

The Effect of Tilt Angle on Autonomic Nerve Modulation during Post-exercise in Healthy Men

Hyeyoung Jung & Maengkyu Kim*

Kyungpook National University

This study was aimed at investigating the effect of head-tilt angle on autonomic nerve modulation immediately after a single bout of exercise in twenty-three healthy young males (age $21.96 \pm .4$ yrs). Post-exercise HRV was measured on supine (SUP), -15° head-down tilt (HDT), and $+15^\circ$ head-up tilt (HUT) followed by 20 min aerobic exercise with moderate intensity (40% of VO_{2max}). As results, heart rate recovery during post-exercise on each tilt angle (SUP vs. HDT vs. HUT) had no significant difference ($p > .05$). Also, there were no significant difference in time and nonlinear domain index of HRV. On spectral analysis; however, frequency domain index (HF, LF/HF ratio, HF/TP ratio, HF nu, LF nu) had significant difference ($p < .05$) on each tilt angle at recovery. Especially, PNS reactivation index (HF, HF/TP ratio, HF nu) had significant increase on HDT compared to HUT ($p < .05$) while SNS activation index (LF/HF ratio, LF nu) had significant decrease on HDT compared to HUT ($p < .05$). Furthermore, there were significant interaction between recovery time elapsed and each tilt angle (except for HF/TP ratio). In conclusion, -15° head-down tilt promotes the effective cardiac vagus nerve reactivation immediately after a single bout of aerobic exercise.

Key words: Single bout exercise, parasympathetic nerve reactivation, head-tilt angle, heart rate variability 

서론

규칙적인 운동트레이닝은 심장 자율신경시스템 (autonomic nervous system, ANS)의 교감신경계 (sympathetic nerve system) 활동을 억제시키는 반면, 미주신경활동 (vagal activity)을 촉진시켜 ANS 균형 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Bouchard & Rankine, 2001; Goldsmith et al., 2000). 그러나 격렬한 피로와 스트레스를 초래하는 일회성 (single bout) 운동 자극은 급격한 SNS 과활성화 및 부교감신경계 (parasympathetic nerve system,

PNS) 저하를 초래하여 극단적 ANS 불균형을 야기한다. 특히 운동 자극으로 유도된 ANS 불균형은 운동 직후 심장돌연사 (sudden cardiac death)를 포함한 심혈관 사고의 위험을 증가시킨다 (Kandankaril & Goldberger, 2002). 또한, 운동 직후 지연된 PNS 재활성화는 추후 사망률과 관련하는 데 실제 명백한 심혈관 질환이 없는 성인 남녀 2,428명을 대상으로 6년 간 추적조사 결과 최대운동부하검사 직후 PNS 재활성화의 둔화 및 지연된 심박회복률이 심혈관 질환을 포함한 모든 원인에 의한 사망률 (all-cause mortality) 증가와 관련하는 것으로 보고되었다 (Cole et al., 1999).

따라서 운동 후 신속한 PNS 재활성화 즉 효율적 ANS 균형 회복을 위한 임상적 전략으로 음악치료요법 (Okada et al., 2009), 냉온수침요법 (Buchheit et

논문 투고일: 2016. 06. 29.

논문 수정일: 2016. 08. 05.

게재 확정일: 2016. 08. 09.

* 저자 연락처: 김맹규 (kimmk@knu.ac.kr)

al., 2008) 및 색광요법(Choi et al., 2011) 등 다양한 중재처치들이 시도되어왔다. 그러나 이러한 요법들은 부가적 장비 또는 환경적 설정이 요구되어 실제 임상적 상황에서 쉽게 적용하기 어렵다.

한편 심장 ANS는 중력의 영향에 기인한 기립성 스트레스(orthostatic stress)와 밀접하게 관련한다(Montano et al., 1994). 실제 기립성 스트레스에 의한 ANS 조절을 평가하기 위해 지면으로부터 머리위치의 상승, 즉 'head-up tilt' 처치 동안 심박변이도(heart rate variability, HRV; Task Force, 1996) 분석을 수행한 결과 0°, 15°, 30°, 60° 및 90°의 점진적인 머리 기울기(tilt) 각(angle) 증가는 PNS 활성화를 독립적으로 반영하는 스펙트럼의 고주파성분(high frequency, HF power) 감소 및 SNS 활성화 지표 LF/HF ratio (ratio of low to high frequency) 증가와 유의하게 관련하는 것으로 나타났다(Montano et al., 1994). 또한, Tulppo et al.(2001)의 연구에서도 20°, 40° 및 60°의 tilt 각 증가는 HF의 감소뿐만 아니라 모든 사망률 증가와 관련된 프랙털분석지수 DFA α_1 의 증가를 유도하는 것으로 나타났다. 반면, 안정 시 누운 자세(supine)를 포함한 머리위치의 하강, 즉 'head-down tilt(HDT)'는 PNS 활동을 증진시킬 수 있는 효율적인 처치로 보고되었다(Malliani & Montano, 2002; Perini & Veicteinas, 2003). HDT 처치는 하지 정맥환류량(venous return)을 증가시켜 체내 중심혈류량의 상승을 촉진시키고 기립자세에서 발생하는 정수압(hydrostatic force)을 감소시키는 데 실제 McInnis et al.(2006)의 연구에서 건강한 성인 남성을 대상으로 안정 시 앉은 자세(90°upright seated posture, URS)와 -15°HDT를 각각 60분 간 처치하였을 때, HDT는 URS에 비해 심박수는 감소된 반면 1회 심박출량은 유의하게 증가됨을 보고하였다. 또한 고강도 유산소운동(75% VO_{2peak})후 회복기 혈액학적 반응을 비교한 결과, HDT는 URS에 비해 회복기 빠른 심박회복 및 1회 심박출량 증가가 관찰되었다. 이러한 연구결과는 1회 심박출량이 심장활동과 밀접하게 관련하며 안정 시 심박수 및 운동 후 심박회복이 ANS 조절에 기인한다는 관점에서 -15°HDT 처치가 안정 시 및 운동중재 후 심장 PNS 재활성화를 촉진시킬 수 있는 강력한 임상적 중

재요법임을 시사한다. 그러나 실제 운동 후 -15°HDT 처치가 PNS 재활성화 및 ANS 균형 조절에 미치는 영향에 관한 직접적인 임상결과는 국내외적으로 알려진 바 없다.

HDT 처치가 임상적 상황에서 간편하게 적용할 수 있다는 점과 함께 '중력-혈류역학상'이라는 기초 개념에 기인하여 운동 후 ANS 균형 조율에 관련된 측면에서 중력의 영향을 평가하는 것은 임상적으로 더 큰 의미가 있겠다. 따라서 본 연구는 일회성의 운동 후 효율적 심장회복을 위한 전략으로 중력의 영향을 최소화하기 위한 HDT 처치가 실제 PNS 재활성화 및 ANS 균형 회복 촉진에 미치는 직접적인 영향을 평가하고자 하였다.

연구방법

연구대상

본 연구는 심혈관질환 및 정형외과적 질환이 없는 정상혈압의 건강한 남성(age, $21.96 \pm .41$ yrs) 23명을 대상으로 실시되었다. 참가자들은 정기적인 운동트레이닝(적어도 6개월 이상)을 수행하지 않는 비신체활동자로 구성되었으며 실험 전 연구의 목적과 절차, 그리고 수반되는 위험성을 구체적으로 고지하고, 자발적 의사에 관한 참가동의서에 서명을 받았다. 피험자들의 임상적 특징은 <Table 1>과 같다.

Table 1. Clinical characteristics of subjects (n=23)

Variables	Values
<i>Clinical information</i>	
Age, yrs	21.96 ± .41
Height, cm	174.71 ± 1.04
Weight, kg	69.93 ± 1.92
Body mass index, kg/m ²	22.86 ± .52
Waist/Hip ratio	.85 ± .01
Fat, %	16.83 ± .83

Values are means ± SE

MHR, mean heart rate; SBP, systolic blood pressure; DBP, diastolic blood pressure; MAP, mean arterial pressure

실험 설계 및 절차

실험 session 분류

모든 피험자들은 무작위 교차설계(randomized cross-over design)로 구성된 총 세 번의 실험 session에 참여하였다. 각 session은 온도와 습도를 제어한 실험실 환경에서 운동 후 회복기 20분 동안 각각 다른 tilt 각(0° supine, SUP; -15° head-down tilt, HDT; $+15^{\circ}$ head-up tilt, HUT)으로 설계된 Tilt 테이블 위에서 휴식하도록 설정하였다. 각 session 간 최소 48시간의 wash-out을 부여하였고, 생물학적 주기(circadian cycle)에 따른 변동을 최소화하기 위해 동일한 시간대에 측정하였다(Buchheit et al., 2009).

피험자 지시사항

사전 신체검사(baseline)전 최소 24시간 동안 알코올 및 카페인 함유된 음료의 섭취를 제한하고 48시간 내 격렬한 신체활동을 금지하였다. 전일공복(overnight fasting) 후 신체조성을 포함한 혈액학적 변인들을 측정하였으며, 총 세 번의 session 전에는 가벼운 식사를 마치고 최소 2시간 이상 휴식 후 실험에 참여하도록 유도하였다. 피험자가 금기사항을 지킬 수 있도록 전화를 통한 지속적인 감독이 이루어졌으며, 각 session 전 피험자와 구체적인 인터뷰를 실시하였다.

심박변이도(heart rate variability, HRV) 측정

온도, 습도, 소음 및 조도 등 ANS 조절에 영향을 미치는 환경적 요인들을 통제하기 위해 먼저 온도($22\sim 24^{\circ}\text{C}$)와 습도($50\sim 60\%$) 유지와 함께 낮은 조도로 설계된 방음실(soundproof chamber) 내에서 HRV 모니터링이 실시되었다(Kim & Kim, 2014). HRV 분석을 위한 r-r intervals은 무선심박계 Polar RS800CX (Polar Electro Oy, Kempele, Finland)를 이용해 샘플링 하였으며, 측정 시 불규칙적인 심호흡이나 혼합된 자극이 있는 상태는 진폭(amplitude)을 증가시키므로 박절기(metronome, 15 times/min에 의한 .25 Hz)를 이용하여 피험자들의 호흡 빈도 차를 최소화하였다(Strano et al., 1998). 안정 시는 10분 동안 편안

하게 누운 자세(0° tilt)로 측정되었으며, 회복기는 운동 직후 Rec1(post-exercise at $0\sim 10\text{min}$) 및 Rec2(post-exercise at $10\sim 20\text{min}$)에서 각각 10분 동안 피험자가 tilt 테이블 위에 설정된 각에서 회복기 동안 측정되었다. 기록된 r-r intervals은 Polar RS800CX의 chest strap(two-lead)을 통해 1000 Hz로 샘플링 되었으며, 모든 원시데이터(raw data)는 전용소프트웨어를 통해 추출 후, HRV 분석 소프트웨어 Kubios (version 2.0, 2008, Biosignal Analysis And Medical Imaging Group, University of Kuopio, Finland, MATLAB)로 전송하였다. 분석 전 artifact correction을 통해 이소성 beat를 제거하고 단기간 HRV 표준검사 프로토콜에 따라 연속적인 r-r intervals를 바탕으로 시간(time), 주파수(frequency), 그리고 비선형(nonlinear) 지수들을 산출하였다. 구체적으로 시간영역의 주요 지표로서 HRV의 총 활성화 지표 SDNN(standard deviation of r-r intervals)과 PNS 활성화 지표 rMSSD (square root of the mean squared differences between successive r-r intervals) 및 pNN50(NN50 divided by the total number of r-r intervals)을 산출하였다. 또한, 고속푸리에변환(fast Fourier transform)법에 의한 파워스펙트럼 지수 중 PNS 활성화를 반영하는 HF(high frequency, $.15\sim .40$ Hz) 및 SNS와 PNS의 혼합지표 LF(low frequency, $.04\sim .15$ Hz)를 산출하였다. 추가적으로 두 값을 이용해 상대적 비율 지수(LF/HF ratio, HF/TP ratio) 및 정규화 값(normalized HF, HF nu; normalized LF, LF nu)을 계산하였다. 본 연구에서는 비선형기법 중 단기간 HRV 분석에 적용 가능한 Poincaré plot에서 PNS 활성화를 반영하는 x축의 변이율 SD1과 혼합지표로서 y축 변이율 SD2를 도출하고, 두 값의 SD1/SD2 ratio를 산출하였다. 또한, 탈경향변동분석(detrended fluctuation analysis, DFA)을 사용하여 단기간의 변이율을 나타내는 DFA α_1 과 장기간의 변이율을 나타내는 DFA α_2 를 산출하고 두 값의 비율로 계산되는 DFA α_1/α_2 ratio를 도출하였다. 끝으로 HRV의 불규칙성 및 복잡성을 반영(Richman & Moonman, 2000)하는 SampEn를 산출하였다(Tarvainen et al., 2014).

유산소운동 프로토콜

미국대학스포츠의학회(American College of Sports Medicine, ACSM)의 가이드라인에서 심폐체력 증진을 위한 중강도 유산소운동 강도는 최대산소섭취량(maximal oxygen consumption, VO_{2max})의 40~60%를 권장하고 있다(ACSM, 2013). 따라서 본 연구에서는 운동 강도 설정 시 참가자가 운동 경험이 없는 초보자인 점을 고려하여 40% VO_{2max} 로 설계하였다. 또한 실험의 취지 상 피험자의 안정성을 확보하기 위해 최대산소섭취량의 직접 평가를 배제하고 간접 기법으로 40% VO_{2max} 에 상응하는 최대심박수(maximal heart rate, HR_{max})의 63% 강도로(Swain et al., 1994) 수행되었다.

각 session에서 중강도 유산소운동 수행은 treadmill (MAHA3, TAEYOUNG Inc., Korea)을 이용한 4 km/h 속도의 가벼운 걷기(warm-up)로 시작하여 5분 이내에 피험자의 목표 심박수에 도달하도록 운동속도를 점진적으로 증가시켰으며(Kim & Kim, 2015) 피험자의 심박수 및 운동속도를 지속적으로 모니터링 하였다. 총 20분간의 운동 후, 신속히 tilt 테이블로 이동하여 각 session의 특정 tilt 각에서(SUP, HDT, 또는 HUT) 20분 동안 휴식을 취하였다(Takahashi et al., 2000).

자료 분석

모든 자료처리는 SPSS 22.0(Statistical Package for the Social Sciences Software, Version 22.0, Chicago, IL, USA)을 이용해 각 항목별 평균(mean)과 표준오차(standard error, SE)를 산출하였으며, 모든 데이터는 $mean \pm SE$ 로 나타내었다. 각 session 간 baseline 차이 검증을 위해 일원분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 실시하였고, Bonferroni post-hoc test를 통해 사후분석을 수행하였다. 또한, 반복측정분산분석(repeated measures analysis of variance, Repeated measures ANOVA)을 수행하여 운동 후 회복시간경과에 따른 집단 간(HDT, HUT, 또는 SUP)의 상호작용효과(interaction: Time \times Group)를 검증하였다. 모든 통계적 유의수준(α)을 .05로 설정하였다.

연구결과

운동 후 회복기 tilt 각에 따른 HRV의 시간(time) 및 비선형(nonlinear) 지수 변화

일원분산분석 결과, 각 session 간 획득된 모든 안정 시 시간영역 지표는 집단 간(HDT, HUT, 또는 SUP) 차이가 나타나지 않았다($p > .05$). HRV의 총 활성화 지표 SDNN과 PNS 활성화 지표 rMSSD 및 pNN50는 운동 후 HDT에서 다른 집단에 비해 높은 값을 나타내었으나, 집단 간 통계적인 차이는 나타나지 않았다(data not shown).

또한, 각 session 간 획득된 모든 안정 시 비선형지수에서 안정 시 집단 간 차이는 나타나지 않았다($p > .05$). PNS 활성화 지표 SD1과 SD1/SD2 ratio는 운동 후 다른 tilt 각에 비해 HDT에서 가장 높게 증가하였으나, 집단 간 유의한 차이는 나타나지 않았다($p > .05$). SampEn 역시 다른 집단에 비해 HDT에서 가장 크게 증가하였으나 집단 간 통계적 차이는 나타나지 않았다($p > .05$). 프랙털분석 지표 DFA α_1 ($p > .05$)과 DFA α_1/α_2 ratio($p > .05$)는 운동 후 회복기 다른 집단에 비해 HDT에서 크게 감소하였으나, 집단 간 유의미한 차이는 나타나지 않았다(data not shown).

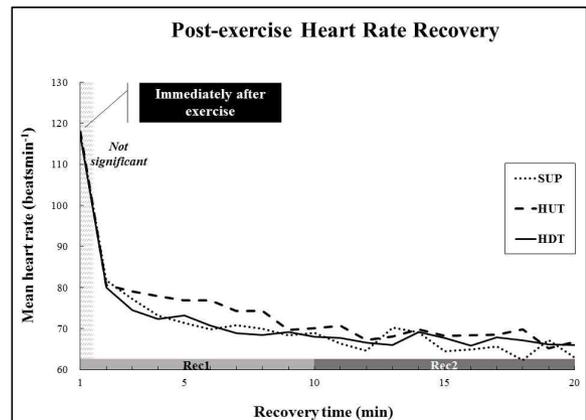


Fig. 1. Post-exercise heart rate recovery
Sup, supine; HUT, +15°head-up tilt; HDT, -15°head-down tilt; Rec1, post-exercise at 0~10min; Rec2, post-exercise at 10~20min

운동 후 회복기 Tilt 각에 따른 심박회복률 변화

운동 중단 직후 및 회복기 20분 동안 tilt 각에 따른 심박회복에 유의한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 1).

운동 후 회복기 HRV 파워스펙트럼(power spectrum) 분석

회복기 tilt 각에 따른 spectral power의 절대 값 (absolute value)의 변화

일원분산분석 결과, 안정 시 스펙트럼의 HF power는 집단 간(HDT, HUT 및 SUP) 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > .05$). 그러나 운동 후 Rec2(회복기 10~20min)에서 집단 간 통계적인 차이가 나타났으며 HDT가 HUT에 비해 유의하게 높은 값을 나타내었다($p < .05$). 또한 반복측정분산분석 결과, 회복시간경과에 따라 집단 간 유의한 상호작용효과($p < .05$, $F=2.432$)가 나타났다(Fig. 2).

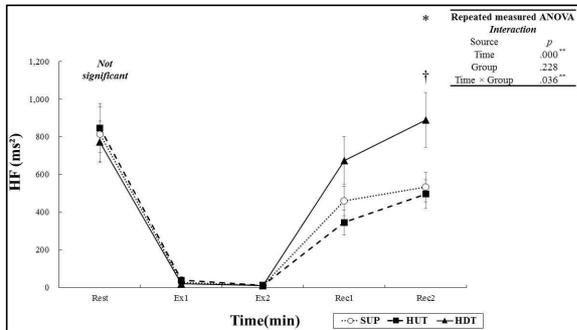


Fig. 2. Change of HF power on each posture

Sup, supine; HUT, +15°head-up tilt; HDT, -15°head-down tilt; Rest, resting state; Ex1, 0~10min of exercise; Ex2, 10~20min of exercise; Rec1, post-exercise at 0~10min; Rec2, post-exercise at 10~20min
* $p < .05$, significant difference by one-way ANOVA; † $p < .05$, significant difference between HDT and HUT by Bonferroni *post-hoc* test; ** $p < .05$, significant interaction

회복기 tilt 각에 따른 spectral power의 비율 (ratio) 값의 변화

SNS 활성화를 반영하는 LF/HF ratio는 일원분산 분석 결과, 안정 시 집단 간(HDT, HUT 및 SUP) 통계

적인 차이가 나타나지 않았다($p > .05$). 그러나 운동 후 회복기 모든 구간(Rec1 및 Rec2)에서 집단 간 통계적인 차이가 나타났으며, HDT가 HUT에 비해 유의하게 낮은 값을 나타내었다($p < .05$).

또한 반복측정분산분석 결과, 회복시간경과에 따른 집단 간 유의한 상호작용효과($p < .05$, $F = .454$)가 나타났다(Fig. 3).

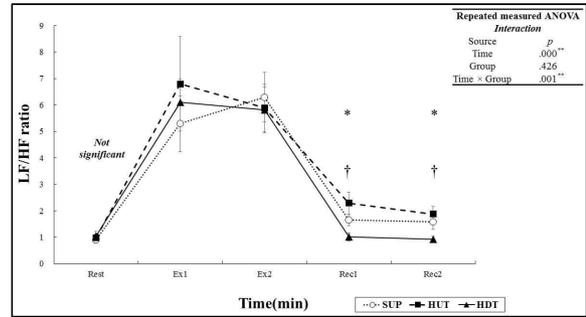


Fig. 3. Change of LF/HF ratio on each posture

Sup, supine; HUT, +15°head-up tilt; HDT, -15°head-down tilt; Rest, resting state; Ex1, 0~10min of exercise; Ex2, 10~20min of exercise; Rec1, post-exercise at 0~10min; Rec2, post-exercise at 10~20min
* $p < .05$, significant difference by one-way ANOVA; † $p < .05$, significant difference between HDT and HUT by Bonferroni *post-hoc* test; ** $p < .05$, significant interaction

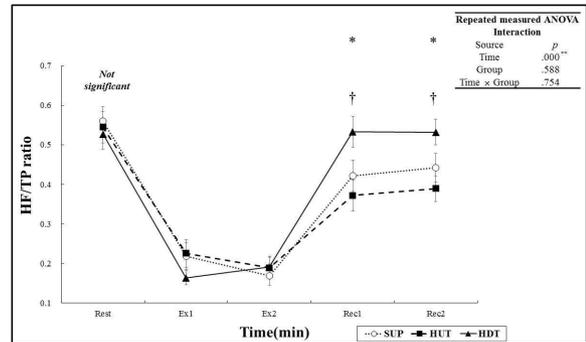


Fig. 4. Change of HF/TP ratio on each posture

Sup, supine; HUT, +15°head-up tilt; HDT, -15°head-down tilt; Rest, resting state; Ex1, 0~10min of exercise; Ex2, 10~20min of exercise; Rec1, post-exercise at 0~10min; Rec2, post-exercise at 10~20min
* $p < .05$, significant difference by one-way ANOVA; † $p < .05$, significant difference between HDT and HUT by Bonferroni *post-hoc* test; ** $p < .05$, significant interaction

한편 PNS 활성화를 반영하는 HF/TP ratio 는 안정 시 및 운동 시 집단 간 유의한 차이가 나타나지 않았으나 ($p > .05$), 운동 후 회복기 모든 구간에서 집단 간 tilt 각에 따른 유의한 차이가 나타났으며, HDT가 HUT에 비해 통계적으로 높은 값을 나타내었다($p < .05$). 그러나 회복시간경과에 따라 집단 간 유의한 상호작용효과 ($p > .05$, $F = 4.216$)는 나타나지 않았다(Fig. 4).

회복기 tilt 각에 따른 spectral power의 정규화 값(normalized unit)의 변화

일원분산분석 결과, 심장 PNS의 우세한 활동을 반영하는 HF nu는 안정 시 집단 간 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > .05$). 그러나 운동 후 회복기 모든 구간(Rec1 및 Rec2)에서 집단 간(HDT, HUT 및 SUP) 통계적인 차이가 나타났으며 HDT가 HUT에 비해 유의하게 높은 값을 나타내었다($p < .05$).

또한 반복측정분산분석 결과, 회복시간경과에 따라 집단 간 유의한 상호작용효과($p < .05$, $F = 4.308$)가 나타났었다(Fig. 5).

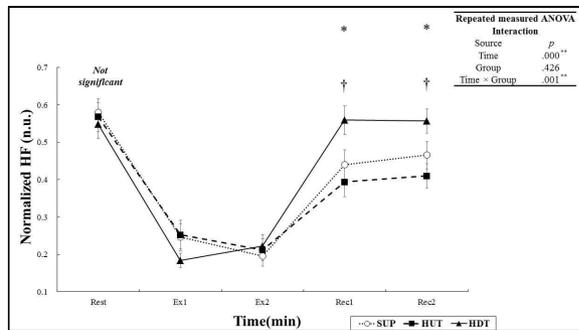


Fig. 5. Change of HF nu on each posture
Sup, supine; HUT, +15°head-up tilt; HDT, -15°head-down tilt; Rest, resting state; Ex1, 0~10min of exercise; Ex2, 10~20min of exercise; Rec1, post-exercise at 0~10min; Rec2, post-exercise at 10~20min
* $p < .05$, significant difference by one-way ANOVA; † $p < .05$, significant difference between HDT and HUT by Bonferroni *post-hoc* test; ** $p < .05$, significant interaction

반면 SNS의 우세한 활동을 반영하는 LF의 정규화 지수인 LF nu는 안정 시 및 운동 시 집단 간 유의한 차이가 나타나지 않았다($p < .05$). 그러나 운동 후 회복기

모든 구간 집단 간 유의한 차이가 나타났으며, HDT가 HUT에 비해 유의하게 낮은 값을 나타내었다($p < .05$). 또한 반복측정분산분석 결과, 회복시간경과에 따라 집단 간 유의한 상호작용효과($p < .05$, $F = 4.308$)가 나타났었다(Fig. 6).

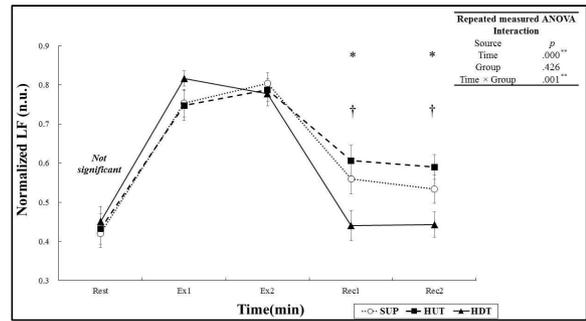


Fig. 6. Change of LF nu on each posture
Sup, supine; HUT, +15°head-up tilt; HDT, -15°head-down tilt; Rest, resting state; Ex1, 0~10min of exercise; Ex2, 10~20min of exercise; Rec1, post-exercise at 0~10min; Rec2, post-exercise at 10~20min
* $p < .05$, significant difference by one-way ANOVA; † $p < .05$, significant difference between HDT and HUT by Bonferroni *post-hoc* test; ** $p < .05$, significant interaction

논 의

자세에 따른 기립성 스트레스는 심장 ANS 조절과 밀접하게 관련한다. 본 연구는 특히 머리 tilt 각을 지면과 수평 이하로 기울인 HDT 처치가 안정 시 심박수 감소 및 운동 후 심박회복률 증가에 기여한다는 관점에서, 건강한 남성을 대상으로 일회성 유산소운동 후 회복기 tilt 각이 PNS 재활성화 및 ANS 균형 회복에 미치는 영향을 규명하려는 목적으로 수행되었다. 주된 연구결과는 다음과 같다.

일회성 중강도 유산소운동 후 회복기 tilt 각에 따른 집단 간(HDT, HUT 및 SUP) 심박회복률의 차이가 없었음에도 불구하고 스펙트럼의 PNS 활성 지수 HF power는 HUT에 비해 HDT에서 유의하게 높은 값을 나타내었다. 또한 스펙트럼의 SNS 활성 지수 LF/HF ratio는 HUT에 비해 HDT에서 유의하게 감소한 반면,

PNS 활동을 반영하는 HF/TP ratio는 HUT에 비해 HDT에 유의하게 상승하는 것으로 나타났다. 한편 ANS 균형 조절에서 SNS 우세적 활동을 반영하는 LF nu는 HUT에 비해 HDT에서 유의하게 감소하였으나, PNS의 우세적 활동을 반영하는 HF nu는 HUT에 비해 HDT 처치에서 유의하게 증가되는 것으로 나타났다.

실제 HDT 처치는 기립성 스트레스에서 발생하는 정수압의 영향을 감소시키는 동시에 하지 정맥환류량을 증가시켜 심장으로 회귀되는 혈액량을 증가시킨다. 특히 30°미만의 HDT 처치는 체내 평균동맥압(mean arterial pressure)의 변화 없이 ANS 조절과 관련한 심폐압수용기 활동에 중력의 영향을 감소시키는 것으로 알려져 있다(Fu et al., 2000; McInnis et al., 2006). 이러한 생리학적 메커니즘에 따라 HDT 처치는 운동 후 심박회복률에 직접적인 영향을 미친다. 실제 고강도 유산소운동 후 회복기 -15°HDT 처치와 URS 처치를 비교 분석한 McInnis et al.(2006)의 연구에서 운동 후 URS에 비해-15°HDT 처치에서 심박회복률의 유의한 감소를 나타냈다($p < .05$). 그러나 본 연구에서는 각 session 간 tilt 각에 따른 심박회복률에 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 운동강도 및 HDT 처치 시 tilt 각에 따른 차이로 해석된다. 구체적으로 본 연구의 경우 피험자가 운동 경험이 없는 초보자를 대상으로 40% VO_{2max} 의 중강도 유산소운동을 수행한 반면 선행연구의 경우 75% VO_{2max} 의 고강도 유산소운동을 수행하였다. 특히 tilt 각에서 선행연구의 경우 90°와 -15°tilt 처치로 머리 tilt각의 차이가 큰 반면 본 연구의 경우 비교집단 간 HDT 처치의 객관적 평가를 위해 0°, +15° 및 -15°로 tilt 각의 차이를 최소화하였다.

한편 중강도 유산소운동 수행 후 0°, +15° 및 -15° tilt 각 처치는 HRV의 시간영역 분석에서 유의한 차이를 나타내지 않았다. 실제 성인 남성을 대상으로 고강도 간헐적 유산소운동(supramaximal intermittent exercise) 후 자세변화가 회복기 심장 PNS 재활성화에 미치는 영향을 조사한 Buchheit et al.(2009)의 연구에서 HRV의 시간영역 분석결과 미주신경활성화를 반영하는 rMSSD가 upright standing 및 sitting에 비해 상대적으로 지면과 머리의 각이 낮은 supine에서 유의하게 증가함을 보고하였다. 하지만 본 연구에서는 시간영역에

서 심장 미주신경활성화를 반영하는 지표들이 운동 후 HUT에 비해 HDT와 SUP에서 신속하게 증가하는 경향은 나타났으나, 유의한 차이가 없었다($p > .05$). 또한 HRV의 시간영역 지수는 연속적인 r-r interval을 이용한 단순 계산으로 산출되어 ANS 균형 조절을 포함한 운동 후 PNS 재활성화를 직접적으로 제시하는 데 한계가 있다.

한편 HRV의 스펙트럼분석은 심장 ANS의 교감-미주밸런스를 가장 효과적으로 반영하는 지표로 알려져 있다. 그러나 Buchheit et al.(2009)의 연구에서 고강도 유산소운동 직후 HRV 분석을 수행한 결과로서 스펙트럼지수에 의한 ANS 해석에 있어 제한점을 가진다고 보고하였다. 실제 70% VO_{2max} 를 초과하는 고강도 운동 직후 ANS 모니터링 시 운동자극에 의해 나타나는 주파수대역의 특이성으로 인해 객관적 분석이 불가능하다(Perini & Veicsteinas, 2003). 따라서 본 연구에서는 고강도 운동 후 스펙트럼 해석상의 제한점을 고려하여 중강도 유산소운동을 수행하였으며, 운동 직후 및 운동 후 회복기 20분 동안 tilt 각에 따른 ANS 균형 회복 및 PNS 재활성화를 과학적으로 평가하였다.

실제 Montano et al.(1994)의 연구에서 안정 시 0~90°의 점진적인 tilt 각의 증가에 따라 교감-미주밸런스의 HF power는 점차 감소하였으나, SNS 활성화 지표인 LF/HF ratio는 유의하게 증가함을 나타내었다. 또한, 독립적으로 PNS 활성화를 반영하는 HF nu 역시 tilt 각의 증가에 따라 낮은 수치를 나타내는 반면 SNS 활성화의 우세를 나타내는 LF nu는 높은 수치를 나타냈다. 대조적으로 안정 시 및 고강도 유산소운동 후 회복기 tilt 각의 감소, 즉 기립성 스트레스의 감소가 ANS 밸런스에 미치는 영향을 URS(90°tilt)와 supine(0°tilt)에서 비교 평가한 Takahashi et al.(2000)의 연구는 안정 시 PNS 활성 지표인 HF power가 URS에 비해 supine에서 유의하게 증가함($p < .001$)을 나타낸 반면, 운동중재 후 회복기에서는 HF power가 상승하는 경향만 확인하였을 뿐 비교그룹간의 유의한 차이가 없음을 보고하였다. 또한, McInnis et al.(2006)의 연구에서는 고강도 유산소운동 후 URS와 -15°HDT처치에서 ANS 해석을 비교한 결과, HF power가 URS에 비해 -15°HDT 처치에서 유의한 차이가 나타났을 뿐만 아니라, 독립적으로 PNS 활성화를 반영하는 HF nu 및

HF/TP ratio의 유의한 상승($p < .05$)을 나타냈다. 하지만 운동 후 심박회복률에서 유의한 차이가 나타났다. 이러한 결과들은 본 연구에서 도출한 결과와 유사하나, 앞서 상술한 바와 같이 70% VO_{2max} 를 초과하는 고강도 운동자극 후 주파수대역의 특이성으로 인해 HRV 분석 및 ANS 해석에서 과학적이고 객관적인 해석이 불가능하다는 점을 고려하여 중강도 유산소운동을 중재한 본 연구의 결과의 신뢰성이 높다고 판단된다.

또한 회복기 스펙트럼 분석결과 PNS 활성화 지표인 HF power가 HUT에 비해 HDT에서 유의하게 높은 값을 나타내었으며, 대조적으로 SNS 활성화를 반영하는 LF/HF ratio는 유의하게 낮은 수치를 나타냈다. 뿐만 아니라 운동 후 HDT 처치는 HUT 처치에 비해 교감-미주밸런스에서 SNS의 우세적 활동을 반영하는 LF nu의 빠른 감소와 함께 PNS의 우세적 활동을 반영하는 HF nu의 신속한 증가가 관찰되었다. 결과적으로 tilt 각에 따른 심박회복률에는 통계적 유의한 차이가 없었음에도 불구하고 스펙트럼분석에서 PNS와 SNS 활성화를 반영하는 지표들에서 유의한 차이를 나타내는 것은 본 연구의 독창성을 보여준다고 판단된다.

따라서 운동 직후 회복기 HDT 처치는 PNS 재활성화 및 SNS 활동저하를 효율적으로 유도할 수 있으며, Albert et al.(2000)의 연구에서 일회성의 운동 후 지연된 PNS 재활성화는 심혈관사고의 위험률의 증가와 직결한다는 관점에서 일회성의 운동 후 ANS 기능회복에 HDT 처치가 가져오는 임상적 효과는 중요한 의의를 가진다고 판단된다.

본 연구는 몇 가지 제한점을 가지는데, 첫째, 본 연구는 -15° HDT와 $+15^{\circ}$ HUT에서 회복기 ANS 회복을 평가하였다. 몇몇 선행연구들을 살펴보면, HUT에서 tilt 각이 30° 미만일 경우 평균동맥압의 변화 없이 심장내 심폐압수용기의 활동이 ANS에 미치는 영향만을 확인할 수 있다고 보고되어 있다. 따라서 본 연구에서는 참여자의 인지심리적 거부감이 적은 -15° 와 $+15^{\circ}$ 각도에서만 tilt 가 실시되었다. 둘째, 본 연구의 실험 대상자는 모두 성인 남성만을 대상으로 실시하였다. 실제 성차에 따른 HRV 분석 결과의 차이점에 대한 보고에 따라 HRV 분석결과의 차이를 배제하기 위해 건강한 성인 남성만을 대상으로 실시되었다(Sookan & McKune,

2012). 그러나 본 연구는 일회성의 유산소운동 후 심혈관 및 ANS 기능향상을 위한 tilt 각에 대한 ANS 기능회복을 규명함으로써 새로운 건강정보를 제공할 것으로 사료된다.

결론 및 제언

본 연구는 성인 남성을 대상으로 일회성 운동 후 tilt 각이 ANS 균형 회복에 미치는 영향을 평가하고, 신속한 PNS 재활성화를 위한 가장 효율적인 tilt 각도를 규명하려는 목적으로 수행되었다.

운동 후 회복기 tilt 각에 따른 심박회복률에 차이가 없었음에도 불구하고 스펙트럼지표에서 -15° tilt의 'head-down tilt' 처치는 신속한 PNS 재활성화 및 SNS 저하를 유도하였을 뿐 아니라 HDT 처치가 교감-미주신경밸런스에서 우세한 PNS 활동을 유도한다는 사실을 객관적으로 검증하였다는 점에서 유의미한 결과를 도출했다.

일과성의 급성적 운동자극은 심박수의 상승과 함께 SNS의 과항진 및 PNS의 저하로 정의되는 ANS 불균형을 야기한다. 따라서 운동 후 심박 및 ANS 균형의 신속한 회복을 위한 중재처치는 신체활동의 안전성을 도모한다는 취지에서 임상적인 의의를 가진다고 하겠다.

이상의 연구결과를 비추어 볼 때, 운동 초보자에 있어서 심혈관 건강을 위한 유산소운동 후 회복기 HDT 처치는 PNS 재활성화 및 ANS 균형회복을 위한 효율적 임상전략임을 시사한다. 추후 연령과 성차 등을 고려한 다양한 인구집단 및 다른 운동양식 또는 운동강도 등을 적용한 다각적 접근을 통해 이를 뒷받침 할 수 있는 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- Albert, C. M., Mittleman, M. A., Chac, C. U., Lee, I. M., Hennekens, C. H., & Manson, J. E.(2000). Triggering of sudden death from cardiac causes by vigorous exertion. *New England Journal of Medicine*, 343(19), 1355-61.

- American College of Sports Medicine.(2013). *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription*. 9th ed., Lippincott Williams and Wilkins: Philadelphia, PA.
- Bouchard, C., & Rankinen, T.(2001). Individual differences in response to regular physical activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(6), S446-451.
- Buchheit, M., Peiffer, J. J., Abbiss, C. R., & Laursen, P. B.(2008). Effect of cold water immersion on post-exercise parasympathetic reactivation. *American Journal of Physiology; Heart and Circulatory Physiology*, 296(2), H421-7.
- Buchheit, M. A., Haddad, H., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S.(2009). Effect of body posture on post exercise parasympathetic reactivation in men. *Experimental Physiology*, 94(7), 795-804.
- Choi, C. J., Kim, K. S., Kim, C. M., Kim, S. H., & Choi, W. S. (2011). Reactivity of heart rate variability after exposure to colored lights in healthy adults with symptoms of anxiety and depression. *International Journal of Psychophysiology*, 79(2), 83-8.
- Cole, C. R., Blackstone, E. H., Pashkow, F. J., Snader, C. E., & Lauer, M. S.(1999). Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *New England Journal of Medicine*, 341(18), 1351-7.
- Fu, Q., Sugiyama, Y., Kamiya, A., & Mano, T.(2000). A comparison of autonomic responses in humans induced by two simulation models of weightlessness: lower body positive pressure and 6 degrees head-down tilt. *Journal of Autonomic Nerve System*, 80(1-2), 101-7.
- Goldsmith, R. L., Bloomfield, D. M., & Rosenwinkel, E. T.(2000). Exercise and autonomic function. *Coronary Artery Disease*, 11(2), 129-35.
- Kannankeril, P., & Goldberger, J. J.(2002). Parasympathetic effects on cardiac electrophysiology during exercise and recovery. *American Journal of Physiology; Heart and Circulatory Physiology*, 282(6), H2091-8.
- Kim, M. K., & Kim, C. S.(2015). Autonomic nerve regulation after arm- or leg ergometer exercising eliciting the same heart level. *Korean Journal of Sport Science*, 26(2), 219-229.
- Kim, C. S., & Kim, M. K.(2014). Effects of short-term aerobic exercise and/or smoking cessation on autonomic nerve regulation in healthy male smokers. *Journal The Korean Society of Living Environmental System*, 21(3), 364-374.
- Malliani, A., & Montano, N.(2002). Heart rate variability as a clinical tool. *Italian Heart Journal*, 3(8), 439-45.
- McInnis, N. H., Journeay, W. S., Jay, O., Leclair, E., & Kenny, G. P.(2006). 15 degrees head-down tilt attenuates the post exercise reduction in cutaneous vascular conductance and sweating and decreases esophageal temperature recovery time. *Journal of Applied Physiology*, 101(3), 840-7.
- Montano, N., Ruscone, T. G., Porta, A., Lombardi, F., Pagani, M., & Malliani, A.(1994). Power spectrum analysis of heart rate variability to assess the changes in sympathovagal balance during graded orthostatic tilt. *Circulation*. 90(4), 1826-31.
- Okada, K., Kurita A., Takase, B., Otsuka, T., Kodani, E., Kusama, Y., Atarashi, H., & Mizuno, K.(2009). Effects of music therapy on autonomic nervous system activity, incidence of heart failure events, and plasma cytokine and catecholamine levels in elderly patients with cerebrovascular disease and dementia. *International Heart Journal*, 50(1), 95-110.
- Perini, R., & Veicsteinas, A.(2003). Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3-4), 317-25.
- Richman, J. S., & Moorman, J. R.(2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 278(6), 2039-49.
- Strano, S., Lino, S., Calcagnini, G., Di Virgilio, V., Ciardo, R., Cerutti, S., Calcagnini, G., & Caselli, G.(1998). Respiratory sinus arrhythmia and cardiovascular neural regulation in athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(2), 215-9.
- Sookan, T., & Andrew, J. M.(2012). Heart rate variability in physically active individuals: reliability and gender characteristics. *Cardiovascular Journal of Africa*, 23(2), 67-62.
- Swain, D. P., Abernathy, K. S., Smith, C. S., Lee, S. J., & Bunn, S. A.(1994). Target heart rates for the development of cardiorespiratory fitness. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(1), 112-6.
- Takahashi, T., Okada, A., Saitoh, T., Hayano, J., & Miyamoto, Y.(2000). Difference in human cardiovascular response between upright and supine recovery from upright cycle

- exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 81(3), 233-9.
- Tarvainen, M. P., Niskanen, J. P., Lipponen, J. A., Ranta-Aho, P. O., & Karjalainen, P. A. (2014). Kubios HRV—heart rate variability analysis software. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 113(1), 210-20.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability. Standards of measurements, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354-81.
- Tulppo, M. P., Hughson, R. L., Makikallio, T. H., Airaksinen, K. E., Seppanen, T., & Huikuri, H. V. (2001). Effects of exercise and passive head-up tilt on fractal and complexity properties of heart rate dynamics. *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 280(3), H1081-7.

유산소 운동 후 Tilt각에 따른 자율신경시스템의 시계열 변화

정혜영 · 김맹규 (경북대학교)

본 연구는 심혈관 및 정형외과적 질환이 없는 23명의 건강한 성인 남성을 대상으로 일회성 유산소운동 중재 후 머리 tilt각이 자율신경조절에 미치는 영향을 규명하기 위한 목적으로 수행되었다. 무작위 교차설계인 총 세 번의 실험은 중강도의 유산소운동 후 tilt 테이블에서 누운 자세(supine, SUP), -15° head-down tilt(HDT), 또는 $+15^{\circ}$ head-up tilt(HUT)처치에서 회복기 20분 동안(Rec1,0~10분; Rec2,10~20분)의 HRV 모니터링으로 구성되었다. 기록된 r-r intervals는 HRV software Kubios 2.0을 통해 시간, 주파수, 비선형영역지수로 산출되었다. 운동 후 회복기 머리 tilt 각이 ANS 균형 회복에 미치는 영향을 평가한 후 다음과 같은 결과를 도출하였다. 먼저, 운동 중단 직후 및 회복기 20분 동안 tilt 각에 따른 심박회복에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > .05$). 또한, 스펙트럼분석에서 SNS를 반영하는 지표(LF/HF ratio, LF nu) 및 PNS 재활성화 지표(HF power, HF/TP ratio, HF nu)는 tilt 각에 따른 통계적인 유의한 차이가 있었으며($p < .05$), HUT에 비해 HDT에서 유의한 증가가 나타났다($p < .05$). 반면 LF/HF ratio 및 LF nu는 HUT에 비해 HDT에서 유의하게 감소함을 나타냈다($p < .05$). 더욱이, 반복측정분산분석 결과, HF/TP ratio를 제외한 모든 SNS 및 PNS 활성 지수들은 회복시간경과와 tilt 각에 따른 주효과 검증에서 유의한 차이가 있었다($p < .05$). 결론적으로, 일회성 유산소운동 직후 회복기 -15° tilt 의 HDT 처치는 신속한 PNS 재활성화 및 SNS 저하를 유도하였을 뿐 아니라 HDT 처치가 교감-미주신경밸런스에서 우세한 PNS 재활성화를 유도한다는 사실을 객관적으로 검증하였다는 점에서 유의미한 결과를 도출했다. 따라서 심혈관 건강을 위해 운동 후 회복기 -15° HDT 처치는 심장 ANS 균형 회복을 위한 효율적 임상전략임을 시사한다.

주요어: 일회성 운동, 부교감신경재활성화, 머리 tilt 각, 심박변이도