

# 용혈 현상의 CFD 예측을 위한 난류 벽 모델의 개발

이승헌\* · 장민욱\* · 강성원\* · 허남건\* · 김원정\*

## Development of a turbulent wall model for hemolysis prediction in CFD

Seunghun Lee\*, Minwook Chang\*, Seongwon Kang\*, Nahmkeon Hur\*,  
Wonjung Kim\*

**Abstract** : For many medical devices such as blood pumps, hemolysis should be reduced from the viewpoints of medical issues. The shear stress has been identified as the most important factor for the hemolysis. In turbulent flows, high shear stress values are concentrated especially near the wall, compared to laminar flows. The blood damage index (BDI) has been adopted often to predict the hemolysis. Simulation of turbulent flows requires many grids to obtain the precise BDI near the wall. In order to reduce this issue, turbulence wall models are used to relax the grid requirements. However, there exists no turbulence wall model proposed for hemolysis yet. Therefore, the purpose of this study is to develop a turbulence wall model for hemolysis applicable to medical devices.

### 1. 서 론

심혈관계 질병은 전체 사망률에서 높은 비율을 차지해왔으며, 또한 매년 약 80만 명의 새로운 심장 질환이 진단된다. 심혈관 질병의 치료목적으로 인공장기가 개발되었으며, 종종 심장 이식의 연결 다리 역할로서도 사용된다. 이러한 인공 장기 중 하나인, VAD와 ECMO 등에는 혈액을 순환시키기 위해 혈액 펌프가 사용된다. 인간의 생명 유지에 사용되는 혈액 펌프의 개발은 생체공학 적 관점에서 hemolysis를 가장 중요한 요인으로 선택하여 수행되어왔다. Hemolysis는 혈액 속 적혈구가 손상되어 적혈구 내부의 헤모글로빈이 혈장으로 유출되는 현상을 뜻한다. 인공장기 장치에서 hemolysis의 원인으로는 대표적으로 전단응력, 원심력, 세포 간 상호작용, 마찰력 등이 존재한다. 이 중에서 전단응력은 hemolysis의 주된 원인이다. Hemolysis를 측정하기 위한 실험에는 혈액이 동반되는데 이는 적지 않은 제약이 존재한다. 이러한 제약들을 극복하기 위해 수치해석법이 이용될 수 있다.

### 2. 본 론

수치해석으로 hemolysis를 계산하는 방법은 크게 strain-based model과 stress-based model로 나뉘며, stress-based model들 중에서 대표적인 power-law model은 사용의 용이성과 넓은 사용 범위로 인해 대중적으로 사용된다. Power law model은 Giersiepen et al.<sup>(1)</sup>에 의해 처음으로 제안되었으며, 이때 hemolysis의 정도를 나타내는 BDI(Blood damage index)는 다음과 같이 표현된다.

$$BDI = \left( \frac{\Delta Hb}{Hb} \right) (\%) = C t_{exp}^a \tau^b$$

Power-law model의  $t_{exp}$ (노출시간)와  $\tau$ (전단응력)는 hemolysis의 요인들과 연관된다. Power-law model을 이용한 Hemolysis의 수치 계산을 진행할 때, 크게 ‘Lagrangian 기법’과 ‘Eulerian 기법’을 이용할 수 있다. ‘Eulerian 기법’은 계산 구간 전체를 고려하여 hemolysis를 계산하는 방법이며, Lagrangian 기법보다 hemolysis 예측에 더 적합하다. Garon & Farinas<sup>(2)</sup>는 power law model에서 계산 구간의 damage function을 부피 적분하여, BDI계산을 보다 간략화 하였다. 본 연구에서는 이 간략화 된 BDI를 hemolysis 예측 지표

\* 서강대학교 기계공학과

로서 사용하였다.

혈액 펌프의 경우, impeller의 높은 회전 속도로 인해 난류 유동이 발생한다. 난류의 대표적인 특징 중 하나로서 난류유동에서는 와동이 생기며, 이로 인해 Reynolds-전단응력이 발생한다. 하지만 Jones에 따르면 이 응력은 타 전단응력에 비해 상대적으로 작기 때문에 무시할 수 있다. 또한 난류 유동은 층류 유동에 비해 전단 응력이 벽 근처에 특별히 집중되어있으며, hemolysis는 전단 응력에 크게 영향을 받는다. 따라서 벽 근처의 hemolysis 예측이 중요하며, 수치해석에서 벽 근처의 격자 조밀도 선정이 전체 hemolysis 결과 값에 큰 영향을 미친다. 난류유동에서, Choi & Moin<sup>(3)</sup>에 따르면 wall model의 유무에 따라, 전산유체공학의 격자 요구량은 큰 격차를 보인다. 따라서 경제성의 증대를 위하여 wall model이 중용되어 왔다. 그러나 기존 wall model 중 hemolysis를 위한 wall model은 존재하지 않는다. 따라서 본 연구의 목적은 난류 상태의 의료기기에도 적용될 수 있는, hemolysis를 위한 wall model을 개발하는 것이다.

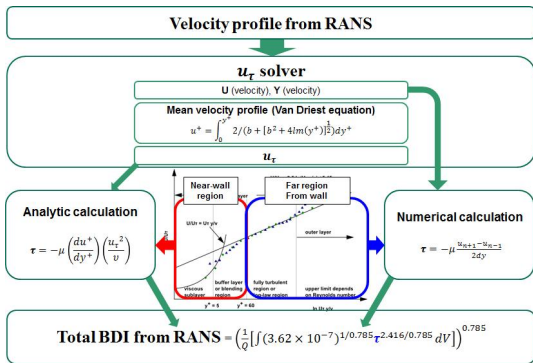


Fig. 1 Schematic diagram of wall model

본 연구에서는 BDI 계산 구간을 두 구간으로 나눈다. 벽 근처 영역은 급격한 속도장의 변화를 정확하게 예측하기 위해 해석적 미분법이 사용되었다. 해석적 미분법을 위하여, 난류 이론으로부터 도출된 평균 속도장 모델 중 하나인 Van-Driest equation을 사용하였다. 벽으로부터 먼 영역은 기존의 수치해석 기법이 사용되었다. 수치 해석법의 오차 확인 및 본 연구에서 제안한 wall model의 영향력을 평가하기 위해, 난류 채널형상의 DNS 자료를 BDI를 예측하여 비교하였다. 또한 hemolysis를 위한 wall model가 BDI 계산에 미치는 효과를 검증하기 위해, 난류 채널 형상의 RANS

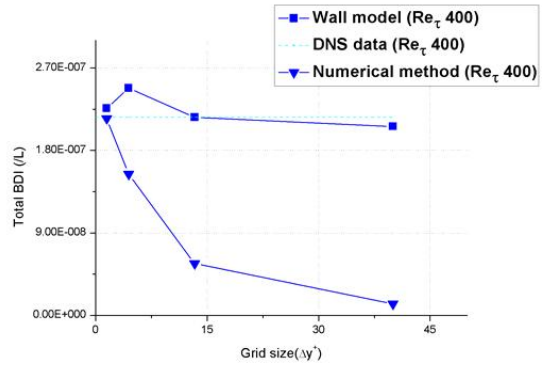


Fig. 2 Effectiveness of wall model for hemolysis 자료를 활용하여 BDI를 비교하였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 일련의 과정을 통하여 hemolysis를 위한 wall model의 효능을 확인하였다. 이 wall model을 사용하여 BDI를 예측할 경우, 큰 격자크기에서 격자 의존성이 개선되었다. 이는 임의의 형상에서 BDI 예측시, 경제성이 증대됨을 의미한다.

### 후 기

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원을 받아 수행한 연구과제임 (No. HI14C0746)

### 참고 문헌

- (1) R. H. Giersiepen M , Wurzinger LJ , Opitz R, "Estimation of shear stress-related blood damage in heart valve prostheses--in vitro comparison of 25 aortic valves," Int. J. Artif. Organs, vol. 13, no. 5, pp. 300 - 306, 1990.
- (2) M.-I. Farinas, A. Garon, D. Lacasse, and D. N'dri, "Asymptotically consistent numerical approximation of hemolysis," J. Biomech. Eng., vol. 128, no. 5, pp. 688 - 696, 2006.
- (3) H. Choi and P. Moin, "Grid-point requirements for large eddy simulation: Chapman's estimates revisited," Phys. Fluids, vol. 24, no. 1, pp. 3 - 8, 2012.