

# 증기터빈 바이패스밸브 케이지 유동장 해석관한 연구

최지용\* · 조안태\* · 김광용\*\*

## Analysis of Flow Field in a Steam Turbine Bypass Valve

Ji-Yong Choi\*, An-Tai Cho\*, Kwang-Yong Kim\*\*

*Key Words* : Bypass valve (바이패스밸브), Pressure drop (압력 강하), Experiment (실험), Numerical analysis (수치 해석), Navier-Stokes equations (나비에-스톡스 방정식)

### ABSTRACT

In the present work, characteristics of the flow in the cage of a steam turbine bypass control valve for thermal power plant are investigated. Experimental measurement for wall static pressure has been carried out to validate numerical solutions. And, the flowfield is analyzed by solving steady three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. Shear stress transport (SST) model is used as turbulence closure. The effects of the flow area between stages of the cage on the pressure drop are also found.

### 1. 서론

발전용 보일러가 잦은 부하 변동으로 운전될 때 보일러와 터빈 사이의 압력 조건을 맞추기 위해 보일러에서 증기를 추출하는데, 이 때 발생한 증기를 밖으로 내보내지 않고 보일러와 주변 기기 주위를 흐르도록 해주는 장치를 바이패스밸브 (bypass valve)라고 한다. 바이패스밸브는 발전소 기동시간 단축 및 부하특성 개선, 보일러 터빈의 독립운전 및 계통 과도현상에 대한 안정성 향상을 가져온다. 현재 국내에서는 화력발전소용 증기터빈 바이패스밸브의 중요성이 부각되어 이 장치의 설계기술을 국내 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다.

바이패스밸브의 내부 구조는 다양한 형태로 설계되는데, 이에 관한 연구는 대부분 기업에서 진행되어 왔

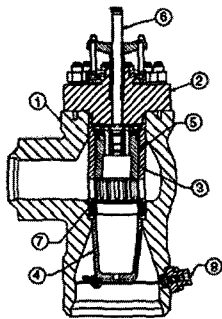
기 때문에 연구결과가 공개된 사례<sup>(1)~(4)</sup>가 많지 않다. Maur 등<sup>(1)</sup>은 증기터빈 내 메인 밸브에서 발생하는 침식에 관한 유동해석을 수행하여, 메인 밸브의 유동패턴을 연구하여 주 침식부의 발생원인과 고체입자의 주입량에 따른 침식률을 예측하였다. Amano와 Draxler<sup>(2)</sup>는 발전소용 고압 바이패스밸브의 수치해석을 통해 밸브의 유동특성과 밸브의 열림에 따른 유량 계수의 변화에 대하여 연구를 하였다. 밸브소음의 원인이 되는 최대 속도 점을 찾아내어 형상개선을 통해 소음을 줄일 수 있음을 주장하였다.

바이패스밸브는 Fig. 1과 같이 그 구조가 상당히 복잡하다. 특히, 밸브 내부의 구성품 중 감압의 주 역할을 하는 케이지 (cage) 부분은 매우 복잡한 형상을 가지고 있고 압력이 매우 급격하게 감소하기 때문에 밸브 소음의 주원인이 되기도 한다. 그러므로 케이지 설계에 있어서는 소음 발생을 최소한으로 억제하며 효과적인 감압을 이루는 것이 중요하다. 그리고 복잡한 케이지 내의 유동구조로 인해 정압측정을 제외한 내부유

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : kykim@inha.ac.kr



1	Body	5	Plug
2	Bonnet	6	Stem
3	Inlet cage	7	Seat
4	Outlet Cage	8	Nozzle body

Fig. 1 Valve components

동장의 실험적 측정이 거의 불가능하므로 케이지 내 유동의 해석에 있어서 수치해석의 중요성이 매우 높다.

일반적인 유체기계들이 에너지 손실을 줄이기 위해 유동의 박리를 억제하는 방향으로 설계하는데 반해 케이지는 짧은 구간 내에서 압력강하 (손실)를 최대화 하기 위해 유동의 박리와 재순환을 유도하는 설계를 하게 되는데, 일반적으로 전산유체역학적 해석에서 사용되는 수치도식과 난류모델들은 박리로 인한 재순환 유동에서 많은 오차를 발생시키므로 이에 대한 해석의 수렴성과 정확성을 확보하는 것이 쉽지 않다.

본 연구에서는 800 MW 화력 발전소용 증기터빈 LP/HP 바이패스밸브의 주 감압부분인 케이지 내 유동에 대한 모형실험과 삼차원 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 해석을 통해 이 장치 내의 삼차원 유동 특성을 분석하기 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 대상으로 하는 케이지는 Fig. 2에서와 같이 여러 개의 원형공 (hole)들이 뚫려 있는 환형원통 (annular cylinder)들이 다수 중첩된 형상을 하고 있다. 각 원형공들이 겹친 면적에 따라 각 단계별 압력강하량이 조절될 수 있다. 따라서, 케이지에는 다수의 원형공들의 캐스케이드 (cascade)가 존재하는 데 각 캐스케이드는 입구유동의 조건이 다소 차이를 나타낼 뿐 내부 유동구조에서는 큰 차이가 없을 것으로 사료되므로, 본 연구에서는 한 개의 캐스케이드에 대한 모형실험을

수행하여 수치해석의 타당성을 시험하고자 하였다.

Figure 3은 모형실험장치의 설계도를 나타내고 있다. 모형실험장치의 캐스케이드는 총 9개단으로 구성된다. 실험장치의 왼쪽 끝 부분이 유동의 유입구이며 여기에

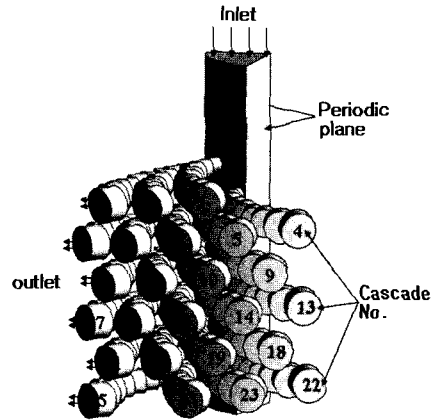


Fig. 2 Shape of cascade in computational domain

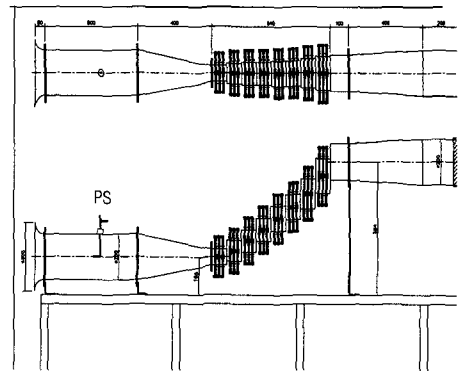


Fig. 3 Plan of experimental apparatus

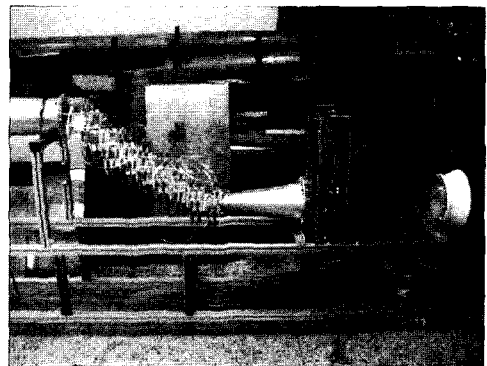


Fig. 4 Experimental apparatus

상하 이송가능한 피토크관 (Pitot tube)을 설치하여 속도 분포를 측정함으로써 유량을 측정할 수 있도록 하였다. 작동유체는 상온의 공기이다. 각 케이지 단의 벽면에 2개씩의 정압공 (static pressure hole)을 설치하여 유량에 따른 각 단의 정압 변화를 측정하였다. Fig. 4는 사용된 실험장치의 실제 모습이다.

### 3. 유동해석방법

본 연구에서는 상용코드인 ANSYS사의 CFX-5.7<sup>(5)</sup>을 사용하여 비압축성 삼차원 정상유동에 대한 연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 계산하였다. 난류모델은 벽함수와 함께 SST 모델<sup>(6)</sup>을 사용하였다. SST모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점을 결합한 모델로서, 벽 근처에서는 k-ω 모델이 사용되며, 나머지 영역에서는 k-ε 모델이 사용된다. SST 모델은 역압력유배로 인한 유동박리 (flow separation)의 예측에 상당히 효과적인 것으로 보고되었는데<sup>(7)</sup>, 이 모델의 사용으로 캐스케이드 내에서 발생하는 박리구역 내 난류유동해석의 정확성을 높일 수 있다. 계산격자는 비정렬 격자계를 사용하여 구성하였다.

케이지의 형상은 총 125개의 hole들이 중심축에서 좌우방향으로 72도를 주기로 형성되어 있는데 Fig. 2는 이 중 한 주기만을 보여주고 있다. 계산은 크게 두 가지로 수행하였다. 우선 계산결과 타당성을 검증하기 위해 실험모형과 동일한 단일 캐스케이드에 대한 계산을 수행하여 그 결과를 실험치와 비교하였다. 다음으로 전체적인 유동특성을 파악하기 위해 유동장의 주기성을 고려하여 Fig. 2와 같이 25개의 캐스케이드로 구성되는 영역에 대하여 계산을 수행하였다. 이 경우 경계조건으로 입구부의 두 측면에 주기조건을 주었고, 입구조건으로 일정한 유량조건을 주었으며, 출구에서는 대기압조건을 주었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 계산치와 실험치의 비교

수치해석의 타당성을 검증하기 위해 앞에서 언급한 바와 같이 실험장치와 동일한 단일 캐스케이드 유동을 해석하여 실험치와 비교하였다. 계산영역과 사용된 격자계의 형태는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 격자의존성 시험을 거쳐 약 10만개의 격자가 사용되었다. 경계조건

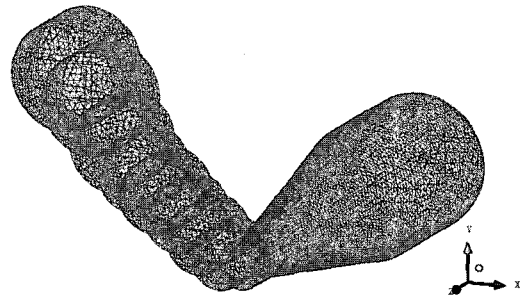
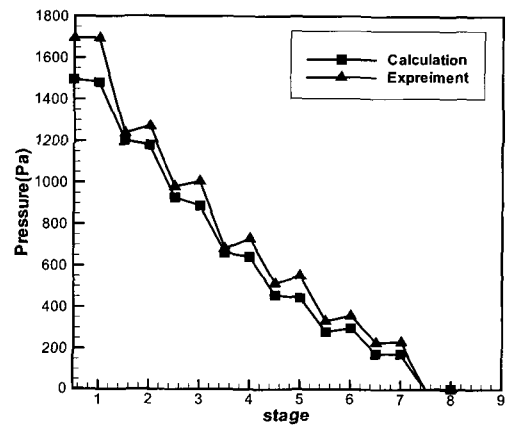
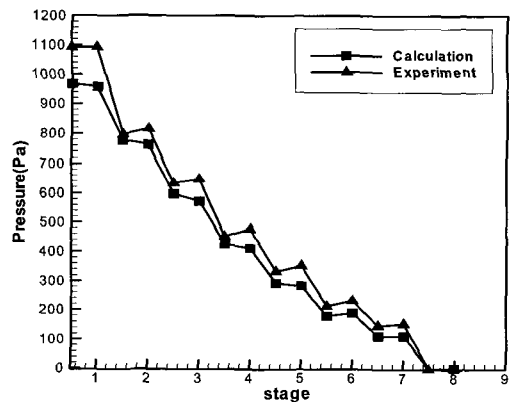


Fig. 5 Computational grids for single cascade

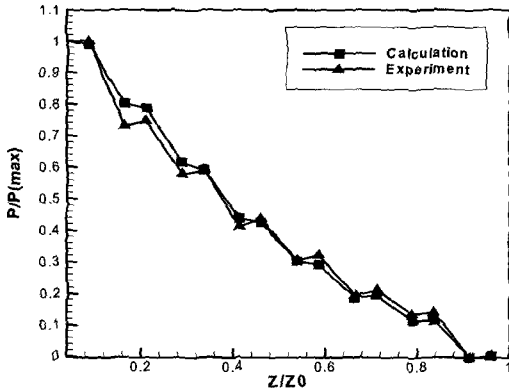


(a)

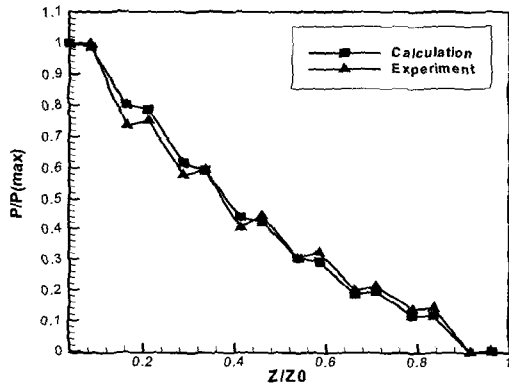


(b)

Fig. 6 Validation of calculated static pressures: (a) Re=32,000 (b) Re=26,000



(a)



(b)

Fig. 7 Normalized static pressures:  
(a) Re=32,000, (b) Re=26,000

으로 입구에서는 균일유속을 주고 출구에서는 대기압 조건을 주었다.

Figure 6과 7에서는 측정 위치에서 벽면 정압에 대한 계산치와 실험치의 비교를 보여주고 있다.  $Z_0$ 는 전체 단의 길이를 나타낸다. Fig. 6을 통해 계산이 실험에 비해 두 가지 유량에 대해 공히 캐스케이드의 총 압력강하를 약 11% 정도 낮게 예측하고 있음을 알 수 있다. 전체압력강하로 무차원화 한 압력분포를 비교한 Fig. 7에서 8개단 각각에서의 압력강하가 비교적 정확하게 예측되고 있다. 초기 네 개의 단에서는 각 단의 최소압력이 실험치 보다 크게 예측되고 있고 제 5단에서는 최대압력이 낮게 예측되고 있으나 나머지 세 개의 단에서는 계산치와 실험치가 상당히 일치하고 있다. 이러한 현상은 두가지 유량에 대해 동일하게 나타난다.

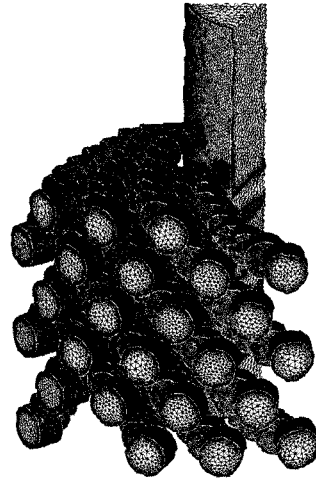


Fig. 8 Computational grids for 1/5 flow field

### 3.2 유동장의 특성

케이징 내 각 캐스케이드의 입구유동조건이 모두 다를 것이므로 전체 유동장의 파악을 위해서 주기조건을 사용하여 Fig. 2와 같은 영역에서의 계산을 수행하였다. 이 경우 격자계는 Fig. 8에 나타난 바와 같다. 격자의존성 시험을 거쳐 최적격자수는 약 190만개로 결정하였다. 계산시간은 3.2GHz의 Pentium-64 bit 프로세서에서 약 80시간이 소요되었다.

Figure 9에서는 캐스케이드 입구에서의 압력분포를 나타내고 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 원통형 입구부 벽면에 위치한 각 hole들의 위치에 따라 입구 압력의 차이가 나타나게 되는데, Fig. 9에 나타난 바와 같이

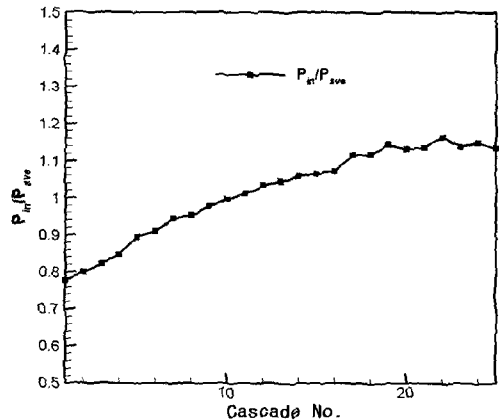


Fig. 9 Distribution of inlet pressure at each cascade

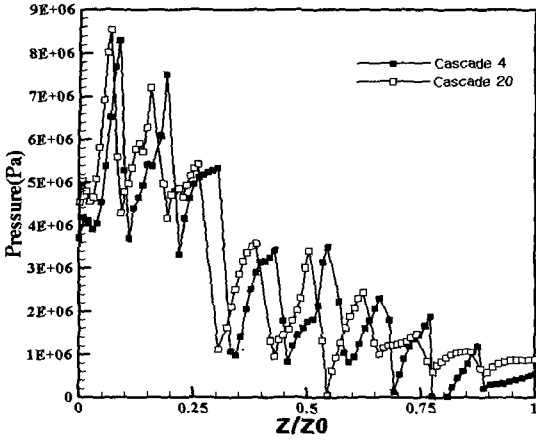


Fig. 10 Distribution of local pressure

벽면상에서 나선형으로 분포하고 있는 hole들이 아래로 갈수록 입구압력이 점진적으로 커지고 있으나 그 최대편차는 약 20%에 불과함을 알 수 있다. 최대 유량도 대체적으로 증가함을 알 수 있다.

Figure 10은 상단부에 위치한 4번 캐스케이드와 하단부의 20번 캐스케이드 내부의 압력분포를 비교하고 있다. 여기에서의 압력은 Figs. 6과 7에서와는 달리 각 단 유동장 중심선을 따른 국부 압력을 나타낸다. 두 개의 멀리 떨어진 캐스케이드에서 정량적인 압력강하의 차이는 있으나 내부 압력분포의 정성적인 경향은 유사함을 알 수 있다. 특히 최대 압력강하는 제 3단에서 4단으로

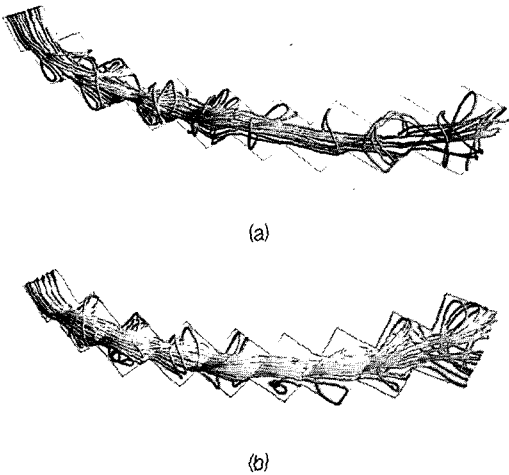


Fig. 11 Distributions of streamlines: (a) cascade 13, (b) cascade 21

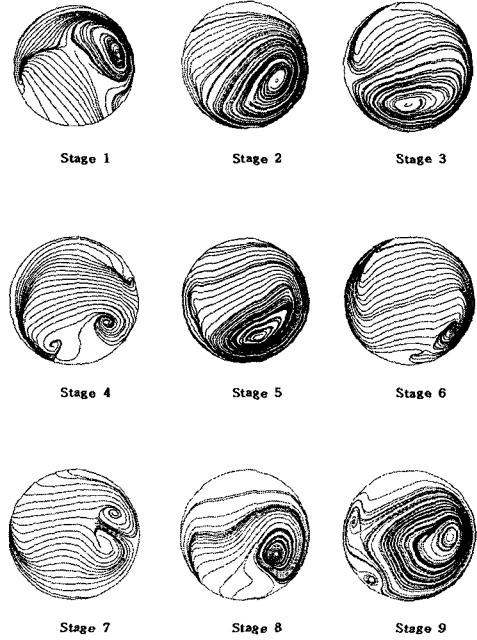


Fig. 12 Flow structures in cascade 13

넘어오면서 발생함을 알 수 있고 이는 두 캐스케이드에서 동일하게 나타난다.

삼차원적인 유선의 분포를 나타내는 Fig. 11에서 두 가지 캐스케이드에서의 유동구조가 유사하게 나타나고, 모두 제 2에서 4단까지의 유동구조가 복잡하게 나타나 이 부분에서 유동의 손실이 큰 것을 나타내는데, 이는 Fig. 10에서 이 부분의 압력강하가 큰 것과 일치하는 현상이다.

Figure 12에서는 캐스케이드 13의 각 단의 중간 단면에서의 유동구조를 보여주고 있다. 단면 내 순환유동이 전반적으로 우측에 편중되어 나타나는 것은 캐스케이드 구조상 이 부분에 박리구역이 형성되기 때문인 것으로 사료된다. 역시 압력강하가 큰 입구 쪽 단들에서 복잡한 순환유동이 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 케이지 유로 변화에 따른 특성

원통형 케이지들의 상대적인 위치에 따라 hole들이 겹치는 면적이 달라져 이 위치에서의 유동면적이 변화하게 되는데, 이 겹치는 면적을 5%와 10% 증가 또는 감소시킨 경우에 대한 계산을 수행하여 이에 따른 유동 특성의 변화를 분석하였다. 이 경우의 계산은 Fig. 5에

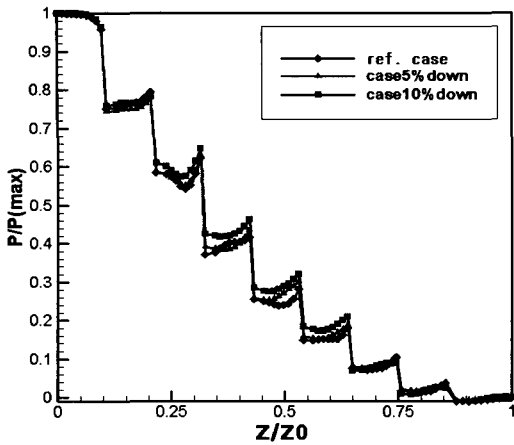


Fig. 13 Pressure distributions with reduction of flow area

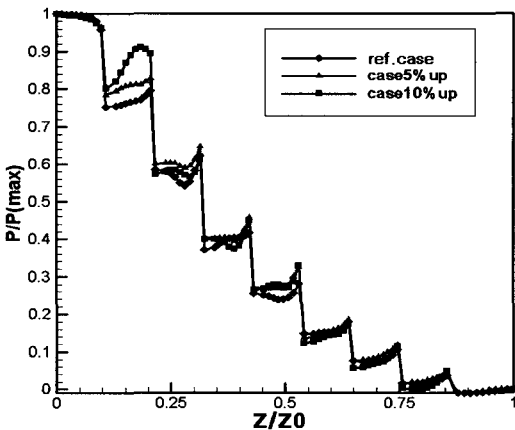


Fig. 14 Pressure distributions with increase of flow area

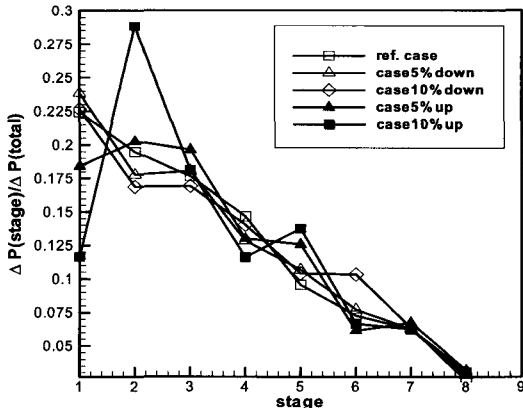


Fig. 15 Pressure drop at each stage

나타난 것과 유사한 단일 캐스케이드에 대해 수행하였다.

Figures 13과 14는 유로 단면적 변화에 따른 국부압력을 무차원화 하여 형상에 따른 감압률을 비교한 그래프이다. 유로 단면적이 감소하였을 때가 증가하였을 때 보다 비교적 균일한 감압이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 특히, 유로면적이 증가하는 경우 제 2단계에서의 압력변화가 두드러지게 나타나는 것이 주목할 만하다.

Figure 15은 각 단 사이의 압력 감압 정도를 알아보기 위해 각 단 간의 압력강하를 총 압력강하로 나누어 나타낸 것이다. 유로면적이 10% 증가하는 경우 2단계와 3단계 사이의 압력강하가 가장 크게 나타나는데 이는 Fig. 14에서도 확인할 수 있다. 유로 단면적 변화가 각 단의 압력 강하에 미치는 영향은 1~4단계에서 비교적 크게 나타나고 나머지 단계에서는 단면적 변화에 따른 영향이 작은 것으로 나타났다.

이상과 같은 연구결과를 통해 실험적 측정이 곤란한 복잡한 유로의 바이패스밸브 케이징 유동에 대해 삼차원 RANS 방정식을 이용한 수치해석은 다양한 유동특성을 파악하는데 매우 효과적인 수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 화력 발전소용 증기터빈 바이패스밸브 내부 유동장의 해석을 위한 실험과 수치해석을 수행하였다. 실험은 케이징 상의 단일 캐스케이드에 대해 수행하였으며, 그 결과를 계산치와 비교 검토하였다. 계산이 실험에 비해 총 압력강하를 약 11% 정도 낮게 예측하였으나, 무차원화 한 압력분포의 비교를 통해 각 단계에서의 압력강하의 정성적 경향은 비교적 정확하게 예측되었음을 알 수 있다. 전체 케이징의 유동장을 해석한 결과 각 캐스케이드 입구의 압력분포는 최대 20%의 편차를 나타내고 있으나, 캐스케이드 내부의 압력분포를 포함하는 유동장은 유사하게 나타났다. 최대 압력강하는 3단계와 4단계 사이에서 발생함을 알 수 있었다. 케이징 hole들의 상대적 위치변화에 따른 유로 단면적의 변화를 시험한 결과 단면적이 감소하였을 때가 증가하였을 때보다 비교적 균일한 감압이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 단면적 변화의 효과는 초기 네 개 stage에서 두드러지게 나타났다.

케이징의 각 캐스케이드에서 나타나는 유동현상이 서로 유사하게 나타남에 따라 향후 케이징 형상의 최적설계를 수행하고자 할 경우 단일 캐스케이드에 대해

수행하여도 전체적으로 균일한 성능향상을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 전력산업연구개발사업 (주관기관: 서흥금속(주))의 지원으로 수행되었음을 밝히고 이에 감사드린다.

## 참고문헌

- (1) Z. Mazur, R. Campos-Amezcuca, G. Urquiza-Beltran, A. Garcia-Gutierrez, 2004, Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine, Applied Thermal Engineering 24 (2004), pp.1877~1891.
- (2) R. S. Amano and G. R. Draxler, 2002, High-Pressure Steam Flow in Turbine Bypass Valve System Part 1: Valve Flow, Journal of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 3, pp. 555~563.
- (3) T. S. Lee and L. C. Leow, 1999, Numerical study on the effects of air valve characteristics on pressure surges during pump trip in pumping systems with air entrainment, Int. J. Numer. Meth. Fluids vol. 29, pp. 645~655.
- (4) Yoshitaka Hayashi, Koji Kagisaki, Takahiro Yamaguchi, Taichi Sakaguchi, Yoshihisa Naka, Yoshiki Sawa, Shigeaki Ohtake, Hikaru Matsuda, 2001, Clinical application of vacuum-assisted cardiopulmonary bypass with a pressure relief valve, European Journal of Cardio-thoracic Surgery, Vol. 20, pp. 621~626.
- (5) CFX-5.7 Solver Theory, Ansys inc., 2004.
- (6) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Uberlandia, Brazil.
- (7) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," AIAA Paper 97-2121.