

규칙기반 리듬 분류에 의한 심전도 신호의 비정상 검출

Abnormality Detection of ECG Signal by Rule-based Rhythm Classification

류춘하* · 김성완** · 김세윤*** · 김태훈* · 최병재**** · 박길흠†

Chunha Ryu, Sung-Oan Kim, Se-Yun Kim, Tae-Hun Kim, Byung-Jae Choi,
and Kil-Houm Park†

*경북대학교 전자전기컴퓨터학부

**수원과학대학 컴퓨터정보과

***삼성전자

****대구대학교 전자공학부

요 약

심전도 신호의 신뢰성 있는 진단을 위해서는 높은 분류 정확도와 함께 낮은 오분류 성능이 중요하며, 특히 비정상을 정상으로 진단하는 것은 심검자에게 치명적인 문제로 귀결될 수 있다. 본 논문에서는 임상 진단 기준을 반영하는 규칙기반 분류 알고리즘을 이용하여 비정상 리듬을 검출 및 분류하는 방법을 제안한다. 규칙기반 분류는 리듬 구간의 특징에 대한 규칙 베이스를 이용하여 리듬 유형을 분류하도록 하며, 이 때 규칙 베이스는 임상 및 내과 분야의 심전도 전문 임상 자료에 기반한 본 논문의 기준표에 따라 구성된다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스를 이용한 제안 방법의 실험을 통하여 정상동조율, 박동조율, 및 다양한 비정상 리듬에 대한 리듬 유형의 분류가 가능함을 확인하였으며, 특히 비정상 리듬 검출 측면에서는 오분류가 전혀 발생되지 않는 결과를 보였다.

키워드 : 심전도 신호, 규칙 기반, 리듬 분류, 비정상 검출

Abstract

Low misclassification performance is significant with high classification accuracy for a reliable diagnosis of ECG signals, and diagnosing abnormal state as normal state can especially raises a deadly problem to a person in ECG test. In this paper, we propose detection and classification method of abnormal rhythm by rule-based rhythm classification reflecting clinical criteria for disease. Rule-based classification classifies rhythm types using rule-base for feature of rhythm section, and rule-base deduces decision results corresponding to professional materials of clinical and internal fields. Experimental results for the MIT-BIH arrhythmia database show that the applicability of proposed method is confirmed to classify rhythm types for normal sinus, paced, and various abnormal rhythms, especially without misclassification in detection aspect of abnormal rhythm.

Key Words : ECG Signal, Rule Base, Rhythm Classification, Abnormality Detection

1. 서 론

최근 국내 식생활의 서구화와 인구 고령화 등으로 인해 암, 뇌혈관질환과 더불어 심장질환이 한국인의 주요 사망원인으로 부각되고 있다. 심장질환은 혈액공급 장애로 발생하는 관상동맥질환(coronary artery disease; CAD)과 심장의

전기 자극 생성 및 전도 장애에 기인한 부정맥(arrhythmia)으로 대부분 되는데, 이는 혈관 경화가 급격히 진행되거나 불규칙적인 심장리듬 이상을 유발하는 등 인체에 치명적인 악영향적 요소가 된다. 이러한 심장질환의 예측 불가능성 위험도는 심전도(electrocardiogram; ECG) 신호를 수시로 모니터링 할 필요성을 방증하고 있으며, 특히 관련 병력이 있는 경우 시간과 장소에 무관한 상시 관리가 반드시 수반되어야 한다[1,2].

이러한 심전도 신호 모니터링의 필요성에 따라 24시간 이상 장시간 심전도 데이터를 저장할 수 있는 홀터(holter)를 사용하여 왔으나, 이는 대량의 데이터를 수반하므로 의료진이 직접 분석하기에 많은 시간과 비용이 따르는 한계점을 가져왔다. 이에 최근에는 사용자 중심의 서비스 제공을 목적으로 한 유비쿼터스(ubiquitous)시대의 도래와 함께 자

접수일자: 2012년 2월 4일

심사(수정)일자: 2012년 2월 4일

게재확정일자 : 2012년 8월 10일

† 교신저자

본 논문(결과물)은 2011학년도 경북대학교 응·복합연구 지원프로그램의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

동화된 심전도 분류 기술이 U-헬스케어 서비스의 핵심 요소기술로 대두되고 있다[3].

심전도 신호에 기반하여 심장질환을 자동으로 진단하는 알고리즘은 치명적인 심장질환이나 위험 단계로 발전할 수 있는 질환의 사전 진단에 집중되어 왔다. 부정맥은 이에 대표적인 심장질환으로서 심전도 신호를 구성하는 각각의 파형이 불규칙하게 나타나는 상태를 반영하고 있다. 따라서 부정맥 진단 알고리즘은 심전도 신호의 구성요소, 즉 P파, QRS군, T파 등의 유무 및 리듬 등에 의존하여 설계되어야 할 필요가 있다[4,5].

심전도 진단을 위한 기존 연구들은 주로 심박 단위에 대한 특징추출 및 분류를 통하여 비정상을 검출하는 접근법에 기반하고 있다. 이러한 심박 부류를 이용한 분류는 심실성(ventricular) 부정맥 또는 상심실성(supraventricular) 부정맥에 대한 개략적 진단정보만을 제공하지만, 부정맥 종류 및 위치에 대한 세부적 진단정보는 제외되는 단점이 있다. 그림 1은 동일한 심검자로부터 얻어진 다양한 심전도의 변화 상태를 나타낸 것으로서, 그림 1(a)는 완전한 정상 상태, 그림 1(b)는 비정상 심박이 드물게 나타나는 상태에 해당하고, 위 경우는 모두 정상 심전도로 분류되어야 한다. 한편, 그림 1(c)는 비정상 심박이 불규칙하게 반복되는 상태이며, (d)는 비정상 심박이 규칙적으로 반복되는 상태로서 모두 비정상 심전도로 분류되어야 한다. 따라서 부정맥 진단의 신뢰성을 확보하기 위해서는 심박 단위와 리듬 구간에 대한 종합적인 분석을 통하여 비정상 여부를 진단할 필요가 있다.

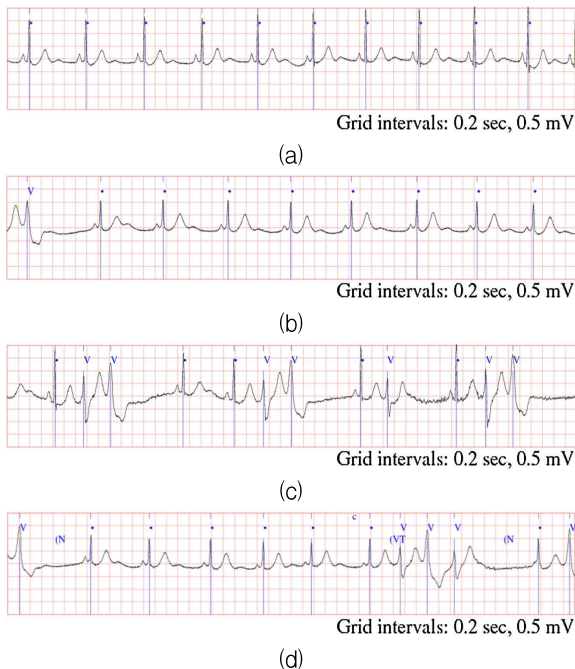


그림 1. 심전도 신호의 예
Fig. 1. Examples of ECG signal

본 논문에서는 심전도 신호의 특징점, 즉 P파, QRS군, T파 등에 기반한 규칙기반 분류를 이용하여 리듬 단위의 분석을 수행한다. 특징점 검출에서는 곡률기반 정점 선택(curvature-based vertex selection)[6,7]을 이용하여 리듬

구간에 대한 모든 P파, QRS군, 및 T파의 시작점, 최고점, 끝점의 위치를 검출한다. 또한 특징 추출 단계에서는 리듬 구간에 대하여 동일성 및 규칙성 등의 심박 비정상 분포에 해당하는 특징이 추출되어 계산된다. 규칙기반 분류에서는 리듬 구간의 특징에 대한 규칙 베이스를 이용하여 리듬 유형을 분류하게 된다. 본 논문에서 제안한 규칙 베이스는 임상 및 내과 분야의 심전도 전문 임상 자료[8-12]를 총체적으로 반영하여 구성되었으며, 모든 리듬 유형에 대하여 각 대응 조건에 대해 상응하는 판단 결과를 도출하는 형태를 띤다. 또한 MIT-BIH 부정맥 데이터베이스를 이용하여 정상동조율, 박동조율, 및 다양한 부정맥 리듬에 대한 리듬 유형의 분류가 가능하며, 특히 비정상 리듬 검출 측면에서 효용성이 우수함을 알 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 제안한 규칙기반 분류를 이용한 비정상 리듬의 검출 및 분류 방법에 대해 기술한다. 3장에서는 MIT-BIH 부정맥 데이터베이스를 이용한 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 살펴본다. 그리고 마지막 4장을 통해 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 규칙기반 리듬 분류에 의한 비정상 검출

2.1 부정맥 진단 기준을 위한 특징 검출

부정맥은 동방결절에서 생성된 전기 자극이 심근세포로 전도되어 발생하는 정상 리듬을 제외한 모든 리듬으로 정의된다. 발생기전에 따라 자극발생장애, 자극전도장애 등으로 분류되며, 발생부위에 따라 동방결절, 심방, 방실결합부, 심실 등으로 분류된다. 표 1은 다양한 부정맥을 발생기전과 발생부위에 따라 체계적으로 분류한 것이며, MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에는 15가지 리듬 유형이 포함되어 있다.

표 1. 부정맥의 분류
Table 1. Classification of arrhythmia

발생기전	발생부위	부정맥 유형	
자극 발생 이상	동방결절	동성빈맥(ST), 동성서맥(SBR), 동성부정맥(SA), 동정지(SAR)	
		심방	심방조기수축(이단맥(AB)) 심방빈맥(AT), 심방조동(AFL), 심방세동(AFIB)
	방실결합부	방실결합부조기수축(이단맥(JB))	
		방실결합부조율(JR), 방실결합부빈맥(JT)	
	심실성	심실	심실조기수축(이단맥(B), 삼단맥(T)) 심실빈맥(VT), 심실조동(VFL), 심실세동(VFIB), 무수축증(AS)
		자극전도장애	동방결절
자극전도장애	방실결절	1도방실차단(BI), 2도방실차단(BII)	
	방실결절 or His속	3도방실차단(BIII)	
	심실	우각차단(RBBB), 좌각차단(LBBB)	
자극전도이상	심실	조기흥분증후군(PREX)	

일반적으로 P파와 QRS군이 가장 잘 보이는 유도 II

의 심전도 신호에서 신호의 리듬, P파의 유/무, PR간격, 및 QRS군의 유/무 등을 분석함으로써 대부분의 부정맥에 대한 진단 근거를 도출할 수 있다[9-11]. 즉, 신호의 리듬의 규칙성 유무와 비정상리듬의 발생 빈도 등을 관찰하고, P파의 모양과 축을 통하여 동성과 이소성에 대한 변별성을 설정한다. 또한 PR간격이 규칙성 유무와 QRS군의 모양과 폭에 따라 상심실성 부정맥이나 심실성 부정맥을 판단할 수 있다.

이러한 전문적 임상 자료를 기반으로 심전도 신호의 정상 판단 및 부정맥 분류를 위한 특징점을 표 2와 같이 구성하였다. 여기서 P파의 심박수와 R파의 심박수가 같은 부정맥의 경우 동일성(identity)을, PP 간격과 RR 간격이 일정하게 유지되는 경우 규칙성(regularity)의 특징으로 분류하였다.

표 2. 부정맥 분류를 위한 특징 검출
Table 2. Features for classification of arrhythmia

리듬 특징(Rhythm Features)
<ul style="list-style-type: none"> • P파의 심박수(heartrate of P wave) • R파의 심박수(heartrate of R wave) • 동일성(identity of P wave and R wave) • 규칙성(regularity of PP and RR interval) • P파(positive and negative of P wave) • PR 간격(PR interval) • QRS폭(QRS width)

그림 2는 표 1의 부정맥 유형에 대하여 표 2에 기술된 리듬 구간 내의 리듬 및 심박 특징의 분석을 통하여 리듬 유형간의 차별성을 시각적으로 표현하기 위해 본 논문에서 도출한 부정맥 진단 기준이다.

정상동조율(Normal sinus rhythm, N)은 심박동수 60~100회/분에서 동일성과 규칙성을 유지하며, 유도 II에서 양성의 P파, 0.12~0.2초의 PR간격, 0.1초 이하의 QRS폭을 가진다. 박동조율(Paced rhythm, P)은 심장박동기의 부위, 종류, 설정 등에 따라 다양한 단조(monotonic) 리듬을 유지하며, 심장박동기에 의한 조율흔적(pacing spike) 후 특징적인 P파 또는 QRS파가 발생된다. 동방결절에 의한 정상동조율 또는 심장박동기에 의한 박동조율을 나타내는 심전도 신호는 통상 정상상태로 분류된다. 표 1에 분류된 부정맥은 다음과 같은 심전도상의 특성을 가진다.

(가) 자극발생장에 따른 부정맥

① 상심실성 부정맥

상심실성 부정맥(Supraventricular tachyarrhythmia, SVTA)은 동방결절, 심방 및 방실접합부에서 발생하는 부정맥으로 QRS모양은 대부분 정상이나 P모양과 PR간격은 발생부위에 따라 다르다[9-12].

동성빈맥(Sinus tachycardia, ST)은 심박동수 100~160회/분 정도이며, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 심박동수가 높을 경우 P파가 선행 T파와 겹쳐질 수 있으며, 동성서맥(Sinus bradycardia, SBR)은 심박동수 60회/분 미만으로, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 PR간격이 약간 길어질 수 있다. 동성부정맥(Sinus arrhythmia, SA)과 동정지(Sinus arrest, SAR)는 심박동수 60~100회/분에서 동일성과 불규칙성(RR)을 가지며, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 동정지 동안 P파, QRS파, T파가 모두 소실된다.

심방이단맥(Atrial bigeminy, AB)은 심박동수 60~100회/분에서 동일성과 불규칙성을 가지며, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 심방조기박동에 의한 이소성 P파의 모양이 달라질 수 있다. 심방빈맥(Atrial tachycardia, AT)은 심박동수 120~200회/분에서 동일성과 규칙성을 유지하며, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 심방조기박동에 의한 이소성 P파의 모양과 방향이 달라질 수 있다. 심방조동(Atrial flutter, AFL)은 심박동수 250~350회/분(P)과 75~150회/분(R)에서 규칙성(PP)을 가지며, P파의 모양이 T와 겹쳐져 기저선 없는 톱니모양의 조동파로 나타난다. 심방세동(Atrial fibrillation, AFIB)은 심박동수 350~600회/분(P)과 100~160회/분(R)에서 불규칙성을 가지며, P파의 모양이 T와 겹쳐져 미세한 진동모양의 세동파로 나타난다.

방실접합부이단맥(A-V junctional or Nodal bigeminy, JB)은 심박동수 60~100회/분에서 불규칙성(RR)을 가지며, 유도 II에서 음성의 P파, 0.12초 미만의 PR간격, 0.1초 이하의 QRS폭을 가지며. 방실접합부조율(A-V junctional or Nodal rhythm, JR or NOD)은 심박동수 40~60회/분에서 동일성과 규칙성을 유지하며, 유도 II에서 음성의 P파, 0.12초 미만의 PR간격, 0.1초 이하의 QRS폭을 가진다. 또 방실접합부빈맥(JT)은 심박동수 100~220회/분에서 동일성과 규칙성을 유지하며, 유도 II에서 음성의 P파, 0.12초 미만의 PR간격, 0.1초 이하의 QRS폭을 가진다.

② 심실성 부정맥

심실이단맥(Ventricular bigeminy, B)과 심실삼단맥(Ventricular trigeminy, T)은 심박동수 60~100회/분에서 불규칙성(RR)을 가지며, 심실조기박동에 의한 이소성 QRS파의 모양이 0.12초 이상의 폭을 가진다. 심실빈맥(Ventricular tachycardia, VT)은 심박동수 110~250회/분에서 규칙성(RR)을 유지하며, 심실조기박동에 의한 이소성 QRS파의 모양이 0.12초 이상의 폭을 가진다. 심실조동(Ventricular flutter, VFL)은 심박동수 250회/분 이상에서 규칙성(RR)을 유지하며, QRS파는 파형 구분이 어려운 역전(sine) 곡선 모양으로 나타난다. 심실세동(Ventricular fibrillation, VFIB)은 심박동수 300~600회/분에서 불규칙성(RR)을 가지며, QRS파는 파형 구분이 심실조동과보다 어려운 진동모양의 세동파로 나타난다. 심장무수축증(Asystole, AS)은 심장 박동이 정지되어 제세동이 불가능한 상태이며, 심전도는 P파, QRS파, T파가 모두 소실된 일직선 모양으로 나타난다[9-11].

(나) 자극전도장애 및 이상에 따른 부정맥

전도장애는 자극전도계의 여러 부위에서 발생할 수 있으며, 장애부위에 따라 동방차단, 방실차단 및 심실차단으로 구분한다[9-11].

동차단(SA block, SAB)은 심박동수 60~100회/분에서 동일성과 불규칙성(RR)을 가지며, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 동차단 동안 P파, QRS파, T파가 모두 소실된다. 심전도 상에서 동차단과 동정지를 구분하는 유일한 차이는 동차단이 정상 PP간격의 배수인 반면 동정지는 정상 PP간격의 배수가 아니라는 점이다.

1도심장차단(1° heart block, BI)은 심박동수 60~100회/분에서 동일성과 규칙성을 유지하며, 심박 형태는 정상동조율과 유사하지만 PR간격이 0.2초 이상으로 길어진다. 2도심장차단(2° heart block, BII)은 심박동수 60~100회/분에서

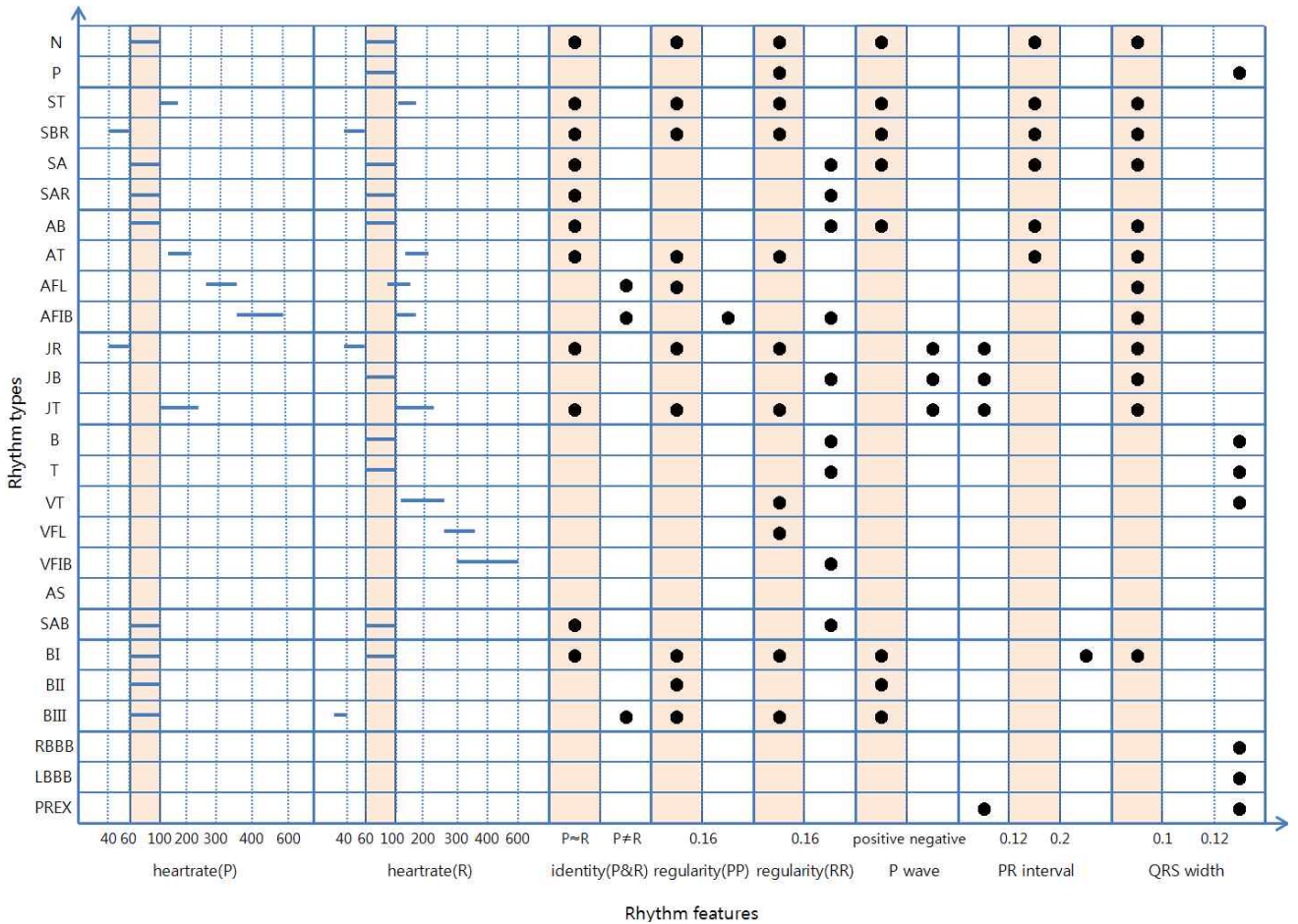


그림 2. 부정맥의 진단 기준
Fig. 2. Diagnosis criteria for arrhythmia

규칙성(PP)을 유지하며, 심박 형태는 QRS파가 주기적으로 소실되어 P파와 QRS파의 전도율에 차이가 있다. 3도심장차단(3° or Complete heart block, BIII)은 심박동수 60~100회/분(P)과 30~40회/분(R)에서 규칙성을 유지하며, 심방과 심실간의 자극전도가 완전 차단되어 심박 형태는 심방조동 또는 심방세동과 유사한 모양으로 나타난다.

우각차단(Right bundle branch block, RBBB)과 좌각차단(Left bundle branch block, LBBB)은 심실내 자극전도의 차단정도에 따라 특징적인 P파 또는 QRS파가 발생되며, 심박 형태는 0.12초 이상의 QRS폭을 가진 파형이 일정시간 동안 단조 리듬을 유지한다.

조기흥분증후군(Pre-excitation or WPW syndrome, PREX)은 심방과 심실간의 고속 전도로가 형성된 자극전도의 비정상적 상태이며, 심박 형태는 0.12초 미만의 PR간격과 0.12초 이상의 QRS폭을 가진다.

본 논문에서는 앞서 기술한 부정맥의 신호적 특성을 비롯한 다양한 부정맥에 대한 임상 및 내과 분야의 심전도 전문 임상 자료에 기반하여 부정맥 분류를 위한 특징을 검출하고 검출된 특징을 이용하여 지식 베이스를 구축하였다. 그림 2는 표 1에 있는 다양한 부정맥 유형에 대하여 리듬 구간 내의 리듬 및 심박 분포의 분석을 통하여 리듬 유형간의 차별성을 시각적으로 표현하기 위해 도출된 부정맥 진단 기준이다. 이는 부정맥의 진단 기준을 하나의 기준표로 요

약함으로써 신호학적으로 유사한 특성을 보이는 부정맥 간 변별성을 제공할 뿐만 아니라, 리듬 특징과 리듬 타입을 변수로 한 각 부정맥의 신호적 특성을 단일 표로 도식화 하였기에 그 학술적 기여도를 가진다.

2.2 규칙기반 리듬 분류

리듬에 대한 분석 및 분류는 다양한 리듬 유형 및 심박 분포의 변형과 혼재로 인하여 심전도 전문가에게도 많은 시간과 노력이 필요한 작업이다. 숙련된 심전도 전문가의 지식과 경험을 활용할 수 있는 전문가 시스템이 구현된다면 실생활에서 신속하고 정확한 부정맥 진단이 가능할 것이다. 본 논문에서는 전문가 시스템을 위하여 그림 3과 같이 지식 베이스, 규칙 베이스, 추론 과정, 그리고 사용자 인터페이스로 구성되는 규칙기반 시스템을 구성하였다.

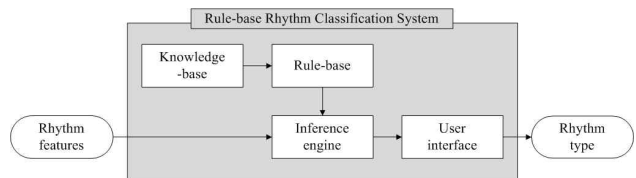


그림 3. 규칙기반 리듬 분류를 위한 구성도
Fig. 3. Diagram for rule-based rhythm classification

규칙 베이스는 그림 2의 부정맥 진단 기준을, 그리고 추론 엔진으로는 if ~ then ... 형식을 이용하여 표 3와 같은 유형으로 생성되며 총 26개의 Rule을 포함한다. 따라서 각 규칙은 진단 기준에 해당하는 전제부와 부정맥 유형에 해당하는 결론부로 구성된다. 규칙에는 해당 부정맥에 특징적인 리듬 및 심박 기준을 가지고 있으며, 규칙에 있는 특징들이 모두 만족되는 경우 해당 부정맥으로 분류가 된다. 보편적인 리듬을 가지는 부정맥은 유형별 단일 규칙으로 충분하지만 변형 및 혼재된 리듬을 가지는 부정맥은 유형별 다중 규칙이 필요할 수도 있다. 마지막으로 리듬 분류 처리 결과를 그림 4와 같이 사용자 인터페이스를 통하여 확인한다.

표 3. 지식 베이스로부터 생성된 규칙 베이스
Table 3. Rule-base generated from knowledge-base

Rule Index	Classification Rule	Arrhythmia Classification
[Rule 1]	if { $(60 \leq P_{rate} \leq 100) \cap (60 \leq R_{rate} \leq 100) \cap (D_{rate}=0) \cap \{ (D_{PP} \leq 0.16) \cap (D_{RR} \leq 0.16) \} \cap \{ (P_{HV} > 0) \} \cap \{ (0.12 \leq PR_{int} \leq 0.2) \} \cap \{ (QRS_{wid} \leq 0.1) \}$ }, then Normal Sinus Rhythm	Normal (Not-Arrhythmia)
[Rule 2]	if { $(60 \leq P_{rate} \leq 100) \cap \{ (D_{RR} \leq 0.16) \} \cap \{ (QRS_{wid} \geq 0.12) \}$ }, then Paced Rhythm	
...

P_{rate} 와 R_{rate} 은 P파와 R파의 분당 심박동수를 각각 나타내며, D_{rate} 은 식 (1)과 같이 P파와 R파의 분당 심박동수 차이를 나타낸다. 여기서 α 는 리듬 구간의 가변성을 고려하여 동일성을 인정하는 허용범위를 반영한 것이다.

$$D_{rate} = P_{rate} - R_{rate} + \alpha \quad (1)$$

D_{PP} 와 D_{RR} 은 식 (2)와 (3)과 같이 PP간격과 RR간격의 최대값과 최소값의 차이를 각각 나타낸다.

$$D_{PP} = PP_{max} - PP_{min} \quad (2)$$

$$D_{RR} = RR_{max} - RR_{min} \quad (3)$$

P_{HV} 는 식 (4)와 같이 P파의 폭에 대한 P파의 높이를 나타낸다.

$$P_{HV} = \frac{P_{height}}{P_{width}} \quad (4)$$

PR_{int} 은 PR간격으로 P파의 시작점과 QRS파의 시작점 사이의 시간으로 정의되며, QRS_{wid} 는 QRS폭으로 QRS파의 시작점과 QRS파의 끝점 사이의 시간으로 정의된다.

그림 4는 제안된 규칙기반 리듬 분류에 의하여 사용자 인터페이스에 제시되는 리듬 구간의 처리 결과를 예시한 것이다. 심전도 원신호와 함께 특징점 검출, 특징 추출, 분류

과정을 통하여 얻어진 진단 결과를 보여준다. 심전도 신호는 분당 심박동수 72회의 동방결절에서 발생한 리듬으로 P파, PR간격, QRS폭이 모두 정상 범위에 해당되므로 분류 결과가 정상동조율로 판정된다.

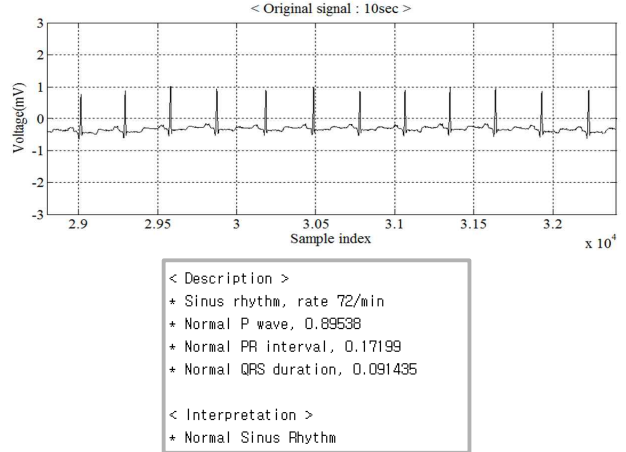


그림 4. 규칙기반 리듬 분류에 의한 처리 결과의 예
Fig. 4. An example of processing result by rule-based rhythm classification

3. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안된 규칙기반 알고리즘에 의한 비정상 리듬의 검출 및 분류 성능을 평가하기 위하여 심전도 데이터베이스를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험에 이용되는 데이터베이스는 임상에서 수집된 MIT-BIH 부정맥 데이터베이스[13]이며, 심전도 관련 연구에서 표준 데이터베이스로서 널리 이용되고 있다. 23~89세 남성 및 여성 47명으로부터 두 가지 유도로 측정된 30분 길이의 48개 레코드로서 전형적인 정기검진의 23개(100~124번)와 복잡한 비정상 환자의 25개(200~234번)로 구성되어 있다. 0.1~100Hz 대역필터링과 360Hz 샘플링 및 12비트 해상도의 디지털 신호로 표현되어 있으며, 2명의 심전도 전문가로부터 분류된 심박 및 리듬 유형에 대한 정보가 추가되어 있다.

실험용 PC는 3.10GHz×2 i5-2400 CPU와 4GByte RAM의 사양을 가지고 있으며, 처리 알고리즘은 MATLAB R2010a를 이용하여 구현하였다. 심전도 신호의 리듬 구간 크기는 관련 논문[14-17]의 연구 결과를 참고하여 모든 부정맥을 충분히 검출할 수 있는 10초로 설정하였다. 먼저 전처리 과정에 해당되는 특징점 검출을 위하여 곡률기반 정점 선택을 이용하여 리듬 구간에 대한 모든 P파, QRS군, 및 T파의 시작점, 최고점, 끝점의 위치를 검출하였다.

리듬 구간에 대하여 검출된 특징점을 이용하여 표 2의 리듬 및 심박 분포 특징을 추출하였으며, 구축된 규칙 베이스를 이용하여 리듬 유형을 분류하였다. 각 부정맥에 특징적인 리듬 및 심박 기준에 대한 규칙 정합을 통하여 모든 조건을 만족하는 경우 해당 부정맥으로 분류하게 된다. 규칙기반에 의한 리듬 분류의 적용 가능성을 확인하기 위하여 MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에 포함된 정상동조율, 박동조율, 및 다양한 부정맥 리듬에 대하여 실험하였다.

정상동조율은 다른 리듬 유형에 비하여 매우 큰 분포 범위 및 샘플 수를 가지므로 다양한 심검자 및 왜곡 신호에 대한 분류 결과의 확인이 필요하다. 그림 5(a)는 레코드 101번의 리듬 구간으로 리듬 및 심박 조건을 모두 만족하는 정상동조율이다.

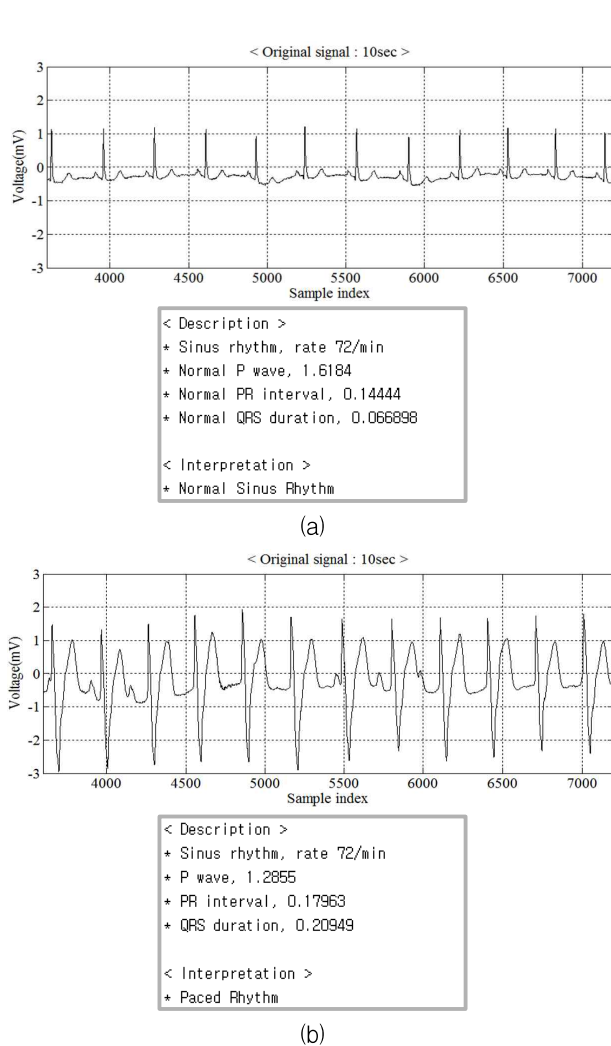


그림 5. 정상동조율과 박동조율에 대한 리듬 분류; (a) 레코드 101번, 및 (b) 레코드 107번

Fig. 5. Rhythm classification for normal sinus rhythm and paced rhythm; (a) Record no.101, and (b) Record no.107

박동조율은 심장박동기가 정상으로 동작하는 경우 정상 상태로 분류되어야 하지만 심장기능의 이상 진단을 받은 상태이므로 정상동조율과는 별도로 분류되어야 한다. 그림 5(b)는 레코드 107번의 리듬 구간으로 정상동조율과는 다른 심박 분포를 가지며, 특히 QRS폭이 넓은 심실 부위의 심장 박동기에 의한 박동조율이다.

동방결절 부위의 자극발생이상에 해당되는 부정맥으로는 동성빈맥, 동성서맥, 동성부정맥, 그리고 동정지가 있다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에는 레코드 232번에 동성서맥 리듬을 포함하고 있는데 다른 부정맥과 혼재되어 심박 특징이 왜곡됨으로써 동성서맥 고유의 진

단기준으로는 검출이 어렵다. 그림 6(a)는 레코드 232번의 리듬 구간으로 심방조기수축과 우각차단의 혼재로 인하여 심박동수 60회/분 미만에서 리듬의 동일성만으로 검출이 가능한 동성서맥이다.

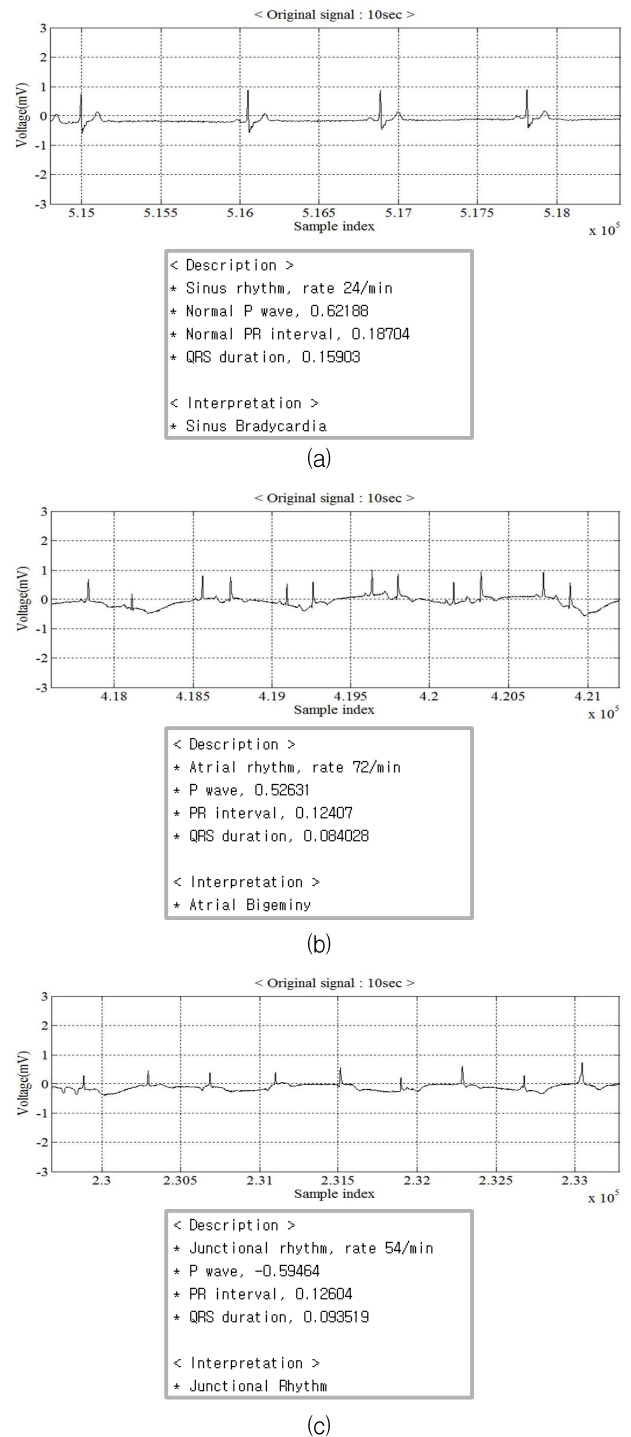


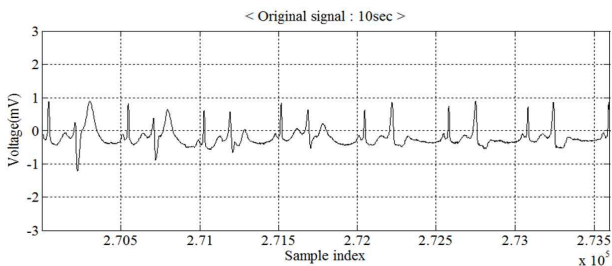
그림 6. 상심실성 부정맥에 대한 리듬 분류; (a) 레코드 232번, (b) 레코드 222번, 및 (c) 레코드 222번

Fig. 6. Rhythm classification for supraventricular arrhythmia; (a) Record no.232, (b) Record no.222, and (c) Record no.222

심방 부위의 자극발생이상에 해당되는 부정맥으로는 심방이단맥, 심방빈맥, 심방조동, 그리고 심방세동이 있다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에는 이러한 리듬을 모두 포함하고 있지만 P파 신호가 미약하거나 T파와 중복되어 검출에 어려움이 있으므로 리듬 고유의 진단기준으로는 검출이 어렵다. 그림 6(b)는 레코드 222번의 리듬 구간으로 심방조기수축에 의한 P파 왜곡으로 인하여 심실박동수의 60~100회/분, 동일성 및 불규칙성과 QRS폭의 정상범위 기준으로 검출이 가능한 심방이단맥이다.

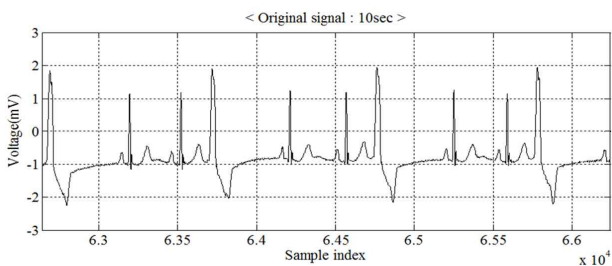
방실접합부 부위의 자극발생이상에 해당되는 부정맥으로는 방실접합부이단맥, 방실접합부조율, 그리고 방실접합부빈맥이 있다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에는 소수의 방실접합부조율 리듬만을 포함하고 있는데 P파의 음성, 없음, 또는 QRS와 겹침으로 인하여 리듬 고유의 진단기준으로 검출에 어려움이 있다. 그림 6(c)는 레코드 222번의 리듬 구간으로 심실박동수의 40~60회/분, 동일성, 및 규칙성과 P파의 음성범위 기준으로 검출이 가능한 방실접합부조율이다.

심실 부위의 자극발생이상에 해당되는 부정맥으로는 심실이단맥, 심실삼단맥, 심실빈맥, 심실조동, 심실세동, 그리고 무수축증이 있다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에는 심실세동과 무수축증을 제외한 리듬을 포함하고 있는데 심실박동수 및 QRS폭 진단기준을 중심으로 검출이 가능하다. 그림 8은 심실박동수 60~100회/분, 비동일성, 및 불규칙성과 QRS폭 0.12초 이상으로 검출된 심실이단맥과 심실삼단맥이며, 그림 7(a)는 정상리듬과 기외수축이 번갈아 오는 이단맥, 그림 7(b)는 2회 정상리듬 발생 후에 기외수축이 발생하는 삼단맥이다.



< Description >
 * Ventricular rhythm, rate 90/min
 * P wave, 0.59944
 * PR interval, 0.080556
 * QRS duration, 0.12593
 < Interpretation >
 * Ventricular Bigeminy

(a)



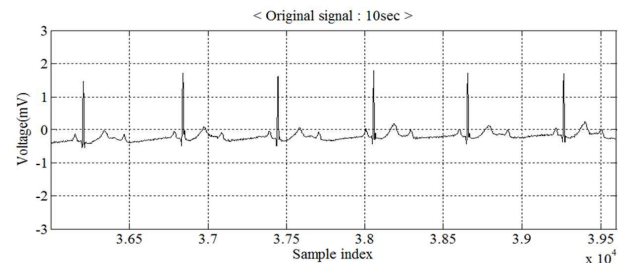
< Description >
 * Ventricular rhythm, rate 60/min
 * Normal P wave, 3.0331
 * Normal PR interval, 0.13135
 * QRS duration, 0.10722
 < Interpretation >
 * Ventricular Trigeminy

(b)

그림 7. 심실성 부정맥에 대한 리듬 분류; (a) 레코드 106번, (b) 레코드 119번

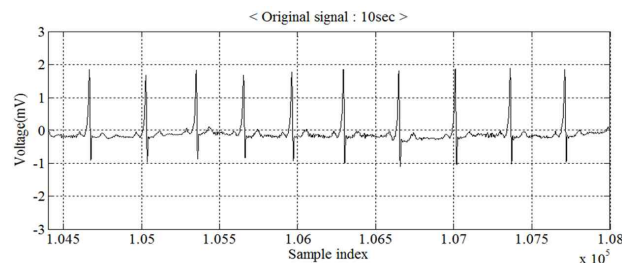
Fig. 7. Rhythm classification for ventricular arrhythmia; (a) Record no.106, and (b) Record no.119

자극전도 장애 및 이상에 해당되는 부정맥으로는 동차단, 1도방실차단, 2도방실차단, 3도방실차단, 그리고 조기흥분증후군이 있다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스에는 2도방실차단과 조기흥분증후군 리듬을 포함하고 있는데 QRS과 없음 또는 delta파 검출에 어려움이 있어 리듬 고유의 진단기준으로 검출이 어렵다. 그림 8(a)는 심방박동수 60~100회/분 및 동일성에 의해 동성서맥으로 오검출된 2도방실차단이며, 그림 8(b)는 심실박동수 60회/분 이상, PR간격 0.12초 미만, 및 QRS폭 0.12초 이상으로 검출이 가능한 조기흥분증후군이다.



< Description >
 * Sinus rhythm, rate 36/min
 * Normal P wave, 1.9812
 * Normal PR interval, 0.14537
 * Normal QRS duration, 0.071296
 < Interpretation >
 * Sinus Bradycardia

(a)



< Description >
 * Sinus+Atrial/Ventricular, rate 60/min
 * Normal P wave, 1.161
 * PR interval, 0.10583
 * QRS duration, 0.14472
 < Interpretation >
 * Pre-excitation(WPW) syndrome

(b)

그림 8. 전도성 부정맥에 대한 리듬 분류; (a) 레코드 231번, 및 (b) 레코드 230번

Fig. 8. Rhythm classification for conduction arrhythmia: (a) Record no.231, and (b) Record no.230

표 4는 제안한 방법에 의한 정상 및 비정상의 분류 결과를 나타낸 것으로서, 정상 신호에 대한 위음성 (false-negative) 오차율은 약 19%이지만, 비정상 신호에 대하여는 0%의 성능을 보인다. 이는 정상 신호에 대한 비정상 신호의 분류는 다소 발생되나, 비정상 신호에 대한 오판정은 존재하지 않는 것으로서, 임상 적용의 관점에서 위험 요소를 최소화하는 특징이 된다.

표 4. 제안된 규칙기반 알고리즘에 의한 정상/비정상 분류 성능

Table 4. Classification performance by proposed rule-based algorithm

	No. of test signals	No. of normality	No. of abnormality	classification (%)
Normal Rhythm	74	60	14	81.08
Abnormal Rhythm	68	0	68	100

표 5는 제안한 규칙 베이스에 기반한 부정맥 분류 성능을 나타낸 것으로서, 전체 분류 성공률은 약 73%로 확인되었다. 이는 본 제안 방법이 각 부정맥의 특징적인 리듬 및 심박의 분포에 의존적인 분류를 제공하므로, 일부 부정맥 신호에 대해서는 변별성 제공이 난해하다. 따라서 규칙기반 방법만으로 해결이 어려운 정상 리듬의 오분류를 개선, 단조 및 배열 리듬의 분류, 그리고 조동 및 세동 리듬의 검출 등에 대한 추가 연구가 수반될 경우 보다 견실한 분류 성능이 재현될 수 있다.

표 5. 제안된 규칙기반 알고리즘에 의한 분류 성능
Table 5. Classification performance by proposed rule-based algorithm

Rhythm type (Risk level)	No. of test signals	No. of normality	No. of abnormality	Type classification (%)
Normal Sinus rhythm(1)	64	50	14	50 / 78.13
Paced Rhythm(2)	10	10	0	9 / 90.00
Sinus Bradycardia(2)	10	0	10	6 / 60.00
Atrial Bigeminy(2)	8	0	8	6 / 75.00
Supraventricular Tachyarrhythmia(2)	10	0	10	7 / 70.00
Ventricular Bigeminy(2)	10	0	10	8 / 80.00
Ventricular Trigeminy(3)	10	0	10	6 / 60.00
Ventricular Tachycardia(4)	10	0	10	7 / 70.00
Pre-excitation syndrome(2)	10	0	10	7 / 70.00
Total	142	60	82	106 / 72.57

4. 결 론

본 논문에서는 임상 진단 기준을 반영하는 규칙기반 분류 알고리즘을 이용하여 비정상 리듬을 검출 및 분류하는 방법을 제안하였다. 규칙기반 분류는 리듬 구간의 특징에 대한 규칙 베이스를 이용하여 리듬 유형을 분류하도록 하였으며, 규칙 베이스는 임상 및 내과 분야의 심전도 전문 임상 자료에 대해 상응하는 판단 결과를 재현하도록 기준표를 제시하였다. MIT-BIH 부정맥 데이터베이스를 이용한 실험에서 부정맥에 해당하는 심전도 신호의 검출은 100%의 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 향후 정상 리듬의 오분류를 개선, 단조 및 배열 리듬의 분류, 조동 및 세동 리듬의 검출 등에 대한 추가 연구를 통해 부정맥의 세부 분류 성능 또한 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Ritika Agarwal, and Sameer R. Sonkusale, "Input-Feature Correlated Asynchronous Analog to Information Converter for ECG Monitoring," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 5, no. 5, pp. 459-467, 2011.
- [2] Honggang Wang, Dongming Peng, Hsiao-Hwa Chen, and Ali Khojenezhad, "Resource-Aware Secure ECG Healthcare Monitoring Through Body Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 12-19, 2010.
- [3] Elham Dolatabadi and Serguei Primak, "Ubiquitous WBAN-based Electrocardiogram Monitoring System," *Proceedings of IEEE Conference on e-Health Networking, Applications and Services*, vol. 13, pp. 110-113, 2011.
- [4] 장형중, 임준식, "심박수 변이도와 퍼지 신경망을 이용한 부정맥 추출," *한국인터넷정보학회 논문지*, 제 10권, 제5호, pp. 107-116, 2009.
- [5] Yun-Chi Yeha, Wen-June Wanga, and Che Wun Chioud, "Cardiac arrhythmia diagnosis method using linear discriminant analysis on ECG signals," *Measurement*, vol. 42, no. 5, pp. 778-789, 2009.
- [6] 김태훈, 김성완, 류춘하, 윤병주, 김정홍, 최병재, 박길흠, "곡률을 이용한 특징점 기반 심전도 신호 압축," *한국지능시스템학회 논문지*, 제20권, 제5호, pp. 624-630, 2010.
- [7] 윤병주, 이훈철, 고윤희, 이시웅, 김성대, "다각형 근사 오차를 최소화하기 위한 2단계 정점 선택 기법," *대한전자공학회 논문지*, 제40권, 제6호, pp. 114-123.
- [8] S. Barro, a, R. Ruizb, J. Presedoa, and J. Mirac, "Grammatic representation of beat sequences for fuzzy arrhythmia diagnosis," *International Journal of Bio-Medical Computing*, vol. 17, no. 3, pp. 245-259, 1991.
- [9] 최윤식, *임상심전도학(제5판)*, 서울대학교출판문화원, 2009.

[10] James H O'Keefe, *The ECG Criteria Book, Second Edition*, Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2009.

[11] Gail Walraven, *Basic Arrhythmias*, Prentice Hall, 6 edition, 2005.

[12] Etienne Delacrétaz, M.D., Clinical Practice, Supraventricular Tachycardia, *The New England Journal of Medicine* 2006; 354:1039-1051, 2006.

[13] G. Moody and R. Mark, "The MIT-BIH arrhythmia database on CD-ROM and software for use with it," *Computers in cardiology*, IEEE Computer Society Press, pp. 185-188, 1990.

[14] M. Kundu, M. Nasipuri, and D. K. Basu, "A knowledge-based approach to ECG interpretation using Fuzzy logic," *IEEE Trans. on SMC*, vol 28 Part B, no. 2, pp. 237-243, 1998.

[15] D. Ge, N. Srinivasan and SM Krishnan, "Cardiac arrhythmia classification using autoregressive modeling," *BioMedical Engineering Online*, vol 1, no. 5, pp. 1-12, 2002.

[16] J. Rodriguez, A. Goñi, and A. Illarramen, "Real-time classification of ECGs on a PDA," *IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine*, vol 9, no. 1, pp. 23-34, 2005.

[17] U. Ayesta, L. Serrano, and I. Romero, "Complexity measure revisited: A new algorithm for classifying cardiac arrhythmias," *Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol 2, pp. 1589-1591, 2001.

저 자 소 개



류춘하(Chunha Ryu)

1988년 : 경북대학교 전자공학과 학사
 2002년 : 경북대학교 산업공학과 제어 및 계측공학 석사
 2010년~현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사과정

관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 생체신호처리
 Phone : 053-940-8849
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : chryu@ee.knu.ac.kr



김성완(Sung-Wan Kim)

1989년 : 경북대학교 전자공학과 학사
 1993년 : 경북대학교 전자공학과 석사
 2012년 : 경북대학교 전자공학부 공학박사
 1995년~현재 : 수원과학대학교 컴퓨터정보과 부교수

관심분야 : 영상처리, 신경망, 병렬처리 등
 Phone : 053-940-8849
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : sungkim@ssc.ac.kr



김세윤(Se-Yun Kim)

2005년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 학사
 2007년 : 경북대학교 전자공학과 석사
 2012년 : 경북대학교 전자공학부 공학박사

관심분야 : 영상처리, 패턴인식, Machine vision
 Phone : 053-940-8849
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : sykim@ee.knu.ac.kr



김태훈(Tae-Hun Kim)

2004년 : 부산외국어대학교 컴퓨터전자공학과 학사
 2009년 : 경북대학교 산업공학과 회로 및 시스템공학 석사
 2010년~현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사과정

관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 생체신호처리
 Phone : 053-940-8849
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : thkim@ee.knu.ac.kr



최병재(Byung-Jae Choi)

1987년 : 경북대학교 전자공학과 학사
 1989년 : 한국과학기술원 원자력공학과 공학석사
 1998년 : 한국과학기술원 전기전자공학과 공학박사
 1999년~현재 : 대구대학교 전자공학부 교수

관심분야 : 지능시스템, 인공지능 이론 및 응용, 마이크로 프로세서 응용
 Phone : 053-850-6635
 Fax : 053-850-6619
 E-mail : bjchoi@daegu.ac.kr



박길흠(Kil-Houm Park)

1982년 : 경북대학교 전자공학과 학사
 1984년 : 한국과학기술원 전기전자공학과 석사
 1990년 : 한국과학기술원 전기전자공학과 박사
 1990년~현재 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수

관심분야 : 영상신호처리, 패턴인식, 영상압축
 Phone : 053-940-8849
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : khpark@ee.knu.ac.kr