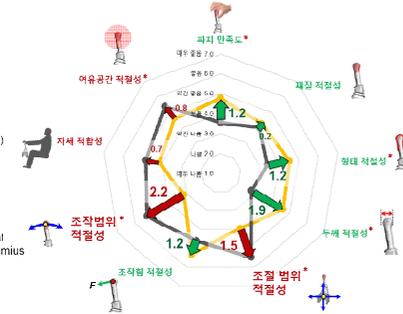
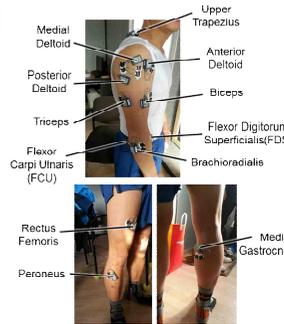
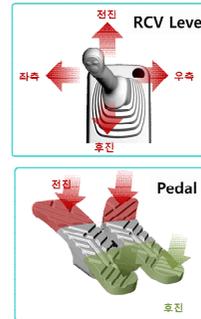


굴삭기 주요 부품의 인간공학적 평가 방법



정하영¹, 이승훈¹, 최영근¹, 문수진¹, 오건희¹,
성창훈², 이상혁², 이상훈², 박찬송³, 최재필³, 유희천¹

¹ 포항공과대학교 산업경영공학과

² 현대건설기계, ³ 현대중공업

hcyou@postech.ac.kr

2017 춘계공동학술대회

Contents

- 연구 배경 및 필요성
- 연구 목적
- 굴삭기 주요부품 인간공학적 평가
 - 주요 부품 설계 인자 정립
 - 인간공학적 평가 및 결과
 - 개선 대상 설계 인자 분석
- 토의

연구 배경

- 굴삭기는 **주행, 고르기, 상차** 등의 **다양한 동작을 수행**하는 이동형 건설 장비임
- 굴삭기는 작업 시 복잡한 동작을 수행하기 위해 **운전석 내부에 다양한 종류의 조절 lever** 등이 배치됨



굴삭기 운전석 설계의 중요성

- 굴삭기 작업 시 운전자는 장시간(5 ~ 10h 지속) 동안 고정된 자세로 굴삭기 운용 업무를 수행함
- 사용성이 낮은 운전석 설계는 굴삭기 운전자의 피로를 유발하고 작업 효율 및 성능을 저하시킴



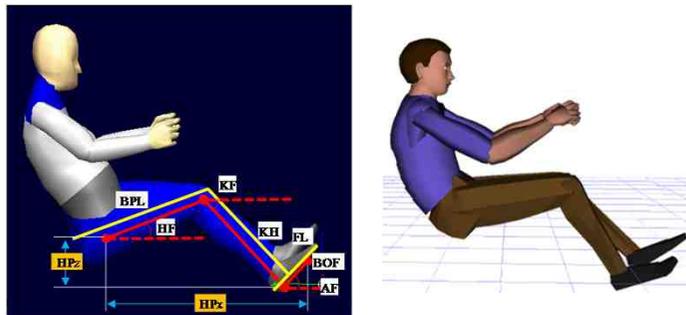
사용성
개선



연구 필요성

- 굴삭기 운전석에 배치된 주요 부품(RCV lever, 주행 lever, Pedal, Seat 등)의 사용 특성(사용 자세, 사용 동작)을 고려한 인간공학적 평가가 필요함
- 굴삭기 주요 부품의 설계 요소를 규명하고 주관적 및 객관적 평가를 기반으로 선호 설계를 도출한 연구는 부족함

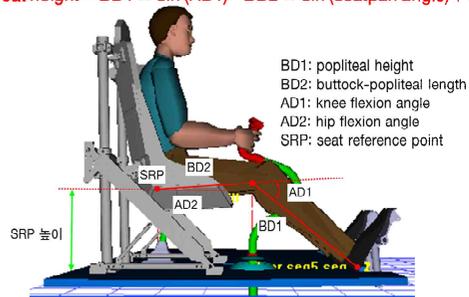
선호 운전 자세



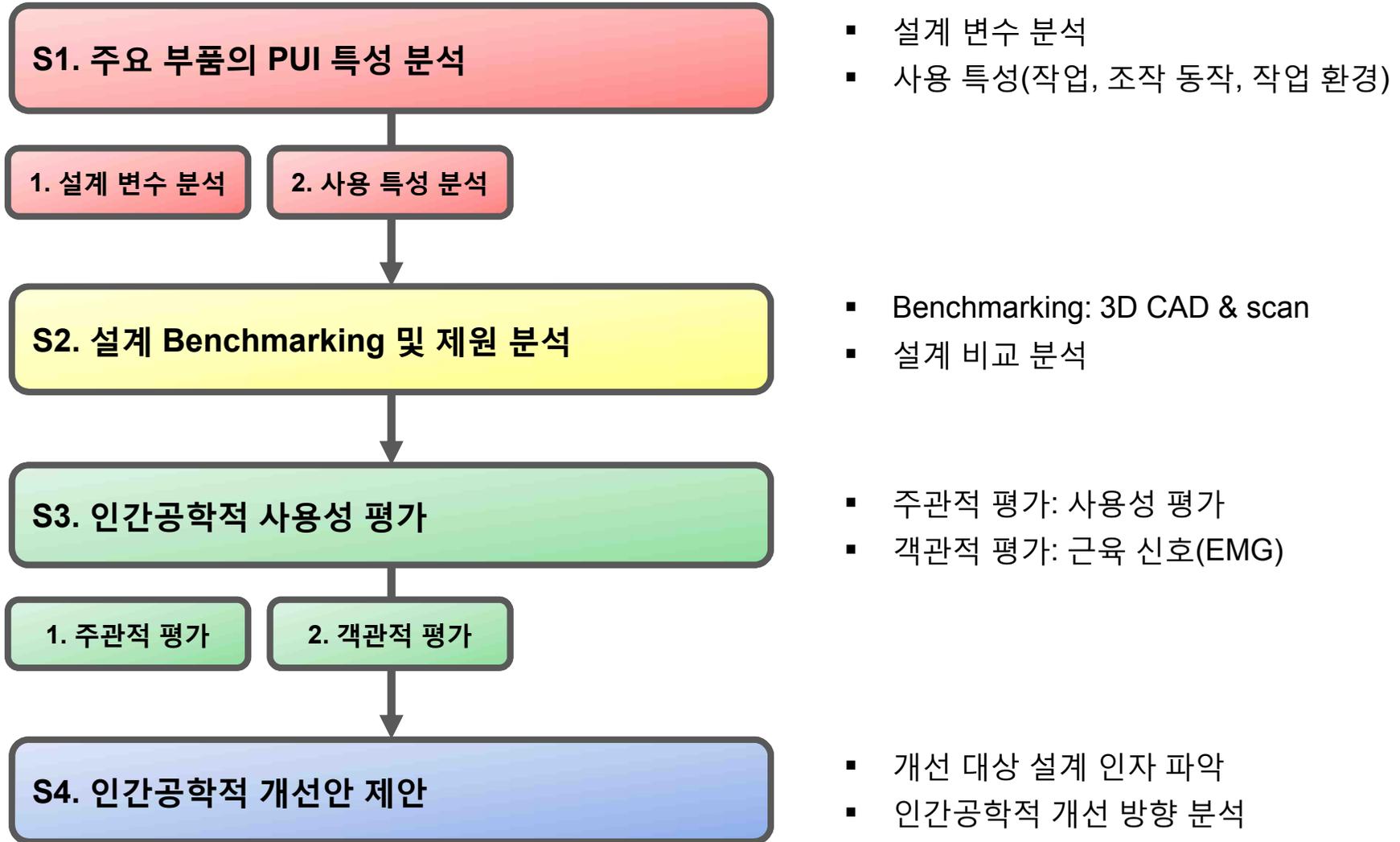
운전석 설계

$$\text{Seat height} = \text{BD1} \times \sin(\text{AD1}) - \text{BD2} \times \sin(\text{seatpan angle}) + 2.5$$

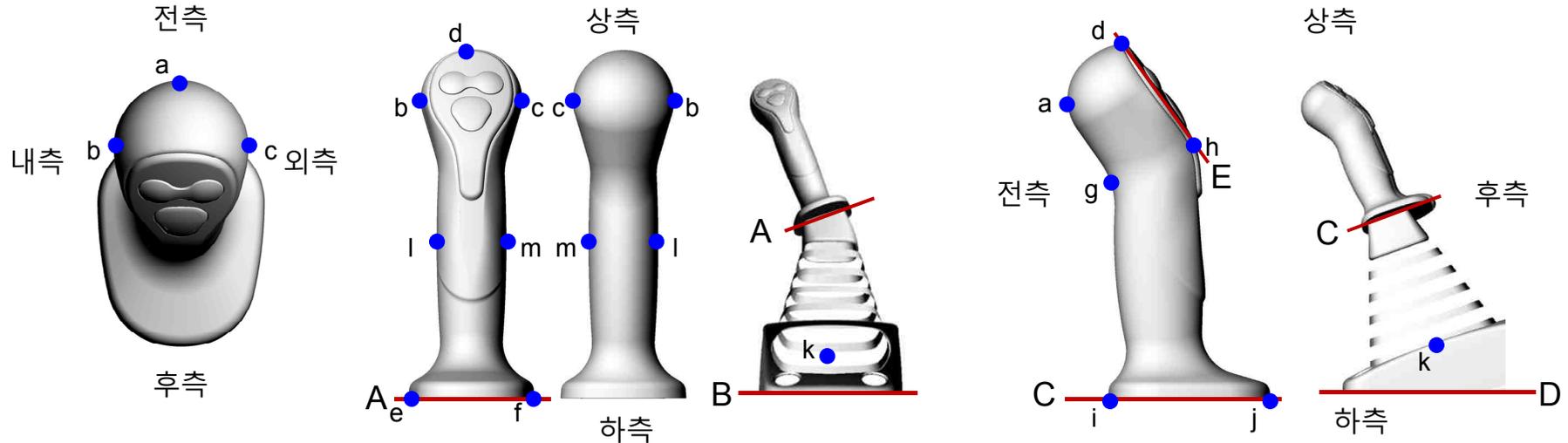
조종화 높이



연구 절차



설계 기준점 정립 예: RCV Lever



<평면 기준>

<정면 기준>

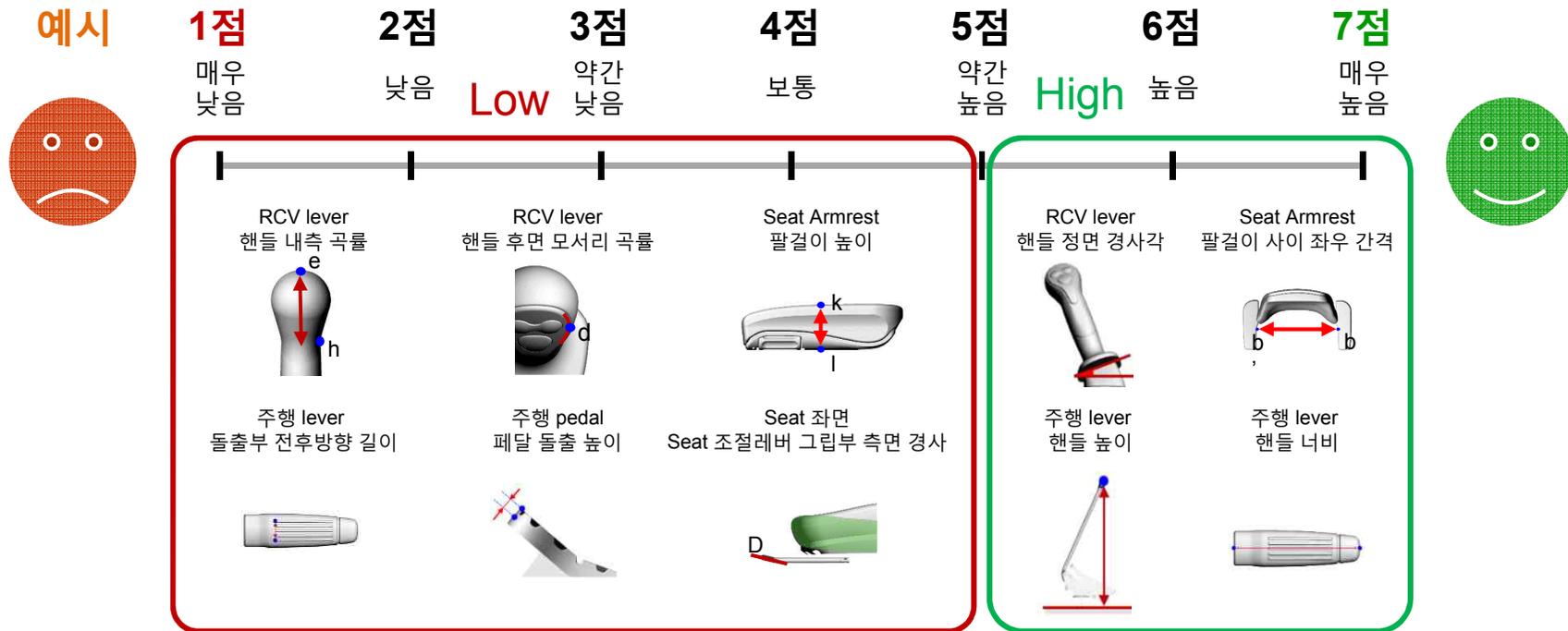
<측면 기준>

기호	명칭	기호	명칭
a	최전측점	j	핸들 결합면 최후측점
b	최내측점	k	핸들 결합면 중점
c	최외측점	l	핸들 lever부 최좌측점
d	최상측점	m	핸들 lever부 최우측점
e	핸들 결합면 최내측점	A	핸들 결합면 좌우방향 직선
f	핸들 결합면 최외측점	B	좌우방향 지평선
g	그립부 전측 최하측점	C	핸들 결합면 전후방향 직선
h	그립부 후측 최하측점	D	전후방향 지평선
i	핸들 결합면 최전측점	E	버튼조작부 측면 경사선

설계 기준점 정립 예: RCV Lever

□ 굴삭기 설계 전문가 6명의 평가를 통해 중요도 high(≥ 5 점)으로 평가된 설계 인자 선정

- ✓ 평가 척도: 7-point Likert scale ※ 항목별 최소값, 최대값은 제외
- ✓ 평가 결과 구분: high(≥ 5 점), low(< 5 점)



부품별 설계 인자 도출 예: RCV Lever

- RCV lever 설계인자 15개 중 주요 설계 인자 11개 선정(73%)
- 손과의 접촉 빈도가 높으며 파지 시 자세에 영향을 미치는 각도, 크기와 위치 설계인자가 상대적으로 중요(> 5.5)한 것으로 파악됨

설계 인자	핸들 정면 경사각	핸들 측면 경사각	핸들 그립부 최대 너비	핸들 높이	핸들 그립부 높이	핸들 Lever부 높이	핸들 그립부 중심 둘레길이	버튼 조작부 측면 경사각	핸들 그립부 하단 둘레길이	핸들 전측 곡률	핸들 외측 곡률	버튼 조작부 상하방향 길이	버튼 조작부 전측 곡률	버튼 조작부 외측 곡률	핸들 후면 모서리 곡률
그림															
중요도 평균	7.0	7.0	6.5	6.5	6.3	6.0	5.8	5.8	5.8	5.3	5.0	4.8	4.5	4.3	3.8
속성	각도	각도	크기	높이	높이	높이	크기	각도	크기	곡률	곡률	길이	곡률	곡률	곡률
접촉 빈도	上	上	上	中	上	中	上	下	中	上	上	下	上	中	中
자세 영향	上	上	上	上	上	上	上	上	上	中	中	下	下	下	下
분류	생체 역학적 인자	생체 역학적 인자	인체 측정학적 인자	인체 측정학적 인자	인체 측정학적 인자	인체 측정학적 인자	인체 측정학적 인자	감성 공학적 인자	인체 측정학적 인자	감성 공학적 인자	감성 공학적 인자	인체 측정학적 인자	감성 공학적 인자	감성 공학적 인자	감성 공학적 인자

Layout 설계 인자 도출 결과

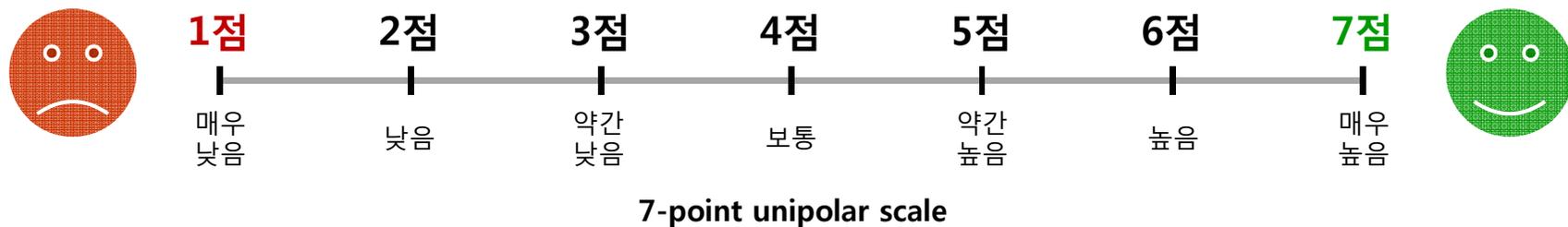
- PRP(Pedal reference point) 및 SRP(seat reference point)를 기준으로 layout과 관련된 부품의 위치, 각도, 조작 범위 등의 **22가지 설계 인자** 파악

Components	Design Variables	
RCV Lever (SRP 기준) 8개	Neutral location	Horizontal (x)
		Lateral (y)
		Vertical (z)
	Orientation	Horizontal (x)
		Lateral (y)
	Operating range	Horizontal (x)
		Lateral (y)
	Adjustment range	
주행 Lever (SRP, PRP 기준) 5개	Neutral location	Lateral (x)
		Horizontal (y)
		Vertical (z)
	Orientation	
	Operating range	

Components	Design Variables	
Footrest (PRP 기준) 4개	Location	Lateral (x)
		Horizontal (y)
		Vertical (z)
	Orientation	
주행 Pedal (PRP 기준) 5개	Location	Lateral (x)
		Horizontal (y)
		Vertical (z)
	Orientation	
	Operating range	

인간공학적 평가 개요

- 목적: 굴삭기 주요부품의 **주관적 만족도 평가 및 근육부하** 측정
- 실험 참여자: **13명**
- 평가 대상: **굴삭기 2종(A사, B사)** 주요 부품
- 실험 시간: **3시간/인 (총 40시간)**
- 실험 방법
 - ✓ **주관적 만족도 평가**: **7-point bipolar scale**을 사용하여 2종 굴삭기 주요부품(RCV lever, 주행 lever, 주행 pedal, option pedal, seat)을 절대 평가(1점 ~ 7점)
 - ✓ **근육 부하 측정**: RCV lever 및 pedal 사용시 단위 동작에 대하여 **유관 근육의 muscular effort** 측정(Noraxon DTS 무선 근전도 system, USA)



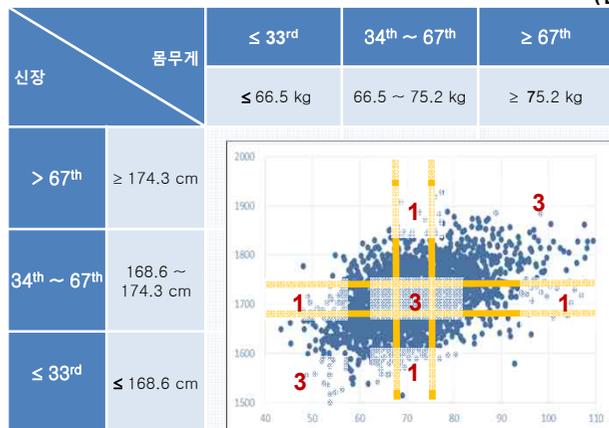
실험 참여자 모집

□ 굴삭기 운전자 13명

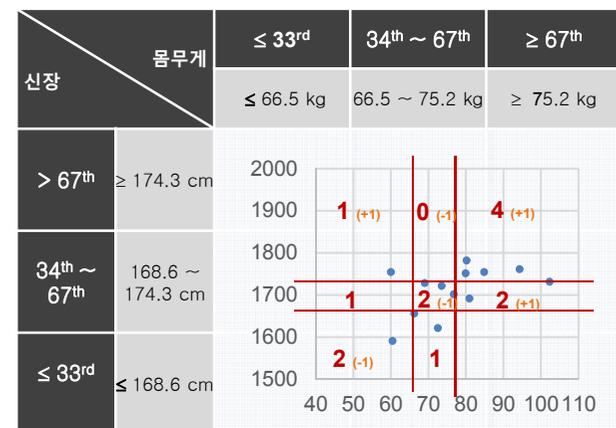
- ✓ 20 ~ 50대 남성
- ✓ 굴삭기 운용 경력 5년 이상
- ✓ A사 및 B사 굴삭기 운전 경험자 유사 비율(1:1)로 모집
- ✓ 한국인 (1) 신장과 (2) 몸무게 분포 고려(Size Korea 인체측정 data 참조)

		<i>n</i>	Mean	SD	평균 비교	분산 비교
신장 (cm)	한국인	2,471	171.4	6.1	$t(2482) = 0.83$ $p = 0.41$	$f(2470, 12) = 0.90$, $p = 0.35$
	실험 참여자	13	170.0	5.8		
체중 (kg)	한국인	2,471	71.6	10.3	$t(2482) = -1.88$ $p = 0.06$	$f(2470, 12) = 1.43$, $p = 0.25$
	실험 참여자	13	77.0	12.3		

한국인 신장 및 몸무게 분포 (단위: 명)

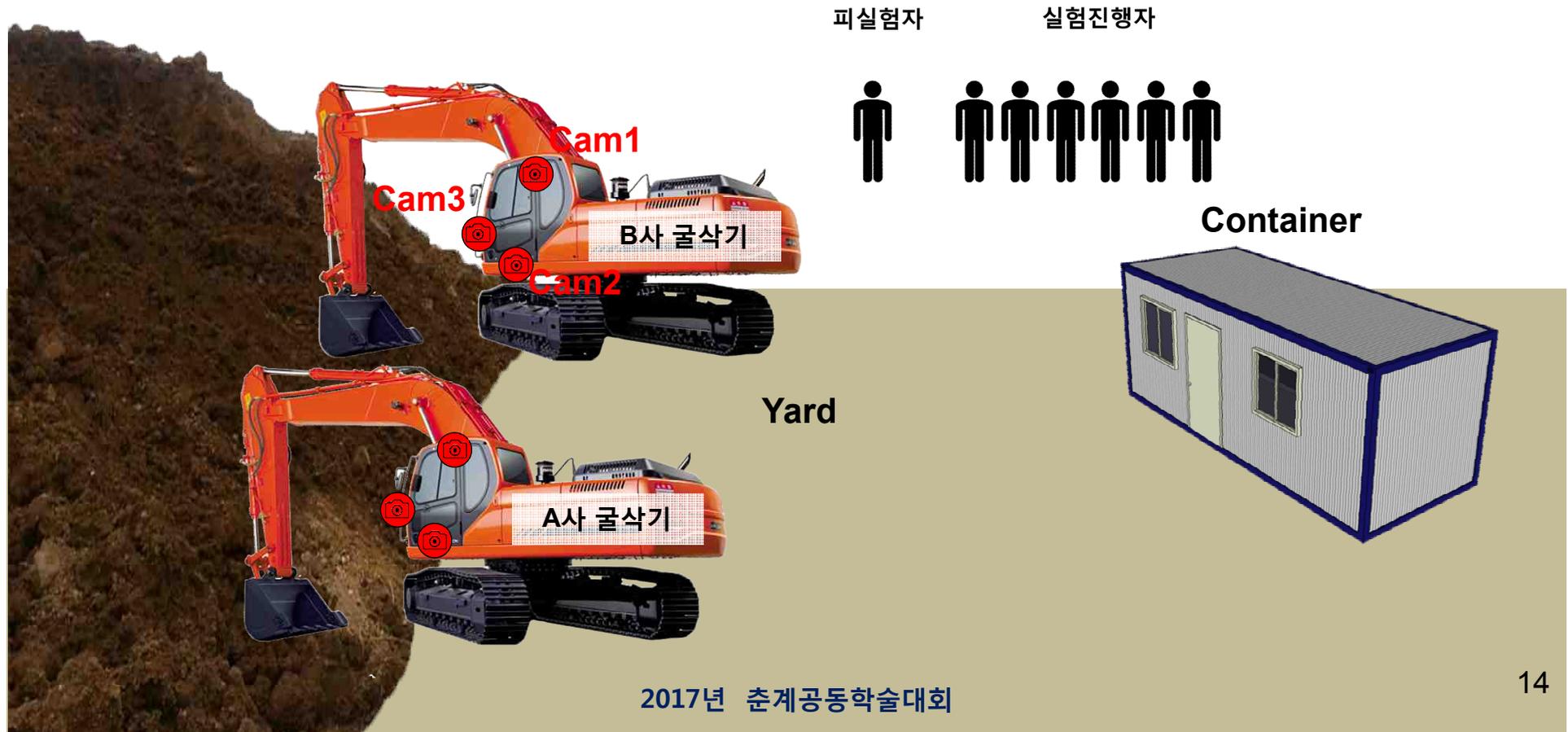


실험 참여자 신장 및 몸무게 분포 (단위: 명)



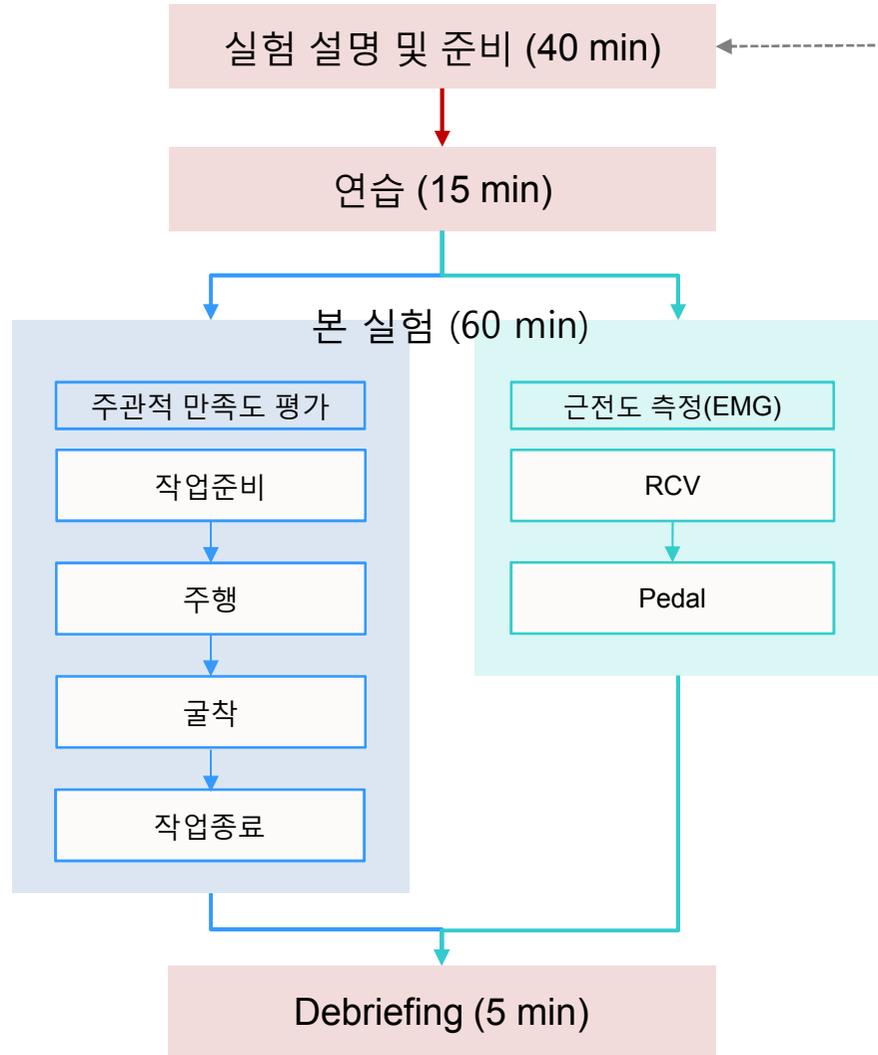
인간공학적 사용성 평가 환경

- ❑ Container: 인체 치수 측정, EMG 전극 부착 및 MVC 측정, 사후 설문
- ❑ Yard: 굴삭기 작업 수행, EMG 측정, 주관적 만족도 평가
- ❑ CAM 1 ~ 3: 운전자 동작(윗면, 측면) 및 굴삭기 boom과 bucket 움직임 촬영



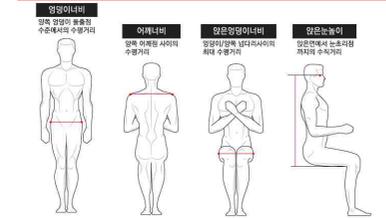
실험 절차 및 평가 Task (1/2)

소요 시간: 180 min/인



실험 설명 및 동의서 작성

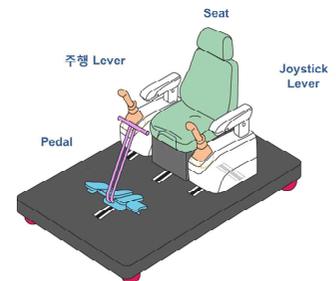
인체 측정



EMG 부착



평가 주요 부품



실험 절차 및 평가 Task (2/2)

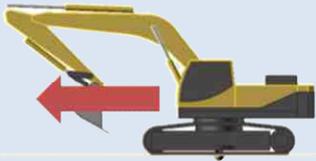
만족도 평가

작업준비



- 탑승
- 안전벨트 체결
- 운전석 조절
- 조작부 조절
- 시동 킴
- 안전 레버 해제

주행



- | | |
|----------------|----------------|
| • 전진_Lever | • 전진_Pedal |
| • 후진_Lever | • 후진_Pedal |
| • 좌회전_Lever | • 좌회전_Pedal |
| • 우회전_Lever | • 우회전_Pedal |
| • 제자리 회전_Lever | • 제자리 회전_Pedal |

굴착



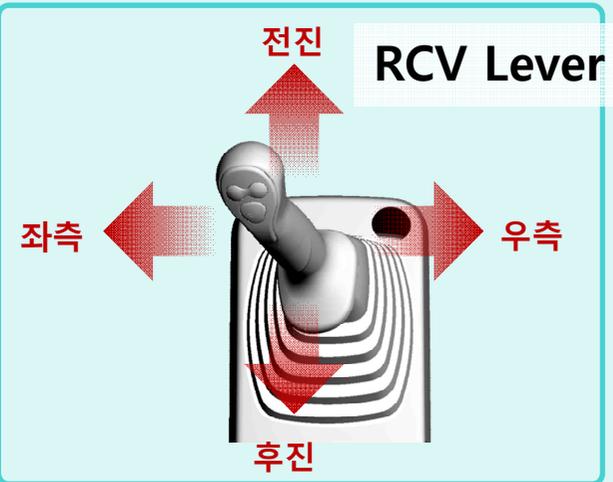
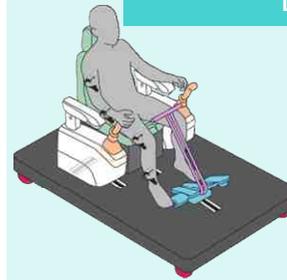
- 고르기
- 굴착
- 상차

작업종료

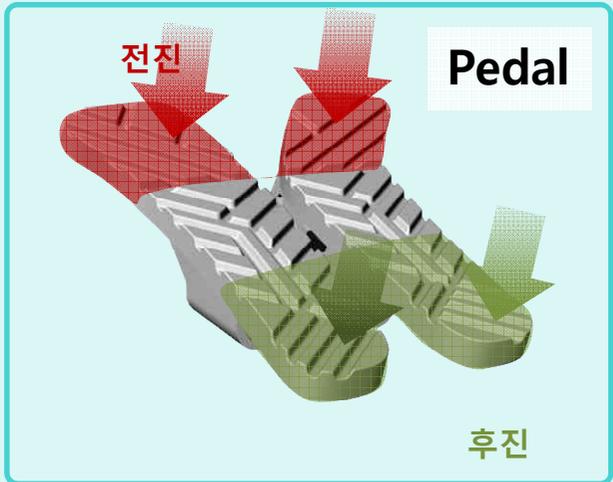


- 시동 킴
- 안전벨트 해제
- 안전 레버 체결
- 하차

근전도 측정(EMG)



7회 반복



인간공학적 사용성 평가 예시

주요 부품 3D scan



굴삭기 사용성 평가



인체 측정



EMG 측정



주관적 만족도 평가



사용성 평가 설문지 개발

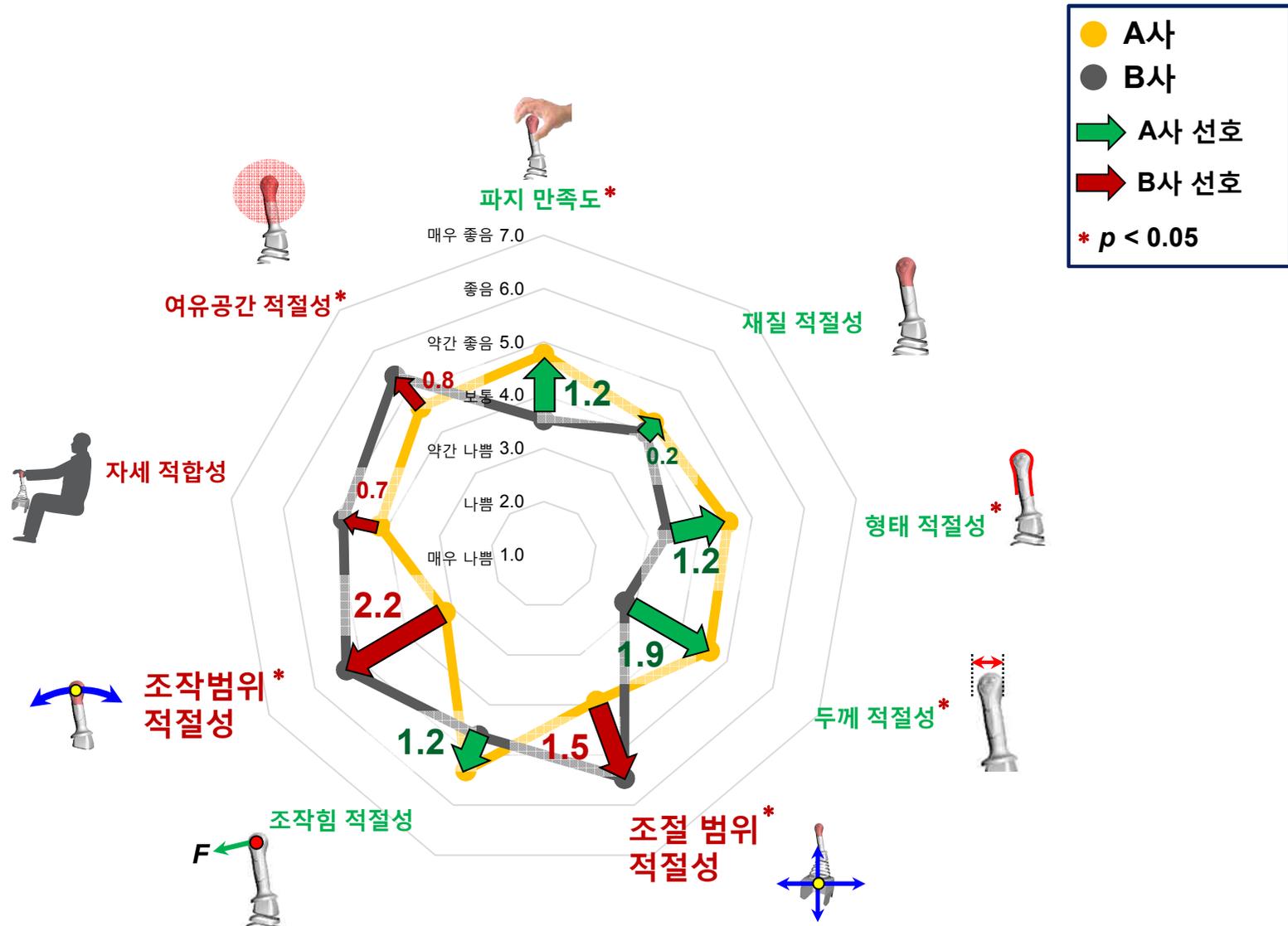
- 파지 만족도, 재질 적절성, 형상 적합성, 조절 범위 적절성 등 10가지 항목 선정
- 사용 task, 조작 부위, 관련 사용성 평가 항목을 반영한 사용성 평가 설문지 개발

굴삭기 사용성 평가 설문지

Task
조작 부위
평가 항목

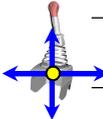
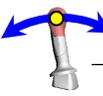
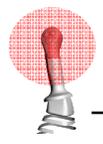
Task	조작 부위	평가 항목
작업 준비 (조작 전)	RCV_핸들부	파지만족도, 재질적절성, 형태적절성, 두께적절성, 조절범위 적절성
주행	주행 Lever_핸들부	파지만족도, 재질적절성, 전후두께적절성, 좌우길이적절성, 조작범위 적절성, 자세 적합성, 여유공간 적절성
굴착	RCV_핸들부	조작범위 적절성, 자세 적합성, 여유공간 적절성
작업종료	RCV_전반	좌우간격 적절성, 전반적 만족도, 정면 각도 적절성, 측면 각도 적절성, 높이 적절성
Seat 등면_머리 지지부	Seat 등면_머리 지지부	재질적절성, 형상적합성, 자세 적합성, 압력분산 적절성
Seat 등면_흉부 지지부	Seat 등면_요추 지지부	재질적절성, 형상적합성, 자세 적합성, 압력분산 적절성

주관적 만족도 분석 결과 예: RCV Lever



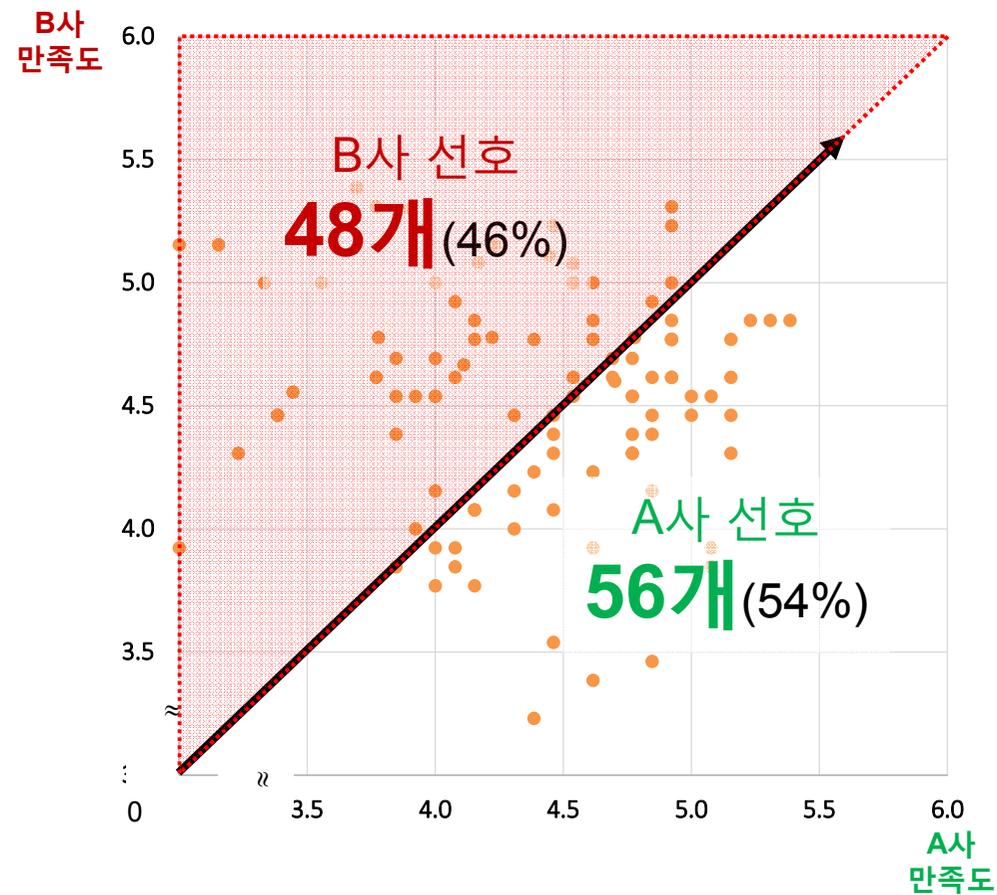
주관적 만족도 분석 결과 예: RCV Lever

※ (x): horizontal, (y): lateral, (z): vertical

No.	평가 항목	A사	B사	MD	유관 설계인자	제원 비교	선호 설계	개선 방향 (A사 기준)	
1	파지 만족도	4.6	3.4	1.2	핸들 그림부 중심 둘레길이	(A) < (B)	A사	-	
					핸들 외측 곡률	(A) > (B)	A사	-	
2	재질 적절성	4.1	3.8	0.2	-	-	-	-	
3	형태 적절성	4.4	3.2	1.2	핸들 그림부 최대 너비	(A) < (B)	A사	-	
					핸들 그림부 높이	(A) < (B)	A사	-	
4	두께 적절성	4.5	2.7	1.8	핸들 그림부 최대 너비	(A) < (B)	A사	-	
	5	조절 범위 적절성	3.8	5.3	-1.5	핸들 조절 범위 (Layout)	(A) < (B)	B사	핸들 조절 범위 ↑
	6	조작 힘 적절성	5.2	4.5	0.7	-	-	-	-
	7	조작범위 적합성	3.0	5.2	-2.2	핸들 조작 범위 (Layout)	(x): (A) > (B) (y): (A) < (B)	B사	핸들 조작 범위 (x) ↓ / (y) ↑
	8	자세 적합성	4.0	4.7	-0.7	핸들 정면 경사각	(A) > (B)	B사	핸들 각도 ↓
						핸들 측면 경사각	(A) < (B)	B사	핸들 측면 경사각 ↑
						핸들 높이	(A) < (B)	B사	핸들 높이 ↑
	9	여유공간 적절성	4.5	5.2	-0.7	핸들 위치 (Layout)	(x): (A) > (B) (y): (A) > (B) (z): (A) < (B)	B사	핸들 거리 (x) ↓ / (y) ↓ / (z) ↑

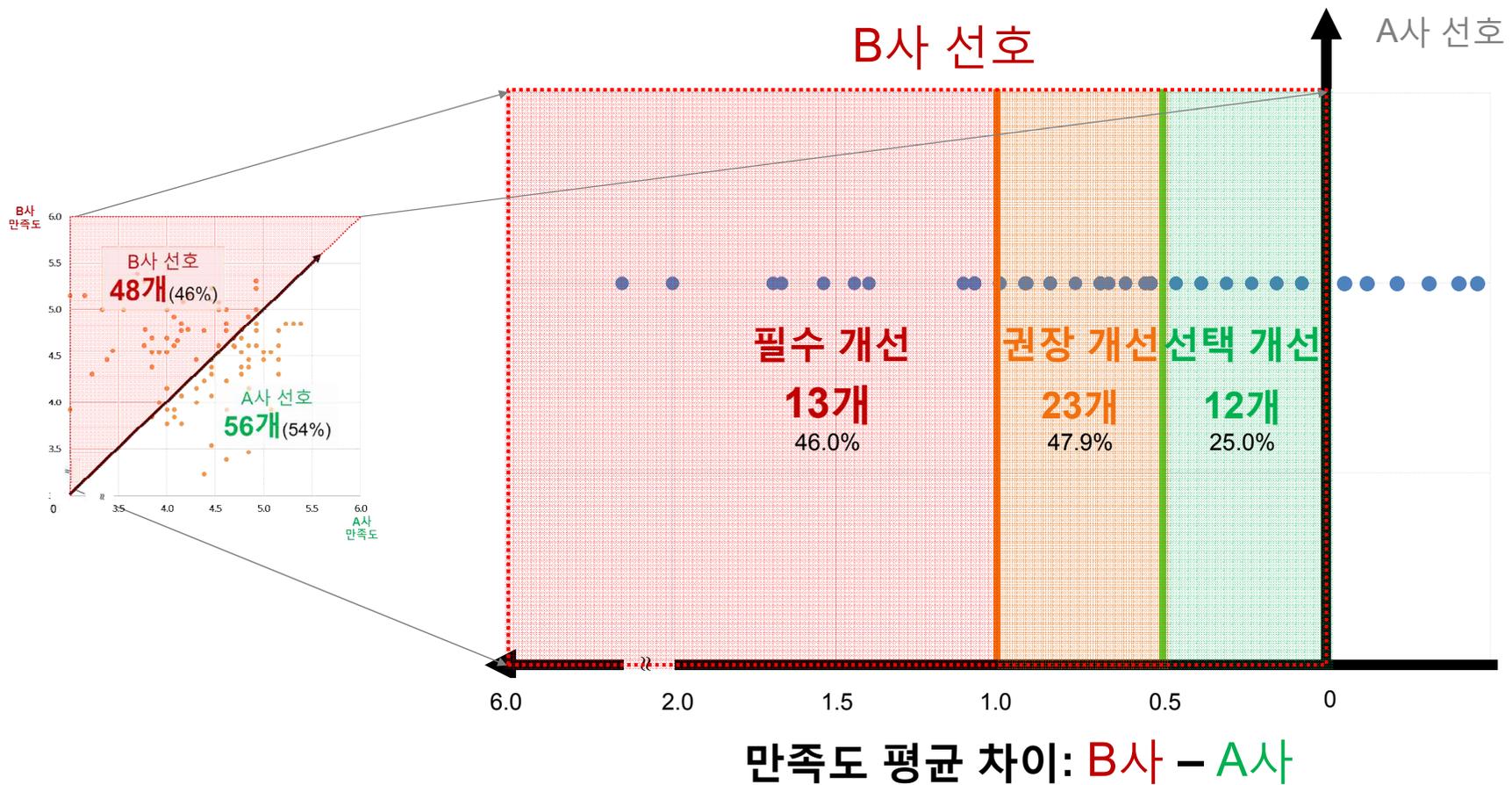
주관적 만족도 평가 항목별 선호 설계 분석

- A사 및 B사 주관적 만족도 분석 결과, 104개 평가 항목 중 **B사 설계 선호 항목 48개(46%)**, **A사 설계 선호 항목 56개(54%)** 파악



주관적 만족도 기반 개선 중요도 도출 (1/3)

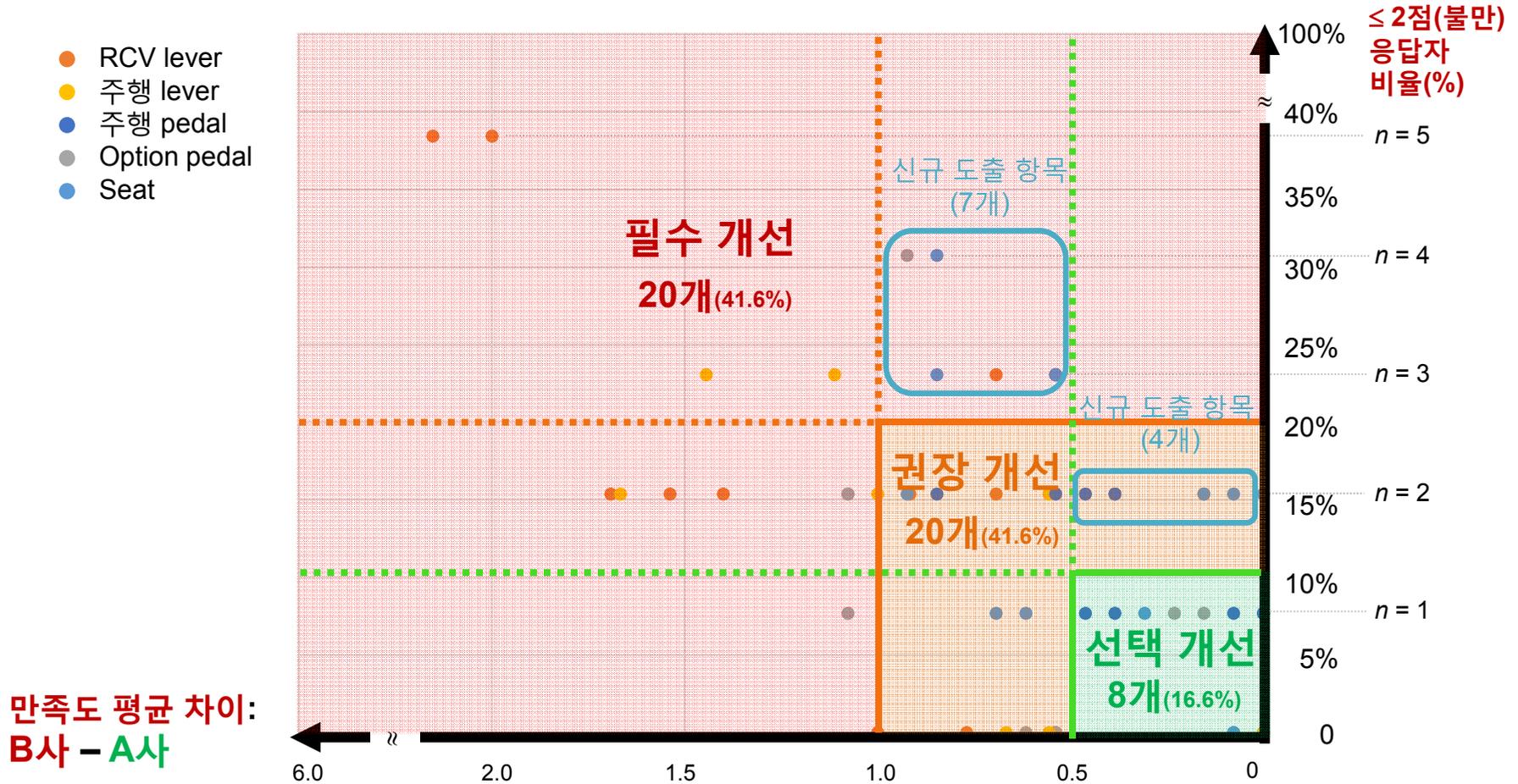
- 만족도 평균 차이(MD)를 분석하여 개선 항목별 중요도(필수개선: ≥ 1.0 ; 권장개선: $0.5 \sim 1.0$; 선택 개선: < 0.5) 구분



주관적 만족도 기반 개선 중요도 도출 (2/3)

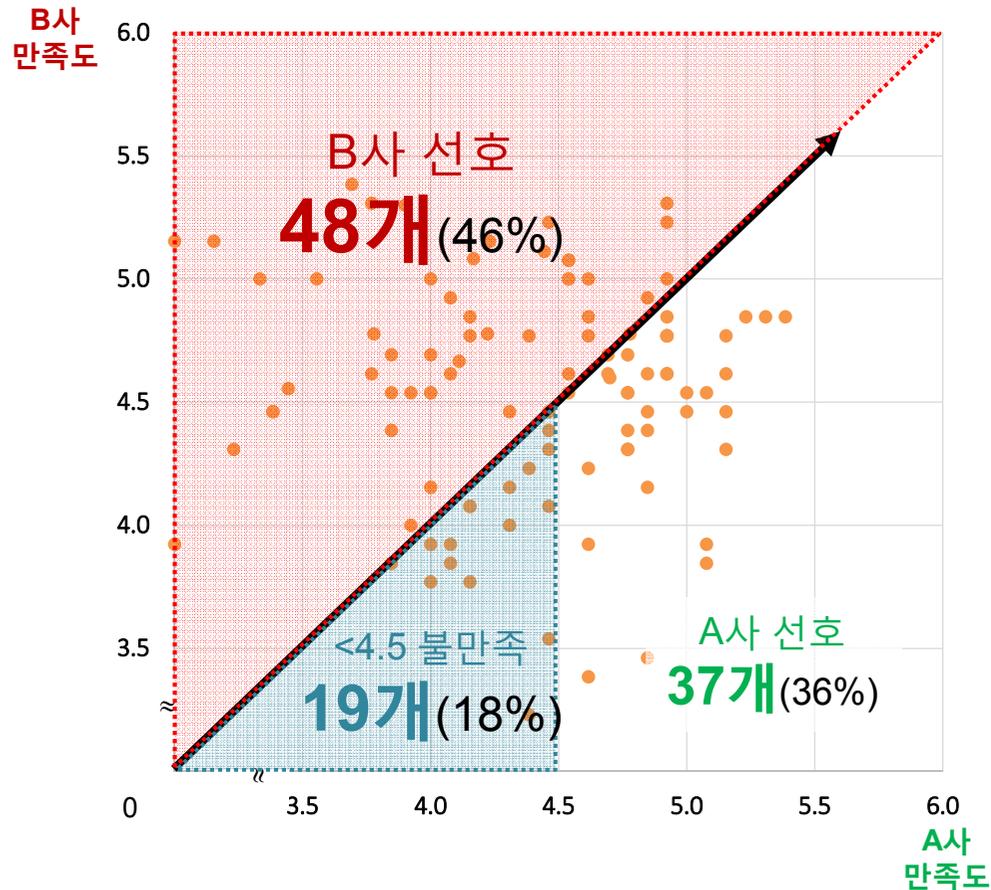
- 만족도 평균 차이(MD)외에도 **2점이하 응답자 비율**을 추가로 고려하여 **개선 항목별 중요도 구분 조정**

- RCV lever
- 주행 lever
- 주행 pedal
- Option pedal
- Seat



주관적 만족도 기반 개선 항목 선정 (3/3)

- A사 및 B사 양사 모두 만족도가 낮은(< 4.5) 항목 19개를 개선 대상으로 추가 포함



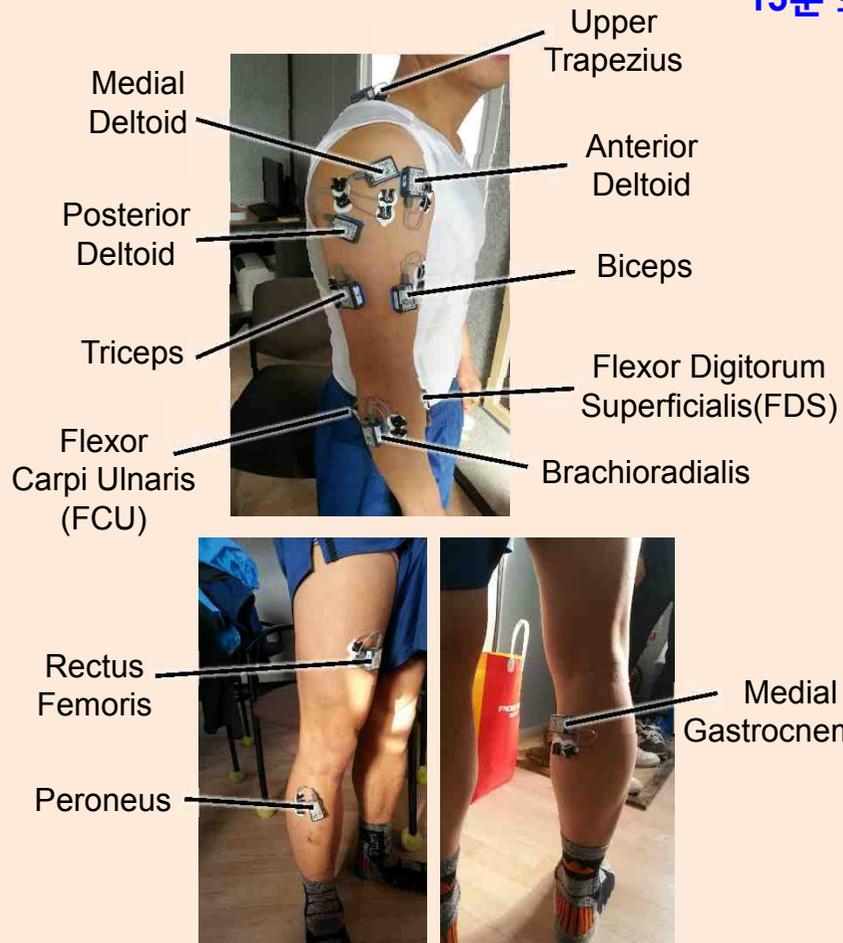
개선 대상 항목
67개 도출

근전도(EMG) 측정 방법

측정 소요 시간: 1 hr/인

전극 부착(근육 12가지)

15분 소요



MVC 측정

15분 소요



12개 근육 각각에 대해
특정 방향의 힘을 가하여
근육 최대힘(MVC) 측정

Task 수행

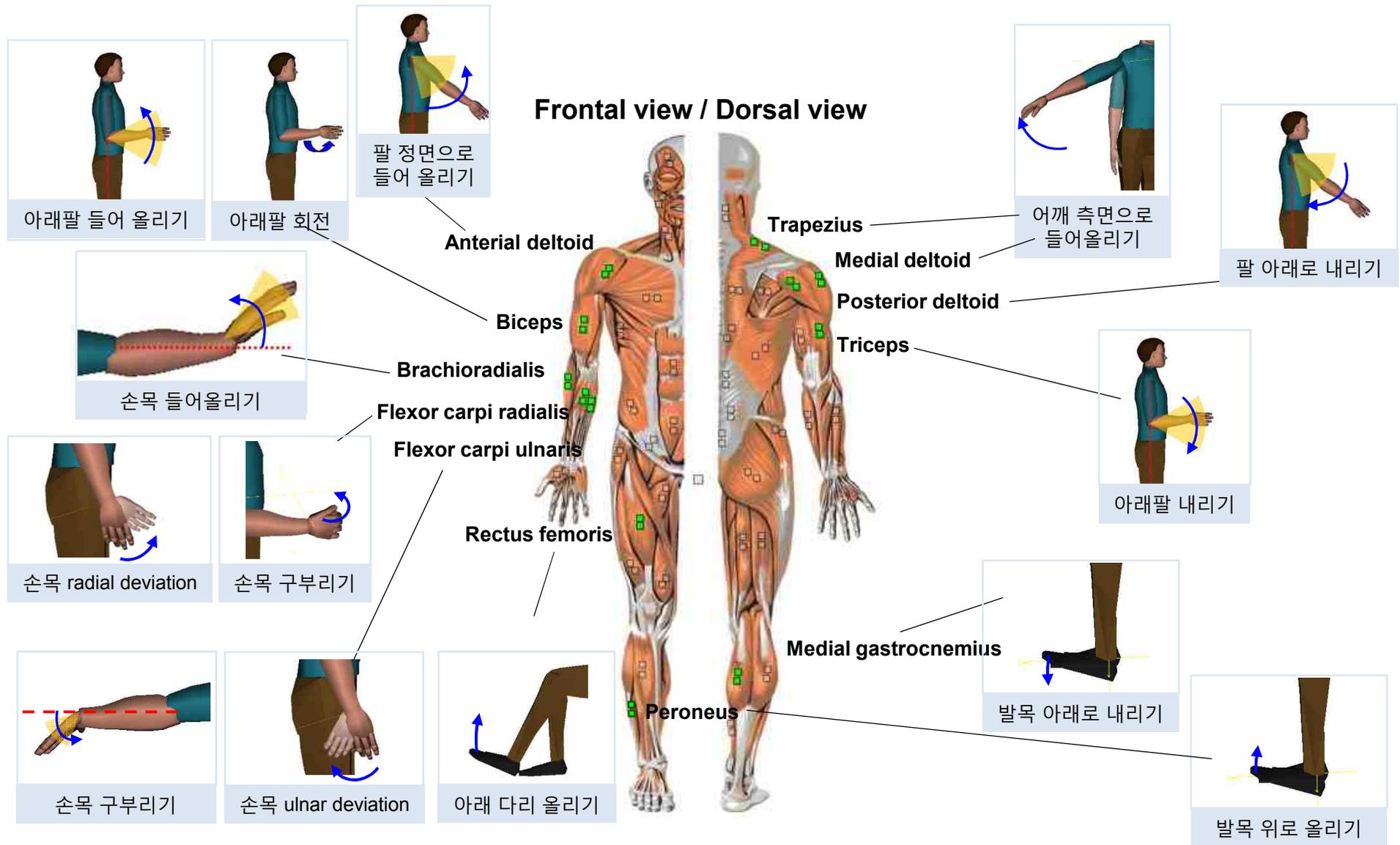
30분 소요



7가지 작업

- RCV Push
- RCV Pull
- RCV Left
- RCV Right
- Pedal Forward
- Pedal Backward(toe)
- Pedal Backward(heel)

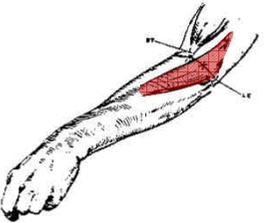
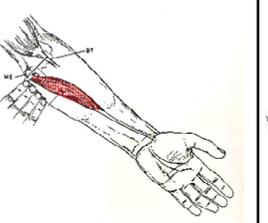
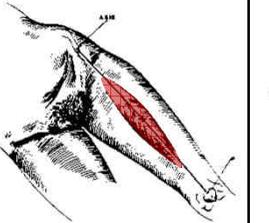
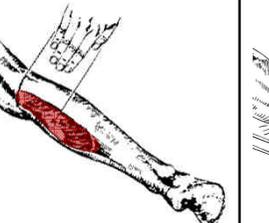
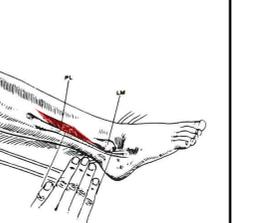
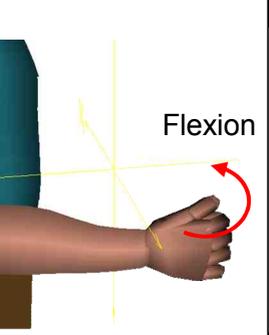
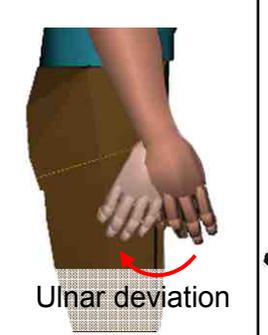
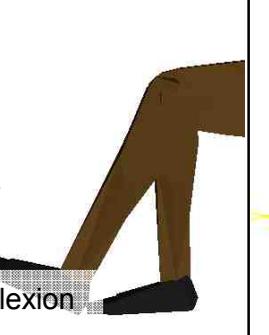
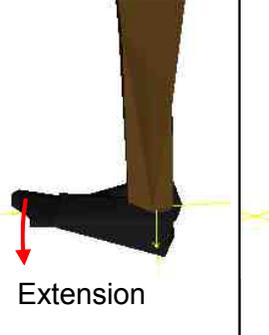
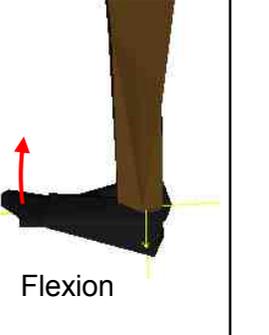
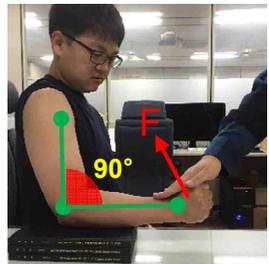
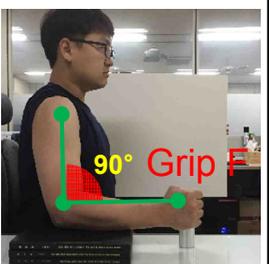
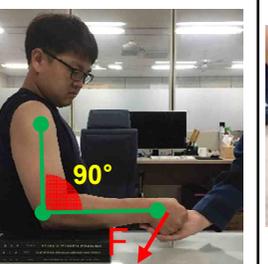
근전도(EMG) 측정: 인체 부위



근전도(EMG) 측정: MVC 측정 방법 (1/2)

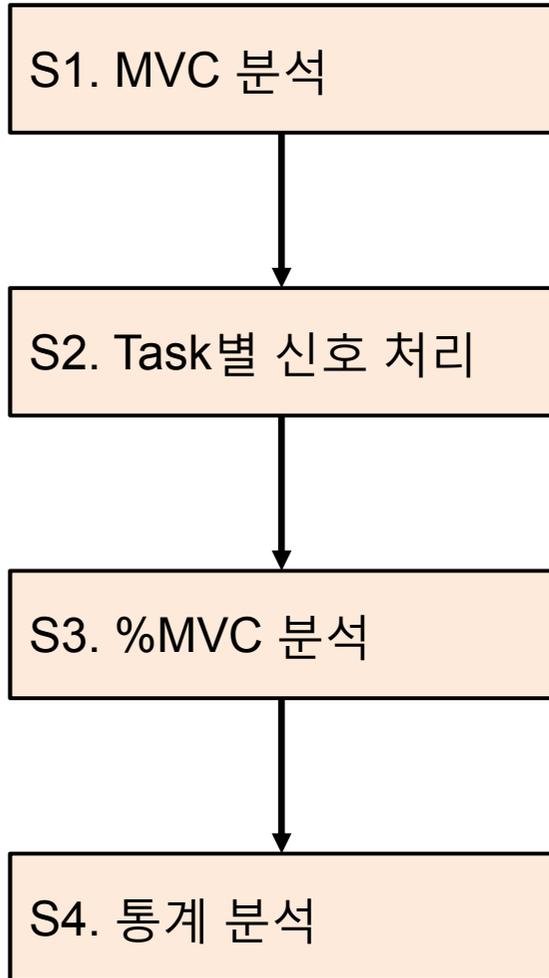
	Upper trapezius	Anterior deltoid	Medial deltoid	Posterior deltoid	Triceps	Biceps
그림						
역할						
MVC 측정 protocol	<p>S1. 상체를 펴고 팔을 상체에 붙이고 고정</p> <p>S2. Shoulder 수직방향으로 힘 작용</p> <p>S3. 최대 힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 trunk 90° 고정</p> <p>S2. Upper arm 수평 유지(정면)</p> <p>S3. 정면 방향으로 최대 힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 trunk 90° 고정</p> <p>S2. Upper arm 수평 유지(측면)</p> <p>S3. 측면 방향으로 최대 힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 trunk 90° 고정</p> <p>S2. Upper arm 수평 유지(측면)</p> <p>S3. 후면 방향으로 최대 힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 forearm 120° 고정</p> <p>S2. Upper arm 수평 유지</p> <p>S3. 최대 힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 forearm 120° 고정</p> <p>S2. Upper arm 수평 유지</p> <p>S3. 최대 힘 발휘</p>
MVC 측정 사진						

근전도(EMG) 측정: MVC 측정 방법 (2/2)

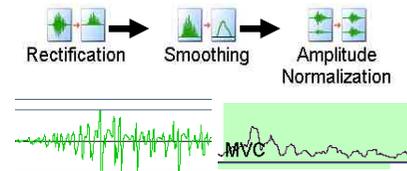
	Brachioradialis	Flexor digitorum superficialis (FDS)	Flexor carpi ulnaris (FCU)	Rectus femoris	Medial gastrocnemius	Peroneus brevis
그림						
역할						
MVC 측정 protocol	<p>S1. Upper arm과 forearm 90° 고정</p> <p>S2. forearm 수평 유지</p> <p>S3. 손목 radial deviation 시 최대힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 forearm 90° 고정</p> <p>S2. forearm 수평 유지</p> <p>S3. 최대 그립 힘 발휘</p>	<p>S1. Upper arm과 forearm 90° 고정</p> <p>S2. forearm 수평 유지</p> <p>S3. 손목 ulnar deviation 시 최대힘 발휘</p>	<p>S1. Upper leg과 foreleg 90° 고정</p> <p>S2. foreleg 수직 유지</p> <p>S3. 무릎 extension 시 최대힘 발휘</p>	<p>S1. Foreleg과 foot 10 ~ 15° 고정</p> <p>S2. foreleg 수직 유지</p> <p>S3. 발목 extension 시 최대힘 발휘</p>	<p>S1. Foreleg과 foot 10 ~ 15° 고정</p> <p>S2. foreleg 수직 유지</p> <p>S3. 발목 flexion 시 최대힘 발휘</p>
MVC 측정 사진						

EMG 분석 방법

분석 소요 시간: 6 hr/인

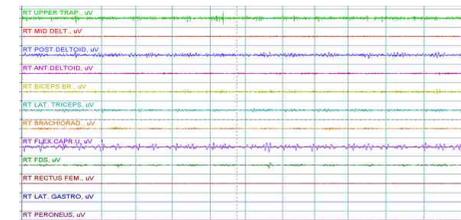


- Signal Processing
 1. Rectification
 2. Smoothing
 3. Amplitude normalization



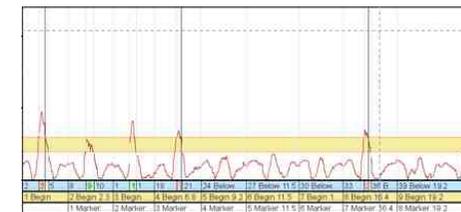
5 분/근육 × 12개 근육 × 13명 = 약 13 hr

- Signal Processing
 1. Bandpass filtering (10 ~ 400 Hz)
 2. Rectification
 3. Smoothing (RMS 400 ms)



15 분/task × 7개 task × 13명 = 약 23 hr

- Muscular Efforts
 - ✓ Low (< 5%)
 - ✓ Medium (5 ~ 15%)
 - ✓ High (≥ 15%)



15 분/task × 7개 task × 13명 = 약 23 hr

- Descriptive Statistics
- Paired *t*-test ($p < 0.05$)

Task	Mean	SD	Min	Max	Q1	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19	Q20	Q21	Q22	Q23	Q24	Q25	Q26	Q27	Q28	Q29	Q30	Q31	Q32	Q33	Q34	Q35	Q36	Q37	Q38	Q39	Q40	Q41	Q42	Q43	Q44	Q45	Q46	Q47	Q48	Q49	Q50																													
1	0.05	0.02	0.01	0.10	0.02	0.08	0.12	0.15	0.18	0.20	0.22	0.25	0.28	0.30	0.32	0.35	0.38	0.40	0.42	0.45	0.48	0.50	0.52	0.55	0.58	0.60	0.62	0.65	0.68	0.70	0.72	0.75	0.78	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92	0.95	0.98	1.00	1.02	1.05	1.08	1.10	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.30	1.32	1.35	1.38	1.40	1.42	1.45	1.48	1.50	1.52	1.55	1.58	1.60	1.62	1.65	1.68	1.70	1.72	1.75	1.78	1.80	1.82	1.85	1.88	1.90	1.92	1.95	1.98	2.00

Code 제작 및 분석 = 약 15 hr

EMG 측정 결과

- RCV lever pull과 pedal press backward(heel)를 제외한 모든 task에서 주동근의 muscular efforts($\geq 5\%$)는 A사가 B사 보다 평균 9.7% 높음

Task	주동근육	Low (< 5%MVC)			Medium (5 ~ 15%MVC)			High ($\geq 15\%$ MVC)			$\geq 5\%$ MVC	평가 우수
		A사	B사	MD_{A-B}	A사	B사	MD_{A-B}	A사	B사	MD_{A-B}		
RCV Push	Ant. Deltoid	41.9	56.4	-14.4	42.0	36.9	5.2	16.0	6.8	9.2	14.4	B사
	Triceps	41.8	52.6	-10.8	31.5	31.4	0.1	26.7	16.0	10.7	10.8	B사
RCV Pull	Post. Deltoid	60.2	43.1	17.1	32.2	42.5	-10.3	7.6	14.4	-6.8	-17.1	A사
	Biceps	77.0	87.6	-10.6	22.0	11.4	10.6	1.0	1.0	0.0	10.6	B사
RCV Left	FDS	4.8	13.1	-8.4	27.9	28.2	-0.3	67.4	58.7	8.7	8.4	B사
RCV Right	Brachioradialis	9.8	15.5	-5.7	46.9	36.0	11.0	43.3	48.5	-5.2	5.8	B사
Pedal Forward	Gastrocnemius	17.7	29.9	-12.2	20.1	27.1	-7.0	62.2	43.0	19.2	12.2	B사
Pedal Backward (toe)	Gastrocnemius	27.5	33.0	-5.5	23.5	16.8	6.8	48.9	50.2	-1.3	5.5	B사
Pedal Backward (heel)	Peroneus	33.6	15.3	18.2	32.8	34.2	-1.3	33.6	50.5	-16.9	-18.2	A사

EMG 유관 설계인자 및 제원 비교

Task	주동근육	근육 부하 ($\geq 5\%$ MVC)		유관 설계 인자	설계 치수 비교
		A사	B사		
RCV Push	Ant. Deltoid	58.0	43.7	측면 경사각	(A) > (B)
	Triceps	58.2	47.4	조작 범위	(A) > (B)
RCV Pull	Post. Deltoid	39.8	56.9	핸들 높이	(A) < (B)
	Biceps	23.0	12.4	핸들 위치	(A) > (B)
RCV Left	FDS	95.3	86.9	정면 경사각	(A) = (B)
				RCV 좌우 간격	(A) > (B)
RCV Right	Brachioradialis	90.2	84.5	핸들 위치	(A) > (B)
				정면 경사각	(A) = (B)
Pedal Forward	Gastrocnemius	82.3	70.1	RCV 좌우 간격	(A) > (B)
				핸들 위치	(A) > (B)
Pedal Backward (toe)	Gastrocnemius	72.4	67.0	페달 조작 범위	(A) > (B)
				주 지지부 경사각	(A) < (B)
Pedal Backward (heel)	Peroneus	66.4	84.7	페달 최후측 높이	(A) > (B)
				주 지지부 경사각	(A) < (B)
				페달 최후측 높이	(A) > (B)

Discussion

□ **굴삭기 주요부품의 주요 설계인자 도출**

- ✓ 굴삭기 운전 시 주로 활용되는 주요 부품의 사용성 측면에서 중요한 설계 인자 선정
- ✓ 설계 인자 선정 시 부품 자체의 특성을 고려한 부품별 설계인자와 layout 상의 배치 특성을 고려한 layout 설계인자를 구분하여 선정함

□ **굴삭기 주요부품 사용성 평가 Protocol 정립**

- ✓ 객관적(EMG) 및 주관적 평가 방법을 적용하여 굴삭기 주요 부품의 사용성 평가
- ✓ 굴삭기 작업 특성을 고려하여 주요 부품별 사용 task를 세분화 함
- ✓ 주요 부품 주관적 만족도 평가에 특화된 평가항목 도출 및 평가 설문지 개발

□ **연구 한계점 및 추후 연구**

- ✓ 굴삭기 운전 시 사용자의 자세의 정량적인 분석이 부재함
⇒ 추후 동작 측정을 함께 수행하여 자세 분석 예정

Q & A

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION



본 연구는 “현대건설기계”의 지원을 받아 수행되었음