(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0102807
(43) 공개일자 2020년09월01일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F01D 5/18 (2006.01)
(52) CPC특허분류
F01D 5/186 (2013.01)
F05D 2250/14 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0021285
(22) 출원일자 2019년02월22일
심사청구일자 2019년02월22일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김광용
서울특별시 서초구 남부순환로 2311-12, 105동 701호(방배동, 래미안방배아트힐)
김준희
경상남도 김해시 내외로 55, 304동 1206호(내동, 동아아파트)
(74) 대리인
이은철, 이수찬

전체 청구항 수 : 총 8 항

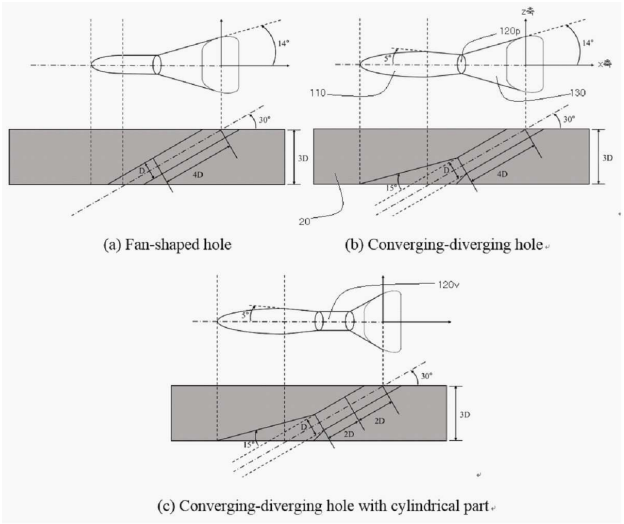
(54) 발명의 명칭 **가스 터빈 블레이드의 냉각을 위한 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조**

(57) 요 약

가스 터빈 블레이드의 냉각을 위한 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조가 개시된다.

냉각유체를 안내하도록 일정한 길이로 형성되고, 길이방향을 따라 제1영역과 제2영역으로 구분되는 통로부를 포함하여 구성되며, 상기 제1영역은, 상기 냉각유체가 유입되는 입구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 감소하며, 상기 제2영역은, 상기 냉각유체가 유출되는 출구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 증가하는 것을 특징으로 한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
F05D 2250/511 (2013.01)
F05D 2260/202 (2013.01)

명 세 서

청구범위

청구항 1

가스 터빈 블레이드의 냉각을 위한 막냉각 홀의 형상 구조에 있어서,

냉각유체를 안내하도록 일정한 길이로 형성되고, 길이방향을 따라 제1영역과 제2영역으로 구분되는 통로부를 포함하여 구성되며,

상기 제1영역은,

상기 냉각유체가 유입되는 입구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 감소하며,

상기 제2영역은,

상기 냉각유체가 유출되는 출구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 증가하는 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1영역과 상기 제2영역의 경계면을 구성하는 상기 통로부의 단면은,

상기 냉각유체의 유동방향에 대해 수직한 원형 단면인 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때,

상기 제1영역의 길이는 2D인 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 통로부는,

가스터빈 블레이드에 대해 일정한 기울기로 형성되고,

상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때,

상기 제2영역의 길이는 4D인 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때,

상기 통로부는,

길이가 6D인 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제1영역은,

상기 통로부의 길이방향을 기준으로 양 측면방향으로 0~20도의 기울기를 갖도록 확관되는 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 제2영역은,

상기 통로부의 길이방향을 기준으로 양 측면방향으로 일정한 기울기를 갖도록 확관되는 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 제1영역은,

상기 통로부의 길이방향에 대한 단면이 타원형을 이루는 것을 특징으로 하는 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 가스터빈 블레이드의 냉각을 위한 수렴발산형 막냉각 홀의 형상 구조에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 막냉각 홀의 구조를 변형함으로써 효율적으로 가스터빈 블레이드의 냉각기능을 수행하기 위한 수렴발산형 막냉각 홀의 형상구조에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 일반적으로, 가스터빈 엔진의 효율 및 성능을 높이기 위해 최근 가스터빈 엔진은 1,500~1700° C에서 작동되도록 설계되고 있으며, 열효율을 더욱 높이기 위해 터빈 입구온도를 연평균 20° C씩 꾸준히 상승시켜 설계하는 추세이다.

[0003] 따라서 높은 입구온도로부터 터빈 블레이드를 보호하기 위해 다양한 냉각기법들이 연구 및 개발되고 있는데, 그 중 막냉각(film-cooling) 방법은 블레이드 표면과 일정한 각도를 이루는 홀(hole)을 통해 냉각유체를 분사하여 블레이드 표면에 막을 형성함으로써 고온의 주유동가스로부터 표면을 보호하는 방법으로, 이 방법은 매우 효과적인 냉각성능으로 인해 가장 보편적으로 사용되고 있다.

[0004] 막냉각을 위해서는 압축기로부터 추출된 고압의 냉각공기가 사용되므로 과도한 [0004] 양의 압축공기의 사용은 가스터빈의 효율을 감소시키므로 효과적인 냉각방식의 필요성이 대두 되고 있으며, 홀의 형상은 막냉각 효율에 크게 영향을 끼치기 때문에 막냉각 효율을 높이기 위해 다양한 홀의 형상이 개발되고 있는 실정이다.

[0005] 그 중 미국공개특허공보 제2008/0031738호에는 벨 형상의 막냉각 홀의 구성이 개시되어 있는데, 그 주요 기술적 구성은 도 1에 나타낸 바와 같이, 출구부측의 단면적이 점차 확장되는 형태이며, 확관형 출구부를 갖는 막냉각 홀의 형상은 지속적인 연구를 통해 다양한 구조로 발전되어 왔다.

[0006] 하지만, 냉각유체가 막냉각 홀을 통과하는 과정에서 막냉각 홀 내에서 분리거품을 발생시키게 되는데, 이는 냉

각 효율의 현저한 감소를 일으키는 원인으로서 여러차례 지적되어 왔고, 이러한 문제점은 확관형 출구부를 갖는 종래의 막냉각 홀에서도 여전히 존재하였다.

[0007] 또한, 막냉각 홀의 입구부 형상에 대한 연구는 거의 존재하지 않았고, 대부분의 형상이 일정한 직경을 갖는 원통형에 국한되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 국내 등록특허공보 제10-1276760호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 상술한 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서,

[0010] 향상된 막냉각 성능을 나타내는 막냉각 홀의 형상 구조를 제공하는 것을 일 목적으로 한다.

[0011] 본 발명의 목적은 이상에서 언급된 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 다른 목적들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기한 바와 같은 본 발명의 목적을 달성하고, 후술하는 본 발명의 특징적인 기능을 수행하기 위한 본 발명의 특징은 다음과 같다.

[0013] 가스 터빈 블레이드의 냉각을 위한 막냉각 홀의 형상 구조에 있어서,

[0014] 냉각유체를 안내하도록 일정한 길이로 형성되고, 길이방향을 따라 제1영역과 제2영역으로 구분되는 통로부를 포함하여 구성되며, 상기 제1영역은, 상기 냉각유체가 유입되는 입구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 감소하며, 상기 제2영역은, 상기 냉각유체가 유출되는 출구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 증가하는 것을 특징으로 한다.

[0015] 바람직하게는, 상기 제1영역과 상기 제2영역의 경계면을 구성하는 상기 통로부의 단면은, 상기 냉각유체의 유동방향에 대해 수직한 원형 단면인 것을 특징으로 한다.

[0016] 또한, 상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때, 상기 제1영역의 길이는 2D인 것을 특징으로 한다.

[0017] 또한, 상기 통로부는, 가스터빈 블레이드에 대해 일정한 기울기로 형성되고, 상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때, 상기 제2영역의 길이는 4D인 것을 특징으로 한다.

[0018] 또한, 상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때, 상기 통로부는,

[0019] 길이가 6D인 것을 특징으로 한다.

[0020] 한편, 상기 제1영역은, 상기 통로부의 길이방향을 기준으로 양 측면방향으로 0~20도의 기울기를 갖도록 확관되는 것을 특징으로 한다.

[0021] 바람직하게는, 상기 제2영역은, 상기 통로부의 길이방향을 기준으로 양 측면방향으로 일정한 기울기를 갖도록 확관되는 것을 특징으로 한다.

[0022] 바람직하게는, 상기 제1영역은, 상기 통로부의 길이방향에 대한 단면이 타원형을 이루는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0023] 이상에서 설명한 바와 같이, 본 발명의 수렴형 입구부와 발산형 출구부를 포함하는 막냉각 홀의 형상 구조에 따르면, 홀 내부의 분리거품의 크기를 줄임으로써 막냉각 홀의 하부 냉각제 층의 두께를 증가시키는 효과를 제공한다.

[0024] 본 발명의 효과는 전술한 것으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 다른 효과들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 인식될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀의 평면도와 단면도를 종래기술과 비교하여 도시한 것이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀의 냉각효율을 계산하기 위한 계산영역 및 경계조건을 도시한 것이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀의 냉각효율을 계산하기 위한 그리드 시스템의 예를 도시한 것이다.

도 4는 서로 다른 메쉬 크기에 대한 축방향 평균 막냉각 효과의 분포를 도시한 것이다.

도 5는 축방향으로 평균화 된 막냉각 효과에 대한 실험 데이터를 도시한 것이다.

도 6은 블로잉 비율에 따른 막냉각 효과를 종래기술과 비교한 결과를 도시한 것이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 축방향으로 평균화된 막냉각 효과를 블로잉 비율에 따라 도시한 것이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 세가지 다른 블로잉 비율에서 국부적인 막냉각 효율의 분포를 종래기술과 비교하여 도시한 것이다.

도 9는 성형된 막냉각 홀의 확산 부분에 있는 분리영역을 도시한 것이다.

도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 z/D=0에서의 x-y평면상의 속도분포를 도시한 것이다.

도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 내부 표면을 블로잉 비율에 따라 도시한 것이다.

도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 단면에서의 속도를 도시한 것이다.

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 x/D가 1에서의 y-z 평면상 온도 및 와도 분포를 도시한 것이다.

도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 x/D=10에서의 y-z 평면상 온도 및 와도 분포를 도시한 것이다.

도 15는 도 1에서 입구부의 경사각을 일부 달리한 것이다.

도 16은 도 15에서 입구부 경사구조의 변화에 따른 냉각효율을 도시한 것이다.

도 17은 도 15에서 입구부 경사구조의 변화에 따른 유동박리 생성 정도를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 이하에서는 도면을 참조하여 본 발명을 보다 상세하게 설명한다. 도면들 중 동일한 구성요소들은 가능한 한 어느 곳에서든지 동일한 부호들로 나타내고 있음에 유의해야 한다. 또한 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 설명은 생략한다.

[0027] 또한 아래 설명하는 실시예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있다. 아래 설명하는 실시예들은 실시 형태에 대한 한정하려는 것이 아니며, 이들에 대한 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0028] 이하 도면에 따라서 논리적으로 기술한다.

[0029] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀의 평면도와 단면도를 종래기술과 비교하여 도시한 것이다.

[0030] 도 1을 참조할 때, 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀은, 가스터빈 블레이드에 형성된 통로부로 이루어지며, 통로부는 제1영역(110)과 제2영역(130)으로 구분된다.

[0031] 통로부는, 냉각수 플레넘으로부터 유입된 냉각유체를 주채널로 안내한다. 통로부를 통과한 냉각유체는 터빈 블

레이드와 주 채널 사이에 냉각수 층을 생성하고 이는 터빈 블레이드를 과열로부터 보호하기 위한 냉각막으로서 기능한다. 블레이드를 관통하여 일정한 길이로 형성되며, 그 길이방향을 따라 제1영역(110)과 제2영역(130)으로 구분할 수 있다.

[0032] 제1영역은, 냉각유체가 냉각수 플레넘으로부터 유입되는 입구를 포함하며, 냉각유체의 유동방향을 따라 점차 그 단면적이 감소하는 영역이 존재한다. 점차 단면적이 감소하는 영역은 제1영역(110) 전체에 걸쳐 형성될 수 있다.

[0033] 제2영역(130)은, 냉각유체가 주 채널로 유출되는 출구를 포함하며, 냉각유체의 유동방향을 따라 점차 그 단면적이 증가하는 영역이 존재한다. 점차 단면적이 증가하는 영역은 제2영역(130) 전체에 걸쳐 형성될 수 있다.

[0034] 제1영역(110)과 제2영역(130)의 경계면은 통로부의 일 단면을 구성하고, 이 단면(120p)은 통로부의 수렴-발산 경계가 된다. 이를 경계단면(120p)이라 정의할 때, 경계단면(120p)은, 냉각유체의 유동방향에 대해 수직한 원형 또는 타원형 단면일 수 있다.

[0035] 보다 구체적으로는, 도 1 (b)에 도시된 바와 같이, 제1영역(110)은 냉각유체의 유동방향을 따라 한 점을 향해 수렴하는 형태일 수 있다.

[0036] 바람직하게는, 통로부의 길이방향에 대해 일정한 경사각을 가지고 그 단면적이 균일하게 좁아지는 수렴영역으로 나타날 수 있다.

[0037] 도 1 (b)의 상부 그림은, 터빈 블레이드 면 위에서 내려다본 평면 투시도를 나타낸 것이다. 터빈 블레이드 면을 x-z평면이라 정의하고, 통로부의 길이방향을 x축 방향이라 정의할 때, 제1영역(110)은, x축에 대해 일정한 경사각을 갖고 ±z축 방향으로 확장되어 나가는 형태이다. 경계단면(120p)이 지나는 x축 상의 점을 원점이라고 가정할 때, 제1영역(110)은 -x축을 따라 형성된다.

[0038] 바람직하게는, x-z평면상에서 제1영역(110)이 갖는 경사각은 2.5° 내지 10° 일 수 있다.

[0039] x-y평면상에서 제1영역의 경사각이 2.5° 미만인 경우는 측면 방향에 대해서는, 종래의 원통형 막냉각홀과 큰 형상의 차이가 없고, 따라서 막냉각홀의 막냉각 성능 및 효율도 미세한 차이만 있게 된다. 제1영역의 x-y평면상의 경사각이 10°를 초과하는 경우에는, 추가적인 확장으로 인한 막냉각 효율의 상대적인 변화는 크지 않고, 추가적인 확장으로 막냉각홀 배치에 있어 측면방향으로 홀과 홀 사이의 간극이 멀어져 전체적인 막냉각 성능이 저하될 가능성이 있어 바람직하지 못하다. 또한, 원통부의 직경 대비, 확관부의 확장이 지나치게 커지게 되면 막냉각홀을 터빈 블레이드에 형성하는데 어려운 단점이 있다. 가장 바람직한 경사각은 5° 일 수 있다.

[0040] 경계단면(120p)을 기점으로 제1영역(110)과 인접하여 형성된 제2영역(130)은 x축을 따라 연장되고, x축에 대해 일정한 경사각을 갖고 ±z축 방향으로 확장되어 나가는 형태이다. 마찬가지로, 경계단면(120p)이 지나는 x축 상의 점을 원점이라고 가정할 때, 제2영역(130)은 +x축을 따라 형성된다.

[0041] 바람직하게는, x-z평면상에서 제2영역(130)이 갖는 경사각은 14° 일 수 있다.

[0042] 각 영역의 단면적이 균일하게 확장되도록 경사는 일정하게 형성되는 것이 바람직하나, 통로부의 내면을 일부 만곡하게 형성하거나, 돌기부를 더 포함하는 등 구조적인 변경을 가하는 것도 통상의 기술자가 적용가능한 범위 내라 할 것이다. 따라서, 각 영역의 단면은, 반드시 원형 또는 타원형에 국한되는 것은 아니며, 통로부 전체의 수렴-발산형 구조를 유지하는 범위 내라면 단면의 형상에 특별한 제한은 없다.

[0043] 도 2 (b)의 하부 그림은, 터빈 블레이드(20)를 그 면에 수직으로 절단한 단면도상의 통로부를 도시한 것이다.

[0044] 터빈 블레이드(20)를 관통하며 형성된 통로부는, 터빈 블레이드 면에 대해 일정한 경사를 두고 형성되며, 통로부의 축과 블레이드 면이 형성하는 경사는 30° 가 가장 적절할 것이다.

[0045] 터빈 블레이드(20)의 수직 절단면을 x-y평면으로 정의하고, 터빈 블레이드(20)의 깊이방향을 y축으로 정의할 때, 제1영역(110)은 x-y평면상에서 통로부의 축에 대해 일정한 경사를 형성하며 확관되는 형태일 수 있다. 이때, 확관되는 경사각은 양측으로 0~20° 가 되는 것이 바람직하다.

[0046] 본 발명에 따른 수렴형 입구형상의 막냉각홀 구조에 있어서, 제1영역의 x-y평면상에서 경사각이 0° 미만인 경우는 수렴형 입구형상의 막냉각홀 구조가 아니고, 반대로 확산형 입구형상의 막냉각홀 구조가 된다. 따라서, x-y평면상의 경사각이 0° 미만인 경우는 본 발명을 통해 얻고자 하는 수렴형 입구형상의 막냉각홀 구조로는 바람직하지 못하다. 제1영역의 x-y평면상 경사각이 20°를 초과하는 경우에는, 추가적인 확장으로 인한 막냉각 효율

의 상대적인 변화는 크지 않고, 추가적인 확장으로 다른 열(array)의 막냉각홀을 침범 할 가능성이 있거나 홀의 열과 열 사이의 거리가 멀어져 막냉각 성능이 저하될 가능성이 있어 바람직하지 못하다. 또한, 원통부의 직경 대비, 확관부의 확장이 지나치게 커지게 되면 막냉각홀의 가공이 어려운 단점이 있다.

[0047] 제1영역에서 확관되는 부분은 통로의 축을 기준으로 대칭되는 형상일 수 있다. 따라서, 터빈 블레이드의 단면도에서 볼 때, 제1영역에 형성된 입구부에는 터빈 블레이드의 면과 예각을 이루는 부분이 존재한다.

[0048] 다만, 제2영역(130)은 x-y평면상에서 경사면 없이 일정한 폭으로 연장될 수 있다.

[0049] 다시 말해서, 제1영역(110)의 경우, 통로부는 x-y평면과 x-z평면 모두에서 각각 일정한 경사로 확관되나, 제2영역(130)의 경우, 통로부는 x-z평면 상에서만 일정한 경사로 확관되는 형태일 수 있다.

[0050] 또한, 경계단면(120p)의 직경을 D라 정의할 때, 제1영역의 길이는 2D, 제2영역의 길이는 4D로서, 통로부 전체의 길이는 6D가 되는 것이 보다 바람직하다. 다만, 이러한 수치적인 한정에서 일부 벗어나더라도, 본 발명의 기술적 효과에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서라면 통상의 기술자가 용이하게 변경 가능하다 할 것이다.

[0052] 본 발명의 또 다른 실시예로서, 도 1 (c)를 참조하면, 제1영역(110)과 제2영역(130) 사이에 실린더 영역(120v)을 형성할 수 있다. 이 실린더 영역(120v)은 경계단면(120p)과 동일한 면적으로 통로부의 길이방향을 따라 연정형성 된다. 즉, 경계단면(120p)이 통로부의 길이방향으로 부피를 갖도록 확장된 형태라고 볼 수 있다. 이 경우 냉각수 플렌지를 통해 유입된 냉각유체는, 제1영역(110)을 통과한 후 바로 제2영역(130)에 진입하는 것이 아니라, 실린더 영역(120v)을 경유하게 된다.

[0054] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀의 냉각효율을 계산하기 위한 계산영역 및 경계조건을 도시한 것이다.

[0055] 구체적으로, 도 2는 고온 가스의 주 채널, 닫힌 끝이 있는 냉각수 플레넘 및 막냉각 홀로 구성된 계산 영역을 도시한다. 주 채널 입구에서 막냉각 홀의 출구 중심까지의 거리는 30D이고, 주채널과 냉각수 플레넘의 총 길이는 70D와 40D이며 주 채널과 냉각수 플레넘의 높이는 각각 8D와 6D이다.

[0056] 작동 유체는 이상기체(공기)로 가정하였다. 주류 유입구에는 13.8m/x의 균일한 유입 속도와 321K의 온도가 정해졌으며 레이놀즈 수는 막냉각 홀의 직경과 주류 유입 속도에 기반하여 11,000으로 설정하였다. 냉각수 플래넘 입구의 냉각수 흐름은 296K의 온도에서 플로잉 비율을 고정하기 위해 일정한 질량 유량을 갖는다. 블로잉 비율(M)은 주류에 대한 냉각제 흐름의 질량 유속 비율로 정의된다. M=0.5, 1.0 및 1.5의 세 가지 발포 비율이 테스트되었다.

[0057] 주 채널에서의 고온 가스에 대한 냉매의 밀도 비(DR)는 1.083이었다. 대기압(제로 게이지 압력)은 주 채널의 출구에서 지정되었다. 모든 벽은 노 슬립 및 단열 벽이며, 막냉각 홀 배열이 고려되었기 때문에 측면 경계에서 주기조건이 사용되었다. 인접한 막냉각 홀 사이의 거리(홀의 피치)는 6D였다. 주 채널 입구의 난류 강도는 3%였다. 매쉬 생성은 ANSYS ICEM 15.0을 사용하여 수행되었다.

[0059] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 수렴발산형 막냉각 홀의 냉각효율을 계산하기 위한 그리드 시스템의 예를 도시한 것이다.

[0060] 주 채널의 그리드는 사면체 메쉬로 구성되어 있으며 냉각수 플레넘 및 막냉각 홀에 육면체 그리드 시스템이 사용되었다. 메쉬는 막냉각 홀 내부와 주 채널의 냉각면과 냉각수 플레넘의 윗면에 밀집되어 있다. 벽에 프리즘 레이어가 쌓여 있고 벽에 인접한 첫 번째 프리즘 레이어가 y^+>30에 배치되어 경험적 벽 기능을 구현할 수 있다.

[0062] 수치 해법의 수렴은 모든 유동 변수의 제곱 평균 제곱근 값이 1.0×10^{-6}이하로 떨어질 때 그리고 전체 계산 영역에서 질량과 에너지의 불균형이 0.001 % 미만일 때 발생한다고 가정했다. 3.41-GHz 인텔 i7 프로세서가 장착된 컴퓨터가 계산에 사용되었다. 단일 분석에 대한 계산은 5000 번의 반복 작업으로 종료되었으며, 형상에 따라 약 50 시간에서 60 시간의 계산 시간이 소요되었다.

[0064] 공간적으로 평균화 된 막냉각 효과 (η_s)는 다음과 같이 정의된다.

[0065]
$$\eta_s\left(\frac{x}{D},\frac{z}{D}\right)=\frac{\int_{-1}^{20}\int_{-3}^{3}\eta\left(\frac{x}{D},\frac{z}{D}\right)d\left(\frac{z}{D}\right)d\left(\frac{x}{D}\right)}{21\times 6}$$

[0067] 여기서,

$$\eta\left(\frac{x}{D},\frac{z}{D}\right)=\frac{T_{aw}\left(\frac{x}{D},\frac{z}{D}\right)-T_h}{T_c-T_h}$$

[0068]

[0069] Taw는 단열 벽 온도이고 Th와 Tc는 주 채널과 냉각수 플레넘 온도의 주류 온도이다. 공간적으로 평균화 된 막냉각 효과는 냉각면에서 3D의 폭과 길이 방향 길이가 20D인 영역에서 평균화되었다.

[0070] 수치 솔루션의 그리드 독립성은 수렴-발산 막 냉각홀에 대해 평가되었다. 그리드 독립성 테스트를 위해 1.7에서 4.0 백만 범위의 세 노드 수가 테스트되었다.

[0072] 도 4는 서로 다른 메쉬 크기에 대한 축방향 평균 막냉각 효과의 분포를 도시한 것이다.

[0073] 보다 구체적으로, 세 가지 다른 메쉬 크기에 대한 측 방향 평균 막냉각 효과의 분포를 도시한다.. 거의 동일한 분포가 260만개와, 400만개의 격자 노드에서 발생하였다. 따라서 최적의 그리드 노드 수는 260만개로 선택되었다.

[0075] 시뮬레이션의 신뢰도를 검증하고 가장 좋은 난류 모델을 선택하기 위해 세 가지 다른 난류 모델을 사용하는 부채꼴 및 원통형 홀의 수치 결과를 종래 실험 데이터(by Saumweber et al. 2008)와 비교하였다.(도 5 참조) 팬 모양 및 원통형 홀은 각각 FAN 및 CYL로 표시된다. 테스트 된 3 가지 난류 모델은 표준 k-ε 모델, 높은 Re SST 모델, 낮은 Re SST 모델 이다.

[0076]

[0077] 도 5는 축방향으로 평균화 된 막냉각 효과에 대한 실험 데이터를 도시한 것이다. 도 6은 블로잉 비율에 따른 막냉각 효과를 종래기술과 비교한 결과를 도시한 것이다.

[0078] 도 5 (a)는 M = 0.5에서 부채 모양의 홀에 대한 측 방향 평균 막냉각 효과의 분포를 보여준다. 높은 Re SST 모델을 사용한 수치 결과는 실험 데이터와 가장 잘 일치함을 보여준다. 표준 k-ε 모델은 약간 크지 만 유사한 결과를 보여준다. 그러나 낮은 Re의 SST 모델은 실험 데이터에 비해 막냉각 효과가 크게 예측된다. 따라서 경험적 벽 기능을 가진 high-Re SST 모델이 본 연구에서 사용되었다. 도 5 (b)는 M = 0.5 인 부채꼴 및 원통형 홀과 M = 1.5 인 부채꼴 홀에 대한 측 방향 평균 막냉각 효과의 분포를 나타낸다. 부채 형태의 홀에 대한 수치 결과는 두 가지의 비율에 대해 다소 과장 예측되었지만 일반적인 경향은 실험 데이터와 일치한다.

[0079] 수렴-발산 막냉각 홀의 효과를 증명하기 위해 수렴발산 막냉각 홀(도 1 (b))의 공간 평균 된 막냉각 효과를 단순한 부채꼴 홀의 효과와 비교하였다. (도 1 (a)), 0.5, 1.0 및 1.5의 블로잉 비율로도 도 6에 도시 된 바와 같이, 상기 수렴-발산 헐은 상기 팬 형 막냉각 홀의 그것과 비교하여, 공간 평균화 된 막냉각 효율을 4.34 %, 5.91 % 및 9.88 %였다. 공간적으로 평균화 된 막냉각 효율의 증가는 블로잉 비율이 증가함에 따라 커짐을 알 수 있다.

[0081] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 축방향으로 평균화된 막냉각 효과를 블로잉 비율에 따라 도시한 것이다.

[0082] M = 0.5에서, 수렴-발산 막냉각 홀은 홀 바로 하류에서보다 높은 막냉각 효과를 나타내지만, 두 홀 모두 먼 하류 영역에서 거의 동일한 막냉각 효과를 나타낸다. 그러나, 송풍 비가 증가함에 따라, 수렴-발산 막냉각 홀은 막냉각 효과를 더 향상시킨다. 따라서 수렴-발산 박냉각 홀의 막냉각 효율의 레벨은 M = 1.0 및 1.5에서 전체 영역의 부채꼴 홀의 그것보다 높다.

[0084] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 세가지 다른 블로잉 비율에서 국부적인 막냉각 효율의 분포를 종래기술과 비교하여 도시한 것이다.

[0085] 수렴-발산 막냉각 홀은 팬 형상 막냉각 홀에 비해 홀 바로 하류에서보다 높은 막냉각 효과를 나타낸다. 그러나, 송풍 비율에 관계없이 냉각제의 스팬 방향으로 퍼짐에있어 명확한 개선은 없다. 이는 막냉각 효과의 향상이 냉각제 스프레드의 개선으로 인한 것이 아니라는 것을 나타낸다.

[0087] 도 9는 성형된 막냉각 홀의 확산 부분에 있는 분리영역을 도시한 것이다.

[0088] 디퓨저의 입구에서 비대칭 속도 프로파일은 막냉각 홀의 축을 향한 냉각제의 편향으로 인해 발생하는데. 이 현

상을 분사 효과라 한다. 분리 영역은 디퓨저의 후방 벽에 형성되고 냉각제를 측면으로 변위시켜도 8에 도시 된 전형적인 이정표 효과 패턴을 유도한다.

[0090] 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 z/D=0에서의 x-y평면상의 속도분포를 도시한 것이다.

[0091] 구체적으로, M = 0.5에서의 팬 - 모양 및 수렴-발산 막냉각 홀에 대한 z/D = 0에서의 x-y 평면상의 속도 윤곽을 보여준다. 이전의 연구에서 수렴 된 입구 형상은 분사 효과를 감소시키고 막냉각 홀 내부의 운동량의 균일성을 향상시켰다. 도 10에 도시된 바와 같이, 유속은 부채 형 홀의 전방 벽 근처에서 증가하지만, 큰 분리 영역은 막냉각 홀의 후방 벽에서 발생한다. 그러나, 수렴-발산 막냉각 홀에서, 확산기의 입구에서의 속도 프로파일은 부채형 홀의 프로파일에 비해 상대적으로 균일하다.

[0093] 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 내부 표면을 블로잉 비율에 따라 도시한 것이다.

[0094] iso-surface는 U / U∞ = 0.1 인 표면을 나타내며, 막냉각 홀에 생성 된 분리 영역을 효율적으로 보여준다. 부채꼴 형태의 홀의 경우, 모든 분출 비에서 디퓨저 부분에 큰 분리 기포가 형성된다. 이렇게 하면 막냉각 홀의 출구 바로 아래의 막냉각 효과가 감소한다. 그러나, 수렴-발산 막냉각 홀에서, 분리 버블의 크기는 상당히 감소하고, 따라서, 냉각제는 막냉각 홀을 통해 보다 고르게 배수된다.

[0096] 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 단면에서의 속도를 도시한 것이다.

[0097] 구체적으로, 막냉각 홀 (평면 a, b, c 및 d)의 중심 축에 수직 인 4 개의 단면에서의 속도 윤곽을 보여준다. 냉각제는 양쪽 홀의 아래쪽에 위치한 분리 기포에 의해 위쪽으로 변위된다. 그러나, 수렴-발산 막냉각 홀 내의 분리 영역은 부채꼴 홀의 분리 영역보다 작다. 따라서, 수렴-발산 막냉각 홀은 부채꼴 홀보다 더 균일 한 속도 프로파일을 나타낸다. 이러한 이유 때문에, 수렴-발산 막냉각 홀은 냉각수가 홀 하류의 냉각 표면에 더 잘 접촉되도록 한다.

[0099] 도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 x/D가 1에서의 y-z 평면상 온도 및 와도 분포를 도시한 것이다.

[0100] 부채꼴 및 수렴형 발산 막냉각 홀의 모두에서, 냉각제 층의 중앙부의 두께는 홀 내에 분리 된 기포의 존재로 인해 감소되었다. 그러나, 수렴-발산 형상의 경우, 도 11에 도시 된 바와 같이, 감소 된 분리 기포로 인해 상대적으로 두꺼운 층이 중앙 부분에 나타된다. 이는 냉각제 층의 폭이 거의 동일하더라도, 팬 형 막냉각 홀에 비해 수렴-발산 막냉각 홀이 냉각 효과의 향상에 더 기여함을 나타낸다.(도 7 및 도 8)

[0102] 도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀의 x/D=10에서의 y-z 평면상 온도 및 와도 분포를 도시한 것이다.

[0103] 구체적으로, M = 1.5에 대한 x / D = 10에서 y-z 평면상의 온도와 와도 분포를 도시한다. 두 개의 신장 소용돌이가 발생했고, 신장 소용돌이 사이에서 반대 방향으로 흐르는 다른 두 개의 소용돌이가 발생하였다. 수렴 - 발산 모양은 신장 소용돌이 사이의 추가적인 와류의 강도를 감소시킨다. 이는 냉각제와 고온의 주변 유체 사이의 혼합을 감소시켜 막냉 각 효과를 향상시킨다. 수렴-발산 막냉각 홀의 경우의 냉각제 온도도 비교적 낮다

[0105] 도 15는 도 1에서 입구부의 경사각을 일부 달리한 것이다. 도 16은 도 15에서 입구부 경사구조의 변화에 따른 냉각효율을 도시한 것이다. 도 17은 도 15에서 입구부 경사구조의 변화에 따른 유동박리 생성 정도를 도시한 것이다.

[0106] 제1영역은, 본 발명의 일 실시예에 의할 때 수렴형 입구부라 지칭될 수 있다. 또한 제2영역은 본 발명의 일 실시예에 의할 때, 발산형 출구부라 지칭될 수 있다. ‘수렴형 입구부의 하부’라는 표현에서 ‘하부’는 냉각 유체가 막냉각 홀을 따라 진행하는 방향을 하부에서 상부라고 할 때를 기준으로 한 것이다. ‘확장각’은 ‘경사각’과 동일한 의미로 사용될 수 있다. 아래 설명들은 전술한 용어들에 기초하여 이해될 수 있을 것이다.

[0107] 도 15 내지 도 17을 참조할 때, 본 발명의 일 실시예에 따른 막냉각 홀은 수렴형 입구부의 하부에 경사구조를 달리 할 수 있고, 이를 통해 상대적으로 효율성이 뛰어난 막냉각 홀의 형상구조를 발견할 수 있다.

[0108] 도 15에 나타난 바와 같이 , 수렴형 입구부 하부의 유동방향 확장각(β)이 60° 일 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이 경우, 수렴형 입구부의 하부와 블래이드 표면은 수직을 이루게 된다.

[0109] 이 경우, 도 16에 나타난 바와 같이, 수렴형 입구부 하부에서의 유동방향 확장각(β) 60° 인 경우가 15° 인 경우에 비하여 측면평균-막냉각 효율이 감소한 것을 확인할 수 있으며, 특히 막냉각 홀 출구 근처의 영역에서 그

차이가 큰 것으로 나타났다.

[0110] 도 17을 참조할 때, β = 60° 인 경우가 β = 15° 인 경우에 비하여 발산형 출구부 하부에서 생기는 유동박리가 더 넓게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 발산형 출구부 상부에 냉각유체가 집중되게 되어 냉각유체의 국소적인 모멘텀을 증가시키게 된다. 이에 따라 냉각유체가 주유동에 침투하려는 경향이 강화되어 막냉각 성능을 감소시키게 된다.

[0111] 수렴형 입구부가 유동박리를 억제시켜 막냉각 효율을 향상시키게 되지만 오히려 발산형 출구부 하부에서의 유동박리가 과하게 억제될 경우, 막냉각 성능이 감소할 수 있다. 유동박리는 냉각유체의 국소적인 모멘텀을 증가시켜 막냉각 성능을 감소시키는 경향도 있지만 출구부 형상이 fan 형상처럼 발산형의 경우에서는 냉각유동을 두 갈래로 분리시키는 역할도 하기 때문에 냉각유동의 측면방향 확산성을 증가시켜준다. 이에 따라 입구부가 필요 이상으로 확장되어 유동박리가 과하게 억제될 경우, 냉각유동의 측면방향 확산성이 감소하게 되어 막냉각 성능에 악영향을 줄 수 있다.

[0112] 이하는 본 발명의 기술적 특징을 포함하는 구성들을 개시한 것이다.

[0113] 가스 터빈 블레이드의 냉각을 위한 막냉각 홀의 형상 구조에 있어서,

[0114] 냉각유체를 안내하도록 일정한 길이로 형성되고, 길이방향을 따라 제1영역과 제2영역으로 구분되는 통로부를 포함하여 구성되며, 상기 제1영역은, 상기 냉각유체가 유입되는 입구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 감소하며, 상기 제2영역은, 상기 냉각유체가 유출되는 출구를 포함하고, 상기 냉각유체의 유동방향을 따라 점진적으로 단면적이 증가하는 것을 특징으로 한다.

[0115] 바람직하게는, 상기 제1영역과 상기 제2영역의 경계면을 구성하는 상기 통로부의 단면은, 상기 냉각유체의 유동방향에 대해 수직한 원형 단면인 것을 특징으로 한다.

[0116] 또한, 상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때, 상기 제1영역의 길이는 2D인 것을 특징으로 한다.

[0117] 또한, 상기 통로부는, 가스터빈 블레이드에 대해 일정한 기울기로 형성되고, 상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때, 상기 제2영역의 길이는 4D인 것을 특징으로 한다.

[0118] 또한, 상기 원형 단면의 직경의 길이를 D라 할 때, 상기 통로부는,

[0119] 길이가 6D인 것을 특징으로 한다.

[0120] 한편, 상기 제1영역은, 상기 통로부의 길이방향을 기준으로 양 측면방향으로 0~20도의 기울기를 갖도록 확관되는 것을 특징으로 한다.

[0121] 바람직하게는, 상기 제2영역은, 상기 통로부의 길이방향을 기준으로 양 측면방향으로 일정한 기울기를 갖도록 확관되는 것을 특징으로 한다.

[0122] 바람직하게는, 상기 제1영역은, 상기 통로부의 길이방향에 대한 단면이 타원형을 이루는 것을 특징으로 한다.

[0123] 한편 본 발명은 상술한 내용에서 본 발명의 실시예 및 첨부된 도면에 의해 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 여러 가지 치환, 변형 및 변경이 가능함은 통상의 기술자에게 명백할 것이다.

부호의 설명

[0124] 터빈 블레이드 20

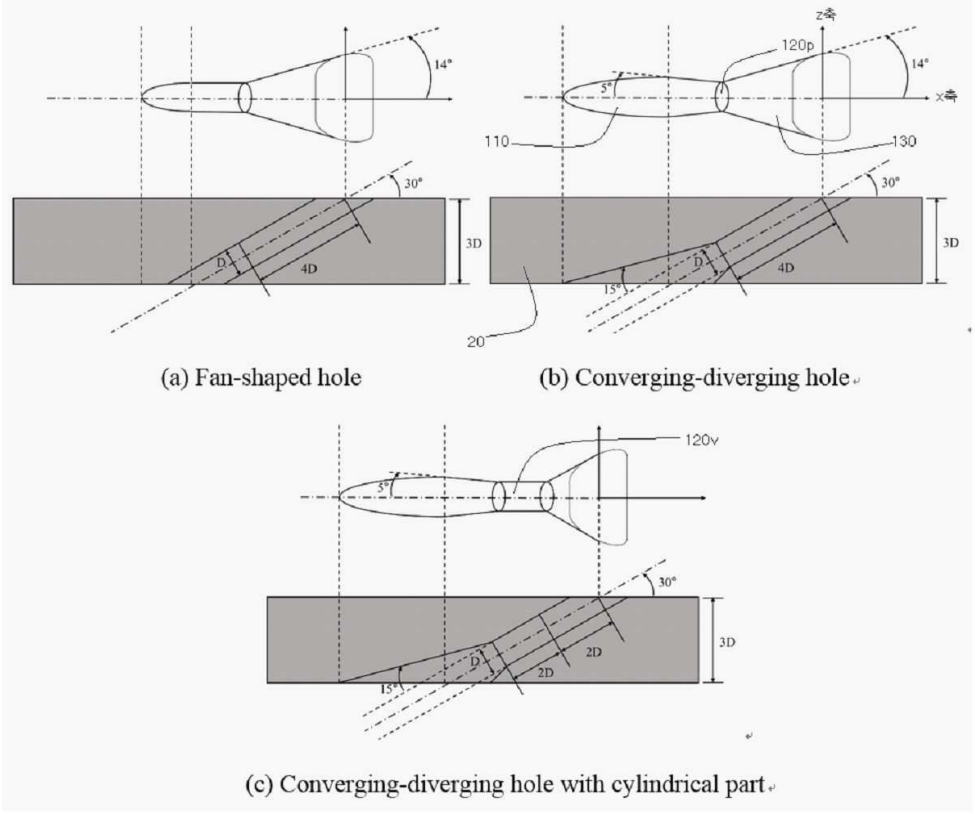
제1영역 110

경계단면 120p

제2영역 130

도면

도면1

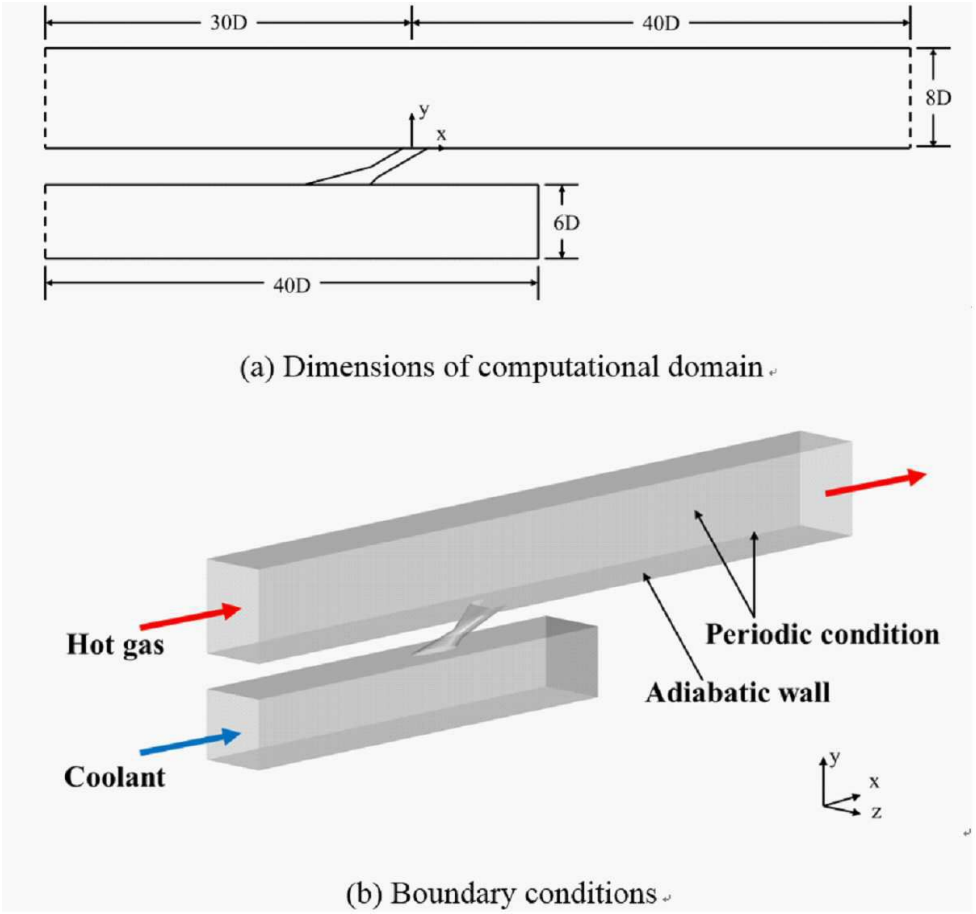


(a) Fan-shaped hole

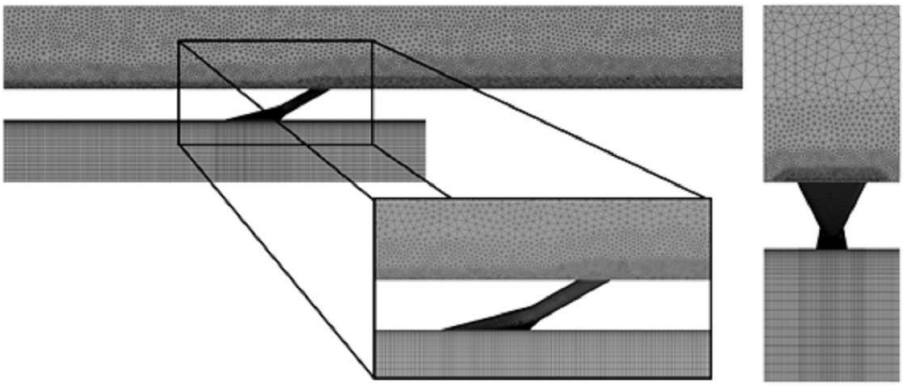
(b) Converging-diverging hole

(c) Converging-diverging hole with cylindrical part

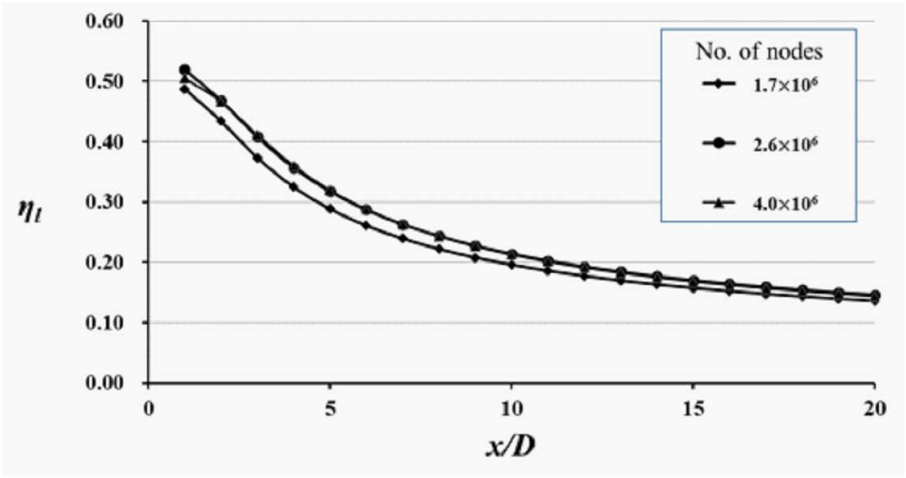
도면2


30D
40D
8D
y
x
6D
40D
(a) Dimensions of computational domain
Hot gas
Periodic condition
Adiabatic wall
Coolant
y
x
z
(b) Boundary conditions

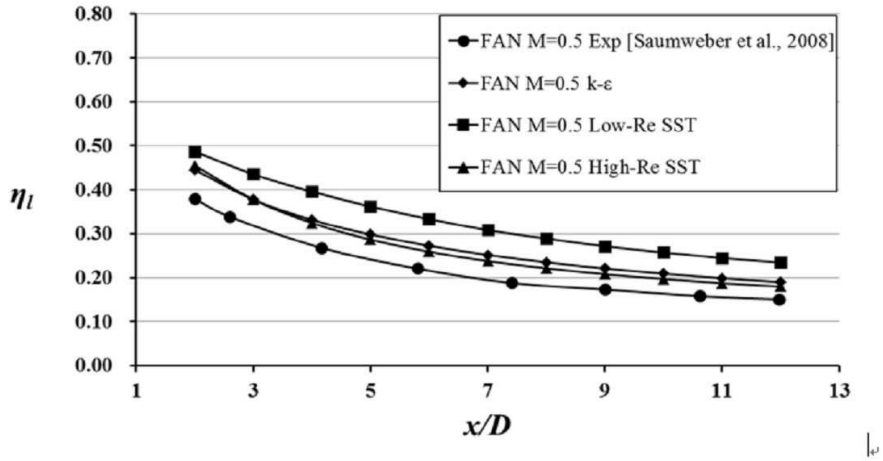
도면3

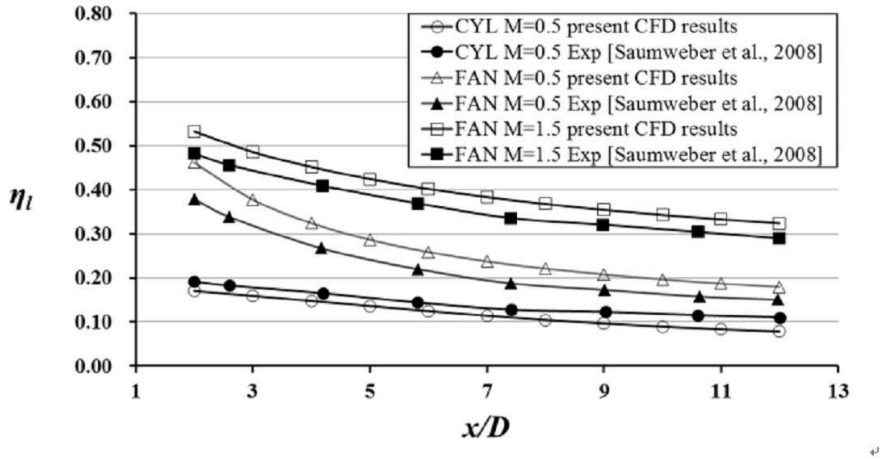


도면4

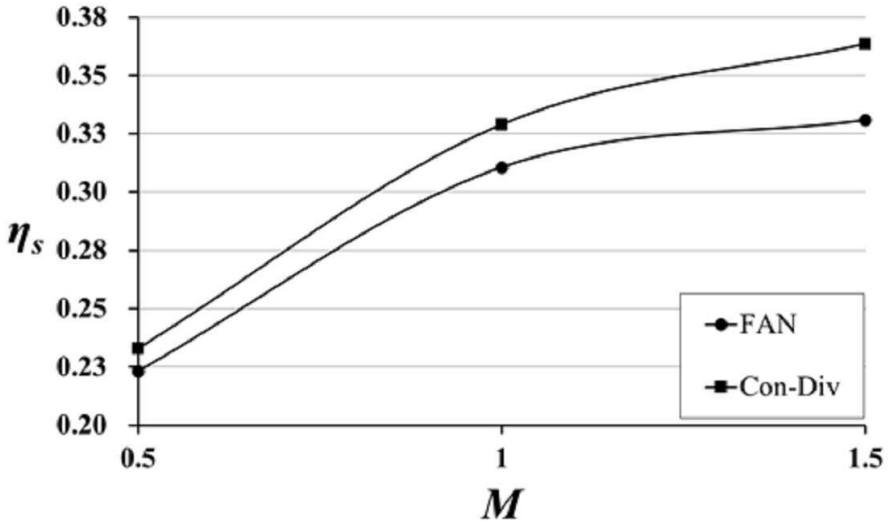

No. of nodes
1.7×10⁶
2.6×10⁶
4.0×10⁶
η_l
x/D
0.00
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
0
5
10
15
20

도면5

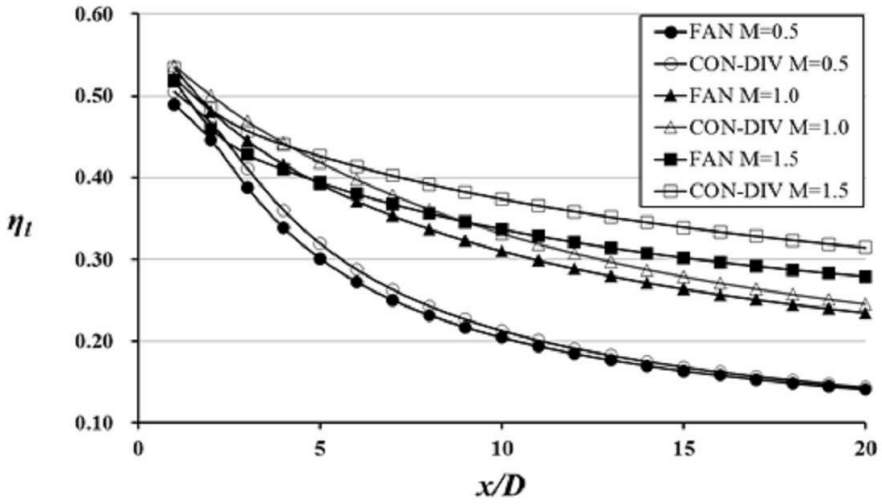

FAN M=0.5 Exp [Saumweber et al., 2008]
FAN M=0.5 k-ε
FAN M=0.5 Low-Re SST
FAN M=0.5 High-Re SST
η_l
x/D
0.00
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
0.70
0.80
1
3
5
7
9
11
13


CYL M=0.5 present CFD results
CYL M=0.5 Exp [Saumweber et al., 2008]
FAN M=0.5 present CFD results
FAN M=0.5 Exp [Saumweber et al., 2008]
FAN M=1.5 present CFD results
FAN M=1.5 Exp [Saumweber et al., 2008]
η_l
x/D
0.00
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
0.70
0.80
1
3
5
7
9
11
13

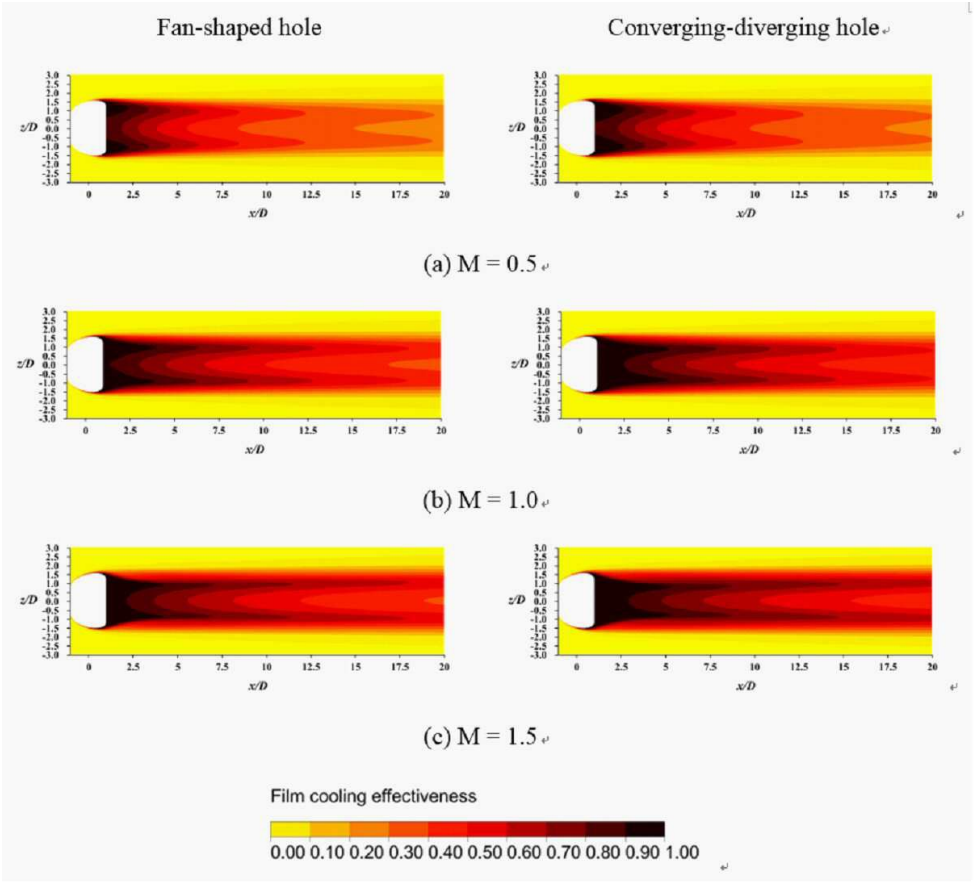
도면6


0.38
0.35
0.33
0.30
0.28
0.25
0.23
0.20
η_s
0.5
1
1.5
M
FAN
Con-Div

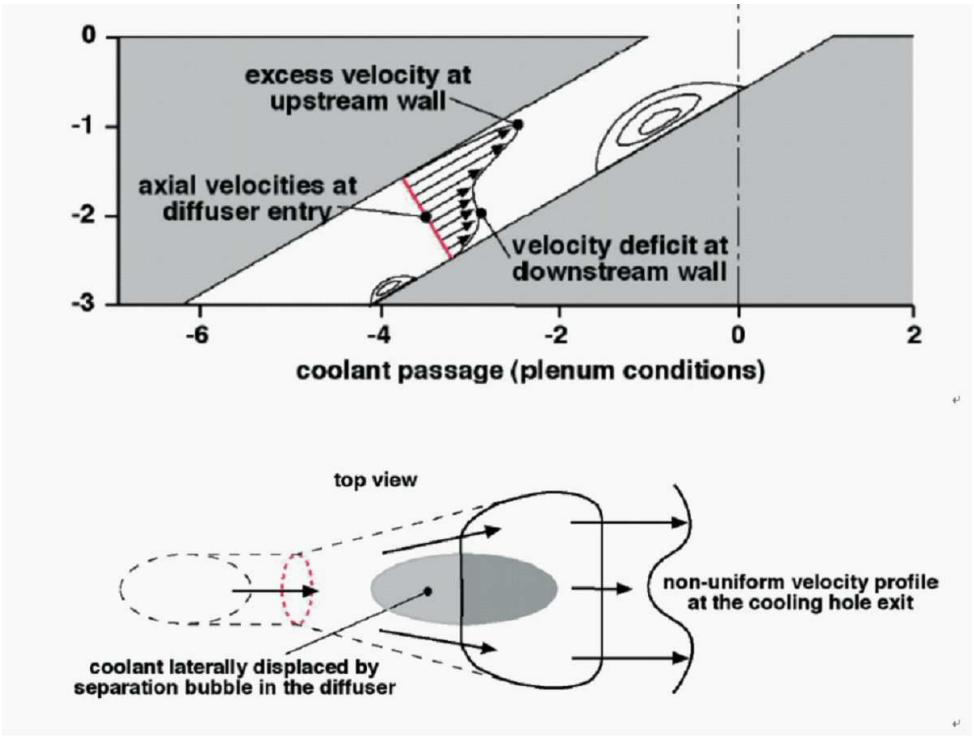
도면7


0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
η_t
0
5
10
15
20
x/D
FAN M=0.5
CON-DIV M=0.5
FAN M=1.0
CON-DIV M=1.0
FAN M=1.5
CON-DIV M=1.5

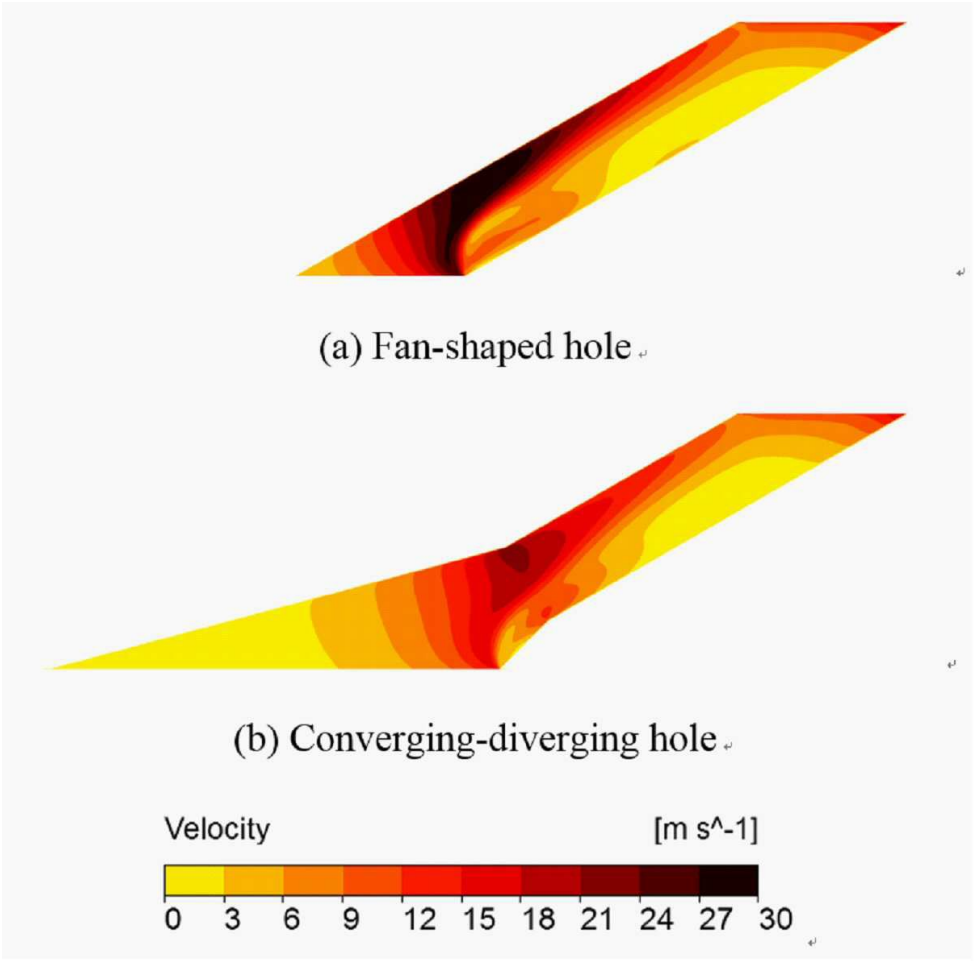
도면8


Fan-shaped hole
Converging-diverging hole
z/D
x/D
(a) M = 0.5
(b) M = 1.0
(c) M = 1.5
Film cooling effectiveness
0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

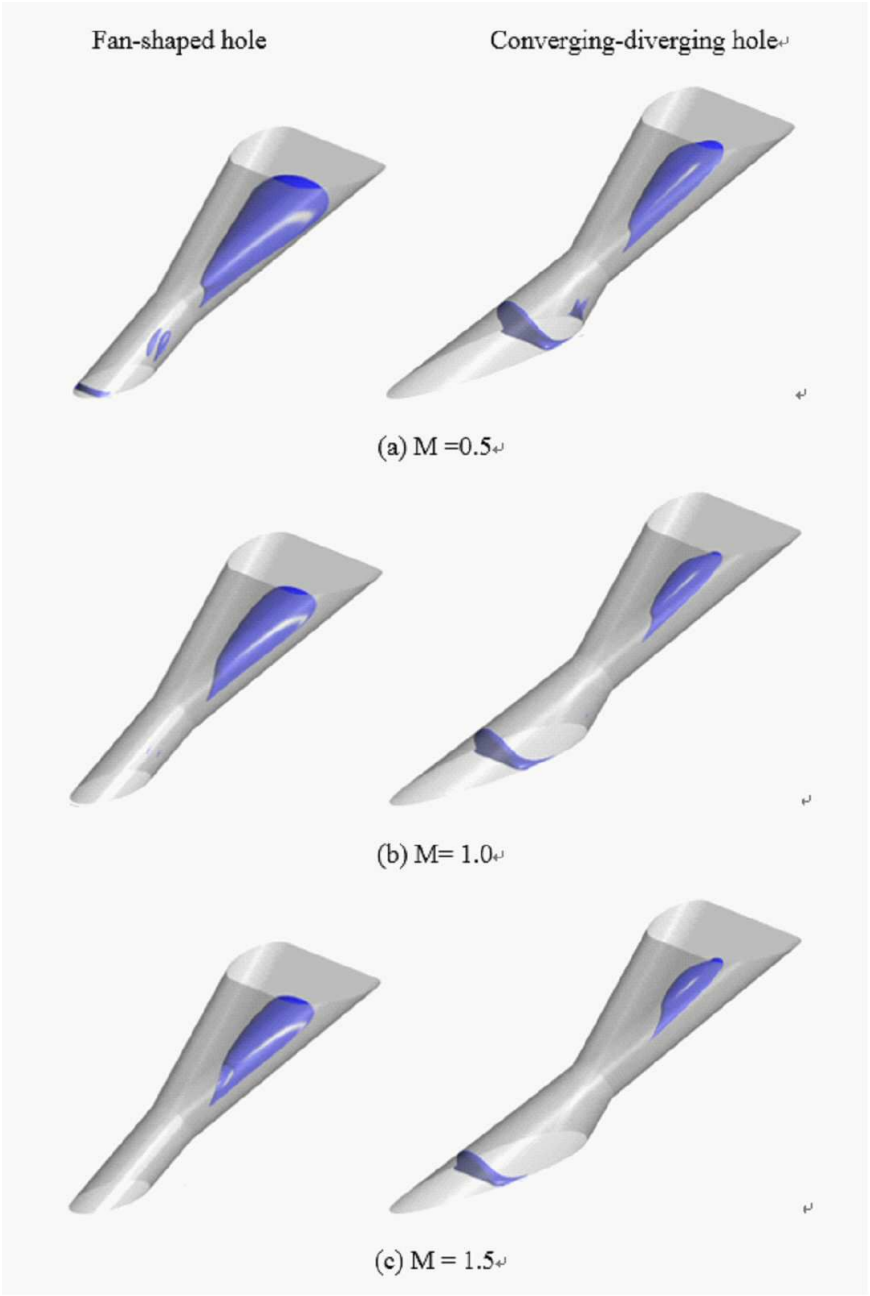
도면9


excess velocity at upstream wall
axial velocities at diffuser entry
velocity deficit at downstream wall
coolant passage (plenum conditions)
top view
non-uniform velocity profile at the cooling hole exit
coolant laterally displaced by separation bubble in the diffuser

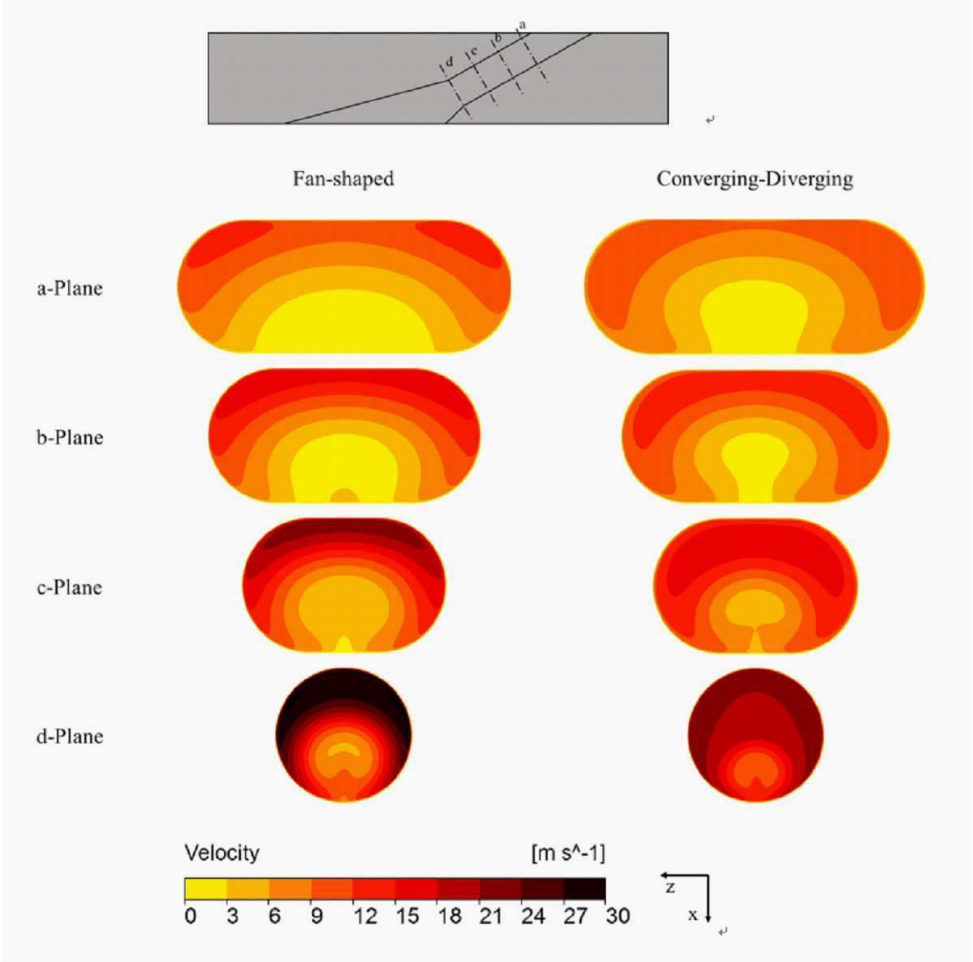
도면10


(a) Fan-shaped hole
(b) Converging-diverging hole
Velocity
[m s^-1]
0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30

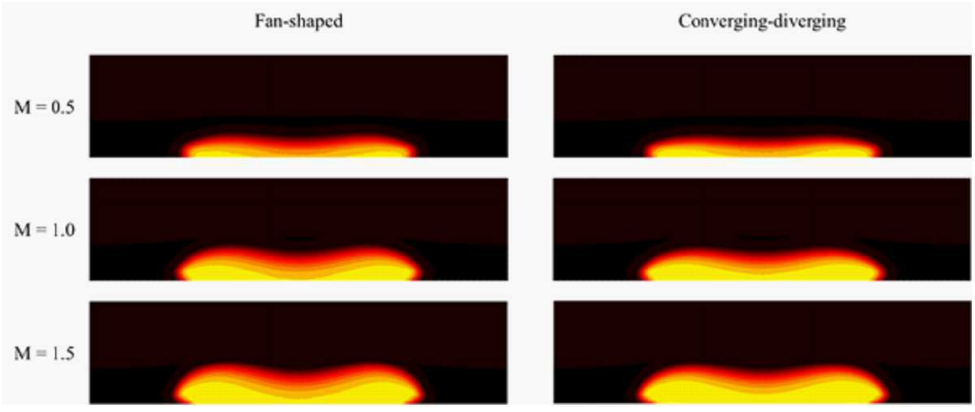
도면11



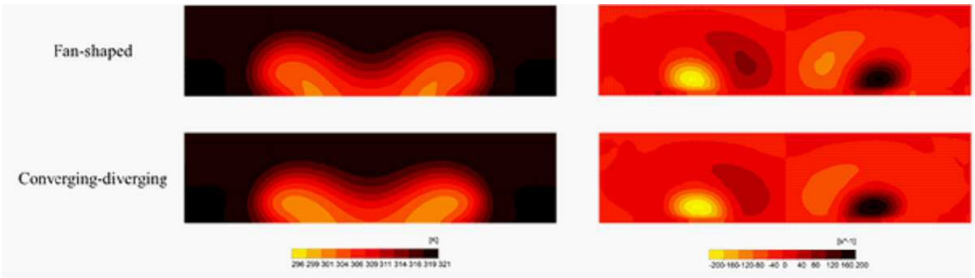
도면12


a
b
c
d
Fan-shaped
Converging-Diverging
a-Plane
b-Plane
c-Plane
d-Plane
Velocity
[m s^-1]
0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30
z
x

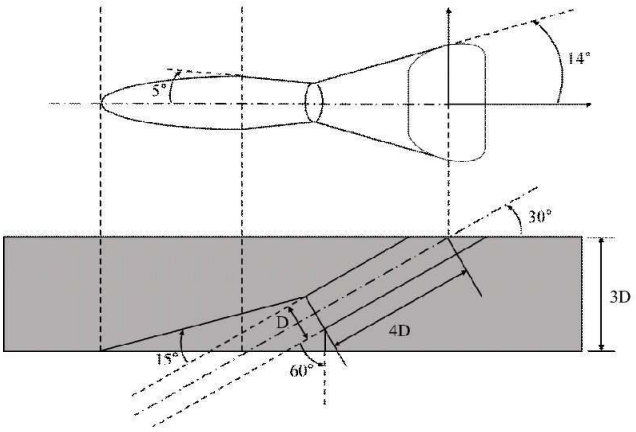
도면13


Fan-shaped
Converging-diverging
M = 0.5
M = 1.0
M = 1.5

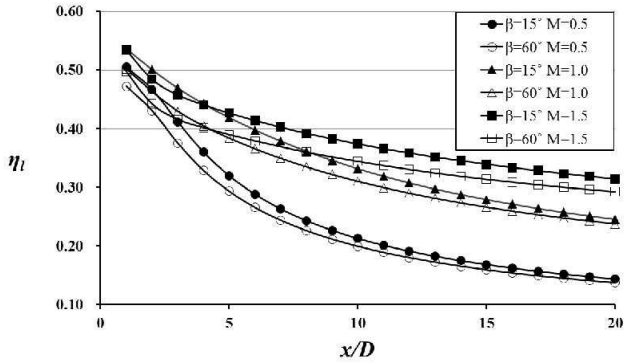
도면14



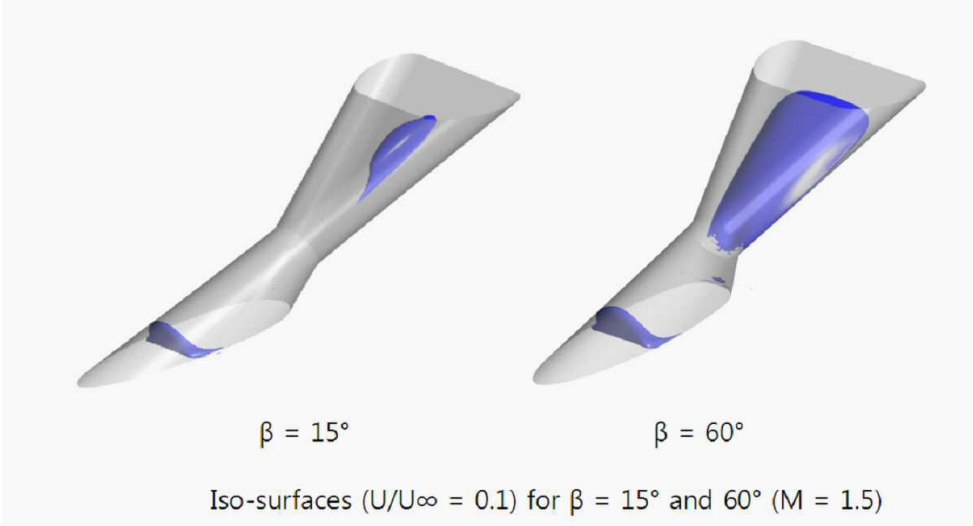
도면15



도면16



도면17



Iso-surfaces (U/U∞ = 0.1) for β = 15° and 60° (M = 1.5)