

Master's Thesis

초음파 Probe 설계의
인간공학적 평가 방법 개발

Nahyeon Lee (이 나 현)

Department of Industrial and Management Engineering

(Human Factors and Ergonomics Program)

Pohang University of Science and Technology

2017

초음파 Probe 설계의
인간공학적 평가 방법 개발

Development of an Ergonomic Evaluation Protocol
for Ultrasound Probe

Development of an Ergonomic Evaluation Protocol for Ultrasound Probe

by

Nahyeon Lee

Department of Industrial and Management Engineering
(Human Factors and Ergonomics Program)
Pohang University of Science and Technology

A thesis submitted to the faculty of the Pohang University of Science
and Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree
of Master of Science in the Department of Industrial and Management
Engineering (Human Factors and Ergonomics Program)

Pohang, Korea

12. 16. 2016

Approved by

Heecheon You 
Academic Advisor

Development of an Ergonomic Evaluation Protocol for Ultrasound Probe

Nahyeon Lee

The undersigned have examined this thesis and hereby certify that it
is worthy of acceptance for a master's degree from POSTECH

12/16/2016

Committee Chair	Heecheon You	 (Signature)
Member	Kwangsoo Kim	 (Signature)
Member	Kihyo Jung	 (Signature)

DIME 이나현, Nahyeon Lee, Development of an Ergonomic Evaluation
20152891 Protocol for Ultrasound Probe, 초음파 Probe 설계의 인간공학적
평가 방법 개발, Division of Industrial and Management
Engineering (Human Factors and Ergonomics Program), 2017, 75P,
Advisor: Heecheon You, Text in Korean.

ABSTRACT

An ultrasound probe, a device transmitting ultrasound waves on the skin of a patient for medical imaging, needs to be ergonomically designed. An ergonomically designed ultrasound probe can improve convenience, muscular efficiency, performance, and satisfaction, contributing to its usability and prevention of work-related musculoskeletal disorders of sonographers. The present study was intended to develop a protocol which identifies design factors of an ultrasound probe and evaluate an ultrasound probe design using both objective and subjective methods for better usability. The proposed ergonomic evaluation protocol of ultrasound probe design consists of four steps: (1) analysis of usage characteristics, (2) analysis of design characteristics, (3) experimentation for ergonomic evaluation, (4) analysis of experiment results. First, in the usage characteristics analysis step the physical user interface (PUI) between an ultrasound probe and a user is identified by analyzing ultrasound scanning tasks and environments. Second, in the design characteristics analysis step the probe design

characteristics is identified by the following subsequent analysis steps: S1. Definition of design dimensions such as length, breadth, thickness, angle, radius, and circumference, S2. Classification of design dimensions into anthropometric factor, biomechanical factor, and affective factor, S3. Importance assessment of design dimensions to determine which dimensions need to be considered with priority in ergonomic design and evaluation, and S4. Measurement of major design dimensions to benchmark the characteristics of probe designs. Third, in the ergonomic evaluation step an ergonomic evaluation protocol is established using objective and subjective evaluation methods and then usability testing of ultrasound probe designs is conducted. Lastly, in the experiment result analysis step the results of ergonomic evaluation results are analyzed and desirable design features of an ultrasound probe are identified based on the results of design dimension measurement and those of motion, EMG, grip posture, satisfaction, and/or debriefing. The proposed ergonomic protocol of ultrasound probe design and evaluation was applied to linear array probe in the present study. The design characteristics of linear array probe were identified by conducting the usage characteristics analysis, design characteristics analysis, and existing probe design benchmarking. Then, desirable design features of linear array probe were identified by comprehensive evaluation of motion, EMG, grip posture, and subjective satisfaction. The proposed ergonomic evaluation protocol of ultrasound probe design can be utilized to design and evaluate a hand-held handle (e.g., vacuum cleaner handle) requiring intensive manipulation of the handle in grip.

TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT	I
TABLE OF CONTENTS	III
LIST OF FIGURES	VI
LIST OF TABLES	VIII
I. 서론	1
1.1. 연구 배경 및 필요성	1
1.2. 연구 목적	5
1.3. 논문 구성	8
II. 문헌 조사	9
2.1. 초음파 작업 및 근골격계 질환	9
2.2. 초음파 작업의 근골격계 질환 예방 및 통제	13
2.3. 초음파 작업의 인간공학적 설계 및 평가	15
III. 초음파 Probe의 인간공학적 평가 Protocol 개발 및 적용	22
3.1. 초음파 Probe 사용 특성 분석	23
3.1.1. 사용 환경 특성 분석	23
3.1.2. 사용 작업 특성 분석	25

3.2. 초음파 Probe 설계 특성 분석.....	26
3.2.1. 설계 인자 정립	26
3.2.2. 설계 인자 유형 분류	28
3.2.3. 설계 인자 중요도 평가	30
3.2.4. 주요 설계 인자 제원 분석	31
3.3. 초음파 Probe 인간공학적 평가 실험.....	32
3.3.1. 실험 참여자	32
3.3.2. 실험 환경	33
3.3.3. 실험 계획	38
3.3.4. 실험 절차	45
3.4. 초음파 Probe 평가 결과 분석.....	48
3.4.1. 동작	48
3.4.2. 근전도	50
3.4.3. 파지 자세	52
3.4.4. 주관적 만족도	53
3.4.5. 초음파 Probe의 선호 설계 특성 분석	55

IV. 토의57

4.1. 초음파 Probe 설계 분석 방법.....	57
4.2. 초음파 Probe 설계 평가 방법.....	59

REFERENCES	64
APPENDICES.....	68
Acknowledgements.....	71
Curriculum Vitae.....	72

LIST OF FIGURES

Figure I.1. 초음파 probe 설계의 인간공학적 평가 방법 연구 framework.....	7
Figure II.1. 초음파 probe의 대표적인 유형	10
Figure II.2. 초음파 작업에서의 근골격계 질환 위험 요소	11
Figure II.3. 초음파 작업에서의 근골격계 질환 예방을 위한 작업 환경	14
Figure II.4. 기존 초음파 probe 설계 및 평가 연구의 평가 대상	18
Figure III.1. 초음파 probe 설계의 인간공학적 평가 protocol	23
Figure III.2. Linear array probe의 사용 환경 특성 분석	24
Figure III.3. Linear array probe의 사용 작업 특성 분석: 유방 검사	26
Figure III.4. Linear array probe 설계 인자 정립: Probe 전체 높이	28
Figure III.5. Linear array probe 설계 인자 유형 분류 예시	29
Figure III.6. Linear array probe 설계 인자 중요도 평가 예시	31
Figure III.7. 초음파 probe의 주요 설계 인자 제원 분석 절차	32
Figure III.8. Linear array probe 인간공학적 평가 실험 환경	36
Figure III.9. Force monitoring system.....	37
Figure III.10. Linear array probe 주관적 만족도 평가지 예시	38
Figure III.11. Linear array probe 평가 대상	39
Figure III.12. Linear array probe 평가 대상 작업	40
Figure III.13. Linear array probe 평가 실험의 동작 분석 부위	42

Figure III.14. Linear array probe 평가 실험의 근전도 분석 부위43

Figure III.15. Linear array probe 평가 실험의 과지 자세 분석 부위44

Figure III.16. Linear array probe 평가 실험의 reflective markers 부착 위치47

Figure III.17. Linear array probe 동작 분석 결과: 어깨의 abduction/adduction
예시49

Figure III.18. Linear array probe 근전도 분석 결과: pectoralis 예시.....51

Figure III.19. Linear array probe 과지 자세 분석 결과: middle finger의 proximal
interphalangeal joint flexion 예시53

Figure III.20. Linear array probe 주관적 만족도 분석 결과: Grip부 예시55

LIST OF TABLES

Table II.1. 초음파작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구 동향: 참여자 특성	19
Table II.2. 초음파작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구 동향: 작업 및 환경	20
Table II.3. 초음파작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구 동향: 평가 척도	21
Table III.1. 초음파 probe 평가를 위한 인간공학적 평가 기준	35

I. 서론

1.1. 연구 배경 및 필요성

초음파 probe는 초음파 검사 시 환자의 인체 부위에서 초음파 신호를 송수신하는 장비로서 사용성 향상 및 초음파사의 근골격계 질환 예방을 위하여 인간공학적 설계가 필요하다. 초음파 기사들이 초음파 scan 시의 반복적인 동작, 과도한 힘 사용과 같은 부적절한 작업 환경에 지속적으로 노출되어 근골격계 질환 발생률이 높은 것으로 파악되었다. 초음파 기사의 90.4%가 어깨(74.6%), 목(65.8%), 손목(49.7%) 등에 근골격계 통증을 겪으며, 이 중 48%는 근골격계 질환을 진단 받은 것으로 파악되었다(Evans et al., 2009). 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 & Campbell-Kyureghyan, 2010; Punnett & Wegman, 2004). 인간공학적으로 설계된 초음파 probe는 사용 편의성, 조작 용이성, 적절한 힘 사용, 그리고 주관적 만족도를 향상시킬 수 있으므로(Harih and Dolsak, 2014; Bohlemann et al., 1994) 사용성 향상 및 초음파사의 근골격계 질환 예방에 기여할 수 있다.

초음파 작업에서의 근골격계 질환 위험 요소를 예방하기 위하여

다양한 인간공학적 평가 연구가 수행되고 있다. Burnett & Campbell-Kyureghyn (2010)은 초음파와 작업에서의 근골격계 질환 위험 요소를 파악하기 위하여 초음파와 작업 시의 동작 및 push force 평가를 수행하여 갑상선, 복부, 심부정맥 부위에서 초음파와 동작 시의 신체 부하 차이를 비교 평가하였다. 평가 결과, 좌우 심부정맥 부위에서 초음파와 작업 시 갑상선, 좌우 복부 부위 대비 손목, 팔꿈치, 아래팔에서 관절 움직임의 중립 이탈이 가장 많이 발생하며, 52% ~ 92% 이상의 push force가 요구되는 것으로 나타났다. Village & Trask (2007)는 초음파와 작업 시의 자세 및 근육 부하를 평가하기 위하여 초음파와 작업 시의 동작, EMG, grip force를 측정하였다. 동작 분석 결과로 경동맥 부위 검사 시 복부, 다리, 자궁 부위 대비 어깨 외회전 정도가 높았고, EMG 분석 결과로 초음파와 작업 시 어깨 근육의 %MVC가 10% 이내에서 초음파와 작업이 반복될수록 증가하여 최고 30% 이상이 발생되었으며, Grip force 분석 결과로 초음파 probe 사용 시 grip force가 평균 $3.96 \pm 2.94\text{kg}$ 발생하는 것으로 나타났다. Paschoarelli et al. (2008)은 유방 초음파 검사 시 검사자의 손목 움직임을 줄이기 위하여 인간공학적 grip 형상 및 회전 mechanism을 더해 인간공학적 linear array probe 3종을 설계하여 손목 동작 및 주관적 만족도를 평가하였다. 평가 결과, 기존의 probe 2종과 비교하여 제안된 probe 설계안 사용 시 기존 probe 대비 손목 움직임이 적고 불편감이 적으며 선호되는 것으로 파악되었다. Mazzola et al. (2016)은

초음파 검사 시 손, 손목, 아래팔의 불편을 줄이기 위하여 인간공학적 grip 형상을 더해 linear array probe 1종과 convex probe 1종을 설계하였다. 제안된 2가지 유형의 probe 각 1종과 기존의 probe 각 1종을 digital human model을 이용하여 손 관절의 torque 측면에서 비교 평가한 결과, 전반적으로 개선 probe의 torque가 적게 발생하는 것으로 파악되었다.

초음파 작업 부하를 평가하기 위한 다양한 연구가 수행되었으나 초음파 probe의 사용성 향상을 위하여 probe의 주요 설계 인자를 분석하고 종합적으로 평가하는 protocol 수립 연구는 미흡한 실정이다. Burnett & Campbell-Kyureghyn (2010)과 Village&Trask (2007)은 초음파 신체 부하를 평가하기 위하여 초음파 작업 시의 동작, EMG, grip force, push force를 측정하고 초음파 작업간의 신체 부하 차이를 분석하였으나, probe 설계에 따른 사용성에 대해서는 연구되지 않았다. 또한 객관적 평가 방법과 주관적 평가 방법을 종합적으로 고려하지 못한 한계점도 있다. Paschoarelli et al. (2008)과 Mazzola et al. (2016)은 인간공학적 probe 형상을 제안하고 기존 probe와 비교하여 손목 동작, torque, 주관적 만족도 측면에서 선호되는 것을 파악하였지만 설계 근거가 제시되지 않았으며 제안된 probe의 크기, 형상, 그리고 무게 등과 같은 세부 설계 특성은 파악되지 않았다. 사용성이 향상된 인간공학적 초음파 probe의 설계를 위해서는 초음파 probe의 physical user interface (PUI)를 이해하여 사용성에 영향을 미치는 설계 인자를

분석하고, 객관적 평가 방법과 주관적 평가 방법을 종합적으로 평가하여
선호 설계 특성을 분석하는 protocol 수립이 필요하다.

1.2. 연구 목적

본 연구는 초음파 probe의 사용성 향상을 위하여 probe의 사용성에 영향을 미치는 설계 인자를 분석하고 객관적 평가 방법과 주관적 평가 방법을 종합적으로 평가하여 선호 설계 특성을 분석하는 protocol을 정립하고자 한다. 이를 위해, 본 연구는 다음의 세 가지 세부 목표를 포함한다.

첫째, 초음파 probe의 설계 분석 방법을 수립한다. 초음파 probe의 사용 특성 분석과 설계 특성 분석을 통해 초음파 probe의 설계 분석을 수행하는 protocol을 제안한다. 초음파 probe의 사용 특성은 사용 환경과 사용 작업을 분석하여 파악된다. 초음파 probe의 설계 특성은 사용 특성 분석을 통해 파악된 physical user interface (PUI)를 고려하여 사용성에 영향을 미치는 설계 인자를 정립하고 기존 초음파 probe들의 제원을 benchmarking하여 분석된다.

둘째, 초음파 probe의 설계 평가 방법을 수립한다. 동작, EMG, 파지 자세, 주관적 만족도 평가 방법을 사용한 인간공학적 평가 실험과 실험 결과 분석을 통해 초음파 probe의 선호 설계 특성을 분석하는 protocol을 제안한다. 인간공학적 평가 실험 방법은 설계 대상의 사용자, 실제 초음파 검사 시의 작업 환경, 조작 동작을 고려하여 수립된다. 실험 결과 분석

방법은 평가 대상 probe별 동작, EMG, 팔자 자세, 주관적 만족도 평가 결과를 비교 분석하고 초음파 probe의 선호 설계 특성을 파악한다.

셋째, 초음파 probe의 설계 분석 및 평가 방법을 적용하여 개발된 평가 protocol을 linear array probe 설계 평가에 적용하여 검증한다. Linear array probe의 설계 분석을 위하여 사용 특성을 분석하여 physical user interface (PUI)를 이해하고 사용성에 영향을 미치는 주요 설계 인자를 분석하여 형상과 크기 측면에서 다른 기존 초음파 probe들을 대상으로 제원 분석을 수행한다. Linear array probe의 설계 평가를 위하여 linear array probe를 사용한 유방 초음파 검사 시의 작업 환경, 조작 동작을 고려하여 평가 protocol을 수립하고 여성 초음파사 12명을 대상으로 평가를 수행한다. 동작, EMG, 팔자 자세, 주관적 만족도 측면에서 2종의 probe의 사용성을 비교 평가하여 linear array probe의 선호 설계 특성을 분석한다.

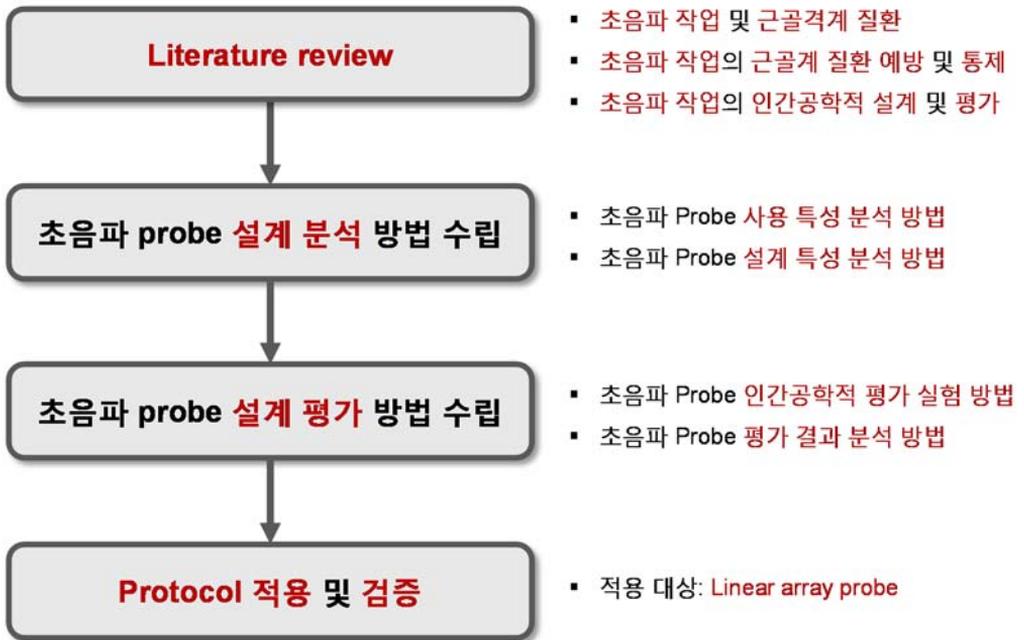


Figure I.1. 초음파 probe 설계의 인간공학적 평가 방법 연구 framework

1.3. 논문 구성

본 논문은 4개의 장과 부록으로 구성되어 있다. 제 1장은 연구의 배경, 필요성, 목적과 같은 전반적인 연구 개요에 대해 서술하고 있으며, 제 2장은 문헌 조사를 통해 파악된 초음파 작업과 근골격계 질환, 초음파 작업에서의 근골격계 질환 예방 및 통제 가이드라인, 초음파 작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구에 대한 내용을 서술하고 있다. 제 3장은 본 연구에서 제안된 초음파 probe의 인간공학적 평가 protocol을 초음파 probe의 사용 특성 분석, 설계 특성 분석, 인간공학적 평가 실험, 평가 결과 분석의 네 단계 절차로 서술하며, 제안된 protocol을 linear array probe의 설계 평가에 적용하여 구체적인 적용 방법 및 적용 결과에 대해 상세히 서술하고 있다. 제 4장은 본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 분석 방법과 설계 평가 방법의 의의, 기대 효과, 한계점, 추후 연구에 대한 토의 내용을 서술하고 있다. 마지막으로, 부록은 각 장에서 예시적으로 기술된 사항의 구체적인 내용 및 정보를 제시하고 있다.

II. 문헌 조사

2.1. 초음파 작업 및 근골격계 질환

초음파 probe는 초음파 검사 시 검사자가 파지하고 환자 인체 부위에 접촉하여 초음파 신호를 송수신하는 장비이다(Hunt et al, 1983; Morgan et al, 2016; Shin & Jeon, 2005). 초음파 probe는 Figure 2.1과 같이 검사 부위와 목적에 따라 모양과 크기가 다르며(Szabo & Lewin, 2013), 대표적인 유형으로 linear array, convex, phased array, 그리고 endocavity가 있다. Linear array는 가장 기본적인 probe 유형으로 주로 유방, 갑상선, 고환 등 표재성 장기 초음파 검사 시 사용되며, 탐촉부가 평평한 형태이다. Convex는 복부 등 넓은 부위를 검사하는 데 주로 사용되며, 탐촉부가 굴곡진 형태이다. Phased array는 늑골과 늑골 사이로 심장을 영상화할 때 적합하도록 탐촉부가 작게 설계된 형태이다. Endocavity는 부인과, 비뇨기과 초음파 검사 시 사용되며 체내 삽입을 위해 탐촉부가 얇게 설계된 형태이다(Eisenbrey et al, 2016; Shin & Jeon, 2005; Szabo & Lewin, 2013).

이전 연구들을 통해 초음파사들의 근골격계 통증 및 질환 발병률이 높은 것으로 파악되었다. 초음파 작업 시 검사자의 65% ~ 91%가 목(43% ~ 86%), 어깨(29% ~ 84%), 등 위쪽(15% ~ 77%), 등 아래쪽(33% ~ 71%), 팔꿈치(5%

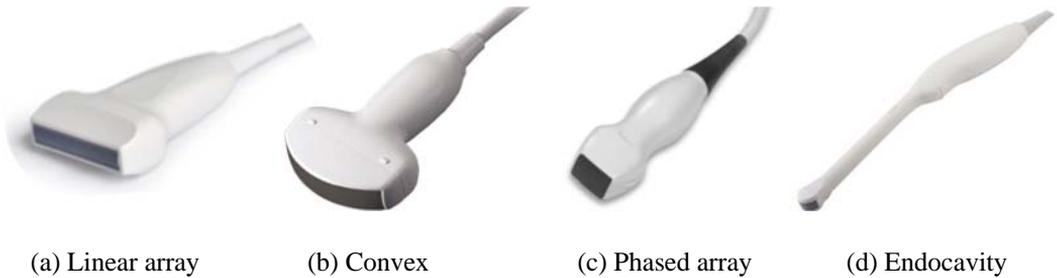


Figure II.1. 초음파 probe의 대표적인 유형

~ 57%), 그리고 손/손목(33% ~ 64%)에 근골격계 통증을 경험한 것으로 파악되었다 (Burnett & Campbell-Kyureghyan, 2010; Friesen et al., 2006; Habes & Baron, 2000; Horkey & King, 2004; Magnavita et al., 1999; McCulloch et al., 2002; Muir et al., 2004; Pike et al., 1997; Russo et al., 2002; Schoenfeld et al., 1999; Smith et al., 1997; Vanderpool et al., 1993; Wihlidal & Kumar, 1997). 그리고 검사자의 48% ~ 90%가 근골격계 질환을 겪은 것으로 파악되었다(Coffin, 2014; Evans et al., 2009; Kim, 2007; Morton & Deft, 2008; Muir et al., 2004).

초음파 기사가 겪는 근골격계 통증의 위험 요소는 반복적인 동작, 부적절한 자세, 정적 근수축, 과도한 힘 사용, 장시간의 초음파 scan 작업, 불충분한 휴식, 그리고 부적절한 설계의 초음파 장비 및 작업 환경을 포함하는 것으로 파악되었다(Bernard, 1997; Burnett & Campbell-Kyureghyan, 2010; Coffin, 2014; Dodgeon et al., 2002; Kim, 2006; Punnett & Wegman, 2004). 초음파사의 반복적인 동작 수행은 근무 시간 동안 동일한 유형의 초음파

작업을 수행할 때 발생된다. 동일한 초음파 작업의 반복은 해당 작업에 필요한 주요 근육을 지속적으로 사용하여 충분히 회복할 시간을 갖지 못하므로 근골격계 통증을 일으킬 수 있다. 초음파 작업 시의 부적절한 자세는 Figure 2.2의 예시와 같이 과도한 어깨의 abduction, 목의 extension과 twisting, trunk의 flexion과 twisting, 손목의 flexion과 extension, reaching, 그리고



(a) Shoulder Abduction



(b) Trunk and neck twist



(c) Wrist flexion



(d) Reaching

Figure II.2. 초음파 작업에서의 근골격계 질환 위험 요소

pinch grip 등을 포함한다. 초음파 검사 시 자세는 환자의 크기에 따라서도 영향을 받는데, 예를 들어 크기가 작은 환자의 복부를 검사 시에는 어깨 움직임이 많아지는 반면 크기가 큰 환자의 복부를 검사 시에는 손목의 flexion/extension이 과도하게 발생하게 된다. 정적인 자세는 관절에 혈류 공급량을 감소시켜 근육에 부담을 증가시키고 피로가 발생하는 시점을 앞당긴다. 정적 근수축 및 과도한 힘 사용은 복부 검사, 다리의 혈관 검사 등에서 초음파 probe를 이용하여 환자의 신체 부위를 누르는 동작 시 주로 발생된다. 장시간의 초음파 scan 작업 및 불충분한 휴식은 초음파사의 근무 일정과 관련되는데 적절한 작업 시간 및 작업량 이상으로 근무 일정이 계획되면 근육이 회복할 수 있는 시간이 감소된다. 근골격계 질환을 진단 받은 초음파사 중 61% ~ 86%가 일일 근무 시간 중에 10분 휴식 시간이 3회 미만인 것으로 보고되었다. 부적절한 설계의 초음파 장비 및 작업 환경은 높이가 고정되고 위치 이동이 용이하지 않도록 바퀴가 설계되지 않은 검사용 bed, 의자, 초음파 영상 monitor, keyboard와 장비들의 부적절한 layout, 협소한 작업 공간 등을 포함한다. 형상 및 크기 측면에서 부적절하게 설계된 초음파 probe는 pinch grip을 이용한 조작, 손목의 torque 증가, 부적절한 손목 동작, 조작 시 미끄럼 등을 야기시킨다. 초음파 probe의 cable이 지지되지 않을 경우, 손목과 팔의 조작 힘이 증가될 수 있다. 기타

초음파 기사가 겪는 근골격계 통증의 위험 요소에는 환자 수운반, 검사자의 키, 나이, 성별 등이 포함되는 것으로 파악되었다.

2.2. 초음파 작업의 근골격계 질환 예방 및 통제

초음파 기사의 작업관련 근골격계 질환 예방 및 감소를 위하여 초음파 기기 설계, 작업 환경, 작업 방법, 작업 일정, 교육에 대한 일반적인 가이드라인이 제안되었다. (Baker & Coffin, 2013; Baker & Murphey, 2001; Coffin, 2014; Evans et al., 2009; Gibbs & Young, 2011; Kim, 2006; Rousseau et al., 2013; Morton & Delf, 2008).

초음파 작업 기기와 작업 환경에 대한 가이드라인은 사용자 친화적 인터페이스의 인간공학적 초음파 scan 시스템, 인간공학적 설계의 probe, 다양한 신체 크기의 초음파 기사와 여러 유형의 scan 작업에 적합하도록 전동 조정 가능한 workstation (e.g., 초음파 영상 진단 장비, 모니터, 키보드, 마우스, 검사용 bed, 의자 등), 그리고 팔 지지대 및 케이블 고정 벨트 등을 포함한다. 인간공학적 설계의 probe에 대한 가이드라인은 적당한 무게와 palmar grip이 가능한 형상, 주요 사용자층을 수용할 수 있는 크기, 미끄럼을 방지하는 재질 등을 포함한다. 작업 방법에 대한 가이드라인은 정적 자세와 포함한다. 작업 자세에 대한 가이드라인은 목의 extension은 발생되지



(a) 전동 조정 장비 (b) 팔 지지대 (c) Cable supporter (d) 인간공학적 probe

Figure II.3. 초음파 작업에서의 근골격계 질환 예방을 위한 작업 환경

않도록 하며, flexion은 20° 이하, 어깨의 abduction은 45° 이하, flexion은 60° 이하, extension은 20° 이하, 팔꿈치의 flexion은 $60^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 사이, 손목의 supination과 pronation은 60° 이하, flexion과 extension은 15° 이하, radial deviation은 15° 이하, ulnar deviation은 25° 이하를 유지하는 것이 권고된다. 초음파 probe의 파지 자세는 power grip으로 하여 힘을 적용하기 용이하도록 한다. 작업 일정과 관련한 가이드라인은 초음파사들이 여러 유형의 scan 작업을 순환하여 수행하도록 하는 것과 일일 초음파 scan 작업량을 제한하는 것을 포함한다. 초음파 검사자의 작업 일정은 하루에 여러 유형의 초음파 검사를 수행하도록 계획되어, 각 유형 초음파 검사 유형에서 주로 사용되는 근골격계 조직이 서로 다른 유형의 초음파 검사 시 회복될 수 있도록 한다. 초음파사의 일일 초음파 scan 작업량은 고려되어야 하나 작업 환경 및 장비, 검사 유형, 초음파사의 경력, 그리고 1회당 작업 시간 등

많은 사항들이 고려되어야 하기 때문에 허용 가능한 검사량을 구체화하기는 어려운 실정이다. 따라서, 일일 적정 검사량을 파악할 수 있는 정보가 파악될 때까지는 일일 총 작업 시간을 고려해야 한다. 마지막으로 교육 관련 가이드라인은 적절한 작업 환경 구축, 작업 방법, 그리고 일정 관리의 주기적인 교육을 포함한다. 적절한 작업 환경 구축 관련 교육 가이드라인은 초음파 검사 장비, 의료용 bed, 의자 등의 적절한 배치, 환자의 적절한 위치 설정, 검사 시 팔꿈치를 지지할 수 있는 쿠션 및 장비 사용 등의 교육을 포함한다. 작업 방법 관련 교육 최적의 가이드라인은 검사 유형에 따른 최적 조작 방법 등의 교육을 포함한다. 일정 관리 관련 교육 가이드라인은 작업 간의 휴식 시간 준수, 일일 초음파 scan 작업량 조정 등의 교육을 포함한다. 기타 교육 관련 가이드라인으로 정기적인 근골격계 진단, 적절한 체력과 컨디션 유지, 신체에 위험 증상이 파악 시 즉시 내원 및 보고 등이 있다.

2.3. 초음파 작업의 인간공학적 설계 및 평가

초음파 작업에서의 근골격계 질환 위험 요소를 예방하기 위하여 다양한 인간공학적 평가 연구가 수행되었다. 초음파 scan 시의 신체부하를 정량화하기 위하여 평균 6.2명(1 ~ 11명)을 대상으로 주로 linear array, convex

유형의 probe를 사용하여 동작, 근전도, grip force, 그리고 만족도를 평가하였다((Burnett & Campbell-Kyureghyan, 2010; Mazzola et al., 2016; Paschoarelli et al., 2008; Vannetti et al., 2015; Village & Trask, 2007).

Burnett & Campbell-Kyureghyn (2010)은 초음파 작업 시 상지 관절의 움직임 및 push force를 정량적으로 평가하기 위하여 갑상선, 복부, 심부정맥 스캔 시의 손목, 팔꿈치, 아래팔, 어깨 관절 각도와 push force를 측정하였다. 측정 결과, 좌우 심부정맥 부위에서 초음파 작업 시 갑상선, 좌우 복부 부위 대비 손목, 팔꿈치, 아래팔에서 관절 움직임의 중립 이탈이 가장 많이 발생하며, 52% ~ 92% 이상의 push force가 요구되는 것이 파악되었다. Village & Trask (2007)은 초음파 작업 시의 자세 및 근육 부하를 평가하기 위하여 복부, 다리, 자궁 부위 초음파 작업 시의 동작, EMG, grip force를 측정하였다. 동작 분석 결과, 초음파 작업 시 어깨의 abduction 각도가 30° 이상인 시간이 68%, outward rotation 각도가 30° 이상인 시간이 63%, 목의 flexion, lateral bending, 그리고 twisting 각도가 20° 이상인 시간이 37%인 것으로 파악되었고, 경동맥 부위 검사 시 복부, 다리, 자궁 부위 대비 어깨의 abduction 각도가 큰 것으로 파악되었다. EMG 분석 결과, 초음파 작업 시 trapezius, supraspinatus, infraspinatus, flexor carpi ulnaris의 %MVC가 10% 이내에서 초음파 작업이 반복될수록 증가하여 최고 30% 이상 발생하는 것으로

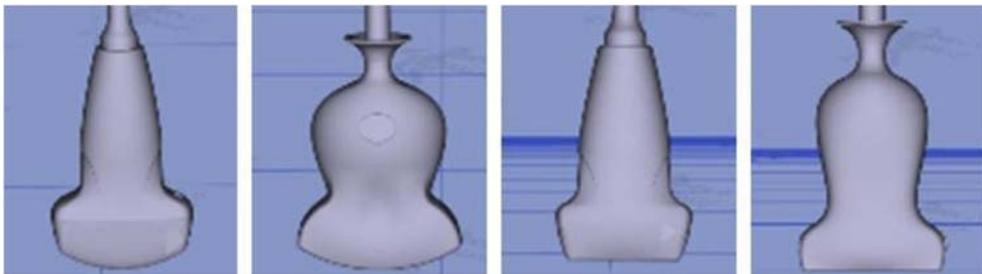
분석되었다. Forearm flexor muscle의 EMG를 통해 grip force를 분석한 결과, 초음파 probe 사용 시 평균 $3.96 \pm 2.94\text{kg}$ 의 grip force가 발생하는 것으로 나타났다. Vannetti et al. (2015)은 반복 조作的 감소를 위해 고안된 automatic scanning protocol의 사용성을 평가하기 위하여 기존의 조작 방법과 비교하여 초음파 검사 시의 동작과 EMG를 평가하였다. 동작 평가 결과, automatic scanning protocol을 사용한 복부 및 경동맥 초음파 검사 시 첫번째 metacarpal의 동작 궤적이 기존 조작 방법 대비 각 6%, 17% 감소된 것으로 파악되었다. EMG 분석 결과, automatic scanning protocol을 사용한 복부 및 경동맥 초음파 검사 시 anterior deltoideus의 RMS EMG가 기존 조작 방법 대비 각 51%, 44% 감소된 것으로 파악되었다. Paschoarelli et al. (2008)은 유방 초음파 검사 시 검사자의 손목 움직임 줄이기 위하여 인간공학적 grip 형상 및 회전 mechanism을 더해 인간공학적 linear array probe 3종을 설계하였다. 제안된 probe 3종의 설계와 기존의 probe 2종을 손목 동작 및 주관적 만족도 측면에서 비교한 결과, 제안된 probe 설계안 사용 시 기존 probe 대비 손목 flexion, extension, deviation 운동에서 움직임 각도가 작고, 불편감이 적으며 acceptance는 높은 것으로 파악되었다. Mazzola et al. (2016)은 초음파 검사 시 손, 손목, 아래팔의 불편을 줄이기 위하여 인간공학적 grip 형상을 더해 linear array probe 1종과 convex probe 1종을 설계하였다. 제안된

2가지 유형의 probe 각 1종과 기존의 probe 각 1종을 digital human model을 이용하여 손 관절의 torque 측면에서 비교 평가한 결과, 전반적으로 개선 probe의 torque가 적게 발생하는 것으로 파악되었다.



Commercial 1 Commercial 2 Mock-up 1 Mock-up 2 Mock-up 3

(a) Paschoarella et al. (2008)



Convex 1 Convex 2 Linear array 1 Linear array 2

(b) Mazzola et al.(2016)

Figure II.4. 기존 초음파 probe 설계 및 평가 연구의 평가 대상

Table II.1. 초음파작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구 동향: 참여자 특성

Author (year)	Participants							
	# subjects			Age (mean ± SD)	Height (cm)	Weight (kg)	Work experience (years)	Other conditions
	Total	Male	Female					
Burnett&Campbell (2010)	7	3	4	38.0 ± N.S.	173.7 ± 12.3	78.3 ± 12.5	10.3 ± 5.7	Right handed
Village et al. (2007)	11 (Posture)	N.S. (Posture)	N.S. (Posture)	42.5 ± 9.3	167.0 ± 6.2	64.3 ± 7.0	13.4 ± 8.9	Right handed
	3 (Muscle load)	1 (Muscle load)	2 (Muscle load)	40.7	169.5	70.3	10.0	
Vannetti et al. (2015)	1	-	-	-	-	-	Skilled sonographer	-
Paschoarellia et al. (2018)	10	5	5	22.3 ± 1.5	170.0 ± 0.6	67.7 ± 11.7	No Experience	No musculoskeletal symptoms in the upper limbs and neck
Mazzola et al. (2016)	2	1	1	-	164.9 ± 11.7	68.2 ± 14.8	-	Human model
Average	6.2	2.5	3.0	36.6	169.0	69.8	9.8	

Table II.2. 초음파작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구 동향: 작업 및 환경

Author (year)	Ultrasound System type	Probe type	Scan type	Scan duration	Layout
Burnett & Campbell (2010)	N.S.	N.S.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Thyroid ▪ Right abdominal ▪ Left abdominal ▪ Right deep venous thrombosis ▪ Left deep venous thrombosis 	N.S.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Patient lies directly to the right side of the sonographer facing him/her
Village et al. (2007)	N.S.	N.S.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abdominal ▪ Carotid ▪ Leg ▪ Obstetrical 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 22.2 min (Posture) 	N.S.
Vannetti et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Portable US system 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Convex (Abdominal) ▪ Linear (Vascular) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abdominal ▪ Vascular 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vascular (eTouch: 90 s; manual: 131 s) ▪ Abdominal (eTouch: 114 s; manual: 148 s) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ US height: 79 cm (from trackball to ground) ▪ Height of chair: 44 cm ▪ Height of exam table: 63 cm
Paschoarella et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ultrasound equipment simulator 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Linear <ul style="list-style-type: none"> - Commercial 1 - Commercial 2 - Mock-up 1 - Mock-up 2 - Mock-up 3 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Breast <ul style="list-style-type: none"> - Longitudinal - Transversal - Rotational 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 12 min per set 	N.S.
Mazzola et al. (2016)	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Convex ▪ Linear 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abdominal ▪ Vascular ❖ Grip type <ul style="list-style-type: none"> - Longitudinal - Transversal - Palmar 	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Virtual simulation environment

Table II.3. 초음파작업의 인간공학적 설계 및 평가 연구 동향: 평가 척도

Author (year)	Measures			
	Motion	EMG	Force	Satisfaction
Burnett & Campbell-Kyureghyan (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Wrist flexion/extension • Wrist radial/ulnar deviation • Elbow flexion/extension • Forearm pronation/supination • Shoulder abduction 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Average peak push force 	-
Village & Trask (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Shoulder abduction • Shoulder outward rotation • Neck lateral bending/twisting 	<ul style="list-style-type: none"> • Percent maximum voluntary contraction 	-	-
Vannetti et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Marker trajectory (first metacarpal) 	<ul style="list-style-type: none"> • Root Mean Square EMG • Normalized EMG 	-	-
Paschoarelli et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Wrist flexion/extension • Wrist ulnar/radial deviation • wrist supination/pronation 	-	-	100 score <ul style="list-style-type: none"> • Acceptability • Discomfort
Total	4건	2건	1건	1건

III. 초음파 Probe의 인간공학적 평가 Protocol 개발 및 적용

초음파 probe의 인간공학적 평가를 위하여 사용 특성 분석, 설계 특성 분석, 인간공학적 평가 실험, 평가 결과 분석의 네 단계로 구성된 초음파 probe 설계의 평가 protocol을 제안한다. 사용 특성 분석 단계는 사용 환경과 사용 작업 분석을 통해 초음파 probe와 사용자간 physical user interface (PUI)를 이해하는 단계이다. 설계 특성 분석 단계는 설계 인자 정립, 설계 인자 유형 분류, 설계 인자 중요도 평가, 주요 설계 인자 제원 분석을 통해 초음파 probe의 설계 특성을 파악하는 단계이다. 인간공학적 평가 실험 단계는 평가 대상을 선정하고 동작, 근전도, 파지 자세, 주관적 만족도 평가를 통해 초음파 probe 설계에 따른 사용성을 종합적으로 평가하는 단계이다. 평가 결과 분석 단계는 평가 실험 결과를 분석하고 선호 설계 특성을 파악하는 단계이다. 본 연구에서 제안된 초음파 probe 설계의 평가 protocol은 본 장에서 단계별로 설명과 linear array probe를 대상으로 한 적용 사례를 통해 상세히 기술되어 있다.

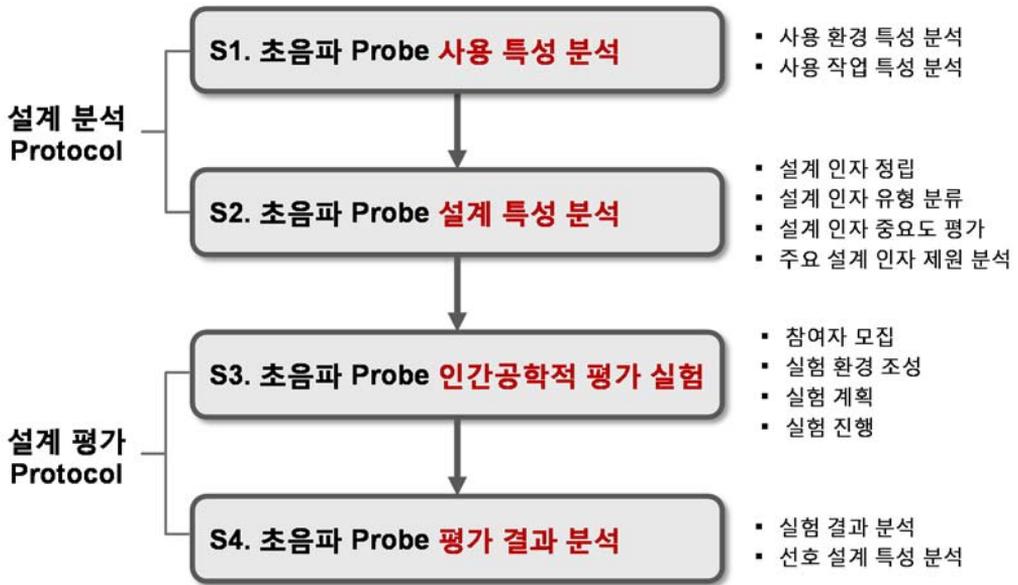


Figure III.1. 초음파 probe 설계의 인간공학적 평가 protocol

3.1. 초음파 Probe 사용 특성 분석

3.1.1. 사용 환경 특성 분석

평가 대상 초음파 probe 유형에 대한 사용 환경 특성을 분석하기 위하여 probe의 사용 용도 및 사용되는 환경을 조사한다. 평가 대상 probe의 사용 용도 및 사용 환경을 조사하기 위하여 문헌 조사, 설문, 인터뷰 등을 수행한다. 수행 결과를 통해 평가 대상 probe의 주요 사용 용도를 분석하고, 사용되는 환경에서 필요한 장비, 장비의 배치, 검사 부위의 위치 등의 환경 특성을 분석한다.

본 연구에서는 linear array probe의 사용 환경 특성을 분석하기 위하여 문헌 조사 및 전문가 인터뷰를 수행하고 사용 용도 및 사용 환경을 파악하였다. 수행 결과, linear array probe의 주요 사용 용도는 유방 초음파 검사이며, linear array probe를 사용한 유방 초음파 검사 환경은 검사자의 stool 앞에 초음파 영상 진단 장비가 배치되고, stool의 오른쪽 옆에 배치된 의료용 bed 위에 환자가 누운 자세로 위치되는 것이 파악되었다.



(a) 사용 용도

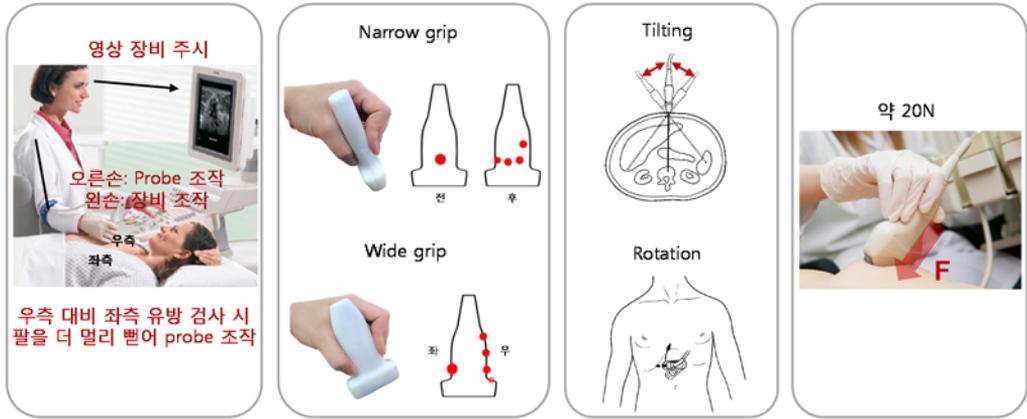
(b) 사용 환경: 유방 검사

Figure III.2. Linear array probe의 사용 환경 특성 분석

3.1.2. 사용 작업 특성 분석

평가 대상 초음파 probe 유형에 대한 사용 작업 특성을 분석하기 위하여 probe의 사용 자세 및 조작 동작을 조사한다. 평가 대상 probe의 사용 자세 및 조작 동작을 조사하기 위하여 문헌 조사, 설문, 인터뷰, 사진 및 동영상 분석 등을 수행한다. 수행 결과를 통해 평가 대상 probe 사용 시의 검사자의 전신 자세, grip 손 자세를 분석하고, 주요 조작 동작, 조작 힘 크기 등의 사용 특성을 분석한다.

본 연구에서는 linear array probe를 이용한 유방 초음파 검사 시의 사용 작업 특성을 분석하기 위하여 사진 분석을 통해 사용 자세를 분석하고, 전문가 인터뷰를 통해 조작 동작을 조사하였다. Linear array probe를 이용한 유방 초음파 검사 시 촬영된 사진 분석 결과, 검사 자세는 앉은 상태에서 전면의 초음파 영상 장비를 주시하며 오른손으로 probe를 파지하고 검사를 수행하는 것으로 파악되었으며 오른쪽 유방 대비 왼쪽 유방 검사 시 팔을 더 멀리 뻗어 probe를 조작하는 것이 파악되었다. 파지 자세는 pinch grip을 사용하나 grip부의 앞뒷면을 pinch grip하는 경우와 grip부의 측면을 pinch grip 경우로 나뉘는 것으로 파악되었다. 전문가 인터뷰 결과, linear array probe를 이용한 유방 초음파 검사 시 조작 동작은 tilt와 rotation 동작이 주로 사용되며, 조작 힘은 20 N 정도인 것으로 파악되었다.



(a) 사용 자세 (b) Grip 자세 (c) 주요 조작 동작 (d) 조작 힘

Figure III.3. Linear array probe의 사용 작업 특성 분석: 유방 검사

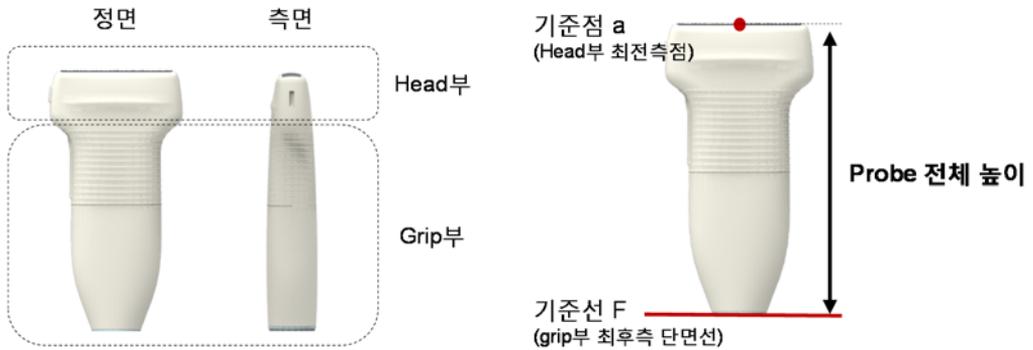
3.2. 초음파 Probe 설계 특성 분석

3.2.1. 설계 인자 정립

초음파 probe의 설계 인자 정립은 (1) 설계 평면 정의, (2) 평가 부위 구분, (3) 기준점 및 기준선 정의, (4) 설계 인자 파악의 네 단계를 통해 수행된다. 첫째, 초음파 probe의 외곽 형상이 잘 드러날 수 있도록 정면, 측면, 평면으로 설계 평면을 정의한다. 둘째, 초음파 probe를 사용자가 파지하는 grip부와 환자 신체에 접촉되는 head부로 평가 부위를 구분한다. 초음파 probe의 유형에 따라 사용성에 영향을 미치는 것으로 사료되는 guard부(손의 미끄러짐을 방지하는 부위), direction marker부(probe의 방향을

표시하는 부위) 등이 추가될 수 있다. 셋째, 각 설계 평면에서 평가 부위별로 기준점 및 기준선을 정의한다. 기준점 및 기준선은 외형의 변곡점, 돌출점, 최우측 및 최좌측점, 중점, 평가부위 경계선 등 특징적인 부위에 대해 정의될 수 있다. 넷째, 정의된 기준점 및 기준선을 기준으로 길이, 너비, 두께, 각도, 곡률, 둘레길이 등의 초음파 probe의 설계 인자를 분석한다.

본 연구에서는 linear array probe를 대상으로 설계 평면을 정면과 측면으로 정립하고 grip부와 head부를 구분하였다. 그리고 grip부에서 기준점 14개와 기준선 5개, head부에서 기준점 9개와 기준선 1개가 정의되었다. 마지막으로, 길이, 너비, 두께, 곡률, 둘레길이 측면에서 25개의 설계인자가 분석되었다. 예를 들면, probe의 정면에서 기준점 a (head부 최전측점)와 F (grip부 최후측 단면선) 사이의 수직거리로 probe 전체 높이 설계 인자가 도출되었다 (Figure 3.4 참조).



(a) 설계 평면 및 평가 부위 정의 (b) 기준점/기준선 정의 및 설계인자 도출

Figure III.4. Linear array probe 설계 인자 정립: Probe 전체 높이

3.2.2. 설계 인자 유형 분류

설계 인자의 특성과 설계 고려사항을 파악하기 위하여 분석된 설계 인자를 인체측정학적 인자, 생체역학적 인자, 그리고 감성적 인자로 분류한다. 인체 측정학적 인자는 설계 시 사용자의 인체 치수와 여유공간을 고려하여 결정될 필요가 있는 인자로 grip부의 둘레길이 관련 설계 인자를 예로 들 수 있다. 생체역학적 인자는 사용 시의 힘, 동작, 인체부하를 고려하여 결정될 필요가 있는 인자로 probe의 전체 길이를 예로 들 수 있다. 감성적 인자는 사용자의 감성적 요소(e.g., grip comfort)를 고려하여 결정할 필요가 있는 인자로 grip부의 곡률 관련 설계 인자를 예로 들 수 있다.

본 연구에서는 인간공학 전문가 3인의 의견을 수렴하여 linear array

probe를 대상으로 분석된 25개의 설계 인자가 인체측정학적 인자 10개, 생체역학적 인자 3개, 그리고 감성적 인자 12개로 분류되었다. 예를 들어, 사용자의 손 크기를 고려하여 결정될 필요가 있는 grip부 최대 너비는 인체측정학적 인자로 분류되고, 사용 시 조작 용이성을 고려하여 결정될 필요가 있는 probe 전체 길이는 생체역학적 인자, 그리고 파지 시 그립감을 고려하여 결정될 필요가 있는 grip부 정면 최대돌출점 곡률은 감성적 인자로 분류되었다(Figure 3.5 참조).



Figure III.5. Linear array probe 설계 인자 유형 분류 예시

3.2.3. 설계 인자 중요도 평가

초음파 probe 설계 및 평가 시 주요하게 분석되어야 하는 설계 인자를 파악하기 위하여 중요도 평가를 수행한다. 중요도 평가는 손 접촉 빈도, 손 자세, 사용 동작을 종합적으로 고려하여 각 설계 인자에 대해 수행된다. 중요도 분석 결과에 따라 우선 순위를 고려하여 probe의 사용성에 주요한 영향을 미칠 것으로 사료되는 설계 인자를 주요 설계 인자로 선정한다.

본 연구에서는 linear array probe를 대상으로 분석된 25개의 설계 인자에 대하여 인간공학 전문가 3인이 7-point Likert scale (1: 중요도 매우 낮음, 4: 보통, 7: 중요도 매우 높음)을 사용하여 중요도를 평가하고, 평가 결과를 취합하여 평균 4점 이상의 인자를 분석 대상 주요 설계인자로 선정하였다. 중요도 평가 결과, 설계 인자 25개 중 인체측정학적 인자 10개, 생체역학적 인자 2개, 그리고 감성적 인자 7개의 총 19개 설계 인자가 주요 설계 인자로 선정되었다.

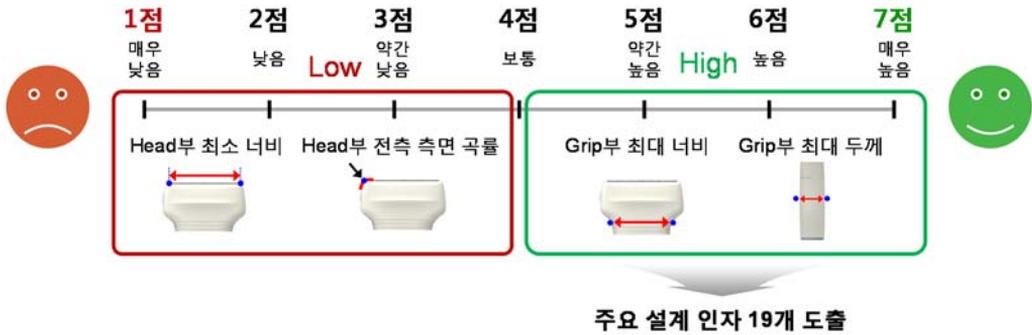


Figure III.6. Linear array probe 설계 인자 중요도 평가 예시

3.2.4. 주요 설계 인자 제원 분석

기존 초음파 probe들의 설계 인자를 정량화하고 설계 특성을 benchmarking 하기 위하여 제원을 분석한다. 제원 분석은 (1) CAD data 확보, (2) 설계 평면에 따라 정렬, (3) 외곽선 추출 및 기준점/기준선 적용, (4) 설계 인자 치수 측정의 네 단계로 수행된다. 첫째, 분석 대상의 CAD data는 기존 설계 data를 활용하거나 3D scanning을 통해 3D 형상 data를 획득할 수 있다. 둘째, 입수된 CAD data는 정면, 측면, 평면의 설계 평면에 따라 정렬한다. 셋째, 각 설계 평면에 정렬된 초음파 probe의 외곽선을 추출하고 설계 인자 분석 시 정의된 기준점 및 기준선을 적용한다. 마지막으로, CAD software를 이용하여 설계 인자의 치수를 측정한다.

본 연구에서는 형상과 크기가 다른 linear array probe들을 대상으로

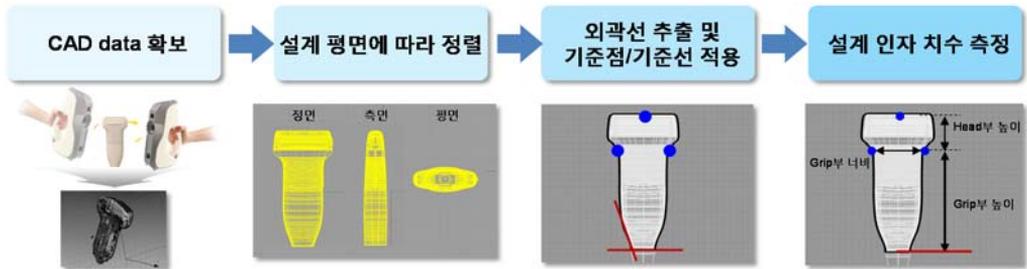


Figure III.7. 초음파 probe의 주요 설계 인자 제원 분석 절차

제원을 분석하였다. Artec Eva 3D scanner (Artec Group, Palo Alto: CA, USA)을 활용하여 얻은 3D probe scan data를 설계 평면에 따라 정렬하였다. 정면과 측면에서의 외곽선을 추출하고 분석된 기준점과 기준선을 적용하였다. Alias Automotive 2012 (Autodesk Inc., San Rafael: CA, USA)를 활용하여 주요 설계 인자에 대하여 설계 제원이 측정되었고 linear array probe의 설계 특성이 파악되었다.

3.3. 초음파 Probe 인간공학적 평가 실험

3.3.1. 실험 참여자

초음파 probe의 인간공학적 평가를 위하여 실험에 참여할 참여자를 모집한다. 전문적이며 신뢰성 있는 probe 평가 결과 수집을 위하여 평가 대상 probe 유형을 사용해본 경험이 있으며 신체가 건강한 참여자가

선호된다. 다양한 크기의 사용자로부터 평가 결과를 수집하기 위하여 실험 참여자는 사용자 집단의 신장 및 손 크기 측면에서 고루 분포되도록 모집되는 것이 권고된다.

본 연구에서는 linear array probe의 인간공학적 평가 실험을 위하여 근골격계 질환 병력이 없고 linear array probe를 사용한 초음파 검사 경험이 5년 이상인 조건 하에 다양한 신장을 가진 한국인 여성 초음파사 12명(나이 = 36.3 ± 4.6 세; 경력 = 9.9 ± 3.8 년; 신장 = 163.2 ± 5.7 cm)이 모집되었다. 실험참여자의 손 길이(170.8 ± 8.2 mm)는 2010년 SizeKorea data의 20 ~ 40대 여성($n = 1675$)의 손 길이(170.2 ± 7.2 mm)와 평균과 분산 측면에서 통계적으로 유사하였다($t[1685] = 0.29, p = 0.77$ for mean difference; $F[11, 1674] = 1.29, p = 0.45$ for variance difference).

3.3.2. 실험 환경

초음파 probe의 인간공학적 평가 환경은 평가 대상 probe의 사용 환경 특성 및 사용 작업 특성을 고려하여 조성된다. 평가 대상 probe를 이용한 검진 시의 환경과 유사하게 초음파 영상 진단 장비, 의료용 bed, stool 등 필요 장비를 배치한다. Testing bed를 사용할 경우 실제 초음파 검진 시 검사 부위가 위치되는 곳과 유사하도록 배치한다. Testing bed는 기존의

의료용 인체 모형을 사용하거나, 실험에 필요한 통제(e.g., probe 조작 힘)를 위하여 환자의 치수, 인체 물성 등을 고려하여 제작될 수 있다. Task 수행 시의 동작 및 파지 자세 측정을 위한 동작 분석 장비와 근전도 측정을 위한 EMG 측정 장비를 setting하고 주관적 만족도 평가를 위한 설문 평가지를 준비한다. 주관적 만족도 설문 평가지는 Table 3.1의 인체측정학적, 생체역학적, 감성적 측면, 그리고 전반적 만족도에서의 10가지 인간공학적 평가 기준과 probe의 component 사이 연관성 분석을 통해 선정된 항목으로 구성된다. 예를 들어, probe가 잘 잡히는 정도를 평가하는 감성적 측면의 그립감 항목은 grip부와 연관성이 높으나 head부와는 연관성이 적으므로 grip부만을 대상으로 평가하도록 한다. 크기 적절성, 각도 적절성, 그리고 곡률 적절성 항목은 probe 설계 인자와 연관지어 평가하도록 세분화한다. 예를 들어, head부의 크기 적절성은 head부의 크기 관련 설계 인자인 너비와 두께를 고려하여 head부 최대 너비 적절성과 head부 최대 두께 적절성으로 세분화되어 평가한다.

Table III.1. 초음파 probe 평가를 위한 인간공학적 평가 기준

기준		설명
인체측정학적 측면	크기 적절성	Probe 크기가 파지하기에 적절한 정도
	형태 적합성	Probe 형태가 파지하기에 적합한 정도
생체역학적 측면	자세 적합성	Probe 사용 시 사용 자세가 적합한 정도
	각도 적절성	Probe 각도가 파지 하기에 적절한 정도
	힘 사용 적절성	Probe 사용 시 힘 사용이 적절한 정도
	압력 분산 적절성	Probe 를 파지 하였을 때 압력 분산이 적절한 정도
	조작 용이성	Probe 사용 시 조작하기 쉬운 정도
감성적 측면	곡률 적절성	Probe 곡률이 파지 하기에 적절한 정도
	그립감	Probe 를 잡았을 때 잘 잡히는 정도
전반적 만족도		Probe 를 사용할 때 전반적으로 만족하는 정도

본 연구에서는 linear array probe의 인간공학적 평가 환경 조성을 위하여 linear array probe를 사용한 유방 검사 시의 전형적 배치 형태에 따라 초음파 영상 진단 장비, 의료용 bed, phantom frame, probe 조작힘 monitoring 장치, stool이 배치되었다. 초음파 영상 진단 장비 iU22 ultrasound system (Royal Philips Electronics N.V., Amsterdam, Netherlands), 검사용 bed (length * width * height = 1800 * 730 * 650 mm), 그리고 stool (height range = 440 ~ 580 mm)이 Figure 3.8과 같이 위치되었다. 검사용 bed 위에는 breast silicon phantom (length×width×height = 100×100×30 mm; GI-720, GI Silicone, Taiwan)과 aluminum profile을 사용하여 제작된 frame (right height = 190 mm, left height = 270 mm)이 위치되었다. 실험 참여자가

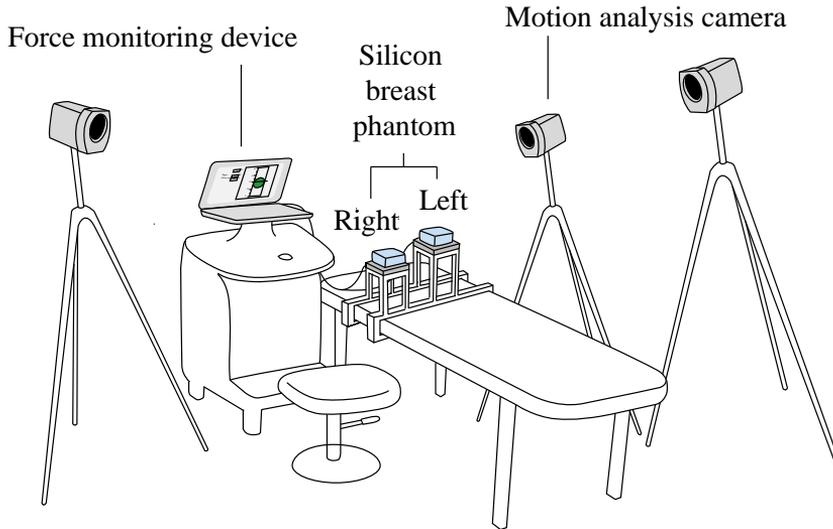


Figure III.8. Linear array probe 인간공학적 평가 실험 환경

일정한 범위의 힘($20\text{ N} \pm 4\text{ N}$)을 적용하여 probe 사용 동작을 모의 수행할 수 있도록 하기 위하여 Figure 3.9과 같은 silicone phantom과 force monitoring system이 활용되었다. Silicone phantom의 하부 중앙에 one-axis loadcell을 설치하여 probe 사용 동작 시 적용된 힘이 측정되었고, Visual Basic 6.0를 활용하여 개발된 program을 통해 실험 참여자가 실시간으로 적용된 힘을 확인할 수 있도록 screen을 통해 표시(힘 적용 허용 범위 내: 녹색, 허용 범위 이상: 흰색)되었다. Probe 조작힘 monitoring을 위한 laptop이 실험 참여자 정면에 위치되었으며, stool의 높이는 각 실험 참여자에게 적절하게

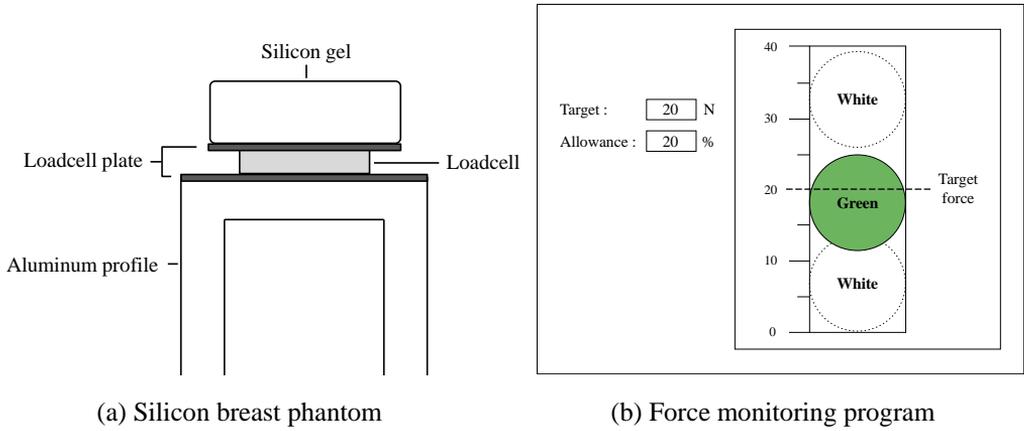


Figure III.9. Force monitoring system

조정되었다. 본 연구에서는 실험 참여자의 신체 동작과 파지 손 자세 측정을 위하여 10대의 Osprey Motion Analysis System (Motion Analysis Corp, Santa Rosa: CA, USA; frame rates: 50Hz)과 근전도 측정을 위한 EMG 측정 장비(TELEMYO DTS Telemetry, Noraxon, Scottsdale: AZ, USA; frame rates: 1000Hz)가 배치되었다. 주관적 만족도 평가지는 평가 대상에 대한 만족도를 인간공학적 평가 기준과 probe의 component 사이 연관성 분석을 통해 선정된 26가지 항목에 대해 상대평가 하도록 3-point bipolar scale (-3: 매우 나쁨, 0: 동등, 3: 매우 좋음)을 사용하여 Figure 3.10과 같이 구성되었다.

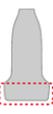
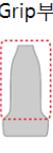
평가 부위	평가 항목	Image	LC probe 대비 SF probe의 주관적 만족도
Head부 	Head부 최대 두께		③ ② ① ① ② ③ ← 매우 나쁨 나쁨 약간 나쁨 동일 약간 좋음 좋음 매우 좋음 →
			⋮
Grip부 	Grip부 전측 너비		③ ② ① ① ② ③ ← 매우 나쁨 나쁨 약간 나쁨 동일 약간 좋음 좋음 매우 좋음 →
			⋮

Figure III.10. Linear array probe 주관적 만족도 평가지 예시

3.3.3. 실험 계획

초음파 probe의 인간공학적 평가 실험을 수행하기 위하여 평가 대상, task, 동작, 근전도, 파지 자세의 평가 부위 등의 실험 계획을 수립한다. 평가 대상은 초음파 probe의 설계에 따른 사용성을 비교할 수 있도록 형상과 크기 측면에서 다른 probe들로 선정한다. Task는 평가 대상 probe 유형의 주요 조작 동작과 grip 방법을 고려하여 선정한다. Typical physical load와 high physical load 조건에서의 신체적 부하를 평가하기 위하여 task를 분류할 수 있다. 평가 대상 probe 간의 평가 순서 및 task 순서는 학습 효과 및 피로 효과를 최소화하기 위하여 randomize 한다. Probe 사용 작업 특성을

고려하여 task 수행 시 측정되는 신체 동작, 근전도, 파지 자세의 분석 부위를 선정한다.

본 연구에서는 linear array probe의 인간공학적 실험 평가를 위하여 평가 대상은 Figure 3.11과 같이 linear array probe 중 크기가 작고 단면이 평평한 형상(small-flat, SF)의 probe와 크기가 크고 단면이 굴곡진 형상(large-curved, LC)의 probe 2가지로 선정되었다. 본 실험의 task는 Figure 3.12와 같이 right breast phantom과 left breast phantom을 대상으로 tilt with narrow grip, tilt with wide grip, rotation의 동작을 수행하는 것으로 설정되었다. Typical physical load와 high physical load 조건에서 신체적 부하를 평가하기 위하여 typical physical load 자세는 실험 참여자로부터 가깝고 높이가 낮게 제작된 right breast phantom을 대상으로 probe를 조작하도록 하였고 high physical load 자세는 상대적으로 멀고 높이가 높게 제작된 left breast phantom을 대상으로

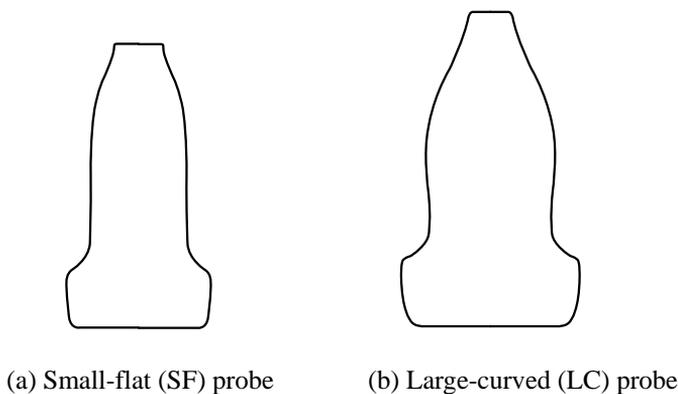


Figure III.11. Linear array probe 평가 대상

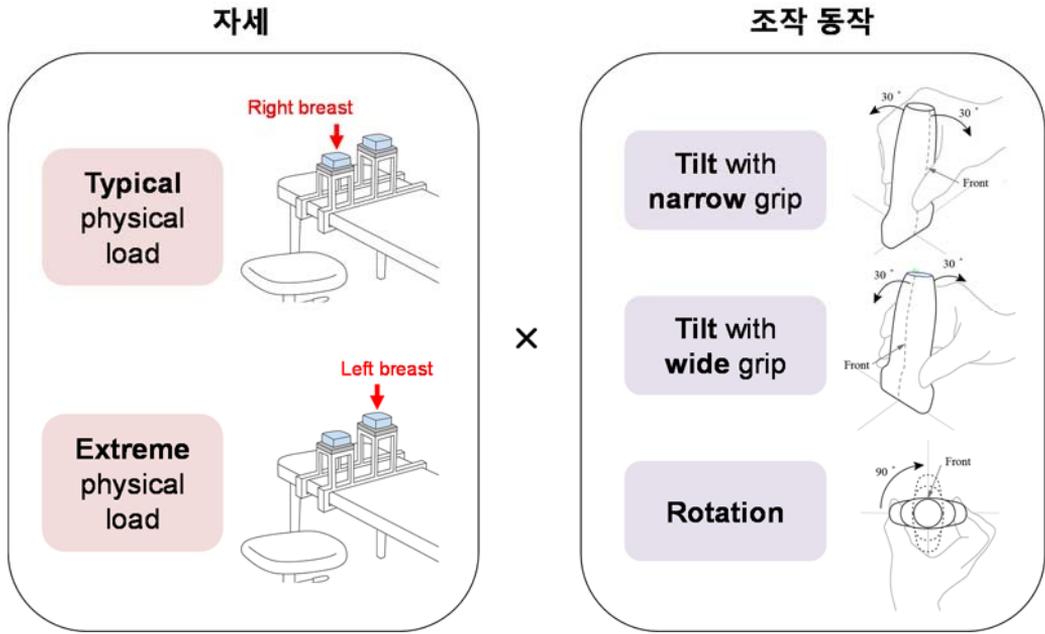


Figure III.12. Linear array probe 평가 대상 작업

probe를 조작하도록 하였다. Tilt with narrow grip 동작은 grip부의 앞뒷면을 pinch grip하고 좌우측으로 30° tilt하여 수행되었다. Tilt with wide grip 동작은 grip부의 측면을 pinch grip하고 전후측으로 30° tilt하여 수행되었다. Rotation 동작은 grip부의 측면을 pinch grip하고 시계 방향으로 90° rotation하여 수행되었다. Task 수행 시간은 한 동작당 3초 ~ 4초로 통제되었다. SF probe와 LC probe간 평가 순서 및 task 진행 순서는 randomization 되었다. Task 수행 시 측정되는 신체 동작, 근전도, 파지 자세의 분석 부위는 유방 초음파 검사 시의 사용 특성을 고려하여 선정되었다. 동작 측정 부위는 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 rotation으로 선정되었다. 근전도 측정 부위는 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 digitorum로 선정되었다. 파지 자세 측정 부위는 thumb의 metacarpal adduction, extension, proximal phalange extension, distal phalange extension과 index/middle/ring/pinky fingers의 proximal phalange abduction, flexion, middle phalange flexion, distal phalange flexion으로 선정되었다.

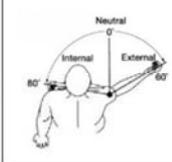
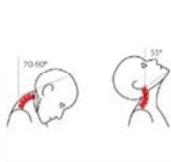
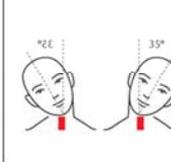
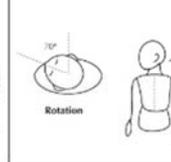
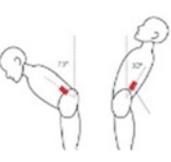
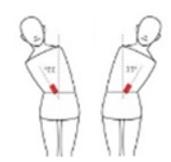
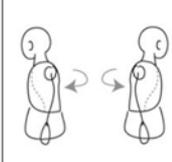
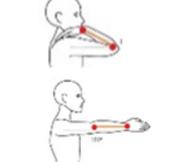
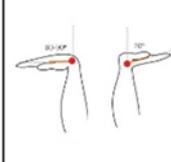
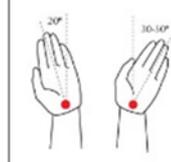
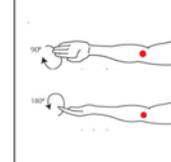
Body part	Shoulder			Neck			
Joint Rotation	Flexion/ Extension	Adduction/ Abduction	Internal/External Rotation	Flexion/ Extension	Right/Left Bending	Right/Left Rotation	
Image							
Body part	Back			Elbow	Wrist		
Joint Rotation	Flexion/ Extension	Right/Left Bending	Right/Left Rotation	Flexion/ Extension	Flexion/ Extension	Radial/Ulnar Deviation	Internal/External Rotation
Image							

Figure III.13. Linear array probe 평가 실험의 동작 분석 부위

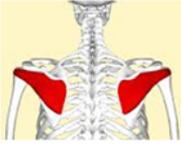
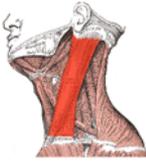
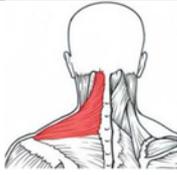
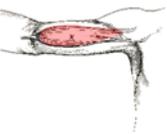
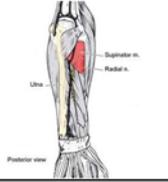
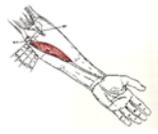
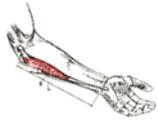
Body part	Shoulder			Neck		Lower back	
Muscle	Deltoid	Pectoralis major	Infraspinatus	Sterno-cleido-mastoid(SCM)	Trapezius	Quadratus Lumborum	
Image							
Body part	Arm						
Muscle	Biceps	Supinator	Pronator Teres	Flexor Carpi Ulnaris(FCU)	Flexor Carpi Radialis(FCR)	Extensor Digitorum	Flexor Digitorum
Image							

Figure III.14. Linear array probe 평가 실험의 근전도 분석 부위

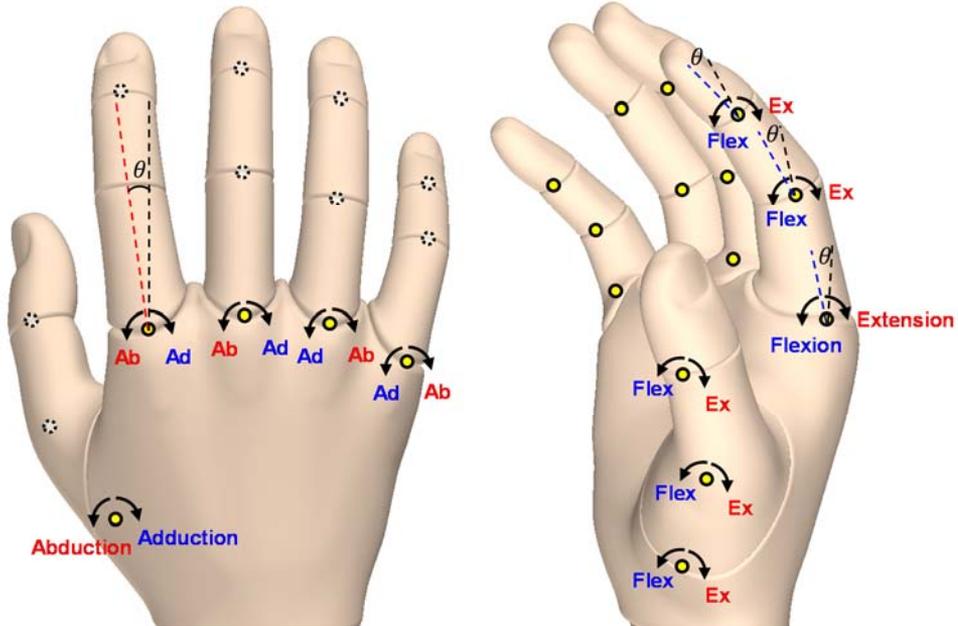
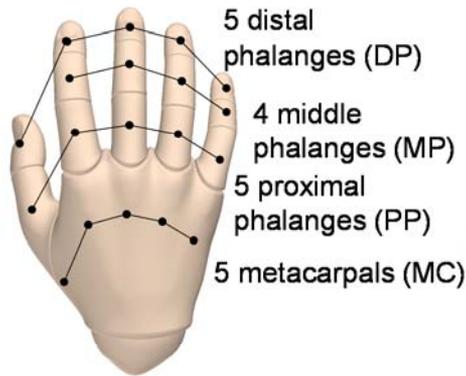


Figure III.15. Linear array probe 평가 실험의 파지 자세 분석 부위

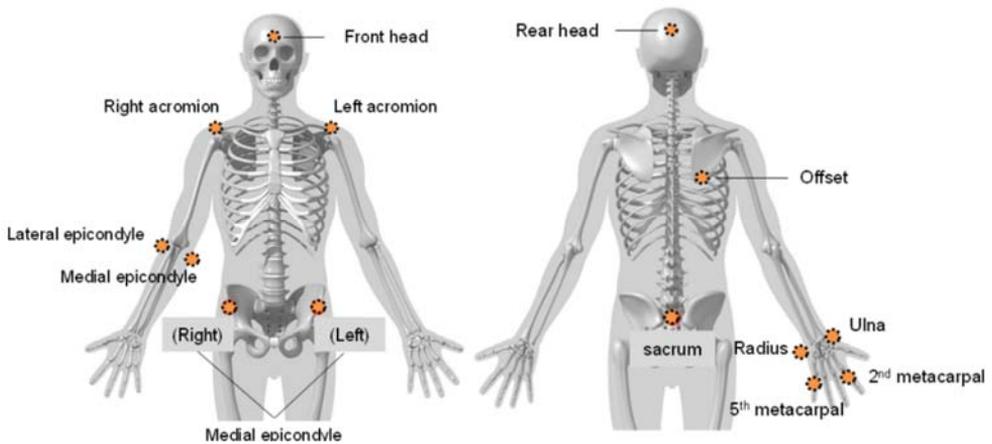
3.3.4. 실험 절차

초음파 probe의 인간공학적 평가 실험은 (1) 실험 준비 및 인체 측정, (2) task 수행 시 신체 동작과 근전도 측정, (3) probe 파지 자세 측정, (4) 주관적 만족도 평가, (5) 사후 설문 의 다섯 단계를 통해 수행된다. 첫째, 실험 준비 및 인체 측정 단계에서는 실험 목적과 방법을 실험 참여자에게 설명하고 실험참여자가 환복 후 인체 측정을 수행한다. 신체 동작 측정을 위한 reflective markers와 근전도 측정을 위한 EMG 측정 전극 및 무선 신호 송신 모듈을 실험 참여자의 신체에 부착한다. 둘째, 근전도 및 동작 측정 단계에서는 실험 참여자가 계획된 순서에 따라 평가 대상 probe를 사용하여 task를 수행할 때의 동작과 근전도를 측정한다. 셋째, 파지 자세 측정 단계에서는 reflective markers를 실험 참여자의 오른손에 부착 후 파지 손 자세를 측정한다. 파지 자세는 실제 검사 시와 유사한 손 자세를 취하도록 하기 위해 probe를 파지하고 자연스럽게 사용 동작을 취한 후 동작이 정지된 상태에서 측정한다. 넷째, 주관적 만족도 평가 단계에서는 평가 대상 probe들에 대한 주관적 만족도를 task 수행 경험을 바탕으로 설문 평가지를 이용하여 평가한다. 마지막으로, probe의 선호 설계 특성에 대해 사후 설문을 실시한 후 실험을 종료한다.

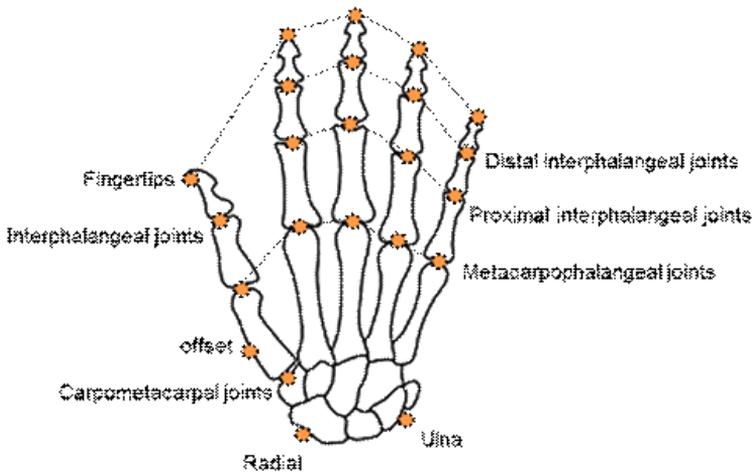
본 연구에서 제안한 초음파 probe의 인간공학적 평가 실험 절차에

따라 linear array probe의 평가 실험이 수행되었다. 첫째, 실험 준비 및 인체 측정 단계에서는 실험 목적과 방법을 실험 참여자에게 설명한 후 실험 참여 동의서를 받았다. 실험참여자가 실험복으로 환복 후 신장, 몸무게, 손 길이를 측정하였으며, reflective markers와 EMG 측정 전극 및 무선 신호 송신 모듈을 실험 참여자의 신체에 부착하였다. Reflective markers는 실험 참여자 신체의 14개 부위(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)에 부착되었고, EMG 측정 전극은 실험 참여자 신체의 14개 부위(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)에 부착되었다. 둘째, 근전도 및 동작 측정 단계에서는 right breast phantom과 left breast phantom을 대상으로 tilt with narrow grip, tilt with wide grip, rotation을 각각 2회 반복하는 동안 실험 참여자의 근전도와 신체 동작이 동시 측정되었다. 셋째, 파지 자세 측정 단계에서는 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 부착한 후 narrow grip과 wide grip 시 손 자세가 측정되었다. 넷째,

주관적 만족도 평가 단계에서는 LC probe 대비 SF probe의 상대적 만족도가 평가 설문지를 사용하여 평가되었다. 마지막으로, linear array probe의 선호 설계 특성에 대해 사후 설문을 실시한 후 실험을 종료하였다.



(a) 동작 측정



(b) 파지 자세 측정

Figure III.16. Linear array probe 평가 실험의 reflective markers 부착 위치

3.4. 초음파 Probe 평가 결과 분석

3.4.1. 동작

동작 측정 data는 후처리 후 분석 부위의 관절 가동 각도(동작 범위), peak 관절 각도, 편안한 범위 이탈 정도(comfortable range of motion; CROM) 등의 평가 measure를 사용하여 분석된다. 분석된 동작 data를 probe별로 비교 평가하고, probe 설계에 따른 동작 차이의 유의성을 확인하기 위하여 통계 분석을 수행한다.

본 연구에서는 probe 사용 시 측정된 동작 data에서 목, 어깨, 허리, 팔꿈치, 그리고 손목 중심에 local coordinate system을 정의하여 평가 부위의 각도를 분석하였다. 측정된 reflective marker의 궤적은 noise에 의한 영향을 제거하기 위하여 fourth-order Butterworth filter (cut-off frequency = 5 Hz)를 사용하여 filtering되었다. Task 수행 시의 관절 가동 각도 분석을 통해 LC probe와 SF probe 사용 시의 동작이 비교 평가 되었으며, 유의한 동작 차이를 확인하기 위하여 paired-*t* test가 유의수준 0.05 수준에서 수행되었다. 관절 가동 각도 비교 평가 결과, LC probe 대비 SF probe 사용 시 어깨, 목, trunk, 팔꿈치, 손목에서 전반적으로 동작 범위가 다소 넓으나, 그 차이는 평균 $0.7^{\circ} \pm 2.3^{\circ}$ 로 크지 않은 것으로 파악되었다. 예를 들어, SF probe 사용 시 어깨 abduction/adduction 측면에서 관절 가동 각도는 LC probe 대비

LC probe 대비 SF probe 사용 시의 평균 관절 가동 각도

(n = 12)

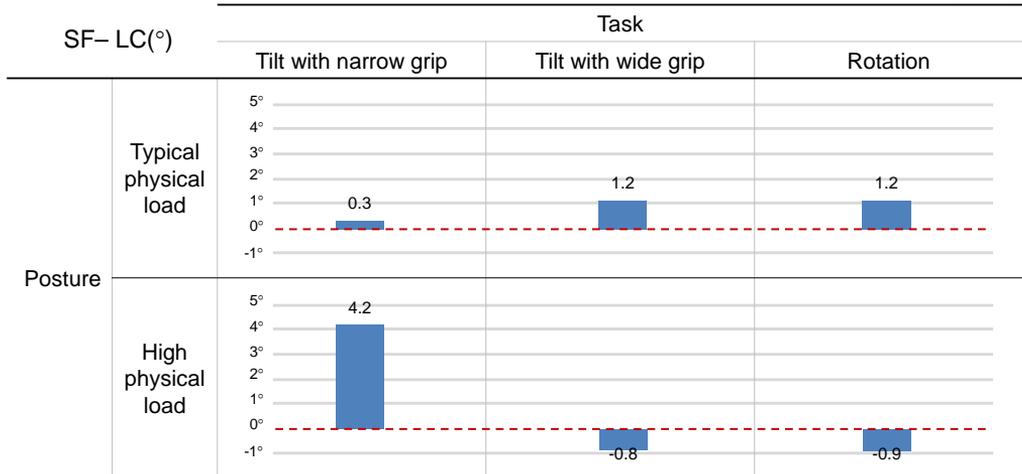


Figure III.17. Linear array probe 동작 분석 결과: 어깨의 abduction/adduction 예시

평균적으로 $0.9^\circ \pm 1.9^\circ$ 넓은 것으로 나타났다. 조건을 분류하여 분석한 결과, 어깨 abduction/adduction 측면에서 LC probe 대비 SF probe 사용 시의 평균 관절 가동 각도는 자세 조건 분류 시 typical physical load 자세에서 $0.9^\circ \pm 0.5^\circ$, high physical load 자세에서 $0.8^\circ \pm 2.9^\circ$ 넓게 나타났고, 조작 동작 분류 시 tilt with narrow grip 동작에서 $2.3^\circ \pm 2.7^\circ$, tilt with wide grip 동작에서 $0.2^\circ \pm 1.4^\circ$, rotation 동작에서 $0.1^\circ \pm 1.4^\circ$ 넓은 것으로 나타났다(Figure 3.17 참조). 통계 분석을 수행한 결과, SF probe와 LC probe 사용 시 동작 측면에서 유의한 차이가 있는 관절 부위가 파악되었다. 예를 들어, LC probe 대비 SF probe 사용 시의 관절 가동 각도는 high physical load 자세에서 tilt with narrow

grip 시 손목 internal/external rotation 측면에서 2.2° ($t[11] = 2.47, p = 0.031$), tilt with wide grip 시 trunk right/left bending 측면에서 1.87° ($t[11] = 2.83, p = 0.016$), rotation 시 목 right/left bending 측면에서 1.30° ($t[11] = 4.30, p = 0.001$) 유의하게 넓은 것으로 나타났다.

3.4.2. 근전도

근전도 측정 data는 후처리 후 분석 부위의 EMG RMS, %MVC 등의 평가 measure를 사용하여 분석된다. 분석된 근전도 data를 probe별로 비교 평가하고, probe 설계에 따른 근전도 차이의 유의성을 확인하기 위하여 통계 분석을 수행한다.

본 연구에서 probe 사용 시 측정된 EMG 신호는 bandpass filter (lower cut-off frequency: 10 Hz; upper cut-off frequency: 400 Hz)를 사용하여 noise가 제거되었고 진폭 분석을 위하여 rectification 후 root mean square (time window: 400 ms)를 사용하여 smoothing 되었다. LC probe 사용 시의 EMG RMS 대비 SF probe 사용 시의 EMG RMS 비율 분석을 통해 근육 사용 정도가 비교 평가 되었고, 유의한 근전도 차이를 확인하기 위하여 paired-*t* test가 유의수준 0.05 수준에서 수행되었다. RMS EMG 비교 평가 결과, LC probe 대비 SF probe 사용 시 어깨, 목, 팔에서 전반적으로 근육 사용 정도가 높은 것으로

LC probe 대비 SF probe의 RMS EMG 비율

(n = 12)

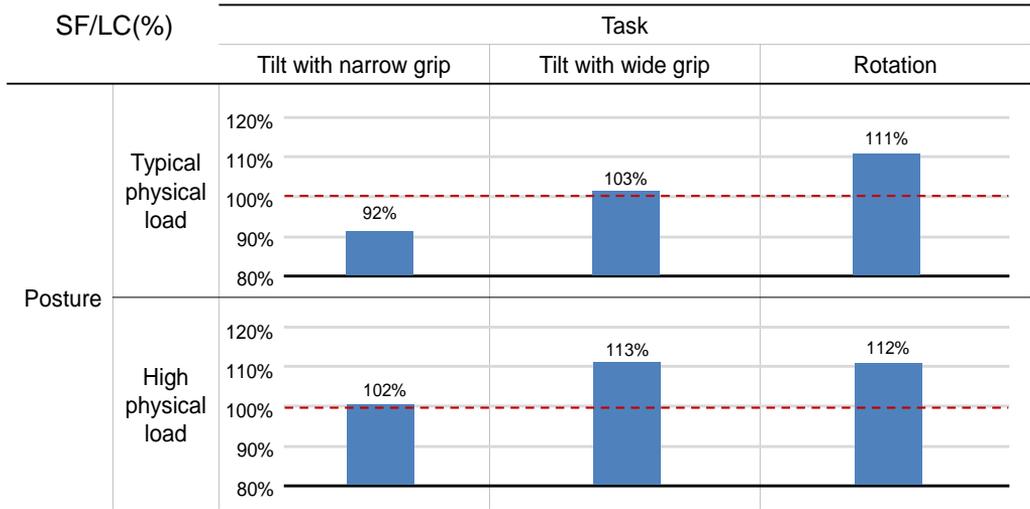


Figure III.18. Linear array probe 근전도 분석 결과: pectoralis 예시

파악되었다. 예를 들어, pectoralis에서 LC probe 대비 SF probe 사용 시의 RMS EMG 비율은 평균적으로 $105.4\% \pm 8.3\%$ 인 것으로 나타났다. 조건을 분류하여 분석한 결과, pectoralis에서 LC probe 대비 SF probe 사용 시의 RMS EMG 비율은 자세 조건 분류 시 typical physical load 자세에서 $107.6\% \pm 2.9\%$, high physical load 자세에서 $124.2\% \pm 25.1\%$ 인 것으로 나타났고, 동작 조건 분류 시 tilt with narrow grip 동작에서 $102.7\% \pm 6.3\%$, tilt with wide grip 동작에서 $129.5\% \pm 26.7\%$, rotation 동작에서 $115.5\% \pm 14.9\%$ 인 것으로 나타났다(Figure 3.18 참조). 통계 분석 결과, SF probe와 LC probe 사용 시 근전도 측면에서 유의한 차이가 있는 근육 부위가 파악되었다. 예를 들어, high physical load

자세에서 rotation 동작 시 LC probe 대비 SF probe의 RMS EMG 비율은 right SCM에서 124.5% ($t[10] = 2.36, p = 0.040$), biceps에서 135.9% ($t[11] = 2.89, p = 0.015$)로 유의한 차이를 보였다.

3.4.3. 파지 자세

파지 자세 측정 data는 후처리 후 분석 부위의 관절 각도를 비교하여 분석된다. 분석된 파지 자세 data를 probe별로 비교 평가하고, probe 설계에 따른 파지 자세 차이의 유의성을 확인하기 위하여 통계 분석을 수행한다.

본 연구에서는 probe 파지 시의 손가락 관절 각도 분석을 통해 LC probe와 SF probe가 비교 평가되었고, 유의한 파지 자세 차이를 확인하기 위하여 paired- t test가 유의수준 0.05 수준에서 수행되었다. 손가락 관절 각도 비교 평가 결과, LC probe 대비 SF probe 파지 시 다섯 개 손가락에서의 평균 관절 각도가 다소 큰 것으로 나타났다. 예를 들어, middle finger의 middle flexion 각도는 LC probe 대비 SF probe 파지 시 narrow grip에서는 $15.8^\circ \pm 11.4^\circ$, wide grip에서는 $6.3^\circ \pm 21.5^\circ$ 큰 것으로 나타났다. 통계 분석 결과, SF probe와 LC probe 파지 시의 파지 자세 측면에서 유의한 차이가 있는 손가락 관절 부위가 파악되었다. 예를 들어, narrow grip 자세에서 LC probe 대비 SF probe

LC probe 대비 SF probe 과제 시 관절 각도

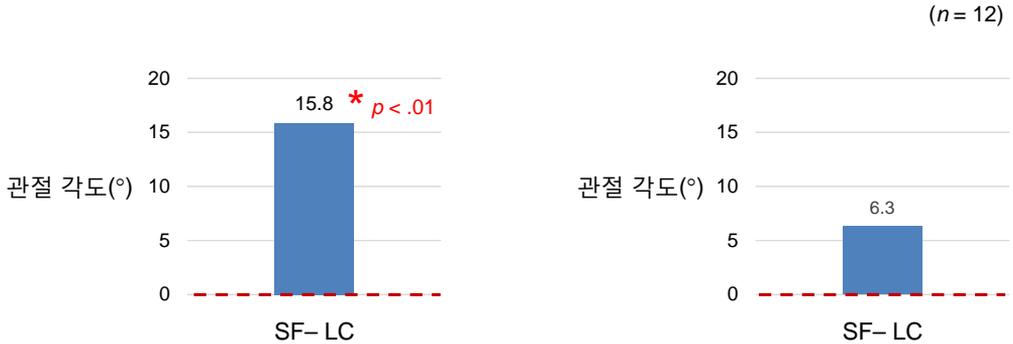


Figure III.19. Linear array probe 과제 자세 분석 결과: middle finger의 proximal interphalangeal joint flexion 예시

과제 시 손가락 관절 각도는 index finger의 distal flexion이 7.5° ($t[7] = 2.78, p = 0.027$), middle finger의 middle flexion이 15.8° ($t[8] = 4.17, p = 0.003$) 유의하게 크게 나타났고, wide grip 자세에서 index finger의 proximal flexion이 10.7° ($t[7] = 3.21, p = 0.015$), ring finger의 proximal abduction이 2.3° ($t[6] = 3.49, p = 0.013$) 유의하게 크게 나타났다.

3.4.4. 주관적 만족도

주관적 만족도 평가 data는 평가 항목별 평균 점수를 비교하여 분석된다. 분석된 주관적 만족도 평가 결과를 probe별로 비교 평가하고, probe 설계에 따른 주관적 만족도 차이의 유의성을 확인하기 위하여 통계

분석을 수행한다.

본 연구에서는 26가지 항목에 대하여 주관적 만족도 평균 점수 분석을 통해 LC probe와 SF probe가 비교 평가되었고, 유의한 주관적 만족도 차이를 확인하기 위하여 paired-*t* test가 유의수준 0.05 수준에서 수행되었다. 주관적 만족도 평가 결과, LC probe 대비 SF probe의 주관적 만족도가 전반적으로 높은 것으로 분석되었다. 예를 들어, SF probe의 grip부는 크기 및 곡률 측면에서 평균적으로 0.5점 ± 1.1점 높았다. 통계 분석 결과, SF probe와 LC probe의 주관적 만족도 측면에서 유의한 차이가 있는 항목이 파악되었다. 예를 들어, LC probe 대비 SF probe의 grip부는 전측 너비 적절성 측면에서 1.0점 ± 1.9점($t[11] = 2.25, p = 0.046$), 최소 두께 적절성 측면에서 0.7점 ± 0.9점 ($t[11]=2.60, p=0.025$), 최대 두께 적절성 측면에서 0.8점 ± 1.1점($t[11]=2.28, p = 0.043$), 최소 두께 지점 모서리 곡률 적절성 측면에서 0.7점 ± 0.9점($t[11] = 2.60, p = 0.025$) 유의하게 높은 것으로 나타났다.

LC probe 대비 SF probe의 주관적 만족도

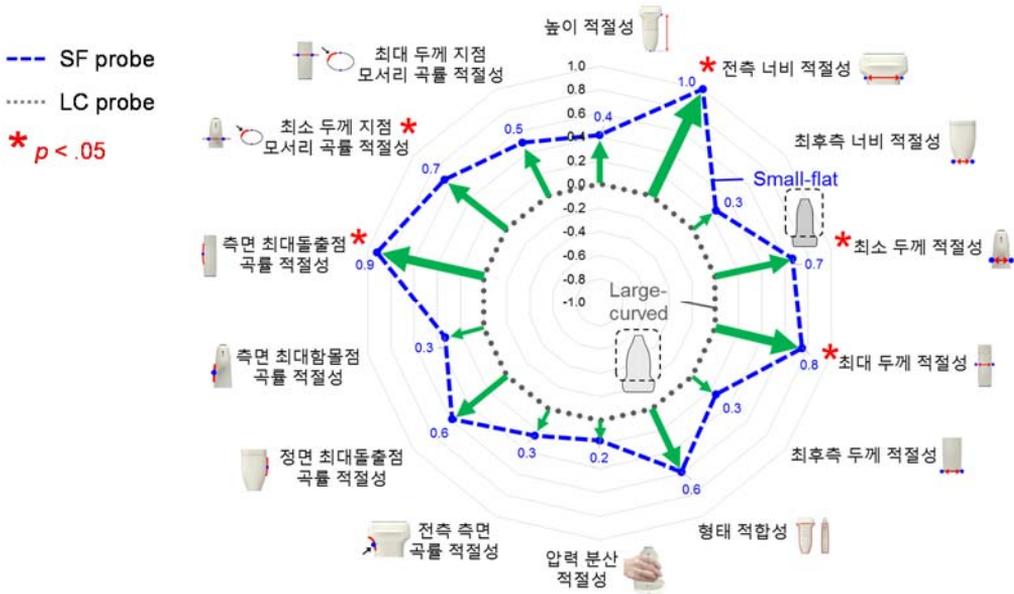


Figure III.20. Linear array probe 주관적 만족도 분석 결과: Grip 부 예시

3.4.5. 초음파 Probe의 선호 설계 특성 분석

동작, 근전도, 파지 자세, 주관적 만족도 분석 결과와 사후 설문 결과를 기반으로 probe의 제원을 비교 분석하여 평가 대상 probe 유형에서의 선호 설계 특성을 분석한다. 동작 측면에서는 사용 시 관절이 편안한 동작 범위 안에서 움직이며 움직임 범위가 적은 probe를 파악하고, 근전도 측면에서는 사용 시 근육 사용량이 적은 probe를 파악하여 사후 설문 결과를 참고하여 선호 설계 특성을 분석한다. 파지 자세 측면에서는

probe별로 주관적 만족도의 그림감 항목의 점수와 비교하여 선호되는 파지 자세를 분석한다. 주관적 만족도 측면에서는 각 항목별로 선호되는 probe를 파악하여 선호 설계 특성을 분석한다.

본 연구에서는 동작, 근전도, 파지 자세, 주관적 만족도 분석 결과와 사후 설문 결과를 기반으로 linear array probe의 선호 설계 특성이 파악되었다. 예를 들어, 주관적 만족도 측면에서는 grip부 크기의 만족도가 높은 SF probe의 설계 제원을 확인하여 grip부 크기의 선호 설계 특성이 파악되었다. 파지 자세 측면에서는 그림감 만족도가 높은 SF probe의 움켜쥐는 파지 자세를 통해 선호 파지 자세 특성이 파악되었다. 움켜쥐는 파지 자세 특성은 LC probe 대비 작으며 사용자 손 크기에게 적절한 SF probe의 크기 설계 특성으로 인한 것으로 분석되었다. 반면 근전도 측면에서 우세한 LC probe에 대해서는 굴곡진 probe 형상 특성이 probe 조작 시 힘을 효율적으로 전달하기 때문에 선호된다는 사후 설문 결과를 참고하여 probe 전반 형상의 선호 설계 특성이 파악되었다.

IV. 토의

4.1. 초음파 Probe 설계 분석 방법

본 연구는 초음파 probe의 사용 특성과 설계 특성 파악을 통한 초음파 probe의 설계 분석 방법을 제안하였다. Paschoarelli et al. (2008)과 Mazzola et al. (2016)은 인간공학적 초음파 probe 형상을 제안하였으나 설계 근거가 제시되지 않았으며 제안된 probe 형상의 세부적인 설계 특성이 파악되지 않았다. 본 연구는 인간공학적 초음파 probe 설계 및 평가를 위하여 사용 특성과 설계 특성 파악을 통해 초음파 probe의 설계를 체계적이고 정량적으로 분석할 수 있는 방법을 제안하였다. 초음파 probe의 사용 특성은 사용 환경과 사용 작업 분석을 통해 파악된다. 초음파 probe의 사용 환경 분석을 통해 검사 시 필요한 장비, 장비의 배치, 검사 부위의 위치 등이 파악되고, 초음파 probe의 사용 작업 분석을 통해 검사자의 전신 자세, grip 손 자세, 주요 조작 동작, 조작 힘 크기 등이 파악된다. 사용 환경과 사용 작업 분석을 통해 파악된 초음파 probe의 사용 특성은 초음파 probe와 사용자간 physical user interface (PUI)를 포괄적으로 이해하는 데에 효과적이다. 초음파 probe의 PUI를 고려하여 초음파 probe의 설계 인자 정립, 설계 인자 유형 분류, 설계 인자 중요도 평가, 주요 설계 인자 제원 분석의

네 단계 절차를 수행하여 초음파 probe의 설계 특성이 파악된다. 첫째, 설계 인자 정립 단계에서는 초음파 probe의 정면, 측면, 평면으로 설계 평면을 정의하고 grip부와 head부 등으로 평가 부위를 구분한다. 그리고 각 설계 평면에서 평가 부위별로 정의된 기준점 및 기준선을 기준으로 길이, 너비, 두께, 각도, 곡률, 둘레길이 등의 초음파 probe의 설계 인자를 분석한다. 둘째, 설계 인자 유형 분류 단계에서는 설계 인자를 인체측정학적 인자, 생체역학적 인자, 그리고 감성적 인자로 분류하여 설계 인자의 특성과 설계 고려사항을 파악한다. 셋째, 설계 인자 중요도 평가 단계에서는 손 접촉 빈도, 손 자세, 사용 동작을 종합적으로 고려하여 각 설계 인자의 중요도를 분석하고 초음파 probe 설계 및 평가 시 주요하게 분석되어야 하는 설계 인자를 파악한다. 마지막으로, 주요 설계 인자 체원 분석 단계에서는 초음파 probe의 CAD data를 확보하고 설계 평면에 따라 정렬하여 외곽선 추출 후 기준점과 기준선을 적용하여 설계 인자 치수를 측정한다. 체원 분석 결과를 통해 기존 초음파 probe들의 주요 설계 인자 정량화하여 설계 특성을 benchmarking 한다. 본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 분석 방법은 linear array probe의 설계 분석에 적용되어 효용성이 검증되었다. Linear array probe의 사용 환경과 사용 작업 특성 파악을 통한 PUI 이해를 기반으로 주요 설계 인자를 분석하고 기존 제품들의 benchmarking을 통해 linear array

probe의 설계 특성이 파악될 수 있었다. 본 연구에서 제안된 설계 분석 방법은 초음파 probe 뿐만 아니라 청소기 핸들 등 사용자가 파지하고 조작하는 다양한 제품의 인간공학적 설계 및 평가 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4.2. 초음파 Probe 설계 평가 방법

본 연구는 동작, EMG, 파지 자세, 주관적 만족도를 사용한 인간공학적 평가 실험과 실험 결과 분석을 통한 초음파 probe의 설계 평가 방법을 제안하였다. Burnett & Campbell-Kyureghyn (2010), Village & Trask (2007), Vannetti et al. (2015), 그리고 Mazzola et al. (2016)은 초음파 작업 시의 신체부하를 정량화하기 위하여 동작, 근전도, push force, 또는 손 관절의 torque 측정과 같은 객관적인 평가만을 수행하였다. Paschoarelli et al. (2008)은 인간공학적 probe 설계안과 기존 probe 설계의 비교 평가를 위하여 동작 측정을 통한 객관적인 평가와 더불어 주관적 만족도 평가도 수행하였으나 discomfort와 acceptability와 같은 전반적인 만족도만을 평가하여 세부적인 선호 설계 특성 파악에는 한계가 있었다. 본 연구는 객관적 평가 방법과 주관적 평가 방법을 이용하여 인간공학적 평가 실험을 계획하고 초음파 probe 설계에 따른 사용성 분석 결과를 기반으로 선호 설계 특성을

파악하는 종합적인 평가 방법을 제안하였다. 초음파 probe의 인간공학적 평가 실험 방법은 사용자, 초음파 검사 환경, 조작 동작을 고려하여 수립된다. 실험 참여자는 probe 사용 경험, 신체 건강 상태, 신체 크기 등을 고려하여 모집된다. 실험 환경은 probe의 사용 환경 특성 및 사용 작업 특성을 고려하여 조성된다. 평가 대상은 설계에 따른 사용성을 비교할 수 있도록 형상과 크기 측면에서 다른 probe들로 선정된다. Task는 probe의 주요 조작 동작과 grip 방법을 고려하여 선정된다. 실험 설계는 학습 효과 및 피로 효과를 최소화하기 위하여 평가 대상 probe 간의 평가 순서 및 task 순서를 randomization하여 설계된다. 신체 동작, 근전도, 팔자 자세의 측정 부위는 probe의 사용 작업 특성을 고려하여 선정된다. 주관적 만족도 평가 항목은 인체측정학적, 생체역학적, 감성적 측면, 그리고 전반적 만족도의 인간공학적 평가 기준과 probe의 component 사이 연관성 분석을 통해 선정된다. 초음파 probe의 평가 실험 계획이 수립되면 실험 준비 및 인체 측정, task 수행 시 신체 동작과 근전도 측정, probe 팔자 자세 측정, 주관적 만족도 평가, 사후 설문은 다섯 단계를 통해 실험이 수행된다. 실험 결과의 분석은 적절한 평가 measure를 사용하여 probe별로 실험 결과값을 비교 평가하여 수행되고 probe 설계에 따른 유의한 실험 결과 차이를 확인하기 위하여 통계 분석이 수행된다. 동작, 근전도, 팔자 자세, 그리고 주관적

만족도 결과가 분석되면 사후 설문 결과와 평가 대상 probe들의 제원 분석 결과를 기반으로 probe의 선호 설계 특성이 분석된다. 본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 평가 방법은 linear array probe의 설계 평가에 적용되어 효용성이 검증되었다. 사용자, 초음파 검사 환경, 조작 동작을 고려하여 실험을 계획하고 신체 동작, 근전도, 과거 자세, 주관적 만족도를 이용한 종합적인 평가를 통해 linear array probe의 선호 설계 특성이 파악될 수 있었다.

본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 평가 방법은 probe 유형에 따라 평가 대상별 실험 결과 차이가 큰 평가 방법과 평가 조건을 선택적으로 사용하여 최적화될 수 있다. 예를 들어, 본 연구에서 설계 평가 방법을 적용해본 linear array probe의 설계 평가 방법은 변별성이 적은 전신 동작 평가 방법은 제외하고, 근전도 평가 시 high physical load 자세와 rotation 동작 조건만을 고려하여 최적화될 수 있다. Linear array probe의 설계에 따른 전신 동작 차이는 task 조건에 따라 일정한 변화 패턴을 보이지 않으며 동작 범위 차이가 $0.1 \sim 8.0^\circ$ 로 크지 않으므로 제외하고 민감도가 큰 과거 자세에 focused된 평가가 권장된다. LC probe 대비 SF probe의 RMS EMG 비율은 어깨/목/윗팔 부위(deltoid, pectoralis, infraspinatus, right SCM, left SCM, trapezius, biceps)에서 typical physical load 자세 대비 high

physical load 자세에서 평균적으로 15% 증가하였고, high physical load 자세에서 tilt with narrow grip 대비, tilt with wide grip 시 13%, rotation 시 14% 증가하는 경향을 보였다. 따라서 신체 부하가 높아지는 high physical load 자세 및 rotation 동작 조건만을 고려하여 평가 protocol이 간소화될 수 있다.

본 연구에서는 주관적 평가 방법이 상대적으로 빠르게 probe의 전반적인 사용성 평가가 가능한 한편, 객관적인 평가 방법(e.g., EMG)은 세부적인 측면(e.g., 힘 전달 효율성)에서 sensitive하게 평가할 수 있음을 파악하였다. 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 sensitive하게 파악하지 못했다. 그러나 EMG 평가를 통해 SF probe 사용 시 LC probe 대비 어깨/목/윗팔 부위 근육 부하가 유의하게 높은 것이 파악되었다.

본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 평가 방법을 적용하여 파악된 linear array probe의 선호 설계 특성은 인간공학적 linear array probe 설계 시 유용하게 활용될 수 있다. 주관적 만족도 및 파지 자세 측면에서 선호된 SF probe grip부의 적절한 크기와 근전도 측면에서 선호된 LC probe 전반의 굴곡진 형상 특성이 적용된 인간공학적 linear array probe는 그립감

항상과 효율적인 힘 사용에 기여할 수 있다. 한편, 본 연구에서 진행된 linear array probe 평가의 실험 참여자는 여성 초음파사로만 구성되었으나 남성 참여자도 포함하여 실험 시 상대적으로 손 크기가 큰 남성의 선호가 고려된 설계 특성이 파악될 수 있을 것이다.

본 연구에서 제안된 초음파 probe의 설계 평가 방법은 기존 probe들을 비교하여 주어진 설계 조건 중 설계 부위별로 선호 설계 특성을 파악하기 때문에 최적 설계안을 개발하는 데는 한계가 있다. 초음파 probe의 설계 부위간에 상호 작용이 존재할 수 있으므로, 설계 부위별 선호 설계 특성 종합을 통해 설계된 초음파 probe는 사용성 검증이 필요하다. 그리고 주어진 설계 조건 외 최적 설계 조건을 파악하기 위하여 사용자 집단의 손 크기/형상 분석과 선호 파지 자세 분석 결과에 근간한 초음파 probe의 인간공학적 최적 설계 연구가 수행되어야 한다. 제안된 설계 평가 방법의 최적 설계 특성 파악 한계를 보완하기 위해서는 평가 대상 선정 시 크기와 형상 측면에서 우수한 PUI 특성을 가진 다양한 probe를 선정하는 것이 필요하다.

REFERENCES

- Andreoni, G., Mazzola, M., Matteoli, S., D'Onofrio, S., Forzoni, L. (2015). Ultrasound system typologies, user interfaces and probes design: a review. *Procedia Manufacturing*, 3, 112-119.
- Baker, J. P. & Coffin, C. T. (2013). The Importance of an Ergonomic Workstation to Practicing Sonographers. *J Ultrasound Med*, 32, 1363-1375.
- Bernard, B. P. (1997). Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors. *U.S. Department Of Health And Human Services*.
- Böhlemann, J., Kluth, K., Kotzbauer, K., Strasser, H. (1994). Ergonomic assessment of handle design by means of electromyography and subjective rating, *Applied Ergonomics*, 25(6), 346-354.
- Burnett, D. R. & Campbell-Kyureghyan, N. H. (2010). Quantification of scan-specific ergonomic risk-factors in medical sonography. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 306-314.
- Coffin, C. T. (2014). 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.
- Dodgeon J., Bernard, F., Wilde, J., Newton-Hughes, A. (2002). Avoidance of musculoskeletal disorders during ultrasound scanning. www.healthcare.salford.ac.uk/radiography.
- Eisenbrey, J. R., Dave, J. K., Forsberg, F. (2016). Recent technological advancements in breast ultrasound. *Ultrasonics*, 70, 183-190.
- Evans, K., Roll, S., Baker, J. (2009). Work-related musculoskeletal disorders (WRMSD) among registered diagnostic medical sonographers and vascular technologists. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 25, 6, 287-299.
- Friesen, M.N., Friesen, R., Quanbury, A., Arpin, S. (2006). Musculoskeletal injuries among ultrasound sonographers in rural manitoba: a study of workplace

- ergonomics. *American Association of Occupational Health Nurses Journal*, 54 (1), 32-37.
- Gibbs, V. & Young, P. Young (2011). A study of the experiences of participants following attendance at a workshop on methods to prevent or reduce work-related musculoskeletal disorders amongst sonographers. *Radiography*, 17, 223-229.
- Habes, D.J., Baron, S. (2000). Ergonomic evaluation of antenatal ultrasound testing procedures. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15 (7), 521-528.
- Harih, G. & Dolsak, B. (2014) Comparison of subjective comfort ratings between anatomically shaped and cylindrical handles. *Applied Ergonomics*, 45, 943-954.
- Horkey, J., King, P., 2004. Ergonomic recommendations and their role in cardiac sonography. *Work*, 22(3), 207-218.
- Hunt, J. W., Arditi, M., Foster, F. S. (1983). Ultrasound Transducers for Pulse-Echo Medical Imaging. *Transactions On Biomedical Engineering*, BME-30, 8.
- Kim, S. (2007). Prevention of work-related musculoskeletal disorders in sonography, *The Society of Radiographers*.
- Magnavita, N., Bevilacqua, L., Mirk, P., Fileni, A., Castellino, N. (1999). Work-related musculoskeletal complaints in sonologists. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 41(11), 981-988.
- Mazzola, M. Forzoni, L., D'Onofrio, S., Andreoni, G. (2016). Use of Digital Human Model for ultrasound system design: A case study to minimize the risks of musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1-12.
- McCulloch, M.L., Xie, T., Adams, D.B. (2002). Cardiovascular sonography: the painful art of scanning. *Cardiac Ultrasound Today*, 8(5), 69-96.
- Morgan, S., Unipan, A., Datta, S. (2016). Ultrasound in obstetrics and gynaecology. *Obstetrics, Gynaecology And Reproductive Medicine*, 26:6.

- Morton, B. & Delf, P. (2008). The prevalence and causes of MSI amongst sonographers. *Radiography*, 14, 195-200.
- Muir, M., Hrynkow, P., Chase, R., Boyce, D., McLean, D. (2004). The nature, cause, and extent of occupational musculoskeletal injuries among sonographers: recommendations for treatment and prevention. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 20(5), 317-325.
- Paschoarell, L. C., Oliveira, A. B., Coury, H. J. C. G. (2008). Assessment of the ergonomic design of diagnostic ultrasound transducers through wrist movements and subjective evaluation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38, 999-1006.
- Pike, I., Russo, A., Berkowitz, J., Baker, J.P., Lessoway, V.A. (1997). The prevalence of musculoskeletal disorders among diagnostic medical sonographers. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 13(5), 219-224.
- Punnett, L. & Wegman, D. H. (2004) Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14, 1, 13-23.
- Rousseau, T., Mottet, N., Mace, G., Franceschini, C., Sagot, P. (2013). Practice Guidelines for Prevention of Musculoskeletal Disorders in Obstetric Sonography. *J Ultrasound Med*, 32, 157-164.
- Russo, A., Murphy, C., M., Lessoway, V., Berkowitz, J. (2002). The prevalence of musculoskeletal symptoms among British Columbia sonographers. *Applied Ergonomics*, 33, 385-393.
- Schoenfeld, A., Goverman, J., Weiss, D.M., Meizner, I. (1999). Transducer user syndrome: an occupational hazard of the ultrasonographer. *European Journal of Ultrasound*, 10(1), 41-45.
- Shin, S. J. & Jeong, B. J. (2013). Principle and Comprehension of Ultrasound Imaging. *The Journal of the Korean Orthopaedic Association*, 48, 325-333.

- Smith, A.C., Wolf, J.G., Xie, G.Y., Smith, M.D. (1997). Musculoskeletal pain in cardiac ultrasonographers: results of a random survey. *Journal of the American Society of Echocardiography*, 10(4), 357-362.
- Szabo, T. L. & Lewin, P. A. (2013). Ultrasound Transducer Selection in Clinical Imaging Practice. *J Ultrasound Med*, 32, 573-582.
- Thierry Rousseau, (2013). Practice Guidelines for Prevention of Musculoskeletal Disorders in Obstetric Sonography. *Journal of Ultrasound Medical*, 32, 157-164.
- Vanderpool, H.E., Friis, E.A., Smith, B.S., Harms, K.L. (1993). Prevalence of carpal tunnel syndrome and other work-related musculoskeletal problems in cardiac sonographers. *Journal of Occupational Medicine*, 35(6), 604-610.
- Vannetti, F., Atzori, T., Matteoli, S., Hartmann, K., Altobelli, G., Molino-Lova, R., Forzoni, L. (2015). 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.
- Village, J. & Trask, C. (2007). Ergonomic analysis of postural and muscular loads to diagnostic sonographers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37, 781-789.
- Wihlidal, L.M., Kumar, S. (1997). An injury profile of practicing diagnostic medical sonographers in Alberta. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(3), 205-2

APPENDICES

부록 1. 초음파작업 관련 연구 문헌 조사 결과

No.	Author(s)	Year	Title	Source
1	Burnett et al.	2010	Quantification of scan-specific ergonomic risk-factors in medical sonography	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>
2	Village et al.	2007	Ergonomic analysis of postural and muscular loads to diagnostic sonographers	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>
3	Vannetti et al.	2015	Usability characteristics assessment protocol applied to etouch ultrasound user-defined workflow optimization tool	<i>Procedia Manufacturing</i>
4	Paschoarella et al.	2008	Assessment of the ergonomic design of diagnostic ultrasound transducers through wrist movements and subjective evaluation	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>
5	Mazzola et al.	2016	Use of digital human model for ultrasound system design: A case study to minimize the risks of musculoskeletal disorders	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>
6	Russo et al.	2002	The prevalence of musculoskeletal symptoms among british columbia sonographers	<i>Applied Ergonomics</i>
7	Evans et al.	2009	Work-related musculoskeletal disorders (WRMSD) among registered diagnostic medical sonographers and vascular technologists	<i>Journal of Diagnostic Medical Sonography</i>
8	Gibbs & Young	2011	A study of the experiences of participants following attendance at a workshop on methods to prevent or reduce work-related musculoskeletal disorders amongst sonographers	<i>Radiography</i>
9	Morton & Delf	2008	The prevalence and causes of MSI amongst sonographers	<i>Radiography</i>
10	Rousseau et al.	2013	Practice guidelines for prevention of musculoskeletal disorders in obstetric sonography	<i>Journal of Ultrasound Medical</i>
11	Coffin	2014	Work-related musculoskeletal disorders in sonographers: a review of causes and types of injury and best practices for reducing injury risk	<i>Medical Imaging</i>
12	Andreoni et al.	2015	Ultrasound system typologies, user interfaces and probes design: a review	<i>Procedia Manufacturing</i>
13	Baker & Murphey	2001	Ultrasound ergonomics	<i>Siemens Medical Systems, Inc.</i>

No.	Author(s)	Year	Title	Source
14	DHHS	2006	Preventing work-related musculoskeletal disorders in sonography	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
15	Joan P. Baker	2013	The importance of an ergonomic workstation to practicing sonographers	<i>J Ultrasound Med</i>
16	Bassey et al.	2013	Work related musculoskeletal disorder amongst sonologists in nigeria	<i>IOSR Journal of Dental and Medical Sciences</i>
17	McCulloch et al.	2002	Cardiovascular sonography: The painful art of scanning	<i>Cardiac Ultrasound Today</i>
18	Dodgeon et al.	2002	Avoidance of musculoskeletal disorders during ultrasound scanning	<i>www.healthcare.salford.ac.uk/radiography</i>
19	JAKES	2001	Sonographers and occupational overuse syndrome: cause, effect, and solutions	<i>Journal of Diagnostic Medical Sonography</i>
20	Kim	2006	Industry standards for the prevention of work related musculoskeletal disorders in sonography	<i>Society of Radiographers</i>
21	Kim	2007	Prevention of work-related musculoskeletal disorders in sonography	<i>Society of Radiographers</i>
22	Necas	1996	Musculoskeletal symptomatology and repetitive strain injuries in diagnostic medical sonographers	<i>Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting</i>
23	Graveling	2012	Ultrasound ergonomics – A practical guide to reducing the risk of musculoskeletal disorders	<i>Toshiba Medical System Corporation</i>
24	Schoenfeld	1998	Ultrasonographer's wrist – an occupational hazard	<i>Ultrasound Obstet Gynecol</i>
25	Schoenfeld et al.	1999	Transducer user syndrome: an occupational hazard of the ultrasonographer	<i>European Journal of Ultrasound</i>
26	Vanderpool et al.	1993	Prevalence of carpal tunnel syndrome and other work-related musculoskeletal problems in cardiac sonographers	<i>JOM</i>
27	Wihlidal & Kumar	1997	An injury profile of practicing diagnostic medical sonographers in alberta	<i>International Journal of Industrial Ergonomics</i>

부록 2. 초음파 검사자의 통증과 근골격계 질환(WMSDs, Work-related Musculoskeletal Disorders)의 발생률 및 발생 부위

Author (year)	Reporting pain (%)	Presence of symptoms (%)						Prevalence of WMSDs (%)
		Neck	Shoulder	Upper back	Lower back	Hand/Wrist	Elbow	
Coffin (2014)	-	-	-	-	-	-	-	90
Burnett&Campbell (2010)	86	86	71	71	71	43	29	-
Evans et al. (2009)	-	-	-	-	-	-	-	48
Morton & Deft (2008)	-	-	-	-	-	-	-	79
Kim (2007)	-	-	-	-	-	-	-	89
Friesen et al. (2006)	81	81	81	72	64	64	57	-
Horkey and King (2004)	90	56	56	15	47	48	12	-
Muir et al. (2004)	91	71	78	61	40	52	5	48
Russo et al. (2002)	91	83	84	77	58	61	40	-
McCulloch et al. (2002)	82	48	29	25	36	37	23	-
Habes and Baron (2000)	83	-	-	-	-	-	-	-
Schoenfeld et al. (1999)	65	-	-	-	-	-	-	-
Magnavita et al. (1999)	80	-	-	-	-	-	-	-
Smith et al. (1997)	80	-	-	-	-	-	-	-
Pike et al. (1997)	81	61	61	49	53	53	28	-
Wihlidal and Kumar (1997)	89	43	47	48	33	33	21	-
Vanderpool et al. (1993)	86	-	-	-	-	-	-	-
Average	83.5	66.1	63.4	52.3	50.3	48.9	21.3	70.8
Min.	65	43	29	15	33	33	5	48
Max.	91	86	84	77	71	64	57	90