

## 발전용 가스터빈 성능해석 기술 분석

김수용\*, 박무룡\*, 최범석\*

### Review on Performance Analysis Technology of Power Generation Gas Turbine

Soo Yong Kim\*, M. R. Park\*, B. S. Choi\*

Key Words : Performance, Design-point, Off-design, Gas turbine, Power generation, Transient

#### ABSTRACT

For the development of a gas turbine engine, repetitive calculation process to determine design point and off-design performance based on basic design requirements resulted from the market survey is necessary. Due attention then, must be given that design process must be carried out within the mechanical limits satisfying conservation laws of mass, work as well as speed equilibrium between the components for maximum performance. It is the purpose of the present study to deal with technical particulars during design point and off-design process of gas turbine engine performance analysis for simple cycle as well as combined cycle.

#### 1. 서론

가스터빈 성능해석은 가스터빈 수요자의 요구에 의해 최초 출력과 효율에 대한 기본적인 사양이 결정되면 설계점 결정을 하고 이후 결정된 설계점이 입력 자료가 되어 탈설계 성능해석을 하게 된다. 탈설계 성능해석 과정에서 성능해석자는 부분품 설계자들로부터 성능특성 자료를 입수하여 각 부분품간에 결함을 시도하게 된다. 여기서 결함이라 함은 각 부분품간 유량의 연속성, 부분품간 일의 보존, 그리고 회전수 일치 조건을 만족시키는 과정을 지칭한다. 각 부분품은 당초 정격에서 뿐 아니라 부분부하에서의 성능도 양호하게 설계되어졌지만 각 부분품들이 결합되어지는 과정 중에서 각 부분품들의 작동 영역은 크게 줄어들게 된다. 따라서 탈설계 성능해석은 가스터빈이 정격 및 부분부하에서 작동할 수 있는 특성을 엔진

의 수명과 안전성 차원에서 규명하고 구조적 안전성을 초과하는 사항이 발생하는가 여부를 검토한다. 과도 성능해석은 포괄적 의미에서는 탈설계 성능해석 영역에 포함될 수도 있으나 분리하여 고려하는 것이 일반적이다. 엔진은 탈설계 해석 시 부분품간에 결함이 이루어질 때 엔진간 열역학적 평형이 이루어져 부분품간에 유량 및 일의 평형이 유지되고 회전축의 회전 속도는 시간의 변화에 무관한 상태에 있었다. 그러나 과도 시에는 이러한 평형이 깨어지면서 엔진의 작동 특성은 시간 변화에 따라 변화하게 되며 주로 엔진의 가속시, 감속시에 일어나는 엔진의 성능 변화가 이에 해당한다. 일반적으로 발전을 위한 산업용 가스터빈의 경우 대부분의 작동기간 중 회전수가 일정하게 유지되므로 과도상태해석의 중요성이 감소하지만 항공기 엔진의 경우에는 엔진의 가감속이 빈번하므로 과도성능해석이 매우 중요하게 된다. 그러나 발전용 엔진이라 하여도 피크 전력 공급용으로 사

\* 한국기계연구원 열유체환경연구부

용되는 경우 엔진의 기동 및 정지가 심하여 엔진 내부의 열응력 변화가 심하므로 과도 성능해석이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 가스터빈 성능해석 과정 중 검토해야 할 기술적 사항들을 조사하여 봄으로서 가스터빈 성능해석 시 도움이 되었으면 한다. Fig. 1에는 대형발전용 가스터빈에 대한 개략도가 나타나 있다.

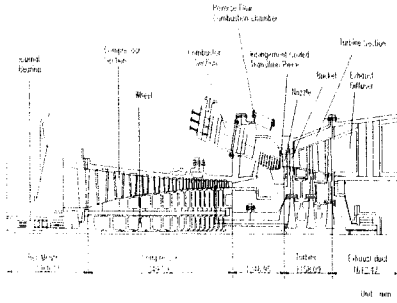


Fig. 1 170MW급 대형 발전용 가스터빈 개략도

## 2. 발전용 가스터빈 성능해석 기술 분석

### 2.1. 가스터빈 설계점 해석

#### 2.1.1. 단순사이클 설계점

가스터빈의 설계점을 결정하는 일은 개념설계 단계에서 가장 중심이 되는 부분이다. 설계점 계산을 통하여 주어진 사양에 맞추어 엔진의 형태, 사이클의 중요 변수, 부분품의 성능 수준, 사이즈 등이 결정된다. 설계점 성능은 엔진의 부하 변화 전체에 대한 작동 특성 해석이 이루어지기 전 단계에서 이루어지며 결정된 설계점은 엔진이 대부분의 수명기간 중 작동되어지는 조건이므로 신중하게 결정되어야 한다. 산업용의 경우 보통 ISO 정격에서의 작동조건을 말하며 15°C의 대기온도와 압력이 101.325kPa, 60%의 대기습도 그리고 설치시 압력 손실이 0인 상태를 말한다. 설계점 해석을 위해서는 각각의 다른 형상의 엔진 구조에 대하여 중요 입력 변수 값을 반복적으로 변화시키면서 성능을 검토하게 된다. 개념설계 단계에서 부분품의 설계점은 가스터빈 엔진 자체의 설계점과 같은 조건에서 수행된다. 설계점 결정 시 엔진의 성능과 관련하여 고려해야 할 중요변수는 출력,

비출력, 비연료 소모율, 열효율, 터빈 출구온도, 터빈 출구 유량 등이며 열역학 측면에서 볼 때 작동 유체는 엔진의 각 부분품을 통과하면서 압력과 온도가 변화하기 때문에 압축비, 터빈 정익 끝단 온도(SOT) 등도 중요 변수로 간주된다.

Fig. 2에는 대형 발전용 가스터빈에 대한 설계점 결정의 한 예로 압축비가 6부터 20까지 변화하고 터빈 연소기 출구온도가 1000부터 1800°K까지 변화하는 중 열효율과 비출력과의 관계를 보여주고 있다. 비출력, 즉 단위 유량 당 출력은 매우 중요한 성능변수인데 이는 이 값이 클수록 같은 출력에 대하여 엔진을 작게 설계할 수 있기 때문이다. 또 열효율이 좋다는 것은 엔진 작동에 요구되는 연료 값의 절약을 의미하기 때문에 열효율은 높을수록 좋다. 열효율은 같은 터빈 입구온도에서 압축비가 증가함에 따라 같이 증가하고 동일한 압축비에서는 터빈 입구온도에 비례하여 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또 압축비가 증가할수록 터빈 입구온도를 증가시키는 효과가 크게 나타나며 주어진 압축비에서 터빈입구온도의 증가는 출력이 증가하는 결과를 가져오지만 일정온도 이상에서는 효율의 희생이 뒤따른다. 비출력이 최고에 이르는 최고 압축비 점은 터빈 입구온도가 낮을수록 낮은 효율에서 발생하여 터빈 입구온도가 낮을수록 엔진은 성능면에서 불리하다고 할 수 있다. 그림에서 사각형 검은 점은 동급의 GE사 엔진인 PG7231FA 엔진을 감안하여 결정한 설계점을 나타내고 있다. 결정된 설계점은 주어진 터빈 입구온도에서 최고 비출력 점임을 고려할 때 효율보다는

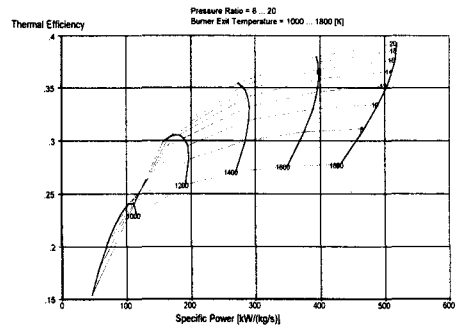


Fig. 2 Thermal efficiency vs. Specific power for different TIT and pressure ratio.

오히려 성능면이 강조된 것으로 이해할 수 있지만 그 보다는 다음과 같은 차원에서 본 설계점을 이해할 수 있다. 복합발전 사이클의 경우 압축비의 효율에 대한 중요성은 simple 사이클에 비하여 덜 중요한 것으로 나타나는데 단순사이클의 경우 효율은 압축비의 증가에 따라 크게 증가하지만 복합 사이클의 경우에는 효율은 오히려 그보다는 낮은 압축비와 높은 터빈 입구온도에서 가장 크게 나타나기 때문이다. 따라서 본 사이클의 설계점 역시 복합발전 시 상부(Gas Turbine Cycle)와 하부(Steam Turbine Cycle)를 동시에 고려하여 결정된 설계점임을 알 수 있다. 열역학적인 관점에서 볼 때 만일 냉각 및 소재기술이 뒤받침 되어준다면 터빈 입구온도가 증가할수록 성능은 크게 증가할 것이므로 가스터빈의 이러한 특성(중간 정도의 압축비와 높은 터빈 입구온도) 특히 복합발전 에 적용 시 유리한 점으로 작용한다. 복합발전의 경우 가스터빈 출구에 설치되는 배열회수장치는 가스터빈 출구에서 낭비되는 높은 열을 회수해서 아주 낮은 온도로 배출할 수 있기 때문에 그만큼 복합사이클의 효율은 높아질 수 있다. 그 외에도 높아진 터빈입구온도와 압축비는 주어진 엔진 사이즈에 대하여 출력을 증가시킬 수 있는 이유로 인하여 단위 출력 당 투자비가 감소하는 결과를 주게되는 이점도 있다.

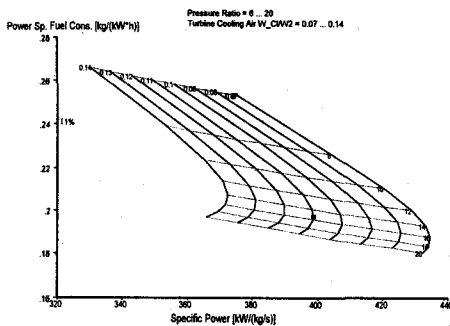


Fig. 3 Power Specific fuel consumption vs. Specific power for different pressure ratio and turbine cooling air.

터빈 냉각 공기의 양은 설계점 결정 시 고려해야 할 중요한 변수 중의 하나이다. Fig. 3은 압축

비가 8부터 20까지 변화하고 터빈 냉각 공기량이 7%로부터 14%까지 변화하는 동안 비연료 소모율과 비출력과 관계 보여주고 있다. 그림에서 같은 압축비에서 터빈 냉각 공기량이 증가할수록 비출력은 거의 선형적으로 감소하고 있으며 이때 비연료 소모율은 증가하는 것으로 나타났다. 그림으로부터 터빈냉각 공기량이 성능(비출력) 및 효율(비연료 소모율은 효율의 역함수이다)에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 쉽게 알 수 있다. 또, 냉각 공기량이 일정하게 유지되는 경우 비출력은 압축비 증가에 따라 같이 증가하다가 최고 값에 이른 후에는 압축비 증가에 따라 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 그림에서 검게 나타난 사각형은 설계점을 나타내며 같은 냉각 공기량에서 최소의 비연료 소모율보다는 최대의 비출력이 발생하는 압력비에 설계점이 결정된 것은 앞서 언급된 바와 같이 본 엔진의 설계점이 가스터빈 단독의 효율성이나 경제성보다는 복합사이클을 고려한 결정이라고 판단된다. 터빈 냉각 공기의 결정은 사용할 냉각 기술의 수준 및 고온부 소재의 재질 등에 크게 좌우된다. 여기서 대상엔진의 터빈 1단 노즐 블레이드의 금속온도가 약 900°C 정도라고 가정할 때 약 13.5%의 냉각 공기가 필요한 것으로 나타났다. Table 1에는 PG7231FA급 가스터빈 엔진에 대하여 출력 및 효율이 선정된 후 중요 기본설계 변수들의 성능에 미치는 영향을 조사하였으며, 각 주요 변수들이 성능에 미치는 영향에 대한 결과를 보여

Table. 1 Influence of important parameters on performance

	Basis	Delta	Pstfc	Specific Power	$\eta_{ther}$	Shaft Power Delivered
W2rstd	433.2	1	0	0	0	0.23
Pressure ratio	15.4	1	-1.1	-0.09	1.11	-0.09
FHV	50.052	0.1	0.0	0	-0.2	0
TCA	0.11	0.01	1.13	-2.23	-1.12	-2.23
$\eta_{is, comp}$	0.87	-0.01	0.78	-1.19	-0.78	-1.19
$\eta_{is, turb.}$	0.928	-0.01	2.19	-2.14	-2.14	-2.14
TIT	1601.1	10.0	1.39	1.39	-0.15	-0.15
$\Delta T_{ISA}$	0	10	1.49	-3.57	-1.47	-5.20

주고 있다. Table 1에서 Basis는 설계점 때의 값을 나타내며 Delta는 1%변화를 가리킨다.  $\Delta T_{ISA}$ 의 경우는 Kelvin으로 환산한 경우 1°K의 변화를 나타낸다. 표에서 효율에 미치는 영향은 외기 온도, 터빈 효율, 냉각공기의 양, 압축비, 압축기 효율 등의 순으로 나타난 반면 입구유량은 엔진의 출력에만 영향을 미치고 있고 효율 및 비연료 소모율과는 관계가 없는 것으로 나타났다. 특히 외기 온도는 엔진의 효율보다는 엔진의 출력에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 엔진의 효율은 터빈의 효율과 가장 큰 관련이 있고 외기 온도, 냉각 공기의 양 등 변수의 순으로 의존하는 것으로 나타났다.

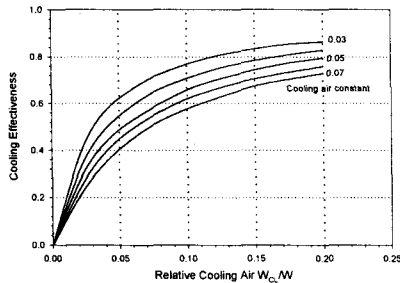


Fig. 4 Cooling Effectiveness,  $W_{CL}/W$  and Cooling Air Constant.

Fig. 4는 터빈 냉각 시 터빈 블레이드 표면 온도를 결정하기 위한 냉각효율 (Cooling Effectiveness)를 계산하기 위한 도표이다. 냉각정수는 실험 결과와 비교하여 적절히 선택되어지며 이때 터빈 블레이드의 표면 온도의 계산은 다음 식을 따른다.

$$T_{Metal} = T_{rel} - \eta_{cool} * (T_{rel} - T_{cooling})$$

Fig. 5에는 1950년 이후 1995년까지 터빈 입구 온도의 변화와 블레이드 표면이 파손되는 온도의 변화를 보여 주고 있다. 그림으로부터 지난 10여년 간 재질의 향상보다 열진달 기술의 개선이 터빈입구온도의 향상에 더 큰 기여를 한 것으로 나타났다. 특히 1980년대 말 이후 막냉각, 충돌제트

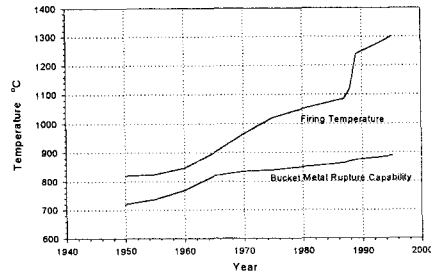


Fig. 5 Firing temperature trend and bucket materials capability

냉각, 내부 대류냉각 등 복합적인 열진달 방법의 개발로 터빈입구온도의 괄목할 만한 성장을 가져와 가스터빈 효율이 향상함으로서 가스터빈 사이클이 기타 왕복동과 비교하여 경쟁성 있는 열기관으로 등장하는 견인차 역할을 하였다.

### 2.1.2. 복합사이클 설계점

Fig. 6과 7에는 단순사이클과 복합발전 시스템 구성과 이때의 열효율과 비출력과의 관계를 보여주고 있다. 비출력이라 함은 단위 유량 당 가스터빈의 출력을 가리키는데 이 값이 클수록 동일한 출력을 생산하면서도 엔진의 크기가 작아질 수 있음을 나타내고 있다. 반면에 열효율이 높을수록 엔진을 작동하는데 드는 비용이 감소하는 것을 가리킨다. Fig. 6은 단순사이클의 경우 주어진 터빈 입구온도에서 압축비가 증가함에 따라 열효율이 항상 증가하는 것을 보여주고 있다. 또 터빈 입구온도가 변함에 따라서 비출력과 열효율이 최대가 되는 압축비 값이 변화하는데 압축비가 높을수록 터빈입구온도를 상승시키는 효과가 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 또 주어진 압축비에서 터빈입구온도의 증가에 따라 출력은 증가하지만 이때 효율이 감소하는 대가를 치르게 됨을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 7에서 보듯이 복합 사이클의 경우에는 압축비의 증가 효과가 단순사이클에 비하여 덜 중요하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 복합사이클의 경우 압축비의 증가가 오히려 비출력의 감소를 가져옴을 볼 수 있으며 터빈 입구온도의 증가로 열효율이 증가하고 있음을 볼 수 있

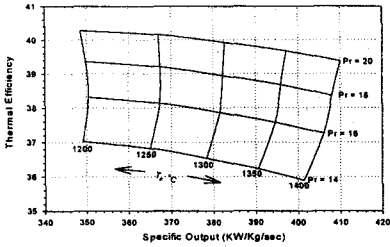
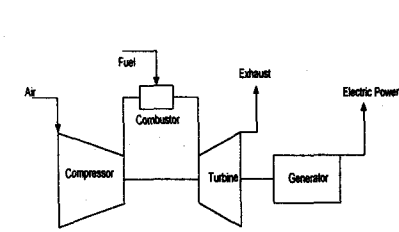


Fig. 6 Thermal Efficiency vs. Specific Output in Simple Cycle

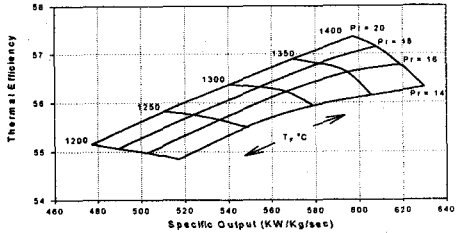
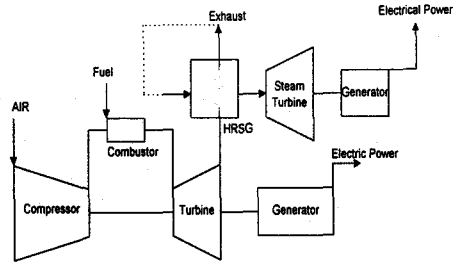


Fig. 7 Thermal efficiency vs. specific output relationship of combined cycle.

다. 즉 Fig. 6과 Fig. 7로부터 단순사이클과 복합 사이클에서 최적 사이클 변수들의 값들에 크게 차이가 있음을 각 그림 우측 곡선의 기울기가 크게 다르다는 사실로부터도 쉽게 알 수 있다. 다시 말하여 단순사이클의 경우 열효율은 압축비 증가와 함께 증가하지만 복합사이클의 경우 최고 효율은 오히려 전자의 경우보다는 낮은 압축비와 높은 터빈입구온도에서 형성되고 있음을 알 수 있다. 따라서 복합사이클의 경우 최적 설계점은 가스터빈을 포함하여 HRSG (Heat Recovery Steam Generator: 크게 Economizer, Evaporator, Condenser로 구성됨)의 성능을 고려해서 결정되어진다. 일단 설계점 성능해석이 이루어지면 부분부하에서의 성능은 이미 결정되어지고 더 이상 탈설계 영역에서 최적 사이클을 찾을 수 있는 여지는 없게 된다. 최적조건에서 사이클이 정해지고 이때 엔진의 규모가 정해지면(sized) 다른 작동 상태에서의 성능은 엔진의 각 부분품의 결합에 의하여 이루어지게 되며 이를 탈설계 성능해석이라 한다.

## 2.2. 탈설계 성능해석

설계점이 결정되면 엔진의 각 부분품에 대한 설계가 이루어지고 이때 압축기 담당자는 압축기의 각 부분품의 공력학적 (aero-dynamically), 기계구조적(mechanically) 결합을 함으로서 동익과 정익이 서로간에 결합을 이룰 수 있도록 설계한다. 그러나 설계된 부분품이 성능시험을 거쳐 우수한 성능으로 개발이 된다 하여도 가스터빈 시스템 전체와는 독립적으로 작동할 것이므로 결합된 가스터빈이 제대로 작동하기 위해서는 부분품간의 결합을 다시 이루기 위한 노력이 뒤따라야 한다. 부분품간의 작동 조건에 대한 결합은 부분품간의 유량보존, 모멘텀, 에너지의 연속 등의 법칙을 만족시켜야 한다. Fig. 8과 9에는 탈설계 성능해석 시 요구되는 압축기 성능도와 터빈 성능도의 예를 보여주고 있다. 각 그림의 종축은 압축비 및 팽창비를 나타내고 횡축은 ISA = 0 (288°K, 101.325 kPa) 때의 온도와 압력으로 교정된 유량을 나타내고 있다. 실선은 각 회전수를 설계점 때의 회전수로 나눈 값이며 점선은 효율을 나타내고 있다. 그

림에서 회전수  $N/N_{DP} = 1.0$ 선에 나타난 사각형 표시는 엔진의 설계점을 표시하고 있다. 일반적으로 탈설계 성능해석 시에 다루어야 할 사항으로 대기온도가 성능에 미치는 영향, 부분부하 시 성능 해석이다. 대기온도 변화는 보통  $-40^{\circ}\text{C}$ 로부터  $40^{\circ}\text{C}$ 까지 변화한다. 부하 변화의 경우 엔진이 변화할 전 작동영역에 대한 성능해석을 수행함으로써 제작되는 엔진이 처하게 될 수도 있을 극한 작동 조건을 사전에 파악하여 설계에 반영한다. 특히 압축기의 동익과 정익에서 발생할 지도 모를 실속이나 서지 현상에 대한 가능성을 사전에 분석하여야 한다.

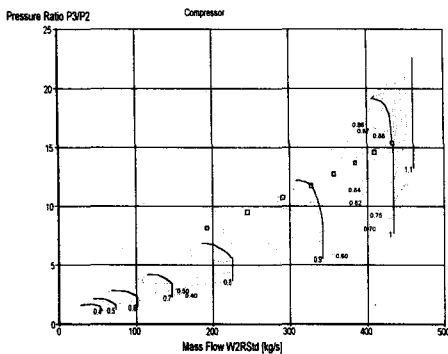


Fig. 8 압축기와 터빈 성능도

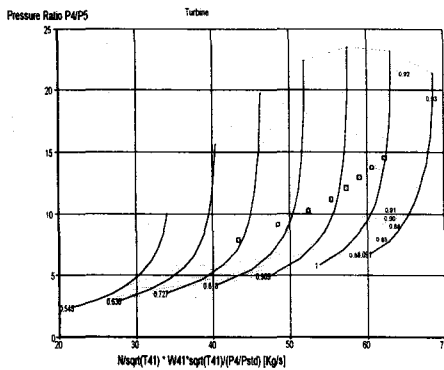


Fig. 9 터빈 성능 특성도

엔진의 가용출력은 터빈에서 제공하는 출력의 상당부분(약 50%이상)을 압축기 및 보조기관 그

리고 기계손실에 의하여 소모되고 남은 출력을 지칭한다. 엔진은 부하 변화 시 압축기 및 터빈의 성능 곡선을 입력자료로 하여 열역학적인 평형을 유지하면서 출력을 생산하므로 각 RPM에서 결합된 엔진이 제공할 수 있는 가용출력을 조사하는 것은 기동과 정지가 빈번히 이루어지는 엔진의 경우 매우 중요하다. 탈설계 성능 시에는 부하 변화에 따라 작동점이 설계점 때에서의 효율 값을 유지하지 못하고 오히려 떨어지게 되며 정확한 부분부하 성능예측을 위해서는 각 부분품에 대한 정확한 성능곡선도의 확보가 필수적이다. 만일 적절한 성능곡선도가 없는 경우 유사한 성능곡선도를 Scaling하여 사용하게 되는데 이때 Reynolds Number Index(RNI)의 적용치가 매우 중요한 변수로 작용한다. 가스터빈의 성능은 가스터빈 내를 통과하는 유체에 의해서 유로 벽면에 발생하는 경계층의 발달로 인하여 크게 영향을 받는데 이러한 통과유량 및 효율에 대한 경계층의 영향은 레이놀즈의 함수로 표시되어지며 부분품 담당자로부터 입수된 성능곡선도에 설계점을 고정할 때 반영어진다. 레이놀즈에 의한 수정은 압축기와 터빈에만 한정한다.

### 2.2.1. 부분부하 제어

여기서 부분부하라 함은 대상엔진이 설치된 상태에서 주어진 대기 온도에서 정격(Full load)부하의 퍼센트를 가리킨다. 부분부하를 계산하는 데는 다음과 같은 4가지 사항에 대하여 유의를 하여 진행된다. 첫째, 엔진의 작동 영역 계산이다. 엔진이 작동하게 될 대기온도의 조건은 엔진에 매우 큰 영향을 미치는 중요 변수이다. 둘째로 부분부하 영역에서 엔진이 처하게 되는 압축비, 마하수 등 무차원 수에 대한 계산이다. 세 번째로는 엔진을 구성하는 부분품들에 대한 성능이다. 가스터빈엔진의 성능은 엔진을 구성하는 중요부품들의 성능에 의하여 크게 좌우된다. 마지막으로 설계점 성능 및 개념설계에 대한 정보이다. 대상엔진의 중요 변수에 대한 사항은 부분부하 성능해석을 진행하기 전에 수행되며 탈설계 성능해석 과정을 통하여 반복적인 과정을 통하여 진행된다. 다시 표현하면 탈설계 성능해석 결과는 최종 엔진의 사양에 매우 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 앞에서 지

적된 대로 엔진의 성능은 무차원 변수에 의하여 표현되는데, 한 변수의 값이 결정되어지는 경우 다른 변수의 값도 자동적으로 결정되어 진다. 엔진의 부하가 변화하는 경우 엔진의 작동점은 대기 조건과 상관없이 독특한 작동선을 형성하게 된다. 주어진 작동조건에서 입구에서의 온도와 압력에 대한 정보를 통하여 실제 성능에 대한 변수들의 값들이 쉽게 계산되어 질 수 있다. 이러한 값들은 후에 엔진 시험이나 비정상 조건에서의 엔진의 성능 변화 추이를 논하게 될 때 필요하게 사용되어 진다. 현재와 같이 단일 축의 엔진인 경우 압축기, 터빈 및 출력을 위한 Generator 모두가 단일 축상에 설치되며 터빈이 압축기 및 출력 모두를 담당하게 된다. 이 경우 언급된 출력이 성능 해석을 위한 기준 변수로 사용되게 되는데 이는 출력 변화와 상관없이 회전축이 동일한 속도로 회전하기 때문이다. 두 번째 변수는 회전 속도이다. 압축기 출구에서의 온도와 압력은 대기온도의 저하와 회전속도의 증가에 의하여 크게 증가한다. 주어진 대기온도에서 터빈 입구온도는 공급 연료의 감소와 함께 급격히 감소한다. 그러나 압축기 출구온도와 압력은 매우 작은 비율로 감소하는데 이는 회전속도가 일정하게 유지되기 때문이다. 터빈 입구온도의 감소와 함께 엔진 전체 효율이 감소하고 따라서 비연료 소모율은 악화하는데 이때 압축기 효율도 감소한다.

### 2.2.2. 불안정 유동 제어

가스터빈은 부분 부하 시 성능이 크게 저하되는 점이 문제점으로 지적되어 왔다. 이같이 부분 부하에서 성능이 좋지 않은 경우 특별히 고려해야 할 부분이 엔진의 실속 또는 서지 현상이다. 가스터빈의 실속 현상은 각 단의 날개에서 영각이 증가하면 양력계수가 증가하다 최대치에 이른 후 실속각에 도달하면서 양력계수는 급격히 감소하고 흐름이 날개 표면에서 박리된다. 이러한 현상을 엔진의 실속이라 하며 실속은 입사각 뿐 아니라 유체의 흐름 상태 즉 레이놀즈 수에 의해서도 크게 영향을 받는다. 실속은 다단압축기의 일부분에서 일어나는 불안정한 현상이나 실속이 발전하면 전 단에 걸쳐 유동이 불안정하게 되어 이를 서지라 한다. 일반적으로 엔진을 가속하는 경우 낮은

회전 속도에서 연료 주입량이 증가하는 경우 회전수가 증가하면서 회전방향 속도 성분이 증가하게 되면 영각이 증가하여 실속이 발생할 가능성이 커지게 되며 일정한 회전속도에서도 공기의 축방향 유속이 감소하는 경우 영각이 증가하여 실속의 가능성이 커지게 된다. 그러나 산업용의 경우와 같이 엔진이 정지하여 작동하는 경우 축방향 유속 증가에 의한 영각 감소는 무시해도 좋다고 볼 수 있다. 그러나 대기온도가 증가하는 경우에는 유속이 감소하여 실속의 가능성은 커지게 된다. 실속이 일어나면 압축기 성능은 급격히 떨어지고 따라서 압축기 소요동력은 증가하게 되며 결과적으로 로터가 요하는 동력은 증가하지만 터빈이 공급할 수 있는 동력은 이 경우 오히려 감소하여 회전수는 감소하게 된다. 회전수 감소는 다시 공기유량의 감소를 유발하여 순간적으로 공기흐름이 역류하는 현상이 발생하므로 고온부(연소기, 터빈)는 유량 감소로 온도가 치솟게 되어 손상이 오게 된다. 이같은 불안정한 엔진의 실속현상을 방지하기 위하여 다축 로터를 적용하여 저회전 속도에서 회전수를 다르게 하여 압축기의 전방단에서도 충분한 압력비가 유지되도록 하는 방법이 있으며 서지 블리드 밸브를 적용하는 방법 그리고 가변정의를 적용하는 방법 등이 있다. Fig. 10에서는 압축공기를 마지막 단에서 압축기 입구공기의 10%까지 추출하는 경우 주요 성능 변수들의 변화를 살펴보았다. 그림에서 보는 바와 같이 압축공기를 추출하는 경우 서지마진이 큰 비율로 증가하여 서지 가능성은 감소하겠지만 동시에 터빈 입구온도, 출구온도 등이 증가하여 엔진의 열용량상 문제가 발생하게 되며 비연료 소모율은 증가하는 반면, 압축비, 팽창비, 공기유량 등이 감소하여 엔진은 매우 비경제적으로 작동하게 될 것임을 알 수 있다. 따라서 Handling Bleed의 사용 시에는 터빈입구온도, 압축비 등이 과도하게 증가하여 엔진의 구조역학적 한계에 봉착하는지 여부도 아울러 검토가 되어야 할 것이다. Fig. 11은 압축기의 VGV (Variable Guide Vane)의 각도를 조절하여 유량을 증가시키는 경우 엔진 작동 특성의 변화를 보여주고 있다. VGV의 각도 변화에 의한 유량, 효율 및 압축비 변화는 다음의 식을 따른다.

$$a_{VG} = \frac{\delta W [\%]}{\delta VG [^\circ]}$$

$$b_{VG} = \frac{\delta(P/P-1) [\%]}{\delta VG [^\circ]}$$

$$c_{VG} = \frac{\delta \eta [\%]}{\delta VG [^\circ]^2}$$

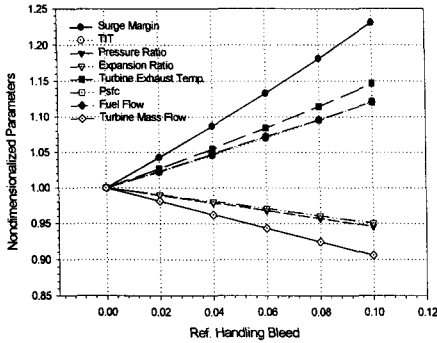


Fig. 10 Influence of Bleed-off of compressed air to gas turbine performance.

여기서 압축기 유량 및 압축비는 입력자료인 VGV의 각도에 비례한다. 탈설계 성능해석 과정에서 각 부분품의 특성곡선도로부터 임해진 압축비, 유량, 효율 등은 다음의 공식에 의하여 수정되어진다.

$$\eta = \eta_{map} * (1 - \delta VG^2 \frac{C_{VG}}{100})$$

그림에서 VGV의 각도 변화에 의하여 유량이 4% 증가하는 경우 압축기 성능도 상에 나타난 작동선의 변화이다. 각도 변화에 의하여 설계점에서의 압축비와 유량이 모두 증가하였으며 효율 역시 증가하는 것으로 나타났다. 서지 마진도 약 17% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그림에서 각 회전속도 및 작동선이 전체적으로 일정거리씩 오른쪽으로 이동하였음을 볼 수 있다. 이상과 같이 Handling Bleed와 VGV를 사용하여 압축기의 실속 또는 서지 현상을 방지 할 수 있으나 이 두 가지 방법이 성능에 미치는 영향에는 차이가 있다.

일반적으로 Bleed-off 밸브는 VGV를 사용하는 것보다 비용이 훨씬 저렴하며 보다 무게가 가벼우며 작동성 역시 안정적이다. 그러나 Bleed-off 밸브의 경우 VGV에 비하여 Psfc가 급격히 감소하는 경향이 있어 성능면에서 큰 손실이 발생하는 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 Bleed-off 밸브 사용의 경우 저속에서는 서지 마진이 감소하지만 고속에서는 오히려 서지 마진이 증가하는 경우도 발생하는 것으로 알려져 있다.

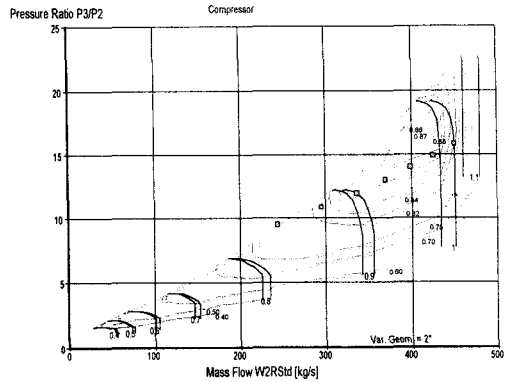


Fig. 11 Effect of mass flow increase by variable guide vane(VGV) angle shown on compressor characteristic.

VGV는 항상 입사각을 일정하게 유지하여 줌으로써 서지 가능성을 낮추기 위한 방편으로 사용된다. 그러나 두 경우 모두 작동선이 낮아지는 결과를 초래한다.

### 2.3. 과도상태 성능해석

엔진의 과도성능해석은 엔진의 성능 변수가 시간에 따라 변화하는 작동 영역을 다루는 것을 말한다. 단순사이클 엔진이 정상상태에서 작동 중 제어계통의 지시에 의하여 연료공급이 증가되면 엔진내의 온도가 상승하고 터빈 출력은 압축기 및 기타 보조기관 구동과 기계손실이 요하는 동력이 상으로 증가하게 된다. 이렇게 부분품간 동력의 불균형은 회전축의 가속으로 이어지며 가속은 연료 유량에 부합하는 정상상태까지 계속된다.



### 2.3.1. 과도상태의 엔진 거동 특성

#### 2.3.1.1. 급작 가속/감속

엔진의 급작가속은 작동 중 짧은 시간에 걸쳐 정상상태 시 연료 분사량의 20~100%를 증가시키는 것을 말하며 주로 항공용 가스터빈의 경우에 해당된다. 일반적으로 급작 가속으로 인한 온도 상승으로 균열이나 산화 등 부품의 손상이 일어나는 일은 없는데 이는 가속이 매우 짧은 시간 내에 일어나기 때문이다. 그러나 과도 거동 시간이 짧아지는 만큼 수명도 감소하는데 이는 혹심한 열응력이 발생하기 때문이다. 일반적으로 급작 가속이 시작되는 시점에서 엔진이 가장 크게 손상을 받지만 가속 및 감속을 시간에 의해서도 적지 않은 영향을 받는다.

#### 2.3.1.2. Hot slam 또는 Bodie

Hot slam 또는 Bodie 특성은 엔진 고온부 전체가 열전달에 의해 충분히 고온에 도달한 상태에서 적어도 5분 이상 작동한 후 Idle 상태까지 급작스럽게 감속한 후 낮은 회전 속도에서 미처 변화된 조건의 열전달이 이루어지지 않은 상태에서 다시 원래의 동력 수준까지 급작 가속하는 경우를 가리킨다. Hot slam의 경우 연소기나 터빈은 마치 연료유량이 추가적으로 증가 한 것같이 되며 서지선 전체가 낮아지는 격이 된다. 이같은 엔진의 거동은 주로 엔진 개발 시 엔진을 미리 혹독한 조건에 처하게 함으로서 정상작동 중 있을 수도 있는 서지 영향을 미리 예측하기 위한 것이다. 주로 항공용 가스터빈에 해당된다.

#### 2.3.1.3. Cold start-accel

Cold start-accel은 주로 군사용 가스터빈에 해당되는데 가스터빈 엔진을 해가 지면 정지시켜 가스터빈 내부의 온도가 대기온도와 같게 한 후 아침에 Idle까지 시동을 한 후 다시 급작 가속으로 최대 출력까지 가속시키는 것을 말한다. 일반적으로 정상적인 가동 시 엔진은 5분, 때로는 30분 이내에서 열전달이 충분히 일어나지만 Cold start-accel의 경우 디스크나 블레이드와 케이싱간의 열응력 증가 차이로 최대의 간극이 발생하게 되므로 이 경우 텀 간극의 증가로 서지선이 낮아지는 결과를 빚게 된다.

#### 2.3.1.4. Shaft breakage

때때로 발전기의 회전축이 파손되는 경우 압축기로부터 터빈이 분리되면서 터빈축 회전축이 가속(Overspeed)되는데 이때 회전속도가 급작 가속 때 보다 큰 비율로 증가함으로 인하여 터빈 디스크가 파열되는 수도 있어 안정성 이에 대한 사전 고려가 요구된다. 이러한 축 파손 시에는 제어시스템에 의하여 즉각적으로 주 연료 공급장치를 봉쇄하고 Bleed 밸브를 열어서 터빈으로 들어가는 공기를 억제하는 방식을 취하는데 이때 서지가 발생하기도 하는데 이 경우 서지는 오히려 바람직한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 이러한 제어시스템은 중량이 크고 고가이다.

#### 2.3.1.5. Emergency shut down

엔진 작동이 비상시 차단되는 경우 Idle까지 천천히 저속이 된 후 약 5분 정도 엔진 작동이 안정되게 한 후 주 연료 밸브를 차단하면서 이루어진다. 그러나 때때로 잘못된 엔진 정지 신호에 의하여 엔진이 비상 정지되는 경우 서지가 발생하여 엔진에 손상이 발생할 수도 있다.

### 2.3.2. 과도상태 시 엔진의 서지, 회전실속

(rotating stall), 고정실속(locked stall)

축류 가스터빈에서 압축비와 영각이 증가하여 흐름이 흡입면에서 분리되면 박리가 일어나고 실속이 일어나는데 일반적으로 익손실(airfoil loss coefficient) 계수가 최저치의 2배이상에 이르면 stall(실속)이 발생했다고 본다. 축류 압축기에서는 실속이 발생한 상태에서도 엔진 작동이 가능한 것으로 보고 있다. 이것은 때로 정상적인 작동 중 압축기 전반부에서 실속이 일어난 동안에도 압축기 후반부에서는 실속 없이 작동되어 흐름이 순화되면서 전반부의 실속현상을 완화시킬 수 있기 때문이다. 서지는 전 엔진 작동 영역 내에서 발생할 수 있으며 블레이드의 실속현상이 극심하여 더 이상 역압력 구배를 견디지 못할 정도가 되면 흐름이 순간적으로 끊어지면서 큰 폭음 소리와 함께 연소화염이 압축기 입구와 터빈 출구사이를 오가는 것이 보이게 되는데 이때 빨리 연료공급을 감소시키고 Bleed 밸브를 열어서 작동선을 낮추지 않으면 엔진이 크게 손상을 입게 된다. 회전실속

은 주로 40-50%의 회전 속도에서 회전방향으로 국부적인 실속이 발생하는 상태를 말한다. 이것은 실속이 일어난 단의 앞단에 위치한 단의 유량이 증가하여 실속으로부터 멀어지는데 반하여 실속단의 다음 단은 유량이 감소하면서 실속이 전염되는 것을 말한다. 이러한 회전 실속이 일어나면 익렬에 심한 진동이 일어난다. 고정실속(Locked stall)은 서지가 일어난 후 저속 영역에서 주로 일어난다. 이 경우 회전 실속이 회복되다가 다시 서지가 일어나는 것과는 달리 실속채널이 엔진 속도의 약 50% 속도로 회전하며 진행된다. 회전실속이 전방단 일부에서 발생하는 것과는 달리 고정실속은 압축기 유로 전체에 걸쳐 발생한다. 고정실속이 일어나는 중 압축비, 효율 등은 약 50%정도로 떨어진다. 고정실속은 터빈 입구온도가 계속상승하고 있음에도 엔진 작동속도가 감소하는 것으로 알 수 있다.

### 2.3.3. 과도상태 시 엔진 작동선

과도상태 작동 시에는 엔진의 작동이 정상상태에 비하여 보다 더 불안정한 상태에 직면하게 되며 엔진의 작동선이 정상적인 작동선에서 상당히 벗어나게 된다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 단순스플 터보 축 엔진의 경우 가속상태에서 무부하 곡선을 따라 가속이 이루어지다가 정격 회전 속도에 이른 후에는 속도 곡선의 왼쪽을 시계방향으로 이동하는 것으로 알려져 있다. 그러나 감속 시에는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 speed 곡선 우측을 시계방향으로 회전 후 무부하 곡선을 따라서 감속하는 것으로 알려져 있다. 이러한 과도 상태에서의 작동선의 궤적은 가속률이나 감속률이 감소할수록 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 또 3.4.1절의 과도성능 시 거동에서 언급한 실속, 서지 현상을 피하기 위하여 가변익이나 Bleed 밸브를 보편적으로 사용한다. Bleed valve나 가변익을 사용하는 경우 작동 곡선을 낮추는 효과를 주므로 엔진의 불안정한 작동을 피할 수 있다. 마지막으로 이러한 과도 상태 엔진 제어를 위한 하드웨어 시스템을 구성한 후 고려해야 할 부분이 엔진 제어시스템의 응답 특성이다. 응답특성은 제어장치에 요구되는 유압장치(Hydro - mechanical system)가 과도상태 시 신호음에 늦게 반응하는

지체(lag) 작용과 신호음을 접수한 후 기계적으로 새로운 위치로 이동하기까지 걸리는 지연(Delay) 작용이 있다. 이러한 지연 및 지체작용으로 걸리는 시간을 고려한 감지기(sensor)를 제어시스템 구성에 포함하여 실시간(real time) 온도와 압력을 측정할 수 있는 기능이 필요하다.

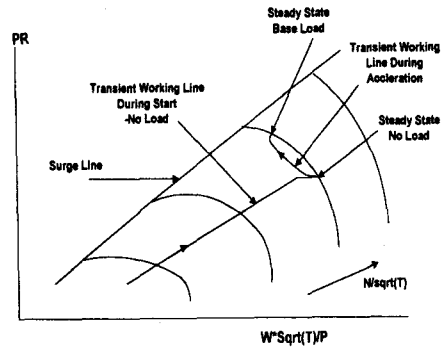


Fig. 12 Transient working lines during acceleration Manoeuvre.

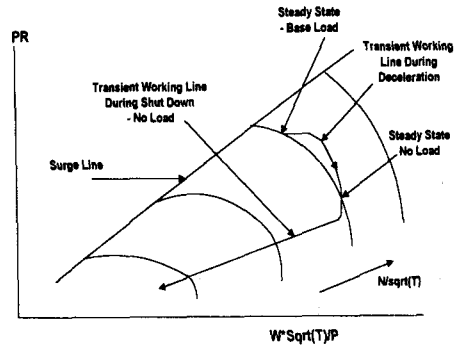


Fig. 13 Transient working lines during deceleration.

### 3. 결론

본 연구에서는 국내의 전력 수요의 증가에 따라 점차 그 수요가 증가하고 있는 발전용 가스터빈의 성능해석에 관한 기술 및 문제점을 분석하여 보았다. 가스터빈은 그 개발에 막대한 비용과 기술이 필요하고 개발 기간 역시 장시간을 요하기 때문에 핵심기술을 국산화하기까지는 오랜 시간과

노력이 뒤따라야 한다. 그러나 관련 기술의 대부분이 첨단 기술 분야에 속하고 부가 가치성이 매우 높으며 또 기타 산업에의 기술파급의 효과가 막대하다는 점에서 한국과 같이 자원이 부족하지만 인력이 풍부한 나라에서는 기술 집약적인 선진 공업국으로 산업형태를 변화하기 위하여 반드시 극복해야 할 분야로 판단된다. 그러나 기술 보유국들이 관련기술의 파급을 극력 억제하기 때문에 기술확보가 쉽지 않은 분야이다. 그러나 최근 가스 터빈 분야에 대한 국내의 관심도 높아지고 또 전문가들의 저변도 확대되어 학계, 연구계, 산업계가 협력하여 정책적인 차원에서 일관성 있게 도전한다면 그리 어려운 문제도 아니라고 판단된다. 국내에서도 이미 압축기, 터빈, 연소기 등의 공력설계 부분에 대해 이론적인 기반이 상당부분 구축되었다고 보아지며 이제는 개발품에 대하여 지속적인 Test Rig상의 성능 시험 결과를 거쳐 가스 터빈 부분품 뿐 아니라 엔진 전체에 대한 독자적인 성능특성자료를 확보할 수 있도록 지속적인 연구 노력이 수반되어야 한다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. J.D. Mattingly, 1996, "Elements of Gas Turbine Propulsion", McGrawHill Book Company.
2. Philip.P. Walsh and Paul Fletcher, 1998, "Gas Turbine Performance" BlackwellScience.
3. Thermoflow, Inc, 1994, "GASCAN Interactive Software for Advanced Gas Turbine System Design" Manual.
4. 홍용식, 1983, "가스 터빈 엔진 이론과 응용", 제 2 개정판.
5. Cohen, H., Rogers, G.F.C, and Saravanamutto, H.I.H, 1987, "Gas Turbine Theory", 3rd Edition, pp. 309-369
6. Bathie, W. W., 1996, "Gas Turbines", pp. 348-367
7. GE Power Generation, 1996, "38th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar"
8. GE Power Generation, 1997, "39th GE Turbine State-of-the-Art Technology Seminar"
9. Soo Y. Kim, 1998, "Performance Analysis of 50KW Turbogenerator GasTurbine Engine" IGTI Gas Turbine & AeroEngine Congress. ASME 98-GT-209 June 2-5 Stockholm, Sweden.
10. 김수용, 오군섭, 1997, "74KW 산업용 가스 터빈 엔진 성능 해석", 추계학술대회, 대한기계학회, 1997. 11. 5 - 7
11. 김수용, 오군섭, 최병철, 1998, "3압 복합발전 플랜트 사이클에 대한 성능해석", 한국추진 공학회 논문집, Vol. 2, No.2 Aug.
12. 김수용, 손호재, 박무룡, 윤의수, 1997, "2압 증기 분사 복합사이클에 대한 성능해석" 한국기계연구원 논문집, 12월호 p.p. 75-86.