

가스터빈 연소실 및 블레이드 막냉각에서 와류 및 높은 난류 강도의 유동 효과에 대한 연구

조 형 희

연세대학교 공과대학 기계공학과

Effect of Vortex and High Turbulence on Film Cooling for Gas Turbine Combustor and Blades

Hyung-Hee Cho

Dept. of Mechanical Eng., Yonsei Univ.

Abstract

The effects of injection angles between 0° and 90° , mainstream turbulent intensities between 0.36 percent and 9.3 percent and embedded longitudinal vortices on jets issuing from a single film cooling hole and from a row of inclined holes are investigated. The heat transfer coefficients around film cooling holes are affected greatly by the compound injection angles. The injected jets affected weakly by the freestream turbulence at low level. However, the heat transfer coefficients near the film cooling holes have higher values at a high turbulence intensity. The vortices generated from a delta winglet change the injected jet direction and the kidney-type vortex pattern.

1. 서 론

회력발전소의 효율 증대를 위하여 가스터빈과 증기터빈의 복합사이클(combined cycle)로 전환하는 것이 세계적인 추세이다. 최근 들어서 국내에도 많은 복합사이클 화력발전소가 건설되고 있으나, 모두 외국 기술에 의존하고 있는 형편이다. 증기 터빈에 대한 기술은 오랜 경험에 의하여 국내에 많이 축적되어 있으나, 가스터빈에 대한 기술 수준은 매우 낮다.

고효율 가스터빈을 개발하기 위해서는 무엇보다도 가스터빈 요소(가스터빈 블레이드, 연소기 벽면 등)에 대한 냉각 기술이 시급히 확보되어야 한다. 그 이유는 가스터빈의 열효율은 터빈 입구온도에 크게 좌우되기 때문이며, 터빈 입구 온도를 높이기 위해서는 내열 온도가 높은 소재를 사용함과 더불어 효율적인 냉각기술을 개발하여 터

빈의 주요 요소들을 보호하여야 한다. 최근 수십 년간 열효율을 높이기 위해서 터빈 입구온도는 지속적으로 증가되어져 왔고, 그 결과 열효율의 증가에 따라 연료소비를 절감시킬 수 있었다. 이와 같이 고온의 연소가스로부터 터어빈 요소들을 보호하기 위하여 재질의 개발과 더불어 많은 냉각방법들이 필요하게 되었으며, 최근 들어 여러 냉각방법과 병행하여 막냉각을 가장 효과적인 방법으로 사용하고 있다 [1-4]. 최고 부하조건에서 운전되는 가스터어빈 요소의 벽면온도를 10°C 정도 낮추는 경우 그 수명은 2배까지 증가되는 것으로 알려져 있다. 이런 이유에서 각 터어빈 요소들의 냉각은 특히 중요하다. 그러나 요소냉각에 너무 많은 압축공기를 사용하는 경우 압축기(compressor)에 많은 동력이 요구되며, 더불어 연소가스의 온도를 낮추기 때문에 전체 효율이 떨어지게 된다.

그러므로 적은 압축 냉각공기로 냉각효과를 극대화할 수 있는 최적 막냉각(film cooling hole)설계 및 최적 운전조건을 얻는 것이 필요하다.

지금까지 막냉각에 관한 주된 연구는 실험실에서 얻기 쉬운 낮은 난류강도내($1x$ 이내)에서 실행되어져 왔다.

하지만, 실제 연소실내와 터빈블레이드 유동장의 난류 강도는 매우 높고, 연소실 입구 또는 전단 블레이드의 후류에서 형성된 와류(vortex)에 의해서 주유동장이 특정 지어진다. 높은 난류 강도와 와류가 있는 경우에 열전달 효과는 크게 변할 것이므로 실제 상황에 근접한 조건에서 실험하여 정확한 열전달효과 예측이 실제 사용을 위한 최적 설계 및 운전 조건을 얻는데 필수적이다. 본 연구에서는 고온의 연소기 벽면 및 터빈 블레이드 막냉각의 성능을 정확히 예측하기 위해서 실제 조건에 근접한 높은 난류 강도 및 와류가 있는 주유동의 경우에 대한 주유동 방향분사(axial injection) 및 복합각도분사(compound angled injection)의 국소 열전달계수를 측정하였다.

2. 본 론

막냉각 분사홀로부터 분사된 제트에 의해서 주유동이 방해받는 경우 매우 복잡한 유동 및 와류양상을 가지게 된다. 그 곳에 형성되는 와류는 크게 후류방향으로 생성되는 kidney-type와류와 제트 옆면에 형성되는 측면 와류로 나눌 수 있다. 이 영향에 의해서 표면에서의 열/물질 전달계수의 양상은 매우 복잡하다. 영역은 크게 3부분으로 나눌 수 있는데, 첫째는 분사홀 상류부분(A), 그 다음은 분사홀과 분사홀 사이의 영역(B), 마지막으로 분사홀 하류부분(C)이다 (Fig. 1). 낮은 분사율(blowing rate: $M=0.5$)에서는 A영역(홀상류 부분)과 B영역(홀과 홀사이)은 분사제트에 의하여 거의 영향을 받지 않고 있지만, C영역(홀하류 부분)에서는 열전달계수가 크게 증가하여 평균 유동의 경우보다 약 80%까지 증가하지만 $x/d \geq 8.0$ 인 경우는 거의 평균 유동과 유사함을 보여주고 있다. 이것은 분사제트가 바로 표면에 퍼지면서 side & kidney-type 와류형성에 기인되는 것으로 사료된다.

분사율이 증가함에 따라서 A영역에서도 영향을 받기 시작한다. 이 경우 A영역에서는 분사제트에 의하여 주유동이 보다 더 큰 영향을 받고 바로 분사홀 주위에서도 큰 Sh 수를 가짐을 보여주고 있다. 이것은 분사제트에 의하여 형성된 vortex ring과 주유동에 의한 horseshoe vortex의 큰 상호작용에 기인되며, 분사홀과 홀사이의 매우 큰 Sh 수는 각각에서 형성된 강한 kidney-type와류들에 기인된다. $M=2.0$ 일 때는 거의 전체 하류영역에서 40%이상 증가하는 양상을 보여주고 있다. 그러므로 지금까지 분사홀 주위를 제외한 영역에서 열전달계수값을 평판에서 얻은 결과를 사용하였는데, 본 결과에 의하면 하류영역도 분사제트에 의한 영향을 고려하여야만 정확한 열전달해석을 할 수 있음을 보여주고 있다.

횡방향으로 각도(본 연구에서는 45°)를 가지고 분사하는 경우 분사제트의 횡방향 운동량에 의해서 제트가 주유동과 더 잘 혼합되어 퍼지게 된다. 분사율이 작은 $M=0.5$ 일 때는 분사제트 자체의 운동량이 적기 때문에 그 양상은 axial injection의 경우와 크게 다르지 않다. 하지만 분사제트에 의하여 영향을 받는 영역이 횡방향으로 더 넓게 퍼져있고 두 개의 극대점이 존재하고 있는 것을 보여준다.

분사율이 증가하여 $M=1.0$ 인 경우는 분사제트의 횡방향 운동량에 의해서 표면에서의 제트계적이 옆으로 휘는 것을 볼 수 있다 (Fig. 2). 제트계적의 각도는 약 20° 정도로 분사각도 45° 보다는 적은 각도이다. 여기서 볼 수 있는 특징은 $M=0.5$ 에서 거의 대칭적으로 형성되었던 kidney-type와류가 분사율을 중심으로 오른쪽면(상류에서 하류쪽으로 보며)은 더욱 커지는 데 비해서, 왼쪽면 와류

는 작은 크기를 가지게 됨을 볼 수 있다. 이것은 주유동과 분사제트의 횡방향 운동량과의 상호작용에 의해서 바람맞이 쪽의 와류가 더 크게 발달함을 알 수 있다. 높은 분사율($M=2.0$)의 경우 표면에서의 제트계적은 30° 정도 경사로 분사제트의 횡방향 운동량 증가에 따라 분사각도에 근접하고 있다. 이 경우 하류에서 분사제트와 제트 사이에 높은 열전달계수값을 갖는 영역이 더욱 크게 존재한다. 결국 분사된 제트의 표면계적이 $x/d=5.0$ 정도에서 끝나고 그 사이에 높은 값을 갖는 영역이 형성된다.

정량적으로 보면 배열막냉각홀에서 복합분사하는 경우 분사홀 주위에서는 열전달이 거의 평판유출의 경우에 2배 정도까지 증가함을 보여준다. 이 결과는 앞의 axial injection의 경우보다 훨씬 더 높은 값이다. 하지만 이 값들은 하류로 갈수록 감소하여 $x/d=25$ 의 경우는 axial injection의 경우보다 약간 낮은 값을 가진다. 이것은 복합각도분사의 경우 분사홀 주위에서는 분사제트의 횡방향 운동량에 의하여 주유동이 크게 방해되지만 하류로 갈수록 분사제트의 주유동방향 운동량은 감소하여 axial injection의 경우보다 작은 값을 갖게 된다. 그러므로 복합각도분사의 경우 분사홀 주위에서는 분사제트의 영향을 충분히 고려한 열/물질 전달계수를 사용하여만 막냉각시 정확하게 열전달해석을 할 수 있다.

막냉각 분사홀주위에서의 분사제트와 주유동사이의 상호 작용에 따른 열전달 효과를 자세히 고찰하기 위하여 커다란($d=20\text{mm}$) 단일 구멍을 사용하는 경우, 분사각도 $\theta = 0^\circ$ 에서는 $z/d = 0$ 을 축으로 좋은 대칭성을 보여주고 있다. 이것은 분사제트에 의하여 형성된 kidney-type와류가 대칭됨을 말해준다. 분사 각도가 횡방향으로 $\theta = 30^\circ$ 에서는 오른쪽(상류에서 하류쪽으로 보면서)에 형성된 와류는 강도가 강해지지만 왼쪽에 형성된 와류는 그 강도가 약화되었음을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 분사 각도가 더 커질수록 뚜렷해서 $\theta = 45^\circ$ 일 때 강한 오른쪽 와류에 의해서 그 쪽 영역에서 열전달 계수 값은 더욱 커진다. 분사 각도가 더 커져서 $\theta = 60^\circ$ 일 때는 오른쪽 와류에 의한 열전달 계수값이 두 개의 극대점을 가짐을 알 수 있다. 이 두 개의 극대점은 분사 각도 $\theta = 90^\circ$ 의 경우 분사홀 주위에서는 명확하게 보여주지만 하류($x/d > 3.0$)에서는 소멸됨을 알 수 있다. 여기서 보여주듯이 분사제트에 의해서 형성된 kidney-type와류는 $\theta=0^\circ$ 에서는 대칭적으로 형성되지만, $\theta \neq 0^\circ$ 에서는 다른 크기로 형성됨을 보여주고 있다. 분사 각도가 증가할수록 분사홀의 앞뒤 영역에서 분사제트에 의해 영향받는 부분이 증가함을 알 수 있다.

본 연구에서 주유동의 난류 강도 변화가 막냉각 홀 주위에서의 열전달 효과에 미치는 영향을 보기 위해서

다음과 같이 주유동 난류 강도를 $T.I.=0.36x$ (저난류강도), $4.1x$, $9.3x$ (고난류강도)로 변화시키면서 수행하였다. 주유동의 난류 강도가 어느 정도(여기서는 $T.I.=4.1x$)까지는 그 열전달 계수의 변화가 작음을 알 수 있다. 이것은 주유동 난류 강도가 어느 정도 이하에서는 열전달계수에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 하지만 주유동의 난류 강도가 높은 경우($T.I.=9.3x$), 그 양상은 달라져서 분사제트에 의하여 형성된 각각 와류에 의한 영향이 적어짐을 알 수 있다. 이것은 높은 와류가 분사제트와 잘 혼합됨으로써 개별 와류의 형성을 억제하기 때문이다. 높은 난류강도($T.I.=9.3x$)에서는 전체적으로 높은 값은 갖지만 하류에서 명확한 극소점 및 극대점을 보여주고 있지 않다. 이것은 높은 난류강도에서는 주유동과 분사제트가 잘 혼합됨을 나타낸다.

본 연구에서는 상류에 vortex generator (delta winglet)를 설치하여 임의의 와류를 형성시킨 다음 그 와류에 의하여 분사제트가 어떤 영향을 받는지에 대하여 고찰하였다. 상류에 와류가 없는 경우는 열전달계수가 대칭이고 분사홀과 홀사이는 거의 영향을 받고 있지 않다. 하지만 상류에 와류가 존재하는 경우에는 분사를 상류에도 높은 열전달 계수를 가지며 분사된 제트에 영향을 주어 열전달계수가 크게 바뀔 수 있다. 상류의 와류의 회전 방향에 따라서 분사제트는 벽에 밀착되거나 또는 벽으로부터 분리될 것이다.

상류 와류의 존재에 따라서 분사를 상류에서도 높은 열전달 계수값은 가지며 하류의 경우 최대값은 상류 와류가 없는 경우 보다 낮지만 전체적으로 높은 열전달계수값을 갖는다 (Fig. 3). 중앙 분사홀의 경우 분사제트에 의하여 형성된 와류의 위치가 상류 와류에 의해서 옆으로 이동되었음을 알 수 있다. 와류는 시계방향으로(상류에서 하류 방향으로 볼때) 회전하면서 분사제트의 중심 부분을 늘려주는 효과를 갖는다.

앞에서 언급했듯이 터빈 요소에서 열부하 및 표면온도를 예측하기 위해서는 열전달계수와 막냉각효율 측정이 필수적이다. 또한 열응력 해석을 하기 위해서는 극소적인 값들이 필요하다. 본 연구 결과에서 얻어진 결과는 위의 조건을 만족시키며 더 나아가 높은 난류강도 및 와류존재시 얻어진 것이므로 최적운전조건예측 및 최적설계에 긴요하게 사용될 것으로 사료된다. 부수적으로는 난류강도 변화 및 와류존재에 따른 열전달특성의 변화를 예측함으로써 다른 분야(열교환기, 발전용 발열요소, 컴퓨터요소 냉각등)에 활용가능하다.

3. 결 론

단일 막냉각홀의 분사각도를 0° 에서 90° 까지 15° 간격으로 변화시키면서 분사시키는 경우 분사제트에 의해서 형성된 kidney-type

와류는 $\theta=0^\circ$ 에서는 대칭적으로 형성되지만, $\theta \neq 0^\circ$ 에서는 다른 크기로 형성됨을 보여주고 있다. 분사 각도가 증가할수록 분사를 앞 뒤 영역에서 분사 제트에 의해 영향받는 부분이 증가함을 알 수 있다.

주유동의 난류 강도가 어느 정도(여기서는 $T.I.=4.1x$)까지는 그 열전달 계수의 변화가 작음을 알 수 있다. 하지만 주유동의 난류강도가 높은 경우 ($T.I.=9.3x$), 그 양상은 달라져서 분사 제트에 의하여 형성된 각각 와류에 의한 영향이 적어짐을 알 수 있다. 이것은 높은 와류가 분사 제트와 잘 혼합됨으로써 개별 와류의 형성을 억제하기 때문이다.

상류에 Delta winglet에 의해 형성된 와류가 존재하는 경우에는 분사를 상류에도 높은 열전달 계수를 가지며 분사된 제트에 영향을 주어 열전달계수가 크게 바뀔 수 있다. 분사를 상류에서도 높은 열전달 계수값은 가지며 하류의 경우 최대값은 상류 와류가 없는 경우 보다 낮지만 전체적으로 높은 열전달계수값을 갖는다. 중앙 분사홀의 경우 분사 제트에 의하여 형성된 와류의 위치가 상류 와류에 의해서 옆으로 이동되었음을 알 수 있다. 와류는 시계방향으로(상류에서 하류 방향으로 볼때) 회전하면서 분사 제트의 중심 부분을 늘려주는 효과를 갖는다

참 고 문 헌

1. Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," Advances in Heat Transfer, vol. 7, Academic Press, pp. 321-379.
2. Cho, H. H., and Goldstein, R. J., 1995a, "Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection through Discrete Holes - Part I: within Holes and on the Back Surface," J. of Turbomachinery, Vol. 117, pp 440-450
3. Cho, H. H., and Goldstein, R. J., 1995b, "Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection through Discrete Holes - Part II: on the Exposed Surface," J. of Turbomachinery, Vol. 117, pp 451-460
4. Eckert, E. R. G., Goldstein, R. J. and Cho, H. H. et al., 1994, "Studies of Full coverage Film Cooling with Compound Angle Injection on Combustor Wall," Project Report to GE, Aircraft Gas Turbine Div.

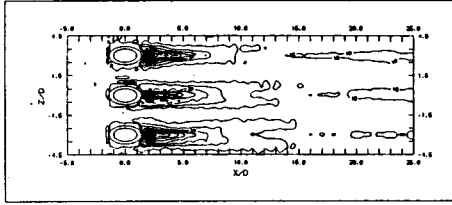


Fig 7. Contour plots at $M = 1.0$ for axial injection (축방향 분사시 $M = 1.0$ 일 때 등열전달계수선)

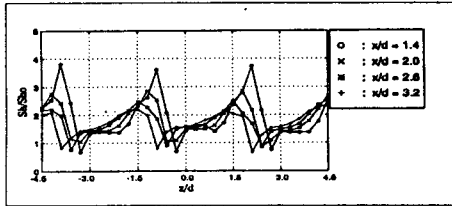


Fig 8. Lateral distribution of normalized Sh at $M = 1.0$ for compound angle injection (복합각도 분사시 $M = 1.0$ 일 때 Sh 분포)

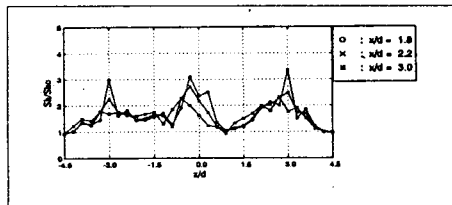


Fig 3. Lateral distribution of normalized Sh at $M = 1.0$ for axial injection with delta winglet (축방향 분사시 delta winglet 설치 상태에서 $M = 1.0$ 일 때 Sh 분포)