

발레 피루엣(Ballet pirouette) 앙 디올 (En dehors) 동작의 운동학적 순서 유형에 관한 연구*

김제민** 뉴멕시코 주립대학교·김광진*** 세종대학교

본 연구의 목적은 정확한 발레 동작의 이해를 돕기 위하여 과학적 분석에 필요한 자료를 제공하고, 운동 역학적 분석을 통한 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 회전 동작의 운동학적 순서를 살펴보고자 한다. 서울 소재 S대학 발레 전공 여자 대학생을 대상으로 14명의 실험자가 3차원 적외선 동작 분석 카메라(Qualisys: 250Hz) 지면반력기(Kisler-9286AA: 2500Hz) 데이터를 통해 각 분절 중심 및 세부분절의 각속도와 질량 중심을 계산하고 분석하였다. 자료분석에는 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences version 25.0)를 사용하여, One-way ANOVA를 실시하였으며, 유의수준을 $\alpha=0.05$ 로 설정 하였다. 연구 결과에 따라 각 분절 중심별 운동학적 순서는 오른팔의 각속도가 시작되며 이후 왼팔, 골반, 오른 다리(지지다리), 머리/몸통 그리고 왼다리(동작다리) 순으로 각 분절별 각속도가 발생된다. 세부 분절별 검사에 따른 결과, 오른팔(상완, 하완, 오른손)과 상체분절(머리, 몸통, 골반)의 세부 분절 사이의 각속도에서 유의미한 차이가 나타났다. 회전이 시작 된 이후 오른팔 분절의 경우 상완의 각속도가 오른손과 하완 보다 크게 발생 하는 것으로 나타났다. 질량 중심에서 가까워질수록 혹은 관절 질량의 크기에 따라 관성의 작은 영향으로 빠른 각속도가 나타났다. 그러나 왼팔의 경우 오른팔에 비해 늦게 각속도가 발생하지만 첫 회전이 구현된 이후부터 왼팔의 각속도가 오른팔 보다 크게 발생 하는 것으로 나타났다. 이는 각속도량을 기준으로 회전력을 발생 시키는데 오른팔보다 왼팔의 비중이 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 운동학적 순서 분석 결과를 통해 그림이나 비디오에 한정되고 혹은 구두로만 전해져 오는 교육 방식에 있던 발레 동작을 보다 일반적인 데이터로 구분하여 정형화된 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 동작을 이해하는 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 피루엣, 질량 중심, 각속도, 운동학적 순서, 분절

I. 서론

무용에서 몸의 움직임은 표현하고자 하는 부분을 음악과 함께 대중에게 전달하는 독특한 예술의 한 분야이다(Warren, 1989). 무용에서 동작은 무용수들의 강인한 체력과 유연성 그리고 표현력이 뒷받침 되어져야 하며(서차영, 1992), 특히 모든 무용장르에는 회전 동작을 포함하고 있다. 또한 회전 동작은 분야별로 독특한 기술과 스타일로 이루어지며 무용 공연 극 자체에 역동적이고 화려한 움직임을 나타내는 대표적인 동작이다(Warren, 1989). 클래식 발레에서 피루엣 앙 디올 (pirouette en dehors) 동작은 무용수의 균형(축을 이루는 지지다리)과 함께 수직 축을 통해 몸 전체가 동시에 바닥에서 돌아가는 무용수의 아름다운 동작 중 하나이다(Herstens, 1989). 이러한 피루엣(pirouette)은 크게 두 가지 방향으로 나뉘어져 동작되는데, 오른쪽 분절의 움직임의 경우 동작이 되는 오른쪽

* 이 연구는 텍사스 여자대학교 박사학위논문(2018년 8월) 중 일부를 발췌하여 수정 보완함

** 뉴멕시코 주립대학교 운동과학과 조교수

*** 세종대학교 무용학과 박사, Email: kkballet@naver.com, 교신저자

다리(gesture leg), 지지다리가 되는 왼쪽다리(support leg)를 기준으로 바깥쪽 회전의 경우 앙 디올(en dehors), 안쪽 회전의 경우 앙 드당(en dedans) 라고 불려진다(Kim, Wilson, Singhal, Gambelin, Suh, & Kwon, 2014).

일반적으로 발레 회전 동작은 무용수의 발 포지션에 따라 바뀌기도 하는데, 4번 발 포지션 또는 5번 발 포지션으로 동작되는 것이 일반적이며, 안무가의 입장에 따라 다른 발 포지션으로도(1번, 2번, 3번 등) 턴이 가능하다(Biringer, 2010). 이러한 피루엣(pirouette) 동작은 움직이는 각 분절들이 하나의 일정한 순간에 함께 동작되어지며, 무용수 몸통 전체가 동시에 회전하기 위해 실행되는 회전 힘(torque)과 각 운동량(angular momentum)을 발생 시키는데 상체와 하체의 움직임을 통해 각 분절별로 전달되고 수행 된다(Kim et al., 2014). 위와 같은 힘의 분석은 운동학적 순서에 따라 영향을 받을 수 있으며, 정형화된 동작이 무용수들의 움직임을 구현하는데 보다 더 정확한 동작을 만들어 내는 중요한 요소로 보여진다.

이러한 발레 동작은 지금까지도 많은 운동 역학적 선행 연구들을 통해 보다 체계적이고 세분화된 모습으로 이루어져 가고 있다(김용이, 최성이 2001; 이능재, 2007; 조남규, 오성근 2014; 한시완, 박성제, 2017). 그러나 이러한 많은 연구에도 불구하고 피루엣(pirouette) 동작 자체를 데이터화 하여 동작을 입증하고 규정하진 못했다. 아름다운 무용 모습일수록 정확한 무용 동작을 표현 한다고 한다(Warren, 1989). 현대무용과 한국무용 동작도 마찬가지로 특히 발레 동작에서는 바른 자세에 엄격한 기준을 가지고 교육되고 있는데, 이러한 기준은 그림 혹은 영상, 교육자의 구두만으로 전해져 교육되는 경우가 대부분일 것이다. 이는 교육자의 개인적인 취향과 성향에 따라 주관적인 모습에 크게 작용될 수도 있다(Herstens, 1989). 현재까지도 고유의 발레 용어와 동작들은 공연, 문서, 혹은 교사들의 구두로 전해져 오고 있으며, 많은 연구에서 운동 역학적 분석으로 동작 자체를 데이터로 정형화하는 연구는 드문 현실이다(Bronner & Brownstein, 1997; Kwon, 2001; Milan, 1994). 이에 본 연구는 올바른 무용 교육을 위한 의견이 아닌 일반화된 운동 역학적 데이터 분석을 통한 발레 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 회전 동작의 운동학적 순서를 살펴보고자 하며, 정확한 동작의 형태와 이해, 이를 통한 체계적인 무용 동작의 구성을 전달하고 올바른 자료를 기반으로 효과적인 교육 방법의 적용도 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구의 목적은 올바른 발레 동작의 이해를 돕기 위한 과학적 분석에 필요한 기초 자료를 제공하기 위하여 운동 역학적 분석을 통한 발레 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 회전 동작의 운동학적 순서를 살펴보고자 한다.

II. 연구방법

1. 실험 대상

본 연구는 서울 소재 S대학교의 발레 전공 여자 대학생 총 14명(n=14)의 피험자를 모집하여 실험·분석 하였다. 실험에 참가한 피험자들은 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors)과 더블(Double: 두 바퀴) 동작 시연이 가능한 최근 5년 이내 부상이 없는 발레 전공자들로부터 모집 하였다(표 1).

표 1. 피험자의 신체적 특성 (M ± SD)

	나이 (만)	몸무게 (kg)	키 (Cm)	발레경력
실험자 (n=14)	22.21 ± 1.72	49.86 ± 2.68	164.32 ± 2.98	11.36 ± 3.94년

2. 측정 도구

1) 측정 동작

모든 실험자들은 총 3개의 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 실험 동작을 구현하였으며, 동작 데이터를 측정·수집 하였고, 실험 동작에 사용된 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 동작의 구성은 다음과 같다.

시작 동작은 다리 5번 포지션 크로아제(croisé)와 팔 동작 2번 포지션 알 라 스킨드(ala seconde: 그림 1-A), 이후 르르베(relevé)와 데미 플리에(demi plié) 동작을 지나, 회전 시작 시 팔은 3번 포지션, 다리는 4번 포지션(그림 1-B) 동작으로 구현하였으며, 회전 중 팔 동작은 5번 안 아방(5th arm position an avnat), 동작다리(gesture leg)의 형태는 리트레 파세(passé and retiré)로 구현 되었다(그림 1-G). 마지막 동작은 플리에(plié)와 발 4번 포지션으로 착지(touch-down) 하였다(그림 1-H).

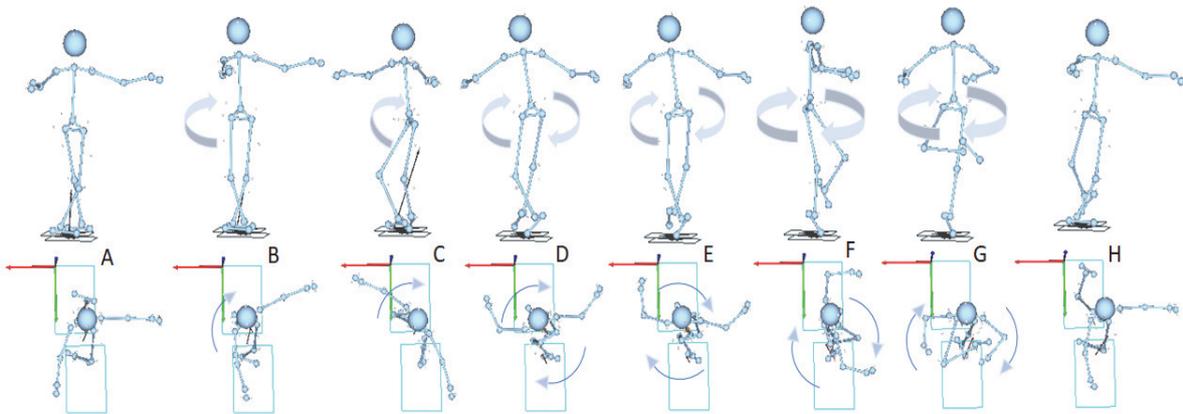


그림 1. 피루엣 (pirouette) 앙 디올 (en dehors) 동작

데이터 수집 시 다른 팔 동작의 시연 혹은 지면 반력기에서 벗어나는 동작 구현 등은 데이터 수집 시 배제 되었다. 모든 실험자들의 동작과 속도의 형평성을 위하여 각 구현 별 데이터는 같은 음악을 기준으로 시행 되었으며, 각 시연 별 음악은 더글러스 숄츠(Douglas Shultz) 발레 수업 음악 중 트랙 34번(3/4; 128 beats/min) 피루엣(pirouette) 을 사용 하였다. 모든 참가자는 실험 전 약 30분간 준비 운동을 실행 하였으며, 각 구현 별 간단한 스트레칭을 허용 하여 무용수들의 긴장을 완화 하도록 하였다. 또한 모든 실험자들은 연습용 천 슈즈를 착용하고 실험에 참여 하였다.

2) 측정 장비

본 연구 측정은 한국 체육 대학교 운동 역학실에서 진행 되었다. 측정에 사용된 장비는 퀄리시스 오퀴스(Qualisis Oqus-300: 250Hz) 3차원 영상·동작 분석 카메라 7대와 지면 반력기(Kisler-9286AA, Swiss: 2500Hz) 2대를 사용하여 데이터를 수집하였고(그림 2), 실험자에 부착된 반사 마커를 기준으로 질량 중심과 각 속도를 계산 하였다. 지면 반력기에는 말리 무용 플로어(Marley dance floor)을 부착하고 실험·분석 하였다.

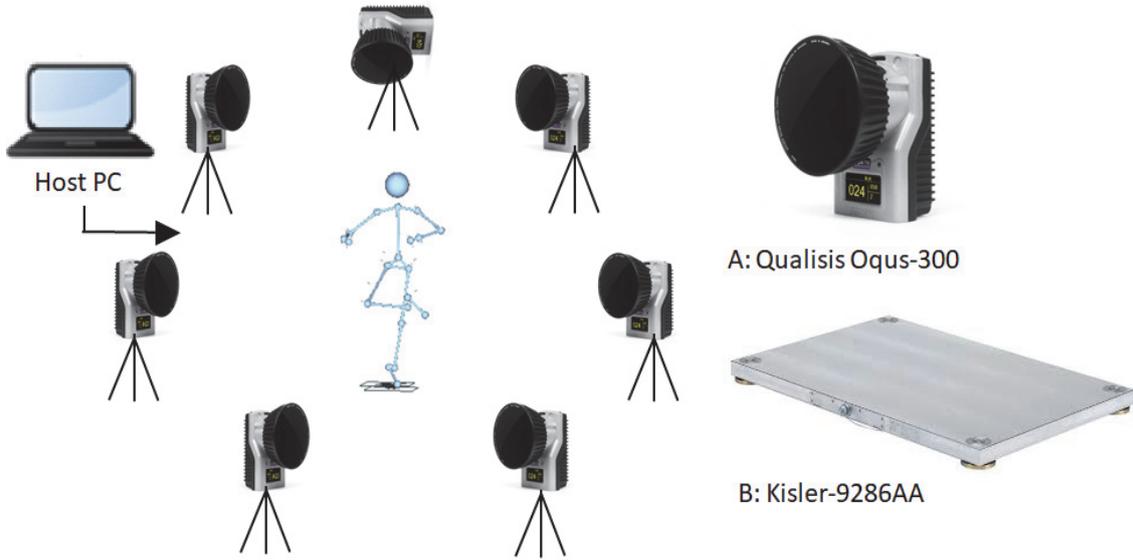


그림 2. 실험 환경 A: 퀄리시스 오퀴스 동작 분석 카메라, B: 키슬러 지면 반력기

3) 측정 과정

피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 동작의 역학적 분석을 위해, 반사되는 10mm 크기의 구 모양의 반사 마커를 사용하였다. 본 연구에 사용되어진 마커 구성은 미국 텍사스 여자대학교(Texas Woman's University dancers marker sets) 마커 표본(그림 3)을 사용하여 총 48개 <표 2>의 마커가 사용되었다(Kim et al., 2014).

본 연구에 사용된 'TWUDANCER' 마커셋 (그림 2)을 통해 총 15개(머리, 몸통, 골반, 상완(각 2개), 하완(각 2개), 손(각 2개), 대퇴(각 2개), 하퇴(각 2개), 발(각 2개)의 분절과 13개의 관절(요추 관절: L4/L5, 견관절 각 2개), 주관절(각 2개), 수관절(각 2개), 고관절(각 2개), 슬관절(각 2개), 족관절(각 2개)로 세분하여 구성

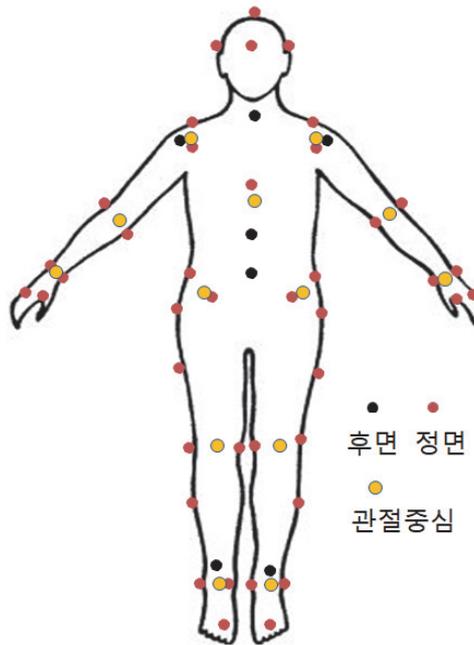


그림 3. TWUDANCER 마커위치

표 2. 마커 위치

구분	마커 수/위치
머리	4개 앞, 꼭짓점, 그리고 좌·우 중심점 (1) 머리중심 계산은 좌·우 마커의 중간지점
몸통	5개 견봉 돌기, 흉골상 절흔, 목등뼈 7번(7th cervical vertebra), 흉추 12번(12th thoracic vertebra) 중심점 (1) 어깨중심 계산은 견관절 좌·우 마커의 중간지점
팔	16개 양쪽 앞·뒤 어깨(4개), 내·외측 상과(ML-epicondyles; 4개),요골·척골 경상 돌기(styloid processes; 4개), 내·외측 중수골 2번·5번(metacarpals; 4개) 중심점 (8) 어깨 관절 앞·뒤 중간지점, 팔꿈치 내·외측상과 중간지점, 손목 중수골 중간지점
골반	5개 앞·뒤, 좌·우 장골(AP superior iliac spines; 4개)과 천골 중심점 (5) 장골 중간지점 '맥키논방법'을 사용하였다(Mackinnon & Winter, 1993). 고관절 중심은 '틸코스키 안드레 아키 하이브리드 방법' 으로 계산되었다(Bell, Pedersen, & Brand, 1990).
다리	18개 대퇴골 큰 돌기, 외측 허벅지, 내·외측 상과(ML-epicondyles; 4개), 외측 종아리, 내·외측 복사뼈(ML-malleoli), 제2 중족골, 종골(calcaneus). 동작 시 대퇴골 마커와 내측 상과, 복사뼈 마커는 제거 후 실험 하였다. 중심점 (4) 양쪽 무릎관절 중심점(mid-point of the epicondyle), 발목관절 중심점(mid-point of the malleolus)

(Kim et al., 2014)

되어지며 계산 되었다(Kim et al., 2014).

또한 본 실험에는 총 10개의 이벤트를 설정하여 모든 실험자들의 데이터 구간을 동일화 하였다. 각 이벤트 시점은 시작, 준비 동작(대항 동작; counter movement), 동작 시작(각 운동량 발생 지점; 그림 1-B), 플리에(plié; 수직의 질량 중심 최저 지점; 그림 1-C), 동작 다리(지면 분리 지점; 그림 1-E), 회전 180°위치, 회전 270°위(그림 1-F), 회전 360°위치(그림 1-G), 회전 720°위치, 착지 동작(지면 착지 지점; 그림 1-H) 으로 설정 되었다.

3. 자료 분석

본 실험의 연구 분석을 위해 Kwon3D 분석 프로그램(Kwon3d Motion analysis software; Visol Inc., Seoul, Korea; XP 5.0)을 사용하여 데이터를 분석하였다. 각 데이터 필터링에 버트워스 로우 패스(Butterworth low-pass; 6 Hz cutoff frequency) 사용하였다. 또한 디 레바(de Leva, 1996)의 인체 분절 지수(body segment parameter)를 이용하여 질량 중심(center of mass), 각속도 (angular velocity), 관성 모멘트(moment of inertia) 등을 계산하였다.

실험이 진행된 장소의 설정을 기준으로 국부 좌표계(local reference frame)가 지정 되어 실험 되었으며, ± Z 축은 위·아래(파란색 벡터:longitudinal axis) ± Y 축은 앞·뒤(녹색 벡터:anterior/posterior) ± X 축은 좌·우 (붉은색 벡터:towards right & left sides)로 설정 되었다(그림 4).

사용된 마커 기준에 따라 무용수 몸에 부착된 48개의 마커들은 각 관절의 위치에 맞추어 실험자 뼈대의 분절별 국부 기준, 좌표계의 위치 벡터로 사용되었다(표 3).

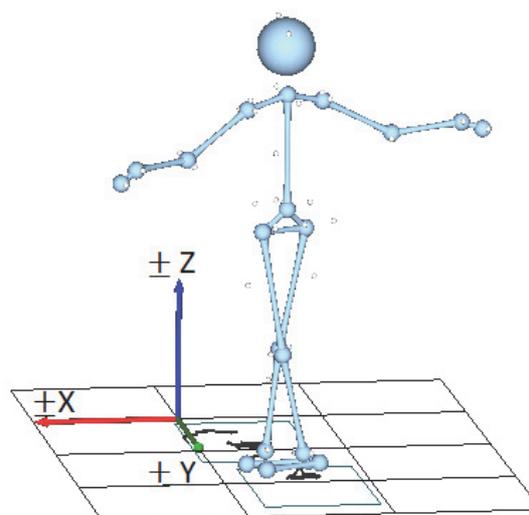


그림 4. 국부 좌표계 X-,Y-,Z-축

표 3. 분절별 국부 좌표계 설정 기준

분절	중심 축	교축	평면
머리	왼쪽에서 오른쪽(+ X 축)	왼쪽에서 머리 중앙(+ Y 축)	횡단면
몸통	장골축에서 견관절 중심(+ Z 축)	경부 7번에서 흉골상 절흔(+ Y 축)	시상면
상완	견관절 중심에서 주관절 중심(- Z축)	왼쪽 주관절에서 중심(+ X 축)	관상면
전완	주관절 중심에서 요수근관절 중심(- Z축)	왼쪽 요수근에서 요수근관절 중심(+ X 축)	관상면
손	손관절 중심(- Z 축)	손 중심(+ X 축)	관상면
골반	왼쪽 상전장골극에서 오른쪽 상전장골극(+ X 축)	왼쪽 상전장골극에서 상전장골극중심(- Y 축)	횡단면
허벅지	슬관절 중심에서 고관절 중심(+ Z 축)	고관절 중심에서 외측 허벅지(+ X 축)	관상면
종아리	족관절 중심에서 슬관절 중심(+ Z 축)	슬관절 중심에서 외측 종아리(+ X 축)	관상면
발	발 앞에서 발뒤꿈치(+ Z 축)	발뒤꿈치에서 족 관절 중심(+ Y 축)	시상면

(Kim et al., 2014)

회전행렬 및 X, Y, Z, 축 회전 순서는 다음과 같다.

$$T_{L/G} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) - c(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) - s(\psi)s(\theta)s(\phi) & c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ s(\theta) & -c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad [1]$$

위의 ψ 은 X - 회전축, θ 은 Y - 회전축, ϕ 은 Z - 회전축이다.

관절별 각속도의 경우 배향각에 의하여 각 관절별로 미분되어 계산 되었다:

$$\omega_i = \omega_j + T_i' \begin{bmatrix} C_2C_3 & S_3 & 0 \\ -C_2S_3 & C_3 & 0 \\ S_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad [2]$$

ω 는 각속도(angular velocity)를 의미 한다:

$$\tilde{r}_i = \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix} \quad [3]$$

The \tilde{r} 은 교대행렬(skew-symmetric)을 r 에서 벡터의 외적(cross product)으로, v 는 속도(velocity)로 관절 중심 관계를 계산 하였다(Kwon, 2008).

본 연구의 자료 분석은 SPSS 25.0(Statistical Package for the Social Sciences 25.0) 프로그램을 사용하여 산출·분석 하였다. 검증을 위해 일원량 분석(One-way ANOVA)을 사용하였으며 유의한 차이점이 나타날 경우 사후검정(post hoc)을 통해 비교 차이를 검증하였다. 통계의 유의 수준은 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였다.

III. 결과 및 논의

1. 세부 분절별 각속도 변화

세부 분절별 각속도량의 차이 분석 결과는 다음과 같다. 오른팔 분절의 경우 상완, 하완, 오른손 각속도에서 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. $F(2, 39) = 12.167, p < 0.001, \eta^2 = 0.384$ (표 4). 오른팔 분절의 경우 상완과 하완 그리고 상완과 오른손의 사이에 각속도 차이를 보였으며, 하완과 오른손의 각속도 유의미한 차이는 없는 것으로 사후검정(post hoc)을 통해 나타났다.

표 4. 오른팔 세부 분절 각속도

구분	각속도						
	n	평균	표준편차	F	P	Sidak	
세부분절	오른상완 ^a	14	613.64	92.17	12.167	0.001*	c < b < a
	오른하완 ^b	14	513.03	75.76			
	오른손 ^c	14	473.76	61.09			

* $p < 0.05$

왼팔 분절에서는 왼팔의 각속도량이 다른 세부 분절에 비해 평균값에 차이를 보이거나 통계적 결과로는 각각의 세부 분절 사이에 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. $F(2, 39) = 2.483, p < 0.097$ (표 5).

표 5. 왼팔 세부 분절 각속도

구분	각속도						
	n	평균	표준편차	F	P	Sidak	
세부분절	왼상완	14	771.01	139.15	2.483	0.097	N/A
	왼하완	14	877.63	175.68			
	왼손	14	905.09	186.09			

$p < 0.05$

오른다리 $F(2, 39) = 0.604, p < 0.552$ (표 6.), 왼다리. $F(2, 39) = 0.059, p < 0.943$ (표 7)는 분절 모두 각속도 평균 차이를 나타내고 있지만 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 못했다. 이는 지지되는 왼다리와 동작되는 오른다리가 회전 힘에 기여하는 바가 작다고 사료된다.

표 6. 오른다리 세부 분절 각속도

구분	각속도						
	n	평균	표준편차	F	P	Sidak	
세부분절	오른허벅지	14	705.65	171.90	0.604	0.552	N/A
	오른종아리	14	722.85	235.95			
	오른발	14	640.10	217.21			

$p < 0.05$

표 7. 왼다리 세부 분절 각속도

구분	각속도						
	n	평균	표준편차	F	P	Sidak	
세부분절	왼허벅지	14	821.13	25.28	0.059	0.943	N/A
	왼종아리	14	813.13	231.74			
	왼발	14	843.26	253.17			

$p < 0.05$

상체 분절 또한 머리, 몸통, 골반 사이에서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. $F(2, 39) = 267.78, p < 0.001, \eta^2 = 0.932$ (표 8). 또한 상체의 경우 머리와 몸통간의 각속도 차이, 머리와 골반과의 각속도에서 유의미한 차이를 보였으며 몸통과 골반간의 각속도에서도 사후검정(post hoc)을 통해 유의미한 차이가 나타났다.

표 8. 상체 세부 분절 각속도

구분	각속도						
	n	평균	표준편차	F	P	Sidak	
세부분절	머리 ^a	14	1012.95	349.57	267.78	0.001*	c < b < a
	몸통 ^b	14	823.89	34.59			
	골반 ^c	14	721.95	171.71			

* $p < 0.05$

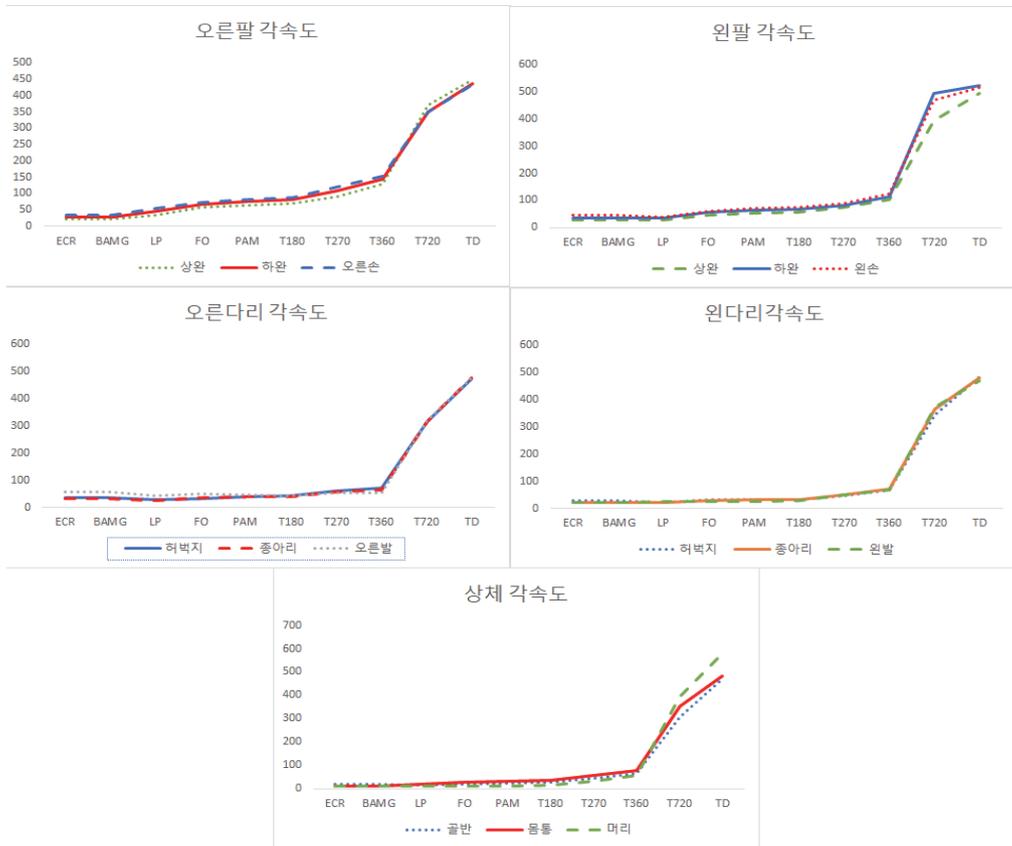


그림 5. 분절별 세부 분절 각속도 변화

그림 5는 각각의 세부 분절 구간별 각속도 변화를 나타낸다. 오른팔과 상체 각속도의 변화를 보면, 각 운동량이 발생하는 지점(BAMG) 구간부터 세부 분절별 차이를 나타내고 있다. 동작이 시현되면서 오른팔의 경우 상완의 각속도(녹색 점선)가 오른손(파란 중점선), 하완의 각속도(붉은색 실선) 보다 느리게 발생하면서 동작되는데 첫 회전 후(T360) 상완의 각속도가 하완의 각속도 보다 빠르게 진행 되는 것을 볼 수가 있다. 이는 동작이 시현되고 회전의 각속도가 증가함에 따라 무용수의 질량 중심에서 하완보다 가깝기 때문에 관성의 작용을 더 받는 원인이라 볼 수 있다. 따라서 관성에 의한 분절이 기저면에서 가까운 분절에서 볼 수 있는 결과일 것이다. 또한 두 번째 회전 이후 오른손의 각속도는 상완보다 다소 느리게 진행 되는데 분절의 크기에 비례되는 결과라 볼 수

있다. 그러나 왼팔 분절의 경우 통계 결과에서도 나타난 바와 같이 상완의 각속도가 다른 두 분절에 비해 다소 느리게 각속도가 발생 하는 것으로 보이지만 세부 분절별 각속도에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 동작에서 각 운동량을 최대로 발생 시키는 왼팔 분절(Kim et al., 2014; Imura & Lino, 2018)이 첫 회전 이후 왼팔 전체가 큰 작용 없이 오른팔 분절을 따라가는 모습으로 보여진다. 또한 지면반력 힘이 회전력에 전달된 이후 상체의 힘 작용이 바닥과의 마찰 그리고 공기 저항에 의해 작아지는 이유이기도 하다.

최대 각 운동량이 발생하는 지점(PAM) 이후 모든 분절의 각속도는 상승하며 각속도를 증가 시키는 것을 볼 수 있다. 그러나 두 다리 분절의 경우 세부 분절별 유의미한 차이를 보이지 못한 것으로 나타났다. 이후 첫 회전이 끝나는 지점(T360)을 지나 두 번째 회전지점(T720) 까지 비슷한 각속도량을 볼 수 있다. 이 과정에서 상체에 각속도는 다른 상지와 하지 분절의 각속도에 비해 다른 변화 곡선을 만들어 내는데 결과상 상체와 골반 사이에 유의미한 차이 나타낸다. 이러한 이유는 골반 분절의 경우 몸통에 비해 느리게 각속도가 발생하지만 비슷한 상승 곡선을 그리며 진행되는 것을 볼 수 있다. 몸통과 골반 분절의 차이는 회전 시 몸통 관절과 골반 관절이 순차적으로 비틀어지면서 발생하는 회전 힘(torque)의 차이에서 나타나는 특성이라 볼 수 있다.

머리 분절의 경우 다른 두 분절에 비해 작은 각속도량을 보이며 시현되는데 첫 회전 이후 빠르게 각속도량을 나타내며 움직인다. 이는 머리 스파트팅을 빠르게 동작 하는 것이기 때문이다. 피루엣(pirouette) 머리 동작의 경우 몸통이 먼저 회전한 후 머리가 회전하며, 몸통보다 먼저 정면에 도달하기 때문이다. 따라서 머리, 몸통, 골반의 회전은 각각 다르게 회전 되어야 한다. 동작이 시작될 때 상체, 골반, 머리의 순서로 진행되어야 하며 첫 회전이 진행된 이후부터 머리, 상체, 골반의 순서로 회전되어야 할 것이다.

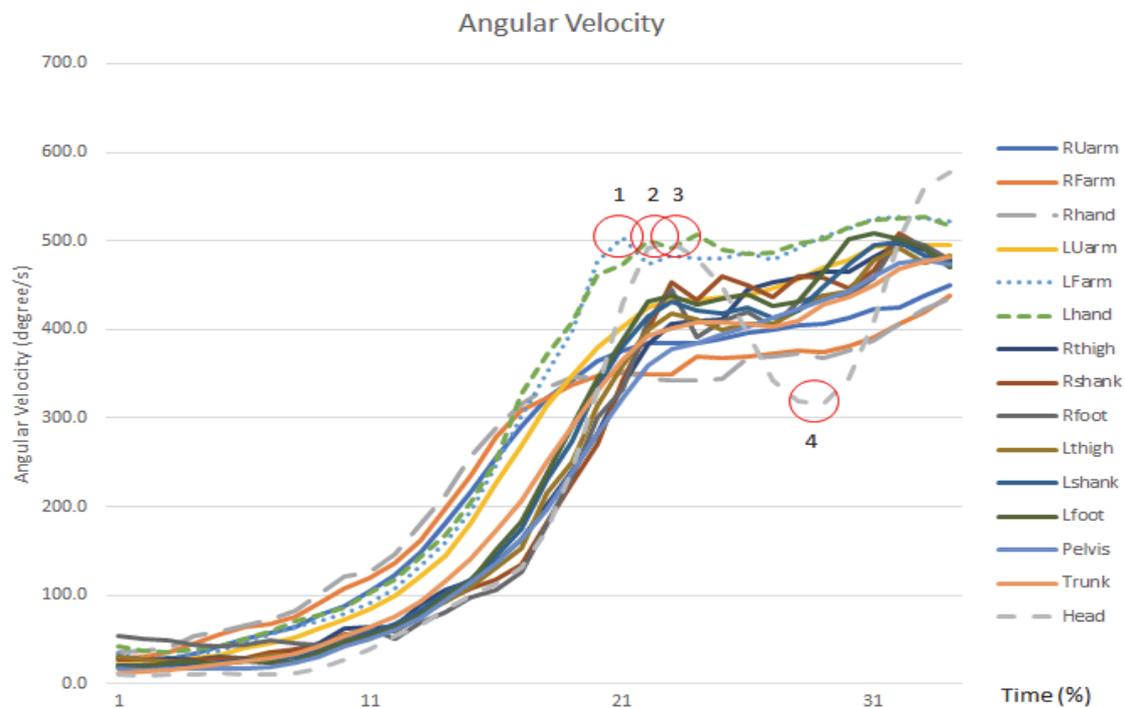


그림 6. 세부 분절별 각속도변화

그림 6의 1(첫 번째 붉은 원)지점은 왼팔 상완, 그림 6의 2지점(두 번째 붉은 원)은 왼손의 각속도를 나타내고 있다. 이는 선행연구에서 나타난 바와 같이 왼팔의 각 운동량을 크게 발생시켜야 하는 이유이기도 하다

(Kim et al., 2014). 독특한 점은 그림 6의 3지점과, 그림 6의 4지점이다. 그림 5의 상체 가속도 그림과 동일한 형태에 각속도 형태를 보이는데 머리분절(회색 중-점선)의 각속도 부분으로 다른 분절에 비해 느리게 각속도량을 시작하지만 다른 분절에 비해 가파른 상승곡선을 그리며 빠른 각속도를 보이다가 그림 6 속 4지점 구간에서 각속도가 급격히 떨어지는 결과를 볼 수 있다. 이러한 이유는 앞서 말한 바와 같이 피루엣(pirouette) 회전 동작의 경우 빠른 머리 회전(head spotting) 동작이 수반되어야 하는데(Sugano & Laws, 2002) 본 연구에 참가한 발레 숙련자들의 동작에서 나타나는 첫 회전 이후 보여지는 빠른 머리 회전의 결과라고 할 수 있다. 이러한 운동학적 순서가 나타나는 이유는 오른팔의 경우 무용수의 질량 중심에서 먼 오른손 분절이 먼저 각속도를 발생 시키고 작용하는 것으로 보이지만 실상은 첫 회전 이후 분절간 이어지는 상완의 각속도 발생에 더 큰 비중이 주어지기 때문이다. 그 차이는 분절이 크기에서 나올 수도 있지만 상완보다 작은 하완 분절의 경우 결과상으로 상완에 비해 작은 각속도량을 보이며 동작되기 때문이다.

2. 질량 중심별 속도 변화

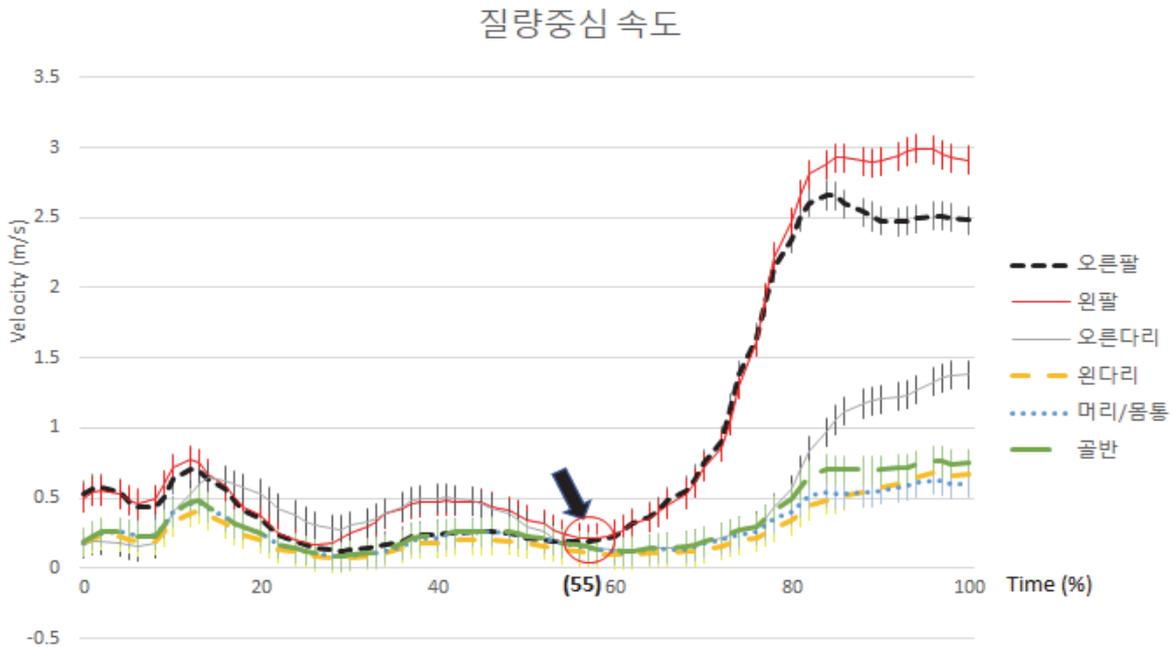


그림 7. 각 분절 질량 중심 속도 변화

그림 7은 분절 중심 각속도량을 나타 내었다. 세부 분절별 각속도량의 경우, 지면에서 동작다리가 떨어진 이후(55%) 양팔 특히 왼팔 분절 위주의 높은 각속도량을 나타나고 있으며 다른 세부 분절들은 비슷한 각속도량을 보여주고 있다. 표 9의 자료에 따라 그림 7의 시작 동작 '0'로부터 '55'까지의 질량 중심의 속도가 작게 발생하는 구간은 준비 동작이다(그림 1A에서 1B까지). 각 운동량이 발생하는 '55'(PAM) 구간 이후 각 분절은 빠르게 질량 속도를 높이고 있다. 가장 처음 질량 속도를 발생 시키는 분절은 오른팔(검정색 점선)이며 이후 왼팔(붉은색 실선), 다음으로 골반(녹색 장-점선), 오른다리(회색 실선), 머리와 몸통(파란색 점선), 마지막으로 왼다리(노랑색 중-점선) 순으로 각속도가 발생되고 동작 되고 있다. 오른팔 분절이 가장 먼저 각속도량을 발생 시키지만 80% 구간 이후 왼팔의 각속도가 더 크게 상승한다. 이는 선행 연구에서도 나타난 바와 같이 왼팔의 각 운동량이 최대 회전 힘을 발생시키기 때문이며(Kim et al., 2014; Imura & Lino, 2018) 두 팔을

제외한 하체, 몸통의 경우 두 팔에 비해 작은 각 운동량을 발생 시키는 것으로 나타난다. 질량이 클수록 또는 각 가속도가 클수록 힘은 증가하며($F = ma$) 이에 따른 각속도량에 영향을 준다(Hall, 2018). 또한 가장 작은 각속도량을 나타내는 왼다리(노란 점선; 그림 6) 분절은 축을 이루는 지지다리로 바닥과 마찰하는 유일한 분절이기 때문에 가장 작은 각속도량을 나타낸다.

표 9. 구간/분절 별 각속도량 M (SD)

구간별	시간별 (%)	오른팔 (m/s)	왼팔 (m/s)	오른다리(m/s)	왼다리(m/s)	몸통/머리(m/s)	골반 (m/s)
구간1 (대항동작)	0	0.525 (0.332)	0.498 (0.321)	0.168 (0.093)	0.183 (0.105)	0.184 (0.106)	0.189 (0.109)
구간2 (동작시작)	55.3	0.191 (0.149)	0.231 (0.216)	0.173 (0.134)	0.122 (0.087)	0.167 (0.12)	0.170 (0.127)
구간3 (최저지점)	55.4	0.192 (0.162)	0.230 (0.213)	0.172 (0.127)	0.122 (0.089)	0.167 (0.124)	0.170 (0.135)
구간4 (지지다리)	60.1	0.233 (0.222)	0.242 (0.240)	0.126 (0.109)	0.096 (0.092)	0.120 (0.105)	0.125 (0.108)
구간5 (최대각운동)	64.1	0.373 (0.437)	0.360 (0.450)	0.137 (0.127)	0.106 (0.102)	0.132 (0.126)	0.140 (0.137)
구간6 (180)	65.8	0.437 (0.533)	0.417 (0.527)	0.143 (0.144)	0.112 (0.11)	0.139 (0.136)	0.146 (0.155)
구간7 (270)	68.3	0.575 (0.772)	0.549 (0.759)	0.160 (0.186)	0.117 (0.099)	0.141 (0.124)	0.158 (0.154)
구간8 (360)	71.0	0.791 (1.042)	0.757 (1.108)	0.195 (0.243)	0.143 (0.146)	0.183 (0.18)	0.202 (0.213)
구간9 (720)	82.2	2.570 (1.792)	2.755 (1.996)	0.788 (0.636)	0.429 (0.338)	0.499 (0.387)	0.633 (0.511)
구간10 (착지)	100	2.483 (1.412)	2.910 (1.562)	1.384 (0.709)	0.671 (0.373)	0.602 (0.319)	0.748 (0.422)

무용동작은 일반 체육 동작과 달리 특별한 운동능력을 측정하거나 기록 등을 나타내지 않는다(Laws, 2002). 그러나 무용은 심미적 특성이 더 강조 되어야 하는 것이 사실이다(서차영, 1992). 무용동작과 체육동작 모두 기본적인 질적(qualities) 측면 혹은 양적(quantities) 측면에서 중요한 상관관계를 가지고 있는데 특히 효율성(efficiency), 유효성(effectiveness), 혹은 안정성(safety) 동작의 추구성은 두 분야 모두 함께 풀어야 하는 좋은 과제일 것이다(Hall, 2018).

무용 학습에는 기본적인 구성과 이를 뒷받침해 주는 확실한 자료가 필요 할 것이다. 정확한 근거에 기준을 두지 않고 단순히 '오른팔을 빨리 움직여라, 왼팔을 빨리 움직여라, 동작다리를 빨리 올려라, 머리를 빨리 회전하라'라는 교육만으로 피루엣(pirouette) 동작을 완벽하게 구현하기 어려울 것이다. 특히 오른팔의 경우 상완의 각속도가 첫 회전 이후 하완과 오른손의 각속도 보다 빠르게 구현되어야 하며 정확한 회전력의 전달을 위해 왼팔 분절이 오른팔 분절 보다 큰 각 가속도를 발생시켜야 되는데 힘은 질량과 각 가속도에 비례한다는 물리적 원리(Laws, 2002)에 입각하여 이러한 이유가 성공적인 동작에 필요한 회전력을 어떻게 발생시키는지 혹은 이유는 무엇인지에 대하여 과학적인 자료를 토대로 이해되어야 할 것이다.

본 연구는 피루엣(pirouette) 준비 동작(르르베; relevé)과 착지 동작(데미 플리에; demi plié)으로 제한되어 있으며, 안무가에 따라 다양한 팔 모양도 동작이 가능한 것으로 알려지고 있다(Biringer, 2010). 다양한 동작의 조합은 다른 운동학적 순서 결과를 나타 낼 수 있으며 특히 아메리칸 발레의 무용교수법에 경우 발 4번 동작은 오픈 스탠스(open stance)를 사용함으로써(Warren, 1989) 또 다른 결과를 나타낼 수도 있다. 선행연구에 따르

면 무용 동작 시 팔의 사용 유·무에 따라 무게 중심이 달라지기 때문에 어떠한 팔 동작이 가장 효율적인지에 대해선 또 다른 연구 과제일 것이다(Payne, Slater, & Telford, 1968). 불과 14명의 숙련된 무용수 동작만으로 피루엣(pirouette) 동작을 완벽하게 구현하거나 설명할 수 없고 발레 동작의 이론 확립 혹은 유수의 단체들의 유사한 피루엣(pirouette) 발레 동작을 일반화 할 수 없지만 가장 기초적이고 일반적인 특징과 자료를 바탕으로 동작 구성 중점으로 연구하였다. 동작의 어떤 분절이 먼저 시작되고 나중에 되어야 하는지 이에 따라 기본적인 움직임은 어떻게 이루어져야 하는지 본 연구를 통해 피루엣(pirouette) 동작을 이해하는 좋은 수단이 될 것으로 사료되며 더 많은 실험자의 연구 특히 성별간의 차이점 또한 중요한 미래 연구로 사료된다. 따라서 유사한 여러 동작들의 검증 또한 체계적인 동작 확립을 위해 또 다른 연구가 수행 되어야 할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구는 서울 소재 S대학교의 발레전공 여자 대학생을 14명을 대상으로 3차원 영상분석(3-dimensional motion capture) 결과를 바탕으로 피루엣 앙 디올(pirouette en dehors) 운동학적 순서를 연구하여 다음과 같은 결론을 갖게 되었다.

각 분절 각속도량은 처음 오른팔 분절을 시작으로 이후 왼팔, 골반, 오른다리, 상체, 그리고 왼다리 순으로 각속도가 발생되고 동작이 이루어진다. 오른팔 분절의 경우 상완의 각속도가 하완과 오른손에 비해 큰 각속도량을 보였으며 분절 사이 각속도량에 유의미한 차이를 보였다. 오른손과 하완은 먼저 동작되어 각속도량을 발생시키지만 회전이 시작된 이후부터 동작다리가 지면에서 떨어진 후 상완의 각속도량은 오른손과 하완에 비해 증가 했다. 무용수 몸의 질량 중심에서 먼 분절의 경우 각속도량은 회전축에 가까운 분절보다 작은 것으로 나타났다는데 이는 관성이 주는 영향이라 볼 수 있다. 그러나 왼팔 분절의 경우 세부 분절 간의 유의미한 차이를 보이지 못했으며 이러한 이유는 오른다리(동작다리)가 지면에서 떨어진 이후 뉴턴의 반작용 법칙(Hall, 2018)에 따라 각속도량 발생에 상체의 역할은 효과적이지 못한 것으로 나타난다. 또한 머리, 몸통, 골반의 회전은 각각 다르게 회전 되어야 하며 동작이 시작 될 때 상체, 골반, 머리의 순서로 진행 되고 첫 회전이 이루어진 후 부터 머리, 상체, 골반의 순서로 진행되어야 한다.

따라서 본 연구는 올바른 발레 동작의 이해를 돕기 위해 운동 역학적 분석을 통해 정확한 동작을 이해하고 실행하며 일반화된 구성을 증명하기 위함에 있다. 정확한 데이터가 아닌 의견이나 보여지는 그대로의 것만으로는 동작을 완벽하게 증명하기에 한계가 있을 것이다. 이러한 토대의 정립을 위해서 생체역학·생리학적 등의 많은 과학적 접근이 필요 할 것으로 사료되며 특히 부상과 관련된 동작분석, 구성, 이유, 이해 등은 우리가 지속해야 할 연구 부분이라 사료된다.

참고문헌

- 김용이, 최성이(2001). 피루엣 앙 디올의 차원 해부학적 각 운동. *한국운동역학회*, **10**(2), 99-113.
- 서차영(1992). *무용기능학*. 서울: 금광.
- 이능재(2007). 발레 회전 동작의 역학적 분석. 미간행 석사학위논문, 수원대학교 교육대학원, 화성.
- 조남규, 오성근(2014). 발레 Pirouette en dehors 동작의 성공과 실패에 따른 운동역학적 차이 분석. *한국체육과학회지*, **23**(1), 1439-1446.
- 한시완, 박성제 (2017). 발레 숙련자의 턴 수행에 대한 영상분석 효과탐색. *중앙대학교 학교체육연구소*, **5**(2), 51-63.
- Biringen, E. (2010). Analysis of pirouette execution for improved performance. *Medical Problems of Performing Artists*, **25**, 136-137.
- Bronner, S. & Brownstein, B. (1997). Profile of Dance Injuries in a Broadway Show: A discussion of Issues in Dance Medicine Epidemiology. *Journal of Orthopaedic Sports Physical Therapy* **26**(2), 87-94.
- de Leva, P. (1996) Adjustments to Zatsiorsky-seluyanov's Segment Inertia Parameters. *Journal of biomechanics*, **29**(9), 1223-1293.
- Hall, J. S. (2018). *Basic Biomechanics* (8th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Herstens, M. (1989). *Ballet technique: Principles for the horizontal floor*. Saratoga, CA: R & E Publishers.
- Imura, A. & Lino, Y. (2018). Regulation of hip joint kinematics for increasing angular momentum during the initiation of a pirouette en dehors in classical ballet. *Human Movement Science*. **60**. 18-31.
- Kim, J., Wilson, M., Kunal, S., Gamblin, S., Suh, C. Y., & Kwon, Y. H. (2014). Development of the longitudinal angular momentum in single-, double-, and triple-turn pirouette en dehors. *Sports Biomechanics*. **13**(3). 215 -229.
- Kwon, Y. H. (2001). Study of dance in the mechanical perspective: Dance biomechanics. *The Korean Journal of Dance*, **30**, 123-140.
- Kwon, Y. H. (2008). Kwon, Y. H. (2008). Measurement for deriving kinematic parameters: Numerical methods. *Routledge handbook of biomechanics and human movement science*, 156-181.
- Laws, K. (2002). *Physic and the art of dance*. New York, NY: Oxford University Press.
- Milan, K. R. (1994). Injury in Ballet: A Review of Relevant Topics for the Physical Therapist, *J. Orthop Sports Phys Ther* **19**, 121-129.
- Payne, A. H., Slater, W. J., & Telford, T. (1968). The use of a force platform in the study of athletic activities. *Ergonomics*, **11**, 123-143.
- Sugano, A., & Laws, K. (2002). Physical analysis as a foundation for pirouette training. *Medical Problems of Performing Artists*, **18**, 29-32.
- Warren, G. W. (1989). *Classic ballet technique*. Gainesville: University Press of Florida.

ABSTRACT

**Analysis of the Kinematic Sequence on the Rotation of
Pirouette En Dehors Motion in Ballet**

Jemin Kim* New Mexico State University · Kwang Jin Kim** Sejong University

The purpose of this study was to investigate the kinematic sequence of a specific ballet dancers' in turn "pirouette en dehors" motion which refers to working on the participants' body segments with motions that indicate skilled ballet dancer movements. Demonstration on a pirouette en dehors motion by using infrared 3-dimensional analysis motion capture system(7-Qualisys: 250 Hz) camera and force-plate(Kisler-9286AA: 2500 Hz). The center of mass position and relative to angular velocity of segments during the pirouette en dehors motion were computed and analyzed the participants trials. The average values were calculated in the statistical analyses. SPSS(Statistical Package for the Social Sciences Version 25.0) was used to conduct the statistical analysis with level of significant(α) set at 0.05. One-way ANOVA was used to compare kinematic sequence. The kinematic sequence pattern, as a start by the right-arm, left-arm, pelvis, right-leg, head/trunk and left-leg segment. There is a significantly different among the right-arm segments(upper arm, lower arm, and right-hand) and upper body segments(head, trunk and pelvis). The right-upperarm showed the large angular velocity after the first revolution followed by the right-hand and right-forearm because of the moment of inertia. The left-arm were characterized by the large angular velocity than right-arm. This type of biomechanical research in regards to dance is lacking and furthering the mechanical knowledge will push the dance field to optimize motions and teach dancers on accepted motions. From the analysis results, it allows to understand the general scientific motion of pirouette en dehors for the teaching methods.

Key words : pirouette, center of mass, angular velocity, kinematic sequence, segments

논문투고일: 2020.11.30

논문심사일: 2021.01.04

심사완료일: 2021.01.18

* Ph.D. Assistant Professor, College of Education, Department of Kinesiology and Dance, New Mexico State University.

** Ph. D., Department of Dance, Sejong University.