

발전용 가스터빈 1단 동익 열전달 해석

홍용주* · 최범석* · 박병규* · 윤의수*

The Heat Transfer Analysis of the First Stage Blade

Yong-Ju Hong, Bum-Seog Choi, Byung-Gyu Park and Eui-Soo Yoon

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Blade(블레이드), Cooling passage(냉각유로), Heat transfer(열전달), Temperature distribution(온도분포)

Abstract

To get higher efficiency of gas turbine, The designer should have more higher turbine inlet temperature (TIT). Today, modern gas turbine having sophisticated cooling scheme has TIT above 1,700°C. In the Korea, many gas turbine having TIT above 1,300°C was imported and being operated, but the gas with high TIT above 1,300°C in the turbine will give damage to liner of combustor, and blade of turbine and etc. So frequently maintenance for parts enduring high temperature was performed.

In this study, the heat transfer analysis of cooling air in the internal cooling channel (network analysis) and temperature analysis of the blade (Finite Element Analysis) in the first stage rotor was conducted for development of the optimal cooling passage design procedure. The results of network analysis and FEM analysis of blade show that the high temperature spot are occurred at the leading edge, trailing edge near tip, and platform. so to get more reliable performance of gas turbine, the more efficient cooling method should be applied at the leading edge and tip section. and the thermal barrier coating on the blade surface has important role in cooling blade.

1. 서론

터빈입구온도(Turbine Inlet Temperature)의 상승은 가스터빈의 고효율화 및 비출력의 증대를 위하여 불가피하나, 가스터빈의 소재로 내열재료를 사용하더라도 재질의 허용 온도의 상승에는 한계가 있으며, 연소기 라이너(linear), 터빈 블레이드 등의 가스터빈 고온부품의 수명 및 신뢰성을 보장하기 위해, 온도를 가능한 낮고 균일하게 유지하기 위한 냉각의 필요성이 제기된다. 한편 고온부품의 냉각을 위해서는 압축기로부터 추출된 고

압의 냉각공기가 주로 사용되어지며, 냉각을 위한 과도한 양의 압축공기의 사용은 가스터빈의 효율 감소를 수반하기 때문에, 손실을 최소화하면서도 최대의 냉각효율을 얻을 수 있는 효과적인 냉각기술이 필요하다.

가스터빈의 주요 핵심 고온부품인 터빈 블레이드의 냉각방식으로는 연소가스의 온도가 1,300 ~ 1,600 K 정도 일 때 사용되는 내부냉각(대류냉각(convective cooling), 충돌냉각(impingement cooling))과 연소가스의 온도가 1,600 K 이상의 경우 사용되어지는 외부냉각(막냉각(film cooling), 투과냉각(transpiration cooling), 열차폐코팅(Thermal Barrier Coating))으로 분류할 수 있다.

대류냉각(convection cooling)은 압축기로부터 추출된 냉각공기를 요철(rib), 못형핀(pin-fin) 배열 등이 부착된 굴곡이 있는 내부 유로로 통과시킨

* 한국기계연구원 열유체환경연구부
Email : yjhong@kimm.re.kr
TEL:(042)868-7366 FAX:(042)868-7335

후, 후연부(trailing edge)로 배출시켜 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)을 냉각하는 방법이며, 충돌냉각(impingement cooling)은 고속의 냉각공기를 전연부(leading edge), 후연부에 충돌시켜 국부적으로 발생하는 고온부를 냉각시키는 방법이다. 막냉각(film cooling)은 냉각구멍을 통해 정해진 분사각으로 냉각공기를 블레이드 외부로 분사하여 고온의 연소가스와 블레이드의 표면 사이에 얇은 막을 형성함으로써 연소가스가 블레이드 표면과 직접 접촉하는 것을 방지하는 냉각방법이다. 최근에는 다공성 물질 재질의 블레이드를 사용하여 블레이드 표면에 냉각공기 막을 형성시키는 투과냉각(transpiration)이 연구되고 있으나, 복잡한 구조와 제작상의 어려움으로 인하여 아직 연구단계에 머물고 있어, 상용 가스터빈에서는 아직 채택되지는 못하고 있는 실정이다.

가스터빈의 1단 동익은 고온의 작동환경 뿐만 아니라 회전으로 인해 높은 열응력 및 원심응력 상태에서 운전된다. 1,300 °C급 가스터빈의 1단 동익은 고압단의 압축기에서 추출한 냉각공기를 가스터빈 내부 또는 외부의 유로를 통해 동익으로 공급하여, 대류냉각 및 막냉각 방법에 의해 냉각이 수행된다.

1,300 °C급 가스터빈의 1단 동익의 경우, 동익 내부에 냉각을 위한 유로(serpentine passage)가 설치되어, 압축기로부터 추출되어 블레이드로 공급되는 냉각공기의 유량을 제어하며, 유로의 압력면과 흡입면에는 열전달 증가를 목적으로 하는 요철이 설치되어 있으며 블레이드의 상부(tip)와 후연에 냉각공기의 배출을 위한 유로가 설치되어 있다. 한편 1,300 °C급 1단 동익의 경우에도 GE사의 7FA+, Westinghouse의 W501F 모델 가스터빈의 경우 전연부 막냉각(showerhead film cooling)을 사용하고 있다.

냉각블레이드의 설계의 주요한 과정은 블레이드의 공력 특성으로부터, 블레이드 표면에서의 열전달 특성을 평가한 후, 블레이드의 온도가 허용온도 이상으로 상승하는 것을 방지하기에 적합한 내부 냉각유로를 최적설계하는 과정이다. 이 과정에서 블레이드 냉각유로 설계의 적합성을 평가하기 위해 필요한 주요한 기술로는, 블레이드 표면 열전달 계수 예측기술, 내부 냉각유로 유로망해석 기술, 블레이드 온도 해석 기술 등이 있

으며, 이러한 기술들의 적합성을 검증하기 위해서는 블레이드 표면 및 끝벽(endwall) 열전달 계수 측정 기술, 회전이 있는 냉각유로의 열전달 측정기술, 요철(rib) 유로의 압력강하 및 열전달 특성 측정 기술, 막냉각의 유용성 측정기술, 충돌 냉각 열전달 특성 측정 기술 등이 요구된다.

2. 해석방법

냉각블레이드에서 냉각유로는 블레이드 표면의 고온 연소가스로부터 전달된 열로 인하여 블레이드의 온도가 허용온도 이상으로 상승하여 발생하는 블레이드의 손상을 방지하는 것이 주목적이다. 그러나 과도한 냉각공기의 사용은 터빈의 효율 저하를 수반하게 되기 때문에 최적의 냉각유로의 설계 및 제작이 요구되고, 이를 위해서는 블레이드 내부의 냉각유로의 열적 특성의 평가가 필수적이다.

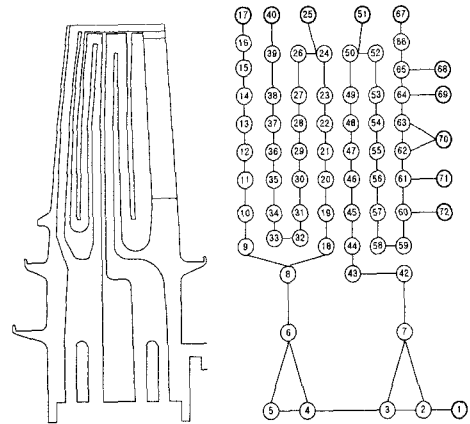


Fig. 1 Network configuration

냉각유로내의 냉각공기의 유량 및 냉각블레이드의 열전달 특성을 평가하기 위해서는 냉각공기의 열유동특성에 대한 해석이 필요하며, 본 연구에서는 이를 위해 1300°C급 발전용 가스터빈의 견본품 블레이드에서 추출한 기본 설계 자료를 토대로 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 상용 유로망 해석 프로그램인 FLOWMASTER²™를 사용하여 1차원 유로망 해석을 수행하였다. 유로망 해석을 위해 해석의 대

상인 냉각 블레이드내의 냉각공기 유로의 기하학적 형상 및 열전달 특성을 고려하여 다음과 같은 유로요소로 분류하였고, Fig. 1의 유로망을 구성하였다. 한편 냉각유로 설계의 적합성을 파악하기 위해서는 냉각의 유용성을 구하여야 하며 이는 냉각블레이드의 온도해석을 통해 구할 수 있다. 냉각 블레이드 온도해석은 SolidEdge™를 사용하여 만든 3차원 모델을 기반으로, 유한요소법 해석을 위한 격자를 생성하여 상용 열구조해석 프로그램 Ansys™를 이용하여 해석 수행하였다. 온도해석의 수행결과는 다시 유로망 해석에 반영되어 새로운 블레이드 경계면에서의 온도와 열전달계수의 계산이 수행되어야 하며, 이과정의 반복을 통해 최종적인 블레이드내의 온도장을 구하였다. 유로망 해석 및 온도해석을 위해서는 내부 냉각 유로의 열전달 계수 및 압력 강하 특성, 블레이드 외부 열전달 계수 및 플랫폼, tip에서의 열전달 계수 등의 자료가 요구된다. 본 연구에서는 기존의 문헌을 조사하여, 각각 요소에서의 열전달 계수를 구하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 외부열전달계수

본 연구에서는 1300℃급 가스터빈의 1단 동익 표면의 열전달 계수를 구하기 위해 ALFA 프로그램을 사용하였다.

Fig. 2는 공력해석을 통해 구한 익형의 속도분포이다. Fig. 2의 x축의 좌표는 정체점으로부터의 거리를 cord 길이로 무차원화한 값으로 음의 부호는 흡입면을 나타내고 양의 부호는 압력면에서의 값을 나타낸다.

Table 1은 hub, mean, tip의 3 단면에서 익형 cord 길이 및 층류로부터 난류로의 천이시작점 및 천이종료점을 나타낸 것으로, 압력면에서의 천이가 흡입면에 비해 일찍 시작됨을 알 수 있다. Fig. 3은 mean 단면에서 천이점 및 모델 블레이드의 냉각유로를 도시한 그림이다. 1300℃급 가스터빈의 1단 동익은 그림에서 알 수 있는 바와 같이 압력면과 흡입면의 천이점 부근에 상대적으로 저온의 냉각공기를 공급하는 냉각유로가 배치되어 있는 구조를 지니고 있다.

Table 1 Characteristics of blade

		C(mm)	P(mm)	Lam. to turb. transition(x/P)	
				Start	End
Hub	Pressure	115.80	323.7	0.042	0.098
	Suction			0.154	0.209
Mean	Pressure	109.2	279.8	0.058	0.128
	Suction			0.092	0.161
Tip	Pressure	105.5	253.4	0.050	0.129
	Suction			0.090	0.167

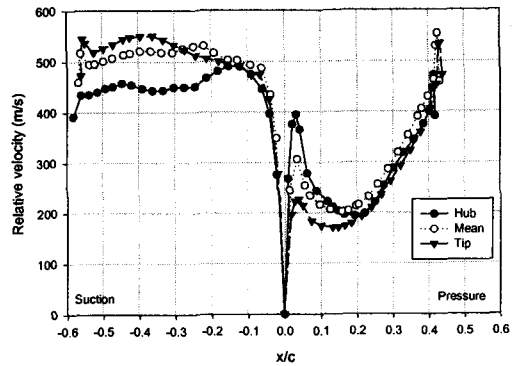


Fig. 2 Velocity on the blade surface

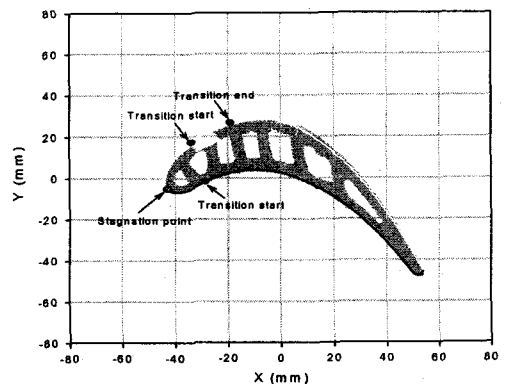


Fig. 3 Laminar to turbulent transition point at mean section

Fig. 4는 예측된 블레이드 표면의 열전달 계수의 분포이다. 열전달계수는 익형의 leading edge에서 5,000이상의 매우 큰 값을 나타내고 있으며, 익형을 따라 압력면 및 흡입면으로 진행하면서 급격한 감소가 발생하였다. 이후 유동의 천이점에서 급격한 열전달 계수의 상승이 발생하며, 난

류로의 천이가 끝나고, 경계층이 성장하면서 완만한 열전달 계수의 감소가 발생하는 것으로 나타났다.

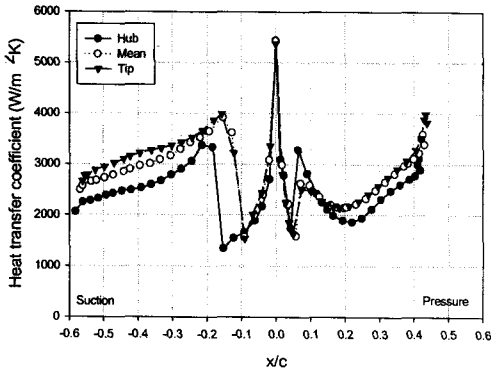


Fig. 4 External heat transfer coefficient on the blade surface

3.2 열전달해석

FLOWMASTER2™로 구한 냉각유로 내의 냉각 공기의 온도 및 열전달계수를 경계조건으로 하여, ANSYS™를 사용하여 블레이드 내부의 온도를 해석한 후 이때 구한 냉각유로 표면의 온도가 이전 해석 단계의 값과 수렴할 때까지 해석과정을 반복적으로 수행하는 방법으로 유로망 및 온도해석을 수행하였다.

Fig. 5는 블레이드 하부에 위치한 냉각공기 입구의 압력변화에 따른 냉각공기 유량의 변화를 나타낸 그림이다. 냉각 공기 입구의 압력이 9 Bar에서 13 Bar로 증가함에 따라 냉각공기 유량은 증가하나, channel 1, 2, 3 각각의 냉각 유로로 공급되는 질량유량 비율은 냉각유로 입구 압력 변화에 큰 영향없이 거의 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이때 블레이드 내부 냉각 유로로 공급되는 냉각 공기의 양은 leading edge를 냉각하는 Channel 1이 20% 미만으로 가장 작게 예측되었으며, Trailing edge로 냉각공기를 배출하는 Channel 3이 전체 냉각 공기 유량의 60% 이상을 차지하여 가장 크게 예측되었다.

본 연구에서는 열차폐코팅에 의한 영향을 고찰하기 위해 TBC 1 ($0.0833 \times 10^3 \text{kW}$), TBC 2 ($4.6667 \times 10^3 \text{kW}$), TBC 3 ($0.75 \times 10^3 \text{kW}$)의 3가지 경우(냉각유로 입구 냉각공기 압력 13 Bar) 및 냉

각공기 유량에 의한 영향을 고찰하기 위해 TBC 2의 경우 냉각공기 유량이 고온가스 유량의 2.722%(입구압력 11 bar), 3.062%(입구압력 12 bar), 3.355% (입구압력 13bar)인 경우에 대해 해석을 수행하였다.

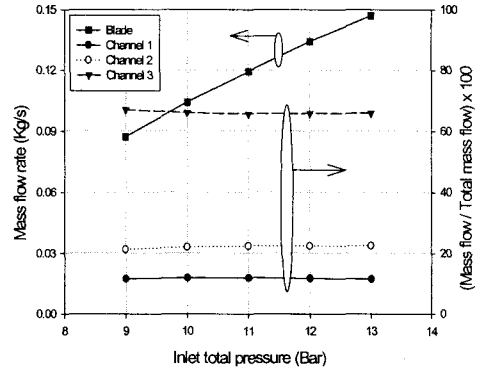


Fig. 5 Mass flow rate through cooling passage of blade with different inlet pressure

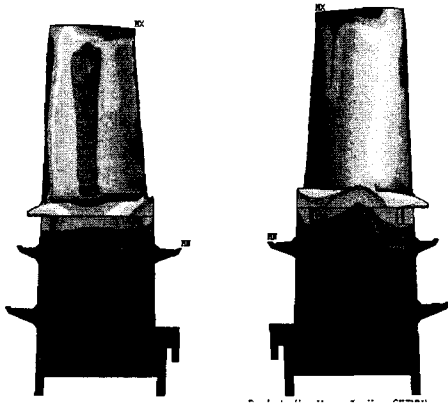
Fig. 6은 TBC 2, Ma/Mg=3.355%의 경우 블레이드의 온도 해석 결과로, 블레이드 표면에서의 온도를 도시한 그림이다. 최고 온도는 블레이드 tip의 trailing edge 부근에서 발생하며, 이때 온도는 약 961.5℃로 예측되었다. 한편 최저 온도는 블레이드의 하부에서 발생하며, 온도는 430.6℃로 나타났다. 900℃이상의 고온이 예측되는 블레이드 표면 부위는 leading edge 부와 trailing edge부의 tip에서 발생하였으며, 플랫폼에서도 고온 부위가 발생하는 것으로 예측되었다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 TBC 2의 경우 익형의 50% span, 즉 블레이드 mean 단면에서 냉각공기유량 변화에 따른 블레이드 표면온도 분포 및 냉각효율을 나타낸 그림이다. 이때 냉각효율의 정의는 다음과 같다.

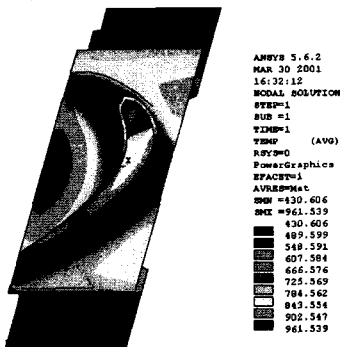
$$\eta = \frac{T_g - T_w}{T_g - T_c} \quad (1)$$

Fig. 7의 온도분포는, leading edge에서 최고 온도인 약 900℃의 온도가 발생하고, 블레이드 표면을 따라 압력면과 흡입면으로 진행됨에 따라 점차 온도감소하여 흡입면의 경우 약 750℃, 압력면의 경우 700℃의 온도까지 강하한 후, 경계

층의 유동이 난류로 천이됨에 따라 급격한 온도 상승이 발생하는 것으로 나타났다. 한편 냉각유량이 변화하는 경우에도 온도분포의 경향은 거의 동일하게 발생하는 것으로 예측되었으며, 냉각공기 유량이 2.722%에서 3.355%로 증가하는 경우 50% span에서 발생하는 최고온도는 약 16.6℃의 강하가 발생하는 것으로 나타났다.



a) Pressure side b) Suction side



c) Top view

Fig. 6 Temperature distribution of blade

Bell⁽¹⁾에 의하면 열차폐코팅이 적용되는 비냉각 방식의 터빈블레이드의 경우 터빈입구온도가 약 1100℃, 공기 냉각방식의 경우 1400℃까지 견딜 수 있으며, Kobayashi⁽²⁾에 의하면 동익의 경우 약 900℃, 정익의 경우 950℃의 터빈 표면 허용 온도를 나타내는 것으로 발표한 바 있어, 본 해석에서의 온도 수준은 허용 가능한 수준으로 판단된다.

Fig. 8은 식(1)로 정의된 냉각효율로, leading edge에서 고온 연소가스로 인한 열부하가 가장 크게 발생하여, 가장 낮은 약 30% 정도의 냉각효율을 나타내고, 최대의 냉각효율은 압력면의 경우 leading edge로부터의 거리가 약 4cm, 흡입면의 경우 약 8cm의 거리에서 55% 이상이 나타났다. 이와 같은 냉각효율은 Fullagar⁽³⁾의 결과와 비교해보면 약 50%의 냉각효율을 나타내고 있고, 비교적 타당한 결과로 판단된다.

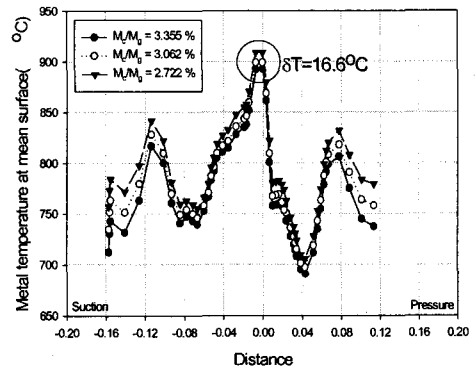


Fig. 7 Temperature distribution at 50% span of blade with different mass flow rate of cooling air

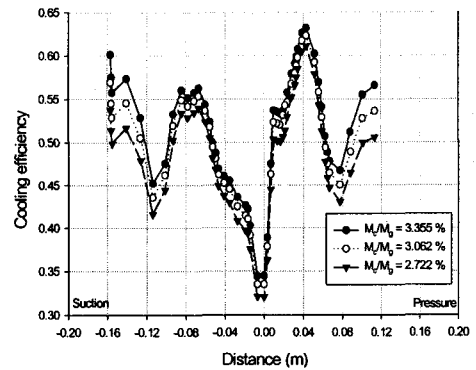


Fig. 8 Cooling efficiency at 50% span of blade with different mass flow rate of cooling air

Fig. 9 및 Fig. 10은 $M_c/M_g = 3.355\%$ 일 때 익형의 50% span, 즉 블레이드 평균 단면에서 열차폐코팅 특성의 변화에 따른 블레이드 표면온도 분포 및 식(1)의 냉각효율을 나타낸 그림이다.

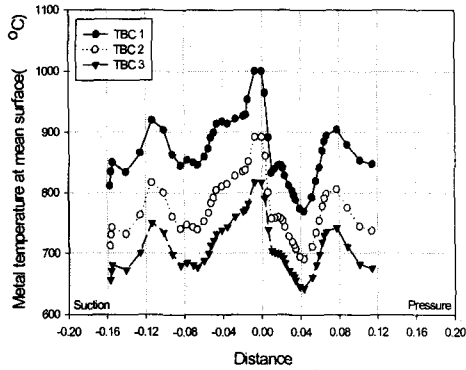


Fig. 9 Cooling efficiency at 50% span of blade with different mass flow rate of cooling air

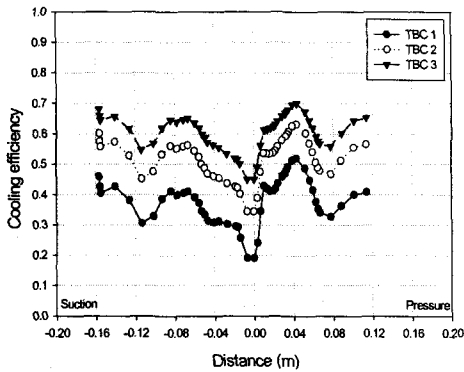


Fig. 10 Cooling efficiency at 50% span of blade with different mass flow rate of cooling air

해석 결과 블레이드 표면의 온도분포는 열차폐 코팅의 특성과 큰 관계없이 유사한 경향을 나타내었다. 한편 TBC 1의 경우 leading edge에서 발생하는 최대온도는 약 1,000°C, TBC 2의 경우 900°C, TBC 3의 경우 820°C로 나타나, 열차폐코팅의 변화에 대한 최고온도의 변화가 약 200°C 발생하여 냉각유량 변화에 비해 매우 큰 변화를 나타내었다. 이는 TBC 1, 2, 3 조건의 열차폐코팅의 열저항(thermal resistance)이 큰 차이를 나타내고 있고, 고온의 연소가스로부터 냉각공기로의 열전달 과정에서 열차폐코팅의 열저항이 중요한 요소로 작용하기 때문으로 판단된다. 한편 열차폐코팅의 변화에 따른 냉각효율의 변화는 열차폐코팅의 열저항이 클수록 큰 냉각효율을 나타내었

다. 해석 결과는 TBC 3의 경우 대략 0.6 부근의 냉각효율을, TBC 2의 경우 0.5 부근, TBC 1의 경우 0.3 ~ 0.4의 효율을 나타내었다. 따라서 해석의 대상으로 설정된 터빈입구온도 1,300°C급 발전용 가스터빈의 1단 버켓의 경우, 버켓의 소재인 GTD111의 항복응력이 온도가 900°C인 경우 상온에 비해 약 60%로 감소(4)하기 때문에, 냉각 성능의 향상을 통한 신뢰성 향상을 위해서는 냉각 성능 향상이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

터빈입구온도 1300°C급 발전용 가스터빈의 1단 동익에 대한 열전달 해석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 1300°C급 발전용 가스터빈의 1단 동익의 냉각유로 열전달 설계를 위해 외부열전달계수, 요철, 굴곡이 있는 유로 등에 대한 열전달 및 압력 손실을 고려한 유로망 해석 및 온도해석의 절차 및 방법을 확립하였다.

(2) 1300°C급 터빈의 모델 블레이드에 대한 유로망해석 및 온도해석 결과 leading edge 및 tip에서 고온부가 발생하는 것으로 파악되었다.

(3) 블레이드 표면의 열차폐코팅은 냉각 블레이드의 온도분포 및 최고온도에 큰 영향을 미치는 인자이다.

참고문헌

- (1) Bell, J.A.E., 1994, US Patent 5279111
- (2) Kobayashi, N., 1981, US Patent 4293275
- (3) Fullagar, K.P.L., 1974, "The Design of Air Cooled Blades", British Aeronautical Research Council Report 35684, HMT 361
- (4) Daleo, J.A., Wilson, J.R., 1998, "GTD111 Alloy Material Study", ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 120, pp. 375-382