사례연구 : VTK를 이용한 대용량 로터 시뮬레이션 데이터의 가시화

이중연, 허영주, 김민아
한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅본부
e-mail:jylee@kisti.re.kr

Cast Study : Visualization of Large Rotor Simulation Data using VTK

Joong-Youn Lee, Younju Hur, MinAh Kim
Supercomputing Center, KISTI

요 약

최근 컴퓨팅 성능의 급격한 발전으로 이를 통해 생산되는 데이터의 크기 역시 매우 커지고 있다. 이는 로터 시뮬레이션 분야에서도 마찬가지인데, 과거에는 백만개 정도의 격자 데이터 정도만을 다루었던 것에 비해 최근에는 1억개 이상의 격자 데이터를 다루려는 시도가 계속되고 있다. 그러나 이렇게 생산된 대용량의 시변환(time-variant) 유동 데이터는 그 크기가 매우 크기 때문에 일반 PC에서는 실시간으로 가시화하기에 곤란한 경우가 많다. 또, 이러한 로터 시뮬레이션 데이터는 매우 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 초보자가 이 데이터에서 vortex와 같은 중요한 정보를 뽑아서 가시화하는 데에는 많은 어려움이 있어 왔다. 본 논문에서는 일반 PC에서 가시화하기 어려운 대용량 로터 시뮬레이션 데이터를 고성능 가시화 컴퓨터와 VTK를 이용해서 빠르게 가시화하기 위한 방법을 서술한다. 또, 복잡한 데이터 내부의 중요한 정보들을 자동으로 빠르고 간편하게 표출하기 위한 방법을 제안한다.

1. 서론

가시화는 복잡한 과학 현상을 연구할 때 그 의미를 이해하기 위한 매우 중요한 과정 중 하나이다. 다양한 과학 분야에서 가시화 과정을 효율적으로 처리하기 위해 컴퓨터 그래픽스를 활용하는데, 유동 데이터 가시화 역시 여러 방법들이 발표되고 있다[1,2]. 한편, 많은 종류의 유동 데이터 중 로터 시뮬레이션 데이터는 최근 많은 연구가 계속되고 있는 분야이다. 로터 시뮬레이션은 헬리콥터나 풍력발전기 개발에 있어서 없어서는 안되는 중요한 연구인데, 그 거대한 크기로 인해 풍동이나 현장에서 실제로 실험하기 어려운 것이 현실이다. 최근 컴퓨팅 성능의 급격한 발전으로 인해 로터 블레이드 실험을 컴퓨터를 이용해서 수행하려는 시도가 계속되고 있지만 이를 통해 생성되는 거대한 데이터를 빠르게 가시화하기 위한 연구는 전무하다. 특히, 일반적으로 로터 시뮬레이션 데이터 자체는 매우 거대한 크기를 가지고 있지만 연구자가 이 데이터에서 보고자 하는 정보는 전체 데이터의 극히 일부일 뿐인데, 이들 정보를 표출하는 작업은 전체 가시화 시간의 대부분을 차지할 정도로 시간을 매우 많이 필요로 한다. 특히 거대한 로터 시뮬레이션 데이터의 경우 일반적인 PC에서는 전체 데이터를 메인 메모리에 올릴 수가 없기 때문에 데이터를 여러 부분으로 나누어 작업해야 해서 더욱 많은 시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 고성능의 가시화 전용 컴퓨터를 이용해서 대용량의 로터 시뮬레이션 데이터를 빠르게 가시화하기 위한 방법에 대해 설명한다.

2. 로터 시뮬레이션 데이터

본 논문에서 다루는 로터 시뮬레이션 데이터는 다중 블록(multi-block) 구조로 된 시변환(time-variant) 데이터로 로터 블레이드와 그 주변 유동장으로 구성되어 있다. 각 블록은 구조화된 격자(structured grid)로 되어 있고 로터 블레이드 데이터는 총 16개, 유동장 데이터는 총 32개의 블록으로 구성되었다. 각 격자에는 격자 좌표 정보와 함께 여러 스칼라 및 벡터 정보가 저장되었고, 데이터 타입은 모두 배정도 부동소수점(double precision floating point)이다.

<표 3> 블레이드 데이터 크기 정보

블록 번호	블록 개수	크기	스텝	MBytes
홀수	8	52 X 43 X 1	90	30.70
짝수	8	52 X 23 X 1	90	16.42
합계	16	-	90	47.12

<표 4> 유동장 데이터 크기 정보

블록 번호	블록 개수	크기	스텝	GBytes
01-16	16	129 X 49 X 49	90	14.95
17-32	16	21 X 73 X 43	90	3.18
합계	32	-	90	18.13

3. VTK를 이용한 가시화

로터 시뮬레이션 데이터는 그 특성상 로터 블레이드가 회전하면서 생기는 wake가 다른 블레이드들에 어떤 영향을 미치는지 파악해서 최대한 영향을 미치지 않도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 또, 블레이드가 회전하면서 생기는 각종 힘에 견딜 수 있는지를 판단하는 것도 중요하다. 이를 판단하기 위해 로터 시뮬레이션 데이터에서 반드시 표출해야하는 데이터는 다음과 같다.

1. 블레이드 데이터에서의 Pressure 분포
2. 유동장 데이터에서의 스트림라인
3. 유동장 데이터에서의 vorticity iso-surface
4. 유동장 데이터에서의 vortex 영역

전체 데이터에서 이러한 데이터를 추출하는 작업을 필터링(filtering)이라고 하는데, VTK[3]는 이러한 필터링을 용이하게 수행할 수 있도록 해주는 라이브러리다. 본 논문에서는 VTK를 이용해서 위에서 설명한 데이터를 표출하도록 했다. 2장에서 설명한 유동장 데이터 정보를 보면 vorticity 정보는 저장되어 있지 않다. 이를 위해 본 논문에서는 데이터 로드를 하고 바로 vorticity 정보를 계산하도록 했다. velocity 벡터를 (u, v, w)라고 할 때 vorticity 값은 다음과 같다.

$$|\Omega| = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}$$

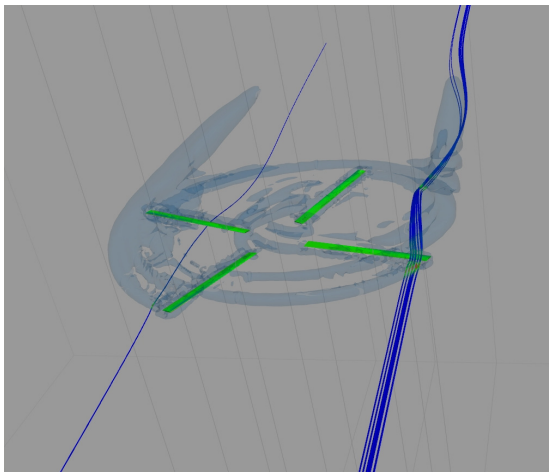
이를 위해 각 격자에서의 velocity 벡터에 대한 편미분이 계산되어야 하는데, 이는 *vtkCell* 클래스의 *Derivative()* 함수를 이용해서 계산이 가능하다. 로터 블레이드 주변의 wake를 가시화하기 위해서는 vorticity 값이 높은 격자에서 스트림라인을 생성하면 된다. 이를 위해 본 논문에서는 vorticity 값의 최대값을 구한 후 이 값의 70%이상인 격자를 모두 구한 후 스트림라인을 생성하도록 했다. vortex 영역을 표출하는 것 역시 매우 중요한데, 본 논문에서는 [4]에서 사용한 Q-Criteria 방법을 사용했다. Q-Criteria는 전체 유동장에서 vorticity가 strain보다 큰 부분을 vortex라고 정의한다. 계산식은 다음과 같다.

$$Q = \Omega^2 - S^2 = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

이 값 역시 vorticity를 계산할 때 *Derivative()* 함수를 이용해서 함께 계산할 수 있다.

4. 구현 결과

지금까지 설명한 VTK를 이용한 로터 시뮬레이션의 가시화를 Intel Xeon X5450 가시화 컴퓨터를 이용해서 구현했다. 이 컴퓨터는 총 64GB의 메인 메모리를 가지고 있어 로터 시뮬레이션 데이터 전체와 VTK에서 생성하는 각종 데이터를 모두 저장하고 가시화할 수 있었다. 전체 데이터를 각 타입 스텝별로 가시화하면서 vorticity 및 pressure 분포의 변화와 블레이드 뒷부분의 wake 변화를 실시간으로 파악할 수 있었다. 또, 3장에서 설명한 가시화 기법들은 범용 데이터를 위한 가시화 기법으로, 일반 사용자도 쉽게 사용할 수 있도록 로터 시뮬레이션 데이터의 가시화를 위한 라이브러리를 새로 구축했다.



(그림 1) 로터 데이터 가시화 결과

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 대용량 로터 시뮬레이션 데이터를 고성능 가시화 컴퓨터를 이용해서 실시간으로 가시화하는 방법에 대해 설명했다. 데이터를 이용해서 보여줄 수 있는 여러 정보들 중 사용자가 꼭 필요로 하는 정보들을 표출하는 방법과 이를 VTK를 이용해서 구현하는 방법에 대해 살펴보았다. 특히, 자동으로 높은 vorticity를 갖는 영역을 찾아 이 영역에서 스트림라인을 가시화하여 wake를 표출할 수 있도록 했다. 또, Q-Criteria 방법을 이용, vortex의 영역을 가시화하도록 했다. 비록 본 논문에서 대용량 데이터에 대한 가시화는 구현할 수 있었지만 스트림라인 생성과 같은 일부 기능에서는 데이터를 표출하는데 30초 이상의 많은 시간을 필요로 했다. 이것은 여러 대의 가시화 컴퓨터를 이용한 병렬 가시화나 GPU를 이용한 수치 계산 가속 기법을 통해 해결이 가능하다. 또, 본 논문에서는 약 600만 개의 격자를 가지는 시변환 데이터를 다루었지만 향후 10배 이상의 거대 용량 데이터를 가시화할 계획이다.

6. 참고문헌

[1] H. Hauser, R. S. Laramee, H. Doleisch, "State-of-the-art report 2002 in flow visualization", Technical Report TR-VRVis-2002-003, 2002

[2] R. S. Laramee et al., "The state of the art in flow visualization: Dense and texture-based techniques. Computer Graphics Forum 23 (2004), 2004.

[3] VTK Homepage, http://www.vtk.org

[4] J. Jeong and F. Hussain, "On the Identification of a Vortex", Journal of Fluid Mechanics, 285, pp.69-94, 1995