

KARI 중형 아음속 풍동용 돌풍 발생기의 수치해석

박영민^{1*}, 권기정², 이상욱³, 김태욱³

NUMERICAL ANALYSIS OF THE GUST GENERATOR FOR KARI LOW SPEED WIND TUNNEL

Y. M. Park, K. J. Kwon, S. W. Lee and T. W. Kim

The vortex convection and induced flow field behind the KARI 3m x 4m LSWT gust generator was computed by using Computational Fluid Dynamics. For the accurate simulation of vortex convection, inviscid, laminar, Spalart-Allmaras k-e and k-w turbulence models were tested with the NAL gust generator configuration and Spalart-Allmaras turbulence model was selected for the prediction of induced flow field behind the KARI LSWT gust generator. The wind tunnel test was also carried out at KARI LSWT and the results were compared with CFD prediction.

Key Words: 돌풍 발생기(Gust Generator), 와류유동(Vortical Flow), KARI 중형아음속 풍동(KARI Low Speed Wind Tunnel)

1. 서 론

항공기가 비행하는 동안 돌풍현상은 승객들에게 불안감을 안겨주고 심할 경우 구조 하중을 유발시켜 파손 위험을 증가시키기도 한다. 특히 최근 항공기는 유연성이 높고 중량비가 증가함에 따라 돌풍에 대한 위험 가능성이 증가하였다. 따라서 항공기의 설계과정에서 돌풍에 대한 응답특성을 해석/시험하고 이를 설계에 반영하는 과정은 항공기의 안정성 확보를 위해 매우 중요하다고 볼 수 있다[1,2].

돌풍시험을 위한 돌풍발생 방법으로는 진동 주파수 등의 제어가 가능한 날개열(vane)을 이용한 방법, 와류로 인한 유도류(induced flow)를 이용한 방법 그리고 제트(jet)를 이용하는 방법을 들 수 있다. 이 중 유도류를 이용한 방법은 날개의 끝단와류를 이용하여 받음각 변화를 유도하는 방법으로 제어가 쉽고 설비제작이 용이하여 많이 이용된다.

유도류 방법을 이용하는 돌풍발생기의 유동장 예측은 일반적으로 와류이론(vortex theory)을 이용한다. 이 방법은 끝단와류를 와류선으로 가정하고 Biot-Savart 법칙을 이용하여 유동장을 예측한다[2,3]. 그러나 점성효과를 고려할 수 없으므로

전달에 따른 와류의 감쇄효과를 재현할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 3 차원 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하여 돌풍 발생기 후방의 정확한 유동장 예측을 시도하였다.

본 연구에서는 먼저 단일 날개형상에 대하여 여러 난류모델을 적용, 사용한 유동해석 도구의 와류전달 능력을 조사하였고 두 가지 격자분포에 따른 계산을 통해 격자밀도에 대한 유동장 특성을 살펴보았다. 다음 단계로 NAL에서 수행한 돌풍발생기 형상[3]에 대하여 해석하였고 동일한 돌풍발생기 형상이 KARI 중형아음속 풍동에 적용 가능한지 살펴보았다. 최종적으로 CFD를 통해 해석한 KARI 돌풍발생기의 유동장 예측 결과를 KARI에서 직접 수행한 시험 결과와 비교하였고 본 방법이 돌풍발생기의 설계과정에 이용될 수 있는지 살펴보았다.

2. 수치적 기법

2.1 유동해석 기법

돌풍 발생기에서 발생하는 와류의 전달을 관찰하기 위하여 상용 소프트웨어인 FLUENT를 사용하였다. 해석과정에서는 비점성 유동, laminar 유동, Spalart-Allmaras, k-e, 그리고 k-w 2-방정식 난류 모델링을 이용하였고 검증을 통해 최적의 방법을 KARI의 돌풍발생기에 적용하도록 하였다. 계산 과정에서

1 정희원, 한국항공우주연구원, 공력성능그룹

2 한국항공우주연구원, 공력성능그룹

3 한국항공우주연구원, 기체구조그룹

* Corresponding author E-mail: ympark@kari.re.kr

는 모두 2차의 공간 정확도를 유지하였으며 경계조건은 풍동 유로의 경우 solid wall(no-slip condition)을 적용하였고, 유입유동의 경우 속도를 고정하는 velocity-inlet 조건을, 유출유동의 경우에는 압력을 고정하는 pressure-outlet 조건을 사용하였다.

2.2 격자 생성

사용한 유동해석 도구는 최고 2차의 공간 정확도를 지원하므로 와류의 전달현상을 관찰하기 위해서는 와류의 전달영역에서 격자가 밀집되도록 되도록 생성해야 한다. 본 문제의 경우 복잡한 형상이 아니므로 날개주위를 제외한 모든 부분은 정렬격자를 사용하였다. 날개의 경우 속도가 10 ~ 20 m/s로 낮고, 날개 공력계수 예측보다는 와류로 인한 유도속도 관찰이 목적이므로 점성 영역을 위한 고중형비의 격자를 생성하지는 않았다. 날개의 표면은 상하단 각각 40개의 격자점으로 이루어진 정렬격자로 구성하였으며 날개 주위의 공간은 비정렬 사각형 격자를 이용하여 생성하였다.

아래의 그림 1은 계산에 사용된 NAL의 돌풍발생기를 도시한 그림으로 대략 2,000,000개의 격자요소로 구성되어 있다. 와류가 전달되는 영역의 격자크기는 코드 길이의 0.033배에 해당하는 길이로 설정하였으며 날개에서 멀어질 경우 와류의 축방향 격자길이는 자연스럽게 증가하도록 하였다.

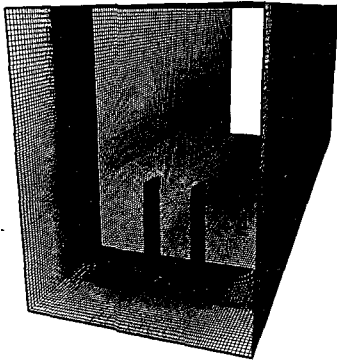


Fig 1. Surface mesh distributions of gust generator and wind tunnel wall surface.

2.3 수치해석 절차

KARI 중형아음속 풍동용 돌풍발생기의 유동장 예측을 위하여 다음과 같은 방법으로 접근하였다.

1. 먼저, 풍동내부에 받음각이 있는 단일 날개형상에 대한 유동장을 해석하여 FLUENT의 와류전달 능력 및 각 난류모델에서의 와류 감쇄현상을 관찰하였다. 또한 두 가지 격자밀도(0.016c, 0.033c)에 대하여 계산을 수행하여 격자밀도에 따른 유동장 특성을 살펴보고 이 중 계산비용이 적은 격자를 사용하도록 하였다.

2. 단계 1에서 격자가 결정되면 다음 단계로 NAL에서 수행한 동일한 돌풍발생기 형상[3]에 대하여 해석을 수행하고 FLUENT를 이용한 해석방법을 검증하였다. 이 과정에서는 비점성 유동 가정부터 2-방정식 난류 모델을 다양한 방법을 이용하였고 최적의 난류모델을 선택하였다. 최적 난류 모델은 시험부 내 유도 받음각의 수직, 수평 방향 평균값을 NAL의 시험값과 비교하여 결정하였다.
3. 단계 2에서 결정한 난류 모델을 이용하여 NAL과 동일한 돌풍 발생기에 대한 KARI LSWT내 유동장을 해석하고 풍동벽면의 근접으로 인한 유도 받음각의 변화를 예측하였다. 이 때 NAL의 측정부와 동일하게 5m 후방인 조건으로 유동장의 변화를 비교하였다.
4. 위에서 예측한 결과를 시험값과 직접 비교하였다. KARI LSWT의 경우 4m 후방 위치에서 유도받음각이 측정되었으므로 이 지점의 예측 값을 시험값과 비교하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 수치적 기법 및 격자분포에 따른 와류전달

먼저, 사용한 유동해석 도구의 와류 생성 및 전달 능력을 파악하기 위하여 단일 날개에 대한 격자를 생성하고 이를 해석하였다. 계산에 사용된 형상은 NACA0015 에어포일을 사용하며 높이 2m, 코드 길이 0.9m, 풍동의 단면은 수평방향 5.5m 수직방향 6.5m에 해당한다. 계산에 사용된 유동 조건은 14m/s 로 하였으며 날개의 받음각은 5도로 설정하였다.

아래의 그림 2는 비점성 유동으로 가정한 경우 날개 앞면에서 1m 간격으로 와류의 등고선을 도시한 것으로 끝단 와류의 생성과 이의 전달과정을 확연하게 볼 수 있다.

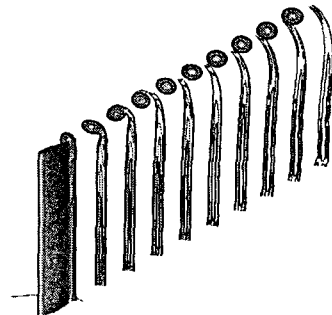


Fig 2. Iso-vorticity contour lines distribution along the free stream.

그림 3에는 각 난류 모델 및 두 가지 격자밀도에 대하여 날개 앞면으로부터 후방 13m 까지의 와류의 세기를 도시하였다. 해석결과 격자의 길이가 0.016c인 경우 와류의 세기가 약

2배 정도 강한 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 난류모델의 경우 비점성 유동, 층류 유동 그리고 Spalart-Allmaras 등 3가지는 큰 차이를 보이지 않으나 2-방정식 모델인 k-e, k-w 모델의 경우 급격하게 와류의 세기가 감소한다. 그림을 보면 격자 크기가 0.016c인 경우가 0.033c인 조건에 비하여 와류의 세기가 강하게 나타난다. 그러나 본 연구의 경우 와류의 직접적인 특성보다는 이로 인한 유도속도 분포가 관심영역이므로 측정부에서 각각의 유도받음각 분포 특성을 관찰하였다.

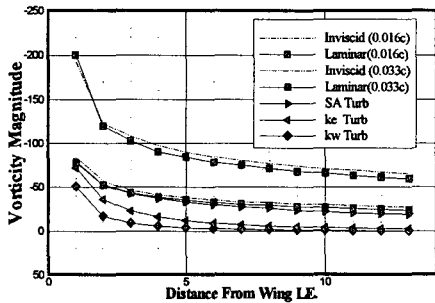


Fig 3. Comparison of vorticity strength for various turbulence models and grid sizes.

그림 4는 두 가지 격자(0.016c, 0.033c)대하여 5m 후방에서의 유도 받음각 분포를 나타내고 있다. 그림을 보면 동일한 난류 모델(Spalart-Allmaras)에 대하여 격자의 밀도가 다르나 유동장의 유도받음각 변화는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 두 경우의 와류 세기가 다르기 때문에 중심에 매우 근접하면 유도 받음각은 다소 차이를 보인다.

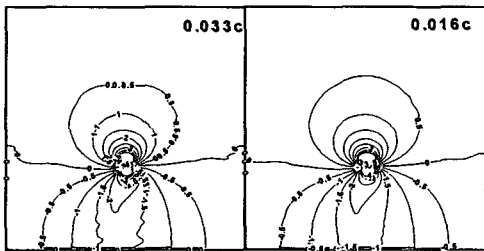


Fig 4. Iso-contour lines of horizontal induced angle of attack at 5m behind the wing leading edge.

본 연구의 경우 계산시간 감소를 위하여 와류부근의 격자의 크기가 0.033c인 경우로 하였다. 격자의 크기가 0.033c인 경우 두 개의 날개에 대하여 격자를 생성하면 약 2,000,000개의 격자요소가 소요된다. 반면 0.016c인 경우에는 두 날개를 고려하면 약 4,000,000개의 격자를 생성해야 한다. 동일한 격자계에 대하여 다른 난류 모델링을 사용할 경우 위의 그림 4와 같이 와류의 강도는 다르나 유도받음각의 분포는 k-w 난류 모델을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않았다. 결국 위의

결과로 판단하면 Spalart-Allmaras 난류모델이 점성효과를 고려하면서도 와류의 감소가 적어 가장 적합하다고 볼 수 있다.

3.2 NAL 돌풍발생기의 수치해석

본 연구에 사용한 유동해석 도구의 해석능력을 검증하기 위하여 NAL에서 실험한 돌풍발생기와 동일한 형상[3]에 대하여 계산을 수행하고 결과를 실험값과 비교하였다. NAL에서 시험한 돌풍발생기는 날개에 장착된 조종면을 이용하여 돌풍하중 경감과 플러터 억제에 위한 능동제어기술(ACT)을 시험하기 위하여 제작되었으며 실험을 통해 다양한 조건의 받음각, 유동속도, 비정상 주파수 등에 대하여 대한 유도받음각을 측정하였다.

이 중 본 연구에서는 유동속도가 14m/s, 받음각 5도인 조건을 선택하여 해석하고 검증하였다. NAL에서 제작한 돌풍발생기의 형상은 그림 5에 나타난 바와 같다. 돌풍발생기의 날개는 높이 2.4m 코드길이 0.9m에 해당하고 측정부 위치는 날개의 앞선으로부터 5m 후방에 위치한다.

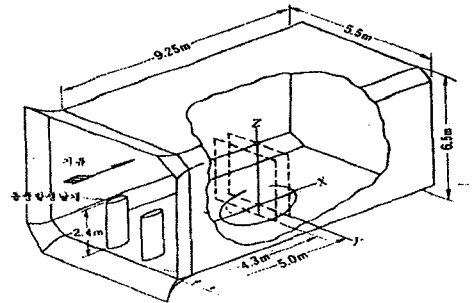


Fig 5. NAL gust generator and wind tunnel configuration

그림 6은 위의 형상에 대하여 계산을 수행한 결과에 대하여 측정부에서 수평 및 수직방향 유도속도를 도시한 그림이다. 결과를 보면 Spalart-Allmaras 난류모델을 이용한 방법이 시험 결과에 가장 근접함을 확인할 수 있다.

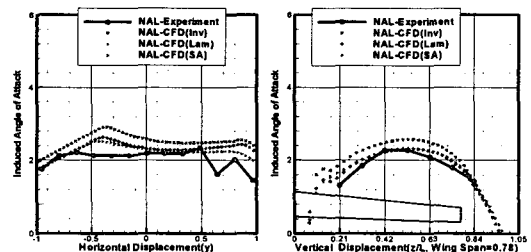


Fig 6. Comparison of horizontal and vertical induced angle of attack distribution(NAL LSWT, 5m behind wing LE).

측정부 전영역에 대한 유도 받음각에 대하여 평균을 취하면 NAL 시험의 경우 2.03도 이고 본 해석결과는 비점성, 층

류, Spalart-Allmaras 모델에 대하여 각각 2.5, 2.3, 2.2도로써 Spalart-Allmaras 모델이 가장 시험값에 근접함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Spalart-Allmaras 모델을 이용한 해석을 최적 방법으로 간주하고 KARI의 돌풍발생기 특성을 예측하는데 이용하였다.

3.3 KARI 돌풍발생기의 유도장 예측

KARI의 증형아음속 풍동의 시험부는 수직방향 3m, 수평방향 4m로, NAL의 풍동 시험부와 비교하여 면적대비 약 1/3에 해당한다. 따라서 동일한 날개형상을 돌풍 발생기에 이용할 경우 상대적으로 근접한 풍동벽으로 인하여 외류로 인한 유도 받음각 분포가 다르게 나타날 수 있다. 이 경우 날개의 길이를 감소시켜 풍동벽과 거리를 두는 방법이 있으나 면적비는 길이비의 제곱에 비례하므로 구조모델의 스케일이 너무 작게되어 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 동일한 날개 형상에 대하여 시험부가 다를 경우에 대하여 해석을 수행하고 동일한 스케일의 돌풍발생기 모델을 사용할 수 있는지 검토하였다.

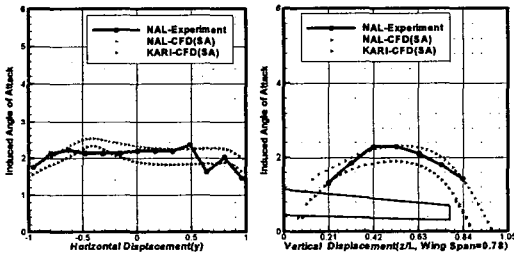


Fig 7. Comparison of horizontal and vertical induced angle of attack distribution(KARI and NAL LSWT, 5m behind)

그림 7은 KARI 및 NAL의 LSWT에 대하여 FLUENT를 이용한 해석결과를 비교한 그림으로 KARI의 경우 풍동벽면효과로 인하여 유도받음각이 다소 감소함을 확인할 수 있다. Spalart-Allmaras 모델을 이용하여 해석한 결과 KARI의 경우 0.4~0.5도 정도 유도 받음각이 감소함을 알 수 있다. 그러나 유도받음각 분포는 KARI와 NAL의 풍동 모두 매우 유사한 형상을 보여 받음각 감소 현상 외에 다른 문제는 발생하지 않아 KARI 증형아음속 풍동에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 감소한 유도 받음각은 돌풍발생기의 받음각을 증가시키거나 측정부와 돌풍발생기간 거리를 좁힘으로써 해결할 수 있다. 따라서 다음 장의 시험에서는 측정부 위치를 1m 정도 전방으로 이동하여 측정하였다.

3.4 KARI 돌풍발생기 시험결과

KARI 공력성능그룹에서는 3m x 4m 증형 아음속 풍동 내부에 돌풍발생기를 설치하고 유동의 특성을 측정하였다. 돌풍

발생기 날개의 형상은 2.4m x 0.9m로 NAL의 경우와 동일하다. 시험조건은 앞서 해석한 바와 동일하게 유속 14m/s, 받음각 5도인 경우로 하였다. 시험과정에서 속도장은 열선 유속계를 이용하여 측정하였으며 받음각이 0도인 조건의 데이터를 이용하여 열선의 장착오차로 인한 오차를 보정하였다.

그림 8은 해석결과를 도시한 그림으로 예측값과 시험값이 매우 근접함을 알 수 있다. 수평방향으로 유도받음각의 평균을 취할 경우 CFD를 이용한 예측값과 시험값은 각각 약 1.89도와 1.99도로 0.1도 정도의 차이를 보인다. 앞서 계산한 NAL의 경우에는 CFD 예측값이 시험값보다 약 0.2도 정도 높았으나 KARI의 경우 시험값과 예측치가 거의 일치하였다. 그러나 NAL 풍동시험의 경우 풍동벽면 부근에서의 변화폭이 큰 데이터를 제외하면 평균값이 약 2.2도로써 CFD예측 결과와 거의 일치한다고 볼 수 있다.

결국 정리하면 4m 후방에서 동일한 돌풍발생기 형상(2.4m x 0.9m)에 대하여 NAL LSWT과 비교할 경우 KARI의 LSWT에서 벽면효과로 인하여 약 0.2도 정도의 유도 받음각이 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

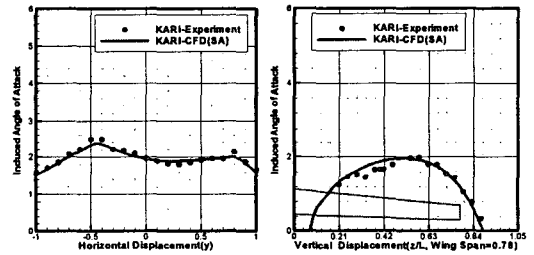


Fig 8 Comparison of horizontal and vertical induced angle of attack distribution(KARI LSWT, 4m behind)

4. 결론

본 논문에서는 상용 유동해석도구를 이용하여 돌풍발생기 주위의 유동장을 해석하였고 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

1. 본 연구에서는 유동해석도구로 FLUENT를 이용하였으며, 여러 난류 모델중 Spalart-Allmaras 모델을 이용할 경우 가장 시험과 유사한 유도 받음각 분포를 구할 수 있었다.
2. FLUENT를 이용하여 5m 후방에서 KARI LSWT용 돌풍발생기의 유도 받음각 분포를 예측할 경우 NAL의 경우와 비교하여 0.4도 정도 감소함을 예측하였다.
3. 풍동시험을 통해 확인한 결과 KARI LSWT용 돌풍 발생기는 NAL의 경우와 비교하여 4m 후방에서 약 0.2도 정도 낮은 유도받음각 분포를 보였으며 이는 본 연구에서 예측한 결과와 거의 일치하였다.

참고문헌

- [1] 김태욱, 외 2, 2004, "MSC/NASTRAN을 이용한 연속돌풍에 의한 날개의 파손확률 해석," *14th Korea VPD Conference*.
- [2] 김태욱, 외 1, 2004, "돌풍하중 완화 풍동시험을 위한 돌풍 발생장치 설계", *KARI-SUG-TM-2004-007*.
- [3] Suzuki, S. et al., 1987, "Design, Construction and Performance of a Gust Generating Device for a Half Model Test in the 6.5m x 5.5m Low Speed Wind Tunnel," *NAL TR-929*.