

# 2025-1 캡스톤 디자인

## 프로젝트 결과 최종 보고서

rMind : 카메라 기반 비접촉식 면접 반응 분석 플랫폼



과목	2025-1 캡스톤디자인
팀 명	Team. 3 idiots
조원	32200584 김민중
	32202136 서범석
	32204325 조수한

# 목 차

I. 서론 .....	3 page
II. 배경 및 관련 연구 .....	4 page
2.1 기존 시스템의 한계점	
2.2 주요 기술 개요	
2.3 본 프로젝트의 차별점	
III. 시스템 설계 및 구현 .....	8 page
3.1 전체 시스템 구조	
3.2 주요 모듈 및 기능 설명	
3.3 적용 기술의 활용 방식	
IV. 실험 및 결과 .....	12 page
4.1 실험 목적	
4.2 실험 설계 및 시나리오별 결과	
4.2.1 실험 A	
4.2.2 실험 B	
4.2.3 실험 C	
4.2.4 실험 D	
4.3 실험 종합 분석 및 고찰	
V. 프로젝트 성과 및 기여 .....	16 page
5.1 주요 성과 요약	
5.2 팀의 기여 및 역할 분담	
VI. 결론 및 향후 발전 방향 .....	19 page
6.1 프로젝트 요약	
6.2 향후 발전 방향 및 기대 효과	

## 1. 서론

현대 사회에서 면접은 학업, 취업, 장학금 심사 등 다양한 상황에서 개인의 능력과 태도를 종합적으로 평가하는 핵심 절차로 자리 잡고 있다. 특히, 면접자의 **비언어적 표현**(표정, 시선, 제스처 등)은 언어적 응답 못지않게 평가자의 인상 형성에 지대한 영향을 미친다. 심리학자 알버트 메라비언(Albert Mehrabian)의 연구에 따르면, 인간 커뮤니케이션에서 언어적 요소는 메시지 전달의 약 7%에 불과하며, 나머지 93%는 음성 및 시각적 신호와 같은 비언어적 요소에 의해 결정된다. 이러한 결과는 면접과 같은 고부담(high-stress) 커뮤니케이션 상황에서 **비언어적 반응의 중요성**을 강하게 시사한다.

그럼에도 불구하고, 대부분의 면접 준비자들은 자신이 면접 중 어떤 질문에 대해 긴장하거나 위축되는지를 인지하지 못하며, 개선할 기회를 갖기 어렵다. 기존의 면접 피드백 시스템은 전문 코칭에 의존하는 경우가 많아, **주관성과 비용 부담, 낮은 접근성**이라는 구조적 한계를 지니고 있다. 또한, 현재까지의 대부분 시스템은 언어적 응답이나 전반적인 면접 흐름에 집중되어 있으며, 생리적 반응 및 정량적 행동 데이터를 기반으로 한 피드백은 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 비접촉식 생체신호 분석 기술인 rPPG(remote photoplethysmography)를 활용하여 면접자의 긴장 반응을 정량적으로 추출하고, 이를 기반으로 **표정 및 제스처 분석, 긴장 곡선 시각화, 개인별 피드백 리포트 제공**이 가능한 인터뷰 반응 분석 플랫폼을 개발하고자 한다. 해당 플랫폼은 사용자로 하여금 스스로 자신의 비언어적 약점을 인지하고, 반복적인 자기 피드백을 통해 개선할 수 있는 자기주도형 면접 트레이닝 환경을 제공한다.

특히, 본 프로젝트는 모바일 앱 기반 사용자 인터페이스와 FastAPI 서버 기반의 영상 분석 백엔드 시스템을 통해, rPPG 기반 심박 분석, 눈 깜빡임 빈도 측정, 얼굴 움직임 분석 등 총 3가지 핵심 기능을 통합적으로 구현하였다. 사용자는 영상 업로드만으로 서버 기반의 자동 분석 결과를 받을 수 있으며, 그 결과는 그래프 및 이미지 형태로 시각화되어 앱 내에서 즉시 확인할 수 있다.

본 보고서에서는 제안한 시스템의 기술적 구성, 구현 방식, 실험 설계 및 결과를 차례로 서술하고, 그 유용성과 향후 발전 방향에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 배경 및 관련 연구

### 2.1. 기존 시스템의 한계점

기존의 비접촉식 심박수 측정 기술(rPPG 포함) 및 웨어러블 기반 시스템은 다음과 같은 한계점을 지니고 있다:

### 2.1.1. 잡음 및 신호 품질 저하

rPPG 기술은 얼굴 영상에서 매우 미세한 혈관 변화를 감지하기 때문에 머리 움직임, 조명 변화, 영상 압축 등 외부 요인에 매우 민감하다. 이로 인해 신호가 왜곡되고 정확도가 떨어지는 문제가 있다

특히 조명이 부족하거나 얼굴이 측면으로 향하거나 가려진 경우, rPPG 신호의 신뢰도가 크게 떨어진다는 연구가 있다.

### 2.1.2. 움직임 및 자세 변화에 취약

환자나 실사용자가 고정되지 않은 상태에서는 머리카나 몸 움직임으로 인해 잡음이 발생하고, 이로 인해 신호 왜곡이 심화된다.

웨어러블 기반 (예: 스마트워치) 시스템은 움직임이 심할 경우 정확도 저하와 오차를 동반하는 한계를 가진다.

### 2.1.3. 조명 조건, 영상 품질에 따른 성능 저하

영상 품질이 저하되거나 조명이 부족한 환경에서는 얼굴 감지 실패, 신호 감쇠, 잡음 증가 등의 문제가 빈번하게 발생한다.

다양한 조명 환경에서의 검증이 부족해, 실제 생활 환경에서의 안정적 수행이 어렵다.

### 2.1.4. 심박 외 추가 정보 부족

대부분의 기존 비접촉식 시스템은 주로 심박수 측정에만 초점을 맞추며, 눈 깜빡임, 얼굴 움직임 등의 **비언어적 행동 데이터까지 포괄하지 못한다**

이에 따라 복합적인 비언어적 반응 분석에 기반한 통합 피드백 플랫폼으로서는 한계가 존재한다.

## 2.2. 주요 기술 개요

본 프로젝트는 카메라 기반의 비접촉식 생체신호 분석 기술인 Remote Photoplethysmography (rPPG)를 중심으로 구성되어 있으며, 이를 토대로 면접자의 **긴장도 및 비언어적 반응을 정량적으로 측정**하고 시각화하는 것을 핵심 목표로 한다. 이를 위해 구현된 시스템은 크게 (1) 심박수 신호 추출 단계와 (2) 심박수 계산 및 시각화 단계로 구성되며, 각각의 단계에서 신호처리 및 컴퓨터 비전 기법이 통합적으로 사용된다.

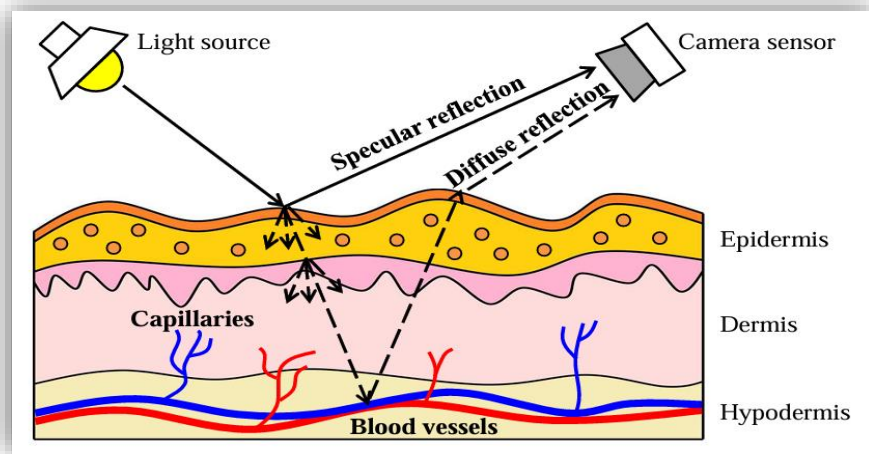


Fig 1. Skin reflection model illustration

## rPPG 기술 개요

rPPG는 피사체의 얼굴 표면에서 반사되는 미세한 색상 변화를 영상으로 포착하고, 이를 통해 심박에 따른 혈류 변화를 비접촉 방식으로 측정하는 기술이다. 이러한 기술은 피부 조직의 확산 반사(diffuse reflection)로부터 혈액량의 변화를 감지하며, 특히 **G(Green) 채널의 색 변화**가 헤모글로빈의 광흡수 특성상 심박수 추정에 가장 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다.

본 프로젝트에서는 해당 원리를 기반으로 아래와 같은 구성의 rPPG 분석 파이프라인을 구현하였다:

### 2.2.1. 데이터 수집 및 전처리

Haar Cascade 기반 얼굴 검출 후, **BGR 채널의 프레임별 평균값**을 추출하며, 동시에 dlib 기반의 얼굴 랜드마크 모델로 눈 영역을 추적하여 눈 깜빡임 횟수도 병렬적으로 수집한다.

이 값들은 시간 순으로 정렬되어 CSV 형식으로 저장되며, 이후 심박 추정의 입력 데이터로 사용된다.

### 2.2.2. rPPG 신호 추출 단계

본 시스템은 세 가지 대표적인 rPPG 알고리즘을 구현하였다:

- **CHROM (Chrominance-based Method)**: RGB 신호를 색차 공간으로 변환한 뒤, 투영 행렬을 사용하여 G채널 기반 심박성분을 강조한다. 이는 조명 변화에 강건하면서도 G채널에 대한 민감도를 활용한 방식이다.
- **POS (Plane-Orthogonal-to-Skin)**: 영상 내 피부색 변화에 직교하는 평면으로 신호를 투영하여 잡음 성분(조명, 움직임 등)을 제거하고 심박 신호만 분리하는 방식이

다. 이는 CHROM 대비 조명 조건 변화에 더 강건하다는 장점이 있다.

- **ICA (Independent Component Analysis):** RGB 3채널을 독립 성분으로 분리하여, 심박 신호를 잡음 성분과 분리한다. 다만 잡음이 주기적이거나 통계적으로 유사한 경우 분리가 어려운 단점이 있다.

### 2.2.3. 신호 필터링 및 심박수 계산

모든 rPPG 추출 결과는 0.5~4.0 Hz 대역통과 필터(Bandpass Filter)를 거쳐 노이즈를 제거한다. 이후 심박수 계산은 세 가지 방식으로 수행된다:

- 푸리에 변환 기반 주파수 분석
- 웨이블릿 변환 기반 시간-주파수 도메인 분석
- 시간 도메인 피크 간 간격 측정 (Interbeat Interval)

### 2.2.4. 시각화 및 실시간 모니터링

심박 신호 및 깜빡임 횟수는 실시간으로 시각화되며, 분석 결과는 PNG 이미지 및 JSON 형식으로 저장되어 앱에서 결과 그래프로 시각화된다.

이러한 rPPG 기반 분석 시스템은 기존 연구들에서 제안된 알고리즘적 원리를 실제 면접 분석 상황에 맞게 구현한 것으로, 본 시스템은 비접촉 상태에서의 실시간 감정 인지 및 피드백 제공이 가능하도록 설계되었다. 이는 기존의 피트니스, 의료 중심의 rPPG 활용에서 한 걸음 더 나아가 **면접 및 커뮤니케이션 훈련 상황에 특화된 응용 사례**로 볼 수 있다.

## 2.3. 본 프로젝트의 차별점

본 프로젝트에서 개발한 플랫폼 **rMind**는 단순한 생체 신호 분석 도구를 넘어, 면접 상황에 특화된 비언어적 반응 분석 및 피드백 제공 시스템으로 설계되었다. rMind는 기존의 rPPG 기반 시스템들이 가진 구조적 한계를 보완하며, 다음과 같은 차별화된 기술적·기능적 특징을 갖는다.

### 2.3.1. 다중 비언어 신호 통합 분석

rMind는 기존의 rPPG 시스템이 주로 단일 생리 지표(심박수)에 국한되어 있는 것과 달리, **심박수, 눈 깜빡임 빈도, 얼굴 움직임**이라는 세 가지 주요 비언어적 반응을 동시에 분석한다. 이러한 통합적 접근은 면접자의 긴장도와 감정 반응을 다면적으로 측정할 수 있게 하며, 사용자에게 보다 풍부하고 신뢰도 높은 자기 피드백을 제공한다.

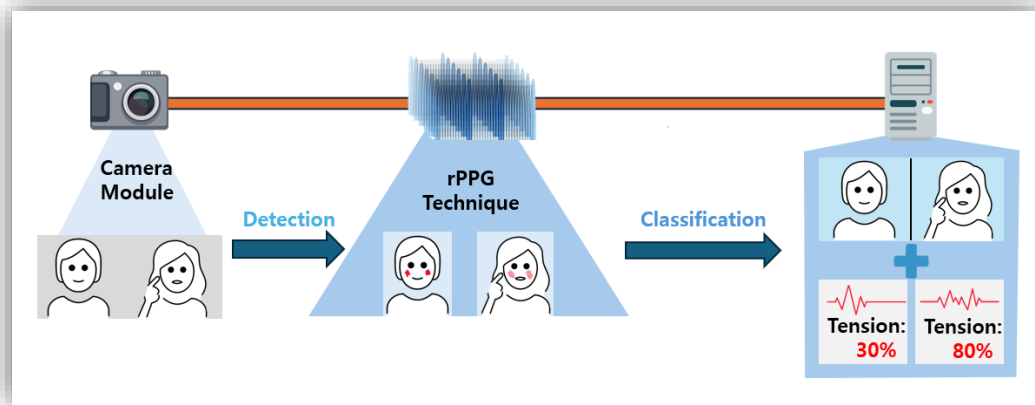


Fig 2. rPPG 기능 적용

### 2.3.2. 질문 구간 기반 반응 분석 기능

일반적인 심박 모니터링 시스템은 시간축 기반의 단순 변화 분석에 머무는 경우가 많다. 그러나 rMind는 면접 영상에서 특정 질문 구간별로 심박수 및 깜빡임 변화를 분석함으로써, 사용자가 어떤 질문에서 긴장 반응이 극대화되는지 명확하게 인식할 수 있도록 돕는다. 이는 기존 시스템과 비교하여 면접 실전 상황에 훨씬 밀착된 분석 구조이다.

### 2.3.3. POS 기반 rPPG 알고리즘의 실제 응용 최적화

rMind는 POS(Plane-Orthogonal-to-Skin) 알고리즘의 원리를 실제 면접 분석 응용에 맞게 구현 및 최적화하였다. 특히 조명 및 움직임에 대한 강건성,  $\alpha$ -tuning 기반 신호 정제, 슬라이딩 윈도우 기반 연속 분석 기능 등을 통해, 비접촉식임에도 불구하고 안정적이고 신뢰할 수 있는 심박 신호 추출이 가능하다.

### 2.3.4. 모바일 연동 FastAPI 기반 분석 파이프라인

본 시스템은 모바일 애플리케이션과 서버 분석 엔진 간의 효율적인 데이터 흐름을 구현하였다. 사용자는 rMind 앱을 통해 면접 영상을 업로드하고, FastAPI 기반 서버에서 분석된 결과를 실시간으로 받아볼 수 있다. 결과는 **시각화된 이미지(PNG)** 및 **JSON 응답 형태로 전송**되며, 앱 내에서 직관적인 UI를 통해 확인할 수 있어 일반 사용자도 손쉽게 자기 피드백을 받을 수 있는 구조를 갖춘다.

### 2.3.5. 로그인 기반의 개인화된 학습 및 피드백

rMind는 단발성 분석에 그치지 않고, 로그인 기반 사용자 데이터 관리를 통해 분석 결과의 저장, 비교, 개선 추이 추적이 가능하다. 사용자는 반복적인 영상 업로드를 통해 자신의 비언어적 반응이 어떻게 변화하는지를 확인할 수 있으며, 시스템은 이전 기록과 비교하여 맞춤형 개선 피드백을 자동으로 생성한다. 이는 rMind가 단순한 분석 도구가 아닌, **AI 기반의 자기주도형 면접 코칭 플랫폼**으로서 기능함을 보여주는 핵심 차별점이다.

### 3. 시스템 설계 및 구현

#### 3.1 전체 시스템 구조

본 연구에서는 사용자 면접 영상에서 비언어적 반응을 추출하여 긴장도 및 표현 습관을 분석하고 피드백을 제공하는 **rMind 플랫폼**을 제안한다. rMind는 **모바일 애플리케이션**과 **서버 기반 분석 시스템**으로 구성된 이중 구조를 채택하여, 사용자가 스마트폰을 통해 영상을 업로드하고 분석 결과를 앱 내에서 직관적으로 확인할 수 있도록 설계되었다.

전체 시스템은 다음의 세 가지 계층으로 구성된다.

##### 1. 사용자 인터페이스 계층 (Mobile Frontend)

사용자는 Android 기반 Flutter 앱을 통해 회원가입 및 로그인을 수행하며, 면접 영상을 업로드하고 분석 결과를 확인한다. 앱은 로그인 기반의 개인화 시스템을 포함하고 있으며, 사용자별 영상 업로드 이력 및 결과를 리스트 형태로 관리한다.

##### 2. 서버 분석 계층 (Backend & rPPG Processing Server)

FastAPI 프레임워크로 구축된 백엔드 서버는 업로드된 영상을 수신하여 **rPPG 기반 심박 신호 추출, 눈 깜빡임 감지, 얼굴 움직임 분석** 등 3가지 주요 분석을 수행한다. 분석 결과는 이미지 및 JSON 형태로 생성되어 결과 디렉토리에 저장되며, 이후 클라이언트 앱에서 접근 가능하다.

##### 3. 데이터 저장 및 결과 제공 계층 (Storage & Visualization)

영상 파일과 분석 결과는 로컬 디렉토리, 외부 저장소에 정리되며, 파일 경로와 메타데이터는 JSON 응답 형태로 반환된다. 사용자는 앱 내에서 해당 결과를 시각화 이미지(PNG) 형태로 확인할 수 있으며, 각 분석 항목별로 그래프와 수치 정보가 제공된다.

이러한 구조는 **비접촉식 심박 측정**이라는 기술적 난이도와 **면접 분석**이라는 실용적 목적을 동시에 충족시키기 위해 설계되었으며, 분석과 시각화가 분리된 구조를 통해 **유지보수성, 확장성, 실시간성**을 동시에 확보하였다.

#### 3.2 주요 모듈 및 기능 설명

rMind 시스템은 비접촉 면접 반응 분석이라는 목적을 달성하기 위해, 다음과 같은 다섯 개의 핵심 모듈로 구성되어 있다. 각 모듈은 사용자 인터페이스, 영상 업로드, 서버 분석, 결과 시각화, 데이터 저장의 기능적 흐름에 따라 상호 유기적으로 작동한다.



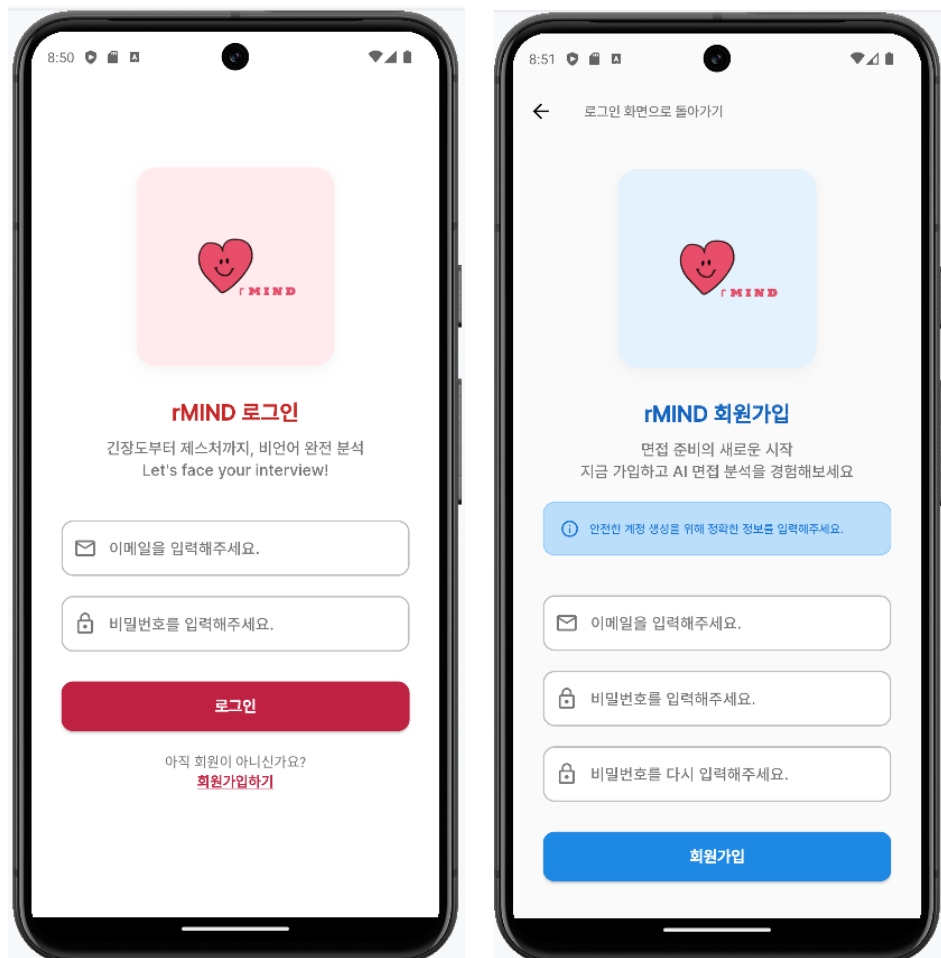


Fig 3. rMind 앱 로그인 화면 및 회원가입 화면

## 1) 사용자 인증 및 개인화 모듈

- **기능:** 회원가입, 로그인, 세션 관리, 사용자별 분석 결과 이력 저장
- **구현 방식:** Flutter 앱에서 이메일 기반 로그인 UI 구현 후, FastAPI 서버의 JWT 기반 인증 API와 연동
- **예외 처리:** 잘못된 형식, 중복 계정, 비밀번호 오류 등 다양한 입력 오류에 대한 예외 메시지 제공

이 모듈은 사용자별 데이터를 구분하고 반복 학습 및 피드백 기록을 추적하기 위한 기반을 형성한다.

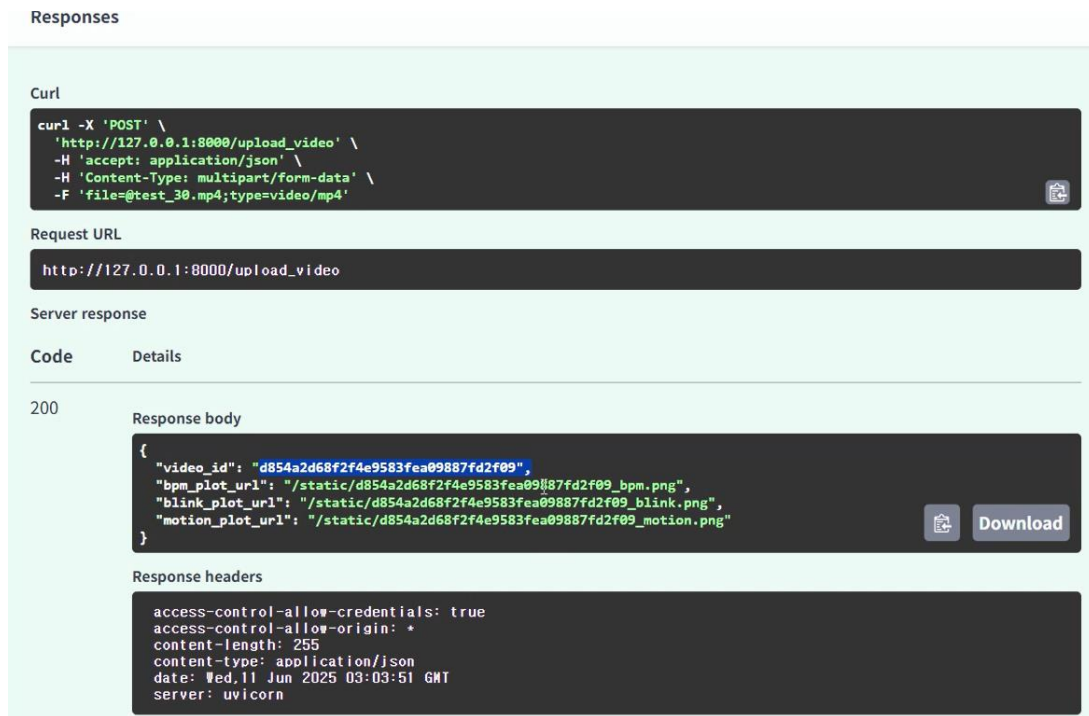


Fig 4. Swagger UI를 통한 실제 API 호출 결과 예시

## 2) 면접 영상 업로드 및 전송 모듈

- **기능:** 모바일 로컬 스토리지에 저장된 영상을 선택하여 서버로 전송
- **구현 방식:** Flutter 앱의 파일 선택 기능과 http 패키지를 사용하여 FastAPI의 `/upload_video` 엔드포인트로 POST 요청
- **서버 처리 흐름:** 수신된 영상은 서버 디렉토리에 저장되며, 해당 요청은 분석 파이프라인을 자동으로 트리거함

본 모듈은 분석의 입력 단계를 담당하며, 직관적 UI를 통해 사용자가 손쉽게 영상 업로드를 수행할 수 있도록 한다.

## 3) rPPG 기반 영상 분석 모듈

- **기능:** 업로드된 면접 영상에 대해 생체신호 및 행동 분석 수행
- **분석 항목:**
  - rPPG 기반 심박수 추정: CHROM, POS, ICA 알고리즘 적용
  - 눈 깜빡임 감지: dlib 68-point 랜드마크 기반 눈영역 추적
  - 얼굴 움직임 분석: 프레임 간 얼굴 중심점의 위치 변화량 기반

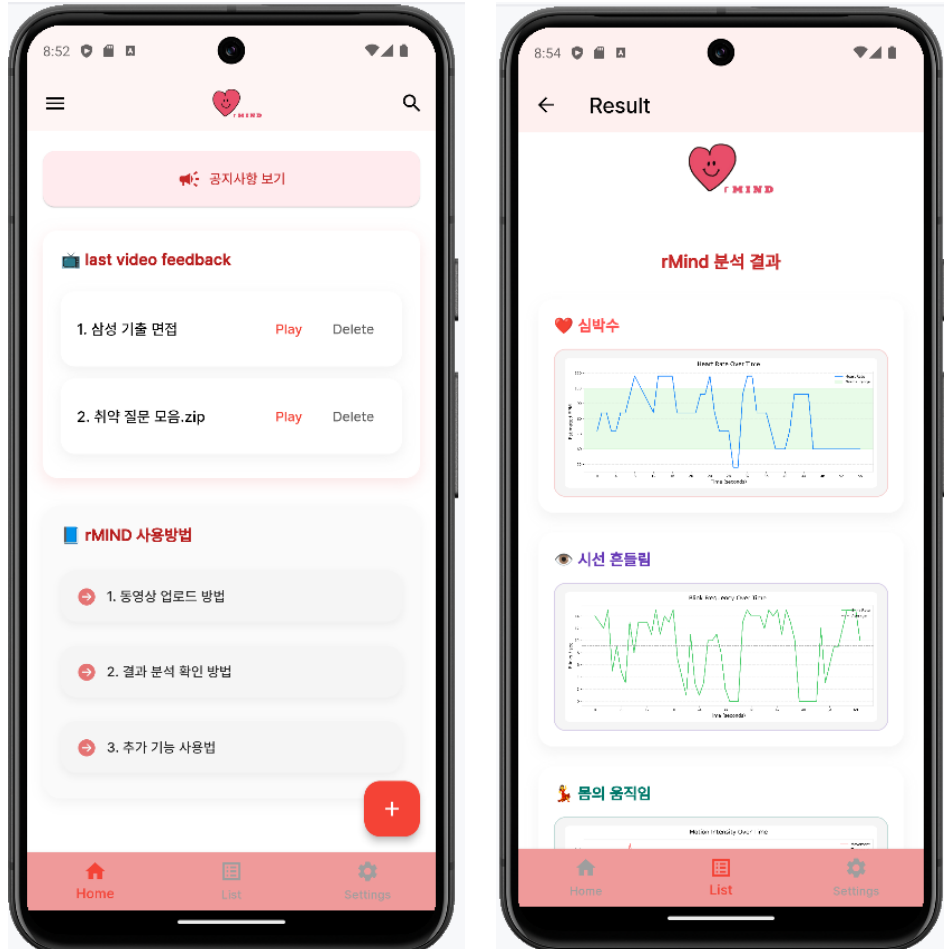


Fig 5. rMind 앱 메인 화면 및 분석 결과 화면

- **구현 흐름:** 분석은 BGR 평균값 추출 → 필터링 → 알고리즘 적용 → 신호 정제 → 시각화로 구성됨

이 모듈은 프로젝트의 핵심 기술 영역이며, 실제 면접자의 비언어적 반응을 수치화하여 정량적 피드백 기반을 제공한다.

#### 4) 결과 시각화 및 피드백 모듈

- **기능:** 심박 그래프, 깜빡임 빈도 그래프, 얼굴 움직임 곡선 등 시각적 정보 제공
- **출력 형식:** 각 분석 결과는 PNG 이미지로 저장되며, JSON 응답에는 해당 이미지 경로가 포함됨
- **앱 연동:** 분석 결과는 Flutter 앱의 결과 화면을 통해 사용자에게 직관적으로 제공됨

시각화 결과는 사용자의 이해를 돕고 반복 학습을 가능하게 하며, 자기 피드백 시스템의 핵심 도구로 기능한다.

## 5) 분석 결과 저장 및 관리 모듈

- **기능:** 분석된 결과의 영속적 저장, 파일 경로 기반 정리, 사용자별 접근 제어
- **데이터 흐름:** JSON 형태로 각 분석의 메타데이터(영상 ID, 결과 파일 경로, 시간 정보 등)를 구성하고, 앱은 이를 통해 결과 목록과 상세 화면을 구현함

본 모듈은 사용자 경험의 연속성과 신뢰성을 보장하는 백엔드 기반 구조이며, 향후 반복 비교 기능과 성과 추적 기능의 확장을 가능하게 한다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 실험 목적

본 절의 핵심 목적은, rMind 시스템의 핵심 기능인 **rPPG 기반 심박수 분석 기능의 반응 민감도와 변동 감지 정확성**을 검증하는 것이다. 실제 면접 환경에서는 긴장, 놀람, 이완 등의 다양한 심리 상태가 순간적으로 변화하며, 이는 생체 반응으로 나타나는 심박수(BPM)의 급변 형태로 반영된다.

하지만 실험실 환경에서는 이러한 자연스러운 심리적 반응을 유도하는 데 한계가 있으므로, 본 실험에서는 **의도적으로 특정 생리적 조건을 강제 유도**하여 다양한 심박수 변화 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오에 따라 피실험자의 행동이나 상태를 통제하고, 그에 따라 발생한 심박수 변화를 rMind 시스템이 얼마나 정확히 시각화하고 기록하는지를 확인하였다.

### 4.2 실험 설계 및 시나리오별 결과

#### 4.2.1 실험 A: 고심박 상태에서 점차 완화되는 유형

##### 실험 목적

이 실험은 rMind 시스템이 고심박 상태에서 점차 안정되는 생리 반응을 감지할 수 있는지를 확인하는 것을 목적으로 한다.

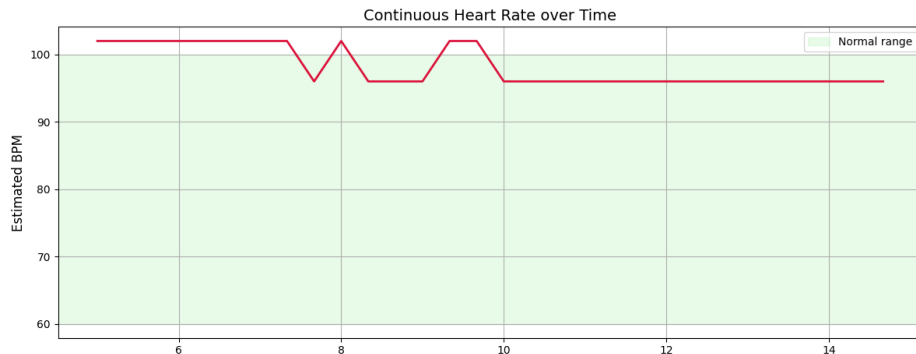
- **시나리오 설정 (면접 상황 가정)**

면접자는 시험장에 도착했을 때부터 높은 긴장 상태에 있었고, 면접 초반까지 긴장이 지속되었다. 그러나 질문 내용이 예상 가능한 범위였고, 초기 질문들이 자기소개나 학업 관련과 같이 자신 있는 주제였기 때문에 점차 긴장이 완화되었다. 이로 인해 심박수는 서서히 낮아지며 안정적인 수준으로 도달하였다.

- **실험 환경 설정 (생리 반응 유도 방식)**

피실험자는 면접 전 약 1분간 제자리 뒹뒹기 활동을 수행하였다. 이로 인해 착석

직후 높은 심박 상태에서 실험이 시작되었으며, 이후 정적인 자세로 면접을 진행하였다.



4.2.1) 실험 A에 대한 BPM 결과 그래프

### BPM 결과 및 해석

심박수는 초기 약 110bpm에서 시작되어 시간이 지나며 서서히 하강하였고, 약 90~95bpm 수준에서 안정적으로 유지되었다. 해당 실험을 통해 운동 후 안정화되는 심박수의 변화를 확인할 수 있었다.

### 4.2.2 실험 B: 안정 상태 → 중간에서 심박 급상승 후 고정 유지

#### 실험 목적

이 실험은 중간 시점에서 급격한 생리 반응이 유발되었을 때, 그 변화와 이후의 고정된 고 심박 상태를 측정할 수 있는지를 확인하고자 한다.

- 시나리오 설정 (면접 상황 가정)

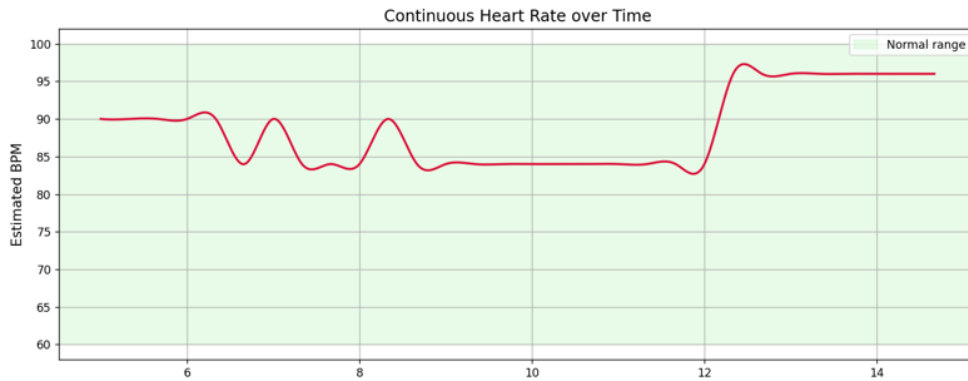
면접 초기에는 면접자가 평온한 상태로 자기소개 및 기본 질문에 차분히 응답하였다. 하지만 중반부에 접어들며 갑작스럽게 예상하지 못한 질문이 등장하였고, 이로 인해 면접자의 긴장도가 급격히 상승하였다. 이후에도 유사한 난도 또는 성격의 질문이 연이어 제시되면서, 높은 심박 상태가 면접 종료까지 지속되었다.

- 실험 환경 설정 (생리 반응 유도 방식)

피실험자는 착석 후 10초간은 정적인 상태에서 면접을 시작하였고, 이후 약 20초간 제자리 뒹뒹기를 수행하도록 하였다. 운동 직후 즉시 착석하여 면접을 이어가게 함으로써, 급격한 심박 상승과 그 후의 고심박 유지 상태를 유도하였다.

### BPM 결과 및 해석

심박수는 약 90bpm에서 시작하여 중간에 100bpm 이상으로 급격히 상승한 후, 종료 시점까지 높은 수준에서 유지되었다. 실험을 통해 중간 자극에 따른 급상승 및 고정된 고심박



4.2.2) 실험 B에 대한 BPM 결과 그래프

반응을 확인할 수 있었다.

#### 4.2.3 실험 C: 불규칙한 요동 후 안정화

##### 실험 목적

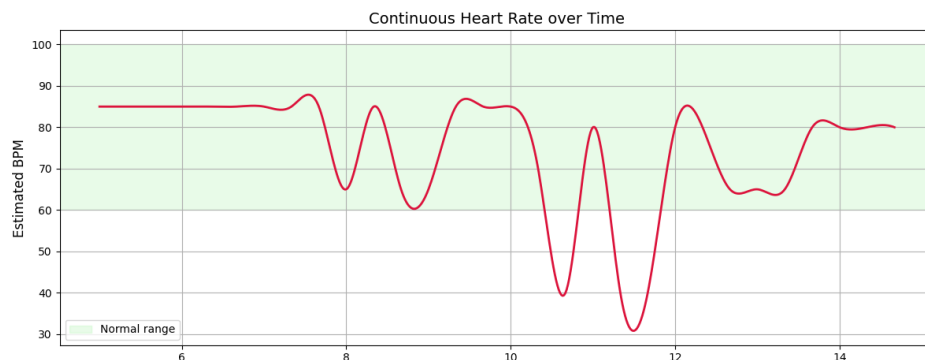
이 실험은 짧은 시간 동안 신체 움직임을 반복적으로 유도하여 비정상적인 심박수 요동을 발생시킨 후, 그 변화가 rMind 시스템에 의해 감지 및 시각화 가능한지를 확인한다.

- 시나리오 설정 (면접 상황 가정)

면접자가 신체적으로 매우 긴장하거나, 면접 중 불안한 자세를 반복하며 움직임이 많은 상황을 가정한 것이다. 자세를 자주 바꾸는 행동 등으로 인해 생체신호가 불안정하게 측정되는 상황에서 rPPG 분석이 어떻게 반응하는지를 관찰하고자 하였다.

- 실험 환경 설정 (생리 반응 유도 방식)

피실험자는 면접 응답 중 약 5초간 의도적으로 고개를 좌우로 흔들거나, 상체를 반복적으로 움직이게 하였다. 이후에는 다시 정자세로 착석하여 면접을 마무리하였다. 이처럼 신체 움직임이 심할 경우, 영상 프레임 상의 얼굴 영역 검출과 BGR 신호 평균값 계산에 영향을 주며, 심박 추정 신호 역시 심하게 요동칠 수 있다.



4.2.3) 실험 C에 대한 BPM 결과 그래프

## BPM 결과 및 해석

심박수는 약 85bpm에서 시작하여 이후 약 5초간 50~80bpm 구간에서 심한 진동 패턴을 보였다. 특히 얼굴이 영상 프레임에서 부분적으로 벗어나거나, 광량이 급변하는 시점에 심박 파형이 왜곡되었다. 이후 움직임이 멈춘 뒤에는 80bpm 내외로 다시 안정화되었다. 본 실험에서는 강한 신체 움직임이 rPPG 기반 측정에 영향을 주는 형태의 불규칙 변화를 유발할 수 있음을 확인하였다.

### 4.2.4 실험 D: 복수의 심박 피크 후 고정 유지

#### 실험 목적

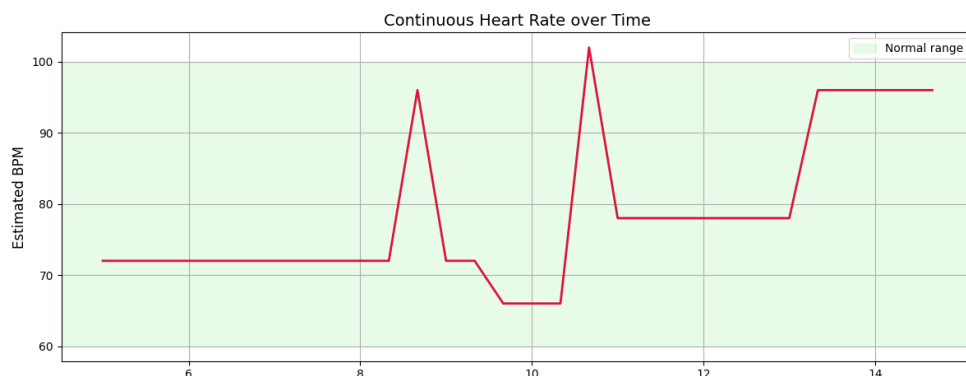
실험 중 복수의 급격한 심박 상승 구간을 거친 뒤 일정 수준에서 고정되는 패턴을 관측함으로써, rMind 시스템이 심박도의 급격한 변화를 명확하게 인식할 수 있는지 확인한다.

- 시나리오 설정 (면접 상황 가정)

면접자는 비교적 침착하게 면접을 시작하였고, 중반부에 첫 번째로 어려운 질문을 받으며 긴장 반응을 보였다. 이후 잠시 후, 두 번째로 어려운 질문을 받았을 때, 점점 긴장하는 상황이 지속되었다.

- 실험 환경 설정 (생리 반응 유도 방식)

피실험자는 초기에는 정적인 상태로 면접을 진행하다가 약 5초 간격으로, 피실험자를 제자리 뒹뒹기를 하고 있는 다른 피실험자의 얼굴로 2회 교체하였다.



4.2.4) 실험 D에 대한 BPM 결과 그래프

## BPM 결과 및 해석

실험 초반 약 70bpm에서 시작된 심박수는 첫 번째 피크에서는 제자리 뒹뒹기 중인 사용자 얼굴이 전환된 이후 100bpm까지 상승하였고, 두 번째 피크에서는 다시 얼굴이 전환되면서 110bpm까지 재차 상승하였다. 이후에는 약 95bpm 전후로 고정된 패턴을 보였다.

### 4.3 실험 종합 분석 및 고찰

본 장에서는 총 4가지 시나리오 기반 실험을 통해 rMind 시스템의 심박수 분석 기능을 종합적으로 검토하였다. 실험은 각기 다른 생리 반응 조건(긴장 완화, 급격한 상승, 불규칙 요동, 사용자 교체 등)을 반영하였으며, rPPG 기반 심박 분석 알고리즘의 반응성과 시각화 결과를 중심으로 고찰하였다.

#### 4.3.1. 분석 가능한 반응 패턴의 유형

실험 결과, rMind 시스템은 다음과 같은 다양한 반응 패턴을 식별할 수 있음을 확인하였다:

- **점진적 완화:** 고심박 상태에서 시작해 점차 안정되는 흐름을 rPPG 신호의 완만한 하강으로 시각화 가능함 (실험 A)
- **급격한 상승 및 유지:** 중간 자극 이후 급격히 심박수가 상승하고 일정 수준에서 유지되는 반응을 뚜렷하게 구분함 (실험 B)
- **불규칙 요동 후 안정화:** 짧은 시간 동안의 반복적인 신체 움직임으로 인한 요동성 반응도 포착되었으며, 이후 안정 구간으로의 전이를 시각적으로 확인할 수 있었음 (실험 C)
- **복수 피크 구간:** 복수 자극에 따라 단계적으로 상승하는 두 개의 피크를 구분하며, 사용자 교체와 같은 비정형 조건에서도 반응 곡선의 연속성이 유지됨 (실험 D)

이러한 실험을 통해 rMind의 rPPG 분석 모듈은 특정 지표 값(예: 평균 BPM)뿐만 아니라 시간에 따른 패턴 변화 자체를 해석 가능한 형태로 표현할 수 있음을 보여주었다.

#### 4.3.2. 고찰 및 유의점

본 실험을 통해 다양한 조건에서 rMind 시스템의 rPPG 기반 분석 성능을 관찰할 수 있었으나, 다음과 같은 기술적 유의사항이 함께 확인되었다:

##### 1. 카메라 화질 및 해상도 의존성

rPPG 분석의 핵심은 픽셀 단위의 미세한 피부 색 변화 감지에 기반하므로, 영상의 해상도와 압축률, 조명 조건 등에 따라 분석 품질이 크게 달라진다. 특히 모바일 기기의 전·후면 카메라 스펙 차이나 실내광 차이에 따른 성능 저하는 추가 검증이 필요하다.



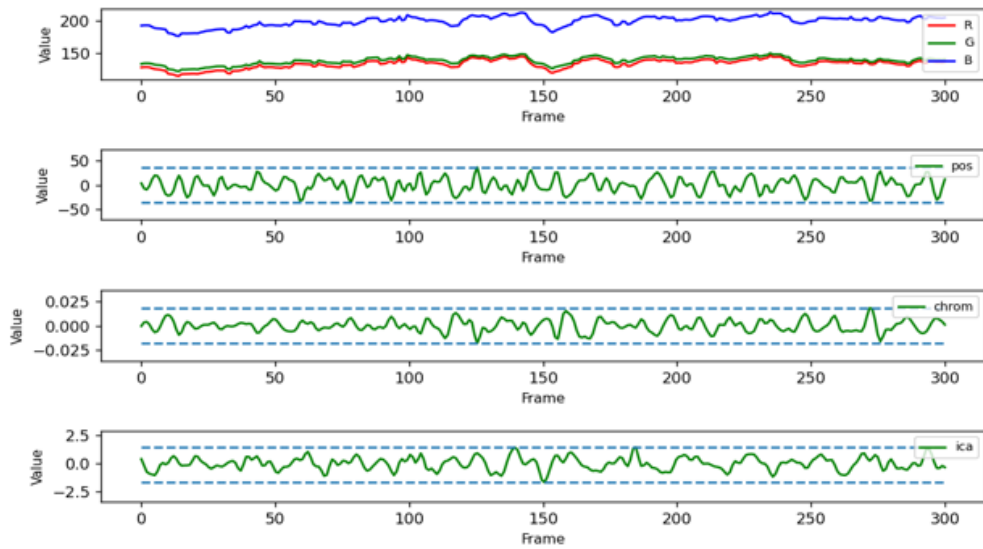


Fig 6. rPPG 기반 심박 추정 알고리즘 3종, 및 RGB 추출 데이터

## 2. 프레임 속도(Frame Rate)의 영향

심박수는 일반적으로 1초에 1회 이상의 변화를 포함하므로, 30fps 이하의 저프레임 환경에서는 신호 누락 또는 부정확한 주기 계산이 발생할 수 있다. 분석 정확도를 위해 일정 수준 이상의 프레임 확보가 필수적이다.

## 3. 피부 색상·톤에 따른 측정 편향 가능성

rPPG는 반사광의 색 변화에 의존하기 때문에, **피부 톤이 짙거나 메이크업, 조명 반사율** 등이 균일하지 않은 경우 정확도에 편차가 발생할 수 있다. 다양한 인종 및 환경에 대한 일반화 가능성 검토가 요구된다.

## 4. 시야 각도와 얼굴 정렬 상태의 영향

피실험자의 얼굴이 카메라 중심과 일치하지 않거나 고개를 돌리는 경우, 얼굴 ROI 영역이 불안정해져 BGR 평균값 계산에 오류가 발생한다. 실제 사용자 인터뷰에서는 정면 유지가 어려울 수 있으므로, **얼굴 각도 보정 알고리즘의 도입**이 바람직하다.

## 5. 빛 반사나 그림자에 의한 간섭

안경, 피부의 유분, 배경광 등으로 인해 얼굴 부위에 반사광이나 그림자가 발생하면 G채널 기반 신호 품질이 급격히 저하될 수 있다. 이는 특히 rPPG 알고리즘 중 CHROM, POS 방식에서 필터링이 어렵다.

## 6. 신호 후처리 미보정 구간 존재

현재 분석은 고정된 길이의 슬라이딩 윈도우와 필터링 기반으로 수행되며, **일시적인 신호 왜곡이나 외란 발생 시 그 영향을 보정 없이 그대로 시각화**하게 된다. 예외 구간에 대한 post-processing이 향후 필수적이다.

본 실험을 통해 rMind 시스템은 다양한 면접 상황에서 발생하는 심박수 변화 양상을 일정 수준 이상 민감하게 감지하고, 그 흐름을 시각적으로 표현할 수 있음을 확인하였다. 특히 급격한 상승, 점진적 안정화, 사용자 교체 등 비정형 상황에서도 분석은 일정한 연속성을 유지하였다.

그러나 동시에 몇 가지 기술적 제한점과 고려사항도 함께 드러났다. 우선, **신체 움직임이나 얼굴 정렬 상태**와 같이 얼굴 표면의 물리적 변화는 BGR 신호의 왜곡을 초래하여 심박 추정치의 정확도를 저하시킬 수 있었다. **반사광, 피부 톤 차이** 등 환경적 요인 역시 분석 결과에 영향을 주는 것으로 나타났으며, **프레임 속도나 해상도**와 같은 영상 품질 요소도 정밀한 신호 추출에 중요한 변수로 작용하였다.

향후에는 이러한 문제를 보완하기 위해, **rPPG 최신 기술들을** 더욱 알아보고, 추후 프로젝트에 적용하기 위한 기술적 개선이 필요할 것으로 보인다.

## 5. 프로젝트 성과 및 기여

### 5.1 주요 성과 요약

본 프로젝트는 비접촉 방식의 생체신호 기반 면접 반응 분석 모바일 플랫폼인 rMind를 구현함으로써, 심박수 추정, 눈 깜빡임 분석, 신체 움직임 감지 등 **비언어적 신호 기반의 인터뷰 반응 모니터링 기술**을 통합적으로 실현하였다. 핵심 성과는 다음과 같다:

- rPPG 기반 심박 추정 알고리즘 3종(CHROM, POS, ICA)의 구현 및 비교 실험 수행
- 심박 신호로부터 FFT, 웨이블릿, 피크 간 간격 기반의 BPM 추정 알고리즘 적용 및 시각화
- FastAPI 기반 분석 서버 구축과 Flutter 기반 모바일 앱 간의 실시간 연동 구조 설계
- 앱 내에서 영상 업로드, 분석 요청, 결과 조회까지 이어지는 **종단 간 사용자 흐름 (End-to-End UX)** 구현
- 다양한 면접 상황 시나리오를 구성한 **생리 반응 실험 설계 및 분석 검증**

특히 본 시스템은 단순한 생체 측정에 그치지 않고, 실제 면접 응답 흐름 속에서의 생리적 반응 변화를 시계열로 시각화함으로써 **사용자의 긴장도 추이와 비언어적 상태를 기술적으로 반영할 수 있는 기반**을 마련하였다.

## 5.2 팀의 기여 및 역할 분담

- **김민중** - Project Lead & Full-stack Developer  
전체 시스템 아키텍처 설계, 서버-클라이언트 통신 구현, rPPG 신호처리 알고리즘 개발, 실험 설계 및 최종 리포트 작성.
- **서범석** - UI Engineer & Motion Analysis Contributor  
Flutter 기반 UI 디자인 및 화면 구성 병합, 모션 인식 기능 개발, 실험 시나리오 기획 및 피실험자 참여, 실험 리포트 작성.
- **조수한** - UI Developer  
Flutter 기반 앱 인터페이스 설계 및 화면 레이아웃 제작 참여

## 6. 결론 및 향후 연구

### 6.1 프로젝트 결론

본 프로젝트는 비접촉 방식의 생리 신호 측정 기술인 rPPG(remote photoplethysmography)를 활용하여, 모바일 환경에서 사용자의 면접 반응을 분석할 수 있는 플랫폼 'rMind'를 설계하고 구현하였다.

심박수, 눈 깜빡임, 신체 움직임이라는 **세 가지 비언어적 반응 요소**를 영상 기반으로 추출하고, 이를 시각적으로 가공하여 사용자가 자신의 상태를 직관적으로 이해할 수 있도록 지원하였다.

Flutter 기반의 앱과 FastAPI 기반 서버를 연동하여 영상 업로드부터 분석 결과 확인까지의 전 과정을 구현하였으며, 다양한 실험 시나리오를 설계하여 분석 기능의 반응성과 한계를 검증하였다.

실험을 통해 rPPG 분석의 민감성과 패턴 인식 가능성을 확인하였고, 동시에 실제 환경에서 발생 가능한 기술적 제약 사항도 함께 도출하였다.

이번 프로젝트는 단순히 기능 구현을 넘어, **생리 신호 기반 정량 분석이 개인의 비언어적 표현 해석에 어떻게 활용될 수 있는지에** 대한 실험적 가능성을 제시한 데 의의가 있다.

### 6.2 향후 발전 방향 및 기대 효과

본 시스템은 아직 초기 단계의 프로토타입이며, 실사용을 위한 보완 및 확장이 필요하다. 향후에는 다음과 같은 방향으로 기능적·기술적 고도화가 이루어질 수 있다:

- **개인 맞춤형 피드백 시스템 추가 도입:**  
단순한 수치 시각화 외에, 긴장 변화 패턴에 따른 코칭 메시지 또는 영상별 분석 리포트, 이용자 최다 긴장 질문 등을 제공하는 기능 확장
- **멀티페이스 인식 및 사용자 식별 기능:**  
사용자 교체나 다중 인물 등장 상황에서도 분석 단위를 유지하고 결과를 분리할 수 있도록 사용자 추적 알고리즘 적용
- **모바일 분석 경량화 및 실시간 스트리밍 도입:**  
서버 의존도를 줄이고, 로컬 장치에서 실시간 분석이 가능하도록 모델을 경량화하고 연산 최적화를 진행
- **추가 생리 신호 분석 연계:**  
rPPG 외에도 안면 표정 인식, 음성 억양 분석 등 다양한 멀티모달 반응 분석 기능을 추가하여, 더욱 정교한 면접 반응 평가 시스템으로 확장
- **실제 면접 코칭 플랫폼 연동:**  
취업 준비생이나 대학 커리어센터와 같은 실제 사용 환경에 연계하여, 사용자 피드백 기반 고도화와 실질적인 실용성 확보

본 프로젝트는 영상 기반 생리신호 분석 기술을 실시간 면접 응답 분석이라는 새로운 활용 시나리오로 확장했다는 점에서 의미를 가지며, 향후 연구와 응용 개발을 위한 유효한 출발점으로 작용할 수 있을 것이다.

## Appendix

### GitHub Repository :

본 프로젝트의 전체 소스코드, 아래 GitHub 저장소에서 확인할 수 있습니다.

<https://github.com/eggplantgf/rMind>