

## 정상인 힘 추적 능력 분석

이백희<sup>1</sup> · 박현지<sup>2</sup> · 김성호<sup>1</sup> · 이병화<sup>3</sup> · 나덕렬<sup>3</sup> · 유희천<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 산업경영공학과 / <sup>2</sup>LG전자 무선사업부 / <sup>3</sup>삼성서울병원 신경과

### Analysis on Force Tracking Capabilities of Healthy Adults

Baekhee Lee<sup>1</sup> · Hyunji Park<sup>2</sup> · Sungho Kim<sup>1</sup> · Byung Wha Lee<sup>3</sup> · Duk L. Na<sup>3</sup> · Heecheon You<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

<sup>2</sup>Mobile Communication Company, LG Electronics

<sup>3</sup>Department of Neurology, Sungkyunkwan University School of Medicine, Samsung Medical Center

A reduction of motor performance due to brain disorders can be screened by evaluating force tracking capabilities (FTCs). Existing studies have examined FTCs mainly using simple sinusoidal waves, of which repeated profiles have a critical limitation due to a learning effect in force tracking. The present study examined the effects of personal factors (age and gender) and sinusoidal wave factors (central force and complexity) on FTCs of healthy adults using composite sinusoidal wave profiles (CSWPs). FTCs were measured using Finger Touch™ for 30 seconds and quantified in terms of time within the target range (TWR, accuracy measure) and relative RMSE (RRMSE, variability measure). A total of 90 healthy adults in 20s to 70s with the equal gender ratio participated in the experiment consisting of combinations of 2 central force levels (6 N and 10 N) and 2 complexity levels (approximate entropy, ApEn = 0.03 and 0.06) of CSWPs. Significantly decreased FTCs (lower TWR and higher RRMSE) were found in aged adults, females, the low central force, and the high complexity. The detailed FTC decrements include a 43% reduced TWR and a 85% increased RRMSE of older adults in 70s as compared to those in 20s, a 17% reduced TWR and a 17% increased RRMSE of female as compared to those of male, a 30% reduced TWR and a 108% increased RRMSE at central force = 6N when compared to those at central force = 10N, and a 19% reduced TWR and a 30% increased RRMSE at ApEn = 0.06 as compared to those at ApEn = 0.03. The characteristics of FTCs for CSWPs can be of use in establishing an assessment protocol of motor performance for screening brain disorders.

**Keywords:** Force tracking, Finger force, Motor performance, Brain disorders, Early screening

#### 1. Introduction

뇌장애(brain disorder) 환자는 정상인에 비해 신체의 힘을 발휘하거나 유지하는 힘 통제 능력(force control capabilities)과 같은 운동능력(motor performance)이 저하된다. 힘 통제 능력은 <Figure 1>과 같이 시작(initiation), 도달(development), 유지(maintenance), 그리고 종결(termination)의 네 단계로 평가될 수 있다(Heliman,

2004; Seo *et al.*, 2007). 기존 연구들(Seo *et al.*, 2009; Yoon *et al.*, 2014)은 뇌장애 환자와 정상인의 힘 통제 능력을 단계별로 비교하여 운동능력의 저하 정도를 정량화하였다. 예를 들면, Seo *et al.*(2009)은 우반구 환자가 정상인보다 시작시간(initiation time), 도달시간(development time), 유지오차(maintenance error), 그리고 종결시간(termination time)이 1.8배, 4.8배, 16.5배, 그리고 1.6배정도 유의하게 저하되는 결과를 보고하였다. 한편, 힘

본 연구는 2010년 한국연구재단(2010-0014026), 삼성생명과학연구소(C-B0-217-3), 그리고 전북대병원의료기능성게임개발 및 선도융합임상연구의 지원을 받아 수행되었음.

\* 연락저자 : 유희천 교수, 790-784 경상북도 포항시 남구 청암로 77 포항공과대학교 산업경영공학과, Tel : 054-279-2210, Fax : 054-279-2820, E-mail : hcyou@postech.ac.kr

2014년 5월 23일 접수; 2014년 9월 1일 1차 수정본 접수; 2014년 11월 16일 2차 수정본 접수; 2014년 12월 1일 게재 확정.

통제 능력을 단계별로 정량화하면 뇌장애 유형을 운동저하증(akinesia; 동작 시작 장애), 운동지속불능증(motor impersistence; 동작 유지 장애), 운동보속증(motor preservation; 동작 종결 장애)과 같이 체계적으로 평가하는데 활용될 수 있다(Heilman, 2003; Yoon *et al.*, 2014).

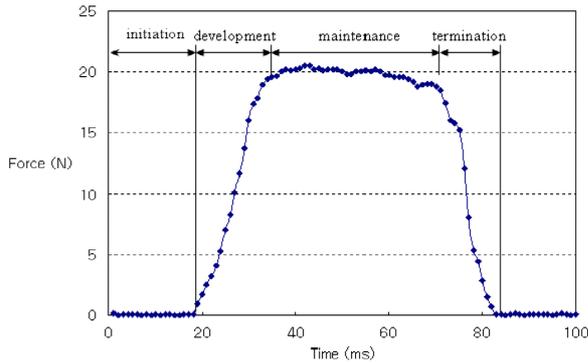


Figure 1. Force control phases : initiation, development, maintenance, and termination(Seo *et al.*, 2009)

힘 통제 능력은 임상에서 주로 환자의 행동 관찰을 통해서 진단되고 있어 체계적이고 정량적인 평가 방법이 요구된다. 예를 들면, 운동저하증(motor akinesia)은 동작의 시작이 지연되는 장애로서 <Figure 2>(a)와 같이 한 손에 자극을 가하여 반대 손을 들어 올리는 작업(crossed response inhibition, CRI task)으로 평가된다(Crucian *et al.*, 2007). 운동지속불능증(motor impersistence)은 동작의 지속에 문제가 있는 장애로서 <Figure 2>(b)와 같이 20초간 눈 감은 상태를 유지하는 작업으로 평가된다(Sander, 2010). 운동보속증(motor preservation)은 자극이 사라져도 현재 상태를 유지해 동작의 종결이 지연되는 장애로서 <Figure 2>(c)와 같이 Luria loop를 그리게 한 후 동작을 중지시키는 작업으로 평가된다(Chin *et al.*, 2012; Luria, 1965). 그러나 전술된 병상시험 방법들은 작업수행 결과를 육안으로 관찰하여 임상가의 소견에 따라 진단결과가 상이할 수 있고, 정량적으로 운동능력 저하 정도를 파악하기 어렵다는 한계가 있다.

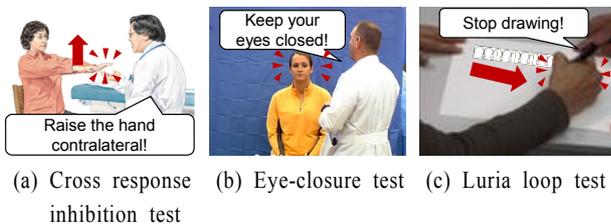


Figure 2. Existing motor performance tests

기존 연구들은 힘 통제 능력의 효과적인 평가를 위하여 힘 추적 능력(force tracking capabilities)을 정량화하는 실험이 수행되고 있으나, 연령 및 성별에 따른 분석과 힘 추적 파형의 특성을 고려한 실험 설계가 미흡하였다. 힘 추적 능력은 <Figure 3>

과 같이 다양하게 제시되는 목표힘 수준을 최대한 정확하게 추적하게 함으로써 평가되고 있다(Lindberg *et al.*, 2012; Nagasawa *et al.*, 2013; Vieluf *et al.*, 2013; Voelcker-Rehage and Alberts, 2005). 그러나 주로 젊은 연령층(예 : 20대)과 고령자(예 : 60대)를 실험하여 중년층(예 : 30대~50대)에 대한 힘 추적 평가가 미흡하였다. 또한, 힘 추적 파형은 주로 사인형(sinusoidal; <Figure 3>), 계단형(stair-stepping)과 같이 반복적인 패턴으로 구성되어 힘 추적에 대한 학습효과(learning effect)가 발생할 수 있으며, 다양한 파형 특성(예 : 힘 수준, 진폭, 주파수)이 종합적으로 고려되지 못하였다. 따라서, 힘 추적을 통하여 보다 정확하게 뇌장애 환자를 판별하기 위해서는 학습효과를 최소화하는 신규 파형의 개발을 통하여 다양한 연령의 정상인에 대한 파형 특성별 힘 추적 능력 분석이 요구된다. 뿐만 아니라, 일부 기존 연구들(Ruff and Parker, 1993; Shimoyama *et al.*, 1990)에서 성별 간 운동능력의 유의한 차이가 보고되어 힘 추적 특성 분석 시 성별 효과도 고려될 필요가 있다.

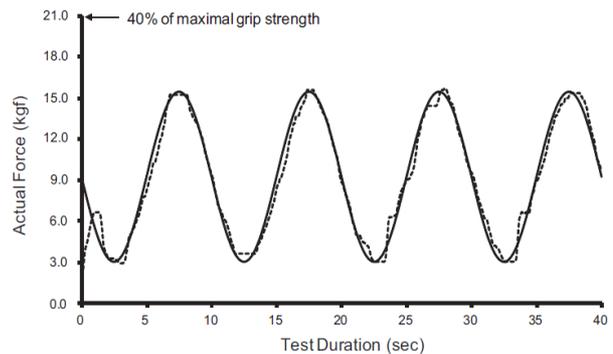


Figure 3. Simple sinusoidal force tracking profile(central force = 9N, ApEn = 0.016; Nagasawa *et al.*, 2013)

본 연구는 뇌장애 선별을 위한 신규 힘 추적 파형을 사용하여 정상인의 힘 추적 능력에 연령, 성별, 파형의 기준힘, 그리고 파형의 복잡도가 미치는 영향을 분석하였다. 힘 추적 파형으로는 다양한 사인곡선의 주파수와 진폭을 조합된 복합적 사인곡선이 사용되었다. 힘 추적 능력은 정상인 90명을 대상으로 검지의 힘 측정을 통해 힘 추적의 정확도와 변동관련 척도로 평가되었다.

## 2. Methods

### 2.1 Force Tracking Profile Development

본 연구는 파형의 기준힘(central force)과 복잡도(complexity level)를 고려하여 <Figure 4>와 같은 복합적 사인곡선 파형(composite sinusoidal wave profile)을 개발하였다. 먼저, 파형의 기준힘은 기존 연구들에 적용된 파형 진폭 범위(3~15N, Nagasawa *et al.*, 2013; 4~12N, Vieluf *et al.*, 2013)를 참고하여 6N과

10N의 두 가지로 선정되었다. 그리고, 파형의 복잡도는 네 가지 주파수(0.1Hz, 0.2Hz, 0.4Hz, 0.8Hz)와 두 가지 진폭(2N, 4N)을 무작위로 조합하여 오차범위 0.005내에서 approximate entropy (ApEn)가 0.03(0.025~0.035)과 0.06(0.055~0.065)인 두 가지로 선정되었다. ApEn은 time-dependent 파형의 복잡도를 정량화한 척도로서, 0에 가까울수록 파형의 regularity가 높아 복잡도가 낮음을 나타낸다(Pincus *et al.*, 1991). 마지막으로, 파형은 기존 문헌들(Nagasawa *et al.*, 2013; Lindberg *et al.*, 2012; Naik *et al.*, 2011; Lodha *et al.*, 2010; Voelcker-Rehage and Alberts, 2005)의 중앙값인 30초로 구성되었으며, 최초 5초간은 기준힘까지 직선으로 도달하도록 구성되었다.

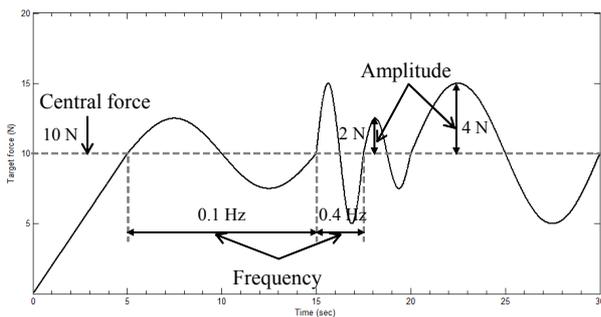


Figure 4. Composite sinusoidal force tracking profile(central force = 10N, ApEn = 0.06)

### 2.2 Apparatus

힘 추적 실험에는 <Figure 5>와 같은 Finger Touch™(FT, 시드텍, 대한민국) 시스템과 <Figure 6>과 같은 힘 추적 평가 S/W가 사용되었다. FT 시스템은 검지의 누르는 힘을 측정할 수 있도록 양쪽으로 두 개의 압력 센서(max = 50N, precision = 0.2N, sampling rate = 30Hz)와 실험 화면 제어를 위한 19인치 모니터(FLATRON L1940P, LG Electronics, 대한민국)로 구성되었다. 피검사자는 <Figure 5>와 같이 힘 측정 센서와 모니터로부터 각각 50cm와 70cm 거리에 위치하고, 센서는 피검사자의 중앙을 기준으로 좌/우 15cm 떨어진 위치에 고정되었다. 모니터에는 <Figure 6>과 같이 Matlab R2011a로 개발된 힘 추적 평가 S/W의 인터페이스가 제시되었다.

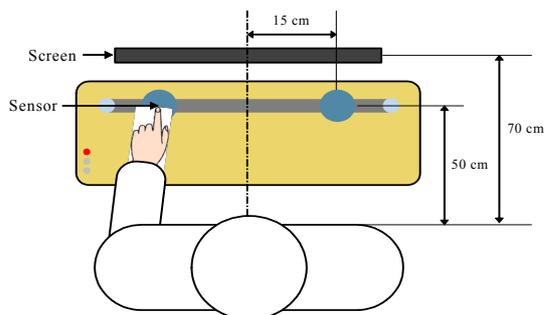


Figure 5. Layout of force tracking experiment

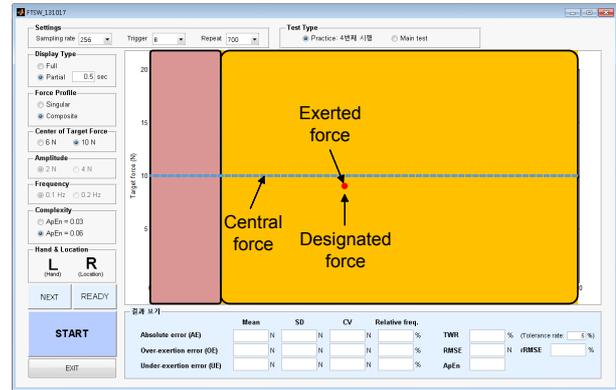


Figure 6. User interface of Finger Touch™

### 2.3 Force Tracking Tasks and Measures

힘 추적 실험에서는 피검사자가 복합적 사인곡선 파형을 30초간 추적하는 task를 수행하여 time within the target range (TWR; 식 (1))과 relative root mean square error(RRMSE; 식 (2))가 산출되었다. 힘 추적 성능은 피검사자가 30초 동안 검지의 힘을 조절하며 FT장비의 압력 센서에 힘을 가해 최대한 파형에 제시된 힘을 발휘함으로써 평가된다. 먼저, TWR은 힘 추력의 정확도를 파악하는 척도로서, 발휘힘이 목표힘의 허용범위 ±5% 이내에 포함되는 정도(범위 = 0~1)가 식 (1)을 통하여 산출된다(Voelcker - Rehage and Alberts, 2005). 그리고, RRMSE는 실시간으로 변하는 목표힘의 크기를 고려한 힘 추력의 변동 지표로서, 식 (2)를 통하여 계산된다(Vieluf *et al.*, 2013). 한편, 최초 5초까지의 힘 추적적 data는 분석에서 제외되었다.

$$TWR = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (1)$$

where,

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if } |EF_i - DF_i| \leq DF_i \times TR \\ 0, & \text{o/w} \end{cases}$$

$m$  = # measurements

$i = 1, \dots, m$

$EF_i$  = exerted force by the subject at measurement  $i$

$DF_i$  = designated force at measurement  $i$

$TR$  = tolerance rate 5%

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{EF_i - DF_i}{DF_i} \right)^2} \quad (2)$$

### 2.4 Participants

힘 추적 실험에는 인지 기능과 손가락 힘 사용에 문제가 없는 20~70대 정상인 90명이 참여하였다. 피검사자는 <Table 1>

과 같이 20~40대의 경우 10명씩, 50~70대의 경우 20명씩 모집되었고, 남녀 비율은 동일하였다. 본 연구는 경도인지장애(mild cognitive impairment, MCI)와 같은 뇌장애 환자의 유병률(prevalence)이 50대 미만에서는 5% 이내로 미미한 것에 근간하여(Ward *et al.*, 2012), 뇌장애 환자 유병률에 상응하도록 50~70대의 참여자를 20~40대의 참여자에 비해 2배 많이 모집하였다.

**Table 1.** Age distribution of healthy adults

	n (M : F = 1 : 1)	Age (mean ± SD; years)	
		Male	Female
20s	10	24.8±3.4	25.4±2.5
30s	10	33.2±2.6	34.2±2.8
40s	10	45.0±2.8	44.2±2.8
50s	20	53.6±2.3	53.2±2.6
60s	20	64.8±2.7	63.1±2.4
70s	20	72.6±2.1	72.4±2.2

**2.5 Experimental Procedure**

힘 추적 능력 평가는 실험 준비, 연습 시행, 본 실험, 그리고 확인의 네 단계로 구성되었다. 실험 준비 단계에서는 피검사자에게 실험 참여 동의를 구하였으며, 힘 추적 시 FT장비의 압력 센서를 검지로 눌러 최대한 화면에 제시되는 목표 힘을 발휘하도록 통제하였다. 연습 시행 단계에서는 피검사자가 힘 추적 실험 방법에 익숙해지도록 임의의 복합적 사인곡선 파형에 대하여 오른손과 왼손을 2회씩 연습하였다. 본 실험 단계에서는 복합적 사인곡선 파형의 2가지 기준힘(6N, 10N)과 2가지 복잡도(ApEn = 0.03, 0.06)를 조합한 4가지 실험 조건에 대하여 왼손과 오른손 각각 4회씩 무작위로 측정하여 1인당 총 32회(= 기준힘 2×복잡도 2×손 2×반복 4)씩 평가되었다. 예를 들면, 피검사자는 기준힘 = 6N, ApEn = 0.06인 복합적 사인곡선 파형에 대하여 오른손으로 4회를 평가하고 기준힘 = 10N, ApEn = 0.03 파형에 대하여 왼손으로 4회를 평가하는 순으로 실험하였다. 마지막으로, 확인 단계에서는 힘 추적 평가 data가 확인되었으며 피검사자에게 사례금이 지급되었다. 피검사자 1인당 실험 시간은 약 40분 정도가 소요되었다.

**2.6 Statistical Analysis Method**

정상인의 힘 추적 성능(TWR, RRMSE)에 대하여 연령, 성별, 파형의 기준힘, 그리고 파형의 복잡성이 미치는 효과를 파악하기 위하여 four-factor mixed-subjects ANOVA(between-subject-factor : 연령, 성별; within-subject-factor : 기준힘, 복잡도)가 수행되었다. 유의한 연령 효과에 대해서는 유의수준 0.05에서 Tukey-Kramer test를 수행하여 다중 비교를 수행하였다. 힘 추적 평가 data는 각 피검사자의 기준힘과 복잡도 조합의 4가지 실험 조

건별로 95% 신뢰구간을 벗어날 경우 이상치로 간주(Barnett and Lewis, 1994)하여 조건별 5% 이내로 제거되었다. 통계 분석에는 SAS(ver. 9.2)가 활용되었다.

**3. Results**

정상인 힘 추적 능력에는 <Table 2>와 같이 연령, 성별, 파형의 기준힘, 그리고 파형의 복잡성의 주 효과가 유의수준 0.001에서 모두 유의한 것으로 분석되었다. 또한, 성별과 기준힘의 교호작용은 TWR과 RRMSE에 대하여 모두 유의하게 나타났다.

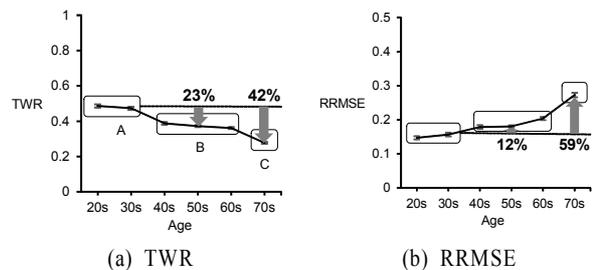
**Table 2.** ANOVA summary table(TWR : time within the target range, RRMSE : relative root mean square error)

	TWR	RRMSE
Age(A)	$F(5, 77) = 15.71^{***}$	$F(5, 76) = 17.70^{***}$
Gender(G)	$F(1, 77) = 15.33^{***}$	$F(1, 76) = 17.11^{***}$
Central force(CF)	$F(1, 80) = 657.22^{***}$	$F(1, 80) = 1035.83^{***}$
Complexity level(CL)	$F(1, 80) = 277.69^{***}$	$F(1, 81) = 437.09^{***}$
A×G	$F(5, 77) = 0.42$	$F(5, 76) = 0.47$
A×CF	$F(5, 80) = 2.05$	$F(5, 80) = 14.15^{***}$
A×CL	$F(5, 80) = 2.49^*$	$F(5, 81) = 0.82$
G×CF	$F(1, 80) = 10.50^{**}$	$F(1, 80) = 11.68^{**}$
G×CL	$F(1, 80) = 0.01$	$F(1, 81) = 1.16$
CF×CL	$F(1, 78) = 2.98$	$F(1, 81) = 151.78^{***}$

\*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$ .

**3.1 Effect of Age**

연령이 증가할수록 TWR은 감소하고 RRMSE는 증가하는 경향이 유의한 것으로 나타났다(<Table 2> 참조). TWR은 <Figure 7>(a)와 같이 20~30대는 유사하나 40대 이상부터 서서히 감소하여 70대가 가장 낮은 것으로 나타났다(20~30대 :  $0.48 \pm 0.16$ , 40~60대 :  $0.37 \pm 0.14$ , 70대 :  $0.28 \pm 0.12$ ). RRMSE는 <Figure

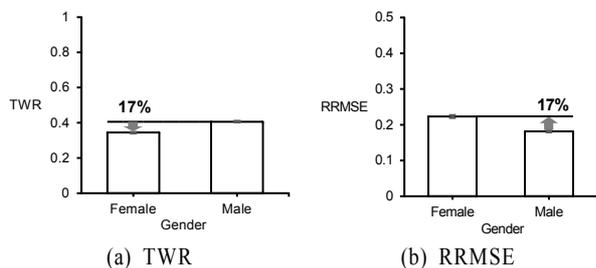


**Figure 7.** Force tracking capabilities by age(TWR : time within the target range, RRMSE : relative root mean square error)

7>(b)와 같이 20대부터 60대까지 서서히 증가하고 70대에서 급격히 높아지는 것으로 나타났다(20~30대 :  $0.17 \pm 0.09$ , 40~60대 :  $0.19 \pm 0.10$ , 70대 :  $0.27 \pm 0.17$ ).

**3.2 Effect of Gender**

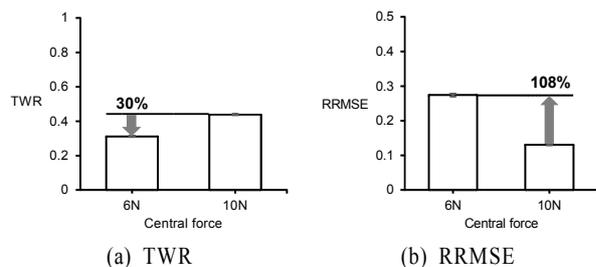
여성은 남성보다 TWR은 낮고 RRMSE는 높은 것으로 나타났다(<Table 2> 참조). 여성은 남성에 비해 <Figure 8>(a)와 같이 TWR(여성 :  $0.34 \pm 0.15$ , 남성 :  $0.41 \pm 0.16$ )이 17%( $MD = -0.07$ )만큼 낮고, <Figure 8>(b)와 같이 RRMSE(여성 :  $0.21 \pm 0.12$ , 남성 :  $0.18 \pm 0.10$ )가 17%( $MD = 0.03$ )만큼 높게 나타났다.



**Figure 8.** Force tracking capabilities by gender(TWR : time within the target range, RRMSE : relative root mean square error)

**3.3 Effect of Central Force**

Central force가 높을수록 TWR은 높고 RRMSE는 낮은 경향이 유의한 것으로 나타났다(<Table 2> 참조). Central force = 6N은 10N보다 <Figure 9>(a)와 같이 TWR(6N :  $0.31 \pm 0.12$ , 10N :  $0.44 \pm 0.16$ )이 30%( $MD = -0.13$ )만큼 낮고, <Figure 9>(b)와 같이 RRMSE(6N :  $0.27 \pm 0.13$ , 10N :  $0.13 \pm 0.06$ )가 108%( $MD = 0.14$ )만큼 높게 나타났다.

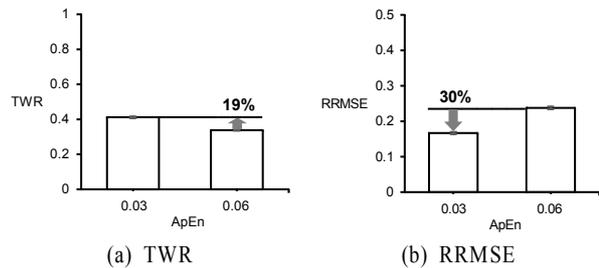


**Figure 9.** Force tracking capabilities by central force of the composite sinusoidal profile(TWR : time within the target range, RRMSE : relative root mean square error)

**3.4 Effect of Complexity Level**

Complexity level이 높을수록 TWR은 낮고 RRMSE는 높은 경

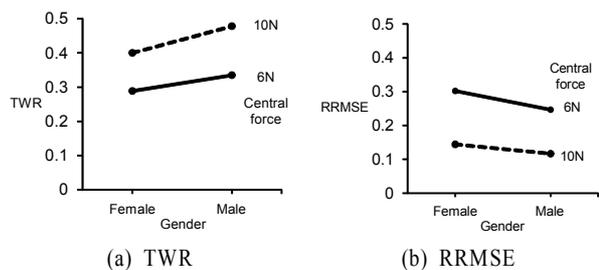
향이 유의한 것으로 나타났다(<Table 2> 참조). ApEn = 0.03은 0.06보다 <Figure 10>(a)와 같이 TWR( $0.03 : 0.41 \pm 0.16$ ,  $0.06 : 0.34 \pm 0.14$ )이 19%( $MD = 0.08$ )만큼 높고, <Figure 10>(b)와 같이 RRMSE( $0.03 : 0.16 \pm 0.10$ ,  $0.06 : 0.23 \pm 0.14$ )가 30%( $MD = -0.07$ )만큼 낮게 나타났다.



**Figure 10.** Force tracking capabilities by complexity level of the composite sinusoidal profile(TWR : time within the target range, RRMSE : relative root mean square error)

**3.5 Interaction Effects**

성별과 기준힘의 교호작용은 TWR과 RRMSE에 대하여 모두 유의하게 나타났다(<Table 2> 참조). TWR은 <Figure 11>(a)와 같이 여성의 경우 6N( $0.29 \pm 0.12$ )보다 10N( $0.40 \pm 0.15$ )이 0.11만큼 높았으나, 남성의 경우 6N( $0.33 \pm 0.12$ )보다 10N( $0.48 \pm 0.15$ )이 0.15만큼 높아 평균 차이가 36%(0.04)정도 증가한 것으로 나타났다. RRMSE는 <Figure 11>(b)와 같이 여성의 경우 6N( $0.30 \pm 0.15$ )보다 10N( $0.14 \pm 0.03$ )이 0.16만큼 낮았으나, 남성의 경우 6N( $0.24 \pm 0.11$ )보다 10N( $0.12 \pm 0.05$ )이 0.12만큼 낮아 평균 차이가 25%(0.04)정도 감소한 것으로 나타났다.



**Figure 11.** Force tracking capabilities by gender and central force of the composite sinusoidal profile (TWR : time within the target range, RRMSE : relative root mean square error)

**3.6 Normative Data of Force Tracking Capabilities**

본 연구는 정상인의 힘 추적 성능에 대한 normative data로서 <Table 3>에 나타낸 것과 같이 연령, 성별에 따른 TWR과 RRMSE의 기술통계치( $M$ ,  $SD$ , 95<sup>th</sup> %ile, 99<sup>th</sup> %ile)를 제공한다. 본 nor-

mative data는 TWR과 RRMSE가 공통적으로 20~30대, 40~60대, 그리고 70대로 분류(<Figure 7> 참조)되는 통계적인 결과에 근간하여 3가지 연령대로 구성되었다. 예를 들어, 30대 남성의 힘 추적 성능의 평균치는 TWR의 경우 0.52이고, RRMSE의 경우 0.14임이 파악될 수 있다.

**Table 3.** Normative data of finger force tracking capabilities by age and gender

Time within the target range(TWR)					
Age	Gender	M	SD	95 <sup>th</sup> %ile	99 <sup>th</sup> %ile
20s~30s	Male	0.52	0.15	0.77	0.86
	Female	0.43	0.16	0.70	0.79
40s~60s	Male	0.40	0.14	0.66	0.75
	Female	0.35	0.13	0.57	0.69
70s	Male	0.31	0.11	0.50	0.60
	Female	0.24	0.12	0.46	0.62
Relative root mean square error(RRMSE)					
Age	Gender	M	SD	95 <sup>th</sup> %ile	99 <sup>th</sup> %ile
20s~30s	Male	0.14	0.08	0.30	0.39
	Female	0.17	0.10	0.36	0.46
40s~60s	Male	0.17	0.10	0.35	0.49
	Female	0.20	0.11	0.43	0.57
70s	Male	0.23	0.13	0.51	0.62
	Female	0.31	0.19	0.70	0.95

#### 4. Discussion

본 연구에서 제안된 신규 힘 추적 파형은 운동능력을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다. 기존 힘 추적을 위한 사인곡선 파형들(Lindberg *et al.*, 2012; Nagasawa *et al.*, 2013; Vieluf *et al.*, 2013; Voelcker-Rehage and Alberts, 2005)은 일정한 진폭과 주파수(예 : 6N, 0.1Hz; Nagasawa *et al.*, 2013)가 반복되어 일정 시간이 지나면 학습효과가 발생할 수 있기 때문에 힘 추적 효과 분석에 영향을 미칠 수 있다는 한계가 있다. 반면, 본 연구가 개발한 복합적 사인곡선 파형(composite sinusoidal wave profile)은 진폭과 주파수가 무작위로 조합되기 때문에 예측이 어려워 학습효과를 최소화시킬 수 있고, 검사 집중도 향상에도 도움을 줄 수 있다. 그러나, 개발된 복합적 사인곡선 파형이 기존 반복적 단순 파형보다 학습효과가 적다는 것은 추후 연구를 통하여 검증될 필요가 있다. 한편, 본 연구는 무작위의 진폭과 주파수의 조합으로 설정된 ApEn(예 : 0.03)의 파형을 <Figure 4>와 같이 완전한 주기(period)를 가진 사인곡선을 제시하기 위하여 ApEn의 오차를 0.005로 허용하였다.

정상인은 연령이 증가함에 따라 점차 힘 추적 능력이 저하되었으며 통계적으로 20~30대, 40~60대, 그리고 70대로 분류

되었다. 본 연구는 TWR과 RRMSE 각각 대하여 Tukey-Kramer test를 수행하여 연령대를 분류해 본 결과, <Figure 7>(a)와 <Figure 7>(b)와 같이 모두 세 가지 연령대(20~30대, 40~60대, 그리고 70대)로 분류되는 것을 파악하였다. 특히, 70대는 60대보다 30% 정도 힘 추적 성능이 저하되어 연령대에 따른 저하 정도가 가장 큰 것으로 나타났다. 연령에 따라 힘 추적 능력이 저하된다는 결과는 젊은층(예 : 20대)과 고령층(예 : 70대)을 대상으로한 기존 연구들(Nagasawa *et al.*, 2013; Vieluf *et al.*, 2013)의 결과와 동일하다고 할 수 있다. 또한, 본 연구는 연령대(20~70대)별로 남녀 비율을 동일하게 통제하여 연령에 따른 힘 추적 능력 분석 시 성별 비율에 따른 효과를 최소화하였다. 본 연구의 연령과 성별에 따른 힘 추적 능력 분석 결과를 힘 추적 normative data로 사용하기 위해서는 추후 보다 많은 인원에 대한 실험(예 : 연령대 및 성별로 30명씩)이 요구된다.

정상인은 힘 추적 파형의 기준힘 수준이 낮고 복잡도가 높을수록 힘 추적 능력이 저하되는 것으로 나타났다. 본 연구는 파형의 기준힘이 10N일 때보다 6N일 때 힘 추적 정확도(TWR)가 30% 저하되고 변동(RRMSE)이 2배 정도 증가하는 것을 파악하였다. 이는 10N(범위 : 6~14N) 기준의 힘 추적보다 6N(범위 : 2~10N)에서 높은 fine motor control 능력을 요구하기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 본 연구는 파형의 복잡도가 2배 정도 높을 경우 힘 추적 정확도가 19% 저하되고 오차가 30% 증가하는 것을 파악하였다. 이는 Vieluf *et al.*(2013)이 사인곡선 파형의 주파수를 5배 높게 할 경우 정확도가 약 30% 정도 저하되었다는 결과와 상응한다고 할 수 있다.

본 연구에서 수립된 힘 추적 성능의 normative data는 뇌장애를 선별하는데 활용될 수 있다. 본 연구의 normative data는 통계적으로 분류된 3가지 연령대(20~30대, 40~60대, 그리고 70대)와 성별(남성, 여성)에 대한 힘 추적 성능의 정확도(TWR)와 오차(RRMSE)에 대하여 평균, 표준편차, 95분위, 그리고 99분위 정보를 제공한다. 힘 추적 성능의 normative data는 운동능력의 평가기준으로 활용될 수 있어 뇌장애 환자를 선별하는데 활용될 수 있을 것으로 기대되나 추후 검증이 필요하다.

추후 힘 추적을 통해 뇌장애를 선별하기 위해서는 뇌장애 환자가 충분히 실험할 수 있도록 복합적 사인곡선 파형의 최적 기준힘과 복잡도를 결정하는 연구가 필요하다. 추가적으로, 힘 추적 평가에 재미 요소를 추가하여 힘 추적 게임으로 개발되면 남녀노소가 보다 효과적으로 운동능력을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- Barnett, V. and Lewis, T. (1994), *Outliers in statistical data* : John Wiley and Sons, Chichester, 12.
- Choi, Y., Park, J., Lee, B., Jung, K., Sah, S., and You, H. (2013), A classification of sitting strategies based on seating pressure distribution, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 39(2), 105-

- 108.
- Crucian, G. P., Heilman, K. M., Junco, E., Maraist, M., Owens, W. E., Foote, K. D., and Okun, M. S. (2007), The crossed response inhibition task in Parkinson's disease : Disinhibition hyperkinesia, *Neurocase*, **13**(3), 158-164.
- Chin, J., Seo, S. W., Kim, S. H., Park, A., Ahn, H. J., Lee, B. H., Kang, S. J., and Na, D. L. (2012), Neurobehavioral dysfunction in patients with subcortical vascular mild cognitive impairment and subcortical vascular dementia, *The Clinical Neuropsychologist*, **26**(2), 224-238.
- Heilman, K. M. and Valenstein E. (2003), *Clinical neuropsychology*, Oxford University Press, New York, USA, **4**, 296-346.
- Heilman, K. M. (2004), Intentional neglect, *Front Biosci*, **9**, 694-705.
- Hong, W., Lee, W., Jung, K., Lee, B., Park, J., Park, S., Park, Y., Son, J., Park, S., and You, H. (2014), Development of an evaluation method for a driver's cognitive workload using ECG signal, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **40**(3), 325-332.
- Kim, B., Kim, T., Lim, Y., and Jung, E. (2012), Usability evaluation of the size of small touch keys for the smart phone, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **38**(2), 80-88.
- Lee, B. and You, H. (2014), A case study of eco-design for a small-size electric heater by performance, usability, and life-cycle assessments, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **40**(2), 223-232.
- Lee, W., Lee, B., Kim, E., and You, H. (2014), Design ideation and evaluation process for E3 (ecology, ergonomics, economy)-friendly product development, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **40**(3), 299-304.
- Lindberg, P. G., Roche, N., Robertson, J., Roby-Brami, A., Bussel, B., and Maier, M. A. (2012), Affected and unaffected quantitative aspects of grip force control in hemiparetic patients after stroke, *Brain Research*, **1452**, 96-107.
- Luria, A. R. (1965), L. S. Vygotsky and the problem of localization of functions. *Neuropsychologia*, **3**, 387-392.
- Nagasawa, Y., Demura, S., and Takahashi, K. (2013), Age differences between the controlled force exertion measured by a computer-generated sinusoidal and a bar chart display, *Archives of Gerontology and Geriatrics*, **57**, 86-91.
- Pincus, S. M., Gladstone, I. M., and Ehrenkranz, R. A. (1991), A regularity statistic for medical data analysis, *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, **7**(4), 335-345.
- Ruff, R. M. and Parker, S. B. (1993), Gender- and age-specific changes in motor speed and eye-hand coordination in adults : normative values for the finger tapping and grooved pegboard tests, *Percept Motor Skills*, **76**, 1219-1230.
- Sander, R. D. (2010), Motor examinations in psychiatry, *Psychiatry (Edgmont)*, **7**(11), 37-41.
- Seo, S. W., Jung, K., You, H., Kim, E. J., Lee, B. H., Adiar, J. C., and Na, D. L. (2007), Dominant limb motor impersistence associated with callosal disconnection, *Neurology*, **68**, 862-864.
- Seo, S. W., Jung, K., You, H., Lee, B. H., Kim, G. M., Chung, C. S., Lee, K. H., and Na, D. L. (2009), Motor intentional disorders in right hemisphere stroke, *Cognitive and Behavioral Neurology*, **22**(4), 242-248.
- Shimoyama, I., Ninchoji, T., and Uemura, K. (1990), The finger-tapping test. A quantitative analysis, *Arch Neurol*, **47**, 681-684.
- Voelcker-Rehage, C. and Alberts, J. L. (2005), Age-related changes in grasping force modulation, *Exp Brain Res*, **166**, 61-70.
- Vieluf, S., Godde, B., Reuter, E.-M., and Voelcker-Rehage, C. (2013), Age-related differences in finger force control are characterized by reduced force production, *Exp Brain Res*, **224**, 107-117.
- Ward, A., Arrighi, H. M., Michels, S., and Cedarbaum, J. M. (2012), Mild cognitive impairment : Disparity of incidence and prevalence estimates, *Journal of the Alzheimer's Association*, **8**(1), 14-21.
- Yoon, D. S., Jung, K., Kim, G. H., Kim, S. H., Lee, B. H., Seo, S. W., You, H., and Na, D. L. (2014), Motor intentional disorders in vascular mild cognitive impairment and vascular dementia of subcortical type, *Neurocase*, **20**(1), 53-60.