

가스터빈 블레이드 팁 열전달 연구를 위한 천음속 캐스케이드 구축

곽재수*[†] · 정진영* · 강영준* · 김기문* · 이수인*

Development of a Transonic Cascade Facility for the Heat Transfer Research of Gas Turbine Blade Tip

Jae Su Kwak*[†], Jin Young Jeong*, Young Jun Kang*, Gi Mun Kim*, Soo In Lee*

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Blade tip(블레이드 팁), Heat transfer coefficient(열전달 계수), Transonic cascade (천음속 캐스케이드)

ABSTRACT

Gas turbines are widely applied to propulsion and power generation systems due to their high efficiency and high thrust/weight ratio. In order to increase the efficiency of gas turbines, the turbine inlet temperature is steadily increasing, and research on turbine cooling technology has been actively conducted. In order to specify the hot spots in the gas turbine and to confirm the cooling design, it is essential to test the components in the engine simulating condition. In the Heat and Flow Control Laboratory of Korea Aerospace University, a transonic turbine test facility (KAU-T³F) has been constructed since 2018, and the facility is recently commissioned. In this paper, the configuration and capacity of the KAU-T³F are introduced and the comparison with the high-speed cascade test facilities of foreign universities are provided.

1. 서 론

가스터빈은 중량대 출력비가 높아 항공 추진용으로 널리 사용되고 있고, 스팀 터빈이나 다른 발전 시스템과의 결합을 통해 고효율 발전용도로의 응용 분야를 넓히고 있다. 이러한 가스터빈의 효율과 출력 향상을 위해 터빈으로 유입되는 연소가스의 온도 (Turbine inlet temperature)를 증가시키는 경향이 있으며, 이로 인해 현대의 가스터빈 입구온도는 금속 재료의 용융점을 넘어서고 있다. 따라서 고성능의 가스터빈 개발을 위해서는 가스터빈 고온 부품의 열전달 현상을 이해하고, 적절한 냉각 기법을 적용하는 절차가 필수적이다.

현대의 전산해석 기법의 발달은 비교적 적은 비용으로 가스터빈 고온 부품의 열전달과 유동 현상에 대한 이해도를 높이고 있지만, 복잡한 열유동 현상이 발생하는 가스터빈에서는 여전히 실험적 연구에 기반한 연구 방법이 필수적인 절차이다. 또한 전산해석적 연구의 신뢰성 확보를 위해서

유사한 환경에서 측정된 열전달 실험 결과를 활용한 검증이 필요하다.

일반적으로 새로운 냉각기법의 구현과 상세한 열유동 측정은 실험이 용이한 저속 저온조건에서 수행될 수 있다. 하지만 전산해석 결과의 검증이나 냉각 설계의 검증 등은 가스터빈 엔진의 운용 환경을 모사하는 조건에서 수행되어야 한다. 특히 압축성 효과에 의한 영향이 중요한 블레이드 표면이나 블레이드 팁에서는 고속 환경에서의 실험적 검증이 필수적이다. 이러한 환경 모사를 위해서는 막대한 설비의 구축 및 유지 비용이 필요하므로, 대학 연구실 수준에서는 구현하기 어렵다.

본 논문에서는 가스터빈 선진국의 사례를 참고하여, 2018년부터 한국항공대학교 열유동제어연구실에서 구축 중인 blow-down 방식의 천음속 터빈 캐스케이드 실험 장치를 소개하고, 천음속 환경에서 항공용 가스터빈 블레이드 팁의 열전달 계수 측정 연구 결과의 일부를 제시하고자 한다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

2. 실험 장치의 구성

2.1 외국 사례 조사

미국과 영국 등의 가스터빈 기술 선진국에서는 다수의 대학에 천음속 캐스케이드 실험이 가능한 blow-down 방식의 캐스케이드 풍동을 보유하고 있다. Table 1은 가스터빈 열전달 연구가 활발하게 진행되고 있는 미국의 Virginia Tech., Texas A&M University, 영국의 Oxford University의 천음속 캐스케이드 사양을 정리한 것이다.

조사된 대학에서는 공기를 30 bar 이하로 압축 탱크에 저장하고, 순간적으로 밸브를 개방하여 필요한 유량과 유동 조건을 확보하는 방식을 취하였다. 또한 열전달 실험을 위해 추가적인 히터를 설치한 경우도 있었고, 적용되는 히터의 종류도 대학마다 달랐다.

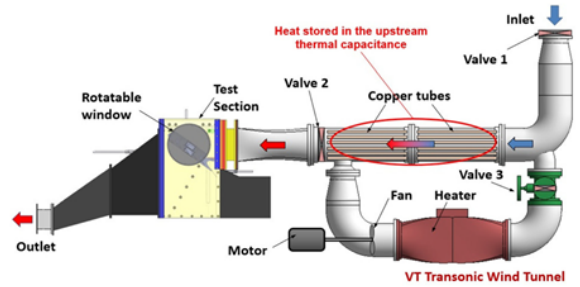
Fig. 1(a)는 Virginia Tech.에서 운용 중인 천음속 캐스케이드를 나타낸 것이다. 실험 전 별도의 공기 히터를 통해 주유로에 설치된 구리관을 가열하고, 실험 직전에 밸브를 조작하여 주유동이 캐스케이드로 유입되도록 한다. 실험 중 유동의 온도가 계속 변화하고, 실험 준비에 일정 시간이 필요하다는 단점은 있지만 주유동 가열을 위한 히터의 용량이 감소하는 장점이 있다. 캐스케이드 하류에 추가 밸브를 설치하여 캐스케이드 상, 하류의 압력비를 조절할 수 있도록 구성되어 있다.

Fig. 1(b)는 Virginia Tech. 캐스케이드 풍동의 운전 특성을 나타낸 것으로, 밸브 개방에서 목표 속도에 도달할 때까지 약 2초의 시간이 소요되었고, 목표 속도에 도달한 이후에는 속도가 안정적으로 제어되는 것을 보여준다.

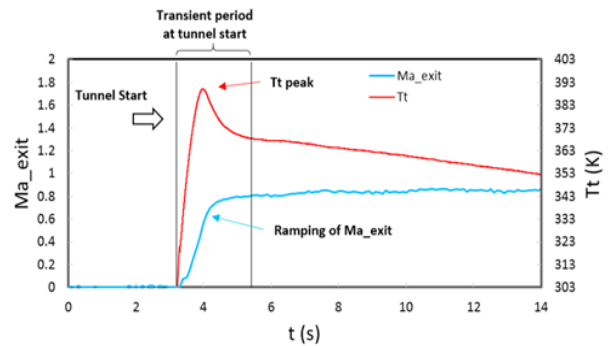
Fig. 2는 Oxford University의 천음속 캐스케이드를 나타낸다. 컨트롤 밸브를 통과한 압축공기는 입구 정체실에서 1차 팽창을 하고, 메쉬 히터를 통과한 후 시험부로 유입된다. 1차 팽창을 통해 유동의 압력 변동을 안정화할 수 있고, 팽창에 의한 공기 온도 저하의 영향을 일부 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 컨트롤 밸브부터 시험부까지의 구성

Table 1 Transonic cascade in foreign universities

대학	Virginia Tech. ⁽¹⁾	Oxford University ⁽²⁾	Texas A&M University ⁽³⁾
탱크 압력 [bar]	13.8	28	22
탱크 부피 [m ³]	-	30	-
입구 압력 [kPa]	20.769	-	-
입구 마하수	0.3	0.28	-
출구 마하수	0.7~1.1	1	0.7~1.3
유량 [kg/s]	5	3.23	-
구동 시간 [sec]	15~25	80	20
히터	regenerative 방식	mesh heater	-



(a) Schematic of Transonic cascade



(b) Flow and temperature characteristics

Fig. 1 Transonic cascade of Virginia Tech⁽¹⁾

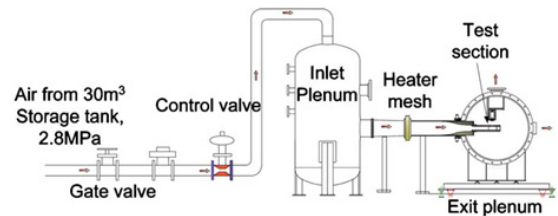


Fig. 2 Transonic cascade of Oxford University⁽²⁾

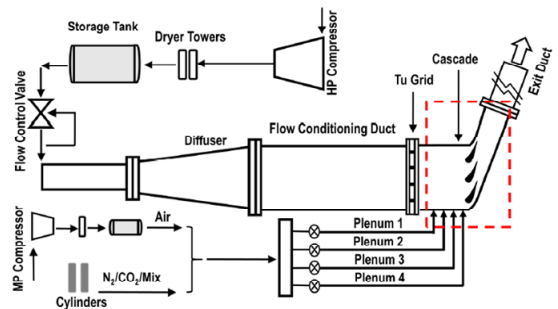


Fig. 3 Transonic cascade of Texas A&M University⁽³⁾

이 복잡해짐에 따라 유동이 안정화되는 데까지 약 10초의 시간이 걸리는 단점이 있다. 메쉬 히터의 사용시 주유동 온도를 순간적으로 증가시킬 수 있고, 실험 중 주유동 온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 장점은 있지만, 유량이 큰 경우 입력 전력이 상당히 높기 때문에 연구실 전력 설비의 제한이 따르게 된다. 캐스케이드를 출구 정체실 내에 두어 캐스케이

드 출구에서 팽창된 공기가 별도의 배관을 통해 외부로 배출되도록 구성하고 있다.

Fig. 3은 Texas A&M University의 천음속 캐스케이드의 개략도를 나타낸 것으로, 주유동 가열을 위한 히터가 설치되어 있지 않다. 따라서 열전달 계수 측정을 위해서는 블레이드 자체를 가열해야 한다. 인용된 논문⁽³⁾에서는 주유동 가열이 필요하지 않은 압력감응페인트를 이용한 막냉각 효율 측정 실험을 수행하였다.

2.2 실험 장치의 사양

위의 3개의 천음속 캐스케이드를 참고하여 한국항공대학교의 천음속 터빈 캐스케이드(KAU Transonic Turbine Cascade Test Facility, KAU-T³F)의 설계 사양을 도출하였다. 주요 고려 사항은 다음과 같다.

- 열전달 실험을 위한 주유동 가열 히터(regenerative 방식)
- 안전과 비용을 고려하여 공기 압력은 10 bar 이하로 제한
- 안정적인 운용을 위해 복수의 압축기 설치
- 주유동 공기의 낮은 이슬점을 확보를 위한 가열식 건조기 설치
- 운전 시간 확보를 위해 최소 30 m³의 저장 탱크
- 배기관의 소음 고려
- 실험자의 안전성 확보를 위해 방호벽 기능
- 이상 작동 시, 시험부 보호를 위한 바이패스 시스템
- 다수의 캐스케이드 장착을 위해 복수의 시험 유로 설치
- 유속, 마하 수, 레이놀즈 수 등 여러 컨트롤 변수 선택 가능한 제어 프로그램
- 주유동 유량 6 kg/s에서 30초 이상의 실험 시간 확보

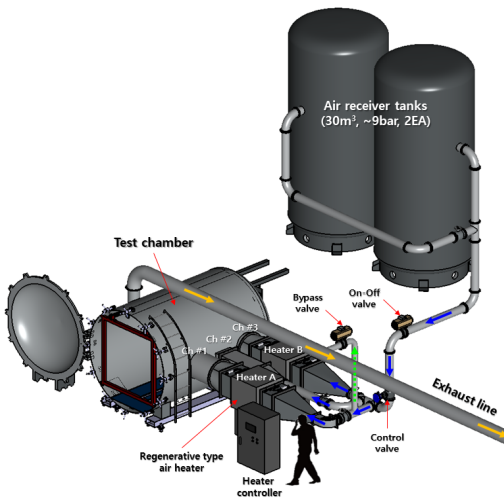


Fig. 4 Schematic of the KAU-T³F

대학교에 설치되고 대학원생들에 의해 운용될 설비의 특성상 관리가 용이해야 하고, 참여 연구원의 안전 확보를 특별히 강조하였다. 위의 고려 사항들과 외국 대학의 사례를 바탕으로 설계를 진행하였고, 설비 운용과 데이터 획득을 위한 제어 프로그램을 제작하였다.

Fig. 4는 한국항공대학교 천음속 캐스케이드의 구성도를 나타낸 것이다. 충분한 실험 시간의 확보를 위해 30 m³ 공기 탱크 2개를 직렬로 연결하였고, 2대의 30 마력 공기 압축기를 통해 압축 공기를 공급하도록 구성하였다. 압축기에서 토출된 압축 공기는 냉동식 건조기와 가열식 건조기를 차례로 통과하여 낮은 이슬점을 갖도록 하였다.

캐스케이드 실험 시, 장착과 교체에 많은 시간을 필요로 하고, 탈장착 시 실험 결과의 반복성 확보를 위해서는 추가적인 노력이 필요하게 된다. 따라서, 실험 설비의 운용성을 최대한 확보하기 위해 실험 설비에는 3개의 실험 유로를 설치하였다. 1, 3번 유로에는 재생형 히터를 설치하여 주유동 온도를 150 °C 이상으로 가열할 수 있도록 하였고, 히터 내부의 발열체와 금속봉의 온도는 별도의 컨트롤러로 제어하였다.

캐스케이드는 챔버 내부에 장착되는데, 챔버는 사고 시 실험자를 보호하는 역할을 한다. 챔버는 약 2.5 m 직경으로 제작되어 챔버 내에서 실험자의 작업성을 확보하였으며, 다수의 스크류 시스템으로 고정되는 2개의 출입문을 설치하였다.

Fig. 5는 블레이드 팁 열전달 실험을 위해 시험 챔버 내부에 장착된 캐스케이드를 나타낸다. 1, 3번 시험 유로에는 교체 가능한 벨 마우스 원판이 장착되어 있으며, 캐스케이드의 크기에 따라 원판을 교체할 수 있도록 하였다. 1, 3번 유로의 입구 덕트의 직경은 700 mm로, 다양한 크기의 캐스케이드의 실험이 가능하도록 하였다. 또한 난류 그리드를 장착하여 실제 터빈의 작동 환경과 유사한 난류 강도를 확보할 수 있도록 하였다.

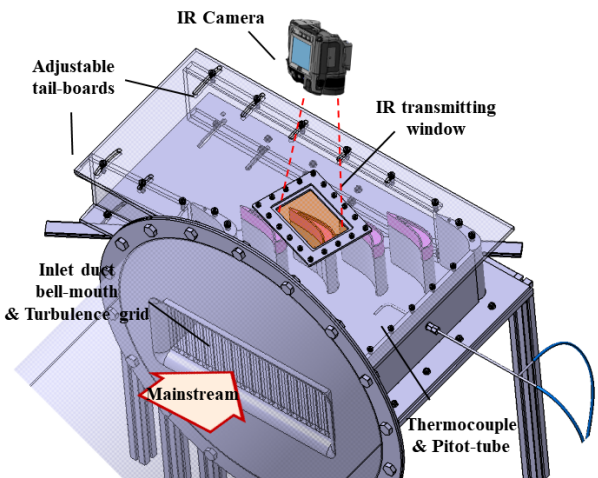


Fig. 5 Cascade for blade tip heat transfer measurement

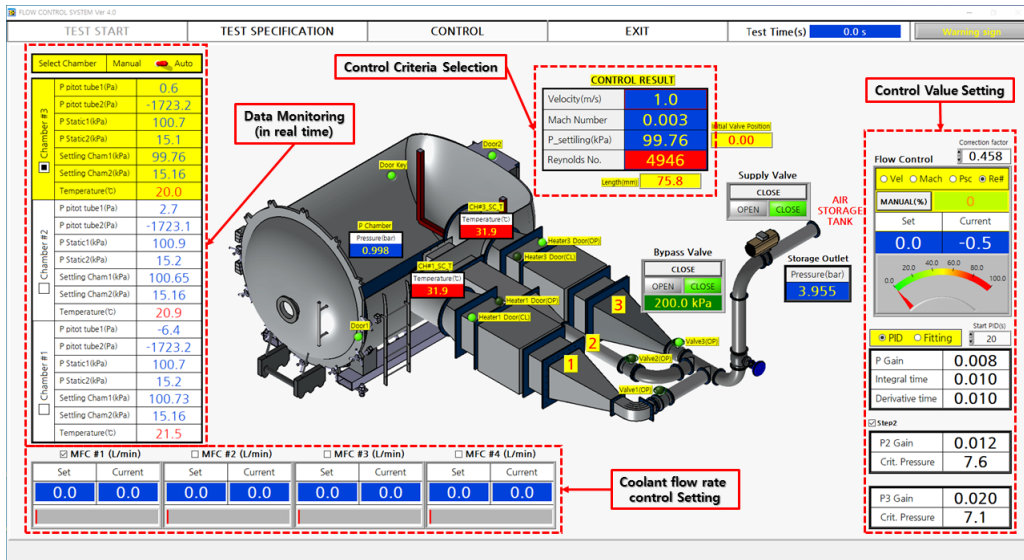


Fig. 6 Control program for the KAU-T³F

시험부에 설치된 피토포관과 열전대 등의 정보를 피드백 받아 상류의 컨트롤 밸브의 개도를 조절할 수 있도록 구성하였다⁽⁴⁾. 또한 시험부 내의 압력이 비이상적으로 증가하는 경우, 시험부로 유입되는 압축공기의 바이패스를 위한 밸브와 배관을 설치하였다.

2.3 제어 프로그램

Fig. 6은 Labview 기반으로 제작된 제어 프로그램⁽⁵⁾의 실행 화면을 나타낸다. 제어 프로그램은 하루 캐스케이드의 정보를 피드백 받아서 상류의 컨트롤 밸브 개도를 조절하고, 획득되는 데이터를 저장할 수 있도록 구성하였다. 이때 PID 제어를 위한 변수를 실험자가 설정할 수 있도록 하였다. 프로그램의 작성은 안정성 확보를 위해 외부 전문 회사에 의뢰하였다.

유동 제어 변수는 실험의 목적에 따라 달라진다. 캐스케이드 실험에서 주로 사용되는 제어 인자는 다음과 같다.

- 캐스케이드 입구 또는 출구 속도
- 캐스케이드 입구 또는 출구 마하 수
- 캐스케이드 입구 또는 출구 레이놀즈 수
- 캐스케이드 입구 전압력

실험자가 위의 제어 변수 중 하나를 선택하면, 각 유로에 설치된 압력계와 열전대를 이용하여 속도, 마하 수, 레이놀즈 수 등을 계산하고, 이 값들을 일정하게 유지할 수 있도록 컨트롤 밸브 개도를 자동으로 조절할 수 있도록 하였다.

안전을 위해 출입문과 히터의 차단벽, 유로 선택 밸브 등에 근접 센서를 설치하였고, 각 센서의 상태가 제어 화면 상

에 표시되며, 모든 근접 센서에 신호가 확보되어야만 실험이 진행될 수 있도록 하였다. 3개의 실험 유로를 선택할 수 있도록 설정하여, 어떤 유로에서 실험이 진행되어도 센서의 이동 없이 신속하게 실험이 가능하도록 구성하였다.

3. 실험 결과

Fig. 7은 캐스케이드 장착 후 각 제어 변수에 따른 제어 결과를 나타낸 것이다. 레이놀즈 수와 입구 속도, 입구 마하 수 등 설정된 제어 변수의 목표값에 2초 이내에 도달하는 것을 볼 수 있으며, 30 초 이상 유지가 가능한 것을 볼 수 있다. Blow-down 풍동의 특성 상, 실험 가능한 시간은 공급되는 공기 유량에 따라 달라진다. 현재의 구성으로는 6 kg/s의 유량으로 30초 이상의 실험 시간 확보가 가능하며, 공급 유량에 따라 실험 지속 가능 시간도 달라지게 된다.

Fig. 8은 히터를 작동한 후의 주유동 속도를 제어한 경우에 대한 결과를 나타낸 것으로, 주유동 속도는 설정된 값을 유지하고 있으며, 주유동 온도는 최대 120 °C 이상의 값에서 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이상의 사전 실험을 통해 한국항공대 천음속 캐스케이드 실험 장치의 성능을 확인하였고, 실제 캐스케이드 실험을 통해 그 활용성을 점검하였다.

예비 실험을 위해 블레이드의 형상 정보가 공개된 GE-E³ 블레이드가 장착된 캐스케이드 (Fig. 5)를 KAU-T³F에 장착하고 블레이드 표면 압력 측정과 블레이드 팁의 열전달 계수 측정 실험을 수행하였다. 정상상태 구간에서 평균 입구 속도 (90 m/s)와 블레이드 코드길이를 기준으로한 평균 레이놀즈 수는 5.9×10^5 , 마하 수는 0.24이었다. 실험 중 평균 주유동 온도는 77.4°C였다.

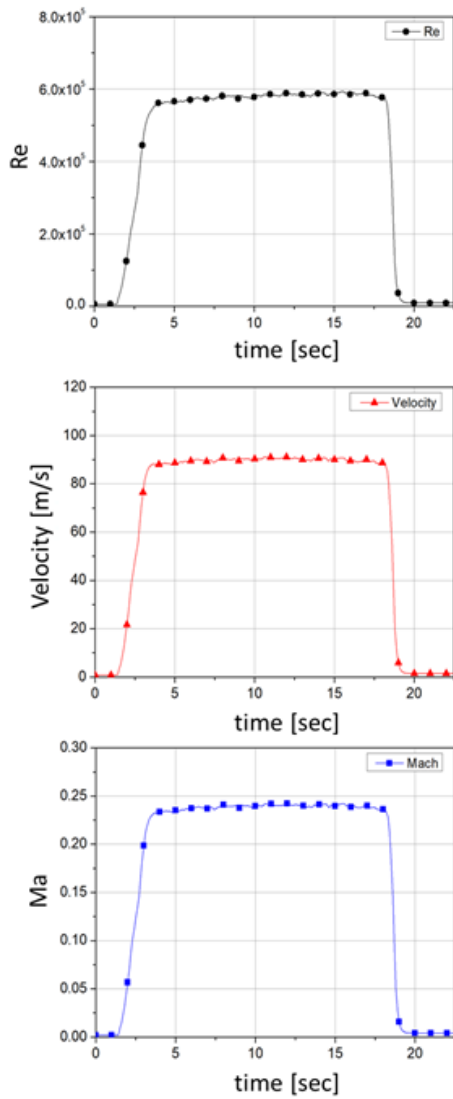


Fig. 7 Results of control program for KAU-T³F

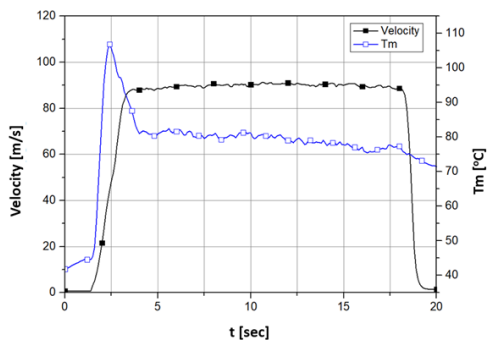


Fig. 8 Inlet velocity and temperature during a test in KAU-T³F

Fig. 9는 측정된 미드 스펠의 정압분포와 동일한 조건에서 수행된 전산해석의 결과를 비교한 것이다. 여기서 정압 계수 C_p 는 식 (1)과 같이 정의된다.

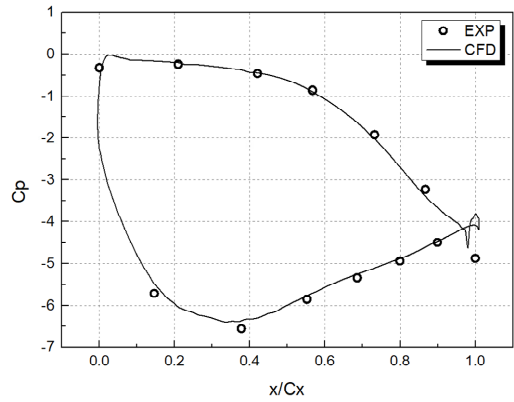


Figure 9 Comparison of measured and calculated static pressure coefficient in high speed condition

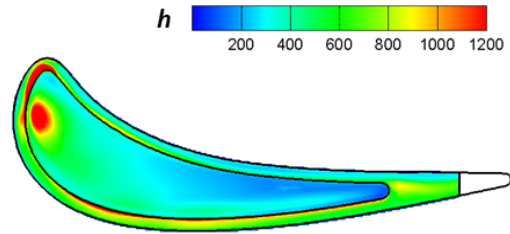


Figure 10 Heat transfer coefficient on a blade tip at high speed condition

$$C_p = \frac{P_{s, \infty} - P_s}{1/2 \rho U^2} \quad (1)$$

Fig. 9에서 실험 결과는 해석 결과와 아주 유사한 값을 보이고 있으며, 따라서 두 기법이 서로 보완적으로 캐스케이드의 열유동 해석에 활용될 수 있으리라 기대된다.

Fig. 10은 Fig. 5의 캐스케이드를 장착한 후 고속 조건에서 측정된 블레이드 팁 열전달 계수를 나타낸 것이다. 측정된 결과는 기존 문헌의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이 결과를 바탕으로 다양한 형상과 조건에서 블레이드 팁의 열전달 및 냉각에 대한 연구를 수행할 예정이다.

4. 결 론

한국항공대학교 열유동제어연구실에서는 2018년부터 천음속 환경 실험이 가능한 터빈 캐스케이드 실험 설비를 구축해 왔다. 실험 장치의 구성과 설계부터 배관 사이징, 압축기 및 밸브 선정, 계측기 선정, 제어프로그램 구성, 제작 업체 선정 등의 모든 과정을 본 연구 책임자와 참여 대학원생들이 직접 수행하였고, 제어 프로그램의 안정화와 열전달 실험 기법의 확보 등도 참여 대학원생들의 많은 시간과 노력의 결과

물이다. 한국항공대학교 천음속 터빈 캐스케이드 시험설비 (KAU-T³F)는 2020년 하반기부터 실제 실험 결과를 도출하고 있으며, 본 논문에서는 고속 조건에서의 측정된 블레이드 팁 열전달 계수 결과의 일부를 소개하였다. 향후 다양한 가스터빈 개발 사업에 본 실험 설비가 활용되길 바라며, 국내 가스터빈 독자 기술 확보에 작은 보탬이 되길 희망한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 무인 기용 고효율 터빈기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- (1) Xue, S., Roy, A., Ng, W. F., and Ekkad, S. V., 2015, "A Novel Transient Technique to Determine Recovery Temperature, Heat Transfer Coefficient, and Film Cooling Effectiveness Simultaneously in a Transonic Turbine Cascade," *ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 7, 011016-1.
- (2) Zhang, Q., O'Dowd, D. O., He, L., Oldfield, M. L. G., Ligrani, P. M., 2011, "Transonic Turbine Blade Tip Aerothermal Performance With Different Tip Gaps—Part I: Tip Heat Transfer," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, 041027-1.
- (3) Chowdhury, N. H., Shiau, C. C., Han, J. C., Xu, H., and Fox, M., 2017, "Film Cooling Effectiveness Comparison on Turbine Vane Endwall With Cluster Configurations Using PSP Measurement Technique," *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Tampa Florida, USA, IMECE2017-30327.
- (4) Kwak, J. S., Jeong, J. Y., 2020, KR Patent No. 10-2086260
- (5) <https://www.ni.com/pdf/manuals/>