

인공심장의 발전을 가져온 항공우주왕복선의 CFD 기술

이 글에서는 항공우주왕복선의 엔진설계 시 사용되었던 CFD(Computational Fluid Dynamics) 기술을 인공심장 개발에 어떻게 적용하여 심장보조장치(Ventricular Assist Device)를 만들었는지 소개하고자 한다.

곽도찬	NASA Ames Research Center, Senior Technologist	e-mail : dochan.kwak@nasa.gov
한준희	한양대학교 기계공학과, 석박사 통합과정 중 석사 1기	e-mail : wunderval@nate.com
차대호	한양대학교 기계공학과, 학부 4년생	e-mail : daeho103@naver.com
이도형	한양대학교 기계공학과, 교수	e-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

NASA Johnson Space Center의 엔지니어 David Saucier는 1984년에 시행된 심장이식에 영감을 받아 휴스턴의 Baylor 의과대학에서 그의 외과의사 Dr. Michael E. DeBakey와 Dr. George P. Noon의 협력 하에 심장보조장치 설계에 착수하였다. DeBakey 심실보조 장치(VAD: Ventricular Assist Device)는 심장질환을 가지고 있는 환자들의 혈액순환을 돕기 위한 소형화된 심장 펌프로 디자인되었다. 이후 MicroMed Technology Inc.와 Ames Research Center의 NAS Systems 부서와 NASA Johnson Space Center의 협력으로 인해 DeBakey VAD는 Saucier의 초기 디자인인 축류펌프로 발달되어왔다.

DeBakey VAD 초기버전

DeBakey VAD 초기버전은 혈전(혈액응고)과 과도한 용혈(적혈구 손상) 방지를 위한 것이었다. 전산 유체역학(CFD)적인 모델기법과 고성능 컴퓨팅 기술의 도입을 통하여 NASA 우주 왕복선 엔진 재설계에 참여한 곽도찬 박사(Dr. Dochan Kwak)는 같은 기술을 이용하여 심장보조장치의 성능을 개선시켰으며, 이 기

술은 향후 생명연장에 기여도가 높을 것으로 기대되고 있다.

Kiris, Kwak, 및 NAS의 Stuart Rogers는 로켓 추진력 연구에 적용되었던 INS3D 컴퓨터 코드를 개발한 바 있으며, 이와 같은 코드는 DeBakey 펌프 개발에 사용되었다. DeBakey VAD의 설계 시 주안점은 혈액이 고여 있는 영역과 높은 전단이 발생하는 부분의 발견이다. 이곳의 문제점은 기존의 장치에서 나타난 높은 적혈구 손상과 혈액이 응고되는 현상이 베어링 주위에서 발생함으로써 로터의 작동을 멈추게 하는 것이다. 앞서 언급된 문제점들은 전산유체역학(CFD)의 도입으로 인해 해결이 가능해졌다.

NAS연구원들이 이 연구에 참여하기 전 단계에서는 DeBakey 장치를 이용하여 동물실험을 실시하였을 때 몸 속에 삽입된 후 이틀 이상을 지속하지 못하였다. 이 후 MicroMED 사의 최고경영자 Dallas Anderson과 수석 엔지니어 Robert Benkowski, Kiris와 Kwak의 협동연구를 통해 100일 이상 지속이 가능한 장치 개발에 성공하였다. 임상실험결과 심장이식수술 후 성공한 실험결과 중 가장 오래 지속된 경우는 1년이였다. 이 연구의 궁극적인 목표는 VAD가 심장 이식 수술을 대신하는 것이다.

표 1 NAS 연구원들에 의해 제안/수정된 VAD의 발전

	기존 디자인	새로운 디자인
용혈현상 지수	0.02	0.002
혈전형성	yes	no
사용시간	2 days	1 year

※ 혈전현상(혈액의 응고)은 제거되었으며, 용혈현상(세포 손상) 또한 현저히 줄어들었다. 그리고 시험 기간 또한 늘어났다. 이 표는 Baylor 의과대학과 MicroMED 사로부터 얻어진 임상실험 결과를 내포함.

전 세계적으로 약 2,000만 명의 사람들이 심장 질환으로 인해 고통받고 있으며, 그 중의 25%는 미국에 살고 있다. 올해 북미지역의 심장질환자는 약 25만 명 가량 증가하는 반면 미국 내 심장기증자는 약 2,500명 안팎이다. 때문에 DeBakey VAD은 심장이식수술에 필요한 심장 기증자의 수가 안정화될 때까지는 환자들의 삶의 연장을 가능하게 하며, 혈압 약화와 심장의 혈류량 약화로 고통받고 있는 환자들에게 혈류 신장을 가져다 줄 수 있다. 미국과 유럽 그리고 아시아에서의 성공적인 실험은 장기적으로 심장의 기능을 보조할 수 있는 장치임에 틀림이 없다.

DeBakey VAD는 기존에 존재하는 VAD에 비해 소형화 및 적은 힘으로의 운전을 가능하게 했고 가격 또한 저렴해졌다. 장치의 크기는 AA 배터리 두 개 정도의 사이즈로 현존하는 심장보조장치들의 10% 정도이며, 무게는 약 4온스(약 113.4 g)에 달한다. 이는 어린 아이들의 가슴에도 장착이 가능한 작은 크기이다. 또한 구동하기 위하여 필요한 힘은 8W밖에 되지 않는다.(그림 1 참조)

Baylor 대학과 NASA 그리고 MicroMED 사의 협력으로 인해 보다 저렴한 장치의 구현이 가능해졌다. 현존하는 심장보조장치의 가격은 약 7만 5,000\$이다. 하지만 MicroMED 사의 디자이너들은 DeBakey VAD를 좀 더 저렴한 가격으로 만들어 내기 위한 프로젝트를 진행 중이다.

현재 약 500명의 환자들이 이 장치를 사용하고 있으며 향후 더욱 더 수요가 늘어날 것으로 예상된다.

보조장치의 성능 향상을 가져온 NAS 디자인

곽도찬 박사는 우주왕복선의 가장 중요한 부분인 엔진연료 터보펌프를 해석하기 위해 적용된 CFD 유동해석 알고리즘을 심장보조장치에 동일하게 적용하여 혈액의 흐름을 해석하였다. 연료 펌프는 1만 2,000~3만 7,000rpm으로 회전하며, VAD의 임펠러 날개는 약 1만 rpm으로 회전한다. 임펠러의 회전은 분당 5리터(1.25ℓ 펌프 4개 분량)의 피를 흐르게 한다. CFD기술은 우주왕복선의 엔진 설계 시 가장 중심이 되며 VAD의 기술 향상에도 중추적인 역할을 한다. 이번 VAD실험은 소형장치에 CFD기술을 적용하는 중요한 기회였으며 장치의 소형화에 따르는 부품 강도 약화에 대한 분석은 CFD기술 없이는 불가능 한 일이다.

곽도찬 박사의 말을 인용하면 혈액의 흐름에 도움이 되는 부분과 불필요한 부분을 명확히 규명하기 위하여 CFD는 필수적인 기술이다.

NAS 팀은 이전의 동물 실험에서의 결과와 CFD를 이용하여 젖소의 혈액의 흐름을 해석 하였다. 소를 이용한 임상 실험에서의 결과 값은 CFD를 이용한

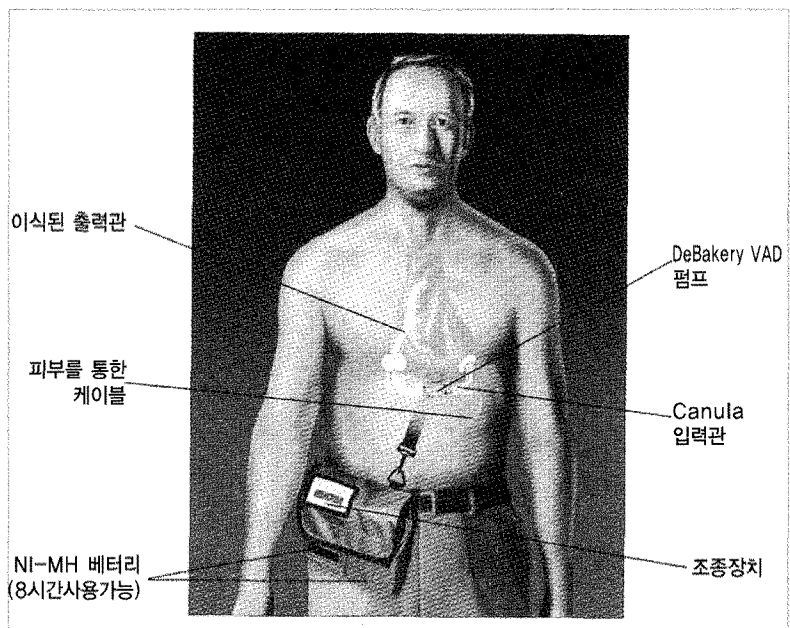


그림 1 소형 DeBakey 심장 보조장치가 환자에게 정상적으로 이식되었다. 며칠 시간 사용 가능한 배터리를 착용하고 환자는 샤워나 수영을 할 수도 있다.(MicroMed Technology)

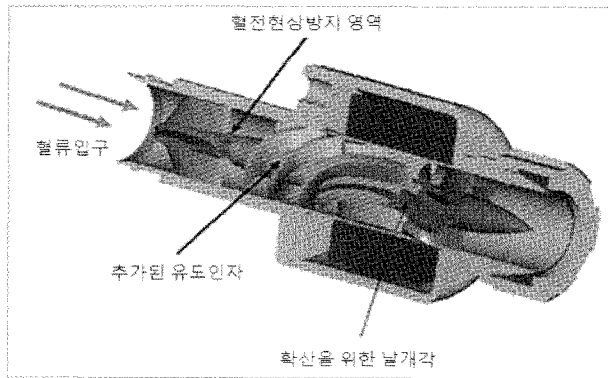


그림 2 CFD 해석을 사용하여, NAS 연구팀의 광도찬 박사는 약 22%의 효율상승을 보인 수정된 디자인을 고안하였다.(MicroMed Technology)

여 해석한 결과 값과 비슷한 혈류를 보였기 때문에 동물을 이용한 실험을 상당량 줄일 수 있었다.

NAS 연구팀은 관의 길이변화가 가능한 디자인, 날개의 굽힘각, 임펠러 끝의 크기 변화가 가능한 7개의 새로운 모델을 설계하였다. 결과적으로 과도한 전단응력과 혈액의 흐름을 방해하는 부분을 해결한 세 가지 수정된 DeBakey VAD 디자인을 제안하였다.

수정된 DeBakey VAD의 우선 개선된 점은 기존의 임펠러에 유도인자를 추가하여, 임펠러의 회전 시 혈압을 충분히 증가시켜 혈액의 흐름이 임펠러 허브 쪽으로 역류하는 현상을 억제하는 역할을 한다. 앞부분에 위치한 날개는 비스듬한 형상을 이루며 임펠러와 함께 혈액의 방향을 제시한다. 따라서 이 장치를 통하여 효율을 증대시킬 수 있었다.(그림 3 참조)

두 번째로, CFD의 해석을 통해 임펠러 날개와 혈류가 만나는 베어링 부근에서 혈액이 응고하는 단점을 보완한 결과가 제시되었다. 허브 폭의 증가를 통해 혈액순환을 돕고, 혈액이 고여 정체되는 부분을 제거하였다. 추가적으로, 허브 표면적을 가늘게 만들어 혈액흐름의 가속을 꾀하였고 빠른 속도의 혈액의 흐름을 통해 벽면에 있는 불순물까지 제거하는 효과를 만들어냈다.

마지막으로, NAS 연구진들은 확산을 위한 날개각의 변형을 통해 혈류의 각(angle) 또한 변형하면서 실험을 진행하였다. 광도찬 박사는 보조장치를 이용하여 흐르는 혈류에서 확산기의 각도 변형의 실험을 통해 가장 원활한 흐름을 나타내고 세포의 손상을 최소화한 전단응력을 나타내는 각도를 발견하였다. MicroMed Technology와 Baylor College의 임상실험 결과에 따

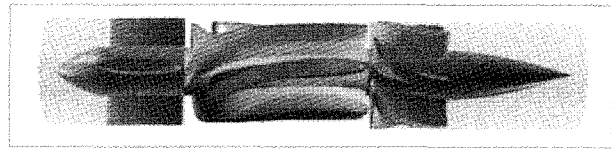


그림 3 (a) 기존의 VAD영상(visual of the original VAD)

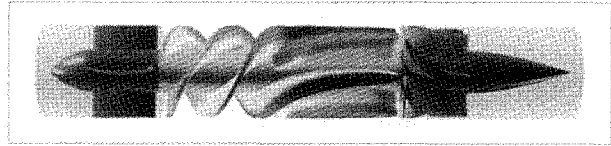


그림 3 (b) NAS 연구원에 의한 수정된 영상(unit after modification by NAS researchers)

DeBakey 장치의 유도인자를 추가하는 것은 날개 끝부분에서의 압력증가와 연속적인 유동을 만드는데 있어 위험요소인 혈액의 역류를 제거한다.



그림 4 CFD 해석을 이용한 디퓨저의 표면 주위로 혈류패턴을 측정하는 것은 전단력의 높은 지점과 낮은 지점의 영역을 표시하여 준다. 파란 영역은 낮은 응력범위를 나타내고, 붉은 영역은 혈액의 흐름에서 난류를 나타낸다. 가장 높은 전단응력은 적은 적혈구 손상을 의미한다.

르면 용혈현상은 기존의 결과와 비교해 약 10% 가량으로 줄어들었다.

생명을 살리기 위한 협력

NAS, Johnson SpaceCenter, Baylor College, 그리고 MicroMed의 협력으로 새롭게 DeBakey VAD에 대한 기술을 확보하였다. NASA에서는 이 프로젝트를 올해의 상업적 발명품으로 선정한 바 있으며 이 장치의 오랜 기간의 연구가 매년 6만 명의 생명을 살릴 것으로 전망하고 있다. DeBakey VAD의 성공적인 수행은 의학기술의 역사상 큰 업적이 될 것임에 틀림없다. NAS의 연구원의 보고서에 따르면 이 프로젝트는 어떤 것보다 CFD기술이 성공적으로 생명을 살리는 일에 적용된 사례로 볼 수 있다. 광도찬 박사는 실제 혈관의 흐르는 혈류의 변화까지 해석하고 VAD에 적용하기 위하여 좀 더 발전된 고성능 컴퓨팅 기술의 개발이 필요함을 강조했으며 또한 DeBakey VAD의 심장장치에 사용된 CFD해석은 미래에 또 다른 생명공학(biomedical) 장치에 적용 될 수 있는 큰 가능성을 지니고 있다.