

## 기저부를 갖는 축대칭 수중운동체의 저항예측에 관한 수치적 연구

### Numerical Investigation for Drag Prediction of an Axisymmetric Underwater Vehicle with Bluff Afterbody

김민재\*

Min-Jae Kim

#### Abstract

The objective of this study is to predict the drag of an axisymmetric underwater vehicle with bluff afterbody using CFD. FLUENT, commercial CFD code, is used to simulate high Reynolds number turbulent flows around the vehicle. The computed drag coefficients are compared to available experimental data at various Reynolds numbers. Four widely used two-equation turbulence models are investigated to evaluate their performance of predicting the anisotropic turbulence in a recirculating flow region, which is caused by flow separation arising from the base of the vehicle. The simulations with Realizable  $k-\epsilon$  and  $k-w$  SST turbulence models predict the anisotropic turbulent flows comparatively well and the drag prediction results with those models show good agreements with the experimental data.

Keywords : Turbulence Model(난류 모델), Flow Separation(유동 박리), Recirculating Flow(재순환유동), Anisotropic Turbulent Flow(비등방성 난류 유동)

#### 1. 서론

공기 중을 운동하는 항공기와 마찬가지로 수중운동체의 경우에도 수중에서의 저항을 최소화할 수 있는 형상을 설계하는 것이 중요하다. 따라서 형상설계 단계에서의 저항예측은 필수적이며, 예측 결과가 효율적으로 설계에 반영될 수 있어야 한다. 이러한 점에서

전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics)을 이용한 저항예측 방법은 시간과 비용을 절감할 수 있으며, 실험의 대안 또는 상호보완적 수단으로써 유용하게 활용될 수 있다.

본 논문에서는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식에 기초한 전산유체역학을 이용하여 수중운동체의 저항예측을 시도하였다. 해석에 사용된 수중운동체의 형상은 몽툰한 끝단을 가지는 축대칭 형상으로 이 경우, 기저 저항(base drag)이 전체 저항 성분 중 상당한 부분을 차지하게 되며, 끝단 모서리에서 발생하는 유동 박리(flow separation)로 인해 기저부에 재순

† 2010년 2월 26일 접수~2010년 5월 13일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김민재(ruoge@add.re.kr)

환 유동(recirculating flow)과 같은 복잡한 구조의 비등방성 난류 유동장이 생성된다. 따라서 정확한 저항예측을 위해서는 기저부 주위의 난류 유동장에 대한 정도 높은 해석이 요구되며, 이를 위한 수치적 방법을 찾는 것이 중요하다. 최근에는 DNS(Direct Numerical Simulation)나 LES(Large Eddy Simulation) 등과 같은 보다 고차원적인 수치해석 방법을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으나 대부분 기본적인 형상이나 낮은 Reynolds 수 영역에 대해서만 제한적으로 적용되고 있는 실정이다. 이러한 한계로 인해 공학적 문제에는 대부분 RANS 방정식을 이용한 유동해석이 주를 이루어 왔으며, DNS나 LES 기법에 비해 비교적 적은 계산 시간과 비용이 들기 때문에 복잡한 공학적 문제에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 난류에 존재하는 비정상(unsteady) 특성을 갖는 와류(eddy)를 직접 모사하지 않고 수학적 모델로 대체하기 때문에 수치해가 난류 모델의 성능에 따라 크게 달라질 수 있다는 단점이 있다. 따라서 난류 모델의 선택에는 특별한 신중을 기해야 하며, 사용하고자 하는 난류 모델의 특성을 충분히 파악하는 것이 중요하다. 최근에는 기존 난류 모델의 개선을 통해 비등방성 난류 유동과 같은 복잡한 유동현상을 예측할 수 있는 모델들이 다양하게 제안되어 왔으며, 실제로 많은 연구에서 향상된 결과를 얻고 있다<sup>[1~3]</sup>.

본 논문에서는 유동해석을 위해 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였으며, 기저부의 난류 유동장에 대해서는 FLUENT에서 제공하는 2-방정식 난류 모델들을 적용하여 성능을 비교하였다. 계산된 저항계수 결과는 수중운동체 모형시험 결과와 비교함으로써 본 문제에 가장 적합한 난류 모델을 찾고자 하였다.

## 2. 수치해석 기법

FLUENT에서 사용한 지배방정식으로는 3차원, 비압축성, 정상(steady), RANS 방정식이며, 유동해석자는 segregated 방식을 사용하였다. 비압축성 유동해석을 위한 압력-속도보정 알고리즘으로는 SIMPLE 기법이 사용되었으며, 해석과정에서 대류항과 확산항에 대한 차별화는 2차 공간 정확도를 가지는 upwind 방법을 적용하였다. 사용한 난류 모델은 표준  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$ ,  $k-w$  SST 난류 모델이며, 유

입유동의 turbulence intensity는 1%로 설정하였다.

해석에 사용된 경계 조건으로는 물체 표면에서는 유속이 0인 no-slip 조건을 적용했으며, 유동흡입면에서는 자유류(free-stream)의 속도를 부과하였다. 그리고 계산상의 효율을 위해 물체 벽면에서는 경험식에 근거한 벽함수법(wall function)을 적용하였고, 모든 계산은 전체 영역을 8개의 부영역으로 분할하여 병렬 계산하였다.

## 3. 결과 및 토론

본 연구에 사용된 수중운동체의 형상 및 제원을 Fig. 1에 도시하였다. 이 형상은 실선에 대해 상사법칙을 만족하도록 축소한 모형선이며,  $L/D$ 가 10인 축대칭 형상이다. 유동해석은 case1~case6까지 6개의 유동조건에 대해 수행하였으며, 각각의 Reynolds 수는  $3.82 \times 10^6$ ,  $5.33 \times 10^6$ ,  $6.86 \times 10^6$ ,  $8.39 \times 10^6$ ,  $9.54 \times 10^6$ ,  $13.4 \times 10^6$  이다.

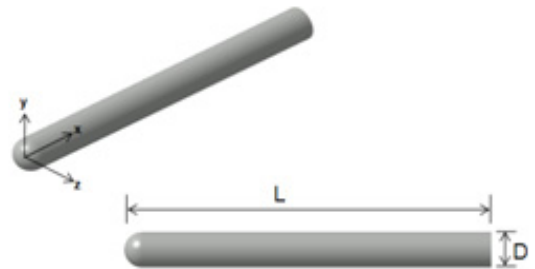


Fig. 1. Geometry

먼저 유동해석을 위해 Fig. 2에서와 같이 수중운동체와 원방경계면에 대한 삼각형 표면 격자를 생성하였다. 원방경계면은 균일한 흡입유동에 영향을 주지 않도록 운동체와 충분한 거리를 두어 생성하였으며, 운동체 주위의 경계층 부분에는 높은 종횡비(aspect ratio)를 가지는 프리즘 격자를 적용하여 점성 경계층 내의 속도 구배를 효과적으로 포착하도록 했다. 격자층 내부에는 모두 10개의 격자점(node)을 분포시켰으며, 벽함수법 적용을 위해  $y^+ > 30$ 이 되도록 하였다. 나머지 영역에 대해서는 사면체 격자로 채워지게 했으며, 이 때 프리즘과 사면체를 연결하기 위해 피라미드 격자가 필요하게 된다. 이러한 비정렬 혼합 격자(unstructured hybrid mesh) 기법은 최근 들어 효율성과

유연성으로 인해 복잡한 형상 주위의 높은 Reynolds 수의 점성 유동을 해석하는 방법으로 크게 각광받고 있다<sup>[4]</sup>. 또한, 본 연구에서는 수치해의 격자 의존성(dependency)을 배제하고 중요한 유동 특성을 효과적으로 포착하기 위해 FLUENT에서 제공하는 적응(solution-adaptive) 격자 기법을 활용하였다. 적응조건으로는 속도 구배가 사용되었으며, 각각의 유동 조건마다 다양한 적응 경계치를 적용하여 격자적응을 수행한 후 수치해가 1%의 오차범위 내에 있을 때 수렴했다고 간주하였다. 이러한 방법을 통해 모든 해석 조건에 대해 수렴된 수치해를 얻었으며, 그 중에서 case1에 대한 유동해석 결과를 바탕으로 수중운동체 주위의 유동현상을 분석하고자 하였다.

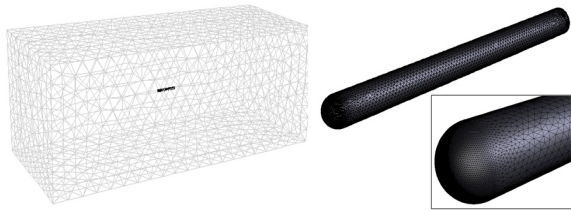


Fig. 2. Computational mesh

먼저 Fig. 3에는 수중운동체 주위의 압력장과 유선(streamlines)을 각각 나타냈다. 수중운동체의 압력분포는 전형적인 축대칭 물체의 압력분포를 보이고 있으며, 유선을 통해서서는 기저부에서 유동박리에 의한 재순환 유동이 발생하고 있는 모습을 확인할 수 있다. Fig. 4에서는 네 개의 난류 모델을 사용하여 예측된 수중운동체의 표면 압력계수(pressure coefficient)를 비교하여 볼 수 있다. 그림을 통해 네 개의 난류 모델이 기저면을 제외한 나머지 부분에서는 모두 동일한 압력계수를 예측하지만 기저면에서만 조금씩 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 재순환 유동과 같은 비등방성 난류 유동을 예측하는 난류 모델의 성능 차이에서 기인하는 것이며, Fig. 5에 나타난 기저면에서의 압력계수를 비교해 보면 이러한 난류 모델의 성능 차이를 보다 분명하게 확인할 수 있다. Fig. 6에서는 난류 모델의 성능 차이를 비교하기 위해 재순환 유동 영역 내에서 각각의 난류 모델이 생성하는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)를 계산하여 비교하였다. 기저면에서 하류(downstream)방향으로 모두 네 지점을 선택하여 난류운동에너지를 나타냈으며, 각각의 위치는 그림에 표시되어 있다.

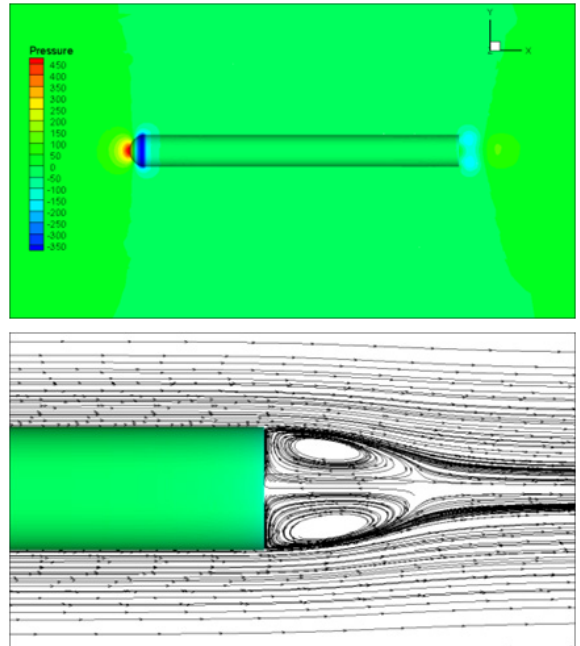


Fig. 3. Pressure contours(above) and streamlines(below)

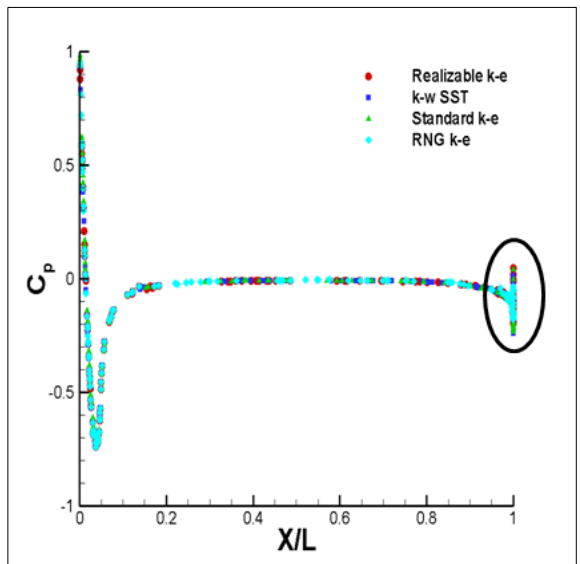


Fig. 4. Surface pressure distributions

먼저 표준  $k-\epsilon$  모델이 다른 모델들에 비해 전반적으로 난류운동에너지를 크게 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 잘 알려진 것처럼 표준  $k-\epsilon$  모델이 수직 응력과 같은 부가적인 응력 성분이 포함되어야 하는 유동에서 비정상적으로 과도한 난류운동에너지를 생

성시킨다는 기존의 연구 결과와 잘 일치한다<sup>[2,3]</sup>. 하지만 나머지 모델들 간에도 난류운동에너지를 예측하는 정도가 모두 다르게 나타나고 있으며, 그 중에서도

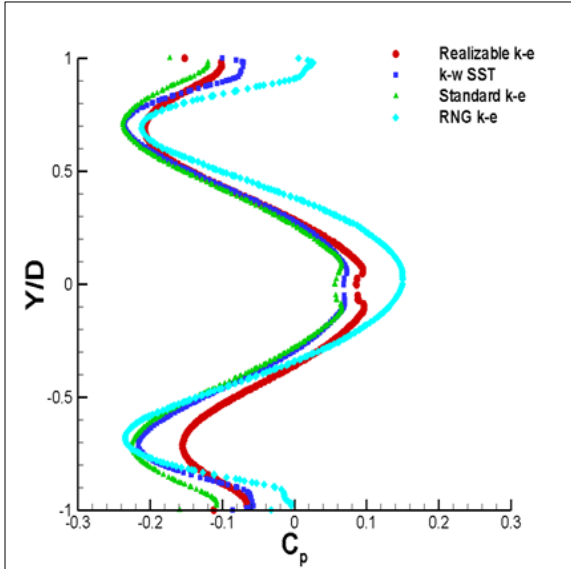


Fig. 5. Base pressure distributions

RNG  $k-\epsilon$  모델이 가장 낮은 난류운동에너지를 예측하고 있음을 볼 수 있다.

난류 모델에 따른 이러한 특성을 보다 정확하게 분석하기 위해서는 실제 실험을 통해 난류운동에너지를 측정하고 비교해봐야 하지만 현실적으로 많은 어려움이 따르므로, 본 연구에서는 저항시험을 통해 측정된 수중운동체의 저항계수를 유동해석 결과와 비교함으로써 난류 모델의 성능 차이를 확인하고자 하였다. 저항시험 결과는 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(KORDI/MOERI)의 VPMM(Vertical Planar Motion Mechanism) 시험 장비를 이용하여 측정된 결과를 사용했으며, 시험에 사용된 수중운동체의 모형을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 시험은 자유 수면의 영향을 최대한 제거하기 위해 물수 깊이 2.4m에서 수행되었으며, 모형선 주위에 난류 유동장이 형성되도록 하기 위해 직경 1.2mm, 높이 2.0mm의 스테드가 모형선의 선수에서 5%되는 위치에 10mm 간격으로 부착되어 있다<sup>[5]</sup>.

먼저 Fig. 8에는 계산된 저항계수와 실험값을 비교하여 보여주고 있다. 그림을 통해 볼 수 있듯이 표준  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델은 실험값과 상당히 큰 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 Realizable

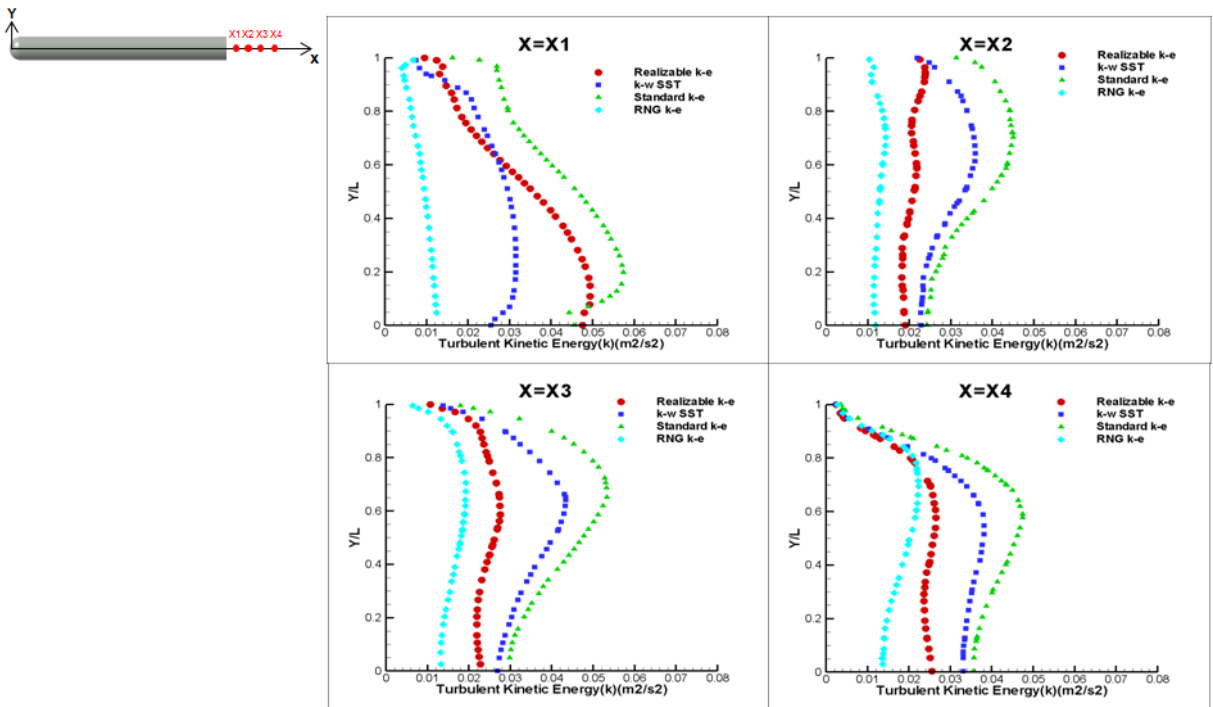


Fig. 6. Turbulent kinetic energy in base flow region

$k-\epsilon$ 과  $k-w$  SST 모델의 예측 결과는 실험값과 상당히 잘 일치하고 있으며, 저항계수 만을 비교했을 때 두 모델 간의 성능 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 성능 차이를 좀 더 면밀하게 분석하기 위해 Fig 9에는 각각의 난류 모델에 대한 저항계수를 마찰저항계수(frictional drag,  $C_f$ )와 형상저항계수(pressure drag,  $C_R$ )로 분리하여 나타냈다. 우선 마찰저항을 비교했을 때, 표준  $k-\epsilon$  모델이 실험값과 가장 잘 일치하는 결과를 주었다. 하지만 나머지 모델들도 모두 우수한 예측결과를 보여주어 마찰저항을 예측하는 난류 모델들 간의 성능 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 반면에 형상저항을 살펴보면 난류 모델 간의 성능 차이가 확연히 드러남을 알 수 있다. 저항계수 결과에서도 확인했듯이 Realizable  $k-\epsilon$ 과  $k-w$  SST 두 모델은 형상저항 예측에 있어서도 마찬가지로 실험값을 비교적 잘 예측하고 있으며, 이에 반해 표준  $k-\epsilon$ 과 RNG  $k-\epsilon$  모델은 상당히 큰 오차를 보이는 것이 확인되었다.

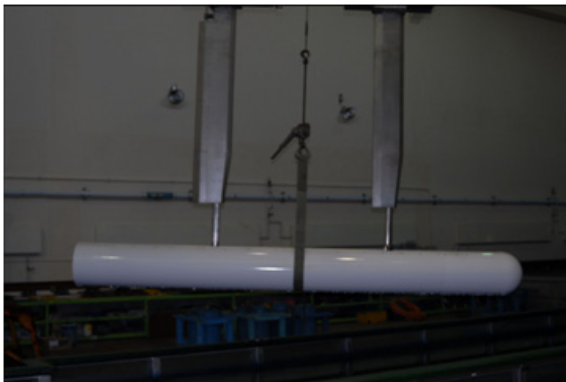


Fig. 7. Drag measurement experiment

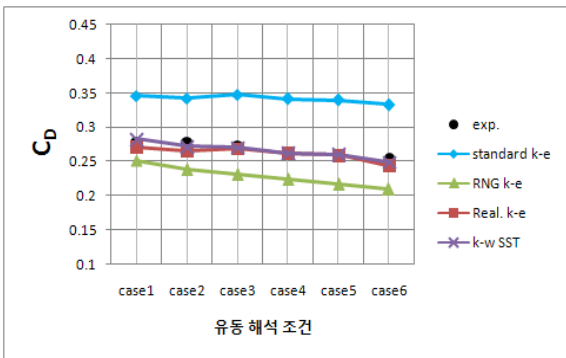


Fig. 8. Total drag coefficients

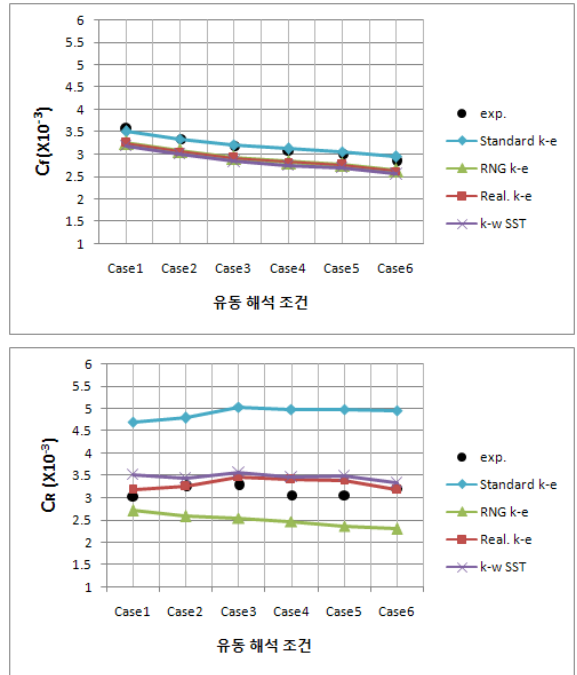


Fig. 9. Frictional( $C_f$ ) and pressure drag( $C_R$ ) coefficients

표준  $k-\epsilon$  모델이 그림에서와 같이 형상저항을 크게 예측한 이유는 Fig. 5에서 확인했던 바와 같이 재순환 유동과 같은 비등방성 난류 유동에서 과도하게 큰 난류운동에너지를 생성시키기 때문이다. 이렇게 과도하게 생성된 난류운동에너지는 또다시 과도한 난류확산을 초래하게 되어, 결과적으로 수중운동체의 형상저항을 증가시키게 된다. 한편, RNG  $k-\epsilon$  모델은 표준  $k-\epsilon$  모델에 비해서는 개선된 저항예측결과를 주었으나, 형상저항을 필요이상으로 낮게 예측함으로써 실험값과 큰 오차를 보였다. 비록 RNG 모델이 선회유동 또는 재순환 유동과 관련한 기존의 여러 연구결과들에서 우수한 성능을 보여 왔지만 대부분이 Reynolds 수가 낮은 유동을 다루고 있었으며<sup>[2,3]</sup>, 본 연구에서와 같이 높은 Reynolds 수를 가지는 유동에서는 모델에 포함되는 변형율항(rate-of-strain term)의 난류와 평균변형률의 시간척도비인  $\eta$ 값이 훨씬 크게 증가하여 과도하게 낮은 난류운동에너지를 예측하게 되고 결과적으로 형상저항도 낮게 예측된 것으로 판단된다.

지금까지의 결과를 통해 Realizable  $k-\epsilon$  모델과  $k-w$  SST 두 모델이 수중운동체의 저항예측에서 가장 우수한 결과를 주는 것으로 확인되었다. 비록  $k-w$  SST 모델이 전반적으로 실험값과 더 잘 일치하

는 경향을 보이긴 했으나, 두 모델 간의 성능 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 하지만 두 모델이 난류운동에너지 예측에서는 분명한 성능 차이를 보였으며, 이 점에 대해선 추가적인 연구를 통해 좀 더 면밀한 성능 분석이 필요하다고 생각된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 전산유체해석을 통해 기저부를 갖는 축대칭 수중운동체의 저항을 예측하고자 하였다. 수중운동체 주위의 난류유동 해석을 위해 FLUENT를 사용하였으며, 검증을 위해 다양한 Reynolds 수에 대해 계산된 저항계수를 수중운동체 모형의 저항시험 결과와 비교하였다. 유동해석 결과로부터 수중운동체의 기저부에서 유동 박리에 의한 재순환 유동 발생을 확인했으며, 이러한 비등방성 난류 유동을 정확하게 예측하고자 2-방정식 난류 모델인 표준  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$ ,  $k-w$  SST 난류 모델을 사용하여 성능을 비교하였다. 그 결과, 난류 모델에 따라 기저면의 압력을 예측하는 정도가 다르게 나타났으며, 재순환 유동 영역에서의 난류운동에너지를 예측하는 정도도 난류 모델에 따라 성능 차이가 있음을 확인하였다. 계산된 저항계수와 실험값의 비교를 통해 Realizable  $k-\epsilon$ 과  $k-w$  SST 난류 모델이 실험값을 가장 잘 예측하고 있으며, 그에 반해 표준  $k-\epsilon$ 과 RNG  $k-\epsilon$  모델은 큰 오차를 보이고 있음을 확인하였다. 이는 저항계수를 마찰저항계수와 형상저항계수로 분리한 결과 두 모델에서의 큰 오차가 형상저항의 부정확한 예측에 따른 것임을 확인할 수 있었다. 비록 Realizable  $k-\epsilon$

과  $k-w$  SST 난류 모델이 본 문제와 같은 비등방성 난류 유동을 예측하는데 있어 가장 우수한 성능을 가진 것으로 판단되었으나, 난류운동에너지 예측에서와 같이 두 모델 간에도 성능 차이가 있음을 확인했으며 이 점에 대해선 정도 높은 실험을 통해 추가적인 연구가 필요하다고 본다.

#### Reference

- [1] Launder, B. E., "Second-moment Closure : Present and Future?", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 10, No. 4, pp. 282~300, 1989.
- [2] Orszag, S. A., Yakhot, V., Flannery, W. S., Boysan, F., Choudhury, D., Maruzewski, J. & Patel, B., "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations", Near-Wall Turbulent Flows, R.M.C.So (ed.), pp. 1031~1046.
- [3] Nicholas J. Mulvany, Li Chen, Jiyuan Y. Tu, & Brendon Anderson., "Steady-State Evaluation of Two-Equation RANS Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations", Defense Science and Technology Organisation, DSTO-TR-1564, 2004.
- [4] Kallineris, Y., "Applied Numerical Mathematics", Vol. 20, No. 4, pp. 387~406, 1996.
- [5] Sun Young, Kim., "Report on the VPMM Test for Hydrodynamic Characteristics of Underwater Bodies", KORDI/MOERI, BSPG0178A-70-2, 2008.