

케스케이드 실험을 위한 벽면형상 설계에 관한 연구

조종현*·조봉수*·김재실**·조수용***

A Study of Wall Shape Design for Cascade Experiment

Chong-Hyun Cho*, Bong-Soo Cho*, Chaesil Kim** and Soo-Yong Cho***

Key Words : Linear Cascade(직선형 케스케이드), Optimization(최적화), Turbomachinery(터보기계)

Abstract

In a double-passage cascade apparatus, only two blades are installed in order to increase the accuracy of experimental result by applying bigger blade than the size of multi-blades on the same apparatus. However, this causes difficulties to make correct periodic condition. In this study, sidewalls are designed to meet periodic condition without removing the operating fluid or adjusting tail boards. Surface Mach number on the blade surface is applied to a responsible variable, and 12 design variables which are related with sidewall profile control are selected. A gradient based optimization is adopted for wall design and CFX-11 is used for the internal flow computation. The computed result shows that it could obtain the same flow structure by modifying only the sidewalls of the double-passage cascade apparatus.

1. 서론

케스케이드에서의 실험에서는 측정하고자 하는 블레이드를 기준으로 여러 블레이드를 설치하여 유동의 주기조건이 이루어지도록 하여 물성치를 측정한다[1]. 이러한 주기조건을 맞추기 위하여 블레이드의 출구측에 꼬리판을 설치하여 유동의 주기조건을 맞추도록 하며, 정체점을 맞추기 위하여 실험장치의 흡입면과 압력면으로부터 작동유체를 일부 제거하기도 한다. 또한 설치된 벽면에서 형성되는 경계층 제거를 위한 작업도 하여야 한다. 블레이드가 다수가 설치되는 경우에는 공간영역의 확보를 위하여 큰 유량을 생산하는 장치가 요구될 뿐만 아니라 PIV와 같은 광학장치의 사용을 어렵게 하므로, 유로에 한 개 혹은 두 개의 블레이드를 설치하여 측정을 하였다[2]. 하지만 이러한 측정에는 벽면으로부터 흡입량의 설정이나 꼬리판의 설정을 정확히 정하기가 어렵다.

케스케이드의 실험장치에서 블레이드의 개수를 줄이면서 발생하는 주기조건의 문제점을 해결하기 위하여 벽면에서 작동유체를 흡입하지 않고 벽면의 형상 조정만으로 주기조건에서의 실험과 동일한 결과를 얻기 위한 연구를 피치의 두배 유로에 한 개의 블레이드를 설치하여 벽면조정에 관한 연구를 Laskowski et al.[1]이 수행하였다. 하지만 설치된 하나의 블레이드는 벽면의 영향으로 블레이드 주위의 유동장은 주기조건에서 얻어진 결과와는 다소 차이를 보였다. 본 연구에서는 피치 두배의 유로에 두 개의 블레이드를 설치하여 블레이드 사이의 중간 피치영역이 벽면으로 부터의 영향이 최소화 되도록 하여 주기조건과 동일한 유동장을 얻기 위한 연구를 수행하였다.

2. 설계변수선정

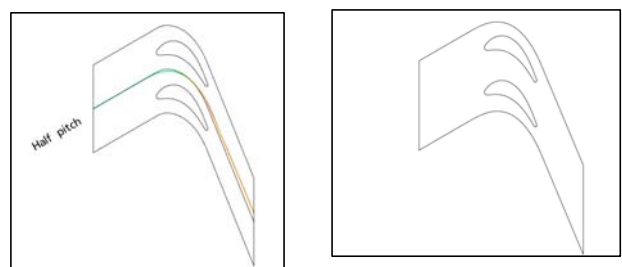
2.1 초기벽면형상

적합한 초기의 벽면을 설정하기 위하여 본 연구에서는 케스케이드의 중간피치에서 얻어지는 유선을 기준으로 벽면을 설정하였다. 이 경우에는 설정된 벽면을 따라서 유동이 형성되었으므로 유동의 급격한 변화를 방지하게 되어 보다 빠르게 목적하는 유동현상을 찾을 수 있게 될 것이다.

Fig. 1 (a)는 주기조건의 계산영역과 이 계산영역에서 피치의 중간에서 얻어진 유선을 보여주고 있다. 중간피치에서의 유선을 기준으로 피치만큼 위쪽과 아래쪽으로 이동하여 벽면으로 하여야 할 때의 계산영역을 Fig. 1(b)에서 보여주고 있다.

2.2 설계변수의 선정

주기조건을 사용하던 위면과 아랫면을 Fig. 1에서처럼 유동장을 기준으로 얻어진 유선을 바탕으로 형상화하였다고 하여도, 이들 면이 벽면으로 변경이 되면 경계층의 형성으로 인하여 내부의 유동이 달라지게 되므로 초기의 계산 결과와는 달라진다. 이를 개선하기 위하여 벽면의 형상을 조정하면서 초기의 주기조건에서 얻어진 계산의 결과와 동일한 유동장을 얻도록 하여야



(a) streamline

(b) computational region

Fig. 1 Region of a double-passage cascade

* 경상대학교 대학원, air0427@empal.com
** 창원대학교 기계공학과, kimcs@changwon.ac.kr
*** 경상대학교 항공기부품기술연구센터, sycho@gnu.kr

Table 1. 12 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 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})

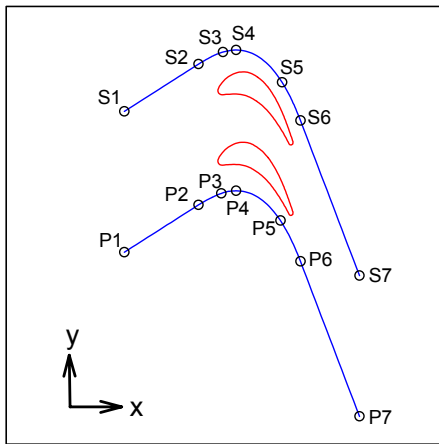


Fig. 2 Points along the upper and lower walls to modify the wall profile

Table 2. Control points values obtained from the streamline on the upper and lower wall

Control points	x location (m)	y location (m)	angle
S1	(-0.1039)	(0.0509)	-
S2	(-0.0216)	(0.0986)	(29.66)
S3	(0.0055182)	0.1108	14.98
S4	0.0202	0.1128	(0.0)
S5	(0.0712)	0.0802	-54.99
S6	(0.0915)	(0.0417)	(-67.57)
S7	(0.1570)	(-0.11462)	-
P1	(-0.1039)	(-0.0911)	-
P2	(-0.0216)	(-0.0434)	(29.66)
P3	(0.0036437)	-0.0317	9.27
P4	0.0202	-0.0292	(0.0)
P5	(0.0693)	-0.0592	-53.81
P6	(0.0915)	(-0.1003)	(67.57)
P7	(0.1570)	(-0.2566)	-

한다. 따라서 단순히 유선을 바탕으로 형성된 벽면을 반복계산에서 조정이 가능하도록 함수로 처리하여야 된다. 이를 위하여 아래면이나 위면에 형상조정을 위한 제어점을 설정하고 제어점과의 연결은 3차원 곡선을 사용하여 연결하는 방식을 채택하였다. 따라서 이 제어점이 최적화를 위한 설계변수가 된다. Fig. 2

Table 3. Constraints of design variables

Design variables	Lower bounds	Upper bounds
SY_3	SY_2	SY_4
SY_5	SY_6	SY_4
SX_4	SX_3	SX_5
SY_3, SY_4, SY_5	suction S	-
θ_{S3}	0	80
θ_{S5}	-80	0
PY_3	PY_2	PY_4
PY_5	PY_6	PY_4
PX_4	PX_3	PX_5
PY_3, PY_4, PY_5	-	pressure S
θ_{P3}	0	80
θ_{P5}	-80	0

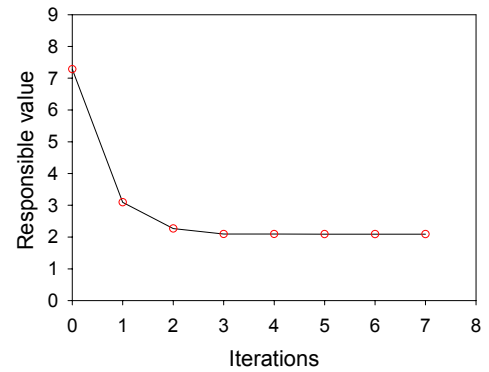


Fig. 3 History of convergence for optimization

Table 4. Design variables when the sidewalls are optimized

Variables	x location (m)	y location (m)	angle
S3	-	0.1082930	14.98898
S4	0.02013173	0.1119628	-
S5	-	0.07852010	-54.32159
P3	-	-0.03226736	19.32853
P4	0.02010693	-0.02955467	-
P5	-	-0.05756379	-50.35115

은 아랫면과 위면의 벽면형상을 변경하기 위한 제어점의 위치를 나타내고 있다. Table 1은 12개의 설계변수를 나타낸다. 언급된 방식으로 Fig. 1에서 보여주는 유선과 동일한 형상을 얻기 위한 제어점을 얻었을 때의 값을 Table 2에서 보여주고 있다. Table 2에서 괄호 내의 값은 제어점으로 얻어진 값이나 최적화과정에서는 변경되어지는 않는 고정된 값을 의미한다.

3. 결과

3.1 최적화기법 및 제한조건

본 연구에서는 주기조건의 경계영역에 벽면을 설치하여 얻어지는 결과가 주기조건을 사용하여 얻어졌던 케이스케이드 블레이드 표면에서의 마하수와 동일한 결과를 얻고자하는 것이 목적이므로, 벽면이 설치되었을 때 얻어지는 블레이드의 표면에서 마하수와 주기조건에서 얻어졌던 마하수의 차이가 최소가 되도록 하여야 한다. 하지만 벽면의 설치로 아래에 있는 블레이드는

흡입면에서 얻어지는 표면에서의 마하수를 적용하고, 위쪽에 있는 블레이드는 위쪽에 설치된 벽면으로 인하여 흡입면이 영향을 받음으로 이 경우에는 압력면에서 얻어지는 마하수를 사용한다. 따라서 블레이드의 통로에서 얻어지는 유동장도 주기조건에서 얻어졌던 유동장과 동일한 결과가 얻어질 것으로 예상된다.

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

식(1)에서의 \vec{X} 와 H^* 은 설계변수와 목적함수를 의미하며, S_{bl} 은 위쪽에 설치된 블레이드의 압력면과 아래쪽에 설치된 블레이드의 흡입면을 의미한다. H^* 은 목적함수로서 식(2)와 같이 표현된다.

$$H^* = \left| \int Ma_{wa} dS_{bl} - \int Ma_{pr} dS \right| \quad (2)$$

식(2)에서 Ma_{wa} 과 Ma_{pr} 은 벽면의 조건에 얻어진 블레이드 표면에서의 마하수와 주기조건에서 얻어진 표면 마하수를 의미한다. Table 3은 형상과 관련한 제한조건을 보여주고 있다.

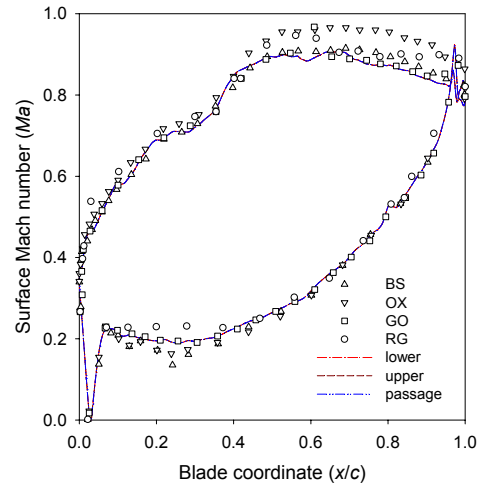
3.2 최적화과정

유선을 벽면으로 설정하였을 때 얻어진 결과는 주기조건으로 얻어진 결과와 상당한 차이를 보이므로 벽면에 설정된 제어점을 설계변수로 하여 벽면의 형상을 변경하면서 주기조건과 동일한 유동장을 얻도록 최적화 과정을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 최적화의 과정은 7번 수행하였으며 방향탐색을 포함하면 총 109번의 계산을 수행하였다. Table 4는 최적화 되어졌을 때의 설계변수들의 값을 나타내고 있다.

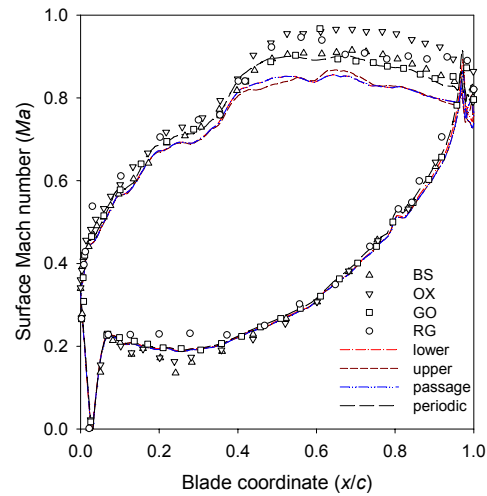
3.3 VKI와 비교

Fig. 4(a)는 실험조건과 동일한 주기조건이 사용되어진 경우에 얻어진 계산결과와 실험결과의 비교를 나타내고 있다. 기호로 나타난 결과는 실험의 결과로서 4개의 각각 다른 결과들을 의미하며, 계산의 결과는 선으로 표시되어 있는데, Fig. 1의 케이스케이드 계산 영역에서 위쪽의 익형에서 얻어진 결과와 아래쪽에서 얻어진 결과, 그리고 두 익형에서 중간통로에서 얻어진 결과들이 동시에 나타나 있으나 주기조건의 계산이므로 어느 블레이드에서의 결과나 모두 동일한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 보여주는 블레이드 표면에서의 마하수는 블레이드 표면에서 측정된 정압력과 입구에서의 측정된 전압력을 기준으로 얻어진 결과이다.

주기조건으로 사용된 Fig. 1의 계산영역에서 위쪽과 아래쪽의 영역을 벽면으로 설정하여 계산한 결과를 Fig. 4(b)에서 보여주고 있다. 이 벽면의 형상은 앞서 언급한 바와 같이 주기조건에서 얻어진 그 위치에서의 유선을 기준으로 형성되었으므로 유동의 방향과 일치한다. 하지만 벽면에서 경계층이 성장하므로 입구영역에서 하류로 갈수록 경계층의 영향으로 내부유동장은 주기조건을 사용하여 얻어진 유동장과는 다르게 형성된다. 이러한 결과를 흡입면에서 얻어진 표면마하수에서 잘 보여주고 있는데, 블레이드의 중간을 지난위치에서 얻어진 표면마하수가 주기조건을 사용하여 얻어진 표면마하수와의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 아울러 벽면의 영향으로 아래쪽에 위치한 블레이드에서 얻어진 표면마하수와 위쪽에 위치한 블레이드에서 얻어진 표



(a) periodic



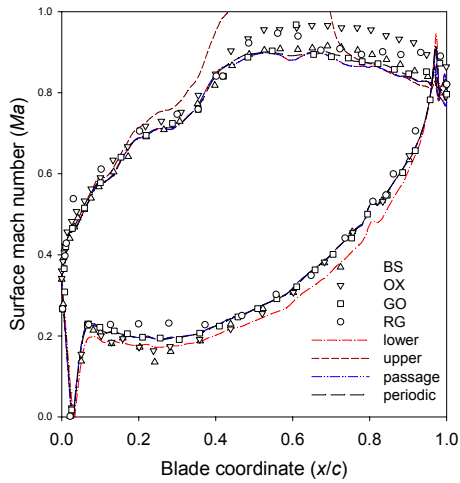
(b) wall from streamline

Fig. 4 Comparison of surface Mach numbers

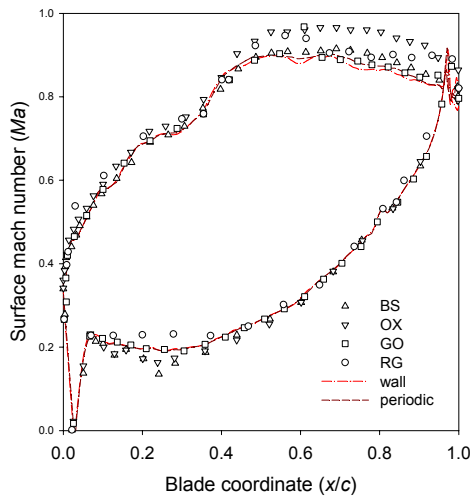
면마하수에도 차이를 나타내는데 특히 흡입면에서 그 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 최적화의 방법으로 설계되어진 벽면으로 얻어진 계산의 결과와 주기조건으로 하여 얻어진 결과와의 비교를 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 계산영역의 위쪽에 위치한 블레이드 표면에서 얻어진 마하수뿐만 아니라 아래쪽에 위치한 블레이드 표면에서 얻어진 마하수까지도 나타내었다. 이 결과에서 보여주는 것과 같이 벽면의 조정은 블레이드의 중간통로를 지나는 유동장에 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 위쪽에 위치한 블레이드의 흡입면은 블레이드 중간 위치에서 아주 높은 표면 마하수를 나타내고 있으며, 아울러 아래쪽에 위치한 블레이드의 경우는 벽면의 영향으로 인하여 압력면에서의 표면마하수가 낮아지는 결과를 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 아래측 블레이드의 흡입면과 위측 블레이드의 압력면에서 표면마하수와 주기조건에서 얻어진 표면 마하수와의 비교를 나타내고 있으며, 압력면에서의 표면마하수는 아주 잘 일치하고 있으나 흡입면 뒤측의 영역에서는 약간의 차이가 있음을 나타내고 있다.

블레이드의 중간 통로에서 얻어진 유동장의 비교를 위하여, Fig. 6에서는 마하수의 비교를 보여주고 있다. 주기조건에서 얻어진 마하수의 변화와 벽면조건으로 하여 얻어진 마하수의 변화가 전체적으로 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 2피치간격의 통로에 하나의 블레이드를 설치하였던 Laskowski et al.[4]의 결

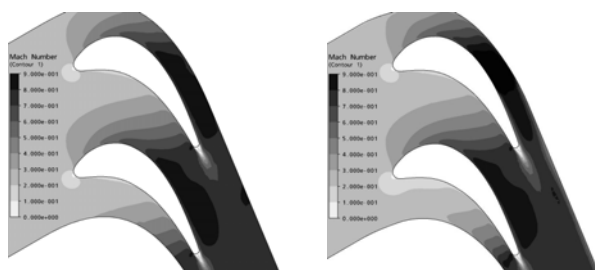


(a) two blades



(b) passage

Fig. 5 Surface Mach number on the optimized cascade model with that obtained with the periodic boundary condition



(a) periodic

(b) optimized

Fig. 6 Comparison of Mach number within a passage

과에 비하여 내부 유동장이 잘 일치하는 결과를 보여주는데 이는 하나의 블레이드를 설치한 경우는 유동장이 벽면에 직접적인 영향을 받기 때문이다. 따라서 케스케이드 실험에서 유동장의 연구가 필요한 경우에는 블레이드 두 개를 설치하는 것이 보다 효과적이라고 하겠다.

4. 결론

2피치 간격의 케스케이드 실험에서 2개의 블레이드를 설치하여 실험을 하는 경우에 주기조건을 맞추는 어려움을 해소하기 위하여, 케스케이드의 벽면을 조정하여 주기조건에서 얻어지는 유동장과 동일한 결과를 얻을 수 있도록 벽면에 12개의 설계변수를 설정하고, 블레이드의 표면마하수를 목적함수로 하여 최적화를 수행하였다. 12개의 설계변수는 내부의 유선을 벽면으로 형상화하는데 상당히 적용성이 높음을 알 수 있으며, 방향탐색 과정을 포함하여 109번의 계산을 수행하여 최적화에 도달하였다. 최적화된 벽면에서 얻어진 결과는 주기조건에서 얻어진 결과와 잘 일치하는 결과를 나타내므로 이러한 방법으로 케스케이드의 벽면을 설계하는 것이 가능함을 확인하였다. 또한 블레이드의 중간통로에서 형성된 유동장은 주기조건에서 얻어진 유동장과 동일한 유동장을 보여주었다. 하지만 최적화의 목적함수로 설정한 표면마하수는 압력면에서 잘 일치되는 결과를 나타내고 있음에도 불구하고 전단영역에서 불일치의 영향이 크게 나타나므로 차후의 연구에서는 압력면과 흡입면에서의 표면마하수에 가중치를 주어서 목적함수를 설정하여야 함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 지방기술혁신사업 [RTI04-0103]으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Hollen, B. and Jacob, J., "Experimental Investigation of Separation on Low Pressure Turbine Blades," (2001), AIAA Paper No. 2001-0447
- [2] 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.
- [3] Ott, P., Norryd, M. and Bolcs, A., "The Influence of Tailboards on Unsteady Measurements in a Linear Cascade," (1998), ASME Gas Turbine and Aeroengine Congress.
- [4] Laskowski, G. M., Vicharelli, A., Medic, G., Elkin, C. J., Eaton, J. K. and Durbin, P. A., "Inverse Design of and Experimental Measurements in a Double-Passage Transonic Turbine Cascade Model," J. Turbomachinery, Vol. 127, (2005), pp.619-626.