

## FSI해석에 의한 요트세일 성능해석

박미연, 이희범, 이신형 (서울대학교)

### 1. 서론

일반 상선이 프로펠러로부터 추진력을 얻는 것에 비해, 세일링 요트는 세일에 작용하는 바람에 의해 추진력을 얻는다. 요트는 세일의 형상에 따라 성능이 좋을 수도, 나쁠 수도 있으며, 그에 따라 요트의 속도도 달라지기 마련이다. 바람을 추진력으로 전환하는 세일의 유체역학적 성능을 최적화하는 것은 매우 중요하다. 요트 세일은 대부분 얇은 직물 소재로 만들어지기 때문에 조그만 힘에도 그 형상이 쉽게 변하는 특성을 지닌다. 바람으로 추진력을 얻는 요트 세일은 풍압에 의한 세일 형상의 변형이 발생하며 이러한 세일 형상의 변형은 세일 주위 유동과 유체력을 다시 바꾸게 된다. 세일에 작용하는 유체력, 즉, 항력이나 양력이 변화했기 때문에 횡경사각(heel angle)이나 사향각(leeway angle)을 포함한 선체 자세에도 변화가 생기게 된다. 선체 자세의 변화와 세일로 인해 발생된 유체력의 변화는 저항을 포함한 항해성능에 영향을 끼치게 되므로 세일의 변형을 고려하는 것은 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 최근에 이르러서야 요트세일 성능 해석 시, 세일의 변형을 고려하기 시작하였다. 앞서서도 언급했듯, 세일의 형상 변형과 유체력은 서로 지속적으로 영향을 미치기 때문에 여러 번 반복 계산하는 과정이 필요하다. 그래서 우선, 세일의 유체-구조 연성해석을 위해 사용 가능한 기술들은 어떤 것들이 있는지 살펴 본 다음, 본 저자가 세일의 유체-구조 연성해석을 위해 사용한 방법과 그 방법의 장점에 관해서 소개하기로 한다.

### 2. 수치 해석 방법

#### 2.1 유한체적법 - MITC 셸 요소법

Trimarchi[1]에서 제안된 방법으로, 요트세일의 유체-구조 연성 해석을 수행함에 있어 유한체적법(finite volume method)과 MITC(mixed tensorial interpolated component) 셸 요소(shell elements)를 함께 사용하는 것을 제안하였다. MITC 셸 요소는 유한요소법(finite elements method)의 한 종류이다.

유체 계산영역을 해석함에 있어서는 편미분방정식인 RANSE를 이산화하는 방법으로 유한체적법이 사용된다. 세일 주변에서는 맴돌이 현상(vortex shedding)과 같은 비정상 현상이 발생 할 뿐만 아니라 큰 유동박리가 발생하는데, 유한체적법은 유동박리나 맴돌이 현상과 같은 비정상 현상을 예측 하는 것이 가능하다.

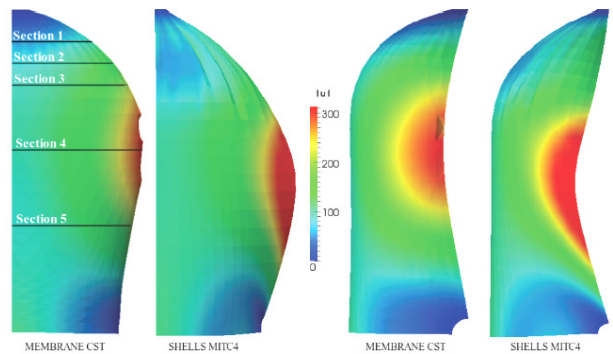


그림 1. 세일의 CST와 MITC 수치해석 결과 비교

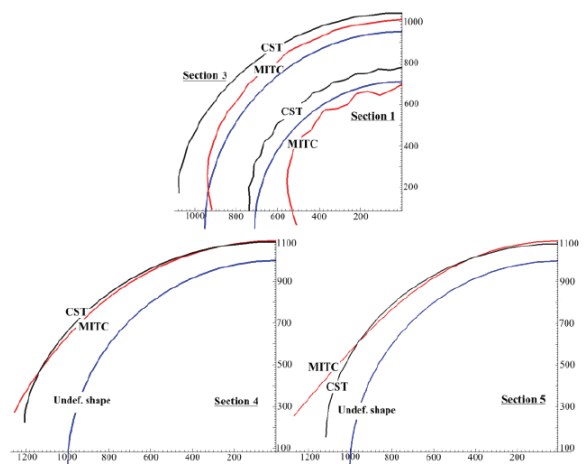


그림 2. 세일 단면의 CST와 MITC를 이용한 결과 비교

구조 계산 영역을 해석함에 있어서는 유한요소법을 사용하는데 이 때, 박막요소(membrane elements)가 아니라 셸 요소를 사용한다. 박막요소가 한 점당 3자유도 (이동만 고려)를 고

려하는데 반해, 셀 요소는 한 점당 5자유도(변위와 접선방향의 회전만 고려, 수직방향의 회전은 무시)를 고려한다.

이 방법은 약한 연성 기법으로 유체-구조가 연성되는 방법이지만, 세일의 재질인 천을 박막이 아니라 셀로 모델링함으로써 상당한 이점을 가진다. 요트 항주 시 바람으로 인해 세일에 발생하는 주름 같은 현상과 관련된 좌굴을 잡아 낼 수 있다. 세일에 주름과 같은 좌굴이 발생하면, 세일에 작용하는 힘도 달라진다. 따라서, 이러한 좌굴을 고려하는 것은 중요하며, 좌굴을 잡아낼 수 있다면 세일에 발생하는 힘을 더 정확히 예측할 수 있다.

## 2.2 와류격자법 - CST 박막요소 법

요트 세일의 유체-구조 연성 해석을 수행함에 있어 바람의 비정상 상태와 세일의 구조적 변형을 모두 고려해야 한다. 유체영역을 계산하기 위해서 와류격자법 (Vortex Lattice Method)을 사용하고 구조영역 계산을 위해서 유한요소법 모델을 사용하는 방법이 있다.

와류격자법은 양력면의 경계층에 와류가 존재하는 외부유동을 계산하는데 적절한 방법이다. 양력면 모델에서, 와류는 양력면을 따라서 입체적인 더블렛 (doublet)분포로 특징지어지며, 맴돌이 현상에 의해 형성된 반류는 소용돌이 발(vortex sheet)로 나타내어진다. 와류격자법은 두 가지 부분으로 구성되는데, 하나는 양력 문제이고 다른 하나는 반류 문제이다. 이 두 가지 문제는 쿠타 조건 (Kutta condition)이 사용되어 커플링 되며, 보통 유동은 비점성으로 가정된다.

구조 영역을 계산하기 위해 유한요소법 중 3차원으로 확장된 CST (Constant Strain Triangles) 박막요소가 사용된다. 큰 변형이 있는 문제의 경우, 구조의 강성은 경험적으로 정의되는 것이 아니라, 각 절점의 변위의 함수로써 계산되어야 한다. 그래서 큰 변형이 있는 문제는 여러 번의 반복과정이 필요하다. CST 박막요소는 간단한 모델인데도 비교적 타당한 값을 도출할 수 있는데, 단, 셀 방정식으로부터 함수를 도출하여야 하며 굽힘 강성을 0으로 부과해야 한다.

본 해석방법은 비점성 가정 하에 세일을 해석하기 위한 방법으로, 점성 자체를 푸는 방법은 아니다. 개략적인 결과로 요트 세일의 설계 시 도움을 줄 수는 있으나, 점성 자체를 푸는 방법은 아니므로, 유동 박리 버블을 표현하기에는 한계가 있으며, 따라서 정확한 해를 도출한다고 단정하기는 어렵다. 요즘은 점성자체를 풀 수 있는 모델을 요구하고 있고 게다가 요트 세일의 경우, 바람으로 인한 구조적 변형이 비선형적이기 때문에 점성 해석 모델이 더욱 절실히 요구되는 실정이다.

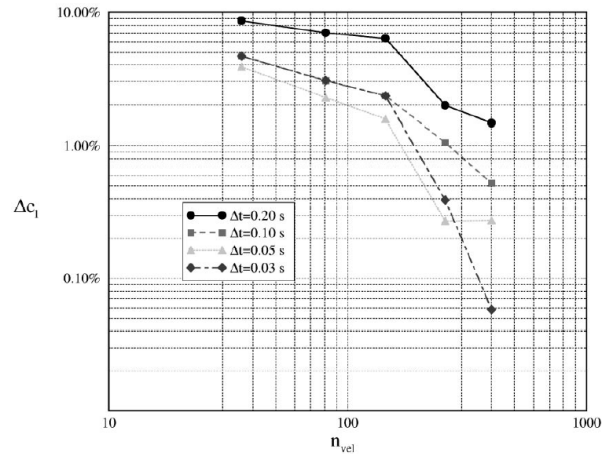


그림 3. 와류 요소 개수에 따른 시간단계별 양력계수의 오차 비교

## 2.3 경계요소법-유한요소법

큰 변형이 발생하는 유체-구조 연성 문제에서 유한체적법을 사용하면 구조물이 변형하면서 격자 질이 나빠 질 수 있다. 하지만 경계요소법 (boundary element method)의 경우, 계산 영역의 경계만 이산화되기 때문에 격자의 질이 나빠지는 문제는 발생하지 않는다. 경계요소법은 대상 영역의 경계면의 물리적 변화만을 미지수로 하여 해석하는 방법이므로 컴퓨터의 용량이 대단히 적게 소요되고, 경계면의 이동 및 변형에 따른 내부 절점의 재편성도 할 필요가 없다는 장점이 있다.

경계요소법과 유한요소법 연성과정을 살펴보면, 구조물의 표면은 사각형의 격자이고, 가우스 점 (Gauss-point)에 의해 다시 구조물의 표면 격자가 나뉘어 조밀한 격자를 얻게 된다. 이렇게 얻어진 격자는 경계요소법의 이산화를 위해 사용된다. 힘은 가우스 점에 주어지며, 인터페이스 면에서 변형된다.

인터페이스 면에서의 일치하는 보간을 최소화하는데 유용하지만 두 개의 해석자 (solver)의 요구에 따라 최적화하지는 않는다. 유한체적법은 유체영역과 구조영역의 인터페이스 면의 어느 정도 적절한 일치가 필요하고 따라서 필수불가결하게 작은 유한 요소가 요구되는 반면에, '경계요소법-유한요소법' 방법은 유체영역과 구조영역의 인터페이스 면이 일치되지 않아도 될 뿐만 아니라 그럼에도 불구하고 더 엄밀한 해를 가진다.

## 3. 유체-구조 연성기법

앞에서 설명한, 수치해석을 수행하기 위해서는 유체와 구

조를 연성시켜야 하는데 연성하기 위한 기법에는 2가지가 있다. 하나는 집적(monolithic) 기법이고 다른 하나는 분할(segregated) 기법이다. 분할 기법은 다시 약한 연성 기법과 강한 연성 기법으로 나뉜다.

### 3.1 집적(monolithic) 기법

집적 기법은 하나의 해석자가 유체와 구조 영역으로부터 얻은 비선형 대수방정식의 완전한 시스템을 전체적으로 동시에 푸는 방법이다.

비선형 대수 방정식을 풀기 위해 계산이 여러 번 반복되기 때문에 안정성이 보장된다. 그렇기 때문에 강하게 연성된 문제뿐만 아니라 매우 약한 유체-구조연성에서도 강력한 기법이다. 하지만 3차원과 같은 문제의 경우에는 효율적인 전제조건들이 제공되어야 하는 데다 메모리를 많이 사용하고 계산시간 또한 오래 걸린다는 단점이 있다.

### 3.2 분할(segregated) 기법 - 약한 연성 기법

분할 기법은 약한 연성 기법과 강한 연성기법으로 분류할 수 있다. 약한 연성 기법은 유체영역과 구조영역이 시간에 맞춰 나아가기 때문에 유체와 구조의 결과 사이에는 항상 시간상 차이가 존재한다. 약한 연성 기법의 과정을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 유동영역에 구조 해석결과로부터 얻어진 구조물의 변형 및 변위를 전달한다.
- (2) 구조물의 변형 및 변위로 인한 경계면의 변화를 유동영역에 반영한다.
- (3) 다음 시간 단계로 넘어가서 다시 유동영역을 계산한다.
- (4) 유동영역에서 계산된 힘을 구조물에 다시 전달한다.
- (5) 다음 시간 단계로 넘어가서 유동영역에서 구한 힘을 구조물에 반영한다.

약한 연성 기법은 계산시간은 짧다는 장점이 있지만 집적 기법과 비교할 때 계산결과의 정확성이 낮다는 단점이 있다.

### 3.3 분할(segregated) 기법 - 강한 연성 기법

분할 기법 중 강한 연성 기법은 유체와 구조 영역에서 동시에 얻어지는 해가 있을 때까지 매 시간단위에 유체와 구조를

계산하는 것을 말한다. 강한 연성 기법의 과정을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 유동영역과 구조영역을 각각 계산한다.
- (2) 유동영역 계산으로 얻은 힘과 구조영역 계산으로 얻은 변형을 서로 교환한다.
- (3) 수렴할 때까지 반복되다가 수렴하면 다음 시간 단계로 넘어간다.

강한 연성 기법은 복잡한 유체-구조연성문제에 적용이 가능하며 계산시간도 집적기법과 비교했을 때 적게 걸린다. 또한, 비교적 정확한 해를 구할 수 있다는 장점이 있다.

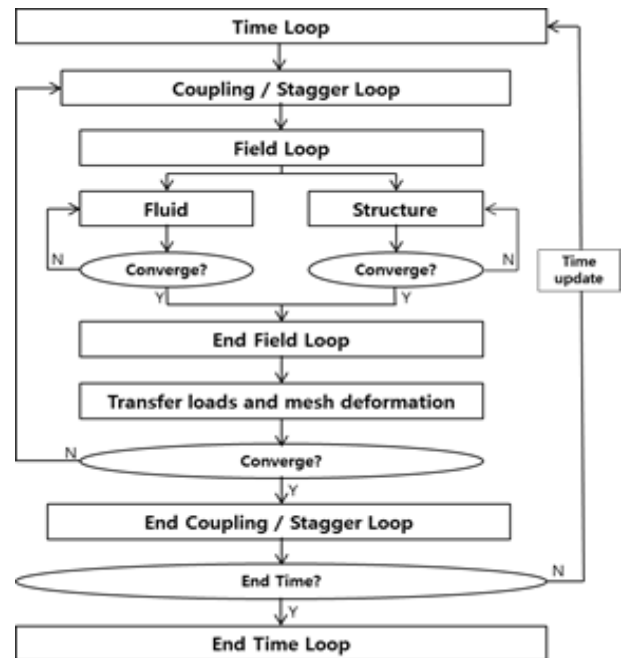


그림 4. 강한 연성 기법 알고리즘

## 4. 요트 세일의 적용

앞에서 설명한 수치해석방법과 유체-구조 연성 기법을 토대로 요트세일 해석 시 사용한 수치해석방법인 '유한체적법-유한요소법' 과 유체-구조 연성 기법인 '강한 연성 기법'을 보다 자세히 소개하기로 한다.

### 4.1 유한체적법 (FVM) - 유한요소법 (FEM)

요트세일의 유체-구조 연성 문제를 해석함에 있어, 유한체적법과 유한요소법을 사용하였다.

Trimarchi[1] 에서 제안된 '유한체적법 - MITC 셀 요소법'은 세일의 주름을 잘 잡아내어 세일에 작용하는 힘을 더 정확히 예측가능하다는 장점을 가진다. 그러나 세일 천에 작용하는 힘을 예측하는데 있어서 주름이 지배적인 경우는 요트가 풍상으로 범주할 때 보다는 풍하로 범주할 때이다. 본 해석에서는 풍상 범주 시 요트세일의 유체-구조 연성을 해석했기 때문에 '유한체적법 - MITC 셀 요소법' 으로 해석한다고 하더라도 다른 방법과 비교해 보았을 때, 훨씬 더 타당한 결론을 얻는다고 보기 어렵다. 게다가 이 방법은 약한 연성 기법으로 연성이 되므로 강한 연성 기법을 필요로 하는 본 해석에는 사실상 적용키가 어렵다는 결론을 내릴 수 있다.

포텐셜 코드를 이용한 '와류격자법 - CST 박막요소법'은 세일의 유체-구조 연성 해석 시 초기에 사용했던 방법으로, 비선형적 변형이 유발되는 요트 세일의 유동 박리로 인해 발생하는 버블을 잡는 데에 한계가 있다.

'경계요소법 - 유한요소법'의 경우, 전체 행렬에 대한 계산을 필요로 하기 때문에 해석대상이 커질 경우 매우 큰 계산량과 메모리가 요구된다. 집세일, 마스트, 메인세일을 모두 포함하는 요트 세일 해석 시에는 적절한 방법이라고는 할 수 없고, 아주 간단한 해석대상에 적용이 가능하다.

'유한체적법 - 유한요소법'은 유체영역 계산을 위해서 유한체적법을, 구조영역 계산을 위해서 유한요소법을 사용하는데, 까다로운 형상을 더 정확하고 강건하고 효율적으로 모델링 가능하기 때문에 타당한 결과를 얻을 수 있다. 게다가 서로 다른 컴퓨터로 유체영역과 구조영역을 각각 계산한 후 그 결과를 서로 상호교환이 가능하기 때문에 더 적은 계산시간이 걸린다. 그러므로 유한체적법-유한요소법은 세일의 유체-구조 연성해석을 수행할 경우, 가장 효율적인 방법이라 여겨지며 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다.

#### 4.2 강한 연성 기법

세일링 요트는 바람이 주된 동력원으로서, 요트 세일 문제의 경우, 비선형 연성 문제이다. 게다가 세일은 굉장히 부드러운 구조물로서, 일개 천으로 만들어진다. 그렇기 때문에 세일은 조그만 힘에도 큰 변형이 유발된다. 세일의 변형은 주위 유동의 변화를 유발하기 때문에 세일의 유체-구조 연성 문제는 비정상 문제라고 할 수 있다. 따라서, 세일의 유체-구조 연성 문제는 굉장히 복잡한 유체-구조 연성 문제로 분류되며, 이는 앞에서 언급했듯, 강한 연성 기법으로 해석이 가능하다. 물론, 집적기법을 사용하면 가장 정확한 해를 얻을 수 있겠지

만, 계산 시간이 오래 걸리는데다가 메모리를 많이 사용한다는 단점을 생각하면 세일 변형을 해석 하는 데는 비효율적이라 할 수 있다. 또한, 복잡한 유체-구조 연성 문제인 세일 변형 해석에서 약한 연성 기법으로 타당한 결론을 얻기는 어렵기 때문에 이 또한 타당한 방법이라 여기기는 어렵다. 특히, 세일은 유체-구조 연성 문제에서 큰 변형이 일어나기 때문에 수치적 안정성을 확보하기 위해서 한 시간 단계 당 여러 번의 반복계산이 요구된다. 따라서 강한 연성 기법이 가장 적절한 방법이라 여겨지며 해석 수행에 있어 이 방법을 사용하였다.

### 5. 결론

요트 세일은 바람으로 인해 그 형상이 변하고 그에 따라 그 주위 유동과 유체력 또한 다시 변한다. 요트 세일의 양항력 변화는 요트 세일의 변형과 밀접한 관련이 있으며 이는 요트의 자세를 변화시켜 추진 및 항해 성능에도 영향을 주기 때문에 요트 세일 해석을 수행할 경우 세일의 변형을 고려해야 한다. 세일의 변형을 고려하기 위해서 유체-구조 연성을 위한 수치해석 방법과 유체-구조 연성 기법을 살펴보았다. 세일은 비선형적 변형이 유발되고 계산 시 사용되는 메모리나 계산시간을 고려해 보았을 때, '유한체적법-유한요소법' 수치해석 기법이 적절하며, 한 시간 단계에서 적절한 안정성을 확보하기 위해서 여러 번의 반복 계산이 필요하므로, 유한체적법과 유한요소법을 강한 연성 기법으로 연성할 필요가 있다고 판단된다.

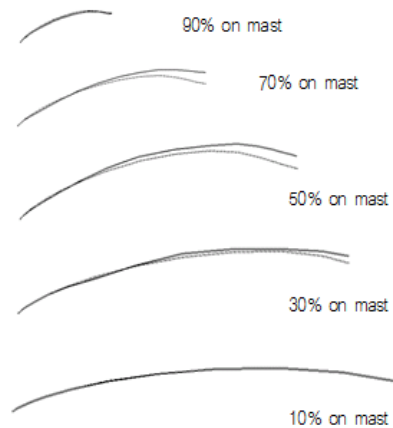


그림 5. 변형 전과 후의 메인세일의 캠버 라인

요트 세일의 해석 결과는 그림 5, 6과 같은데, 전체적으로 세

일이 부드럽게 변화하는 양상을 보이는 것으로 보아, 이는 타당한 결과라고 생각할 수 있다. 따라서 계산 방법이 적절하다는 결론을 얻을 수 있다.

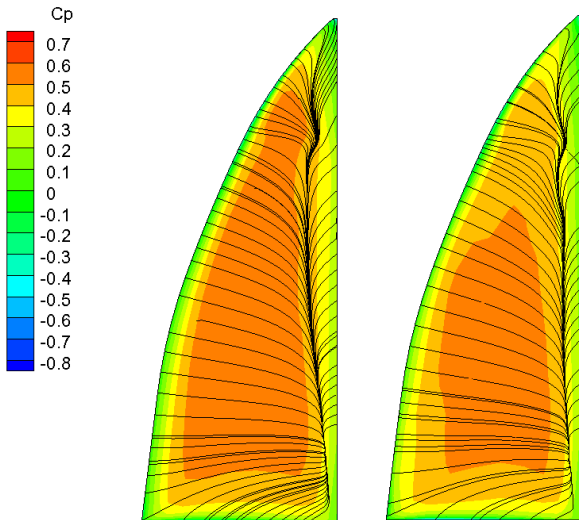


그림 6. 변형 전과 후의 메인세일의 압력과 유선

## 참고 문헌

Trimarchi, D., Turnock, R., & Taunton D.J., 'The Use Of Shell Elements To Capture Sail Wrinkles, And Their Influence On Aerodynamic Loads', Proc. 2nd. Intl. Conference on Innovations in High Performance Sailing Yachts, Lorient, 2010.

Schoop, H. & Bessert, N., 'Instationary Aeroelastic Computation of Yacht Sails', Int. J. Numer. Meth. in Engineering, Vol 52, 2001.

Augier, B., Bot, P., Hauville, F., Durand, M., 'Dynamic Behaviour of a Flexible Yacht Sail Plan', Ocean Engineering, 66:32-43, 2013.

Bergsma, F., Moerke N., Zaaijer S., Hoeijmakers H., 'Development of a Computational Fluid-Structure Interaction method for yacht sails', The Third International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Lorient, France, 27th June 2013.

Jean-Marc, V., Pascal, D.V., Charles, H., Benoit, L., 2006, Strong Coupling Algorithm to Solve Fluid-Structure-

Interaction Problems with a Staggered Approach, The ESA Flow-SCHyp research project.

Lee, H.B., Rhee, S.H., Yoo, J.H., 2011, Analysis of a Two-Dimensional Section of Deforming Yacht Sails, Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol.48, No.4, pp.308-316.

Park, S.R., Yoo, J. and Song, C.Y., 2011, Fluid-Structure Interaction Analysis of 30ft Yacht Sail deformation, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, pp.610-617.

Trimarchi, D. Turnock, S. Chapelle, D. & Taunton, D., 2009, Fluid-structure interaction of an isotropic thin composite materials for application to sail aerodynamics of a yacht in waves, 12th Numerical Towing Tank Symposium, Cortona, Italy.

Heil, M., Hazel, A.L. & Boyle, J., 2008, Solvers for large-displacement fluid-structure interaction problems: segregated versus monolithic approaches, Computational Mechanics, 43, pp.91-101.

### 박미연



- 1988년생
- 2011년 부경대학교 조선해양시스템공학과 졸업
- 현 재 : 서울대학교 조선해양공학과 석사과정
- 관심분야 : 전산유체역학
- 연 락 처 : 02-880-7333
- E - mail : pmy44@snu.ac.kr

### 이희범



- 1983년생
- 2011년 서울대학교 조선해양공학 석사
- 현 재 : 서울대학교 조선해양공학과 박사과정
- 관심분야 : 전산유체역학
- 연 락 처 : 02-880-7333
- E - mail : claid1@snu.ac.kr

### 이신형



- 1968년생
- 1998년 아이오와대학교 기계공학 박사
- 현 재 : 서울대학교 교수
- 관심분야 : 선박저항추진/ 전산유체역학
- 연 락 처 : 02-880-7333
- E - mail : shr@snu.ac.kr