

총설

비만 개선을 위한 다양한 운동 전략: 최신 접근법과 효과 비교

장 거¹, 황든솔², 견성환², 김지수^{1,2}

¹건국대학교 대학원 스포츠의과학과, ²건국대학교 Physical Activity & Performance (PAP) 연구소

Comparative Effects and Recent Approaches of Exercise Strategies for Obesity Management

ZHANG GE¹, Deunsol Hwang², Seunghwan Kyun², Jisu Kim^{1,2}

¹Department of Sports Medicine and Science in Graduated School, Konkuk University, Seoul, ²Physical Activity & Performance Institute (PAPI), Konkuk University, Seoul, Korea

Obesity is a multifactorial metabolic disorder characterized by energy imbalance, chronic inflammation, and insulin resistance. Regular exercise is one of the most effective non-pharmacological interventions for improving metabolic health by enhancing energy expenditure, fat oxidation, and insulin sensitivity. This review compares the physiological and metabolic effects of various exercise modalities applied for obesity management, including aerobic exercise, high-intensity interval training (HIIT), low-intensity steady-state exercise (LISS), resistance training, and concurrent exercise. Aerobic exercise improves cardiorespiratory fitness and promotes lipid oxidation, whereas HIIT induces rapid metabolic activation and enhances insulin sensitivity with high time efficiency. LISS provides stable fat oxidation and high adherence, particularly for obese or high-risk individuals. Resistance training increases lean body mass and resting metabolic rate, thereby supporting long-term weight maintenance. Concurrent exercise combines the advantages of both aerobic and resistance training, improving body composition, mitochondrial function, and metabolic flexibility. Collectively, exercise interventions play a crucial role in reversing obesity-related metabolic dysfunction, and personalized, combined, and sustainable exercise strategies are most effective for long-term obesity management.

Keywords: Obesity, Exercise strategy, Aerobic exercise, Resistance training, High-intensity interval training, Concurrent trainin

Received October 23, 2025
Revised November 20, 2025
Accepted December 2, 2025

Corresponding author

Jisu Kim

Department of Sports Medicine and Science in Graduated School, Konkuk University, 413 JoongJangBi-Building, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Korea

Tel: +82-2-2049-6034

E-mail: kimpro@konkuk.ac.kr

서론

비만은 현대 사회에서 가장 빠르게 증가하는 주요 공중보건 문제 중 하나이다. 세계보건기구(world health organization, WHO)에 따르면, 2022년 기준 전 세계 인구의 약 8명 중 1명(약 12.5%)이 비만 상태이며, 성인 인구 중 약 25억 명이 과체중이고 이 중 8억 9,000만 명이 비만으로 분류된다.¹

비만은 단순히 과도한 에너지 섭취와 신체활동 부족의 결과만이 아니라, 고열량·저영양 식품의 접근성 증가와 같은 환경적 요인, 사회·경제적 구조, 유전적 소인 및 심리사회적 요인이 복합적으로 작용하여 발생하는 다요인적 질환이다. 이러한 비만으로 인한 전 세계 경제적 부담은 2030년까지 연간 약 3조 달러에 이를 것으로 예상되며, 향후 더욱 증가할 것으로 전망되어 심각한 글로벌 보건 위협으로 인식되고 있다.^{1,2}

비만의 예방 및 치료를 위한 비약물적 중재(non-pharmacological intervention) 중 운동(exercise)은 가장 효과적이고 과학적으로 검증된 전략 중 하나로 평가된다. 규칙적인 운동은 에너지 소비를 증가시키고, 인슐린 감수성(insulin sensitivity)과 미토콘드리아 기능을 향상시키며, 염증 반응을 억제함으로써 대사 건강을 개선한다고 보고되어 있다.³

이러한 운동의 유익한 효과가 다수의 연구에서 일관되게 보고되고 있음에도, 최근 연구들은 운동의 강도, 빈도, 형태에 따라 비만 개선 효과가 상이하게 나타남을 보고하고 있다.⁴ 이에 따라 고강도 인터벌 운동(high-intensity interval training, HIIT), 저항성 운동(resistance training), 복합운동(concurrent exercise) 등 다양한 접근법이 제시되고 있으나, 각 운동 전략의 대사적 기전과 효과를 통합적으로 비교·평가한 문헌은 여전히 부족하다. 따라서 본 논문은 최신 연구 근거를 바탕으로 비만 개선을 위한 주요 운동 전략의 접근법과 효과를 종합적으로 비교·분석함으로써, 효과적이고 과학적 근거에 기반한 운동 처방의 방향성을 제시하고자 한다.

본 론

1. 운동의 대사적 기전(mechanistic effects of exercise)

1) 에너지소비 및 지방산화 증가(energy expenditure and fat oxidation during exercise)

운동은 에너지 소비를 극대화하고 지방 산화를 촉진함으로써 비만 개선에 핵심적인 역할을 수행한다.

운동이 시작되면 골격근은 급격히 증가한 에너지 요구량(energy demand)을 충족하기 위해 ATP (adenosine triphosphate)의 지속적인 재합성이 필요하다. 이를 위해 인체는 산소 섭취량(oxygen uptake, VO_2)을 증가시키고, 심박출량(cardiac output) 및 혈류 재분배(blood flow redistribution)를 재조정하여 활성 근육으로 산소를 효율적으로 공급한다. 이러한 생리적 반응은 유산소 대사(aerobic metabolism)를 통해 지방 및 탄수화물의 산화를 촉진시키는 기반이 된다.⁵

운동 강도와 지속 시간은 에너지 기질(energy substrate)의 이용 비율에 중요한 영향을 미친다. 저강도·장시간 운동(low-intensity, long-duration exercise)에서는 지방산(fatty acid)이 주요 연료로 사용되며, 이는 혈중 유리지방산(free fatty acid)과 근육 내 중성지방(intramuscular triglyceride)의 산화를 통해 ATP를 생성한다. 반면, 고강도 운동(high-intensity exercise)에서는 근글리코겐(glycogen)과 혈중 포도당(glucose)의 이용이 급격히 증가하며, 해당과정(glycolysis)을 통한 빠른 에너지 생산이 우세하게 작용한다.⁶

이러한 기질 선택의 변화는 호흡교환비(respiratory exchange ratio, RER)로 정량화할 수 있으며, 강도가 증가할수록 지방 산화율은 감소하고 탄수화물 이용률이 상대적으로 높아지는 경향을 보인다.⁷ 운동 후에는 초과산소섭취(excess post-exercise oxygen consumption, EPOC) 현상이 나타나며, 이는 운동 종료 후에도 산소 섭취량이 안정 수준으로 즉시 회복되지 않고 일정 시간 동안 높은 상태로 유지되는 것을 의미한다. 이 과정에서 체내 산소 결핍을 보충하고, 젖산염(lactate)의 이용, ATP·크레아틴 인산 재합성, 체온 회복 등 에너지 항상성을 유지하기 위한 대사 활동이 지속된다. 이러한 EPOC 반응은 운동 후 지방 산화를 촉진시켜, 총 에너지 소비량(total energy expenditure)을 증가시키는 중요한 생리적 메커니즘으로 작용한다.⁸

세포 수준에서 보면, 운동에 의한 반복적 에너지 요구는 AMPK (activated protein kinase, AMPK)의 활성화를 유도하며, 미토콘드리아 생합성(mitochondrial biogenesis)과 지방산 산화 관련 효소(CPT-I, CPT-II, β -HAD 등)의 발현을 증가시킨다. 특히, AMPK-PGC-1 α (peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator-1 α) 경로는 지방산의 β -산화(β -oxidation)를 촉진하고, 미토콘드리아 내 효율적인 ATP생산을 가능하게 한다. 이러한 분자적 적응은 장기적으로 지방 이용 효율(fat utilization efficiency)을 향상시키며, 결과적으로 체지방 감소(fat mass reduction)와 대사적 유연성(metabolic flexibility)의 회복을 유도한다.⁹

따라서 규칙적인 운동은 단순한 에너지 소비 증가뿐만 아니라, 지방 산화 효율 및 미토콘드리아 기능 개선을 통해 비만의 대사적 병태를 근본적으로 완화한다. 이러한 생리적·분자적 적응은 운동 강도와 지속 시간, 훈련 상태에 따라 다르게 나타나며, 이는 훈련 강도·지속 시간·훈련 상태에 따라 달라지며, 비만 개선을 위한 맞춤형 운동 전략 수립의 근거가 된다.¹⁰

2) 인슐린 감수성 개선과 포도당 대사조절(improvement of insulin sensitivity and glucose metabolism through exercise)

비만은 인슐린 수용체 신호전달의 장애로 인한 인슐린 저항성(insulin resistance)을 특징으로 하며, 이는 포도당의 세포 내 이동과 이용률을 저하시켜 대사 불균형을 초래한다. 규칙적인 운동은 이러한 병태를 완화하는 가장 효과적인 비약물적 중재로, 포도당 섭취(glucose uptake) 및 글리코겐 저장(glycogen storage) 능력을 회복시키는 것으로 보고되어 있다.¹¹

운동 중 근육수축(muscle contraction)은 인슐린 의존 경로와는 별개로 AMPK 및 Ca^{2+} /calmodulin-dependent protein kinase (CaMK)를 활성화하여, 포도당 수송체(glucose transporter 4, GLUT4)의 세포막 이동(translocation)을 촉진한다. 그 결과, 인슐린 저항성이 존재하더라도 근육 내 포도당 흡수(glucose uptake in

skeletal muscle)가 증가하며, 운동 후에도 이 효과가 일정 시간 지속되어 운동 후 인슐린 감수성 향상을 유도한다.¹²

장기간의 규칙적 운동은 근육 내 미토콘드리아 밀도(mitochondrial density)와 산화 효소 활성(oxidative enzyme activity)을 증가시켜, 포도당 산화(glucose oxidation) 효율을 높이고 대사적 유연성을 회복시킨다. 이 과정에서 PGC-1 α 는 핵심 조절자로 작용하며, AMPK-p38 MAPK-PGC-1 α 경로의 활성화는 인슐린 신호 전달계와 상호보완적으로 작용한다.¹³

또한 운동은 근육과 간 조직에서 GLUT4 발현 증가, Akt 인산화(Akt phosphorylation), IRS-1 (insulin receptor substrate-1)의 활성화를 통해 인슐린 감수성을 향상시킨다. 이러한 변화는 혈당 조절능력(glycemic control)을 개선하고, HOMA-IR (homeostatic model assessment of insulin resistance) 등 대사 지표의 개선으로 이어진다.¹⁴

따라서 운동은 인슐린 의존적 경로(insulin-dependent pathway)와 비의존적 경로(insulin-independent pathway)를 모두 활성화하여, 비만 상태에서 손상된 포도당 대사와 인슐린 신호 전달(insulin signaling)을 정상화시킨다.¹⁵ 이러한 대사적 회복은 단순한 혈당 조절을 넘어 전신 대사 항상성(systemic metabolic homeostasis)을 유지하는 기반이 되며, 염증 반응 및 미토콘드리아 기능 조절과 같은 후속 대사 적응 과정으로 확장되어 비만 관련 대사 장애의 개선을 지속적으로 유도한다.

3) 염증 반응 조절 및 미토콘드리아 기능 향상(regulation of inflammation and mitochondrial function by exercise)

비만은 만성적인 저등급 염증 상태(chronic low-grade inflammation)를 특징으로 하며, 이는 지방조직에서의 면역세포 침윤과 염증성 사이토카인(inflammatory cytokines)의 과도한 분비에 의해 매개된다. 비만 시 대식세포(macrophage)는 항염증성 M2형에서 친염증성 M1형으로 전환되어 TNF- α , IL-1 β , IL-6 등의 발현을 증가시키고, 이로 인해 인슐린 신호 전달(insulin signaling)이 억제되며 전신 대사 장애가 심화된다.¹⁶

운동은 이러한 염증 반응을 다단계적으로 억제한다. 먼저, 규칙적인 유산소 및 저항성 운동은 지방세포 크기를 감소시키고 지방조직 내 혈류 및 산소 공급(oxygenation)을 개선하여 저산소 유발 염증(hypoxia-induced inflammation)을 완화한다.¹⁷ 또한 운동은 순환 내 항염증성 사이토카인(IL-10, IL-1 receptor antagonist)의 분비를 증가시키고, M1에서 M2형 대식세포로의 극화 전환(macrophage polarization shift)을 유도함으로써 조직 내 염증 수준을 낮춘다.¹⁸ 특히 IL-6 (interleukin-6)는 운동 중 골격근에서 분비되는 마이오카인(myokine)으로서, 비만 시 지방조직 유래 IL-6가 만성 염증을 악

화시키는 것과는 달리, 운동 유래 IL-6 (exercise-induced IL-6)는 AMPK 활성화, 지방산 산화 촉진, 항염증 사이토카인 유도(IL-10)를 통해 전신 대사 항상성을 회복시키는 방향으로 작용한다. 동일한 IL-6라도 지방조직의 만성·저등급 분비와 골격근의 급성·일과성 분비는 기전과 건강 효과가 상반되며, 후자는 AMPK 활성화와 항염증성 사이토카인 유도를 통해 대사 항상성 회복에 기여한다. 이러한 차별적 역할은 IL-6의 작용 환경(지속적 vs. 일시적)과 신호 경로(JAK/STAT3 vs. AMPK/PGC-1 α)에 의해 결정된다.¹⁹

운동은 또한 아디포넥틴(adiponectin)의 분비를 증가시켜 NF- κ B 신호 억제 및 항염증성 유전자 발현(anti-inflammatory gene expression)을 강화한다. 아디포넥틴은 AMPK-SIRT1-PGC-1 α 경로를 자극하여 미토콘드리아의 생합성과 기능 향상(functional capacity)을 촉진하며, 이는 지방산 산화율 증가와 산화 스트레스 감소로 이어진다.²⁰ 최근 연구에서는 탄수화물 산화과정의 부산물인 젖산염이 단순한 대사산물이 아닌 신호 분자(signaling molecule)로 작용하여 HCAR1(GPR81) 수용체를 매개로 cAMP-NF- κ B 경로를 억제하고, 지방조직과 면역세포의 염증 반응을 완화한다는 사실이 보고되었다. 이는 운동 시 증가한 젖산염이 항염증 신호로 작용하여, 운동과 대사 간의 상호작용이 단순한 에너지 소비를 넘어 면역대사적 조절(immunometabolic regulation) 수준으로 확장된다는 것을 의미한다.²¹

결과적으로, 규칙적인 운동은 AMPK-SIRT1-PGC-1 α 축을 중심으로 미토콘드리아 생합성과 기능을 향상시키며, 항염증 사이토카인 증가 → 산화 스트레스 감소 → 미토콘드리아 효율 개선의 선순환을 구축한다. 이러한 적응은 훈련 강도와 지속 시간, 훈련 상태에 따라 상이하며, 비만 개선을 위한 맞춤형 운동 전략 수립의 근거가 된다(그림 1).

2. 비만 개선을 위한 주요 운동 전략

1) 유산소 운동(aerobic exercise)

유산소 운동은 산소를 이용하여 에너지를 생성하는 지속성 신체활동(endurance-type physical activity)으로, 걷기(walking), 조깅(jogging), 자전거 타기(cycling), 수영(swimming), 계단 오르기(stair climbing), 등산(mountain climbing) 등 다양한 형태를 포함한다. 이러한 운동은 심폐지구력(cardiopulmonary endurance)을 향상시키고 지방 산화(fat oxidation)를 촉진하며, 비만 및 대사질환의 개선에 핵심적인 역할을 한다.²²

운동 중 산소 섭취량(VO_2)이 증가함에 따라 인체는 안정 시보다 더 많은 에너지를 산화적 경로를 통해 생성한다. 특히 최대산소섭취량($\text{VO}_{2\text{max}}$)의 약 50–70%에 해당하는 중강도 유산소 운동(moderate-intensity aerobic exercise)은 지방산(fatty acids)이 주요 에너지원으로 사용되며, 이 강도 구간은 최대 지방산화 강도(fatmax

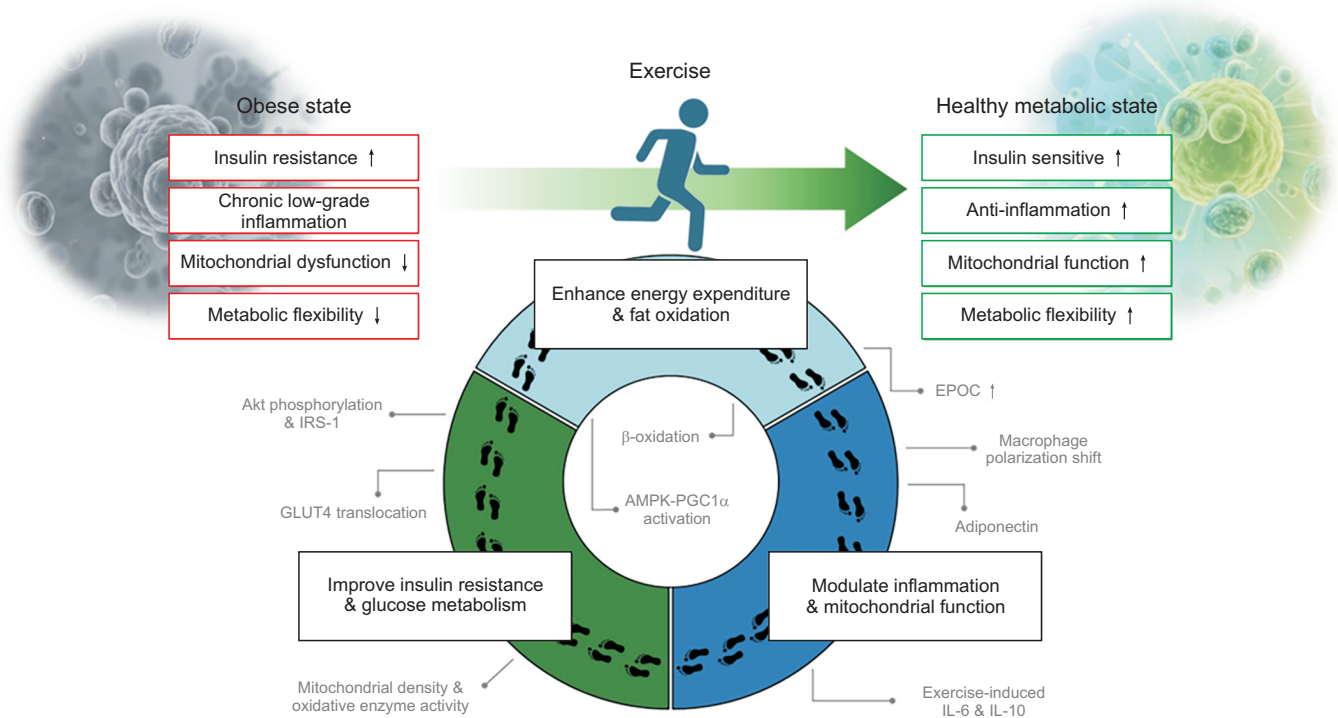


그림 1. 운동의 대사적 기전.

intensity)로 알려져 있다.²³

이러한 수준의 지속적인 유산소 운동은 총 에너지 소비량을 증가시키고 체지방 및 내장지방(visceral fat)을 감소시키는 것으로 보고된다. 임상 연구에 따르면, 주 3–5회, 회당 30–60분의 중강도 유산소 운동을 12주 이상 지속할 경우 체중(weight), 체지방률(body fat percentage), 허리둘레(waist circumference)가 유의하게 감소하며, HOMA-IR, 공복 혈당(fasting glucose), 혈중 중성지방(triglyceride), LDL 콜레스테롤이 감소하고 HDL 콜레스테롤이 증가하는 등 대사 건강이 전반적으로 개선된다.²⁴ 특히 내장지방 감소 효과는 총 체중 변화와 무관하게 나타나며, 이는 유산소 운동이 지방의 분포와 대사 활성도에 직접적인 영향을 미친다는 점을 시사한다.²⁵

유산소 운동은 또한 인슐린 감수성을 향상시키고 혈당 조절능력(glycemic control)을 개선한다. 대규모 무작위 대조군 연구 결과, 생활습관 개선 중에서도 규칙적인 유산소 운동 수행이 제2형 당뇨병 발병 위험을 58%까지 감소시킨 것으로 보고되었다.²⁶ 또한 6개월 이상의 지속적인 중강도 훈련은 골격근 내 포도당 운반체(GLUT4)의 발현을 증가시켜 포도당 이용률(glucose uptake)을 개선하는 것으로 나타났다.²⁷ 이러한 효과는 체중 감량이 없어도 나타날 수 있으며, 운동의 지속성(consistency of performance) 자체가 대사 개선에 결정적인 요인임을 시사한다.²⁸ 최근 메타분석 연구에서도 유산소 운동이 심혈관질환 위험요인(cardiometabolic risk factors)을 유의하게 개선하

는 것으로 나타났다. 6개월 이상 유산소 운동을 수행한 집단에서 평균적으로 체중 -3.4 kg, 체지방률 -2.6%, HOMA-IR -18%의 개선 효과가 보고되었으며, 이는 운동의 형태보다 규칙성과 지속성이 장기적인 체중 관리 및 대사 건강 유지에 더 큰 영향을 미친다는 점을 보여준다.²⁹

유산소 운동의 강도와 형태는 개인의 체력 수준과 비만 정도에 따라 조절될 수 있다. 비만이 심하거나 운동 초심자인 경우에는 저강도-중강도 지속운동(low-to-moderate intensity continuous training)이 가장 안전하고 지속 가능한 접근법으로 권장되며, 운동 적응 이후에는 인터벌형 유산소 운동(interval-type aerobic training)을 병행함으로써 지방 산화율과 심폐기능 향상을 보다 효과적으로 유도할 수 있다.³⁰

따라서 유산소 운동은 비만 개선뿐 아니라 체중 감량 후 유지(weight maintenance)에도 핵심적 중재로서 작용하며, 규칙적이고 장기적인 수행은 에너지 소비 증가, 체지방 감소, 인슐린 감수성 개선, 심혈관 위험 감소를 통해 비만의 병태생리적 악순환을 근본적으로 완화하는 가장 기본적이고 필수적인 운동 전략으로 평가된다.

2) 고강도 인터벌 운동(high intensity interval training)

고강도 인터벌 운동(HIIT)은 짧은 시간의 고강도 운동(high-intensity bouts)과 저강도 회복 구간(recovery intervals)을 반복하는 형

태의 운동으로, 상대적으로 짧은 시간 내 높은 에너지 소비와 대사 자극을 유도할 수 있는 전략이다. 전통적인 지속적 유산소 운동과 비교했을 때 HIIT는 운동 시간 대비 효율성(time efficiency)이 높으며, 최근 연구에서는 비만과 대사질환 개선에 유사하거나 그 이상의 효과를 보이는 것으로 보고되고 있다.³¹

HIIT의 대표적인 형태로는 전통적 인터벌 훈련(4 × 4 min at 85–95% HRmax)과 스프린트 인터벌 훈련(sprint interval training, SIT; 30초 전력 질주)이 있으며, 두 방식 모두 단기간 내 최대산소섭취량을 증가시키고 심폐지구력을 향상시킨다.³²

특히 HIIT는 고강도의 짧은 운동 구간 동안 해당과정과 지방산 산화(fat oxidation)가 동시에 활발히 일어나며, 운동 종료 후에도 운동 후 초과산소섭취(excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)가 지속되어 장시간의 에너지 소비 증가 효과를 유발한다.³³

비만 또는 대사증후군 대상을 대상으로 한 연구에서, 8–12주간의 HIIT는 체중 및 체지방률의 유의한 감소, 인슐린 감수성 향상, HOMA-IR 감소를 유도하였다.^{34,35} 또한 HIIT는 골격근 내 미토콘드리아 생합성(mitochondrial biogenesis)을 촉진하고, AMPK-PGC-1 α 경로를 활성화하여 지방산 산화능(fat oxidation capacity)을 향상시킨다.³⁶ 이러한 분자적 적응은 중강도 지속운동(MICT) 대비 짧은 훈련 시간에도 불구하고 유사하거나 더 큰 대사 개선 효과를 나타낸다.³⁷

메타분석 결과에 따르면, 10주 이상 HIIT를 수행한 비만 성인에서 체지방률 평균 -2.6%, VO₂max +14%, HOMA-IR -18%의 개선이 보고되었으며, 이는 동일 기간의 지속적 유산소 운동(MICT)과 비교해 통계적으로 비슷하거나 약간 우수한 수준이었다.³⁸ 특히 시간 제약이 있는 성인 집단이나 운동 순응도가 낮은 사람들에게 HIIT는 짧은 운동 시간(20–30분 이내)으로도 유의미한 체성분 및 대사 개선 효과를 제공하여 '시간 효율적(time-efficient)' 운동 전략으로 주목받고 있다.³⁹

임상적으로도 HIIT는 혈중 지질 개선(lipid profile improvement), 혈압 감소, 심혈관 기능 향상 등 다양한 심대사적 이점을 보이며, 당뇨병 전단계나 인슐린 저항성이 있는 대상자에서 골격근 내 GLUT4 단백질 발현 증가와 말초 인슐린 감수성 개선이 확인되었다.⁴⁰ 이러한 변화는 체중 감량 여부와 관계없이 나타나며, 운동의 대사 효율을 향상시키는 중요한 요인으로 작용한다.⁴¹ 다만, HIIT는 운동 중 심혈관 부담과 근골격계 피로가 높아 운동 경험이 부족하거나 비만도가 높은 대상자에게는 초기 단계에서 주의가 필요하다. 따라서 운동 초심자나 고위험군에서는 저강도·중강도 지속운동(LISS, MICT)을 기반으로 점진적으로 인터벌 강도를 높여가는 점진적 접근(progressive adaptation)이 권장된다.⁴²

결론적으로, 고강도 인터벌 운동은 짧은 시간 내 높은 대사 자극과 지방 산화 효과를 유도하는 효율적인 비만 개선 전략으로, 규칙적 수행

시 체지방 감소, 인슐린 감수성 향상, 심폐기능 강화를 통해 비만의 대사적 병태를 개선하는 강력한 운동 형태로 평가된다.

3) 저강도 지속운동(low intensity steady-state)

저강도 지속운동(low intensity steady-state, LISS)은 비교적 낮은 강도에서 일정한 속도로 장시간 수행하는 지속성 유산소 운동 형태로, 대표적으로 빠른 걷기(brisk walking), 가벼운 자전거 타기(light cycling), 수중운동(aquatic exercise) 등이 포함된다.

운동 강도는 일반적으로 최대산소섭취량의 약 40–60%, 또는 최대 심박수의 60–70% 수준에서 설정되며, 피로도가 낮고 부상 위험이 적어 비만, 고혈압, 대사증후군 및 운동 초심자 집단에서 안전하고 지속 가능한 운동 전략으로 권장된다.⁴³

저강도 운동은 에너지 기질 이용 측면에서 지방산(fatty acid) 산화율이 가장 높은 강도 영역에서 수행되기 때문에 지속적인 지방 연소(fat oxidation)를 유도한다. 특히 장시간(≥ 45 분)의 LISS는 혈중 유리지방산(free fatty acid)의 동원(mobilization)을 증가시키고, 미토콘드리아 내 β -산화(fatty acid β -oxidation) 효소 활성도를 향상시켜 체지방 축적을 완화한다.⁴⁴ 또한 장시간 수행에도 피로 누적이 크지 않다는 점에서 지속 가능한(low-fatigue, sustainable) 대사 자극을 제공한다.⁴⁵ 임상연구에서도 주 4–6회, 회당 45–60분의 LISS를 12주 이상 지속할 경우 체중, 체지방률, 허리둘레, 내장지방이 유의하게 감소하는 것으로 보고된다.^{46,47}

특히 고강도 운동을 수행하기 어려운 비만 중년층 또는 심혈관계 질환 위험군에서 혈압, 공복혈당, 중성지방(triglyceride)의 개선 효과가 확인되었다.⁴⁸ 이러한 대사 개선은 체중 감량 여부와 관계없이 나타나며, 규칙적인 LISS 수행만으로도 인슐린 감수성과 HOMA-IR이 개선된다는 보고가 있다.⁴⁹ 또한 LISS는 자가지각 운동 강도(RPE, rating of perceived exertion)가 낮고, 피로 누적 및 근육통 발생 빈도가 적어 운동 순응도(exercise adherence)가 높은 것으로 알려져 있다.⁵⁰ 이러한 특징은 운동 초기 단계의 비만 환자나 고위험군의 운동 습관 형성에 특히 중요하다.

한편, 고강도 운동 대비 절대적 에너지 소비량은 적지만, 장시간·정기적인 수행을 통해 총 에너지 소비(total energy expenditure)와 지방산 산화 누적량(cumulative fat oxidation)이 크게 증가할 수 있다.⁵¹ 최근의 체계적 문헌고찰(meta-analysis)에서도 LISS가 비만 또는 과체중 성인에서 체지방 감소(-2.1%), HOMA-IR 개선(-12%), 혈압 감소(-4.5 mmHg) 효과를 유의하게 나타내며, 이는 중강도 지속운동(MICT)과 유사한 수준으로 보고되었다.⁵² 특히 LISS는 부상 위험이 낮고 피로 회복이 빠르다는 점에서 고강도 운동(HIIT)에 비해 운동 지속률(adherence rate)이 높고, 장기적인 체중 관리 및 대사 건강 유지에 유리한 접근법으로 평가된다.⁵³

따라서 저강도 지속운동은 비만 및 대사질환 예방·치료의 초기 단계에서 심혈관계 부담이 적고 피로 누적이 낮은 저위험·고순응도(low-risk, high-adherence) 운동 전략으로 적합하며, 장기간 규칙적 수행을 통해 지방 산화 촉진, 인슐린 감수성 향상, 심혈관 대사 개선을 유도하는 안정적이고 지속 가능한 운동 형태로 권장된다.

4) 저항성 운동(resistance training)

저항성 운동(resistance training, RT)은 외부 저항(external load) 또는 체중(body weight)을 이용하여 근육 수축을 반복함으로써 근육량(muscle mass)과 근력(muscular strength)을 향상시키는 훈련 형태이다. 대표적인 예로는 웨이트 트레이닝(weight training), 탄성 밴드를 이용한 운동(resistance band exercise), 그리고 맨몸 근력운동(bodyweight exercise) 등이 있다.

저항성 운동은 비만 및 대사질환 관리에서 근육 중심의 대사적 재조정(muscle-centered metabolic adaptation)을 유도하는 핵심 전략으로 평가된다.⁵⁴ 저항성 운동의 가장 큰 효과는 체지방량(lean body mass) 증가와 기초대사율(resting metabolic rate, RMR) 향상에 있다. 근육조직은 대사적으로 활발한 조직으로, 근육량 증가가 곧 에너지 소비량의 장기적 증가로 이어진다. 12주 이상 주 2–3회의 저항성 운동을 수행할 경우 체중 변화가 없더라도 체지방량을 감소 및 RMR 증가(약 7–10%)가 보고되었다.⁵⁵ 또한 근육량의 증가는 운동 후 초과산소 섭취(EPOC)를 높여, 운동 종료 후에도 에너지 소비가 지속되는 효과를 제공한다.⁵⁶

또한 인슐린 감수성과 포도당 대사(glucose metabolism) 개선에도 뚜렷한 효과를 보인다. 골격근은 체내 포도당의 약 70–80%를 흡수·이용하는 주요 기관으로, 근육량 증가와 함께 GLUT4 수송체 발현(glucose transporter 4 expression)이 증가함으로써 인슐린 의존적 포도당 섭취가 개선된다.⁵⁷ 실제로 16주간의 RT 프로그램은 비만 성인에서 HOMA-IR 15–25% 감소, 공복 혈당(fasting glucose) 및 HbA1c 개선 효과를 나타냈으며, 이는 체중 감량 없이도 나타나는 독립적인 대사 개선 효과로 보고되었다.^{58,59}

이와 함께 저항성 운동은 근육 내 미토콘드리아 효소 활성(mitochondrial enzyme activity)과 AMPK-PGC-1 α 신호경로를 부분적으로 자극하여, 지방산 산화 효율을 높이고 대사적 유연성(metabolic flexibility)을 회복시킨다.⁶⁰ 이와 함께 근육에서 분비되는 마이오카인(myokine)—특히 IL-6, irisin, myonectin 등—은 지방조직의 지방 분해(lipolysis)와 간의 지방산 산화를 촉진하며, 운동에 의한 항염증 및 대사 개선 효과를 매개하는 주요 인자로 작용한다.⁶¹

비만 또는 대사증후군 대상자를 대상으로 한 연구에서도 RT는 체중 변화와 관계없이 체지방 감소, 근육량 증가, 혈중 지질 프로파일(lipid profile) 개선, 혈압 감소 등의 긍정적 변화를 유도한다.⁶²

특히 고강도(70–85% 1RM) 저항성 운동은 저강도(40–50% 1RM)보다 근육 내 인슐린 감수성 증가 및 지방산 산화율 향상이 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 보고되었다.⁶³

또한 노인 및 비만 중년층에서 RT는 근육 내 지방 침착(intramuscular fat accumulation)을 감소시켜, 근육 품질(muscle quality)과 기능적 체력(functional capacity)을 동시에 개선한다.⁶⁴ 최근 메타분석에서도 RT는 비만 성인에서 평균 체지방량 -1.8%, 체지방량 +1.4 kg, HOMA-IR -13%의 개선을 유도하며, 이러한 변화는 중강도 유산소 운동과 병행될 경우 더욱 증폭되는 것으로 나타났다.⁶⁵ 특히 장기간 RT 수행자는 체중 감량 후 근육 손실을 최소화하고, 체중 유지(weight maintenance)에 효과적이며, 근육 중심의 대사 항상성(muscle-centered metabolic homeostasis)을 유지하는 데 중요한 역할을 한다.⁶⁶

따라서 저항성 운동은 단순한 근력 향상을 넘어, 근육량 증가 → RMR 상승 → 인슐린 감수성 개선 → 지방산 산화 촉진으로 이어지는 일련의 대사적 선순환을 형성한다. 규칙적인 저항성 운동은 비만의 병태생리적 특징인 에너지 소비 저하와 인슐린 저항성을 근본적으로 완화시키는 핵심적 운동 중재로 평가된다.

5) 복합 운동(combined exercise)

복합 운동(concurrent exercise)은 유산소 운동(aerobic exercise)과 저항성 운동(resistance training)을 병행하여 수행하는 형태로, 두 운동의 장점을 동시에 활용함으로써 심폐기능, 근력, 체성분, 대사 건강을 종합적으로 개선하는 전략이다.⁶⁷

유산소 운동이 지방 산화 및 심혈관 기능 개선에, 저항성 운동이 근육량 증가 및 기초대사율(RMR) 향상에 기여한다는 점에서, 복합 운동은 비만 개선 및 체중 유지에 가장 균형 잡힌 접근법으로 평가된다.⁶⁸ 복합 운동의 주요 생리적 이점은 근육량 유지와 체지방 감소의 동시 달성에 있다. 단독 유산소 운동은 장기간 수행 시 근육량 손실(sarcopenic effect)을 유발할 수 있으나, 저항성 운동의 병행은 이를 효과적으로 방지하며 체중 감량 후 체지방량 유지(lean mass preservation)에 기여한다.⁶⁹

또한 복합 운동은 AMPK-PGC-1 α 경로를 통한 미토콘드리아 생합성(mitochondrial biogenesis)과, Akt-mTOR 경로를 통한 단백질 합성(protein synthesis)을 동시에 자극하여, 지방 산화와 근합성이 균형적으로 이루어지는 대사 환경을 조성한다.⁷⁰

비만 및 대사증후군 환자를 대상으로 한 임상연구에서도 복합 운동의 효과가 일관되게 보고되고 있다. 12주간의 유산소+저항성 병행 훈련은 단독 유산소 운동군보다 체지방량(-3.5% vs. -2.2%)과 HOMA-IR (-22% vs. -14%)의 개선 폭이 더 컸으며, 공복 인슐린, 혈중 중성지방(triglyceride), LDL 콜레스테롤이 유의하게 감소하였

다.⁷¹ 이러한 복합적 효과는 근육 내 GLUT4 수송체 발현 증가, 지방 조직 내 염증성 사이토카인(TNF- α , IL-6) 감소, 아디포넥틴(adiponectin) 분비 증가 등 다양한 분자 수준의 변화를 통해 매개된다.⁷²

또한 복합 운동은 심폐기능(cardiorespiratory capacity)과 근기능(muscular strength)을 동시에 향상시켜, 대사 증후군 위험인자(복부 비만, 고혈압, 고혈당, 이상지질혈증)의 통합적 개선에 기여한다.⁷³ 16 주간의 복합 훈련은 비만 중년 여성에서 체지방률 4.7% 감소, 근육량 2.1% 증가, HDL 콜레스테롤 8.5% 상승을 유도하여, 단일 운동군보다 뚜렷한 체성분 및 대사 개선 효과를 보였다.⁷⁴ 노인 및 대사질환 위험군에서도 복합 운동은 낙상 위험을 감소시키고, 기능적 체력(functional fitness)을 향상시키는 효과가 확인되었다.⁷⁵

한편, 복합 운동의 순서(order of exercise)와 구성 비율에 따라 대사 적응 양상이 달라질 수 있다. 전통적으로 제기된 간섭효과(interference effect) 즉, 유산소 운동 후 즉시 수행되는 저항성 운동이 근합성 신호(mTOR signaling)를 억제할 수 있다는 우려는, 운동 강도와 휴식 간격(rest interval)이 적절히 조절될 경우 실제 임상적 영향은 크지 않은 것으로 보고된다.⁷⁶ 최근 연구에서는 유산소 → 저항성 순서로 수행할 때 인슐린 감수성 및 지방 산화 개선 효과가, 저항성 → 유산소 순서에서는 근합성 및 근육량 증가 효과가 상대적으로 크다는 결과가 제시되었다.⁷⁷ 따라서 운동 목적에 따라 두 형태의 병행 순서와 비중을 조절하는 것이 바람직하다.

체계적 문헌고찰에 따르면, 12주 이상의 복합 운동 프로그램은 비만 성인에서 평균 체지방률 -3.2%, 체지방량 +1.5 kg, VO₂max +12%의 개선을 유도하였으며, 이는 단독 운동보다 전반적으로 높은 효과 크기(effect size)를 나타냈다.⁶⁹ 특히 중년 여성, 제2형 당뇨병 환자, 노인 집단에서 복합 운동은 체성분 개선과 대사 건강 유지의 가장 효율적인 형태로 제시되고 있다.^{78,79}

따라서 복합 운동은 유산소 운동과 저항성 운동의 생리적 이점을 결합한 통합적 접근으로, 체지방 감소와 근육량 유지, 인슐린 감수성 및 심혈관 기능 개선을 동시에 달성할 수 있다. 규칙적이고 장기적인 복합 운동 수행은 대사적 유연성(metabolic flexibility)을 회복하고 비만의 병태생리적 불균형을 근본적으로 개선하는 데 기여하는 핵심적 운동 전략으로 평가된다.

3. 운동 전략 간 효과 비교(comparative analysis of exercise modalities)

비만 개선을 위한 다양한 운동 전략은 공통적으로 에너지 소비 증가, 인슐린 감수성 향상, 지방 산화 촉진을 통해 대사 건강을 개선하지만, 그 효과의 정도와 기전은 운동의 형태, 강도, 빈도, 지속시간에 따라 서로 다르게 나타난다. 유산소 운동(aerobic training), 고강도 인터벌 운

동(HIIT), 저강도 지속운동(LISS), 저항성 운동(resistance training), 그리고 복합 운동(concurrent training)은 모두 비만 관리에 효과적인 전략으로 제시되어 왔으나, 각 운동은 특정 대사 경로와 조직 수준의 적응 기전을 달리하여 작용한다. 이에 본 장에서는 주요 운동 전략 간의 대사적 효과, 체성분 변화, 인슐린 감수성 개선 및 실용성을 중심으로 비교·분석하였다(표 1).

우선 에너지 소비 및 지방 산화 효율 측면에서, 유산소 운동과 HIIT은 모두 높은 에너지 소비를 유도하지만 시간 대비 효율성에서는 HIIT이 우세하다.⁸⁰ 중강도 지속운동(MICT)은 지방산 산화(fat oxidation)를 통한 안정적 에너지 생산을 유도하는 반면, HIIT은 단시간 내 해당과정과 운동 후 초과산소섭취(EPOC)를 증가시켜 운동 종료 후 수 시간 동안 대사율을 상승시킨다.^{33,38} 따라서 HIIT은 단기간의 강력한 대사 자극(short-term metabolic activation)을 유도하지만, 장기간 지방 산화율의 누적 효과는 MICT나 LISS와 같은 지속성 운동에서 더 뚜렷하게 나타난다. 특히 LISS는 상대적으로 낮은 피로도와 안정된 대사 환경에서 내장지방 감소에 탁월한 효과를 보이는 것으로 보고된다.⁴⁶

인슐린 감수성 및 포도당 대사 개선 효과에서도 운동 형태별 차이가 뚜렷하다. 운동은 수축 의존적(contraction-mediated) 및 인슐린 의존적(insulin-mediated) 경로를 통해 골격근의 포도당 흡수(glucose uptake)를 증가시키는데, 특히 HIIT과 저항성 운동은 GLUT4 수송체 발현 증가, AMPK-PGC-1 α 경로 활성화, 그리고 미토콘드리아 효소 활성 증가를 통해 포도당 산화능을 회복시키는 것으로 알려져 있다.⁸¹ 임상연구에서도 16주간의 HIIT 또는 RT는 비만 성인에서 HOMA-IR 20–25% 감소, 공복 혈당 및 HbA1c 개선을 유도하였으며, 이는 중강도 지속운동보다 더 큰 개선 효과로 보고되었다.⁸² 반면, LISS는 강도가 낮아 인슐린 감수성 향상 폭은 제한적이지만 피로 누적이 적고 스트레스 호르몬(코르티솔) 상승이 완화된 고위험군(고혈압·당뇨·노년층)에서 안정적이고 지속 가능한 중재로 권장된다.⁴⁹ 한편 복합 운동(concurrent training)은 유산소 운동의 GLUT4 발현 증가 효과와 저항성 운동의 근육량 유지 및 RMR 상승 효과를 동시에 제공하여 인슐린 감수성 개선에서 시너지 효과를 나타낸다. 체계적 문헌고찰에 따르면, 복합 운동은 단일 운동 대비 인슐린 감수성 개선 효과가 약 1.3배 높게 보고되었다.⁷¹

체성분 및 근육 대사 적응 측면에서도 운동 형태 간 차이는 뚜렷하다. 유산소 운동은 체중 및 체지방 감소에 효과적이지만 근육량 증가에는 제한적이며, 저항성 운동은 근육량 증가와 RMR 향상을 통해 장기적 체중 유지에 기여한다.⁶² 특히 저항성 운동은 근육 내 myokine(IL-6, irisin, myonectin) 분비를 자극하여 지방조직의 지방분해(lipolysis)와 간의 지방산 산화(fat oxidation)를 촉진하며, 항염증 효과를 통해 대사증후군의 염증성 병태를 완화한다.⁶¹

복합 운동은 두 기전을 동시에 자극함으로써 체지방률 감소와 근육

표 1. 비만 개선을 위한 주요 운동 전략의 대사적 효과 및 프로토콜

운동 형태	대사적 효과				프로토콜			참고사항	참고문헌
	주요 효과	주요 적용 대상	장점	단점	강도	빈도	지속시간	운동 예시	
유산소 운동(Aerobic exercise)	지방 산화를 증가, 심폐지구력 향상, 인슐린 감수성 개선, 혈중 지질 개선	대부분의 성인, 비만 초기단계, 체중 감량 목적자	안전성 높음, 지속 가능, 심혈관질환 위험 감소	장기 수행 시 근육량 손실 가능, 시간 소요 많음	50–70% VO_2 max 또는 60–75% HRmax	주 3–5회	30–60분/회	빠른 걷기, 조깅, 실내 자전거, 수영 등	22–30
고강도 인터벌 운동(HIIT)	EPOC 증가, 미토콘드리아 활성화, 인슐린 감수성 및 지방산 산화 개선	시간 제약이 있는 성인, 대사증후군 환자, 중등도 이상 체력자	시간 효율 높음, 빠른 대사 자극, VO_2 max 향상	피로 누적 및 부상 위험, 초심자에게 부적합	85–95% HRmax (4 x 4 protocol 또는 SIT)	주 3회	20–30분	트레드밀 인터벌(4분 달리기 + 3분 걷기), 사이클 스프린트, 계단 달리기	31–42
저강도 지속운동 (LISS)	지방산 산화 극대화, 혈당·혈당 조절, 스트레스 호르몬 저하	초심자, 고위험군 (비만·고혈압·당뇨), 노년층	피로 낮음, 순응도 높음, 안전성 우수	에너지 소비 속도 낮음, 효과 발현까지 장기 필요	40–60% VO_2 max 또는 55–65% HRmax	주 4–6회	45–60분/회	느린 걷기, 저속 사이클, 가벼운 하이킹 등	43–53
저항성 운동 (Resistance training)	근육량 증가, RMR 상승, GLUT4 발현 증가, 인슐린 감수성 개선	근감소 위험자, 비만 중·후기 단계, 노년층	체성분 개선, 장기 체중 유지, 근력 기능 향상	초기 부상 위험, 기술 습득 필요	60–80% 1RM	주 2–3회	45–60분/회	스쿼트, 벤치프레스, 렉슬다운, 덤벨 쥔 등의 마신 웨이트, 푸시업, 플랭크 등의 맨몸 운동 등	54–66
복합 운동(Con-current exercise)	지방 산화 + 근합성 균형, 인슐린 감수성 향상, 심혈관 기능 강화	대부분의 비만 및 대사질환자, 체중 감량 후 유지기	전반적 대사 개선 + 체성분 유지의 종합적 개선 효과	프로그램 설계 복잡, 시간 소요 다소 많음	유산소 60–70% VO_2 max + 저항성 60–75% 1RM	주 3–5회	60–75분/회	유산소와 저항성 운동 병행, 순서에 따라 효과 차이 있음: 유산소 → 저항성 (지방산 산화↑), 저항성 → 유산소 (근합성↑)	67–79

Abbreviations: VO_2 max, maximum rate of oxygen consumption; HRmax, maximum heart rate; MICT, moderate-intensity continuous training; HIIT, high-intensity interval training; EPOC, excess post-exercise oxygen consumption; SIT, sprint interval training; LISS, low-intensity steady-state; RMR, resting metabolic rate; GLUT4, glucose transporter type 4; 1RM, one repetition maximum.

량 유지를 동시에 달성할 수 있으며, 특히 중년 여성과 노년층에서 이 효과가 두드러지게 나타난다.⁷⁴ 12주 이상의 복합 운동은 비만 성인에서 평균 체지방률 -3.5%, 제지방량 +1.2 kg, $VO_2\max$ +10%의 개선을 유도하였으며, 단일 운동 대비 효과 크기(effect size)가 더 높았다.⁷⁹

비만의 중요한 병태 중 하나인 대사유연성(metabolic flexibility) 저하는 운동을 통해 회복이 가능하다. HIIT과 복합 운동은 AMPK-p38-PGC-1 α 축을 활성화시켜 미토콘드리아 생합성 및 지방산 산화 효소를 증가시키고, 탄수화물과 지방 대사 간 전환 효율을 향상시킨다.³⁶ 또한 저항성 운동은 NF- κ B 경로 억제와 항염증성 마이오카인 분비 증가를 통해 만성 저등급 염증(low-grade inflammation)을 완화하여 대사 기능을 안정화 시킨다.¹⁸ 이러한 다중 신호경로 활성화(multimodal signaling adaptation)는 AMPK, PGC-1 α , mTOR, IL-6, adiponectin 등 다양한 대사 조절인자를 통해 운동에 의한 통합적 대사 재조정(metabolic reprogramming)을 유도한다.⁸³

실제적 측면에서의 지속 가능성(adherence) 과 현장 적용성(practicality) 역시 운동 효과를 결정짓는 주요 요인이다. HIIT은 짧은 시간 내 높은 대사 자극을 유도하지만, 피로 누적 및 부상 위험으로 인해 장기 수행 지속률(long-term adherence)이 낮을 수 있다.⁸⁴ 반면 LISS나 중강도 유산소 운동은 낮은 강도로 인해 순응도와 지속성이 높으며, 특히 초심자나 대사질환 위험군에게 적합하다.⁵⁰

저항성 운동은 체성분 개선과 기초대사율 유지에 탁월하지만, 기구 접근성과 기술 습득이 필요하다는 점에서 초기 진입장벽이 존재한다.⁶⁵ 복합 운동은 상대적으로 시간 소요가 크지만, 심폐지구력·근력·체성분 개선 효과를 모두 달성할 수 있고 심리적 만족도도 높아 장기적인 체중 유지 및 건강관리 측면에서 가장 효과적인 접근법으로 평가된다.⁸⁵

종합적으로 보면, HIIT은 단기간의 효율적 대사 자극, LISS와 MICT은 지속 가능한 지방 산화와 높은 순응도, 저항성 운동은 근육 중심의 대사 안정화 및 장기 체중 유지, 복합 운동은 지방·포도당 대사 및 체성분 균형 개선의 통합 효과를 나타낸다. 따라서 비만 개선을 위한 최적의 전략은 단일 형태의 운동에 국한되지 않고, 유산소와 저항성 운동을 주기적으로 병행(periodized combination)하거나 개인의 대사 상태에 맞게 맞춤형 프로그램(individualized prescription)으로 설계하는 것이다. 결국, 비만의 근본적 개선은 특정 운동 형태보다 운동의 다양성과 지속성(consistency and variety)에 의해 결정된다고 할 수 있다.⁷⁶

결론

비만은 단순한 체중 증가를 넘어, 에너지 대사 불균형과 인슐린 저항성, 염증 반응, 근육량 감소 등 복합적인 생리적 교란이 동반되는 대사

질환이다. 이러한 비만의 병태생리적 특성을 개선하기 위해 운동은 가장 효과적이고 과학적으로 검증된 비약물적 중재로 평가되며, 그 형태와 강도, 빈도에 따라 대사적·기능적 효과가 다르게 나타난다.

본 종설은 유산소 운동, 고강도 인터벌 운동(HIIT), 저강도 지속운동(LISS), 저항성 운동, 복합 운동 등 대표적인 운동 전략의 기전과 효과를 종합적으로 비교·분석하였다. 그 결과, 유산소 운동은 지속적인 지방 산화와 심폐지구력 향상, HIIT은 짧은 시간 내 높은 대사 자극과 인슐린 감수성 개선, LISS는 높은 안전성과 장기 지속 가능성, 저항성 운동은 근육량 증가와 기초대사율(RMR) 향상, 복합 운동은 체지방 감소와 근육 보존, 인슐린 감수성 및 대사유연성의 동시 개선이라는 차별화된 이점을 나타냈다.

특히 복합 운동은 유산소와 저항성 운동의 상호 보완적 기전을 통해 지방산 산화-근합성-항염증 경로를 동시에 자극함으로써 체성분 개선 뿐 아니라 전신 대사 건강 회복에 가장 효율적인 전략으로 평가된다. 이는 단일 형태의 운동보다 복합적 접근이 비만의 다요인적 병태를 조절하는 데 더 효과적임을 시사한다. 또한 운동의 절대적 강도보다 지속성과 개별화된 접근(individualized prescription)이 비만 개선의 핵심 결정 요인으로 확인되었다. 즉, 개인의 체력 수준, 비만 정도, 대사 건강 상태를 고려하여 유산소·저항성 운동을 적절히 조합하고, 주기적 훈련(periodized training)을 통해 운동 적응을 극대화하는 것이 바람직하다. 이는 단기 감량이 아닌 대사 적응(metabolic adaptation)과 체중 유지(weight maintenance)를 목표로 하는 장기적 관점의 운동 처방이 필요함을 의미한다.

결론적으로, 비만 개선을 위한 최적의 운동 전략은 단일 접근이 아닌 다양성과 지속성(consistency and variety)을 기반으로 한 복합적 운동 수행이며, 이러한 통합적 접근은 비만의 대사적 병태를 근본적으로 완화하고 지속 가능한 건강 체중 관리와 대사 회복을 실현하는 가장 과학적이고 실용적인 해법이라 할 수 있다.

이해충돌

이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 수혜

이 논문 또는 저서는 2023년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023S1A5A8080047).

생성형 AI 및 AI 기반 도구 사용에 대한 선언

본 원고의 준비 과정에서 저자들은 OpenAI ChatGPT (GPT-5)를 이용하여 어휘 개선 및 전달력 향상을 위한 문장 다듬기를 수행하였음. 저자들은 AI 도구의 결과물을 면밀히 검토하였으며, 최종 원고 내용에 대한 모든 책임을 질 것임.

ORCID

ZHANG GE <https://orcid.org/0009-0008-9229-585X>
Deunsol Hwang <https://orcid.org/0000-0002-9323-7183>
Seunghwan Kyun <https://orcid.org/0000-0002-3368-1581>
Jisu Kim <https://orcid.org/0000-0003-2344-6235>

참고문헌

- World Health Organization (WHO). Obesity and overweight [Internet]. WHO. 2022 [cited 2025 Dec 8]; Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Lin X, Li H. Obesity: epidemiology, pathophysiology, and therapeutics. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2021;12:706978.
- Yin YH, Liu JYW, Välimäki M. Effectiveness of non-pharmacological interventions on the management of sarcopenic obesity: a systematic review and meta-analysis. *Exp Gerontol* 2020;135:110937.
- Longo M, Zatterale F, Naderi J, et al. Adipose tissue dysfunction as determinant of obesity-associated metabolic complications. *Int J Mol Sci* 2019;20:2358.
- Zhou X, Li J, Jiang X. Effects of different types of exercise intensity on improving health-related physical fitness in children and adolescents: a systematic review. *Sci Rep* 2024;14:14301.
- Garnacho-Castaño MV, Albesa-Albiol L, Serra-Payá N, et al. Oxygen uptake slow component and the efficiency of resistance exercises. *J Strength Cond Res* 2021;35:1014-22.
- Baker JS, McCormick MC, Robergs RA. Interaction among skeletal muscle metabolic energy systems during intense exercise. *J Nutr Metab* 2010;2010:905612.
- Hargreaves M, Spriet LL. Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nat Metab* 2020;2:817-28.
- Grevendonk L, Connell NJ, McCrum C, et al. Impact of aging and exercise on skeletal muscle mitochondrial capacity, energy metabolism, and physical function. *Nat Commun* 2021;12:4773.
- Bouchard C, Deprés JP, Tremblay A. Exercise and obesity. *Obes Res* 1993;1:133-47.
- Amanat S, Ghahri S, Dianatinasab A, Fararouei M, Dianatinasab M. Exercise and type 2 diabetes. *Adv Exp Med Biol* 2020;1228:91-105.
- Roberts CK, Little JP, Thyfault JP. Modification of insulin sensitivity and glycemic control by activity and exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2013;45:1868-77.
- Małkowska P. Positive effects of physical activity on insulin signaling. *Curr Issues Mol Biol* 2024;46:5467-87.
- Silva FM, Duarte-Mendes P, Teixeira AM, Soares CM, Ferreira JP. The effects of combined exercise training on glucose metabolism and inflammatory markers in sedentary adults: a systematic review and meta-analysis. *Sci Rep* 2024;14:1936.
- Whillier S. Exercise and insulin resistance. *Adv Exp Med Biol* 2020;1228:137-50.
- Ray I, Mahata SK, De RK. Obesity: an immunometabolic perspective. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2016;7:157.
- Trayhurn P. Hypoxia and adipose tissue function and dysfunction in obesity. *Physiol Rev* 2013;93:1-21.
- Petersen AM, Pedersen BK. The anti-inflammatory effect of exercise. *J Appl Physiol* 2005;98:1154-62.
- Diniz TA, Aquino Júnior JCJ, Mosele FC, et al. Exercise-induced AMPK activation and IL-6 muscle production are disturbed in adiponectin knockout mice. *Cytokine* 2019;119:71-80.
- Ajuwon KM, Spurlock ME. Adiponectin inhibits LPS-induced NF- κ B activation and IL-6 production and increases PPAR γ 2 expression in adipocytes. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2005;288:R1220-5.
- Llibre A, Kucuk S, Gope A, Certo M, Mauro C. Lactate: a key regulator of the immune response. *Immunity* 2025;58:535-54.
- Ross R, Dagnone D, Jones PJ, et al. Reduction in obesity and related comorbid conditions after diet-induced weight loss or exercise-induced weight loss in men. A randomized, controlled trial. *Ann Intern Med* 2000;133:92-103.
- Achten J, Venables MC, Jeukendrup AE. Fat oxidation rates are higher during running compared with cycling over a wide range of intensities. *Metabolism* 2003;52:747-52.
- Kraus WE, Houmard JA, Duscha BD, et al. Effects of the amount and intensity of exercise on plasma lipoproteins. *N Engl J Med* 2002;347:1483-92.
- Swift DL, Johannsen NM, Lavie CJ, Earnest CP, Church TS. The role of exercise and physical activity in weight loss and maintenance. *Prog Cardiovasc Dis* 2014;56:441-7.
- Knowler WC, Barrett-Connor E, Fowler SE, et al. Reduction in the incidence of type 2 diabetes with lifestyle intervention or

- metformin. *N Engl J Med* 2002;346:393–403.
27. Goodpaster BH. Effects of physical activity on skeletal muscle insulin resistance and muscle lipid content. *Diabetes* 2003;52:1–7.
 28. Ross R. The importance of exercise in maintaining weight loss and improving metabolic health. *Ann Intern Med* 2015;162:325–34.
 29. Swift DL. Exercise training and cardiometabolic risk factors: a meta-analysis. *Prog Cardiovasc Dis* 2018;61:206–13.
 30. Scharhag-Rosenberger F. Effects of different exercise intensities on fat metabolism of overweight men. *Med Sci Sports Exerc* 2010;42:296–302.
 31. Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, Hawley JA. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J Physiol* 2012;590:1077–84.
 32. Helgerud J, Høydal K, Wang E, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO_{2max} more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:665–71.
 33. LaForgia J, Withers RT, Gore CJ. Effects of exercise intensity and duration on the excess post-exercise oxygen consumption. *J Sports Sci* 2006;24:1247–64.
 34. Tjønnå AE, Lee SJ, Rognmo Ø, et al. Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: a pilot study. *Circulation* 2008;118:346–54.
 35. Kessler HS, Sisson SB, Short KR. The potential for high-intensity interval training to reduce cardiometabolic disease risk. *Sports Med* 2012;42:489–509.
 36. Little JP, Safdar A, Wilkin GP, Tarnopolsky MA, Gibala MJ. A practical model of low-volume high-intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. *J Physiol* 2010;588:1011–22.
 37. Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, et al. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J Physiol* 2008;586:151–60.
 38. Keating SE, Johnson NA, Mielke GI, Coombes JS. A systematic review and meta-analysis of interval training versus moderate-intensity continuous training on body adiposity. *Obes Rev* 2017;18:943–64.
 39. Wewege M, van den Berg R, Ward RE, Keech A. The effects of high-intensity interval training vs. moderate-intensity continuous training on body composition in overweight and obese adults: a systematic review and meta-analysis. *Obes Rev* 2017;18:635–46.
 40. Hood MS, Little JP, Tarnopolsky MA, Myslik F, Gibala MJ. Low-volume interval training improves muscle oxidative capacity in sedentary adults. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43:1849–56.
 41. MacInnis MJ, Gibala MJ. Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity. *J Physiol* 2017;595:2915–30.
 42. Ramos JS, Dalleck LC, Tjønnå AE, Beetham KS, Coombes JS. The impact of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training on vascular function: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 2015;45:679–92.
 43. Liguori G. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription. 11th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2021.
 44. Achten J, Gleeson M, Jeukendrup AE. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:92–7.
 45. Venables MC, Achten J, Jeukendrup AE. Determinants of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study. *J Appl Physiol* 2005;98:160–7.
 46. Ross R, Janssen I, Dawson J, et al. Exercise-induced reduction in obesity and insulin resistance in women: a randomized controlled trial. *Obes Res* 2004;12:789–98.
 47. O'Donovan G, Thomas EL, McCarthy JP. Changes in visceral adipose tissue and metabolic risk factors after moderate-intensity exercise. *Int J Obes* 2005;29:1175–82.
 48. Hwang CL, Yoo JK, Kim HK. Exercise training improves arterial stiffness in obese adults: a randomized controlled trial. *Am J Hypertens* 2014;27:1215–23.
 49. Coker RH. Exercise-induced changes in insulin action and muscle metabolism in older adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41:1523–30.
 50. Biddle SJ, Batterham AM. High-intensity interval exercise training for public health: a big HIT or shall we HIT it on the head? *Int J Behav Nutr Phys Act* 2015;12:95.
 51. Grediagin MA, Cody M, Rupp J. Exercise intensity does not affect energy expenditure during training. *Int J Sports Med* 1995;16:49–53.
 52. Wewege M, van den Berg R, Ward RE, Keech A. The effects of high- and low-intensity exercise training on fat mass and metabolic risk factors in overweight adults: a meta-analysis. *Sports Med* 2022;52:567–84.
 53. Keating SE. Adherence to exercise training and risk factor changes in overweight adults: comparison between high- and low-intensity programs. *Obesity (Silver Spring)* 2019;27:1287–95.
 54. Phillips SM, Winett RA. Uncomplicated resistance training and health-related outcomes: evidence for a public health mandate.

- Curr Sports Med Rep 2010;9:208–13
55. Hunter GR, Bryan DR, Wetzstein CJ, Zuckerman PA, Bamman MM. Resistance training and intra-abdominal adipose tissue in older men and women. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:1023–8.
 56. Schuenke MD, Mikat RP, McBride JM. Effect of an acute period of resistance exercise on excess post-exercise oxygen consumption: implications for body mass management. *Eur J Appl Physiol* 2002;86:411–7.
 57. Holten MK, Zacho M, Gaster M, Juel C, Wojtaszewski JF, Dela F. Strength training increases insulin-mediated glucose uptake, GLUT4 content, and insulin signaling in skeletal muscle in patients with type 2 diabetes. *Diabetes* 2004;53:294–305.
 58. Dunstan DW, Daly RM, Owen N, et al. High-intensity resistance training improves glycemic control in older patients with type 2 diabetes. *Diabetes Care* 2002;25:1729–36.
 59. Bacchi E, Negri C, Zanolin ME, et al. Metabolic effects of aerobic training and resistance training in type 2 diabetic subjects: a randomized controlled trial (the RAED2 study). *Diabetes Care* 2012;35:676–82.
 60. Porter C, Reidy PT, Bhattarai N, Sidossis LS, Rasmussen BB. Resistance exercise training alters mitochondrial function in human skeletal muscle. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47:1922–31.
 61. Pedersen BK, Febbraio MA. Muscle as an endocrine organ: focus on muscle-derived interleukin-6. *Physiol Rev* 2008;88:1379–406.
 62. Strasser B, Schobersberger W. Evidence for resistance training as a treatment therapy in obesity. *J Obes* 2011;2011:482564.
 63. Ibañez J, Izquierdo M, Argüelles I, et al. Twice-weekly progressive resistance training decreases abdominal fat and improves insulin sensitivity in older men with type 2 diabetes. *Diabetes Care* 2005;28:662–7.
 64. Goodpaster BH. Effects of physical activity on skeletal muscle lipid content and insulin sensitivity in overweight and obese adults. *J Appl Physiol* 2003;95:5–13.
 65. Westcott WL. Resistance training is medicine: effects of strength training on health. *Curr Sports Med Rep* 2012;11:209–16.
 66. Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. Skeletal muscle remodeling in response to eccentric vs. concentric loading: morphological, molecular, and metabolic adaptations. *Front Physiol* 2017;8:447.
 67. Leveritt M, Abernethy PJ, Barry B, Logan PA. Concurrent strength and endurance training: the influence of dependent variable selection. *J Strength Cond Res* 2003;17:503–8.
 68. Chtara M. Combining endurance and strength training improves fitness and health more than either alone in obese women. *Clin Sci (Lond)* 2005;109:467–74.
 69. Schumann M. Concurrent endurance and resistance training: molecular basis and practical applications. *Eur J Sport Sci* 2014;14:5–15.
 70. Wang YX, Zhang CL, Yu RT, et al. Regulation of muscle fiber type and running endurance by PPARdelta. *PLoS Biol* 2004;2:e294.
 71. Balducci S. Combined aerobic and resistance training improves glucose tolerance and lipid profile in type 2 diabetic subjects. *Diabetes Care* 2004;27:2187–93.
 72. Ho SS, Dhaliwal SS, Hills AP. The effect of combined resistance and aerobic exercise training on abdominal fat and insulin resistance in obese women. *J Sports Sci* 2012;30:37–46.
 73. Strasser B, Siebert U, Schobersberger W. Resistance training in the treatment of the metabolic syndrome: a systematic review and meta-analysis of the effect of resistance training on metabolic clustering in patients with abnormal glucose metabolism. *Sports Med* 2010;40:397–415.
 74. Park J, Park H, Lim ST. Combined exercise training reduces visceral fat and improves metabolic syndrome indicators in overweight middle-aged women. *J Exerc Nutr Biochem* 2018;22:1–8.
 75. Cadore EL, Izquierdo M. How to simultaneously optimize muscle strength, power, functional capacity, and cardiovascular gains in the elderly: an update. *Age (Dordr)* 2013;35:2329–44.
 76. Coffey VG, Hawley JA. Concurrent exercise training: do opposites distract? *J Physiol* 2017;595:2883–96.
 77. Murlasits Z, Lee Y, Reed JL. Effect of resistance and aerobic exercise sequence on training adaptations. *J Strength Cond Res* 2018;32:10–5.
 78. Ortega FB, Ruiz JR, Castillo MJ, Sjöström M. Physical fitness in childhood and adolescence: a powerful marker of health. *Int J Obes (Lond)* 2008;32:1–11.
 79. Sillanpää E, Laaksonen DE, Häkkinen A, et al. Body composition, fitness, and metabolic health during strength and endurance training and their combination in middle-aged and older women. *Eur J Appl Physiol* 2009;106:285–96.
 80. Boutcher SH. High-intensity intermittent exercise and fat loss. *J Obes* 2011;2011:868305.
 81. Richter EA, Hargreaves M. Exercise, GLUT4, and skeletal muscle glucose uptake. *Physiol Rev* 2013;93:993–1017.
 82. Jelleyman C, Yates T, O'Donovan G, et al. The effects of high-intensity interval training on glucose regulation and insulin resistance: a meta-analysis. *Obes Rev* 2015;16:942–61.
 83. Egan B, Zierath JR. Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation. *Cell Metab*

- 2013;17:162–84.
84. Bartlett JD, Close GL, MacLaren DP, Gregson W, Drust B, Morton JP. High-intensity interval running is perceived to be more enjoyable than moderate-intensity continuous exercise: implications for exercise adherence. *J Sports Sci* 2011;29:547–53.
85. Cadore EL, Izquierdo M. Concurrent training in the elderly: balance between anabolic and catabolic stimuli. *Eur J Appl Physiol* 2013;113:2951–62.