

Exercise physiology basis and necessity of hypoxic training to improve exercise performance in elite athletes

Hun-Young Park¹, Jisu Kim¹, & Kiwon Lim^{1,2*}

¹Konkuk University Physical Activity and Performance Institute & ²Konkuk University Department of Physical Education

[Purpose] The purpose of this study is to emphasize the need for the establish and the use of altitude training center via examining exercise training method in natural or artificial altitude environment that is applied to various elite athletes in various advanced countries to maximize exercise performance and its effectiveness. **[Results]** Altitude training in natural or artificial altitude environment enhances aerobic and anaerobic exercise performance based on the hematological and nonhematological adaptations to hypoxic conditions. These altitude training methods can be classified into living high training high (LHTH), living high training low (LHTL), and living low training high (LLTH). LHTH (i.e., developed since the 1968 Mexico Olympics) and LHTL (i.e., developed in the 1990s by Levine and Stray-Gundersen) improve exercise performance via hematologic changes through erythropoiesis such as increased hemoglobin mass and erythrocyte volume. On the other hand, LLTH (i.e., has been developed variously since the 2000s) is composed continuous hypoxic training (CHT), intermittent hypoxic training (IHT) and repeated sprint training in hypoxia (RSH), and the altitude environment is constructed using a vacuum pump and a nitrogen generator. In general, LLTH method dose not induce hematological change in a short time within 3 hours. However, CHT and IHT enhance aerobic exercise capacity by improved exercise economy, supply and utilization of blood to tissues, capillary and mitochondrial densities, and oxidative enzyme activity through various biochemical and structural changes in skeletal muscle and cardiac muscle. RSH enhances anaerobic power and repetitive sprint performance by improving glycolytic enzyme, glucose transport, and pH control. In Korea, however, there are almost no facilities for altitude training that is applied to enhance athletic performance in advanced sports countries and recognition of the need for altitude training is also very poor. **[Conclusions]** Therefore, it is very urgent to develop altitude training for maximizing athletic performance in Korea and a lot of support and efforts are needed from the government and local governments.

Key words: Altitude training, Altitude training center, Elite athletes, Exercise performance

서 론

자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝은 과거 수십

년간 전세계적으로 유산소성 운동선수들의 경기력 향상을 위해서 활용되어져 왔으며, 오늘날에는 스프린트 및 저항성 종목의 운동선수들에게도 다양한 방법으로 적용될 뿐만 아니라 유·무산소성 운동능력이 모두 요구되는 팀 스포츠 선수들의 경기력 향상에도 활용되고 있다(Brocherie et al., 2017; Girard et al., 2013; McLean et al., 2014; Park & Lim, 2017).

자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝 방법은 크게 2,000~3,000m 자연적 고지환경에서 생활 및 훈련을

논문 투고일 : 2018. 06. 21.

논문 수정일 : 2018. 08. 20.

게재 확정일 : 2018. 09. 10.

* 교신저자 : 임기원 (exercise@konkuk.ac.kr).

* 이 논문은 2015년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과제임 (2015M3C1B1019479)

* 이 논문은 건국대학교 KU연구전임 프로그램에 의해 수행된 과제임

실시하는 living high training high(LHTH), 2,000~3,000m 자연적·인공적 고지환경에서 생활하면서 1,500m 이하의 저지대 환경 및 평지 환경에서 훈련을 실시하는 living high training low(LHTL), 평지환경에서 생활하지만 2,000~4,000m의 인공적 고지환경에서 훈련을 실시하는 living low training high (LLTH) 3가지 형태로 나눌 수 있으며, 이러한 트레이닝 방법은 일반적으로 유산소성 운동능력 개선을 목적으로 개발되었으나 최근에는 운동종목 및 트레이닝 목적에 따라서 세부적으로 더 다양하게 분류하여 적용하고 있다(Millet et al., 2013).

지구성 운동종목에 있어서 운동수행능력은 전신에서 활동근과 같은 국소부위로의 산소운반능력(oxygen transporting capacity)에 의해서 큰 영향을 받는다(Park et al., 2018). 이러한 산소운반능력의 개선은 유산소성 에너지 생산의 효율성 증가를 가져오고, 결과적으로 최대 산소섭취량(maximal oxygen uptake; $VO_2\max$)을 증가시킬 뿐만 아니라 운동 중 피로할 때까지의 시간 개선과 더 높은 운동강도 증가를 통해 운동수행능력을 향상시킨다(Park et al., 2016; Sinex & Chapman, 2015). 자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝은 헤모글로빈(hemoglobin; Hb) 질량 증가 및 적혈구(red blood cell; RBC) 생성(erythropoiesis)과 같은 혈액학적 변화와 심혈관계 기능 및 골격근 산소이용능력과 같은 비혈액학적 변화를 통해 산소운반 및 이용능력을 향상시켜 유산소성 종목의 운동선수들의 경기력을 개선시키는 것으로 보고되고 있다(Czuba et al., 2011; Park et al., 2017; Park & Nam, 2017).

최근에는 무산소성 운동종목 선수들 및 팀스포츠 선수들의 운동수행능력 향상을 위해서 repeated sprint training in hypoxia(RSH)라는 새로운 자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝 방법이 적용되고 있다. RSH는 일반적으로 2,000~4,000m에 해당되는 자연적·인공적 고지환경에서 4~6주의 기간 동안 30초 이내의 고강도 운동을 10회 이상 반복적으로 실시하는 방법으로 평지환경에서의 인터벌 운동과 비교했을 때 활동근에서 유의하게 더 큰 분자적 수준 및 혈액관류(blood perfusion)의 변화와 보다 더 개선된 젖산에 대한 내성, 산-염기 평형 능력, 해당과정에 관여하는 효소의 활성 등에 의해 무산소성 운동능력을 개선시키는 것으로 보고되고 있다(Faiss et al., 2013; Galvin et al., 2013; Hamlin et al., 2017; Park & Lim, 2017). 이에 대한 연구결과를 자세히 살펴보면,

Faiss et al.(2013)은 40명의 훈련된 대상자를 바탕으로 3,000m 저산소 환경과 485m의 평지환경에서 4주간, 15회, 5×10초의 all-out repeated sprint training을 실시한 결과 저산소 환경에서 트레이닝을 실시한 집단에서 보다 개선된 평균파워(average of power output) 및 운동지속시간을 나타냈다고 보고하였으며, 이러한 결과는 근생검(muscle biopsy)에 의해 검사된 HIF(hypoxic inducible factor)-1 α 의 mRNA, carbonic anhydrase III, monocarboxylate transporter-4에 대한 유의한 증가와 mitochondrial transcription factor A, peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator 1 α , monocarboxylate transporter-1의 유의한 감소와 같은 분자적 수준의 변화 및 총 헤모글로빈 농도의 증가 현상으로 나타나는 혈액관류(blood perfusion)의 변화와 이로 인한 운동 중 피로를 유발하는 혈중젖산 및 다양한 산성물질의 제거가 증가해 나타나는 현상이라고 주장하였다. 또한, Galvin et al.(2013)은 30명의 럭비선수들을 대상으로 4주간 12회 세션의 repeated sprint training(10×6초, 30초 휴식)을 13% F_iO_2 에 해당되는 저산소 환경과 21% F_iO_2 에 해당되는 평지환경에서 수행하는 두 집단으로 분류하여 RSH의 효용성을 검토한 결과 저산소 환경에서 트레이닝을 실시한 실험군에서 더 큰 무산소성 운동수행능력의 향상을 보고하였으며, 이러한 현상은 더 큰 산소섭취량의 증가와 뇌에서의 산소이용감소로 인해 골격근에서 사용할 수 있는 산소가 증가한 결과라고 보고하였다.

이외에도 최근 몇몇의 연구자들은 저항성 트레이닝을 통한 근 기능(muscular function) 개선을 위해 자연적·인공적 고지환경을 적용하고 있다. 이러한 원리는 Schoenfeld et al.(2013)이 제시한 바와 같이 운동에 의한 대사적 스트레스가 증가된 근 섬유의 동원, 증가된 호르몬 방출, 마이오카인 생산의 변화, 반응성 산소종 생산의 증가, 세포 부종 등을 일으켜 근 비대 및 근 기능을 개선을 유도한다는 것에 기초한다. 이를 바탕으로 저산소 환경에서 저항성 운동 트레이닝을 적용한 연구들에서는 근 비대 및 근 기능의 개선 효과가 일반적으로 혈중젖산, 무기인산(inorganic phosphate; Pi), 수소이온(hydrogen ion; H^+)과 같은 더 큰 대사산물의 축적과 성장호르몬(growth hormone; GH), 인슐린 유사성장 인자(insulin like growth factor; IGF)-1, 카테콜라민, 코티졸, 테스토스테론과 같은 더 큰 호르몬 반응에 의해 나타나는 것으로 보고하고 있다(Kon et al., 2012; Manimmanakorn et al., 2013; Park

& Lim, 2017; Scott et al., 2014). 이러한 저산소 환경에서 혈중젖산, P_i , H^+ 와 같은 대사산물과 GH, IGF-1, 카테콜라민, 코티졸, 테스토스테론과 같은 동화 호르몬 분비의 상승은 저산소 환경조건에 의해 저항성 운동 시 상대적으로 더 큰 운동자극을 유도하고 이에 더 많은 대사적 스트레스를 받아 나타나는 현상으로 판단된다(Park et al., 2017). 그러나 이에 대한 연구는 현재 매우 부족한 실정으로 앞으로 보다 다양한 연구가 수행되어야 이에 대한 원리를 보다 정확하게 설명할 수 있는 실정이다. 대사산물과 관련된 연구의 경우 Kon et al.(2010)과 Kon et al.(2012)는 저산소 환경에서 수행하는 저항성 운동 트레이닝이 더 큰 대사산물의 자극을 가져와 근 비대 및 근 기능을 향상시킬 수 있다고 주장하고 있으나 이에 대한 상관관계를 명확하게 설명하지 못하고 있으며, Park & Lim(2017)은 수영선수에게 있어 6주간의 저항성 밴드 운동 트레이닝의 적용을 통해 근력 및 근지구력의 개선과 GH, IGF-1, VEGF(vascular endothelial growth factor)의 증가를 보고하였으나 마찬가지로 근 기능과 호르몬 간의 상관관계를 설명하지 못하였다. 특히, 현재 근 비대 및 근 기능 개선에 있어서 전신의 내분비 반응(systemic endocrine response)의 역할은 많은 과학자들 사이에 있어서 논쟁의 요점에 해당되기 때문에 이에 대한 기전연구가 추가적으로 선행되어야 명확한 설명을 할 수 있는 실정이다.

현재 고지 및 저산소 환경에서의 운동 트레이닝에 따른 다양한 운동수행능력 향상과 관련된 이론적 근거를 바탕으로 전세계적으로 30개국 이상의 많은 나라들이 자연적 고지환경 훈련장 및 인공적 저압 또는 저산소 훈련 시스템을 보유하고 있으며, 이러한 시설을 바탕으로 선수들의 종목특성에 맞는 운동수행능력 향상을 위해 다양한 형태의 고지 트레이닝을 개발 및 적용하고 있다(Hamlin et al., 2013; Park et al., 2016). 특히, 가까운 이웃이자 경쟁 국가인 일본의 경우, 2002년에 국립스포츠과학센터를 설립하여 다양한 종목의 엘리트 선수들의 경기력 향상을 위하여 72개의 저산소 숙소를 비롯하여, 저산소 수영장과 트레이닝 센터를 갖추고 있으며, 이러한 시설을 바탕으로 실시된 자연적·인공적 고지 트레이닝을 통해 최근 다양한 국제대회에서 눈부시게 향상된 경기성적을 거두는데 있어 일조한 것으로 평가받고 있다. 그러나 국내의 경우, 지구성 운동선수들의 경기력 향상을 위해 고지 트레이닝 적용하기 위한 목적으로 1998년에 개장된 태백선수촌의 경우 1,330m 환경에 세워졌으나 상대적으로 고도가 낮아 경기력을 효

율적으로 향상시키는 고지 트레이닝 장으로서 사용가치가 낮은 것이 현실이다. 이외에도, 2003년 경희대학교에 인공적으로 저압 및 저산소 환경을 조성할 수 있는 시설이 설립되었으나 현재에는 노후 및 관리소홀과 전문인력 부족으로 인해 활용이 불가능한 상태이다. 그러나 다행히 2018년 2월에 개최된 동계평창올림픽 준비를 통한 정부의 스포츠과학에 대한 관심을 바탕으로 2015년에 시행된 스포츠과학융합사업을 통해 현재 건국대학교에 저압 및 저산소 환경을 조성하여 다양한 형태의 고지 트레이닝을 적용할 수 있는 12인용(9m×7m×2.8m) 환경제어 챔버(Nara control, Korea)가 구축되었으나 본 시설 또한 그 규모가 작아 선수들의 체력 트레이닝을 이용하는데 국한될 수밖에 없는 실정이며(Fig. 1), 저압 및 저산소 환경을 조성할 수 있는 대규모의 훈련장이 다양한 종목의 엘리트 선수들에게 고지 트레이닝을 적용하기 위해 매우 절실하지만 현재 국내에 구축된 시설은 다른 여러 스포츠 선진국들과 비교했을 때 너무나 미비한 실정이다.



Fig. 1. Environmental control chamber for athletic performance in Konkuk University.

이에 본론에서는 지금까지 개발된 다양한 종목의 엘리트 선수들의 운동수행능력 및 경기력 향상을 위한 자연적·인공적 고지 트레이닝의 생리적 배경과 그 적용방법에 따른 효용성 검토를 통해 국내 자연적·인공적 고지 트레이닝 센터의 개발 및 활용의 필요성을 강조하고 이를 바탕으로 고지 트레이닝을 적용할 수 있는 기초시설 건립에 대한 의욕을 고취시키고자 한다.

고지 트레이닝의 생리적 배경

엘리트 운동선수들은 일반적으로 자연적 또는 인공적인 방법에 의한 산소운반 및 이용능력이 감소된 고지환경에의 규칙적인 노출이 가져다주는 다양한 근본적인 이점 때문에 자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝을 반복적으로 수행하게 된다. 고지환경의 경우, 고도가 높아짐에 따라 대기압이 낮아지게 되고, 이에 대기 중의 산소분압이 감소하여 동일 부피의 공기 중에 이용할 수 있는 산소가 적어지게 되어 저산소 환경(hypoxic environment)을 유도하게 된다(Moon et al., 2016; Sinex & Chapman, 2015). 이러한 반복적인 저산소 환경에의 노출은 인체 내에서 신장(kidney)을 자극하여 RBC 생성(erythropoiesis)을 유도하는 호르몬인 에리스로포이에틴(erythropoietin: EPO)의 더 많은 분비를 유도한다(Park et al., 2016; Sinex & Chapman, 2015). 결과적으로 고지환경에 노출하는 동안 증가된 RBC는 큰 조직으로 더 많은 산소를 전달하게 되고 이에 조직에서의 산소운반 및 이용능력이 개선되어 운동수행능력을 향상시키게 된다(Płoszczyca et al., 2018; Sanchis-Gomar et al., 2009; Schmidt, 2002).

이러한 생리적 반응 이외에도 증가된 미토콘드리아의 밀도(mitochondrial density), 산화적 효소 능력(oxidative enzyme capacity), 지방산화(fat oxidation), 근육 산-염기 평형능력(muscle buffering) 등과 같은 비혈액학적인 측면(nonhematological aspect)의 개선효과를 통해 운동 경제성(exercise economy) 및 $VO_2\max$ 의 상승과 이로 인한 운동수행능력의 개선을 가져오게 된다(Faiss et al., 2013; Galvin et al., 2013; Geiser et al., 2001; Hamlin et al., 2017; Park et al., 2016; Park & Lim, 2017; Park et al., 2018).

결과적으로 자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝은 적용방법에 따라서 운동수행능력을 향상시키는 주요 기전에 있어서 차이가 나타나지만 위에서 언급한 바와 같이 혈액학적·비혈액학적인 측면(hematologic and non-hematological aspect)의 종합적인 작용에 의해서 운동수행능력의 개선효과가 나타나는 것으로 보고되고 있다.

고지환경에 의한 혈액학적인 변화

위에서 언급한 바와 같이 일반적으로 고지환경에의 노출은 평지환경에서 생활하는 사람들에게 있어 erythropoiesis

를 자극하여 산소운반능력의 향상을 가져온다(Gore et al., 2013). 저산소 자극에 의한 실질적인 erythropoiesis 반응은 적혈구 내에서 산소를 운반하는 금속 단백질인 Hb 질량의 증가와 실질적인 RBC 숫자의 증가에 의해서 나타난다(Bonetti & Hopkins, 2009). 이러한 생리적 반응은 세포에서의 산소운반의 효율성 개선과 산소를 운반하는 세포 자체의 더 큰 증가 현상을 의미한다. 또한, 모세혈관의 밀도(density) 및 효율성(efficiency)의 증가로 인해 혈액의 목표 조직으로의 이동이 보다 원활하게 이루어지게 되어 순환능력이 개선된다(Park et al., 2016; Prommmer et al., 2018). 이러한 혈액과 순환계의 생리적 변화는 다양한 선행연구를 바탕으로 $VO_2\max$ 와 운동수행능력을 향상시키는 주요한 기여요인으로 판단된다(Hauser et al., 2017; Wehrlin et al., 2006).

그러나 실질적으로 고지환경에 의한 혈액학적인 변화에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 RBC의 생산을 증가시키는 호르몬인 EPO이다. 일반적으로 혈액 내 산소농도가 감소하면 이에 반응하여 신장에서 당단백(glycoprotein) 호르몬인 EPO의 분비가 자극되고 이에 적색골수에서 RBC의 생산이 증가하게 된다(Ge et al., 2002; Gore et al., 2006). EPO는 저산소 환경에 노출하게 되면, 급성적으로 빠르게 분비량이 증가하고 약 48-72시간이면 최대치에 도달하게 되며, 이러한 EPO의 자극에 의한 새로운 적혈구의 생산은 약 5일 정도 소요되는 것으로 보고되고 있다(Ge et al., 2002; Gore et al., 2006). 이러한 저산소 환경에의 노출에 의한 혈장량의 감소는 혈액 단위마다 산소를 운반할 수 있는 능력이 높아진다는 것을 의미하지만 혈장량의 감소는 순환계를 통한 산소운반능력에 악영향을 미칠 수 있다. 그러나 일반적으로 고지환경에서의 운동 트레이닝은 EPO에 의한 RBC 생산 증가 뿐만 아니라 혈장량의 증가 또한 유도하기 때문에 혈중산소운반능력 개선에 있어서 매우 효과적이다(Gore et al., 2013).

하지만 고지환경에 의한 erythropoiesis 효과는 영구적으로 나타나는 적응현상은 아니다. 고지환경에서 평지환경으로 다시 돌아오게 되면, 더 높은 대기 산소농도로 인해 미성숙 적혈구의 파괴(neocytolysis)가 나타나게 되며, 일반적으로 고지환경에의 적응에 의한 Hb 질량과 RBC 양 증가로 나타나는 erythropoiesis는 평지환경에 돌아온 후 약 16일 정도면 다시 원래 상태로 회복된다(Płoszczyca et al., 2018).

고지환경에 의한 비혈액화적인 변화

고지환경에 의한 생리적인 변화는 혈액화적인 측면 뿐만 아니라 근 조직을 산소 및 에너지 활용에 있어서 매우 효율적으로 변화시키는 근신경계, 호르몬, 다양한 단백질 등의 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 이러한 비혈액화적 측면에 영향을 미치는 요인들에는 산화적 효소(oxidative enzyme)의 증가(Serebrovskaya et al., 2011; Takahashi et al., 1996), 미토콘드리아 양 및 밀도의 증가(De Miranda et al., 2012; Hopperler et al., 2003; Jaspers et al., 2014; Kurhaluk et al., 2013), 에너지 이용능력의 증가 및 기질이용의 변화(Brook et al., 1992; Park et al., 2017; 2018), 근육 내 젖산 내성 및 산-염기 평형 능력의 증가(Lühker et al., 2017; Park & Lim, 2017), 혈액유변적 기능 및 혈액동역학 기능 강화(Moon et al., 2016; Park & Nam, 2017), 세포 내 철분 전달 개선(Płoszczyca et al., 2018), 자율신경계 활성화

균형능력의 증가(Povea et al., 2005; Taralov et al., 2015), 다양한 호르몬 분비의 변화(Kjaer et al., 1988; Park et al., 2017), 산소운반 및 이용과 관련된 다양한 단백질의 증가(Madanecki et al., 2013; Nunomiya et al., 2017) 등이 존재한다. 이와 관련된 자세한 기전은 Rodriguez (2002) 및 Rodriguez et al. (2007)에 의해 (Fig. 2)과 같이 정리되어 자세히 설명되고 있다.

이러한 기전에 의한 생리적 변화들은 고지환경에서의 운동 트레이닝에 의한 VO₂max 및 운동수행능력의 개선 효과가 erythropoiesis와 같은 혈액화적인 측면뿐만 아니라 앞에서 설명한 다양한 비혈액화적 측면에 의해서도 나타날 수 있다는 것을 의미하며, 이러한 생리적 근거를 바탕으로 고지대에서의 생활(living high)의 비중을 낮추어 효율적 접근 및 활용이 가능한 다양한 방법의 고지 트레이닝 방법이 개발되었으며, 현재 다양한 형태의 저 산소 환경에서의 운동 트레이닝 방법을 적용하여 비혈액화적 요인의 변화에 따른 VO₂max 및 운동수행능력의

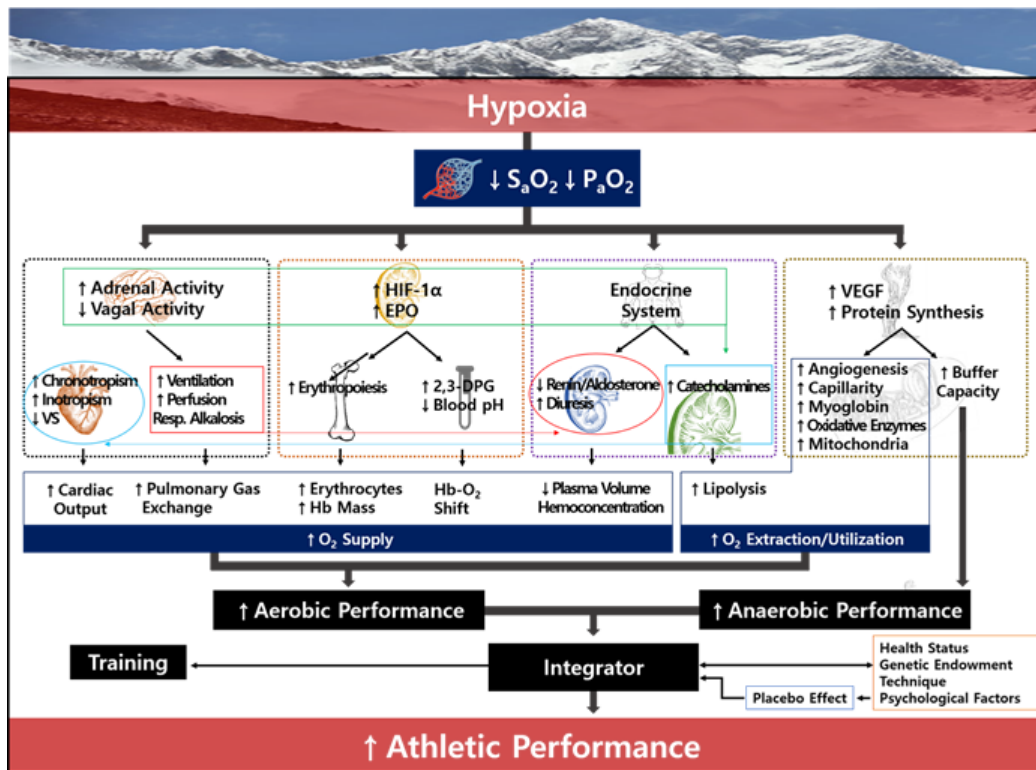


Fig. 2. Mechanisms for the improvement of athletic performance via exercise training in natural high altitude and artificial hypoxic condition (Rodriguez, 2002; Rodriguez et al., 2007).

HIF, hypoxic inducible factor; EPO, erythropoietin; VEGF, vascular endothelial growth factor; Resp, respiratory; DPG, diphosphoglycerate; Hb, hemoglobin; O₂, oxygen.

개선효과를 증명한 다양한 연구들이 보고되었다(Girard et al., 2013; Millet et al., 2013).

다양한 자연적·인공적 고지 트레이닝 전략과 그에 따른 효과

엘리트 선수의 운동수행능력 및 경기력을 향상시키기 위한 자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝 방법은 저산소 환경에의 노출 및 운동 트레이닝의 시너지 효과를 극대화할 수 있는 원리에 기초하여 이루어져야 한다. 이에 이상적인 저산소 환경에서의 운동 트레이닝 방법은 저산소 환경과 운동 트레이닝 적용 시 적절한 자극조건을 바탕으로 혈액학적 변화 및 비혈액학적 변화 모두를 극대화하여 조직으로의 산소운반 및 조직에서의 산소이용능력 모두를 개선시켜야 하며, 부적절한 트레이닝 조건으로 인한 골격근으로 혈류량 감소(Bender et al., 1988; Fulco et al., 1988), 고강도 운동에 의한 산성물질에의 내성 감소(Levine & Stray-Gundersen, 1992), 면역기능

의 저하(Tiollier et al., 2005), 산화스트레스에 의한 근육 손상 증가(Pialoux et al., 2006)와 같은 부정적인 효과를 최소화하여야 한다.

일반적으로 자연적·인공적 고지환경에서의 트레이닝 방법은 크게 living high training high(LHTH), living high training low(LHTL), living low training high(LLTH) 3가지 방법으로 구분할 수 있으며, 최근에는 운동선수의 종목 특성 및 트레이닝 목적에 따라 Wilber (2007) 및 Millet et al.(2010)의 연구를 종합하여 Millet et al.(2013)은 <Fig. 3>와 같이 고지 트레이닝 방법을 세분화하여 적용하고 있다.

Living High Training High(LHTH) 방법

다양한 고지 트레이닝 방법 중에서 가장 전통적인 형태는 <Table 1>에서 분류한 바와 같이 2,000~3,000m의 적절한 고도 조건(moderate altitude)에서 생활 및 훈련을 실시하는 LHTH 방법이다. 본 방법은 1968년 멕시코 올림픽에서 아프리카 선수들이 높은 성적을 거두기 시작하면서 많은 스포츠 선진국에서 적용되기 시작하였

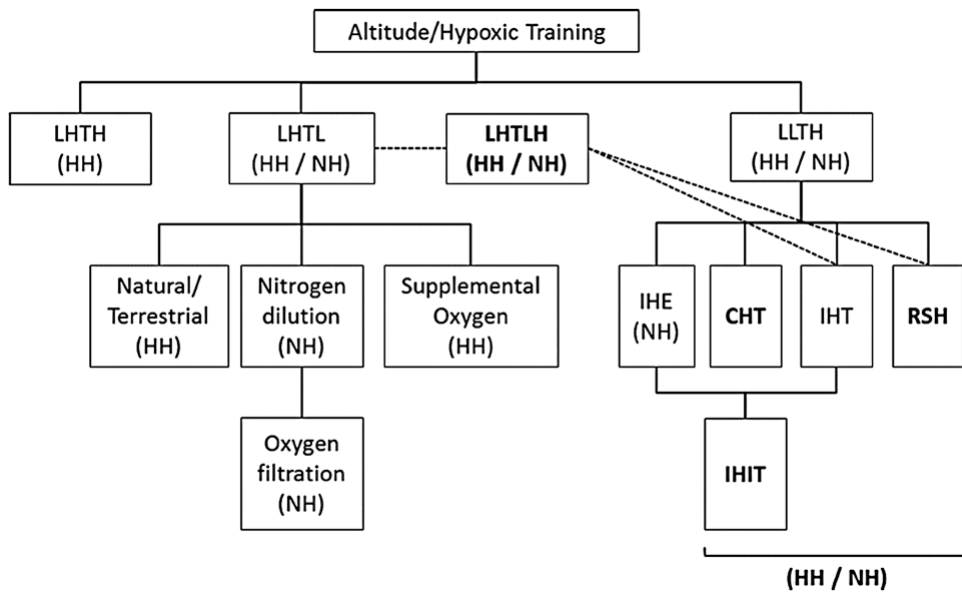


Fig. 3. Various altitude/hypoxic training modalities that can be applied to athletes developed to date. (Millet et al., 2013).

LHTH, living high training high; LHTL, living high training low; LHTLH, living high training low and high;

LLTH, living low training high; IHE, intermittent hypoxic exposure; CHT, continuous hypoxic training;

IHT, interval hypoxic training; RSH, repeated sprint training in hypoxia; IHIT, IHE during interval training;

HH, hypobaric hypoxia; NH, normobaric hypoxia.

으며, 평지환경과 비교했을 때, 인체 내 조직의 저산소 환경 조건을 유도함으로써 더 많은 RBC 양과 더 큰 운동 트레이닝 자극을 제공하기 위한 목적으로 수행되었다 (Christoulas et al., 2011; Svendenhag et al., 1991). 그러나 LHTH 방법이 평지에서의 운동수행능력에 미치는 영향을 검토한 연구들은 대조군이 존재하지 않는 경우가 많으며, 연구결과 또한 긍정적·부정적 결과가 매우 상이하게 나타나 있는 실정이다(Bonneti & Hopkons, 2009; Svendenhag et al., 1991). 실질적으로 엘리트 및 아마추어 육상선수에게 LHTH를 적용하여 평지에서의 운동수행능력을 검토한 Burtscher et al.(1996) 및 Baily et al.(1998)의 연구에서는 오히려 3주간의 LHTH 적용 후 대조군에 비해 VO₂max가 약 2.8% 더 낮은 결과를 보고하였다. 이러한 연구결과들은 운동선수들에게 LHTH 처치 적용을 통해 고지생활(living high)에 의한 RBC 양 및 Hb 질량 증가와 같은 erythropoiesis를 유도할 수 있지만, 고지환경에서 운동 트레이닝(training high) 시 나타나는 운동강도 및 운동량의 감소에 의한 부정적인 효과로 인해 LHTH의 효용성은 비교적 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

Table 1. Classification in altitude/hyoxic condition (Bärtsch et al., 2008; Sinex & Chapman, 2015).

Classification	Altitude (m)	Equivalent F _I O ₂ (%)
Near sea-level	<500	19.8-20.9
Low	500-2,000	16.7-19.8
Moderate	2,000-3,000	14.8-16.7
High	3,000-5,500	10.9-14.8
Extreme	>5,500	<10.9

F_IO₂, fraction of inspired oxygen.

Living High Training Low(LHTL) 방법

본 단락에서 설명할 LHTL 방법은 LHTH 방법에서 나타나는 부정적인 효과인 고지환경에서의 운동 트레이닝 시 나타나는 운동강도 및 운동량 감소에 의한 운동수행능력 개선에 있어 효용성 감소를 극복하기 위해 1990년대 초에 두 명의 미국 국적의 연구자인 Levine과 Stray-Gundersen에 의해 개발되었다(Levine, 2002; Levine & Stray-Gundersen, 1992; Wilber, 2007). LHTL은 적정한 고지환경인 2,000~3,000m 조건에서 생활하고 1,500m 이하의 조건에서 운동 트레이닝을 하

는 방법으로 운동선수들에게 있어 고지환경에서 생활함으로써 얻을 수 있는 장점인 erythropoiesis의 증가와 평지와 가까운 환경조건에서의 운동 트레이닝을 통한 운동강도 및 양과 조직으로의 산소유량(oxygen flux) 유지 효과를 통해 긍정적인 혈액학적, 대사적, 신경계적 적응을 가져와 엘리트 선수의 운동수행능력을 효과적으로 증진시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Brugniaux et al., 2006; Liu et al., 1998; Robach et al., 2006; Stray-Gundersen et al., 2001; Levine & Stray-Gundersen, 1997; Park & Nam, 2017; Park et al., 2017; Wherlin et al., 2006).

이와 관련된 연구들을 살펴보면, 초창기에 Levine & Stray-Gundersen(1997)은 육상선수 39명(남자 27명, 여자 12명)을 대상으로 LLTL(living low training low) 집단, LHTH 집단, LHTL 집단으로 분류한 후 2,500m에서 생활하고 1,250m에서 운동 트레이닝을 실시하는 LHTL의 효용성을 검토한 결과 LHTL을 적용한 집단에서 RBC, VO₂max, 환기역치, 5,000m time trial에서 더 큰 증가를 나타냈음을 확인하였으며, 이와 비슷한 Stray-Gundersen et al.(2001) 연구에서는 LHTL을 적용한 집단에서 LLTL을 적용한 집단보다 VO₂max의 3% 증가, EPO 2배 증가, 3,000m time trial 1.1% 향상과 실제 경기에서 참가한 22명의 육상선수(남자 14명, 여자 8명) 중에서 총 인원이 1/3이 최고기록을 경신한 것으로 통해서 LHTL이 효과적인 고지 트레이닝 방법임을 증명하였다. 이외에도 Liu et al. (1998)은 트라이애슬론 선수(triathletes) 21명을 대상으로 LLTL 및 LHTL 집단으로 나눈 후 2주 동안 1일 12시간 이상 1,980m에서 생활하고 평지환경에서 운동 트레이닝을 실시하는 LHTL의 효용성을 검토한 결과 LHTL 집단에서 좌심실 수축기말 직경의 감소, 구출분획(ejection fraction; EF), 심박출량(cardiac output; CO), 일회박출량(stroke volume; SV)의 증가를 보고하였으며, 이를 통해 LHTL의 적용은 심장기능의 개선을 바탕으로 운동수행능력을 향상시킬 수 있다고 주장하였다. 보다 최근에 Brugniaux et al.(2006)은 엘리트 육상 중·장거리 남자 선수 20명을 대상으로 LLTL과 LHTL 집단으로 나눈 후 초반 6일은 2,500m에서 거주하고 후반 12일은 3,000m에서 생활하는 LHTL을 적용한 결과, LHTL 집단에서 LLTL 집단보다 더 큰 VO₂max 및 최대 유산소성 파워의 증가와 더 낮은 19.5km/hr 운동 시 심박수

(heart rate: HR)를 보고하였으며, 이 효과가 약 15일 동안 지속된다고 발표하였다. Wherlin et al.(2006)은 스위스 국가대표팀 오리엔티어(Swiss national team orienteers)를 대상으로 LHTL을 적용한 결과, 체력수준이 동일한 LLTL를 수행한 대조군에 비해 erythropoiesis와 관련하여 RBC 양 및 Hb 질량이 각각 5%씩 보다 더 증가한 결과와 함께 더 큰 $VO_2\max$ (4%)와 5,000m time trial(2%)을 보고하였다. Robach et al.(2006)은 18명의 수영선수에게 단기간의 13일 동안 5일은 2,500m, 8일은 3,000m에서 생활하는 LHTL 프로그램을 적용한 결과, 유의하게 증가한 red cell volume을 통해 혈액학적인 변인의 개선효과를 증명하였지만 운동수행능력과 관련된 변인에서는 어떠한 상승효과도 나타나지 못했다. 국내에서 수행된 보다 최근의 Park & Nam (2017) 및 Park et al. (2017)의 연구에서는 육상 중·장거리 선수 20명을 대상으로 1,000m에서 생활하고 700~1,330m에서 훈련하는 LLTL 집단과 3,000m에 해당되는 인공적인 평압·저산소 환경에서 생활하고 700~1,330m에서 훈련하는 LHTL 집단으로 나누어 28일간, 일일 16시간 이상 저산소 환경에 노출하고 4시간 운동 트레이닝을 실시하는 LHTL의 효용성을 검토한 결과, erythropoiesis와 같은 혈액학적인 요인의 변화는 나타나지 않았지만 최대하 운동 중보다 더 효율적인 VO_2 , 골격근 산소화 농도(skeletal muscle oxygenation), HR, SV, CO를 바탕으로 보다 개선된 3,000m 및 5,000m time trial을 나타냈다고 보고하였다.

지금까지 설명한 선행연구들을 살펴보면, 자연적·인공적 고지환경에서의 운동 트레이닝은 혈액학적 변화와 비혈액학적인 변화를 바탕으로 한 다양한 생리적 적응현상을 통해 운동수행능력 및 경기력을 향상시키는 것으로 보고되고 있는데, LHTL 방법은 고지환경에의 노출에 의한 erythropoiesis 자극을 통한 혈액학적인 개선효과와 평지와 가까운 환경조건에서 트레이닝을 함으로써 강한 운동자극을 가하고, 이를 통한 근 조직으로의 산소운반 및 이용 증가, 운동경제성(exercise economy) 개선, 심장기능의 강화 등과 같은 다양한 비혈액학적 변인의 개선효과를 동시에 가져와 운동수행능력 및 경기력 향상을 유도할 수 있는 매우 효율적인 고지 트레이닝 방법인 것으로 판단된다. 또한 LHTL 방법에 의한 운동수행능력에 있어서 긍정적인 효과를 극대화하기 위해서는 2,000~3,000m 사이의 적정고도, 최소 21일 이상의 트레이닝 기간, 최소

일일 12시간 이상의 노출시간을 가져야 하는 것으로 판단된다(Brugniaux et al., 2006; Robach et al., 2006; Sinex & Chapman, 2015; Wilber, 2007).

이에 국내에서도 LHTL을 다양한 종목의 선수들에게 적용할 수 있는 고지 트레이닝 센터의 설립과 함께 다양한 유산소성 종목의 엘리트 선수를 대상으로 앞에서 언급한 바와 같은 합리적인 적절한 조건의 LHTL을 적용함으로써 우리에게 알맞은 LHTL 방법을 찾기 위한 다양한 노력이 필요하며, 이를 적용하여 유산소성 종목 선수들의 운동수행능력 및 경기력 향상을 위한 많은 노력을 경주하여야 한다고 판단된다.

Living Low Training High(LLTH) 방법

지금까지 살펴본 두 가지의 자연적·인공적 고지 트레이닝 방법인 LHTH 및 LHTL은 운동수행능력 및 경기력 개선을 위한 충분한 생리적 효과를 얻기 위해서는 상대적으로 긴 노출 시간(3주 이상의 기간 동안 매우 최소 12시간 이상의 노출)이 요구된다. 그러나 구기종목과 같이 팀 단위로 운동 트레이닝이 이루어지는 다양한 팀스포츠의 선수들은 거의 매주 또는 2주마다 반복적으로 실전 경기를 수행해야 하며, 또한 living high를 위해 근처에 자연적 고지환경이 존재하거나 거주를 할 수 있는 넓은 공간에 저산소 환경을 시뮬레이션할 수 있는 장비가 구비되어있지 않으면 실질적으로 이러한 고지 트레이닝 방법을 적용할 수 없는 실정이다.

이에 접근성이 쉽고 적용이 간편한 대체 고지 트레이닝 방법(alternative hypoxic training method)이 개발되었는데 이것이 LLTH 방법이다. 다양한 종목의 선수들에게 적용할 수 있는 LLTH 방법은 일반적으로 진공펌프를 이용하여 실내공기의 양을 줄여 저압·저산소 환경을 만들거나, 질소발생기를 이용하여 내부공간으로 질소를 유입하여 상대적으로 산소농도가 낮은 평압·저산소 환경을 조성하여 인공적인 고지환경을 조성한다. 이러한 LLTH 방법은 평소에 평지환경에서 노출하면서 운동 트레이닝 시에만 자연적·인공적 고지환경에서 운동 트레이닝을 실시하는 방법으로 일반적으로 3시간 이하로 고지환경에 노출하기 때문에 저산소 자극이 충분하게 이루어지지 못하며, 이에 LHTH 및 LHTL 방법처럼 erythropoiesis와 같은 혈액학적인 변화를 유도하지 못한다. LLTH 방법은 저산소 환경에서 간헐적으로 노출

하는 방법(intermittent hypoxic exposure; IHE)과 저산소 환경에서 간헐적으로 운동 트레이닝을 실시하는 방법으로 크게 구분할 수 있다. 또한, 저산소 환경에서 간헐적으로 운동 트레이닝을 실시하는 방법은 엘리트 선수의 운동종목 및 업고자 하는 운동수행능력 형태에 따라서 CHT(continuous hypoxic training), IHT(interval hypoxic training), RSH(repeated sprint training in hypoxia)로 구분할 수 있다.

고지환경에서 단순히 노출만을 실시하는 IHE의 경우, Millet et al.(2010)의 comprehensive review 연구에서 IHE는 다양한 생리적 요인의 변화를 바탕으로 엘리트 선수의 운동수행능력 및 경기력 향상을 가져올 수 없다고 보고하고 있다. 그러나 이와는 반대로 메타분석(meta-analysis)을 통한 Bonneti & Hopkins (2009)의 연구에서는 엘리트 수준이 아닌 그 하위단계인 일반 선수의 경우에는 운동수행능력 및 경기력을 개선시킬 수 있는 것으로 보고하였으며, 이러한 차이가 발생하는 원인은 엘리트 선수 경우 그 하위단계의 일반선수와 비교했을 때, 운동 트레이닝 시에 더 높은 강도의 운동 트레이닝을 실시하여 골격근이 국소적으로 더 강한 저산소 조건에 노출되기 때문에 단순히 IHE 적용에 의한 저산소 자극 효과가 상대적으로 더 약하게 나타나기 때문에 운동수행능력에 있어서 긍정적인 결과를 가져오기가 어렵다고 보고하고 있다.

이와는 다르게 간헐적으로 수행하는 고지환경에서의 운동 트레이닝 즉, IHE와 운동 트레이닝의 결합(e.g., CHT, IHT, RSH)은 골격근과 심장근에서의 다양한 생화학적·구조적 변화를 통해 개선된 운동 경제성(exercise economy), 조직으로의 혈류공급 및 이용, 모세혈관 및 미토콘드리아 밀도, 산화적 효소(oxidative enzyme)의 활성도의 개선효과 등을 보이며, 이를 바탕으로 유산소성 운동능력을 향상시킨다(Czuba et al., 2011; Geiser et al., 2001; Hamlin et al., 2010). 이외에도 해당과정 효소(glycolytic enzyme), 글루코스 수송(glucose transport), pH 조절 능력을 개선시키며, 이를 통해 무산소성 파워(anaerobic power)를 증가시키고 반복적인 스프린트 능력(repeated sprint ability)을 향상시킨다(Faiss et al., 2013; Hamlin et al., 2010; Park & Lim, 2017; Vogt et al., 2001; Zoll et al., 2006).

우선 다양한 LLTH 방법 중 CHT와 관련된 내용을 살펴보면, 평지환경에서와 동일한 상대강도로 저산소 환경

조건에서 CHT를 적용하는 경우, McLean et al.(2014)의 체계적 리뷰(systemic review) 연구에서 보고한 바로는 운동수행능력 및 경기력에 있어 큰 효과가 나타나지 않는 것으로 보고되고 있다(Beidleman et al., 2009; Debevec et al., 2010; Lecoultre et al., 2010; Messonnier et al., 2004). 이러한 결과는 저산소 환경에의 급성 노출 시 나타나는 심혈관계 기능의 감소 현상이 선수들의 절대운동강도를 감소시켜 유산소성 운동능력 향상을 유도하지 못하는 것과 저산소 환경에서 간헐적으로 운동 트레이닝을 실시하는 LLTH 방법이 근본적으로 무산소성 능력과 관련된 해당과정(glycolysis), pH 조절, 탄수화물 대사(carbohydrate metabolism)와 같은 적응효과를 강화시키기 때문인 것으로 보고되고 있다(McLean et al., 2014; Zoll et al., 2006). CHT 적용을 통해 운동수행능력에 있어 긍정적인 결과를 나타내는 연구를 살펴보면, Mao et al.(2011)과 Meeuwsen et al.(2001)과 같이 LLTL 및 LLTH 집단 모두에게 동일한 절대강도로 운동 트레이닝을 적용하여 실질적으로 저산소 환경에서 운동 트레이닝을 실시하는 LLTH 집단에서 더 큰 상대강도를 나타내는 경우와 Czuba et al.(2011) 및 Park et al.(2018)과 같이 LLTL 및 LLTH 집단에게 동일한 상대강도로 운동 적용을 하였지만 CHT 뿐만 아니라 IHT를 복합적으로 적용하는 경우에 실질적인 유산소성 운동수행능력 및 경기력 향상을 보고하였다. 이러한 연구결과는 저산소 환경에서 엘리트 선수의 경기력 향상을 위해 운동 트레이닝을 적용할 시 고강도의 인터벌 또는 반복적인 스프린트 형태의 운동 트레이닝이 함께 적용되어야 한다는 것을 보여준다고 설명할 수 있다.

다음으로 IHT와 RSH 관련된 연구를 살펴보면, 이 두 가지의 LLTH 적용에 따른 운동수행능력 및 경기력 향상을 검토한 연구는 지금까지 많이 보고되지 않았으며, 그 결과 또한 대상자에게 적용한 IHT 및 RSH의 운동형태, 강도, 트레이닝 기간, 운동수행능력의 측정방법에 따라서 긍정적·부정적 결과로 상반되어 나타나고 있는 실정이다(Millet et al., 2014; Park et al., 2017).

IHT를 적용한 연구의 경우, Park et al.(2017)은 20명의 실업수영선수를 LLTL 및 LLTH 집단으로 나눈 후 모든 대상자에게 각 환경조건에서 최대심박수(maximal heart rate; HRmax)의 75%에 해당되는 트레드밀 지속주 운동과 90%에 해당되는 자전거 인터벌 운동(2분 운동, 1분 휴식)을 총 6주간, 주 3회, 일일 각각 30분씩

적용한 결과, 더 큰 비율의 VO_{2max} 및 최대 무산소성 파워의 개선을 통해 향상된 50m 및 400m 자유형 수영 기록을 나타냈으며, Dufuer et al.(2006)은 6주간, 주당 3회, 39~55분 동안 상대강도로 지속되는 IHT(LLTL 집단: $77\%VO_{2max}$, LLTH 집단: $88\%VO_{2max}$)을 적용한 결과, 혈액의 산소운반능력이나 산소동역학의 유의한 개선이 없이도 LLTL 집단 보다 5% 정도 향상된 VO_{2max} 와 최대운동부하검사 동안의 운동지속시간의 증가를 보고하였다. 또한, Roels et al.(2005)은 33명의 사이클 선수 및 트라이애슬론 선수를 대상으로 최대파워의 90~100%에 해당되는 자전거 운동형태의 IHT 효용성을 검토한 결과, 혈액학적 변인에 있어서는 어떠한 변화도 나타나지 않았지만 VO_{2max} 가 개선되었음을 보고하였다. 이와는 반대로 Vallier et al.(1996)은 5명의 엘리트 트라이애슬론 선수를 대상으로 4,000m 저압-저산소 환경에서 3주간, 1주일에 30시간의 훈련 스케줄에 해당되는 IHT를 적용한 결과 운동수행능력에 있어 어떠한 변화도 나타나지 않았다고 보고하였으며, 이와 비슷하게 Hendriksen & Meeuwssen (2003)의 연구에서도 16명의 트라이애슬론 선수들을 LLTL 및 LLTH 집단으로 나눈 후 2,500m 환경조건에서 10일에 걸쳐 매일 2시간 동안 자전거 에르고미터를 이용하여 IHT를 적용한 결과 VO_{2max} 에 있어서 집단 간 차이가 없음을 보고하였다. 이외에도 Truijens et al.(2003)은 수영선수를 대상으로 $15.3\%O_2$ 즉, 약 3,500m 상당고도에 해당되는 환경조건에서 5주간, 주 3회, $69\sim 94\%VO_{2max}$ 에 해당되는 강도로 IHT를 적용한 결과 100m 및 400m 경기기록에 어떠한 영향을 미치지 못하였다고 보고하였다. McLean et al.(2014)은 이와 같은 IHT 적용에 따른 긍정적인 연구결과와 부정적인 연구결과에 대한 내용을 종합하여, 엘리트 운동선수의 경기력 향상을 위해 IHT를 적용하여 긍정적인 결과를 나타낸 선행연구의 경우 다음의 3가지 조건에 해당된다는 것을 확인하였다. ① 저산소 환경에서의 운동 트레이닝이 고강도의 인터벌 운동으로 구성됨. ② IHT의 수행과 별도로 평지환경에서 추가적으로 운동트레이닝을 병행함. ③ 운동수행능력의 측정을 유산소성 운동능력 보다는 무산소성 운동능력을 선택함. 이와 같이 평지환경에서의 운동 트레이닝에 비해 더 큰 유산소성 및 무산소성 운동수행능력의 향상을 보인 연구들은 대부분이 저산소 환경에서 비교적 고강도의 인터벌 운동 트레이닝이 적용되었으며, 이외에 평지환경에서 상

당한 양의 추가적인 훈련이 진행되어 온 것을 확인할 수 있다(Park & Lim, 2017; Park et al., 2018).

마지막으로 RSH와 관련된 내용을 살펴보면, LLTH 방법은 전통적으로 지구성 종목의 운동선수의 경기력 향상을 위해서 적용되어져 왔다. 그러나 2010년대에 들어와서는 저산소 환경에서의 반복적인 스트린트 훈련이 고강도의 운동수행능력 및 팀스포츠의 경기력에 미치는 영향에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다(Faiss et al., 2013; Galvin et al., 2013; Puype et al., 2013; Millet et al., 2013). Faiss et al.(2013)은 40명의 남자 사이클 선수를 대상으로 $14.6\%O_2$ 인 약 2,950m 상당고도에서 4주간, 주 2회, 총 36분 동안 10초간 수행되는 최대 반복 스프린트 운동 및 능동적 회복운동으로 구성된 RSH의 효용성을 검토한 결과, 최대파워의 향상과 운동에 의한 피로의 지연효과를 나타냈다고 보고하였다. 이외에도 Galvin et al.(2013)은 럭비선수를 대상으로 $13\%O_2$ 인 약 3,800m에 해당되는 고지환경에서 4주간, 주 3회, 총 6분 동안 6초간 수행되는 최대 반복 스프린트 운동 및 수동적 회복을 수행하는 RSH를 적용한 결과 Yo-Yo intermittent recovery test level 1에 대한 운동수행능력이 개선되었다고 보고하였다. 반대로 Puype et al.(2013)은 일반 남성을 대상으로 $14.4\%O_2$ 인 약 3,100m 상당고도에서 4주간 최대 스프린트 파워의 80%에 해당되는 강도로 6주간, 주 3회, 약 30~55분간 운동 트레이닝을 실시한 결과, 대조군에 비해 무산소성 운동 능력에 있어서 유의한 개선효과가 나타나지 않았다고 보고하였으며, 이는 다른 연구에 비해 수행한 RSH의 운동 강도가 상대적으로 낮은 결과라고 보고하였다. 이러한 RSH가 무산소성 운동능력에 미치는 효과에 대한 내용은 아직까지 수행된 연구결과가 많지 않아 이에 대한 검토가 더 이루어져야 하나 기본적으로 고지환경에서 수행되는 고강도의 운동 트레이닝이 조직 내 더 큰 저산소 자극을 가져다주어 근 조직의 생리적·분자적 변화를 더 많이 유도하여 운동수행능력을 향상시키는 것으로 판단된다.

지금까지 살펴본 운동수행능력 및 경기력에 있어 LLTH 방법의 효용성에 대한 내용을 정리하면, 유산소성 종목 선수들의 운동수행능력 개선을 위해서는 CHT와 더불어 IHT가 복합적으로 수행되어야 하며, 또한 평지환경에서도 충분한 양의 추가적인 훈련을 수행해야 되는 것으로 판단된다. 이외에도 스프린트 및 팀스포츠 선수들에게 있어 무산소성 운동능력을 향상시키기 위해서는 RSH 형

태의 고지 트레이닝 방법이 활용되어야 하며, 이 형태의 운동 트레이닝 또한 무산소성 파워의 효과적인 개선을 위해서는 근 조직 내 보다 큰 저산소증을 유발할 수 있는 짧은 시간 동안 이루어지는 고강도 형태의 운동 트레이닝이 반복적으로 이루어져야 효용성을 극대화시킬 수 있는 것으로 판단된다. 국내에서도 다양한 LLTH 방법을 적용할 수 있는 고지 트레이닝 훈련장을 개발하여 엘리트 선수들의 경기력을 극대화할 수 있는 적절한 CHT, IHT 및 RSH 방법들의 개발 및 검증이 절실하다고 판단된다.

결론 및 제언

본 연구는 저산소 조건에 의한 혈액학적·비혈액학적 적응현상을 바탕으로 엘리트 선수의 운동수행능력 및 경기력 향상에 있어 효과적인 것으로 보고되고 있는 자연적·인공적 고지 트레이닝의 생리적 기전과 그 종류 및 효용성에 대해서 살펴보았다. 앞에서 확인한 바와 같이 고지 트레이닝은 얻고자 하는 운동능력(유산소성 또는 무산소성)에 따라서 다양한 형태로 적용할 수 있으며, 많은 스포츠 선진국에서 얻고자 하는 운동수행능력에 따라 고지 트레이닝을 다양하게 세분화하여 적용하고 있다. 그러나 국내의 경우, 경기력의 극대화를 위해 다양한 종목에 맞는 맞춤형 고지 트레이닝 형태를 개발해야하는 시대적 흐름에도 불구하고, 엘리트 선수들에게 고지 트레이닝을 적용할 수 있는 기초시설 자체가 매우 부족한 실정이다. 이에 유·무산소성 운동능력의 개선을 통해 경기력의 향상을 유도하는 고지 트레이닝을 다양한 종목의 엘리트 선수들에게 적용할 수 있는 종합적인 고지 트레이닝 센터가 다양하게 개발될 필요성이 매우 절실한 실정이며, 이를 위해 정부 및 지자체 등의 많은 지원과 노력이 필요하다.

참고문헌

- Bärtsch, P., Saltin, B., & Dvorak, J. (2008). Consensus statement on playing football at different altitude. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(Suppl 1), 96-99.
- Beidleman, B. A., Muza, S. R., Fulco, C. S., Jones, J. E., Lammi, E., Staab, J. E., & Cymerman, A. (2009). Intermittent hypoxic exposure does not improve endurance performance at altitude. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(6), 1317-1325.
- Bender, P. R., Groves, B. M., McCullough, R. E., McCullough, R. G., Huang, S. Y., Hamilton, A. J., Wagner, P. D., Cymerman, A., & Reeves, J. T. (1988). Oxygen transport to exercising leg in chronic hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, 65(6), 2592-2597.
- Bonetti, D. L. & Hopkins, W. G. (2009). Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Medicine*, 39(2), 107-127.
- Brocherie, F., Girard, O., Faiss, R., & Millet, G. P. (2017). Effects of repeated-sprint training in hypoxia on sea-level performance: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 47(8), 1651-1660.
- Brooks, G. A., Wolfel, E. E., Groves, B. M., Bender, P. R., Butterfield, G. E., Cymerman, A., Mazzeo, R. S., Sutton, J. R., Wolfe, R. R., & Reeves, J. T. (1992). Muscle accounts for glucose disposal but not blood lactate appearance during exercise after acclimatization to 4,300 m. *Journal of Applied Physiology*, 72(6), 2435-2445.
- Brugniaux, J. V., Schmitt, L., Robach, P., Nicolet, G., Fouillot, J. P., Moutereau, S., Lasne, F., Pialoux, V., Saas, P., Chorvot, M. C., Cornolo, J., Olsen, N. V., & Richalet, J. P. (2006). Eighteen days of "living high, training low" stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners. *Journal of Applied Physiology*, 100(1), 203-211.
- Burtscher, M., Nachbauer, W., Baumgartl, P., & Philadelphy, M. (1996). Benefits of training at moderate altitude versus sea level training in amateur runners. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 74(6), 558-563.
- Christoulas, K., Karamouzis, M., & Mandroukas, K. (2011). "Living high - training low" vs. "living high - training high": erythropoietic responses and performance of adolescent cross-country skiers. *The Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 51(1), 74-81.
- Czuba, M., Waskiewicz, Z., Zajac, A., Poprzecki, S., Cholewa, J., & Rocznik, R. (2011). The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(1), 175-183.
- De Miranda, M. A. Jr., Schlater, A. E., Green, T. L., & Kanatous,

- S. B. (2012). In the face of hypoxia: Myoglobin increases in response to hypoxic conditions and lipid supplementation in cultured Weddell seal skeletal muscle cells. *Journal of Experimental Biology*, 215(Pt 5), 806-813.
- Debevec, T., Amon, M., Keramidis, M. E., Kounalakis, S. N., Pisot, R., & Mekjavic, I. B. (2010). Normoxic and hypoxic performance following 4 weeks of normobaric hypoxic training. *Aviation, Space, & Environmental Medicine*, 81(4), 387-393.
- Dufour, S. P., Ponsot, E., Zoll, J., Doutreleau, S., Lonsdorfer-Wolf, E., Geny, B., Lampert, E., Flück, M., Hoppeler, H., Billat, V., Mettauer, B., Richard, R., & Lonsdorfer, J. (2006). Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. I. Improvement in aerobic performance capacity. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1238-1248.
- Faïss, R., Léger, B., Vesin, J. M., Fournier, P. E., Eggel, Y., Dériaz, O. & Millet, G. P. (2013). Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS one* 8(2), e56522.
- Fulco, C. S., Rock, P. B., Trad, L., Forte, V., & Cymerman, A. (1988). Maximal cardiorespiratory responses to one- and two-legged cycling during acute and long-term exposure to 4300 m meters altitude. *European Journal of Applied Physiology*, 57(6), 761-766.
- Galvin, H. M., Cooke, K., Summers, D. P., Mileva, K. N. & Bowtell, J. L. (2013). Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *British Journal of Sports Medicine*, 47(Suppl 1), i74-i79.
- Ge, R. L., Witkowski, S., Zhang, Y., Alfrey, C., Sivieri, M., Karlsen, T., Resaland, G. K., Harber, M., Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (2002). Determinants of erythropoietin release in response to short-term hypobaric hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, 92(6), 2361-2367.
- Geiser, J., Vogt, M., Billeter, R., Zuleger, C., Belforti, F. & Hoppeler, H. (2001) Training high-living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *International Journal of Sports Medicine*, 22(8), 579-585.
- Girard, O., Amann, M., Aughey, R., Billaut, F., Bishop, D. J., Bourdon, P., Buchheit, M., Chapman, R., D'Hooghe, M., Garvican-Lewis, L. A., Gore, C. J., Millet G. P., Roach, G. D., Sargent, C., Saunders, P. U., Schmidt, W., & Schumacher, Y. O. (2013). Position statement – altitude training for improving team-sport players' performance: Current knowledge and unresolved issues. *British Journal of Sports Medicine*, 47(Suppl 1), i8-i16.
- Gore, C. J., Rodríguez, F. A., Truijens, M. J., Townsend, N. E., Stray-Gundersen, J., & Levine, B. D. (2006). Increased serum erythropoietin but not red cell production after 4 wk of intermittent hypobaric hypoxia (4,000-5,500 m). *Journal of Applied Physiology*, 101(5), 1386-1393.
- Gore, C. J., Sharpe, K., Garvican-Lewis, L. A., Saunders, P. U., Humberstone, C. E., Robertson, E. Y., Wachsmuth, N. B., Clark, S. A., McLean, B. D., Friedmann-Bette, B., Neya, M., Pottgiesser, T., Schumacher, Y. O., & Schmidt, W. F. (2013). Altitude training and haemoglobin mass from the optimised carbon monoxide rebreathing method determined by a meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 47(Suppl 1), i31-i39.
- Goto, K. (2013). Metabolic and endocrine responses to hypoxic exposure. *The Journal of Physical Fitness & Sports Medicine*, 2(2), 215-220.
- Hamlin, M. J., Marshall, H. C., Hellemans, J., Ainslie, P. N. & Anglem, N. (2010) Effect of intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(4), 651-661.
- Hamlin, M. J., Olsen, P. D., Marshall, H. C., Lizamore, C. A. & Elliot, C. A. (2017). Hypoxic repeat sprint training improves rugby player's repeated sprint but not endurance performance. *Frontiers in Physiology*, 8(1), 24.
- Hauser, A., Troesch, S., Saugy, J. J., Schmitt, L., Cejuela-Anta, R., Faiss, R., Steiner, T., Robinson, N., Millet, G. P., & Wehrli, J. P. (2017). Individual hemoglobin mass response to normobaric and hypobaric “live high-train low”: A one-year crossover study. *Journal of Applied Physiology*, 123(2), 387-393.
- Hendriksen, I. J. & Meeuwssen, T. (2003). The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4-5), 396-403.
- Hoppeler, H., Vogt, M., Weibel, E. R., & Fluck, M. (2003). Response of skeletal muscle mitochondria to hypoxia. *Experimental Physiology*, 88(1), 109-119.
- Jaspers, R. T., Testerink, J., Gaspera, B. D., Chanoine, C., Bagowski, C. P., & van der Laarse, W. J. (2014). Increased oxidative metabolism and myoglobin expression in zebrafish muscle during chronic hypoxia. *Biology Open*, 3(8), 718-727.

- Kjaer, M., Bangsbo, J., Lortie, G., & Galbo, H. (1988). Hormonal response to exercise in humans: Influence of hypoxia and physical training. *American Journal of Physiology*, 254(2 Pt 2), R197-R203.
- Kon, M., Ikeda, T., Homma, T., Akimoto, T., Suzuki, Y., & Kawahara, T. (2010). Effects of acute hypoxia on metabolic and hormonal responses to resistance exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(7), 1279-1285.
- Kon, M., Ikeda, T., Homma, T., & Suzuki, Y. (2012). Effects of low-intensity resistance exercise under acute systemic hypoxia on hormonal responses. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(3), 611-617.
- Kurhaluk, N., Tkachenko, H., & Nosar, V. (2013). The effects of intermittent hypoxia training on mitochondrial oxygen consumption in rats exposed to skeletal unloading. *Annals of Clinical & Laboratory Science*, 43(1), 54-63.
- Lecoultre, V., Boss, A., Tappy, L., Borrani, F., Tran, C., Schneiter, P., & Schutz, Y. (2010). Training in hypoxia fails to further enhance endurance performance and lactate clearance in well-trained men and impairs glucose metabolism during prolonged exercise. *Experimental Physiology*, 95(2), 315-330.
- Levine, B. D. (2002). Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Altitude Medicine & Biology*, 3(2), 177-193.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (1992). A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *International Journal of Sports Medicine*, 13(Suppl 1), S209-S212.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (1997). "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology*, 83(1), 102-112.
- Liu, Y., Steinacker, J. M., Dehnert, C., Menold, E., Baur, S., Lormes, W., & Lehmann, M. (1998). Effects of "living high-training low" on the cardiac functions at sea level. *International Journal of Sports Medicine*, 19(6), 380-384.
- Lühker, O., Berger, M. M., Pohlmann, A., Hotz, L., Gruhlke, T., & Hochreiter, M. (2017). Changes in acid-base and ion balance during exercise in normoxia and normobaric hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 117(11), 2251-2261.
- Madanecki, P., Kapoor, N., Bebok, Z., Ochocka, R., Collawn, J. F., & Bartoszewski, R. (2013). Regulation of angiogenesis by hypoxia: the role of microRNA. *Cellular & Molecular Biology Letters*, 18(1): 47-57.
- Manimmanakorn, A., Hamlin, M. J., Ross, J. J., Taylor, R. & Manim-manakorn, N. (2013). Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 16(4), 337-342.
- Mao, T. Y., Fu, L. L., & Wang, J. S. (2011). Hypoxic exercise training causes erythrocyte senescence and rheological dysfunction by depressed Gardos channel activity. *Journal of Applied Physiology*, 111(2), 382-391.
- McLean, B. D., Gore, C. J. & Kemp, J. (2014). Application of 'live low-train high' for enhancing normoxic exercise performance in team sport athletes. *Sports Medicine*, 44(9), 1275-1287.
- Messonnier, L., Geysant, A., Hintzy, F., & Lacour, J. R. (2004). Effects of training in normoxia and normobaric hypoxia on time to exhaustion at the maximum rate of oxygen uptake. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4-5), 470-476.
- Meeuwssen, T., Hendriksen, I. J., & Holewijn, M. (2001). Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 84(4), 283-290.
- Millet, G., Bentley, D. J., Roels, B., Mc Naughton, L. R., Mercier, J., & Cameron-Smith, D. (2014). Effects of intermittent training on anaerobic performance and MCT transporters in athletes. *PLoS one*, 9, e95092.
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X., & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1-25.
- Millet, G. P., Faiss, R., Brocherie, F., & Girard, O. (2013). Hypoxic training and team sports: a challenge to traditional methods? *British Journal of Sports Medicine*, 47(Suppl 1), i6-i7.
- Moon, H. W., Shin, S. H., Lee, C. H., Park H. Y., Sunoo, S., & Nam, S. S. (2016). Effects of various acute hypoxic conditions on the hemorheological response during exercise and recovery. *Clinical Hemorheology & Microcirculation*, 63(4), 451-460.
- Nunomiya, A., Shin, J., Kitajima, Y., Dan, T., Miyata, T., & Nagatomi, R. (2017). Activation of the hypoxia-inducible factor pathway induced by prolyl hydroxylase domain 2 deficiency enhances the effect of running training in mice. *Acta Physiologica*, 220(1), 99-112.
- Park, H. Y., Hwang, H., Park, J., Lee, S., & Lim, K. (2016). The

- effects of altitude/hypoxic training on oxygen delivery capacity of the blood and aerobic exercise capacity of the blood and aerobic exercise capacity in elite athletes: A meta analysis. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 20(1), 15-22.
- Park, H. Y. & Lim K. (2017). Effects of hypoxic training versus normoxic training on exercise performance in competitive swimmers. *Journal of Sports Science & Medicine*, 16(4), 480-488.
- Park, H. Y. & Nam, S. S. (2017). Application of “living high-training low” enhances cardiac function and skeletal muscle oxygenation during submaximal exercises in athletes. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 21(1), 13-20.
- Park, H. Y., Kim, S. H., & Nam, S. S. (2017). Four-week “living high training low” program enhances 3000 m and 5000 m time trial by improving energy metabolism during submaximal exercise in athletes. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 21(1), 1-6.
- Park, H. Y., Shin, C., & Lim, K. (2018). Intermittent hypoxic training for 6 weeks in 3000 m hypobaric hypoxia conditions enhances exercise economy and aerobic exercise performance in moderately trained swimmers. *Biology of Sport*, 35(1), 49-56.
- Pialoux, V., Mounier, R., Ponsot, E., Rock, E., Mazur, A., Dufour, S., Richard, R., Richalet, J. P., Coudert, J., & Fellmann, N. (2006). Effects of exercise and training in hypoxia on antioxidant/pro-oxidant balance. *European Journal of Clinical Nutrition*, 60(12), 1345-1354.
- Płoszczyca, K., Langfort, J., & Czuba, M. (2018). The Effects of Altitude Training on Erythropoietic Response and Hematological Variables in Adult Athletes: A Narrative Review. *Frontiers in Physiology*, 9(1), 375.
- Povea, C., Schmitt, L., Brugniaux, J., Nicolet, G., Richalet, J. P., & Fouillot, J. P. (2005). Effects of intermittent hypoxia on heart rate variability during rest and exercise. *High Altitude Medicine & Biology*, 6(3), 215-225.
- Prommer, N., Wachsmuth, N., Thieme, I., Wachsmuth, C., Mancera-Soto, E. M., Hohmann, A., & Schmidt, W. F. J. (2018). Influence of Endurance Training During Childhood on Total Hemoglobin Mass. *Frontiers in Physiology*, 9, 251.
- Puype, J., Van Proeyen, K., Raymackers, J. M., Deldicque, L., & Hespel, P. (2013). Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(11), 2166-2174.
- Sanchis-Gomar, F., Martinez-Bello, V. E., Domenech, E., Nascimento, A. L., Pallardo, F. V., Gomez-Cabrera, M. C., & Vina, J. (2009). Effect of intermittent hypoxia on hematological parameters after recombinant human erythropoietin administration. *European Journal of Applied Physiology*, 107(4), 429-436.
- Robach, P., Schmitt, L., Brugniaux, J. V., Roels, B., Millet, G., Hellard, P., Nicolet, G., Duvallat, A., Fouillot, J. P., Moutereau, S., Lasne, F., Pialoux, V., Olsen, N. V., & Richalet, J. P. (2006). Living high-training low: effect on erythropoiesis and aerobic performance in highly-trained swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 423-433.
- Rodriguez, F. A. (2002). Intermittent hypoxia: an alternative to acclimatization to high altitude and enhancement of athletic performance? *The American Journal of Medicine & Sports*, 4(5), 385-391.
- Rodríguez, F. A., Truijens, M. J., Townsend, N. E., Stray-Gundersen, J., Gore, C. J., & Levine, B. D. (2007). Performance of runners and swimmers after four weeks of intermittent hypobaric hypoxic exposure plus sea level training. *Journal of Applied Physiology*, 103(5), 1523-1535.
- Roels, B., Millet, G. P., Marcoux, C. J., Coste, O., Bentley, D. J., & Candau, R. B. (2005). Effects of hypoxic interval training on cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(1), 138-146.
- Schmidt, W. (2002). Effects of intermittent exposure to high altitude on blood volume and erythropoietic activity. *High Altitude Medicine & Biology*, 3(2), 167-176.
- Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(10), 2857-2872.
- Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V. & Dascombe, B. J. (2014) Hypoxia and resistance exercise: A comparison of localized and systemic methods. *Sports Medicine*, 44(8), 1037-1054.
- Serebrovskaya, T. V., Nikolsky, I. S., Nikolska, V. V., Mallet, R. T., & Ishchuk, V. A. (2011). Intermittent hypoxia mobilizes hematopoietic progenitors and augments cellular and humoral elements of innate immunity in adult men. *High Altitude Medicine & Biology*, 12(3), 243-252.
- Sinex, J. A. & Chapman, R. F. (2015). Hypoxic training

- methods for improving endurance exercise performance. *Journal of Sports Health & Science*, 4(4), 325-332.
- Stray-Gundersen, J., Chapman, R. F., & Levine, B. D. (2001). "Living high training low" altitude training improve sea level performance in male and female elite runners. *Journal of Applied Physiology*, 91(3), 1113-1120.
- Truijens, M. J., Toussaint, H. M., Dow, J., & Levine, B. D. (2003). Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *Journal of Applied Physiology*, 94(2), 733-743.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (1997). "Living high-training low": Effect of moderate altitude acclimatization with low altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology*, 83(1), 102-112.
- Svedenhag, J., Saltin, B., Johansson, C. & Kaijser, L. (1991). Aerobic and anaerobic exercise capacities of elite middle-distance runners after two weeks of training at moderate altitude. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 1, 2015-214.
- Takahashi, H., Asano, K., & Nakayama, H. (1996). Effect of endurance training under hypoxic condition on oxidative enzyme activity in rat skeletal muscle. *Applied Human Science*, 15(3), 111-114.
- Taralov, Z., Terziyski, K., Dimov, P., Marinov, B., Tarvainen, M. P., Perini, R., & Kostianev, S. (2015). Assessment of the acute impact of normobaric hypoxia as a part of an intermittent hypoxic training on heart rate variability. *Cor et Vasa*, 57(4), e251-e256.
- Tiollier, E., Schmitt, L., Burnat, P., Fouillot, J. P., Robach, P., Filaire, E., Guezennec, C., & Richalet, J. P. (2005). Living high-training low altitude training: effects on mucosal immunity. *European Journal of Applied Physiology*, 94(3), 298-304.
- Vallier, J. .M., Chateau P., & Guezennec, C. Y. (1996). Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 73(5), 471-478.
- Vogt, M., Puntschart, A., Geiser, J., Zuleger, C., Billeter, R., & Hoppeler, H. (2001). Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *Journal of Applied Physiology*, 91(1), 173-182.
- Wehrlin, J. P. & Marti, B. (2006). Live high-train low associated with increased haemoglobin mass as preparation for the 2003 World Championships in two native European world class runners. *British Journal of Sports Medicine*, 40(2), e3.
- Wehrlin, J. P., Zuest, P., Hallèn, J. & Marti, B. (2006). Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 100(6), 1938-1945.
- Wilber, R. L. (2007). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(9), 1610-1624.
- Zoll, J., Ponsot, E., Dufour, S., Doutreleau, S., Ventura-Clapier, R., Vogt, M., Hoppeler, H., Richard, R., & Flück, M. (2006). Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. III. Muscular adjustment of selected gene transcript. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1258-1266.

엘리트 선수의 경기력 향상을 위한 저산소 트레이닝의 운동생리학적 근거 및 필요성

박훈영 · 김지수(건국대학교 PAP 연구소), 임기원(건국대학교 PAP 연구소 및 체육교육과)

【목적】 본 연구는 다양한 선행연구를 바탕으로 많은 스포츠 선진국에서 다양한 종목의 엘리트 선수들에게 있어 운동수행능력 및 경기력 극대화를 위해 적용하고 있는 자연적·인공적 고지환경에서의 운동 트레이닝의 적용방법과 그에 따른 효용성 검토를 통해 국내 고지 트레이닝 센터 개발 및 활용에 대한 필요성을 강조하고자 한다. **【결과】** 자연적·인공적 고지 트레이닝은 저산소 조건에 대한 혈액학적·비혈액학적인 적응현상을 바탕으로 유·무산소성 운동능력을 개선시키며, 이러한 고지 트레이닝 방법은 LHTH(living high training high), LHTL(living high training low), LLTH(living low training high)로 구분할 수 있다. 1968년 멕시코 올림픽 이후로 개발된 LHTH와 1990년대 Levine과 Stray-Gundersen에 의해 개발된 LHTL은 장시간의 living high를 바탕으로 헤모글로빈 질량 및 적혈구 양 증가와 같은 erythropoiesis를 통한 혈액학적 변화에 의해 운동수행능력을 향상시킨다. 반면에, 2000년대 이후부터 지금까지 다양하게 개발되어 온 LLTH는 주로 진공펌프 및 질소발생기를 이용하여 인공적인 고지환경을 조성하며, CHT(continuous hypoxic training), IHT(intermittent hypoxic training) 및 RSH(repeated sprint training in hypoxia)로 구성된다. 일반적으로 LLTH 방법은 3시간 이내의 짧은 시간동안 노출하기 때문에 혈액학적 변화를 유도하지 못하지만, CHT 및 IHT는 골격근과 심장근에서의 다양한 생화학적·구조적 변화를 통해 개선된 운동 경제성, 조직으로의 혈류공급 및 이용, 모세혈관 및 미토콘드리아 밀도, 산화적 효소의 활성화 등을 통해 유산소성 운동능력을 향상시키고, RSH는 해당과정 효소, 글루코스 수송, pH 조절 능력 개선을 통해 무산소성 파워를 증가시키고 반복적인 스프린트 능력을 향상시킨다. 그러나 현재 국내의 경우에는 스포츠 선진국에서 여러 종목의 엘리트 선수의 경기력 향상을 위해 다양하게 적용하고 있는 고지 트레이닝을 적용할 수 있는 시설이 거의 전무할 뿐만 아니라 이에 대한 필요성 인식 또한 매우 부족한 실정이다. **【결론】** 이에 국내에서도 엘리트 선수의 운동수행능력 및 경기력을 극대화할 수 있는 고지 트레이닝 센터에 대한 개발 필요성이 매우 절실하며, 이를 위한 정부 및 지자체들의 많은 지원과 노력이 필요하다.

주요어: 고지 트레이닝, 고지 트레이닝 센터, 엘리트 선수, 경기력