

## 관류 익형송풍기의 유동해석에 대한 난류모델 및 수치도식의 영향에 관한 연구

문정주\* · 서성진\* · 김광용\*\*

### A Study on the Effects of Turbulence Model and Numerical Scheme on Analysis of the Flow through Airfoil Type Tubular Fan

Jung-joo Moon\*, Seung-jin Seo\*, Kwang-yong Kim\*\*

*Key Words: Airfoil type tubular fan (관류 익형송풍기), Navier-Stokes equations (나비에스톡스 방정식), k-ε model (k-ε모델), k-ω model (k-ω모델)*

#### ABSTRACT

Three-dimensional flow through a tubular centrifugal fan with airfoil type blades is analyzed, and the effects of turbulence model and numerical scheme on the results are investigated. Standard  $k - \epsilon$  model and  $k - \omega$  model are tested as turbulence closures. The numerical schemes for convection terms, i.e., Upwind Differencing Scheme (UDS), Mass Weighted Skewed upstream differencing scheme (MWS), Linear Profile Skewed upstream differencing scheme (LPS), and Modified Linear Profile Skewed upstream differencing scheme (MLPS) are also tested, and the performances of these schemes coupled with two turbulence models are evaluated. The static pressure distributions are compared with experimental data obtained in this work, which shows that the  $k - \epsilon$  model gives better results than the  $k - \omega$  model.

#### 1. 서론

공조용으로 널리 사용되고 있는 관류 (tubular 혹은 inline-duct) 원심 익형송풍기는 넓은 풍량 범위에서 효율과 구동 동력의 변화가 적다는 장점을 가지고 있다. 특히, 일반적인 원심송풍기의 경우 설치공간이 커서 공간활용상의 비효율성의 문제가 있는 반면에 본 송풍기는 축류 덕트 내부에 원심 송풍기를 설치하여

구동하기 때문에 설치면적이 작아 공간 활용상의 장점을 가지게 된다. 그러나, 일반적으로 과도한 유로의 굴곡에 의해 소음이 커진대거나, 효율이 저하되는 문제를 가질 수 있다. 그러므로, 설계에서 이러한 문제를 개선하기 위해서는 송풍기의 내부유동구조를 정확하게 이해하고 예측하는 것이 필수적이다.

송풍기의 설계를 위한 유동해석 기법으로는 널리 사용되고 있는 적분형 1차원 해석으로부터 각종 비점성해석, 준삼차원해석을 거쳐 최근 들어서는 컴퓨터의 속도가 점차 빨라짐에 따라 Navier-Stokes 방정식을 이용한 삼차원 해석 방법이 많이 사용되고 있다.

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

그간 송풍기를 비롯한 터보기계 내부 유동구조는 다양한 수치해석방법 및 실험을 통해 연구되어 왔다.

Moore 등<sup>(1)</sup>은 부분포물선 (PPNS)형 해석방법에 혼합거리 난류모델을 도입하여 원심압축기의 내부 유동장을 계산하였고, Wright<sup>(2)</sup>는 원심송풍기의 입구 간극 (inlet clearance)이 전체 송풍기의 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, Cau 등<sup>(3)</sup>은 열선풍속계를 이용한 실험적 연구를 통하여 전향익 원심송풍기 내부의 와류구조를 규명하였다.

수치해석에 있어 난류모델의 영향에 관한 연구에 있어서도 많은 진전이 있었다. Lakshminarayana<sup>(4)</sup>는 난류모델의 선정과 각 난류모델들의 특징에 관해 연구를 하였고, Schulz 등<sup>(5)</sup>은 표준  $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 펌프동익, 터빈 동익 등을 계산하였다. Chima<sup>(6)</sup>는 박층근사 (thin-layer approximation) Navier-Stokes 방정식을 이용한 천음속 압축기의 유동해석에서 0-방정식 난류모델인 Baldwin-Lomax 모델과 2-방정식 모델인  $k-\omega$ 모델의 성능을 비교하여 두 모델의 성능에는 큰 차이가 없음을 밝힌 바 있으며, Turner와 Jennions<sup>(7)</sup>은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하여 천음속 압축기를 수치계산함에 있어 Baldwin-Lomax 모델과 2-방정식 모델인  $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산한 결과를 비교하여  $k-\epsilon$ 모델이 보다 나은 성능을 가진다고 밝힌 바 있다.

송풍기에 대한 많은 연구가 있었음에도 불구하고 현재까지 수치해석이나 실험에 의한 관류 원심 익형송풍기에 관한 연구는 보고되지 않아 이 송풍기의 내부 유동구조에 대해서는 알려진 바가 없다. 관류 익형송풍기에서는 과도한 유로의 굴곡으로 인해 일반 송풍기의 내부유동에서는 발견하기 힘든 큰 재순환유동들이 발견되고 있어 이로 인한 유선의 곡률이 수치해석의 정확성에 강한 영향을 미칠 것이므로 이러한 영향을

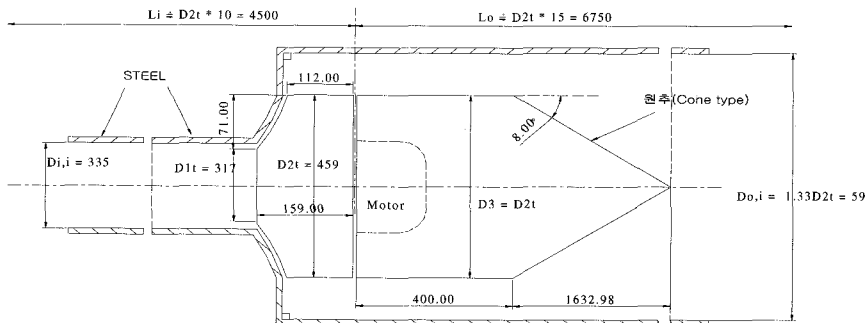
최소화할 수 있는 수치도식 (numerical scheme)과 난류모델에 대한 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 관류 익형송풍기의 임펠러를 지나서 삼차원 비압축성 점성유동의 해석에 대한 수치도식과 난류모델의 영향을 평가하기 위해 수치계산과 실험을 수행하였다. 난류모델로는 일반적으로 많이 사용되고 있는 표준  $k-\epsilon$ 모델과  $k-\omega$ 모델을 사용하여 그 결과를 비교하였으며, 네 가지 수치도식에 따른 영향을 검토하였다. 아울러, 본 연구에서는 외벽면에서의 정압분포를 측정하기 위한 실험을 수행하였으며, 이 결과를 이용하여 계산결과의 타당성을 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 제작 도면은 Fig. 1과 같다. 실험장치는 크게 유동을 유도하기 위한 직경 335mm인 입구영역과 임펠러가 위치해 있는 중심영역, 그리고 직경 597mm인 출구영역으로 구성되어 있다. 벽면에서 보다 정확한 정압 분포를 측정하기 위하여 입구 영역은 임펠러 직경의 10배, 출구영역은 임펠러 직경의 15배를 주었다. 실험장치의 재질은 운전 중에 발생할 수 있는 덕트의 비틀림과 변형을 방지하기 위해서 전체 실험영역에 대해서 강철 (steel) 재질로 구성하였고, 입구 및 출구 덕트 부분과 임펠러 및 모터 설치 부분은 각각 플랜지 이음으로 연결된다. 출구 덕트 내부에는 임펠러 후단에 장착되어 있는 모터에 대해서 원추형의 모터캡을 설치했다. 이 모터캡 부분은 유동장의 확대에 따른 박리를 최소화하고 와류의 발생을 억제하기 위해서 측방향에 대하여 경사면이 8°가 되도록 설치하였다.

정압측정은 실험장치 전체에 걸쳐 이루어졌다. 측정을 위한 압력공 (pressure hole)은 측방향으로 입구부에 10 개, 임펠러부에 30mm 간격으로 3개, 모터캡부에



50mm 간격으로 38 개를 설치하였고, 출구부에는 간격을 200mm에서 점차로 늘려가며 출구 끝까지 5 개를 설치하여 측정했다. 모터캡 부분에 38 개의 압력공을 설치한 것은 모터캡의 형상변화에 따른 압력변화를 정밀하게 측정하기 위해서다. 그리고, 원주방향 압력변화를 고려하여 각 압력공 위치에서 원주방향으로 4 점에서 압력을 측정하여 평균하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1. 지배방정식과 해석방법

본 연구에서는 비압축성 정상상태 점성 난류유동의 해석을 위해 3차원 Reynolds Averaged Navier-Stokes 지배방정식을 유한체적법을 적용하여 계산하였으며, 터보기계 전용 해석코드인 CFX-TASCflow를 사용하였다.

대류항에 대한 수치도식으로 Upwind Differencing Scheme (UDS), Mass Weighted Skewed upstream differencing scheme (MWS), Linear Profile Skewed upstream differencing scheme (LPS), 그리고 Modified Linear Profile Skewed upstream differencing scheme (MLPS) 등을 사용하여 그 성능을 비교하였다.

1차의 정확도를 가지고 있는 UDS는 해의 오차가 크고 수치확산이 존재한다고 알려져 있다. 이러한 UDS의 정확도를 향상시키기 위한 방법으로 LPS와 MWS 등의 방법이 있다. 보다 정확한 예측을 가능하게 하는 LPS는 2차의 정확도를 가지며 단순 LPS와 수정 LPS(MLPS)의 두 가지가 있다. 단순 LPS에서는 상류의 값을 제어체적면에 위치한 유동변수의 값을 보간하여 구한다. 수정 LPS는 상류의 값은 먼저 앞서 설명한 단순 LPS를 이용하여 구한 다음 음의 계수의 발생을 제한하기 위해 보간 인자를 수정한다. MWS는 상류의 값을 주위 격자의 질량평균으로부터 구한다. MWS는 1차의 정확도를 가지나 UDS나 그 변형에 비해 비교적 정확한 예측이 가능하다<sup>(8)</sup>.

난류모델로는 표준  $k-\epsilon$ 모델과  $k-\omega$ 모델을 사용하여 그 결과를 비교하였다. 일반적으로  $k-\omega$ 모델은 부드러운 표면에서의 유동 박리를 예측하는데 있어 다소 부정확하다고 알려져 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 보완하고자  $k-\omega$ 모델 중 Menter<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 SST모델 (Shear Stress Transport Model)을 사용하였다. 저레이놀즈수모델로 제안된 이 모델을 사용하기 위해서는 벽함수를 사용하는 표준  $k-\epsilon$ 모델과는 달리 벽

근처에서 매우 조밀한 격자를 사용해야 하는 문제가 있다. 그러나, 본 계산에서 사용한 계산코드인 CFX-TASCflow에서는 계산시간의 절감과 일반적인 사용상의 편의를 위해 Grotjans와 Menter<sup>(10)</sup>가 제안한 방법에 따라 벽 근처에서는 저레이놀즈수 모델과 벽함수를 병행하여 사용함으로써 벽에서 첫번째 격자가 저레이놀즈수 모델을 사용할 수 있을 정도로 충분히 가깝게 설정되지 않은 경우에는 벽함수를 사용해 계산할 수 있도록 되어있다. 본 연구에서는 두 모델에 대해 동일한 격자계에서 계산을 수행하였으며 결과적으로 벽 근처에서는 벽함수가 공히 적용되었다.

#### 3.2. 경계조건

본 연구에서는 임펠러를 지나는 유동이 정상상태이고 주기적이라는 가정을 바탕으로 하나의 날개영역만을 해석하였다. 계산영역은 정압측정을 위한 실험장치와 동일한 조건으로 구성하였으며 계산영역의 입구에서는 절대좌표계의 질량유량과 난류 길이척도 (length scale) 등이 주어지고, 출구에는 압력조건과 종속변수의 구배가 0인 조건이 주어진다. 임펠러에 고정된 회전좌표계이므로 좌표계 상에서 날개표면과 허브 (back plate), 쉬라우드 (front plate)는 고정된 벽으로, 외부 덕트의 벽은 임펠러 회전방향과 반대방향으로 움직이는 벽면으로 처리하였다.

#### 3.3. 격자계

계산결과와 실험결과를 비교하기 위해 격자계는 실험장치를 바탕으로 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 전체 계산영역을 4개의 블록 즉, 입구 덕트 부분, inblock, 임펠러, 출구 덕트 부분으로 구성하였다. 여기서, 입구와 출구 덕트 부분은 CFX-Mesh Builder에서 격자를 생성하여 사용하였다. 계산에 사용된 격자수는 입구 덕트 61×36×31개, inblock 17×37×32개, 임펠러 32×37×55개, 그리고 출구 덕트 216×41×41개이다. 입구 덕트 부분과 출구 덕트 부분의 길이는 각각 임펠러 직경의 5배와 10배로 하였다.

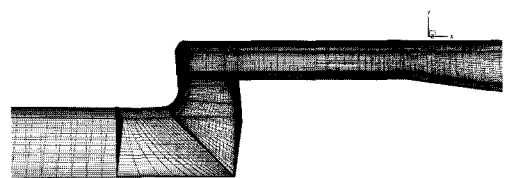


Fig. 2 Grid system

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 관류 원심 익형송풍기에 대해 삼차원 점성유동계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 원심 임펠러는 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 10개의 후향, 익형 날개를 가지고 있다. 임펠러의 입구측 직경은 317mm 이고 출구측 직경은 459mm이다. 임펠러의 날개는 NACA-810 익형이며 허브에서 쉬라우드까지 스테거각(stagger angle)의 변화가 없이 일정한 형태이다. 회전 속도는 1750 rpm이고, 유량은 2.06 kg/s이다. 이 회전 속도와 유량은 실험에 의해 획득된 값이다. 앞에서 언급했듯이 TASCflow에는 사용자가 제어할 수 있는 대류항의 수치도식으로 1차의 정확도를 갖는 UDS, MWS와 2차의 정확도를 갖는 MLPS, LPS가 있다. 이러한 수치도식과 난류모델이 해석결과에 미치는 영향을 평가하기 위해 네 가지 수치도식들과 두 가지 난류모델들, 즉 표준  $k-\epsilon$  모델과  $k-\omega$  모델을 조합하여 수치해석을 수행하였다.

관류 원심 익형송풍기는 일반 원심송풍기와는 다르게 임펠러 출구의 유로가 직각으로 꺾어져 있어 유선의 곡률이 커지고, 이는 유로의 격임으로 인해 유발되는 유동의 박리와 그에 따른 재순환구역의 형성으로 인해 더욱 증폭됨으로써 유동 에너지의 손실이 크게 발생하게 된다. 이와 같이 유선이 복잡하고 강한 곡률을 갖는 유동장에서는 특히 와점성계수를 도입하는 난류모델들에 있어서는 유선의 휨으로 인한 부가적인 난류운동에너지의 생성으로 인해 난류모델의 성능이 저하될 뿐 아니라, 유선이 격자선과 큰 각도로 교차함으로써 수치확산이 증가되는 수치해석상의 부작용이 나타나는 것으로 알려져 있다. Figs. 4와 5에서는 이러한 유로의 곡률로 인한 유동현상들이 계산에 사용한 각각의 수치기법과 난류모델에 의해 어떻게 예측되어지는가를 알아보기 위해 네가지 수치도식과 두가지 난류모델을 조합하여 각각에 의해 예측된 유선분포를 비교해 보았다. Fig. 4는 표준  $k-\epsilon$  모델의 경우에 각각의 수치도식들을

사용해 얻어진 피치중간 부분에서의 유선분포들을 보여준다. 유동이 임펠러 내부로 유입되면서 먼저 허브면에 닿으면서 유동의 박리와 그에 따른 재순환영역이 형성되고 있음을 알 수 있다. 또한 임펠러 출구를 바로 지나 덕트 외벽 코너와 모터캡 상단에서 재순환영역이 각각 형성되고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는  $k-\omega$  난류모델에 대해서 각각의 수치도식들을 조합해 계산한 결과를 보여주고 있는데, 주목할 점은,  $k-\epsilon$  모델을 사용한 계산결과들과는 달리 허브면에서 재순환구역이 매우 작게 혹은 전혀 형성되지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이  $k-\omega$  모델이 부드러운 벽면에서의 박리를 잘 예측하지 못하였다는 그간의 지적과 관련이 있는 것으로 사료된다. 그 외의 재순환영역들은  $k-\epsilon$  모델을 사용해 예측한 것과 비슷한 형태를 보여주고 있다.

그림에 나타난 바와 같이 LPS 수치도식이 특히 허브 중심에서 형성되는 재순환영역을 다른 도식들에 비해 크게 예측해 내고 있다. Patankar<sup>(11)</sup>는 유동의 방향과

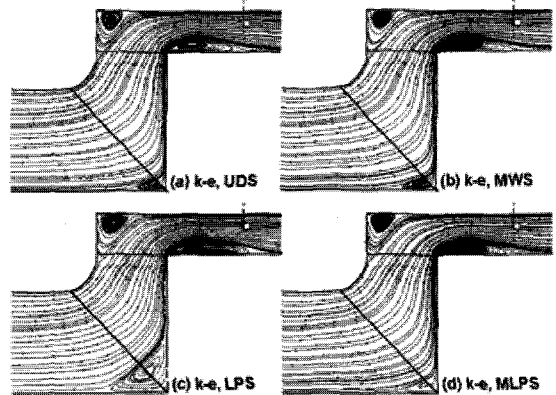


Fig. 4 The streamlines at the mid-pitch :  $k-\epsilon$  model

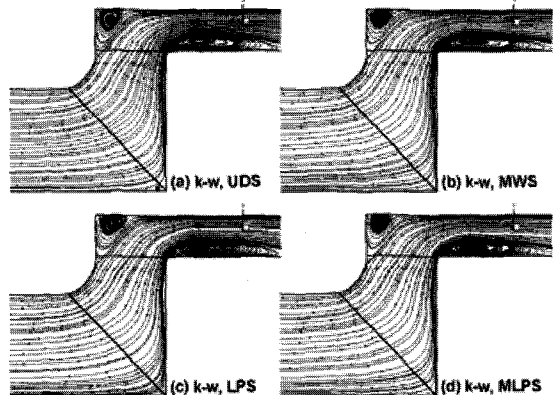


Fig. 5 The streamlines at the mid-pitch :  $k-\omega$  model

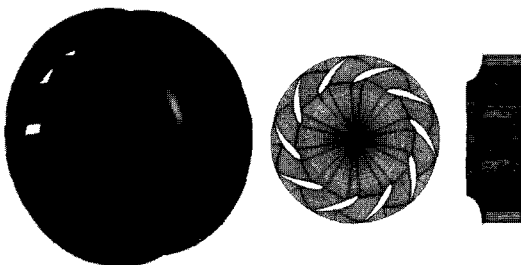


Fig. 3 The shape of impeller

격자선 방향의 차이에 의해 수치확산이 유발된다고 밝혔으며, Peric<sup>(12)</sup>은 유동방향과 격자선의 방향이 다른 경우에 대해 LPS와 UDS 등을 비교한 연구에서 속도 등을 예측함에 있어서 LPS가 실험치 보다 과도한 예측의 경향을 보인다는 결과를 얻은 바 있다. 속도장에 관한 실험치를 얻지 못해 허브면 재순환영역의 실제 크기를 알 수 없으나 Peric의 연구결과에 비추어 LPS는 다른 수치도식들과는 달리 실제보다 과도한 재순환영역을 예측한 것으로 사료된다. 이상의 결과에서 볼 때, 난류모델과 수치도식의 영향을 가장 민감하게 받는 유동현상은 허브면에서 발생하는 재순환구역임을 알 수 있다. 날개면 쉬라우드 선단의 압력으로 무차원화한 정압분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 수치도식에 따라 계산결과는 큰 차이를 보이지 않았으므로 LPS 도식 과 각각의 난류모델을 조합한 계산결과만을 표시하였다. 이 그림들에서, 압력면 선단부의 최대압력이 표준 k-ε모델에 의해 상대적으로 크게 (10%미만)

예측됨을 알 수 있다. 날개의 선단부에서 압력의 극대치가 존재하는데, 이는 Fig. 8에서 보여지는 것처럼 유동이 날개 선단부에 부딪힐 때 발생하는 유동의 박리 때문인 것으로 생각된다.

실험에 의해 얻어진 외벽면상의 정압분포를 계산치들과 비교한 것을 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 임펠러를 빠져나온 유동의 압력이 급격히 낮아지는 이유는 허브

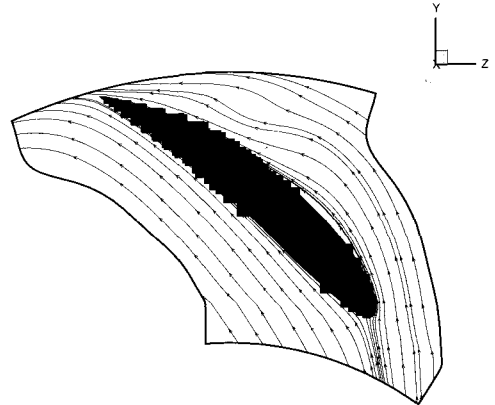


Fig. 8 Streamlines at 80% span : k-ε model, LPS

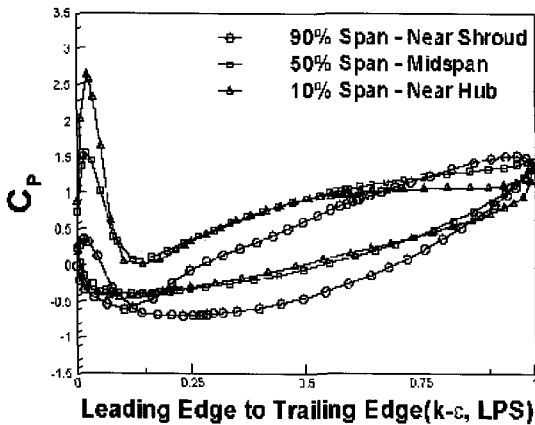


Fig. 6 Static pressures on blade surfaces : k-ε model

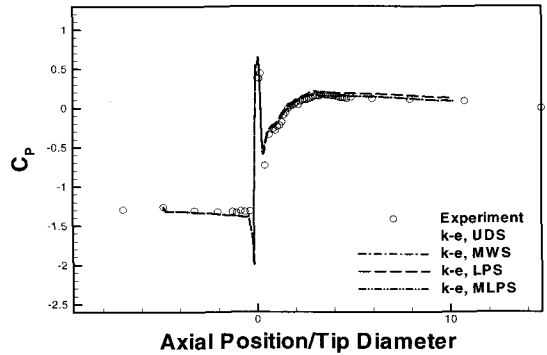


Fig. 9 Cp distributions on casing wall : k-ε Model.

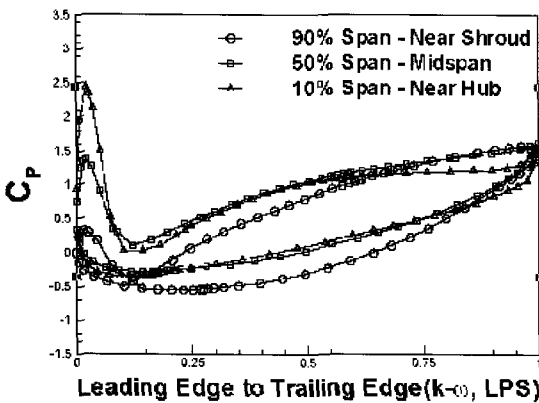


Fig. 7 Static pressures on blade surfaces : k-ω model

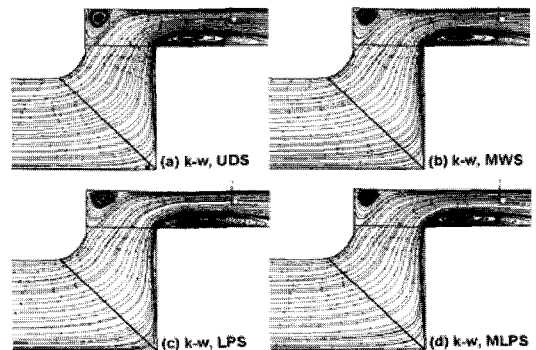


Fig. 10 Cp distributions on casing wall : k-ω Model.

뒤쪽에 설치되어 있는 모터캡의 존재로 인해 유로가 급격히 좁아지기 때문이다. 표준  $k-\epsilon$  모델과  $k-\omega$  모델 모두 임펠러 구간에서 실험치 보다 다소 큰 정압 상승을 예측하고 있다. 두 모델 공히 정성적으로는 타당한 정압분포를 예측하고 있으나,  $k-\epsilon$  모델에 의한 결과가 하류에서 실험치에 보다 더 접근하고 있다. 임펠러와 하류 구간에서 실험치와 계산치의 미소한 차이가 나타나는 이유는 계산에서는 덕트 내벽과 쉬라우드 사이의 끝 간극 (tip clearance)이 무시되어 실험에서 보다 작은 손실이 발생하였기 때문이다. 그러나, 이 차이는 전반적으로 크게 나타나지 않는다. 임펠러 하류에서  $k-\epsilon$  모델로 계산한 정압이  $k-\omega$  모델로 계산한 정압 보다 작아서 실험치에 접근하는 이유는 Figs. 4와 5에 나타난 바와 같이  $k-\epsilon$  모델은  $k-\omega$  모델과는 달리 허브 중심의 재순환영역을 크게 예측하므로 이로 인한 손실이 추가적으로 반영되어 하류 외벽의 정압을 상대적으로 떨어뜨린 것으로 사료된다. 이러한 관점에서 본다면,  $k-\epsilon$  모델에 의한 Fig. 4의 유동장이  $k-\omega$  모델에 의한 Fig. 5의 유동장 보다 더 실제의 유동장에 접근하는 것으로 유추할 수 있다.

외벽면상의 정압분포예측 (Fig. 9과 Fig. 10)에서 수치도식에 따른 계산치 사이의 차이는 크게 나타나고 있지 않으나 단순 LPS 도식은 다른 도식들에 비해 임펠러 하류에서 높은 정압을 나타내어 실험치와 차이를 보이고 있다. 결과적으로 단순한 UDS 도식에 비해 나머지 도식들이 수치해를 기대한 만큼 향상시키지 못하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 삼차원 Navier-Stokes 해석기법을 사용하여 관류 원심 익형송풍기에 대한 유동해석을 수행하여 난류모델과 대류항의 수치도식이 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 표준  $k-\epsilon$  난류모델의 경우 임펠러의 허브 중심에서 모든 수치도식이 공통적으로 재순환 영역의 형성을 예측하였고, 특히 LPS 도식의 경우 다른 수치도식에 비해 과도한 크기의 재순환을 예측하였다.

그러나,  $k-\omega$  난류모델을 사용하여 계산한 결과에서는 허브 중심에서 재순환구역이 매우 작게 혹은 전혀 형성되지 않고 있음을 알 수 있었다.

실험에 의해 얻어진 벽면에서의 정압분포를 각 수치도식과 난류모델에 따른 계산결과와 비교해 본 결과 표준  $k-\epsilon$  모델이  $k-\omega$  모델보다 전반적으로 실험치에 접

근하는 결과를 예측함을 알 수 있었다. 수치도식에 따른 계산결과의 차이는 크지 않았으나, 주어진 유동장의 해석에 단순 LPS 도식의 사용은 적절하지 못함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) Moore, J., Moore, J. G., and Timmis, P. H., April, 1984, "Performance Evaluation of Centrifugal Compressor Impellers Using Three-Dimensional Viscous Flow Calculations," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 475~481.
- (2) Wright, T., 1984, "Centrifugal Fan Performance With Inlet Clearance," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 906~912.
- (3) Cau, G., Mandas, N., Manfrida, G., and Nurzia, F., December, 1987, "Measurements of Primary and Secondary Flows in an Industrial Forward-Curved Centrifugal Fan," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109, pp. 354~358.
- (4) Lashminarayana, B., 1991, "An Assessment of Computational Fluid Dynamic Techniques in the Analysis and Design of Turbomachinery-The 1990 Freeman Scholar Lecture," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp. 315~351.
- (5) Schulz, H., Greim, R., and Volgmann, W., 1996, "Calculation of Three-Dimensional Viscous Flow in Hydrodynamic Torque Converters," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 578~589.
- (6) Chima, R. V., 1996, "A  $k-\omega$  Turbulence Model for Quasi-Three Dimensional Turbomachinery Flows," AIAA Paper 96-0248 and NASA TM-107051
- (7) Turner, M. G., Jennions, I. K., 1993, "An Investigation of Turbulence Modeling in Transonic Fans Including a Novel Implementation of an Implicit  $k-\epsilon$  Turbulence Model," *Journal of Turbomachinery* Vol. 115, pp. 249~260.
- (8) CFX-TASCflow User Documentation, Theory Documentation.
- (9) Menter, F. R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (10) Grotjans, H. and Menter, F. R., 1998, "Wall Func-

- tions for General Application CFD Codes," ECCOMAS 98 Proceedings of 4th European Computational Fluid Dynamics Conference, pp. 1112~1117.
- (11) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Co.
- (12) Peric, M., 1985, *A Finite Volume for the Prediction of Three-Dimensional Flow in Complex Ducts*, Ph. D Thesis, Imperial College