論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/KSAS.2011.39.11.995>

상대운동이 있는 중첩격자계에 효율적인 Hole Searching Algorithm 개발

이선형*, 채상현*, 오세종**, 이관중***

Efficient Hole Searching Algorithm
for the Overset Grid System with Relative Body Motion

Seonhyeong Lee*, Sanghyun Chae*, Sejong Oh** and Kwanjung Yee***

ABSTRACT

Object X-ray method commonly used for hole search in overset grids requires huge amount of time due to complicated vector calculations to search the cross-points as well as time-consuming hole search algorithm with respect to background grids. Especially, when the grid system is in motion relative to the background, hole points should be searched at every time step, leading to hung computational burden. To cope with this difficulties, this study presents an efficient hole search algorithm mainly designed to reduce hole searching time. To this end, virtual surface with reduced grid points is suggested and logical operators are employed as a classification algorithm instead of complicated vector calculations. In addition, the searching process is further accelerated by designating hole points in a row rather than discriminating hole points with respect to each background grid points. If there exists a relative motion, the present algorithm requires much less time because only the virtual surface needs to be moved at every time step. The hole searching time has been systematically compared for a few selected geometries.

초 록

Overset 격자계에서 사용되는 Object X-rays Method는 홀점 탐색의 일부인 교차점 탐색에 복잡한 벡터계산을 사용하고 개별 배경격자점에 대하여 물체 내외부를 판별하여 홀점을 탐색하므로 많은 시간이 소요된다. 특히 격자의 상대운동이 있을 경우 매 시간간격마다 홀점 탐색을 수행해야 하므로 계산 시간이 가중된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 홀점 탐색시간을 줄일 수 있는 효율적인 탐색 알고리즘을 제안한다. 빠른 탐색을 위해 격자점 수가 줄어든 가상의 표면을 사용하고 복잡한 벡터계산을 통한 교차점 탐색 대신 논리연산자를 사용하는 내외부 판별법을 사용하였다. 또한 개별 배경격자점에 대해 홀점 판별을 수행하는 대신 일괄로 홀점을 지정하여 탐색속도를 향상시켰다. 물체의 상대운동이 있을 경우 가상의 표면이 상대 운동하여 기존 방법에 비해서 홀점 탐색시간을 감소시킬 수 있었다. 임의의 2차원, 3차원 형상에 대하여 기존의 hole searching 알고리즘과 홀점 탐색속도를 비교한 결과를 제시하였다.

Key Words : Overset Grid(중첩 격자), Hole Searching(홀점 찾기), Object X-rays(엑스레이)

† 2011년 7월 29일 접수 ~ 2011년 11월 2일 심사완료

* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과
교신저자, daedalus@pnu.edu,
부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

1. 서 론

격자계의 질은 수치해석 결과의 정확도와 수렴 등에 영향을 미치므로 적합한 격자계의 생성은 전산유체역학에서 매우 중요한 문제이다. 복

잡한 형상의 물체는 2차원이라도 양질의 격자 생성이 어렵고 3차원 형상이나 상대운동이 있을 경우에는 적절한 구조화 격자계의 생성이 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Steger, Dougherty, Benek 등이 중첩격자계를 제안하였다 [1,2]. 중첩격자계는 복잡한 물체를 조각으로 분리하여 중첩시키므로 격자 생성이 수월하며 비교적 높은 질의 격자를 만들 수 있다. 그리고 전진 비행하는 로터의 경우와 같이 물체가 배경격자에 대해서 상대운동을 하는 경우에도 일부격자만 이동하므로 상대운동의 구현이 용이하다. 그러나 물체 내부에 포함된 격자는 홀점으로 지정하여 제외시켜야 하고 각 격자간 정보를 전달하는 경계를 설정해야하며, 경계를 통한 정보전달 시 보간을 사용하므로 정보의 손실이 발생한다는 단점도 존재한다. 특히 보간에 사용되는 보간요소와 보간계수를 추가적으로 탐색 하는 경우 상당한 시간이 소요되며 상대운동이 있다면 매 시간간격마다 위 요소들을 다시 찾아야하는 문제점이 있다. 이와 같은 이유로 전체 유동해석시간 중 부수적인 요소의 탐색과 같은 전처리 과정의 시간을 줄이고 계산 시간의 효율을 높이기 위한 여러 연구가 진행되어왔으며, 대표적인 코드로 DCF3D, PEGASUS 등이 있다[3].

홀점 탐색시간을 줄이기 위한 최근 해외의 연구로는 Meakin의 Object X-rays Method[4]가 있으며 PEGASUS의 최신버전인 PEGASUS5[5]에 적용되었다. 국내에서는 1997년 조금원, 권장혁 [6], 2000년에 박종훈, 권장혁에 의해 중첩 격자계에서의 새로운 탐색 알고리즘 개발[7]이 수행되었으며, 2006년 김병수와 고성호에 의해 Octree Hole-map을 사용하여 빠르게 홀점을 탐색하는 중첩 격자계의 효율적 Hole Finding 기법에 대한 연구[8]가 수행되었다.

Object X-rays Method[4]는 가상의 평면을 수직으로 통과하는 무한대의 Ray를 이용하여 그 Ray와 물체의 교차점을 탐색해서 물체내부의 홀을 탐색하고, 탐색된 홀을 외부로 확장시키는 알고리즘이다. 그러나 물체와 X-ray의 교차점 탐색에서 복잡한 벡터계산을 수행하고 물체내부의 홀점 지정 시 각 격자점에 대해서 개별적으로 내외부 판별을 수행하므로 탐색시간이 길어지는 단점이 있다. 특히 상대운동하는 물체 주위 유동장을 해석할 경우 계산 시간이 길어지는 문제가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 기존 Object X-rays Method의 개념을 확장하여 교차점 탐색속도와 전체 홀점 탐색속도 및 상대운동 시 홀점 탐색속도를 향상시킬 수 있는 새로운 알고리즘 개발을

수행하였고 2차원 또는 3차원에서 Object X-rays Method, 기존의 hole searching 알고리즘을 사용하여 정상 및 비정상상태에서의 탐색속도를 비교하였다.

II. 본 론

2.1 중첩격자계의 전처리과정

중첩격자계를 사용한 유동해석과정에 필수인 전처리과정은 일반적으로 Fig. 1(a)와 같이 홀점 탐색, 홀 경계점 탐색, 보간요소의 탐색의 순서로 진행된다. 그러나 본 알고리즘은 X-ray와 가상의 평면을 사용하여 홀 경계점에 대한 정보를 먼저 탐색하므로 Fig. 1(b)와 같이 홀 경계점 탐색, 홀점 탐색, 보간요소 탐색의 순서로 탐색이 진행된다.

본 연구는 홀점 탐색과정에 초점을 맞추어 알고리즘 개발을 진행하였다. 본 논문의 알고리즘은 X-ray를 사용하여 Object X-rays Method와 일부 유사한 점이 존재하나 Fig. 2와 같이 Virtual Surface와 Virtual Pierce Point라는 새로운 개념을 추가하여 홀점 탐색을 보다 빠르게 수행한다.

Fig. 1. 전처리 진행과정

Fig. 2. Method별 차이점

2.2 Object X-rays Method

Meakin이 제안한 홀점 탐색 알고리즘인 Object X-rays Method[3]는 NASA의 PEGASUS5[5]에 적용되어 이 후의 개선점은 공개가 되지 않고 있는 것으로 알고 있다. 현재 발표된 논문의 알고리즘을 간단하게 설명하면 다음과 같다.

1. Fig. 2와 같이 임의의 평면에서 z 방향으로 X-ray를 발생시킨다.

2. Fig. 3과 같이 X-rays와 물체표면과의 교차점인 Pierce Point를 탐색한다.

3. 배경격자 위의 임의의 점이 물체 내부에 위치하는지 확인한다. Fig. 4와 같이 임의의 점이 $j+1$ 과 $j+2$ 사이의 Pierce Point 사이에 위치할 경우, 보간을 통해 최대 z 와 최소 z 를 구할 수 있

Fig. 2. X-ray의 생성

Fig. 3. Pierce Point의 탐색

Fig. 4. 임의의 점의 물체 내외부 판별

다. 임의의 점의 z 좌표가 최대 z 와 최소 z 사이에 위치할 경우, 그 점은 물체의 내부에 있다고 판단한다. 이와 같은 방법으로 배경격자의 격자점들을 탐색하여 물체내부의 홀점을 탐색한다. 탐색된 홀점은 Fig. 5와 같다.

4. 탐색된 물체내부의 홀점을 바탕으로 내부격자가 외부 격자로부터 정보를 전달받는 경계, 즉 표면으로부터 δ 만큼 떨어진 거리까지 홀점을 확장시켜 Fig. 6과 같이 전체 홀점을 결정하고 홀점 탐색과정을 마친다.

Object X-rays Method는 몇 가지 개선 가능한 사항을 가지고 있다. 먼저 Pierce Point의 탐색에서 시간단축이 가능하다. 2차원의 경우, Pierce Point는 선으로 표현된 물체표면 위에 위치하므로 이웃한 두 격자점을 보간하여 X-ray 위에 위치하는 Pierce Point를 찾을 수 있다. 그러나 3차원의 경우 4개의 격자점으로 생성된 면 위에서 Pierce Point가 탐색되므로 수학적으로 복잡한 벡터계산을 수행한다. 벡터계산을 대체하는 새로운 알고리즘을 사용하여 계산시간을 줄일 수 있다. 그리고 배경격자점들의 물체 내외부 판별 과정 또한 소요되는 시간을 줄일 수 있다. Object X-rays Method는 배경격자의 격자점들이 물체의 내부에 포함되는지 판별하기 위해 각 격자점들에 대해 개별적으로 내외부 판별을 수행하므로 홀점 지정에 더 많은 시간이 소요된다. 그러므로 본 논문은 Object X-rays Method의 개념을 빌려

Fig. 5. 물체내부에 포함된 홀점 탐색

Fig. 6. 홀점의 확장

산속도가 향상된 알고리즘을 개발하였다.

2.3 개선된 알고리즘의 기본개념

본 알고리즘은 크게 Virtual Surface 생성과 홀점 지정의 단계로 구분할 수 있으며 세부적으로 아래와 같은 단계로 진행된다.

1. X-ray 생성
2. Pierce Point의 탐색
3. Virtual Surface의 생성
4. Virtual Pierce Point의 탐색
5. 홀점 지정
6. 상대운동

본 알고리즘은 Fig. 2와 같이 홀점을 찾기 위해 Object X-rays Method와 같은 방법으로 임의의 평면을 수직으로 통과하는 X-ray를 사용하여, Pierce Point를 탐색한다. 단, Pierce Point를 탐색하는 영역이 물체의 표면이 아닌 내부격자 중 특정 k인덱스를 가지는 점들로 구성되는 표면으로 대체한다. 이 때, k인덱스가 표면에 근접할 경우 유동장의 값 변화가 크므로 주격자로 정보 전달을 위한 보간 시 오차가 증가한다. 그리고 형상에 따라 k인덱스의 위치가 변화하므로 경우에 따라 적합한 k인덱스를 선택할 필요가 있다..

홀점을 탐색하기 위해 Virtual Surface와 Virtual Pierce Point라는 새로운 개념을 적용하였다. Virtual Surface는 탐색된 Pierce Point를 연결하여 생성한 가상의 표면이고, Virtual Pierce Point는 배경격자의 임의의 i, j인덱스에서 생성된 X-ray와 Virtual Surface의 교차점이다.

홀점 탐색에 새로운 개념을 적용하였을 경우, 탐색해야 하는 격자의 인덱스 개수를 줄일 수 있어 Virtual Pierce Point 탐색시간 단축이 가능하다. 그리고 상대운동이 있을 때, 격자전체가 이동하지 않고 Virtual Surface만 이동하여 홀점 탐색을 하므로 계산에 소요되는 시간이 단축된다.

또한 Virtual Pierce Point의 사용으로 홀점 지정 시 기존 알고리즘과는 달리, 한 X-ray에 위치한 두 Virtual Pierce Point사이의 격자점을 일괄로 홀점으로 지정하므로 개별격자점에 대해 홀점 여부를 판별하는 방법보다 탐색시간을 줄일 수 있다. 각 단계를 보다 상세히 설명하면 다음과 같다.

2.3.1 X-ray의 생성

앞서 2.2절의 Object X-rays Method와 같이 X-ray는 임의의 xy평면을 수직으로 통과하여 +z,

-z의 방향으로 끝없이 뻗어나간다. X-ray는 홀점 지정이 필요한 영역에서만 발생하면 되므로, X-ray가 발생하는 x, y 범위를 Fig. 7과 같이 내부격자의 특정 k인덱스를 가지는 평면의 x, y방향 최대, 최소값의 범위로 한정한다. 이 때 x, y 방향으로의 X-ray의 개수는 홀점 탐색 속도와 정확도의 측면을 고려하여 임의의 수로 설정한다.

2.3.2 Pierce Point 탐색

본 알고리즘은 홀점을 지정하기 이전에 홀점의 범위를 결정하는 외부경계가 먼저 결정되어야 한다. 외부 경계는 내부격자의 k인덱스가 특정한 값을 가지는 선, 혹은 면이다. Fig. 8과 같이 이 외부경계와 X-ray의 교차점을 Pierce Point라고 한다.

Pierce Point가 속하는 구간을 결정하기 위해 Fig. 9와 같이 특정한 엑스레이에 대해 외부경계의 인덱스를 순차적으로 변화시키며 외부경계를 탐색한다. 2차원의 경우 Fig. 10(a)와 같이 외부 경계는 선으로 표현되므로 하나의 인덱스만 고려하면 된다. 그러나 3차원의 경우 Fig. 10(b)와 같이 4개의 격자점이 이루는 면을 통과하므로 한 점이 다각형의 내부에 위치하는지를 판별하여 Pierce Point가 위치하는 구간을 결정하여야 한다. 3차원에서 한 점이 다각형의 내부에 들어오는지 판별할 수 있는 방법은 교차횟수를 이용한 판별법중의 하나인 '공차를 고려한 다각형 영역의 내외부 판별 알고리즘'을 이용하였다[9]. 판별 알고리즘에 대한 설명은 본 논문의 범위를 벗어나

Fig. 7. X-ray의 생성

Fig. 8. Pierce Point의 탐색

Fig. 9. 표면 탐색 방향

Fig. 10. Pierce Point 탐색

므로 자세한 내용은 참고문헌[9]를 참고한다.

Meakin의 Object X-rays Method에서는 복잡한 벡터계산식을 사용하여 내외부 판별과 Pierce Point의 탐색을 수행하였다[3]. 그러나 본 알고리즘에 사용된 '공차를 고려한 다각형 영역의 내외부 판별 알고리즘'[9]의 경우 논리연산자를 이용하여 내외부를 판별 하므로 Pierce Point 탐색시 내외부 판별속도를 향상시킬 수 있다.

내외부 판별 알고리즘을 이용하여 Pierce Point가 위치하는 구간이 결정되었으므로 z좌표를 결정한다. 2차원의 경우 X-ray에 의해 x좌표가 이미 결정되었으므로 구간 양 끝 격자점의 z좌표와 x좌표를 사용하여 보간 함으로써 Pierce Point의 z좌표를 결정할 수 있다. 3차원 또한 x,y

좌표가 결정되어있고 둘러싸고 있는 격자점의 좌표를 알고 있으므로 간단한 평면의 방정식을 사용하여 z좌표를 빠르게 결정할 수 있다.

2.3.3 Virtual Surface 구성

Fig. 11에서와 같이 Pierce Point들을 연결하여 만든 가상의 표면을 Virtual Surface라고 부른다. Virtual Surface를 사용한 홀점 탐색의 이점은 탐색대상의 감소에 따른 탐색시간 감소이다. 사용자가 계산의 정확도에 영향을 미치지 않는 범위에서 X-ray의 개수를 조절하여 Virtual Surface 격자점의 개수를 줄일 수 있다. 홀점 탐색을 위해 내부격자 전체를 탐색하는 대신 인덱스 개수가 줄어든 Virtual Surface를 탐색하여 탐색시간을 향상시킨다.

2.3.4 Virtual Pierce Point 탐색

Pierce Point는 내부격자와 가상평면에서 발생한 X-ray의 교차점이다. 그러나 Fig. 12와 같이 Virtual Pierce Point는 Virtual Surface와 배경격자의 특정 i, j인덱스에서 발생한 X-ray의 교차점이다. Pierce Point는 내부격자에서 Virtual Surface를 만들기 위한 점들이었으나, Virtual Pierce Point는 Fig. 13과 같이 배경격자에서 홀점을 찾기 위한 외부경계점들이고 Virtual Surface가 상대운동 함에 따라 재탐색하게 된다.

Virtual Pierce Point 탐색과정은 다음과 같다. 배경격자의 특정 i, j인덱스의 X-ray와 교차하는 구간을 탐색하기 위해 Virtual Surface의 i, j인덱

Fig. 11. Virtual Surface의 생성

Fig. 12. Virtual Pierce Point의 탐색

스를 바꾸어가며 탐색한다. 교차하는 구간이 탐색되면 그 구간에 대해 Virtual Pierce Point들을 계산한다. 위 과정을 실제 물체가 있는 영역으로 한정시키고 그 내부에서 i, j 인덱스를 변화시키며 Virtual Pierce Point의 z 좌표를 탐색한다.

2.3.5 홀점 지정

Fig. 12와 같이 배경격자의 특정 X-ray마다 Virtual Surface를 뚫고 들어가는 Virtual Pierce Point와 뚫고 나오는 Virtual Pierce Point가 앞서 탐색되었다. Fig. 13과 같이 탐색된 Virtual Pierce Point의 최소 z 값과 최대 z 값 사이에 위치하는 배경격자 z 값을 가지는 k 인덱스를 일괄로 홀점으로 지정해주면 Fig. 14와 같이 해당 엑스레이상의 홀점 지정은 완료된다. 위 과정을 Virtual Pierce Point가 탐색된 X-ray에 대해 모두 수행하면 전체 홀점 탐색이 완료된다.

2.3.6 상대 운동

상대운동이 있을 경우 2.3절의 4, 5과정만을 반복한다. Virtual Surface가 상대운동 한 후 Virtual Pierce Point를 다시 탐색하고 일괄로 홀점으로 지정한다. 앞서 언급한 것과 같이 Virtual Surface를 사용한 홀점 탐색의 이점은 탐색대상의 감소이다. 사용자가 계산의 정확도에 영향을 미치지 않는 범위에서 X-ray의 개수를 조절하여

Virtual Surface 격자점의 개수를 줄일 수 있다.

기존의 방법은 내부격자 전체가 상대운동 한 후, 격자 전체를 탐색하여 홀점 탐색을 수행하였으나 본 알고리즘은 격자 인덱스수가 현저히 줄어든 Virtual Surface가 이동하고 그 표면을 탐색하므로 탐색속도가 향상된다.

2.4 결과 및 검토

3차원에서 개선된 알고리즘을 적용하여 홀점을 탐색하기에 앞서 2차원에서 홀점탐색을 수행하였다. 사용된 주격자계는 H유형 321x321, 부격자계는 C유형 157x40 이며 Fig. 15와 같이 구성되었으며, 홀점 탐색에 사용된 시스템은 Intel Core 2 Quad(2.83GHz, 4GB)이다.

탐색속도의 향상을 확인하기 위해 Meakin의 2D Object X-rays Method[4]와 비교하였다. 비교에 사용된 Object X-rays Method는 참고자료에 제시된 정보의 제약으로 세부적으로는 다소 차이가 있을 수 있으나 기본개념은 참고자료에서 소개된 내용과 동일하다.

Fig. 15의 격자계에서 정상상태 홀점 탐색시간을 Object X-rays Method의 탐색시간으로 무차원화 한 결과는 표 1과 같다.

표 1에서와 같이 개선된 알고리즘은 탐색시간이 Meakin의 Object X-rays Method[4]대비 약 17.5% 감소하였다. 이는 기존 알고리즘이 Pierce Point 탐색 후 주격자의 격자점에 대하여 개별적

Fig. 13. Virtual Pierce Point의 탐색

Fig. 14. 홀점 지정

Fig. 15. 2차원 테스트용 격자계

표 1. 2차원 정상상태 홀점 탐색시간

알고리즘	소요시간
Object X-rays Method	1.0000
개선된 알고리즘	0.8252

으로 물체 내외부 판별을 수행하고 홀점 확장과정을 거치는데 비해 개선된 알고리즘은 Pierce Point의 탐색이 끝나면 그 사이를 일괄로 홀점으로 지정하므로 탐색시간이 줄어든다. 3차원으로 확장할 경우 기존 알고리즘은 Pierce Point의 탐색 시 복잡한 벡터계산을 수행하지만 개선된 알고리즘은 논리연산자 기반의 연산을 통해 탐색하므로 탐색 시간이 더욱 빨라질 것이다.

비정상상태에서 홀점 탐색속도는 정상상태와 같은 중첩격자계에서 상대운동을 실시하여 비교하였다. 무차원화 한 결과는 Fig. 16과 같으며 무차원화 기준시간은 Object X-rays Method를 사용하여 비정상상태 홀점 탐색을 수행하였을 때의 총 소요시간이다. Fig. 16과 같이 개선된 알고리즘을 사용하여 상대운동을 하였을 때, 탐색속도가 더욱 빨라지는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 16 좌상단의 차트는 상대운동 시 단계에서의 홀점 탐색시간이다. 누적시간이 아닌 상대운동이 시작한 후의 탐색시간만을 비교하면 개선된 알고리즘의 탐색시간이 기존 알고리즘 대비 약 38.1% 단축된다. 이는 개선된 알고리즘이 상대운동 단계에서는 Virtual Surface를 생성하지 않고 홀점을 탐색하고 Virtual Pierce Point사이를 일괄로 홀점으로 지정하므로 탐색시간이 줄어든다.

개선된 알고리즘을 3차원 중첩격자계에 대해 적용하여 홀점 탐색을 수행하였다. 테스트에 사용된 주격자계는 H-H유형 149x149x149, 부격자계는 C-H유형 197x111x40 이며 Fig. 17과 같은 형태로 설정되었다.

본 알고리즘은 앞서 언급한 것과 같이 Virtual Surface의 구성에 ray를 사용한다. 따라서 ray의 개수에 따라 홀점 탐색속도가 변화 할 것을 예상

Fig. 16. 2차원 비정상상태 홀점 탐색시간

Fig. 17. 3차원 테스트용 격자계

표 2. ray개수에 따른 홀점 탐색시간 비교

ray개수 (i x j)	소요시간
5 x 5	1.0000
11 x 11	1.2414
21 x 21	1.8974
41 x 41	4.8684

할 수 있다. ray에 따른 홀점 탐색시간의 변화를 확인하기 위해 ray의 개수를 달리하여 홀점 탐색을 수행하였다. 홀점 탐색에 소요된 시간은 표 2와 같고 5x5의 시간을 기준으로 무차원화 하였다. 앞서 예상한 것과 같이 ray개수가 작을수록 탐색에 소요되는 시간은 줄어든다. 그러나 Fig. 18과 같이 Virtual Surface의 형상유지를 위해 5x5 대신 시간차가 크지 않은 11x11의 ray를 발생시켜 정상 상태 및 비정상 상태에서 홀점 탐색을 수행하였다.

홀점 탐색시간 비교에 사용된 알고리즘은 Steger등이 제안한 알고리즘이다.[1,2] 정상 상태에서 각 알고리즘별 홀점 탐색시간은 표 3과 같다. 소요시간은 기존 알고리즘[1,2]의 탐색시간을 기준으로 무차원화 하였다.

표 3에서와 같이 정상상태에서의 3차원 중첩격자계 홀점 탐색시간은 개선된 알고리즘의 경우 기존 알고리즘에 비해 약 74% 감소되었다. 이는 비교대상으로 사용된 알고리즘이 복잡한 벡터계산을 사용하고 개별적으로 홀점을 탐색하는데 비해 개선된 알고리즘은 논리연산자를 사용한 내외부 판별과 격자점 수가 줄어든 Virtual Surface를

(a) Ray 5x5 Virtual Surface

(b) Ray 11x11 Virtual Surface

Fig. 18. ray개수에 따른 Virtual Surface의 형상

표 3. 3차원 정상상태 홀점 탐색시간 비교

알고리즘	소요시간
기존 알고리즘	1.0000
개선된 알고리즘	0.2612

사용하여 일괄로 홀점을 탐색한 결과이다.

비정상 상태는 정상상태와 같은 격자계를 사용하고 z축을 기준으로 반시계방향으로 50°씩 5번 이동시켜 홀점 탐색에 소요되는 시간을 측정하였다. 비정상 상태에서의 홀점 탐색 시간은 표 4와 같으며 0단계의 시간으로 무차원화 되었다. 비정상 상태에서 상대운동이 시작된 후 속도가 급격히 증가하여 최초단계보다 탐색시간이 약 87% 감소하였다. 또한 표 5와 같이 비정상 상태에서의 탐색속도가 최초단계와 같은 기존 알고리즘[1,2] 대비 탐색시간이 96.6% 감소하였다. 이는 상대운동 후 새로운 위치에 대해 Virtual Surface

표 4. 3차원 비정상상태 단계별 홀점 탐색시간

Time Step	경과시간	단계별 소요시간
Step 0	1.0000	1.0000
Step 1	1.1323	0.1323
Step 2	1.2575	0.1251
Step 3	1.3928	0.1353
Step 4	1.5160	0.1231
Step 5	1.6444	0.1284

표 5. 3차원 비정상상태 홀점 탐색시간 비교

알고리즘	소요시간
기존 알고리즘[1,2]	1.0000
개선된 알고리즘	0.0339

Fig. 19. 4블레이드 로터의 Virtual Surface 배치

를 재생성하지 않고, 이미 생성된 Virtual Surface만 이동하여 탐색을 수행한 후 홀점을 지정하므로 탐색속도가 빨라진다.

실용적인 문제에 대해 본 알고리즘을 적용하기 위해 4개의 블레이드를 가지는 로터 격자계를 구성하였다. 기존의 알고리즘은 각각의 격자에 대해 홀점을 탐색하나, 본 알고리즘은 Fig. 19와 같이 첫 번째 블레이드에서 생성된 Virtual Surface를 나머지 블레이드가 위치한 자리로 배치하여 Virtual Surface만을 탐색하므로 기존 알고리즘에 비해 홀점 탐색이 빠르다.

4블레이드 로터 격자계에서 반시계방향으로

30° 간격 1000단계 상대운동하며 홀점 탐색 시 소요되는 시간은 Fig. 20과 같으며 1000단계의 누적 경과시간으로 무차원화 하였다. Fig. 20에서와 같이 전체적으로는 상대운동이 진행됨에 따라 홀점 탐색에 소요되는 시간이 선형으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 20 우측하단의 단계별 소요시간을 보면 3단계를 주기로 탐색속도가 변화하는 경향을 보여주고 있다. 이는 상대운동의 단계를 앞서 언급한 것과 같이 30° 간격으로 설정했기 때문이며, 3단계와 그 배수의 단계에서 탐색속도가 줄어드는 것은 블레이드의 배치가 Fig. 21, Fig. 22의 0단계와 같이 정확히 90°의 배수에 해당하는 각도에 위치할 때 홀점 탐색 영역이 최소가 되기 때문이다. 표 6은 본 알고리즘을 사용하여 홀점 탐색을 수행하였을 때의 결

Fig. 20. 4블레이드 로터의 1000회 반복계산 시 홀점 탐색시간

Fig. 21. 비정상상태의 4블레이드 홀점 탐색결과

Fig. 22. 시간간격별 4블레이드 홀점 탐색결과

표 6. 비정상상태 4블레이드 로터 기준 알고리즘과의 탐색 속도비교

알고리즘	소요시간
기존 알고리즘[1,2]	1
개선된 알고리즘	0.0909

과이다. 기존 알고리즘[1,2]의 탐색시간으로 무차원화 되었으며 기존 알고리즘[1,2]의 경우 블레이드 개수가 증가하면 탐색시간도 선형으로 증가하므로 기존 알고리즘[1,2] 대비 약 90.9%의 탐색시간 단축이 있음을 확인할 수 있다. Fig. 21은 4블레이드 로터 격자를 반시계방향으로 30° 간격 3번 이동하여 홀점을 탐색한 결과이다. 상대운동을 한 뒤에도 Fig. 22와 같이 경계를 벗어나지 않고 정확하게 같은 홀점을 탐색하는 것을 확인할 수 있다. 또한 상대운동을 하는 동안 각 블레이드가 Fig. 22와 동일한 각도에 위치할 때 Fig. 22에 표시된 단계의 홀점과 정확히 동일하게 홀점을 탐색하는 것을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 연구에서는 X-ray를 사용하여 정상 상태 및 비정상 상태에서 홀점 탐색을 효율적으로 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

본 알고리즘은 ray를 사용하여 Virtual Surface를 생성하고 홀점을 탐색한다. 형상에 따라 적절한 개수의 ray를 발생시켜 내부 격자보다 격자점수가 적은 Virtual Surface를 생성하므로 탐색시

간이 감소하여 빠른 속도로 홀점 탐색이 가능하다. 또한 Virtual Pierce Point 사이를 일괄로 홀점으로 지정하므로 홀점 탐색이 매우 빠르다. 그리고 홀점 탐색 속도에만 영향을 미치므로 계산 정확도에는 영향이 없다.

2차원에서 Object X-rays Method와 홀점 탐색 속도를 비교하였을 때, Object X-rays Method[4] 대비 정상상태에서 17.5%, 비정상상태에서 38.1% 탐색시간이 감소하였다.

3차원 정상 상태에서의 홀점 탐색은 Virtual Surface를 먼저 결정하고 그 사이를 일괄로 홀점으로 지정하므로 탐색 시간이 약 87% 단축되었으며, 비정상 상태에서의 홀점 탐색은 Virtual Surface를 재생성하지 않고 이미 생성된 Virtual Surface를 이동하여 매 시간간격 홀점을 탐색하므로 Steger등이 개발한 알고리즘과 비교하여 탐색 시간이 96.6% 줄어들었다.

4개의 블레이드로 구성된 로터를 사용한 테스트의 경우 1000번의 반복계산에 대해 홀점 탐색을 수행한 결과 기존 알고리즘 대비 약 90.9%의 시간 단축이 있었으며 이는 각 블레이드 별로 Virtual Surface를 생성하지 않고 하나의 블레이드에서 생성된 Virtual Surface를 나머지 3개의 블레이드가 위치하는 자리로 이동시켜 홀점을 탐색하였기 때문에 더욱 빠른 속도로 홀점 탐색이 가능하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0024757).

참고문헌

- 1) Benek, J., Steger, J., Dougherty, F., and Buning, P., "Chimera: A Grid-Embedding Technique," AEDC-TR-85-64, 1986.
- 2) Dougherty, F. C., "Development of a Chimera Grid Scheme with Application to Unsteady Problems," Ph.D. Dissertation, Stanford Univ. April, 1984
- 3) Meakin, R. L., "DCF3D User's Manual: Version 1.0," NASA Ames Research Center, 1991.
- 4) Meakin R. L., "Object X-rays for Cutting Holes in Composite Overset Structured Grids." in 15th AIAA computational fluid dynamics conference, Anaheim, CA. AIAA Paper 2001-2537, June, 2001.
- 5) Rogers, S. E., Suhs, N.E., Dietz, W. E., "PEGASUS 5: An Automated Preprocessor for Overset-Grid Computational Fluid Dynamics," AIAA Journal, Vol.41, No.6, p.1037-1045
- 6) 조금원, 권장혁, "A Study of the Generation Mesh Interface Regions for Structured Overlapped Grids," 전산유체공학회 춘계학술 대회, 1997, pp.45~51.
- 7) 박종훈, 권장혁, "중첩 격자계에서의 새로운 탐색 알고리즘 개발," 한국항공우주학회지, 28권, 6호, 2000, pp.21~30.
- 8) 김병수, 고성호, "중첩 격자계의 효율적 Hole Finding 기법," 한국항공우주학회지, 11권, 2호, 2006, pp.62~66.
- 9) 정연찬, 박준철, "공차를 고려한 다각형 영역의 내외부 판별 알고리즘", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 7권, 2호, 2002, pp.75-80.