JESK J Ergon Soc Korea 2022; 41(3): 221-236
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2022.41.3.221
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

An Ergonomic Analysis of Ultrasound Probe Designs

Hayoung Jung[1], Nahyun Lee[2], Jinho Yim[3], Seungju Lee[4], Heecheon You[1]

[1]Pohang University of Science and Technology, Department of Industrial and Management Engineering, Pohang, 37673
[2]SK Broadband Co., Mobile B tv Team, Seoul, 04637
[3]Kookmin University, Department of Smart Experience Design, Seoul, 02707
[4]SAMSUNG MEDISON Co., System Development Group, Seoul, 05340

초음파용 프로브 설계의 인간공학적 분석

정하영[1], 이나현[2], 임진호[3], 이승주[4], 유희천[1]

[1]포항공과대학교 산업경영공학과
[2]SK브로드밴드 모바일 B tv팀
[3]국민대학교 테크노디자인전문대학원 스마트경험디자인학과
[4]삼성메디슨 시스템개발팀

Corresponding Author
Heecheon You
Pohang University of Science and Technology, Department of Industrial and Management Engineering, Pohang, 37673
Email : hcyou@postech.ac.kr

Received : April 22, 2022
Revised : April 25, 2022
Accepted : May 16, 2022

Objective: The present study is intended to analyze the design characteristics of ultrasonic probes in different sizes and shapes and identify the preferred design characteristics by ergonomic evaluation.

Background: The use of an ultrasound probe among sonographers in improper postures with high repetitions for long periods of time has resulted in a high incidence of musculoskeletal symptoms and/or disorders.

Method: While sonographers (n = 12) simulated ultrasound scanning tasks with two linear array probes (small-flat, SF; large-curved, LC) in different sizes and shapes by applying forces of 20±4N, EMG activities, body motions, and grip postures were measured. After completing the ultrasound simulation tasks, a comparative evaluation of subjective satisfaction with the two probe designs was conducted.

Results: The SF probe required a larger range of motion at the elbow (up to 9.9° on average), higher RMS EMG levels (-1.8~48.4%) during the probe rotation task at the shoulder (pectoralis and infraspinatus), neck (right/left sterno-cleido-mastoid and trapezius), and upper-arm (biceps), and larger finger joint angles (-6.3~15.8°) than the LC probe.

Conclusion: The SF probe was preferred to the LC probe in terms of grip fit, the opposite was found in terms of the efficiency of force transfer.

Application: The analysis and evaluation methods of ultrasound probe design and the identification of the preferred design characteristics of linear array probe will be of use to develop ergonomic probe designs that can reduce musculoskeletal symptoms and disorders among sonographers.

Keywords: Ultrasound probe, Ergonomic assessment, Design analysis, Electromyography, Motion analysis

Copyright@2022 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

1. Introduction

초음파 검사 시 지속적으로 사용되는 초음파 probe는 초음파사의 근골격계 질환 예방 및 사용성 향상을 위하여 인간공학적 설계가 필요하다. 초음파 probe는 환자의 인체 부위를 초음파 scan 시 초음파 신호를 송수신하는 장비이다. 부적절한 작업 환경에서 장기간에 걸쳐 초음파 probe의 반복적 사용 동작과 과도한 힘 적용으로 인해 초음파 기사(sonographer)의 근골격계 질환 발생률이 높은 것으로 파악되었다(Baker and Coffin, 2013; Coffin, 2014; Choi et al., 2016; Dodgeon et al., 2002). 예를 들어, Evans et al. (2009)는 초음파 기사의 90.4%가 어깨(74.6%), 목(65.8%), 손목(49.7%) 등에 통증을 경험하였으며 이 중 48%는 근골격계 질환을 진단 받았다고 보고하였다. 초음파 기사가 겪는 근골격계 통증의 위험 요소는 반복적인 동작, 부적절한 자세, 정적 근수축, 과도한 힘 사용, 장시간의 초음파 scan 작업, 부적절한 설계의 초음파 장비 및 작업 환경 등을 포함하는 것으로 파악되었다(Bernard, 1997; Burnett and Campbell-Kyureghyan, 2010; Punnett and Wegman, 2004). 인간공학적으로 설계된 초음파 probe는 사용 편의성, 조작 용이성, 적절한 힘 사용, 그리고 주관적 만족도를 향상시킬 수 있으므로(Harih and Dolsak, 2014; Böhlemann et al., 1994; Kong et al., 2019) 사용성 향상 및 초음파 probe 사용자의 근골격계 질환 예방에 기여할 수 있다.

초음파 작업의 근골격계 질환 위험 수준을 줄이기 위하여 초음파 작업 특성 및 초음파 probe 설계 특성에 따른 신체적 부하의 영향에 대한 다양한 인간공학적 평가가 수행되었다. Burnett and Campbell-Kyureghyan (2010)은 갑상선, 복부, 심부정맥 부위에 대한 초음파 작업의 신체적 부하를 비교 평가하여 갑상선 및 복부 부위 대비 심부정맥 부위의 경우 52~92%의 보다 높은 누르는 힘이 요구되고 손목, 팔꿈치, 그리고 아래팔 관절의 중립 이탈은 갑상선, 심부정맥, 복부 부위의 초음파 작업 시 각각 가장 크게 발생하는 것을 파악하였다. Village and Trask (2007)는 초음파 작업 시의 동작, EMG, 그리고 grip force를 평가하여 복부, 다리, 자궁 부위 대비 경동맥 부위 검사 작업 시 어깨 외회전이 가장 크고, 초음파 작업이 반복될수록 어깨 근육의 %MVC가 10~30% 증가하며, 40±30N의 grip force가 발생하는 것을 파악하였다. 한편, Paschoarelli et al. (2008)에 따르면 인간공학적 grip 형상 및 회전 mechanism이 적용된 신규 linear array probe가 손목 동작 및 주관적 평가에서 기존 probe 대비 유방 초음파 검사 시 검사자의 손목 움직임을 줄이고 불편감을 감소시키는 것을 파악하였다. Mazzola et al. (2016)은 인간공학적 linear array probe의 grip 형상을 개발하고 초음파 검사 시 손 관절에 작용하는 torque를 digital human model을 이용하여 평가하여 신규 probe 형상에서 기존 probe 형상에 비해 전반적으로 torque가 감소되며 손, 손목, 아래팔의 불편이 감소된 것을 파악하였다.

초음파 probe 설계 특성을 분석하고 인간공학적 평가를 통하여 사용성과 신체적 부하 측면에서 선호되는 초음파 probe 설계 특성의 파악이 필요하다. Burnett and Campbell-Kyureghyan (2010)과 Village and Trask (2007)은 초음파 사용자의 신체 부하를 평가하기 위하여 초음파 검사 작업 시의 동작, EMG, grip force, push force를 측정하고 초음파 작업 간 신체 부하 차이를 분석하였으나 probe 설계에 따른 사용성 및 신체적 부하 측면에서 비교 평가는 수행하지 않았다. Paschoarelli et al. (2008)과 Mazzola et al. (2016)은 손바닥 부위를 접촉하여 조작하도록 설계되어 grip force를 분산시키는 특성을 가진 신규 probe 형상이 기존 probe와 비교하여 손목 동작, torque, 주관적 만족도 측면에서 선호되는 것을 파악하였지만 제안된 probe의 크기, 형상, 무게 등과 같은 설계 특성을 세분화하여 파악하지 못한 한계를 지닌다. 사용성이 향상된 인간공학적 초음파 probe의 설계를 위해서는 초음파 probe의 물리적 사용자 인터페이스를 이해하여 사용성에 영향을 미치는 설계 인자를 분석하고, 객관적 평가 방법과 주관적 평가 방법을 종합적으로 평가하여 선호 설계 특성을 파악하는 것이 필요하다.

본 연구는 linear array probe에 대하여 초음파 probe의 사용성 및 신체적 부하에 영향을 미치는 설계 인자를 분석하고 객관적 방법 및 주관적 방법을 이용한 인간공학적 평가를 통해 probe의 선호 설계 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구는 초음파 probe 사용성과 신체적 부하에 영향을 미치는 설계 인자를 파악하고 측정하였다. 본 연구는 초음파 probe에 대해 초음파 검사 작업 환경 및 조작 동작을 고려하고, 동작, EMG, 파지 자세, 주관적 만족도 측면에서 인간공학적 평가를 수행하여 초음파 probe의 선호 설계 특성을 파악하였다.

2. Method

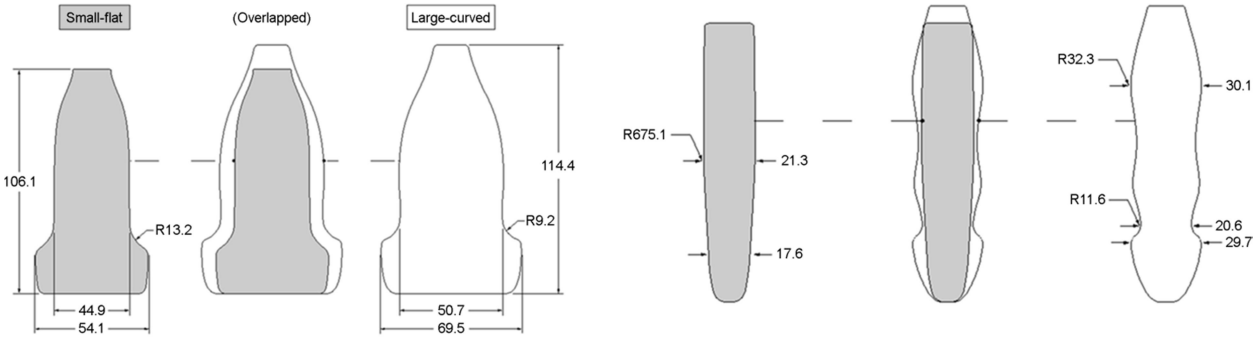
2.1 Participants

본 실험에 근골격계 질환 병력이 없고 초음파 기사 근무 경력이 5년 이상이며 다양한 신장을 가진 한국인 여성 초음파 기사 12명(연

령 = 36.3±4.6세; 초음파사 근무 경력 = 9.9±3.8년; 신장 = 163.2±5.7cm)이 모집되었다. 실험 참여자의 손 길이(170.8±8.2mm)는 Size Korea (KATS, 2010)의 20~40대 여성(n = 1,675)의 손 길이(170.2±7.2mm)와 비교 시 평균과 분산 측면에서 통계적으로 유사한 것으로 파악되었다(평균 차이 검정: t [1685] = 0.29, p = 0.77; 분산 차이 검정: F [11, 1674] = 1.29, p = 0.45). 실험 참여자들은 본 실험 시작 전 실험의 목적과 내용에 대해 충분히 숙지하고 실험 참여 동의서에 서명하였다. 본 연구의 실험 프로토콜은 기관생명윤리위원회의 승인(PIRB-2016-E036)을 받았다.

2.2 Materials

초음파 probe 설계 특성에 따른 사용성 및 신체적 부하의 변화를 평가하기 위하여 linear array probe들 중 크기가 작고 손잡이가 평평한 형상(small-flat type, SF)의 probe와 크기가 크고 손잡이가 굴곡진 형상(large-curved type, LC)의 probe가 실험 대상으로 선정되었다(Figure 1 참조). Artec Eva 3D scanner (Artec Group, Palo Alto: CA, USA)을 활용하여 획득한 probe 스캔 데이터에 Alias Automotive 2012 (Autodesk Inc., San Rafael: CA, USA)를 활용하여 probe의 사용성에 영향을 주는 probe의 세부 부위별 주요 길이, 높이, 둘레, 곡률 설계 제원이 측정되었다(Figure 1 참조). SF probe는 LC probe에 비해 전체 높이는 8.3mm, grip부 최대 너비는 5.9mm, grip부 최대 두께는 8.8mm, head부 최대 너비는 15.4mm, head부 최대 두께는 12.0mm로 작은 반면, grip부 측면 최대돌출점 곡률은 642.7mm, grip부 전측 최대함몰점 곡률은 385.5mm, grip부 정면 최대돌출점 곡률은 219.4mm로 큰 것으로 파악되었다. 본 연구에서 인간공학적 평가를 위해 활용된 SF 및 LC probe 목업은 상용 probe 제품을 참고하여 케이블 무게를 제외하고 120g으로 제작되었다.



(a) Front view (b) Side view

Figure 1. Comparison of small-flat and large-curved ultrasound probes (unit: mm)

2.3 Apparatus

Linear array 초음파 probe 설계의 인간공학적 평가를 위해 초음파 영상 진단 장비, 초음파 검사용 침상, phantom frame, probe 조작 힘 monitoring 장치, 의자가 실제 검사 환경과 유사하게 배치되었다(Figure 2 참조). 초음파 영상 진단 장비 iU22 Ultrasound system (Royal Philips Electronics N.V., Amsterdam, Netherlands), 초음파 검사용 bed(길이 × 너비 × 높이 = 1800 × 730 × 650mm), 그리고 의자(높이 범위 = 440~580mm)는 probe를 사용한 유방 검사 시의 전형적 배치 형태를 따라 위치되었다. 검사용 bed 위에는 breast silicon phantom(길이 × 너비 × 높이 = 100 × 100 × 30mm; GI-720, GI Silicone, Taiwan)과 aluminum profile을 사용하여 제작된 frame(우측 높이 = 190mm, 좌측 높이 = 270mm)이 위치되었다. 우측 breast silicone phantom 높이(220mm)와 좌측 breast silicone phantom 높이(300mm)는 전형적 probe 사용 자세와 과도한 probe 사용 자세에서의 사용성을 분석하기 위하여 평균적 크기(50th %ile)의 환자와 큰 환자(95th %ile)에 대한 초음파 검사를 모의 수행할 수 있도록 각각 설정되었다(Figure 3 참조). 구체적으로 설명하면, 본 연구에서 phantom 높이는 CAESAR data (Robinette et al., 2002)의 30~60대 미국인 여성(n = 950)를 기준으로 젖가슴 두께와 누운 자세에서의 젖가슴 두께 변형량(가령 7%)을 고려하여 설정되었는데, CAESAR data에서 bust depth가 측정되지 않아 2010년 Size Korea의 30~60대 한국인 여성(n = 1,834) 데이터를 사용하여 도출된 젖가슴 두께 추정 회귀식(젖가슴 두께 = - 4.95 - 0.0315 × 키 - 0.0360 × 가슴둘레

+ 0.316 × 젖가슴둘레 + 0.0240 × 젖가슴아래둘레 + 0.0545 × 젖꼭지사이수평길이, adjusted R^2 = 81.5%)을 적용하였다. 마지막으로, probe 조작힘 monitoring을 위해 실험 참여자 정면에 컴퓨터 모니터가 위치되었으며, 의자 높이는 실험 참여자 본인에게 적절하게 조절되도록 하였다.

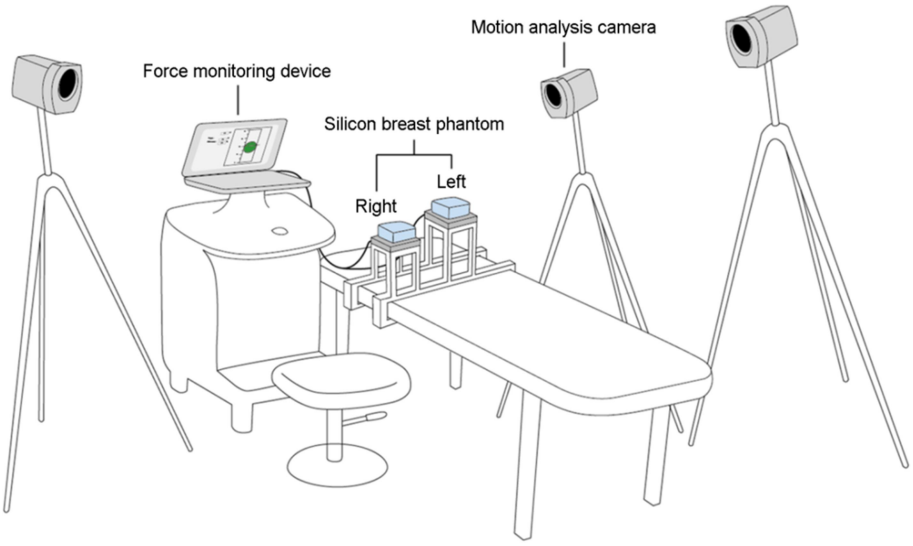
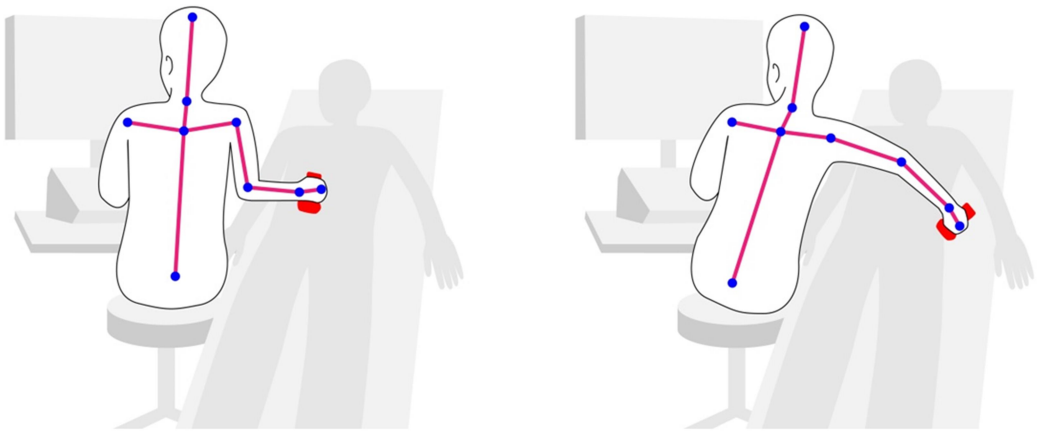


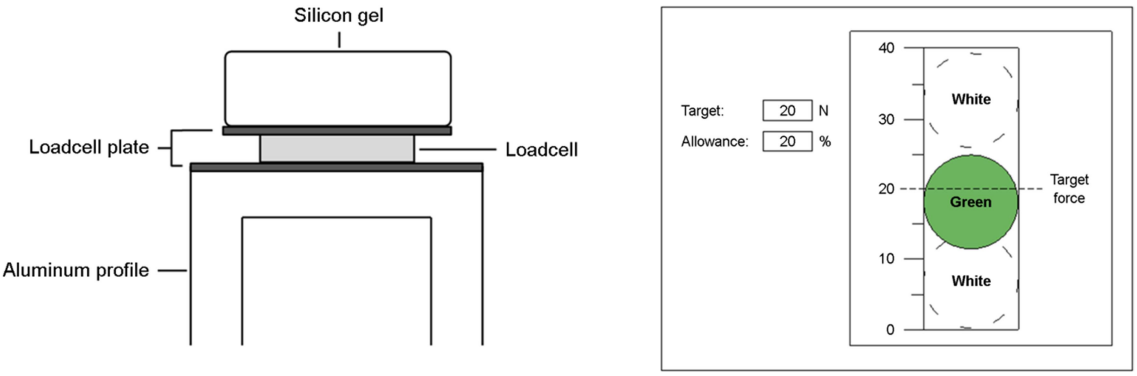
Figure 2. Experimental layout for the ergonomic evaluation of an ultra-sound probe design



(a) Typical working posture (b) Extreme working posture

Figure 3. Working posture of ultra-sound probe

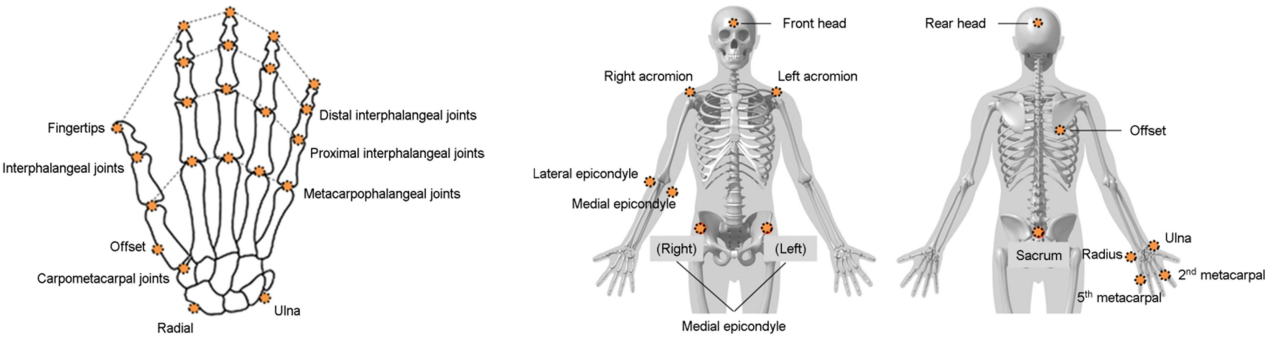
실험 참여자가 일정한 범위의 힘(20±4N)을 적용하여 probe 사용 동작을 모의 수행할 수 있도록 하기 위하여 Figure 4와 같은 silicone phantom과 force monitoring system이 활용되었다. 모의 실험 시 probe 조작 힘은 linear array probe를 사용한 유방 검사 시 사용되는 조작 힘에 대한 초음파 기사들과 설계 전문가의 의견을 반영하여 설정되었다. Probe 사용 동작 시 적용된 힘은 phantom의 하부 중앙에 one-axis loadcell (HX711 Load Cell Amplifier, AVIA Semiconductor Ltd., China)을 설치하여 측정되었으며, Visual Basic 6.0를 활용하여 개발된 program을 통해 실험 참여자가 실시간으로 적용된 힘을 확인할 수 있도록 컴퓨터 모니터를 통해 표시(힘 적용 허용 범위 내의 경우 초록색; 허용 범위 밖의 경우 흰색)되었다.



(a) Silicon breast phantom (b) Force monitoring program

Figure 4. Force monitoring system for ultra-sound probe operation

Probe 사용 시 실험 참여자의 신체 동작과 파지 손 자세는 10대의 Osprey Motion Analysis System (Motion Analysis Corp, Santa Rosa: CA, USA; frame rates: 50Hz)을 사용하여 측정되었다. Probe 사용 동작 분석을 위해 실험 참여자의 신체에 14개의 reflective markers (front head, rear head, right acromion, left acromion, offset, lateral epicondyle, medial epicondyle, right anterior superior iliac spine [ASIS], left ASIS, sacrum, radius, ulna, 5th metacarpal, 2nd metacarpal)가 부착되었다(Figure 5.b 참조). 목, 어깨, 허리, 팔꿈치, 그리고 손목 중심에 local coordinate system을 정의하여 probe 사용 시 어깨의 flexion/extension, abduction/adduction, internal/external rotation, 목의 flexion/extension, right/left bending, right/left rotation, 허리의 flexion/extension, right/left bending, right/left rotation, 팔꿈치의 flexion/extension, 그리고 손목의 flexion/extension, ulnar/radial deviation, internal/external rotation 각도가 측정되었다. 측정된 reflective marker의 궤적은 noise에 의한 영향을 제거하기 위하여 fourth-order Butterworth filter (cut-off frequency = 5Hz)를 사용하여 filtering 되었다. Probe 파지 손 자세 분석을 위해 실험 참여자의 오른손에 23개 reflective markers (5 fingertips, 1 interphalangeal [IP] joint, 4 distal interphalangeal [DIP] joints, 4 proximal interphalangeal [PIP] joints, 5 metacarpophalangeal [MCP] joints, 1 carpometacarpal [CMC] joint, offset, ulna, radius)를 부착하여(Figure 5.a 참조), 엄지의 metacarpal adduction, extension, proximal phalange extension, distal phalange extension과 검지, 중지, 약지, 그리고 소지의 proximal phalange abduction, flexion, middle phalange flexion, distal phalange flexion 각도가 측정되었다.



(a) 23 reflective markers on the hand (b) Reflective markers on the whole body

Figure 5. Locations of reflective markers: (a) 23 markers on the hand, (b) 14 markers on the whole body

Probe 사용 시 실험 참여자의 근전도는 EMG 측정 장비(TELEMYO DTS Telemetry, Noraxon, Scottsdale: AZ, USA; frame rates: 1,000Hz)를 사용하여 측정되었다. EMG 측정 전극과 무선 신호 송신 모듈이 실험 참여자의 deltoid, pectoralis, infraspinatus, right sterno-cleido-mastoid (SCM), left SCM, trapezius, quadratus lumborum, biceps, supinator, pronator, flexor carpi ulnaris (FCU), flexor carpi radialis (FCR), extensor digitorum, flexor digitorum 부위에 부착되었다(Figure 6). 측정된 EMG 신호는 bandpass filter (lower cut-off frequency: 10Hz; upper cut-off frequency: 400Hz)를 사용하여 noise가 제거되었고 진폭 분석을 위하여 rectification 후 root mean square (time window: 400ms)를 사용하여 smoothing되었다.

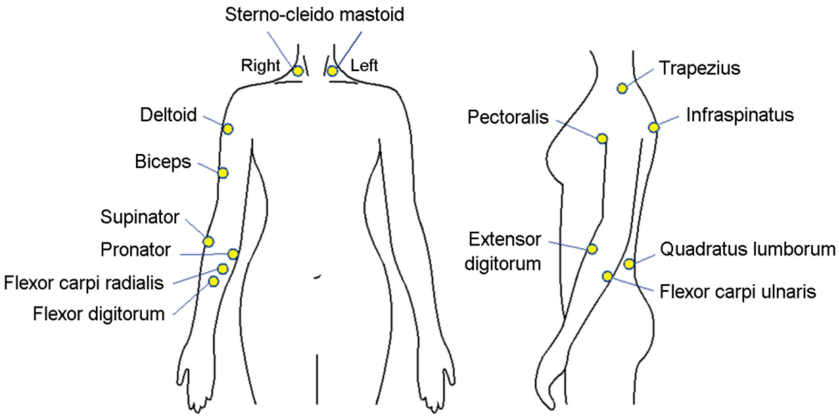


Figure 6. Locations of 14 EMG electrodes

Probe의 주관적 만족도는 인간공학적 평가 기준과 평가 대상 probe 부위와의 연관성 분석을 통해 개발된 평가 설문지를 사용하여 LC probe 대비 SF probe의 만족도가 상대평가 되었다. 평가 항목은 Table 1과 같이 인체측정학적 측면, 생체역학적 측면, 감성적 측면, 그리고 전반적 만족도의 10가지 인간공학적 평가 기준과 probe의 head부와 grip부 사이 연관성 분석을 통해 선정된 평가 항목으로 구성되었다. 예를 들어, probe가 잘 잡히는 정도를 평가하는 감성적 측면의 그립감 항목은 grip부와 연관성이 높으나 head부와는 연관성이 적으므로 grip부만을 대상으로 평가하도록 하였다. 인체측정학적 측면의 크기 적절성과 감성 측면의 곡률 적절성에 대한 평가 항목은 probe 설계 인자와 연관하여 평가하도록 세분화되었다. 예를 들어, head부의 크기 적절성은 head부의 크기 관련 설계 인자인 너비와 두께를 고려하여 head부 최대 너비 적절성과 head부 최대 두께 적절성으로 세분화되어 평가되었다. LC probe 대비 SF probe의 만족도 상대평가에는 7-point bipolar scale(-3: 매우 나쁨, 0: 동등, 3: 매우 좋음)이 사용되어 Figure 7과 같은 평가 설문지가 개발되었다.

Table 1. Relationship analysis between ergonomic criteria and probe parts

Ergonomic criteria		Description	Probe part	
			Head	Grip
Anthropometric aspects	Adequacy of size	Degree of size adequacy of probe for grip	O	O
	Adequacy of shape	Degree of shape adequacy of probe for grip	O	O
Biomechanical aspects	Adequacy of posture	Degree of adequacy of posture in probe use	O	O
	Adequacy of force exertion	Degree of adequacy of force exertion in probe use	O	O
	Adequacy of pressure distribution	Degree of adequacy of pressure distribution in probe use		O
	Ease of operation	Degree of ease of operation of probe	O	O

Table 1. Relationship analysis between ergonomic criteria and probe parts (continued)

Ergonomic criteria		Description	Probe part	
			Head	Grip
Emotional aspects	Adequacy of curvature	Degree of adequacy of probe curvature	O	O
	Grip comfort	Degree of grip comfort in probe use		O
Overall satisfaction		Degree of overall satisfaction in probe use	O	O

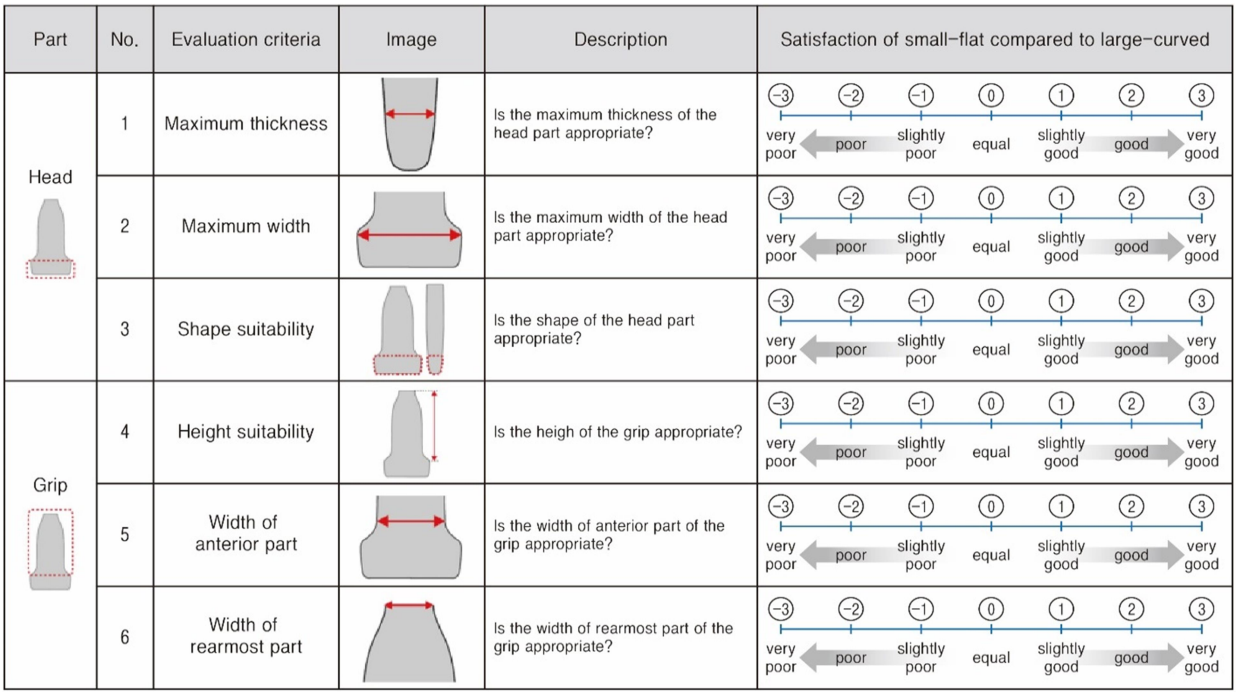
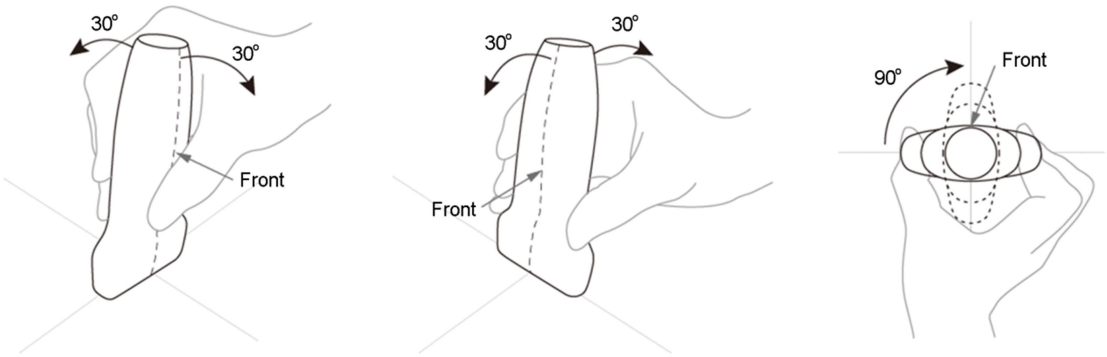


Figure 7. Subjective satisfaction questionnaire of ultra-sound probe (illustrated)

2.4 Experimental procedure

본 실험은 (1) 실험 준비 및 인체 측정, (2) probe 사용 시 근전도와 신체 동작 측정, (3) probe 파지 손 자세 측정, (4) 주관적 만족도 평가, 그리고 (5) 사후 설문의 다섯 단계를 통해 수행되었다. 실험 준비 및 인체 측정 단계에서는 실험 목적과 방법을 실험 참여자에게 설명한 후 실험 참여 동의서에 서명을 받았다. 실험 참여자가 실험복으로 환복 후 신장, 몸무게, 손 길이가 측정되었으며, 신체 동작과 근전도 측정을 위한 reflective markers와 EMG 측정 전극 및 무선 신호 송신 모듈이 실험 참여자의 신체에 부착되었다. 근전도 및 동작 측정 단계에서는 우측 breast phantom과 좌측 breast phantom을 대상으로 narrow grip tilt, wide grip tilt, 그리고 wide grip rotation을 각각 2회 반복하는 동안 실험 참여자의 근전도와 신체 동작이 동시 측정되었다. 전형적 작업부하 조건과 과도한 작업부하 조건에서 신체적 부하를 파악하기 위하여, 전형적 작업부하 사용 자세로 실험 참여자로부터 가깝고 높이가 낮은 우측 breast phantom을 대상으로 probe를 조작하도록 하였고 과도한 작업부하 사용 자세로 실험 참여자로부터 상대적으로 멀고 높이가 높은 좌측 breast phantom을 대상으로 probe를 조작하도록 하였다. Narrow grip tilt 동작은 grip부의 앞뒷면을 pinch grip하고 좌우측으로 30° tilt하는 동작(Figure 8.a), wide grip tilt 동작은 grip부의 측면을 pinch grip하고 전후측으로 30° tilt하는 동작(Figure 8.b), 그리고 wide grip rotation 동작은 grip부의 측면을 pinch grip하고 시계 방향으로 90° rotation하는 동작(Figure 8.c)이다. 모의 작업의 수행 시간은 각 동작당 3~4초

로 통제되었으며, probe 간의 평가 순서 및 probe 조작 동작 순서는 학습 효과 및 피로 효과를 최소화하기 위하여 randomization 되었다.



(a) Tilt with narrow grip (b) Tilt with wide grip (c) Rotation

Figure 8. Probe operating tasks

파지 손 자세 측정 단계에서는 reflective markers가 실험 참여자의 오른손에 부착된 후 narrow grip과 wide grip 시 파지 손 자세가 측정되었다. 파지 손 자세는 실험 참여자가 probe를 파지하고 자연스럽게 사용 동작을 취하여 실제 검사 시와 유사한 손 자세를 취하도록 한 후 동작이 정지된 상태에서 측정되었다. 주관적 만족도 평가 단계에서는 LC probe 대비 SF probe에 대한 주관적 만족도를 task 수행 경험을 바탕으로 평가 설문지를 이용하여 상대평가 되었다. 마지막으로, probe의 선호 설계 특성에 대해 사후 설문이 실시되었다.

2.5 Statistical analysis

본 연구에서는 probe 설계 형상 특성, probe 사용 자세, 사용 작업 유형에 따른 근전도, 신체 동작, 파지 손 자세, 그리고 주관적 만족도의 통계적 유의성이 평가되었다. 본 연구의 독립 변수로는 probe 형상(2수준: small-flat, large-curved), probe 사용 자세(2수준: 전형적 사용 자세, 과도한 사용 자세), probe 사용 작업(3수준: tilt with narrow grip, tilt with wide grip, rotation)가 선정되었다. 종속 변수로는 근육 14종의 근전도 신호, 전신 관절 13종의 각도, 손가락 관절 20종, 사용성 평가 항목 23종에 대한 주관적 만족도가 선정되었다. Probe 설계 형상 특성, probe 사용 자세, 사용 작업 유형에 따른 근전도, 신체 동작, 파지 손 자세, 그리고 주관적 만족도의 통계적 차이는 유의수준 0.05에서 paired-t test에 의해 분석되었다. 본 연구의 통계 분석은 MINITAB 14 (Minitab Inc., State College: PA, USA)을 이용하여 수행되었다.

3. Results

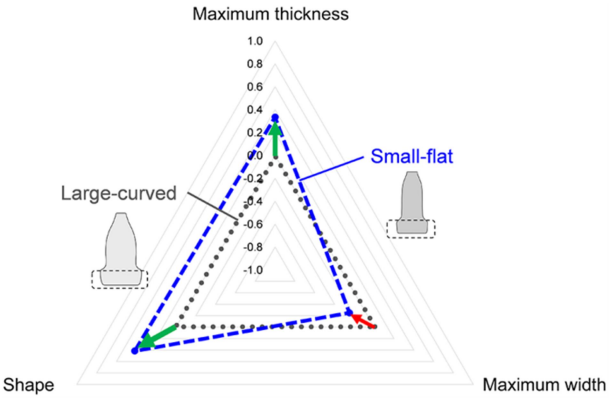
3.1 Subjective satisfaction

Probe head부의 경우, SF probe와 LC probe는 전반적 형태, 최대 두께, 그리고 최대 너비에 대해 통계적으로 유의하지 않은 주관적 만족도 평균 차이(mean difference, MD)를 보였다(Figure 9.a 참조). LC probe 대비 SF probe에 대한 주관적 만족도 MD ± SD는 형태 적합성 측면에서 0.4±1.0, 최대 두께 적절성 측면에서 0.3±1.5, 그리고 최대 너비 적절성 측면에서 -0.3±1.9로 α = 0.05에서 통계적으로 유의하지 않은 주관적 만족도 차이(MD < 0.5)를 보였다.

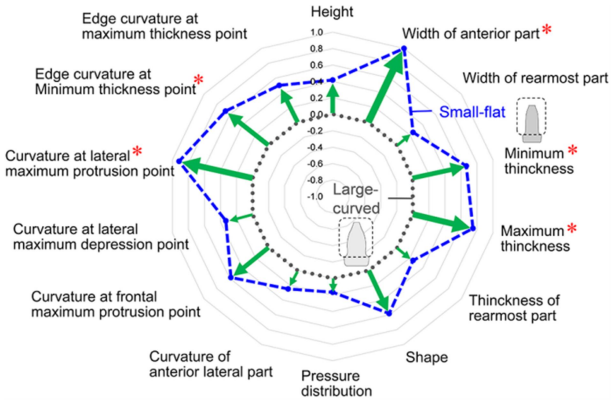
Grip부의 경우, SF probe가 LC probe에 비해 전반적으로 선호(MD = 0.3~1.0) 되었는데 특히 두께, 너비, 그리고 곡률 측면에서 통계적으로 유의한 선호를 보였다(Figure 9.b 참조). SF probe는 LC probe에 비해 높이, 최후측 너비, 최후측 두께, 형태, 압력분산, 전측 측면

곡률, 정면 최대돌출점 곡률, 측면 최대함몰점 곡률, 최대 두께 지점 모서리 곡률 측면에서 약간의 선호 우위(MD = 0.3~0.5)를 보였으나 통계적으로 유의하지 않았다. 반면, LC probe 대비 SF probe에 대한 주관적 만족도 MD ± SD는 전측 너비 측면에서 1.0±1.9 (t [11] = 2.25, p = 0.046), 최소 두께 측면에서 0.7±0.9 (t [11]= 2.60, p = 0.025), 최대 두께 측면에서 0.8±1.1 (t [11] = 2.28, p = 0.043), 최소 두께 지점 모서리 곡률 측면에서 0.7±0.9 (t [11] = 2.60, p = 0.025), 측면 최대돌출점 곡률 측면에서 0.9±1.2 (t [11] = 2.73, p = 0.020)로 통계적으로 유의한 선호를 보였다.

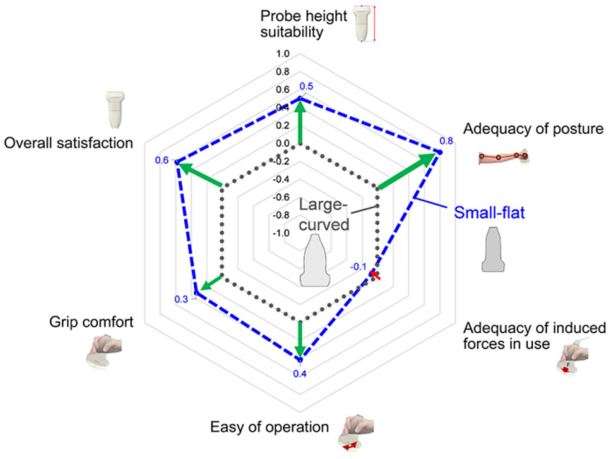
마지막으로, SF probe가 LC probe에 비해 힘 사용 적절성을 제외한 전반적 만족도, 자세 적절성, 그립감, 조작 용이성 측면에서 높은 선호도(MD = 0.3~0.8)를 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다(Figure 9.c 참조). LC probe 대비 SF probe에 대한 주관적 만족도 MD ± SD는 probe 높이 적절성 측면에서 0.5±0.9, 자세 적합성 측면에서 0.8±1.3, 조작 용이성 측면에서 0.4±1.2, 그립감 측면에서 0.3±1.4점, 전반적 만족도 측면에서 0.6±1.7점 높아 전반적으로 선호되었으나 통계적으로 유의하지 않았다. 한편, LC probe 대비 SF probe는 힘 사용 적절성 측면에서 유사하게(MD = 0.1±0.7) 선호되는 것으로 파악되었다.



(a) Head part



(b) Grip part



(c) Overall probe

Figure 9. Satisfaction comparison of small-flat type (SF) and large-curved type (LC) ultra-sound probe designs (*p < 0.05)

3.2 Electromyography

SF probe는 과도한 조작 자세에서의 초음파 검사 작업 수행 또는 신체적 부하가 큰 초음파 검사 동작 시 어깨, 목, 윗팔 부위에서 LC

probe 대비 높은 근육 부하를 발생시키는 것으로 파악되었다(Figure 10 참조). 전형적인 조작 자세로 SF probe를 이용한 초음파 작업 시 EMG RMS는 deltoid, pectoralis, infraspinatus, right/left SCM, trapezius, biceps, quadratus lumborum, supinator, pronator, FCU, FCR, extensor digitorum, flexor digitorum 근육에서 LC probe 대비 평균적으로 -21.3~22.6%의 차이를 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 과도한 조작 자세로 SF probe를 이용한 초음파 작업 시 EMG RMS는 deltoid, quadratus lumborum, supinator, pronator, FCU, FCR, extensor digitorum, flexor digitorum 근육에서 LC probe 대비 평균적으로 -7.3~7.0%의 차이를 보이며 유사하였으나, pectoralis, infraspinatus, right/left SCM, trapezius, biceps 근육에서는 -1.8~48.4%의 상대적으로 큰 차이를 보였다. LC probe 대비 SF probe의 EMG RMS 차이는 pectoralis, infraspinatus, right SCM, left SCM, trapezius, biceps 근육에서는 load가 큰 tilt with narrow grip (MD =

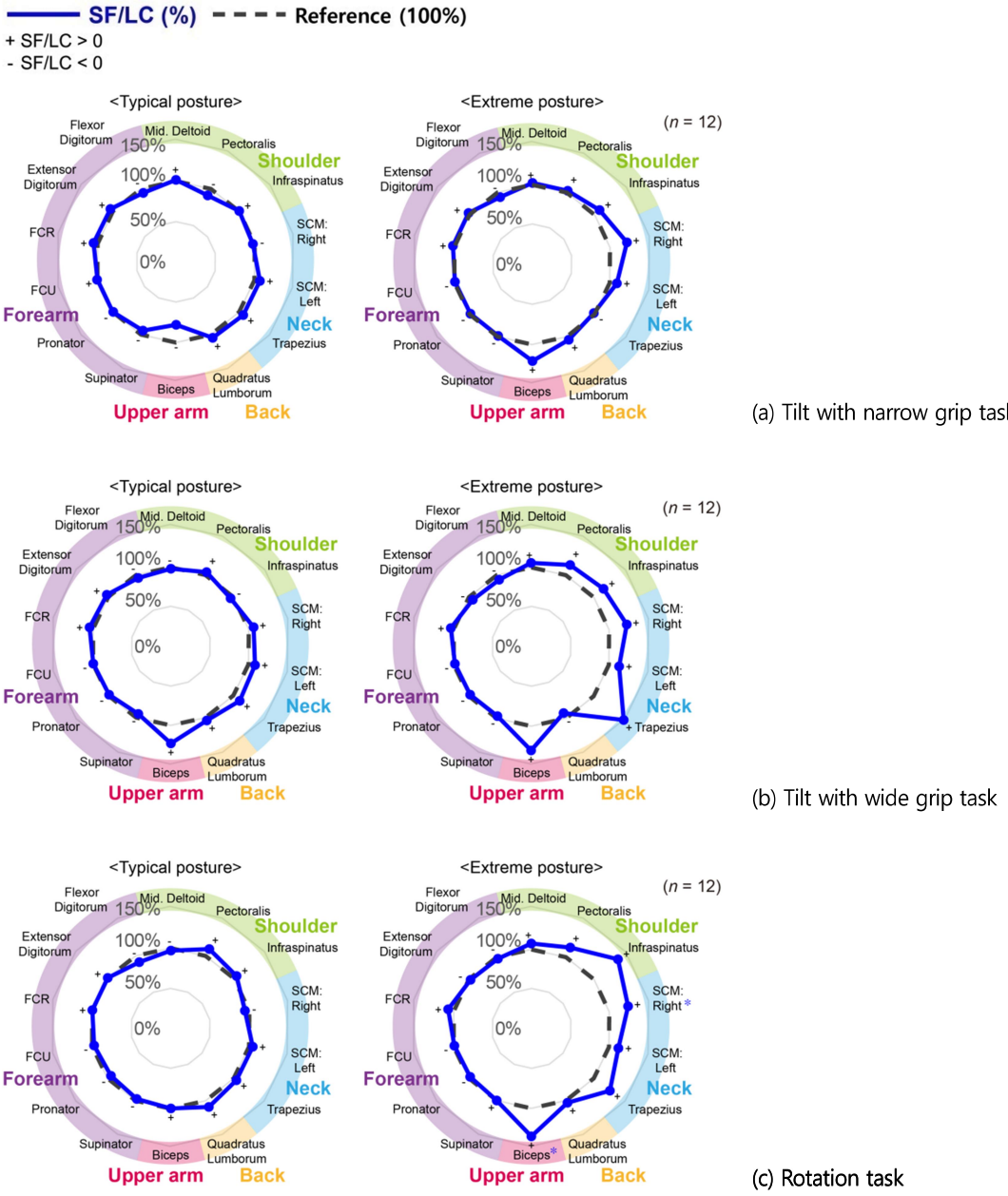
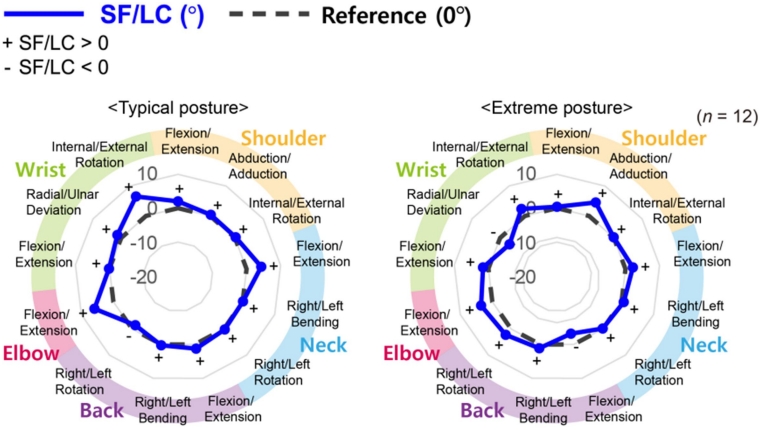


Figure 10. EMG RMS ratio of small-flat (SF) probe to large-curved (LC) probe by posture and task (∗p < 0.05)

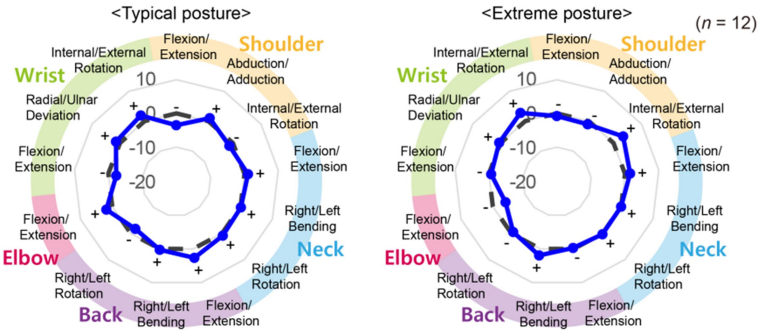
1.8~21.3%), tilt with wide grip (MD = 13.3~31.0%), rotation (MD = 11.8~38.9%) 검사 작업 순으로 크게 발생하였다. 특히, LC probe 대비 SF probe의 가장 큰 EMG RMS 차이를 보인 과도한 조작 자세에서는 rotation 동작 시 SF probe의 RMS EMG가 LC probe 대비 right SCM에서 23.0% (t [10] = 2.36, p = 0.040), biceps에서 26.4% (t [11] = 2.89, p = 0.015)로 통계적으로 유의하게 높았다.

3.3 Motion

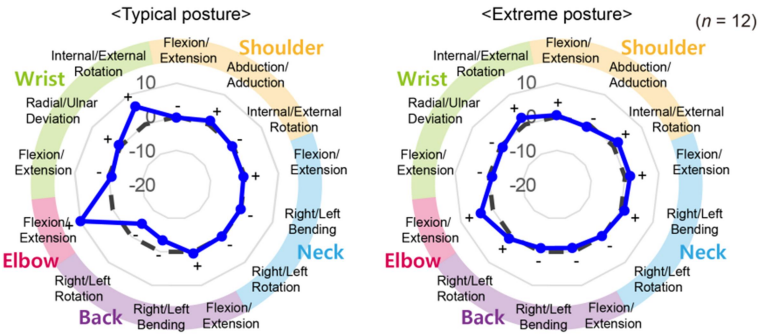
SF probe를 이용한 초음파 검사 작업 시 LC probe 대비 어깨, 목, 상체, 손목의 관절 동작은 전반적으로 유사하였으나 팔꿈치 관절에서 전형적인 조작 자세로 rotation 동작 시 상대적으로 높은 flexion이 발생하였다(Figure 11 참조). SF probe 사용 시의 관절 동작은 LC



(a) Tilt with narrow grip task



(b) Tilt with wide grip task



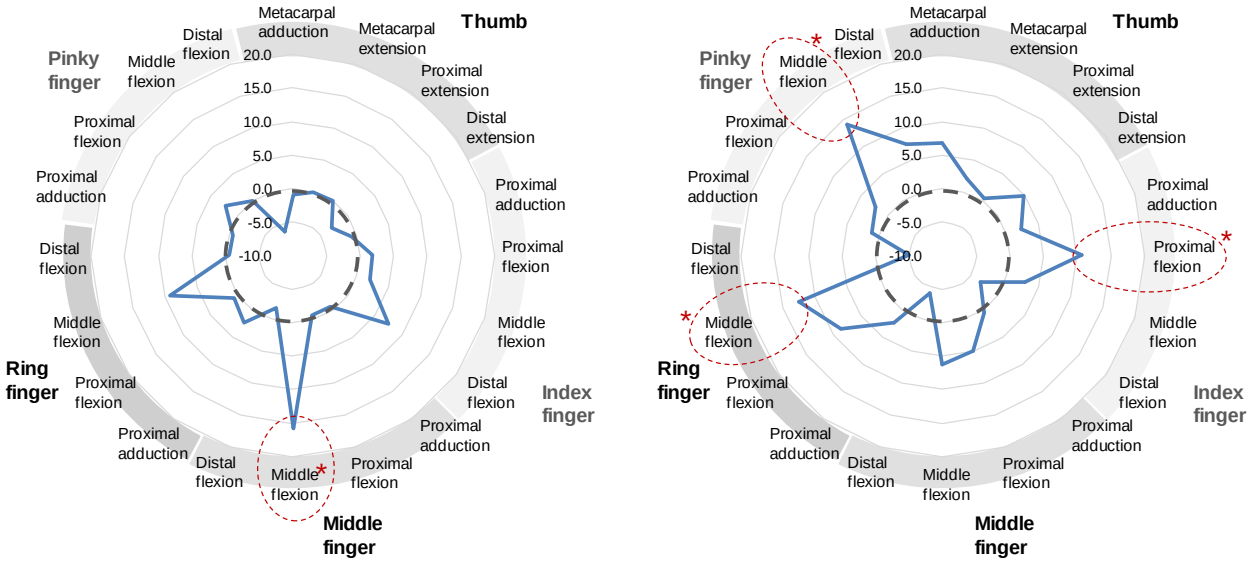
(c) Rotation task

Figure 11. Range-of-motion (ROM) differences between small-flat (SF) probe and large-curved (LC) probe by posture and task (*p < 0.05)

probe 대비 어깨의 flexion/extension, abduction/adduction, internal/external rotation, 목의 flexion/extension, right/left bending, right/left rotation, 상체의 flexion/extension, 손목의 flexion/extension, radial/ulnar deviation, internal/external rotation 측면에서 -4.8~6.3°로 전반적인 관절 동작의 차이가 10° 이하로 작게 파악되었다. SF probe 사용 시의 팔꿈치 관절 flexion/extension 동작은 LC probe 사용 시에 비해 전형적인 조작 자세로 rotation 동작 시 9.9° 정도의 상대적으로 큰 차이를 보였으며, 그 외 조건에서는 -3.9~5.9°로 유사한 것으로 파악되었다.

3.4 Grip posture

SF probe 파지 시 손가락 관절 각도는 LC probe와 비교하여 전반적으로 컸으며 narrow grip 시에는 중지에서, wide grip 시에는 검지, 약지, 소지에서 10° 이상의 큰 차이를 보이는 것으로 파악되었다(Figure 12 참조). Narrow grip의 경우, SF probe 파지 시 손가락 관절 각도는 LC probe 대비 -6.3~15.8°로 다소 크게 나타났으며 특히 중지의 middle flexion 측면에서 15.8° (t [8] = 4.17, p = 0.003) 정도 유의하게 높았다. Wide grip의 경우, SF probe 파지 시 손가락 관절 각도는 LC probe 대비 -5.0~14.1°로 다소 크게 나타났으며 특히 검지의 proximal flexion 측면에서 10.7° (t [7] = 3.21, p = 0.015) 정도, 약지의 middle flexion 측면에서 12.4° (t [7] = 1.07, p = 0.321) 정도, 소지의 middle flexion 측면에서 14.1° (t [7] = 1.65, p = 0.142) 정도로 파악되어 10° 이상의 통계적으로 유의한 차이를 보였다.



(a) Narrow grip (b) Wide grip

Figure 12. Finger joint angle differences between small-flat (SF) probe and large-curved (LC) probe by posture and task (*p < 0.05)

4. Discussion

본 연구의 SF probe와 LC probe에 대한 주관적 만족도 평가 결과는 SF probe grip부의 너비, 두께, 곡률이 선호되는 것으로 나타났으나, EMG 평가 및 debriefing을 통해 SF probe의 평평한 probe 형상이 힘 전달 측면에서 비선호 되는 것을 파악하였다. 주관적 만족도 평가 결과, SF probe가 LC probe 대비 전측 너비(44.9mm), 최소 두께(17.6mm), 최대 두께(21.3mm), 최소 두께 지점 모서리 곡률(7.1mm), 측면 최대돌출점 곡률(675.1mm) 측면에서 통계적으로 유의한 선호 우위를 보였다. SF probe의 너비, 두께, 그리고 곡률이 LC probe 대비 선호되는 것은 본 연구의 실험 참여자 손 길이에 grip fit과 grip감 측면에서 적절하기 때문인 것으로 사료된다. 한편, EMG 평가 결과에서는 SF probe 사용 시 근육 부하가 LC probe 대비 어깨(pectoralis, infraspinatus), 목(right/left SCM, trapezius), 윗팔

(biceps)에서 1~9% 정도 높은 것으로 나타났다. SF probe가 힘 사용 측면에서 열세인 것은 debriefing에서 실험 참여자들이 제시한 SF probe의 평평한 probe 형상이 조작 시 힘을 효율적으로 전달하지 못하는 구조라는 의견과 연관되는 것으로 추정된다. 따라서, SF probe의 평평한 형상은 효율적 힘 전달 측면에서 LC probe의 굴곡진 형상을 반영하여 개선이 필요하다. 본 연구에서 파악된 선호 설계 특성이 반영된 linear array probe는 사용자의 주관적 만족도, 그립감, 힘 전달 효용성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 자세에 따라 초음파 probe 설계별 근육 부하와 동작의 차이가 달라지며 과도한 조작 자세에서는 근육 부하 측면, 전형적 조작 자세에서는 동작 측면의 차이가 더 크게 발생하는 경향을 파악하였다. 자세 조건에 따른 EMG를 비교해보면, SF probe의 RMS EMG는 LC probe 대비 어깨, 목, 윗팔 부위(deltoid, pectoralis, infraspinatus, right SCM, left SCM, trapezius, biceps)에서 전형적 조작 자세 대비 과도한 조작 자세에서 평균적으로 15% 정도 크게 측정되었다. 과도한 조작 자세에서는 팔을 넓게 뻗은 상태에서 어깨, 목, 상체, 상지의 자세를 유지하는 것과 초음파 검사 동작을 수행하는 것의 인체 부하가 동시에 발생하므로 probe 설계에 따른 EMG 차이가 더 크게 발생하는 것으로 사료된다. 한편, 자세 조건에 따른 동작을 비교해보면, SF probe의 사용 동작은 LC probe 대비 팔꿈치 관절 flexion/extension 동작 측면에서 전형적 조작 자세 대비 과도한 조작 자세에서 평균적으로 81.4% 정도 감소하였다. 전형적 조작 자세에서는 상체를 바르게 유지한 상태에서 probe를 조작하므로 상체 및 상지 움직임이 적고 probe 설계에 따라 손목과 팔꿈치 관절에서 더 큰 동작의 차이를 유도하는 것으로 사료된다. 본 연구 결과를 참고하여 probe 설계에 따른 근육 부하 차이를 평가하는 경우 과도한 조작 자세에서 평가를 수행하고 동작 범위 및 동작 효율성을 평가하는 경우 전형적 조작 자세에서 평가를 수행하면 초음파 설계에 따른 사용성 평가를 간소화하여 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

Probe 설계에 따른 EMG와 동작의 차이가 tilt 작업 동작 조건에 비해 rotation 작업 동작 조건에서 크게 발생한 본 연구의 결과는 probe 설계 평가 프로토콜을 rotation 작업 동작 조건으로 한정시켜 간소화될 수 있음을 보여 준다. LC probe 대비 SF probe 사용 시의 EMG RMS는 tilt with narrow grip 작업 및 tilt with wide grip 작업 시 평균적으로 2~7% 정도 크게 측정되었으나, rotation 작업 시에는 평균적으로 5~14% 정도로 다른 작업에 비해 상대적으로 크게 측정되었다. LC probe 대비 SF probe 사용 시의 동작은 전형적인 자세로 rotation 작업을 수행하는 경우 tilt with narrow grip 작업 및 tilt with wide grip 작업에 비해 팔꿈치 관절에서 4.0~8.0° 정도 크게 측정되었다. 따라서 초음파 probe 평가 protocol을 간소화하기 위해서 변별성이 적은 tilt 동작은 제외하고, rotation 동작만을 선택적으로 평가할 수 있다.

본 연구는 probe 파지 자세의 선호도를 평가한 그립감 평가 결과를 참고하여 SF probe 설계와 같이 probe를 상대적으로 더 많이 움켜쥐는 손 그립 자세가 선호되는 경향을 파악하였다. 본 연구에서는 2종 probe 설계에 따른 파지 자세의 안락감(그립감)을 주관적으로 평가하여 파지 자세의 선호도 측면에서 SF probe 설계가 LC probe 설계 대비 0.3점 높게 평가되어 더욱 선호되었다. LC probe 대비 SF probe 파지 시 손가락 관절 각도 차이는 narrow grip 시 -6.3~15.8°, wide grip 시 -5.0~14.1°로 파악되어 SF probe 파지 시에 전반적으로 손가락을 더 구부리며 움켜쥐는 그립 자세를 취하는 것으로 파악되었다. 따라서, 본 연구에서는 SF probe와 같이 더 많이 움켜쥔 손 자세로 사용하는 probe 설계가 주관적으로 더욱 선호되는 것을 그립감과 파지 자세 평가 결과를 종합하여 파악하였다.

본 연구는 인간공학적 초음파 probe 설계 평가 protocol을 통해 기존의 linear array probe 2종에 대해 적용하여 선호 설계 특성을 파악하였다. 기존의 인간공학적 초음파 probe 설계 및 평가 연구는 Paschoarelli et al. (2008)나 Mazzola et al. (2016)와 같이 인간공학적 probe 형상을 제안하고 기존 probe와 비교하여 선호되는 것을 파악하였지만 개선 설계의 근거를 제시하지 않았으며 세부적 선호 설계 특성을 파악하지 못한 한계점이 있었다. 본 연구는 기존 linear array probe 2종을 대상으로 설계를 정량화하고 객관적 평가 방법과 주관적 평가 방법을 종합적으로 사용하여 사용성을 비교 평가하고 선호 설계 특성을 세부적으로 파악하였다. 본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 평가 protocol은 초음파 probe 뿐만 아니라 사용자가 파지하고 조작하는 다양한 제품의 인간공학적 설계 및 평가 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들면, 청소기 핸들 제품의 경우 제품별로 다양한 크기 및 형태의 핸들을 이용하여 유사한 청소 동작을 수행하므로 핸들 형상에 따른 만족도, 동작 효율성, 근육 부하 등의 비교 평가에 본 연구에서 제안된 평가 protocol이 활용될 수 있다. 그 외에도 전동 공구, 스포츠 그립 등 다양한 핸들 및 그립 제품의 인간공학적 설계 및 평가에도 본 연구에서 제안된 방법이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 probe 조작 시 적용되는 힘을 force monitoring system을 사용해 모의 검사 수행 시 적용 힘을 일정 범위 안에서 사용하도록 통제한 조건에서 probe 설계에 따른 EMG 변화를 평가하였다. Vannetti et al. (2015)은 신규 조작 방법의 사용성을 평가하기 위하

여 사람을 대상으로 초음파 검사 시 EMG 측정 값을 기존 조작 방법과 비교 평가하였는데 초음파 검사 시의 적용 힘을 통제하지 못하여 EMG의 변화가 조작 방법의 차이로 인한 것인지 사용 힘의 변동에 의한 것인지 교란(confounding)된 한계점이 있다. 반면, 본 연구는 one-axis loadcell을 이용하여 probe 사용 시 적용되는 힘을 monitoring 할 수 있는 force monitoring phantom을 제작하였다. Force monitoring phantom을 대상으로 실험 참여자간 일정한 힘으로 probe 사용 동작을 수행하도록 하여 초음파 probe의 적용 힘이 통제된 상황에서 probe의 설계 특성에 따른 EMG 변화가 평가될 수 있었다. 본 연구에서는 probe 형상, 작업 유형, 자세에 따른 사용성을 비교하기 위하여 probe 무게가 힘 사용 및 근육 부하에 미치는 영향을 250g으로 통제하였으므로 probe 무게가 힘 사용에 미치는 영향을 파악하지 못한 한계를 지닌다. 따라서 추후 연구 주제로 동일한 형상의 probe에 다양한 무게를 적용하여 무게에 의한 힘 사용 및 인체 부하를 평가하는 연구가 수행될 필요가 있다.

초음파 probe의 설계를 종합적으로 평가하기 위해서는 본 연구에서 파악된 주관적 평가 방법과 객관적 평가 방법의 장단점을 고려한 사용성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 주관적 만족도 평가를 통해 SF probe가 LC probe 대비 전반적으로 크기 및 곡률, 조작 용이성, 그립감, 그리고 전반적 만족도 측면에서 선호되는 것을 파악하였으나, 힘 사용 측면에서는 열세인 것을 파악하지 못했다. 그러나, EMG 평가를 통해 SF probe 사용 시 LC probe 대비 어깨, 목, 윗팔 부위에서의 근육 부하가 유의하게 높은 것이 파악되었다. 본 연구 결과는 초음파 probe의 사용성 평가 시 전반적 측면과 세부적 측면을 모두 평가하기 위하여 주관적 평가 방법과 객관적 평가 방법의 장점과 한계점을 고려한 평가가 필요함을 보여 준다.

본 연구의 초음파 probe의 설계 특성 분석 및 인간공학적 평가는 기존 probe들의 설계 특성들을 비교하여 선호 설계 특성을 파악하기 때문에 최적 설계안을 개발하는 데는 한계가 있다. 따라서, 다양한 손 크기와 초음파 작업 시의 선호 grip 자세 분석을 기반으로 인간공학적 최적 설계 연구가 필요하며, 각 설계 제원의 특성별 선호도를 비교 분석하는 연구가 필요하다. 예를 들면, 다양한 설계 변수에 대하여 사용성에 높은 영향을 미치는 변수를 분석하거나, 실험계획법에 기반하여 다양한 설계 변수 및 설계 수준이 조합된 형상에 대한 인간공학적 평가를 통하여 각 설계 변수가 사용성에 미치는 영향 및 교호작용을 세부적으로 분석하는 연구가 수행될 수 있다(Lee et al., 2014). 또한, 설계 부위별로 선호 설계 특성을 파악하여 설계된 초음파 probe는 설계 부위 간에 교호작용이 존재할 수 있으므로 추후 사용성 검증이 필요하다.

Acknowledgement

This research was jointly supported by Samsung Medison, the National Research Foundation of Korea (NRF) grants (2018R1A2A2A05023299; 2022R1A2C1013198) funded by Korean Government, and Jeonbuk Research & Development Program grant (RA2021-02-C1-10) funded by Jeonbuk Province.

References

Baker, J.P. and Coffin, C.T., The Importance of an Ergonomic Workstation to Practicing Sonographers, *Journal of Ultrasound in Medicine*, 32(8), 1363-1375, 2013.

Bernard, B.P., Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors: A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back, *U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health*, 1997.

Burnett, D.R. and Campbell-Kyureghyan, N.H., Quantification of scan-specific ergonomic risk-factors in medical sonography, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 306-314, 2010.

Böhlemann, J., Kluth, K., Kotzbauer, K. and Strasser, H., Ergonomic assessment of handle design by means of electromyography and subjective rating, *Applied Ergonomics*, 25(6), 346-354, 1994.

Coffin, C.T., Work-related musculoskeletal disorders in sonographers: a review of causes and types of injury and best practices for reducing injury risk, *Medical Imaging*, 7, 15-26, 2014.

Choi, K., Lee, S., Lee, J. and Kong, Y, Ergonomic Design of Medic Work Table (MWT) for Medical Technologist, *Journal of Ergonomic Society Korea*, 35(6), 595-609, 2016.

Dodgeon, J., Bernard, F., Wilde, J. and Newton-Hughes, A., Avoidance of musculoskeletal disorders during ultrasound scanning, www.healthcare.salford.ac.uk/radiography (retrieved April 21, 2022).

Evans, K., Roll, S. and Baker, J., Work-related musculoskeletal disorders (WRMSD) among registered diagnostic medical sonographers and vascular technologists, *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 25(6), 287-299, 2009.

Harih, G. and Dolsak, B., Comparison of subjective comfort ratings between anatomically shaped and cylindrical handles, *Applied Ergonomics*, 45(4), 943-954, 2014.

Korean Agency for Technology and Standards (KATS), The Report on the 6th Size-Korea (Korean Body Measurement and Investigation), Seoul, Korea, *Size Korea, Ministry of Knowledge Economy*, 2010.

Kong, Y., Kim, J., Shim, H., Cho, M., Park, C., Ha, K., Lim, S., Moon, J., Oh, B., Choi, J., Han, S. and Choi, K., Quantifications study of scan stress on ultrasound devise users, *In Proceedings of the 2019 Fall Conference of Ergonomics Society of Korea*, 2019.

Lee, B., Lee, S., Jung, H., Lee, J., Choi, T., Lee, M., Kim, H., Kim, E., Jeon H., Cho, Y., Seo, S. and You, H., Development of a Design Factor Quantification Method to Increase a Grip Comfort of Outside Door Handle (ODH), *In Proceedings of the 2014 Fall Conference of Ergonomics Society of Korea*, 2014.

Mazzola, M., Forzoni, L., D'Onofrio, S. and Andreoni, G., Use of Digital Human Model for ultrasound system design: A case study to minimize the risks of musculoskeletal disorders, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 60, 35-46, 2016.

Paschoarelli, L.C., Oliveira, A.B. and Coury, H.J.C.G., Assessment of the ergonomic design of diagnostic ultrasound transducers through wrist movements and subjective evaluation, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(11-12), 999-1006, 2008.

Punnett, L. and Wegman, D.H., Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(1), 13-23, 2004.

Robinette, K.M., Blackwell, S., Daanen, H., Boehmer, M., Fleming, S., Brill, T., Hoeferlin, D. and Burnsides, D., Civilian American and European Surface Anthropometry Resource (CAESAR) Final Report, Volume I: Summary, AFRL-HE-WP-TR-2002-0169, *Human Effectiveness Directorate, Crew System Interface Division, Wright-Patterson Air Force Base*, OH, 2002.

Vannetti, F., Atzori, T., Matteoli, S., Hartmann, K., Altobelli, G., Molino-Lova, R. and Forzoni, L., Usability characteristics assessment protocol applied to eTouch ultrasound user-defined workflow optimization tool, *Procedia Manufacturing 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015)*, 3, 104-111, 2015.

Village, J. and Trask, C., Ergonomic analysis of postural and muscular loads to diagnostic sonographers, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37, 781-789, 2007.

Author listings

Hayoung Jung: niceterran36@postech.ac.kr
Highest degree: Master, Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)
Position title: Ph.D. Candidate, Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)
Areas of interest: Ergonomic Design, Digital Human Modeling, Usability Evaluation

Nahyeon Lee: dnnh1218@sk.com
Highest degree: Master, Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)
Position title: Manager, Mobile B tv Team, SK broadband
Areas of interest: Ergonomic Design, UI/UX, Usability Evaluation

Jinho Yim: hci.yim@kookmin.ac.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Systems and Information Engineering, Korea University
Position title: Professor, Department of Smart Experience Design, Graduate School of Techno Design, Kookmin University
Areas of interest: Medical Equipment & Healthcare UX Design, UX Engineering, Leisure UX Design, Ergonomic Design

Seungju Lee: sj63.lee@samsungmedison.com
Highest degree: Master, Department of Industrial Engineering, Hanyang University
Position title: Team leader, UX team, System dev. group, SAMSUNG MEDISON
Areas of interest: Healthcare UX, Ergonomics

Heecheon You: hcyou@postech.ac.kr
Highest degree: Ph.D., Industrial Engineering, The Pennsylvania State University
Position title: Professor, Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology
Areas of interest: Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation, Digital human modeling & simulation, Human performance & workload assessment, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing