

에어포일-다중 와류 상호작용의 수치적 연구

Numerical Study of Airfoil-Vortex Interactions with Multiple Vortices

조치훈*, 이덕주(한국과학기술원), 황창전(항공우주연구원)

1. 서론

블레이드와 와류가 인접한 거리에서 존재하거나 움직일 때 그 둘은 상호작용(Blade-Vortex Interaction, BVI)을 하는데, 이 때 블레이드의 공력 변화, 유체 내 소음 방사, 와류의 변형 등의 현상이 발생한다. 헬리콥터 로터나 압축기 캐스케이드 그리고 팬 등에서 회전하는 블레이드는 자체적으로 생성시키거나 또는 외부로부터의 유입된 와류와 주기적으로 상호작용하는 경우가 빈번하다. 이러한 BVI 현상은 공력 성능 저하와 공력 소음 발생 등의 문제점을 일으킨다.

BVI는 블레이드와 와류 필라멘트가 상호작용하는 각도에 따라 평행(parallel), 유선(stream-wise), 수직(normal)으로 구분할 수 있다[1]. 이중에서 작용 면적이 넓게 분포하는 평행 BVI가 가장 문제가 된다. 평행 BVI 현상은 그것의 2차원 근사인 에어포일-와류 상호작용(Airfoil-Vortex Interaction, AVI)으로 해석될 수 있다.

본 연구에서는 에어포일과 다중 와류의 상호작용이 수치적으로 연구된다. 헬리콥터 BVI 소음 저감 방법의 하나인 끝단 와류 분리(split tip vortex) 방식 또는 캐스케이드 유입로에서 Karman 흘림 와류가 발생하는 경우 등에서는 그림1에 나타나있듯이 블레이드가 여러 개의 와류와 동시 다발적으로 상호작용한다. 특별한 구성을 갖는 몇 가지 다중 와류 조건을 선정하고, 그것의 해석을 통해 에어포일-다중 와류 상호작용의 공력 및 소음 특성을 분석하고자 한다. 특히 다중 와류 상호작용이 여러 개의 단일 와류 상호작용의 선형 합으로 표현될 수 있는지 여부가 집중적으로 분석된다.

2. 수치적 방법

지배방정식은 비정상 압축성 Euler 방정식이다. 일반화된 좌표계에서의 2차원 보존형 Euler 방정식이 사용된다.

공간차분법으로 4차 정확도, 7포인트 스텝, 5중 대각행렬 중앙 집적유한차분법이 사용된다. 계수는 위상오차가 최소화되도록 최적화되었다. 경계 및 경계주변 영역은 비중앙 집적유한차분법이 사용되며 계수는 역시 마찬가지로 최적화된 것이 사용된다[2]. 시간전진은 4차 정확도 선형 Runge-Kutta 기법으로 구현된다. 수치적 불안정성으로 인한 진동을 없애기 위해 인공점성항이 도입되었다[3]. 일련의 고해상도 수치 기법들은 작은 수치적 감쇄 및 위상 오차를 보이므로 와류 그리고 AVI 과정에서 발생하는 음파를 잘 해상할 수 있다.

AVI 계산에서 와류는 에어포일의 풍상방향에 초기조건으로 심어진다. 와류속도모델은 Scully 모델이 사용되며, 와류 압력과 밀도는 방사방향 모멘텀방정식과 균등 엔탈피관계식을 통해 결정된다.

격자계는 그림2와 같이 하나의 에어포일 블록과 그것을 둘러싼 8개의 블록으로 구성된다. 이러한 구성을 통해, 와류가 이동하는 영역에서 높은 격자밀도를 얻을 수 있다. 계산에서는 와류 코어영역 지름 길이를 7.5격자점으로 해상하도록 격자가 제작되었다.

에어포일 벽면, 유입 경계, 유출 경계, 그리고 블록 간의 인터페이스 경계 등 모든 경계에서는 원시변수 또는 특성변수의 비정상 조건을 부여하기 위해 특성경계조건이 사용되었다[4].

3. 결 과

3.1. 에어포일-단일 와류 상호작용

에어포일-단일 와류 상호작용에 대한 분석이 선행적으로 수행된다. 에어포일의 받음각은 0도, 자유류 속도는 0.5[음속]로, 그리고 와류의 코어 반지름은 0.05[코드길이], 회전 강도는 -0.13 [코드길이*음속], 초기 수평위치는 -4.5 [코드길이]로 두었다. 세 가지 간섭거리[수직위치] 0.0, -0.15 , -0.45 [코드길이]에 대한 수치 계산이 수행되었다.

그림3은 간섭거리 -0.15 일 때 AVI 계산 결과이다. 그림3(a)는 시간에 따른 와도 등고선의 변화를 보여준다. 와류는 에어포일의 앞전으로 접근할 때 에어포일 유동으로 급격히 휘말리며 변형이 생김을 확인할 수 있다. 와류가 변형되는 이 순간은 에어포일의 공력 측면에서도 대단히 중요한 의미를 갖는다. 와류의 유도속도는 에어포일의 표면 압력을 변화시키는데 앞전 영역에서 변화량이 가장 크고 또한 거기에서 대부분의 음파가 발생한다고 알려져 있다. 단일 와류에 의한 에어포일의 표면압력 변화는 거의 양력 변화에만 기여한다. 그림4는 여러 가지 간섭거리에 대한 양력의 시간 변화 곡선이다. 그림4에 나타나 있듯이 와류가 에어포일 앞전 영역을 통과할 때($x_r=0$) 가장 큰 양력 변화가 발생함을 알 수 있다. 그림3(b)는 교란된 압력 등고선인데, 앞전에서 발생한 음파가 편심된 원의 형태로 전파하고 있다. 항력보다는 양력이 주된 공력 변화이기 때문에 방향성은 상하 dipole형태로 나타난다. 음향 상사 이론에 따르면 방사되는 음파의 세기는 양력 변화 정도에 거의 비례한다[5].

3.2. 에어포일-다중 와류 상호작용

다중 와류는 그것들의 회전강도, 회전방향, 상대위치 등에 따라 수많은 구성이 존재한다. 문제의 단순화를 위해 코어반지름, 회전강도가 같은 두 개의 와류가 고려된다. 회전강도는 앞서 해석한 단일 와류 경우의 1/2에 해당하는 0.065로, 상대거리는 코어반지름의 6배로 두었다. 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 특별한 구성이 계산된다. 첫 번째(case 1), 같은 회전방향을 갖는 와류들이 순차적으로 에어포일과 정면충돌하는 경우, 두 번째(case 2) 같은 회전 방

향의 와류들이 동시에 에어포일을 스쳐지나가는 경우, 세 번째(case 3) 서로 반대의 회전방향을 갖는 와류들이 동시에 에어포일을 스쳐지나가는 경우이다. 다중 와류는 서로 속도를 유도시키기 때문에 단일 와류와 다르게 자유류 속도로 운동하지 않는다. 세 가지 경우에 대한 와류의 경로는 그림5에 제시되었다. 첫 번째와 두 번째 경우는 분리된 끝단 와류 문제에서 대표적으로 강한 상호작용을 보이는 구성이다. 세 번째 경우는 상하 대칭 문제로서 양력이 발생하지 않는다.

단일 와류 문제에서 살펴본 바에 의하면 에어포일의 공력 변화와 음파의 방사는 와류가 앞전 영역을 통과하는 짧은 순간에 결정된다. 그러므로 와류의 이동 경로 중에서 앞전 영역을 통과하는 부분만 일치한다면 에어포일은 비슷한 공력 변화를 보일 것이다. 또한 와류의 유도속도가 자유류 속도에 비해 충분히 작고 양력이 지배하는 문제라면 얇은 에어포일 선형 공력 이론을 적용할 수 있으므로 각 와류의 유도속도는 선형적으로 중첩(superposition)이 가능하다. 이러한 유추를 기반으로 다중 와류를 분할하여 단일 와류 상호작용으로 해석하는 방법이 아래와 같이 제안된다. i) 우선 여러 개의 와류를 하나씩 분해(decomposition)한 뒤 ii) 각 와류가 에어포일의 앞전 영역을 지나는 경로들이 분해 이전의 경로(path correction)들과 일치하도록 초기 조건을 수정한 다음 iii) 여러 번의 단일 와류 상호작용으로 해석하고(simulation) iv) 마지막으로 단일 와류 상호작용에 의한 공력 변화 곡선들을 합친다(superposition).

그림6은 세 가지 경우에 대한 공력의 시간 변화 곡선으로 직접 해석과 분해 해석을 함께 제시해 놓았다. 양력이 지배적인 문제인 첫 번째와 두 번째 경우는 공력의 분해 해석이 매우 타당함을 확인할 수 있다. 이러한 분해 해석은 각 와류가 전체 공력 특성에 얼마나 기여하고 있는지를 알려줄 수 있다. 한편, 양력이 없는 세 번째 경우에는 항력이 지배적인 공력 변화가 되는데, 항력은 두께 효과와 관련이 있으므로 superposition이 성립하지 않고 있다.

그림7은 상호작용 시 발생한 음파의 등고선을 나타낸다. 첫 번째 경우는 두 와류의 순차적 충돌로 인해 두 개의 침두치를 갖는 음파가 발생하고 있다. 세 번째 경우는 항력에 의한 전후

dipole 형태의 방향성을 보이는데 그 세기는 매우 작다.

4. 결론

고해상도 기법을 이용한 에어포일-다중 와류 상호작용의 수치적 연구가 수행되었다. 앞전 영역을 지나는 와류 경로를 고려한 분해 해석을 통해, 에어포일-다중 와류 상호작용의 양력 특성은 작은 오차 안에서 여러 개의 단일 와류 상호작용의 양력의 합으로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 또한 에어포일-다중 와류 상호작용 중에 방사되는 소음의 특징도 관찰하였다.

참고문헌

[1] Rockwell, D., Vortex-Body Interactions, Annu. Rev. Fluid Mech. v.30, pp.199-229(1998)
 [2] Kim, J.W. and Lee, D.J., Optimized Compact Finite Difference Schemes with Maximum Resolution, AIAA Journal, v.4, pp.887-893(1996)
 [3] Kim, J.W. and Lee, D.J., Adaptive Nonlinear Artificial Dissipation Model for Computational Aeroacoustics, AIAA J., v.39, pp.810-818(2001)
 [4] Kim, J.W. Lee. D.J., Generalized Characteristic Boundary Conditions for Computational Aeroacoustics, AIAA J., v.38, pp.2040-2049(2000)
 [5] Schmitz, F.H., Ch.2 Rotor Noise, Aeroacoustics of Flight Vehicles edited by Hubbard H.H., ASA(1995)

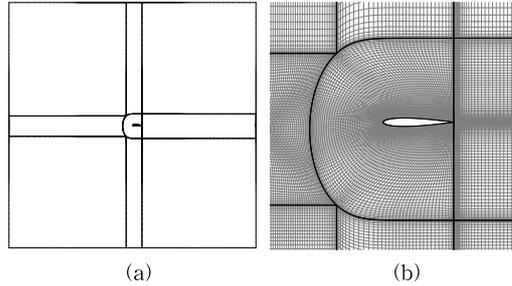


그림2. 격자계 (a) 블록 구성 (b) 에어포일 영역 격자

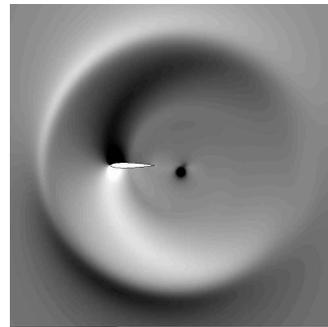
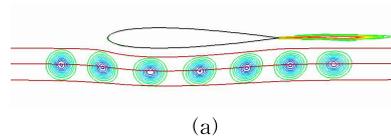


그림3. 단일 와류 AVI, 간섭거리 -0.15 (a) 시간에 따른 와도 등고선 변화 (b) 교란 압력 등고선

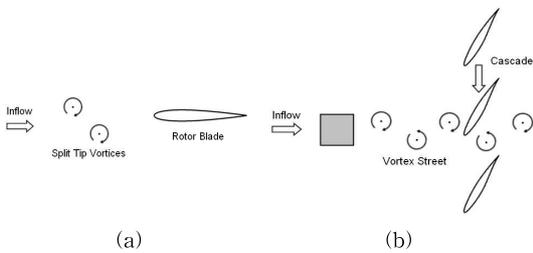


그림1. 에어포일과 다중 와류의 상호작용 예 (a) 분리된 끝단 와류와 로터 블레이드 (b) Karman 홀림 와류와 캐스케이드

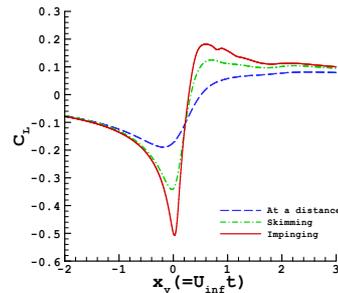


그림4. 단일 와류 AVI; 시간에 따른 양력 계수 변화

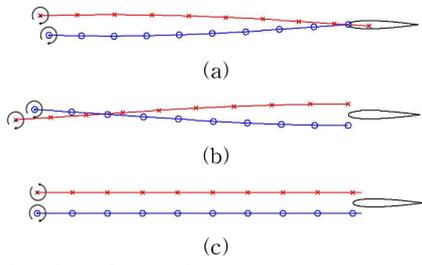
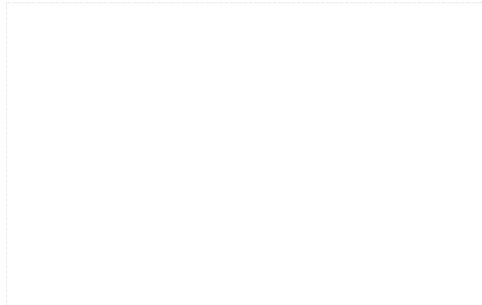
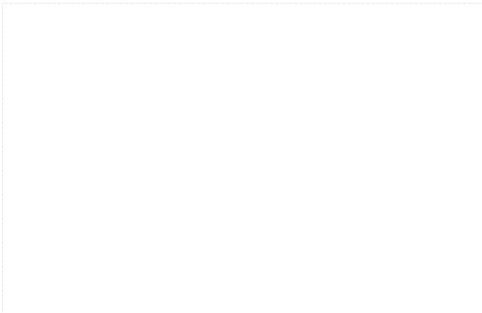


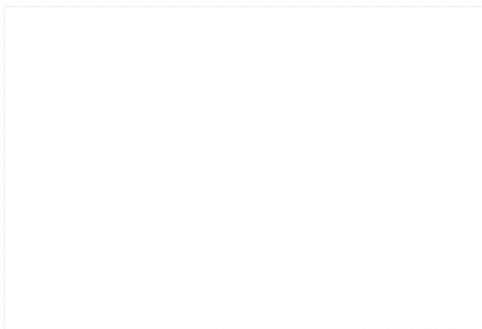
그림5. 다중 와류 구성 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3



(a)

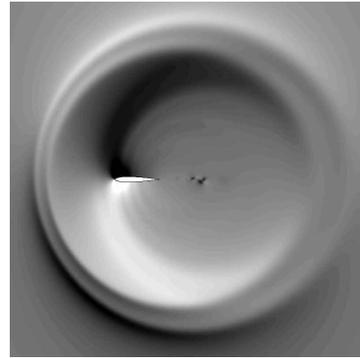


(b)

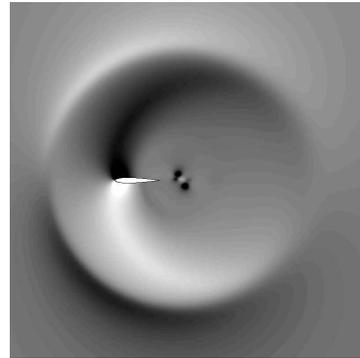


(c)

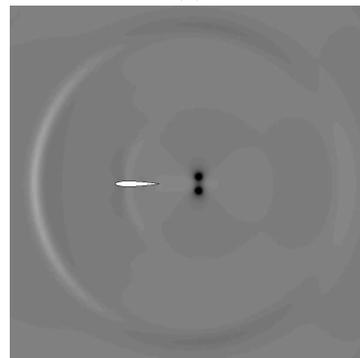
그림6. 다중 와류 AVI; 시간에 따른 공력 변화 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3



(a)



(b)



(c)

그림7. 다중 와류 AVI; 교란 압력 등고선 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3