맥진단 기술의 고도화를 위한 KIOM 연구 개발 현황

김 영 민
한국한의학연구원
한의기반연구부

김 재 욱
한국한의학연구원
한의기반연구부

Ⅰ. 서 론

2010년 맥진단 기술의 현황 및 주요 알고리즘 개발에 관한 특집호를 게재한 지 6여년의 시간이 흘렀다. 지난 호에서 강[1] 등은 한의학의 진단법을 소개하고, 이 중 절진의 꽃이라 불리는 맥진의 종류와 쓰임새를 고문헌을 통해 풀이하였다. 또한 맥진을 객관화하기 위한 노력으로 핵심 요소기술들을 센서, 측정, 신호분석, 진단연계, 임상시험 및 성능시험 기술로 분류하여 체계적으로 소개하고 발전 방향을 제시하였다. 김[2] 등은 맥진을 객관화하는 구체적인 요소기술로서 맥진 알고리즘 개발에 관한 연구 방법론을 소개하였고, 이를 위해 전통적인 맥상을 물리량으로 전환하는 방법과 주요 10대 맥상을 판단하기 위한 시공간적 특징들을 산출하는 알고리즘을 설명하였다.

현재, 여전히 맥진단 기술은 한방의 중요 진단지표이며 동시에 심혈관계 관련 질환 예측을 위한 비관혈적 지표로 꾸준히 연구되고 있다. Kim[3] 등은 지난 40여년동안 발전해온 맥진단 객관화를 위한 다양한 연구성과들을 리뷰하고, 앞으로의 맥진단 기술이 진일보하기 위한 기술적 제안을 센서 및 액츄에이터 개발, 물리량 연구, 미래형 건강 관리 시스템 개발, 및 임상 연구로 세분화해서 설명하고 있다. 센서 및 액츄에이터 개발에 있어서는 측정 정밀도 확보를 위한 측정 부위의 인체공학적 해석 및 첨단 로봇 및 센서 기술의 융합 등이 제안되었고, 물리량 연구에 있어서는 한양방에서 사용되는 심혈관 지표와의 비교연구를 통한 맥진단 지표의 타당성 연구가 절실하다고 강조하고 있다. 또한, 유비쿼터스 헬스케어 시스템이 대체의학적 측면에서 맥진단기술 활용의 가치를 높일 수 있다는 것을 소개하고, 이를 위한 한양방 융합형 의료기술 개발로의 연구확장이 필요하다고 설명하고 있다. 이처럼 맥진단 기술은 이제 고도화 즉, 기술 성숙 단계에 진입하여 미래형 의료기술로

의 사회적/상업적 접근성을 높이는 작업을 필요로 한다.

지난 5년간 한국한의학연구원(KIOM)에서는 그간의 맥진 기술을 고도화시키기 위한 다양한 노력을 수행해왔다. 대표적으로 맥의 혈류역학적 기전 연구, 맥측정기술의 고도화, 맥상 과학화, 한양방을 아우르는 질환 관련 지표 발굴 등 다각적이고 심도 있는 연구를 통해 기술을 발전시켜왔다. 본지에서는 관련 연구들을 간단히 소개하고, 맥진단 기술의 고도화를 통해 이루고자 하는 미래 예방 의학의 진단 도구로서의 가치를 타진해보고자 한다.

2장 1절에서는 맥의 혈류역학적 해석을 통해 맥진의 과학적 이해를 돕고자하고, 2절에서는 맥측정의 정밀도 향상에 필요한 기술적 한계와 이를 극복하기 위한 로봇 및 센싱 기술을 소개한다. 3절에서는 전통적 맥상을 객관화하기 위한 전문가 총의 도출 방법론 및 분석 결과를 소개하고 4절에서는 맥진단의 현대적 해석과 임상 활용 가능성을 높이기 위해 다양하게 시도되고 있는 임상 연구에 대해 소개한다. 마지막으로 3장에서 결론 및 연구방향으로 끝을 맺는다.

Ⅱ. 맥진단 고도화 기술

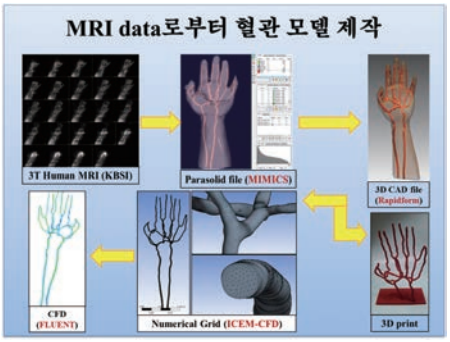
1. 맥의 혈류역학적 이해

맥진은 요골 동맥 상의 이웃하는 세 지점인 촌(寸), 관(關), 척(尺) 세 부위의 압력맥파의 특성을 감지하고 분석해서 진찰에 활용하는 방법이다. 맥진에서 중요한 제 1차적인 생체정보는 혈관을 타고 전달되는 심혈관계의 정보이다. 따라서, 맥진의 과학화와 원리규명을 위해서는 혈류역학적 접근법이 필요하다. 혈류역학적인 접근법은 임상연구의 막대한 비용과 시간, 임상 윤리적 문제 등에 구애받지 않고 혈류의 변인 요인들을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 혈류역학은 혈액 순환을 연구하는 것을 목적으로 심박출 특성, 혈관 저항, 혈액 점도 등의 변화가 혈류와 혈관을 따라 흐르는 압력맥파에 미치는 영향을 연구한다[4]. 기존의 혈류역학적 연구는 심장의 기능문제, 뇌졸중, 협착증 문제 등과 같이 특정 부위의 임상적 문제의 기전 연구에 초점을 맞추었다. 반면, 맥진의 과학화를 위해서는 인체 체순환적 관점에서 접근해야 하는데, 특히 인체의 여러 부위별 혈류 변화가 요골동맥의 맥진 부위에 미치는 영향을 볼 수 있는 연구 디자인이 필요하다.

이를 위해, 본 혈류역학 연구팀에서는 체순환시스템 전체를 모델링하는 연구와 MRI 데이터에 기반하여 정밀한 왼팔-동맥 순환계를 재구성하는 연구의 두 접근법을 사용하여 오고 있다. 체순환시스템 전체 모델링 연구에 있어서 수치해석적 접근법은 인체 순환계의 복잡성 때문에 사실적인 3차원적 모델링을 하지 못하고 있고, 여전히 1차원적 혈관모델 수준에 머물러 있다. 한편, 심혈관계를 모사하는 시뮬레이터에 기반한 연구도 본 연구진에서 진행해 오고 있는데. 맥진 시뮬레이터 개발의 동향과 연계하여 본 특별호의 양과 신[5]의 논문에서 소개하기로 하고 여기서는 다루지 않기로 한다. 따라서, 여기서는 정밀 왼팔-동맥 순환계 수치해석 연구 방향에 대해 간략히 소개한다.

왼팔-동맥 순환계 수치해석 연구는 실제 맥진을 하는 부위인 요골동맥에 대한 정밀 3차원 수치해석 모델을 만들어서, (1) 상완동맥 부위의 혈류와 압력맥파의 경계조건의 변동이 요골동맥에서의 혈류와 압력맥파의 성질을 어떠한 식으로 변동시키는지와, 장기적으로는 (2) 3차원 수치해석 모델을 심장 부위와 이를 넘는 오장육부 부위까지 확장해 나아가 장부에서의 생리적 또는 병리적 변화가 야기시키는 혈류역학적 변동 특히 요골동맥과 경동맥에서의 변동 메커니즘을 밝히는 것을 목표로 한다.

왼팔-동맥계의 3차원적인 구조 획득을 위해, 한국기초과학지원연구원이 보유한 3T Human MRI(Philips, Netherland)를 이용하여 건강한 20대 남성의 왼팔 혈

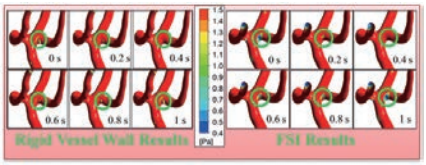


〈그림 1〉 MRI 이미지로부터 3차원적인 수치해석 모델을 재구성해내는 과정

관을 손목에서 상완까지 2차례 나누어서 촬영하여 얻은 데이터로 〈그림 1〉과 같은 3차원 수치해석 모델을 제작하였다. 왼팔에 특화된 MRI 이미지를 얻기 위해 심장코일을 사용하였고, 획득된 MRA 데이터는 MIMICS(Materialize Co., Belgium) 프로그램을 이용하여 0.9mm 이상의 혈관구조의 3차원 모델을 제작하였다. 수치해석은 상용코드인 ICEM-CFD(ANSYS Co., USA)을 이용하였고, 수치격자는 혈관 벽 근처에는 5개의 평행사변형 격자층을, 내부에는 4면체 격자를 형성하였다[6].

수치해석은 층류유동을 지배하는 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 혈액의 특성 모델링을 위해 (1) 뉴턴유체 모델과 (2) 비뉴턴유체 모델(Casson Model)을 사용하였고, 혈관의 특성 모델링을 위해 (3) Rigid Body 모델과 (4) 탄성모델(Fluid-Structure Interaction Model)을 사용하였으며, 혈류와 압력맥파의 경계조건으로 입구(상완)에서는 인체의 알려진 평균 값들을 사용하였고, 출구에서는 (5) 손가락 끝의 작은 혈관의 평균 압력 값인 30mmHg를 사용하거나 (6) 손가락 끝의 모세혈관들을 다관유동에서의 저항으로 가정하고 순환함수적 방법으로 접근하는 임피던스 경계조건[7]을 적용하여 비교 분석하였다.

맥진학적 관점에서의 관심 분야인 요골동맥에서의 혈류와 압력맥파의 특성에 대한 현재까지 분석된 결과를 간략히 보면 아래와 같다: (1) 혈액의 점성 유무는 요골동맥 주위 분지에서의 혈류 변화에 영향을 주지 못하였다. (2) 혈관의 탄성이 고려된 경우 비탄성 모델에 비해 분지 주위에서 혈류가 느려지는 현상(wall sheer stress 〈0.4 Pa에서 10%까지 차이를 보임)이 관찰되었다. Low wall sheer stress 영역에서는, 에테롬성 동맥경화가 발생하기 쉬운 상태이다. 또한, 임피던스 출구경계조건을 적용한 결과, 경직 혈관모델에서 조차 상완동맥의 입력시점에



〈그림 2〉 요골동맥 주위의 혈류 비교 결과 : (좌) 경직혈관 모델과 (우) 탄성혈과 모델

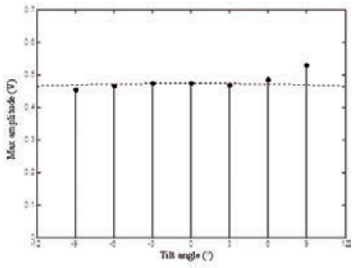
비해 요골동맥에서 압력맥파가 0.02초 정도 지연 효과가 있음이 관찰되었다.

현재까지의 3차원적인 수치해석 모델 연구 결과, 맥진의 기전연구를 위한 정밀 모델로서의 가능성을 확인하였으나, 더 심화된 연구를 위해서는 다음의 두 가지 접근법을 모두 고려하여야 한다. 우선, 전체 순환계에 대한 3차원 수치해석 모델 개발을 위해서는 수퍼컴퓨터에 기반한 컴퓨팅 파워가 절대적으로 필요하다. 현재의 상완에서 손까지의 간단한 3차원 수치모델이 상용 PC에서 3주 내외의 계산시간이 필요하였다. 따라서, 전신 순환계로의 확장 모델에서는 컴퓨팅 파워의 개선과 더불어, 전신 모델을 부분으로 나누어 부분 모델화하고 이웃하는 부분 모델들의 경계조건들을 일치시켜 가는 전략이 필요하다. 또한, 인체의 전신 순환계의 전체 3차원 모델 개발이 기술적으로 요원하기 때문에, 중간단계적인 접근법으로서 3차원모델에 1차원 모델을 잘 접목시키는 방법을 고려하여 계산 시간을 개선시켜야 한다. 이러한 차원 간 융합 방법에서는 차원 변경에 따른 경계조건 불일치를 해결하는 것이 관건이다.

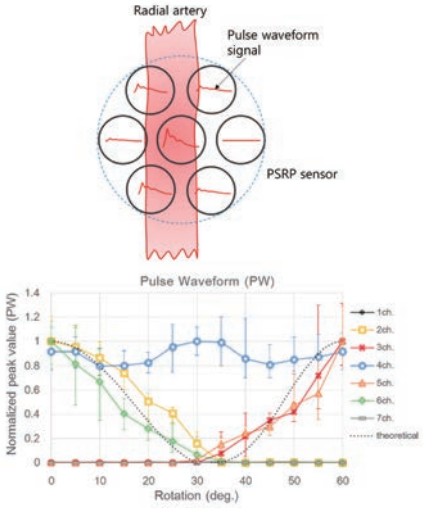
2. 맥 측정 기술의 고도화

2.1 맥 측정 신뢰도 저하 요인

요골동맥은 인체에서 동맥의 흐름을 비관혈적으로 파악하기 위한 최적의 위치 중 하나로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고, 혈류의 저항성을 통해 맥을 진단하는 맥진의 특성상 혈관을 직접 가압하는 과정에서 생기는 외란이 측정의 불확실성을 크게 증가시키고 있다. Agnoletti[8] 등 에 의하면 두 개의 토노메트리 펜 방식 맥측정 장치들 간의 원신호 비교 실험 분석 결과에서 심혈관질환 예측 주요 지표인 Radial rSBP2, Mean arterial pressure, Augmentation index(AI) 등이 유의하게 서로 다른 결과를 보였다. 또한, 정[9] 등의 연구에 의하면 요골 동맥 모의 실험 장치에서 동일한 맥센서를 이용해 가압했을 경우, 가압 각도가 커짐에에 따라 변동성이 크게 변하는 것을 확인할 수 있었다(〈그림 3〉). 또한, 전[10] 등은 혈관 방향이 맥측정 정밀도에 미치는 영향을 분석하여 이를 보정



〈그림 3〉 가압 각도에 따른 맥측정 변동성 변화([9] 인용)

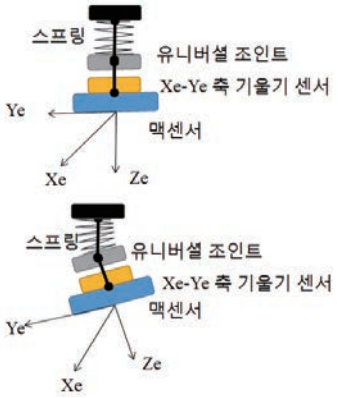


〈그림 4〉 원형 어레이 타입 맥센서와 요골동맥 상대 각도에 따른 맥압 변화 양상([10] 인용)

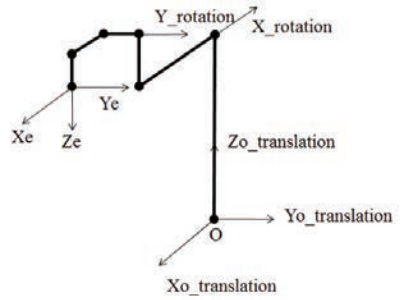
하기 위한 방법론을 제시하기도 하였다. 즉, 맥센서가 혈관을 누르는 위치 및 방향을 획득하고 제어하는 것이 맥측정의 정밀도 향상에 크게 기여할 수 있다고 추론할 수 있다(〈그림 4〉).

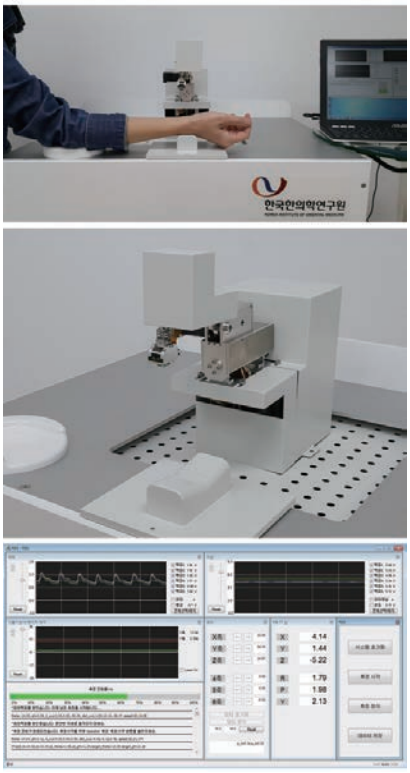
2.2 정밀 맥측정을 위한 가압 메커니즘

일반적으로 맥측정을 위해 센서로 혈관을 가압하는 방식은 공압 기반의 커프 장치를 이용해 팔이나 손목 전체를 가압하는 커프 방식과 측정 위치에만 센서를 부착하여 수동(펜 타입)이나 자동(전기모터 방식)으로 센서를 눌러 가압하는 토노메크리 방식으로 나눌 수 있다. 가압 방향을 정밀하게 탐색 및 제어하기 위해서는 가제어성이 높은 로봇 매니퓰레이터 방식을 사용하게 된다. 현재까지 로봇 기술은 맥동 위치를 찾고 가압력을 조절하기 위한 도구 정도로 개발되었고, 현재 가압 방향을 되먹임받아 최적의 가압 방향을 찾고자 하는 기술은 시도된 적이 없다.



〈그림 5〉 가압방향 센싱 메커니즘(초기 위치(상), 피부층 저항에 의한 기울어짐(하))





〈그림 6〉 6축 로봇 토노메트리 장치(6축 로봇 구동 좌표축(상), 로봇 맥측정 장치(중), 맥측정 구동 화면(하))

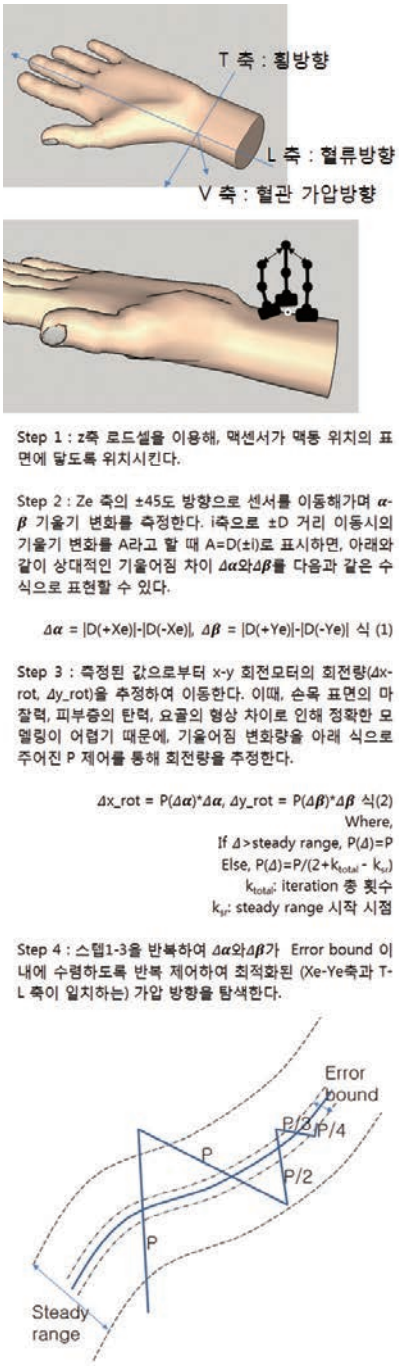
KIOM에서는 사람에 따라 팔의 위치, 요골 구조가 다른 측정 환경에서 맥센서면과 요골동맥 사이의 상대적인 기울어짐을 측정해낼 수 있는 메커니즘을 개발해왔다.

구동 메커니즘은 〈그림 5〉에서 보듯이 맥센서와 센서 위에 부착된 Xe-Ye 2축 기울기 센서, 센서와 피부 사이의 저항력에 의해 수동적으로 기울어질 수 있는 스프링-유니버셜 조인트로 구성된다. 이 기구부는 맥센서의 가압 방향 정밀 제어를 위해 6축 로봇 매니퓰레이터의 끝단에 장착된다. 6축 로봇은 3축의 선형 이송축(Xo_translation, Yo_translation, Xo_translation)과 2축의 회전축(X_rotation, Y_rotation) 그리고, 정밀가압을 위한 끝단에서의 가압방향 선형 이송축(Ze)으로 구성된다(〈그림 6〉).

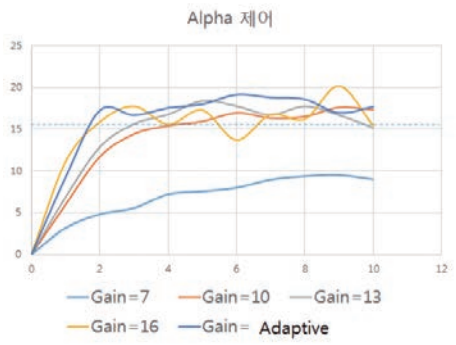
2.3 가압 방향 제어 알고리즘

인체의 피부층, 요골 구조, 요골동맥의 위치는 사람마다 편차가 심하고, 뿐만 아니라 측정 자세, 즉, 팔꿈치와 손목을 놓는 위치, 몸을 굽히는 정도, 팔꿈치와 손목 각도 등에 따라 편안함을 느끼는 정도가 다르기 때문에 이를 해석적으로 모델링하기는 요원하다. 그러므로, 적절한 가압 방향을 찾기 위해서는 피부층을 다양한 위치에서 반복적으로 눌러보면서 수렴하는 과정을 거치는 방법을 사용할 수 있다.

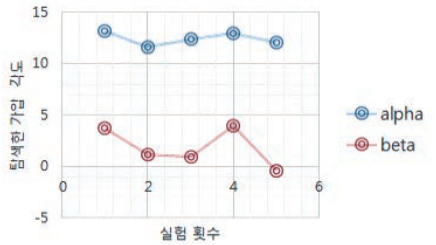
KIOM에서 현재 개발하고 있는 알고리즘은 맥동 위치에서 센서면의 수직축에서 ±45도 방향으로 2mm씩 이동시켜가며 획득되는 Xe 축 기울기(Alpha), Ye 축 기울기(Beta)의 각각의 차이를 분석해 맥센서면의 최적 가압 방향을 탐색한다(〈그림 7〉). 즉, 이론적으로 센서면의 수직축과 피부면이 직교한다면 기울기 차(Δα, Δβ)는 0이 되므로 그 차이의 크기가 되먹임을 위한 제어입력이 된다. 이때, 제어입력에 비례 이득(P)를 곱하여 수렴 속도와 안정성을 확보한다. P를 상수로 할 경우 〈그림 8〉에서처럼 수렴이 늦어지거나(P=7) 발산하는 경우(P=16)가 생기게 되고, 더욱이 인체 피부층이나 요골이 비선형적인 구조를 지니기 때문에 안정적인 수렴 과정을 얻기 쉽지 않다. 의료기의 특성상 안정상태에서의 변화를 최소화하는 것을 만족할 수 있어야 하고, 현재 개발 중인 알고리즘은 특정 안정화 구간(Steady range) 안에 접어들면 P값을 감소시켜(P=Adaptive) 안정성 기능을 구현하고 있다. 이 때, 안정화 구간의 경계조건을 설계하는 것이 앞으로 풀어야할 중요한 기술적 이슈가 된다. 개발된 제어알고리



〈그림 7〉 가압 방향 제어 알고리즘(알고리즘 구동 예(상), 알고리즘 흐름(중), 적응형 P변화 개념도(하))



〈그림 8〉 제어입력에 따른 가압 방향 탐색 결과(Alpha 제어 예시)



〈그림 9〉 가압 방향 탐색 반복성 실험 결과

즘을 이용하여 동일 피험자에 대해 5회 반복 측정한 결과 〈그림 9〉에서 보듯이 ±2.23도 범위 내에서 반복 정밀도 성능을 확인할 수 있었다. 이는 기존 연구에서 정[5]이 제안한 변동성 최소화를 위한 허용 가압각도인 ±3도 이내에 들어옴을 알 수 있다.

본 연구는 기존 압저항형 어레이 센서 기반 맥측정 시스템의 성능 향상을 위한 연구 방법론 및 시스템 구현에 초점을 맞추고 있다. 본 시스템은 총안용(촌/관/척 동시 측정) 맥진기 개발로 심화시킬 예정이다. 이를 위해, 기존 일자형 배열의 센서 구조를 확대하여 공간 분해력을 확보하는 연구, 멀티 가압을 위한 컴팩트형 가압 매니퓰레이터를 설계하는 연구, 가압 동기화를 통해 촌/관/척 세 부위의 맥신호를 동기화하는 연구 등이 함께 이뤄져야 할 것이다.

3. 맥상 과학화

맥파 측정기로부터 측정된 압력맥파를 분석하기 위해서는 먼저 맥파를 정량적 지표로 나타내어야 한다[2]. 압력맥파의 정량화를 위해 KIOM 맥진기 개발팀에서는 2가지 상보적인 접근법을 사용하고 있다. 첫째, 전통적인 압력맥파의 분류 기법인 맥상(脈象)에 대해 전문가들의 총의를 도출하는 연구이다. 둘째, 맥파의 특성을 구분 지을 수 있는 기초 물리량을 발굴하고 맥파를 요소 물리량의 조합으로 표현하는 방법이다. 이렇게 표현된 압력맥파의 각 요소 물리량별 조합 양상과 전문가의 총의에 의해 도출된 맥상을 이루는 물리량과의 비교를 통해, 임상에서 활용될 수 있는 맥상을 개발해 가고 있다.

먼저, 맥상에 대한 전문가들의 총의를 도출하는 연구를 소개한다. 임상에서 활용되어 온 맥상은 문헌상으로 "부(浮)/규(芤)/홍(洪)/활(滑)/삭(數)/촉(促)/현(弦)/긴(緊)/침(沈)/복(伏)/혁(革)/뇌(牢)/실(實)/미(微)/색(濇)/세(細)/유(濡)/약(弱)/허(虛)/산(散)/완(緩)/지(遲)/결(結)/대(代)/동(動)/대(大)/장(長)/단(短)"으로 명명된 28 맥상을 기준으로 한다. 임상가들의 성향에 따라서 이와 같은 28맥상 중 일부만 사용하기도 하고 또는 추가로 정의하여 사용하기도 한다. 고전 문헌에서 정의된 맥상은 현대 물리학이 발달하기 훨씬 이전에 정의되었고 그 표현이 모호하고 비유와 은유에 기반하였다. 따라서 압력맥파의 정량화를 통해 맥상을 현대화하고 임상에 활용할 수 있게 하기 위해서는, 28 맥상을 현대 물리학적인 요소로 재정의하는 작업부터 진행하여야 한다. 중국의 비조복[11]은 28맥의 속성을 귀납적으로 분류하여 맥동이 느껴지는 깊이(淺深), 맥동하는 힘의 강약(脈力), 맥박의 빠르기(脈率), 맥동이 느껴지는 혈관 지름방향의 범위(脈幅), 맥동이 느껴지는 혈관축 방향의 길이(脈長), 맥동의 원활한 정도, 혈관벽의 딱딱한 정도, 맥박의 리듬과 힘의 균일한 정도의 8가지 기준으로 맥상을 구분하기도 하였으며, 유현희 등은 맥상 판별의 우선순위를 선정하여, 맥위의 깊이, 맥의 빠르기, 맥동의 세기, 맥의 너비, 맥의 길이 등 명확하게 정의할 수 있는 5가지 기본 물리량을 중심으로 28맥상을 재정리한 바 있다[12].

이러한 노력에도 불구하고, 아직 28 맥상에 대한 전문가들 사이의 일치된 의견이 없는 상황이다. 이에, 본 연구팀에서는 임상에서 자주 활용되는 주요 맥상을 선별하고 맥파의 기본 속성으로 표현하는 연구를 진행하였다. 먼저, 대한한의진단학회를 중심으로 맥상 정량화를 위한 전문가 협의체를 구성하였다. 델파이 기법에 기반하여,

〈표 1〉 맥상을 표현하는 맥파의 기본 물리량에 대한 델파이 연구 결과

기본 속성은 깊이, 빠르기, 세, 너비, 규칙성, 긴장도로 나눌 수 있다.			66.7%
속성		일치율	
깊이	최대맥파가 감지될 때의 물리적 거리		83.3%
빠르기	1회 박동에 걸리는 시간		100%
	맥의 지삭은 맥률로 정의가능		50.0%
세	손목에서의 혈압과 상관이 있다.		16.7%
	최대맥파가 감지될 때의 맥파의 크기와 상관이 있다.		83.3%
	軟은 無力과, 强은 有力과 긴밀한 관계가 있다.		100%
너비	팔의 길이방향의 직각으로 느껴지는 맥파의 폭		100%
길이	촌관척을 본위로 삼아 비교한다.		83.3%
불규칙성	맥박이 일정하게 뛰지 않을 때가 있는 경우		100%
긴장도	압력에 대한 저항		66.7%

범례 16 25 33 50 66 75 87 100%

〈표 2〉 10개 기본 맥상에 대한 전문가 총의 도출 결과

	깊이	빠르기	세	너비	길이	불규칙성	긴장도	일치율평균
浮脈	■	■	■	■	■	■	■	100%
沈脈	■	■	■	■	■	■	■	100%
遲脈	■	■	■	■	■	■	■	95%
數脈	■	■	■	■	■	■	■	100%
洪脈		▒	■	■		■	■	67%
細脈	■	■		■	▒	■	■	81%
虛脈	▒	■	■	▒	▒	■	▒	71%
實脈	▒	■	■	▒	▒	■	■	81%
促脈	■	■	▒	■	▒	■	■	91%
結脈	■	▒	▒	■	■	■	■	91%

범례 16 25 33 50 66 75 87 100%

맥상에 적용 가능한 물리량 속성 7건(맥의 깊이, 빠르기, 세, 너비, 길이, 불규칙성, 긴장도)에 대한 전문가 합의(〈표 1〉)를 도출하였고, 10개 기본 맥상에 대한 물리량에 대한 총의를 도출하였다[13].

〈표 2〉는 깊이, 빠르기, 세, 너비, 깊이, 불규칙성, 긴장도 등의 물리량에 대해 10개의 기본 맥상(浮, 沈, 遲, 數, 洪, 細, 虛, 實, 促, 結)의 물리량에 대한 1차 총의 도출 결과이다. 전문가 의견을 바탕으로 맥파의 첨예도에 대한 물리량을 추가하여 2차 델파이를 진행하여 좀 더 복잡한 5개 맥상(緩, 滑, 澁, 弦, 緊脈)에 대한 추가 델파이 문항을 개발하고 총의를 도출한 결과는 〈표 3〉에 나와 있다. 또한 좀 더 복잡한 물리량들에 대해서도 추가적인 델파이 연구를 진행 중에 있다.

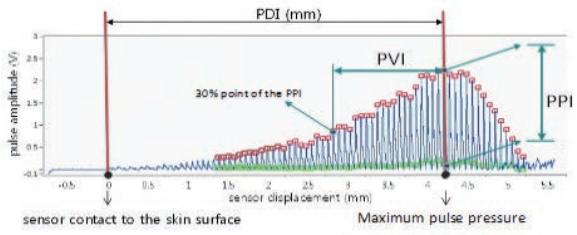
다음으로, 요골동맥에서 측정한 압력맥파를 패턴분류할 수 있는 맥진지수 개발 연구에 대해 소개한다. 전통맥진에서는 가압력에 대한 맥파형의 정보가 중요한 맥진 판단기준으로 적용되어 왔다. 2장에서 소개된 바와 같이, KIOM에서 개발 중인 맥파측정기의 특성은 연속적인 가

〈표 3〉 緩, 滑, 澁, 弦, 緊脈에 대한 전문가 총의 도출 결과

脈	깊이	빠르기	길이	너비	세기	규칙성	긴장도	첨예도	평균 일치율
緩	100.0 (무관)	66.7 (긴 주기)	100.0 (무관)	83.3 (무관)	66.7 (무관)	100.0 (규칙)	66.7 (이완)	66.7 (무관)	81.3
滑	66.7	66.7	66.7	83.3	83.3	100.0	33.3	50.0	68.8
澁	50.0	50.0	66.7	50.0	66.7	100.0	50.0	50.0	60.4
弦	50.0 (얕음, 무관)	83.3 (무관)	83.3 (무관)	83.3 (무관)	66.7 (무관)	100.0 (규칙)	83.3 (긴장)	33.3 (뾰족, 매끈, 무관)	72.9
緊	100.0 (무관)	66.7 (무관)	66.7 (무관)	100.0 (무관)	66.7 (유력)	100.0 (규칙)	83.3 (긴장)	50.0 (매끈)	79.2

압을 하고 매 가압 시점마다 맥파의 정보를 실시간으로 획득하는 연속가압 토노메트리 방식을 사용한다. 〈그림 10〉은 KIOM 맥파측정기에서 획득된 맥파의 약 60초간 측정 예시이다. x 축은 가압하는 깊이(센서가 요골동맥상의 피부와 접촉하는 시점이 0점)이고 y 축은 측정되는 압력맥파의 진폭이다. 그림상에서 표현되는 맥진지수들의 더 구체적인 정의의 예시는 〈표 4〉에 나타내었다.

〈표 4〉에서 정의된 기본 맥진지수 외에도 맥의 기초적인 속성을 정의하는 방법이 여러 가지로 가능하다. 예를 들어, 맥심지수는 압력맥파의 깊이를 정의하는 지수로서 맥의 부침도(浮沈度)를 나타낼 수 있다[14]. 하지만, 맥심지수가 압력맥파의 깊이를 나타내는 유일한 방법이 아니고, 압맥파의 최대 크기일 때의 가압력의 크기 기준이나[15], 약한 가압하에서와 센 가압하에서의 상대적인 압맥파의 크기 비교를 통해 맥의 부침도를 정의할 수도 있다[16]. 이와 같이, 맥의 깊이와 같이 잘 정의된 맥의 속성을 물리량으로 표현하는 방법 조차 유일하지 않은 경우가 많으므로, 꾸준한 맥진지수의 개발과 보완 연구가 필요하



〈그림 10〉 압력맥파 측정 예시

〈표 4〉 맥진지수 정의

지수	알고리즘
맥력지수 (Pulse Pressure Index)	최대압맥파의 크기
맥심지수 (Pulse Depth Index)	센서가 피부에 접촉되는 시점부터 최대압맥파가 발생하는 시점까지의 모터 이동 거리
맥실지수 (Pulse Volume Index)	최대압맥파의 30% 지점부터 최대 압맥파까지의 면적
지삭지수 (Pulse Rate Index)	호흡당 맥박수

다. 본 고에서는 구체적으로 설명하지 않겠지만, 맥파의 특성을 분석하는 시계열 상의 변수들과 주파수 공간 상의 변수들은 분석에 기본으로 활용되는 변수이다. 기본 맥진지수 외에, 만완(蔓緩)지수, 심응(心應)지수, 맥긴(脈緊)지수 등의 새로운 지수를 개발 중에 있으며, 다음 장에서 소개되어질 맥진단 지표 발굴을 위한 임상연구를 통해 추가 맥진지수 개발과 기 정의된 지수들을 보완하는 작업을 진행 중에 있다.

4. 맥진단 지표 발굴 연구

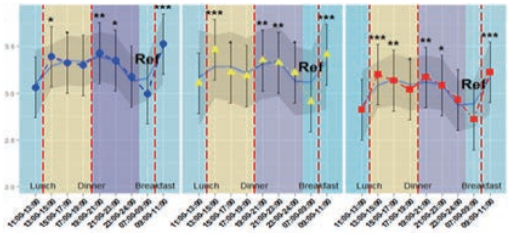
본 장에서는 맥진단 지표 발굴에 관한 연구를 소개하고자 한다. 요골동맥의 압력맥파는 인체 순환계의 정보를 우선적으로 반영하기 때문에, 맥진을 통해서 1차적으로 심장의 박출 특성과 혈관의 경직도 특성에 관한 건강정보를 얻는다. 한의학에서는 인체에 분포되어 있는 장부(臟腑)가 심혈관계와 영향을 주고 받고 이러한 정보가 인체 순환계를 통해 맥진으로 감지된다고 본다. 따라서, 맥진으로 심혈관계의 건강정보 뿐만 아니라, 인체의 상(上), 중(中), 하(下)부에 분포되어 있는 장(臟)과 부(腑)의 건강정보 또한 획득한다. 또한, 한의학 변증의 기본인 팔강변증(八綱辨證: 陰陽, 表裏, 寒熱, 虛實)에서 맥진을 주요한 진단 도구로 사용한다. 이와 같은 맥진의 특성에 기반하여, KIOM 맥 연구진에서는 심혈관계의 특성을 분석하는 Pulse Wave Analysis (PWA) 기법의 분석 지표와 장부변증과 같은 전통적 맥진법에 활용되어 온 맥진 지표를 발굴하고 있다.

맥진단에 있어 특정 부위의 종양 등과 같은 구조적 변형도 일부 진단에 활용하지만, 주로 "상기하였다", "습열이 있다", "간기능이 항진되었다", "위기가 내려앉았다" 등과 같은 인체의 기능적 문제에 더 활용도가 높다. 이러한 기능적 문제는 명확한 객관적 지표가 부재하여 임상에서 환자의 자각 소견에 많이 의존하고, 처방에 의한 치료 효과를 간접적 지표들에 의존해서 모니터링 해가며 처방조건을 변경시켜 나아간다. 따라서, 명확한 맥진단 지표 발굴은 매우 도전적인 과제이고, 중장기적인 로드맵에 기반한 데이터 모집 및 분석 전략이 필요하다. KIOM에서는 압력맥파를 획득하면서, 잘 알려진 건강 지표들인 ECG (Electrocardiography, 심장의 전기적 신호), PPG (Photoplethysmography, 용적맥파), Impedance Cardiography, 초음파에 기반한 혈류 특성, ABI (Ankle-brachial index), Pirspiration rate 등을 동시에 측정하고 있으며, 생화학적 검사와 설문지표도 동시에 보고 있어, 여러 생체지표들과의 상관성 분석을 1차로 진행하여 알려진 건강 정보에 대한 맥진 지표 발굴을 진행하고 있다. 또한, 명확한 질병을 가진 환자군에서 일부 환자는 특정 치료 프로토콜에 잘 반응하고 일부는 그렇지 못한데, 그 이유가 명확하지 않아 치료 프로토콜을 선정하는데 있어 try&error 방법에 의존하고 있다. 환자군의 치료 프로토콜에 따른 세분화된 맥 진단 지표 개발도 가능하며, 특정 질병의 세분화된 분류가 가능하다면 기존의 try&error 방법을 극복하여 환자의 치료 부작용과 비용의 감소로 이어질 수 있다. 현재 KIOM에서 시도하고 있는 1차 목표 질환으로 맥파에 가장 영향이 큰 심뇌혈관 질환과 장부변증 및 현대사회의 숙제인 난임이다. 두 질환군의 치료 경과에 따른 맥파의 변화, 그리고 다른 임상지표들의 변화를 추적 관찰 중에 있다.

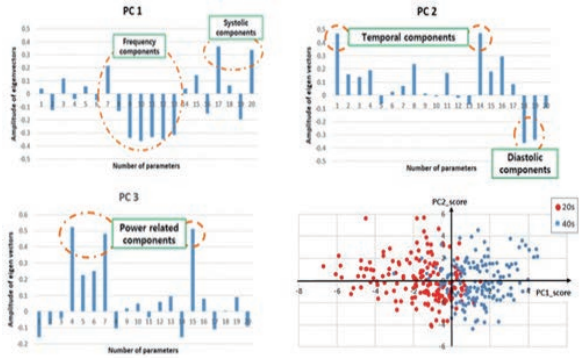
한편, 맥은 하루 주기로 변하고, 계절 주기로 변한다. 이러한 특성을 잘 나타내는 표현으로 맥진학의 고전인 맥경(脈經)에서 평단맥(平旦脈)이 있는데 "환자가 기상 직후에 어떠한 활동도 하기 전의 맥이 그 환자의 본래 맥상이다"라고 기술되어 있다. 이는 환자 기상 직후의 맥을 하루 중 환자의 기준 지표로 하여야 한다는 의미이기도 하다. 또한, 한의학 고전인 황제내경 (黃帝內經)에 의하면 봄에는 맥이 현(弦)해지고, 여름에는 홍(洪)해지고, 가을에는 부(浮)해지고, 겨울에는 침(沈)해진다고 기술되어 있는데, 이는 맥의 특성이 계절별로도 변하기 때문에 건

강한 맥상의 기준 지표가 계절마다 다르다는 것을 내포한다. 이러한 고전 문헌에 기술된 내용을 확인하고 맥진단 지표의 기준점으로 활용하기 위하여 맥의 일중변화(〈그림 11〉)와 계절별 변화를 관찰하였다.

일중변화에 대한 임상연구(〈그림 11〉)에서는 20대와 40대 남/녀 40명에 대해 병원 입원실에 동일한 조건하에서 1박을 하며 2시간 마다 압력맥파를 측정하여 분석하였다. 그 결과, 기상 직후에 맥력이 가장 작고, 식후에 맥력이 증가하는 경향을 보인 반면, 맥의 깊이에 있어서는 일중 변화가 거의 없는 양상으로 나타났다. 맥의 계절별 변화를 보기 위해서 사전연구 격으로 남녀 각각 1인을 선정하여 매주 1회씩 1년간 맥을 측정해 보았다. 그 결과 여름에 비해 가을철에 맥의 깊이가 급격히 낮아지는 패턴, 봄절이 겨울보다 맥의 긴장도가 높아지는 패턴, 겨울철이 여름보다 심박수가 빠르고 맥력이 세지며 심벽변이도 변화 폭이 작아지는 패턴 등의 특성을 관찰하였다. 이는 고전 문헌 상의 내용과도 일치하는 패턴이다. 이와 같이 맥의 일중변화와 계절별 변화 양상을 관찰하여 실제로 맥의 평단맥이 중요한 이유와 건강맥의 판단 기준에 계절별 요인을 감안해야 한다는 점을 확인하였다.



〈그림 11〉 맥의 일중 변화



〈그림 12〉 Principal Component Analysis 기법에 기반하여 맥진 지표로 연령을 판별하는 모델

이 외에도 맥파에 기초하여 추가적인 생체 정보를 획득할 수 있다. 맥진이 병의 예후 진단에도 중요하고, 치료 효과 모니터링에도 중요하다. 맥진의 큰 특성 중 하나가 심혈관계를 통한 자율신경 반응도를 실시간으로 모니터링 할 수 있다는 점이다. 이러한 특징으로 인해, 한의학의 대표적 치료법인 침, 뜸, 부항 치료 후에 치료 호전 효과를 맥파 변수로 즉각 모니터링 할 수 있다. 본 연구팀에서 정상인에 대해 침자극에 의해 맥파의 변화 양상을 관찰한 바가 있는데, 유의미한 혈류량 증가와 자율신경계 반응 지표가 관찰되었다. 또한, 〈그림 12〉에서 보이는 바와 같이 맥파 변수로 연령을 구분하는 것도 가능하다는 것을 보였다[17]. 이 외에도, 비만유형에 따른 운동 전후의 맥파 변화 양상을 관찰하거나, 월경통 환자의 월경 주기별 맥파변화 양상을 보는 연구, 갱년기의 맥 변화 연구 등의 다양한 맥파 특성 연구를 진행중에 있다(〈그림 13〉).

맥진의 가장 큰 장점으로는 비침습적인 간단한 방법에 의해 몸의 미묘한 상태 변화가 실시간으로 반영되므로, 조기 진단을 통한 조기 치료가 가능하다는 점이다. 이러한 맥의 장점을 최대한 잘 활용하기 위해서 전문가 맥진단 기술의 숙련도에 좌우되는 영역을 넘어서, 기기 기반의 맥파지표를 진단에 활용할 수 있어야 한다. 이를 위한 유의미한 맥진단 지표 발굴 연구는 지속성 있게, 또한 다기관 임상으로 교차 검증하여 진행하여야 한다. 맥의 특성이 각 연령대마다 다르고 성별에 따라 다르다. 또한, 기후조건과 일중 변동 등을 감안하여야 한다. 따라서, 한 질환군에 대해서도 전 연령 및 남/녀 각각의 환자에 대해서 장기간 추적 관찰하는 연구 설계에 바탕을 두어야 임상적으로 유의미한 지표 개발로 이어질 수 있다.

〈그림 13〉 맥 진단 지표 개발을 위한 임상연구 테마

Ⅲ. 결론 및 향후 연구방향

지금까지 맥진 기술의 고도화를 위한 주요 원천 기술들을 소개하고, 이를 위한 KIOM의 연구 성과 및 비전을 살펴보았다. 앞으로의 맥진기 연구가 성공하기 위해서는 성능 향상 뿐 아니라 측정 편의성 및 의료 기기로서의 안정성 등 시장 진입을 위한 다양한 기술적 난제를 함께 해결해야한다. 본 연구는 기술 고도화를 통해 핵심 원천기술을 확보하는 단계에 있고, 추후 사용성, 경제성 및 사용자의 수요를 만족하기 위해 다양한 형태로 변형될 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국한의학연구원 주요사업 혈류역학과 맥진단학을 융합한 맞춤의료 맥 분석 시스템 개발 과제(K16020) 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] 강희정, 허영, “맥 진단기기의 요소기술 및 제품화 동향”, 전자공학회지, 37(7), 2010

[2] 김재욱, 신상훈, “맥진 알고리즘 개발”, 전자공학회지, 37(7), 2010

[3] Hyunho Kim, Jong Yeol Kim, Young-Jae Park, Young-Bae Park, “Research and Development of Radial Artery Pulse Diagnostic Devices in Korea”, Integrative Medicine Research, 2013

[4] N. Westerhof, N. Stergiopulos and M. I. Noble, Snapshots of hemodynamics: an aid for clinica research and graduate education, Springer, 2010

[5] 양태헌, 신상훈, “맥진 시뮬레이터 개발 동향”, 전자공학회지 특별호, 2016

[6] 김기원, 김재욱, 백현만, 김성균, 상지동맥 혈관계의 모델링과 혈유동의 전산수치해석, 대한기계학회 논문집 B권, 2016

[7] S. M. Watanabe et al., Blood Flow Modeling in a Detailed Arterial Network of the Arm, ESAIM: M2AN 47 (2013) 961-985

[8] D. Agnoletti, S. Millasseau, J. Topouchian, Y. Zhang, M.E. Safar, J.Blacher, “Pressure wave shape comparison between two non-invasive tonometric devices”, Annales de cardiologie et d’angeiologie, 62, 2013

[9] 정창진, 조정희, 전민호, 전영주, 김영민, “토노메트리 방식 맥파 측정의 가압 각도에 따른 변동성 평가”, Journal of Sensor Science and Technology, 25(2), 2016

[10] 전민호, 전영주, 김영민, “맥센서어레이의 실리콘 코팅 두께에 따른 센서 간 간섭효과”, Journal of Sensor Science and Technology, 25(1), 2016

[11] 비조복, 중의맥진연구, 의성당, 1993.

[12] 유현희, 이시우, 이전, 이유정, 김종열, 문헌을 통한 맥상의 물리적 요소 분석, 동의생리병리학회지 21(6), pp1381-1387, 2007.

[13] 이해범, 김현호, 박영재, 박영배. “맥상파 물리량 속성 총의형성을 위한 델파이 연구”, 대한한의진단학회지, 2014.

[14] J. H. Bae et al., New Assessment Model of Pulse Depth Based on Sensor Displacement in Pulse Diagnostic Devices, Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, article ID 938641, 2013.

[15] 이시우, 이유정, 이혜정, 강희정, 김종열, 압저항 센서와 가압조절 로봇을 이용한 부침맥 검출에 관한 임상연구, 동의생리병리학회지 19(6), pp1673-1675, 2005.

[16] J. U. Kim et al., Novel Diagnostic Algorithm for the Floating and Sunken Pulse Qualities and Its Clinical Test, Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, article ID 813427, 2011.

[17] J. H. Bae et al., A feasibility study on age-related factors of wrist pulse using principal component analysis, EMBC 2016.

김 영 민

- 1999년 2월 연세대학교 기계설계공 학사
- 2001년 2월 포항공과대학교 기계공학 석사
- 2011년 8월 카이스트 기계공학 박사
- 2001년 3월~2006년 2월
  KAIST인간친화복지로봇시스템 연구센터,
  위촉연구원
- 2011년 3월~현재, 한국한의학연구원, 책임연구원

〈관심분야〉
의료로봇, 인간로봇상호작용, 지능로봇, 기계학습

김 재 욱

- 1998년 2월 포항공과대학교 물리학 학사
- 2000년 3월 Chalmers Univ. of Technology, Sweden
  물리학 석사
- 2005년 4월 Univ. of Gothenburg, Sweden
  물리학 박사
- 2005년 9월~2006년 2월 고려대학교 물리학과,
  박사후연구원
- 2006년 3월~2009년 4월 카이스트 물리학과,
  연수연구원
- 2009년 4년~현재 한국한의학연구원, 책임연구원,
  한의기반연구부 부장

〈관심분야〉
맥진기 개발, 생체장 및 생체전자기 연구, 한의 의료기기 개발