

분사홀에 설치된 난류촉진제에 따른 총돌/유출면에서의 열/물질전달 특성

홍성국* · 이동현* · 김영도* · 조형희**†

Effect of Turbulator on Heat/Mass Transfer for Impingement/Effusion Cooling System

Sung Kook Hong*, Dong Hyun Lee*, Young Do Kim*, Hyung Hee Cho**†

Key Words : *Impingement/Effusion Cooling*(충돌제트/유출냉각), *Heat/Mass Transfer*(열/물질전달), *Turbulator*(난류 촉진제), *Initial Crossflow*(초기횡방향 유동)

ABSTRACT

In order to enhance the heat/mass transfer, a turbulator has been installed at the exit of injection hole for the impingement/effusion cooling system. The local heat/mass transfer coefficients have been obtained by a naphthalene sublimation method. Experiments have been carried out at the fixed jet Reynolds number of 10,000. Two turbulators with different diameter have been used in the current study. The result presents that the turbulator leads to the increase in flow mixing and jet velocity, consequently enhancing the heat/mass transfer at a stagnation region. Further, the stagnation region is divided into four small areas with peak value. In the existence of initial crossflow, the stagnation regions move downstream and low heat/mass transfer regions are formed regardless of the installation of turbulator. However, the increased jet velocity by turbulator reduces the crossflow effect against the jet, resulting in decrease of low heat/mass transfer regions. Compared to the case without turbulator, the installation of turbulator yields 5~10% augmentation in averaged Sh value.

1. 서론

충돌제트(Impinging jet)는 국소적으로 높은 열/물질

전달 특성을 갖기 때문에 가스터빈의 냉각, 고온강판 및 유리가공에서의 냉각, 종이건조와 같이 다양한 산업 응용분야에서 널리 사용되고 있다. 이러한 장점으로 오래전부터 충돌제트에 관한 연구들이 수행되었으며⁽¹⁻³⁾ 최근에도, 열전달을 향상시키기 위해 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Wen 등⁽⁴⁾과 Gao 등⁽⁵⁾은 분사홀 내에 구조물 삽입 또는 삼각형 탭을 설치하여 기존

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

의 단순 분사홀에 비해 열전달이 증가됨을 보인 바 있다. 그러나 이전의 연구들은 단일 제트에 대해서만 수행되어 다열로 적용되는 배열제트는 고려하지 않았다.

충돌제트의 핵심 응용분야인 가스터빈의 경우, 냉각 성능을 개선하기 위해 충돌제트 냉각과 유출냉각이 동시에 고려된 충돌/유출냉각 방법이 적용되고 있다^(6, 7). 이러한 충돌/유출냉각 시스템에서는 상류영역 냉각 및 냉각유동의 원활한 공급을 위해 시스템 내부에 초기 횡방향 유동이 존재하게 된다. Rhee⁽⁸⁾ 등은 이러한 횡방향 유동에 의해 충돌제트 효과가 저하되어 전체적으로 열/물질전달이 크게 감소된다고 보고하였다. 따라서 이를 개선시키기 위한 연구로 홍 등⁽⁹⁾은 사각핀을 충돌/유출면에 설치하였으며 그 결과, 전체적으로 열/물질전달이 향상됨을 보였다. 그러나 이러한 구조물 설치의 상대적으로 매우 높은 압력손실이 뒤따르게 된다. 따라서, 시스템 내의 압력손실을 줄이면서 냉각성을 개선하기 위한 방법으로 삼각형 탭과 같은 turbulator(난류촉진제)를 분사홀에 설치하는 것을 고려해 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 다수의 배열제트가 적용되는 충돌/유출냉각 기법에서 turbulator의 분사홀 적용에 따른 열/물질전달 특성에 대해 살펴보았으며 또한, 초기 횡방향 유동의 존재로 인해 어떻게 열/물질전달이 달라지는가에 대해서도 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 나프탈렌 승화법을 사용하여 분사홀의 turbulator 적용에 따른 충돌/유출면에서의 열/물질전달 계수를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 충돌/유출냉각 시스템을 모사한 시험부의 개략도이다. 본 연구에서는 연소실 내벽이나 베인에 적용되는 충돌제트/유출냉각을 모사하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 시험부는 윗면에 분사판, 아래 부분에 유출판을 설치하고 그 사이에 횡방향 유동이 지나는 덕트를 설치하였다. 덕트의 단면은 300 mm(W_D)×20 mm(H_D)이며, 수력직경(D_h)은 37.5 mm이다. 균일한 횡방향 유동을 얻기 위해 면적비 6:1인 수축부를 설치하였으며 입구부에 와이어(trip wire)와 사포(sand paper)를 설치하여 측정영역에서 완전 발달된 난류유동을 얻도록 하였다. 본 연구에 사용된 충돌/유출기법 실험장치의 자세한 구성 및 사양은 Rhee 등⁽⁸⁾에 제시된 바와

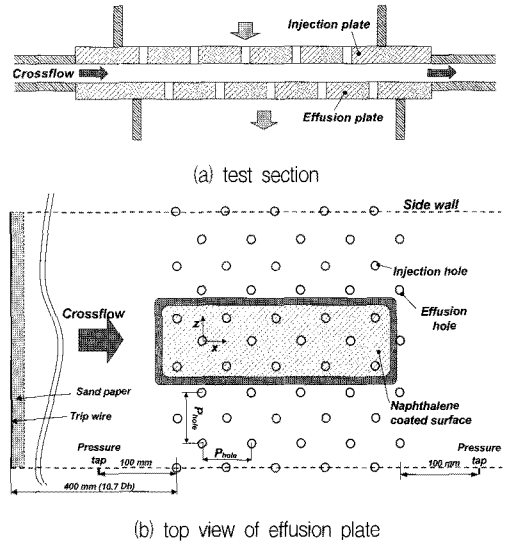


Fig. 1 Schematic view of test section

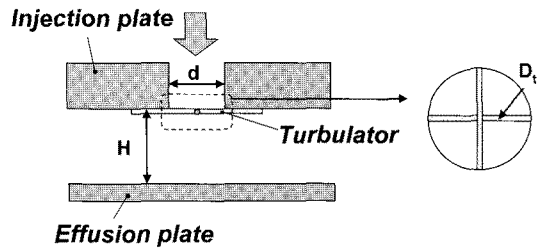


Fig. 2 Schematic view of injection hole with turbulator

같다.

Fig. 1(b)는 시험부에서 유출판의 개략도를 나타내는 것으로 국소 열/물질전달 계수를 측정하기 위하여 나프탈렌이 주조된 시험시편을 유출판에 설치하였다. 분사홀과 유출홀의 직경은 10 mm로 분사홀과 충돌면과의 거리비 (H/d)는 2.0에 해당된다.

분사판과 유출판은 각각 25(5×5)개의 홀들로 구성된 사각배열을 이루며, 분사홀 직경 대 간격(P_{hole}/d)은 6.0이다. 이 때, 분사판과 유출판의 홀 배열은 엇갈림 배열(staggered array)이 되도록 배치하였다.

Fig. 2는 turbulator가 설치된 분사홀의 개략도를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 각각 직경(D_t)이 0.4 mm, 0.8 mm의 turbulator가 분사홀 중심을 지나도록 엇갈리게 분사홀 출구 끝부분에 적용하였다. 따라서, turbulator 설치로 인해 설치되지 않은 경우에 비해 분사홀 출구의 면적은 각각 10%, 20%가 감소되는 효과

Table 1 Operating condition with crossflow

	M	MR	I
without turbulator	1.0	0.327	0.107
turbulator1	1.0	0.294	0.087
turbulator2	1.0	0.263	0.069

를 일으키므로 제트속도의 증가가 일어나게 된다. 본 연구에서는 각각 경우를 turbulator1과 turbulator2로 명명하였다.

2.2 실험조건

본 연구에서는 횡방향 유동의 존재유무에 따른 영향을 살펴보기 위해 횡방향 유동의 유량과 분사홀들을 통해 분사되는 총 유량비로 정의한 분사비(M)가 0.0과 1.0이 되는 조건에서 실험을 수행하였다. 이 때, 덕트 내의 횡방향 유동 대 각각의 분사홀에서 분사되는 제트유동과의 속도비(MR) 및 운동량비(I)는 turbulator 설치유무에 따라 Table 1과 같이 달라진다.

본 연구에서는 각각의 유출홀로 일정한 유출유량이 빠져나가도록 blower를 추가적으로 설치하여 덕트 내의 유출유량이 분사홀을 통해 유입되는 유량과 동일하도록 조절하였다. 따라서, 전체 측정면에서 횡방향 유동을 일정하게 유지시키고 불균일한 유출유동의 영향을 최소화하였다. 작동조건 및 분사홀 직경 기준으로 제트 Reynolds 수는 $Re_d=10,000$ 이며 덕트의 수력직경을 기준으로 한 횡방향 유동의 Reynolds 수는 $Re_{Dh}=12,000$ 이다.

2.3 열/물질전달 계수

본 연구에서 국소 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 나프탈렌 승화법을 이용하였으며 실험에서 얻어진 물질전달 계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = h_m d / D_{naph} \quad (1)$$

이 때, 나프탈렌의 물질확산계수(D_{naph})와 국소 물질전달계수(h_m)의 수식은 Goldstein과 Cho⁽¹⁰⁾가 제시된 바와 같다. 앞에서 계산된 물질전달 계수는 Eckert⁽¹¹⁾가 제시한 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여

열전달 계수로 전환되며, 그 식은 다음과 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (2)$$

본 실험은 상온에서 이루어졌으며, 25°C 기준으로 $(Pr/Sc)^{0.4}=0.624$ 에 해당된다. 측정된 실험결과와 오차해석은 Kline과 McClintock⁽¹²⁾이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 한 결과, Sherwood 수에 대해 전체적으로 $\pm 7.1\%$ 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국소적인 열/물질전달 분포

3.1.1 횡방향 유동이 없는 경우(M=0.0)

Fig. 3은 횡방향 유동이 없는 경우에서의 열/물질전달 분포를 나타낸 것이다. 이 때, 흰색의 점선으로 표시된 원은 분사홀을, 검은색의 반원들은 유출홀을 의미한다. Fig. 3(a)와 같이 turbulator가 설치되지 않은 경우에는 기존의 단일제트 특성⁽¹⁻³⁾에 보이듯, 분사홀 중심을 기준으로 원형 형태의 열/물질전달 분포가 형

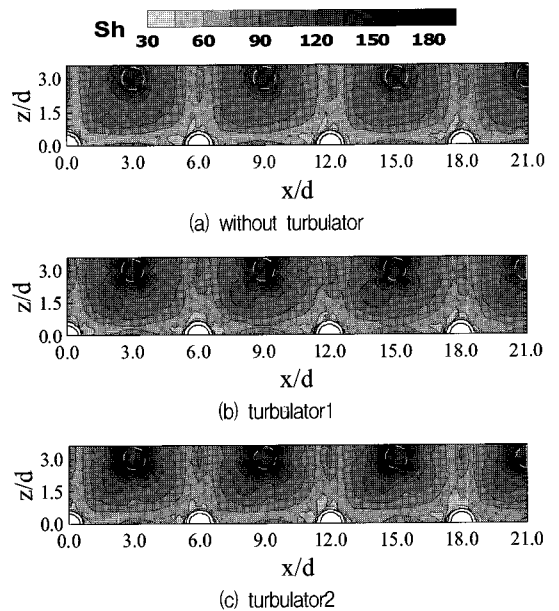
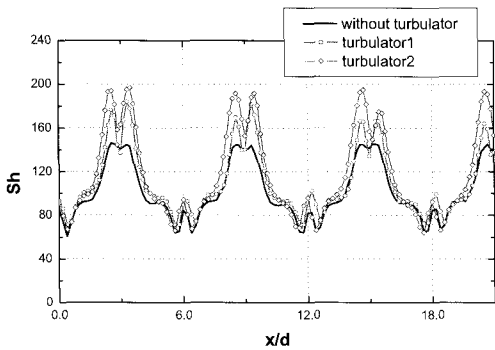


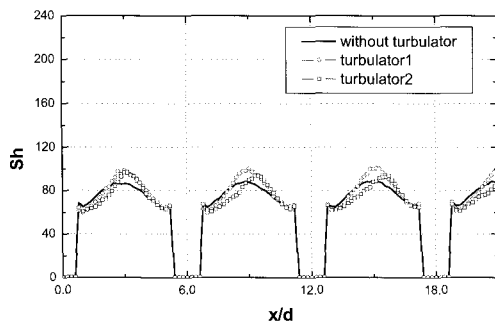
Fig. 3 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling with various turbulators at M=0.0

성됨을 볼 수 있다. 그러나 분사홀에 turbulator가 설치된 경우(turbulator : 흰색선)에는, 정체영역에서 열/물질전달 분포가 크게 달라진다. 설치된 turbulator에 의해 제트가 나뉘어져서 정체영역이 네 개의 극대값으로 분리되어 형성되며, 제트유동의 난류강도 및 속도 증가로 인해 열/물질전달이 상승됨을 볼 수 있다. 한편, 분사홀 중심에서는 상대적으로 낮은 열/물질전달 분포가 나타나는데 이는 turbulator설치로 인해 분사홀 중심에서는 분사된 제트의 속도가 크게 감소되었기 때문이다.

Fig. 4(a)는 극대값이 형성된 지점을 지나는 위치에서의 국소적인 Sh값을 비교한 것이다. turbulator가 설치되지 않은 경우는 $z/d=3$ 에 해당되며, turbulator가 설치된 경우는 $z/d=3.4$ 또는 2.6의 위치에서 극대값이 형성된다. turbulator를 설치한 경우, 극대값이 최대 30%이상 증가됨을 볼 수 있다. 이는 결국, 분사제트 속도 및 제트유동의 난류강도 증가에 기인하며 turbulator 직경이 증가함에 따라 보다 뚜렷하게 극대



(a) along the peak point



(b) along the effusion hole

Fig. 4 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with various turbulators at $M=0.0$

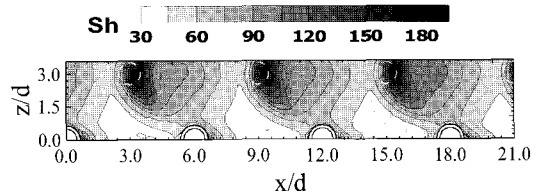
값이 커진다. 하지만 이러한 열/물질전달 증대효과는 정체영역에서 멀어질수록 크게 감소됨을 볼 수 있다.

Fig. 4(b)는 유출홀 중심부를 지나는 $x/d=0$ 지점에서의 국소적인 값으로 turbulator 설치 여부에 상관없이 주변 벽제트(wall jet)간의 상호간섭으로 인해 중간 위치에서 Sh값이 상승하는 특성을 보이며 turbulator 설치에 따른 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 결국, turbulator에 의한 열/물질전달 증가효과는 정체영역에만 지배적으로 나타남을 확인할 수 있다.

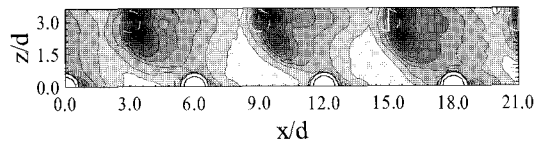
3.1.2 횡방향 유동이 있는 경우($M=1.0$)

Fig. 5는 횡방향 유동이 있는 경우, 분사홀 출구의 turbulator 설치에 따른 열/물질전달계수 분포를 나타낸 것이다. turbulator가 설치되지 않은 경우는 기존 연구⁽⁸⁾에서와 같이 횡방향 유동에 의해 분사된 제트가 하류 방향으로 치우쳐서 비대칭적인 정체영역 분포가 나타난다. 또한, 벽제트가 횡방향 유동에 의해 하류 방향으로 끌려가면서 유출홀을 통해 밖으로 배출되므로 유출홀 사이에 낮은 열/물질전달 영역이 형성된다.

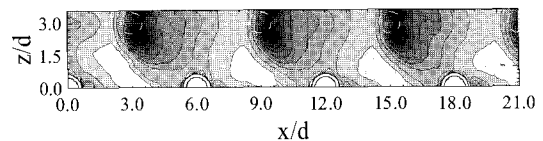
이러한 횡방향 유동에 의한 열/물질전달 분포 특성은 turbulator가 설치된 경우에서도 유사하게 나타난다. 하지만, turbulator 설치로 여전히 난류강도 및 제트속



(a) without turbulator

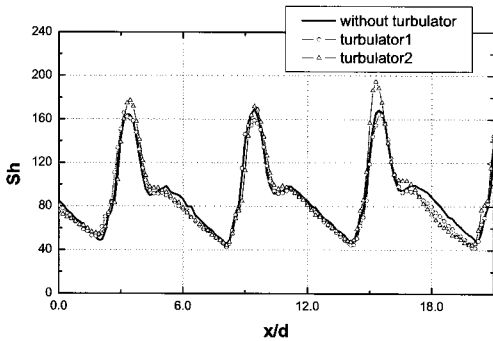


(b) turbulator1

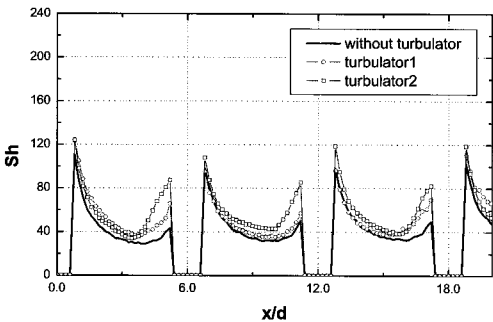


(c) turbulator2

Fig. 5 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling with various turbulators at $M=1.0$



(a) along the peak point



(b) along the effusion hole

Fig. 6 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with various turbulators at $M=1.0$

도가 증가되므로 열/물질전달이 향상된다. 한편, 정체 영역에서 극대값이 2개로 분리되어 나타나는데 이는 네 개로 나뉜 제트 유동이 횡방향 유동과의 충돌로 인해 두개가 다시 합쳐지는 유동특성을 갖기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 국소적인 열/물질전달 값을 비교한 것이다. 극대값이 위치하는 경우(Fig. 6(a)), turbulator 설치와 상관없이 극대값이 하류방향으로 이동되며 유사한 값을 갖는다. 이는 횡방향 유동과 분사제트 유동과의 상호간섭으로 인해 난류강도가 증가되고 분사제트에 대한 횡방향 유동의 영향이 크기 때문에 상대적으로 turbulator에 의한 상승효과가 감소되었기 때문이다.

또한, 형성된 극대값 위치도 turbulator 설치여부에 상관없이 동일하게 나타나는데 결국 turbulator 설치로 인한 횡방향 유동 대 분사제트의 속도비의 상대적인 변화가 10~20% 이내이므로 정체점 형성에 큰 영향을 주지 못함을 확인 할 수 있다. 하지만 속도비가 50% 이상으로 커진다면 이전연구 결과⁽¹⁰⁾와 같이 정체점의 값 및 위치가 크게 변화될 것으로 예상된다. 한편,

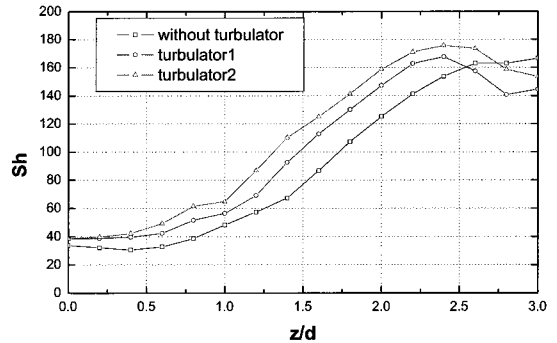


Fig. 7 Local plots of Sh along spanwise direction ($x/d=9.0$) at $M=1.0$

turbulator2에서 극대값들의 변화가 다소 크게 나타나는데 이는 설치된 turbulator로 인한 제트유동의 불안정성 증가 및 실험 오차로 인한 것으로 판단된다.

한편, 유출홀을 지나는 지점(Fig. 6(b))에서 turbulator로 인한 Sh 차이가 유출홀 상류영역($x/d \approx 5, 11, 17$)에서 크게 나타나며 turbulator 직경이 증가함에 따라 열/물질전달이 향상된다. 이는 제트유속의 증가 및 실제 형성되는 제트중심지점($z/d \approx 2.6$)과 분사홀 간의 거리 감소로 인해 분사된 제트에 대한 횡방향 유동의 영향이 상대적으로 감소되었기 때문이다. 따라서, turbulator가 설치되지 않은 경우에 비해, 측면방향(spanwise direction)으로 벽제트가 잘 발달해 나가기 때문에 높은 열/물질 전달 분포가 측면으로 넓게 형성된다. 이러한 특징은 $x/d=9.0$ 지점을 따라 얻어낸 Fig. 7의 국소적인 값에서 잘 나타난다. 분사홀 중심위치($z/d=3.0$)를 기준으로 turbulator가 설치된 경우, 중심위치에서 다소 떨어진 곳에서 극대값을 형성하고 높은 열/물질전달 분포가 측면으로 확대됨을 볼 수 있다.

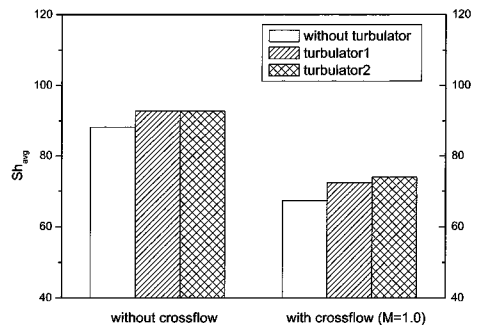


Fig. 8 Averaged Sh value for all experimental cases

3.3 평균 열/물질전달

Fig. 8은 $0.0 \leq x/d \leq 21.0$, $0.0 \leq z/d \leq 3.0$ 의 범위에서 얻어진 평균 열/물질전달 값을 제시한 것이다. 그림에서와 같이, turbulator설치로 평균 열/물질전달 값이 증가됨을 볼 수 있으며 횡방향 유동이 발생하는 경우에는 turbulator와 관계없이 횡방향 유동의 영향으로 평균값이 감소된다.

횡방향 유동이 없는 경우($M=0.0$)는 turbulator 설치로 인해 약 5%의 평균 열/물질전달계수 값의 증가를 보였다. 이는 대부분 정체영역에서의 열/물질전달 값의 증가에 기인한다. 횡방향 유동이 있는 경우($M=1.0$), turbulator 설치에 따른 증가비가 커져서 7~10% 향상되며 turbulator 직경이 커질수록 값이 증가된다.

한편, turbulator는 기존연구⁽⁹⁾에서 사용된 사각핀 구조물에 비해 시스템 내의 압력손실을 크게 감소시키지만 turbulator도 제트유동에 대한 blockage 효과를 일으키므로 turbulator가 설치되지 않은 경우에 비해 상대적으로 압력손실의 증가가 예상된다. 또한, 횡방향 유동이 더욱 증가되는 경우에는 Rhee 등⁽⁸⁾에 보고된 바와 같이 제트유동에 대한 횡방향 유동이 영향이 지배적이기 때문에 열/물질전달 증가에 대한 turbulator의 영향이 감소될 것으로 기대된다. 따라서, 다양한 횡방향 유동조건 및 압력손실까지 고려한 최적의 설계인자를 도출하는 연구가 필요하다 하겠다.

이러한 turbulator의 분사홀에 대한 적용은 시스템의 스케일이 상대적으로 큰 combustor linear나 2단 vane에 용이할 것으로 생각되며, 다열의 홀배열에 일정한 격자로 이루어진 turbulator판을 결합하거나 또는 변형된 방법으로는 기존 단일제트 논문⁽⁵⁾에서 사용된 분사홀 끝단에 tap을 갖는 수정된 원형홀 및 다수의 작은 원형 분사홀들을 충돌면의 중심선상으로 배열되도록 설치하는 것을 생각해 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 분사홀에 turbulator를 설치하여 이에 따른 충돌제트/유출냉각방법에서 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 분사홀에 설치된 turbulator로 정체영역은 극대값이 4개로 나뉘어져 나타나는 열/물질전달 분포를 형성한다. 이러한 정체영역의 특징은 설치된 turbulator

직경이 증가될수록 더욱 뚜렷해진다.

(2) turbulator는 분사되는 제트유동의 교란 및 blockage 효과에 따른 제트유동 속도증가로 인해 turbulator가 없는 경우에 비해 정체영역에서 열/물질전달을 촉진시킨다. 그러나 상대적으로 분사제트의 속도변화도 심해져서 정체영역에서의 열/물질전달 분포의 변화도 커진다.

(3) 횡방향 유동이 존재하는 경우, turbulator 설치 여부에 관계없이 하류방향으로 편향되는 열/물질전달 분포가 나타났다. 그러나 turbulator 설치로 제트유속 증가 및 분리된 제트 중심영역의 측면이동으로 제트유동에 대한 횡방향 유동의 영향이 상대적으로 감소되므로 turbulator 설치되지 않은 경우에 비해 높은 열/물질전달 분포가 측면방향으로 넓게 형성되었다.

(4) 횡방향 유동존재 여부에 상관없이, turbulator 설치를 통해 평균 열/물질전달 값이 5~10% 증가되는 효과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Martin, H., 1977, "Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces," *Adv. Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.
- (2) Viskanta, R., 1993, "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets," *Experimental Thermal and Fluid Science.*, Vol. 6, pp. 111~134.
- (3) Downs, S. J., and James, E. H., 1987, "Jet Impingement Heat Transfer—A Literature Survey," ASME Paper No. 87-HT-35.
- (4) Wen, M. and Jang, K. 2003, "An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 4657~4667.
- (5) Gao, N., Sun, H., and Ewing, D. 2003, "Heat transfer to impinging round jet with triangular tab," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2557~2569.
- (6) Hollwarth, B. R., Lehmann, G. and Rosiczkowski,

- J., 1983, "Arrays of Impinging Jets with Spent Fluid Removal through Vent Holes on the Target Surface Part 2: Local Heat Transfer," J. of Engineering for Power, Vol. 105, pp. 393~402.
- (7) Cho, H. H. and Rhee, D. H., 2001, "Local Heat/Mass Transfer Measurement on the Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling System," J. of Turbomachinery, Vol. 123, pp. 601~608.
- (8) Rhee, D. H., Choi, J. H. and Cho, H. H., 2003, "Flow and Heat (Mass) Transfer Characteristics in an Impingement/Effusion Cooling System with Crossflow," J. of Turbomachinery, Vol. 125, pp. 74~82.
- (9) 홍성국, 이동호, 조형희, 2005, "가스터빈 연소실 냉각을 위한 충돌제트/유출냉각기법에서 사각핀 설치에 따른 열/물질전달 특성," 유체기계저널, 제8권, 제4호, pp. 39~47.
- (10) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 10, pp. 416~434.
- (11) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes," in Measurements in Heat Transfer, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., pp. 397~423, Hemisphere Pub., New York.
- (12) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3~8.