한국운동역학회지, 2007, 제17권 1호, pp. 1-8
Korean Journal of Sport Biomechanics
2007, Vol. 17, No. 1, pp. 1-8

지면반력장비의 정밀성, 신뢰도와 장비설치·사용 환경의 영향

Accuracy and Reliability of Ground Reaction Force System and Effect of Force Platform Mounting and Environment

박영훈* · 염창홍 · 손승 · 서국웅(부산대학교) · 김의환 · 김태완(용인대학교)
Park, Young-Hoon* · Youm, Chang-Hong · Sun, Sheng · Seo, Kook-Woong(Pusan National University) · Kim, Eui-Hwan · Kim, Tae-Whan(Yongin University)

ABSTRACT

Y. H. PARK, C. H. YOUM, S. SUN, K. W. SEO, E. H, KIM, and T. W. KIM, Accuracy and Reliability of Ground Reaction Force System and Effect of Force Platform Mounting and Environment. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 17, No. 1, pp. 1-8, 2007. Ground reaction force (GRF) measures are one of the most commonly used in biomechanical study. GRF system is very useful educational tool to explain and demonstrate the Newton's law of universal gravitation and laws of motion as well. However, accuracy, intra- and inter- force platform measures' consistency, reliability, noise, and the effect of platform mounting to GRF measures were not clearly viewed. The aim of this study was to examine the above. GRFs of a plastic dummy and two subjects' quiet upright standing were collected at four university laboratories eight force platforms. The types of platforms, analysis programs, and platform set-up were various. Three 100s-trials were conducted with sampling frequency of 100 Hz. First two trials' vertical component of GRFs, Fz, and CoP sway ranges of mid-60s-portion of 100s trials were analyzed by the paired *t*-tests and *one-way ANOVA*. Six of eight platforms' 1st and 2nd trial dummy Fz were statistically different ($p<.05$) and all platforms ICC were poor (<.28). Fz of the two platforms in every four laboratories were statistically different ($p<.05$). There were white noises and/or very distinctive noises at specific frequency ranges in all Fz measures. 5 Hz low-pass filtering made clear the Fz differences. CoP ranges of dummy were less than 0.5 cm and the best was 0.02 cm. This CoP range finding agrees with previous results suggests the importance of force platform mounting and A/D card resolution.

KEYWORDS: GRF, ACCURACY, CONSISTENCY, TEST-RETEST RELIABILITY, FILTERING

이 논문은 2006년도 부산대학교 박사후연수과정지원사업에 의하여 연구 되었음.
* yhpark10@pusan.ac.kr

Ⅰ. 서 론

컴퓨터와 정밀측정 장비의 발달은 인체 움직임과 스포츠동작에 대한 이해를 증진시켜 지도자들의 전문지식을 향상 시키고 선수들의 최고기능 발휘와 일반인들의 스포츠 기능습득 지도에 도움을 주고 있으며(Hume, Koegh, & Reid, 2005), 영상분석, 지면반력, 근전도, 압력분포 측정 장비 등이 이에 해당한다(Cappozzo, Croce, Leardini, & Chiari, 2005).

지면반력은 점프를 하거나 인체의 공간이동에 필요한 추진력 발생을 위한 필수요건 일 뿐 아니라 중력하에서 인체움직임에 대단히 큰 역할을 한다. 인체가 발휘하는 힘은 영상분석의 역동역학(inverse dynamics)을 통하여 계산으로 산출할 수 있다. 그러나 지면반력 장비는 인체가 발휘하는 힘과 중력의 영향을 직접 측정할 수 있는 장비일 뿐 아니라 뉴턴의 만유인력법칙과 운동법칙을 설명하고 교육할 때 사용할 수 있는 대단히 유용한 장비이다(Parker, 2001).

지면반력 장비는 Marey(1873)가 처음으로 원시적인 힘판(force plate)을 제작하여 사용한 이래 센서, 분석알고리즘, 컴퓨터 발달에 힘입어 현재는 패키지화한 제품이 다양하게 판매되고 있으며 사용이 간편하므로 이를 이용한 연구가 활발하다. 삐에조(piezo) 센서를 사용하는 일부지면반력 장비는 심장박동을 감지할 정도로 정교하다(Onell, 2000). 그러나 장비사용과 데이터 획득이 용이할수록 데이터 활용과 분석에 오류 가능성이 높아 주의가 요망된다(Korad, 2005). 또, 측정정비가 정밀할수록 측정된 신호(signal) 속에 포함된 노이즈(noise)의 영향이 크지만 현재 기술과 측정 장비로는 노이즈 없는 신호를 측정하는 것은 불가능하다(Stergiou, 2004). 노이즈 수준은 연구 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 노이즈를 적절히 처리해야하지만 운동역학 연구 시 사용되는 생체신호는 측정에 의한 노이즈뿐 아니라 유기체인 인체의 본질적인 가변성(variability) 때문에 신호와 노이즈의 구분이 어려울 뿐 아니라 고전역학을 이용한 운동역학 연구에서는 가변성 자체가 노이즈로 간주되어왔다(Stergoiu, 2004).

지면반력 압력중심점(CoP)을 이용한 정적직립(quiet upright standing) 균형연구에서 데이터 필터링에 관한 찬반 의견이 제시되고 있으나(England, & Granata, 2006; Harbourne, & Stergoiu, 2003), 필터링을 하는 경우에는 차단주파수 5 Hz를 적용한 저역통과 필터를 많이 사용하고 있다(Doyle, Hsiao-Wecksler, Ragan, & Rosengren, 2006; Ferdjallah, Harris, & Wertsch, 1999; Prieto, Myklebust, Hoffmann, Lovett, & Myklebust, 1996; Yamada, 1995).

연구목적이 기존의 운동현상 분석과 달리 동작의 일관성(consistency), 가변성(variability), 주기성(periodicity), 혹은 복잡성(complexity) 등으로 바뀐다면 실험으로 획득한 생체역학 데이터의 정밀도는 연구결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이 현상은 속도나 가속도 등과 같이 원데이터를 미분할 경우 더 큰 문제를 야기할 수 있다. 따라서 인체 움직임의 정밀한 분석과 이에 대한 명확한 이해를 위해서는 사용하는 장비의 정밀성, 신뢰도, 노이즈 영향 등에 대한 분석이 필요하다.

이 연구는 지면반력 측정 장비의 정밀도, 검사-재검사(test-retest) 신뢰도, 타 힘판 간 비교, 노이즈 및 필터링 효과, 장비설치방법 등이 지면반력 측정값에 미치는 영향을 분석하여 지면반력 장비의 특징을 이해하고 이의 활용을 극대화할 뿐 아니라 또 다른 활용방안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

Ⅱ. 연구방법

이 연구는 두 개 이상 힘판이 설치된 국내 대학실험실 4곳에서 중량 약 370 N의 플라스틱 더미(dummy)와 성인남자 2명(약 720 N, 171 cm, 1명, 약 870 N, 180 cm, 1명)을 대상으로 하였다. 실험은 각 대학 실험실 장비운용자가 해당 실험실에서 지면반력 측정 시 실시하는 절차에 따라 지면반력 장비를 가동시킨 후, 전자적 드리프트(drift)를 최소화하기 위하여 45분 이상 예열한 다음(Bertec, 2006; Lafond, Duarte, & Prince, 2004) 샘플링 주파수 100 Hz(Collins, & De Luca, 1993; Doyle, Newton, & Burnett, 2005; Doyle, Hsiao-Wecksler, Ragan, & Rosengren, 2006; Nolan, & Kerrigan, 2004;

표 1. 각 실험실별 지면반력장비 설치현황

	설치 장소	plate	설치방법	A/D card	S/W
lab A	2층 이상	A+A	매설	16 bit	Vicon
lab B	1층	A+A	매설	16 bit	KwonGRF
lab C	2층 이상	A+A	거치	12 bit	KwonGRF
lab D	2층 이상	B+K	거치	12 bit	KwonGRF

A: AMTI, B: Bertec, K: Kistler

Prieto, Myklebust, Hoffmann, Lovett, & Myklebust, 1996), 측정시간 100초로 실험을 진행하였다.

먼저 더미를 각 힘판의 가운데 부분에 올린 상태에서 각 힘판에서 3회씩 총 6회에 걸쳐 데이터를 수집하였다. 그 다음 신발을 벗은 피험자가 힘판 위에 올라가 두 발은 편히 벌리고 두 손은 자연스럽게 인체측면에 둔 자세로 시선은 전방에 두고 가능한 움직임이 없는 상태에서 각 힘판에서 3회씩 총 6회에 걸쳐 측정하였다.

실험 진행 중 지면반력 값에 영향을 미칠 수 있는 환경을 의도적으로 만들지는 않았지만 지나치게 주위 환경을 통제하지도 않고 통상적인 지면반력 실험과 유사하게 진행하였다. 실험은 실험실 위치관계로 3일에 걸쳐 수행하였으며 실험실 A, B는 같은 날, 실험실 C는 다음날, 실험실 D는 3일째 되는 날 측정하였다.

각 실험실 별 장비설치현황 및 기계적 특이사항은 <표 1>과 같다.

분석은 각 힘판에서 획득한 더미와 피험자의 지면반력 데이터 각 3세트 중 첫 2세트를 대상으로 하였다. 먼저 각 힘판 별 Fz와 CoP 좌표를 엑셀파일로 변환 후 데이터 안정을 위하여 앞부분 20초를 트림하고 뒷부분 80초를 대상으로 분석을 진행하였다. 필터링에 의한 데이터 왜곡을 최소화하고 필터링 전·후 동일한 순간 데이터 비교를 위하여 실제 분석은 다시 80초 분량의 데이터 앞뒤 각 10초 부분을 잘라낸 중간부분 60초 데이터 6,000개(=100 Hz x 60 s)를 대상으로 하였다.

좌우방향 압력중심점(CoPx) 이동범위와 전후방향 압력중심점(CoPy) 이동범위는 6,000개 데이터를 대상으로 산출하였다. 그러나 Fz는 순간 값 비교의 효용성 검토, 검사-재검사 신뢰도 분석, 필터링 전·후 동일 순간 데이터 비교를 위하여 다시 1초 간격으로 데이터 61개를 추출하여 분석하였다.

범용 수치해석 프로그램 Complexity(Laxtha, 대전광역시)를 이용하여 주파수 분석과 데이터 필터링을 수행하였으며 필터는 차단주파수 5 Hz, FFT(fast Fourier transformation) 저역통과필터를 사용하였다.

SPSS 12.0 통계프로그램의 paired *t*-test을 이용하여 각 힘판의 1, 2회 Fz 비교, 힘판 간 Fz 비교, 필터링 전·후 Fz를 비교하였으며, one-way ANOVA를 이용하여 모든 실험실 힘판 간 Fz를 비교하였다. 통계적 유의수준은 *.05*로 설정하였으며 각 힘판의 1, 2회 Fz의 검사-재검사 신뢰도는 ICC (intraclass correlation coefficient)로 평가하고 판단기준은 Shrout, & Fleiss(1979)에 따라 *<.40* poor, *.40~.75* fair-to-good, *>.75* excellent로 하였다.

Ⅲ. 결과 및 논의

1. Fz 분석

더미와 피험자 1, 2에 대한 각 실험실의 힘판 별 Fz, 95% SEF(spectral edge frequency) 및 5 Hz 저역 필터링 전·후 Fz 비교결과는 <표 2>와 같다.

더미를 대상으로 동일 힘판에서 2회에 걸쳐 측정한 Fz는 실험실 A의 1번 힘판(P1), 실험실 B의 P3 힘판을 제외한 나머지 6개 힘판에서 모두 통계적으로 차이가 있는 것($p<.05$)으로 나타났으며, 모든 실험실의 두 힘판 간에도 통계적으로 차이가 있는 것($p<.01$)으로 나타났다. 각 힘판의 1, 2회 Fz의 ICC는 전 실험실 모든 힘판에서 *.28* 이하로 검사-재검사 신뢰도는 낮은 것(poor)으로 나타났다.

인체를 대상으로 한 실험에서 피험자 1(S1)의 경우 P1, P7 힘판에서만, S2의 경우 P1, P2, P7, P8 힘판에서만 1, 2회 Fz 간에 차이가 없는 것으로 나타났으나, 각 실험실의 두 힘판 간에는 모두 통계적으로 차이가 있는 것($p<.05$)으로 나타났다. 인체 Fz의 ICC는 S1은 P5 힘판, S2는 P4 힘판에서만 *.40* 이상인 것으로 나타났다.

이론적으로 더미는 움직임이 없으므로 동일한 힘판의 1, 2회 Fz 간에는 차이가 없어야하며, 같은 실험실

표 2. 각 실험실 각 힘판 별 Fz, SEF 95% 주파수, 및 필터전후 값 비교 (n=61)

subject	lab	plate	raw Fz(N)			SEF 95%(Hz)			filtered Fz(N)				raw-filtered *t*-value	
			T1	T2	*t*-value	ICC	T1	T2	T1	T2	*t*-value	ICC	T1	T2
DM	A	P1	373±0.6	373±0.5	.30	.129	47.07	47.78	373±0.2	373±0.2	-1.44	.531	5.04***	5.32***
		P2	369±0.5	370±0.6	-5.68***	.280	47.46	47.61	369±0.2	369±0.2	-13.28***	.217	3.79***	4.77***
		t-value	36.72***	39.22***	-	-	-	-	150.55***	112.15***	-	-	-	-
	B	P3	369±0.4	369±0.5	.621	-.676	44.07	46.90	368±0.2	368±0.2	-2.59*	.686	12.09***	6.21***
		P4	370±0.4	370±0.3	3.23**	-.045	47.44	47.68	370±0.2	370±0.2	6.81***	.744	7.90***	9.13***
		t-value	-21.02***	-18.24***	-		-	-	-79.76***	-57.11***	-	-	-	-
	C	P5	366±1.0	366±0.0	-2.50*	.003	48.32	47.39	365±0.4	366±0.4	-3.08**	.247	3.74***	15.72***
		P6	369±1.7	365±2.5	10.21***	.010	47.78	47.34	369±0.5	365±0.8	36.43***	.240	1.21	1.56
		t-value	-12.39***	3.11**	-	-	-	-	-45.74***	7.61***	-	-	-	-
	D	P7	368±2.1	366±2.6	4.15***	.193	46.97	47.56	367±0.8	365±0.6	13.20***	.123	2.68**	1.88
		P8	372±1.4	371±1.9	3.48***	-.503	44.53	45.12	372±0.4	371±0.4	15.80***	.067	1.39	.60
		t-value	-12.81***	-11.06***	-	-	-	-	-40.62***	-61.66***	-	-	-	-
	F-value		229.56***	214.57***	-	-	-	-	2061.02***	2910.82***	-	-	-	
	Duncan		P3<P4<P2 <P7,P5<P6 <P8<P1	P7<P4,P3< P2<P5,P6< P8<P1	-	-	-	-	P3<P4<P2< P7,P5<P6<P 8<P1	P7<P4<P3< P2<P5<P6< P8<P1	-	-	-	-
S1	A	P1	724±0.9	725±0.9	-.69	-.650	41.97	41.72	724±0.5	724±0.4	-.10	.026	5.92***	6.23***
		P2	716±0.8	717±0.9	-6.19***	.292	42.11	42.50	716±0.5	716±0.4	-8.66***	.282	6.34***	8.26***
		t-value	58.80***	45.33***	-	-	-	-	137.72***	128.53***	-	-	-	-
	B	P3	718±0.7	717±0.7	5.48***	-.012	40.01	40.01	717±0.4	716±0.4	15.13***	.649	8.74***	9.67***
		P4	719±0.8	719±0.6	4.65***	.108	40.04	40.01	718±0.4	718±0.4	7.13***	.601	10.51***	8.10***
		t-value	-12.54***	-14.72***	-	-	-	-	-31.17***	-37.31***	-	-	-	-
	C	P5	722±1.5	721±1.4	5.01***	.572	46.83	47.29	722±0.5	721±0.5	13.70***	.382	3.40***	4.35***
		P6	723±1.2	722±1.0	2.88**	-.089	47.22	47.29	722±0.5	721±0.4	9.80***	.090	4.19***	6.89***
		t-value	-2.52*	-6.01***	-	-	-	-	-7.80***	-11.92***	-	-	-	-
	D	P7	711±2.3	710±2.1	.56	-.042	47.02	45.31	710±0.7	709±0.7	6.13***	.392	3.79***	6.59***
		P8	718±1.7	719±1.7	-4.15***	.356	43.19	47.29	718±0.8	718±0.6	-5.74***	.417	2.68**	4.71***
		t-value	-19.67***	-26.37***	-	-	-	-	-57.77***	-82.50***	-	-	-	-
S2	A	P1	882±0.7	882±0.8	.41	-.207	44.21	44.53	881±0.5	881±0.5	-.94	.790	10.28***	8.32***
		P2	871±0.7	871±0.7	-.20	.092	44.73	44.95	870±0.4	870±0.4	-1.69	.336	11.92***	11.84***
		t-value	97.00***	83.39***	-	-	-	-	186.08***	189.43***	-	-	-	-
	B	P3	874±0.6	873±0.6	5.31***	.296	39.99	39.97	873±0.4	872±0.4	13.91***	.565	9.32***	13.41***
		P4	875±0.6	875±0.6	2.07*	.549	40.01	39.99	874±0.6	874±0.5	6.04***	.799	10.06***	14.33***
		t-value	-16.27***	-23.14***	-	-	-	-	-29.46***	-37.50***	-	-	-	-
	C	P5	864±1.0	864±0.7	2.73**	-.018	47.31	46.95	863±0.5	863±0.5	11.29***	.595	5.89***	11.22***
		P6	863±1.2	862±1.4	7.73***	.052	47.56	47.61	863±0.4	861±0.7	20.59***	.439	4.61***	4.69***
		t-value	3.34***	10.52***	-	-	-	-	10.39***	18.75***	-	-	-	-
	D	P7	871±1.9	871±2.0	-.27	-.224	45.07	47.02	870±0.8	869±0.7	2.88**	.258	3.71***	5.79***
		P8	879±1.9	880±1.6	-1.66	.164	46.07	42.82	879±0.6	879±0.8	-2.34*	-.337	2.75**	4.09***
		t-value	-24.72***	-25.70***	-	-	-	-	-81.33***	-66.89***	-	-	-	-

DM: dummy, S1: subject 1, P1: plate 1, T1: trial 1, SEF: spectral edge frequency

내 두 힘판의 Fz 간에도 차이가 없어야할 것이다. 그러나 <표 2>처럼 더미를 대상으로 한 경우에도 동일 힘판의 1, 2회 Fz 간에 차이가 있을 뿐 아니라 동일 실험실 내 두 힘판 간에도 차이가 있는 것으로 나타났다.

만약 더미의 1, 2회 Fz는 차이가 없고 인체의 1, 2회 Fz는 차이가 있다면 이 차이를 균형을 유지하려는 인체동작의 특징 때문이라고 해석할 수도 있을 것이다. 그러나 검사-재검사 신뢰도를 나타내는 ICC 또한 더미는 모든 힘판에서 *.28* 이하로 신뢰도가 낮으며, 인체에서는 피험자와 힘판에 따라 큰 차이가 있어 S1 *.57*(P5), S2 *.55*(P4)를 제외하고는 모두 *.40* 이하로 신뢰도가 낮을 뿐 아니라 전체적인 경향이 나타나지 않았다.

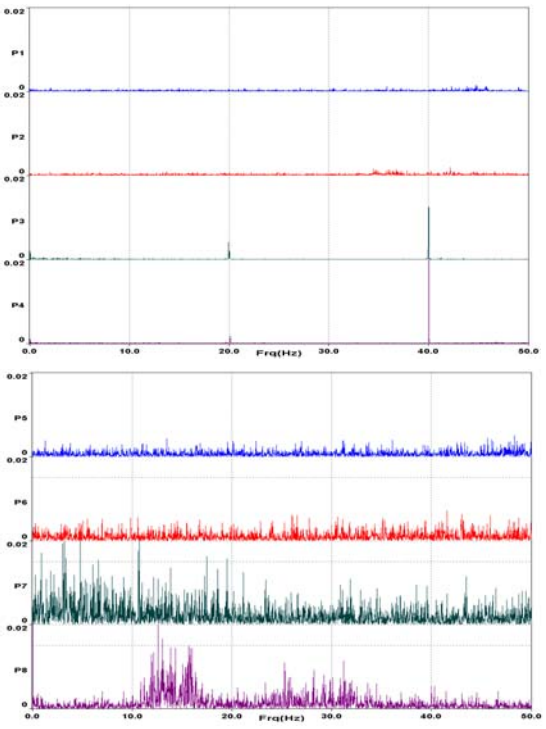
Fz 신호 파워(power)의 95%를 차지하는 SEF 95% 주파수는 <표 2>와 같이 더미 44.07 Hz 이상, S1 40.01 Hz 이상, S2 39.97 Hz 이상으로 나타났다. 이론적으로 더미는 움직임이 없으므로 SEF 95% 주파수는 0 Hz 이어야하며 건강한 성인의 정적직립 시 Fz의 SEF 95% 주파수는 2 Hz 미만(Winter, 1995)으로 이 연구와 큰 차이가 있으며 이는 신호 속에 노이즈가 있음을 의미한다. 퓨리에변환(fasr Fourier transform)을 이용하여 더미의 시계열(time domain) Fz 데이터를 주파수계열(frequency domain)로 변경한 결과는 <그림 1>과 같다.

<그림 1>의 위 부분은 P1~P4 힘판으로 A 실험실의 P1, P2 힘판에는 전 주파수영역에 걸쳐 미세한 화이트(white) 노이즈가 깔려있으며 35~45 Hz 대역에서 노이즈가 조금 더 큰 것으로 나타났다. 반면 B 실험실의 P3, P4 힘판에는 화이트 노이즈는 식별하기 곤란한 수준이지만 20 Hz, 40 Hz 대역에 뚜렷한 노이즈가 있음을 보여주고 있다. 아래 그림은 P5~P8 힘판으로 실험실 C의 P5, P6 힘판에는 현저한 화이트 노이즈가 깔려있으며 실험실 D의 P7, P8 힘판에는 전 주파수 영역에 걸쳐 심한 노이즈가 깔려있음을 나타내고 있다. 따라서 P1, P2 힘판에는 연구목적에 따라 필터적용 여부를 고려할 수도 있겠지만 나머지 6개 힘판의 Fz는 노이즈 원인을 처치해야하며 필요시 필터를 적용하여 데이터 속의 노이즈를 인위적으로 제거해야 할 것이다.

차단주파수 5 Hz(Doyle, Hsiao-Wecksler, Ragan, & Rosengren, 2006; Ferdjallah, Harris, & Wertsch, 1999; Prieto, Myklebust, Hoffmann, Lovett, & Myklebust, 1996; Yamada, 1995)로 Fz를 FFT 저역 필터링한 결과는 <표 2>의 'filtered Fz'와 같다.

필터링 후 각 힘판의 1, 2회 Fz 간에는 필터링 전보다 그 차이가 더 명확해 졌으나(P3, P7, P8) 검사-재검사 신뢰도는 향상되었으며, 특히 실험실 A, B의 ICC 향상이 현저하다. 이 두 실험실은 <표 1>에서 보는 것처럼 힘판을 콘크리트 바닥에 매설하여 사용하고 있으며 16 bit A/D 카드를 사용하고 있다. 따라서 힘판 설치방법과 A/D 카드 분해능(resolution)이 지면반력 측정에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

필터링하지 않은 Fz를 기준으로 지면반력 측정결과를 종합해보면 동일 힘판의 1, 2회 Fz는 실험실 별, 힘판 별로 대상에 따라 차이는 있지만 전체적으로 67%(24회 중 16회)의 경우 통계적으로 차이가 있는 것으로 나



<그림 1> 더미 Fz의 각 힘판 별 주파수 분석결과.
위 그림은 P1~P4 힘판으로 A 실험실의 P1, P2 힘판에는 전 주파수영역에 걸쳐 미세한 화이트(white) 노이즈, B 실험실의 P3, P4 힘판에는 20 Hz, 40 Hz 대역에 뚜렷한 노이즈가 있음을 보여주고 있다. 아래 그림은 P5~P8 힘판으로 실험실 C의 P5, P6 힘판에는 현저한 화이트 노이즈, 실험실 D의 P7, P8 힘판에는 전 주파수 영역에 걸쳐 심한 노이즈가 깔려있음을 나타낸다.

타났으며, 움직임이 없는 더미의 Fz 검사-재검사 신뢰도도 낮은 것으로 나타났다. 그러나 Fz 크기 차이는 더미, 인체 모두 1~2 N에 불과하다. 이는 Fz의 표준편차가 작기 때문에 발생하는 통계적인 현상으로 역으로 지면반력 장비의 정밀성을 의미한다. 이는 운동역학연구에서 어떤 순간의 지면반력 값을 통계적으로 비교하는 것에 대한 검토 필요성으로 해석할 수도 있을 것이다.

노이즈 측면에서 보면 연구대상 4 실험실의 모든 힘판 Fz에는 차이는 있지만 노이즈가 포함되어 있으며, 노이즈는 실험실 상황에 따라 화이트 노이즈와 특정 주파수 대역의 노이즈로 뚜렷이 구분되었다. 필터링 전·후 Fz 비교 시 더미는 실험실, 힘판에 따라 차이가 없는 경우도 있었으나(P6, P7, P8), 인체 Fz는 모든 힘판에서 차이가 있는 것으로 나타나 필터링효과 혹은 필터링 필요성에 의문을 제기할 수 있을 것이다. 그러나 주파수 분석 결과와 필터링 후 ICC 향상은 필터링 필요성을 나타낸다.

실험실 D의 두 힘판은 센서종류와 메이커가 서로 다르므로 두 힘판의 Fz 간에는 차이가 발생할 수도 있을 수 있겠지만 실험실 A, B, C의 두 힘판은 모두 스트레인게인지(strain gauge)를 사용하는 동일 회사제품이다. 특히 실험실 B, C의 두 힘판들은 동일 모델이지만 두 힘판의 Fz가 통계적으로 차이가 나는 것은 지면반력 장비의 설치 혹은 사용상의 한계점인지 모르며 이에 관해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

2. 압력중심점(CoP) 분석

각 실험실 힘판 별 더미와 정적직립 시 인체의 CoP 이동범위는 <표 3>과 같다. <표 3>은 데이터 안정과 필터링 전·후 비교를 위하여 전체 100초 데이터 중 앞 30초, 뒤 10초를 트림한 중간 부분 60초 데이터 6,000개(=100 Hz x 60 s)를 대상으로 산출한 결과이다.

더미는 움직임이 없으므로 이론적으로는 CoP 변화가 없어야하지만 노이즈가 심한 실험실 D를 제외하고 모두 0.5 cm 미만의 미세한 변화가 있는 것으로 나타났으며, 전후(CoPy), 좌우(CoPx) 방향간에는 크기 차이를 식별하기 곤란한 수준이었다.

인체 CoP 범위는 개인의 정적균형 제어능력에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 참고로 측정하였으나 연구대상 실험실 모든 힘판에서 피험자 간, CoPx, CoPy 간 일정한 경향을 나타내었다. 즉, 모든 힘판에서 S1의 CoP 이동범위가 S2 이동범위 보다 적으며 S1, S2 모두 인체전후방향 (CoPy) 이동범위가 좌우방향(CoPx) 이동범위보다 크게 나타났다. 이는 정적균형 제어시 발목제어전략(ankle strategy)에 따라 전후방향 이동범위가 좌우방향 이동범위보다 커다는 선행연구 결과와 일치하며 이동범위크기는 선행연구 0.78 cm, 1.35 cm(Doyle, Newton, & Burnett, 2005)와 유사하거나, 2.63 cm, 3.31 cm(Doyle, Dugan, Humphries, & Newton, 2004) 보다 더 작은 것으로 나타났다.

CoP의 주파수 분석 결과 더미 CoP의 SEF 95% 주파수는 모든 힘판에서 43 Hz 이상으로 나타나 Fz와 같이 화이트 노이즈 혹은 특정 주파수대역 노이즈가 포함된 것을 확

표 3. 압력중심점 이동 범위 (n=6,000)

sub	lab	plate	CoP range(cm)		SEF 95%(Hz)		filtered CoP range(cm)	
			CoPx	CoPy	CoPx	CoPy	CoPx	CoPy
DM	A	P1	0.27	0.30	47.61	47.71	0.18	0.13
		P2	0.16	0.19	47.34	47.02	0.26	0.36
	B	P3	0.08	0.07	43.14	42.58	0.04	0.04
		P4	0.06	0.06	45.75	46.09	0.02	0.02
	C	P5	0.35	0.40	48.00	47.66	0.18	0.09
		P6	0.19	0.19	47.97	47.80	0.15	0.05
	D	P7	0.60	1.07	46.61	46.63	0.37	0.58
		P8	0.47	0.74	48.80	48.39	0.11	0.15
S1	A	P1	0.57	1.72	0.59	0.46	0.60	1.68
		P2	1.02	2.01	0.83	1.17	1.12	2.11
	B	P3	0.89	1.81	0.48	0.73	0.87	1.80
		P4	0.80	1.64	0.59	0.51	0.79	1.64
	C	P5	0.94	1.71	0.49	0.85	0.87	1.65
		P6	0.91	1.37	2.08	1.34	0.86	1.24
	D	P7	0.97	1.31	24.07	35.08	0.81	0.97
		P8	0.94	1.46	2.10	15.63	0.83	1.22
S2	A	P1	1.46	2.96	0.85	1.03	1.48	2.98
		P2	1.76	2.28	0.68	0.76	1.84	2.37
	B	P3	2.21	2.83	1.05	0.59	2.20	2.82
		P4	2.18	2.48	1.17	1.03	2.17	2.48
	C	P5	1.47	2.86	0.93	0.81	1.47	2.83
		P6	1.53	2.02	1.03	0.63	1.50	1.96
	D	P7	1.75	2.04	2.78	0.90	1.67	1.75
		P8	1.77	2.82	1.05	0.68	1.64	2.66

DM: dummy, S1: subject 1, P1: plate 1, T1: trial 1
SEF: spectral edge frequency

인 할 수 있었으나 인체 CoP의 SEF 95% 주파수는 실험실 D를 제외하고 모두 3 Hz 이하로 나타나 더미와 큰 차이를 보이고 있다. 이 현상은 Fz의 SEF 95% 주파수가 더미, 인체 모두 40 Hz 이상인 것과 대조적이다.

CoP는 식(1), (2), (3)으로 산출되고, 각 식 속의 x, y 축 모멘트(moment) Mx, My는 각 센서의 힘 F와 센서로부터 거리 d의 함수이므로, CoP의 SEF 95% 주파수는 Fz의 SEF 95% 주파수와 유사하게 나타나야 하지만 인체 CoP의 SEF 95% 주파수는 이와 큰 차이를 보이고 있어 이에 관한 추가 연구가 요구된다.

$$CoPx = (-tFx - My)/Fz \quad \text{---------- (1)}$$
$$CoPy = (-tFy + Mx)/Fz \quad \text{---------- (2)}$$
$$Mx, y = f(F, d) \quad \text{---------- (3)}$$

필터링 후 더미의 CoP 범위는 0.58 cm 이하로 나타났으며 특히 힘판을 1층에 매설하고 16 bit A/D 카드를 사용하는 실험실 B의 두 힘판 CoP 범위는 각각 0.02 cm, 0.04 cm로 CoP 정밀도를 확인한 선행논문의 0.06 cm, 0.59 cm(Doyle, Newton, & Burnett, 2005), 0.05 cm(Collins, & De Luca, 1993), 0.02 cm(Lafond, Corriveau, Hebert, & Prince, 2004; Corriveau, Hebert, Prince, & Raiche, 2001)와 동등 이상으로 정밀한 것으로 나타났다.

Ⅳ. 결론 및 제언

두 개 이상 힘판이 설치된 국내대학 4 실험실에서 움직임이 없는 플라스틱 더미와 정적직립 자세를 취하는 인체의 지면반력 수직성분(Fz)과 압력중심점(CoP) 이동범위를 측정·분석 후 얻은 결론 및 제언은 다음과 같다.

1. 동일 힘판의 1, 2회 Fz는 67% 힘판에서 통계적으로 차이가 있을 뿐 아니라 검사-재검사 신뢰도가 낮은 것으로 나타났다(최고 .57). 그러나 Fz 크기 차이는 1~2 N에 불과하므로 운동역학 연구에서 어떤 이벤트 순간 Fz를 통계적으로 비교하는 것에 대해서는 재검토가 요구된다.

2. 연구대상 실험실 모든 힘판의 Fz에는 화이트 노이즈 혹은 특정주파수 대역의 노이즈가 포함되어 있으며, 5 Hz 저역 필터링 후에도 1, 2회 Fz는 83% 힘판에서 통계적으로 차이가 있는 것으로 나타났다.

3. 필터링 전·후 Fz 비교 시 더미 Fz는 통계적으로 차이가 없는 경우도 있으나 인체 Fz는 모든 힘판에서 차이가 있는 것으로 나타났다.

4. 동일 실험실 내 두 힘판의 Fz는 연구대상 실험실 모든 힘판에서 통계적으로 차이가 있는 것으로 나타나 이에 대한 추가 연구가 요구될 뿐 아니라, 인체가 두 힘판을 동시에 접촉한 상태에서 체중분포나 체중이동을 연구하는 경우 주의가 요구된다.

5. 더미 CoP 이동범위는 1.07 cm 이하로 나타났으나 힘판 설치방법과 A/D 카드 분해능에 따라 CoP 이동범위를 0.1 cm 이하로 제어 가능한 것으로 나타났다.

6. 힘판을 지면에 고정하고 분해능이 높은 16 bit A/D 카드를 사용하는 두 실험실의 Fz, CoP에 화이트 노이즈가 적으며 데이터가 전반적으로 안정된 것으로 나타나 힘판 설치방법과 A/D 카드 성능이 지면반력 정밀도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

Bertec (2006). *Force Plate Manual*. Columbus, OH: Bertec Corporation.

Cappozzo, A., Croce, U. D., Leardini, A., & Chiari, L. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry part 1: theoretical background. *Gait and Posture,* 21. 186-196.

Collins, J. J., & De Luca, C. J. (1993). Open-loop and closed-lop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Experimental Brain Research*, 95. 308-318.

Corriveau, H., Hebert, R., Prince, F., & Raiche, M. (2001). Postural control in the elderly: an analysis of test-retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Arch Phys Med*

Rehabil, 82. 80-85.

Doyle, T. L., Dugan, E., Humphries, B., & Newton, R. U. (2004). Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of center of pressure. *Int. J. Med. Sci.* 1. 11-20.

Doyle, T. L., Newton, R. U., & Burnett, A. F. (2005). Reliability of traditional and fractal dimension measures of quiet stance center of pressure in young, healthy people. *Arch Phys Med Rehabil,* 86. 2034-2040.

Doyle, R. J., Hsiao-Wecksler, E. T., Ragan, B. G., & Rosengren, K. S. (2006). Generalizability of center of pressure measures of quiet standing. *Gait and Posture,* In Press.

England, S. A., & Granata, K. P. (2006). The influence of gait speed on local dynamic stability of walking. *Gait and Posture*, In press.

Ferdjallah, M., Harris, G. F., & Wertsch, J. J. (1999). Instantaneous postural stability characterization using time-frequency analysis. *Gait and Posture*, 10. 129-134.

Harbourne, R. T., & Stergoiu, N. (2003). Nonlinear analysis of the development of sitting postural control. *Dev Psychobiol*, 42. 368-377.

Hume, P. A., Keogh, J., & Reid, D. (2005). The role of biomechanics in maximising distance and accuracy of golf shots. *Sports Medicine, 35(5).* 429-449.

Korad, P. (2005). *Kinesiological EMG.* Phoenix, AZ; Noraxon

Lafond, D., Corriveau, H., Hebert, R., & Prince, F. (2004). Intrasession reliability of center of pressure measures of postural steadiness in health elderly people. *Arch Phys Med Rehabil,* 85. 896-901.

Lafond, D., Duarte, M., & Prince, F. (2004). Comparison of three methods to estimate the center of mass during balance assessment. *Journal of Biomechanics*, 37. 1421-1426.

Marey, M. (1873). De la locomotion terrestre chez les bipedes et les quadrupedes. *Journal de l'Anat. et de la physiology, 9.* 42.

Nolan, L., & Kerrigan, D. C. (2004). Postural control: toe-standing versus heel-toe standing. *Gait and Posture*, 19. 11-15.

Onell, A. (2000). The vertical ground reaction force for analysis of balance? *Gait and Posture,* 12. 7-13.

Parker, K. (2001). Use of force platforms in physics and sports. *Physics Education,* 11, 18-22.

Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering,* 43(9). 956-966.

Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychology Bulletin*, 86. 420-428.

Stergiou, N. (2004). *Innovative analysis of human movement.* Champaign, IL; Human Kinetics.

Winter, D. A. (1995). *A.B.C. of balance during standing and walking.* Waterloo, Ontario: Waterloo Biomechanics.

Yamada, N. (1995). Chaotic swaying of the upright posture. *Human Movement Science,* 14. 711-726.

투 고 일 : 1월 26일
심 사 일 : 2월 6일
심사완료일 : 3월 7일