

정익-동익 상호작용의 병렬처리해석

이 장 준^{*1}, 최 준 민^{*2}, 이 동 호^{*3}

Analysis of Stator-Rotor Interactions by using Parallel Computer

J. J. Lee, J. M. Choi and D. H. Lee

CFD code that simulates stator-rotor interactions is developed applying parallel computing method. Modified Multi-Block Grid System which enhances perpendicularity in grid and is appropriate in parallel processing is introduced and Patched Algorithm is applied in sliding interface which is caused by movement of rotor. The experimental model in the turbo-machine is composed of 11 stators and 14 rotors. Analyses on two test cases which are one stator - one rotor model and three stators - four rotors model are performed. The results of the two cases have been compared with the experimental test data.

Key Words: 병렬처리(Parallel Computing), MPI(Message Passing Interface), 다중블럭격자계(Multi-Block Grid System), 정익-동익 상호작용(Stator-Rotor Interactions)

1. 서 론

최근에 컴퓨터의 비약적인 발전과 더불어 전산유체역학도 더 복잡하고, 더 다양한 문제로의 접근이 가능해졌다. 특히 벡터 컴퓨터와 같은 슈퍼컴퓨터의 등장으로 계산 시간을 비약적으로 절감할 수 있게 되었지만, 최근에는 계산할 몫을 여러 대의 프로세서가 나누어 실행하는 병렬컴퓨터가 세계적인 추세로 활용되고 있다. 따라서 광대한 시간이 요구되는 터보머신 해석분야에 병렬컴퓨팅을 도입하여 수치해석을 시도하는 것은 필연적이라고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 연구모델은 정익 11개와 동익 14개로 이루어져 있는데, 이를 해석하기 위하여 모두 계산영역으로 고려한다면 엄청난 계산 시간이 필요하게 된다.[1] 그래서 많은 경우에 계산 시간을 절감하기 위하여 정익과 동익의 비율을 1:1로 가정하여 계산하는 방법이 자주 쓰인다.

본 연구에서는 turbomachinery 해석에서 정확한 계산 결과를 얻을 수 있도록 물리적 가정을 최대한 도입하지 않은 알고리즘을 이용하되, 이를 병렬컴퓨터로 구현하여 계산시간을 절감하였다.

2. 병렬처리 기법과 수치해법

병렬처리기법이란 하나의 프로세서가 아닌 여러 개의 프로세서를 동시에 이용하여 보다 효율적으로 문제를 풀고자 하는 방법을 말한다. 이 방법은 중앙처리장치(CPU)의 성능 증가가 한계에 도달함에 따라 하나가 아닌 여러 개의 CPU를 동시에 사용하여 성능의 한계를 극복하고자 하는 생각에서 나왔다.[2]

MPI(Message Passing Interface)는 병렬처리 컴퓨터상의 프로그래밍 기법 중의 Message Passing에 기본을 둔 프로그래밍 방법 중의 하나이다. MPI 기준이 나오기 이전까지는 모든 병렬 컴퓨터상에서 각기 다른 형태의 프로그래밍 인터페이스를 제공하여 사용자 프로그램의 호환성에 문제가 있었다. 이러한 문제점을 인식하고 일련의 병렬컴퓨터 사용자, 연구자, 그리고 병렬컴퓨터 제작자들이 모여서 병렬컴퓨터 상의

*1 항공우주연구원 위성기초기술그룹

*2 항공우주연구원 위성기초기술그룹

*3 서울대학교 기계항공공학부

*E-mail : ljj@kari.re.kr

Message Passing 프로그래밍에 일정한 syntax와 interface를 마련하고자 Message Passing Interface Forum을 결성하고 수년간 노력한 결과 1994년에 제정한 것이 Message Passing Interface이다.

본 연구에서는 2차원 비정상 압축성 Navier - Stokes 방정식을 사용하였다. 공간 이산화 방법으로 유한 체적법(finite volume method)이 사용되었으며, 격자 경계를 출입하는 플럭스 항에 대해서는 풍상차분법(Upwind difference method)의 일종인 Roe의 플럭스 분할 기법을 사용하였다. 시간적분에는 이보성의 DP-SGS기법을 사용하였다.[3] 또한, 난류모델링에 있어서는 K-w SST 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 유입조건이 아음속 영역에 속하는 문제이므로 교란이 유동흐름의 반대방향으로 전파될 수 있다. 따라서 유입경계면에서 유동의 양쪽방향 파동을 고려할 수 있도록 Characteristic boundary condition을 적용하였다. 또한 유출류 경계에서는 밖으로 향하는 교란이 경계에서 반사하지 않도록 국소적으로 1차로 가정한 파동방정식을 이용한 무반사 경계조건을 사용하였다. 정익과 동익의 표면에서는 점착 조건(no slip condition)을 주었고, 정익과 동익의 상대운동으로 인해 발생하는 경계면은 Patched 경계격자를 사용하였다. 이 외에도 병렬처리의 특성상 내부 경계면이 발생하게 되는데, 이 부분은 다음 절에서 다루겠다.

3. 계산 격자계 및 영역분할

3.1 계산 격자계

터보기계의 유동해석 시에 H-type 격자는 상당히 일반적으로 사용된다. 이는 격자의 형성이 쉽고, 3차원으로의 확장과 계산과정이 용이해 많이 쓰이지만, 익렬의 앞전과 뒷전의 격자형태가 좋지 않아 앞전과 뒷전 유동을 기술하는데 좋지 않고 후류를 모사하기 위해 하류(downstream)에 격자를 필요이상으로 많이 배치시켜야 하는 단점이 있다.

한편 Multi-block H-type Grid System은 1-block H-type Grid System에 비하여, 전 영역에서 격자의 수직성이 개선되어 더 정확한 수치해석 결과를 기대할 수 있다. 하지만, 본 모델에서 Multi-block H-type Grid System을 적용한다면 정익과 동익 사이의 직선 Patched Grid 외에 정익과 정익 사이, 동익과 동익 사이에 또한 Patched Grid 가 발생하게

된다. 그리고 그에 따라 다시 새로운 부영역(sub-domain)들이 발생하게 되어, Patched 면을 전후해서 1:1의 데이터 교환이 불가능해지고, 결과적으로 다양한 조건에서 활용될 수 있는 해석코드의 개발이 매우 난해해진다.

따라서 본 연구에서는 Multi-block H - type Grid System (Fig. 1)을 도입하되, 정익과 정익 사이, 동익과 동익 사이에서 Patched Grid 가 발생되지 않도록 하였다. 이와 같은 Non-Patched Multi-block H-type Grid System에서는 일부 영역에서의 격자의 찌그러짐은 감수하면서, 1-block H-type Grid System 보다는 격자의 수직성을 개선시키고, 일반적인 Multi-block H - type Grid System 보다는 해석코드 작성의 편리함을 지니게 된다.

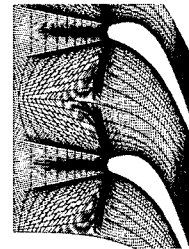


Fig. 1 Non-Patched Multi-block H-type Grid

3.2 Patched 경계조건 처리

Patched 격자기법에서는 각각의 영역이 공통의 경계(patch boundaries)에 의하여 분할되며, 이러한 경계면에서의 격자점들은 수치적 안정성, 해의 정확성, patch 경계를 통한 유동변수의 보존 등 요구조건을 만족시키도록 적절히 분포되어야 한다.

본 연구에서 사용한 Interface Algorithm에 따라 유량은 다음 식과 같이 보존된다. 여기서 y 는 격자계의 수직 좌표 값, $Q_j^{(i)}$ 은 영역(i)의 유량이고, N_j^m 은 내삽계수라고 불리며 cell m 이 cell j에 투영될 때 발생하는 상대 면적이다.

$$\sum_j Q_j^{(1)} \Delta y_j = \sum_m Q_m^{(2)} \Delta y_m$$

$$\sum_j N_j^m \Delta y_j = \Delta y_m = y_{m+1/2} - y_{m-1/2}$$

3.3 내부경계조건 처리

부영역을 다시 프로세서의 개수로 나누면서 원래

의 격자계에서는 경계가 아니었던 곳이 경계로 형성되며 각 프로세서는 겹침 영역(overlap region)을 갖게 된다. 예를 들어 부영역을 가로 방향으로 2개로 분할하였을 때 왼쪽 프로세서의 imax(가장 오른쪽에 위치한 데이터)와 오른쪽 프로세서의 imin(가장 왼쪽에 위치한 데이터) 부분의 겹침 영역이 내부 경계가 되는 것이다.

이러한 내부 경계는 별도의 서브루틴을 통해서 처리된다. 왼쪽 프로세서의 imax와 오른쪽 프로세서의 imin이 서로 만나게 되는데, 이 경우 왼쪽 프로세서의 imax 부근에서 계산된 유동 정보가 오른쪽 프로세서의 imin 내부 경계로, 오른쪽 프로세서의 imin 부근에서 계산된 유동 정보가 왼쪽 프로세서의 imax 내부 경계로 전달되면 된다. 여기서 한 가지 주의할 점은 내부 경계면은 원래 순차적 프로그램에서 고차의 공간정확도로 계산되던 곳이므로 마찬가지로 고차의 공간정확도로 계산될 수 있도록 경계조건이 적용되어야 한다는 것이다. 본 연구의 수치해석에서는 3차의 공간 정확도를 갖추므로, 주고받는 데이터가 2줄의 가상 cell 에 저장되어야 한다.

4. 결과 및 분석

4.1 연구모델

본 연구에서는 1982년에 United Technologies에서 실험되어진 Large-Scale Rotating Rig (LSRR) Turbine을 연구모델로 삼았다.[4] LSRR 터빈은 22개의 정익 에어포일과 28개의 동익 에어포일로 구성되어 있다. 이 실험의 결과 중에서는 정익-동익의 간격이 익렬 시위의 15%인 경우를 수치모사 대상으로 삼았다.

정익 22개의 에어포일과 동익 28개의 에어포일간의 상호작용을 해석함에 있어서 11개의 정익과 14개의 동익 비율을 모두 고려하여 수치해석하기 위해서는 아주 많은 계산 시간을 필요로 하게 된다. 따라서 에어포일 수를 감소시키기 위해서 많은 경우 rescaling 과정을 수행한다. Rescaling 과정이란 동익이나 정익을 피치와 시위의 비를 유지하면서 일정한 비율로 확대하거나 축소하여 에어포일 수를 줄이는 것을 말한다.[5]

4.2 1대 1의 경우 해석을 수행한 결과

동익 에어포일을 28/22배하여 정익 한 개의 에어

포일과 동익 한 개의 에어포일의 상호작용을 수치모사 하는 것은 계산시간의 절감을 위하여 많은 경우에 사용되는 방법이다.

다음의 Fig. 2는 이렇게 가정하여 계산한 결과 얻게 된 정익과 동익 표면의 시간평균 압력을 무차원화 한 값의 분포를 나타내고 있다. 시간 평균 압력 계수는 유동장에서 익형에 미치는 압력의 평균분포로서 유동장의 정적인(static) 특성을 보여준다. 두 그림을 살펴보면 정익의 표면 시간평균압력은 대체로 실험치와 일치함을 보여준다. 그러나, 동익의 경우는 실험치와 상이한 결과를 보인다.

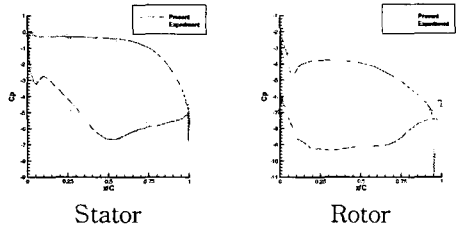


Fig. 2 Time Averaged Pressure on blade

아래의 Fig. 3은 정익과 동익의 비정상 표면 압력으로서 한 주기 동안 익형의 한 지점에 미치는 최대 압력과 최소압력의 차이이며 유동장의 동적인(dynamic) 특성을 보여준다.

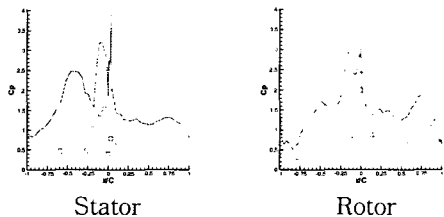


Fig. 3 Pressure amplitude distribution on blade

위의 두 그림에서 알 수 있듯이 이 경우에 정익과 동익의 비정상 표면 압력 계수는 정성적으로 실험결과와 부합하지만 정량적인 측면에서는 미흡하다고 할 수 있다.

5.3 3대4의 경우 해석을 수행한 결과

다음의 Fig. 4는 정익과 동익의 비율을 3:4의 비율로 모사하여 얻게 된 결과로서 정익과 동익에서의 시간평균압력계수를 나타낸 값이다. 정익 3개와 동익 4개에서의 표면 압력 값을 모두 구한 후에 또한 정

익과 동익에서의 값을 각각 평균하였다.

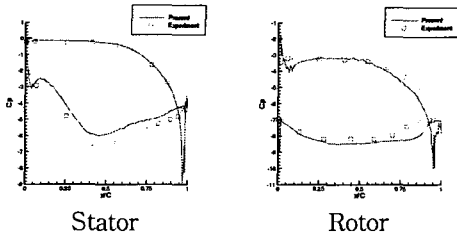


Fig. 4 Time averaged pressure on blade

앞의 Fig. 4를 살펴 보면, 정익의 경우 계산결과는 1:1의 경우(이하 case1)과 크게 다른 점은 보이지 않는데 반하여, 동익의 경우 계산결과는 case1에 비하여 실험 결과와 훨씬 근접했음을 보여주고 있다. 이것은 미리 예상했듯이 case1에서는 동익의 rescaling 과정을 통하여 실제보다 훨씬 큰 형상으로 해석을 시도하여 실제 실험 결과와 많은 차이를 낸 것으로 보인다. 반면에 3:4의 경우(이하 case2)에서는 실제에 훨씬 가까운 형상으로 해석을 수행하여, 실험 결과와 잘 일치함을 보인다.

다음의 Fig. 5는 case2에서의 정익과 동익의 비정상 표면 압력분포를 보여주고 있다.

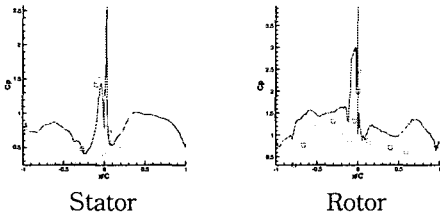


Fig. 5 Pressure amplitude distribution on blade

위의 두 그림을 살펴보면 case2의 경우가 case1의 경우에 비해서 비정상 표면 압력 계수에 있어서 훨씬 정확하게 예측함을 알 수 있다.

결과적으로 case1과 case2를 비교한 결과, case1의 경우에도 blade rescaling을 통한 정익-동익 상호작용의 해석은 정성적으로 잘 일치하는 편이지만, 좀 더 정확한 수치모사를 위해서는 실제 모양에 더 가까운 다수의 정익-동익 수치모사가 필요함을 알 수 있다. 이는 블레이드의 rescaling을 통해 계산 시간을 절감하는 방법이 해의 정확도에 있어서는 한계를 지니고 있다는 사실을 말해준다.

5. 결 론

광대한 계산시간이 요구되는 터보머신 해석분야에 병렬컴퓨팅을 도입하였다. 병렬처리에 편리한 격자를 형성하고, Patched 알고리즘을 도입하여 정익 - 동익 상호작용 유동장을 해석하였다.

많은 계산 시간을 필요로 하는 다수 정익과 다수 동익 사이의 상호작용 해석을 수행하였다. 계산시간의 절감을 위하여 많은 경우에 사용되는 블레이드의 rescaling 방법은 정확한 수치모사를 하는 데에 한계를 지니고 있음을 밝혔다.

향후에는 수렴성을 가속시키기 위한 수치기법과 해의 정확성을 높이기 위해 형성된 양질의 격자 모델을 병렬컴퓨팅으로 구현하기 위한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 김선태, "터보기계내의 정익/동익 상호작용 수치 해석을 위한 다중영역 격자기법연구", 서울대학교 대학원 항공우주공학과 공학박사학위논문. (1996).
- [2] 김재훈, "다중 블록 격자계에서의 효율적인 병렬 계산을 위한 다중 분할 기법의 구현", 서울대학교 대학원 항공우주공학과 공학석사학위논문. (1999).
- [3] 이보성, 이동호, "MPP에서의 효율적 분산처리를 위한 Data Parallel Symmetric Gauss-Seidel 알고리즘", 한국항공우주학회지 제26권 제2호, (1998).
- [4] Dring R. P., Joslyn H. D., Hardin L.W., and Wagner J. H., "Turbine Rotor-Stator Interaction", Journal of Engineering for Power, Vol.104, (1982), p.729-742.
- [5] Daniel J. Dorney, Roger L. Davis and Om P. Sharma, "Unsteady Multistage Analysis Using a Loosely Coupled Blade Row Approach", Journal of propulsion and power, March-April (1996).