

## ◎ 특 집 : 연구실 소개

## 한국과학기술원 항공우주공학 전공 전산유체역학 실험실 소개

권 장 혁<sup>\*1</sup>

### 1. 머리말

급속히 발전하는 컴퓨터의 성능과 수치 해석 기법 등의 발달을 통해 전산유체역학은 실험의 보조적인 수단을 뛰어넘어 이제는 산업 현장 및 연구 기관 등에 없어서는 안될 중요한 부분으로서 그 입지를 굳히게 되었다. 전산유체역학의 중요성과 실용성에 대한 언급은 무수한 연구 결과와 실용 사례 등을 통하여 이미 확인된 바 있으며 특히, 최근 들어 설계 단계에 있어서 그 중요성은 급속히 증대되고 있는 추세이다. 국내외적인 발전 동향에 발맞추어 국내 유수의 연구실들은 나름의 값진 연구를 통해 학문적, 산업적 발전에 크게 기여하고 있으며, 이러한 학문적 공동체의 일원으로서 본 연구실에서 현재 수행되고 있는 주요 연구 활동을 본 기고를 통하여 간단히 소개하고자 한다.

본 전산유체역학 실험실(Computational Fluid Dynamics Laboratory)의 주요 연구 분야는 크게 다음과 같이 구분될 수 있다. 이러한 구분은 편의상의 구분일 뿐이며 연구 내용의 속성상 매우 밀접한 상관관계를 가지고 있다. 현재 주로 수행되고 있는 연구 분야는 복잡한 3차원 유동장 해석을 위한 유동장 해석 코드 및 수치 해석 기법의 개발, 일반적인 3차원 형상에 대한 정렬 격자계 생성, 형상 최적 설계(shape optimization) 기법의 개발 및 적용, 병렬 처리(parallel processing) 기법의 도입을 통한 해석 및 설계의 효율성 증진 및 거대 문제에 대한 적용을 위한 그리드 컴퓨팅(GRID computing) 등을 주요 연구 내용으로 하고 있다.

유동 해석 기법의 발달과 컴퓨터 하드웨어의

발달은, 1990년대 이후 Euler 방정식을 이용한 유동장 해석의 단계에서 Navier-Stokes 방정식을 이용한 유동장 해석 및 형상 설계까지도 가능케 하였다. 여러 연구소 등에서는 선진국에서 주로 개발된 다양한 소프트웨어의 활용으로 설계 단계에서 성능 평가 등의 과정에 이르기까지 광범위하게 전산유체역학 기법을 적용하고 있다. 이러한 상용 소프트웨어들의 편리한 사용자 환경과 다양한 해석 능력은 전산유체역학의 다양하고 복잡한 내용에 친숙하지 않은 사용자들에게까지 매우 편리한 환경을 제공해주는 장점이 있다. 그러나 일반적 해석을 목적으로 하는 소프트웨어의 특성 상 그 정확도에 대한 한계와 선진국에 대한 기술적 종속의 문제점을 갖게 된다.

다양한 유동조건에 대한 정확한 해석 및 설계를 위해서는 우선 일반적인 3차원 형상에 대한 격자계 생성이 가장 먼저 극복해야할 문제점이며, 또한 해석하고자 하는 유동장의 유동 특성에 적합한 해석 기법의 개발 및 적용이 필수적이라 할 수 있다. 그리고, 수치 해석에 소요되는 해석 시간을 절감하기 위해서는 우수한 수렴성을 갖는 수치 해석 기법의 개발 및 병렬 컴퓨터 등과 같은 적절한 하드웨어의 사용이 요구된다. 본 연구실에서는 이러한 각 요건들에 대한 연구를 수행하여 3차원 격자 생성 소프트웨어 및 다양한 유동조건에 적합하게 사용될 수 있는 유동 해석 코드를 개발하였으며, 지속적인 연구를 통한 코드의 성능 향상을 꾀하고 있다. 그리고 개발된 해석 코드와 우수한 설계 기법의 적용을 통한 3차원 형상 최적화에 적용함으로써 격자 생성에서 형상 최적화에 이르기까지 다양한 연구를 수행하고 있으며, 주요 연구 내용들에 대한 간단한 소개와 적용 사례 등을 다음절에서 기술하도록 한다.

<sup>\*1</sup> 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

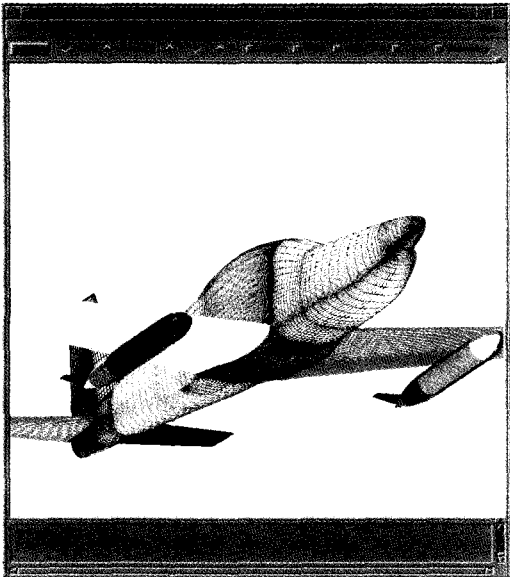


Fig. 1 KGRID를 이용한 항공기 표면 격자계 생성

2. 주요 연구 분야

2.1 3차원 격자 생성 프로그램 개발 : KGRID

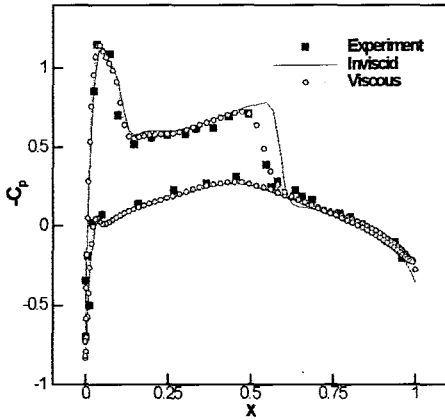
전산유체역학기법을 이용한 유동 해석 및 형상 설계 과정에 있어서 현재 가장 큰 병목 현상을 보이고 있는 부분은 격자 생성 과정이라 할 수 있다. 격자계의 생성 과정은 해석하고자 하는 형상이 항공기 등과 같이 복잡하거나 유동조건이 복잡할 경우 매우 많은 시간과 노력을 요구하는 과정이 된다. 격자 생성과정에 필요한 노력과 시간을 줄이기 위한 요소들 중 매우 중요한 요소가 가시화 기능과 격자계 생성 기능을 결합한 사용자 환경을 제공해 주는 것이며, 기타의 편리한 사용자 환경이 제공되는 것이라 할 수 있다. 물론 격자계 생성을 위한 수치적 기법은 가장 기본적인 요구 조건일 것이다. 본 연구실에서는 이러한 특성에 맞추어 그래픽 환경과 가시화 기법을 도입한 3차원 격자생성 프로그램으로서 KGRID를 개발하였다. KGRID는 형상 모델링을 위한 기본적인 함수들뿐만 아니라 3차원 내부 격자계 생성을 위한 대수적 기법, 타원형 편미분 방정식을 이용한 기법, 쌍곡선형 편미분 방정식을 이용한 기법 등을 제공하며, 3차

원 자유 곡면상의 표면 격자계 생성을 위한 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)기능을 사용할 수 있다. 또한 다양한 격자점 밀집함수(stretching function)를 이용한 적절한 격자점 분포를 결정할 수 있다. 그림 1은 KGRID를 이용하여 3차원 항공기주위에 생성된 격자로서 표면 격자계를 나타내고 있다.

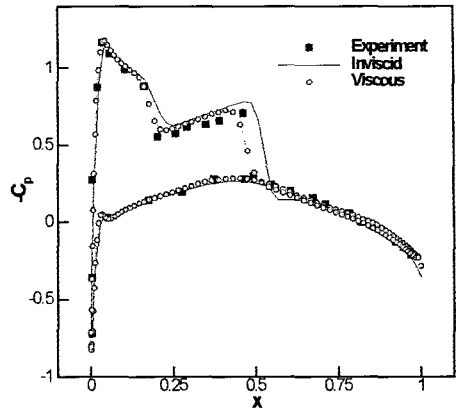
2.2 병렬화된 3차원 다중블럭 유동 해석 코드 개발 : KFLOW

전산유체역학은 컴퓨터의 발달과 더불어 방대한 수치해석 알고리즘을 통해 실제에 가까운 3차원 형상에 대한 해석을 빠르고 정확하게 수행하는 방향으로 나아가고 있다. 이를 위해 생성되는 격자는 대부분 다중블럭 격자계로 구성되며, 경우에 따라서는 중첩된 격자계가 사용되기도 한다. 이를 위해서는 다양한 격자 형태를 가진 3차원의 문제를 동시에 처리할 수 있는 능력이 요구된다. 또한, 방대한 저장용량 및 계산시간 문제를 해소하기 위한 병렬처리는 이제 필수적인 요구조건이 되고 있다. 본 연구실에서는 3차원 다중블럭/중첩격자를 사용하여 다양한 유동조건을 해석할 수 있도록 병렬화된 KFLOW를 개발하여 발전시키고 있다. 본 연구실의 지속적인 연구활동의 종합으로서 개발된 KFLOW는 저 마하수 에서부터 극초음속에 이르기까지의 유동조건을 모두 해석할 수 있으며, 정상 및 비정상 유동해석에 필요한 다양한 공간이산화 기법과 시간전진 기법 및 수렴가속 기법을 제공한다.

본 연구실의 연구활동은 다양한 유동 조건에서 효율적이고 정확한 계산을 수행하기 위한 알고리즘의 개발을 중심으로 진행되고 있다. 천음속 영역에서 복잡한 형상에 대한 빠른 계산을 위해 다중격자(Multi-Grid) DADI 기법이 개발되어 ONERA M6 날개(그림 2)의 해석에 적용되었다. 또한, 비정상 해석을 위한 이중시간적분법이 적용되어 Basic Finner(그림 3) 주위의 비정상 유동장 해석에 사용되었다. 이중시간적분법은 정상해석을 위한 여러 수렴가속기법과 내재적 기법을 사용할 수 있게 한다. 이러한 유동 해석 결과는 형상 최적설계와 제어기 설계 등에 응용되고 있다. Pylon이나 미사일 등이 날개에 장착되고 날개에서 발사될 때, 이러한 비정상



(a) 44% span



(b) 65 % span

Fig. 2 ONERA M6 날 표면의 압력분포

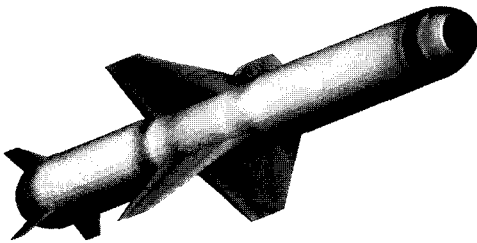


Fig. 3 Basic Finner 주위 압력분포( $M_\infty=0.8$ )

운동의 묘사를 위한 다중블럭 격자계의 생성은 지극히 어렵다. 이 경우 날개/pylon/미사일 주위의 격자는 서로 독립된 격자가 중첩된 형태로 구성되어야 한다. 또한, 중첩격자를 어떻게 구성하는가에 따라서 해석된 해의 정확도도 다르기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되었다. 이러한 연구의 결과로 벽면에서 가급적 떨어진 영역에서 정보의 삼간이 이뤄지도록 하는 cut-paste 알고리즘이 개발되었다. 또한, 상대운동을 가지는 다물체의 6자유도 운동을 손쉽게 해석하도록 자동화된 중첩격자 해석기법이 개발되었다. 그림 4는 중첩격자계를 사용하여 TER(Triple Ejection Rack) 문제를 해석한 결과 중 특정 순간의 압력분포도와 궤적을 나타낸 그림이다.

천음속 영역에 대한 해석 및 알고리즘 개발과 더불어 저마하수 영역에서의 예조건화에 대한 연구도 수행되었다. 수치해석의 절단오차를

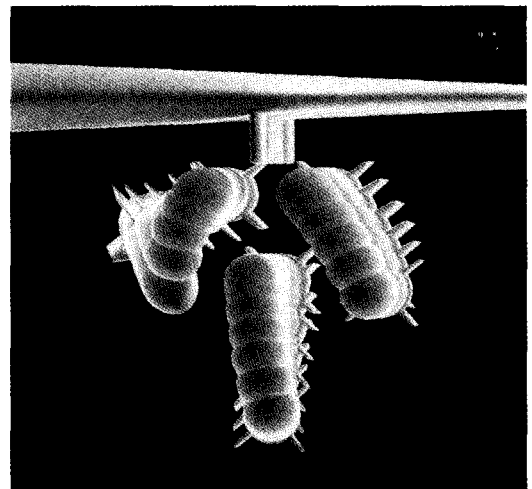


Fig. 4 TER3

제거하고 큰 조건수에 따른 수렴성 저하문제를 해결하기 위해 압축성 Navier-Stokes 방정식에 대한 예조건화가 필요하고, 예조건화된 다중격자 DADI기법이 개발되었다. 개발된 저마하수 예조건화 기법을 사용하여 저마하수에서 비행선의 정적 및 동적 공력계수들을 예측하기 위한 연구가 진행되었다. 그림 5는 동적 감쇠계수 계산을 위해 coning 운동을 하는 비행선 주위의 압력분포도이다.

한편, 강한 충격파로 인한 열적, 화학적 비평형이 존재하는 극초음속 영역에서의 수치적 문제를 해결하기 위해 HLLE+ 공간이산화 기법이

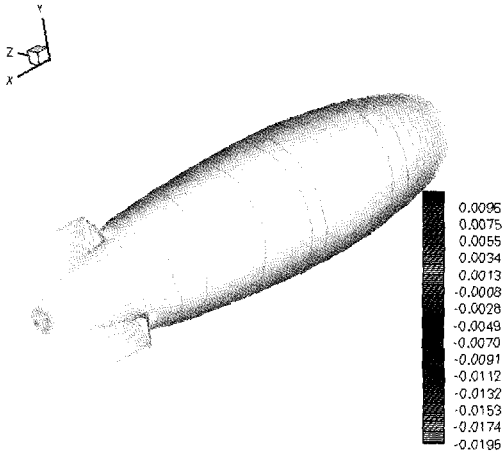


Fig. 5 Coning 운동하는 비행선 주위 상대압력분포( $U_\infty=9m/s$ )

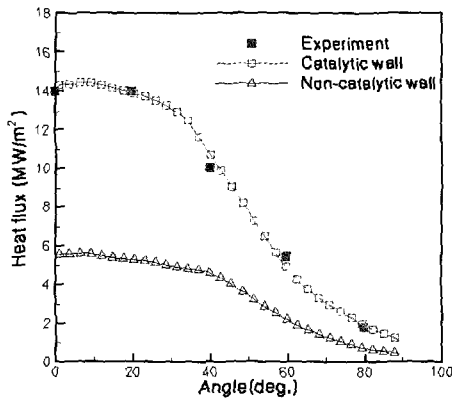


Fig. 6 벽면열전달량 비교 ( $U_\infty= 5,940m/s$ ,  $Re=1.14E+04$ )

개발되었다. HLLE+ 기법을 사용하여 극초음속 영역에서 발생하는 수치적 불안정을 해결하고, 불필요한 수치점성을 최소화함으로써 열전달 계산에서 나타나는 격자의존성을 제거하였다. 이러한 수치해석기법을 사용해 강한 화학반응이 동반되는 Nozzle 및 발사체 앞전에서의 열전달량 예측에 관한 연구(그림 6)와, KSR-III 발사체 주위의 Navier-Stokes 유동장 해석에 관한 연구(그림 7)를 수행하였다.

2.3 계산시간 단축을 위한 연구

비정상 유동장 해석 및 형상 최적 설계 과정과 같이 많은 수의 반복 계산을 필요로 하는 문제의 경우 방대한 계산 시간은 개발된 수치 기법의 적용에 있어서 또 하나의 장애가 된다. 계

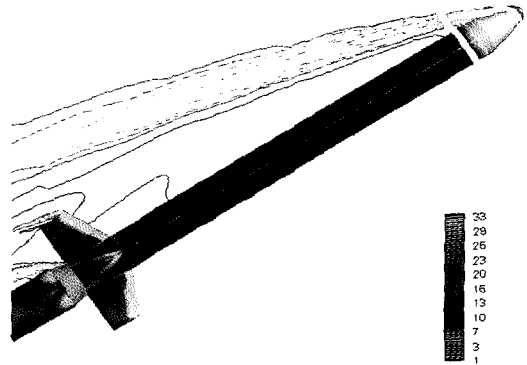


Fig. 7 KSR-III 압력분포도 :  $M=5$

산 시간의 단축을 위한 방법으로서 수치 해석 기법의 개선을 통한 방안과 최근 다양하게 활용되고 있는 병렬 컴퓨터를 이용한 병렬 처리 기법 등에 대한 연구를 수행하고 있다. 그리고, 거대 문제 해석의 수행을 위해 여러 컴퓨터들을 하나의 망으로 잇는 그리드 컴퓨팅(GRID Computing)에 대한 연구를 수행 중이다.

2.3.1 다중 격자 기법(Multi-grid method)을 이용한 수렴성 증진 기법에 대한 연구

다중 격자 기법은 초기에 타원형 방정식의 수렴성 향상을 위해 개발되었으나 Euler 방정식 및 Navier-Stokes 방정식의 수렴성 향상에 있어서도 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 다중 격자 기법은 저주파수의 오차에 대한 우수한 감쇠 특성과 성근 격자를 이용한 수치해의 효율적인 전파 특성으로 인하여 우수한 수렴성을 나타내게 된다. 기존에는 외재적 기법들과 연계하여 수렴성 증진을 위하여 많이 사용되었으나, Navier-Stokes 방정식과 같이 큰 중횡비를 가지는 격자계에서는 그 성능을 충분히 나타내지 못하는 문제점을 나타내었다.

본 연구실에서는 내재적 기법들 중 그 계산 시간이 비교적 적게 소요되는 DADI 방법과 다중 격자 사이클의 수정을 통해 기존의 계산 시간에 비해 7배 정도의 수렴성 증진 효과를 나타낼 수 있었다. 위의 표 1은 Pentium II 400MHz로 구성된 4node PC cluster에서 수행된 ONERA M6 날개 주위의 비 점성 및 점성 유동장 해석시 소요된 시간 및 수렴성 증진 결과를 나타낸 것이다.

고주파수 오차에 대한 우수한 감쇠특성으로

Table 1. 다중 격자 기법의 수렴가속 효과

Case	격자 level	반복회수	계산시간(초)	Speed up
3차원 비점성	단일격자	1192	1920	2.7
	다중격자	281	723	
3차원 점성	단일격자	1824	13330	6.8
	다중격자	193	1970	

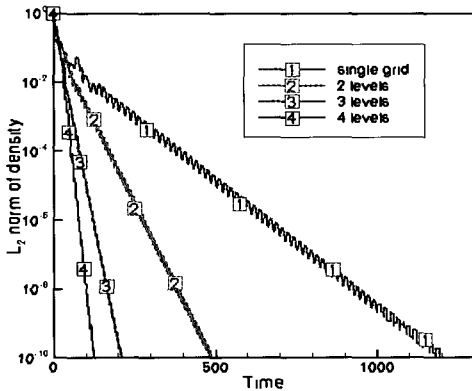


Fig. 8 다중격자기법의 적용에 따른 수렴성

중 격자 기법과 많이 사용되어 오던 다단계 시간 전진 기법과 내재적 예조건화 기법을 연계시킨 예조건화된 다단계 시간 전진 기법에 대한 연구를 수행하여 Navier-Stokes 해석시 다중 격자 기법의 성능을 월등히 향상시킬 수 있었다. 그림 8 은 DDADI 예조건화된 다단계 시간 전진 기법을 이용하여 RAE 2822익형 주위의 난류 유동장 해석시 다중 격자 기법의 적용에 따른 수렴성 증대 효과를 나타내고 있다.

### 2.3.2 그리드 컴퓨팅

전산유체역학 분야에서 최소한의 시간으로 원하는 수치해를 얻기 위한 노력은 고성능 시스템의 사용과 효율적인 알고리즘의 개발로 나타난다. 고성능 시스템의 사용은 알고리즘의 개발에 따른 시간과 노력에 비해 단기간에 목적하는 바를 이룰 수 있으므로 대부분의 연구자들이 기본적으로 채택하게 된다. 고성능 시스템으로 백터형 슈퍼컴퓨터를 사용하다가 더 적은 비용으로 더 강력한 성능을 얻을 수 있는 병렬형 슈퍼컴퓨터를 사용하기에 이르렀고 최근 몇 년 사이 각 사용자 그룹별로 혹은 연구 그룹별로 소규모

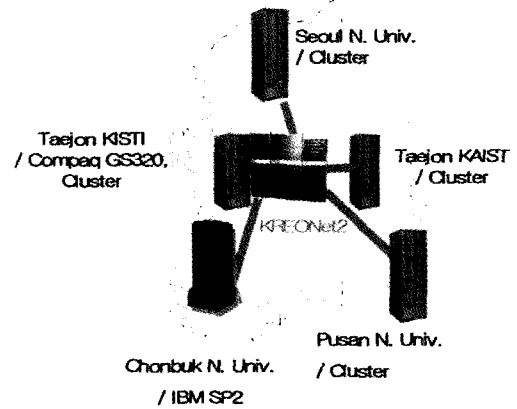


Fig. 9 확장될 CFD 그리드 테스트베드

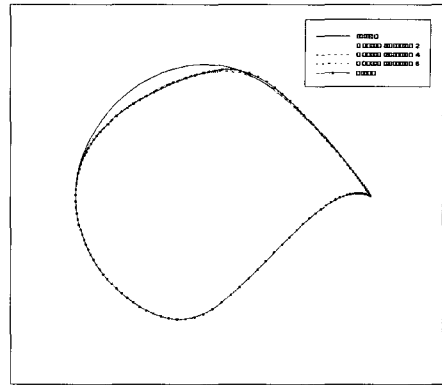
로는 몇 십 개의 노드로부터 대규모로는 수백 개의 노드로 구성된 클러스터를 직접 제작하거나 구입함으로써 슈퍼컴퓨터에 비교할 수 없을 정도로 저렴한 비용으로 슈퍼컴퓨터 성능에 맞먹는 강력한 병렬 컴퓨터를 사용하게 되었다. 이렇게 구성된 시스템을 사용함으로써 작게는 몇 배에서 크게는 수십 배 이상의 효율 상승을 가져오게 되었다. 이러한 혁신적인 시스템의 개선에도 불구하고 연구자들이 해석하고자 하는 문제의 크기는 사용하는 시스템의 용량에 맞춰지게 마련이다. 따라서 분산된 여러 연구그룹의 막대한 계산자원들을 공동으로 활용하고자 하는 시도가 있어왔고 최근에 이를 위해 컴퓨터 과학 분야에서 새로운 고성능 계산 기술이 개발되었고 계속 개선되고 있다.

그리드 컴퓨팅이라 불리는 이 기술은 이기중, 지리적으로 분산된 수많은 자원을 활용해 하나의 큰 슈퍼컴퓨터처럼 사용하고자하는 의도에서 출발하였다. 다양한 운영체제와 하드웨어로 구성된 자원들을 하나로 묶기 위해서는 미들웨어가 필요하며 미들웨어가 그리드 기술의 핵심이라 할 수 있다. 개발된 미들웨어를 이용하면 운

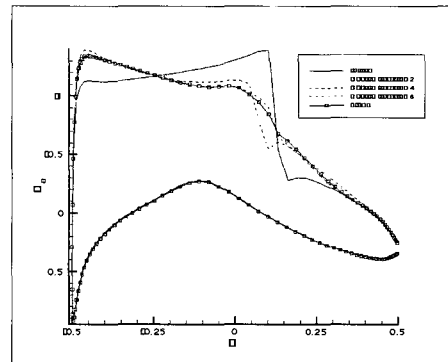
영체제, 위치, 자원의 크기 등 서로 다른 특성들 때문에 야기되는 사용의 어려움을 해결할 수 있고 사용자는 마치 단일 컴퓨터를 사용하는 것과 같이 사용할 수 있게 된다. 그리드 컴퓨팅의 가장 핵심적인 목적은 기존의 단일 시스템으로는 다룰 수 없는 거대 문제의 해석에 도전하는 것이다. 전산유체역학에서는 대규모 격자점을 가지는 3차원 전 기체 해석, 많은 수의 설계변수를 가지는 최적설계 및 다학제간 최적설계(MDO)등의 문제에 그리드 기술을 사용할 수 있다.

그리드 컴퓨팅은 최근에 각광받는 기술로 대규모 자원의 공유, 혁신적인 응용분야에 초점을 맞추으로써 기존의 분산 처리와 차별을 둔다. 일반적으로 거대한 문제는 지리적, 조직적으로 분산된 사람들, 이기종 계산 자원, 수많은 정보 체계, 장비들의 상호작용을 통해 해결된다. 그리드 기술의 탄생배경은 이와 같은 동일하지 않은 자원들 사이의 일반적인 상호작용 규칙을 만들어 거대문제에 적용할 수 있도록 하고자 하는 동기에서 출발하였다. 여러 종류의 과학 및 공학 응용 분야가 그리드 환경 하에서 수행되고 있는데 이에 는 고에너지 물리 데이터 해석, 차세대 우주 왕복선 설계, 인간 계능 프로젝트, NASA의 우주 관찰 시스템 데이터 등이 있다.

본 연구실에서는 국가 그리드 응용 프로젝트에 참여하고 있으며 “그리드 기반의 가상 풍동을 이용한 최적 형상 설계 기술 개발”을 그 목표로 하고 있다. 이를 위해 여러 대학에서 참여하여 전처리 모듈 개발 그룹, 수치 해석자 개발 그룹, 최적 형상 설계 기술 개발 그룹, 후처리 모듈 개발 그룹으로 구성된 연구팀들이 각기 그리드 기반의 응용 기술을 개발하고 있으며 본 연구실에서는 수치 해석자 및 최적 형상 설계 기술을 그리드 환경에서 테스트하고 있다. 소규모 그리드 컴퓨터 환경을 본 연구실과 KISTI 센터에 구축하였으며 이를 이용하여 3차원 난류 점성 유동장에서 날개 설계를 수행하였다. 프로젝트의 최종 목표는 500개 이상의 설계변수를 가지는 문제에 대한 설계, 1억 개 정도의 격자점을 가지는 문제에 대한 수치해석이다. 프로젝트가 완료되면 항공기 전 기체에 대한 수치 해석과 설계가 가능하리라 생각된다. 그리고 더 나아가 다학제적 최적 설계에까지 그 응용의 범



설계 과정에서의 형상 변화

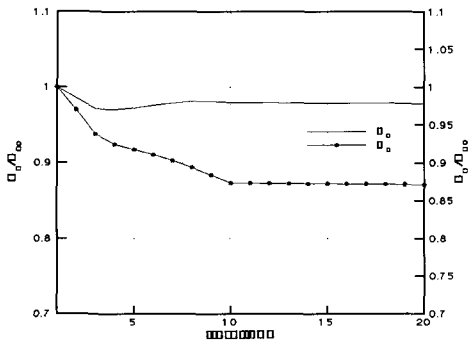


설계 과정에서의 압력 분포 변화

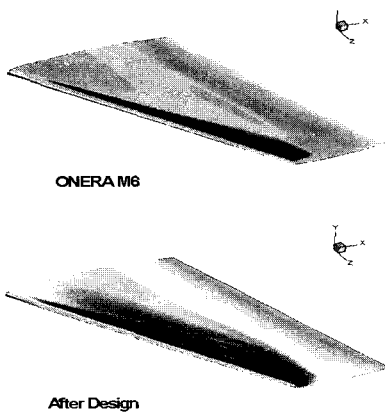
위를 넓힐 수 있을 것이다. 현재 그리드 기술은 사용자의 요구가 반영되고 그에 맞게 개선되고 하는 과정을 통해 발전해 가고 있으며 세계 각국에서 상당한 자본을 투입하면서 연구 및 개발에 노력을 기울이고 있다.

**2.4 형상 최적 설계 기법 개발 및 적용**

항공기 및 유도무기 등의 설계를 위해서는 항속거리, 이륙중량, 최대 추력, 순항속도, 최고 속도 등 수십 가지에 이르며, 또한 결정되어야 할 항공기의 형상을 결정하는 변수 역시 수백 가지 이상에 이르는 복잡한 작업이다. 항공기의 형상과 크기에 따라 다양한 요소들이 복합적으로 변화하게 되고 이를 동시에 고려한 우수한 형상을 직관적으로 찾는 작업은 거의 불가능하다. 이러한 설계의 어려움으로 인하여 설계 단계에서 다양한 매개변수들을 최적화 기법을 도



설계에 따른 공력 계수 변화



설계 전후의 등압력선도 비교

Fig. 11 3차원 날개 형상 최적화

입하여 해결하는 형상 최적 설계에 대한 관심이 높아지고 있다.

공력 최적 설계 기법은 전산유체역학 기법과 수치최적화 기법을 결합하여 최적 설계를 수행하는 방법이다. 그러나, 이와 같은 공력 최적 설계 기법은 많은 계산 시간으로 인하여 실제적인 3차원 설계 문제에서의 적용이 지극히 제한적이다. 즉, 3차원 공력 최적 설계 문제의 경우 반복적으로 3차원 유동장을 해석하는데 소요되는 계산 시간, 설계 변수 개수의 증가로 인한 계산 시간 등으로 인하여 계산에 많은 어려움이 있다.

본 실험실에서는 이와 같은 계산 시간의 문제를 극복하고 실용적인 3차원 공력 최적 설계 기법을 개발하기 위하여 adjoint 방정식을 이용한 민감도 해석 기법, 병렬처리 기법, 단일 사이클의 최적 설계 기법 등을 적용하여 전체 설계

시간을 크게 단축한 효율적인 3차원 최적 설계 기법을 개발하였다. 기존에 많이 사용되는 유한 차분법을 이용한 최적화 코드와 본 실험실에서 개발한 최적화 코드를 비교하면, 설계 변수가 5개인 경우 최대 16배, 설계변수가 20개인 경우 최대 40배의 계산 시간 차이를 볼 수 있다. 이러한 빠른 수렴이 가능한 최적화 코드를 바탕으로 지금까지 계산 시간의 문제로 인해 거의 수행되지 못했던 3차원 Navier-Stokes 방정식을 이용한 공력 형상 최적화를 수행하였다.

본 실험실은 adjoint 기반의 최적화 코드 뿐만 아니라 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 코드를 개발하여 사용하고 있다. 유전자 알고리즘은 미분 기반 알고리즘이 가지고 있는 국부 최적화의 단점을 극복하고 전역 최적점을 찾을 수 있으며, 비교적 쉬운 적용이 가능하여 많은 분야에서 사용되고 있다. 하지만, 복잡한 문제의 최적화를 수행하기 위해서는 매우 많은 반복 계산을 필요로 하므로 공력 형상 최적화와 같은 큰 문제에 적용하기에는 적합하지 않았다. 본 실험실에서는 기존에 알려진 다양한 형태의 유전자 알고리즘을 연구하여 이들에 비해 적은 계산량으로 보다 빠른 수렴이 가능한 유전자 알고리즘 코드를 개발하였다. 이런 유전자 알고리즘 코드를 바탕으로 2차원 및 3차원 공력 형상 최적화를 수행하였으며, 또한 공력 및 전자기파의 동시 최적 설계를 수행하였다. 현재는 adjoint 기법을 이용한 최적화 코드와 유전자 알고리즘 코드를 사용하여, 날개 형상 최적화 뿐만 아니라 엔진 흡입관, 날개-몸체 등에 대한 공력 최적화 뿐만 아니라 공력-구조를 동시 고려한 최적 설계에 대한 연구를 수행하고 있다.

### 3. 결 언

향후로도 현재까지 개발된 유동장 해석 코드 및 형상 최적화를 위한 수치 해석 코드들은 지속적인 연구를 통하여 개발될 것이다. 특히, 우수한 계산 성능을 기반으로 복잡한 형상에 대한 3차원 형상 최적화 및 다학제적 최적화 수행, 비정상 유동장 해석 등에 대한 연구를 중점적으로 수행할 예정이다. 이들 통하여 전산유체역학의 발전에 기여하고자 한다.