

근감소증의 영양 중재

— 총 설 —

정 민 유

강서대학교 식품영양학과

Nutritional Approaches in Sarcopenia Management

Min-Yu Chung

Department of Food and Nutrition, Gangseo University

ABSTRACT This review comprehensively examined the latest research findings on dietary and nutritional intervention strategies for the prevention and management of sarcopenia. Sarcopenia is characterized by a progressive decline in muscle mass, muscle strength, and physical function during aging, resulting in a deterioration in the quality of life of older adults and increasing healthcare costs, consequently exacerbating the socioeconomic burden. This review is focused on the roles of key nutrients and supplements that can prevent the development of sarcopenia. Protein is an essential nutrient for muscle synthesis and maintenance. For older adults, a protein intake of 1.2~2.0 g per kg of body weight is recommended, with high-quality protein rich in leucine being particularly effective for muscle protein synthesis. Additionally, vitamin D acts directly on muscle cells through vitamin D receptors to promote protein synthesis, and when consumed together with calcium, synergistic effects are observed in improving muscle strength and physical function. Antioxidant vitamins and carotenoids may prevent sarcopenia by reducing oxidative stress. However, their effects vary according to the gender and between individuals. Among nutritional supplements, beta-hydroxy-beta-methylbutyrate, creatine, and omega-3 fatty acids have been reported to have positive effects on increasing muscle mass and strength through various mechanisms, and their effects are maximized particularly when combined with resistance exercise. In conclusion, a comprehensive approach that integrates an adequate intake of high-quality protein, a balanced intake of various nutrients, and regular physical activity is essential for the effective prevention and management of sarcopenia.

Keywords: sarcopenia, aging, protein, vitamin D, antioxidants

서 론

우리나라는 노인 인구의 급속한 증가와 함께, 노화 관련 질환에 대한 사회적·의학적 관심이 점점 높아지고 있다. 근감소증은 노화 과정에서 나타나는 근육량, 근력, 그리고 신체 기능의 점진적인 감소를 특징으로 하는 질환으로(Cruz-Jentoft 등, 2010), 2016년 국제질병분류코드(ICD-10-CM)에 공식 등재되며 독립된 질환으로 인정받게 되었다(Vellas 등, 2018). 근감소증은 노인의 삶의 질 저하와 낙상 위험 증가, 신체 기능 제한뿐 아니라 의료비용 상승 등 사회경제적 부담도 함께 증가시키는 중대한 공중보건 문제이다(Cruz-Jentoft 등, 2010; Janssen 등, 2004).

일반적으로 근육량과 근력의 감소는 자연스러운 노화 현상으로 여겨져 왔으나(Cruz-Jentoft 등, 2010; Syddall 등,

2009), 그 감소 속도는 임상적으로도 의미 있는 수준이다. 연구에 따르면 40세 이후 10년마다 약 8%, 70세 이후에는 약 15%의 근육량이 감소하는 것으로 보고되고 있다(Cruz-Jentoft 등, 2014). 근감소증의 주요 병태생리학적 요인으로 는 염증 및 동화 저항성의 증가, 단백질 섭취 부족, 신체활동 감소 등이 있으며(Bauer 등, 2013; Cruz-Jentoft 등, 2019; Katsanos 등, 2005; Reginster 등, 2021), 이러한 요인들은 상호작용을 통해 근감소증을 가속화한다.

근감소증의 진행 속도와 심각도는 개인차가 크며, 이는 유전적 소인뿐 아니라 식이, 운동 수준, 만성질환 유무 등 조절 가능한 생활 습관 요인들에 의해 좌우된다. 특히, 단백질은 근육 합성과 유지에 필수적인 영양소로, 노인의 단백질 섭취 부족은 근감소증의 발생과 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있다(Landi 등, 2016). 따라서 노인의 식이 및 영양

Received 18 April 2025; Revised 16 May 2025; Accepted 16 May 2025

Corresponding author: Min-Yu Chung, Department of Food and Nutrition, Gangseo University, 24-47 Kachisan-ro, Gangseo-gu, Seoul 07661, Korea, E-mail: chungmy@gangseo.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Food Science and Nutrition.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

중재는 근감소증의 예방과 관리에 있어 가장 기본적인 면서도 효과적인 접근법으로 평가된다.

본 총설에서는 식이 및 영양소가 근감소증에 미치는 영향을 종합적으로 검토하고, 이를 기반으로 근감소증의 예방 및 관리를 위한 최적의 영양 중재 전략을 논하고자 한다. 특히, 단백질과 필수아미노산, 비타민 D, 항산화 비타민을 비롯하여, 베타-히드록시-베타-메틸부티레이트(beta-hydroxy-beta-methylbutyrate, HMB), 크레아틴 등의 영양 보충제가 근육 건강에 미치는 영향을 최신 연구 중심으로 고찰하였다. 이를 통해, 고령 인구의 근감소증 예방 및 건강한 노화를 위한 과학적이고 실용적인 영양 중재 방안을 제시하고자 한다.

영양소와 근감소증

단백질과 분지사슬아미노산

단백질: 다수의 연구에 따르면 적절한 단백질 또는 필수 아미노산(10~20 g)의 섭취는 노인뿐 아니라 젊은 성인에서도 근육 단백질 합성을 효과적으로 자극한다(Cuthbertson 등, 2005). 그러나 노인은 젊은 성인에 비해 단백질 합성 효율이 낮아, 더 많은 양의 단백질 섭취가 요구된다. 실제로 Na 등(2022)은 단백질 섭취량이 1.2 g/kg 미만인 그룹에서 근감소증 발생 위험이 유의하게 높음을 보고하였다. Campbell 등(2001) 또한 체중 1 kg당 0.8 g 미만의 단백질 섭취가 근감소증 위험을 증가시킨다고 지적하였다. 일부 연구는 노인의 근감소증 예방을 위해 체중 1 kg당 1.2~2.0 g 수준의 단백질 섭취를 권장하고 있으며(Bauer 등, 2013; Houston 등, 2008), 이는 일반적인 권장섭취량보다 더 높은 수치다.

식사를 통한 단백질 섭취 외에도, 단백질 보충제가 근육량 유지 및 근손실 예방에 효과적이라는 증거가 다수 보고되고 있다(Milne 등, 2006). Liao 등(2017)의 메타분석에서는 단백질 보충과 저항성 운동을 병행한 경우, 저항성 운동만 시행했을 때보다 근육량 및 하지 근력이 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 다만, 일부 연구에서는 단백질 보충제가 포만감을 유발하여 식사 섭취를 제한하는 부작용이 관찰되기도 하였다(Milne 등, 2006; Pupovac와 Anderson, 2002; Singh 등, 2000). 따라서 근감소증 예방을 위해서는 가능한 자연식품을 통한 고품질 단백질 섭취가 우선적으로 권장된다.

근감소증 관리에서 중요한 요소는 단백질의 총 섭취량뿐 아니라, 단백질의 질과 함께 섭취하는 영양소의 종류이다. 특히 유청단백질과 같이 류신이 풍부한 고품질 단백질은 일반 단백질보다 근육 단백질 합성에 효과적인 것으로 밝혀졌다(Bauer 등, 2013; Morley 등, 2010). 유청단백질은 빠른 소화와 높은 흡수율을 통해 동화작용을 더 효율적으로 유도하며(Boirie와 Guillet, 2018), 이는 동화 저항성을 가진 노인에서 더욱 중요한 의미를 갖는다.

또한, 동물성 단백질(예: 우유, 달걀, 육류)은 식물성 단백

질보다 '단백질 소화율 보정 아미노산 점수(protein digestibility-corrected amino acid score, PDCAAS)'나 '소화 가능한 필수아미노산 점수(digestible indispensable amino acid score, DIAAS)' 지수가 높아, 근육 단백질 합성을 더 효과적으로 자극하는 것으로 보고된다(Phillips 등, 2009; van Vliet 등, 2015). 단백질과 함께 섭취하는 다른 영양소 역시 동화작용에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 탄수화물은 인슐린 분비를 유도하여 단백질 분해를 억제하고(Volpi 등, 2000), 오메가-3 지방산은 아미노산과 인슐린에 대한 근육의 민감도를 높이는 작용을 한다(Smith 등, 2011).

요약하자면, 근감소증 예방 및 관리를 위해서는 적절한 양의 고품질 단백질 섭취가 필수적이며, 가능하면 자연식품을 통해 섭취하는 것이 바람직하다. 더불어 탄수화물이나 오메가-3 지방산 등 다른 영양소와의 복합적인 식이 전략이 단백질의 효과를 극대화하는 데 도움이 될 수 있다.

분지사슬아미노산: 유청단백질은 분지사슬아미노산(branched-chain amino acids, BCAA)인 발린, 이소류신, 류신이 풍부한 단백질 공급원으로, 근육 단백질 합성에 있어 핵심적인 역할을 한다(Norton 등, 2009). BCAA 중 특히 류신(leucine)은 단백질 합성의 주요 조절자인 mammalian target of rapamycin(mTOR) 경로를 활성화하여 근육 성장과 유지에 기여한다(Cuthbertson 등, 2005). 류신은 또한 인슐린 분비를 촉진하고(Katsanos 등, 2006; Koopman 등, 2005, 2006), mTOR 상위 조절자인 Akt/PKB 및 하위 조절자인 4E-BP1과 S6K1의 인산화를 통해 단백질 합성을 더욱 촉진한다(Dreyer 등, 2008).

이러한 mTOR 경로의 활성화는 상대적으로 젊은 성인에서 효율적으로 이루어지나, 노인의 경우 활성화 반응이 감소하며(Cuthbertson 등, 2005), 이는 노화에 따른 '아미노산 저항성(anabolic resistance)' 현상과 관련이 있다. 즉, 노화된 근육은 류신에 대한 민감도가 떨어지고, 혈중 류신 농도도 감소하여 근육 단백질 대사와 합성이 저하되는 것이다(Dardevet 등, 2000; Haran 등, 2012). 또한, 노화에 따른 인슐린 저항성은 단백질 대사 관련 신호전달에도 악영향을 미친다.

이와 관련하여, Pansarasa 등(2008)은 아미노산 보충을 통해 mTOR 경로의 활성을 높이고 근감소증을 예방할 수 있다고 보고하였다. 이는 류신 보충제가 노인의 근육 단백질 합성을 회복시키는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 실제로 동물 연구에서도 식사에 류신을 보충했을 때, 노화로 둔화된 단백질 합성 반응이 회복되었다(Combaret 등, 2005; Rieu 등, 2003). 예컨대, 성체 쥐는 젊은 쥐보다 근육 단백질 합성 반응이 낮았으나, 식사에 류신을 추가한 후 합성률이 정상 수준으로 회복되었다.

인간을 대상으로 한 연구(Pansarasa 등, 2008)에서도 식사에 류신을 추가하면 근육 단백질 합성률이 유의미하게 증가(0.053 ± 0.009 에서 $0.083 \pm 0.008\%/h$, $P < 0.05$)하는 것

으로 나타났다. 종합하면, 류신이 풍부한 식품(예: 육류, 유제품, 콩류 등)을 충분히 섭취하거나, 필요시 류신 또는 유청 단백질 보충제를 활용하는 것이 노인의 근감소증 예방과 관리에 효과적인 전략이 될 수 있다.

비타민 D와 칼슘

비타민 D: 비타민 D는 근육 건강을 유지하는 데 중요한 영양소 중 하나이다. 최근 연구에 따르면 비타민 D 부족은 근감소증뿐만 아니라 심혈관 질환, 비만, 암 등 다양한 질환의 발생 위험 증가와 유의한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다(Kaur 등, 2025). 특히, 비타민 D와 근감소증 간의 연관성은 다수의 연구에서 반복적으로 입증되었으며(Choi, 2011; Uchitomi 등, 2020), 노인 인구에서의 비타민 D 결핍과 근감소증은 양의 상관관계를 가지는 것으로 보고되었다(Remelli 등, 2019; Umar 등, 2018).

국민건강영양조사 자료 분석에 따르면, 우리나라 65세 이상 노인의 경우 비타민 D 결핍은 남녀 모두에서 근감소증 발생률 증가와 유의한 관련이 있는 것으로 나타났다(Roh와 Kim, 2024). 또한, Cangussu 등(2015), El Hajj 등(2019), Suebthawinkul 등(2018)의 연구에서는 비타민 D 결핍과 근감소증을 동시에 가진 대상자에게 비타민 D 보충이 악력 개선에는 뚜렷한 영향을 미치지 않았지만, 근육량 증가에는 긍정적인 효과를 보였다. 특히 이러한 효과는 비만 대상자보다 정상 체중 대상자에서 더 뚜렷하게 나타났는데, 이는 비만으로 인해 비타민 D의 생체이용률이 낮아지고, 지방조직 내에 격리되어 근육에 미치는 작용이 제한될 수 있음을 시사한다.

비타민 D는 비타민 D 수용체(vitamin D receptor, VDR)와 결합하여 전사 조절 및 신호 전달에 관여하는 리간드-수용체 의존적 경로를 통해 빠르게 작용한다(Girgis 등, 2013). Girgis 등(2019)은 근세포 특이적 VDR 유전자 결손 마우스 모델을 통해, 비타민 D가 VDR을 매개로 근육 기능과 크기의 손실을 예방하는 데 필수적인 역할을 한다는 사실을 입증하였다. 이는 비타민 D가 VDR을 통해 직접 근육 세포에 작용하여 단백질 합성을 촉진하고, 근력과 기능을 유지하는 데 중요한 영향을 미친다는 것을 시사한다. 이러한 근거들을 종합해 볼 때, 비타민 D는 노인의 근육 건강을 유지하고 근감소증을 예방하기 위한 중요한 생리적 조절자로 작용함을 알 수 있다.

칼슘: 칼슘과 비타민 D는 밀접한 상호 관계를 가진다. 예컨대, 비타민 D는 칼슘의 항상성 유지를 조절함으로써 근수축에 영향을 미친다. 비타민 D 결핍은 근형질세망(sarcoplasmic reticulum) 내 칼슘의 재흡수를 감소시켜 근육 수축 역학에 변화를 유발한다(Rodman과 Baker, 1978). 또한 Mukherjee 등(1981)은 비타민 D가 결핍된 병아리의 근육에서 산화적 인산화 과정과 미토콘드리아의 칼슘 유지 능력이 저하되는 현상을 관찰하였으며, 이는 비타민 D 결핍이 미토콘드리아 기능 저하를 통해 근육 대사 항상성을 교란시킬

수 있음을 시사한다.

최근 Antoniak와 Greig(2017)는 비타민 D와 칼슘을 병행 보충한 노인 집단에서 단독 보충 집단에 비해 근력 및 신체 기능의 유의한 개선이 있었음을 보고하였다. Daly 등(2015)의 연구에서도 고단백 식이와 함께 비타민 D(1,000 IU) 및 칼슘 보충제를 섭취한 노인 그룹이 일반 식이를 섭취한 대조군보다 체지방량은 증가하고 체지방은 감소하는 유의한 변화를 보였다. 이러한 결과들은 비타민 D와 칼슘, 그리고 단백질의 복합적 섭취가 근육 건강을 증진하는 데 효과적인 전략임을 뒷받침한다.

항산화비타민

비타민 C: 근감소증의 주요 원인 중 하나는 산화적 스트레스다(Meng과 Yu, 2010). 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)은 직접적으로 근위축과 근육 기능 저하를 유발할 뿐 아니라, tumor necrosis factor- α (TNF- α), interleukin-6(IL-6), IL-1과 같은 염증성 사이토카인의 발현을 증가시킬 수 있다(Meng과 Yu, 2010; Morley와 Baumgartner, 2004). 이러한 작용은 근육 건강을 악화시키는 중요한 경로로 간주한다.

이에 따라, 비타민 C와 같은 항산화제는 ROS 생성을 억제함으로써 근감소증의 발달을 예방하는 데 기여할 수 있다. 실제로 국민건강영양조사 자료에 따르면, 65세 이상 여성 노인 중 식이 비타민 C 섭취량이 낮은 그룹은 높은 그룹에 비해 낮은 근력을 가질 위험이 유의하게 높은 것으로 나타났다(오즈비 2.16; 95% 신뢰구간)(Park과 Shin, 2024).

이는 적정량의 비타민 C 섭취가 근손실 위험을 낮추는 보호 효과를 가질 수 있음을 시사한다. 그러나 해당 연구는 여성 노인에 한정된 결과이므로, 성별에 따른 차이와 식이 비타민 C 섭취의 근감소증 예방 효과에 관한 추가 연구가 필요하다(Ganapathy와 Nieves, 2020).

비타민 E: 비타민 E는 대표적인 지용성 항산화 비타민으로, 자유라디칼을 중화시켜 세포막 및 DNA를 산화적 손상으로부터 보호하는 역할을 한다. 이러한 항산화 기능은 근육의 구조적 안정성과 대사 기능 유지에 기여할 수 있으며, 결과적으로 근감소증 예방에도 영향을 줄 수 있다. 실제로 일본의 단면연구인 ROAD study에서는 식이에서 비타민 E와 지질 섭취가 근감소증의 위험을 낮춘다는 결과가 보고되었다(Otsuka 등, 2021). 비슷하게 EPIC-Norfolk 코호트 연구에서는 식품 유래 비타민 E 섭취와 혈장 농도가 골격근 질량과 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 이는 비타민 E의 섭취가 근육량 유지에 기여할 수 있음을 시사한다(Mulligan 등, 2021).

국민건강영양조사를 이용한 국내 단면연구에서도 유사한 경향이 확인되었다. 이 연구에서는 혈청 비타민 E 수치가 낮은 지역사회 거주 성인에서 악력이 유의미하게 낮은 것으로 나타났으며, 이는 노인의 근육 기능 유지에 있어 비타민 E의 중요성을 지지하는 결과이다(Kim 등, 2021). 또한, 이

탈리아 대규모 횡단연구(InCHIANTI study)에서는 혈중 알파-토코페롤 농도가 높을수록 무릎 근력과 신체 기능이 우수하다는 결과가 나타났으며, 감마-토코페롤 농도는 무릎 근력과 유의한 관련을 보였다(Cesari 등, 2004). 이 연구에서는 비타민 C와 관련된 결과도 함께 보고되었는데, 혈중 비타민 C 수치가 높은 고령자는 무릎 근력과 신체 기능이 더 우수하였다. 이는 항산화 비타민들이 노인의 근기능 전반에 복합적으로 작용할 가능성을 암시한다.

반면, 항산화제 보충의 효과에 대해 상반된 결과도 존재한다. 예를 들어 34명의 노인 남성을 대상으로 한 무작위 대조 연구에서는 고용량의 비타민 C와 E를 함께 보충한 군에서 오히려 총 체지방량 증가가 제한되는 결과가 나타났다(Bjørnsen 등, 2016). 이는 항산화제가 운동 효과를 간섭할 가능성을 시사하며, 고용량 섭취 시 이점이 제한될 수 있음을 보여준다. 특히 비타민 E의 경우 혈중 미세농도의 정확한 측정과 근육량, 신체활동 수준과의 상호작용에 대한 정량적 분석이 필요하다. 또한, 기존 연구 대부분이 남성을 중심으로 진행된 점을 고려할 때, 성별에 따른 반응 차이를 검토하는 후속 연구도 요구된다.

카로티노이드: 식이 카로티노이드와 비타민 A는 인체의 항산화 기전에서 중요한 역할을 수행하는 영양소로, ROS에 의한 세포 손상을 줄이고 염증을 완화하는 데 기여한다(Palace 등, 1999). 이러한 생리적 기능을 바탕으로, 이들 항산화 영양소의 섭취가 노인의 근기능 유지 및 근감소증 예방에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다는 가설이 제기되어 왔다.

63세 이상의 지역사회 거주 노인을 대상으로 한 단면연구에서는 여성 노인에서 베타-카로틴 섭취량이 높을수록 보행 속도가 빠르고 의자에서 일어서는 시간이 짧아지는 경향이 관찰되었다(Martin 등, 2011). 이는 카로티노이드가 근기능 유지에 기여할 수 있음을 시사한다. 그러나 같은 연구에서 남성 노인에게서는 이러한 연관성이 나타나지 않아, 성별에 따라 카로티노이드의 효과가 상이할 가능성도 제기된다.

또한, 이탈리아의 대규모 횡단연구에서는 베타-카로틴 섭취 수준과 무릎 근력 및 신체 수행 점수 간에 초기에는 유의한 양의 상관관계가 보고되었으나, 연령, 성별, 흡연, 체질량지수(BMI) 등의 혼란 변수를 조정한 후에는 이러한 관련성이 통계적으로 유의하지 않게 되었다(Cesari 등, 2004). 이는 카로티노이드 섭취와 근기능 간의 관계가 단순한 인과가 아니라 다양한 인자들의 상호작용에 영향을 받을 수 있음을 의미하며, 향후 보다 정교한 연구 설계와 종단적 분석을 통해 인과성을 검토할 필요가 있다.

영양소보충제와 근감소증

베타-히드록시-베타-메틸부티레이트

근감소증에 대한 효과적인 중재 방법 중 하나로 보충제의 사용이 제시될 수 있다. 류신의 대사산물 중 하나인 HMB는 여러 기전을 통해 근육 건강에 도움을 줄 수 있다. 첫째,

mTOR 신호전달 경로를 활성화하고 동화작용 관련 호르몬 유전자의 발현을 촉진함으로써 단백질 합성을 증가시킨다(Jakubowski 등, 2020). 둘째, HMB는 근육 세포막의 구조적 안정성을 향상시키고 단백질 분해 과정을 억제하며, 근육 재생에 중요한 위성세포의 증식을 촉진하여 근육의 크기와 기능 발달에 긍정적인 영향을 미친다(Alway 등, 2013; Asadi 등, 2017).

안전성 측면에서도 HMB는 비교적 부작용이 적은 것으로 평가된다(Borack과 Volpi, 2016). 인체 연구에 따르면 일일 6 g의 고용량을 섭취했을 때도 혈중 콜레스테롤, 헤모글로빈, 백혈구, 혈당 수치나 간 및 신장 기능에 유해한 영향을 주지 않았다(Gallagher 등, 2000).

HMB가 근기능에 긍정적인 영향을 미친다는 연구 결과들도 보고되고 있다. Berton 등(2015)은 8주간 매일 1.5 g의 HMB를 보충한 지역사회 거주 노인 여성을 대상으로 한 연구에서, HMB 보충 그룹이 대조군에 비해 등속성 근기능의 균형과 신전이 현저히 향상된 결과를 보였다고 보고하였다. 또한 Peng 등(2021)은 지역사회에 거주하는 노인 남성을 대상으로 12주간 하루 3 g의 HMB를 섭취하게 한 결과, 근육량의 유의미한 증가뿐 아니라 영양 상태 및 신체적 수행능력의 개선, 근육 내 지방 축적의 감소 등의 효과를 관찰하였다.

한편, HMB 보충이 근력 등 근기능에 유의한 영향을 주지 않는다는 상반된 결과도 있으며(Din 등, 2019), 이에 따라 HMB 보충 기간, 형태, 병행된 근육운동 프로그램 등 다양한 요인을 고려한 후속 연구가 필요하다.

크레아틴

크레아틴은 운동선수뿐만 아니라 일반 성인의 무산소성 운동 능력 향상에 효과적인 기능성 보충제로 널리 알려져 있다(Kreider 등, 2017). 주로 붉은 육류와 해산물에 함유된 크레아틴은 자연적으로 존재하는 비단백질 아미노산 화합물로, 대부분 골격근에 저장되며, 소량은 뇌와 고환 등에도 존재한다(Buford 등, 2007). 크레아틴은 포스포릴 그룹과 결합해 포스포크레아틴을 형성하고, 이는 세포 내 adenosine triphosphate(ATP) 재합성 과정에서 중요한 역할을 한다(Ydfors 등, 2016). 또한, mTOR 자극을 통한 단백질 합성 촉진(Farshidfar 등, 2017) 등 다양한 기전을 통해 근력 증가와 근육 회복에 기여하는 것으로 보고되고 있다(Buford 등, 2007).

노인의 근감소증 개선과 관련된 크레아틴 보충의 효과에 관한 연구도 다수 존재한다. Aguiar 등(2013)은 노인을 대상으로 12주간 하루 5 g의 크레아틴을 섭취하게 하고 주 3회 근력운동을 병행한 결과, 근육량이 약 2.8% 증가하고 벤치프레스, 레그익스텐션(하체 근력), 바이셉스 컬 등으로 측정된 전반적인 근력이 유의미하게 향상되었음을 보고하였다. 특히 레그익스텐션의 유의한 증가는 일상생활 기능 개선과 밀접하게 연결된 중요한 결과로 해석된다. 또한 Forbes 등(2021)의 메타분석에 따르면 노인은 근력운동과

함께 크레아틴을 보충했을 때 더 큰 효과를 보이며, 일반적으로 5 g 이하의 섭취도 효과적이지만 하체 근력 향상을 위해서는 5 g 이상의 고용량 보충이 도움이 될 수 있다고 제안하였다.

한편, 일부 연구에서는 근력운동 없이도 크레아틴 보충이 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 제시하고 있다. Moon 등 (2013)은 크레아틴 보충이 운동 여부와 관계없이 노인의 근육량, 근력, 기능적 능력 향상에 효과적이었다고 보고하며, 일상 활동 기능 저하를 예방하는 안전한 중재 전략으로 제안하였다. 반면 Chami와 Candow(2019)는 노인을 대상으로 근력운동 없이 10일간 체중 1 kg당 0.1~0.3 g의 크레아틴을 보충한 결과, 근력이나 신체 수행력에서 유의한 변화가 나타나지 않았다고 보고하며 상반된 결과를 제시하였다. 이처럼 크레아틴 보충의 효과는 보충 기간, 용량, 근력운동 병행 여부 등에 따라 달라질 수 있으며, 향후 이를 고려한 정교한 연구 설계가 필요하다.

오메가-3 지방산

비지방 조직 부위의 지질 축적은 TLR4, 종양 괴사 인자인 TNF- α 및 NF- κ B와 같은 전염증성 매개체의 활성화와 연관되어 있다(Holland 등, 2011). 염증 반응은 근감소증 발생에 중요한 영향을 미치며, 특히 동화저항성 메커니즘을 통해 작용하는 것으로 여러 연구에서 제시되고 있다(Giresi 등, 2005; Peake 등, 2010). Cuthbertson 등(2005)의 연구는 노인에서 NF- κ B, TNF- α , IL-6와 같은 염증 매개체의 발현 수준이 증가되어 있으며, 이는 mTOR 신호전달과정을 방해함으로써 근육의 동화 작용을 억제한다고 제안했다.

오메가-3 지방산의 근감소증 예방효과에 관한 연구는 지속적으로 논의되고 있으며(Di Girolamo 등, 2014), 그 기전은 크게 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 오메가-3 지방산의 항염증 효능은 다수의 연구를 통해 입증되었으나(Custodero 등, 2018; Tan 등, 2018), 실제 노인 근감소증 예방에 대한 직접적인 효과를 확인하기 위한 추가 연구가 필요하다. 둘째, 오메가-3는 mTOR 신호전달체계를 활성화하는 것으로 알려져 있어, 이 경로를 통한 근감소증 예방 가능성이 제시되고 있다(Smith 등, 2015; Yoshino 등, 2016). 셋째, 인슐린 신호전달이 mTOR 활성화에 핵심적 역할을 하므로, 오메가-3 지방산이 인슐린 저항성을 개선함으로써 근감소증을 예방할 수 있다는 기전이 제안되었다(Bodine과 Baehr, 2014; Gray와 Mittendorfer, 2018). 결론적으로, 오메가-3 지방산은 항염증 작용과 더불어 mTOR 경로 활성화, 인슐린 감수성 개선이라는 다중 경로를 통해 근감소증 예방에 효과적인 가능성이 크며, 이러한 효과를 입증하기 위한 분자 수준의 추가 연구가 요구된다.

근감소증 연구의 한계 및 방향성 제시

본 논문은 근감소증과 관련된 영양소와 보충제의 효과에

대한 포괄적인 고찰 및 요약(Table 1)을 제공하고 있으나 몇 가지 주요 제한점이 존재한다. 일부 영양소에서 성별에 따른 효과 차이가 언급되었으나, 대부분의 영양소에 대해서는 성별에 대한 명확한 정의를 내리기는 어렵다. 65세 이상의 지역사회 노인 565명을 대상으로 한 Korean Longitudinal Study on Health and Aging(KLoSHA) 연구에서, 근감소증의 유병률은 진단 지표에 따라 성별 차이를 보였다. 사지 골격근량을 키의 제곱으로 나눈 appendicular skeletal muscle mass(ASM)/ kg^2 기준에서는 남성 노인에서 유병률이 높았으나, ASM을 체중으로 나눈 기준에서는 여성 노인에서 유병률이 더 높게 나타났다. 이는 근감소증의 측정 지표 및 한계치에 따라 성별 유병률에 차이가 있음을 시사한다(Kim 등, 2010). 향후 연구에서는 남성과 여성의 생리적 차이를 반영한 진단 기준 개발과 다양한 지표의 비교를 통한 표준화가 필요하겠다. 또한, 근감소 연구에서 동양인 대상의 연구가 미비한 편으로 이에 대한 추가 연구도 필요하다.

다음으로, 여러 영양소를 함께 섭취할 때의 시너지 효과나 최적 조합에 대한 구체적인 제안이 제한적이다. 다양한 영양소의 복합적 상호작용을 조사하는 장기 추적 연구가 향후 필요하겠다.

종합적으로 근감소증 예방을 위하여 식이 패턴 접근법을 통한 통합적 영양 전략 개발이 중요하다. 특히 한국인을 포함한 동양인 인구 집단에서의 영양 중재 효과를 검증하고, 영양소 보충과 저항성 운동의 최적 병합 방법을 규명하는 연구가 필요하겠다. 이러한 후속 연구는 고령화 사회에서 근감소증 예방 및 관리를 위한 보다 효과적이고 개인화된 영양 중재 전략 개발에 기여할 것이다.

결론

근감소증은 단순한 노화의 부산물이 아니라, 다양한 병태생리적 경로가 복합적으로 작용하는 질병으로 인식되어야 한다. 이에 따라 단일 영양소 중심의 접근보다는 다영역적인 영양 중재 전략이 필요하다. 고령자의 근육 건강 유지를 위한 기본 조건은 충분하고 질 높은 단백질 섭취이며, 특히 식사마다 25~30 g의 단백질(필수 아미노산 약 10 g 포함)을 섭취하는 것이 근육 단백질 합성을 극대화하는 데 효과적이다. 그러나 노화에 따른 대사 반응성의 저하는 단순한 영양소 공급만으로는 한계를 가질 수 있으므로, 이를 보완하기 위한 생리학적 기전을 타겟으로 한 전략적 접근이 필요하다.

특히 특정 보충제의 활용은 근육량 유지 및 기능 향상에 보조적 역할을 할 수 있으며, 이때 보충제는 개인의 생리적 상태와 생활 습관, 운동 여부 등을 고려한 맞춤형으로 적용되어야 한다. 여러 연구에 따르면 보충제의 효과는 근력운동과 병행할 때 더욱 뚜렷하게 나타나며, 이는 근감소증 예방 및 관리에 있어 핵심적인 고려 사항이다. 궁극적으로, 근감소증의 예방과 관리는 고품질 단백질 섭취, 항염증 및 동화 촉진 보충제의 선택적 활용, 다양한 영양소의 균형적 섭취,

Table 1. Recommended intake, primary functions, and mechanisms of action of sarcopenia-related nutrients

Nutrients	Recommended intake (65+ years)	Primary function	Mechanism of action
Protein	1.0~1.2 g per kg body weight	<ul style="list-style-type: none"> – Promotes muscle protein synthesis – Maintains muscle mass and prevents muscle loss 	<ul style="list-style-type: none"> – Stimulates muscle protein synthesis – Inhibits protein breakdown
BCAA	–	<ul style="list-style-type: none"> – Promotes muscle protein synthesis – Supports muscle growth and maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> – Activates mTOR pathway – Stimulates insulin secretion
Vitamin D	15 µg/day	<ul style="list-style-type: none"> – Maintains muscle function – Increases muscle mass – Improves muscle strength 	<ul style="list-style-type: none"> – Transcriptional regulation via VDR – Affects muscle contraction through calcium homeostasis regulation
Calcium	700 mg/day (male) 800 mg/day (female)	<ul style="list-style-type: none"> – Maintains muscle contraction function – Synergistic effect with vitamin D 	<ul style="list-style-type: none"> – Muscle contraction regulation through calcium reuptake in sarcoplasmic reticulum
Vitamin C	100 mg/day	<ul style="list-style-type: none"> – Reduces oxidative stress – Anti-inflammatory effects 	<ul style="list-style-type: none"> – Inhibits ROS generation – Reduces inflammatory cytokine expression
Vitamin E	12 mg α-TE*/day	<ul style="list-style-type: none"> – Protects cell membrane and DNA – Maintains muscle structural stability 	<ul style="list-style-type: none"> – Neutralizes free radicals – Antioxidant action
Carotenoids	–	<ul style="list-style-type: none"> – Reduces oxidative damage – Anti-inflammatory effects 	<ul style="list-style-type: none"> – Reduces cellular damage caused by ROS – Antioxidant and anti-inflammatory action
HMB	–	<ul style="list-style-type: none"> – Increases protein synthesis – Improves muscle size and function 	<ul style="list-style-type: none"> – Activates mTOR pathway – Promotes anabolic hormone gene expression – Enhances muscle cell membrane structural stability – Inhibits protein breakdown
Creatine	–	<ul style="list-style-type: none"> – Enhances anaerobic exercise capacity – Increases muscle strength and promotes muscle recovery 	<ul style="list-style-type: none"> – Supports ATP resynthesis process – Promotes protein synthesis through mTOR stimulation
Omega-3 fatty acids	0.5~1.0% of total daily caloric intake	<ul style="list-style-type: none"> – Reduces inflammatory responses – Supports muscle anabolic action 	<ul style="list-style-type: none"> – Anti-inflammatory action – Activates mTOR signaling pathway – Improves insulin resistance

*Tocopherol equivalent

BCAA: branched-chain amino acid, mTOR: mammalian target of rapamycin, VDR: vitamin D receptor, ROS: reactive oxygen species, HMB: beta-hydroxy-beta-methylbutylate, ATP: adenosine triphosphate.

그리고 규칙적인 근력 운동을 포함한 복합적 생활습관 개선 전략을 통해 달성될 수 있다. 이러한 통합적 접근은 노인의 근육 소실을 효과적으로 억제하고, 삶의 질을 향상시키는 데 기여할 것이다.

요 약

근감소증은 단순한 노화가 아니라 복합적인 병태생리 기전이 관여하는 질환으로, 이를 예방하고 관리하기 위해서는 단백질을 중심으로 한 균형 잡힌 영양 섭취와 규칙적인 근력 운동의 병행이 필수적이다. 크레아틴, HMB, 오메가-3 지방산과 같은 보충제는 근육량과 기능 유지에 도움을 줄 수 있으며, 비타민 D, 항산화 영양소, 미네랄 등 다양한 미량영양소의 적절한 섭취 또한 중요하다. 개인 맞춤형 보충전략과 생활습관 개선을 통합한 접근이 노인의 근육 건강을 효과적으로 유지하고 삶의 질 향상에 기여할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2023년도 강서대학교 교내 학술연구비 지원사업에 의해 수행된 연구로, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Aguilar AF, Januário RS, Junior RP, et al. Long-term creatine supplementation improves muscular performance during resistance training in older women. *Eur J Appl Physiol.* 2013. 113:987-996.
- Alway SE, Pereira SL, Edens NK, et al. β-Hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) enhances the proliferation of satellite cells in fast muscles of aged rats during recovery from disuse atrophy. *Exp Gerontol.* 2013. 48:973-984.
- Antoniak AE, Greig CA. The effect of combined resistance exercise training and vitamin D₃ supplementation on musculoskeletal health and function in older adults: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open.* 2017. 7:e014619. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-014619>
- Asadi A, Arazi H, Suzuki K. Effects of β-hydroxy-β-methylbutyrate-free acid supplementation on strength, power and hor-

- monal adaptations following resistance training. *Nutrients*. 2017. 9:1316. <https://doi.org/10.3390/nu9121316>
- Bauer J, Biolo G, Cederholm T, et al. Evidence-based recommendations for optimal dietary protein intake in older people: A position paper from the PROT-AGE study group. *J Am Med Dir Assoc*. 2013. 14:542-559.
- Berton L, Bano G, Carraro S, et al. Effect of oral beta-hydroxy-beta-methylbutyrate (HMB) supplementation on physical performance in healthy old women over 65 years: An open label randomized controlled trial. *PLoS One*. 2015. 10: e0141757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141757>
- Bjørnsen T, Salvesen S, Berntsen S, et al. Vitamin C and E supplementation blunts increases in total lean body mass in elderly men after strength training. *Scand J Med Sci Sports*. 2016. 26:755-763.
- Bodine SC, Baehr LM. Skeletal muscle atrophy and the E3 ubiquitin ligases MuRF1 and MAFbx/atrogen-1. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2014. 307:E469-E484.
- Boirie Y, Guillet C. Fast digestive proteins and sarcopenia of aging. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2018. 21:37-41.
- Borack MS, Volpi E. Efficacy and safety of leucine supplementation in the elderly. *J Nutr*. 2016. 146:2625S-2629S.
- Buford TW, Kreider RB, Stout JR, et al. International society of sports nutrition position stand: creatine supplementation and exercise. *J Int Soc Sports Nutr*. 2007. 4:6. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-4-6>
- Campbell WW, Trappe TA, Wolfe RR, et al. The recommended dietary allowance for protein may not be adequate for older people to maintain skeletal muscle. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2001. 56:M373-M380.
- Cangussu LM, Nahas-Neto J, Orsatti CL, et al. Effect of vitamin D supplementation alone on muscle function in postmenopausal women: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial. *Osteoporos Int*. 2015. 26:2413-2421.
- Cesari M, Pahor M, Bartali B, et al. Antioxidants and physical performance in elderly persons: the Invecchiare in Chianti (InCHIANTI) study. *Am J Clin Nutr*. 2004. 79:289-294.
- Chami J, Candow DG. Effect of creatine supplementation dosing strategies on aging muscle performance. *J Nutr Health Aging*. 2019. 23:281-285.
- Choi HJ. New insight into the action of vitamin D. *Korean J Fam Med*. 2011. 32:89-96.
- Combaret L, Dardevet D, Rieu I, et al. A leucine-supplemented diet restores the defective postprandial inhibition of proteasome-dependent proteolysis in aged rat skeletal muscle. *J Physiol*. 2005. 569:489-499.
- Cruz-Jentoft AJ, Baeyens JP, Bauer JM, et al. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People. *Age Ageing*. 2010. 39:412-423.
- Cruz-Jentoft AJ, Bahat G, Bauer J, et al. Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. *Age Ageing*. 2019. 48:16-31.
- Cruz-Jentoft AJ, Landi F, Schneider SM, et al. Prevalence of and interventions for sarcopenia in ageing adults: a systematic review. Report of the International Sarcopenia Initiative (EWG-SOP and IWGS). *Age Ageing*. 2014. 43:748-759.
- Custodero C, Mankowski RT, Lee SA, et al. Evidence-based nutritional and pharmacological interventions targeting chronic low-grade inflammation in middle-age and older adults: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Res Rev*. 2018. 46:42-59.
- Cuthbertson D, Smith K, Babraj J, et al. Anabolic signaling deficits underlie amino acid resistance of wasting, aging muscle. *FASEB J*. 2005. 19:1-22.
- Daly RM, Gianoudis J, Prosser M, et al. The effects of a protein enriched diet with lean red meat combined with a multi-modal exercise program on muscle and cognitive health and function in older adults: study protocol for a randomised controlled trial. *Trials*. 2015. 16:339. <https://doi.org/10.1186/s13063-015-0884-x>
- Dardevet D, Sornet C, Balage M, et al. Stimulation of in vitro rat muscle protein synthesis by leucine decreases with age. *J Nutr*. 2000. 130:2630-2635.
- Di Girolamo FG, Situlin R, Mazzucco S, et al. Omega-3 fatty acids and protein metabolism: enhancement of anabolic interventions for sarcopenia. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2014. 17:145-150.
- Din USU, Brook MS, Selby A, et al. A double-blind placebo controlled trial into the impacts of HMB supplementation and exercise on free-living muscle protein synthesis, muscle mass and function, in older adults. *Clin Nutr*. 2019. 38:2071-2078.
- Dreyer HC, Drummond MJ, Pennings B, et al. Leucine-enriched essential amino acid and carbohydrate ingestion following resistance exercise enhances mTOR signaling and protein synthesis in human muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2008. 294:E392-E400.
- El Hajj C, Fares S, Chardigny JM, et al. Vitamin D supplementation and muscle strength in pre-sarcopenic elderly Lebanese people: a randomized controlled trial. *Arch Osteoporos*. 2019. 14:4. <https://doi.org/10.1007/s11657-018-0553-2>
- Farshidfar F, Pinder MA, Myrie SB. Creatine supplementation and skeletal muscle metabolism for building muscle mass: review of the potential mechanisms of action. *Curr Protein Pept Sci*. 2017. 18:1273-1287.
- Forbes SC, Candow DG, Ostojic SM, et al. Meta-analysis examining the importance of creatine ingestion strategies on lean tissue mass and strength in older adults. *Nutrients*. 2021. 13: 1912. <https://doi.org/10.3390/nu13061912>
- Gallagher PM, Carrithers JA, Godard MP, et al. β -hydroxy- β -methylbutyrate ingestion, Part I: effects on strength and fat free mass. *Med Sci Sports Exerc*. 2000. 32:2109-2115.
- Ganapathy A, Nieves JW. Nutrition and sarcopenia – What do we know? *Nutrients*. 2020. 12:1755. <https://doi.org/10.3390/nu12061755>
- Giresi PG, Stevenson EJ, Theilhaber J, et al. Identification of a molecular signature of sarcopenia. *Physiol Genomics*. 2005. 21:253-263.
- Girgis CM, Cha KM, So B, et al. Mice with myocyte deletion of vitamin D receptor have sarcopenia and impaired muscle function. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2019. 10:1228-1240.
- Girgis CM, Clifton-Bligh RJ, Hamrick MW, et al. The roles of vitamin D in skeletal muscle: Form, function, and metabolism. *Endocr Rev*. 2013. 34:33-83.
- Gray SR, Mittendorfer B. Fish oil-derived n-3 polyunsaturated fatty acids for the prevention and treatment of sarcopenia. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2018. 21:104-109.
- Haran PH, Rivas DA, Fielding RA. Role and potential mechanisms of anabolic resistance in sarcopenia. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2012. 3:157-162.
- Holland WL, Bikman BT, Wang LP, et al. Lipid-induced insulin resistance mediated by the proinflammatory receptor TLR4 requires saturated fatty acid-induced ceramide biosynthesis in mice. *J Clin Invest*. 2011. 121:1858-1870.
- Houston DK, Nicklas BJ, Ding J, et al. Dietary protein intake is associated with lean mass change in older, community-dwelling adults: the Health, Aging, and Body Composition (Health ABC) study. *Am J Clin Nutr*. 2008. 87:150-155.

- Jakubowski JS, Nunes EA, Teixeira FJ, et al. Supplementation with the leucine metabolite β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) does not improve resistance exercise-induced changes in body composition or strength in young subjects: A systematic review and meta-analysis. *Nutrients*. 2020. 12:1523. <https://doi.org/10.3390/nu12051523>
- Janssen I, Shepard DS, Katzmarzyk PT, et al. The healthcare costs of sarcopenia in the United States. *J Am Geriatr Soc*. 2004. 52:80-85.
- Katsanos CS, Kobayashi H, Sheffield-Moore M, et al. A high proportion of leucine is required for optimal stimulation of the rate of muscle protein synthesis by essential amino acids in the elderly. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2006. 291: E381-E387.
- Katsanos CS, Kobayashi H, Sheffield-Moore M, et al. Aging is associated with diminished accretion of muscle proteins after the ingestion of a small bolus of essential amino acids. *Am J Clin Nutr*. 2005. 82:1065-1073.
- Kaur J, Khare S, Sizar O, et al. Vitamin D deficiency. In: *Stat Pearls*. StatPearls Publishing. 2025 [cited 2025 Apr 18]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532266/>
- Kim JH, Hwang Bo Y, Hong ES, et al. Investigation of sarcopenia and its association with cardiometabolic risk factors in elderly subjects. *J Korean Geriatr Soc*. 2010. 14:121-130.
- Kim Y, Shin S, Hong N, et al. Low serum vitamin E level associated with low hand grip strength in community-dwelling adults: Korean National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES VII) 2016-2018. *Nutrients*. 2021. 13:1598. <https://doi.org/10.3390/nu13051598>
- Koopman R, Verdijk L, Manders RJF, et al. Co-ingestion of protein and leucine stimulates muscle protein synthesis rates to the same extent in young and elderly lean men. *Am J Clin Nutr*. 2006. 84:623-632.
- Koopman R, Wagenmakers AJM, Manders RJF, et al. Combined ingestion of protein and free leucine with carbohydrate increases postexercise muscle protein synthesis in vivo in male subjects. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2005. 288:E645-E653.
- Kreider RB, Kalman DS, Antonio J, et al. International society of sports nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *J Int Soc Sports Nutr*. 2017. 14:18. <https://doi.org/10.1186/s12970-017-0173-z>
- Landi F, Calvani R, Tosato M, et al. Protein intake and muscle health in old age: From biological plausibility to clinical evidence. *Nutrients*. 2016. 8:295. <https://doi.org/10.3390/nu8050295>
- Liao CD, Tsao JY, Wu YT, et al. Effects of protein supplementation combined with resistance exercise on body composition and physical function in older adults: a systematic review and meta-analysis. *Am J Clin Nutr*. 2017. 106:1078-1091.
- Martin H, Sayer AA, Jameson K, et al. Does diet influence physical performance in community-dwelling older people? Findings from the Hertfordshire Cohort Study. *Age Ageing*. 2011. 40:181-186.
- Meng SJ, Yu LJ. Oxidative stress, molecular inflammation and sarcopenia. *Int J Mol Sci*. 2010. 11:1509-1526.
- Milne AC, Avenell A, Potter J. Meta-analysis: Protein and energy supplementation in older people. *Ann Intern Med*. 2006. 144:37-48.
- Moon A, Heywood L, Rutherford S, et al. Creatine supplementation: Can it improve quality of life in the elderly without associated resistance training? *Curr Aging Sci*. 2013. 6:251-257.
- Morley JE, Argiles JM, Evans WJ, et al. Nutritional recommendations for the management of sarcopenia. *J Am Med Dir Assoc*. 2010. 11:391-396.
- Morley JE, Baumgartner RN. Cytokine-related aging process. *The Journals of Gerontology: Series A*. 2004. 59:M924-M929.
- Mukherjee A, Zetvekh JE, Nicar MJ, et al. Effect of chronic vitamin D deficiency on chick heart mitochondrial oxidative phosphorylation. *J Mol Cell Cardiol*. 1981. 13:171-183.
- Mulligan AA, Hayhoe RPG, Luben RN, et al. Positive associations of dietary intake and plasma concentrations of vitamin E with skeletal muscle mass, heel bone ultrasound attenuation and fracture risk in the EPIC-Norfolk cohort. *Antioxidants*. 2021. 10:159. <https://doi.org/10.3390/antiox10020159>
- Na W, Oh D, Hwang S, et al. Association between sarcopenia and energy and protein intakes in community-dwelling elderly. *Korean J Community Nutr*. 2022. 27:286-295.
- Ng TB, Cheung RCF, Wong JH, et al. Antiviral activities of whey proteins. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2015. 99:6997-7008.
- Norton LE, Layman DK, Bunpo P, et al. The leucine content of a complete meal directs peak activation but not duration of skeletal muscle protein synthesis and mammalian target of rapamycin signaling in rats. *J Nutr*. 2009. 139:1103-1109.
- Otsuka Y, Iidaka T, Horii C, et al. Dietary intake of vitamin E and fats associated with sarcopenia in community-dwelling older Japanese people: A cross-sectional study from the fifth survey of the ROAD study. *Nutrients*. 2021. 13:1730. <https://doi.org/10.3390/nu13051730>
- Palace VP, Khaper N, Qin Q, et al. Antioxidant potentials of vitamin A and carotenoids and their relevance to heart disease. *Free Radic Biol Med*. 1999. 26:746-761.
- Pansarasa O, Flati V, Corsetti G, et al. Oral amino acid supplementation counteracts age-induced sarcopenia in elderly rats. *Am J Cardiol*. 2008. 101(11S):S35-S41.
- Park CY, Shin S. Low dietary vitamin C intake is associated with low muscle strength among elderly Korean women. *Nutr Res*. 2024. 127:75-83.
- Peake J, Della Gatta P, Cameron-Smith D. Aging and its effects on inflammation in skeletal muscle at rest and following exercise-induced muscle injury. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2010. 298:R1485-R1495.
- Peng LN, Cheng YC, Yu PC, et al. Oral nutritional supplement with β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) improves nutrition, physical performance and ameliorates intramuscular adiposity in pre-frail older adults: A randomized controlled trial. *J Nutr Health Aging*. 2021. 25:767-773.
- Phillips SM, Tang JE, Moore DR. The role of milk- and soy-based protein in support of muscle protein synthesis and muscle protein accretion in young and elderly persons. *J Am Coll Nutr*. 2009. 28:343-354.
- Pupovac J, Anderson GH. Dietary peptides induce satiety via cholecystokinin-A and peripheral opioid receptors in rats. *J Nutr*. 2002. 132:2775-2780.
- Reginster JY, Beaudart C, Al-Daghri N, et al. Update on the ESCO recommendation for the conduct of clinical trials for drugs aiming at the treatment of sarcopenia in older adults. *Aging Clin Exp Res*. 2021. 33:3-17.
- Remelli F, Vitali A, Zurlo A, et al. Vitamin D deficiency and sarcopenia in older persons. *Nutrients*. 2019. 11:2861. <https://doi.org/10.3390/nu11122861>
- Rieu I, Sornet C, Bayle G, et al. Leucine-supplemented meal feeding for ten days beneficially affects postprandial muscle

- protein synthesis in old rats. *J Nutr.* 2003. 133:1198-1205.
- Rodman JS, Baker T. Changes in the kinetics of muscle contraction in vitamin D-depleted rats. *Kidney Int.* 1978. 13:189-193.
- Roh S, Kim KS. Relationship between vitamin D levels and sarcopenia: Insights from a Korean population study. *Korean J Fam Pract.* 2024. 14:203-210.
- Singh MAF, Bernstein MA, Ryan AD, et al. The effect of oral nutritional supplements on habitual dietary quality and quantity in frail elders. *J Nutr Health Aging.* 2000. 4:5-12.
- Smith GI, Atherton P, Reeds DN, et al. Dietary omega-3 fatty acid supplementation increases the rate of muscle protein synthesis in older adults: a randomized controlled trial. *Am J Clin Nutr.* 2011. 93:402-412.
- Smith GI, Julliand S, Reeds DN, et al. Fish oil-derived n-3 PUFA therapy increases muscle mass and function in healthy older adults. *Am J Clin Nutr.* 2015. 102:115-122.
- Suebthawinkul C, Panyakhamlerd K, Yotnuengnit P, et al. The effect of vitamin D2 supplementation on muscle strength in early postmenopausal women: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Climacteric.* 2018. 21:491-497.
- Syddall H, Evandrou M, Cooper C, et al. Social inequalities in grip strength, physical function, and falls among community dwelling older men and women: Findings from the hertfordshire cohort study. *J Aging Health.* 2009. 21:913-939.
- Tan A, Sullenbarger B, Prakash R, et al. Supplementation with eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid reduces high levels of circulating proinflammatory cytokines in aging adults: A randomized, controlled study. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids.* 2018. 132:23-29.
- Uchitomi R, Oyabu M, Kamei Y. Vitamin D and sarcopenia: Potential of vitamin D supplementation in sarcopenia prevention and treatment. *Nutrients.* 2020. 12:3189. <https://doi.org/10.3390/nu12103189>
- Umar M, Sastry KS, Chouchane AI. Role of vitamin D beyond the skeletal function: A review of the molecular and clinical studies. *Int J Mol Sci.* 2018. 19:1618. <https://doi.org/10.3390/ijms19061618>
- van Vliet S, Burd NA, van Loon LJC. The skeletal muscle anabolic response to plant- versus animal-based protein consumption. *J Nutr.* 2015. 145:1981-1991.
- Vellas B, Fielding RA, Bens C, et al. Implications of ICD-10 for sarcopenia clinical practice and clinical trials: Report by the international conference on frailty and sarcopenia research task force. *J Frailty Aging.* 2018. 7:2-9.
- Volpi E, Mittendorfer B, Rasmussen BB, et al. The response of muscle protein anabolism to combined hyperaminoacidemia and glucose-induced hyperinsulinemia is impaired in the elderly. *J Clin Endocrinol Metab.* 2000. 85:4481-4490.
- Ydfors M, Hughes MC, Laham R, et al. Modelling *in vivo* creatine/phosphocreatine *in vitro* reveals divergent adaptations in human muscle mitochondrial respiratory control by ADP after acute and chronic exercise. *J Physiol.* 2016. 594:3127-3140.
- Yoshino J, Smith GI, Kelly SC, et al. Effect of dietary n-3 PUFA supplementation on the muscle transcriptome in older adults. *Physiol Rep.* 2016. 4:e12785. <https://doi.org/10.14814/phy2.12785>