

# 발전소용 고압 바이패스 밸브의 유동해석

조안태<sup>†</sup> · 김광용<sup>\*</sup>

## Analysis of Flow through High Pressure Bypass Valve in Power Plant

An-Tae Cho, Kwang-Yong Kim

**Key Words:** Bypass Valve(감압밸브), Navier-Stokes Equation(나비에-스톡스 방정식), Numerical Analysis(수치해석), Pressure Drop(압력 강하)

### Abstract

In the present work, flow characteristics analysis has been performed for steam turbine bypass control valve (single-path type). The numerical analysis is performed by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations. Shear stress transport (SST) model is used as turbulence closure. Symmetry condition is applied at the mid plane of the valve while adiabatic condition is used at the outer wall of the cage. Grid independency test is performed to find the optimal number of grid points. The pressure and temperature distributions on the outer wall of the cage are analyzed. Mass flow rate at maximum plug opening condition is compared with the designed mass flow rate.

### 1. 서 론

발전용 보일러가 잦은 부하 변동으로 운전 될 때 보일러와 터빈 사이의 압력 조건을 맞추기 위해 보일러에서 증기를 축출하는데, 이 때 발생한 증기를 밖으로 내보내지 않고 보일러와 주변 기기 주위를 흐르도록 해주는 장치를 Bypass Valve 라고 한다. Bypass Valve는 발전소 기동시간 단축 및 부하특성 개선, 보일러 터빈의 독립운전 및 계통 과도현상에 대한 안정성 향상을 가져온다. 현재 국내에서는 화력발전소용 증기터빈 Bypass Control Valve 의 중요성이 부각되어 이 장치의 설계기술을 국내에서 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다.

Bypass Valve의 내부 구조는 다양한 형태로 설계되는데, 이에 관한 연구는 대부분 기업에서 진행되어 왔기 때문에 연구결과가 공개된 사례<sup>(1-3)</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. Amano 와 Draxler<sup>(2)</sup>는 발전소용 고압 Bypass Valve의 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.

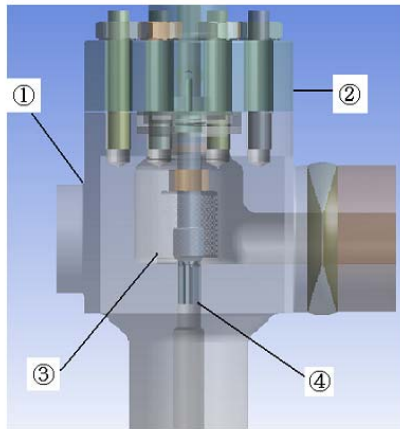
Bypass Valve는 Fig. 1 과 같이 그 구조가 상당히 복잡하다. 특히, 밸브 내부의 구성품 중 감압의 주 역할을 하는 Cage 부분은 매우 복잡한 형상을 가지고 있고 압력이 매우 급격하게 감소하기 때문에 밸브 소음의 주원인이 되기도 한다. 그러므로, Cage 설계에 있어서는 소음 발생을 최소한으로 억제하며 효과적인 감압을 이루는 것이 중요하다. 그리고, 복잡한 Cage 내의 유동구조로 인해 정압측정을 제외한 내부유동장의 실험적 측정이 거의 불가능하므로 Cage내 유동의 해석에

<sup>†</sup> 인하대학교 대학원 기계공학과

E-mail : choat@inhaian.net

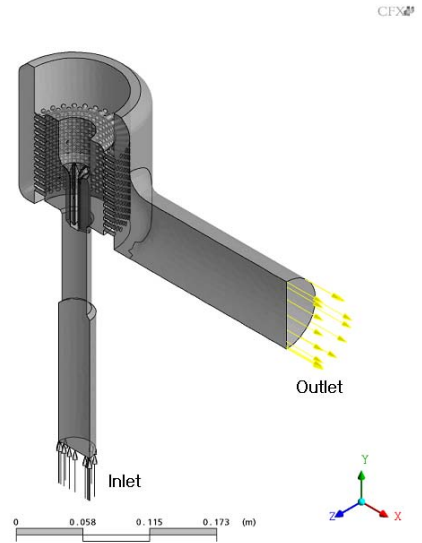
TEL : (02)860-7317 FAX : (02)868-1716

<sup>\*</sup> 인하대학교 기계공학과



①	Body	②	Bonnet
③	Cage	④	Plug

**Fig. 1** Valve components



**Fig. 2** Shape of computational Domain

있어서 수치해석의 중요성이 매우 높다.

일반적인 유체기계들이 에너지 손실을 줄이기 위해 유동의 박리를 억제하는 방향으로 설계하는데 반해 Cage는 짧은 구간 내에서 압력강하(손실)를 최대화하기 위해 유동의 박리와 재순환을 유도하는 설계를 하게 되는데, 일반적으로 전산 유체역학적 해석에서 사용되는 수치도식과 난류 모델들은 박리로 인한 재순환유동에서 많은 오차를 발생시키므로 이에 대한 해석의 수렴성과 정확성을 확보하는 것이 쉽지 않다.

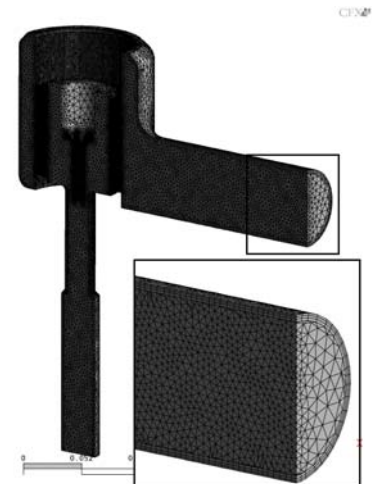
본 연구에서는 800MW 화력 발전소용 증기터빈 HP single-path type bypass control valve 의 삼차원 RANS(Reynolds- averaged Navier-Stokes) 해석 통해 이 장치내의 삼차원 유동 특성을 분석하기 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 유동해석방법

### 2.1 형상설계 및 격자생성

본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 계산시간의 단축과 수렴성의 향상을 위해 유로의 형상을 단순화 하였고, 유동해석형상의 대칭성을 이용하여 유동해석형상 중심면에 대칭조건(symmetry condition)을 주어 계산을 할 수 있도록 형상을 설계하였다.

Fig. 3 는 유동 해석 방법의 결정과 난류 모델 설정 및 해석결과의 타당성을 검증하기위해 제작



**Fig. 3** Computational mesh for analysis

된 유동형상의 계산 격자점을 나타내고 있다. 격자계는 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이, 사면체의 비정렬격자계로 구성하였으며, 벽 근처 속도구배의 정확한 해석을 위해 벽 근처 격자는 육면체로 구성하였다. 격자의 의존성을 제거하기 위한 격자의존성 테스트는 총 51만~74만 사이에서 이루어졌으며 격자 의존성 테스트 결과 총 격자수는 65만개로 결정하였다.

### 2.2 수치해석 및 경계조건

본 연구에서는 상용코드인 ANSYS사의 CFX-10.0<sup>(4)</sup>을 사용하여 비압축성 삼차원 정상유

동에 대한 연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 계산하였다. 난류모델은 벽함수와 함께 SST 모델<sup>(4)</sup>을 사용하였다. SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점을 결합한 모델로서, 벽 근처에서는 k-ω 모델이 사용되며, 나머지 영역에서는 k-ε 모델이 사용된다. SST 모델은 역압력구배로 인한 유동박리 (flow separation)의 예측에 상당히 효과적인 것으로 보고되었는데<sup>(5)</sup>, 이 모델의 사용으로 Cage 내에서 발생하는 박리 구역 내 난류유동해석의 정확성을 높일 수 있다.

입구경계조건은 발전소 Bypass valve의 정상 운전조건과 비슷한 273kgf/cm<sup>2</sup>의 압력조건과 569℃의 온도조건을 주었고 작동유체로 H<sub>2</sub>O Redlich-Kwong vapor를 사용하였다. 출구경계조건은 일정압력조건 136kgf/cm<sup>2</sup>을 주었고, 모든 벽면에는 점착조건(no-slip)과, 단열조건을 적용하였으며, 유동해석형상 중심면을 기준으로 유동혼합이 없는 대칭조건(symmetry)을 주었다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 밸브단면의 압력분포를 나타내고 있다. Plug를 통과한 고압(273kgf/cm<sup>2</sup>)의 steam은 Plug의 유로부분에서 가장 큰 압력강하가 이루어지고, cage내에서 48~67kgf/cm<sup>2</sup>의 압력분포를 보이며, 48kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 출구로 빠져나간다.

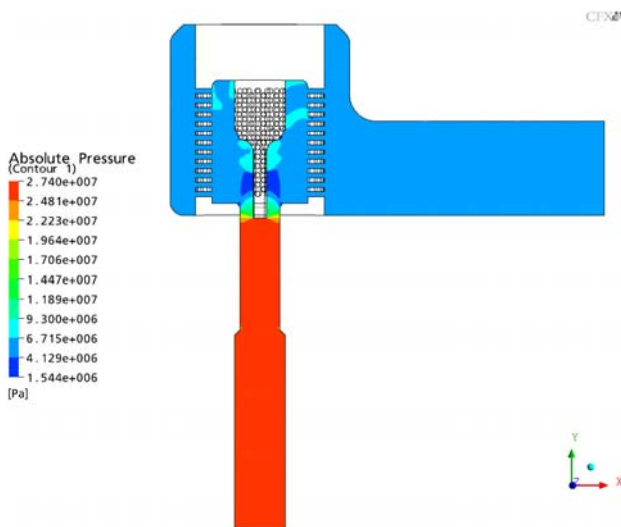


Fig. 4 Distribution of static pressure

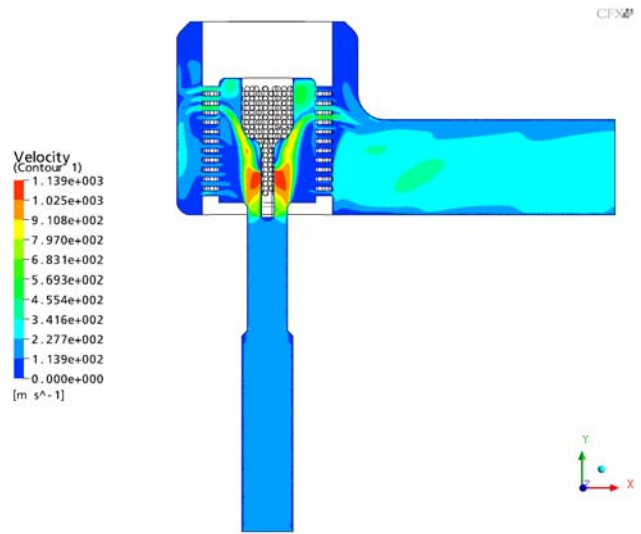


Fig. 5 Distribution of magnitude of velocity

Plug가 최대로 열렸을 때의 아래와 같은 압력 조건에서 입구부 통과 유량은 11.38kg/s 로 계산되었다. Plug를 100% 개방하였을 경우, 시제품 설계 시 예상한 최대유량 8.33kg/g보다 약 3.05kg/s 많은 유량이 입구로 흘러들어 가는 것으로 계산되었다. 따라서 시작품의 설계가 타당함을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 밸브단면의 속도장을 보여주고 있다. Steam이 Plug를 통과한 후 Cage로 흘러들어 가면서 속도가 급격히 상승하여 Plug의 중상부에서 최대속도(1.139E3 m/s)가 형성된다. 빠른 속도로 인하여 Steam이 Plug의 좁은 유로를 통과하여 상대적으로 넓은 영역의 Cage내로 흘러들어감에도 불구하고 대부분의 유동은 Plug를 통과할 때의 유동형태를 유지하면서 Cage상부의 hole로 빠져나가며, Cage내 하부영역은 유동의 흐름이 상대적으로 미약한 것을 볼 수 있다. Cage hole을 통과한 Steam은 Cage 외부영역에서 대부분 300m/s 이하의 속도분포를 보이고 있다.

Fig. 6은 밸브단면의 streamline을 나타낸 것이다. 입구로 들어온 고압의 steam은 빠른 속도로 인해 Cage hole 전체에 고르게 유동이 퍼져나가지 못하고 Plug의 형상을 따라 대부분 상부 Cage hole로 유동이 흘러가는 것을 볼 수 있다.

출구의 반대방향의 Cage 외부 위쪽 영역에서는 Vortex가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

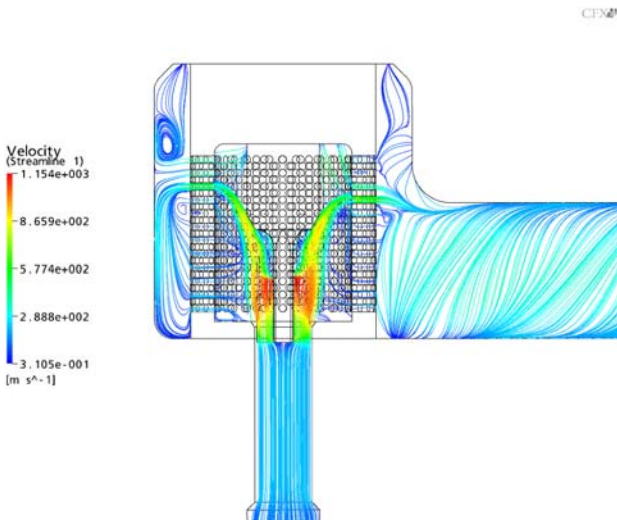


Fig. 6 Distribution of streamlines

Fig. 7과 Fig. 8은 Cage 외부표면 근처의 속도와 압력분포를 나타내고 있다. Cage 외부 벽면은 Plug나 Cage와 비교하여 기계적 강도가 상대적으로 낮은 재질로 구성되어 있기 때문에, 속도와 압력분포를 확인하는 것이 안정성을 평가하는데 있어 중요하다. 속도분포는 Cage 외부의 중하부 영역에서 높은 속도분포를 보이고 있으며, 최대 속도 334m/s를 나타내고 있다. 압력분포는 Cage의 중상부와 하부 영역에서 다른 영역보다 높은 압력분포를 보여주고 있으며, Cage 외부표면에서 형성되는 최대 압력은 약 60kgf/cm<sup>2</sup>인 것으로 나타났다.

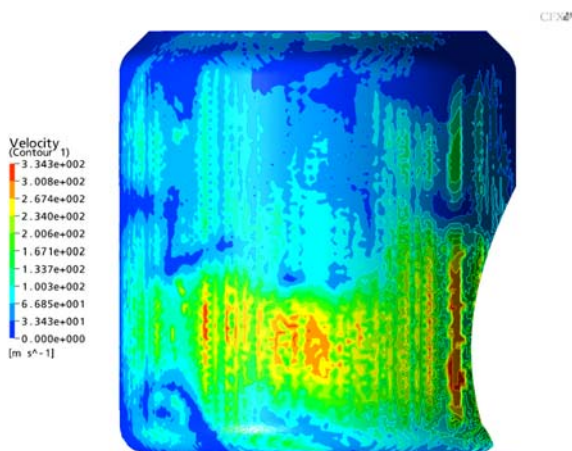


Fig. 7 Distribution of velocity near cage wall

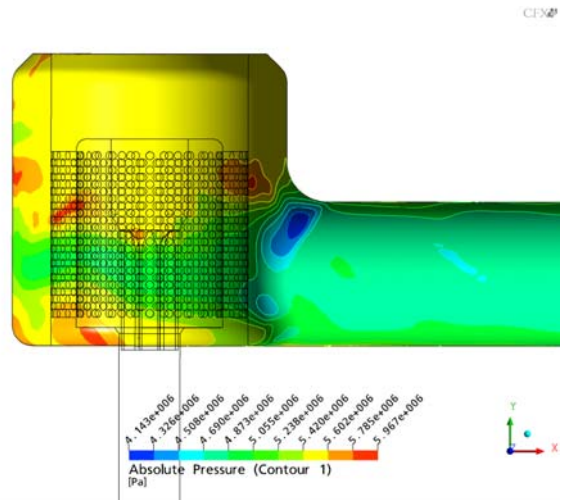


Fig. 8 Distribution of pressure on Cage wall

#### 4. 결론

본 연구는 화력 발전소용 증기터빈 Bypass Valve 내부 유동장의 해석을 위한 수치해석을 수행하였다. Bypass Valve 내부의 유동장 해석을 통하여 현재 설계된 시제품의 신뢰성과 안정성을 확보하고 설계상의 문제점을 파악하는 것이 유동해석의 주요 목적이다.

Plug가 최대로 개방되었을 때, 입구부로 유입되는 steam의 유량은 11.38kg/s로 시제품 설계 시 예상한 최대유량 8.33kg/s보다 많은 유량이 통과하는 것을 확인함으로써, 시제품 설계의 타당성을 확인할 수 있다. Cage 외부표면 근처의 속도와 압력분포는 최대334m/s, 60kgf/cm<sup>2</sup>를 가짐을 확인하였다.

#### 후기

본 연구는 한국전력 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(2204), 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) 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.
- (4) CFX-10.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006
- (5) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Uberlandia, Brazil.