

막오염에 의한 압축기 성능 저하가 발전용 가스터빈 설계점 성능에 미치는 영향에 관한 연구

서진식* · 손정락** · 김재환*** · 김동섭**** · 노승탁**

Performance degradation due to compressor fouling of an industrial gas turbine operating at design point condition

J. S. Seo*, J. L. Sohn**, J. H. Kim***, T. S. Kim****, S. T. Ro**

Key Words: Gas turbine (가스터빈), Compressor (압축기), Fouling (막오염), Performance degradation (성능저하), Mass flow rate (유량), Stage efficiency (단효율), Power (출력), Thermal efficiency (열효율)

ABSTRACT

Operating performance of industrial gas turbines in combined cycle power plants depends upon atmospheric conditions. Compressor fouling caused by airborne particles in the atmosphere and their adhesions on compressor blades is one of critical phenomena related to the performance degradation of industrial gas turbines. Compressor fouling provokes increase of pressure loss in inlet duct, decrease of mass flow rate of intake air and decrease of compressor stage efficiency. In this study, impacts of compressor fouling on the performance of an industrial gas turbine operating at design point condition are investigated analytically. As results, it is found that the reduction of produced power with decreased mass flow rate of intake air caused by narrowed flow area by the adhesion of airborne particles on compressor blades is the most dominant impact on the gas turbine performance by the compressor fouling phenomena.

1. 서 론

최근 들어 발전 설비의 환경 친화성과 에너지의 효율적인 이용에 관한 관심이 증대되면서 세계적으로 발전시장에서 복합 화력이 차지하는 비중이 점차 커지고 있다. 국내 발전 산업에서도 복합 화력의 역할이 점차 증대되어 2001년 기준으로 복합 화력 설비의 규모는

약 12,870MW로서 국내 전체 발전 설비의 약 25%를 점하고 있다⁽¹⁾.

복합 발전설비는 크게 가스터빈, 폐열회수 증기발생기, 그리고 스팀터빈으로 구성되며 가스터빈과 스팀터빈은 대략적으로 약 2:1의 비율로 출력을 생산한다. 복합 발전설비는 가스터빈의 고온 작동으로 인한 블레이드들의 주기적 교체, 각종 작동조건의 변화에 따른 성능의 민감성 등의 이유로 인하여 life cycle cost 중에서 유지 보수비용이 차지하는 비율이 비교적 큰 편이다. 이와 관련하여 Boyce⁽²⁾는 복합 발전 설비의 운용 비용이 초기 설치비용 10%, 연료 조달 비용 75%, 유지 보수비용 15%로 구성된다고 분석한 바 있는데 유

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 한국항공우주연구원 터보기계연구그룹

**** 인하대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : jlsohn@snu.ac.kr

지 보수비용이 초기 설치비용을 상회함을 알 수 있다. 따라서 복합 발전 설비의 경제적인 운용을 위해서는 설비가 최적의 성능을 유지할 수 있도록 하여 사용 연료 공급량을 최대로 절약함으로써 연료 조달 비용을 최소화함은 물론 최상의 작동 조건을 유지하여 부품의 훼손 가능성을 최소화함으로써 유지 보수비용을 줄여야 한다.

복합 발전설비는 대기상태의 공기를 흡입하여 가스터빈에서의 압축, 연소 및 팽창과정을 거치면서 일차 출력을 생산하게 된다. 그런데, 대기 상태의 공기에는 일정량의 습도와 함께 먼지를 비롯한 각종 부유 입자들이 포함되어 있어 이러한 물질들이 공기와 함께 입구부를 통하여 압축기로 흡입된다. 흡입 물질들은 습기로 인하여 압축기 블레이드에 점착되어 막오염 (fouling)을 유발하여 블레이드 형상을 변화시킴으로써 압축기의 성능을 왜곡시켜 궁극적으로는 전체 설비의 성능을 저하시키는 요인이 된다. Fig. 1은 부유물질 점착에 의한 막오염이 형성된 압축기 블레이드의 한 예를 보여 주고 있다.

막오염에 의한 복합발전 설비의 성능 저하를 방지하기 위하여 가스터빈 입구부에 각종 필터 (filter)들을 설치하지만 이러한 필터들만으로는 막오염을 궁극적으로 방지할 수 없을 뿐만 아니라 필터에 의한 입구부 압력 강하로 인한 성능 저하가 동반되는 단점이 있다⁽³⁾. 필터를 통과하여 압축기로 흡입되는 각종 부유 물질들은 압축기 블레이드에 점착됨으로써 본격적으로 막오염을 발생시키게 된다. 압축기 블레이드에 점착된 부유 물질들은 블레이드의 형상을 왜곡시키는 결과를 가져오게 되어 압축기의 단 효율 (stage efficiency)을

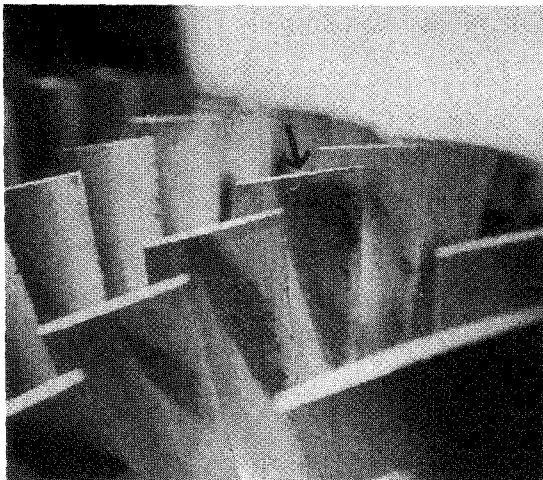


Fig. 1 Example of fouled compressor blades

감소시키게 될 뿐만 아니라, 공기 흡입 유로를 축소시켜 흡입공기 유량을 감소시킨다. 따라서 이와 같이 막오염에 따른 입구부 압력 손실, 흡입 공기 유량의 감소, 압축기 단 효율의 감소 등의 현상들은 가스터빈을 포함한 복합발전 전체의 성능을 저하시키는 원인이 된다.

막오염으로 인한 복합 발전 설비의 성능저하를 방지하기 위한 보다 적극적인 방법으로는 설비 운전 중 정기적으로 압축기를 세척 (washing)함으로써 블레이드에 점착된 물질들을 제거하는 방법이 있다. 세척의 방법으로는 설비를 운전하면서 세척하는 on-line washing과 설비의 정지 중 세척에 해당하는 off-line washing이 있다⁽⁴⁾. 일반적으로 세척제는 주로 물을 이용하지만 경우에 따라서는 세척 시 특수 화학 세척제나 고히입자 (nutshell)를 분사하는 경우도 있다⁽²⁾. 이러한 압축기 세척작업은 추가의 설비 비용이 요구될 뿐만 아니라 세척 과정 중 설비 가동을 중단시키거나 (off-line), 비정상적인 운전 상태 (on-line)가 유지 되어야 하므로 적절한 세척 주기의 선택이 매우 중요하다. Fig. 2는 Boyce⁽²⁾로부터 인용된 자료로서 washing에 따른 출력의 변화 사례를 보여주고 있다. 따라서 막오염과 관련된 설비의 유지 보수와 관련해서는 막오염으로 인한 가스터빈의 성능 저하 정도를 예측하고 이를 기반으로 최적의 세척 주기를 결정하여야 한다.

막오염이 가스터빈 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 세계적으로 복합발전 설비가 본격적으로 보급되기 시작하던 1980년대 중반부터 최근까지 지속적으로 진행되어 오고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 본 연구에서는 이와 같은 선행 연구들을 기반으로 국내 복합 화력발전소에 설치되어 가동 중인 GE사의 Frame 7F모델 제품을 기반으로 압축기 막오염에 따른 각종 현상들이 가스터빈 설계점 (design point) 성능에 미치는 영향을 해석적으로 고찰

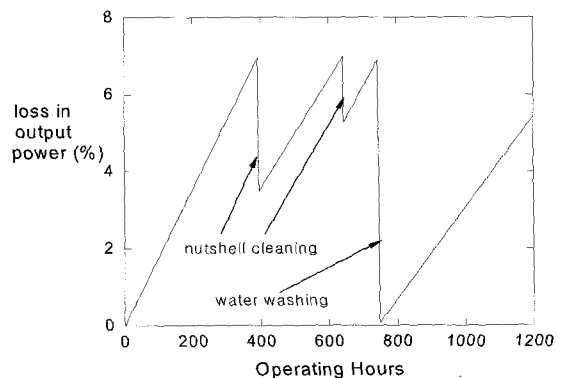


Fig. 2 Effect of on-line cleaning on the loss of power output⁽²⁾

함으로써 막오염에 따른 가스터빈의 성능 저하 정도를 정량적으로 분석하였다.

2. 발전용 가스터빈 성능저하예측 모델링

막오염에 따른 가스터빈의 설계점에서의 성능 거동을 분석하기 위해서는 가스터빈의 설계점 성능해석 기법을 확립하고 이를 기반으로 막오염에 따른 각종 현상들과 관련된 변수들의 변화가 성능에 미치는 영향을 분석하여야 한다.

복합 발전 설비를 구성하고 있는 발전용 가스터빈은 터보 샤프트형 엔진으로서 대기 상태의 공기를 흡입하여 압축기에서의 압축과정을 통과하면서 가압된 상태에서 연소기로 공급된 연료와 혼합시켜 연소반응을 거치면서 고온 고압의 연소 가스를 생성한다. 이 연소 가스는 터빈에서의 팽창과정을 거치면서 저온 저압의 상태로 변하면서 동력을 생성하게 되며, 생성 동력 중 압축기 구동에 필요한 동력을 제외한 나머지 동력은 발전기를 통하여 전력 (electric power)으로 출력된다. 이러한 과정 중 높은 터빈 입구 온도를 유지하기 위하여 압축기 후방에서의 고압 공기 중 일부를 연소기를 통과시키지 않고 터빈으로 공급하여 터빈 블레이드 등 고온 부품의 냉각 공기로 활용한다.

GE사의 Frame 7F 모델은 18단 축류 압축기와 역류형 회박 저공해 연소기, 그리고 3단 축류 터빈으로 구성된 단축 (single shaft)형이며, 터빈 중 셋째 단 (3rd stage) 로터 (rotor) 블레이드를 제외하고 모든 단의 스테이터(stator)와 로터는 공기냉각 블레이드로 구성되어 있다. 이 모델의 설계점에서의 주요 사양은 Kim⁽⁸⁾에서 사용된 Table 1과 같다.

Table 1. Design specifications of GE7F model gas turbine engine

System	Rotational Speed, RPM	3600
	Electric power, MW	150
Compressor	Number of stages	18
	Pressure ratio	13.5
	Stage efficiency, %	91.2
Combustor	Fuel	LNG
	LHV, kJ/kg	50056
Turbine	Number of stages	3
	Exhaust gas flow, kg/s	417
	Firing temperature, °C	1270
	Exit temperature, °C	600
	Stage efficiency, %	88.8

본 연구에서는 이러한 냉각 블레이드가 적용된 발전용 가스터빈의 설계점 성능저하를 예측하기 위하여 Kim⁽⁸⁾에 의하여 개발된 발전용 가스터빈 동특성 부분 부하 성능 해석 프로그램 중 설계점 해석 모듈을 활용하였다. 설계점 성능해석 과정을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- (1) 입구부 압력 손실이 고려된 압축기 입구 압력을 구하고, 압축기의 전체 압력비로부터 각 단에서의 압력비를 구한다.
- (2) 압축기 각 단에서의 단열효율에 해당하는 단 효율과 각 단에서의 압력비로부터 각 단 출구 온도와 압력을 구한다.
- (3) 설계점 사양에서 주어진 터빈 입구 온도를 연소기 출구 온도라고 가정하고 연소기에서의 공급 연료 유량을 구한다.
- (4) 연소기 입구 압력과 연소기에서의 압력 손실량을 이용하여 터빈 입구 압력을 구하고, 가스터빈 배기부에서의 압력 손실량으로부터 터빈 출구에서의 압력을 구한 다음 이로부터 터빈에서의 전체 압력비 및 각 단의 압력비를 구한다. 단, 이 경우 설계점 운전 조건에서는 터빈 입구온도는 항상 일정하다고 가정한다.
- (5) 터빈 각 단에서의 단열 효율에 해당하는 단 효율과 각 단에서의 압력비로부터 각 단 출구 온도와 압력을 구한다.
- (6) 압축기 후방으로부터 터빈 각 단에 공급되는 냉각 공기량을 고려하여 각 단에서의 생성 출력을 구한 다음 터빈 전체 생성 출력을 구한다.
- (7) 터빈 생성 출력에서 압축기 구동에 필요한 동력을 제외한 나머지로부터 가스터빈 출력을 구하고, 연소기에 공급된 연료의 유량과 발열량을 이용하여 가스터빈의 열효율을 구한다.

3. 막오염에 의한 발전용 가스터빈 성능 분석

3.1 막오염에 의한 압축기 성능변화에 관한 고찰

막오염이란 공기 중에 부유중인 각종 오염입자들이 습기와 함께 압축기로 유입되어 압축기 블레이드에 점착되는 현상이다. 막오염으로 인한 가스터빈의 주요 성능 저하 요인으로는 (1) 부유 물질이 입구부 필터에 점착함으로 인하여 발생하는 입구부 압력 손실의 증가,

(2) 점착 물질에 의한 블레이드 조도 (roughness) 증가에 따른 압축기 단 효율 (stage efficiency)의 저하, 그리고 (3) 점착 물질에 의한 공기 흡입 면적의 변화에 의한 흡입 공기 유량의 감소 등이 있을 수 있다.

막오염이 가스터빈의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 막오염 현상이 압축기의 각종 성능변수들에 미치는 영향을 고찰하여야 하며, 이를 위해서는 압축기내에서의 부유 물질에 대한 거동에 대한 이해가 필요하다. 이와 관련하여 송태원 등⁽⁹⁾은 축류 압축기내에서 부유 입자의 크기 및 분포가 블레이드에의 점착 정도에 미치는 영향을 해석적으로 분석한 바 있다. 본 연구에서는 이와는 별도로 막오염에 의해서 가스터빈 압축기의 성능이 변화되었을 경우 이에 따른 가스터빈 전체 성능의 거동에 대해서 고찰하기로 한다.

발전용 가스터빈이 설치된 조건과 주변 환경에 따라 차이는 있을 수 있겠으나 일반적으로 발전용 가스터빈에 있어서의 막오염에 의한 입구부 압력 손실은 최대 150mmH₂O까지 증가하고, 흡입 공기유량은 최대 5%까지 감소하는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 또한 Zwebek과 Pilidis⁽⁷⁾에 의하면 막오염에 의한 압축기 단 효율은 절대값 기준으로 최대 2.5%까지 감소할 수 있다. 그리고 막오염과 관련된 부유 입자들은 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 주로 5단 이하의 압축기 앞단에서 점착하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이와 같은 데이터들을 기본으로 막오염으로 인한 입구부 압력 손실이 최대 150mmH₂O (대기압 기준으로 1.1616%), 흡입 공기 유량의 최대 감소량이 5%, 그리고 압축기 단 효율의 최대 감소량이 2.5%일 경우에 있어서의 가스터빈의 성능 거동을 분석하고자 한다. 막오염이 발생할 경우 이러한 각종 성능 저하 현상들은 동시에 나타나지만 각 현상들을 분리해서 고찰해 볼 필요가 있다. 예를 들어 입구부 압력 손실을 줄이기 위한 필터 교체 시기와 압축기 세척시기의 상대적 중요성에 대한 판단은 입구부 압력 손실과 압축기 단 효율의 각각의 저하에 따른 가스터빈 전체 성능 거동에 대한 이해를 기반으로 이루어져야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 막오염으로 인하여 발생 가능한 압축기 성능 저하와 관련된 각각의 변수들의 영향이 전체 가스터빈 성능에 미치는 영향에 대해서 분석하고자 한다.

이러한 변수들은 실제로는 서로 상관관계를 가지고 있고, 그 상관관계가 일반적으로 압축기 성능선도를 통하여 표현된다. 그러나 본 연구에서는 설계점 부근에서의 변수들의 변화폭에 따른 상관관계가 그다지 크

지 않다고 가정하여 세 가지 변수들의 영향을 각각 독립적으로 취급하였다.

3.2 설계점 성능저하 분석 결과

공기 중의 부유물질들이 유입되면서 입구부에 설치된 필터에 점착되면 압력 손실이 발생하게 되며 이로 인하여 압축기 입구 압력이 영향을 받게 된다. Fig. 3은 입구부 압력 손실이 가스터빈의 성능에 미치는 영향을 나타내고 있다. 압축기에서의 압력비가 고정된 상태에서 입구부 압력 손실의 증가에 따른 압축기 입구 압력 강하 때문에 터빈 입구 압력은 입구부 압력 손실이 없을 경우보다 낮아진다. 터빈 입구 온도가 고정된 상태에서 터빈 입구 압력이 낮아지게 되면 상대적으로 터빈에서의 압력비가 감소하게 되며 결과적으로 터빈 출구 온도는 증가하게 되고, 이는 결국 터빈에서 생성되는 출력이 감소하는 결과를 가져온다. 압축기에서의 압력비가 고정되어 있으므로 압축기에서 소모되는 동력은 입구부 압력에 따라 변하지 않는 반면 터빈 생성 출력이 감소하면 전체 가스터빈의 생성 출력은 입구부 압력 손실의 증가에 따라 감소하게 된다. 또한, 입구부 압력 손실은 압축기 내의 온도에는 영향을 미치지 않는다. 즉, 터빈 입구 온도가 고정된 상태에서 연소기에서의 연료 소모량은 거의 일정하게 되므로, 입구부 압력 손실의 증가에 따른 출력의 감소로 인해 열효율은 감소하게 된다.

압축기 블레이드에 부유 물질의 점착에 따른 막오

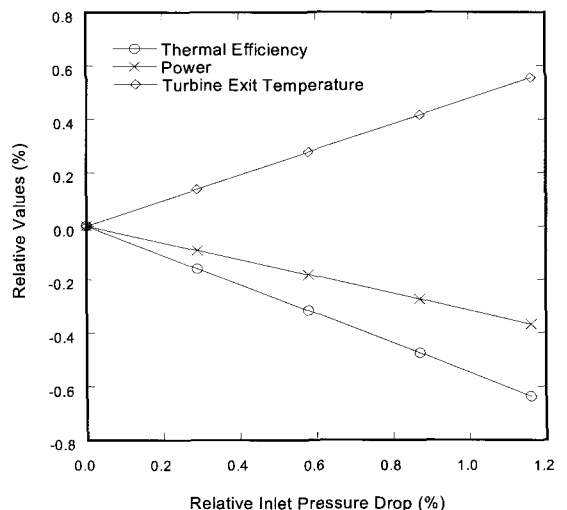


Fig. 3 Effect of inlet pressure drop on the gas turbine performance

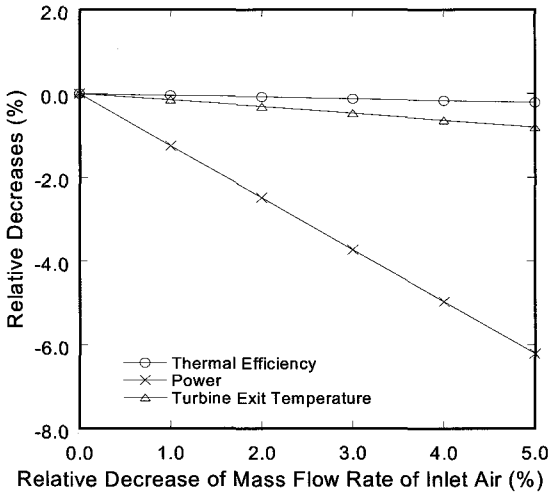


Fig. 4 Effect of reduction of intake air on the gas turbine performance

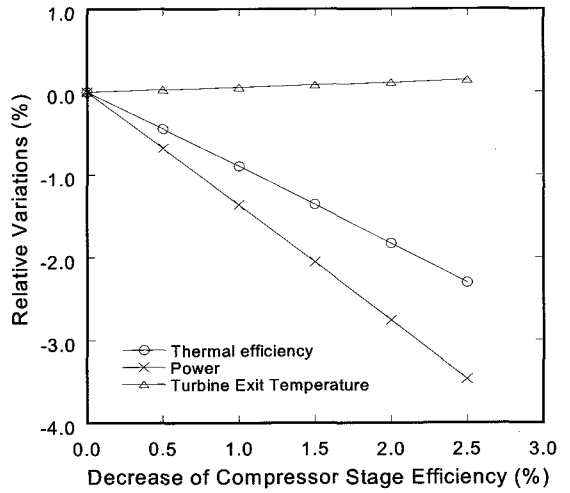


Fig. 5 Effect of the decrease of compressor stage efficiency on the gas turbine performance

염이 발생할 경우 블레이드 사이를 통과하는 공기 유량이 감소하게 되어 결과적으로 압축기에 흡입되는 공기의 유량을 줄이는 효과가 있게 된다.

Fig. 4는 흡입공기 유량의 감소가 가스터빈 성능에 미치는 영향을 보여주고 있다. 가스터빈의 생성출력은 흡입공기 유량의 감소에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 터빈 출구 온도도 흡입 공기 유량의 감소와 함께 낮아짐을 알 수 있는데, 이는 흡입 공기 유량이 감소하게 되면 가스터빈 내에서의 공기 속도가 감소하게 되어 터빈 출구에서의 전압(total pressure)이 감소하게 되고, 그로 인해 압력비가 커지기 때문이라고 판단된다. 또한 흡입 공기 유량의 감소에 따른 열효율의 감소량은 생성 출력의 감소 경향에 비하여 미미함을 알 수 있다.

막오염으로 인하여 부유 물질이 압축기 블레이드에 점착되면 블레이드의 조도를 증대시켜 결과적으로 압축기의 단 효율이 감소하게 된다. 특히 압축기의 경우에는 터빈과 달리 블레이드의 형상이 압축기 성능에 절대적인 영향을 미치므로 부유 물질의 점착에 의한 성능저하는 매우 심각한 요인이 될 수 있다. 이러한 압축기 단효율의 영향을 고찰하기 위하여 18단 압축기 각 단계에서의 단 효율이 동일하게 감소하였을 경우의 가스터빈 성능에 미치는 영향을 Fig. 5에 분석하였다. 예상대로 압축기 단 효율이 감소하게 되면 생성 출력과 열효율이 감소하는데, 이는 압축기 단 효율 감소에 따라 압축기 출구 온도가 상승하게 되어 압축기에서 소모되는 동력이 증가하여 결과적으로 터빈 생성 출력

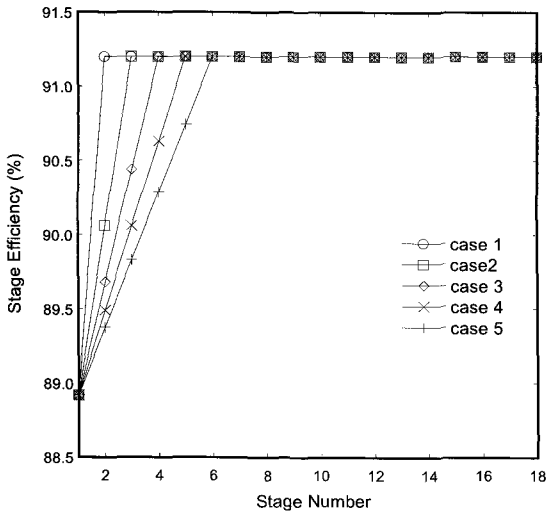
중에서 압축기 구동에 필요한 출력이 차지하는 비중이 커지기 때문이다. 또한 압축기 단 효율 감소에 따른 압축기 출구 온도의 증가는 터빈 블레이드 냉각에 필요한 냉각 공기 유량의 온도 상승으로 인한 터빈유로 온도가 상승하였기 때문이다.

앞서 기술한 바와 같이 압축기 막오염에 의하여 영향을 받는 압축기 단 수는 입구부로부터의 5단 정도에 해당된다. 이는 송태원 등⁽⁹⁾에서 분석된 바와 같이 큰 입자의 부유 물질일수록 앞단에 점착되고 뒷단으로 갈수록 점착되는 입자의 크기가 작아지기 때문이다. 이와 같은 실제적인 상황을 모사하기 위하여 Fig. 6(a)와 같이 5단까지 점차적으로 단 효율이 감소할 경우의 가스터빈 성능 저하 정도를 분석하였다. 그 결과 Fig. 6(b)에서와 같이 막오염의 영향을 받는 압축기 단의 수가 늘어날수록 생성 출력과 열효율 등 가스터빈의 성능저하가 더 심해짐을 확인할 수 있다.

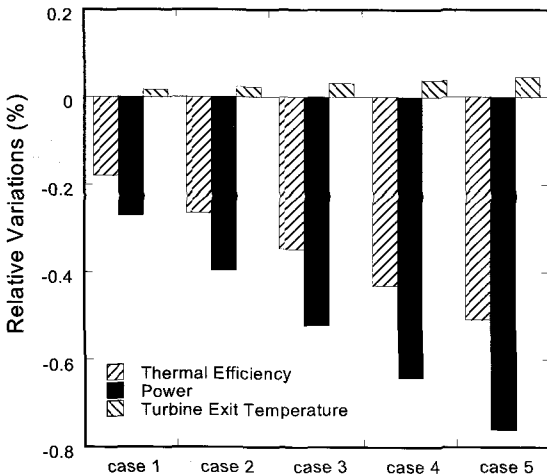
Fig. 7 ~ 9는 위의 결과들을 가스터빈 성능과 관련된 변수들을 중심으로 다시 정리한 것이다. 각 그림의 횡축은 각각의 변수(흡입 공기유량, 압축기 단 효율 및 입구부 압력 손실량)들의 막오염에 따른 최대 감소량에 대한 상대적 감소량을 백분율로 나타낸 것으로서 아래와 같이 각각 정의하였다.

흡입공기 유량의 상대적 감소량:

$$\Delta \dot{m}_{relative} = \frac{\Delta \dot{m}_{fouling}}{\Delta \dot{m}_{max, fouling}} \times 100\% \quad (1)$$



(a) Distributions of compressor stage efficiency



(b) Gas turbine performance with different cases described in (a)
Fig. 6 Effect of distributions of compressor stage efficiencies on the gas turbine performance

압축기 단효율의 상대적 감소량:

$$\Delta\eta_{relative} \equiv \frac{\Delta\eta_{fouling}}{\Delta\eta_{max, fouling}} \times 100\% \quad (2)$$

입구부 압력손실의 상대적 감소량:

$$\Delta P_{relative}^{inlet} \equiv \frac{\Delta P_{fouling}^{inlet}}{\Delta P_{max, fouling}^{inlet}} \times 100\% \quad (3)$$

여기서, 막오염으로 인한 흡입공기 유량의 최대 감소량 ($\Delta \dot{m}_{max, fouling}$)은 설계점 흡입공기 유량의 5%,

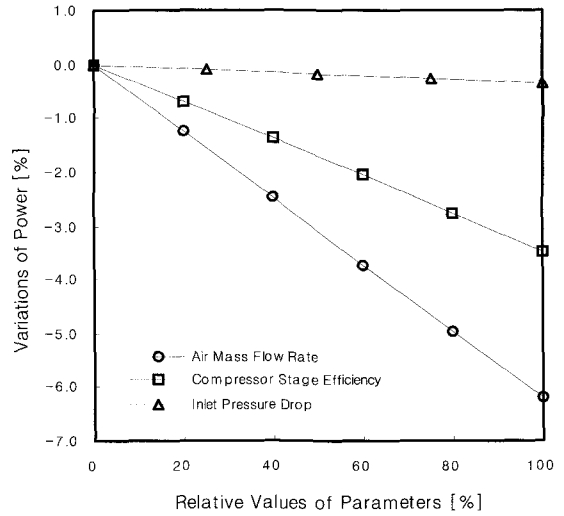


Fig. 7 Degradations of gas turbine power due to compressor fouling

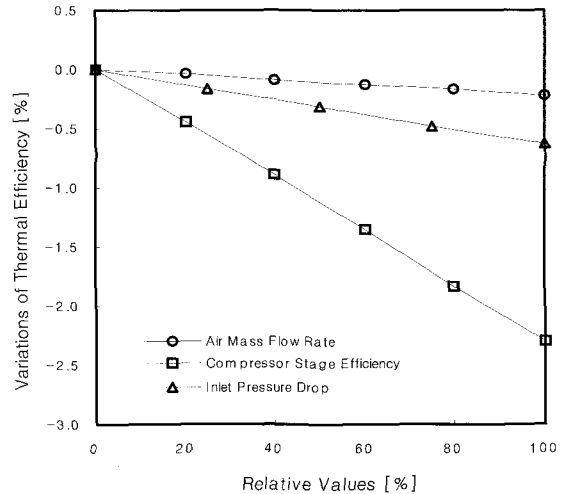


Fig. 8 Degradations of thermal efficiency due to compressor fouling

압축기 단효율의 최대 감소량 ($\Delta\eta_{max, fouling}$)은 설계점 효율의 2.5%, 그리고 입구부 압력손실의 최대값 ($\Delta P_{max, fouling}^{inlet}$)은 150mmH2O로 각각 설정하였다.

이 세 가지 그림을 비교해 보면 Fig. 7에서와 같이 압축기 막오염에 따른 흡입 공기 유량의 감소가 생성 출력을 최대 6.2%까지 감소시킴으로써 가스터빈 성능에 가장 민감하게 반응함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 8과 같이 가스터빈 열효율의 경우에는 흡입 공기 유량의 감소에 따라 큰 영향을 받지 않고 오히려 압축기 단

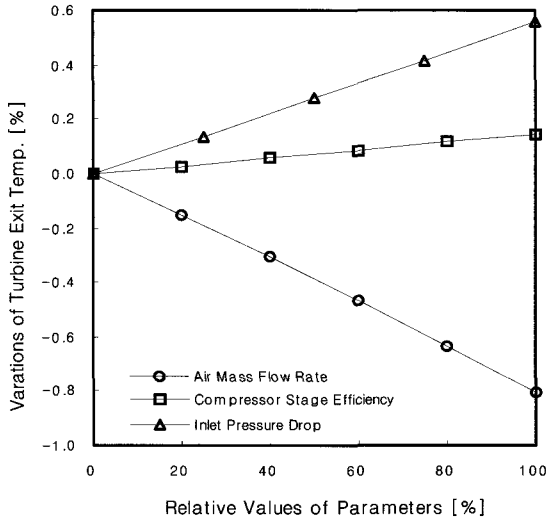


Fig. 9 Variations of Turbine exit temperature due to compressor fouling

효율에 따라 크게 변화하며 최대 2.3%정도 감소함을 알 수 있다. 그리고 터빈 출구 온도는 압축기 단 효율이 감소하거나 입구부 압력 손실이 증가할수록 증가하며, 흡입 공기 유량이 감소함에 따라 감소한다 (Fig. 9). 그러나 터빈 출구 온도의 변화량은 생성 출력 및 열효율에 비하여 매우 작으므로 압축기 막오염은 터빈 출구 온도에는 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

복합 발전용 가스터빈이 설치된 주변 환경 조건에 따른 각종 부유 물질들의 흡입에 따른 압축기 막오염 현상이 가스터빈의 설계점 성능에 미치는 영향을 해석적으로 분석한 결과 다음과 같은 주요 결론들을 도출하였다.

- (1) 공기 중 부유물질이 가스터빈으로 흡입되면서 일차적으로 정착되는 입구부 필터에 의한 입구부 압력 손실은 가스터빈의 열효율과 생성출력을 감소시킨다.
- (2) 압축기 막오염에 의한 유로 면적의 감소에 따른 흡입공기 유량의 감소는 가스터빈 생성 출력 감소와 관련된 가장 중요한 요인이다.
- (3) 부유 물질의 압축기 블레이드 점착에 의한 블레이드 표면 조도의 증가에 따른 압축기 단 효율의 감소는 열효율을 급격하게 저하시킨다.
- (4) 복합발전의 경우 가스터빈 후방의 폐열회수 증기

발생기와 증기 터빈의 성능과 밀접한 관련이 있는 터빈 출구 온도는 압축기 막오염에 따른 입구부 압력 손실이나 압축기 단 효율 감소의 경우 오히려 상승하지만 그 크기가 크지 않기 때문에 복합발전의 전체 성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것이다.

- (5) 압축기 막오염에 따른 가스터빈 성능 저하는 생성 출력에 가장 민감한 영향을 미치기 때문에 막오염에 따른 설비의 정비 여부를 판단할 경우에는 생성 출력의 거동으로부터 판단하는 것이 가장 합당할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) 김시문, 2002, "복합화력 온라인 성능감시용 성능해석모델 평가," 기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합 심포지움 논문집(대한기계학회편) pp. 2564~2569.
- (2) Boyce, M. P., 2002, *Gas Turbine Engineering Handbook*, Gulf Professional Publishing, 2001.
- (3) Meher-Homji, C. B., 2001, "Compressor fouling - causes and solutions," *Global Gas Turbine News*, Vol. 40, No. 3, pp. 4~9.
- (4) Stalder, J.-P., 2001, "Gas turbine compressor washing state of the art: field experiences," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 123, pp. 363~370.
- (5) Saravanamutto, H. I. H., 1985, "A preliminary assessment of compressor fouling," *ASME Paper* 85-GT-153.
- (6) Aker, G. F. and Saravanamutto, H. I. H., 1989, "Predicting gas turbine performance degradation due to compressor fouling using computer simulation techniques," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 111, pp. 343~350.
- (7) Zwebek, A. and Pilidis, P., 2001, "Degradation effects on combined cycle power plant performance, Part 1: Gas turbine cycle component degradation effects,"

ASME Paper 2001-GT-0388.

- (8) Kim, J. H., 2000, *Analysis on transient behavior of gas turbines for power generation*, Ph.D Thesis, Seoul National University.
- (9) 송태원, 김동섭, 김재환, 손정락, 노승탁, 2001, “해석적 방법을 이용한 가스터빈 축류 압축기의 파울링 현상 해석,” 대한기계학회 논문집 B권, 제 25권, pp. 1721~1729.