

협착 동맥혈관의 혈류유동 모델링

김성종¹, 박영란¹, 김상진², 강형섭², 김진상², 오성훈³, 강성준³, 김기범^{2*}

¹전북대학교 화학공학부, ²전북대학교 수의과대학 약리학교실·인수공통전염병연구소, ³전북대학교 기계시스템공학부

Modeling of Hemodynamics in Stenosed Artery

Seong-Jong Kim¹, Young-Ran Park¹, Shagn-Jin Kim², Hyung-Sub Kang²,
Jin-Shang Kim², Sung-Hoon Oh³, Sung-Jun Kang³ and Gi-Beum Kim^{2*}

¹Division of Chemical Engineering, Chonbuk National University

²Department of Pharmacology, College of Veterinary Medicine, Korea Zoonosis Research Institute,
Chonbuk National University

³Division of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University

요약 동맥경화는 혈관 안에서 콜레스테롤의 침착 때문에 혈관이 좁아지거나, 딱딱해 지거나, 두꺼워 지게 되는데, 이런 현상이 심해지게 되면 동맥은 단단해져서 혈액이 원활히 통과하지 못하게 되고 심하면 사망 까지 이르게 되는 것이다. 본 연구에서는 복대동맥에서의 동맥경화가 진행되는 것을 탄성 혈관 일 때와 강성 혈관 일 때 각각 협착물이 혈관 직경의 20과 45%로 설정하고 속도와 압력 변화를 살펴보기 위하여 유한 요소 해석을 이용하여 모델링을 하였다. 혈관이 탄성 혈관일 때 속도와 압력 값은 협착물이 혈관 직경의 20%일 때 보다 45%일 때 더 높게 나타났으며, 강성 혈관에서 속도와 압력 값은 협착물이 혈관 직경의 20%일 때보다 45%에서 더 높았다. 협착물이 혈관 직경의 20과 45%인 탄성 혈관에서 재순환영역이 나타났다. 본 연구결과 혈관 협착에 따른 혈류역학적 특징을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

Abstract This study is about atherosclerosis which occupies the highest rate in many diseases people have and we have studied about atherosclerosis for abdominal aorta. Atherosclerosis is the phenomenon which blood vessel gets narrower, harder and thicker due to the stenosis of cholesterol in blood vessel. If it becomes worse, arteries will be hard and blood can't flow smoothly, and even it can reach to death. In this study, the geometric models of the considered stenotic blood flow are two different types of constriction of cross-sectional area of blood vessel; 20 and 45% of constriction in each elastic wall and rigid wall. We have modeled by using finite element method to observe the changes of velocity and pressure. In case of the diameter of blood vessel decreased 45% in elastic wall model, the values of velocity and pressure were higher than the case of 20% and in case of the diameter of blood vessel decreased 45% in rigid wall model, the values of velocity and pressure were higher than the case of 20%. In cases of elastic wall models of the diameters of blood vessels decreased each of 20% and 45%, recirculation zones appeared. This results show understanding of hemodynamic properties depending on stenosed blood vessels.

Key Words : Atherosclerosis, Stenotic blood flow, Elastic and rigid wall vessel, Finite elements method (FEM), Computer fluid dynamics (CFD)

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0016405)

*Corresponding Author : Gi-Beum Kim

Tel: +82-10-6480-2468 email: kgb70@jbnu.ac.kr

접수일 12년 03월 05일

수정일 12년 04월 13일

게재확정일 12년 05월 10일

1. 서론

혈관은 혈액을 체내의 각 부분에 수송해주는 기관으로, 사람의 혈관을 일직선으로 연결한다고 하면 약 10만 km에 달하며, 지구를 두 바퀴 반 정도 도는 거리에 해당한다[1]. 혈관 중 동맥은 심장의 혈액을 온몸으로 보내주는 역할을 한다. 크게 대동맥과 폐동맥으로 나누며 대동맥을 흐르는 혈액은 충분한 산소를 가진 반면, 폐동맥은 이와 반대이다. 체내를 돌아 이산화탄소를 흡수한 정맥혈은 심장의 우심실을 통하여 나와 폐동맥을 통하여 폐로 이동한다. 동맥혈관의 벽을 구성하는 조직은 3중 구조로 되어 있는데 안쪽으로부터 내막, 중막, 외막이라 한다. 혈관의 굵기에 따라서 각층의 두께와 구조가 각각 다르다. 내막은 탄성에 강한 구조로 이루어져 있고, 중막은 매우 두꺼우며, 고리 모양으로 이어진 민무늬근섬유와 탄성섬유로 되어 있다. 동맥은 단순히 혈액을 공급하는 관이 아니라 탄력성을 가지고 있어 간헐적으로 뿜어 나오는 심장의 혈액을 꾸준히 말초 혈관까지 전달하는 역할을 담당하며 이를 통하여 혈압을 유지하는 완충 작용을 하고 관상동맥에 원활한 혈류를 공급한다. 그러나 현대 사회의 발전과 더불어 환경오염이나 스트레스 등으로 인한 사망율이 크게 증가하고 있으며, 그 중에서도 높은 비율을 차지하고 있는 질환 중 하나가 혈관 질환이다[2-4].

동맥은 탄력이 있으며 부드러운 튜브이다. 혈관 내벽에 작고 노란 덩어리 즉, 콜레스테롤, 인지질, 칼슘 등을 함유한 지방성 물질(plaque)이 축적되면 혈관이 딱딱해진다. 이 지방물질이 증가되면 동맥은 단단해져 탄력성을 잃게 될 뿐 아니라 좁아져서 혈액이 원활히 통과하지 못하게 된다. 이렇게 혈액공급이 저해되거나 압력이 높아져 동맥이 파열, 박리 등이 일어나는 과정을 동맥경화(atherosclerosis)라고 한다. 동맥경화는 관동맥 질환, 뇌혈관 질환, 폐쇄성 말초질환 등으로 발현되는 서구사회의 가장 흔한 사망원인중 하나이며, 최근 우리나라에서도 혈관질환으로 인한 유병율이 급속한 증가 추세를 보이고 있다. 동맥경화에 대한 기능적, 구조적 변화의 발생 및 진행에 관련된 기전은 아직 정확히 알려지지 않았으나 일반적으로 고 콜레스테롤, 흡연, 고혈압, 당뇨 등이 주요원인으로 지적되고 있으며, 최근에는 혈류 역학적 특성이 동맥경화성 플라크의 형성 및 성장에 영향을 미치는 것으로 알려져 연구가 활발히 진행 중이다[5-7]. 따라서 혈관 질환에서 동맥 손상에 대한 병인학적 기전과 혈류역학적 위험인자의 완전한 이해를 통한 연구는 혈관 질환의 발생으로 인한 임상적 합병증 및 사망율을 줄이는데 크게 기여할 수 있다[8].

혈관 질환을 예방하기에 앞서 본 연구에서는 유한요소

방법(Finite Elements Method, FEM)과 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)해석을 통하여 동맥경화가 진행되었을 때, 혈관의 혈류 속도와 압력의 변화를 살펴보고 수치 해석적 연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 유체의 점성에 의해 나타나는 압력과 마찰력을 고려하여 다음과 같은 유체운동 방정식을 이용하였다[9].

물질식은 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$ 운동량식은 $\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v - \tau) = f^B$, 그리고 에너지식은 $\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v E - \tau \cdot v + q) = f^B \cdot v + q^E$ 을 이용하였다. 여기서 t 는 시간, ρ 는 밀도, v 는 속력벡터, f^B 는 유체의 힘 벡터, τ 는 응집 tensor, E 는 에너지, q 는 열의 흐름, q^E 는 열 발생 비율이다.

위 식들을 기반으로 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

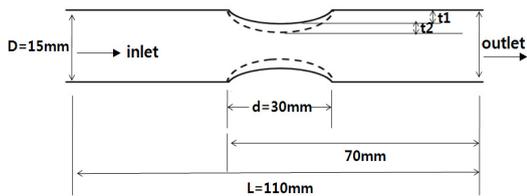
$$\rho \left(\frac{dv}{dt} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f$$

혈액의 흐름은 비압축성(incompressible), 층류인 뉴턴 유체(Newtonian fluid)이며 혈액은 등방성(isotropic)을 갖는 탄성체(elastic)이라고 가정하였다. 혈액의 밀도(density, ρ_f)는 1.060 g/cm^3 , 동적 점성(viscosity, μ)는 $0.034 \text{ g/cm}\cdot\text{s}$ (μ)라고 가정하였다. 또한 혈관의 Young's modulus (E)는 $0.7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, Poisson's ratio (ν)는 0.49, 밀도(density, ρ_s)는 2 g/cm^3 , 그리고 혈관 벽의 두께는 1 mm로 균일하게 설정하였다.

구조해석, 유체해석, 유체-구조연성 해석과 같은 유한요소 해석을 위하여 ADINA 8.6(able MAX, U.S.A)를 사용하여 모델링하였다. 본 연구에서는 동맥경화로 인해 복대동맥의 혈관 직경이 20%와 45% 감소하였을 때, 강성 혈관(rigid wall vessel)과 탄성 혈관(elastic wall vessel)에서의 혈류 속도와 압력, 그리고 전단응력 변화를 살펴보기 위하여 유한요소방법과 전산유체역학해석을 사용하였다.

본 연구에 사용된 협착혈관 모델은 그림 1과 같이 혈관 직경이 15 mm인 2차원 축 대칭 모델을 사용하였고, 협착 길이와 탄성 혈관과 강성 혈관에서 20과 45%의 협착률을 가지는 경우를 고려하였다. 협착부에서 출구까지 거리는 완전 발달 유동을 가지기 위해 충분한 거리인 70 mm로 설정 하였다. 혈관의 총 길이(L)는 110 mm이고 직

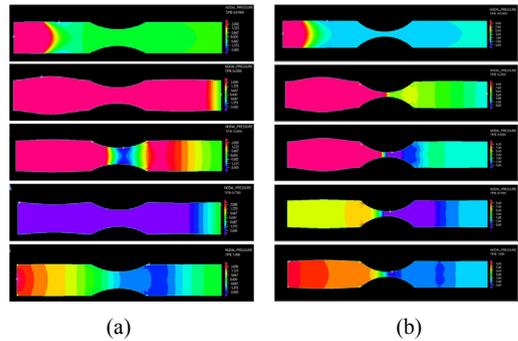
경(D)은 15 mm로 이는 동맥 협착이 되지 않은 혈관의 직경이다. 협착부에서 혈류 흐름의 길이(d)는 30 mm이다. 협착부에서 협착정도를 나타내기 위하여 t_1 , t_2 는 각각 15 mm의 혈관 직경에 대한 20과 45%의 협착비율로 가정하였다. 입구(inlet)의 속도부하(velocity loading)은 0.39 m/s로 가정하였다. 관련 방정식은 Finite Element Commercial Computational Fluid Dynamic Software인 ADINA 8.6(ADINA, Watertown, MA)를 사용하여 해석하였다. 모든 계산은 Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU T9400 @ 2.53GHz, 4GB RAM, Windows XP를 사용하였다.



[그림 1] 협착 혈관 모델
[Fig. 1] Model of stenosis blood vessel.

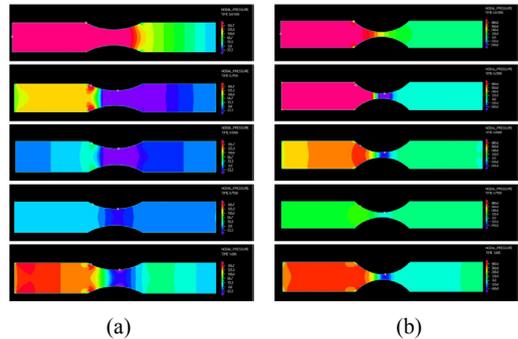
4. 결과 및 고찰

그림 2, 3은 협착율이 20%일 때와 45%일 때 탄성혈관과 강성혈관에서의 압력분포를 나타낸 그림이다. 협착부에서의 압력은 정상 혈관일 때의 압력보다 높게 나타났다. 원래 흐르던 혈액이 계속 흐르기 위해 밀어붙이지만 협착부에서의 혈관 직경이 정상보다 좁기 때문에 병목 현상이 일어나게 된다. 따라서 협착부 입구에서 압력이 높아지는 것을 확인하였다. 협착율이 혈관직경의 20%일 때보다 45%일 때 협착부의 혈관 직경이 더욱더 좁아지게 되므로 협착부 입구에서 압력이 더 큰 것을 관찰할 수 있었고, 협착율이 높을수록 혈관이 파열될 가능성이 높다는 것을 예측할 수 있었다. 탄성 혈관(elastic wall vessel)은 혈관 벽에 탄성력이 있기 때문에 갑자기 좁아지는 협착부를 빠져나가지 못하는 혈액이 축적되어 혈관이 팽창되는 것으로 나타났다. 강성 혈관(rigid wall vessel)의 경우 혈관 벽에 탄성이 전혀 없기 때문에 협착부를 빠져나가지 못한 혈액이 축적되어도 혈관이 팽창되지 않았다. 강성혈관은 탄성 혈관과 달리 혈관이 팽창되면서 압력을 감쇄시켜주지 못하기 때문에 협착부 입구에서 더 많은 압력을 받게 된다. 따라서 탄성 혈관보다 강성 혈관에서의 압력이 더 높은 것을 확인할 수 있었고 이에 따라 탄성 혈관에서보다 강성 혈관에서 파열 가능성이 더 높은 것을 예측할 수 있었다.



[그림 2] 탄성 혈관에서의 압력분포. (a) 20% 협착, (b) 45% 협착

[Fig. 2] Pressure distributions in the case of the diameter of blood vessel of elastic wall vessel. (a) decreases 20%, (b) decreases 45%

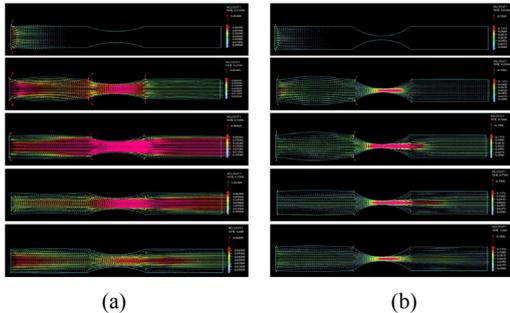


[그림 3] 강성 혈관에서의 압력분포. (a) 20% 협착, (b) 45% 협착

[Fig. 3] Pressure distributions in the case of the diameter of blood vessel of rigid wall vessel. (a) decreases 20%, (b) decreases 45%

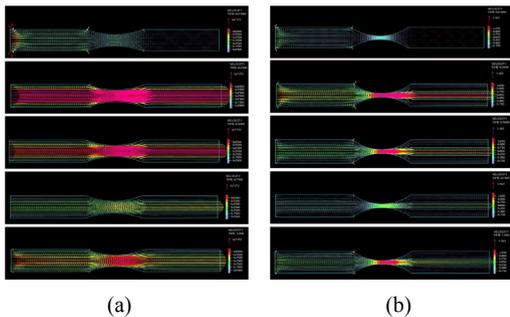
그림 4, 5는 협착율이 20%일 때와 45%일 때 탄성혈관과 강성혈관에서의 속도분포를 나타낸 그림이다. 협착부에서의 속도는 정상 혈관일 때의 속도보다 빠르게 나타났다. 혈관의 직경이 협착부에서 좁아지기 때문에 압력이 높아지고 그에 따라 속도가 빨라지게 되는 것을 확인할 수 있었다. 협착율이 혈관 직경의 20%일 때보다 45%일 때 혈관 직경이 더욱더 좁아지게 되므로 압력이 더 높아져 20%일 때보다 45%일 때 혈류 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 탄성 혈관에서는 혈류가 유입되면서 팽창하는 혈관의 탄성에 의해 다시 좁아지면서 생기는 압력의 변화가 있을 후 속도가 빨라지게 된다. 그러나 강성 혈관에서는 혈관에 탄성이 없기 때문에 혈류가 유입되는 압력 그대로 속도가 빨라지게 되고, 협착부를 빠져나간 직후의 혈류 속도와 이미 빠져나간 혈류 속도 차에 의해 재순환 영역이 발생하게 된다. 탄성 혈관 모델과 강

성 혈관 모델 각각의 경우에 압력이 주어짐에 따라 혈류의 속도 변화가 생기는데 협착율이 20%일 때에는 혈관 직경이 좁긴 하지만 일반 혈관 직경과 크게 차이가 없어서 압력을 받는 것이 혈액 유입 시부터 일정하지만, 45% 일 때에는 혈관 직경이 작아지는 곳에서부터는 유입 시 받은 압력이 제대로 전달이 되지 않는 것을 볼 수 있고, 그 압력이 제대로 작용하지 못해서 혈액이 재순환하는 현상이 나타났다.



[그림 4] 탄성 혈관에서의 속도분포. (a) 20% 협착, (b) 45% 협착

[Fig. 4] Velocity distributions in the case of the diameter of blood vessel of elastic wall vessel. (a) decreases 20%, (b) decreases 45%



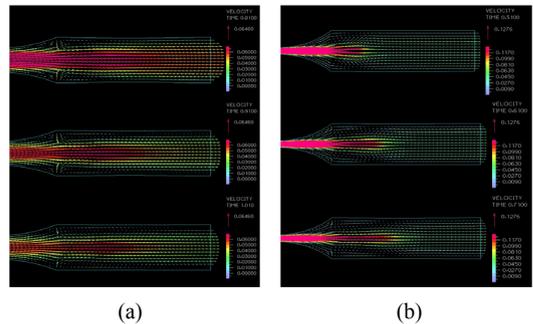
[그림 5] 강성 혈관에서의 속도분포. (a) 20% 협착, (b) 45% 협착

[Fig. 5] Velocity distributions in the case of the diameter of blood vessel of rigid wall vessel. (a) decreases 20%, (b) decreases 45%

그림 6은 협착율이 혈관 직경의 20%일 경우와 45%일 경우에서 나타나는 재순환 영역을 나타낸 그림이다. 재순환 영역은 그림에서 볼 수 있듯이 협착부 뒤쪽에서 발생된다. 가장 작은 재순환 영역은 협착율이 혈관 직경의 20% 이고, 탄성 혈관 모델에서 발생하였다. 협착율의 비교는 재순환영역의 크기로 설명된다. 따라서 탄성 혈관 모델에서 협착율이 혈관 직경의 20%에서 45%까지 증가할 때 재순환 영역은 점차적으로 길고 두껍게 발생한다.

최대의 재순환 영역은 협착율이 혈관 직경의 45%이고 탄성 혈관 모델에서 발생했다. 또한 재순환영역은 벽 근처에서 발생한 것을 확인할 수 있었다. 재순환 영역을 통한 혈액 흐름의 변화는 혈액 흐름의 불안정으로 인해 나타난 것으로 판단된다.

모델링 결과는 혈액 흐름에 있어서 탄성 혈관 모델과 강성 혈관 모델, 협착율이 혈관 직경의 20과 45%일 경우 발생하는 좁은 통로에서 정도의 차이는 있지만, 재순환 영역으로 인한 혈액흐름의 이상을 가져올 수 있다는 것을 보여준다. 만약 재순환영역이 협착부 하류에서 발생한다면 혈액의 소량은 협착 이후 부분에서 정체증이 발생할 것으로 예상된다. 결과적으로 혈관은 혈액순환의 비정상적인 결과로 혈류 흐름의 속도가 일정하지 못하거나, 심한 경우 관의 파열까지 이어질 수 있을 것으로 예상된다.



[그림 6] 탄성 혈관에서의 재순환 영역. (a) 20% 협착, (b) 45% 협착

[Fig. 6] Recirculation zones in diameter of blood vessel in elastic wall. (a) decreases 20%, (b) decreases 45%

5. 결론

본 연구에서 사용프로그램인 ADINA 8.6 program을 이용하여 20과 45%의 협착율에서 탄성 혈관 모델과 강성 혈관 모델을 고체구조로 연관시킨 흐름을 연구하는 FSI를 사용하였다. 주목할 만 한 점은 생리학적인 속도와 압력 특성을 비교한다는 가정 하에 혈관 벽의 종류와 협착율의 정도가 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

탄성 혈관 모델과 강성 혈관 모델의 실험결과 협착 지역에서의 속도와 압력의 변화가 있는 것으로 나타났다. 또한 탄성 혈관 모델과 강성 혈관 모델의 경우 협착율이 20과 45%일 때 속도와 압력의 변화 정도가 다른 것으로 나타났다. 탄성 혈관 모델에서는 혈류가 유입될 때 혈관 입구가 팽창한 뒤에 수축하면서 압력이 증가한 뒤 협착부로 혈류가 흐르게 되고 협착부는 압력을 받아 혈류속

도가 빠르고 공간도 좁아서 압력이 더 커지게 된다. 강성 혈관 모델에서는 혈관이 유연하지 못하기 때문에 압력이 한번 주어지면 지속적으로 그 압력을 받아서 혈액이 흐르게 되므로 협착부에서는 탄성벽보다 받는 압력이 적어서 혈류의 흐름이 느려지게 된다. 탄성 혈관 모델과 강성 혈관 모델의 실험결과를 비교해 보면 탄성 혈관 모델에서는 혈류가 유입되면서 부풀어 오르는 혈관이 탄성에 의해 다시 좁아지면서 생기는 압력의 변화가 생긴 다음에 속도가 빨라지게 된다. 하지만 강성 혈관 모델에서는 혈관에 탄성이 없기 때문에 혈류가 유입되는 압력 그대로 속도가 빨라지게 되고, 협착부를 빠져나간 직후의 혈류 속도와 이미 빠져나간 혈류 속도 차에 의해 재순환 영역이 발생하게 된다.

임상적 관점에 의하면, 혈액 역학적 요소는 동맥 경화증 장애에 중요한 역할을 한다. 협착율이 혈관 직경의 45%인 경우는 혈류 역학적 요소들로 인하여 동맥경화가 심해지게 되면 말초 혈관의 혈액순환 장애가 일어나고, 수축기 고혈압이 진행되어 심장벽이 두꺼워져 심장이 비대해지거나 심하게는 사망에 이르게 되는 부정적 영향을 미칠 수 있어 사전 예방이 필요하다.

References

[1] H. S. Kim, "A intelligible story of hypertension and heart disease", Koonja, pp.3-90, 2010.

[2] N. B. Lee, et al., "Development of a Pulse Wave Velocity Measurement System and Assessment of the System Reproducibility for the Diagnosis of Arteriosclerosis", Korean J. Institute of Oriental Medical Diagnostics, **9(1)**, pp.112-124, 2005.

[3] L. Jiang, et al., "On the blow up criterion for the 2-D compressible Navier-Stokes equations", Czechoslovak Math. J, **60(1)**, pp.195-209, 2010.

[4] S. H. Suh, et al., "Correlation between atherosclerosis and geometrical characteristic changes of blood vessels", Biomedical Engineering Society for Circulatory Disorders Semiannual 5th conference, 2005.

[5] M. S. Park, et al., "Numerical analysis of the blood flow in the korean artificial heart using two dimensional model", Korean J. Biomedical and biological engineering, **24(4)**, pp.301-307, 2003.

[6] H. K. Kim, et al., "The relationship between aortic distensibility and serologic markers of atherosclerosis", J. Internal medicine, **77(1)**, pp.68-75, 2009.

[7] S. D. Jung, et al., "A Numerical Analysis on the

Hemodynamic Characteristics in Elastic Blood Vessel with Stenosis", J. Biomed. Eng, **23(4)**, pp.281-286, 2002.

[8] G. H. Kwon, et. al., "Insulin Sensitivity is Associated with the Presence and Extent of Coronary Artery Disease", Korea circulation Journal, **32(7)**, pp.566-572, 2002.

[9] T. W. Tae, B. Buriev, "Numerical study of pulsatile blood flow in stenotic artery", J. KSME, **32(11)**, pp.891-896, 2008.

김성종(Seong-Jong Kim)

[정회원]



- 1983년 2월 : 전북대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 전북대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 2000년 10월 ~ 2002년 8월 : 전북대 익산캠퍼스 산업기술연구소장
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 공과대학 화학공학부 교수

<관심분야>
생체의용화학, 분체공학

박영란(Young-Ran Park)

[정회원]



- 2010년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 화학공학부대학원 (화학공학 석사)

<관심분야>
화학공학, CFD(Computer Fluid Dynamics)

김 상 진(Shang-Jin Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 전북대학교 대학원 (수의학석사)
- 2005년 2월 : 전북대학교 대학원 (수의학박사)
- 2005년 4월 ~ 2006년 3월 : 학진 박사후연수 (전북대학교)
- 2006년 8월 ~ 2007년 2월 : 전북대학교 기금교수
- 2007년 4월 ~ 2010년 6월 : Research Associate in University of Bristol
- 2010년 8월 ~ 현재 : 전북대학교 수의과대학 수의학과 교수

<관심분야>

생체정보, 의공학

강 형 섭(Hyung-Sub Kang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 전북대학교 수의학과(수의학석사)
- 1999년 2월 : 전북대학교 수의학과(수의학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 수의과대학 수의학과 교수

<관심분야>

생명공학, 생체정보, 의공학

김 진 상(Jin-Shang Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 전북대학교 수의학과 (수의학사)
- 1989년 8월 : 전북대학교 대학원 (수의학 석사)
- 1993년 2월 : 전북대학교 대학원 (수의학 박사)
- 1993년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 교수

<관심분야>

심장약리학, 동물사체 매립제

오 성 훈(Sung-Hoon Oh)

[정회원]



- 1998년 8월 : 전북대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계시스템공학부 부교수

<관심분야>

절삭공구 마모감시, 난삭재 가공특성

강 성 준(Sung-Jum Kang)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 조선공학과(석사)
- 1990년 2월 : 서울대학교 조선공학과(박사)
- 1992년 ~ 1993년 : 원자력연구소 선임연구원
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계시스템공학부 교수

<관심분야>

전상구조해석, 구조설계

김 기 범(Gi-Beum Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 전북대학교 대학원 화학공학과(공학석사)
- 2004년 2월 : 전북대학교 대학원 화학공학과(공학박사)
- 2010년 8월 : 전북대학교 대학원 의학과(의학박사수료)
- 2007년 ~ 2009년 : 전북대학교 질환동물모델사업팀 신진연구자
- 2010년 1월 ~ 현재 : 전북대학교 인공공동전염병연구소 학술연구교수

<관심분야>

생체공학, 인공장기, 혈류유동, 전산유체