



## 선박의 유동해석 문제에 대한 중첩격자기법(Suggar++)의 활용

Application of the Overset Grid Scheme (Suggar++) for Flow Analysis around a Ship

---

저자 (Authors)	김유철, 김윤식, 김진, 김광수 Yoo-Chul Kim, Yoonsik Kim, Jin Kim, Kwang-Soo Kim
출처 (Source)	<a href="#">대한조선학회 논문집 56(1)</a> , 2019.2, 47-57(11 pages) <a href="#">Journal of the Society of Naval Architects of Korea 56(1)</a> , 2019.2, 47-57(11 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">대한조선학회</a> The Society of Naval Architects of Korea
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610882">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610882</a>
APA Style	김유철, 김윤식, 김진, 김광수 (2019). 선박의 유동해석 문제에 대한 중첩격자기법(Suggar++)의 활용. <a href="#">대한조선학회 논문집</a> , 56(1), 47-57
이용정보 (Accessed)	누리미디어 121.125.221.*** 2019/07/18 13:58 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 선박의 유동해석 문제에 대한 중첩격자기법(Suggar++)의 활용

김유철·김윤식·김진·김광수<sup>†</sup>  
선박해양플랜트연구소

## Application of the Overset Grid Scheme (Suggar++) for Flow Analysis around a Ship

Yoo-Chul Kim·Yoonsik Kim·Jin Kim·Kwang-Soo Kim<sup>†</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recent CFD solvers in engineering have to treat geometrically complex domains and moving body problems. In ship hydrodynamics, flow around the stern and ship motions in waves are examples of such cases mentioned before. The unstructured grid scheme is successfully applied for these problems, but it has weakness of inefficient memory usage and intensive computational time as compared to the structured grid method. Overset grid scheme is one of the alternatives for structured grid system taking advantage of fast and memory efficiency. Overset grid scheme is especially useful for moving body problem because there is no need to re-mesh around the body. In this paper, we adopted the Suggar++, the grid connectivity and interpolation utility for the overlapping grid, to WAVIS which is the in-house flow solver of KRISO. Then we introduced some applications using the overset grid method for flow analysis around the ships. The computed results show that WAVIS with Suggar++ is practically feasible and has an advantages for moving geometry cases.

**Keywords** : Overset grid(중첩격자), WAVIS(WAVIS), Suggar++(Suggar++), CFD(수치유동해석)

### 1. 서론

과거 선박 및 프로펠러에 대한 유동 해석은 주로 포텐셜 기반의 패널법, 양력면 이론 등이 주를 이루고 있었으나, 컴퓨팅 성능의 비약적인 발전과 병렬 계산 기법의 보급에 힘입어 현재에는 소위 Computational Fluid Dynamics (CFD)라 불리는 점성유동 해석 방법이 일반적으로 되어가는 추세이다. 잘 알려진 바와 같이 CFD는 유동장을 격자(grid)라 불리는 미소 셀(cell)로 이산화 하여 이에 따른 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 다루는 방법이기 때문에 격자 생성의 중요성이 매우 크다. 격자의 종류는 크게 정렬 격자(structured grid)와 비정렬 격자(unstructured grid)로 나눌 수 있다. 비정렬 격자는 각 셀의 인덱스와 주변 격자의 연결성을 모두 정의해서 저장하고 참조해야 하기 때문에 계산 시간에서의 불리한 점을 갖고 있지만, 복잡한 물체 주변의 격자 생성의 자유도가 높고, 최근에는 정도 향상과 수렴성 향상을

위한 방법들이 적용되면서 상용 코드들을 중심으로 적극적으로 활용되고 있다. 정렬 격자는 규칙적인 연결성이 특징으로 주변 격자가 배열의 인덱스에 의해서 정의되기 때문에 저장 공간의 효율성이 높고 비정렬 격자에 비해 계산 시간 및 수렴성에서 이점을 갖는다. 하지만 국부적인 조밀한 격자 생성이 전체 격자수에 영향을 미치고, 격자의 위상(topology)을 유지하면서 선미 부분의 복잡한 부가물 등을 정의하기가 매우 번거롭다. 이러한 이유로 정렬 격자를 사용하는 코드에서는 가상경계법(immersed boundary method)이나 중첩격자법(overset grid scheme) 등을 적용하고 있다. 중첩격자법은 복잡한 형상의 물체에 대한 적용 뿐 아니라, 선박의 조종, 운동 문제와 같은 상대 운동이 존재하는 문제에 그 이점이 크며, 기존 코드에 접목하기 비교적 쉬운 장점을 갖고 있다. 정렬격자와 Finite Difference Method (FDM)을 이용하는 CFDShip-Iowa는 중첩격자 기법을 활용하여 많은 연구 결과를 발표하고 있다(Carrica et al., 2007, Castiglione et

al., 2014, He et al., 2015). 선박해양플랜트연구소(KRISO)는 2007년에 독자 개발 중첩격자기법을 사용하여 사항상태의 탱커 선에 대한 유동해석(Kim et al., 2007b), 타(rudder)를 고려한 선체-프로펠러-타 상호작용 해석(Kim et al., 2007a, Kim et al., 2008)을 수행한 바 있으나, 타와 같은 단순한 형태에 적용한 사례에 그치고 있다.

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소가 개발하여 국내 선박 유동 수치해석 분야에서 널리 활용되고 있는 정렬 격자 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 코드인 WAVIS(Kim et al., 2005)에 중첩격자 기법의 하나인 Suggar++를 적용하여 다양한 선박 주위의 유동해석 문제에 적용한 결과를 보인다.

## 2. 중첩격자기법

### 2.1 개요 및 특성

선박과 같이 복잡한 형상의 3차원 물체주위에 정렬격자를 생성하기 위해서는 일반적으로 다중블록 격자계(multi-block grid system)를 이용한다. 그 이유는 단일블록 격자계를 이용하여 외형이 복잡한 형상주위에 양질의 격자계를 효과적으로 구성하기 매우 어렵기 때문이다. Fig. 1은 단순한 실린더 주위 유동장 해석을 위해 다중블록격자(3블록)를 생성한 것을 나타낸 것이다. 다중블록 격자계는 인접한 블록과 공유하는 경계에서 동일한 점을 유지해야 한다('경계점 일치조건'). 이를 통해 인접 격자간 자료(유동변수 등) 전달 과정에서 별도의 변환, 내삽(interpolation) 등의 과정을 거치지 않고 직접 전달함으로써 해의 정확도를 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 '경계점 일치조건'은 한 블록의 격자를 수정하는 경우 인접한 블록의 격자도 직접적으로 영향을 받아, 같이 변화하는 특성을 갖는다. 즉, 특정부분에만 격자점을 밀집시키거나 격자분포를 유연하게 조정하기 어려운 단점이 있고 부분적으로 복잡한 형상표현, 격자밀집 등이 있는 경우 전체적인 격자점의 수가 증가하는 단점이 있다. 또한 실린더 형상이 시간에 따라 운동하는 경우, 매 시간간격마다 격자를 재생성(remeshing) 해야 한다. 이러한 격자 재생성 기법은 복잡한 3차원 형상에는 일반적으로 적용하기 매우 곤란하다. Fig. 2는 실린더 주위 유동장 해석을 위한 중첩격자계를 생성한 예를 나타낸 것이다. 중첩격자계는 각 부분의 격자계 생성과정에서 다른 부분의 격자계에 직접적으로 구속되지 않고 비교적 자유롭게 격자를 생성할 수 있는 장점이 있다. 실린더가 없는 배경 격자계(Grid-B)와 실린더 주위 격자(Grid-C)를 각각 따로 생성하여 겹친 격자계(overlap grid system)를 생성하게 된다.

이 과정에서 두 격자계는 다중블록 격자계와 다른 독특한 특성을 가지며, 유동해석을 위한 별도의 처리가 필요하다. 먼저 배경격자(Grid-B)의 일부 격자점들은 실린더 고체경계 내부에 위치하게 된다. 즉 유동장 외부에 존재하는 격자점들이 포함되어 있다. 이러한 점들을 '홀점(hole points) 또는 '제거점'

(out points)이라고 하고 별도의 처리가 요구된다. 홀점을 제거하는 과정에서 (해석의 정확도를 위해) 고체내부점만 제거하지 않고 추가적으로 고체 내부점 주위의 일부 점들도 같이 제거할 수 있다.

Fig. 2의 배경격자에서 홀점은 Fig. 3의 청색점으로 나타난 것이다. Fig. 3의 청색점들은 배경격자 해석과정에서 제거되는 점들(홀점)이다. 즉, 해석을 위해 고체 내부점들처럼 처리되어 계산결과 갱신(update) 과정에서 배제된다. 배경격자 해석과정에는 홀점 주위에 추가로 (각 인덱스 방향으로) 격자층이 필요하다. 이러한 점들은 배경격자 해석과정에 실린더가 있음으로 인한 유동 교란(perturbation)이 발생되어야 하지만 물체가 없기 때문에 그 효과를 직접 반영하지 못하고 간접적으로 반영하기 위해 고안된 것이다. 즉, 간접적인 경계조건 적용을 위해 고안된 것이라 할 수 있다. 이러한 점들을 '프린지점(fringe points)'이라 부른다. 프린지점은 홀점으로 구성된 영역의 경계에 있기 때문에 붙여진 이름이다. 프린지 점들은 홀점이 없는 부격자계(Grid-C)에서도 존재할 수 있다. 이런 경우 각 부격자계의 경계 주변에 위치한다. 프린지점들은 소속된 각 부격자에서 경계조건이 적용되는 점과 같은 역할을 하고, 다른 부격자간의 변수들을

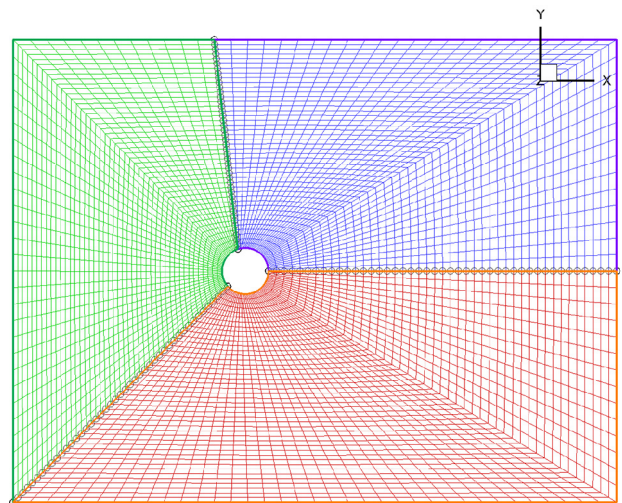


Fig. 1 Multi-block structured grid around a cylinder

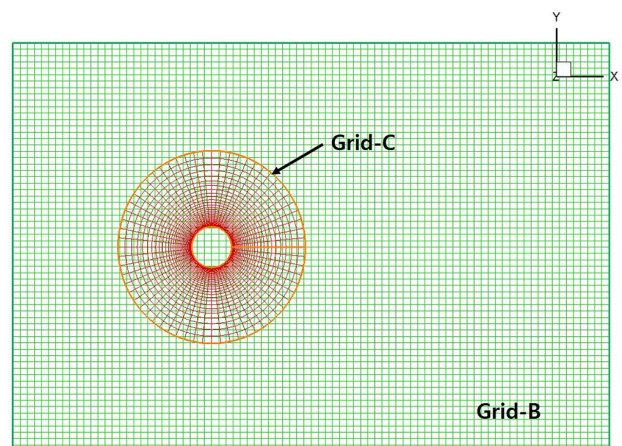


Fig. 2 Overset grid around a cylinder

구속(couple)시키는 역할을 함으로써 전체 유동해석결과가 하나의 값으로 수렴할 수 있도록 하는 역할을 한다. 실린더 주위격자(Grid-C)에 해당하는 프린지점들을 Fig. 4에 보인다.

프린지점들은 짝이 되는 부격자계의 유동 변수값을 전달 받는데, 변수값 전달과정에는 격자점들의 위치가 정확히 일치하지 않기 때문에 다중블록격자계처럼 일대일 전달이 되지 않는다. 예를 들어, Fig. 4에 나타난 실린더 주변격자(Grid-C)의 프린지점들(fringe-C) 각각은 배경격자계(Grid-B)에 속한 주변 격자점에 저장된 유동변수 값들을 이용하여 내삽된 값을 전달받는다. 이와 같이 Grid-B에서 fringe-C로 값을 전달하는 일부 점들을 기부자점(donor cell, 'doner-B')이라 한다. 이러한 기부자점들은 대체로 짝이 되는 프린지점을 포함하는 8개(2차원: 4개)의 점들(또는 인근의 점들)로 구성된다. 내삽에 사용되는 기법은 bi-linear(2차원), tri-linear(3차원), 또는 고차 내삽법(Heo et al., 2015)을 적용할 수 있으며 본 연구에서는 tri-linear 방법을 사용한다.

Fig. 5는 실린더 주위 격자계(Grid-C)의 프린지 점들(fringe-C)에 대해 데이터를 제공해주는 기부자점(doner-B)들로 구성된 인근 cell들을 나타낸 것이며, Fig. 6은 fringe-B에 대해 doner-C들을 나타낸 것이다.

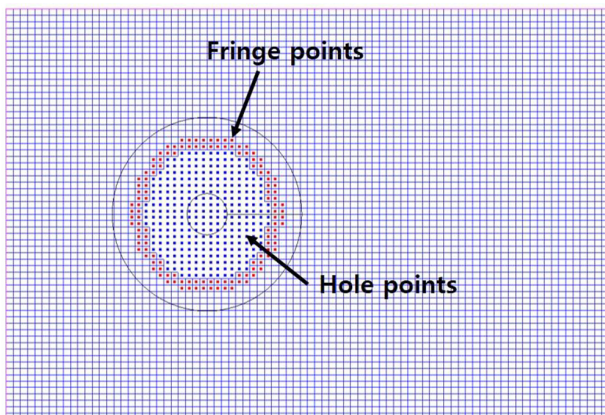


Fig. 3 Hole points and fringe points of an background grid (Grid-B)

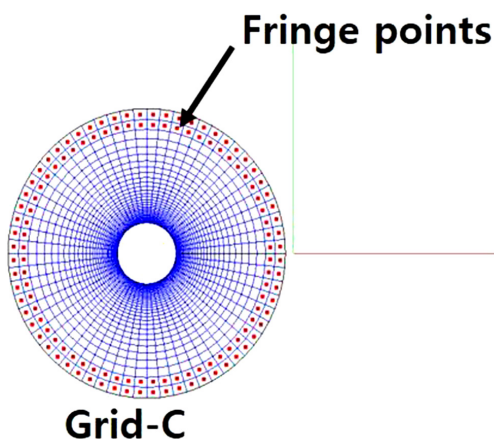


Fig. 4 Sub grid (Grid-C) and its fringe points

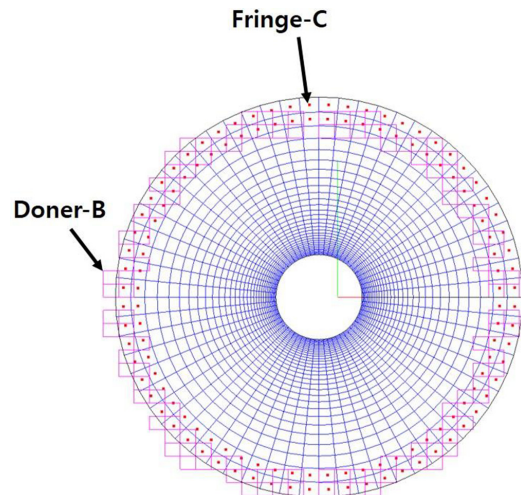


Fig. 5 Fringe-C of the sub grid and doner-B of the background grid

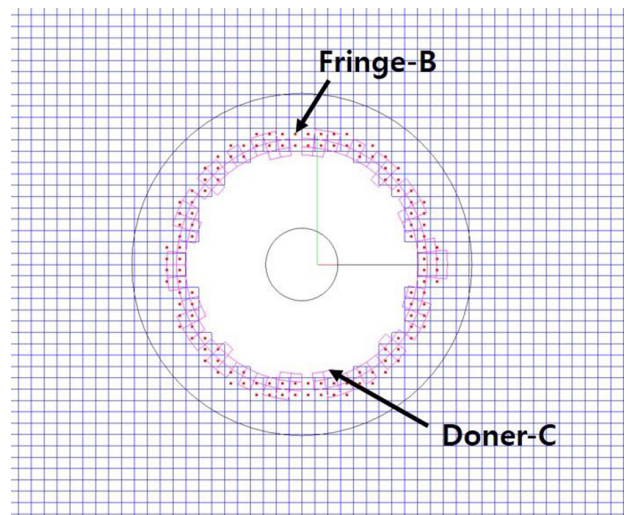


Fig. 6 Fringe-B of the background grid and doner-C of the sub grid

위와 같이 프린지-기부자간 짝이 구성되어야 하며, 기부자점들은 제3의 부격자계에서 데이터를 받아야하는 프린지점이 되어서는 안되고, 정상적인 유동계산점(정상점)이어야 한다. 만일 기부자점들 중 일부 또는 전부가 정상점이 아닌 경우(즉, 자신도 프린지점 또는 홀점인 경우)는 짝이 되는 프린지점은 정상적인 짝을 구성하지 못하고 '고아점'(orphan cell)이 된다. 정상적인 유동해석을 위해서는 고아점이 하나도 존재하지 않아야 한다. 고아점이 없는 격자계를 구성하기 위해서는 두 부격자계간 격자의 크기 차이가 지나치게 크지 않도록 하는 유의가 필요하다.

이상과 같이 중첩격자기법을 도입하는 경우 각 부격자계들은 짝이 되는 부격자계를 찾고, 홀점, 프린지점, 그리고 기부자점으로 구성된 별도의 정보를 필요로 한다. 이러한 정보를 통해 각 부격자계간, 프린지-기부자간 서로 연계되고 유동장 계산과정에 중간 계산결과 값들을 서로 전달하게 된다. 이러한 정보들을 영역연결정보(Domain Connectivity Information, DCI)라 한다. 중첩격자기법의 적용을 위해서는 DCI데이터의 구성이 전체 해

석 기법의 성패를 좌우하는 가장 중요한 데이터라 할 수 있다. 위 내용을 요약하여 중첩격자기법을 이용하는 경우 주요 용어를 정리하면 다음과 같다.

정상점 (Normal points)	수치해석과정에서 정상적으로 다루어지는 점들.
홀점 (Hole points)	다른 부격자계의 고체경계 내부에 포함되어 소속 부격자계의 유동계산 과정에서는 배제되는 점
프린지점 (Fringe points)	홀점 또는 경계 주변에 위치하는 점들로서 다른 부격자계의 기부자점들로부터 자료를 전달받는 점
기부자점 (Doner points)	다른 부격자계에 소속되어 있는 프린지점들에게 데이터(유동변수 값 등)를 제공해주는 점들. 대체로 정상점들로 구성되고, 프린지점 1개에 대부분 8개(3차원)의 기부자점이 짝지어짐. 벽면 근처에 있는 프린지점의 경우 8개보다 적을 수도 있음
영역연결정보 (DCI, Domain Connectivity Information)	프린지-기부자 간 연결 관계를 구성하는 정보로서 각 점들의 번호, 소속 격자계 번호(각 소속 부격자계가 다중블록으로 구성되어 있는 경우 블록 번호), 내삽과정에서 사용될 가중치(weighting factor) 또는 계수값 등으로 구성된 일련의 데이터 집단

이상과 같이 구해진 DCI데이터를 이용하여 유동해석을 수행하는 경우 해석과정에 일부 수정이 필요하다. 유동해석과정에서 수정할 부분은 크게 두 부분을 들 수 있다.

먼저 각 격자점(또는 cell)들이 정상점인지 홀점이나 프린지점인지 구분할 수 있는 별도의 정보가 필요하다. 통상 이러한 표시자를 'iblack'라 부른다. 각 격자점마다 iblack를 지정하고 값을 iblack=1, 0 등으로 구분함으로써 정상점(1), 프린지점(0), 홀점(0) 등으로 구분하여 해석과정에 적용한다. 이러한 iblack는 수치해석 과정에서 차분방정식 해석을 위한 선형연립방정식 계산 과정에 적용되며, 나머지 모든 부분은 다중블록격자를 이용한 해석때와 동일하다. 차분화된 지배방정식을 대수방정식 형태로 나타내면 다음과 같이 단순한 형태로 표현될 수 있다.

$$A_P \phi_P + \sum_l A_l \phi_l = Q_P \quad (1)$$

이때, 각 계수행렬과 우변항에 iblack를 곱하여 각 항들이 활성(active:1), 비활성(inactive:0) 값이 되도록 설정할 수 있다.

$$i_{bP} A_P \phi_P + \sum_l i_{bl} A_l \phi_l = i_{bP} Q_P \quad (2)$$

$$i_b = \begin{cases} 1 & (normal) \\ 0 & (hole \text{ or } fringe) \end{cases}$$

이와 같이 수정되면, 계산과정에서 홀점이나 프린지점들은 비활성화되고, 시간전진을 통해 값이 갱신되지 않고 그대로 있으며, 주위 격자에도 영향이 없어진다. 그리고, 경계조건 적용과정에서 프린지점의 값( $\phi^f$ )은 기부자점들의 값( $\phi^d$ )들로서

내삽된다.

$$\phi^f = \sum_k^{N_{doner}} w_k \phi_k^d \quad (3)$$

여기서, 기부자점의 수( $N_{doner}$ ), 각 기부자점에 곱해지는 가중치( $w_k$ ) 및 기부자점의 위치, 속해있는 블록 등은 중첩격자 검색 과정에서 계산하여 제공된다.

## 2.2 중첩격자 검색 프로그램

DCI 데이터를 구성하는 과정은 매우 복잡한 과정을 거치게 된다. 이 과정은 각 부격자계가 다른 격자계와 어떻게 만나서 겹치는지, 어떤 점들이 고체경계 내에 속하는 홀점들인지, 프린지 점들에 데이터를 제공해줄 수 있는 기부자점들은 어떻게 구성되어야 하는지 등을 검색하는 알고리즘이 가장 중요한 과정이다. 특히, 정형화되지 않은 일반적인 형상과 격자계에 대해 강건한 검색 알고리즘을 적용해야만 많은 경우 고아점이 없는 검색결과(DCI 데이터)를 제공해 줄 수 있다.

DCI데이터 구성을 위해 중첩격자 검색을 수행하는 부분에 대한 연구는 1980년대부터 개발되어 왔다. 두 물체 이상이 있는 대상체가 상대운동이 있는 경우를 해석하고자 하는 경우 중첩 격자기법이 주로 활용되었고, 미국을 중심으로 여러 코드들이 서로 다른 검색 알고리즘을 적용하여 개발되어 왔다. 대표적인 프로그램들이 Suggar++ (Noack, 2009), Pegasus (Suhs et al., 2002), Beggar (Prewitt et al., 2002), Overflow (Nichols et al., 2006)등을 들 수 있다. 이러한 프로그램들은 유동해석과 중첩격자 검색기능을 같이 하는 경우도 있고 중첩격자 검색기능만 수행하여 해석코드에 그 결과를 제공해 주는 경우도 있다. 후자에 해당하는 코드로는 Suggar++, Pegasus 등을 들 수 있으며, 해당 프로그램들은 국제적으로 상용 시판, 지원되고 있다.

유동해석부분과 분리되어 독립적으로 구동되는 중첩격자 프로그램은 특정 유동해석코드 뿐만 아니라 불특정 다수의 유동해석 코드들의 다양한 요구조건들을 지원하기 위해 다양한 기능과 옵션을 지원하고, 자체적으로 완성된 입출력 양식을 갖는다. 따라서 초기 사용자 입장에서 상대적으로 복잡하고 많은 사용자 입력 데이터를 만들어야 하는 단점이 있다. 다양한 유동해석 코드들과 연계되어 구동됨으로 인해 비교적 단기간 내에 다양한 형상/격자 등에 대한 성능테스트가 수행될 수 있고 이를 통해 프로그램의 강건성(robustness)을 향상시킬 수 있는 점, 다양한 사용자로부터 피드백 받음으로써 여러 요구사항을 반영하고 프로그램을 개선시키기 유리한 점은 큰 장점으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 많은 사용자들에 의해 검증된 프로그램들 중에 Suggar++를 선택하여 중첩격자기법연구에 활용하도록 하였다. 이를 위해 WAVIS의 각 부분들을 개선하는 연구를 수행하고 해석수행을 통해 코드에 대한 검증 등을 수행하였다.

### 2.3 Suggar++의 WAVIS에의 접목

Suggar++는 앞서 설명한 바와 같이 중첩격자 검색 기능만을 수행하기 때문에 본 연구에서 사용하는 유동해석 코드인 WAVIS와 연결하는 작업이 필요하다. Suggar++를 실행하기 위한 입력 데이터 양식은 XML(eXtensible Markup Language) 양식으로 작성된 텍스트 형태의 입력파일만 지원한다. 복잡한 형상에 대한 중첩격자계산을 위해서는 매우 긴 입력파일을 오류 없이 입력해야만 한다. 일반적으로 선박주위 유동장 해석을 위해 수십 개의 블록으로 분할해서 병렬계산을 수행하는 환경을 감안하면 한 번의 Suggar++ 실행을 위해 입력파일 작성과정이 매우 불편한 문제점이 있다. 뿐만 아니라 복잡한 형상의 경우 초기에 생성된 격자로 Suggar++를 실행했을 때 고아점이 발생하는 등 해석에 바로 활용되지 못하고 격자를 수정해야 하는 경우들이 빈번하게 발생할 수 있다. 이와 같은 경우 격자를 수정할 때마다 위와 같은 입력파일을 수정해야 하는 어려움이 있다. Suggar++는 불특정 다수의 유동해석 코드와 연계할 수 있도록 설계되었기 때문에 기존의 WAVIS가 사용하는 입력 방식과 호환될 수 있는 부분은 별도로 작성되어야 한다. 본 연구에서는 입력파일 작성과정의 불편을 줄이기 위해 기존 WAVIS의 입력데이터(격자 및 경계조건파일)만으로 Suggar++실행을 위한 입력 파일(XML 파일)을 자동으로 생성해주는 모듈을 별도로 작성하였다. 그리고 Suggar++을 실행하여 나온 DCI데이터 파일도 WAVIS가 인식할 수 있는 단순한 형태로 변환하는 모듈도 별도로 작성하였다(Fig. 7).

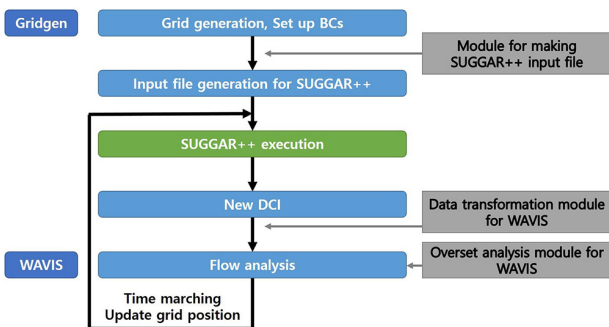


Fig. 7 Developed modules for adopting Suggar++ to WAVIS

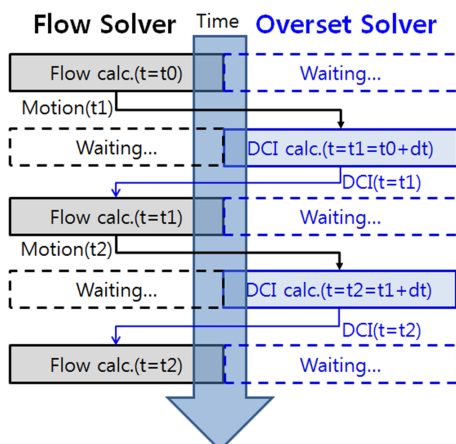


Fig. 8 Process of the unsteady analysis using Suggar++

Suggar++는 라이브러리 형태로도 활용이 가능하다. 매 시간 간격마다 격자의 운동이 있는 경우는 계속해서 DCI데이터를 다시 계산하여 유동해석에 적용해야 한다. 이와 같은 경우 처음 한 번 실행하는 경우와 달리 유동계산과정과 직접적으로 연계되어 서로 데이터를 주고받으며 계산을 수행하기 위해서는 WAVIS와 라이브러리 형태로 링크(link)되어 실행 될 수 있도록 하였다. Fig. 8은 동적 중첩격자기법을 이용한 비정상 유동해석 절차를 보인다.

## 3. 중첩격자기법을 활용한 유동 해석

### 3.1 중첩격자기법에 의한 오차 검토

중첩격자기법을 적용한 WAVIS를 이용하여 기존의 다중블록 격자 해석결과와 비교하여 그 정밀도(accuracy)를 비교, 검토할 필요가 있다. 복잡한 형상 주위 유동장 해석결과에는 다양한 요소들이 해석결과 정확도에 영향을 미칠 수 있기 때문에 가급적 단순한 형상을 가진 문제를 선택하여 다중블록격자를 이용한 결과와 그 결과를 비교하고, 격자의 밀도가 높아짐에 따른 수치오차의 변화를 검토하였다. 해석대상은 2차원 비압축성 유동장 해석에 많이 이용되고 있는 Lid-driven Cavity 문제(Burggraf, 1966)를 다중블록격자와 중첩격자를 이용하여 해석하고 그 결과를 비교, 분석하였다. Fig. 9에서  $H=L=1$ 을 적용하였으며,  $Re=1000$  조건에 대해서 해석을 수행하였다. 2차원 캐비티 형상에 다중블록 격자계를 생성하여 WAVIS를 이용하여 해석하고, 그 결과를 중첩격자계를 이용한 결과와 비교하였다. 중첩격자는 Fig. 10과 같이 다중블록 격자에서 가운데 부분을 제거하고(Grid 1), 별도의 사각형 격자(Grid 2)블록을 중첩시켜서 구성하였다. Fig. 11은 u 속도분포를, Fig. 12는 v 속도분포 해석결과를 격자의 밀도 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 Overset-A-B는 중첩격자 해석 결과 내부격자밀도(A)-외부격자 밀도(B)를 의미한다. 숫자는 격자의 수를 의미하는 것이 아니고

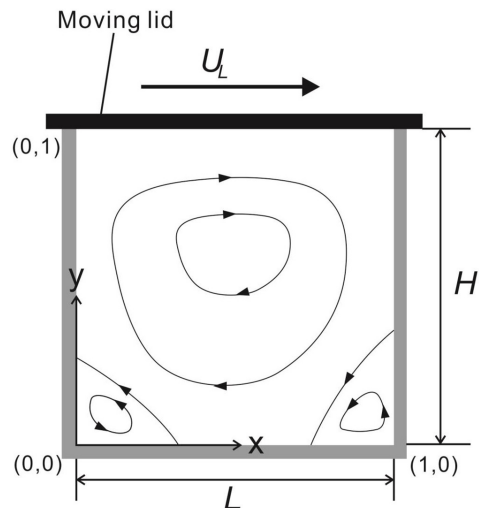


Fig. 9 Lid-driven cavity problem

다중블록격자에서 사용한 격자의 밀도와 동일한 밀도를 나타낸다. 즉 내부격자밀도 128은 다중블록격자 중 128x128의 격자와 동일한 밀도로 내부중첩격자를 구성한 것을 의미한다. 중첩격자를 사용한 결과가 다중블록격자를 사용한 결과와 거의 유사한 결과를 주는 것을 확인할 수 있다. Table 1은 Fig. 11의 u 속도의

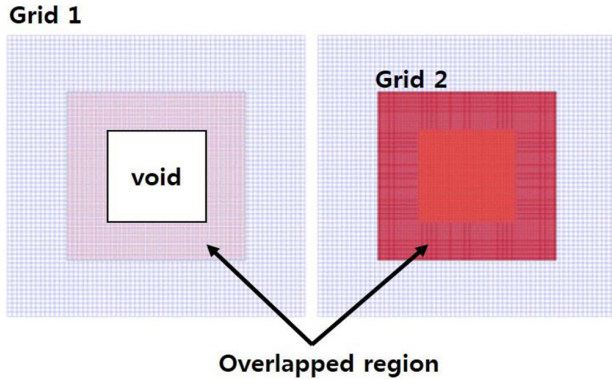


Fig. 10 Constitution of the overset grid system

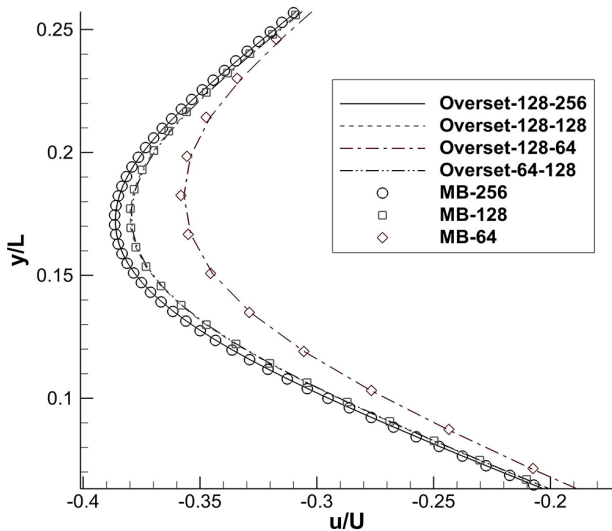


Fig. 11 Vertical u distribution at x/L=0.5

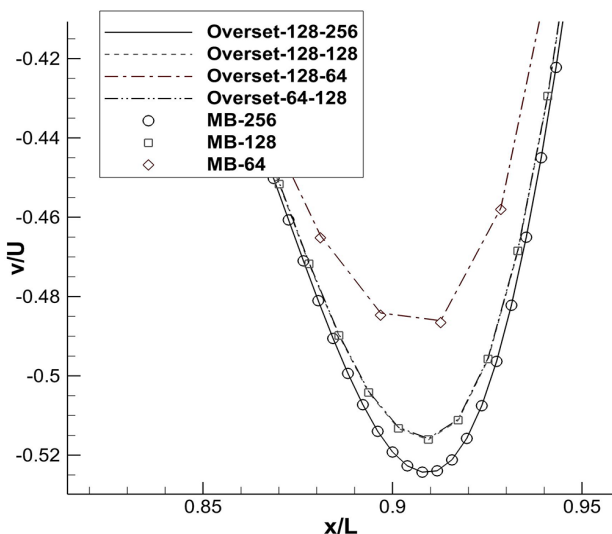


Fig. 12 Horizontal v distribution at y/L=0.5

Table 1 Difference of (u/U)<sub>max</sub> between the results using the multi-block and the overset grid

Grid	Multi-block	Overset	Diff.(%)
642	-0.35815	-0.35659	0.44
1282	-0.38031	-0.37964	0.18
2562	-0.38632	-0.38635	-0.01

최대값을 비교한 표이다. 중첩격자는 내부밀도와 외부밀도가 동일한 것을 기준으로 하였다. 다중블록격자와 중첩격자의 계산 결과는 그 차이가 0.5% 이하로 확인된다.

### 3.2 추진기 단독성능 해석

동적중첩격자를 이용한 비정상 유동장 해석의 정확도 검증을 위해 프로펠러 단독성능(Propeller Open Water) 해석을 수행하였다. 단독성능 계산은 미리 설정된 운동에 대한 해석 절차이므로,  $t_{n-1}$ 의 계산 결과가  $t_{n-1}+dt$ 의 프로펠러 위치에 영향을 주지 않기 때문에,  $t_{n-1}$ 의 유동계산을 수행하면서 동시에  $t_{n-1}+dt$ 의 DCI 계산을 수행할 수 있다. 따라서 병렬 계산 수행시 유동해석을 위한 프로세서와 DCI 계산을 위한 프로세서를 별도로 설정하여 계산 시간 절약을 꾀할 수 있다.

대상 프로펠러는 KRISO 프로펠러인 KP458(KVLCC 프로펠러), KP505(KCS 프로펠러), KP632(KLNG 프로펠러)로 선정하였으며(Kim et al., 2011, Van et al., 2003), 비관성 좌표계를 이용한 준정상상태(quasi-steady)의 결과와 중첩격자를 이용한 비정상 상태의 결과 비교를 수행하였다. 비관성 좌표계를 사용한 계산은 총 격자수 약 4백만개(KP458 기준) 수준을 사용하였으며, 중첩 격자계는 비관성 좌표계를 이용한 해석에 적용된 격자계에서 프로펠러 주위의 격자를 추출하고, 직사각형 영역의 배경 격자계에 적용하여 구성하였다. 배경격자계의 영역은  $-5 \leq x \leq 8$ ,  $-5 \leq y$ ,  $z \leq 5$ 이며, 3개의 프로펠러 모델 모두 동일한 배경격자를 적용하였다. 중첩격자를 사용한 경우에는 프로펠러 주위의 내부격자계가 실제로 전진비에 맞게 회전하면서 Suggar++를 사용하여 DCI 정보를 갱신하며 계산이 수행된다. Fig. 13은 해석에 적용된 프로펠러와 배경격자계를 보여주고 있다. 프로펠러 날개면의 격자는 약  $58 \times 59$ 이며, 배경격자수는 약 180만개로 설정하였다. 또한 해석에 사용한 난류 모형은 EARSM(Explicit Algebraic Reynolds Stress Model) 이다(Kim et al. 2018).

Fig. 14는 KP458 프로펠러의 표면 압력분포와 중첩격자계를 나타내며, Fig. 15는 계산된 추력 계수( $K_t$ ), 토크 계수( $10K_q$ )와 단독효율( $\eta_0$ )의 비교를 보인다. 다중블록격자계를 이용한 계산결과가 실험 결과에 비하여 추력 계수와 토크 계수가 약간 작게 계산되는 것을 볼 수 있다. 중첩격자계를 사용한 계산 결과는 다중블록격자계를 사용한 계산 결과와 유사한 결과를 주고 있으나 약 2~3%(추력 및 토크 계수) 작게 예측하고 있다. 이 차이는 중첩격자 해석과정에서 적용되는 내삽에 의한 오차와 다중블록격자계에서 프로펠러 허브를 후류 방향으로 무한히 길게

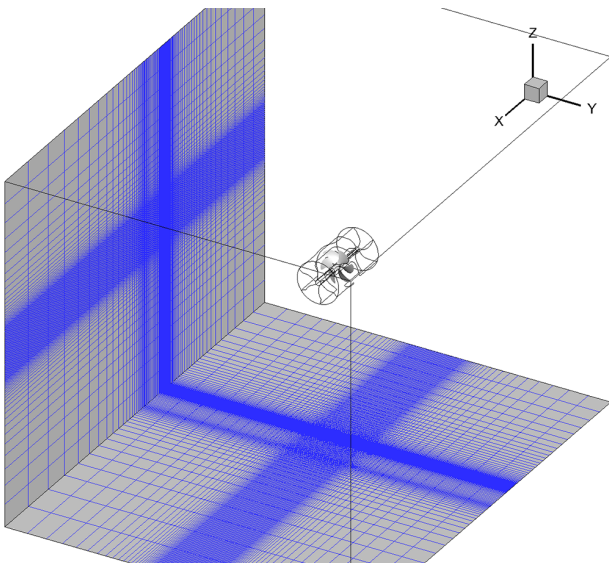


Fig. 13 Overset grid system for the POW tests

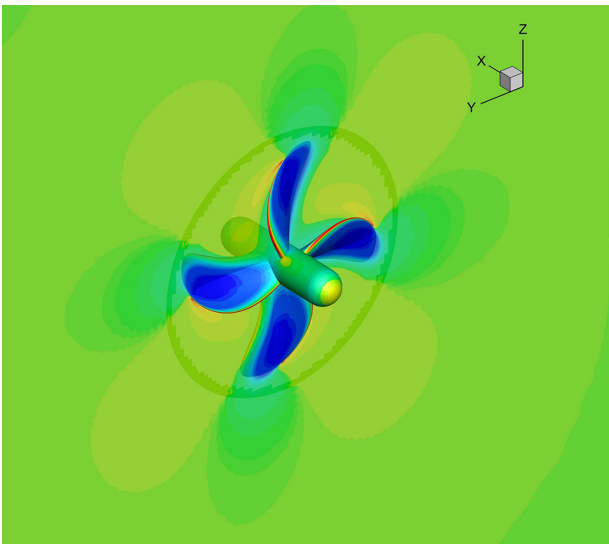


Fig. 14 Overset grid and the surface pressure distribution of KP458

모델링 한 차이에서 기인하는 것으로 추정된다. Fig. 16과 17은 각각 KP505와 KP632에 대한 다중블록격자와 중첩격자를 사용하여 계산한 결과의 비교를 보인다. KP458의 결과와 유사한 경향을 보인다. 중첩격자를 이용한 계산 결과가 다중블록격자를 이용한 계산 결과 대비 약간 작은 추력 계수와 토크 계수를 보이며, 높은 전진비에서 그 차이가 더 크다. 이 영역에서는 추력계수와 토크 계수의 값 자체가 매우 작아서 단독효율에서 그 차이가 더 크게 보이는 경향이 있다. 중첩격자계를 이용하여 계산한 프로펠러 단독 성능 해석 결과는 격자간 정보전달 과정에서 오는 차이(설계 전진비 근처에서 실험치와 약 5% 이내, 다중블록격자계의 결과와 2% 이내의 차이)가 있으나, 실용적으로 활용할 수 있는 수준으로 판단된다. 또한 현재는 프로펠러 주위 격자를 기존의 다중블록격자를 그대로 사용하여 해석을 수행하였으나, 프로펠러 형상 해석에 더욱 적합한 격자계를 중첩격자계를 사용하여 생성하는 방법에 대한 연구가 추가로 수행되어야 할 것으로 보인다.

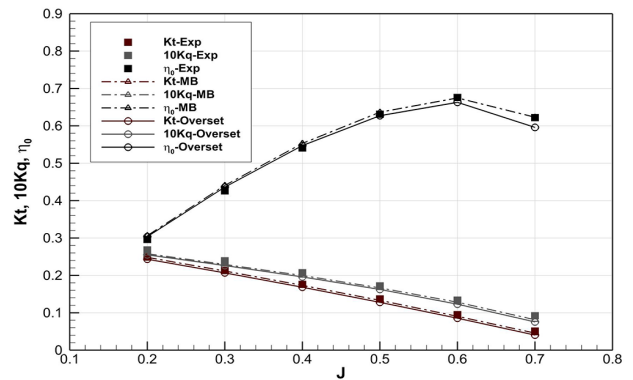


Fig. 15 Comparison of  $K_t$ ,  $10K_q$ , and  $\eta_0$  of KP458

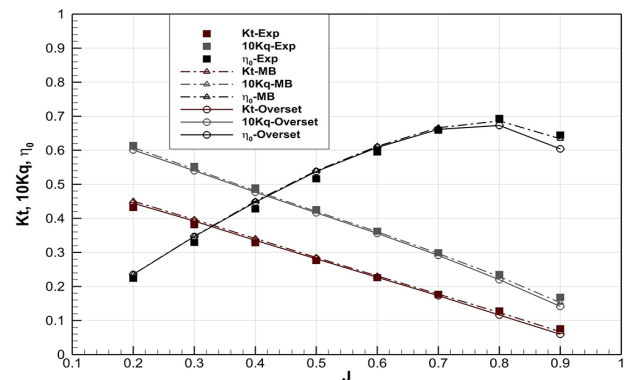


Fig. 16 Comparison of  $K_t$ ,  $10K_q$ , and  $\eta_0$  of KP505

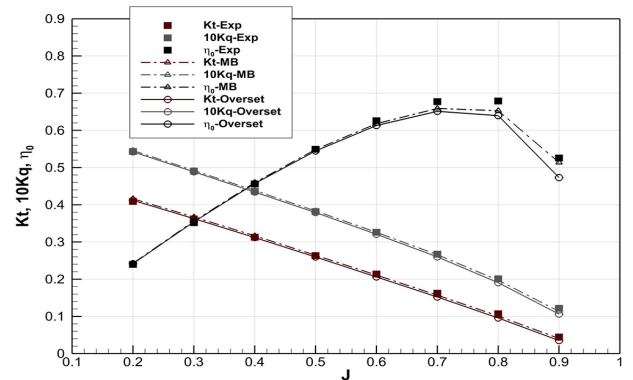


Fig. 17 Comparison of  $K_t$ ,  $10K_q$ , and  $\eta_0$  of KP632

### 3.3 복잡한 선미 부가물 해석

중첩격자 기법의 장점중의 하나는 복잡한 형상에 대한 정렬 격자 생성이 용이하다는 점이다. 특히 선미 부분에 부가물이 있을 경우 다중블록 격자계를 사용하여 정렬 격자를 생성하는 것이 매우 번거롭거나 생성이 현실적으로 불가능한 경우도 있다. 중첩격자계를 사용하면 국부적인 부분에 조밀한 격자를 넣을 수 있고, 각 부분별 격자를 생성하여 중첩시키기 때문에 격자 생성에 제약이 거의 없다. Fig. 18은 ROPAX 선형의 선미 부분을 보이고 있다. 선미쪽에 러더와 스트럿, 그리고 프로펠러 축이 모두 있는 복잡한 형태이다. Fig. 19는 중첩격자를 이용하여 러더 블록, 스트럿 블록, 프로펠러 축 블록, 선체 블록을 각각 생성하여



중첩시킨 모습을 보인다. Fig. 20은 생성된 중첩격자계를 이용하여 유동 계산을 수행한 예를 보인다. 중첩격자계를 이용하면 예제와 같은 복잡한 선미 형상에 대한 유동 계산을 비교적 손쉽게 수행할 수 있음을 확인할 수 있다.

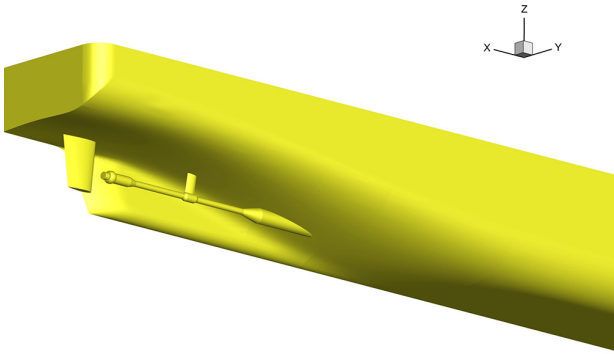


Fig. 18 Stern geometry of a ROPAX hull form

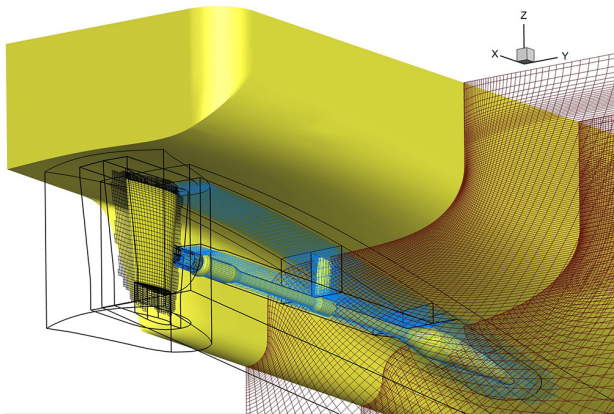


Fig. 19 Example of generated overset grids around the stern

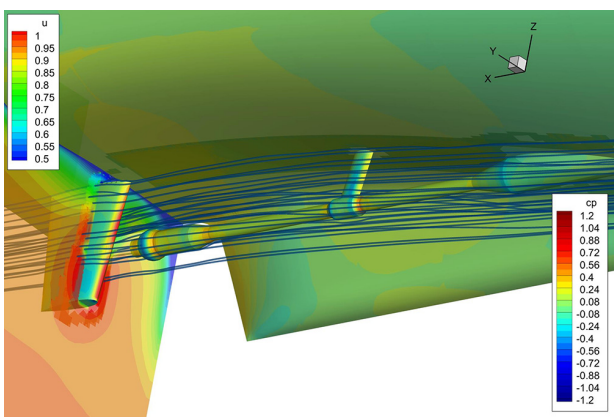
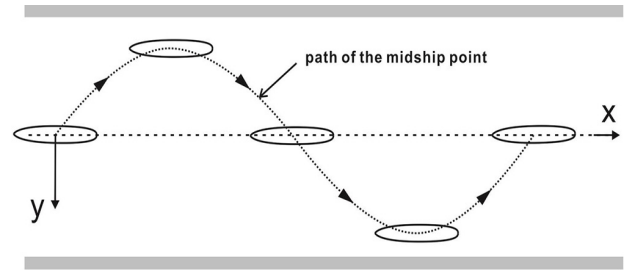


Fig. 20 Computed streamlines and pressure contours around the stern

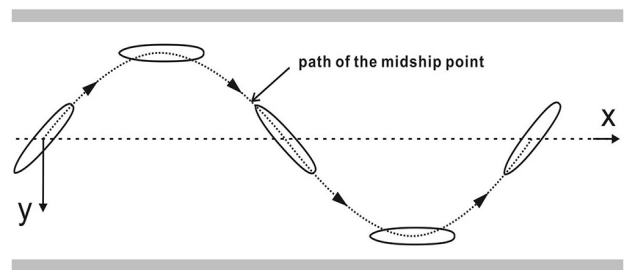
### 3.4 KVLCC2의 PMM 문제 해석

앞서 언급한 바와 같이 중첩격자 기법을 활용하면 선박의 상대 운동 해석에 이점이 있다. 본 절에서는 선박의 구속모형시험

항목 중 pure sway와 pure yaw(Fig. 21)에 대한 수치적 해석을 수행하였다. 본 문제는 미리 정의된 경로를 선박이 움직이는 경우로 선박의 위치에 해당하는 DCI를 Suggar++가 먼저 계산하고, 그 결과를 이용하여 WAVIS가 유동해석을 수행하는 방식으로 진행된다.



(a) Pure sway



(b) Pure yaw

Fig. 21 Ship motions at a PMM test

선형은 KVLCC2로 타(rudder)가 있는 모델이며 모형선의  $L_{pp}$ 는 5.52m이다. 계산 조건은 SIMMAN-2008(SIMMAN2008)의 조건을 적용하였으며, 프로펠러는 고려하지 않은 차이점이 있다. 식 (4)와 (5)는 각각 선수동요각과 좌우동요 변위를 나타내는 식이며, Table 2는 해석 조건을 보인다.

$$\Psi(t) = -\Psi_0 \cos\left(\frac{2\pi N}{60}t\right) + \beta \quad (4)$$

$$\eta(t) = -\eta_0 \sin\left(\frac{2\pi N}{60}t\right) \quad (5)$$

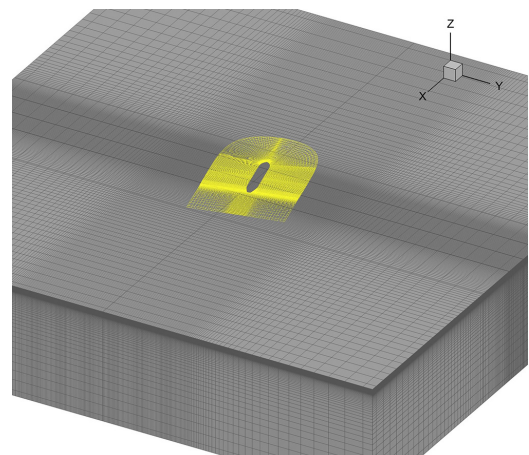
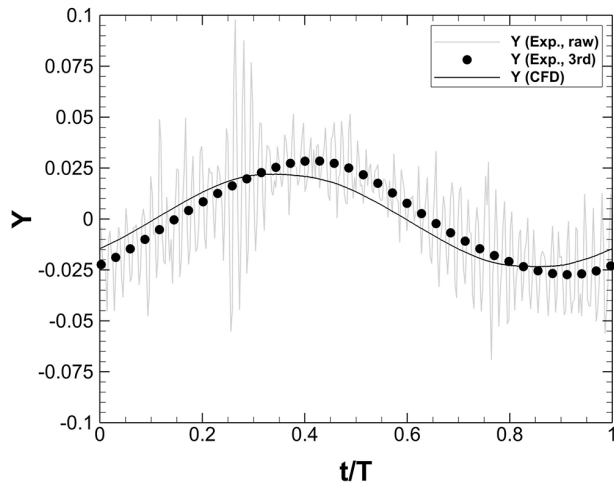


Fig. 22 Grid system for the pure yaw test

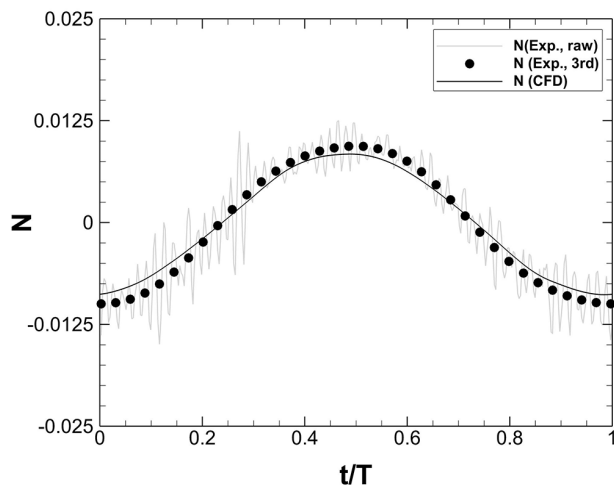
Table 2. Computational setup

Test	$F_n$	$R_n$ ( $\times 10^6$ )	$\beta$ [deg]	$\eta_0$ [m]	$\Psi_0$ [deg]	$N$ [rpm]
Pure sway	0.142	4.6	0	0.5	0	1,704
Pure yaw	0.142	4.6	0	1.0	13.36	2,334

총격자수는 약 950만개이며, 계산 영역은  $-5 \leq x/L_{pp}, y/L_{pp} \leq 5$ 로 설정하였다. Fig. 22는 배경격자와 선체 주변의 중첩격자를 보인다. Fig. 23과 Fig. 24는 각각 pure sway와 pure yaw 경우의 우현 방향 항력 계수(Y)와 z축 모멘트(N)의 계산 결과를 실험의 raw data와 3차 조화 성분까지 고려한 시계열 결과와의 비교를 보인다. 우현 방향 항력 계수의 경우 실험 결과와 비교할 때 약간의 위상 차이(pure sway 경우 약  $0.1\pi$ )가 나타나는 확인할 수 있다. 수치해석에서는 프로펠러를 포함하지 않아서 비대칭 반류에 의한 추력이 z축 모멘트와 우현 방향의 항력 계수에 영향을 주었을 가능성이 있다고 생각된다. 더욱 명확한 검증을 위해서 추후에 프로펠러를 포함한 계산 수행이 필요할 것으로 보인다.

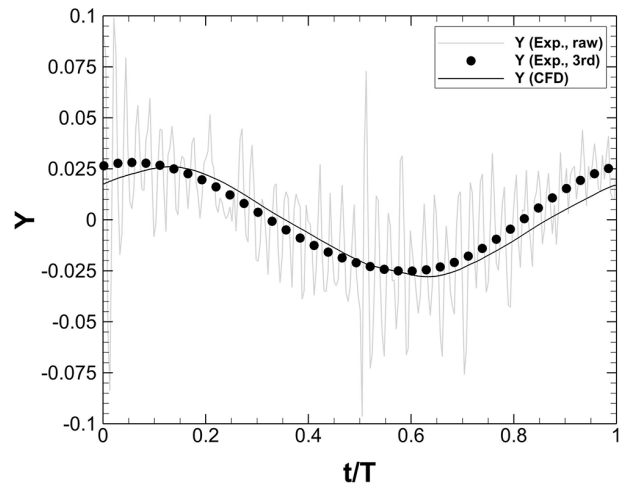


(a) Force coefficient of the starboard direction

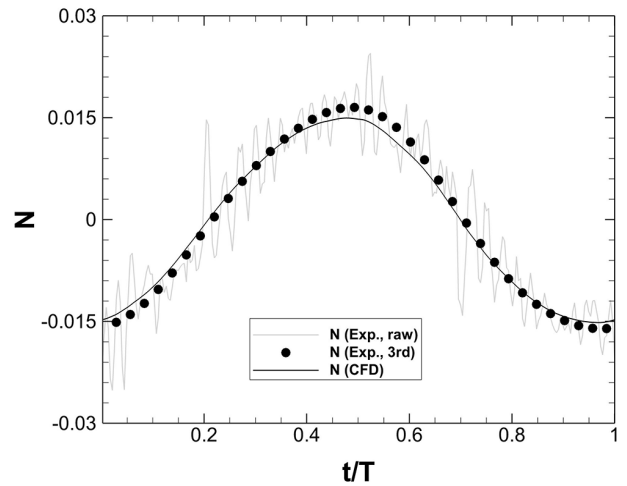


(b) Vertical moment coefficient

Fig. 23 Force and moment coefficients of the pure-sway case



(a) Force coefficient of the starboard direction



(b) Vertical moment coefficient

Fig. 24 Force and moment coefficients of the pure-yaw case

### 3.5 KVLC2의 파랑중 운동 해석

본 장에서는 선박의 동적 운동 예측에의 적용 예를 보인다. 선박의 파랑중 운동 해석 문제는 앞서 보인 조종 문제와 달리 선박의 운동은 유체 해석을 통해 얻어진 힘에 의해 결정되며, 이를 이용하여 선박의 위치에 해당하는 DCI를 Sugar++를 사용하여 계산하는 방식이 사용된다. 대상선은 KVLC2의 축척비 1/39.44 모델이고, 유입류 조건은 선형 규칙파를 적용하며, 상하 동요(heave)와 종동요(pitch)만을 고려한 다음과 같은 2자유도 운동 방정식을 사용하여 선박의 운동을 계산한다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= M_y / I_{yy} \\ \dot{w} &= F_z / m - g \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\dot{q}$ 는 종동요 가속도,  $\dot{w}$ 는 상하동요 가속도를 의미하며,  $m$ 은 질량,  $I_{yy}$ 는 관성모멘트,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.  $M_y$ 와  $F_z$ 는 유체동역학적 모멘트와 힘으로 유동 해석을 통해 얻어진 값을 사용한다. 이렇게 구해진 가속도를 이용하여 운동 변

위를 계산하는 것은 1차 정도의 Euler법을 이용하였다. 적용된 경계 조건은 Kim et al.(2017)과 동일하게 설정하였다. Fig. 25는 규칙파 조건을 적용한 2자유도 운동 해석을 위해 사용한 격자 시스템을 보인다. 총격자수는 약 340만개이다. Fig. 26은  $\lambda/Lpp = 1.0$ ,  $A/Lpp = 0.005$ 인 규칙파 조건하에서 계산된 총저항계수, 종동요, 상하동요의 시계열 결과이다. 이때의 조우 주기(encountered period)는 약 0.262이다. 조우 주기에 따른 규칙적인 시계열 결과를 확인할 수 있다. 총 13개의 파장 조건(Kim et al., 2017)에 대하여 계산을 수행하여 얻어진 부가저항계수( $C_{AW}$ ), 종동요와 상하동요의 1차 조화 진폭(1st harmonic amplitude)의 RAO를 각각 실험값(Hwang et al., 2016)과 비교하여 Fig. 27, 28, 29에 나타낸다. 부가저항 계수와 운동 예측 결과는 단파장 영역에서부터 장파장 영역까지 전반적으로 실험치와 좋은 일치를 보이는 것을 확인할 수 있다. 포텐셜 기반 방법에 비해 상대적으로 좋은 결과를 보이는 단파장 영역에서 뿐 아니라 비관성 좌표계가 상대적으로 약점을 갖는 대운동 영역인 장파장 영역에서도 좋은 결과를 주는 것을 확인할 수 있다(Kim et al. 2018).

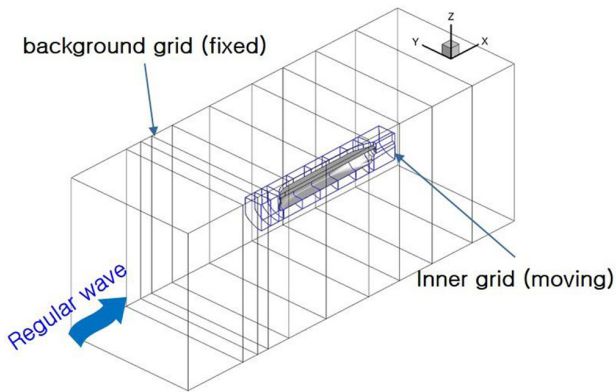


Fig. 25 Grid system for 2DOF motion analysis in waves

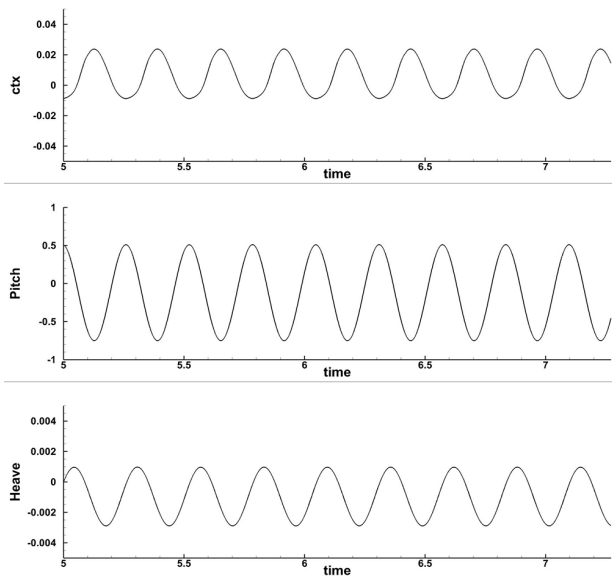


Fig. 26 Time history of  $C_t$ , pitch and heave at  $\lambda/Lpp = 1.0$  case

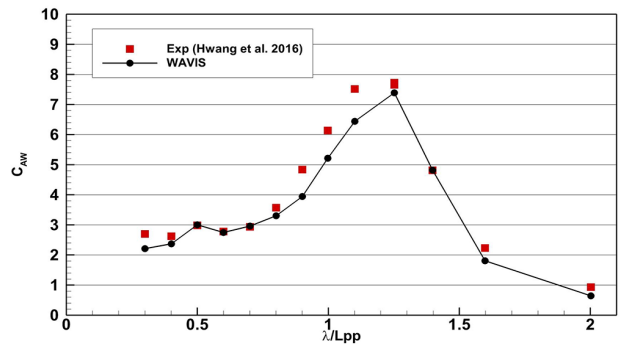


Fig. 27 Added resistance coefficient

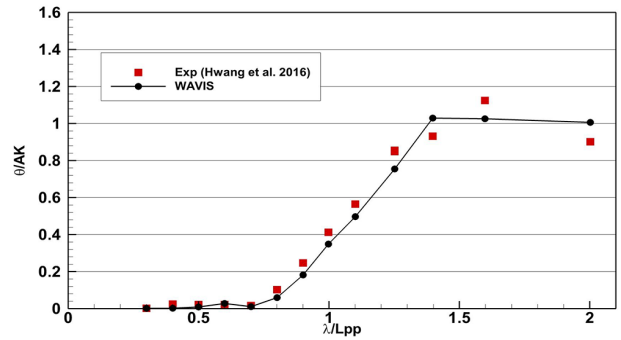


Fig. 28 Pitch motion RAO

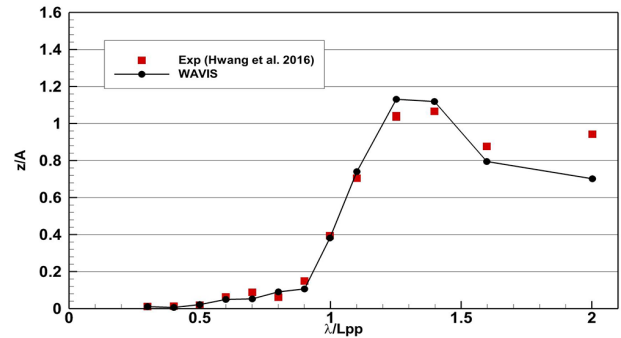


Fig. 29 Heave motion RAO

## 4. 요약 및 결론

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소의 in-house 유동해석 코드인 WAVIS에 동적 중첩격자 기법 라이브러리인 Suggar++를 접목하여 몇몇 적용 사례를 통해서 검증 및 유효성을 검토하였다. 선박 분야의 주요 부분으로, 1)프로펠러가 회전하는 경우, 2)복잡한 부가물이 설치된 경우, 3)미리 지정된 경로를 움직이는 경우, 4)파도 중 선박의 운동 예측 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 프로펠러 단독성능 시험에서는 비관성 좌표계를 이용한 결과와 좋은 일치를 보여 주었으며, ROPAX 선형의 복잡한 선미 부가물 해석에서는 중첩격자의 장점을 이용하여 다중블록 격자로 생성하기 힘든 경우에 대한 해석의 가능성을 확인하였다. Pure-sway, pure-yaw 사례와 파랑중 선박 운동 계산을 통해서 선박의 대운동 해석에 있어서 중첩격자의 장점을 확인할 수 있었다.

향후 중첩격자 기법의 장점을 충분히 활용할 수 있는 복잡한 적용 분야, 예를 들어 파랑중 자유항주(국부 좌표계를 중심으로 회전하는 프로펠러 + 지구 좌표계에서 운동하는 선박) 해석 등으로의 확장을 위한 연구 및 중첩격자 활용에 적합한 격자생성 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소(KRISO) 주요사업(PES3210 및 PES3010)의 지원으로 작성되었습니다.

## References

- Burggraf, O.R., 1966. Analytical and numerical studies of the structure of steady separated flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 24. pp.113–151.
- Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W., & Stern, F., 2007. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids. *Computers & Fluids*, 36(9), pp.1415–1433.
- Castiglione, T., He, W., Stern, F., Bova, S., 2014. URANS simulation of catamaran interference in shallow water. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(1), pp.33–51.
- He, W., Castiglione, T., Kandasamy, M., & Stern, F., 2015. Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran. *Journal of Marine Science and Technology*, 20. pp. 292–308.
- Heo, J.K., Ock, Y.B., Park, J.C., Jeong, S.M., & Akimoto, H., 2015. Overset-grid simulation technique for analysis of 2-DOF ship motions in waves. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 20(3), pp.20–26.
- Hwang, S., Ahn, H., Lee, Y.Y., Kim, M.S., Van, S.H., Kim, K.S., Kim, J., & Jang, Y.H., 2016. Experimental study on the bow hull-form modification for added resistance reduction in waves of KVLCC2, *The 26<sup>th</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 26 June – 2 July 2016.
- Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S., Van, S.H., 2005. RANS simulation for KRISO container ship and VLCC tanker. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42. pp.593–600.
- Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S., Van, S.H., Kim, Y.C., 2011. Development of a numerical method for the evaluation of ship resistance and self-propulsion performances, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.147–157.
- Kim, K.S., Kim, J., Park, I.R., Kim, G.D., & Van, S.H., 2007a. RANS analysis for hull-propeller-rudder interaction of a commercial ship by using the overset grid scheme, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, 3(1), pp.251–264.
- Kim, K.S., Park, I.R., Kim, J., Kim, Y.J., Van, S.H., 2007b. RANS analysis for obliquely towed VLCC tanker by using the overset grid scheme, *Proceedings of KAOSTS*, Seoul, Korea, pp.895–904.
- Kim, K.S., Kim, J., Park, I.R., Kim, G.D., & Van, S.H., 2008. High fidelity RANS simulation for a self-propelled ship in model scale, *Marine CFD 2008*, pp.101–110.
- Kim, K.S., Kim, Y.C., Kim, Y., Kim, J., & Van, S.H., 2018. RANS simulations for propeller open water tests in towing tank, *Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan, 10 June – 15 June 2018.
- Kim, Y.C., Kim, K.S., Kim, J., Kim, Y., Park, I.R., & Jang, Y.H., 2017. Analysis of added resistance and seakeeping responses in head sea conditions for low-speed full ships using URANS approach. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(6), pp.641–654.
- Kim, Y.C., Kim, Y., Kim, J., & Kim, K.S., 2018. Added resistance and 2DOF motion analysis of KVLCC2 in regular head waves using dynamic overset scheme. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(5), pp.385–393.
- Nichols, R.H., Tramel, R.W., & Buning, P.G., 2006. Solvers and turbulence model upgrades to OVERFLOW 2 for unsteady and high-speed applications. *AIAA 2006-2824*, pp.1–34.
- Noack, R.W., Boger, D.A., & Kunz, R.F., 2009. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability, *19<sup>th</sup> AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, San Antonio, USA, 22–25 June 2009.
- Prewitt, N.C., Belk, D.M., Shyy, W., 2002. Improvement in parallel chimera grid assembly. *AIAA Journal*, 40(3), pp.497–500.
- SIMMAN2008, 2008, *Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, URL: <http://www.simman2008.dk> [Accessed 02 March 2018].
- Suhs, N. E., Rogers, S. E., Dietz, & W. E., 2002. PEGASUS 5: an automated pre-processor for overset-grid CFD. *AIAA 2002-3186*, pp.1–16.
- Van, S.H., Yoon, H.S., Lee, Y.Y., Park, I.R., Lee, C.J., Kim, W.J., 2003. Measurement of flow around KRISO 138K LNG carrier model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(2), pp.1–10.

