

마라톤의 스포츠 과학적 특성

계명대학교 체육대학 체육학과

김 기 진

Sports Scientific Characteristics of Marathon

Kijin Kim

Department of Physical Education, Keimyung University, Daegu, Korea

Although marathon has been considered as a simple or natural event, the multiple factors affect its performance such as physique and physical fitness including physical, technical, and mental factors. Academic disciplinary topics for talent identification in marathon performance are supported by physical characteristics, exercise physiology, biochemistry, nutrition, psychology, biomechanics, development and growth, evaluation and measurement. The scientific factors of marathon consist of physical and physiological characteristics of runners, overcoming trial of environmental effects, nutritional and psychological approach, ergogenic aid, effective training program, shoes and clothes. Especially, cardiopulmonary-related physical fitness is evaluated by maximal oxygen uptake, anaerobic threshold, oxygen transport rate, and lactate tolerance. These scientific approaches for the improvement of running performance have been applied to the pick-up of excellent runner, exercise training, and actual running race for the overcome of limiting factors as environmental condition, exercise-induced fatigue, and injury, etc. In conclusion, we must consider the scientific factors for actual running race with physiological or psychological paradigm, technical application, nutritional approach, genetic analysis and information and communication and technology (ICT) convergence science for the scientific consideration of improvement in marathon running performance.

Keywords: Marathon, Physical characteristics, Physiology, Cardiopulmonary function, Genetics, Limiting factor

서론

마라톤은 자연환경과 인간 사이의 조화와 다양한 과학적 요인 등이 복합적으로 작용하는 인간과 과학의 드라마이며, 총체적 스포츠과학의 산물로 간주된다. 마라톤의 스포츠 과학적 특성은 경기력 결정요인의 핵심을 이루며, 체격 및 체력적 특성을 중심으로 기술적 요인과 정신적 요인으로 세분화 될 수 있으며, 우수선수로서의 성장 잠재력을 가진 체격 특성, 심폐지구력을 중심으로 한 체력적 특성, 심리적 특성을 포함한 정신력 등은 선수의 발굴에서부터 훈련 방향 설정의 핵심적 근거로 제시될 수 있다¹⁾. 마라톤은 단순히 42.195 km의 거리를 가장 빠르게 달리기 위한 다소 원시적인 경쟁에 해당하

Received: May 9, 2016 Revised: May 26, 2016

Accepted: May 26, 2016

Correspondence: Kijin Kim

Department of Physical Education, Keimyung University, 1095

Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Korea

Tel: +82-53-580-5256, Fax: +82-53-580-5314

E-mail: kjk744@kmu.ac.kr

Copyright ©2016 The Korean Society of Sports Medicine

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

는 것으로 간주되지만, 다른 어떤 종목보다도 인간의 능력을 중심으로 한 첨단 과학적 요인들의 접목과 적용이 요구된다²⁾. 마라톤의 세계적 우수선수들은 대부분 원시적이고 자연적인 요인이 강한 아프리카의 케냐, 에티오피아, 멕시코, 브라질 등의 선수들이 주도하며, 첨단과학이 발달한 선진 스포츠강국에 해당하는 미국, 일본, 스페인 등의 선수들이 가세하는 형국을 이루고 있다. 따라서 자연적이고 원시적인 요인과 더불어 첨단과학에 의한 트레이닝 방법 혹은 경기와 관련된 요인들이 함께 고려되면서 경기력 향상이 이루어진다는 것을 알 수 있다³⁾.

우수선수를 발굴하고 선발하는 과정에서 인체 구조 및 기능 분석과 관련된 해부학, 생리학, 생화학, 역학, 발육발달, 측정평가 등을 바탕으로 체격 요인의 분석과 관련된 학문이 핵심을 이루고, 훈련 및 경기수행과정에서는 체력, 기술 및 전술 요인들을 최적화 및 최대화시키기 위한 생리학, 영양학, 역학, 심리학, 사회학, 운동제어 및 학습 등을 근간으로 한 트레이닝 이론과 효율적인 훈련여건 조성과 관련된 산업공학 및 환경공학 등을 포함하며²⁾, 마라톤의 저변확대, 경제적 및 사회문화적 변화와 조화를 이루는 미래지향적 발전방안을 위한 학문적 공헌도 빼놓을 수 없는 분야에 해당할 것이다. 본 논문에서는 이러한 학문적 요인을 바탕으로 마라톤의 스포츠 과학적 특성에 관련된 세부적인 내용을 살펴본다.

본 론

1. 체격 특성

체격 요인과 관련하여 우수선수들의 모델링에 관한 정확한 분석결과들은 우수선수들의 발굴 및 선발과정에서 중요한 근거로 제시될 수 있다. 신체적 크기, 각 신체분절에 의한 체격지수, 체형분석, 체지방 및 밀도를 중심으로 한 신체구성 등에 대한 과학적 분석과 그 결과를 데이터베이스로 구축하여 이용된다. 마라톤선수의 체격 특성은 바람의 저항과 체표면적에 의한 열손실 혹은 열생성의 불균형을 초래할 가능성이 높기 때문에 과도한 신장이나 체중은 불필요하며, 10% 미만의 낮은 체지방률과 세장형의 체형을 나타낸다.

마라톤선수들의 체격 특성을 분석한 선행연구들은 피하지방 두께, 하지장, 신체질량지수, 체지방률 등에 대해서 많은 결과들⁴⁾이 제시된 바 있는데, Arrese와 Ostariz⁵⁾는 대퇴 전부와 하퇴 뒷부분의 피하지방두께가 장거리 경기기록과 높은 관련성을 나타내는 것으로 보고한 바 있으며, 특히 남자⁶⁾와 여자⁸⁾

마라톤선수 모두 신체 각 부위 중 대퇴 전부의 피하지방두께가 가장 기록과 높은 상관성이 있는 것으로 보고되었다. 또한 전체 체지방률^{6,10)}도 매우 높은 관련성을 나타냄으로써 신체구성은 마라톤선수의 중요한 신체적 특성으로 간주될 수 있다. Schmid 등⁸⁾은 여자 우수선수 및 일반인들의 하퇴 둘레가 가늘수록 빠른 기록을 나타내는 것으로 보고한 바 있으며, Rust 등⁷⁾은 남자선수를 대상으로 한 분석결과에서 상완과 대퇴의 둘레가 가늘수록 마라톤 기록이 우수한 것으로 보고함으로써 체격의 둘레변인도 마라톤 경기력에 중요한 영향을 미치는 요인으로 간주되었다. 신장의 경우에는 미국의 프랭크 쇼터와 일본의 나카야마와 같이 180 cm에 이르는 우수선수들도 있었으나 역대 우수선수들의 대부분은 170-177 cm 사이의 신장을 나타냈으며, 자세분석과 관련하여 스트라이드(stride) 길이와 빈도 등을 포함한 주법의 특성에도 중요한 관련성을 나타내며, 체표면적의 크기에 따라서 체열균형에 의한 체온조절에도 중요한 영향을 미치게 된다¹¹⁾. Larsen¹²⁾은 케냐선수들의 우수한 장거리 운동능력의 바탕에는 높은 최대산소섭취량과 더불어 가늘고 긴 다리를 바탕으로 한 체질량 지수와 체형상의 특성이 근섬유 구성상 특성보다 낮은 에너지소비량을 나타내면서 효율적인 러닝 페이스(running pace)를 유지하는데 더욱 중요한 요인으로 작용한다고 주장하였다.

2. 유전적 특성

선수 발굴 및 훈련과정에서는 지구력의 특성에 영향을 미치는 유전자 다형성 분석¹³⁾을 비롯한 유전학 및 분자생물학의 활용도 널리 이루어지고 있다. 인간의 운동능력이 유전적 특성에 의해서 결정되며, 특정유전자가 운동능력을 결정한다는 가설¹⁴⁾에 근거하여 Couture 등¹⁵⁾이 올림픽 참가선수를 대상으로 DNA 특성을 분석하면서 이와 관련된 분야의 관심이 높아지기 시작하였다. 유전적 특성의 분석결과들은 우수한 잠재력을 가진 선수 발굴과 훈련과정에서 개인의 능력을 극대화시키기 위한 토대를 이루도록 함으로써 스포츠과학의 새로운 연구 주제로 널리 활성화되고 있다. 아프리카 흑인들의 유전적 특성이 육상선수들의 생리적 능력의 발현과정에서 어떤 특성을 나타내는가에 관한 관심이 중요한 주제로 제시된 바 있는데, 파워 발현에 우수한 유전자를 가진 아프리카 북부지역 흑인들은 유럽이 중미 지역을 식민지화 하는 과정에서 노동인력으로 이동하여 생활하게 되면서 자메이카의 우수한 단거리 유전자로 발달하게 되었을 가능성을 추론해 볼 수 있다. 또한 중부지역의 케냐와 에티오피아 지역의 흑인들이 장거리에 뛰어난 유전자를 가진 부분도 흥미로운 과학이 잠재되어 있을 가능성

이 높다. 이와 관련하여 Wilber와 Pitsiladis¹⁶⁾는 1968년 멕시코 올림픽 이래 케냐 및 에티오피아선수들의 국제대회 상위입상을 계속하는 8가지 요인을 제시한 바 있는데, 그 첫 번째 요인으로 유전적 특성을 제시한 바 있으며, 어린 시절 걷기위주의 환경적 특성, 선천적으로 높은 헤모글로빈과 헤마토크리치, 경제적 효율성의 페이스 유지가 가능한 체형, 근섬유의 유전적 특성, 전통적 식이, 고지환경, 경제적 지위 향상의 동기유발 등을 제시한 바 있다.

현재까지 약 20여개의 운동능력과 관련된 후보 유전자가 근력, 근파워, 근지구력 및 심폐지구력 등과 관련이 있는 것으로 알려져 있으며^{17,18)}, 특히 최근 들어 마라톤선수에게서 중요한 체력요인에 해당하는 심폐기능과 관련된 유전자를 찾아내기 위한 시도가 널리 진행되고 있으며, 아울러 혈관, 혈액의 구성, 심장과 폐의 구조 등을 부모로부터 물려받을 가능성이 제기되고 있다. 아울러 유전적 특성이 신체적 특성과 관련된 트레이닝 가용성의 범위에 어떤 영향을 미치는가를 규명하는 것이 현장 활용성의 높은 범위를 차지한다고 볼 수 있다. 심폐기능의 결정과정에서 유전적 영향의 범위는 근파워에 비해서 상대적으로 낮은 범위를 나타내는데, 이와 관련된 가장 대표적인 유전자로는 심장과 골격근에서 발현되는 안지오텐신 전환 효소(angiotensin converting enzyme; ACE) 유전자가 운동능력과 밀접한 관련이 있는 것으로 간주되면서 그 영향을 분석하기 위한 시도들이 널리 제시되고 있다^{19,20)}. 또한 단거리선수의 운동능력과 밀접한 관련성을 가지는 것으로 알려진 *ACTN3* 유전자²¹⁻²³⁾의 경우 근파워에 중요한 영향을 미치는 유전자이지만, 동형 XX 유전자형은 역으로 지구성 운동능력과도 관련성을 가진 것으로 보고된 바 있다^{24,25)}. 또한 그 밖에도 *NRF-1*, *Tfam*, *HIF-1 α* , *PGC-1 α* 등과 같이 미토콘드리아 기능에 영향을 미치는 유전자에 관한 분석도 널리 시도되고 있다²⁶⁾. 육상선수들의 체력요인에 대한 유전적인 영향으로 *ACTN3*와 *ACE* 유전자 등을 중심으로 근파워와 심폐지구력의 유전적 특성을 분석하기 위한 시도가 최근까지도 널리 계속되고 있다²⁷⁾.

3. 체력 특성

마라톤선수의 경기력 발휘과정에서 가장 중요한 결정요인에 해당하는 체력적 특성은 심폐기능을 중심으로 한 전신지구력, 근육기능과 관련된 근력 및 근지구력, 스피드를 중심으로 한 순발력, 유연성 등이다^{28,29)}. 특히 체력적 특성에는 에너지원의 충분한 저장과 이를 효율적으로 이용하기 위한 대사능력이 중요한 일부를 차지한다³⁰⁾. 최근 기록단축을 위한 급속한 스피드화가 현저하게 강조되면서(현재 세계최고기록 기준 초속

5.7198 m), 보다 높은 운동강도를 발휘하기 위한 순간적인 파워 유지의 무산소성 지구력, 피로요인으로 작용하는 젖산에 대한 내성능력 등도 함께 요구된다³¹⁾.

마라톤선수의 근력과 근파워는 기본적인 근육기능이며, 특히 근 지구력은 매우 중요한 요인에 해당한다. 근 기능과 근섬유구조는 선수 발굴, 훈련장도 및 프로그램 구성, 상해방지 등을 위한 중요한 근거로서 마라톤선수들은 주로 지근섬유의 구성 비율이 80%³²⁾ 혹은 85%³³⁾ 이상으로 높게 나타나며, 근섬유 1개당 모세혈관 밀도가 더욱 높게 나타나 산소공급의 효율성이 우수한 것으로 간주되고 있다³⁴⁾. 이러한 근섬유의 특성은 대부분 유전적 특성에 의해서 결정되는 것으로 간주되어 왔는데³⁵⁾, 트레이닝에 의한 근섬유 특성의 변화 가능성에 대한 다양한 의견들이 제시되고 있다. Simoneau 등³⁶⁾은 고강도 트레이닝에 의해서 지근섬유(type I)의 비율이 증가하는데 반해서 속근섬유의 type IIb는 감소하며, type IIa는 변화하지 않는 것으로 보고하였고, Ogborn과 Schoenfeld³⁷⁾는 트레이닝 시 주어지는 운동강도에 따라서 근섬유의 선택적 비대현상이 현저하게 일어날 가능성이 높은 것으로 보고함으로써 근섬유 구성비율의 유전적 결정 가능성과 관련된 여러 가지 이견들이 제시되고 있다. 또한 Trappe 등³⁸⁾은 마라톤 트레이닝 후 근섬유의 굵기는 속근섬유와 지근섬유 모두에서 감소하지만 그 기능은 향상되는데, 최대하운동 시 산소공급능력과 citrate synthase 활성도가 더욱 향상되며 이러한 향상은 지근섬유에서 더욱 현저하게 나타난다고 보고하였다.

마라톤선수를 비롯한 장거리선수들의 심폐기능의 분석에는 호흡가스분석 및 혈중 변인 측정을 포함한 점증적 최대운동 검사에 의해서 산소운반능력, 가스교환능력, 체내 완충능력, 체내 젖산내성 및 회복능력 등이 포함된다. 가장 포괄적인 지표로는 최대산소섭취량(maximal oxygen uptake), 무산소성 역치수준(anaerobic threshold) 및 러닝 효율성을 들 수 있다³⁹⁾. 이와 관련하여 di Prampero⁴⁰⁾는 마라톤선수의 러닝 스피드를 에너지소비량, 최대산소섭취량 및 최대산소소비분율 등으로 제시한 바 있으며, Knechtle⁴⁾은 마라톤선수의 경기력에 대해서 최대산소섭취량이 약 59%의 범위에서 영향을 미치는 것으로 보고하여 산소이용능력의 중요성이 강조되고 있다. 심박수 및 젖산 회복률은 심폐기능의 기본적인 척도로서 장거리 운동 능력과 고강도 운동의 지속적인 반복능력을 평가하기 위한 기본적인 지표임과 동시에 지구성 훈련의 효과분석을 위한 평가지표에 해당되는데⁴¹⁾, 우수한 마라톤선수들은 회복시간 3분의 심박수 회복률이 50%, 회복시간 15분의 젖산 회복률이 50%에 이르는 것으로 보고된 바 있다⁴²⁾. 심폐기능의 중추적

요인은 심박출량, 폐 확산능력, 혈액량 및 혈류량 등을 들 수 있으며, 말초적 제한요인은 동원 근육의 산소 이용 및 추출 능력, 근육의 확산능력, 미토콘드리아 효소 및 모세혈관 밀도 등을 들 수 있다^{43,44)}. Joyner⁴⁵⁾는 마라톤의 미래지향적 최고기록을 1시간 57분 58초로 예측한 바 있는데, 이러한 추정치의 산출은 84 mL/kg/min의 최대산소섭취량, 90%의 젖산 역치를 결정요인으로 적용하여 제시한 것으로서 이 두 가지 변인의 중요성을 잘 나타내주고 있다.

무산소성 역치의 경우 Wasserman과 Mcilroy⁴⁶⁾가 McArdle disease 환자를 대상으로 심장기능을 분석하는 과정에서 처음 제시한 이래 심폐기능 평가의 가장 중요한 지표로 간주되고 있다. 점증적 최대운동수행과정에서 피로의 발생시점이 어느 수준에서 나타나느냐에 따라서 일정한 운동강도의 지속능력이 결정된다는 관점에서 실제 마라톤 러닝 시 적정 페이스의 결정, 트레이닝 강도의 설정기준과 효과분석지표 등으로 활용되고 있다. 또한 젖산 역치⁴⁷⁾, 환기 역치⁴⁸⁾, 개인별 무산소성 역치⁴⁹⁾, onset of blood lactate accumulation (OBLA)⁵⁰⁾ 등의 방법에 의한 다양한 생리적 지표에 의한 결정방법이 심폐기능 평가의 중요한 기전으로 제시되고 있는데, 실제 마라톤선수들의 경우 훈련효과 분석 시 최대산소섭취량에 비해서 더욱 민감하게 반응하며 심폐기능 평가의 가장 핵심적인 지표로 간주되고 있기 때문에 1980년대 들어 매우 많은 학자들이 이를 분석하고 활용하기 위한 방법들을 널리 시도해왔다⁵¹⁾. 무산소성 역치가 마라톤 경기에서 더욱 중요하게 강조되는 것은 최근 마라톤 기록이 계속적으로 단축되면서 더욱 고속화되어 그 페이스가 최대산소섭취량 기준 85%~87%에 이르기 때문에 이를 뒷받침하기 위해서는 무산소성 역치의 수준도 더욱 높아져야 된다⁵²⁾는 것이다. 아울러 높은 무산소성 역치 수준을 기준으로 적용하여 운동강도를 조절하면서 고강도 인터벌 트레이닝의 방법을 훈련과정에 포함시켜 전체적인 심폐기능 향상을 달성할 수 있게 된다는 관점에서 고강도 인터벌 트레이닝 프로그램을 경기력 향상을 위한 트레이닝 프로그램으로 적용하는 시도들이 널리 제시되고 있다⁵³⁾.

기존의 전통적인 트레이닝 방법에서는 주로 저강도와 젖산 역치 수준에서의 지속적인 방법과 복합적인 방법을 중·장거리 육상선수들의 심폐지구력을 바탕으로 한 경기력 향상에 널리 활용해 왔다⁵⁴⁾. 최근에는 최대심박수의 약 90% 이상, 최대산소섭취량의 85% 이상에 해당하는 특이적인 생리적 능력 향상에 도움을 주기 위하여 상대적으로 높은 강도에서 설정되는 OBLA를 이용한 방법을 토대로 한 고강도 인터벌 트레이닝⁵⁵⁾을 실시함으로써 심폐지구력의 중요한 결정요인

에 해당하는 회복능력 향상, 근육의 젖산 내성 및 완충능력 강화에 크게 도움을 얻을 수 있는 것으로 강조되어 왔다. 또한 고강도인터벌 트레이닝은 그 기전분석을 통해서 미토콘드리아 생합성 활성화에도 크게 도움을 줄 수 있는 것⁵⁶⁾으로 보고되면서 분자생물학적 기전에 의해서 그 심폐기능 활성화와 더불어 건강증진에도 도움을 줄 수 있는 가능성이 뒷받침되고 있다.

체력 특성은 생리학적 접근을 토대로 한 세부적인 분석을 시도함으로써 우수선수 발굴, 효과적인 트레이닝 프로그램의 개발과 효과분석 등을 위해서 크게 도움을 받게 된다. 심폐기능 향상을 위한 트레이닝 구성 시 인터벌 트레이닝, 지속주 트레이닝, 고지트레이닝 등을 포함한 다양한 트레이닝 프로그램이 이용될 수 있으며, 운동강도 및 지속거리를 중심으로 한 다양한 방법이 제시될 수 있을 것이다⁵⁷⁾.

4. 심리적 특성

대부분 스포츠종목의 실제 경기수행 장면에서는 심리 또는 정신력이 다른 어떤 요인에 비해서 경기력을 결정하는데 높은 비중을 차지한다. 특히 마라톤경기는 투철한 정신력이 체력 요인의 영향 범위의 결정을 요구하는 종목으로서 스포츠심리학적 접근의 활성화를 요구한다. 물론 마라톤경기는 다양한 요인에 의해서 경기력이 결정되는데, 생리적 요인에 의해서 모든 것을 설명할 수 없으며¹²⁾, 심리적 요인과 생리적 요인의 적절한 결합에 의해서 영향을 받게 된다³⁸⁾. Singer⁵⁸⁾는 경기력 관련 심리적 요인을 실천력, 의지력, 자발성, 자기통제력, 도전성, 자신감, 목표지향성, 긍정적 사고, 상황대처능력, 심신의 조화 등으로 제시한 바 있다. 또한 우리나라 국가대표팀 지도자들은 우수선수들의 심리적 요인으로서 자신감, 집중력, 목표설정, 의지력, 생활관리 등을 중요하게 주장한 바 있다⁵⁹⁾. 특히 우수한 선수들은 체력수준, 운동능력 및 신체적 특성이 서로 비슷하기 때문에 심리적 능력이 승패에 중요한 영향을 미칠 것이다. 국가대표 선수들에게 요구되는 심리적 특성으로는 자신감, 집중력, 목표설정, 의지력, 생활관리 등⁵⁹⁾이 제시되었다. 정신력을 향상시키기 위한 심리학적 요인들 중에는 성격, 불안수준, 집중력, 자신감, 태도, 인지능력, 동기유발, 자아조절, 정확한 목표설정, 적정 각성수준의 유지 등이 포함되며, 이러한 요인들을 향상시키기 위해서는 심리훈련(mental training)과 카운셀링 기법 등이 활용될 수 있을 것이다. 이와 관련된 요인들 중에는 특히 자신감 부분이 절대적 요인을 차지하는데, 과거 우수선수들이 레이스를 펼치는 과정에서 생리적 특성이나 체력 수준이 비슷한 경우에는 자신감이 절대적으로 승부에

중요한 영향을 미칠 수 있는 사례를 여러 차례 볼 수 있었다. 아프리카의 마라톤선수들이 우수한 경기력을 발휘하는 저변에는 경제적, 사회적 지위의 향상 수단으로 마라톤이 크게 공헌함으로써 우수선수가 되기 위한 강한 동기유발 요인이 된다는 것도 힘든 마라톤 레이스에서 정신적인 부분이 중요한 범위를 차지할 수 있다는 것을 확인할 수 있는 부분이다.

5. 기술적 요인

마라톤경기의 기술적 요인의 향상을 위해서 다양한 요인의 복합적 원리를 적용하게 되는데, 정확한 장·단점 파악, 동작 오류의 수정, 우수한 기술 모델링의 제시, 신체 중심의 궤적분석을 비롯하여 세부적인 동작분석 등을 위한 역학적 분석의 시도, 기술숙달을 위한 생체지표에 의한 피드백의 적용, 기술향상의 정제와 관련된 고원현상 및 슬럼프의 원인분석과 해결방안의 제시 등이 요구된다²⁾. 특히 대기 온도, 바람 등의 환경적 요인, 도로의 표면 및 탄성, 신발, 유니폼, 머리 및 동체 무게, 체중, 하지장, 심리적 이완 및 최면상태, 생물학적 리듬, 역학적 에너지 전이, 발의 지면동작, 스트라이드 길이, 상체 및 팔의 움직임 등이 광범위하게 포함된다³⁾. 마라톤선수를 위한 전용 신발의 개발은 기록향상과 부상방지에 중요한 역할을 담당한다. 스포츠용 신발의 개발은 생체역학 및 스포츠공학의 연구분야로서 신발 착용 시 움직임 분석을 위한 3차원 입체영상분석기법, 압력 센서와 적외선카메라로 바닥면의 압력분포를 측정하는 기법 등을 이용해서 전체적인 신발 무게의 경량화, 신발 바닥면에 주어지는 충격량 완화와 그 흡수상태의 최대화, 바닥면의 내구성, 발 뒷꿈치의 움직임조절 및 물기 제거 등에 관한 분석이 다양하게 요구된다²⁾. 마라톤선수를 위한 전용 신발의 개발은 기록향상과 부상방지에 중요한 역할을 담당한다.

6. 영양학적 요인

마라톤경기는 2시간 이상 지속되는 과정에서 대사기능의 원활한 수행을 어렵게 만드는 피로유발물질의 과도한 축적, 영양상태 및 수분대사의 불균형 등에 의해서 운동 유발성 피로⁶⁰⁾의 발생가능성이 매우 높는데 이를 효율적으로 극복하기 위해서는 영양학의 적극적인 활용이 요구된다. 즉, 수분손실에 대한 저항능력과 적절한 섭취방안, 운동성 피로의 방지와 적절한 처치, 충분한 에너지 공급을 위한 영양학적 접근⁶¹⁾은 마라톤경기에서 발생하는 운동성 피로발생의 주된 원인인 에너지원의 저장량 고갈, 전해질농도의 불균형, 젖산 및 암모니아를 중심으로 한 대사부산물물의 축적, 심리적 피로 등을 포함하며, 특히 운동성 피로를 극복하기 위해서는 스포츠영양

학적 관점에서 에너지원의 충분한 섭취를 위한 식이요법과 에르고제닉 에이드(ergogenic aids)의 활용 등이 제시될 수 있다⁶²⁾.

마라톤경기 시 주요 에너지원인 탄수화물의 원활한 공급을 위한 체내 글리코겐 저장량은 2시간 이상 계속되는 많은 에너지요구에 대처할 수 있는 충분한 수준이 요구되지만 제한된 저장량으로 인해 빠른 스피드에 의한 완주를 위해서는 항상 부족한 상태를 나타낼 가능성이 높으며, 레이스 후반에는 심지어 저혈당 현상을 나타내면서 운동성 피로를 유발하게 된다⁶³⁾. 따라서 글리코겐 저장량을 증가시키기 위한 효과적인 트레이닝 프로그램과 글리코겐 로딩으로 불리는 식이요법이 요구된다. 과거 레이스 과정에서 발생하는 35 km 지점에서의 현저한 기록 저하현상은 근육 내 글리코겐의 저장량을 증가시키기 위한 식이요법⁶⁴⁾이 제시되면서 효율적으로 극복되기 시작하였다. 글리코겐 로딩방법은 초창기에는 저탄수화물 섭취와 고탄수화물 섭취를 적절하게 병행하면서 90분 이상 지속되는 레이스에서 2%~3%의 기록향상을 나타내는 것⁶⁵⁾으로 제시되면서 마라톤선수들이 널리 활용해오고 있었으나 로딩과정에서 사전에 탄수화물 고갈단계 없이도 체내 글리코겐 저장량을 높일 수 있는 방법⁶⁶⁾이 제시되는 등 그 개선방안이 모색되기도 하였으며, 글리코겐 로딩이 기록향상에 크게 도움이 되지 않는다는 주장⁶⁷⁾도 함께 제시되면서 논란은 계속되어 오고 있으나 보다 적절한 방법을 모색하기 위한 시도는 앞으로도 계속 활성화될 것이다⁶⁸⁾.

7. 환경적 요인

마라톤경기는 도로에서 장시간 동안 이루어지기 때문에 외부 환경의 영향을 많이 받으면서 경기력을 저해하는 다양한 환경적 요인에 노출되어 있다. 경기력 발휘과정에 대해서 부정적인 영향을 미치는 환경적 요인으로는 기온, 습도, 고지, 대기 오염, 시차 등이 포함되며, 이를 극복하기 위한 주된 내용으로는 체온증가에 대한 적절한 반응과정의 분석과 이에 대한 효과적인 처치방법이 중요한 핵심을 이룬다.

고온은 심장 순환계통에 과도한 부담을 주면서 체온증가의 주된 요인으로 작용하게 되면서 마라톤선수의 경기력에 부정적인 요인으로 작용하며, 체온상승으로 인한 부상의 발생 가능성을 증가시킨다. 고온에 의한 체온상승은 심박수 및 산소섭취량의 증가를 통해서 근육 내 글리코겐 고갈 조기화의 원인으로 작용하며, 젖산 축적에 의한 피로 유발 증가⁶⁹⁾를 나타내는데 이러한 체온증가현상은 습도 증가 시 더욱 부정적인 영향을 나타낸다⁷⁰⁾. 고온과 습도 증가현상은 탈수현상을 초래하면서 혈장량 감소, 혈류 장애, 전해질 불균형 등에 의한 부정적인

영향을 더욱 악화시키기 때문이다^{71,72)}. 운동선수들의 훈련과 정에서 일일 수분손실 범위는 4-10 L, 소듐 손실범위는 3,500-7,000 mg으로서 이의 적절한 재보충은 효율적인 피로회복에 매우 중요하며, 하루 훈련 후 체중의 5% 이상 감소를 나타내는 경우 충분한 수분공급은 필수적이다⁷³⁾. 따라서 수분의 효율적인 공급을 위한 스포츠음료의 개발, 충분한 섭취량, 흡수속도를 고려한 수분의 온도, 산-염기정도, 삼투압 등을 적절하게 유지하기 위한 노력이 요구될 것이다. 장시간 러닝 시 탄수화물 고갈과 더불어 단백질 대사와 관련된 에너지원 부족현상이 동반될 경우 대뇌를 중심으로 한 중추성 피로의 발생 가능성⁷⁴⁾이 제시된 이래 아미노산 재보충의 중요성을 고려한 다양한 스포츠 음료의 개발은 최근까지도 시도되고 있다⁷⁵⁾. 체온조절과 관련된 공학적 접근의 경우 햇빛에 의한 열작용을 차단하기 위해서 흰색의 유니폼이나 모자착용, 선글라스의 착용 등이 도움이 될 것이다.

8. 제한요인

스포츠에서 경기력 발휘의 대표적인 제한요인으로는 상해를 들 수 있는데, 상해 방지를 위한 스포츠 의학적 접근은 마라톤에서도 예외 없이 중요한 범위에 해당한다. 마라톤선수의 상해 방지와 관련된 중요한 요인으로는 신발의 적절함, 러닝 동작 오류수정, 트레이닝과정의 문제점 해소, 스트레칭을 포함한 준비운동, 근육기능의 강화 및 균형유지 등이 포함되는데, 상해발생과 관련된 신체 구조적 특성에 대한 의학적 진단, 오버트레이닝의 방지를 위한 적절한 트레이닝 프로그램의 적용, 심장과 폐와 관련된 질환의 철저한 분석 등에 대한 적극적인 관심을 기울여야 할 것이다⁷⁶⁾. 특히 우려되는 것은 최근 건강을 위해서 시민들이 마라톤을 직접 수행하는 과정에서 심장에 대한 부담은 물론 지면 반력에 의한 충격량, 표면 및 내리막 달리기에 의한 신체 자극, 유연성 및 근육기능의 부조화로 발생하는 상해, 신발 및 환경변화와 기술적인 문제점 등에 의한 상해발생 등과 같은 다양한 문제점이 발생하게 되는데, 이를 방지하거나 대처할 수 있는 과학적, 체계적 운동 프로그램에 대한 정보 제공과 대처방법이 미흡하다. 마라톤 인구의 급증과정에서 나타나는 심각한 문제점은 주요 건강 마라톤 대회에서 부상자의 증가는 물론 심지어 사망자까지 발생하고 있다는 것은 이에 관한 절대적인 중요성을 의미한다고 볼 수 있다.

9. 미래지향적 고려사항

미래의 스포츠과학은 보다 더 다양한 학문적 접근과 조화를

요구하게 될 것이며, 첨단과학의 활용, 다변화된 정보화와 주변과학과의 공유 등을 요구하게 될 것이 예측된다는 관점에서 더욱 체계적인 접근과 활용이 시도되어야 한다²⁾. 특히 의료, 메카트로닉스(mechatronics), 섬유, 웨어러블 센서를 비롯한 첨단 신소재 및 기계공학 등을 중심으로 한 information and communication technology (ICT) 융·복합 분야가 마라톤에 대한 다양한 접근을 시도하고 있다. 그러나 마라톤은 자신의 능력을 최대화하기 위한 과정에서 스스로 엄청난 시련을 극복해야 하기 때문에 더욱 철저한 자신과의 싸움을 요구한다. 선수들이 중요한 대회에 대비하여 스포츠과학을 바탕으로 얼마나 많은 땀과 피나는 노력을 기울이면서 선수 자신과의 싸움을 극복하느냐 하는 것이 경기력 향상을 위한 최선의 방안이 될 것이다.

결론

마라톤은 단순하면서도 인간적인 스포츠이면서도 과학적 속성의 산물에 해당하는데, 스포츠 과학적 특성은 체격, 체력, 심리, 기술, 제한요인의 극복 등을 들 수 있다. 체격요인은 신체구성, 신체 크기 등이 포함되며, 체력 요인은 생리적 이론을 바탕으로 한 심폐기능, 근육구조 및 특성이 주된 요인에 해당하는데, 최대산소섭취량, 산소운반효율, 무산소성 역치, 젖산 내성 등이 경기력에 중요한 영향을 미친다. 또한 심리적 특성을 바탕으로 한 정신력, 기술적 요인 등과 관련된 과학적 특성이 강조되며, 2시간 이상 지속되는 과정에서 발생하는 운동 유발성 피로, 영양상태 및 수분대사의 불균형, 상해 등의 효율적인 극복은 스포츠과학의 적극적인 활용이 요구된다. 마라톤의 과학적 특성은 선수들의 생리학적 특성, 환경극복과 관련된 과학, 영양학적인 관점에서의 식이요법과 훈련외적 보조물의 활용, 다양한 분석지표를 이용한 과학적인 트레이닝 방법, 심리적인 요인의 적극적인 고려방안, 신발과 유니폼 등을 포함한 스포츠 ICT 융·복합을 바탕으로 한 미래지향적 첨단과학의 활용, 다변화된 정보화와 주변과학과의 공유 등이 요구된다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Myburgh KH. What makes an endurance athlete world-class? Not simply a physiological conundrum. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2003;136:171-90.
- Kim K, Ahn N, Hong C. Paradigm of marathon coaching science. *J Coach Dev* 2010;12:175-84.
- Kim K. Sports science. Daegu: Keimyung University Press; 2010.
- Knechtle B. Relationship of anthropometric and training characteristics with race performance in endurance and ultra-endurance athletes. *Asian J Sports Med* 2014;5:73-90.
- Arrese AL, Ostariz ES. Skinfold thicknesses associated with distance running performance in highly trained runners. *J Sports Sci* 2006;24:69-76.
- Barandun U, Knechtle B, Knechtle P, et al. Running speed during training and percent body fat predict race time in recreational male marathoners. *Open Access J Sports Med* 2012;3:51-8.
- Rust CA, Knechtle B, Knechtle P, Rosemann T. Comparison of anthropometric and training characteristics between recreational male marathoners and 24-hour ultramarathoners. *Open Access J Sports Med* 2012;3:121-9.
- Schmid W, Knechtle B, Knechtle P, et al. Predictor variables for marathon race time in recreational female runners. *Asian J Sports Med* 2012;3:90-8.
- Hagan RD, Upton SJ, Duncan JJ, Gettman LR. Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices in female distance runners. *Br J Sports Med* 1987;21:3-7.
- Hagan RD, Smith MG, Gettman LR. Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices. *Med Sci Sports Exerc* 1981;13:185-9.
- Noakes T. Lore of running. 4th ed. Champaign: Human Kinetics; 2003.
- Larsen HB. Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2003;136:161-70.
- Bouchard C, Dionne FT, Simoneau JA, Boulay MR. Genetics of aerobic and anaerobic performances. *Exerc Sport Sci Rev* 1992;20:27-58.
- Woods DR, World M, Rayson MP, et al. Endurance enhancement related to the human angiotensin I-converting enzyme I-D polymorphism is not due to differences in the cardiorespiratory response to training. *Eur J Appl Physiol* 2002;86:240-4.
- Couture L, Chagnon M, Allard C, Bouchard C. More on red blood cell genetic variation in Olympic athletes. *Can J Appl Sport Sci* 1986;11:16-8.
- Wilber RL, Pitsiladis YP. Kenyan and Ethiopian distance runners: what makes them so good? *Int J Sports Physiol Perform* 2012;7:92-102.
- Perusse L, Rankinen T, Rauramaa R, Rivera MA, Wolfarth B, Bouchard C. The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2002 update. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:1248-64.
- Rankinen T, Perusse L, Rauramaa R, Rivera MA, Wolfarth B, Bouchard C. The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2003 update. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:1451-69.
- Abraham MR, Olson LJ, Joyner MJ, Turner ST, Beck KC, Johnson BD. Angiotensin-converting enzyme genotype modulates pulmonary function and exercise capacity in treated patients with congestive stable heart failure. *Circulation* 2002;106:1794-9.
- Chiu LL, Hsieh LL, Yen KT, Hsieh SS. Ace I/D and Actn3 R577x polymorphism in elite athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37:S167.
- Broos S, Malisoux L, Theisen D, et al. Evidence for ACTN3 as a speed gene in isolated human muscle fibers. *PLoS One* 2016;11:e0150594.
- MacArthur DG, North KN. A gene for speed? The evolution and function of alpha-actinin-3. *Bioessays* 2004;26:786-95.
- Niemi AK, Majamaa K. Mitochondrial DNA and ACTN3 genotypes in Finnish elite endurance and sprint athletes. *Eur J Hum Genet* 2005;13:965-9.
- Eynon N, Duarte JA, Oliveira J, et al. ACTN3 R577X polymorphism and Israeli top-level athletes. *Int J Sports Med* 2009;30:695-8.
- Yang N, MacArthur DG, Gulbin JP, et al. ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *Am J Hum Genet* 2003;73:627-31.
- Maeda S, Murakami H, Kuno S, Matsuda M, Murakami K. Individual variations in exercise training-induced physiological effects and genetic factors. *Int J Sport Health Sci* 2006;4:339-47.
- Trappe S, Luden N, Minchev K, Raue U, Jemiole B, Trappe TA. Skeletal muscle signature of a champion sprint runner. *J Appl Physiol* (1985) 2015;118:1460-6.
- Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Koralsztejn JP. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:2089-97.
- Reilly T, Secher N, Snell P, Williams C. Physiology of sports. London: E & FN Spon; 1990.
- Brownell KD, Steen SN, Wilmore JH. Weight regulation

- practices in athletes: analysis of metabolic and health effects. *Med Sci Sports Exerc* 1987;19:546-56.
31. Beneke R, Leithauser RM, Ochentel O. Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. *Int J Sports Physiol Perform* 2011;6:8-24.
32. Saltin B. Metabolic fundamentals in exercise. *Med Sci Sports* 1973;5:137-46.
33. Costill DL, Fink WJ, Pollock ML. Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Med Sci Sports* 1976;8:96-100.
34. Ingjer F. Capillary supply and mitochondrial content of different skeletal muscle fiber types in untrained and endurance-trained men: a histochemical and ultrastructural study. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1979;40:197-209.
35. Healthy Diet Base. Physical and biological characteristics of a marathon runner [Internet]. Healthy Diet Base; 2015 [cited 2016 May 20]. Available from <http://www.healthdiethbase.com/physical-and-biological-characteristics-of-a-marathon-runner/>.
36. Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Marcotte M, Thibault MC, Bouchard C. Human skeletal muscle fiber type alteration with high-intensity intermittent training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1985;54:250-3.
37. Ogborn D, Schoenfeld BJ. The role of fiber types in muscle hypertrophy: implications for loading strategies. *Strength Cond J* 2014;36:20-5.
38. Trappe S, Harber M, Creer A, et al. Single muscle fiber adaptations with marathon training. *J Appl Physiol* (1985) 2006;101:721-7.
39. Wells GD, Norris SR. Assessment of physiological capacities of elite athletes & respiratory limitations to exercise performance. *Paediatr Respir Rev* 2009;10:91-8.
40. di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986;7:55-72.
41. Forgo I, Schimert G. The duration of effect of the standardized Ginseng extract G115 in healthy competitive athletes. *Notabene Med* 1985;15:636-40.
42. Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:70-84.
43. di Prampero PE. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 1981;89:143-222.
44. Robergs RA, Roberts SO. Exercise physiology: exercise, performance, and clinical applications. St. Louis: Mosby; 1997.
45. Joyner MJ. Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol* (1985) 1991;70:683-7.
46. Wasserman K, Mcilroy MB. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am J Cardiol* 1964;14:844-52.
47. Simon J, Young JL, Blood DK, Segal KR, Case RB, Gutin B. Plasma lactate and ventilation thresholds in trained and untrained cyclists. *J Appl Physiol* (1985) 1986;60:777-81.
48. Davis JA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:6-21.
49. Stegmann H, Kindermann W, Schnabel A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 1981;2:160-5.
50. Sjodin B, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med* 1981;2:23-6.
51. Okano AH, Altimari LR, Simoes HG, et al. Comparison between anaerobic threshold determined by ventilatory variables and blood lactate response in cyclists. *Rev Bras Med Esporte* 2006;12:39-44.
52. Tolfrey K, Hansen SA, Dutton K, McKee T, Jones AM. Physiological correlates of 2-mile run performance as determined using a novel on-demand treadmill. *Appl Physiol Nutr Metab* 2009;34:763-72.
53. Bond B, Cockcroft EJ, Williams CA, et al. Two weeks of high-intensity interval training improves novel but not traditional cardiovascular disease risk factors in adolescents. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2015;309:H1039-47.
54. Tjelta LI, Enoksen E. Training characteristics of male junior cross country and track runners on european top level. *Int J Sports Sci Coach* 2010;5:193-203.
55. Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med* 2002;32:53-73.
56. 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(Pt 6):1011-22.
57. Ahn NY, Park J, Kim K. Effects of exercise intensity distribution of cardio-pulmonnay endurance training in cyclists middle. *J Coach Dev* 2016;18:47-52.
58. Singer RE. Sport psychology: an integrated approach. *Proceedings of 8th World Congress Sport Psychology*; 1993 Jun 22-27; Lisbon, 1993. p. 229-58.
59. Yoo J, Chang D. Sport psychology and psychological skills perceived by coaches and athletes in Korea: an exploratory study. *Proceedings of 1998 International Sports Scientific*

- Congress of Seoul Olympic Game, 1998. p. 493-9.
60. Jeukendrup AE. Nutrition for endurance sports: marathon, triathlon, and road cycling. *J Sports Sci* 2011;29 Suppl 1:S91-9.
61. Nicol C, Komi PV, Marconnet P. Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance. *Scand J Med Sci Sports* 1991;1:18-24.
62. Beck KL, Thomson JS, Swift RJ, von Hurst PR. Role of nutrition in performance enhancement and postexercise recovery. *Open Access J Sports Med* 2015;6:259-67.
63. Felig P, Cherif A, Minagawa A, Wahren J. Hypoglycemia during prolonged exercise in normal men. *N Engl J Med* 1982;306:895-900.
64. Coyle EF, Coggan AR. Effectiveness of carbohydrate feeding in delaying fatigue during prolonged exercise. *Sports Med* 1984;1:446-58.
65. Hawley JA, Schabort EJ, Noakes TD, Dennis SC. Carbohydrate-loading and exercise performance: an update. *Sports Med* 1997;24:73-81.
66. Burke LM, Hawley JA, Wong SH, Jeukendrup AE. Carbohydrates for training and competition. *J Sports Sci* 2011;29 Suppl 1:S17-27.
67. Coyle EF, Jeukendrup AE, Oseto MC, Hodgkinson BJ, Zderic TW. Low-fat diet alters intramuscular substrates and reduces lipolysis and fat oxidation during exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2001;280:E391-8.
68. Burke LM, Wood C, Pyne DB, Telford DR, Saunders PU. Effect of carbohydrate intake on half-marathon performance of well-trained runners. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2005; 15:573-89.
69. Kruk B, Kaciuba-Uscilko H, Nazar K, Greenleaf JE, Kozłowski S. Hypothalamic, rectal, and muscle temperatures in exercising dogs: effect of cooling. *J Appl Physiol* (1985) 1985;58:1444-8.
70. Ely MR, Chevront SN, Roberts WO, Montain SJ. Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:487-93.
71. Maughan RJ, Shirreffs SM. Fluid and electrolyte loss and replacement in exercise. In: Harries M, Williams C, Stanish WD, Micheli LJ, editors. *Oxford textbook of sports medicine*. 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press; 1998. p. 97-112.
72. Sawka MN, Greenleaf JE. Current concepts concerning thirst, dehydration, and fluid replacement: overview. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:643-4.
73. Shirreffs SM, Sawka MN. Fluid and electrolyte needs for training, competition, and recovery. *J Sports Sci* 2011;29 Suppl 1:S39-46.
74. Newsholme EA, Acworth IN, Blomstrand E. Amino acids, brain neurotransmitters and a functional link between muscle and brain that is important in sustained exercise. In: Benzi G, editor. *Advances in myochemistry*. London: John Libbey Eurotext; 1987. p. 127-33.
75. Tai CY, Joy JM, Falcone PH, et al. An amino acid-electrolyte beverage may increase cellular rehydration relative to carbohydrate-electrolyte and flavored water beverages. *Nutr J* 2014;13:47.
76. Shephard RJ, Astrand PO. *Endurance in sport*. Oxford: Blackwell Scientific Publication; 1993.