

좋습니다. 스쿼트 자세 분석 및 실시간 교정 피드백 시스템 개발을 위한 심화 리서치를 시작하겠습니다.

다음과 같은 내용을 포함하여 약 60,000자 분량의 마크다운 보고서를 준비할 예정입니다:

- 실시간 자세 디렉팅의 중요성과 물리치료학적 의의
- 척추, 골반, 무릎, 발목의 자세 교정 기준 및 의학적/운동역학적 근거
- 실제 물리치료 현장에서 사용하는 교정 지시 문구 및 설계 기준
- 관절 위치 기반 실시간 오류 판단 기준 및 AI 모델에 적합한 교정 포인트 구성
- 대상자 유형별(초보자, 노약자 등) 디렉팅 기준 차이

모든 내용은 한국어로 작성되며, 고전 문헌과 최신 연구 자료를 모두 참고하고, 생체역학 및 운동역학 관련 문헌도 포함하여 분석하겠습니다. 결과가 준비되면 바로 알려드릴게요.

AI 기반 스쿼트 자세 분석 및 실시간 교정 피드백 시스템: 심층 연구

1. 스쿼트 수행 시 실시간 자세 디렉팅의 중요성

스쿼트에서 즉각적 피드백의 역할: 스쿼트는 하체 근력과 운동 수행 능력을 향상시키는 대표적인 복합 관절운동이다. 하지만 바른 자세로 수행하지 않으면 무릎, 허리 등에 부담을 주어 부상의 위험이 높아진다. **실시간 자세 디렉팅**, 즉 운동 동작 중에 바로바로 제공되는 피드백은 이러한 잘못된 자세를 즉각 교정함으로써 운동 효과를 극대화하고 부상 위험을 최소화하는 데 중요한 역할을 한다. 전문 ([The effects of technological and traditional feedback on back squat performance in untrained women | BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation | Full Text](#))동하는 경우, 자신의 자세 오류를 인지하기 어려워 미세한 잘못된 습관이 누적될 수 있다. 이때 **AI 기반 실시간 피드백 시스템**은 **센서나 카메라 기반 자세 추적**을 통해 사용자의 관절 움직임을 모니터링하고, 잘못된 정렬이 감지되면 즉각적인 교정 지시를 내려준다. 이는 마치 옆에 퍼스널 트레이너나 물리치료사가 실시간으로 지켜보며 “무릎이 안쪽으로 모입니다. 조금 벌려보세요”와 같이 바로 지적해주는 효과를 낸다.

운동 효과 측면의 이점: 실시간 피드백은 운동 수행 능력을 향상시키는 데 큰 도움이 된다. 연구에 따르면, **정량화된 실시간 피드백**을 받은 운동 그룹은 전통적 피드백을 받은 그룹보다 운동 수행 향상이 더 뚜렷하게 나타났다. 예를 들어, 보트 조정 훈련 연구에서 시각적 실시간 피드백을 추가 제공하자 **스트로크 정확도가 65% 향상**되었다는 보고가 있다. 스쿼트 운동에서도, 한 연구는 각 반복마다 **속도 정보를 실시간 제공**했을 때 스쿼트 수행 능력이 향상되었다고 밝혔는데, 이는 운동 중 실시간으로 ****자신의 수행 지표**

(예: 속도, 관절 각도)**를 확인하고 조절할 수 있기 때문이다. 이러한 즉각적 정보 제공은 사용자가 **올바른 근육 동원 패턴**을 학습하도록 도와주며, 운동 수행의 정확성과 효율을 높여준다. 또한 즉각적인 교정으로 인해 잘못된 자세로 인한 **에너지 누출**이나 **과도한 특정 근육 사용**을 방지하여, 목표 근육에 보다 효과적으로 자극을 줄 수 있다. 예를 들어, **무릎이 안쪽으로 모이는 오류를 즉시 교정**하면 대퇴사두근과 둔근이 균형 있게 사용되어 스쿼트의 근력 강화 효과가 높아진다.

부상 예방 및 안전성 측면: 무엇보다 실시간 피드백의 가장 큰 가치 중 하나는 **운동 중 부상 예방**이다. 스쿼트 동작은 허리(요추)와 무릎에 높은 부담을 줄 수 있는데, 잘못된 정렬 상태가 반복되면 만성 손상으로 이어질 수 있다. **즉각적 피드백**은 이러한 잘못된 움직임을 **즉시 식별하고 수정**하여 위험을 줄여준다. 실제 임상 연구에서도 **실시간 시각 피드백**을 제공했을 때 무릎 앞쪽에 통증이 있는 환자의 스쿼트 동작에서 ** ([Feedback in Motor Learning | Motor Learning and Control Class Notes](#)) 힘이 유의하게 감소**한 것으로 나타났다. 이는 환자에게 실시간으로 무릎 정렬이나 자세 교정을 알려줌 ([Feedback in Motor Learning | Motor Learning and Control Class Notes](#))으로 인한 **관절 압력**을 줄였기 때문이다. 즉, 사용자가 **위험한 자세에 빠르게 인지**하고 **자세를 고치도록 유도**함으로써, 인대나 연골에 가해지는 **스트레스 누적을 방지**한다. 뉴욕재활병원(NYDN)의 보고에 따르면, **실시간 정량 피드백**은 기존의 사후 피드백보다 스포츠 수행자의 **부상 위험 요소**(예: 무릎 가중 부하, 잘못된 착지 자세 등)를 더 효과적으로 개선하는 것으로 나타났다. 이는 실시간 피드백을 통해 운동 선수가 **움직임을 수행하는 순간에 올바른 자세**를 취하도록 해주기 때문에, 잘못된 움직임 패턴이 반복되기 전에 차단되는 것이다. 종합하면, 스쿼트 같은 고부하 운동에서 실시간 교정은 **“오류-수정” 사이클을 즉각적으로 수행**하게 하여 부상의 싹을 미리 잘라내는 역할을 한다.

동기 부여와 심리적 효과: 실시간 피드백은 단순히 육체적 측면뿐 아니라 **심리적 측면**에서도 긍정적 효과가 있다. 즉각적인 교정 신호나 칭찬 신호는 사용자로 하여금 **바로바로 성취감을 느끼게** 하거나 잘못을 인지하게 해주어 **학습 동기를 높인다**. 예를 들어, **실시간으로 “좋습니다! 방금 자세가 정확해졌어요.”**와 같은 긍정 피드백을 받으면 사용자는 자신감과 재미를 느끼며 계속 올바른 자세를 유지하려 노력하게 된다. 반대로 잘못된 경우에도 곧바로 **“무릎이 안쪽으로 모 들으면, 사용자는 스스로 인지하지 못했던 오류를 깨닫고 곧장 수정**할 수 있다. 이러한 즉각적 보상과 수정 과정은 운동 학습 이론에서도 중요한데, 초기 학습자에게는 수행 직후의 피드백이 옳은 동작 패턴을 빠르게 체득하는데 도움이 된다고 알려져 있다 ([The effects of technological and traditional feedback on back squat performance in untrained women | BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation | Full Text](#)) ([The effects of technological and traditional feedback on back squat performance in untrained women | BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation | Full Text](#))공 경험은 재활 참여도와 자신감 향상으로 이어져 결과적으로

재활 효율을 높일 수 있다. 실시간 피드백 시스템은 이러한 장점을 활용하여 사용자가 **지속적으로 올바른 자세로 운동하도록 동기를 부여**하고, 올바른 동작 패턴을 습관화하도록 돕는다.

즉각적 피드백의 정의와 재활 의의: 운동 과학 및 재활 분야에서 피드백은 제공 시점에 따라 ****실시간 피드백(real-time feedback)****과 ****즉각적 피드백(immediate feedback)****으로 구분되곤 한다. 실시간 피드백은 말 그대로 **동작이 이루어지는 순간 동시에 제공되는 피드백**을 뜻하며, 예를 들어 **동작 중 화면에 관절 각도가 실시간 표시되거나 센서 알람이 울리는 경우**가 해당된다. 반면 즉각적 피드백은 **한 동작 또는 세트가 끝나자마자 바로 주어지는 정보**를 말하는데, 예를 들어 한 번 스쿼트를 완료하고 일어서자마자 듣는 트레이너의 코멘트나 모니터에 표시되는 평가 점수가 이에 해당한다. 일반 대화에서는 두 용어가 혼용되기도 하지만, 재활 맥락에서는 대개 **운동 수행 도중 주어지는 피드백**을 강조하는 경우 실시간 피드백이라 칭한다. 본 연구 및 시스템 개발 맥락에서도, 카메라/센서가 운동 중 사용자의 자세를 분석하여 **동시에 교정 지시를 내리는 경우**를 주로 다룰 것이므로 이를 **실시간 즉각 피드백**으로 통칭한다.

재활의 관점에서, 이러한 **실시간/즉각적 피드백**은 환 ([Squatting Exercises in Older Adults: Kinematic and Kinetic Comparisons - PMC](#)) ([Squatting Exercises in Older Adults: Kinematic and Kinetic Comparisons - PMC](#))한다. 예를 들어 **뇌졸중 환자나 신경계 손상 환자가** 올바른 보행이나 스쿼트 패턴을 다시 배우는 경우, 자신의 움직임에 대한 즉각적인 교정 신호는 ****신경 가소성** ([Squatting Exercises in Older Adults: Kinematic and Kinetic Comparisons - PMC](#)) ([Squatting Exercises in Older Adults: Kinematic and Kinetic Comparisons - PMC](#)) 데 도움이 된다. 실시간 피드백은 일종의 ****바이오피드백(biofeedback)****으로 볼 수 있는데, 근전도 바이오피드백이나 균형 바이오피드백이 환자의 재활에 혁신적 효과를 준다는 연구들이 이를 뒷받침한다. 즉, 환자가 **자신의 움직임 오류를 감각적으로 확인**함으로써(예: 스쿼트 시 무게중심이 치우치면 경고음 발생), 스스로 움직임을 수정하는 능력이 향상되고 결과적으로 **치료 효율과 독립적인 운동 수행능력**이 증진된다. Mayo Clinic 재활 연구에서도 **즉각적인 보행 속도 피드백**을 제공하자 환자들의 보행 능력이 통계적으로 유의미하게 개선되었다고 보고한 바 있다. 이처럼 즉각적 피드백은 재활치료사와 환자 모두에게 **즉각적인 상태 정보를 공유**하게 해 주며, 치료사는 바로 중재를 조정하고 환자는 잘못을 바로잡아 **치료 과정을 최적화**할 수 있다. 요약하면, 스쿼트 실시간 자세 교정 시스템은 운동학습과 재활의 원리가 응용된 기술로서, 운동 효과를 높이고 부상을 예방하며, 운동 패턴 재학습을 촉진하는 **과학적 근거에 기반한 핵심 도구**이다.

2. 신체 부위별 스쿼트 자세 교정 기준 및 과학적 근거

스쿼트 자세를 교정하기 위해서는 각 신체 부위별로 **이상적인 정렬 상태와 허용 범위**를

이해하고, 이에 벗어났을 때 발생하는 문제점을 파악해야 한다. 본 장에서는 척추, 골반, 무릎, 발목의 네 부위에 대해 올바른 자세 기준과 잘못된 정렬 시 생체역학적 문제, 그리고 그 교정 필요성 및 근거를 살펴본다.

2.1 척추 정렬: 측면에서 본 중립 척추의 유지

중립 척추(neutral spine)의 정의: 중립 척추란 경추와 흉추는 약간의 전만(curve inward) ([Squatting Exercises in Older Adults: Kinematic and Kinetic Comparisons - PMC](#))는 후만(curve outward), 요추는 전만 곡선을 이루는, 자연스러운 S자 만곡 ([Squatting Exercises in Older Adults: Kinematic and Kinetic Comparisons - PMC](#)) 상태를 말한다. 쉽게 말해 ****과도한 굽음(rounded back)****도 없고 ****과도한 휨(과신전)****도 없는 상태로, 척추뼈들이 **정상 생리 curvatures** 안에서 배열되어 있는 것이다. 스쿼트를 할 때 옆에서 보았을 때 이 중립 상태를 유지하는 것이 핵심이다. **척추 중립을 유지한다**는 것은 특히 요추 부위에서 **과도** ([The Role of Real-Time Feedback in Modern Rehabilitation](#)) 일어나지 않는 것을 의미한다. 예를 들어 스쿼트 하강 시 허리가 눈에 띄게 둥글어지거나(고양이 등처럼) 혹은 반대로 과도하게 꺾여서 엉덩이가 심하게 뒤로 빠지고 배가 과하게 앞으로 나오는 모습이 보이면, 이는 중립을 벗어난 것이다. 옆모습 기준으로 **귓볼-어깨-고관절-무릎-발목**이 대체로 일직선에 가깝게 정렬되는 것이 올바른 척추 자세의 지표가 될 수 있다. 특히 ****요추의 전만(curve)****은 완전히 편평해지거나 극단적으로 과전만되지 않고 **자연스러운 곡률을 유지**해야 한다.

척추 중립 유지의 중요성: 척추는 인체의 **중양 기둥**으로서, 스쿼트 동작 시 상체와 하중을 지지하는 역할을 한다. 중립 상태일 때는 추간판(디스크), 인대, 근육에 고르게 힘이 분산되지만, 등을 굽히거나(**rounding**) 허리를 지나치게 젖히면(**hyperextension**) 특정 구조에 과부하가 걸리게 된다. 예를 들어, **요추가 굽는 경우(후방 경사)** 앞쪽 추간판이 압박되어 디스크 후측부가 돌출할 위험이 있고, 척추 후면의 인대와 근육에 과 ([Muscle activation in the lower limb muscles in individuals with dynamic knee valgus during single-leg and overhead squats: a meta-analysis study | BMC Musculoskeletal Disorders | Full Text](#)) ([Muscle activation in the lower limb muscles in individuals with dynamic knee valgus during single-leg and overhead squats: a meta-analysis study | BMC Musculoskeletal Disorders | Full Text](#))24-L132】. 실제 Athletico 물리치료 보고에 따르면, 스쿼트 중 흔히 나타나는 오류인 ****과도한 후방 경사(일** ([A Biomechanical Exploration of Sex Differences in the Back Squats Until Failure - Journal of Science and Medicine in Sport](#))utt wink))******는 **요추의 과도한 굴곡**을 초래하여 **허리 구조물에 압력**을 증가시킨다고 한다. 이러한 자세가 반복되면 디스크나 후방 인대에 스트레스가 누적되어 요통이나 디스크 병변으로 발전할 수 있다. 반대로 ****허리를 심하게 젖히는 경우(전방 경사 심화)****에는 후방 척추관절(후관절)에 압박이 증가하고, 척추 기립근 등에 불균형한 긴장이

가해져 허리 통증의 원인이 될 수 있다. 따라서, **척추를 중립으로 곧게 세우고(core를 잡아 안정화)** 유지하는 것은 스쿼트 수행 시 허리 부상을 예방하는 데 필수적이다. *****척추 중립이 곧 허리 보호*****라는 말이 있듯, 허리가 굽지 않도록 가슴을 펴고 복근에 힘을 주는 것은 올바른 스쿼트의 기본 요건이다. 한 스포츠의학 가이드에 따르면, 스쿼트 중 **척추의 전만-후만 각도가 중립 범위 내(약 $\pm 2 \sim 3$ 도 이내 변동)**로 유지되어야 하며, **요추 굴곡이 시각적으로 뚜렷하게 보일 정도로 발생하면 잘못된 자세로 간주한다.** 요컨대 측면 관찰 시 **등이 평평하고 자연스러운 곡선을 유지하면서 내려갔다 올라오는 것**이 스쿼트 척추 정렬의 이상적인 모습이다.

잘못된 척추 정렬(라운드 등/과신전)의 문제점: 척추 정렬이 무너지면 다양한 문제로 이어진다. **(1) 에너지 전달의 비효율:** 상체의 힘이 하체로 효율적으로 전달되지 못해 들인 힘 대비 운동 효과가 떨어진다. 척추가 굽으면 몸이 앞으로 쏠리면서 **고관절과 무릎에 불필요한 부담**이 늘고, 올라올 때 **허리 근육에 과도한 노력**이 요구된다. **(2) 허리 부상 위험:** 앞서 언급했듯 척추 굴곡 상태에서 중량이 실리면 추간판 후방으로 내용물이 밀려나와 **디스크 탈출** 위험이 높아진다. 실제 역도나 스쿼트 동작에서 **요추 부상 사례**의 상당 부분이 ****둔근** ([Muscle activation in the lower limb muscles in individuals with dynamic knee valgus during single-leg and overhead squats: a meta-analysis study | BMC Musculoskeletal Disorders | Full Text](#))런있다. **(3) 자세 연쇄 영향:** 척추가 구부정하면 상체가 숙여져 시선이 떨어지고, 이는 균형을 무너뜨려 **발뒤꿈치 들림**이나 **무릎의 전방 이동**을 초래하는 등 다른 부위 자세에도 악영향을 ([A Biomechanical Exploration of Sex Differences in the Back Squats Until Failure - Journal of Science and Medicine in Sport](#))를 과하게 젖히면 골반 전방경사가 심해져 **고관절 가동범위 제한** 및 **무릎 위치 불안정**으로 이어질 수 있다.

척추 자세 교정의 기준: 실시간 시스템은 **측면 영상의 척추 각도**로 척추 정렬을 판단할 수 있다. 예를 들어, ****몸통과 골반의 상대각(요추 만곡 각도)****을 측정하여 **중립 대비 변화량**이 일정 범위 이상이면 오류로 간주한다. 일반적으로 **서있는 중립 자세 대비 허리가 5도 이상 굽혀지거나 펼쳐지면** 눈에 띄는 변화로 판단할 수 있다. Athletico 등의 지침에서는 **얕은 스쿼트 범위에서도 허리가 굽는다면** 이는 코어 약화나 유연성 부족으로 인한 **비정상 패턴**으로 간주하고 교정하도록 권고한다. 특히 **의도하지 않은 '버트 윈크'** 현상은 피해야 한다. 버트 윈크란 스쿼트 가장 아래 지점에서 **골반이 후방 경사되어 엉덩이가 아래로 말리는 현상**으로, 이때 요추가 굴곡되어 척추 중립이 깨진다. 일반적으로 **유연성이 매우 좋은 사람이 깊은 스쿼트를 할 때 약간 발생하는 것은 허용**되기도 하지만, 초보자나 가동성이 부족한 사람이 **평행스쿼트 수준에서도 버트윈크가 발생한다면** 이는 개선이 필요하다. 교정 기준으로는 *****운동 범위를 줄여서라도 척추 중립 범위 유지*****를 원칙으로 삼는다. 즉, 만약 사용자가 깊이 내려가려다 허리가 둥글어지기 시작하면 그 직전까지만 내려가는 범위로 제한하여 연습하 ([A Biomechanical Review of the Squat](#)

[Exercise: Implications for Clinical Practice - PMC](#)) 코어 근육 강화 및 햄스트링/둔부 스트레칭을 병행하여, 추후에는 더 깊이 내려가도 척추 중립을 지킬 수 있도록 유도한다.

시스템은 **자세 오류 판단 시** “허리가 둥글어지고 있습니다. 가슴을 펴고 척추를 세워주세요”와 같은 디렉션을 줄 수 있다. 이러한 지시는 **흉추를 신전시켜** 상체를 세우고, ****복근과 척** ([A Biomechanical Review of the Squat Exercise: Implications for Clinical Practice - PMC](#)) ([A Biomechanical Review of the Squat Exercise: Implications for Clinical Practice - PMC](#))하라는 의미다. 필요하다면 “현재 허리가 굽어있습니다. 내려가는 ([A Biomechanical Review of the Squat Exercise: Implications for Clinical Practice - PMC](#))럼 깊이 조절까지 함께 안내할 수 있다. 요약하면, 척추 부위 교정의 과학적 근거는 **요추의 안전성 확보와 효율적 힘 전달**이며, 교정 기준은 **측면에서 요추 만곡의 변형을 최소화**하는 것이다.

2.2 골반 기울기: 전방경사/후방경사의 문제와 교정

골반 전방경사/후방경사의 정의: 골반은 척추의 기저부로서, **중립 골반**이란 ASIS(앞엉덩뼈능선)와 PSIS(뒤엉덩뼈능선)이 수평면에서 거의 같거나 약간 기울어진 정상 위치를 말한다. ****골반 전방경사(Anterior Pelvic Tilt)****는 골반이 앞으로 기울어져 ASIS가 PSIS보다 아래로 내려간 상태, 흔히 말해 **허리가 과도하게 아치형으로 휘고 엉덩이가 뒤로 빠진 자세**이다. 반대로 ****골반 후방경사(Posterior Pelvic Tilt)****는 골반이 뒤쪽으로 기울어져 ASIS가 PSIS보다 위로 올라간 상태, 즉 **꼬리뼈가 아래로 말려들어가는 자세**를 말한다. 스쿼트 동작 중에는 내려가면서 골반 각도가 변하는데, 이상적으로는 내려가는 동안에도 **허리가 중립을 유지하도록 골반 기울기 변화가 최소화**되는 것이 좋다. 그러나 실제로는 가동성 한계 등으로 내려갈수록 골반이 약간 후방경사(버트 윙크)되는 경향이 있고, 올라올 때 다시 전방경사로 돌아온다. 중요한 것은 그 경사 범위가 과도하지 않고 통제되는 것이다.

골반 경사 이상과 문제점: **골반 전방경사 과도** – 골반이 과하게 앞으로 기울어지면 요추 전만이 심해져 **허리가 지나치게 꺾인 자세**가 된다. 이런 상태에서는 척추 후방의 ****면관절(후관절)****에 압력이 높아져 만성 요통의 원인이 될 수 있고, 복근은 과신장되고 둔근과 햄스트링은 상대적으로 긴장이 증가하거나 약화되어 **근육 불균형**이 생긴다. 게다가 골반이 전방으로 기울면 고관절 굴곡각이 상대적으로 줄어들어 **스쿼트 깊이를 방해**할 수 있다. 즉, 엉덩이가 뒤로 빠진 채로 내려가면 하체를 충분히 낮추기 어려워져 **피동적 가동성 한계**에 빨리 도달한다. 또한 상체가 앞으로 기울기 쉽고, 무게중심이 뒤로 쏠려 균형을 잃을 위험도 있다.

반대로 **골반 후방경사 과도** – 내려갈 때 골반이 지나치게 뒤로 말리면 곧바 ([Why Visual Biofeedback is a Game Changer in Rehabilitation ...](#)) ([The Role of Real-Time Feedback in Modern Rehabilitation](#))어진다. 이는 앞서 본 것처럼 디스크와 인대에 부담을 주어 허리

에 해롭다. 특히 **최하위 지점에서 골반이 갑자기 후방경사**되면, 내려갈 때와 올라올 때 척추 각도가 급변하면서 **흉요추 이음부에 스트레스**를 준다. 또한 둔근과 햄스트링이 일찍 신장되어 장력이 생기므로 더 이상 깊게 못 내려가게 되고, 무릎 굴곡이 충분치 않은 상태에서 운동 범위가 제한될 수 있다. 한 연구에서 스쿼트 깊이에 따른 골반 경사를 측정했는데, **부분 범위(약 90° 무릎)** ([A Biomechanical Review of the Squat Exercise: Implications for Clinical Practice - PMC](#)) ([A Biomechanical Review of the Squat Exercise: Implications for Clinical Practice - PMC](#)) 경사, ****풀 스쿼트(약 140° 무릎 굽힘)****에서는 **-21°의 후방경사**가 발생했다고 보고했다. 이는 깊은 스쿼트에서는 어느 정도 골반 후방경사가 불가피하지만, 중요한 것은 그 각도와 속도다. 경사가 완만하게 일어나고 전체 범위에서 척추가 안전하다면 큰 문제가 없지만, **과도하고 빠르게 골반이 말리면** 부상의 신호다.

골반 정렬 교정 기준: 첫째로 **서 있을 때나 앉은 범위에서 중립 골반 유지**가 선행되어야 한다. 평소 전방경사 습관이 있는 사람은 준비자세부터 골반을 살짝 후방경사(꼬리뼈 내리기)하여 중립으로 만들어야 한다. ****운동 중에는 코어근육(복근과 척추기립근)****을 동시에 활성화하여 골반이 흔들리지 않도록 한다. 만약 **내려갈 때 골반 후방경사가 시작되는 깊이**를 발견하면, 그 지점이 바로 개인의 **현재 가동성 한계**다. 시스템은 이를 감지하여 예를 들어 “엉덩이가 너무 아래로 말리지 않게 현재 깊이까지만 내려가세요.”라고 지시할 수 있다. 실제 전문가들도 *****허리가 둥글어지기 시작할 정도로 깊게 앉지 말고, 그 이전 범위까지만 수행하라*****고 조언한다. 그리고 점차 **고관절과 햄스트링 유연성**을 향상시켜 그 범위를 넓혀가는 것이 바람직하다.

특히 **전방경사형 사용자**라면, 스쿼트 시 **의식적으로 복근에 힘을 줘서 골반을 살짝 후방경사**하는 것이 도움이 된다. 이를 위한 큐잉으로 “갈비뼈와 골반을 서로 맞춘다”는 이미지를 심어주어, 과도한 요추 곡선을 플랫하게 한다. 반면 **후방경사/버트윙크 과한 사용자**는 “가동범위 줄이기”와 “고관절 접는 동작 연습”이 필요하다. 예컨대 벽에 등을 대고 스쿼트하거나, 박스를 뒤에 놓고 살짝 닿을 정도까지만 앉는 연습(박스 스쿼트)을 통해 골반 말림 없이 앉는 연습을 할 수 있다. 또한 **햄스트링 스트레칭**과 **둔근 근력 강화**를 통해 골반 후방경사의 원인을 해결해야 한다. NASM 트레이닝 가이드에 따르면, **골반 경사를 교정하기 위해서는 짧아진 근육은 스트레칭하고 약해진 근육은 강화**해야 한다고 강조한다. 예를 들어 전방경사의 경우 **장요근과 척추기립근 스트레칭, 복근과 햄스트링 강화**가, 후방경사의 경우 **햄스트링과 복근 스트레칭, 척추기립근과 둔근 강화**가 권장된다.

생체역학적 근거 요약: 골반의 정렬은 척추와 다리의 중간 고리로서, 잘못 기울어지면 **허리와 무릎 관절의 부하 분포**를 바꾸어 잠재적 문제를 일으킨다. 따라서 스쿼트 교정 시스템은 ****골반 각도 센싱(예: 엉덩이뼈 라인 각도)****을 통해 전방/후방경사가 정상 범위(예: 서있을 때 전방 5~10°, 앉았을 때 후방 5° 이내 등)에서 벗어나는지를 감지할 수 있

다. 그리고 그에 따라 “골반이 너무 앞/뒤로 기울었습니다”라는 신호와 함께 앞서 언급한 구체적 교정 동작(복근 조이기 또는 깊이 제한 등)을 안내한다. 이는 단순히 형태상의 교정이 아니라, **허리의 장력 균형과 고관절-무릎의 적절한 협응을 보장하기 위한 것으로**, 궁극적으로 **허리 통증 예방과 스쿼트 역량 향상에 기여한다**.

2.3 무릎 정렬: 내반(Valgus) 및 외반(Varus)의 위험성과 교정 필요성

스쿼트 동작에서의 무릎 이상 정렬: 이상적인 스쿼트에서는 무릎 관절이 발끝 방향과 같은 선상에서 움직여야 한다. 정면에서 보았을 때, 무릎이 너무 안쪽이나 바깥쪽으로 치우치지 않고 **고관절-무릎-발목이 거의 일직선**을 이뤄야 한다. ****무릎 내반(knee valgus)****은 흔히 **무릎이 안쪽으로 모이는 현상**으로, 두 무릎이 서로 가까워지고 발은 벌어진 O자 형태(그러나 일반적인 용어로는 X자 모양)를 띤다. ****무릎 외반(knee varus)****은 **무릎이 바깥으로 벌어지는 현상**으로, 무릎 간 거리는 넓어지고 발은 안쪽을 향해 모이는 형태(다리는 O자형)가 된다. 스쿼트 시 초보자나 근력이 부족한 사람에게 특히 흔한 오류는 **동작 하강 시 무릎이 안쪽으로 모아지는 내반(collapsing inward)** 현상이다. 외반의 경우 내반보다는 덜 흔하지만, 과도하게 **“무릎을 밖으로 밀라”는 cue를 오용**할 경우 무릎이 과하게 벌어져 발 폭보다 크게 벌리는 경우도 있다.

무릎 내반(발목보다 무릎이 안쪽으로 치우침)의 문제: 무릎이 안쪽으로 모이면 슬관절의 정렬 불일치로 인해 여러 손상이 유발될 수 있다. 첫째, **전방십자인대(ACL) 부상 위험 증가:** 무릎 내반은 대개 **경골의 외회전 + 대퇴의 내회전 + 족관절의 회내(내측 쏠림)** 동반하는 **3차원적 무릎의 붕괴(dynamic valgus)** 패턴이다. 이 패턴은 착지 동작이나 방향 전환 시 ACL에 큰 부담을 주어 단발성 손상의 주요 원인이 된다. 실제로 Hewett 등 연구에서 **점프 착지 시 무릎 내반각이 큰 여성 선수들이 ACL 파열 위험이 훨씬 높았다고** 보고하였다. **10%의 내반각 증가가 슬개대퇴 관절 압력을 45% 증가시킨다**는 연구도 있어, 이는 내반이 무릎 관절에 얼마나 큰 부담을 주는지 보여준다. 둘째, **슬개대퇴통증증후군(PFPS) 위험:** 무릎이 안쪽으로 모아지면 슬개골(무릎뼈)이 대퇴골의 골고랑에서 **바깥쪽으로 비정상적인 압박**을 받는다. 이로 인해 연골 연화나 연부조직 통증이 생기는 PFPS(러너스 니)가 발생할 수 있다. 실제 임상에서 무릎 전면 통증을 호소하는 많은 환자들이 **내반 무릎 경향**을 보이며, 교정 훈련을 통해 통증이 개선되는 사례가 많다. 셋째, **엉덩이/발목 주변 문제:** 무릎 내반은 고관절의 내전 및 내부회전을 동반하므로 **엉덩관절의 정렬**에도 부정적 영향을 준다. 이는 고관절 외전근(중둔근 등)의 약화와 관련 있으며, 허리나 고관절 통증으로도 이어질 수 있다. 또한 내반은 ****발의 과회내(과도한 평발화)****와 연관되어 족저근막염이나 경골부하 증가 같은 2차 문제도 야기할 수 있다. 종합하면, **무릎이 안쪽으로 모이는 현상은 단순한 모양 문제를 넘어 여러 근골격계 손상의 위험 요인**이다.

무릎 외반(무릎이 과도하게 벌어짐)의 문제: 외반은 내반만큼 흔하지는 않지만, **양측 무릎이 발보다 바깥쪽으로 치우치는 경우**를 말한다. 어느 정도 무릎을 밖으로 벌리는 것은

내반을 방지하기 위해 권장되지만, 과하면 문제다. **무릎 외반이 심하면** 무릎 관절의 **외측 지지구조(외측 인대, 외측 연골)**에 부담이 증가한다. 예를 들어, 외측 측부인대(LCL)에 지속적인 장력이 가해지고 내측 연골에 압박이 증가하여 퇴행성 변화가 가속될 수 있다. 또한 발목은 반대로 내반(안쪽으로 굴림)되기 쉬워 **발목 불안정**을 초래할 수 있다. **발이 과도하게 바깥쪽 가장자리로 치우쳐 체중이 실리면** 발목 염좌 위험도 증가한다. 그리고 근력 측면에서는, 필요 이상으로 무릎을 벌리면 오히려 **대퇴 내전근과 사두근의 효율적 동원**이 방해되어 **힘 손실**이 발생할 수 있다.

무릎 정렬 교정의 기준: 이상적인 기준은 *****무릎과 발이 동일 선상*****이다. 구체적으로, ****무릎 정면(슬개골 중앙)**이 발의 2번째 발가락** 방향과 일직선을 이루는 것이 좋다. 운동 중에는 **무릎이 안쪽으로 들어오려는 징후** (예: 슬개골이 엄지발가락 쪽으로 향함)가 포착되면 즉각 교정해야 한다. AI 시스템은 **카메라 영상의 2D 좌표** 또는 **센서의 3D 데이터로 엉덩이-무릎-발목 각도**를 계산해 무릎의 내반/외반을 판별할 수 있다. 예를 들어 ****대퇴와 경골이 이루는 각(정면 관절각)**이 외측으로 벌어지는 각도(외반각)** 혹은 내측으로 모이는 각도(내반각)를 모니터링하여, **내반각이 5° 이상이면** 위험 신호로 볼 수 있다. 실제 한 연구에서 **운동선수의 착지 동작**을 분석한 결과, 부상을 당한 그룹이 그렇지 않은 그룹보다 **무릎 내반각이 평균 8° 높았다고** 보고하기도 했다. 또한 **무릎 간 거리와 발목 간 거리의 비율**도 활용 가능하다. 서있는 자세에서 무릎 간 거리가 발목 간 거리보다 현저히 좁으면(X자형 다리) 내반 경향으로 볼 수 있고, 반대이면 외반 경향으로 볼 수 있다. 스쿼트 하강 시 이 비율이 많이 변한다면 동작 중 정렬이 흐트러진 것이다.

교정 전략: 무릎 내반 경향이 관찰되면 시스템은 **“무릎을 바깥쪽으로 벌리세요”** 혹은 **“무릎을 발끝 방향으로 맞추세요”** 같은 메시지를 줄 수 있다. 이때 사용자는 **고관절을 외회전/외전**시키는 근육(둔근, 대퇴근막장근 등)을 활성화하여 무릎을 바깥으로 눌러주는 느낌으로 자세를 교정하게 된다. 실제 임상에서도 **무릎 내반 수정 운동**으로 고무 밴드를 무릎 주위에 두르고 **밴드를 벌리면서 스쿼트**하는 운동 등이 활용되는데, 이는 **의식적으로 무릎을 밖으로 밀게 하여 중둔근 등을 강화**하는 방법이다. **AI 코칭 메시지로도** 동일한 효과를 노릴 수 있다. 이때 주의할 점은, 앞서 언급했듯 과도한 “무릎 바깥으로” 지시는 외반을 초래할 수 있으므로 **절제된 표현**이 필요하다. 예컨대 “무릎과 발끝이 같은 방향입니다. 더 이상 안쪽으로 모이지 않게 유지하세요.” 정도로 안내하면 충분하다. 또한 **발의 아치 지지**를 언급하여, 발이 무너지면서 무릎이 함께 들어오는 것을 막도록 유도할 수 있다. 예를 들어 **“발바닥으로 바닥을 움켜쥐듯 지지하세요”** 같은 큐는 발의 안정성을 높여 무릎 내반을 억제한다.

무릎 외반이 감지되는 경우(예: 무릎이 발보다 바깥으로 크게 벌어진 경우)에는 *****무릎이 너무 벌어졌습니다. 발끝 방향보다 너무 바깥으로 나가지 않게 하세요.*****라고 안내할 수 있다. 다만 일반적으로는 내반 교정에 중점을 두되, 외반은 특별한 경우에 한해 조정

하면 된다. **전문 역도 선수들이** 최대 중량을 다룰 때 일부러 무릎을 살짝 밖으로 밀며 일어나는 경우도 있는데, 이는 숙련된 움직임으로 **고관절 힘을 동원**하기 위함이며 통제된 범위에서 일어난다면 큰 문제는 아니다. 그러나 초보자의 과도한 외반은 협응 오류이므로 바로잡는 것이 좋다.

무릎 정렬 교정의 근거 요약: 의학적 연구는 ****동적 무릎 내반(Dynamic Knee Valgus, DKV)****이 **ACL 부상 및 슬개대퇴 통증의 주요 위험인자**임을 누차 보고하고 있다. 특히 여성이나 청소년 스포츠 선수의 경우 이를 개선하기 위한 운동 프로그램이 권장될 정도다. 그러므로 스쿼트 훈련 시 *****무릎은 발끝과 같은 선상*****이라는 황금률을 철저히 지킬 필요가 있다. AI 자세 교정 시스템은 이 황금률을 지속적으로 모니터링하고 어길 때마다 실시간으로 알려줌으로써, 사용자가 **초기부터 올바른 무릎 움직임 패턴**을 몸에 익히도록 도와야 한다. 그 결과 장기적으로 **슬관절 부상 예방과 운동 수행 향상**이라는 두 마리 토끼를 잡을 수 있을 것이다.

2.4 발목과 발: 뒤통치 들림 및 발 흔들림의 문제와 교정

스쿼트 시 발목의 역할: 발목(특히 족관절 배측굴곡, dorsiflexion)은 스쿼트 깊이를 결정짓는 중요한 관절이다. 스쿼트 자세에서는 **발이 지면에 고정된 닻(anchor)** 역할을 하며, 발목 관절의 가동성과 안정성이 상체와 하체의 **힘 전달 경로**를 결정한다. **이상적인 자세에서는** 스쿼트 전 과정을 통해 ****양 발전체(뒤통치부터 앞발가락까지)****가 지면에 안정적으로 붙어 있어야 한다. 또한 발목은 **적절한 배측굴곡 각도**를 보여야 하는데, 일반적으로 스쿼트 하강 시 무릎이 약간 앞으로 나가므로 그에 상응하는 발목 굽힘(배측굴곡)이 일어난다. 만약 발목의 유연성이나 가동범위에 제한이 있으면, **뒤통치가 들리거나 아니면 무릎이 앞으로 못 나가고 상체가 과도하게 숙여지는 보상 동작**이 나타난다.

뒤통치 들림의 문제: 스쿼트 하강 시 뒤통치가 바닥에서 뜰다면, 이는 크게 두 가지 문제를 야기한다. 첫째, **무게중심 불안정:** 체중이 앞꿈치 쪽으로 쏠려 균형을 잃기 쉽다. 뒤통치가 들리면 발앞쪽 작은 면적으로 몸을 지탱하게 되어 전후방 흔들림이 커진다. 이는 특히 ****하중을 들고 하는 스쿼트(바벨 스쿼트)****에서 매우 위험하며, 몸이 앞으로 넘어가거나 허리를 굽히는 사고로 이어질 수 있다. 둘째, **무릎과 종아리에 가해지는 부하 증가:** 뒤통치가 들릴 정도로 무릎이 앞으로 나갔다는 뜻이며, 이때 **무릎의 전방 전단력과 슬개건에 가해지는 응력**이 커진다. 실제 Athletico의 설명에 따르면 뒤통치가 들리면 무릎 앞쪽에 가해지는 압력이 증가하고, 햄스트링/둔근 등 후방 사슬 근육의 관여는 줄어든다고 한다. 이는 곧 무릎관절의 부담 증가와 운동 효율 저하로 이어진다. 요약하면, 뒤통치가 들리는 것은 **균형 손실 + 무릎과 발목 부하 증가**로 좋지 않은 패턴이다.

발 흔들림(안쪽 또는 바깥쪽으로 치우침)의 문제: 스쿼트 시 발바닥 전체가 균등한 압력으로 지면을 눌러야 하는데, 만약 발이 안쪽이나 바깥쪽으로 기울어지거나 아치가 무너

지는 현상이 있다면 이는 체중 분산의 불균형을 나타낸다. **발 안쪽 모서리로 치우치는 경우(과회내)**, 흔히 평발 경향이 있는 사람들이 스쿼트 시 나타나는데, 이러면 **발 아치의 지지력 감소**와 함께 경골의 과내회전 -> 무릎 내반으로 이어지는 연쇄가 발생한다. 결과적으로 무릎 부상 위험을 높이는 패턴이다. ****발 바깥 모서리로 치우치는 경우(과회외)****는 아치가 너무 높거나, 무릎을 지나치게 외반시키려 할 때 나타난다. 이 경우 발목 외측 구조에 부담을 주고 무릎 외반 스트레스와 연결된다. 즉, **발의 불안정은 바로 무릎 정렬의 불안정으로 직결된다.**

발목 가동성 부족의 생체역학적 보상: 발목의 **배측굴곡 제한**은 흔한 문제인데, 발목이 덜 굽혀지면 스쿼트 동작에서 **필연적으로 다른 관절이 그 부족분을 보상**한다. 가장 흔한 보상이 ****상체 전경(앞으로 숙여짐)****이다. 발목이 안 굽혀져 무릎 진행이 어려우면, 엉덩이를 뒤로 더 빼고 상체를 숙여 겨우 균형을 맞추려 한다. 이는 **허리에 과부하**를 늘리고 스쿼트 깊이도 얕아진다. 또 다른 보상은 **발뒤꿈치 들기로**, 무릎 진행을 확보하기 위해 뒤꿈치를 들어 발목 각도를 강제로 만들어낸다. 이 경우 앞서 언급한 문제들이 발생한다. 실제 연구에서도 **제한된 발목 가동성이 있는 경우 스쿼트 깊이가 감소하고, 몸통 전경각이 커지며, 무릎 역학이 비정상적으로 변한다**는 결과가 있다. 또한 발목 유연성 부족은 **무릎 내반의 원인** 중 하나로 지목되는데, JOSPT 발표에 따르면 **발목 배측굴곡 제한은 무릎 외부 돌림 보상(즉 내반)과 연결되어 ACL 부상률을 높인다고** 한다. 따라서 발목의 충분한 가동성과 안정성은 스쿼트 자세 교정에서 빼놓을 수 없는 요소다.

교정 기준: 발뒤꿈치 지면 밀착이 최우선 기준이다. 시스템은 발뒤꿈치 포인트의 높이를 추적하여 일정 기준 이상 들리면 오류로 판단할 수 있다. 예를 들어, 스쿼트 동작 중 **뒤꿈치가 지면에서 1cm 이상 들리는 프레임이 존재하면 "뒤꿈치를 드셨습니다"** 경고를 준다. 그리고 즉각적인 교정 지시로 ****"발뒤꿈치를 바닥에 붙이고 무게중심을 뒤쪽으로 두세요"**라는 메시지를 전달한다. 이는 사용자가 의식적으로 엉덩이를 더 뒤로 빼고, 무게중심을 발뒤꿈치-중족부 쪽으로 이동하도록 유도한다. 결과적으로 **무릎의 과도한 전진 억제와 후방 사슬 근육(둔근, 햄스트링) 활성화** 효과가 있다. Athletico에서도 ****"뒤꿈치를 바닥에 붙이면 무릎 앞쪽 압력이 줄어들고 햄스트링/둔근이 더 많이 쓰인다"**고 강조한다.

발목 가동성 자체를 개선하는 것은 장기 과제이므로, **단기적 보조책**으로는 ****발뒤꿈치 아래에 작은 힐컵(뽕기)****을 대어주는 방법이 있다. 실제로 ****역도화(Weightlifting shoes)****가 뒤꿈치가 들리는 사람에게 도움이 되는데, 구두굽처럼 뒤꿈치가 높아지면 적은 발목 가동성으로도 무릎 진행을 허용할 수 있다. 다만 이런 보조는 임시방편일 뿐, 근본적으로는 발목 관절의 유연성 확보를 목표로 해야 한다. 시스템은 **"필요시 발뒤꿈치 밑에 얇은 경사판을 사용하세요"**라고 조언할 수 있으며, 장기적으로 **종아리 스트레칭**이나 **발목 모빌리티 운동**을 프로그램에 포함시켜 발목 기능을 향상시키는 방향으로 나아가

야 한다.

발의 안정성 교정: 발이 운동 중 흔들린다면, *****발바닥에 고르게 체중을 실으세요. 엄지 쪽과 새끼발가락쪽, 뒤꿈치쪽 세 지점을 모두 누릅니다.*****와 같은 큐를 줄 수 있다. 이는 흔히 ****발 삼점 지지(tripod foot)****라고 하는 개념으로, 발의 세 주요 지점에 고른 압력을 가함으로써 아치가 유지되고 안정성이 확보된다. 또한 “무게중심이 발앞쪽/뒷쪽으로 쏠리지 않게 중간에 둥니다”라는 피드백도 줄 수 있다. 만약 **실시간으로 압력중심(COP)을 측정할 수 있는 스마트 깔창** 등을 활용한다면 보다 정밀한 피드백(예: “왼발 안쪽에 치우침, 오른발 뒤꿈치 치우침” 등)을 제공할 수도 있다. 그러나 일반 카메라 기반 시스템이라면, **발가락과 뒤꿈치의 픽셀 움직임** 등으로 대략적인 흔들림만 감지하여 알리는 정도가 가능하다.

과학적 근거 요약: 발목과 발은 **지면과의 상호작용** 부위로서, 이 부분의 오류(뒤꿈치 들림, 아치 붕괴 등)는 위로 연쇄적인 문제를 일으킨다. 제한된 발목 가동성은 **forward lean, depth 감소, knee valgus 증가**로 이어진다는 것이 연구를 통해 입증되었으며, 발의 불안정은 곧 무릎의 불안정이다. 그러므로 교정 시스템은 **발뒤꿈치 밀착과 안정된 발 아치 유지**를 핵심 기준으로 삼아 모니터링해야 한다. 이를 통해 **발목의 적절한 역할**을 이끌어내면, 전체 스쿼트 동작의 안정성과 효율이 향상되어 부상 위험이 줄어든다. 결과적으로 사용자들은 “스쿼트할 때 뒤꿈치를 들지 않고, 발을 단단히 붙이는 것만으로도 무릎 통증이 줄고 자세가 안정되었다”는 변화를 체감할 수 있을 것이다.

3. 실시간 디렉팅 메시지 설계 기준

실시간 자세 교정 시스템의 효과는 **어떻게 메시지를 구성하여 사용자에게 전달하느냐**에 달려 있다. 여기서는 실제 물리치료 및 트레이닝 현장에서 사용하는 **자세 교정 지시 문구**의 예시들을 살펴보고, 이러한 문구들의 생리학적/기능적 배경을 설명한다. 또한 사용자 오류 유형별로 **피드백 메시지를 어떻게 차별화**하여 설계할 것인지에 대한 기준을 제시한다.

3.1 물리치료 현장의 자세 교정 지시 문구와 배경

물리치료사나 트레이너들은 스쿼트 자세를 지도할 때 이해하기 쉬우면서도 효과적인 다양한 **큐잉(cueing) 문구**를 사용한다. 이러한 문구들은 대부분 **어떤 동작 감각을 환기**하거나 **특정 근육의 사용을 유도**하기 위해 고안되어 있으며, 그 배경에는 인체 기능에 대한 이해가 깔려있다. 아래에는 스쿼트 자세 교정에 자주 활용되는 지시 문구와 그 생리학적 의미를 몇 가지 예로 들어보았다:

- **“가슴을 펴고 시선을 정면으로”** – 상체가 숙이거나 등이 굽는 경향이 있을 때 사용하는 지시이다. **가슴을 편다**는 것은 흉추를 신전시키고 견갑골을 살짝 모아 등 상부를 곧게 만드는 동작으로, 이를 통해 **흉추 후만을 줄이고 요추가 중립**을 찾도록

록 돕는다. 또한 **시선을 정면** 혹은 약간 위로 향하게 하면 자연스럽게 목과 등에 긴장이 들어가 상체가 구부정해지는 것을 방지한다. 이 문구의 생리학적 배경은, 상체를 곧게 세움으로써 **척추 기립근과 코어 근육 활성화**를 유도하고 척추를 중립 정렬로 유지시키는 데 있다. 결과적으로 허리에 가해지는 전단력을 낮추고, 체간이 곧게 뻗어야 스쿼트 힘 전달 경로가 효율적이므로 전체적인 운동 역학이 좋아진다.

- **“배에 힘을 주고 척추를 세워요”** – 이것은 코어 안정화를 위한 지시이다. ****배에 힘을 준다(복부 Brace)****는 행위는 복횡근, 복직근 등 코어 근육에 긴장을 주어 ****복압(Intra-abdominal pressure)****을 높이고 척추를 지지하는 효과가 있다. 흔히 “코르셋을 조인다”는 이미지로 설명하기도 한다. **척추를 세운다**는 말은 중립 척추를 유지하라는 뜻으로, 앞의 “가슴 펴기”와 연계된다. 이러한 지시는 허리가 불안정해 보이거나 힘이 빠져 있을 때 사용되며, ****척추 주변 근육의 동시수축(co-contraction)****을 통해 척추의 미세 움직임을 억제하고 안전성을 높이는 배경이 있다. 실제로 척추 안정화 연구에서는 **복부 브레이싱 기법**이 요통 환자의 척추 안정화 운동에서 통증 감소와 기능 개선을 가져온다고 보고한다. 따라서 “배에 힘”이라는 큐는 **허리 보호 및 힘 전달의 중심축 안정**이라는 중요한 기능적 목적을 달성한다.
- **“엉덩이를 뒤로 쭉 빼면서 앉으세요”** – 이것은 **힙 힌지(hip hinge)** 동작을 제대로 하도록 유도하는 지시이다. 스쿼트의 시작 동작은 **고관절 접힘**인데, 무릎부터 굽히려는 사람이 많아 **무릎 부담 증가**와 **앞쪽 쏠림** 문제가 생긴다. “엉덩이를 뒤로 빼라”는 것은 의자에 앉듯이 **고관절을 접어 엉덩이를 뒤쪽으로 이동**하라는 뜻으로, 이를 통해 **둔근과 햄스트링이 먼저 활성화**되고 무릎이 앞으로 튀어나가는 것을 방지한다. 이 문구의 생체역학적 배경은, 힙 힌지를 제대로 함으로써 무릎 굴곡보다 고관절 굴곡에 더 강조를 두어 ****후방 사슬(엉덩이-허벅지 뒤쪽 근육)****을 적극 사용하고 무릎 전단력을 줄이는 데 있다. 실제 전문가들은 스쿼트 초심자에게 “의자에 앉듯 엉덩이를 뒤로”를 가장 먼저 가르치며, 이 동작이 되어야 비로소 무릎과 발목 움직임이 올바르게 연계된다고 강조한다. 따라서 이 지시는 **올바른 동작 순서**를 몸에 익히게 하고, 허벅지 앞쪽에 과부하가 걸리지 않도록 균형잡힌 근육 사용을 도와준다.
- **“무릎을 발끝 방향으로”** – 무릎 정렬을 바로잡는 가장 대표적인 지시이다. 스쿼트 시 무릎이 안쪽이나 바깥쪽으로 치우치는 사람에게 *****무릎은 항상 발끝과 같은 방향으로 움직여야 한다*****고 알려준다. 특히 무릎이 모이는 내반 경향이 있을 때 **즉각적으로 교정**해야 하는데, “발끝 방향”이라는 말은 **슬개골이 발의 두번째 발가락과 일직선**을 이루도록 정렬하라는 의미다. 이 지시에 따라 사용자는 무릎이 안

쪽으로 들어갈 때마다 “아, 발끝 쪽으로 밀어야지” 하고 인지하게 되고, 자연스럽게 **둔근과 대퇴 외회전근**을 써서 무릎을 바깥으로 돌리는 동작을 하게 된다. 결과적으로 **무릎 관절의 비틀림과 전단력**이 줄고, 슬개골이 고른 트래킹을 하게 되어 부하 분산이 정상화된다. 실제 물리치료 지침서에서도 **“스쿼트 내려갈 때 ‘무릎-발끝 일직선’이라고 계속 상기시켜라”**고 조언하며, 이는 ACL 부상 예방 운동 프로그램에서도 핵심 원칙이다. 따라서 이 문구는 **무릎-발 정렬 보정의 간단하면서도 강력한 cue**로 기능한다.

- **“뒤꿈치로 바닥을 밀어 올린다”** – 스쿼트 상향(일어설 때) 동작에서 흔히 쓰이는 지시이다. 내려갈 때는 엉덩이를 뒤로 빼고, 올라올 때는 **뒤꿈치로 지면을 밀면서 선다**고 이미지를 주면, 자연스럽게 **둔근과 햄스트링으로 힘을 써서 일어서게** 된다. 반대로 잘못된 패턴은 앞꿈치로 밀며 무릎으로만 일어나는 것이다. “뒤꿈치로 밀어라”는 말은 사용자가 **발뒤꿈치에 체중을 싣고, 엉덩이를 수축하여 펴는 데 집중**하게 만든다. 이는 **“엉덩관절 신전근(둔근, 햄스트링)”**을 더 많이 활용하게 하고, 무릎관절의 부담을 덜어준다. 동시에 발뒤꿈치가 바닥에 단단히 붙게 되어 균형도 안정된다. 이 큐의 기능적 배경은, **하중을 뒤쪽으로 실어 후방 사슬 사용 극대화 및 무릎전방 전단력 최소화**이다. 이러한 감각을 익히면, 나중에 별도로 지시하지 않아도 자연스럽게 스쿼트 시 뒤꿈치가 들리지 않고 엉덩이 힘으로 일어서게 된다.
- **“호흡: 내려갈 때 들이쉬고, 올라올 때 내쉴다”** – 호흡은 종종 간과되지만 중요한 부분이다. 이 문구는 스쿼트 수행 중 **적절한 호흡 패턴**을 안내한다. 내려갈 때 들이쉬면 흉곽이 확장되면서 **복압이 상승하고 코어가 안정**된다. 그런 다음 올라올 때 힘을 주며 내쉬면 **과도한 혈압 상승을 방지**하면서도 복압을 적절히 유지할 수 있다. 만약 호흡을 멈추거나 잘못하면, 힘을 쓰기 어려울 뿐더러 현기증이나 혈압 급등의 위험이 있다. 물리치료 현장에서는 “힘 쓸 때 숨 내쉴다”는 기본을 항상 주지시키는데, 이 간단한 문구가 **안전한 Valsalva 완화와 근육에 산소 공급**을 원활히 하는 배경이 있다. 따라서 시스템도 사용자에게 이 호흡 리듬을 알려주어 **호흡과 동작을 동기화**시키는 것이 바람직하다.

이 외에도 **“무릎이 서로 부딪치지 않게 유지”, “발 아치가 무너지지 않게 엄지발가락에 힘”, “목은 중립, 시선 정면”, “어깨 긴장 빼고 아래로 눌러 안정”** 등 세세한 큐들이 상황에 따라 활용된다. 이러한 문구들은 모두 **특정 오류를 바로잡거나, 올바른 움직임 감각을 높이는 데 목적**이 있다. 중요한 것은, **한 번에 너무 많은 지시를 하지 않고** 필요한 순간에 핵심만 전달하는 것이다. 예를 들어 초보자가 동시에 여러 가지 오류를 보일 때, **“가슴 펴고, 무릎 벌리고, 뒤꿈치 붙이고...”**를 한꺼번에 다 말하면 오히려 혼란스럽다. 대신 그 순간 가장 위험하거나 핵심적인 문제부터 한두 가지 지시로 교정하고, 점진적으로

다른 요소들을 개선해야 한다. 실시간 AI 시스템도 이 원칙을 따라 **우선순위 큐잉** 전략을 채택해야 사용자에게 과부하를 주지 않는다.

3.2 오류 유형에 따른 피드백 메시지 차별화 설계

사용자가 스쿼트를 수행할 때 나타낼 수 있는 오류는 다양하며, 효과적인 교정을 위해서는 **오류 유형에 맞춤형 피드백 메시지**를 제공해야 한다. AI 기반 시스템은 **감지된 특정 오류**에 대응하여 그에 최적화된 지시를 내릴 수 있도록 설계되어야 한다. 여기서는 대표적인 오류 시나리오별로, 어떻게 피드백 메시지를 차별화하고 구성할지 원칙을 제시한다:

- **오류: 무릎 내반 (Knee Valgus)** – 감지 기준: 정면에서 무릎이 안쪽으로 모여 양 무릎 간 거리가 발목 간 거리보다 현저히 좁아짐, 혹은 슬개골이 엄지발가락 방향으로 치우침.

피드백: “무릎이 안쪽으로 모입니다. 두 무릎 사이 간격을 유지하면서, 무릎을 약간 바깥쪽으로 벌려 발끝 방향과 나란히 하세요.”

설명: 이 메시지는 **무릎을 벌리라는 동작 지시**와 함께 그 기준(발끝 방향)을 제시한다. 단순히 “무릎 모으지 마세요”라고 하는 것보다 *****발끝과 같은 방향*****이라는 구체적 기준을 주는 것이 이해를 돕는다. 또한 **두 무릎 사이 간격 유지**라는 말은, 무릎이 붙지 않을 정도로 벌리라는 의도를 전달한다. 이때 지나치게 “한없이 벌려라”가 아니고 어디까지 벌려야 할지를 알려주는 것이 핵심이다. 발끝 방향이라는 참조는 그 한계를 제시한다.

기능적 배경: 무릎을 바깥으로 벌리면 **둔근, 대퇴근막장근 등 고관절 외전근**이 활성화되어 내반을 억제한다. 또한 **무릎-발 정렬이 바로잡혀** 슬관절에 걸리는 비틀림이 감소한다.

- **오류: 무릎 외반 (Knee Varus)** – 감지 기준: 무릎이 과도하게 바깥으로 벌어져 발 폭보다 훨씬 넓게 벌어짐, 혹은 발 안쪽이 뜰 정도로 체중이 바깥쪽으로 실림.

피드백: “무릎이 너무 벌어졌습니다. 발끝 폭보다 더 벌어지지 않도록, 무릎을 너무 바깥으로 밀지 마세요.”

설명: 내반 교정에 집중하는 것이 일반적이지만, 만약 외반이 극심한 경우엔 이를 지적해야 한다. 이 메시지는 *****너무 벌렸다*****는 경고와 함께 **얼마나가 적정선인지** 알려준다. 발끝 폭(발 간격)보다 더 벌어지지 않도록 하라는 것은 발과 무릎이 동일 선상에 오도록 조정하라는 의미다.

기능적 배경: 과한 외반을 교정하면 **균형이 개선되고, 외측 지지구조의 과긴장을** 방지한다. 또한 발이 안쪽으로 돌아오는 만큼 ****족궁(발 아치)****의 안정성이 높아져 전체 체중 분산이 고르게 된다.

- **오류: 등 굽음/버트윙크 (Spinal Rounding/Butt Wink)** – 감지 기준: 측면에서 요

추 곡률이 줄어들어 등 부분이 둥글게 보임, 하강 최하위에서 골반이 급격히 후방 경사됨.

피드백: “허리가 둥글어지고 있습니다. 가슴을 펴고 허리를 곧게 유지하세요. 더 깊이 내려가면 안 됩니다.”

설명: 첫 문장은 **현재 오류 상태**를 지적한다 – 허리가 둥글다는 사실. 다음은 **구체적 동작 수정**으로, 가슴 펴기와 허리 펴를 지시한다. 마지막으로 **원인 해결**로 깊이를 조절하라고 알려준다. 즉, 이 경우 버트윙크가 발생한 원인이 가동성 한계로 너무 깊이 내려간 것이므로, 현재 깊이보다 덜 내려가도록 제한한다.

기능적 배경: 가슴을 펴라는 것은 **흉추를 세워 요추 굴곡을 보상**하는 행동이고, 허리 곧게는 **코어에 힘을 주어 요추를 중립화**시키는 것이다. 내려가는 범위를 줄이라는 것은 **버트윙크가 시작되지 않는 구간까지만 가동**하여 척추를 보호하라는 의미다. 이러한 복합 지시는 허리 굽음 현상을 즉각 줄이고, 반복 시 점차 유연성을 향상시키는 효과도 노린다.

- **오류: 요추 과신전/골반 전방경사 (Hyperextended Lumbar/Anterior Tilt)** – 감지 기준: 허리가 과도하게 휘고 배가 튀어나와 보임, 골반이 앞쪽으로 기울어짐.

피드백: “허리가 너무 과하게 휘었습니다. 아랫배에 힘을 주고 꼬리뼈를 살짝 내리세요. 갈비뼈와 골반을 맞추는 느낌으로 자세를 잡습니다.”

설명: 과신전 상태에서는 먼저 그것을 인지시킨다(허리가 너무 휨). 그리고 **복부 브레이싱**과 **골반 후방경사**를 지시한다. “꼬리뼈를 내리라”는 말은 전방경사된 골반을 중립으로 돌리라는 뜻이다. 마지막 문장은 감각적인 cue로, 과도한 요추전만으로 갈비뼈와 골반이 벌어져 있으니 그 간격을 줄이라는 이미지다.

기능적 배경: 복부에 힘을 주면 **골반이 후방경사**되어 요추 전만이 줄어든다. 꼬리뼈를 내리는 동작 역시 **전방경사 교정**이다. 갈비뼈-골반 정렬은 **흉추와 요추의 중립**을 의미한다. 이 지시들을 따르면 척추가 중립으로 돌아와 **후관절 스트레스**가 줄고, 코어 근육이 활성화되어 **척추 안정성**이 높아진다.

- **오류: 발뒤꿈치 들림 (Heels Rise)** – 감지 기준: 내려갈 때 발뒤꿈치가 지면에서 떨어짐.

피드back: “뒤꿈치가 들렸습니다. 체중을 너무 앞으로 두고 있어요. 뒤꿈치를 바닥에 붙이고, 무게중심을 조금 뒤로 옮겨보세요.”

설명: 먼저 뒤꿈치 들림이라는 구체적 오류를 지적한다. 이어서 왜 그런지 – 체중이 앞으로 쏠렸다는 원인을 알려준다. 그리고 수정으로, 뒤꿈치를 붙이고 무게중심을 뒤로 이동시키라는 지시를 내린다.

기능적 배경: 뒤꿈치를 붙이면 **발목이 더 굴곡되지 않게** 억제하고, 햄스트링/둔근에 힘을 신게 된다. 무게중심을 뒤로 옮기라는 것은 **상체를 조금 세우고 엉덩이를 더 활용**하라는 의미다. 이를 통해 **무릎 전방 부담**이 감소하고 자세 안정이 개선된

다. 또한 사용자는 자신의 발 뒤꿈치 감각을 인지하게 되어, 향후 동작 시에도 자연스럽게 뒤꿈치를 내리려 노력할 것이다.

- **오류: 발 불안정/안쪽 치우침 (Foot Pronation/Instability)** – 감지 기준: 스쿼트 시 발 아치가 무너지고 발 안쪽 가장자리에 체중 과다, 혹은 양발이 흔들려 균형 불안.

피드백: “발이 불안정합니다. 발바닥 전체로 균일하게 지면을 누르세요. 엄지발가락과 새끼발가락, 뒤꿈치에 고르게 힘을 줍니다.”

설명: 발이 흔들리는 경우 일단 “불안정하다”고 지적하여 사용자가 그 문제를 인식하게 한다. 그리고 “발바닥 전체”로 누르라고 하여, 특정 부분에 치우친 체중을 분산하라고 지시한다. 이어서 좀 더 구체적으로 **발의 세 점(엄지, 새끼, 뒤꿈치)**을 언급하여 어디에 힘을 줘야 하는지 알려준다.

기능적 배경: 삼중 지지대를 만들면 발 아치가 살고 **족근 관절의 정렬이 중립**에 가까워진다. 이는 곧 무릎과 고관절의 정렬 안정으로 연결된다. 또한 발의 고른 지지는 스쿼트 힘 전달의 기반이 되어, 지면을 밀 때 힘 손실 없이 효율이 올라간다.

이처럼 **오류-대응** 형태로 메시지를 준비해 두면, 시스템은 실시간 분석을 통해 해당 오류가 감지될 때 미리 정의된 메시지를 즉각 출력할 수 있다. 메시지 설계에서 중요한 몇 가지 원칙을 덧붙이면 다음과 같다:

- **긍정적/능동형 표현:** “~하지 말라”보다는 “~하라” 식으로 지시하는 것이 이해가 쉽다. 예를 들어 “무릎 모으지 마세요”보다 “무릎을 벌리세요”가 직관적이다. 부정형은 사용자가 무엇을 해야 할지 순간적으로 망설이게 만들 수 있으므로, **동작 그 자체를 지시하는 것이 좋다.**
- **간결성과 명확성:** 실시간 음성/문자 피드백은 길면 안 보고/안 듣게 된다. 한 문장에서 핵심 동사와 명사를 사용해 **간단명료**하게 전달해야 한다. “척추를 중립으로 유지하고 골반의 경사를 조절하세요”보다는 “허리를 곧게 펴세요”처럼 **직설적인 짧은 문장**이 효과적이다. 필요하다면 두 문장으로 쪼개되, 각 문장은 짧게.
- **하나의 메시지에 하나의 핵심 교정:** 한 번에 여러 오류를 나열하지 않는다. **우선 순위가 가장 높은 오류 하나를 겨냥**하여 그에 대한 교정법 하나(또는 관련된 2단계 동작)를 말해준다. 다른 오류는 일단 무시하거나 다음 반복 때 피드백하는 것이 낫다. 예컨대 무릎도 모이고 허리도 굽었다면, 처음엔 허리 굽음을 고치도록 지시하고 무릎 언급은 나중에 하는 식이다.
- **이미지화/비유 활용:** 필요하다면 물리치료사가 즐겨 쓰는 비유를 적용할 수 있다. 예를 들어 “꼬리뼈에 꼬리를 달았다 생각하고 그 꼬리가 땅을 향하게 하세요” (골

반 후방경사 유도), “양발로 수건을 양쪽으로 찢는 느낌으로 밀어보세요” (무릎 벌림+둔근 활성화) 등 이미지 큐는 복잡한 설명 없이도 동작을 유발한다. 이러한 메시지는 사전에 풍부히 데이터베이스화해두고 상황에 맞게 호출할 수 있다.

- **사용자 친화적 어조:** 기계음처럼 딱딱하게 명령조보다는, 부드럽지만 단호한 코칭 어조가 바람직하다. “~하세요”와 같은 존칭형 안내가 일반적일 것이며, 필요하면 이모티콘이나 간단한 격려(“좋습니다! 지금처럼 계속”)도 추가하여 **인간 코치와의 상호작용 느낌**을 줄 수 있다.

결론적으로, 오류 유형별 피드백은 **정확한 오류 진단 -> 핵심 교정 동작 지시 -> 기준/이미지 제시**의 구조로 구성된다. 예를 들어 무릎 내반이라면, (진단)“무릎이 모인다” -> (교정동작)“무릎을 바깥으로” -> (기준)“발끝 방향으로”의 3단계가 한 문장이나 두 문장에 녹아들도록 하는 것이다. 이렇게 설계된 피드백은 사용자가 **즉각적으로 이해하고 행동으로 옮길 수 있는 형태**가 되며, 반복된 교정 메시지를 통해 점차 오류를 줄여나가게 될 것이다.

4. 기술적 구현을 위한 기준 요소

AI 기반 자세 교정 시스템이 효과적으로 동작하려면, **어떤 데이터를 기반으로 오류를 판단하고 어떤 논리로 교정 포인트를 식별할지** 명확한 기준이 필요하다. 본 장에서는 **관절 위치 데이터로부터 오류를 판별하는 핵심 요소들**과, AI 모델이 학습/판단해야 할 **교정 포인트의 구조화 방식**에 대해 설명한다. 이는 시스템 개발을 위한 기술적 사양을 정의하는 단계에 해당한다.

4.1 관절 위치 기반 오류 판단 요소: 각도, 거리, 궤적

스쿼트 자세를 정량적으로 평가하려면, **인체 관절의 위치 좌표**로부터 ****유의미한 특징들 (feature)****을 추출해야 한다. 일반적으로 고려되는 요소는 **관절 각도, 관절 간 상대 거리/비율, 움직임 궤적 패턴** 등이다. 시스템은 이러한 요소들을 **실시간 계산**하여 미리 설정된 임계값과 비교함으로써 오류 여부를 판단한다.

- **관절 각도(Joint Angles):** 스쿼트에서 중요한 각도는 **무릎 각도(대퇴-하퇴간 각), 엉덩이 각도(몸통-대퇴간 각), 발목 각도(하퇴-발간 각), 그리고 척추 각도(몸통 경사각, 요추 만곡각)** 등이 있다.
 - **무릎 각도:** 무릎이 굽혀진 정도로, 보통 0°(선 상태)에서 120° 이상(풀스쿼트)까지 간다. 이 각도는 **스쿼트 깊이**와 연관되며, 너무 작으면(얕으면) 운동 강도가 떨어지고, 너무 크면서 척추 중립이 깨지면 버트윙크 위험이 있다. 따라서 시스템은 ****목표 범위 (예: 90°~120°)****를 설정해 두고, 예컨대 무릎 각도가 60° 미만이면 “조금 더 깊이 앉으세요” 피드백을, 130° 초과이

면서 허리가 굽었다면 “너무 깊이 앉았습니다” 피드백을 낼 수 있다.

- **엉덩이(고관절) 각도:** 몸통(혹은 허벅지와 수직선) 대비 허벅지 기울기 각도로 정의할 수 있다. 이는 **상체 기울기와 무릎 굽힘의 복합 지표**라 볼 수 있다. 예를 들어 상체가 많이 숙여지면 엉덩이 각도는 작아진다. 한 연구에서는 올바른 스쿼트의 고관절 각도를 좌우 엉덩이 각도의 평균으로 정의하고, 적정 범위를 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 로 두었다. 그 범위를 벗어나면 “엉덩이가 너무 내려갔습니다(혹은 덜 내려갔습니다)”라는 지시를 했다고 보고한다. 이처럼 고관절 각도는 **깊이와 상체 기울임의 균형**을 나타내므로, 시스템이 이를 모니터링하여 **과도한 상체 숙임**이나 **과소/과대 굴곡**을 감지할 수 있다.
- **발목 각도(배측굴곡 각):** 스쿼트 진행 중 무릎 위치와 연동된다. 발목 배측 굴곡 각도가 충분히 나오지 않으면, 뒤꿈치가 들리거나 무릎 진행이 제한된다. 시스템은 발목 각도가 예를 들어 $^{**}0^{\circ}$ (중립) ** 에서 30° 정도까지 정상 범위라 보고, 만약 하강 동작 중 10° 미만에 머문다면 “발목 가동성 부족” 신호로 인식할 수 있다. 하지만 2D 카메라로는 발목 각도 직접 계산이 어려울 수 있으므로, **무릎 전진 거리**로 대체하기도 한다.
- **척추 각도:** 척추 만곡을 정량화하기 위해 **몸통 기울기(Trunk angle)** ** 와 **골반 기울기(Pelvic tilt)** ** 의 차이를 활용할 수 있다. 몸통 기울기는 지면 수직선 대비 흉추축의 각도로, 예를 들어 상체가 완전히 세워져 있으면 0° , 45° 숙이면 45° 로 표현된다. 골반 기울기는 골반의 전후경사 각도로, 중립을 0° 로 두고 전방경사 시 양의 각, 후방경사 시 음의 각으로 표기 가능하다. **척추 중립 상태**에서는 몸통 기울기와 골반 기울기의 차이가 정상 허리 만곡각(약 15° 내외)을 나타낸다. 만약 이 차이가 급격히 감소하면(즉 골반이 많이 따라 움직이면) 허리가 굽은 것으로 판단할 수 있다. 시스템은 이러한 척추각 지표를 실시간 계산해, 일정 임계 이상 변하면 오류로 인식하도록 설계한다.
- **상대 거리 및 비율(Relative Distances/Proportions):** 절대 각도뿐 아니라, 신체부위 간 거리 비율도 중요한 판단 기준이 된다.
 - **무릎-발끝 상대 위치:** “무릎이 발끝을 넘는지”는 오래된 논쟁거리지만, 현대 운동역학에서는 **약간 넘는 것은 괜찮지만 지나치게 넘어가면 문제**라고 본다. 시스템은 **무릎의 수직선 투영이 발끝 선상에서 얼마나 앞에 있는지**를 체크할 수 있다. 예를 들어, 무릎 선이 발끝보다 5cm 이상 앞에 있으면 “무릎이 너무 앞으로 나갔습니다”를 경고하고, 반대로 무릎이 발끝에 한참

못 미치면 “조금 더 무릎을 굽혀도 좋습니다”라고 안내할 수 있다. 특히 **뒤꿈치 들림**과 연계하여, 무릎-발끝 거리가 큰데 뒤꿈치까지 들렀다면 이는 명백히 발목 부족/무릎과부하 패턴이므로 즉시 교정 대상이다. 실제 OpenCV 기반 구현 사례에서는 **“무릎 선이 발끝보다 0.1 (정규화된 좌표) 이상 앞으로 나가면 오류”**로 간주하고 **“무릎이 발끝을 넘지 않게”** 지시했다고 한다.

- **무릎-엉덩이 높이 차이:** 이는 **허벅지의 평행 여부**를 나타내는 지표다. 예를 들어 허벅지가 지면과 평행이면 무릎과 엉덩이 높이가 같다. 시스템은 **무릎 관절점과 엉덩이 관절점의 y좌표 차이**를 계산해, 차이가 0이면 허벅지 평행, 무릎이 더 높으면 얇은 스쿼트, 무릎이 더 낮으면 깊은 스쿼트로 볼 수 있다. 이를 토대로 “허벅지를 평행되게 낮추세요” 또는 “너무 깊게 앉았습니다”를 판단한다. 특히 왼쪽/오른쪽 다리의 높이차도 체크할 수 있는데, 좌우 무릎 높이차가 크면 체중이 한쪽으로 치우쳤거나 비대칭 동작을 하는 것이므로 “좌우 균형을 맞추세요” 피드백도 가능하다.
- **발 간격 대비 무릎 간격 비율:** 정면에서 **발목 간 거리 대비 무릎 간 거리**를 보면 내반/외반 경향을 숫자로 파악할 수 있다. 예컨대 발목 간 거리가 40cm인데 무릎 간 거리가 30cm라면 내반이 있는 것. 시스템은 이 **“비율 (무릎간/발목간)”**을 계산해 1보다 작으면 내반, 1보다 크면 외반으로 볼 수 있다. 물론 개인의 기본 체형이 있기에 한계가 있지만, 동적 변화(내려갈 때 비율 변화)가 크다면 오류 신호다. 이를 이용해 “무릎 간격 유지”를 모니터링하고 조언할 수 있다.
- **상체 숙임과 무릎 진행의 상관성:** 상체가 숙여진 정도(몸통 기울기 각)와 무릎 전진 정도(무릎-발끝 거리 또는 발목 각도) 사이의 균형도 중요 지표다. 너무 상체만 숙이고 무릎은 안 굽힌 경우 혹은 반대로 무릎만 너무 내밀고 상체는 세운 경우 모두 부자연스러운 자세다. 연구에 따르면 **상체 전경각이 경골 전경각보다 스쿼트 무릎부하 예측에 더 중요**하다고 한다. 시스템은 **몸통 기울기 대 경골 기울기 비율**을 분석해, 이상적 비율(보통 1:1에 가까움)이 깨지는지 볼 수 있다. 만약 몸통이 훨씬 많이 기울었다면 “상체가 너무 숙여졌습니다. 조금 더 가슴을 들어주세요”라고 한다. 반대로 몸통은 세웠는데 무릎만 앞으로 심하게 나갔다면 “무릎이 너무 앞으로 나갔습니다. 엉덩이를 더 쓰세요” 같은 피드백으로 이어질 수 있다.
- **시간에 따른 거리 변화(속도):** 거리와 각도의 **“변화율(velocity)”**도 궤적 분석의 한 부분이다. 예를 들어, 내려갈 때 일정 속도로 부드럽게 내려가야 하는데 중간에 속도 변화가 급격하면(예: 바닥에서 튕기듯 반동) 이는 잘못

된 패턴일 수 있다. 시스템은 **위치 데이터의 미분(속도)과 가속도**를 추정해, 부드러운 곡선인지, 불규칙한지 검사할 수 있다. 다만 이는 고난도 기능이므로 1차 구현에서는 각도와 위치 임계값에 집중하고, 추후 세련된 피드백에 활용하는 것이 현실적이다.

- **움직임 궤적(Movement Trajectory):** 스쿼트 동작은 단발적인 자세가 아니라 연속된 움직임이므로, **궤적 데이터**가 오류 감지에 활용될 수 있다.
 - **관절의 이동 궤도 추적:** 예를 들어 **무릎의 이동 경로**를 추적하면, 내반이 있으면 궤적이 안쪽으로 휘었다가 나오는 식으로 나타날 수 있다. **이상적인 무릎 궤적**은 거의 직선으로 앞쪽-약간 외측 방향이지만, 내반이 있는 사람은 무릎이 안쪽으로 굽은 곡선을 그릴 수 있다. 이러한 **곡률**이나 **궤적 편차**를 분석해 “무릎이 흔들립니다” 같은 피드백 가능하다.
 - **바벨 혹은 상체 중심 궤적:** 만약 사용자가 바벨을 들고 있다면, **바벨의 수직 이동 궤도**를 직선에 가깝게 유지하는 것이 이상적이다. 카메라가 이를 포착할 수 있다면, 바벨이 앞뒤로 크게 흔들리면 자세 오류 신호다. 혹은 바벨 없이라도 ****몸통 중심(COG)****이 이동하는 경로를 볼 수 있다. 내려갈 때 뒤로 갔다가 앞으로 오는 궤적이라면 균형이 흔들린 것이라 피드백할 수 있다.
 - **속도-리듬 패턴:** 궤적의 시간 프로파일로 **컨트롤 정도**를 파악할 수도 있다. 너무 **빠르게 내려갔다가 (포음없이) 바로 튕겨 올라오면** 동작이 통제되지 않은 것일 수 있다. 물리치료에서는 “바닥에서 튕기지 말고 근육의 힘으로 올라오라”고 지시한다. 시스템은 하강 속도가 어떤 임계 이상으로 빠르고, 최저점에서 정지 없이 반전된다면 “너무 반동을 사용하지 마세요. 천천히 컨트롤하면서 올라오세요.”라고 알려줄 수 있다.

임계값 설정과 개인화: 위에서 말한 각도, 거리, 궤적 요소들은 일반적 기준선을 제시하지만, 사람마다 신체 비례와 유연성이 다르므로 **개인화된 임계값**이 필요하다. 초기에는 문헌과 전문가 의견에 기반한 일반 기준으로 적용하고, 추후 사용자의 누적 데이터로 그 사람만의 패턴과 한계를 파악해 임계값을 조정할 수 있다. 예컨대 발목 유연성이 매우 부족한 노년 사용자는 **처음부터 무릎-발끝 거리 허용치**를 좀 높게(더 앞으로 나가도 허용) 설정하고 점진적으로 개선된 만큼 기준을 엄격히 할 수 있다. AI 시스템은 이러한 ****적응형 기준(adaptive threshold)****을 학습하게 설계하는 것이 이상적이다.

정리하면, 스쿼트 분석을 위한 **핵심 요소**는 (a) **관절 각도 및 이에 따른 정상/비정상 범위**, (b) **신체 부위간 거리비와 정렬 관계**, (c) **동작 궤적과 속도 패턴**이다. 시스템은 매 프레임(혹은 실시간 스트림)마다 이들 값을 계산해서 현재 동작이 미리 정의된 “올바른 폼”

범주 내인지 비교한다. 그리고 특정 요소가 기준에서 벗어나면 해당 오류에 mapping된 피드백 메시지를 즉각 출력한다. 이러한 ****규칙 기반 판단(rule-based decision)****은 이해하기 쉽고 구현이 비교적 간단하나, 사전에 정한 기준에 의존하므로 **사람마다 다른 미묘한 차이**를 놓칠 수 있다. 따라서 다음 절에서는 이러한 요소들을 AI 모델이 어떻게 학습하고 일반화할 수 있게 구조화할지 다룬다.

4.2 AI 모델의 교정 포인트 구조화 및 학습 방식

AI 기반 자세 교정 시스템은 **머신러닝/딥러닝 모델**을 활용하여 자동으로 자세 오류를 감지하고 교정 포인트를 판단할 수 있다. 이를 위해서는 위에서 논의한 특징들을 모델이 이해할 수 있는 방식으로 입력하고, **출력은 교정 피드백과 연결**되도록 구조화해야 한다.

1) 데이터 입력 및 특징 표현: 우선 인체의 **관절 좌표 데이터**(예: 2D 화면상의 x,y 좌표, 혹은 3D 좌표)가 모델의 입력이 된다. 이때 원시 좌표 자체보다는, 앞서 정의한 ****유의미한 특징 값들(각도, 거리 비율 등)****을 계산하여 입력 피처로 사용하는 것이 학습 효율을 높일 수 있다. 예를 들어 하나의 스쿼트 동작을 표현하기 위해, **프레임별**로 다음과 같은 벡터를 만들 수 있다:

- $v = [\text{무릎각(좌/우)}, \text{엉덩이각}, \text{발목각(좌/우)}, \text{몸통기울기}, \text{골반기울기}, \text{무릎-발끝거리비(좌/우)}, \text{무릎-발목간거리비}, \dots]$. 이러한 피처 벡터들이 시간 순으로 나열된 시퀀스로 한 번의 스쿼트가 표현된다. 모델에 따라서는 **시계열 컨볼루션이나 RNN/LSTM 계열**을 사용해 동작 패턴 전체를 분석할 수도 있고, 아니면 **프레임별 분석 + 규칙 적용**으로 충분할 수도 있다.

대안적으로, **딥러닝 기반 자세 분류 모델**은 원시 관절 좌표를 그대로 입력으로 받아 알아서 특징을 뽑기도 한다. 예컨대 17개 관절의 2D 좌표라면 34차원의 벡터 시퀀스가 입력된다. 딥러닝은 여러 레이어를 통해 특정 각도 조합이나 패턴을 내재적으로 감지할 수 있다. 그러나 훈련 데이터가 많이 필요한 단점이 있다. 개발 초기에는 **설정된 임계 기반**을 우선 활용하고, 데이터 축적 후 **학습 기반 모델**로 고도화하는 접근이 현실적이다.

2) 출력 구조화: 모델이 취할 출력은 단순히 “양호/불량” 같은 이진 분류가 아니라, **어떤 부위의 어떤 오류인지**를 식별하는 다중 분류 또는 다중 레이블 예측이 되어야 한다. 예를 들어 가능한 출력 클래스를 미리 정의해볼 수 있다:

- 클래스 0: 올바른 자세 (교정 필요 없음)
- 클래스 1: 무릎 내반 오류
- 클래스 2: 무릎 외반 오류
- 클래스 3: 척추 굴곡(등 둥굽음) 오류

- 클래스 4: 요추 과신전 오류
- 클래스 5: 뒤통치 들림 오류
- 클래스 6: 기타/복합 오류 ...

이처럼 분류 문제로 만들면, 모델은 입력된 자세 데이터에 대해 이 중 가장 해당하는 클래스를 출력하게 된다. 각 클래스는 고유의 피드백 메시지와 연결된다. 만약 동시에 여러 오류가 있을 경우는 어떻게 할 것인가? 이때는 ****다중 레이블 분류 (multi-label classification)****로 접근하여, 각 오류 항목마다 신뢰도 점수를 예측하도록 설계할 수 있다. 예컨대 모델이 $y = [p_1, p_2, \dots, p_N]$ 형태로 각 오류 유형에 해당할 확률(또는 점수)을 출력하고, 시스템은 그 중 가장 높은 p 값을 가진 오류를 우선 처리하거나, 일정 임계 이상인 오류들을 모두 사용자에게 알려줄 수 있다. 다만 한 번에 여러 피드백을 주면 혼란을 주므로, **점수가 가장 높은 한두 개 오류만 피드백**하는 것이 바람직하다.

3) 지도 학습 vs. 규칙 기반 하이브리드: AI 모델을 완전히 **지도학습**시키려면, 대량의 스쿼트 영상 데이터를 수집하고 각 프레임이나 구간마다 “어떤 오류 상태인지” 레이블링해야 한다. 예컨대 수천 명의 스쿼트 수행 데이터를 모아, 전문가가 프레임별로 “이때 무릎 내반 발생”, “이때 척추 굴곡” 등을 태그하는 작업이 필요하다. 이는 현실적으로 방대한 작업이다. 따라서 **규칙 기반과 ML 기반의 혼합** 전략이 유효하다. 먼저 규칙 기반 임계치를 활용해 비교적 명확한 오류 케이스들을 자동 수집하여 초기 학습데이터로 삼는다. 예를 들어 시스템을 가동해 여러 사람의 스쿼트를 받되, 무릎간 거리비가 0.8 이하인 프레임은 자동으로 “내반” 레이블을 달고, 허리각이 30° 이상 굴곡된 건 “척추 굴곡” 레이블을 달아주는 식이다. 물론 이 자동 레이블이 완벽하지 않겠지만, 초반에는 모델 학습을 위한 **거친 라벨링**으로 활용한다. 이후 모델이 어느 정도 예측을 하면, 사람이 그 결과를 검토/수정하는 **active learning** 방식으로 정제해나간다. 이런 iterative한 접근을 통해 점차 모델의 정밀도를 높일 수 있다.

4) 교정 포인트의 우선순위와 의사결정: 앞서 말한 다중 레이블 출력에서, 어떤 오류를 먼저 교정할지는 시스템이 전략을 가져야 한다. 예를 들어 **안정성에 중대한 오류**(허리 굴곡, 심한 무릎 내반 등)를 최우선으로 하고, 그 다음 경미한 오류(발가락 약간 들림 등)는 차순위로 둔다. 이를 위해 각 오류 클래스에 **가중치**를 둘 수 있다. 예컨대 허리 굴곡 오류는 심각도 점수 1.0, 무릎 내반 0.9, 뒤통치 들림 0.7, 무릎 외반 0.6 이런 식으로. 모델이 확률을 주더라도, 시스템은 $\text{adjusted_score} = \text{weight} * \text{probability}$ 로 조정하여 최종 어떤 메시지를 낼지 결정한다. 이러한 가중치는 의학적 지식과 경험을 반영하여 설정한다.

5) 실시간 연속 판정과 이력 관리: 스쿼트는 연속 동작이므로, 한 프레임의 오류 판정이 있더라도 바로 피드백을 줄지, 잠시 추이를 볼지도 고려해야 한다. 예를 들어 **일시적인 흔들림인지 일관된 패턴 오류인지** 구분이 필요하다. 이를 위해 **연속 프레임 상의 출력**

안정성을 볼 수 있다. 5프레임 연속으로 “무릎 내반” 신호가 강하게 나오면 실제 오류로 판단, 하지만 1프레임만 나오고 다시 정상이라면 노이즈로 간주하는 식이다. 이런 **이력 기반 필터링**은 거짓된 경고를 줄여준다. 딥러닝적으로는 LSTM이 이 역할을 부분적으로 해줄 수도 있다. 혹은 간단히 **최근 n초간 평균 점수**를 내는 방법도 있다.

6) 모델의 피드백 모듈화: AI 모델이 직접 자연어 문장을 생성하는 것은 아직 한계가 있다. 대신 **모델 출력 -> 미리 정의된 메시지 매핑** 방식을 사용한다. 즉, 모델은 오류코드나 키워드들을 내놓으면, 그에 해당하는 준비된 한국어 문장을 시스템이 출력한다. 예를 들어 모델이 [valgus=0.95, spine_round=0... p50, ...] 형태로 출력되었다고 가정해보자. 이 경우 시스템은 해당 벡터를 해석하여, 예를 들어 valgus 신뢰도가 가장 높으므로 “무릎 내반” 오류로 판단하고 그에 대응하는 메시지를 출력하는 식이다. 이런 구조를 통해 **AI 모델의 출력층과 피드백 모듈**을 분리하여 관리할 수 있다. 결국 AI 모델은 복잡한 관절 데이터로부터 ****오류 유형(교정 포인트)****을 식별하는 역할을 하고, 식별된 오류에 대한 구체적 메시지는 사람이 설계한 대로 제공된다. 이로써 전문가의 지식과 AI의 학습 능력을 결합한 **하이브리드 시스템**이 구현되는 것이다.

요약하면, 기술적 구현을 위해:

- 관절 각도, 거리 등의 **정량 기준**을 설정하고,
- 이를 기반으로 **룰(rule)**과 머신러닝을 병행하여 오류를 판별하며,
- AI 모델의 출력은 **오류 종류 코드로** 구조화하고, 미리 준비된 **교정 지시문**과 연동시킨다.
- 실시간 시스템 특성을 고려해 **연속 프레임 필터링**과 **우선순위 결정 로직**을 적용한다.

이러한 접근은 **초기에 명확한 기준으로 안정성을 확보**하면서, 점진적으로 **AI의 학습에 따라 정밀도를 높이고 사용자별 최적화**로 나아갈 수 있게 해준다. 궁극적으로, AI 모델은 수많은 데이터를 통해 사람 전문가가 미처 정의하지 못한 미세한 패턴까지 포착할 수 있고, 이는 새로운 교정 포인트 발굴이나 기존 기준 개선에 기여할 것이다. 개발자는 지속적인 피드백 루프를 통해 시스템의 판단 알고리즘(룰/모델)을 업데이트함으로써, 시간이 지날수록 더욱 똑똑한 실시간 자세 교정이 가능해질 것이다.

5. 대상자 유형에 따른 디렉팅 기준 차이 및 근거

스쿼트 자세 교정 지침은 **사용자의 개별 특성**에 따라 달라질 수 있다. 초보자, 노약자, 여성, 재활 환자 등 각각의 집단은 체력 수준과 신체 조건, 목표가 다르므로, 실시간 디렉팅 전략도 이를 고려해 차별화되어야 한다. 이 절에서는 다양한 대상자 유형별로 **중점되어야 할 교정 기준의 차이**와 그 근거를 설명한다.

5.1 초보자(운동 입문자)를 위한 기준

특징: 스쿼트에 익숙지 않은 초보자는 **자세 오차가 크고 전신 협응이 미숙한** 경우가 많다. 또한 근력이 부족하여 천천히 통제하기보다 **반동에 의존하거나 균형을 잃기** 쉽다. 이들은 ****운동 감각(proprioception)****이 발달되어 있지 않아, 잘못된 자세를 스스로 알아채지 못하는 경우가 많다.

교정 지침의 초점: 초보자에게는 **가장 기본적인 자세 원칙 몇 가지를 우선 숙지**시키고, 세부사항은 차차 교정하는 것이 바람직하다. 처음부터 너무 많은 요구를 하면 혼란을 느껴 오히려 운동을 기피할 수 있다. 따라서 *****척추 중립 유지**", **"무릎-발끝 정렬*****과 같이 **핵심 원칙 2~3가지**를 일관되게 강조한다. 또한 초보자는 **즉각적 피드백**에 매우 의존하므로, 매 반복 또는 매 세트마다 바로바로 피드백을 주는 것이 도움이 된다. 실제 운동학습 이론에서도 *****Novice** 단계에서는 빈번한 (실시간 또는 즉각적) 피드백이 수행 향상에 이롭다***고 한다.

실시간 디렉팅 전략: 초보자는 동작을 아직 **몸으로 체득하지 못했기 때문에**, AI 시스템은 **모범 동작을 학습**시키는 코치 역할을 해야 한다. 예를 들어 처음 스쿼트를 시작할 때는 **속도보다는 정확성**을 목표로 하도록, **"천천히 내려가며 자세를 맞추세요"**라고 안내한다. 내려가는 매 순간 **중요 체크포인트**(예: 허벅지 평행 시점)를 알려주고, 그때 자세를 교정해보게 하는 것도 교육에 좋다. 또한 **거울모드 영상**이나 **화면 속 실시간 뼈대 모델**을 보여주어, 초보자가 자기 자세를 **시각적으로 인지**하면서 교정하도록 돕는 방법도 효과적이다. 이때 AI의 피드백은 **거울 뒤의 트레이너 음성**처럼 작동한다 - **"좋아요, 그대로 가슴 펴고... 무릎 조금 더 벌리고... 그렇죠!"** 등 단계별 지시를 실시간 내보낸다.

주의사항: 초보자에게 너무 엄격하게 피드백을 주면 **위축**될 수 있으므로, **긍정 강화**도 섞어준다. 잘한 부분이 있다면 **" 좋습니다! 지금 자세를 유지하세요"**라고 즉시 칭찬/강화하고, 잘못된 부분은 하나씩 차근차근 고치도록 유도한다. 예컨대 처음엔 허리 굽음만 신경쓰게 하고, 허리가 펴지면 그 다음에 무릎 벌리는 것을 지도하는 식으로 **단계적 피드백**을 적용한다. 또한 초보자는 근력이 약해 깊이 앉기 어려울 수 있으므로, 애초에 **부분 범위 스쿼트나 의자 스쿼트**부터 시작하게 하고, 기술 숙련에 따라 점차 깊이를 늘리도록 한다. AI 시스템은 이러한 프로토콜(예: **"초반 2주는 박스 스쿼트"**)을 알고 있어야 하며, 초보자 모드에서는 **깊이보다는 정렬에 집중한 피드백**만 제공하는 게 좋다.

근거: 초보자 대상 연구들에서, **올바른 기술 습득 초기 단계**가 이후 성과와 부상 예방에 결정적임을 시사한다. 제대로 배우지 못한 습관은 나중에 고치기 어려우므로, AI 시스템은 처음 접하는 초보자에게 **코치 이상의 세심함**으로 기본기를 주입해야 한다. 즉각적인 교정과 반복 학습을 통해, 초보자는 차츰 ****내적 피드백 능력(스스로 느끼고 교정)****도 향상시킬 수 있다. 피드백 빈도는 초반에 높게, 점차 **자기 주도적인 움직임 탐색을 유도**

하며 줄여가는 것이 이상적이다 – 이를 **페이딩(fading) 전략**이라고 하며, AI도 일정 수준 이상 정확도가 유지되면 피드백 빈도를 줄여 **사용자의 자율적 조절 능력**을 기르는 방향으로 설계할 수 있다.

5.2 노약자(고령자)를 위한 기준

특징: 노약자는 **근력과 관절 가동범위가 감소**하고, 균형 감각도 젊은 사람보다 떨어져 있다. 또한 골밀도나 관절 연골 상태가 악화되어 있어 **과도한 부하나 범위**는 위험할 수 있다. 스쿼트 동작이 일상생활 동작(의자 앉았다 일어서기 등)과 밀접하지만, 노약자에게는 이것조차 힘겨운 경우가 있다.

교정 지침의 초점: 노약자에게는 **안전성과 기능 회복**이 최우선 목표다. 따라서 실시간 디렉팅도 **안전한 범위 내에서 운동**하도록 유도하고, 조금이라도 올바르게 수행하면 격려하여 **자신감과 참여도**를 높이는 데 중점을 둔다. 구체적으로:

- **부분 범위 스쿼트 또는 의자 스쿼트 권장:** 처음부터 깊이 앉는 풀스쿼트는 요구 근력이 크고 무릎에 부담이 될 수 있다. **의자 스쿼트(Chair Squat)**, 즉 의자를 놓고 앉았다 일어서기를 연습하게 하면 안전하다. 실시간 피드백도 “의자를 터치하고 일어서세요”처럼 의자를 활용한 큐를 줄 수 있다. 연구에 따르면 **의자 스쿼트는 고령자에게 고관절 위주의 부하를 주면서도 안정성을 높여, 일상 동작 기능 향상에 효과적**이다. 반면 그냥 스쿼트는 무릎과 발목 부하가 크므로 초기에는 의자 스쿼트를 많이 활용한다.
- **균형 보조와 속도 조절:** 노약자는 균형을 잃는 걸 가장 두려워한다. 따라서 AI 시스템은 필요시 벽이나 봉을 잡고 하도록 권고할 수 있어야 한다. 예: “균형이 불안하면 의자를 잡고 진행하세요.” 또, 동작 속도를 느리게 하여 통제력을 높인다. “하나, 둘, 셋에 맞춰 앉고, 천천히 일어납니다.” 이런 리듬 피드백은 노약자에게 안정감을 준다.
- **통증 모니터링:** 노년층은 퇴행성 관절염 등으로 통증이 있을 수 있다. 실시간 디렉팅 시 “무릎 통증이 심하면 깊이를 더 줄입니다” 등의 안내를 포함하여, **자기 통증에 귀 기울이도록** 교육한다. AI가 직접 통증을 알 수 없지만, **사용자 보고 기능**(버튼이나 음성)으로 “아프다” 신호를 받으면 즉시 “운동을 중단하고 휴식하세요” 혹은 “범위를 줄입니다” 같은 피드백을 내도록 설계한다.

디렉팅 차별화: 젊은 층과 달리, 노약자에게는 **강한 교정보다는 긍정 강화와 안전장치** 안내가 많아야 한다. 예를 들어 등이 조금 굽었다고 바로 “허리 굽었습니다”보다는, 일단 가능한 범위 내에서 움직인 것을 칭찬하고, 점진적으로 교정한다. **“아주 잘하셨습니다! 이제 이번에는 등을 조금 더 펴볼까요?”** 식의 어투가 좋다. 또한 노약자는 청력이나 인지속도가 저하된 경우도 있으므로, **말을 천천히 또박또박** 하거나 **간단한 단어**를 써야 한

다. 시각적인 큰 글씨 안내나 화면 데모도 함께 제공하면 이해를 돕는다.

근거: 노인에게 스쿼트를 시킬 때 주의할 점은 이미 여러 연구와 가이드라인에 나와 있다. Wang 등의 연구에서, **의자 스쿼트 시 고관절에 더 큰 각도와 힘이 가며, 일반 스쿼트 시 무릎과 발목에 더 큰 부하가 걸린다고** 보고했다. 또한 **의자 스쿼트가 앉았다 일어서기 일상동작과 유사하여 기능적 이득이 크고 안전하다고** 했다. 이처럼 노인에게는 **안정 장치가 있는 변형 스쿼트**를 활용하는 것이 과학적으로 타당하다. AI 시스템도 이러한 과학적 배경을 반영하여, 노약자 모드에서는 **의자 높이, 손잡이 사용 여부 등의 요소를 고려한 코칭**을 해야 한다. 노약자의 운동 참여를 높이는 심리 요소도 중요한데, 즉각적 피드백으로 “잘 하고 있다”는 느낌을 주면 **자신감과 운동 지속 의지**가 커진다. 그러므로 전체적으로 **친절하고 안전지향적인 피드백**이 노약자 대상 디렉팅의 핵심이라 할 수 있다.

5.3 여성 사용자에 따른 기준 차이

특징: 여성은 남성에 비해 **신체 구조와 근력 분포**가 약간 다르다. 일반적으로 ****하지의 Q-각도(골반-무릎 각도)****가 남성보다 크고 고관절이 넓어, 스쿼트 시 **무릎이 내측으로 모이는 경향**이 더 있을 수 있다. 또한 상대적으로 상지근력이 약해 바벨을 들고 하는 스쿼트에서 불리할 수 있지만, 순수 하체 힘도 트레이닝 경험이 적으면 부족할 수 있다. 일부 여성은 ****무릎 통증(연골 연화증 등)****을 호소하거나 **관절 과가동성**을 갖는 경우도 있어 주의가 필요하다.

교정 지침의 초점: 여성에게 특별히 다른 운동 원리가 적용되는 것은 아니지만, **통계적으로 흔한 부상 위험 요소**를 고려해 지도하는 것이 좋다. 핵심 포인트는 **무릎 정렬과 코어 안정성**이다.

- **무릎 내반 예방 강조:** 여성 운동선수의 ACL 부상이 남성보다 흔한 것은 동적 무릎 내반이 두드러지기 때문이라는 연구들이 있다. 실제로 한 피로도 연구에서 **여성은 피로 시 남성보다 무릎이 더 심하게 내반되고 요추 굴곡이 증가했다고** 보고되었다. 따라서 AI 피드백도 여성 사용자의 **무릎 트래킹**에 매우 민감하게 반응하여, 조금이라도 내반 조짐이 보이면 즉각 교정하도록 설계한다. 예컨대 남성은 약간의 내반은 허용범위라 해도, 여성 모드에서는 **허용 오차를 더 낮게** 잡고 “무릎 벌리세요” 알림을 빠르게 주는 식이다.
- **코어 및 자세 의식:** 여성은 임신이나 출산 등의 경험으로 **복부 근력**이 약하거나 골반 기저근 안정성이 떨어진 경우가 있다. 또 상대적으로 상체 근육량이 적으면 무게중심 유지에 불리하여 상체가 흔들릴 수 있다. 그러므로 **코어 조임, 가슴 펴기** 같은 큐를 자주 주어 중심을 잡도록 한다. 특히 거울이 없는 홈트 환경이라면, AI가 **자세 모니터 역할**을 충실히 해서 사용자가 본인의 허리/골반 위치를 인지하

도록 해야 한다.

- **과신전 교정:** 일부 유연성이 좋은 여성은 **과신전**된 자세를 취하기도 한다. 예를 들어 무릎을 완전히 펴 잠그거나, 허리를 과도하게 젖혀 엉덩이를 빼는 과전만 자세 등을 무의식중에 취할 수 있다. 이는 관절에 부담을 준다. AI는 **관절 잠김을 탐지**하여 “무릎을 살짝 굽혀 긴장 유지” 또는 “허리를 너무 젖히지 마세요” 같은 디렉션을 준다.

디렉팅 차별화: 여성 사용자에게는 **날씬한 허벅지를 만들기 위한 스쿼트** 등 미용적 동기가 많을 수도 있다. 이에 따라 피드백 톤을 **동기부여** 쪽으로 조절할 수 있다. 예를 들어 “엉덩이에 힘이 제대로 들어가고 있어요! 힙 업에 효과적입니다” 같은 코멘트를 occasionally 제공하면 흥미를 높일 수 있다. 또한 여성은 **감정적 교류**를 중요시하는 경향이 있어, AI가 너무 기계적이면 금세 흥미를 잃을 수 있다. 따라서 **친구처럼 대화하는 피드백** (예: “좋아요, 이제 3개만 더 힘내봐요!”)이 남성보다 더 효과적일 수 있다.

근거: 연구적으로 보면, **여성의 무릎 부상 예방**을 위한 피드백 전략이 많이 개발되어 있다. 예를 들어 점프 착지 훈련 시 “무릎을 밖으로, 가슴을 들고 착지” 같은 코칭이 여성 선수의 내반을 감소시켰다는 보고들이 있다. 또, 앞서 인용한 JSAMS 2024 연구에서는 **여성이 피로 누적 시 남성보다 무릎 각도 악화 및 척추 굴곡 증가**를 보였다고 하여, 여성은 **피로에 따른 자세 무너짐**에 주의해야 함을 시사했다. 따라서 AI도 반복 횟수가 많아져 피로 징후(속도 느려지고 무릎 흔들림 등)가 보이면 “잠시 휴식하세요” 혹은 “세트를 종료합니다”라고 권고하는 기능이 필요할 수 있다, 특히 여성 사용자에게.

요약하면, 여성 대상 스쿼트 교정의 차이는 ****무릎 안전(내반 교정)****에 대한 민감도를 높이고, **코어와 균형**을 강조하며, **심리적 측면**에서는 격려와 공감을 자주 표현하는 것이다. 이는 여성들이 더 안전하고 즐겁게 운동을 지속하게 함으로써 결과적으로 운동 효과도 높이고 부상 위험은 낮추는 방향으로 기여할 것이다.

5.4 재활 환자를 위한 기준

특징: 재활 환자라 함은 **부상이나 수술 후 회복 중인** 사람들을 말한다. 무릎 전방십자인대 재건술 후, 또는 허리 디스크 치료 후 등 다양한 경우가 있다. 이들은 **정상인보다 가동성이나 근력이 제한되어** 있을 뿐 아니라, 잘못된 움직임이 통증이나 재부상으로 바로 이어질 수 있다. 따라서 **정확한 폼과 통증 없는 범위**가 무엇보다 중요하다. 동시에 재활의 목표는 점진적으로 기능을 회복하는 것이므로, 초기에는 제한적으로 하다가도 차츰 **운동 강도와 범위를 늘려야** 한다.

교정 지침의 초점: 재활 환자에게 실시간 디렉팅을 적용할 때는, **해당 환자의 재활 프로토콜**을 반영해야 한다. 무조건 일반 기준을 적용하면 안 된다. 몇 가지 사례별로 살펴보면:

- **무릎 재활 (예: ACL 재건 후):** 초기 몇 개월간은 무릎에 큰 전단력이나 회전력이 가해지지 않도록 해야 한다. 그래서 **힙-바이어스드(hip-biased) 스쿼트**를 먼저 적용한다. 힙바이어스드란 고관절 위주로 앉아서 둔근에 부하를 싣고, 무릎은 살짝 굽히는 정도로 하는 스쿼트다. 예를 들어 **박스 스쿼트나 반범위 스쿼트**가 해당된다. AI 피드백은 “엉덩이 중심으로 앉고 무릎은 많이 안 굽힙니다” 같이 가이드할 수 있다. 문헌에 따르면 재활 초기 **엉덩이 중심 스쿼트는 대퇴사두근에 부하를 덜 주어 슬개대퇴 관절 스트레스를 줄인다고** 한다. 시간이 지나 안정성이 확보되면, **점차 무릎 부하를 늘리는 knee-biased squat**으로 전환한다. AI는 환자 상태 정보를 입력받아 (의사가 허용한 범위 등) 그에 따라 **단계별 다른 피드백**을 제공해야 한다. 예컨대 12주차 이전엔 “무릎 90도까지만”이라 하고, 이후엔 “조금 더 깊게 앉아보세요”로 바뀌는 식이다.
- **허리 재활 (예: 요추 디스크):** 척추 수술이나 디스크 환자는 **척추 중립 유지와 코어 안정화**가 절대적이다. 스쿼트를 시킬 때도 무게는 없이 맨몸으로, 벽에 기대서 하거나 하이박스 스쿼트 등으로 매우 조심히 시작한다. AI는 지속적으로 “복근 힘 주고 천천히 하세요”를 상기시키고, 허리 각도 조금만 벗어나도 경고를 준다. 또한 이들은 **동작 범위보다 정확도 위주로** 훈련해야 하므로, 깊이보다는 자세 안정에 대한 피드백을 많이 한다. 통증 모니터링도 중요하다 – 허리 통증이 나타나면 즉시 중단을 권고한다. 재활환자의 AI는 **일반 모드보다 민감한 센서처럼** 작동해야 한다.
- **기타 (고관절, 발목 재활 등):** 예를 들어 발목 염좌 재활이라면, 편측 다리로 체중 싣는 걸 두려워한다. AI는 양발 고르게 체중 분배를 신경써서 알려주고, 필요한 경우 발목 보조기 착용 상태를 인식해 (사용자가 입력하거나, 모션 특성으로 추론) 그에 맞춰 운동 난이도를 조절한다. 고관절 인공관절 수술 후라면, 너무 깊이 굴곡하지 않도록 범위를 제한하는 등 특정 각도 제한을 준수한다.

디렉팅 차별화: 재활 환자 모드의 AI는 일종의 *****디지털 치료사*****처럼 행동해야 한다. 즉, 단순한 운동 코치가 아니라 **치료 목적**을 이해하고, 의료 전문가가 제시한 범위 내에서 피드백을 제공해야 한다. 그러기 위해서는 **개인별 프로토콜 데이터** 입력이 필요하다. 예컨대 “환자 A: 무릎 수술 8주차, 현재 0~60° 허용” 이런 정보를 세팅하면, AI가 그 각도를 넘지 않도록 알려주는 식이다. 일반인 같으면 “조금 더 깊게”라고 할 상황에서도, 재활 환자에게는 “현재 각도로 충분합니다. 더 깊게 가지 마세요”라고 차별화한다.

또한 재활 환자는 **심리적으로 위축되어** 있는 경우가 많아, 작은 통증에도 불안을 느낀다. AI는 이를 고려해 **심리적 지지 멘트**도 곁들인다. “지금 잘하고 있어요. 통증이 없다면 조금 더 내려가 볼까요? 아프면 바로 멈추세요.” 이런 식으로 사용자의 불안을 낮추고, 용기를 북돋우며, 그러나 안전선은 넘지 않게 가이드한다.

근거: 재활 분야에서는 **즉각적 피드백이 운동 재학습을 촉진**한다는 보고가 많다. 예를 들어 보행 재활에서 실시간 보행 속도 피드백을 주면 보행 개선이 빨라지는 식이다. 스쿼트 역시 재활 운동으로 사용될 때, 실시간 교정은 환자가 **다시 정상 패턴을 습득**하는 데 도움이 된다. 특히 수술 후 잘못된 보상 패턴 (예: 무릎 아파서 건강한 쪽 다리만 쓰는 등)을 방치하면 다른 부위에 문제가 생기는데, AI 코치는 “왼쪽 다리도 똑같이 쓰세요” 등을 바로잡아줄 수 있다. 또한, 앞서 인용한 스포츠 재활 가이드에 따르면 **재활 초기에 힙 중심 스쿼트, 후기엔 무릎 중심 스쿼트로 변화**시키는 것이 추천되는데, 이런 **프로그램 단계를** AI가 알고 피드백을 조절한다면 훨씬 정교한 재활이 가능하다.

마지막으로, 재활 환자는 데이터 축적이 특히 중요하다. AI 시스템은 환자의 매일매일 **관절 가동범위, 통증 호소 정도, 근력 향상 추이** 등을 기록하여 의료진에게 제공할 수 있다. 이는 본 주제에서 약간 벗어나긴 하지만, 실시간 피드백 시스템이 가진 부가가치이다. 예컨대 “오늘은 어제보다 5° 더 깊게 앉았습니다. 잘 하고 있습니다!” 같은 피드백은 환자에게 동기를 주고, 의사에게는 환자 상태를 파악하는 데이터를 준다.

이상을 종합하면, AI 기반 스쿼트 자세 교정 시스템은 **개별 사용자 특성에 맞춘 섬세한 대응**이 필요하다. 초보자는 기본기에 집중하고 빈번한 교정으로 빠른 학습을 돕고, 노약자는 안전한 범위 내 동작과 자신감 형성에 중점을 둔다. 여성 사용자는 무릎 안전과 균형을 강조하며, 재활 환자는 의료 프로토콜을 준수한 상태에서 기능회복을 촉진한다. 이러한 차별화된 디렉팅은 각 집단의 생체역학적/의학적 요구를 충족시켜, **사용자에게 최적화된 코칭 경험**을 제공한다. 결국 궁극적인 목표는 모든 사용자가 **자신의 능력과 한계 안에서 올바른 스쿼트 자세를 익히고, 부상 없이 효율적으로 운동 효과를 얻는** 것이다. AI 실시간 교정 시스템은 이러한 목표 달성을 위해, 의학과 공학의 지식을 통합하여 개인 맞춤형 지도를 구현하는 역할을 하게 될 것이다.