

## ◎ 특 집 : 연구실소개

## KAIST 항공우주공학전공 전산공기역학 및 최적설계 연구실 소개

권 오 준\*

### 1. 머리말

1970년대에 들어서면서부터 급격한 컴퓨터 기술의 발전과 함께 공기역학적 특성을 지배하는 방정식들의 해를 수치적으로 구하고자 하는 분야가 큰 각광을 받으며 등장하였으며, 이러한 새로운 분야를 전산유체역학 또는 전산공기역학이라고 한다. 본 전산공기역학 및 최적설계 연구실(<http://cadol.kaist.ac.kr>)에서는 전산공기역학의 여러 분류 중 비정렬격자계를 이용한 전산공기역학 기법에 대한 연구를 수행하고 있다. 비정렬격자계를 이용한 전산공기역학 기법은 1980년대 후반에 본격적인 연구가 시작되어 현재에는 정렬격자계 기법과 나란히 전산유체역학의 큰 줄기를 형성하고 있으며, 이 기법을 이용하면 매우 복잡한 형상에 대한 모델링이 편리하며 수치적 해를 매우 효율적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 현재 국내에서는 이러한 비정렬격자계를 이용한 전산유동에 대한 연구는 일부 필요한 경우에 따라 시행되고 있으나 본 연구실과 같은 체계적인 연구는 수행되고 있지 못한 형편이다.

본 연구실에서는 비정렬격자계를 기반으로 한 각종 항공기, 우주발사체와 유도무기, 헬리콥터 형상 주위의 유동과 공기역학적 성능계산과 공력최적설계 그리고 터보기계 내부유동 계산 등의 다양한 전산공기역학 분야에 대한 연구를 수행하고 있다. 계산에 사용되는 코드들은 효율적인 계산을 위해 병렬화 하였으며, 모든 계산은 본 연구실이 보유하고 있는 약 150여대의 리눅스를 기반으로 하는 PC 병렬 클러스터에서 수행하고 있다.

### 2. 주요 연구 분야

#### 2.1 비정렬격자계 형성기법 및 유동 해석

비정렬격자계는 주로 이차원에서는 삼각형을, 그리고 삼차원에서는 사면체 셀을 바탕으로 하여 형성되며, 경우에 따라서는 사각형과 육면체 셀들과 혼합된 혼합격자계가 사용되기도 한다. 비정렬격자계는 정렬격자계와는 달리 각 셀들과 주변 셀들의 배치에 대한 규칙성이 없으며 따라서 각 격자점들은 주변 격자점들과의 연계성에 대한 정보를 가지고 있다. 따라서 비정렬격자계를 사용하게 되면 다소의 메모리 증가가 있으며, 격자의 불규칙성으로 인하여 정렬격자계에 대해 개발되어진 효율적인 알고리즘들을 적용하기가 상대적으로 어렵다. 그러나 비정렬격자계를 이용하면 격자의 불규칙성으로 인하여 항공기의 동체-날개-꼬리날개-외부장착물 등과 같이 매우 복잡한 형상에 대한 계산 격자를 단일 블록으로 매우 빠른 시간에 형성할 수 있는 장점이 있다. 또한 격자점들의 불규칙성을 이용하면 계산 과정에서

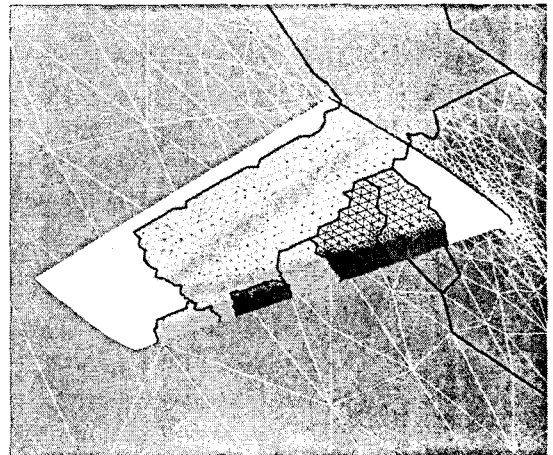


Fig. 1 항공기 날개 형상에 대한 비정렬 적응 격자의 예.

\* 종신회원, KAIST 항공우주공학전공 교수  
E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr

기존의 격자점과 격자점 사이에 임의로 격자점들을 추가할 수 있는 적응격자의 사용이 매우 편리하다. 이러한 적응격자를 이용하면 충격파와 같이 유동장 내에 매우 큰 유동변화가 존재하는 경우에 대한 정확한 해석이 용이하게 된다.

Fig. 1에는 본 연구실에서 개발된 비정렬격자계를 이용한 항공기 날개 형상에 대한 표면격자와 격자 적응의 예를 제시하였다. 또한, Fig. 2, 3과 4에는 비정렬격자계를 사용한 초음속 고등훈련기와 동체-로터-날개 복합형상 및 유도무기에 대한 유동계산의 예를 제시하였다.

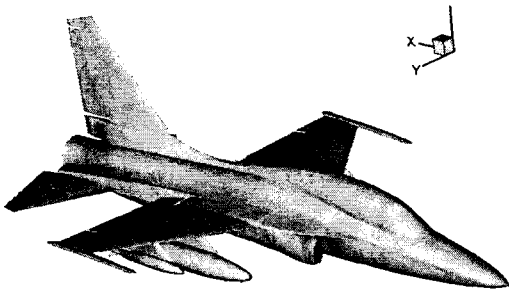


Fig. 2 초음속 고등훈련기(T-50)에 대한 표면 압력 분포도.

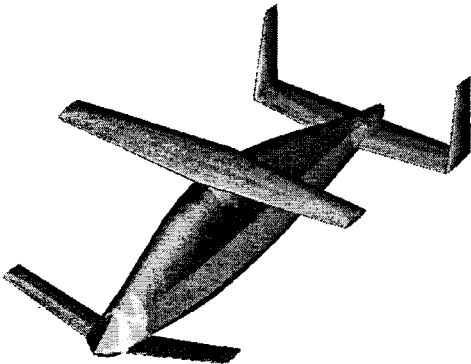


Fig. 3 Canard-rotor-wing 형상에 대한 공력 해석.

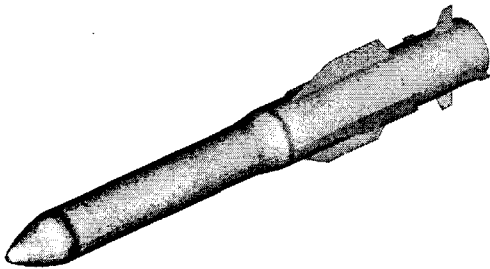


Fig. 4 유도무기 형상에 대한 공력 해석.

## 2.2 헬리콥터 공력 성능 해석

헬리콥터는 고정익 항공기와는 달리 로터를 회전함으로써 공기와와의 상대속도를 얻고 그에 따른 양력과 추력을 얻는다. 따라서 헬리콥터는 고정익 항공기와는 달리 제자리비행이 가능하다. 그러나 공기역학적 관점에서 볼 때 헬리콥터 로터와 동체 주위의 유동은 고정익 항공기와는 달리 3차원 효과가 매우 크며 비정상적인 특성을 가지고 있다. 또한, 날개 끝단에서 생성되는 끝단 와류는 로터면의 아래에 오랫동안 머물며 로터의 공력 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 끝단 와류를 수치적으로 정확히 포착하는 것이 헬리콥터 공력 계산에 매우 중요하게 된다.

본 연구실에서는 비정렬격자계의 장점을 이용하여 제자리 비행 및 전진 비행하는 로터 블레이드의 공력특성을 효율적으로 계산하는 기법들에 대한 연구를 수행하고 있다. 또한 비정렬격자의 적응격자 기법을 도입하여 로터 블레이드 끝단와류에 대한 정확한 포착을 위한 연구를 수행하고 있다. 그리고 상대운동하는 로터와 동체 사이의 공력 상호 간섭 효과에 대한 모사를 위해 슬라이딩 격자 기법에 대한 연구를 수행중이다.

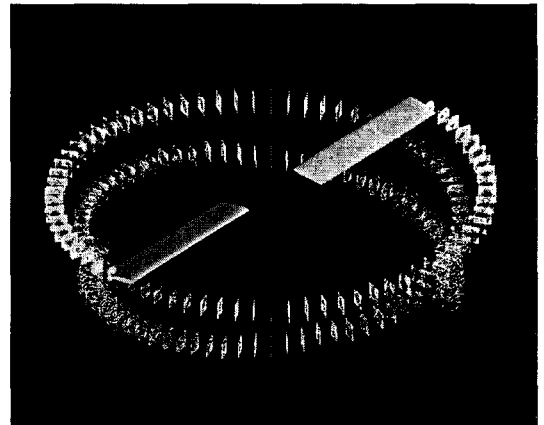


Fig. 5 비정렬 적응격자를 이용한 블레이드 끝단와류 모사.

Fig. 5와 6에는 비정렬 적응격자를 이용하여 제자리 비행하는 로터 블레이드 끝단와류를 여러 번의 로터 회전에 대해 포착한 결과와 블레이드 끝단와류 형성과정을 보여주는 와류 분포도에 대한 예를 제시하였다.

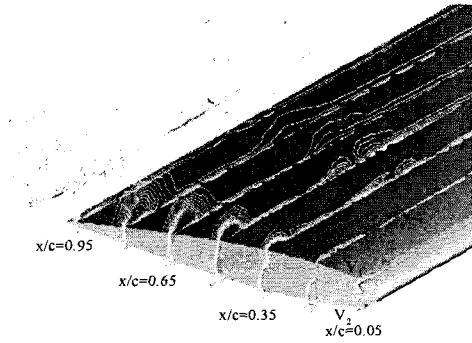


Fig. 6 로터 블레이드 주위의 와류 분포도.

Fig. 7과 8에는 본 연구실에서 수행한 로터-동체 상호 간섭현상에 대한 연구 결과를 제시하였다. 본 형상은 NASA의 랭그리 연구소에서 실험적으로 측정된 형상을 바탕으로 하였다. Fig. 7에는 본 연구에서 사용된 네개의 블레이드를 갖는 헬리콥터 형상 주위의 비정렬 적응격자를 보여주고 있으며, 계산 결과에 따른 압력분포도를 Fig. 8에 제시하였다.

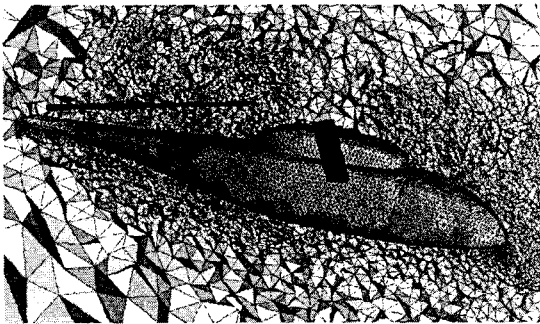


Fig. 7 로터-동체 형상 주위의 비정렬 적응격자 분포도.

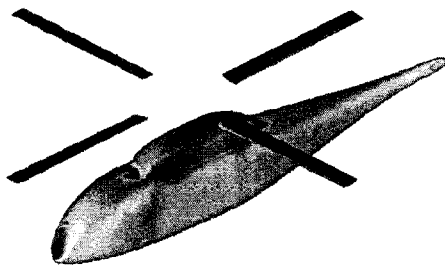


Fig. 8 로터-동체 형상에 대한 압력분포도.

### 2.3 비정렬 중첩격자 기법

유체 내에 존재하는 물체와 물체 사이에 비교적 간극이 큰 상대운동이 존재하는 경우에 대한 수치적 모사를 위해서는 상대운동하는 물체 사이의 시간에 따라 변화되는 간극에 대한 적절한 처리가 요구된다. 이를 위해서 정렬격자계에서는 중첩격자 기법을 많이 사용하고 있다. 본 연구실에서는 비정렬 격자계의 틀을 유지하면서도 서로 상대운동하는 물체들에 대한 유동계산을 위해 비정렬 중첩격자 기법에 대한 연구를 수행하고 있다. 현재 전 세계적으로 비정렬격자를 사용한 중첩격자 기법은 많은 연구가 이루어지지 않은 분야이다. 비정렬격자를 이용하여 중첩격자 계산을 수행하게 되면 복잡한 형상을 갖는 상대운동 하는 물체들 주위의 유동을 효과적으로 계산할 수 있으며, 동시에 비정렬격자 기법의 장점인 적응격자도 도입할 수 있다.

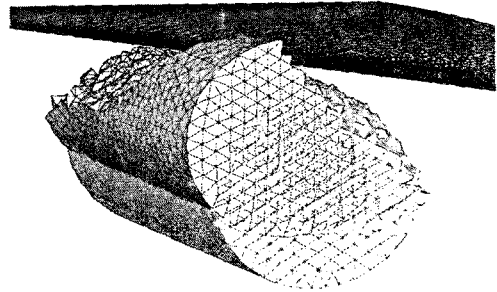


Fig. 9 외부장착물 분리운동 모사를 위한 중첩격자계.

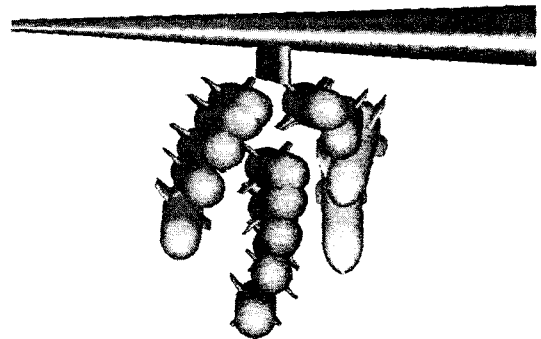


Fig. 10 비정렬격자계를 이용한 외부장착물 분리운동 모사.

Fig. 9에는 이러한 비정렬 중첩격자를 이용한 고정의 항공기 날개에서의 외부장착물 분리현상을 모사하기 위한 격자계를 예시하였다. 또한 Fig. 10에는 이러한 기법을 6자유도 방정식과 연계한 항공기 날개와 외부장착물의 분리 운동 과정을 시간에 대해 제시하였다.

#### 2.4 비정렬 동적적응격자 비정상유동 해석기법

앞에서 언급한 대로 비정렬격자계는 격자 배치의 불규칙성으로 인해 격자 적용이 매우 용이하다. 이러한 장점을 비정상유동 모사에 적용하여 비정상적 동적 격응격자를 사용하게 되면 비정상 와류나 충격파와 같이 시간에 따라 위치가 변화하는 유동에 대한 정확한 모사가 가능하게 된다. 그러나 이러한 비정상적 동적 적응격자 기법은 그 특성상 매우 복잡한 격자점들의 추가와 삭제 및 그에 따른 격자 연결성에 대한 처리가 요구된다. 본 연구실에서는 이러한 비정렬 동적 적응격자에 대한 연구를 수행하고 있으며, 이를 이차원과 삼차원 유동에 적용하고 있다.

Fig. 11에는 충격파관 내부를 이동하는 충격파와 팽창파의 거동에 대해 비정렬 동적 적응격자 기법을 적용한 예를 제시하였다.

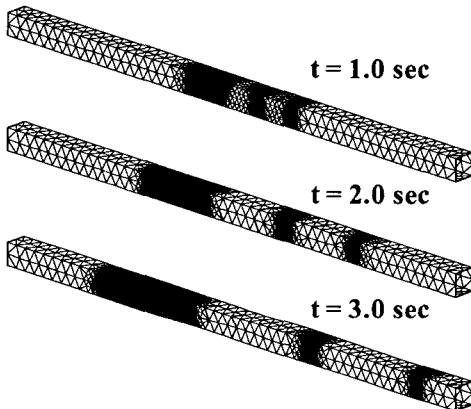


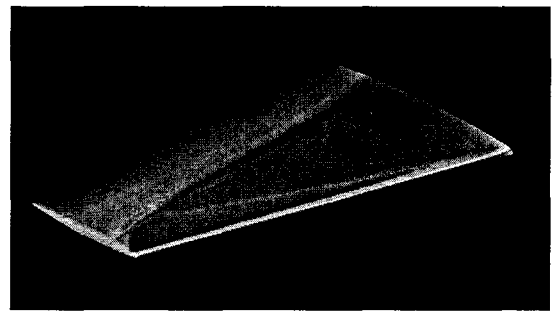
Fig. 11 충격파관 내부유동에 대한 비정렬 동적적응격자 적용의 예.

#### 2.5 비정렬 격자계를 이용한 공력 최적 설계

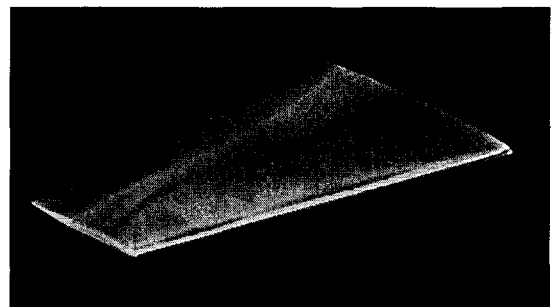
컴퓨터 하드웨어와 전산유체역학 알고리즘의 급속한 발달과 함께 1980년대 후반에 들어서 부터는 이러한 전산유체역학적 기법들을 이용하여 최적의 공기역학적 성능을 구현할 수 있는 공력최적설계 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연

구실에서는 이러한 공력 형상 최적화 기법을 비정렬격자계를 이용하여 구현하려는 연구를 수행중이다. 본 연구실에서는 현재 다양하게 존재하는 공력 최적설계 기법들 중 3차원에서 효율성이 뛰어난 것으로 알려진 연속적인 어드조인트 기법을 이용하여 3차원 고정익 항공기의 저항감소와 헬리콥터 로터의 요구마력 감소를 위한 최적설계에 대한 연구를 수행중이다.

Fig. 12에는 본 연구실에서 개발한 비정렬격자계 공력최적 설계 기법을 적용한 항공기 날개 형상 설계의 예를 제시하였다. 공력 최적설계를 수행함으로써 날개위의 초음속 유동영역이 상당히 줄어들며 충격파 세기도 완화됨으로서 날개의 양력을 원래대로 유지하면서도 항력이 상당부분 감소한 것을 확인할 수 있었다.



(a) 설계 적용 전



(b) 설계 적용 후

Fig. 12 항공기 날개에 대한 공력 최적 설계 적용의 예.

#### 2.6 터보기계 내부유동 해석

압축기와 터빈 그리고 연소실과 같은 터보기계의 내부 유동 해석은 제트 엔진과 같은 항공기 추진기의 성능 예측을 위해 매우 중요하다. 그러나 터보기계 내부유동은 회전하는 컴포넌트와 매우 작은 로터 끝단간극 그리고 자주 발생하는 역압력 구배 등

에 의해 수치적 예측이 매우 어렵게 된다. 본 연구실에서는 비정렬격자계를 이용한 터보기계 내부유동과 성능예측을 위한 연구를 수행하고 있다. 비정렬격자계를 이용하면 로터 끝단간극을 추가적인 모델링 없이 단일격자계 내에서 효과적으로 처리할 수 있으며, 로터 블레이드의 큰 비틀림에도 불구하고 매우 질이 좋은 격자들을 생성할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 13과 14에는 본 연구실에서 수행한 터보기계 내부의 로터에 대한 격자계와 계산된 유동 결과를 제시하였다.

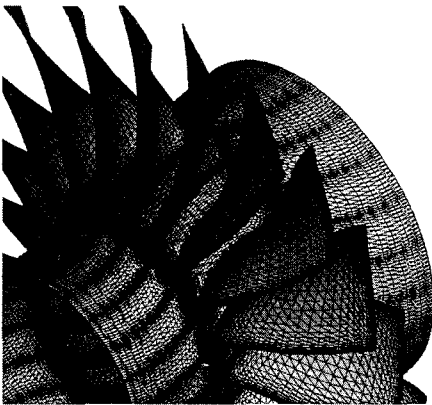


Fig. 13 터보기계 로터의 표면 격자계.

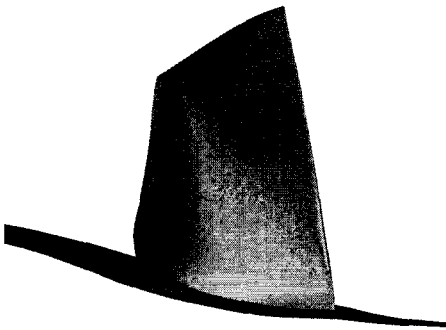


Fig. 14 터보기계 로터 블레이드 유동 계산.

2.7 직접모사법을 이용한 희박기체 유동해석

고고도에서 운행하는 인공위성 추력기 분출 유동과 발사체 주위의 유동 등에는 지표상에서 적용되는 연속체역학의 기법들이 적용되지 않는 희박기체 영역이 되며, 이러한 경우에는 특별한 유동해석 기법이 요구된다. 이러한 희박유동 해석을 위한 여러 기법 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 기법이 직접모사(Direct Simulation Monte Carlo) 기법이다.

이 기법은 자유운동하고 분자간 충돌이 일어나는 실제적인 유동 입자들의 거동을 대표하는 모사입자들을 이용하여 모사하며, 그 결과를 통계적 기법을 이용하여 처리하여 평균화된 유동 결과를 구하는 방법이다.

본 연구실에서는 비정렬격자계를 이용한 희박기체 직접모사 기법에 대한 연구를 수행 중이다. 이러한 기법들은 발사체 payload의 로켓 폴름 거동해석과 유도무기의 자세제어를 위한 측면제트와 자유유동의 상호작용 등에 적용하였다. Fig. 15에는 100km 상공에서의 유도무기 자세제어를 위한 측면제트와 자유류의 상호작용에 대한 직접모사기법 적용의 예를 제시하였다.

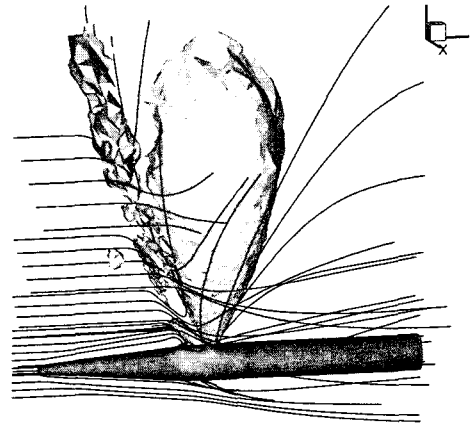


Fig. 15 직접모사법을 이용한 유도무기 측면제트-자유류 상호작용 모사의 예.

3. 맺음말

앞에서 제시한 바와 같이 본 연구실에서는 비정렬격자계를 이용하여 다양한 전산공기역학적 모사 기법 및 최적설계 기법 개발에 대한 연구를 수행하고 있다. 또한, 연속체역학의 가정이 성립되지 않는 고고도 희박유동에 대한 직접모사 기법에 대한 연구도 수행 중이다. 현재에는 이러한 전산공기역학 해석 기법들을 공탄성적 변형이 존재하는 경우에 대해 확장하는 연구를 수행 중이다. 본 연구실에서 개발하고 있는 기법들은 국내에서만 아니라 선진 외국에서도 상당한 경쟁력을 가지고 있으며, 이를 이용하면 장래의 국내 항공기, 헬리콥터, 유도무기 및 우주발사체 등에 대한 연구와 개발과정에 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.