 사이클 모두에서 증기분사율에 따라 증가하며, 낮은 압력비에서는 STIG, RAF, RSTIG 순으로 높아지고 높은 압력비에서는 RAF, RSTIG, STIG 순으로 높아진다.

3) 엑서지 효율은 터빈 비동력과 연료소비율에 대해서 최대값을 가진다. STIG, RSTIG 및 EAF의 최대 엑서지 효율은 증기분사율이 5%일 때 35.1%, 42.8%, 41.3%, 증기분사율이 10%일 때 38.5%, 45.0%, 42.2% 등 STIG, RAF, RSTIG 순으로 높아진다.

4) 엑서지 파괴율이 가장 높은 요소는 세 사이클 모두에서 연소기이며, 그 다음으로 파괴율이 높은 요소는 매우 낮은 압력비의 경우를 제외하면 세 사이클 모두 압축기이다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2016935888).

References

1. H. K. Kayadelen and Y. Ust, "Performance and environment as objectives in multi-criterion optimization of steam injected gas turbine cycles", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, 2014, pp. 184-196.
2. A. K. Shukla and O. Singh, "Performance evaluation of steam injected gas turbine based power plant with inlet evaporative cooling", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, 2016, pp. 454-464.
3. J. B. Burnham, M. H. Giuliani, and D. J. Moeller, "Development, installation, and operating results of a steam injection system (STIGe) in a general electric LM5000 gas generator", *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 109, No. 3, 1987, pp. 257-262.
4. S.Y. Kang and T. S. Kim, "Changes in Performance and Operating Condition of a Gas Turbine Combined Heat and Power System by Steam Injection - A Focus on Compressor Operation", *Korean Society for Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 6, 2011, pp. 68-75.
5. H. K. Kim, D. J. Kim, S. H. Park, M. S. Oh, and D. M. Kim, "Study on Performance and Optimal operating Conditions of Regenerative Steam-Injection Gas Turbine Systems" *The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 1, 2010, pp. 29-39.
6. M. S. Jeon, J. J. Lee, and T. S. Kim, "Analysis of Performance Enhancement of a Microturbine by Water Injection", *Korean Society for Fluid Machinery*, Vol. 12, No. 2, 2009, pp. 46-51.
7. K. Nishida, T. Takagi, and S. Kinoshita, "Regenerative steam-injection gas turbine systems", *Applied Energy*, Vol. 81, 2005, pp. 231-246.
8. H. Mokhtari, H. Ahmadisedigh, and M. Ameri, "The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power plant", *Energy*, Vol. 118, 2017, pp. 399-413.
9. F. N. M. Elwekeel and A. M. M. Abdala, "Effect of mist cooling technique on exergy and energy analysis of steam injected gas turbine cycle", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 98, 2016, pp. 298-309.
10. K. H. Kim, H. J. Ko, and H. Perez-Blanco, "Exergy analysis of gas-turbine systems with high fogging compression", *Int. J. Exergy*, Vol. 8, 2011, pp. 16-32.
11. H. K. Kayadelen and Y. Ust, "Thermodynamic, environmental and economic performance optimization of simple, regenerative, STIG and RSTIG gas turbine cycles", *Energy*, Vol. 121, 2017, pp. 751-771.
12. C. L. Yaws, "Chemical Properties Handbook," McGraw Hill, New York, NY, USA, 1999.