

# 수소압축기용 스너버 내부 압력특성에 관한 수치해석

## Numerical Analysis on the Pressure Characteristics in a Snubber for Hydrogen Compressor

심규진 · 이종섭 · 악바르 완다 알리 · 정한식 · 정효민 · 이철재

K. J. Shim, C. S. Yi, W. A. Akbar, H. S. Chung, H. M. Jeong and C. J. Lee

**Key Words** : Snubber(스너버), Hydrogen Compressor(수소 압축기), Buffer(버퍼), Pulsation Pressure(맥동압)

**Abstract** : The objective of this study is to find the optimum design of a snubber using CFD analysis. Several dimensions such as snubber height(H), snubber diameter(D), buffer width and buffer angle are considered in this study. The present study shows that the CFD can be applied to study the pressure characteristics inside the snubber. The objective of the snubber design optimization are to minimize a pressure loss and the pulsation ratio. Numerical results such as particle track, pressure distribution and turbulent kinetic energy are used to analyze the critical area and pressure behavior inside the snubber. As a result, snubber model with H/D ratio of 3.23 and buffer angle of 40° has a minimum pressure loss. On the other hand, snubber model with H/D ratio 4.41 and buffer angle 10° has a minimum pulsation ratio.

### 1. 서 론

에너지환경은 급변하고 있으며 현재의 대표적인 에너지 담체인 전기뿐만 아니라 또 다른 에너지 담체로써 수소를 사용하게 되는 수소경제 시대가 2040년경 도래할 것으로 예측되고 있다. 2030년대에는 수소·연료전지 자동차의 시장은 매년 5,000만대가 생산되어 세계 수요의 10%를 차지할 것으로 전망하고 있다. 국내에서는 수소에너지 인프라 시스템 구축의 일환으로 자동차 충전용 수소스테이션의 핵심기인 고압용(70 MPa급) 수소압축기가 개발되어 현장적용단계에 있다. 이러한 노력은 수송에너지에 의한 대기환경 문제를 현저히 줄이고 수소경제 활성화에 적극기여 할 수 있는 막대한 잠재력을 가진 기술로 인식되고 있다.<sup>1,2)</sup>

수소의 압축시스템은 대용량(800 Nm<sup>3</sup>/hr)이면서 왕복동식을 구현하기 위해 필연적으로 맥동압(pulsating pressure)이 동반되므로 이를 근본적으로

해결하여야 한다. 따라서 맥동압 완충기인 스너버(snubber)의 개발이 필수적이다. 특히, 수소압축기의 경우 기존압축기에 비해 고압일 뿐만 아니라 수소 취화로 인한 열화를 초래 할 수 있기 때문에 압축기의 고효율, 고성능을 유지할 수 있는 스너버의 유동해석적 설계와 개발은 필수적이다. 스너버는 압축기 전후에 각각 2개씩 총 4개가 설치되어 있다. 스너버는 최초 또는 압축기를 지난 맥동의 성질을 가진 수소가스의 맥동완화<sup>3)</sup> 및 수소가스에 포함되어 있는 이물질질을 제거하는 역할을 수행하고 내부에는 버퍼(buffer)라는 격판이 설치되어있다.

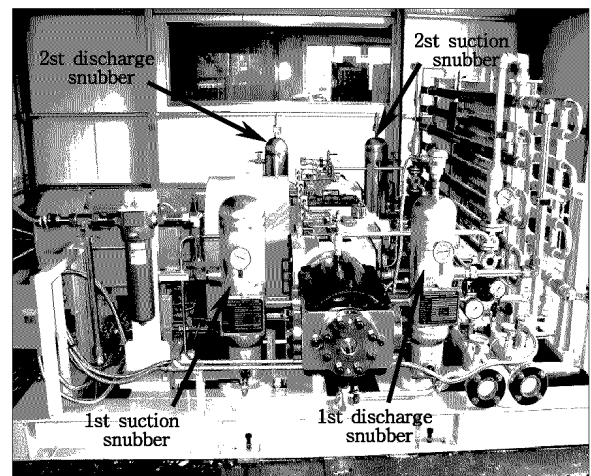


Fig. 1 Commercial hydrogen compressor

접수일 : 2007년 1월 4일, 채택확정 : 2007년 1월 20일  
 심규진(책임저자) : 경상대학교 대학원  
 E-mail : sgc6422@nate.com Tel. 055-646-4766  
 이종섭 : 경상대학교 BK21 친환경에너지연구사업팀  
 Wanda Ali Akbar : 경상대학교 대학원  
 정한식, 정효민:경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소  
 이철재 : 동명대학교 자동차공학과

본 연구는 수소압축기에 설치되는 스너버의 내부 유동해석을 통하여 최저 맥동률과 압력손실률을 계산하고 내부에 설치되는 버퍼의 최적각도를 도출하고자 한다. Fig. 1은 국내에 실제 운용중인 20 MPa급의 수소압축기와 스너버 내부구조를 나타내고 있다. 스너버 내부에 설치된 버퍼는 사진 Fig. 2의 좌측 유입구 상부와 우측 유출구 하부에 걸쳐 설치되어 있으며, 유입구로부터 유입된 고압의 수소가스는 버퍼로 인하여 복잡한 스너버 내부 유동형상을 갖게 된다. 따라서 본 연구는 CFD를 활용하여 수소압축기용 스너버의 최적형상을 찾고자 한다.

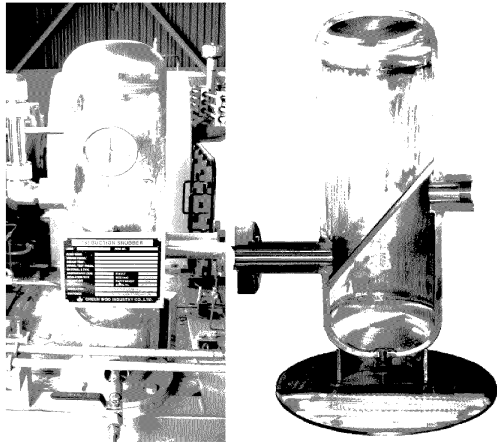


Fig. 2 Snubber and cutting model

## 2. 수치해석방법

### 2.1 경계조건 및 수치기법

본 연구에서 사용된 입구의 경계조건은 실제 수소압축기에서 발생하는 맥동압력 파형과 유사한 sine 파형을 생성시켜 이를 경계조건으로 사용하였다. 작동유체는 수소(H<sub>2</sub>)로 하였으며, 최고 12 MPa, 최저 8 MPa의 2 MPa 진폭을 갖는 맥동 압력파를 아래 Fig. 3과 같이 하여 본 수치해석의 입구경계조건으로 하였다. 또한 스너버의 출구 경계조건으로는 압력을 적용하였다. 실제 수소압축기에서 맥동성향의 고압 수소가스는 스너버를 거쳐 최종 저장실린더에 저장된다. 즉, 실린더내부의 압력은 일정하다. 스너버로 인한 맥동저감의 영향을 판단할 주요 변수인 맥동 압력 변화를 예측하기 위해서는 스너버 출입구로부터 각각 50 mm 떨어진 지점에서 압력값을 출력하였다. 스너버의 출입구 관로 및 내부에 흐르는 유동은 압축성 3차원 비정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 내부압력을 계산하기 위해서 사

용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식이 사용되었다. 난류모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 표준  $\kappa-\epsilon$  모델을 사용하였으며 압축성 효과를 고려하기 위해 밀도항은 이상기체로 온도와 압력에 관한 함수로 가정하였고 벽면은 단열 조건으로 가정하였다.<sup>4)</sup> 수치해석 기법으로는 지배방정식의 대류항 차분은 2차 정확도를 가지는 MARS (Monotone Advection and Reconstruction Scheme) 기법을 사용하였으며, 또한 압력과 속도의 연결은 PISO 알고리즘을 사용하였다. 본 연구는 범용 열유체 프로그램인 STAR-CD Ver. 3.24를 사용하였고, 격자 생성틀인 Pro-am에서 Fig. 4와 같은 격자를 생성하여 계산을 수행하였으며, 버퍼주위와 내부벽면 그리고 출입구 관로에 격자의 조밀성을 증가시킨 Trimmed cell hexahedral로 약 15만개의 격자를 생성시켰다. 해석결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 매 time step시 종속변수들의 수렴판정을 잔류값이 10<sup>-3</sup>이하에 도달하면 수렴한 것으로 간주하고 다음 time step으로 넘어가게 설정하였다.<sup>5,6)</sup>

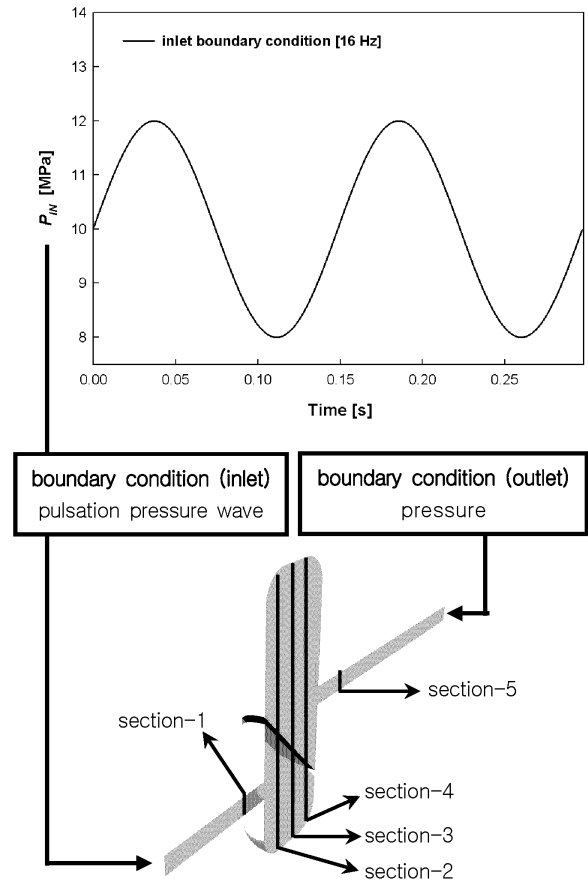


Fig. 3 Schematic diagram of boundary conditions on the snubber inlet and outlet

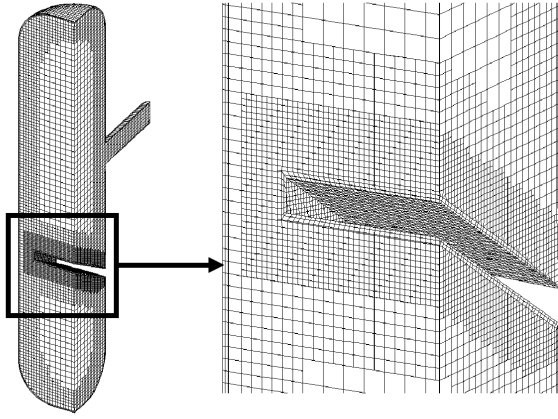


Fig. 4 Computational grid system

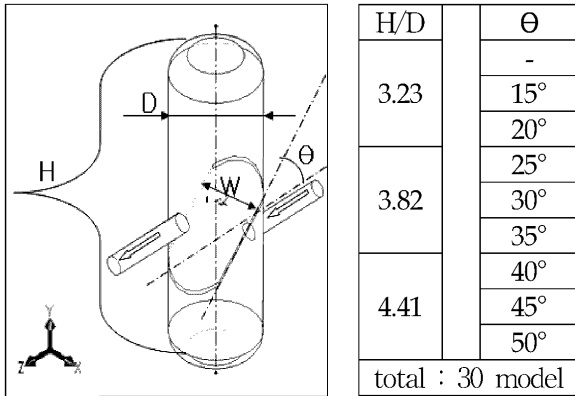


Fig. 5 Computational geometry parameters

### 2.2 해석모델

스너버의 크기와 스너버 내부에 설치될 버퍼의 각도가 백동압 저감에 미치는 영향의 결과를 도출하기 위하여 기본적으로 서로 체적이 다른 3종류의 스너버를 Fig. 5와 같이 설계하였다. 스너버 설계에 있어서 많은 변수들이 있겠지만 본 연구에서는 스너버 직경대비 수직방향의 길이 비율 H/D가 3.23, 3.82, 4.41을 갖는 무차원 변수를 기본으로 버퍼의 각도를 변화한 스너버 설계를 수행하였다. 이때 각각 0.0124 m<sup>3</sup>, 0.0147 m<sup>3</sup>, 0.0170 m<sup>3</sup>의 체적을 가지게 된다. 또한 스너버 내부에 버퍼를 설치하지 않은 스너버와 버퍼의 각도가 10°~50°까지 5° 간격으로 9종류, 총 30개의 스너버에 대한 수치해석을 실시하였다. 버퍼의 너비는 스너버의 직경을 고려하여 적용하였고, 각도에 따른 버퍼의 수직방향위치는 스너버 입구측에서 버퍼 하단부 1/3 위치에 고정시켰다. 이러한 일련의 변수를 설정하고, 스너버의 3차원 유동해석을 위하여 해석대상의 CAD는 CATIA V5를 통해 설계하였으며, 이 데이터를 DAT 파일로 변환하여 계산 격자를 생성시켰다.

### 3. 수치해석결과 및 분석

#### 3.1 압력분포 결과

Fig. 6은 스너버 몸체에서 각각 50 mm 지점에 위치한 출입구 단면의 압력분포를 나타내고 있으며 최고 압력 시점인 0.2s 이후의 압력 분포이다. 버퍼를 설치하지 않은 스너버와 버퍼각도를 10°부터 50°까지 5°씩 증가시킨 9개의 모델에 대한 결과이다. 입구의 경우 버퍼를 설치하지 않은 모델은 전반적으로 높은 압력분포를 보이고 있다. 버퍼를 설치한 경우 각도가 10°부터 30°까지 거의 일정한 분포를 보이고 있지만 35°부터 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 버퍼각도가 증가하면 그 만큼 배압도 증가하여 입구측의 상승된 압력을 유발하는 것으로 사료된다. 스너버 체적이 가장 큰 H/D가 4.41인 모델의 경우 버퍼각도의 증가에 따라 25°까지 압력의 감소를 보이다 25°에서 가장 낮은 압력값을 보이고 있으며, 다시 증가하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 체적이 보다 작은 H/D가 3.23, 3.82인 모델은 균일한 입구 압력분포를 보이고 있다. 이러한 경향은 수치해석상 오차 범위 내의 결과값 영향으로 판단되며, 약 0.004 MPa 내의 압력값이므로 압력분포상의 많은 영향을 끼치지 않는다고 사료된다.

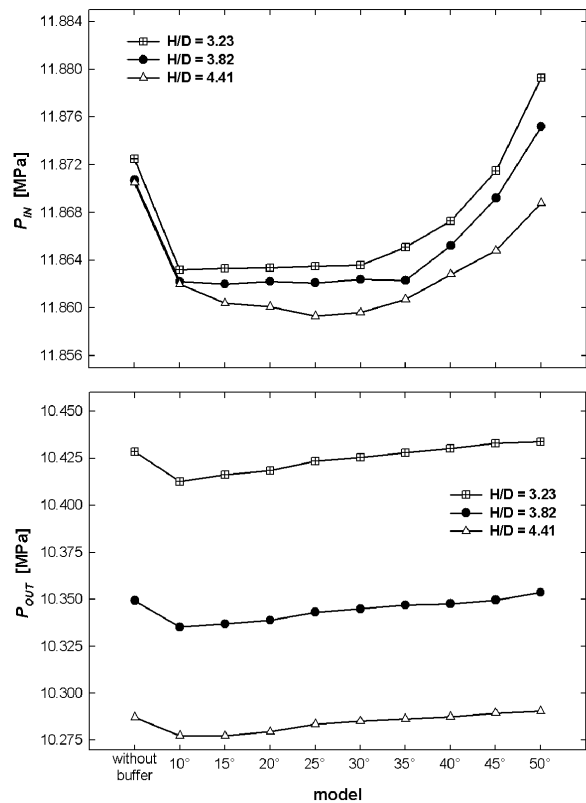


Fig. 6 Pressure comparisons of the snubber models with H/D=3.23, 3.82, and 4.41

반면 출구의 경우 모델별 최대·최소 압력범위의 정도는 입구압력의 0.02 MPa 보다는 큰 0.2 MPa의 범위를 보이고 있다. 스너버와 버퍼로 인하여 입구보다 큰 압력차를 보이고 있다. 입구압력분포와 마찬가지로 3종류의 모델에서 버퍼를 설치하지 않은 스너버에서 높은 압력 분포를 보이고 있으며, 버퍼의 각도가 증가할수록 점진적으로 압력이 증가하는 결과를 볼 수 있다. 또한 체적의 증가에 따라 평균 0.07 MPa 가량 압력이 감소하여 나타나고 있다. H/D가 4.41이고 버퍼의 각도가 10°인 모델에서 10.27 MPa의 가장 낮은 출구압력을 보이고 있으며, H/D가 3.23이고 각도 50°인 모델에서 출구압력은 10.43 MPa으로 가장 높게 나타났다.

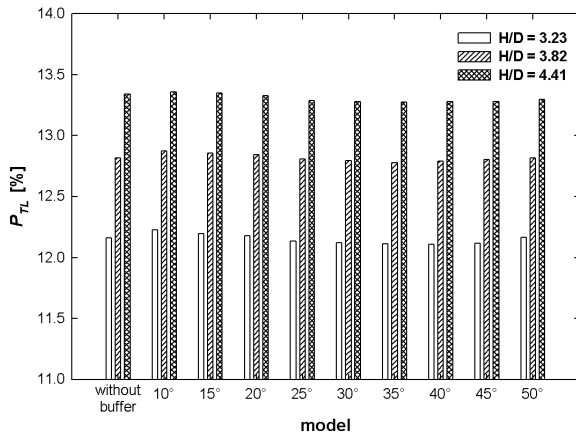


Fig. 7 Pressure loss comparisons of the snubber models with H/D=3.23, 3.82, and 4.41

Fig. 7은 스너버 출입구 압력차에서 얻어진 결과로부터 얻어진 압력손실률을 나타내고 있으며 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$P_{TL} = \frac{P_{IN} - P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $P_{TL}$ 은 압력손실,  $P_{IN}$ 은 입구압력  $P_{OUT}$ 은 출구압력을 나타낸다. 압력손실은 수소압축기의 좋지 않는 영향을 가져온다. 최소한의 압력손실은 압축기의 효율을 증대 시키며 최종 저장시 고압을 유지 하는데 기여를 한다. 체적이 가장 큰 H/D가 4.41인 스너버가 높은 압력 손실률을 보이고 있으며, 체적의 감소에 따라 함께 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 출입구 압력차에 기인하여 3종류의 모델에서 버퍼의 각도가 35° 전후에서 압력손실이 가장 낮은 것을 볼 수 있다.

### 3.2 맥동률 결과

맥동률은 스너버 설계에 있어서 가장 중요한 설계인자이다. 앞서 언급했듯이 맥동률은 낮을수록 압축기의 성능을 향상시키며 최종 저장 단계에서 높은 압축효율을 가져올 수 있다. 다만 압축시 맥동이 클 경우 2단에서의 맥동성질이 많은 불안정한 가스를 압축기에서 흡입하게 되고 이는 압축행정시 낮은 압축효율을 유발하게 된다. 그러므로 최소한의 맥동 가스를 압축기에서 흡입하여야만 높은 압축효율을 얻을 수 있을 것이다.

맥동률에 있어서 압력의 변화는 유량의 증감으로 해석할 수 있으며 이는 압력의 최고 최저치로 설명될 수 있다. 맥동률 결과를 얻기 위해서 수치해석에서 취득한 0.2s 이후 시점의 압력데이터를 사용하였다. 데이터 검출지점은 Fig. 3의 section-5 지점이다. 출구단에서의 최고 압력과 최저 압력의 차를 평균압력으로 나누어 수치함계를 하였으며, 맥동의 진폭을 비율로 해를 구하기 위해 식 (2)와 같이 다시 2로 나누었다.

$$P_F = \sum \frac{P_{OUT[ MAX ]} - P_{OUT[ MIN ]}}{P_{OUT[ MEAN ]}} \div 2 \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $P_F$ 는 맥동률,  $P_{OUT[ MAX ]}$ 는 출구최대압력,  $P_{OUT[ MIN ]}$ 은 출구최소압력,  $P_{OUT[ MEAN ]}$ 은 출구평균압력을 나타낸다. Fig. 8은 스너버 모델에 대한 맥동률을 나타내고 있다. 스너버의 체적이 가장 큰 H/D가 4.41인 모델이 가장 작은 맥동률을 보이고 있으며, 체적이 가장 작은 모델에서 높은 맥동률을 나타내고 있다. 전반적으로 버퍼를 설치하지 않은 경우 맥동률은 높게 나타난다. 버퍼의 초기각도 10°에서는 3종류의 스너버 모델 모두에서 가장 낮은 분포를 보이며, 각도가 증가할수록 맥동률은 증가하게 된다. 버퍼 각도의 증가는 스너버 내부 유량의 원활한 유동과 맥동 성질의 압력파장을 감쇠하지 못하고 출구단으로 배출되는 것으로 사료된다. 스너버를 설계하기 위해서는 출입구 압력차를 최대한으로 줄여 압력손실을 최소화하는 동시에 맥동의 성질을 최저로 하는 것이다. 앞서 압력손실결과에서는 버퍼의 각도가 35°~40°에서 가장 낮은 분포를 보였으며, 맥동률에서는 최초각도인 10°에서 가장 낮은 맥동률을 나타내었다. 이는 스너버 설계의 유동적인 측면에서 볼 때 압력손실과 맥동률의 상호보완적인 수치에서 설계되어야 한다고 판단된다.

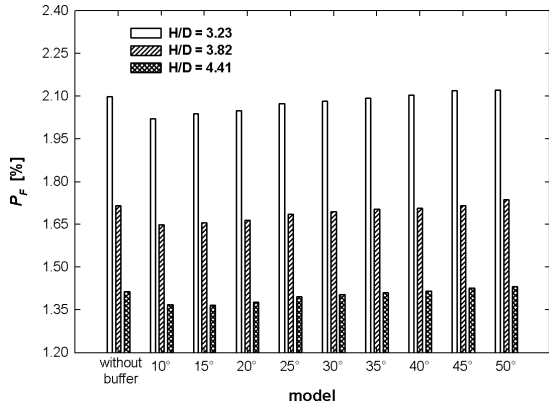


Fig. 8 Pulsation ratio comparisons of the snubber models with H/D=3.23, 3.82, and 4.41

### 3.3 난류운동에너지분포 결과

일반적으로 유체의 흐름이 있는 관로 또는 일정한 체적을 가지고 있는 해석영역에 있어서 압력손실을 규명하고자 할 시에는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)로써 표현 할 수 있다. 운동에너지 방정식을 간단히 한 베르누이 방정식에서 속도가 증가하면 압력이 감소한다는 기본적인 정의를 볼 수 있으며 에너지 보존 법칙에 기인하여 출구와 입구단의 압력차 즉, 압력회복(pressure recovery)을 난류운동에너지와 연계하여 해석할 수 있다. 스너버에 의한 출입구 압력손실 또한 난류에너지의 증감으로써 표현될 수 있다. 다시 말해 압력손실이 증가하면 난류에너지도 함께 증가한다. 버퍼의 각도에 따른 난류에너지의 분포는 스너버 내부에서의 압력손실을 설명할 수 있다. 앞서 결론지어진 스너버 모델별 압력손실에서 버퍼의 각도가 35°~40°인 모델이 가장 낮은 압력손실률을 보였다. 압력손실에 기인하여 스너버 모델별 난류운동에너지의 분포와 경향을 보고자 한다. Fig. 3에서 section-1은 스너버 입구에서 50 mm 지점이고, section-2는 스너버 중심에서 좌측으로 40 mm, section-3은 스너버 중앙이다. section-4는 중심에서 우측으로 40 mm, section-5는 스너버 출구에서 50 mm 지점이다. section-1~section-5 영역의 난류에너지를 구하기 위하여 스너버 내부에 압력이 최고치에 이르는 0.2s 이후에서 각 단면에 대한 난류에너지를 계산하고 그 단면의 면적을 나누어 평균값을 획득하였으며  $\bar{U}^2$ 로 나누어 무차원화 시켰다.

Fig. 9은 각 모델에 대한 난류운동에너지 분포를 나타내고 있다. 여기서 모델의 체적이 증가할수록 평균적인 난류운동에너지 수치는 감소함을 알 수 있다. 스너버 입구 단면인 section-1의 수치는 거의

일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 유동이 직선적인 입구 관로에서는 초기 압력이 관로를 지나면서 벽면의 마찰로 인한 난류운동 에너지만 가져 스너버 내부와 출구관로 보다 낮은 분포의 난류운동에너지 분포를 보인다. section-2는 스너버 몸체 단면에 난류운동에너지 분포 중 가장 낮은 난류운동에너지 수치를 보이고 있다. 버퍼의 각도가 15°~20°에서 높은 분포를 보이며 3종류의 모델에서 동일하게 40°에서 가장 낮은 난류운동에너지를 나타내고 있다. section-3과 section-4에서도 같은 경향을 볼 수 있으며 이는 출입구 압력차 결과분포와 거의 일치한다. 즉, 스너버로 인한 압력손실이 내부의 난류운동에너지 분포와 동일하게 증감하는 결과를 볼 수 있다.

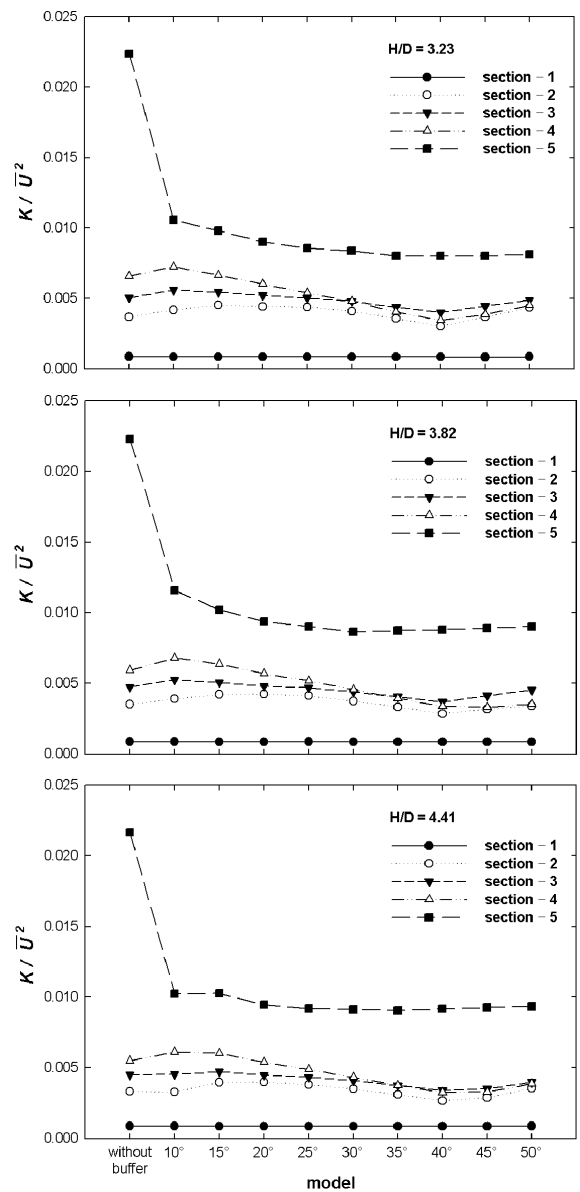


Fig. 9 Mean turbulent kinetic energy distribution of various snubber by buffer angle

section-5는 스너버 출구단면의 수치를 나타내고 있는데 버퍼를 설치하지 않은 스너버가 상당히 높은 난류운동에너지 분포를 보이고 있다. 입구로부터의 유동이 버퍼를 거치지 않고 곧바로 스너버 우측 벽면에 부딪히면서 상부 방향에 있는 출구 파이프로 이어진다. 이때 출구 단면에 작용하는 난류운동에너지 방향이 버퍼를 설치한 스너버 보다 큰 각도를 이루고 있어 출구 단면에서 다소 많은 분포의 vortex와 난류유동이 발생하여 버퍼를 설치한 스너버 보다 2배 정도의 높은 난류운동에너지 수치를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

왕복동식 수소압축기의 스너버 내부의 유동해석을 위해 여러 가지 설계변수 중 버퍼각도와 스너버 체적이 내부 압력손실과 맥동압 저감에 미치는 영향에 대하여 수치해석을 수행하여 버퍼의 각도에 따른 압력손실율과 맥동율에 관해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 수치해석결과 스너버 입구 압력분포는 버퍼를 설치하지 않은 모델은 전반적으로 높은 압력분포를 보이고 있다. 버퍼를 설치한 경우 각도가 10°부터 30°까지 거의 일정한 분포를 보이고 있지만 35°부터 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 버퍼각도가 증가하면 그 만큼 배압도 증가하여 입구측의 상승된 압력분포결과를 가져왔다.

2) 출구 압력분포는 스너버와 버퍼로 인하여 입구보다 큰 압력차이를 보이고, 입구 압력분포와 마찬가지로 3종류의 모델에서는 버퍼를 설치하지 않은 스너버에서 높은 압력 분포를 보이고 있으며 버퍼의 각도가 증가할수록 점진적으로 압력이 증가하는 결과를 볼 수 있다.

3) 스너버 체적이 증가할수록 출입구 압력차는 더 높게 나타나며, 30개의 스너버 모델에 대한 출입구 압력차 결과를 보면 가장 높은 압력차는 0.15으로 H/D가 4.41이고 버퍼 각도가 10°인 모델이며 가장 낮은 압력차는 0.14로 H/D가 3.23이고 버퍼 각도가 45°인 모델로 나타났다.

4) H/D가 3.23이고 버퍼의 각도가 40°인 스너버가 12.11%의 가장 낮은 압력손실률을 보이고 있으며 압력 손실 측면에서 가장 효율적인 스너버로 보이고 있다. 반면 동일 체적의 스너버에서 가장 큰 압력손실율은 12.22%를 나타내고 있는 버퍼각도가 10°인 스너버에서 나타났다. 또한 스너버 내부 난류

운동에너지 결과에서도 버퍼의 각도가 40°인 스너버가 가장 낮은 분포를 보였다.

5) 스너버 체적이 가장 큰 H/D가 4.41인 모델의 버퍼각도가 10°일 때 1.3%로 최소한의 맥동률을 보이고 있고, 체적이 가장 작은 H/D가 3.23이고 버퍼각도가 50°인 모델에서 2.1%의 가장 높은 맥동률을 나타내었다.

6) 압력손실결과에서는 버퍼의 각도가 35°~40°에서 가장 낮은 분포를 보였으며 맥동률에서는 최초 각도인 10°에서 가장 낮은 맥동률을 나타내었다. 이는 스너버 설계가 유동적인 측면에서 볼 때 압력손실과 맥동률의 상호보완적인 수치에서 설계되어야 한다고 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 중점기술개발사업(과제번호 10024348), 지역혁신인력양성사업(과제번호 275)과 2단계 BK21 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. S. A. Heever and I. E. Grossman, 2003, "A strategy for the integration of production planning and reactive scheduling in the optimization of hydrogen supply network", *Journal of Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 1831~1839.
2. S. Shayegan, D. Hart and P. Pearson, 2006, "Analysis of the cost of hydrogen infrastructure for buses in London", *Journal of Power Sources*, Vol. 65, pp. 62~75.
3. 김현진, 2000, "복동식 왕복동 압축기의 연결 배관계 가스 맥동이 압축기 성능에 미치는 영향", *설비공학논문집*, 제12권, 제5호, pp. 448~457.
4. 김성광, 2006 "디젤엔진용 사이클론 내부 수치해석", *한국동력기계공학회지*, 제10권, 제2호, pp. 16~21.
5. S. V. Patanker, 1984, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation.
6. H. K. Versteeg, W. Malalasekera, 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume method", Longman.