

손 힘 사용 측정 FSA 시스템의 성능 평가*

정기효** · 유희천** · 권오채**

Evaluation of the FSA Hand Force Measurement System

Kihyo Jung**, Heecheon You**, Ochaekwon**

ABSTRACT

The FSA(Force Sensitive Application) system measures hand force by using force resistance sensors. Compared to conventional hand force measurement systems such as Lafayette hand dynamometer and Jamar hydraulic hand dynamometer, the FSA system can be applied to analyze use of hand forces while the hand is manipulating objects for a task, However, the measurement performance of the FSA system has not been objectively evaluated. The present study tested the FSA system in terms of stability, repeatability, accuracy, and linearity. It is shown that the FSA system has good stability ($CV \leq 0.02$) and linearity ($R^2 = 0.82$), but has low repeatability ($CV = 0.11 \sim 0.19$) and accuracy (22% of underevaluation on average). This performance result indicates that measurements from the FSA system should be used for relative comparison rather than for absolute comparison.

Keyword: FSA system, Hand force measurement, Performance evaluation, Musculoskeletal disorders

1. 서 론

수작업에서의 과도한 힘 사용은 상지 근골격계질환(upper extremity musculoskeletal disorders)을 유발할 수 있는 유해요소로 지적되고 있다. NIOSH(1997), Ayoub(1990), 그리고 Putz-Anderson(1988)은 산업현장에서 발생하는 과도한 힘 사용을 근골격계질환의 원인 중 하나로 보고하였다.

동적 작업 상황에서 힘 사용에 따른 부하를 정량적으로 측정하기 위해 FSA 시스템(Verg Inc., Canada; 그림 1 참조)이 사용되고 있으나, 이 시스템의 측정 성능에 대한 이해가 부족한 실정이다. 손의 악력을 측정하는 장비인 NK dynamometer (NK BioTechnical Co.), Lafayette hand dynamometer (Lafayette Instrument), Jamar hydraulic hand dynamometer (Sammons Preston) 등은 다양한 형

상의 작업 대상물에 작용하는 동적 손 힘 측정시 적용 한계가 있다. 이러한 기존 악력 측정 장비의 단점을 보완하기 위해 개발된 FSA 시스템은 손동작을 방해하지 않으며 다양한 형상의 작업 대상물을 취급하는 수작업 분석에 적용할 수 있는 장점이 있으나, 측정 성능에 대한 객관적 평가 정보가 부족한 실정이다.

본 연구는 수작업에서 손의 힘 사용을 측정하는 FSA 시스템의 성능을 안정성, 반복성, 정확성, 선형성 측면에서 평가하였다. FSA 시스템의 개별 센서 성능은 무게가 상이한 3개 분동을 이용하여 평가하였고 시스템 전반 성능은 잡기, 집기, 누르기 작업 수행시 NK dynamometer를 사용하여 평가하였다.

*본 논문은 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었음.

**포항공과대학교 기계산업공학부 제품생산기술연구소

교신저자: 유희천

주 소: 790-784 경북 포항시 남구 효자동 산31, 전화: 054-279-2210, E-mail: hcyou@postech.ac.kr



그림 1. FSA hand force measurement system

2. 실험 방법

2.1 측정 대상 작업

FSA 시스템의 센서 성능과 전반 시스템 성능을 분석하기 위해 분동과 NK dynamometer를 이용하였다. FSR 센서 위에 그림 2.a와 같은 분동(0.5kg, 1kg, 2kg)을 올려놓고 시간의 흐름에 따른 측정값 변화를 반복 측정하였다. 그리고 분동의 무게가 FSR 센서의 활성화 영역(sensing area)에 정확하게 전달될 수 있도록 센서의 활성화 영역과 동일한 크기의 직육면체 보조도구(0.6g; 그림 2.b 참조)를 사용하였다.



(a) 분동 (b) 센서와 보조도구

그림 2. 분동과 보조도구

손동작에 따른 FSA 시스템의 힘 사용 측정 성능은 잡기(power grip), 집기(pulp pinch), 누르기(pulp press) 동작에 대해 NK dynamometer로부터 측정된 값을 기준으로 비교 평가되었다. FSA 시스템과 NK dynamometer는 동시에 측정이 가능하도록 동기화되었고, NK dynamometer의 Digit-Grip (DGR001), Adjustable-Pinch (PA001), Pinch (PF002)가 잡기, 집기, 누르기 동작에 각각 사용되었다(그림 3). 본 연구에서 사용한 NK dynamometer의 측정 정확

성은 $\pm 1\%$ 로 보고되고 있다(NK BioTechnical Corporation, 2003).

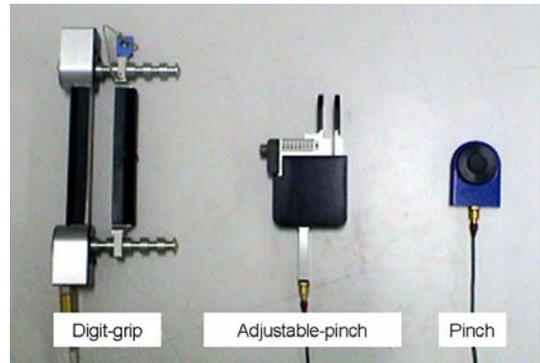


그림 3. NK dynamometer

2.2 평가 척도

FSA 시스템의 성능은 4개 평가 척도(안정성, 반복성, 정확성, 선형성)를 적용하여 평가되었다. 이들 평가 척도들은 동작분석 시스템(motion analysis system) 평가와 관련된 연구 문헌들(Kessler et al., 1995; Wise et al., 1990; Quam et al., 1989)을 참고하여 선정되었다. 각 평가 척도는 표 1과 같이 세부 정의되었다.

표 1. FSA 시스템 평가 척도

평가 척도	정의
안정성 (stability)	동일 부하 상태에서 측정값의 시간에 따른 변화
반복성 (repeatability)	여러 번 반복하여 측정하였을 때 측정값의 변동
정확성 (accuracy)	측정값과 참값의 차이
선형성 (linearity)	측정값과 참값의 선형관계

2.3 평가 절차

FSA 시스템의 성능을 분석하기 위해 그림 4에 나타난 순서로 평가가 진행되었다. 먼저, FSA 시스템 calibration을 수행한 후 센서 성능 평가를 위해 분동을 이용한 측정을 10회 반복하였다. 그리고 NK dynamometer를 이용한 손동작에 따른 성능을 측정하기 위해 NK dynamometer와 FSA 시스템의 샘플링 횟수와 측정 시점이 동기화 되었다. 샘플링

횟수는 초당 10회로 설정되었고, 두 장비의 측정 시점은 인터넷 시간을 이용한 시간 설정 프로그램인 AboutTime을 이용하여 동일하게 설정되었다. AboutTime은 NASA에서 제공하는 인터넷 시간으로 컴퓨터의 시간을 설정하는 프로그램으로 시간 설정의 정확성은 ±50ms로 보고되고 있다 (AboutTime, 2004). 두 장비가 동기화된 후 잡기, 집기, 누르기 동작에 대해 힘 사용 측정이 수행되었다. 잡기 동작 측정시에는 Yun(1994)의 연구를 참고하여, Digit-Grip을 잡았을 때 손바닥의 닫는 부위에 FSA 시스템의 센서가 부착될 수 있도록 하였다.

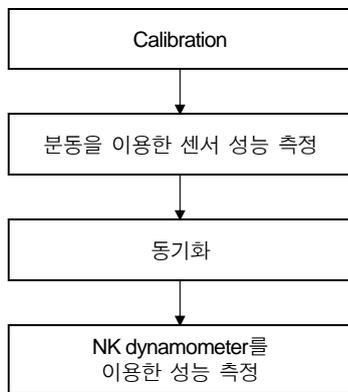


그림 4. FSA 시스템 성능 평가 절차

3. 실험 결과

3.1 센서 성능 평가

FSA 시스템의 센서 성능을 평가한 결과, 안정성과 선형성은 높았으나, 반복성과 정확성이 낮게 나타났다(표 2). 그림 5와 같이 FSA 시스템의 센서는 안정성 측면에서 2% 미만의 변동계수(coefficient of variation)를 보였다. 그러나 반복성에 있어서 분동의 무게에 따라 11~19% 변동계수를 보였다(그림 6). 또한, 센서로부터 측정된 값은 전반적으로 분동의 무게보다 높게 측정되었고, 표준오차(standard error, SE)는 분동무게에 따라 0.12~0.52kgf로 분석되었다. 마지막으로, 회귀 분석을 통해 절편 -0.1, 기울기 1.3이 파악되었고, 분동무게와 센서 측정값 간의 회귀결정계수(R^2)가 0.95로 분석되었다.

3.2 손동작에 따른 측정 성능 평가

손동작에 따른 FSA 시스템의 힘 사용 측정 결과는 NK

표 2. 분동을 이용한 FSA 시스템 센서 평가

분동 무게 (kg)	안정성 (CV)	반복성 (CV)	정확성		선형성
			측정값 차이의 평균** (비율)	표준오차 (kgf)	
0.5	0.014	0.19	0.09(18%)	0.12	$W_j = -0.1 + 1.3FSA_j$ ($R^2 = 0.95, MSE = 0.04$)
1.0	0.009	0.14	0.14(14%)	0.18	
2.0	0.012	0.11	0.52(26%)	0.52	

*변동계수(coefficient of variation)
**FSA 시스템 측정값과 분동무게 간 차이의 평균

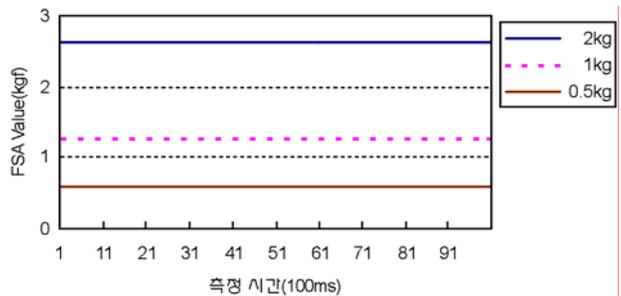


그림 5. 분동을 이용한 FSA 시스템의 센서 안정성 평가

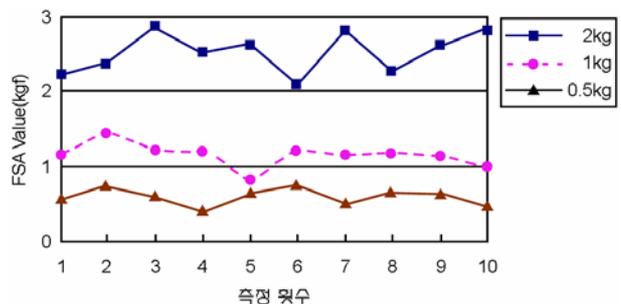


그림 6. 분동을 이용한 FSA 시스템의 센서 반복성과 정확성 평가

dynamometer의 측정값보다 전반적으로 작게 분석되었으나, 측정값간의 높은 상관관계가 파악되었다(표 3). 정확성 분석 결과, 센서가 가장 많이 동원되는 잡기 동작에서 표준오차가 8.73kgf로 가장 크게 나타났고, 집기 1.4kgf, 누르기 0.79kgf로 순으로 분석되었다. 그리고 FSA 시스템의 힘 사용 측정값은 전반적으로 NK dynamometer로부터 측정된 값보다 작게 나타났다(그림 7).

회귀 분석을 이용한 선형성 분석 결과, 측정에 동원되는 센서의 개수가 증가할수록(잡기>집기>누르기) 평균오차제곱합(mean sum of squared error, MSE)과 회귀결정계수가 증가하였다(표 3). NK dynamometer와 FSA 시스템 측정값을 회귀 분석한 결과 절편이 0.5 미만으로 나타났으나, 유

의수준 0.05에서 통계적으로 유의하지는 않았다. 그리고 회귀식의 기울기는 한 개 센서가 사용되는 누르기의 경우 1.00으로 분석되었고, 2개 이상의 센서가 사용되는 잡기와 집기는 각각 1.33, 1.57으로 나타났다. 마지막으로, 측정에 동원되는 센서가 증가할수록 평균오차제곱합은 0.24kgf, 0.79kgf, 2.90kgf로 증가하였고, 손동작에 따른 NK dynamometer와 FSA 시스템의 측정값 간의 회귀결정계수는 잡기 0.99, 집기 0.94, 누르기 0.82로 분석되었다.

표 3. 손동작에 따른 FSA 시스템 성능 평가

손동작 (센서 수)	정확성		선형성			
	측정값 차이의 평균* (비율)	표준오차 (kgf)	절편**	기울기	R ²	평균오차 제곱합(kgf)
잡기 (18개)	-1.49(30.4%)	8.73	0.38	1.33	0.99	2.90
집기 (2개)	-1.15(40.0%)	1.40	0.16	1.57	0.94	0.79
누르기 (1개)	-0.09(9.8%)	0.79	0.10	1.00	0.82	0.24

*FSA 시스템 측정값과 NK dynamometer 측정값 간 차이의 평균
**유의수준 0.05에서 유의하지 않음

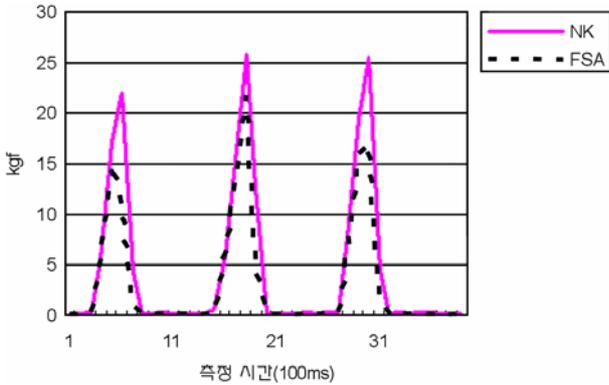


그림 7. 잡기 동작에 따른 힘 사용 측정 결과

4. 토 의

손동작에 따른 FSA 시스템의 사용 성능을 평가하기 위해 본 연구에서는 NK dynamometer의 측정값을 기준으로 FSA 시스템 측정값을 비교 평가하였다. FSA 평가에 적용한 센서 성능 평가 방법을 NK dynamometer에 적용한 결과, 안정성과 반복성의 변동계수가 1% 미만이고 표준오차가 0.0002kgf 미만으로 나타나, NK dynamometer가 높은 안

정성, 반복성, 정확성을 갖는 장비로 파악되었다.

분동을 사용한 FSA 시스템의 센서 성능 평가 결과, 안정성과 선형성은 높았으나 반복성과 정확성이 낮게 나타났다. 안정성을 나타내는 변동계수가 0.02 미만으로 평가되었고, 선형성을 나타내는 회귀결정계수가 0.95로 분석되어 우수한 성능을 보였다. 그러나 반복성의 변동계수가 분동무게에 따라 0.11~0.19로 평가되어 NexGen(2004)에서 제시하고 있는 0.10 변동계수보다 크게 나타났고, 정확성 측면에서 FSA 시스템의 센서 측정값이 분동무게보다 14~26% 크게 측정하는 것으로 평가되었다.

손동작에 따른 FSA 시스템 성능 평가 결과, 선형성은 높았으나 측정에 동원되는 센서의 수가 증가할수록 정확성이 낮게 나타났다. FSA 측정값과 NK dynamometer 측정값 간의 회귀결정계수가 0.82 이상으로 분석되어 선형성이 높았다. 그러나 정확성 측면에서 측정에 동원되는 센서의 수가 증가할수록 FSA 측정값은 NK dynamometer의 측정값보다 작게 나타났다. 따라서, 잡기 동작과 같이 많은 센서가 측정에 사용될 경우 FSA 시스템으로 측정된 힘 사용 측정값을 절대적 크기로 분석하는 것은 바람직하지 않으며, 측정값을 상대적으로 비교하는 것이 의미를 가진다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 손 힘 사용을 측정하는 FSA 시스템의 센서 성능과 손동작에 따른 측정 성능을 평가하였다. 개별 센서 성능은 3개 무게의 분동을 사용하여 평가되었으며, 손동작에 따른 측정 시스템의 성능은 load cell을 사용한 NK dynamometer 측정값을 기준으로 비교평가 되었다. 평가결과, FSA 시스템 센서는 안정성과 선형성 측면에서 성능이 높았으나, 정확성과 반복성 측면에서 한계점이 파악되었다. 또한, 손동작에 따른 측정 성능 평가에서 FSA 측정값은 전반적으로 NK dynamometer의 측정값보다 작았으며, 측정에 동원되는 센서의 수가 증가할수록 정확성이 낮게 나타났다. 따라서, FSA 시스템으로부터 측정된 값의 절대적 크기를 비교하는 것 보다는 상대적 크기를 비교하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참고 문헌

Ayoub, M. A., Ergonomic deficiencies: I. Pain at work. *Journal of Occupa-*

tional Medicine, 32(1), 52-57, 1990.

AboutTime, Introduction about AboutTime. Retrived April 1, 2004 from <http://www.arachnoid.com/abouttime/>, 2004.

Kessler, G. D., Hodges, L. F. and Walker, N., Evaluation of the cyberglove as a whole-hand input device. *ACM Transactions on Computer-Human Interface*, 2(4), 263-283, 1995.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *Musculoskeletal Disorders (MSDs) and Workplace Factors: A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back* (2nd printing). Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services (DHHS), 1997.

NexGen, FSA glove pressure mapping system. Retrieved April 1, 2004 from <http://www.nexgenergo.com/ergonomics/fsaglove.html>, 2004.

NK BioTechnical Corporation, *NK Dynamometer User's Manual*, 2003.

Putz-Anderson, V., *Cumulative Trauma Disorders: A Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs*. Taylor & Francis: New York, 1988.

Quam, D., Williams, G., Agnew, J. and Browne, P., An experimental determination of human hand accuracy with a dataglove. In *Proceedings of the Human Factors Society 33rd Annual Meeting. Human Factors Society, Santa Monica, Calif.*, 315-319, 1989.

Wise, S., Gardner, W., Sabelman, E., Valainis, E., Wong, Y., Glass, K., Drace, J. and Rosen, J., Evaluation of a fiber optic glove for semi-automated goniometric measurements. *J. Rehab. Res. Devel.*, 27(4), 411-424, 1990.

Yun, M. H., *A Hand Posture Measurement System for the Analysis of Manual Tool Handling Tasks*. Unpublished doctoral dissertation, Pennsylvania State University, Pennsylvania, 1994.

● 저자 소개 ●

❖ 정 기 효 ❖

2003년 금오공과대학교 산업시스템공학과 학사
 2005년 포항공과대학교 산업공학과 석사
 현 재 포항공과대학교 산업경영공학과 박사과정
 관심분야: 인간공학적 제품설계, 산업인간공학

❖ 유 희 천 ❖

1988년 서울대학교 산업공학과 학사
 1990년 서울대학교 산업공학과 석사
 1999년 미국 펜실바니아 주립대학교 산업공학과 박사
 1999년~2002년 미국 위치타대학교 산업공학과 조교수
 현 재 포항공과대학교 산업경영공학과 조교수
 관심분야: 인간공학적 제품설계기술, 사용자 중심의 제품설계, 작업관련성 근골격계질환 예방, 사용자 인터페이스 설계용 디지털 인체모형, 가상현실 기술의 제품설계 응용

❖ 권 오 채 ❖

1997년 성균관대학교 산업공학과 학사
 1999년 포항공과대학교 산업공학과 석사
 2005년 포항공과대학교 산업공학과 박사
 현 재 포항공과대학교 기계산업공학부 연구원
 관심분야: 산업인간공학, 생체공학, 인간공학적 제품설계

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2004년 08월 02일

논문게재승인일 (Date Accepted) : 2005년 05월 12일