

論文

160% 피치의 유로에서 단일익형에 의한 캐스케이드 실험을 위한 벽면의 설계에 관한 연구

조종현*, 김영철**, 안국영**, 조수용***

A Study of Design of Sidewalls for Cascade Model with Single Blade Within a 160% Pitch Passage

Chong-Hyun Cho*, Young-Cheol Kim**, Kook-Young Ahn** and Soo-Yong Cho***

ABSTRACT

A cascade apparatus was designed with only one blade. Its passage is a 160% width of the cascade pitch. This kind of apparatus can give more accurate experimental result than those applying multi-blades even though the apparatus is small. However, this causes difficulties to make the periodic condition along the pitchwise direction. In this study, sidewalls were designed to satisfy the periodic condition based on the flow structure using a gradient based optimization and a genetic algorism. The objective function was adopted the surface Mach number obtained on the cascade and fourteen design variables were selected for controlling sidewall shapes. The designed sidewalls using the genetic algorism shows better result.

초 록

캐스케이드 실험장치에 한 개의 익형을 설치하여 캐스케이드 실험이 가능한 장치벽면의 설계를 수행하였다. 장치의 폭은 피치의 160% 넓이다. 이 경우에 실험장치 내에 다수개의 블레이드를 설치하는 경우에 비하여 소형의 장치라도 실험의 정확성이 향상되는 장점이 있지만, 피치방향으로 주기조건을 맞추기가 어렵다. 본 연구에서는 주기조건이 얻어지도록 벽면의 형상설계를 내부유동장의 결과를 바탕으로 기울기기반과 유전자알고리즘의 방식을 사용하여 벽면을 설계하였다. 이를 위하여 목적함수는 캐스케이드 익형의 표면에서 얻어진 마하수를 적용하였으며, 실험장치의 형상 조정이 가능한 14개의 설계변수를 적용하였다. 유전자알고리즘에 의한 최적화 설계방식이 향상된 결과를 보여주었다.

Key Words : Sidewall Design (벽면설계), Linear Cascade (직선형 캐스케이드), Genetic Algorism (유전자알고리즘), Turbomachinery (터보기계)

1. 서 론

항공용 엔진의 설계나 해석에 있어서 CFD의 활용은 점차적으로 확대되어가고 있는 실정이며, 로터나 노즐의 경우는 높은 압력에서 낮은 압력으로 흐르는 유동이므로 경계층이 얇으며 유동 해석에서 난류모델에 따른 해석결과의 차이는 크지 않다. 하지만, 블레이드의 냉각이 포함되는 열

† 2009년 1월 20일 접수 ~ 2009년 5월 28일 심사완료

* 정희원, 경상대학교 항공공학과 대학원

** 정희원, 한국기계연구원

*** 정희원, 경상대학교 항공기부품기술연구소

교신저자, E-mail : sycho@gnu.kr

경남 진주시 가좌동 900번지

전달 해석에서는 난류모델에 따라 유동 해석의 결과에 차이가 많으므로 설계자들은 실험데이터에 크게 의존하고 있다[1]. 따라서 블레이드를 통과하는 유동에서의 난류특성, 블레이드의 휘어짐에 따른 유동의 영향, 정체점 주위에서의 유동 특성 등에 대한 세부적인 실험결과들이 측정되어야 한다.

로터 주위에서의 유동의 특성을 연구하기 위하여 Giess 와 Kost[2]는 회전하는 원통형 터빈 캐스케이드에서 유동의 측정을 하였으며, Lang et al.[3]은 PIV의 사용으로 회전하는 로터와 정익 사이의 3차원 유동을 측정하였다. 하지만 로터가 회전하는 상태에서 유동장의 물성치를 측정하는 것은 측정의 어려움뿐만 아니라 많은 비용을 요구하므로 원통형이나 직선형 캐스케이드에서 실험을 수행하게 되며 이러한 방식은 동일 유동조건에서 보다 나은 공간영역을 확보하게 된다 [4]. Baughn et al.[5]은 회전과 동일한 조건에서 측정된 직선형 캐스케이드 장치가 보다 양호한 중간스팬에서의 결과를 제공함을 보여주었다.

캐스케이드 실험에서는 측정하고자 하는 블레이드를 기준으로 여러 개의 블레이드를 피치방향으로 설치하여 유동의 주기조건이 이루어지도록 하여 물성치를 측정한다[6-8]. 이를 위하여 블레이드의 출구측에 꼬리판을 조정하여 유동의 주기조건을 맞추기도 하며, 블레이드 앞면에서의 정체점을 맞추기 위하여 실험장치의 측면으로부터 작동유체를 일부 제거하기도 한다. 또한 설치된 벽면에서 형성되는 경계층 제거를 위하여 작동유체를 불어넣어 주거나 혹은 제거하는 작업을 하여야 한다. 뿐만 아니라, 다수의 블레이드가 설치되는 경우에는 블레이드 주위의 유동을 측정하기 위한 공간을 확보하여야 하므로 장치가 거대해진다. 따라서 대 유량을 생산하는 압축기나 블로워가 요구될 뿐만 아니라, 피치방향으로 있는 블레이드에 의하여 PIV와 같은 광학장치의 사용을 어렵게 한다. 따라서 유로에 한 개 혹은 두 개의 블레이드를 설치하여 측정을 하기도 한다[9,10]. 하지만 이와 같은 방법을 적용하는 경우에는 다수의 블레이드를 사용하여 발생되었던 많은 문제점을 해결하기는 하지만, 피치방향으로 유동의 주기조건을 맞추는 문제가 발생된다[11,12].

캐스케이드 실험장치에서 블레이드 개수를 줄이면서도 벽면으로부터 작동유체를 제거하지 않고 벽면의 형상만으로 주기조건과 동일한 결과를 얻기 위하여, 피치의 두 배 유로에 두 개의 블레이드를 설치하여 주기조건과 동일한 유동장이 얻어지는 연구가 수행되었다[13]. 또한 목적함수에

가중치를 주거나 목적함수를 평가하는데 있어서 불안정한 영역의 제거에 의하여 보다 향상된 주기조건의 유동장이 얻어지는 연구도 수행되었다 [14]. 두 개의 블레이드를 설치한 경우에는 블레이드 사이의 유동장은 벽면에서 형성되는 경계층의 영향이 블레이드에 차단되므로 주기조건과 일치하는 결과가 얻어졌다.

한 개의 블레이드를 피치의 200% 유로에 설치하여 벽면설계만으로 주기조건과 동일한 유동장을 얻기 위한 연구를 Laskowski et al.[15]가 기울기기반의 방법을 사용하여 수행하였으나, 블레이드 주위의 유동장은 주기조건에서 얻어진 결과와는 다소 차이를 보였다. 본 연구에서는 피치의 160% 폭을 가지는 유로에 하나의 블레이드를 설치하였을 때, 주기조건과 동일한 유동장을 얻기 위한 벽면형상의 설계에 관한 연구를 기울기기반 및 유전자알고리즘의 방법을 사용하여 수행하였으며, 그 결과를 비교하였다.

II. 설계변수 선정

2.1 캐스케이드 실험

본 연구를 위한 캐스케이드의 실험결과는 VKI 블레이드에서 수행된 결과를 사용하였다[16]. 상기의 실험은 실험장소와 장비의 차이에 따른 실험의 불확도를 평가하기 위하여 시도한 실험으로써 4개의 다른 기관에서 수행되었다. 각각의 실험은 비슷한 조건에서 수행되었으며, 실험의 수행조건은 Table 1에서 보여주고 있다. 하지만 실험의 결과들은 각각 다른 기관에서 다른 장비를 사용하여 수행하였으므로 약간의 차이를 보여주고 있으며, 이러한 결과는 본 연구 결과와의 비교와 함께 본문 4절에서 보여줄 것이다.

Table 1. Experimental conditions on the four different wind tunnel facilities

Parameters	RG	GO	BS	OX
Chord(mm)	32.6	60	100	100
Aspect ratio	1.534	2.083	3.000	3.000
Pitch(mm)	25.13	42.58	70.88	70.88
Stagger	33.14°	33.56°	33.29°	33.29°
Inlet flow angle	28.95°	29.92°	29.92°	30.04°
Exit flow angle	67.03°	67.02°	67.33°	67.76°
Turbulence intensity(%)	1	1	0.3-0.6	<1

2.2 초기벽면형상

주기조건을 만족하는 캐스케이드의 계산영역은 윗면(흡입면과 가까운 영역)과 아랫면(압력면과 가까운 영역)을 각각 주기조건을 적용하므로 윗면과 아랫면과의 거리가 피치만큼 차이가 나도록 하면 된다. 하지만 본 연구에서처럼 캐스케이드 블레이드 한 개를 실험장치에 장착하여 주기조건에서 얻어진 유동장과 동일한 유동장을 얻기 위한 경우에, 벽면의 형상은 주기조건에 사용된 경계와는 상당히 다르게 된다.

초기의 벽면형상을 물리적인 현상과 일치하는 벽면의 형상으로 설정하기 위하여 유선을 기준으로 벽면을 설정하였다. 이 경우 벽면의 형상을 따라서 유동이 형성되었으므로 유동장의 급격한 변화를 방지하게 되어 보다 빠르게 목적하는 유동현상을 찾을 수 있게 될 것이다. 캐스케이드 유로 내의 어떤 위치에서 유선을 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 주기조건으로 얻어진 결과에서 유선을 구하였다. 참고로 Fig. 1에서는 아래쪽에 위치한 블레이드의 흡입면에서 떨어진 거리를 피치의 비로 나타내었으며 그 위치에서의 유선들을 보여주고 있다.

Fig. 2는 유로의 폭이 피치의 160%인 경우를 나타내고 있다. 블레이드의 흡입면을 기준으로 위쪽으로 피치의 80% 위치에서의 형상과 압력면으로 부터 아래로 피치의 80% 위치에서의 각각의 형상을 나타내고 있으며, 이들은 그 위치에서의 유선을 사용하여 얻어진 초기 벽면형상이다. 피치의 160%를 벽면간의 거리로 설정하였으므로 주기조건에 사용된 피치의 폭보다 증대된 형상을 보여주고 있다.

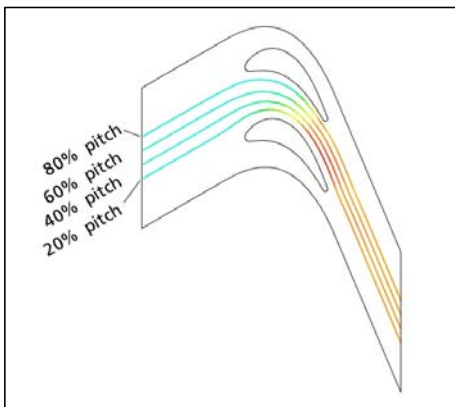


Fig. 1. Streamlines at the different locations within the passage

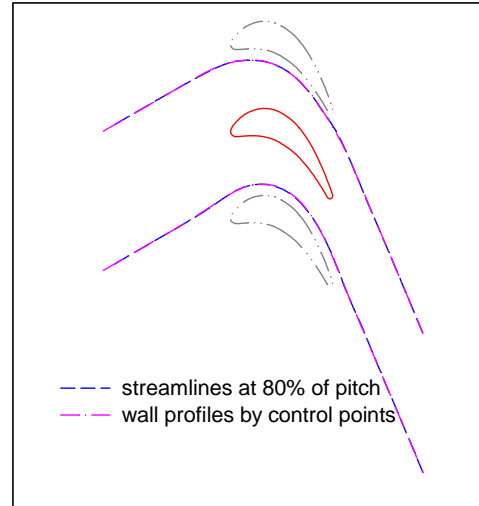


Fig. 2. Sidewall profiles obtained from streamlines at 80% pitch

2.3 설계변수의 선정

실험을 위한 벽면을 유선을 바탕으로 형상화 하였다고 하여도, 유선이 벽면으로 변경되면 경계층의 형성으로 인하여 내부 유동장이 달라지게 됨으로 주기조건에 유동장과는 달라지게 된다. 따라서 주기조건에서 얻어진 계산 결과와 동일한 유동장을 얻기 위하여서는 벽면의 형상을 조정하여야 한다. 따라서 단순히 유선을 바탕으로 형성된 벽면을 반복계산에서 조정이 가능하도록 함수로 처리하여야 된다. 이를 위하여 아랫면이나 윗면에 형상조정을 위한 제어점을 설정하고 제어점과의 연결은 출구측 벽면만 직선으로 처리하고 나머지는 3차원 곡선을 사용하여 연결하는 방식을 채택하였다. 따라서 이 제어점이 최적화를 위한 설계변수가 된다.

Fig. 3은 아랫면과 윗면의 벽면형상을 변경하기 위한 제어점들의 위치(Pt로 표기함)를 나타내고 있으며, 각각의 제어점에서 y방향의 위치는 유선에 의하여 결정되어진다. x방향의 위치는 두 개의 블레이드를 장착하여 주기조건과 동일한 결과를 얻었던 방법[13]을 사용하였다. 하지만 Pt2에서의 각도는 유선으로부터 얻어진 각도를 유지하였다. Pt6 (S6,P6)와 Pt7 (S7,P7)에서의 출구유동각은 유선으로부터 얻어진 각도를 기준으로 동일하게 적용하여 평행한 벽면으로 설정하였으며, Pt6의 y방향으로의 변화가 가능하도록 하였다. 이는 경계층의 증가로 인하여 유동속도가 출구쪽으로 가면서 줄어들지 않도록 하기 위함이다. 그

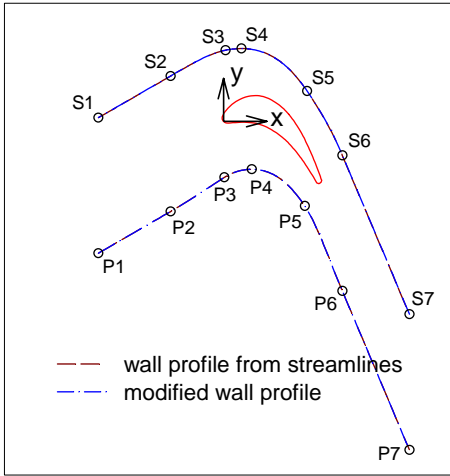


Fig. 3. Points along the upper and lower walls to modify the wall profile

러므로 Pt7은 변화가 발생되지만 Pt6에 종속적이므로 설계변수는 아니다.

Fig. 3의 제어점에서 Pt6과 Pt7 사이는 직선적으로 연결되며 나머지는 3차원 곡선을 사용하여 연결되며, 제어점과 제어점의 연결에서 연결부의 각도는 동일하게 이루어지도록 하였다. Pt1과 Pt2는 입구영역이므로 조정이 필요 없으며, Pt3과 Pt5의 x 위치는 코드를 기준으로 정하였으므로 조정을 필요로 하지 않는 고정된 값이 된다. 하지만 y 방향과 각도의 변경은 가능하도록 하여 벽면의 조정을 할 수 있도록 하였다. Pt4의 경우는 벽면 조정에서 y 방향으로 최고점의 위치를 조정하도록 한 것이므로 x와 y 방향으로 조정이 가능하도록 하였으나 각도는 최고점 위치이므로 각도 조정은 필요가 없게 된다. Pt6는 Pt2와 같이 x의 위치는 코드를 기준으로 정하여지나 y 위치는 변경되어진다. 따라서 총 14개의 설계변수가 선정되었으며, Table 2는 윗면과 아랫면의 조정을 위한 설계변수를 보여주고 있다. 윗면과 아랫면에 각각 7개씩 설계변수를 보여준다.

상기의 방식으로 초기 벽면형상 설정을 위하여 유선으로부터 얻어진 제어점들의 값을 Table 3에서 보여주고 있다. Table 3에서 괄호 내의 값은 벽면의 설계과정에서는 변경되어지는 않는 고정된 값을 의미한다. Fig. 2에서는 이렇게 설정한 제어점으로 표현된 형상과 유선이 상당히 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한 여러 위치에서 얻어진 유선에 대하여서도 제어점을 사용하여 얻어진 형상과 유선은 잘 일치되는 결과를 보여주었으며, 이러한 벽면 설계방식은 높은 유연성이 있음을 보여주었다[13].

Table 2. 14 design variables to modify the upper and lower wall

Design variables
y at control point S3 (SY_3)
angle at control point S3 (θ_{s3})
x at control point S4 (SX_4)
y at control point S4 (SY_4)
y at control point S5 (SY_5)
angle at control point S5 (θ_{s5})
y at control point S6 (SY_6)
y at control point P3 (PY_3)
angle at control point P3 (θ_{p3})
x at control point P4 (PX_4)
y at control point P4 (PY_4)
y at control point P5 (PY_5)
angle at control point P5 (θ_{p5})
y at control point P6 (PY_6)

Table 3. Control points values obtained from the streamline on the upper and lower wall

Control points	x location (x/c)	y location (y/c)	angle
S1	(-1.039)	(0.012)	(30.0)
S2	(-0.433)	(0.362)	(29.75)
S3	(0.028)	0.579	11.88
S4	0.161	0.593	(0.0)
S5	(0.712)	0.236	-56.07
S6	(1.009)	-0.303	(-67.14)
S7	(1.571)	(-1.636)	(-67.14)
P1	(-1.039)	(-1.124)	(29.99)
P2	(-0.433)	(-0.774)	(30.44)
P3	(0.018)	-0.488	32.55
P4	0.249	-0.420	(0.0)
P5	(0.693)	-0.728	-56.66
P6	(1.009)	-1.441	(-67.14)
P7	(1.571)	(-2.773)	(-67.14)

III. 최적화 및 유동해석 알고리즘

3.1 목적함수 및 제약조건

본 연구에서는 주기조건의 경계영역에 벽면을 설치하여 얻어지는 결과가 주기조건을 사용하여 얻어졌던 캐스케이드 블레이드 표면에서의 마하수와 동일한 결과를 얻고자하는 것이 목적이므로, 벽면이 설치되었을 때 얻어지는 블레이드 표

면에서의 마하수와 주기조건에서 얻어졌던 마하수와의 차이가 최소가 되도록 하여야 한다.

$$\text{Minimize : obj} = H^*(\vec{X}) \text{ at } S_{suc} \text{ and } S_{pre} \quad (1)$$

식(1)에서의 \vec{X} 와 H^* 은 설계변수와 목적함수를 의미하며, S_{suc} 과 S_{pre} 은 블레이드의 흡입면과 압력면을 의미한다. H^* 은 목적함수로서 주기조건에서 얻어진 표면마하수와 벽면조건에서 얻어진 표면마하수의 차이를 의미한다.

식(1)에서 H^* 는 목적함수로서 벽면을 설치하여 얻어지는 블레이드 표면에서의 마하수와 주기조건을 사용하여 얻어지는 블레이드 표면에서의 마하수와의 차이로 정의되었지만, 이를 평가하기 위한 영역에 따라서 목적함수의 값은 달라질 수 있다. 하지만 계산의 결과에서, 뒷전에는 격자와 정체점의 영향으로 수치적인 피크가 발생되므로 이를 피하기 위하여 목적함수의 평가범위를 압력면에서는 앞전부분에서의 정체점 영역을 제외하기 위하여 코드를 기준으로 0.08-0.95로 설정하였으며, 흡입면에서는 뒷전에서 급격한 마하수의 변화로 인하여 목적함수가 과장되게 나타남을 피하기 위하여 평가영역을 0.01-0.95로 설정하였다. 아울러 불일치가 심한 부분에는 가중치를 주어 목적함수의 영향이 효과적으로 반영되도록 흡입면에서의 목적함수는 1.5배의 가중치를 주었다.

$$H^* = \omega_1 \left| \int_{0.01}^{0.95} Ma_{suc} dS_{suc} - \int_{0.01}^{0.95} Ma_{prd} dS_{suc} \right| + \omega_2 \left| \int_{0.08}^{0.95} Ma_{pre} dS_{pre} - \int_{0.08}^{0.95} Ma_{prd} dS_{pre} \right| \quad (2)$$

제약조건으로는 제어점이 원래의 조건에 따라 y 방향으로의 최고점이 Pt4 이므로 Pt3은 Pt2와 Pt4의 중간에 위치하도록 제한하고, 최고점을 지난 Pt5는 Pt4와 Pt6의 중간에 위치하도록 하였다. 또한 Pt6의 경우도 Pt5와 Pt7의 중간에 위치하도록 제한하였다. 특히 y 방향으로의 변화에 있어서 위쪽에 설치되는 벽면의 제어점은 위쪽에 있는 블레이드의 흡입면 이하로 내려오는 경우가 없도록 하였으며, 마찬가지로 아래쪽의 벽면을 제어하는 제어점은 아래쪽에 있는 블레이드의 압력면 위로 변경되지 않도록 하여 캐스케이드 실험이 가능하도록 하였다. Pt4의 x 방향의 위치는 Pt3과 Pt5의 x 값 사이에 위치하도록 하였다. 제어점의 각도를 조정하는 Pt3과 Pt5에서의 기울기는 벽면의 뒤틀림 현상이 없도록 제한하였으며, Table 4는 각각의 제한조건을 보여주고 있다.

Table 4. Constraints of design variables

Design variables	Lower bounds	Upper bounds
SY3	SY2	SY4
SY5	SY6	SY4
SY6	SY7	SY5
SX4	SX3	SX5
SY3,SY4,SY5	suction S at upper blade	-
θ_{s3}, θ_{s5}	no distortion	no distortion
	-80	0
PY3	PY2	PY4
PY5	PY6	PY4
PY6	PY7	PY5
PX4	PX3	PX5
PY3,PY4,PY5	-	pressure S at lower blade
θ_{p3}, θ_{p5}	no distortion	no distortion

3.2 최적화 알고리즘

벽면의 설계는 주어진 제약조건을 위배하지 않으면서 목적함수(벽면이 설치되었을 때 얻어지는 블레이드 표면에서의 마하수와 주기조건에서 얻어졌던 마하수와의 차이)가 최소가 되는 설계변수(\vec{X})를 찾는 과정이다. 일반적으로 많은 설계변수를 가진 경우에는 기울기기반의 최적화기법을 적용하는 것이 효과적이지만 목적함수가 설계변수의 전역에 대하여 최적성을 보장하지 못하는 문제점이 있다.

본 연구에서 14개의 설계변수가 선정되었으므로 이들을 기준으로 기울기기반의 방식으로 최적화를 수행하였으며, 아울러 전역최적성이 보장되는 유전자알고리즘으로도 최적화를 수행하여 형상을 비교하였다. 본 연구에서는 최적화 상용코드인 VisualDOC[17]의 MMFD (modified method of feasible directions)와 유전자알고리즘(GA)방법을 채택하였으며 기울기기반에서는 상대적인 변화의 크기와 절대적인 변화의 크기는 각각 5%와 0.5%를 사용하였으며, 유전자알고리즘에서는 집단의 크기를 100개로 선정하고 개체간의 교배확률과 돌연변이확률을 각각 95%와 10%로 하였다.

3.3 수치해석방법

본 연구에서는 3차원 압축성 난류유동 해석을 위하여 터보기계 해석에 적합한 상용프로그램인 CFX-11[18]을 사용하여 유동해석을 하였다. 이산화 기법은 2차 이상의 정확도를 가지는 고휘상도

기법을 사용하였으며 난류모델은 전단응력이송 (shear stress transport) $k-\omega$ 모델[19]을 적용하였다. 계산을 위하여 15만개 이상의 격자가 사용되었으며 비정렬격자계가 사용되었으며, 벽면에서의 첫 번째 y^+ 는 1 이하의 값을 갖도록 하였다. 입구와 출구의 영역은 블레이드의 코드를 기준으로 1.2배와 2.0배 만큼 앞전과 뒷전을 기준으로 상류와 하류에 설치하였다.

경계조건으로는 주기조건을 계산과는 달리 벽면을 설치하여 주기조건에서 얻어진 유동장과 동일한 결과를 얻고자 하는 경우이므로 실제 실험에서 발생될 수 있는 현상과 일치하는 경계조건을 주어야 한다. 벽면을 설치하면 경계층 영역이 형성되므로 주기조건에서의 질량유량과 동일한 질량유량을 적용하려면 벽면은 점차적으로 넓어지도록 변경하여야 한다. 그러면 입구에는 질량유량의 조건을 주고, 출구에는 정압력을 경계조건으로 적용할 수 있다. 하지만 벽면의 경계층으로 인하여 앞전에서 동일조건을 얻기 위하여서는 전체 벽면이 확장되어야 하는 문제가 있다. 따라서, 보다 더 실험의 상황에 근접한 경우에는 실험장치에서 벽면을 설치하였다고 가정하면, 입출구에서의 압력변동이 발생되므로 이를 벽면의 조정으로 주기조건에서의 압력과 동일한 압력이 되는 경계조건을 적용하는 것이다. 따라서 입구에는 전압력을 출구에는 정압력을 적용하였다.

IV. 계산 및 결과

4.1 주기조건에서의 결과

Table 1의 4가지 실험조건을 참조하여 입구유동각과 출구유동각을 각각 30° 와 68° 로 설정하였으며 스테저각은 33.3° 로 주었다. 피치코드는 0.71로 설정하였으며, 입구에서의 난류강도는 0.5%를 주어 계산을 수행하였다. Fig. 4는 VKI 블레이드의 캐스케이드 실험[16]에서 얻어진 표면마하수와 주기조건을 사용하여 얻어진 계산결과와의 비교를 나타내고 있다. 기호로 나타난 결과는 실험의 결과로써 4개의 각각 다른 결과들을 의미하며, 이들의 실험조건은 Table 1에서 처럼 미세한 차이는 있지만 동일한 실험으로 판단되어지며, 측정장비나 측정장소 등에 따른 실험의 불확도를 확인할 수 있다.

Fig. 4에서 보여주는 블레이드 표면에서의 마하수는 블레이드 표면에서 측정된 정압력과 입구에서의 측정된 전압력을 기준으로 얻어진 결과이다. 계산의 결과는 선으로 표시되어 있으며, 실험

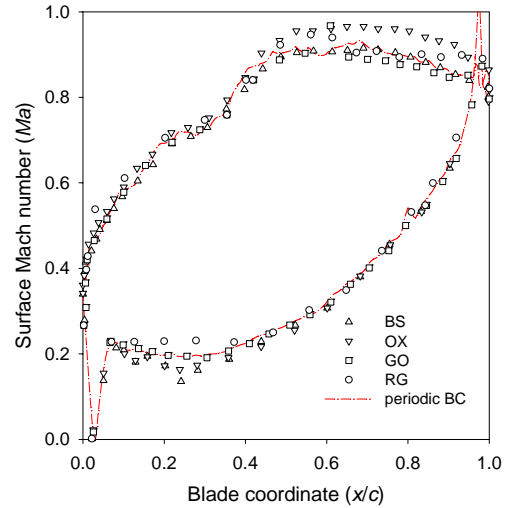


Fig. 4. Comparison of computed surface Mach numbers and experimental results[16]

의 결과와는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험결과에서도 흡입면의 뒷부분에서는 상호간 차이가 심하게 발생됨을 알 수 있다. 따라서 이 영역의 유동장은 상당히 민감한 특성을 보일 것으로 예상할 수 있다.

4.2 MMFD에 의한 벽면설계

주기조건을 경계조건으로 하여 얻어진 계산결과를 바탕으로 Fig. 1과 같이 유로에서 유선을 얻어서 Fig. 2와 같은 160%의 피치폭을 가지는 계산영역을 선택한다. 유선으로 얻어진 형상을 벽면으로 채택하여 이를 초기 벽면형상으로 설정한다. Fig. 5는 초기 벽면형상으로부터 얻어진 계산의 결과를 보여주고 있는데 흡입면에서 표면마하수가 크게 증대하였음을 알 수 있다. 이 벽면의 형상은 유선을 기준으로 형성되었으므로 유동의 방향과 일치한다. 하지만 벽면에서 경계층이 성장하므로 하류로 갈수록 경계층의 영향이 증대하므로 내부유동장은 주기조건을 사용하여 얻어진 유동장과는 다르게 형성됨을 알 수 있다.

초기 벽면형상으로부터 주기조건을 유동장과 동일한 유동장을 얻기 위하여 벽면의 설계를 기울기기반의 MMFD 방식을 적용하여 얻어진 벽면과 초기 벽면과의 형상의 차이를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 초기의 벽면형상으로 형성되었던 블레이드 흡입면에서 과도한 속도를 줄이기 위하여, 위측의 벽면은 초기에 선택되었던 벽면과는 달리 블레이드의 앞부분에서는 유로 간격을 줄이

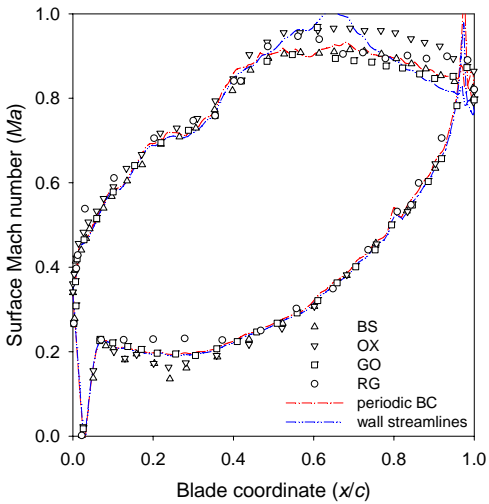


Fig. 5. Comparison of surface Mach numbers when two streamlines are adopted as sidewalls of the apparatus

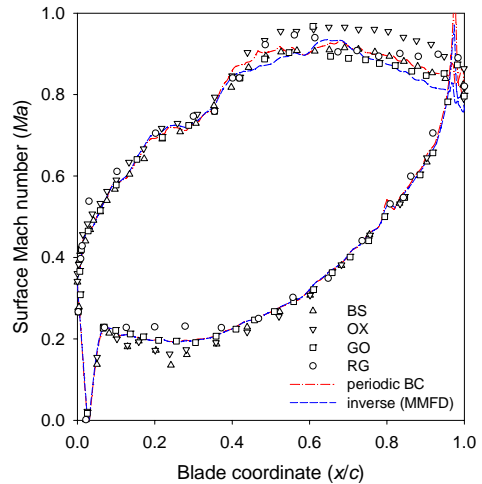


Fig. 7. Surface Mach numbers with inverse designed sidewalls

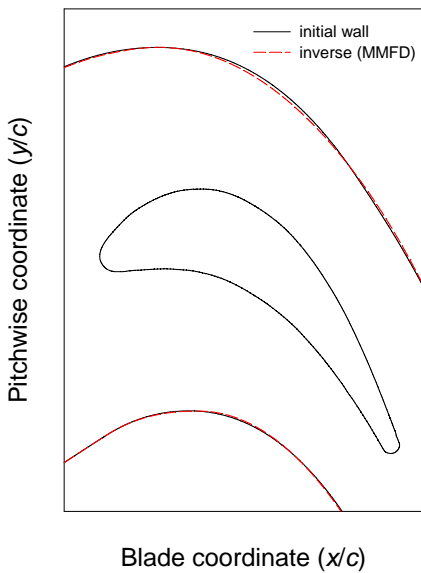


Fig. 6. Comparison of sidewall profiles

기 위하여 블레이드쪽으로 이동하였으며 블레이드의 뒷부분에서는 유로의 간격을 넓히는 방향으로 설계되어졌음을 알 수 있다.

Fig. 7은 설계 되어진 벽면에서 얻어진 표면마하수의 변화를 주기조건에서의 표면마하수와 함께 보여주고 있다. 주기조건에서 얻어진 결과와 동일한 결과를 보여주지 못하고 있는데, 이는 초기벽면을 유선으로부터 설계하여 최적화를 수행하였으나 전역에서 목적함수의 최소화를 달성하

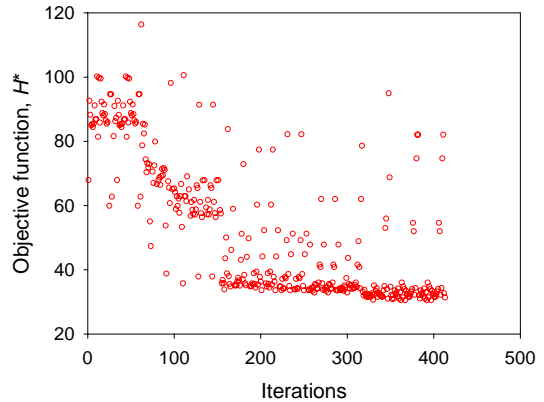


Fig. 8. Variation of objective function during iterative calculations

지 못하였다. 이는 아래측 벽면의 제어점 Pt5와 Pt6의 변화에 대하여 블레이드 흡입면에서 유동장이 민감하게 반응하였기 때문이다. 계산중에 지엽적으로 목적함수의 최소값을 나타내면 방향 탐색벡터를 수정하여 총 413회의 계산을 수행하였으며 Fig. 8은 전체 계산에서의 목적함수의 변화를 보여주고 있다. 주기조건에서 얻어진 유동장과의 비교는 4.3절에서 보여준다.

4.3 GA 에서의 결과

설계변수 전역에서 목적함수의 최소값을 찾기 위하여 유전자알고리즘을 사용하여 주기조건과 동일한 유동장을 얻고자 하였다. 최적화의 결과로 얻어진 벽면의 형상은 MMFD에서 얻어진 벽

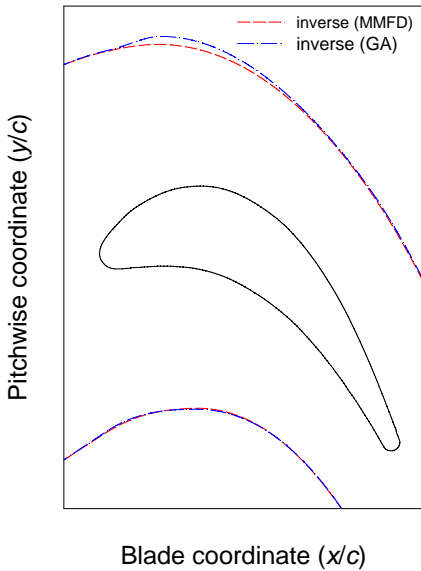


Fig. 9. Comparison of inverse designed sidewall profiles

면형상과 함께 Fig. 9에서 보여주고 있다. 특히 블레이드의 앞부분에서 조정이 많이 이루어졌다. 위측 벽면에서 피치방향으로 이동이 발생되어 폭이 넓어지면서 벽면에 의한 경계층의 영향을 완화하고 있음을 알 수 있다. Table 5에서는 최적화 되었을 때의 설계변수의 값들을 보여주고 있다. 최적화에서 흡입면에서의 유동장이 민감하게 작동하므로 각도인 설계변수는 $O(10^{-2})$ 까지 세분화하고 좌표인 설계변수는 코드비를 기준으로 $O(10^{-4})$ 까지 세분화하였다.

표면마하수의 분포는 Fig. 10에서 보여주고 있으나, 블레이드 흡입면의 뒷부분에서의 마하수가 주기조건에서 얻어진 마하수보다는 약간 높은 값을 보여주었다. 이는 실험에서도 유동장이 민감

Table 5. Control points values for sidewalls designed using GA method

Control points	x location (x/c)	y location (y/c)	angle
S3	(0.028)	0.578	12.41
S4	0.170	0.615	(0.0)
S5	(0.712)	0.243	-52.32
S6	(1.009)	-0.30	(-67.14)
P3	(0.018)	-0.489	32.72
P4	0.271	-0.420	(0.0)
P5	(0.693)	-0.731	-57.26
P6	(1.009)	-1.438	(-67.14)

하게 나타나고 있음을 보여주고 있는 영역인데, 벽면의 영향이 블레이드 표면의 유동장에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 두 개의 블레이드가 장착되었던 결과[14]에서는 아주 일치되는 결과를 보였던 것에 비하여 한 개의 블레이드인 경우에는 차이가 발생됨으로써 벽면의 설계를 보다 더 완벽하게 하기 위하여서는 보다 더 복잡한 벽면의 형상일지라도 표현할 수 있는 설계변수를 설정하여야 함을 알 수 있다.

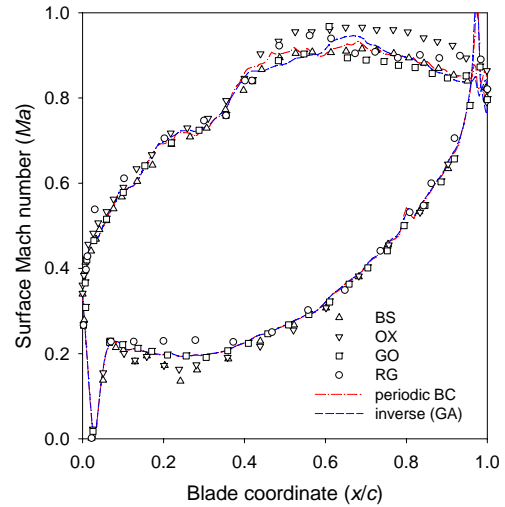
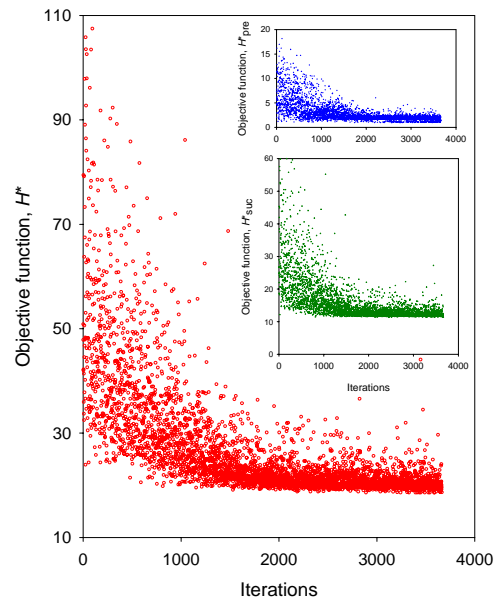


Fig. 10. Comparison of surface Mach number on the blade with sidewalls designed using GA method



(a) overall iterations

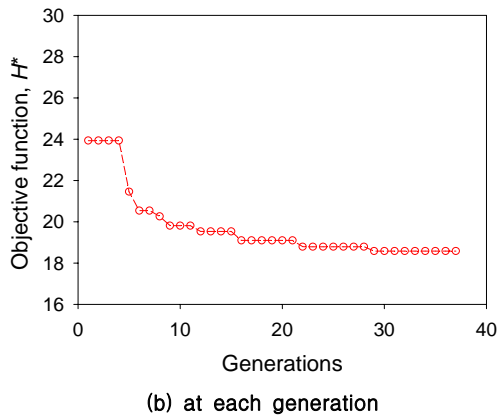


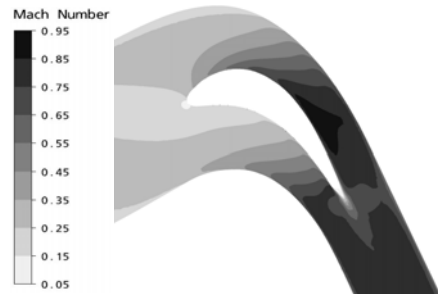
Fig. 11. Convergence history of objective function on the GA method

계산과정에서의 목적함수의 변화를 Fig. 11에서 보여주고 있으며, 아울러 블레이드 흡입면에서의 목적함수와 압력면에서의 목적함수의 변화도 그림안에서 구분하여 보여주고 있다. 압력면에서는 아주 낮은값의 목적함수로 접근하게 되지만 흡입면에서는 어느 일정값 이하로 낮아지지는 않고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급한 것과 같이 이러한 현상은 설정된 설계변수에 의하여 벽면을 표현하는데 충분하지 않았기 때문이라고 판단된다. 총 계산은 3664번 수행되었으며 Fig. 11(b)는 각 세대마다 얻어졌던 최소 목적함수의 변화를 보여주고 있다. 유전자알고리즘에 의하여 최종적인 목적함수는 MMFD에서의 결과보다 37% 더 최적화된 값을 얻게 되었다.

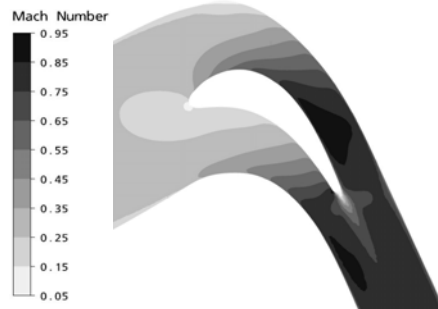
최적화된 벽면에서 얻어진 유동장과 주기조건에서 얻어진 유동장과의 비교를 마하수의 분포로 Fig. 12에 나타내었다. 표면 마하수의 분포에서 이미 예상되었던 것처럼 GA방법으로 최적화한 벽면으로부터 얻어진 유동장이 MMFD 방법으로 최적화한 벽면으로부터 얻어진 유동장보다는 주기조건 유동장과 보다 더 잘 일치하고 있음을



(a) periodic boundary condition



(b) wall designed using MMFD



(c) wall designed using GA

Fig. 12. Comparison of Mach number contours around the blade

알 수 있다. 아울러 본 유동장의 일치하는 정도는 캐스케이드에서의 실험조건은 동일하지는 않지만 200% 피치간격의 통로에 하나의 블레이드를 설치하였던 Laskowski et al.[16]의 결과에 비하여 내부 유동장이 잘 일치하는 결과를 보여주는데 이는 전역에서의 목적함수를 얻을 수 있는 최적화방식을 사용하였기 때문이라고 하겠다.

V. 결 론

160% 피치 간격의 캐스케이드 실험에서 한 개의 블레이드를 설치하여 실험을 하는 경우에 피치방향으로 블레이드의 주기조건을 맞추기 위하여, 14개의 설계변수를 설정하여 벽면설계를 하였다. 블레이드 표면에서의 마하수 일치도를 목적함수로 사용하여 기울기 기반의 MMFD 방법으로 최적화를 하였을 경우에 방향 탐색과정을 포함하여 413회의 계산을 수행하였으나 블레이드 흡입면에서 표면마하수가 다소 크게 나타났다. 아울러 설계변수 전역에서 목적함수의 최적화를 보장하는 유전자알고리즘 방법으로 벽면을 수행하였는데, 36세대에서 MMFD에 의한 목적함수보다 37% 향상된 목적함수를 얻었다. 유전자알고리즘으로 얻어진 표면마하수의 분포는 MMFD에

서 얻어진 결과보다는 주기조건에서 얻어진 표면 마하수와 잘 일치하는 결과를 보여주었으며, 블레이드 주위의 유동장도 동일한 결과를 보여주었다. 따라서 유동장이 벽면의 변동에 민감하게 나타나는 경우에는 유전자알고리즘과 같이 전역에서 최적의 목적함수를 나타내는 방식을 사용하여야 함을 알 수 있었으며, 민감한 유동장을 충분히 제어할 수 있는 벽면을 설계할 수 있는 제어점을 선정하여야 함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원(CH3-101-04)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Dornberger, R., Stoll, P., Buche, D. and Neu, A., "Multidisciplinary Turbomachinery Blade Design Optimization", AIAA Paper No. 2000-0838, 2000.
- 2) Giess, P. A. and Kost, F., "Detailed Experimental Survey of the Transonic Flow Field in a Rotating Turbine Cascade", 2nd European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Antwerpenm Belgium, March 3-7, 1997.
- 3) Lang, H., Morck, T., and Woisetschlager, J., "Stereoscopic Particle Image Velocimetry in a Transonic Turbine Stage", Exp. Fluids, Vol. 32, 2002, pp. 700~709.
- 4) Giel, P. W., Van Fossen, G. J., Boyle, R. J., Thurman, D. R., and Civinskas, K. C., "Blade Heat Transfer Measurements and Predictions in a Transonic Turbine Cascade", NASA/TM-1999-209296, 1999.
- 5) Baughn, J. W., Butler, R. J., Byerley, A. R., and River, R. B., "An Experimental Investigation of Heat Transfer, Transition and Separation on Turbine Blade at Low Reynolds Number and High Turbulence Intensity", ASME Paper No. 95-WA/HT-25, 1995.
- 6) Hollen, B. and Jacob, J., "Experimental Investigation of Separation on Low Pressure Turbine Blades", AIAA Paper No. 2001-0447, 2001.
- 7) Erhard, J. and Gehrler, A., "Design and Construction of a Transonic Test-Turbine Facility", ASME Paper No. 2000-GT-0480, 2000.
- 8) Sanz, W., Gehrler, A., Woisetschlager, J., Forstner, M., Artner, W., and Jericha, H., "Numerical and Experimental Investigation of the Wake Flow Downstream of a Linear Turbine Cascade", ASME Paper No. 98-GT-246, 1998.
- 9) Buck, F. A. and Prakash, C., "Design and Evaluation of a Single Passage Test Model to Obtain Turbine Airfoil Film Cooling Effectiveness Data," ASME Paper No. 95-GT-19, 1995.
- 10) Radomsky, R. W. and Thole, K. A., "Flowfield Measurements for a Highly Turbulent Flow in A Stator Vane Passage", J. Turbomachinery. Vol. 122, 2000, pp. 252~262.
- 11) Kodzwa, P. M., Elkins, C. L. and Eaton, J. K., "Measurements of Film Cooling Performance in a Transonic Single Stage Passage Model", 2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Zambia, 2003.
- 12) Ott, P., Norryd, M. and Bolcs, A., "The Influence of Tailboards on Unsteady Measurements in a Linear Cascade", ASME Gas Turbine and Aeroengine Congress, 1998.
- 13) 조종현, 조봉수, 김재실, 조수용, "2피치 유로의 캐스케이드 모델을 위한 벽면설계에 관한연구", 한국항공우주학회지, 36권 8호, 2008, pp. 797 ~806.
- 14) 조종현, 안국영, 조수용, "2피치 유로 캐스케이드 실험을 위한 벽면 최적화에 관한연구", 한국항공우주학회지, 36권 10호 2008, pp. 969~978.
- 15) Laskowski, G. M., Vicharelli, A., Medic, G., Elkin, C. J., Eaton, J. K. and Durbin, P. A., "Inverse Design and Experimental Measurements in a Double-Passage Transonic Turbine Cascade Model", J. Turbomachinery, Vol. 127, 2005, pp. 619~626.
- 16) Kiock, R., Lehthaus, F., Baines, N. C. and Sieverding, C. H., "The Transonic Flow Through a Plane Turbine Cascade as Measured in Four European Wind Tunnels", J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 108, 1986, pp. 277~284.
- 17) Visual DOC Reference Manual Version 6.0, Vanderplaats R&D Inc, 2006.
- 18) CFX-11, version 11, 2007.
- 19) Menter F. R, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA J., Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598~1605.