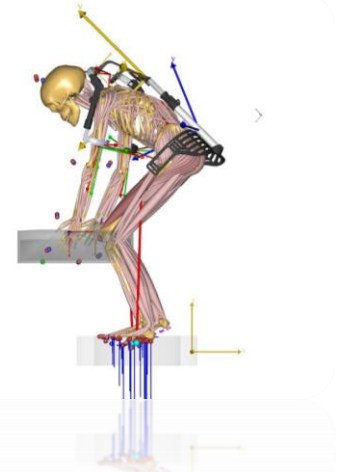
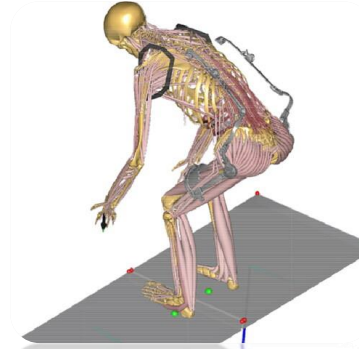
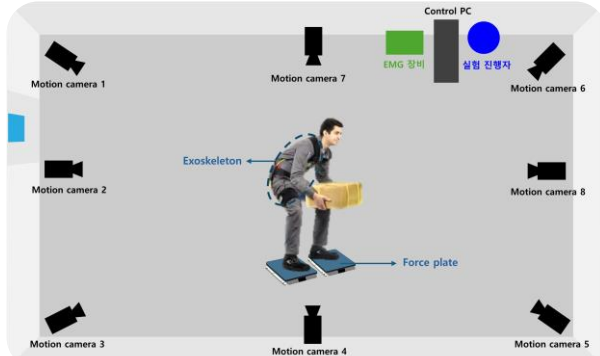


Back-Support Exoskeleton의 인간공학적 효과 평가 및 설계 특성 비교 평가에 따른 설계 최적화: Preliminary study



정소윤¹, 심고은¹, 박종배¹,
이경은², 공태웅², 김훈², 유희천¹



¹포항공과대학교
산업경영공학과

Ergonomic Design Technology Lab

²순천향대학교
스포츠의학과

Human Performance Laboratory



Contents

- 연구배경/목적
 - 연구배경 및 필요성
 - 연구 목적
- 문헌조사
- 연구방법
 - 외골격 유효성 평가 실험 설계
 - 데이터 처리 및 분석
- 실험결과 ($n = 1$)
- 토의
- Q & A

연구 배경



작업 관련 근골격계 질환(WMSDs)

- ❑ **작업 관련 근골격계질환**(Work-related Musculoskeletal Diseases, WMSDs)은 **작업 활동**으로 인해 **발생**하는 **근육, 건, 인대, 신경, 관절, 척추 디스크, 기타 골격계의 부상 및 장애**를 의미
 - ⇒ **불편한 자세, 과도한 힘 사용, 반복적 동작, 기계적 부하(진동, 충격)** 등의 **작업 위험 요인**으로 인해 발생(He et al., 2023)
 - ⇒ **작업자의 삶의 질 저하, 생산성 감소**를 포함한 **경제적 및 사회적 손실 초래**(Do et al., 2022)

작업 관련 근골격계질환 예시



WMSDs 발생 요인

작업적 요인 부적절한 자세 과도한 힘 반복적 동작 등	
개인적 요인 연령, 성별 신체 조건 유전적 요인 등	
사회심리적 요인 작업 만족도 업무 스트레스 동료 관계 등	

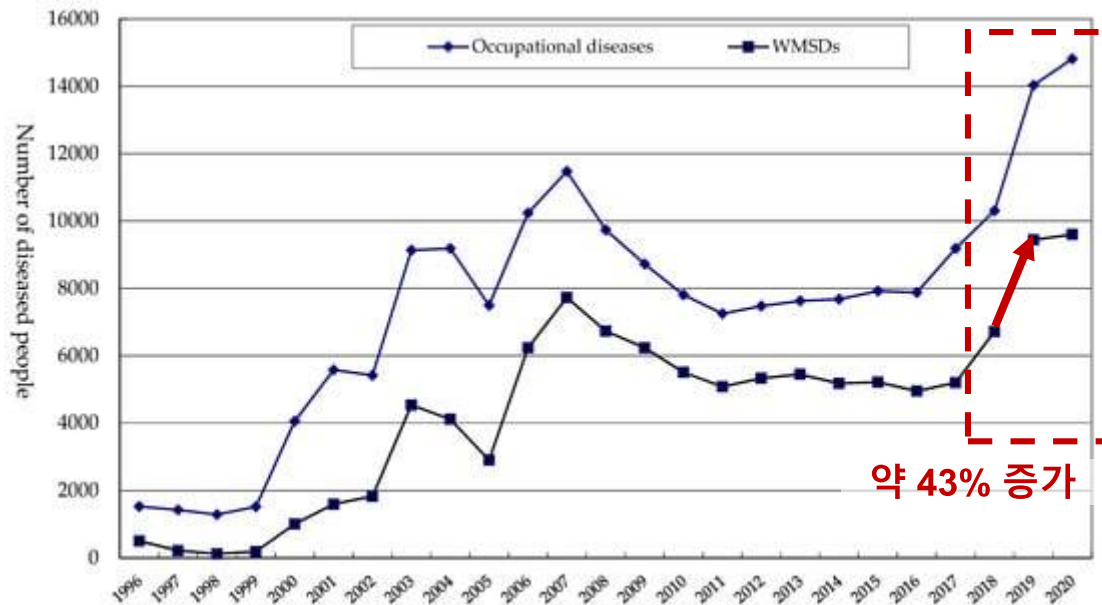
→

WMSDs 발생↑		

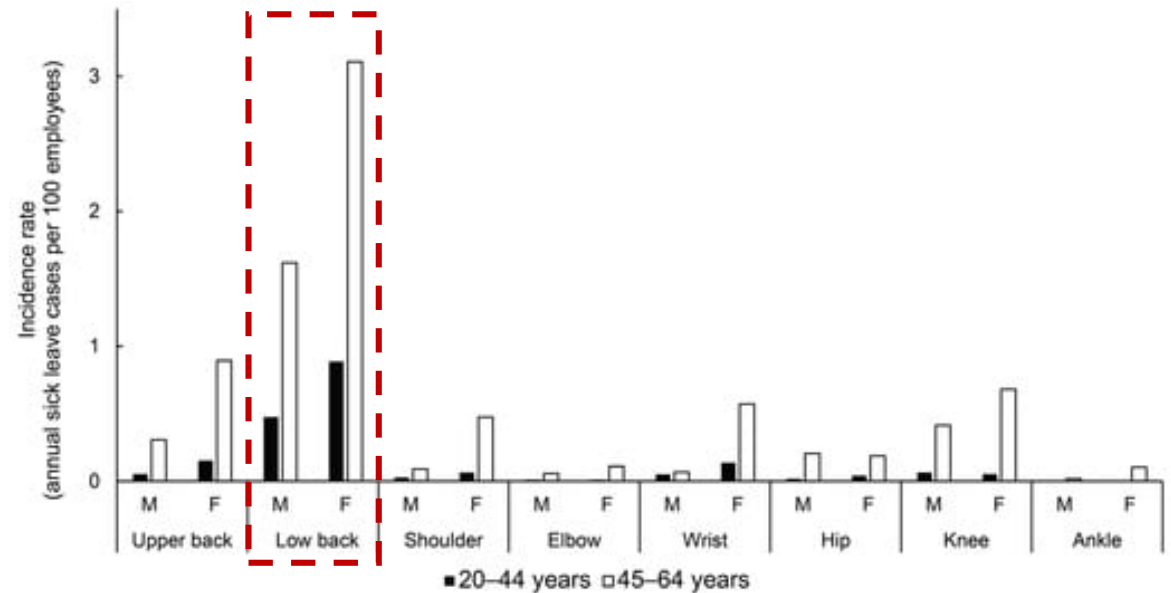
WMSDs 추세와 요통

- 연도별 직업병 중 WMSDs 발생률은 9.5~71.5% 차지 (Do et al., 2022)
- 요통(low-back disorder)은 WMSDs 중에서 78.1%로 높은 비율을 차지 (André et al., 2020)
- ⇒ 무거운 물건을 들기, 내기, 밀기, 당기기, 운반하는 작업으로 인해 유발
- ⇒ 요통 유발을 방지하기 위해 보조 힘을 제공해주는 외골격(exoskeleton) 활용

연도별 직업병 및 WMSD의 추세 (Do et al., 2022)



WMSD의 신체부위별 발생률 (Šporin et al., 2022)



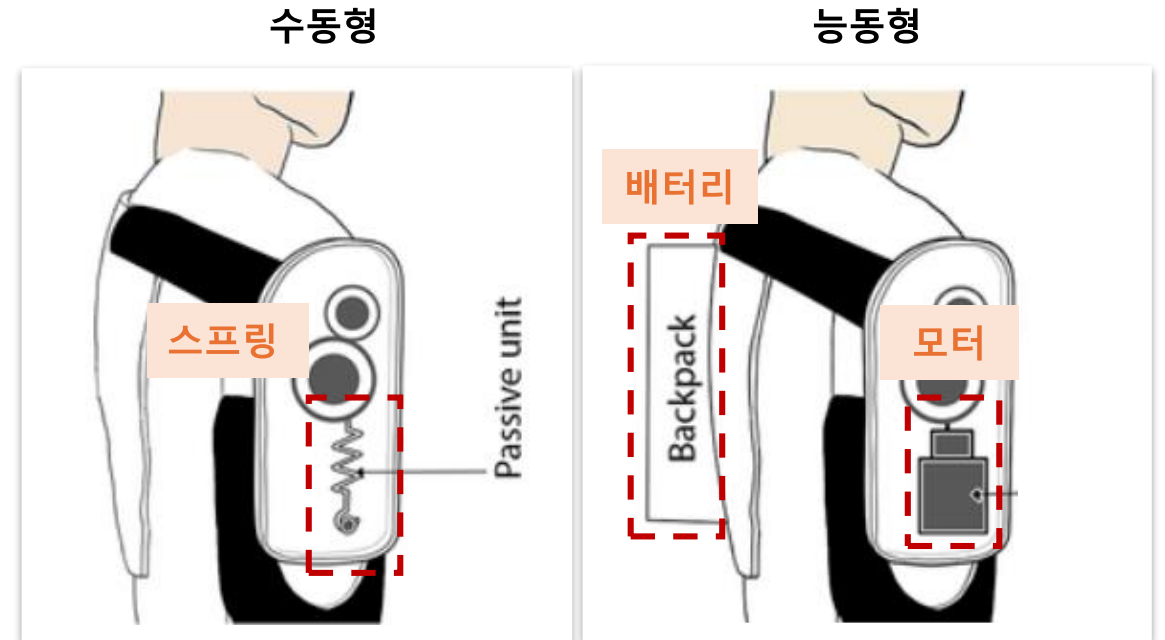
Exoskeleton의 정의 및 분류

- 신체와의 기계적 상호작용을 통해 신체 활동을 보조, 신체 성능을 향상시키는 착용형 장치(John et al., 2019)
⇒ 의료, 헬스케어, 산업, 스포츠, 군사 분야 등 다양한 분야에서 활용(Yeem et al., 2019)
- 구동 방식에 따라 스프링 및 댐퍼로 구동되는 수동형과 액추에이터로 구동되는 능동형으로 구분(André et al., 2020)
⇒ 최근에는 수동형과 능동형을 결합하여 지원 수준을 조정할 수 있는 하이브리드 형태가 제안(Lorenzo et al., 2022)

외골격의 활용 분야

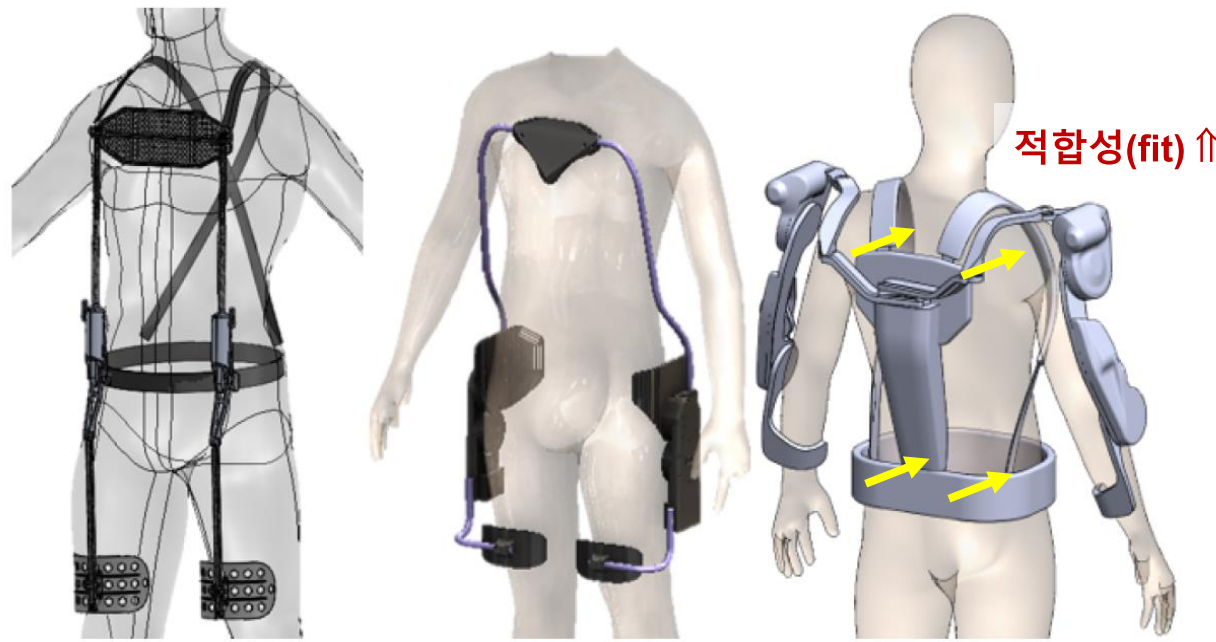
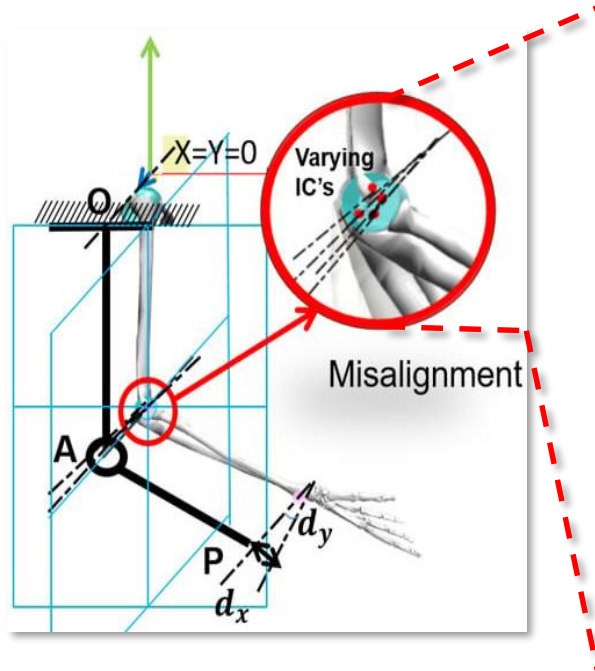


구동 방식에 따른 외골격 분류



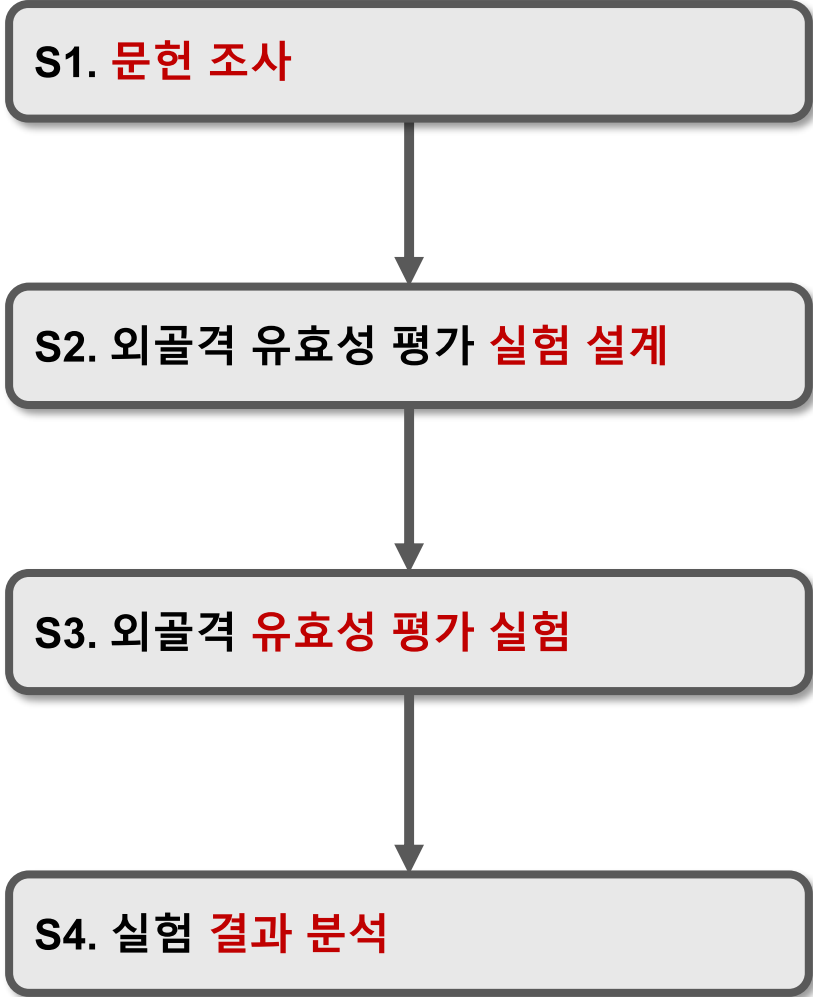
기존 Exoskeleton 설계의 한계점

- 외골격과 사용자 관절간 오정렬은 부적절한 힘과 토크 발생 \Rightarrow 불필요한 힘 사용 (Sergei et al., 2020; Clarissa et al., 2023)
 - 딱딱하고 무겁게 설계된 외골격 \Rightarrow 관절 가동 범위 제한 및 불편함 유발 (Leah et al., 2023)
- \Rightarrow 외골격 장치의 사용성 및 안전성을 높이기 위해 사용자 $\begin{matrix} \text{힘 사용} \uparrow \\ \text{불편함} \uparrow \end{matrix}$ 결과와 적합성(fit) 필요

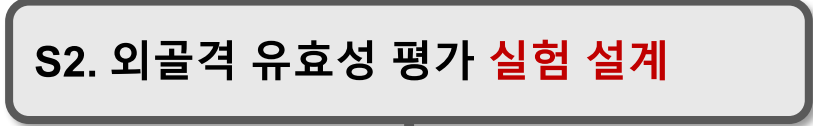


Manual lifting task를 보조하기 위한 BSE의 인간공학적 효과 평가 및 설계 특성 비교 평가에 따른 설계 최적화

- 문헌조사를 통한 BSE 장치의 객관적 및 주관적 평가척도 파악
 - BSE의 인간공학적 평가 실험 프로토콜 개발
 - BSE 착용 여부에 따른 외골격 장치의 유효성 평가
 - 설계 특성 차이를 고려한 외골격의 인간공학적 비교 평가 및 설계 개선 방향 제안
 - OpemSim 기반 동적 시뮬레이션을 통한 설계 유효성 추정 및 실험 결과와 비교 검증
- ↑ 선행연구
↓ 후속연구



- 외골격의 **객관적 및 주관적 평가 척도** 파악
- 외골격 **평가 실험 protocol** 및 **데이터 분석 방법** 파악



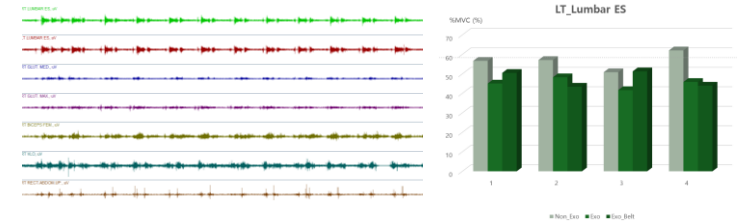
- **실험 평가 환경** 및 **측정 장비** 준비
- **사용성 평가** 및 **작업 부하 설문지** 작성



- **외골격 착용 유무**에 따른 **EMG** 및 **motion data** 측정
- 외골격 장치에 대한 **주관적 사용성 평가**



- **EMG/motion 데이터 처리** 및 **분석**
- **사용성 평가 설문지 결과 분석**



문헌조사



논문 Review

□ 문헌 조사 site: <https://www.scopus.com>

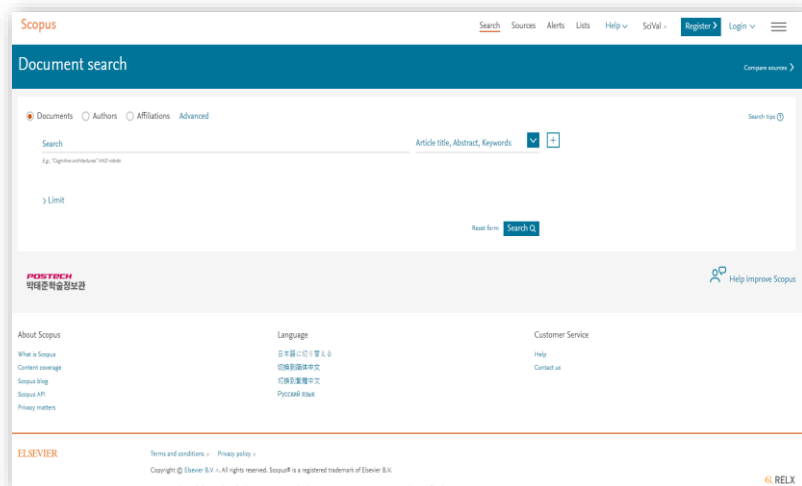
□ 검색조건: title, abstract, keyword

□ Keywords 선별

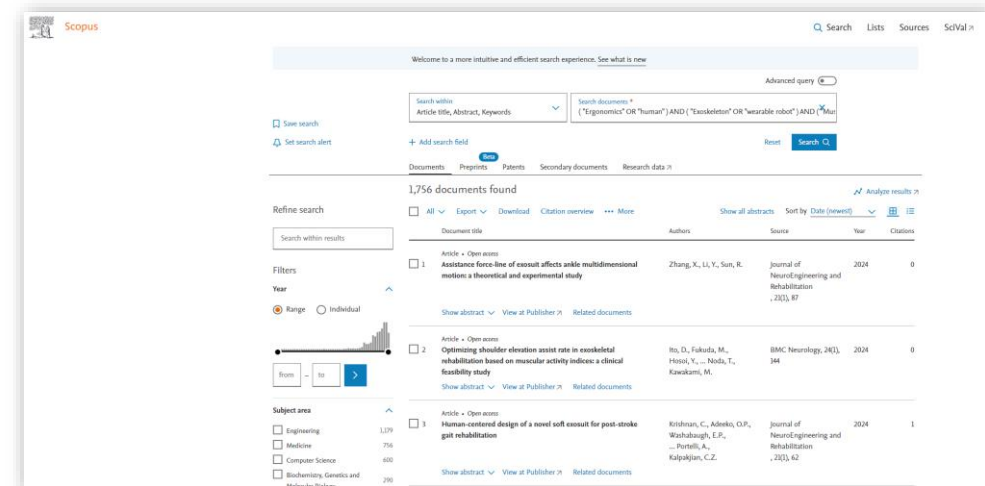
- ✓ 대상: exoskeleton, wearable robot
- ✓ 인간공학 분야: ergonomics, human factors, biomechanics
- ✓ 연구 목적: design, evaluation, usability testing
- ✓ 방법: simulation, modeling
- ✓ 대상 부위: upper limb, back, lumbar

추정식: Title-Abs-Key ("Exoskeleton" OR "Wearable robot") AND ("Upper limb" OR "Upper extremity " OR "Back") AND ("Active" OR "Powered") AND ("Evaluation" OR "Usability") AND ("Ergonomics" OR "Human Factor")

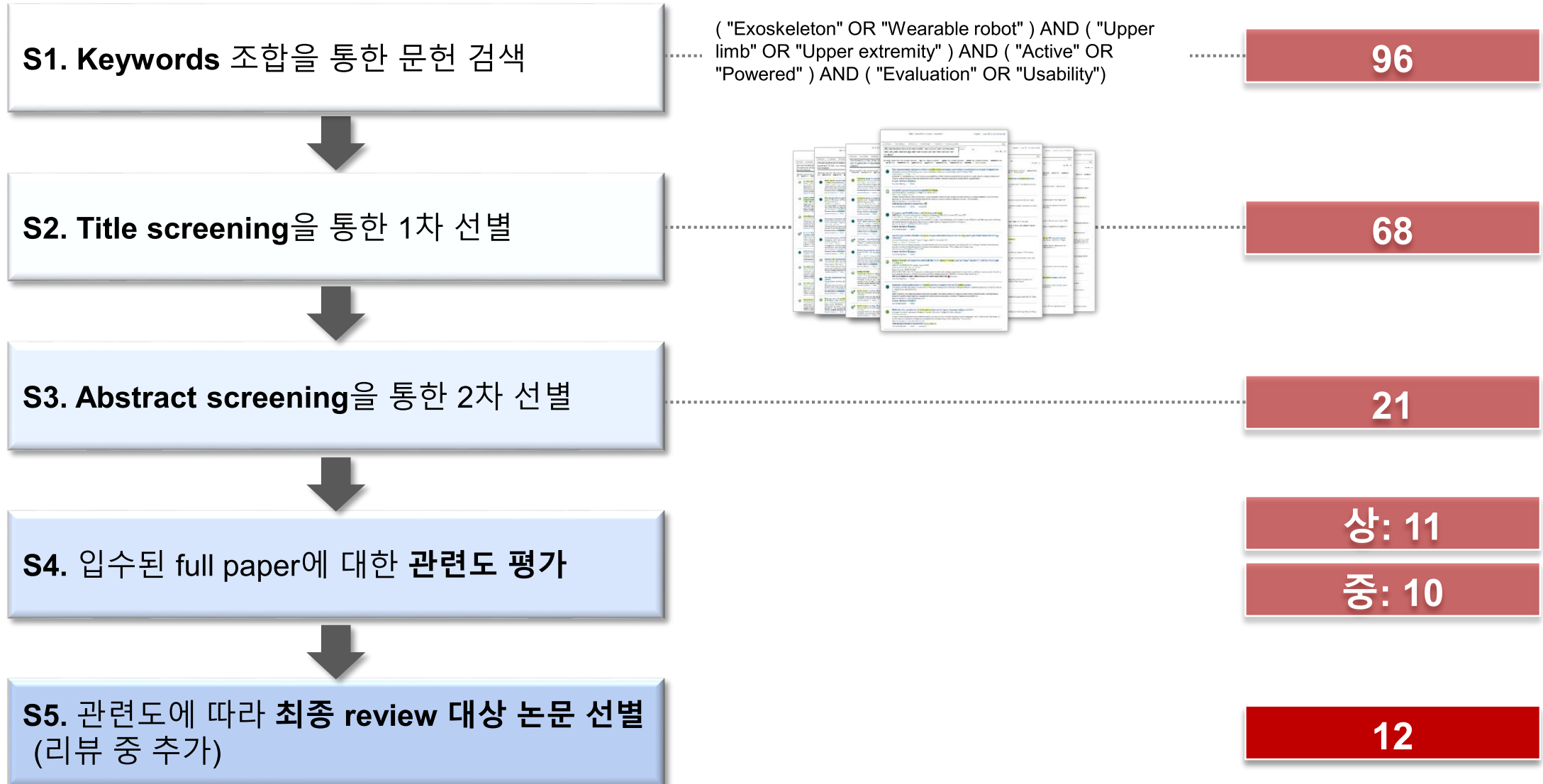
Search site: [scopus.com](https://www.scopus.com)



Literature search results




논문 선정 절차



논문 Review 요약

□ 논문 review를 통해 **실험 및 분석 protocol**과 **BSE의 객관적 및 주관적 평가 척도 파악**

Experimental protocol												Variables			Analysis protocol						
Participant					Recruitment criteria	Measurement area	Exoskeleton			Task		Independent	Dependent		EMG			ECG	Motion		Statistical analysis
n	Gender	Age	Height	Weight			Type of action	Company	Image	Motion	Time		Objective	Subjective	Sampling rate	Filtering	Sensor location	Filtering	Marker	Sampling rate	
12	- 11 male - 1 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb (lumbal)	Active	-		- Raise the arm to reach the target position - Hold the working position - Lowering the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) - Wearing exoskeleton (WE) - No load - Load (1.7kg drill)	- VO2 (respiratory frequency) - EMG (muscle activity) - ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)

No.	Author	Year	Experimental protocol										Variables			Analysis protocol								
			n	Gender	Age	Height	Weight	Recruitment criteria	Measurement area	Type of action	Company	Image	Motion	Time	Independent	Objective	Subjective	Sampling rate	Filtering	EMG	ECG	Marker	Motion	Statistical analysis
1	Wang et al.	2019	14	11 male 3 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb	Active	-		Raise the arm to reach the target position Hold the working position Lower the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) Wearing exoskeleton (WE) No load Load (1.7kg)	- VO2 (respiratory frequency) EMG (muscle activity) ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)
2	Wang et al.	2019	14	11 male 3 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb	Active	1.7kg load		Raise the arm to reach the target position Hold the working position Lower the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) Wearing exoskeleton (WE) No load Load (1.7kg)	- VO2 (respiratory frequency) EMG (muscle activity) ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)
3	Wang et al.	2019	14	11 male 3 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb	Active	1.7kg load		Raise the arm to reach the target position Hold the working position Lower the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) Wearing exoskeleton (WE) No load Load (1.7kg)	- VO2 (respiratory frequency) EMG (muscle activity) ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)
4	Wang et al.	2019	14	11 male 3 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb	Active	1.7kg load		Raise the arm to reach the target position Hold the working position Lower the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) Wearing exoskeleton (WE) No load Load (1.7kg)	- VO2 (respiratory frequency) EMG (muscle activity) ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)
5	Wang et al.	2019	14	11 male 3 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb	Active	1.7kg load		Raise the arm to reach the target position Hold the working position Lower the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) Wearing exoskeleton (WE) No load Load (1.7kg)	- VO2 (respiratory frequency) EMG (muscle activity) ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)
6	Wang et al.	2019	14	11 male 3 female	22-42 years (27.6 ± 5.53)	1.63-1.83m (1.76m ± 0.56m)	63-90kg (72.4 ± 8.16)	Right-handed	Upper-limb	Active	1.7kg load		Raise the arm to reach the target position Hold the working position Lower the arm to the resting or starting position	5s (3 states, total 15 seconds)	- Non exoskeleton (NE) Wearing exoskeleton (WE) No load Load (1.7kg)	- VO2 (respiratory frequency) EMG (muscle activity) ECG (heart rate variability)	-	1 kHz	band pass filter (20 Hz and 500 Hz)	Biceps, triceps brachii, pectoralis, rhomboids	high pass filter (0.004Hz)	-	-	Normality test (Shapiro-Wilk test)

외골격의 객관적 및 주관적 평가 척도

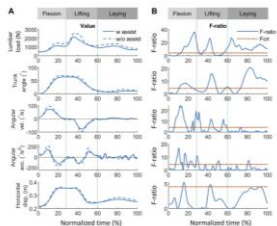
외골격 평가 척도

객관적 평가 척도

주관적 평가 척도

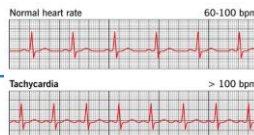
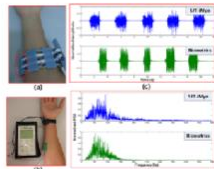
Physical

- Kinematic (displacement, speed, acceleration, ROM)
- Kinetic (force/moment/torque)



Physiological

- Heart rate variability (HRV)
- Metabolic energy
- Muscular activity



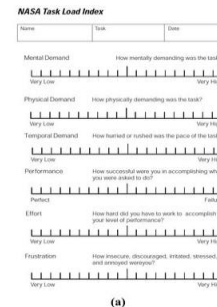
Task performance

- Task completion time
- Speed
- Accuracy



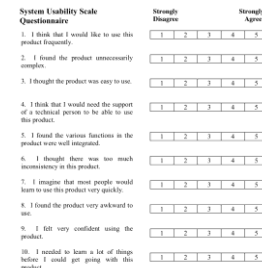
NASA-TLX

- Mental demand
- Physical demand
- Performance



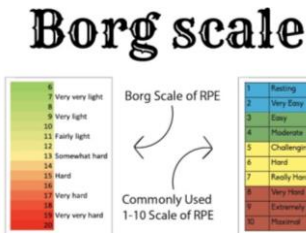
SUS

- Usability



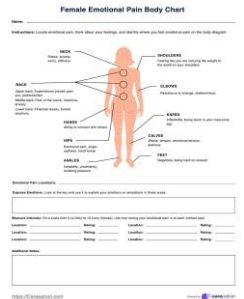
Borg scale (Borg-10, Borg-20)

- Perceived exertion



Body discomfort map

- Perceived discomfort



외골격 유효성 평가 실험 설계: Pilot Test ($n = 1$)

실험 개요

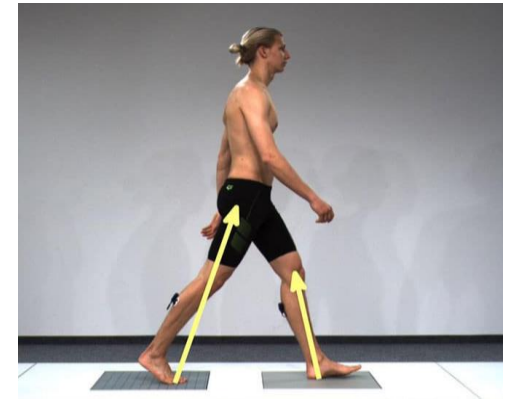
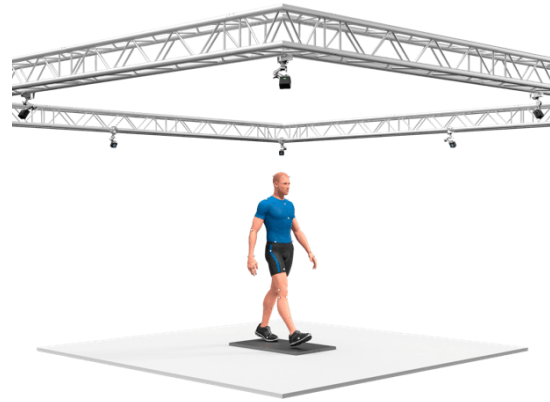
□ 목적: BSE의 **착용 여부**에 따른 **외골격 효과** 및 **사용성 평가**

□ 실험 참여자: **1명** (남자)

- ✓ 근골격계질환 병력 및 증상이 없고, 요구하는 신체적 작업을 수행하기에 심신이 건강한 자
- ✓ 실험에 사용되는 외골격에 대한 사전 착용 경험이 없는 자

□ 실험 장비

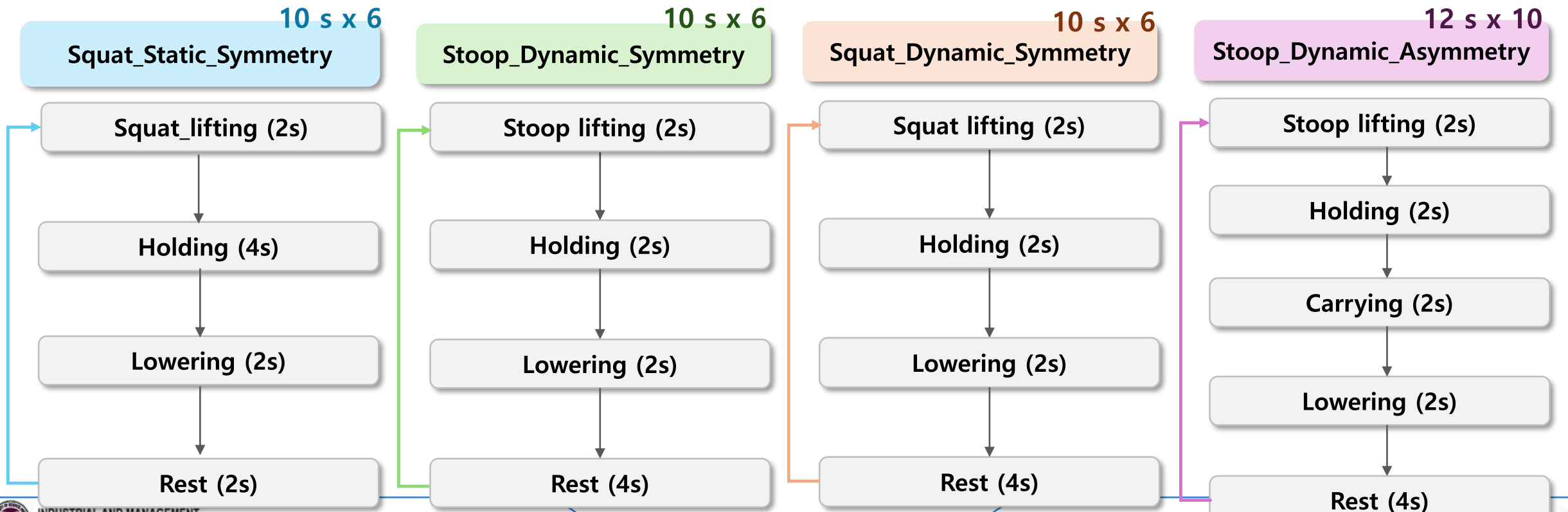
- ✓ 외골격: StepUp 4th back-supported exoskeleton (FRT Robotics, ROK)
- ✓ 근부하 측정: EMG sensor (Noraxon Telemetry, Noraxon, Inc., USA)
- ✓ 모션 캡처: Motion capture system (Optitrack, NaturalPoint, Inc., USA)
- ✓ 지면 반력 측정: Force plate (AMTI, USA)



실험 동작

□ 10kg 중량물을 총 4가지 **lifting 방법**으로 각 task에 대해 일정시간 **반복**하여 **수행**

- ✓ Exoskeleton 착용 여부: 미착용, 착용
- ✓ Belt 착용 여부: 미착용, 착용
- ✓ Lifting posture: Stoop, squat
- ✓ Dynamicity: Static, dynamic
- ✓ Trunk twisting: Symmetry, asymmetry



실험 동작 예시

Squat_Static_Symmetry



Stoop_Dynamic_Symmetry



Squat_Dynamic_Symmetry

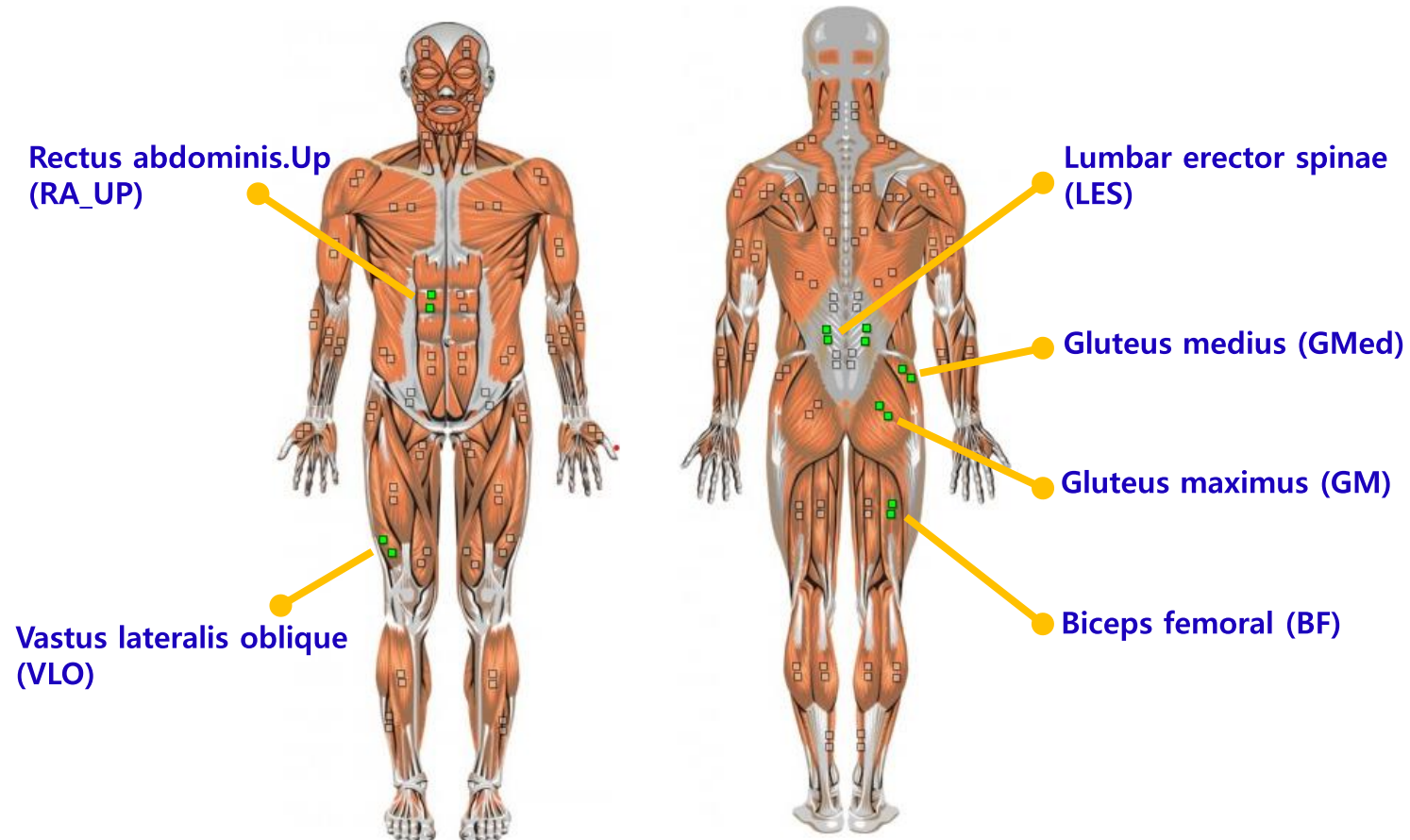


Stoop_Dynamic_Asymmetry



- EMG sensor를 **허리, 엉덩이, 허벅지 부위의 총 7개 부위**에 부착하여 **외골격 착용 여부**에 따른 **근부하도 변화 평가**

EMG 센서 부착 위치



주관적 평가 항목

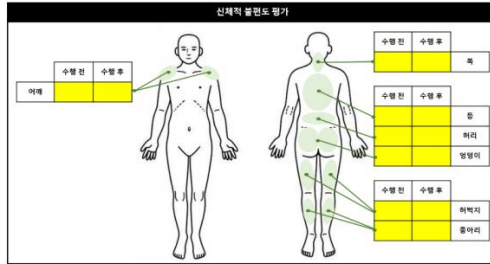
- ❑ **Body discomfort map**: 외골격 착용 전/후 경험한 각 부위에 대한 **신체적 불편도 평가**
- ❑ **NASA-TLX**: 외골격 착용 전/후 작업 수행 시 경험한 **작업 부하 정도 11점 척도로 평가**
- ❑ **Usability evaluation questionnaire**: 외골격 착용 시 경험한 **사용용이성, 유용성, 편의성을 7점 척도로 평가**

신체적 불편도 평가

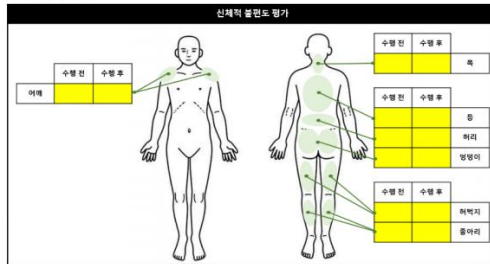
본 설문은 들기 작업 수행 전과 수행 후의 신체적 불편도를 평가하는 양식입니다. 제공된 평가 예시를 참조하시어, 각 부위의 불편 정도(0~10점)를 기입하여 주십시오.



- 외골격 착용 X



- 외골격 착용 O



정신적 작업부하 평가

본 설문은 들기 작업 시 정신적 부하를 평가하는 양식입니다.

표 1의 4가지 정신적 작업부하 항목에 대해 **작업부하 정도**를 평가(V) 주십시오.

표 1. 정신적 작업부하 평가 항목

No.	항목	정의
1	정신적 요구수준	작업 수행 시 지각적/인지적 활동(예: 관찰, 탐색, 사고, 의사 결정, 계산, 기억 등)이 요구되는 정도
2	신체적 요구수준	작업 수행 시 신체적 활동(조작, 기동, 힘 사용 등)이 요구되는 정도
3	노력 수준	작업 목표를 달성하기 위해 정신적 및 신체적으로 노력한 정도
4	좌절감 수준	작업을 수행하는 동안 불안, 낙담, 화남, 압박감, 좌절감 등의 부정적인 감정을 느낀 정도

No.	항목	극도로 낮음	매우 낮음	상당히 낮음	낮음	다소 낮음	보통	다소 높음	상당히 높음	매우 높음	극도로 높음	
1	정신적 요구수준	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	신체적 요구수준	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	노력수준	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	좌절감 수준	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Step-up 4th 장치 사용성 평가 설문지

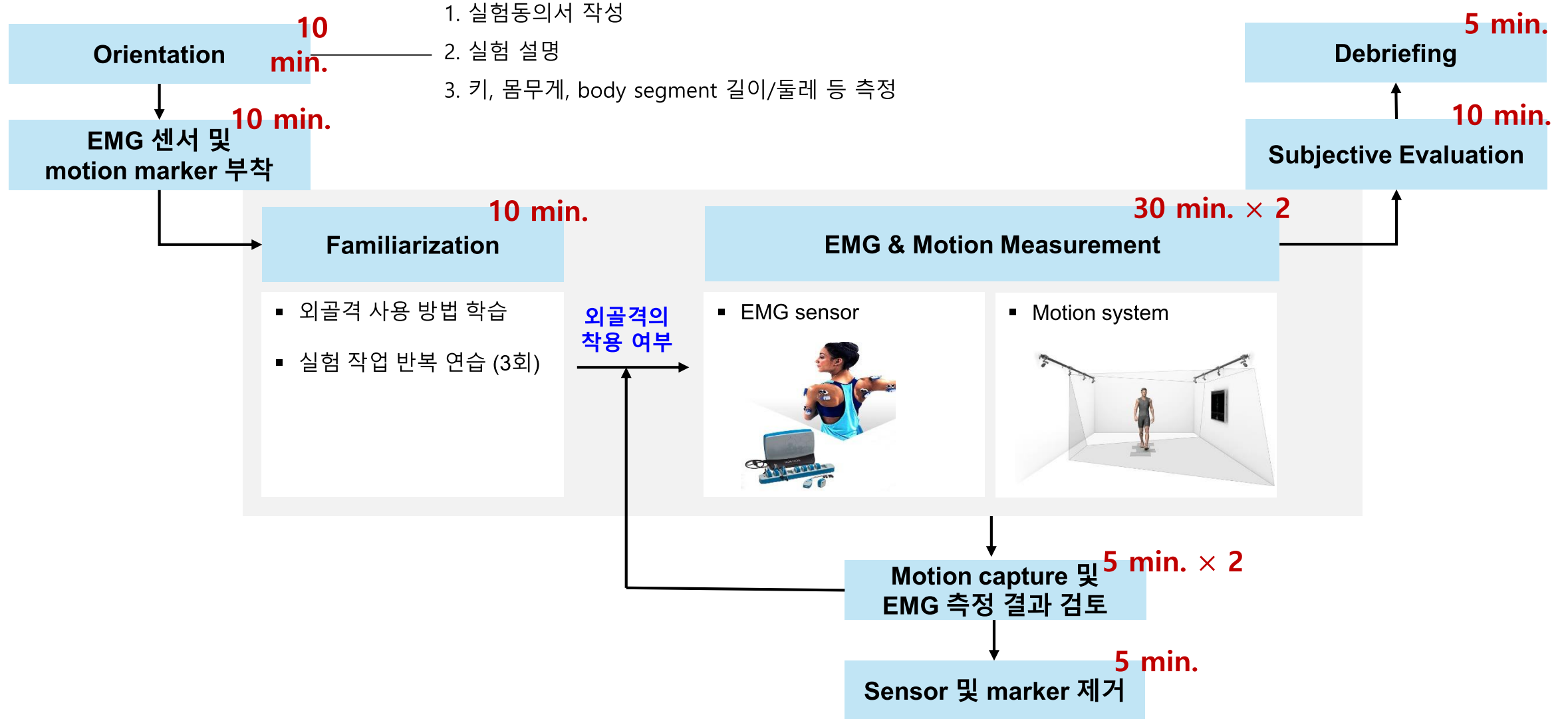
본 설문은 StepUp 4th 외골격 장치의 사용성을 평가하기 위한 양식입니다. 각 항목에 대해 7점 척도로 평가해 주시기 바랍니다.

사용용이성 (Perceived ease of use)		전혀 동의하지 않음	대체로 동의하지 않음	약간 동의하지 않음	중립	약간 동의함	대체로 동의함	전적으로 동의함
1	나는 외골격 장치를 사용하기 쉽다고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2	나는 외골격 장치가 불필요하게 복잡하지 않다고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
3	나는 외골격 장치의 사용 방법을 빠르게 배울 수 있을 것이라고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
4	나는 외골격 장치 사용이 직관적이라고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
5	나는 외골격 장치가 도움이 된다고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
6	나는 외골격 장치를 자주 사용하고 싶다고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

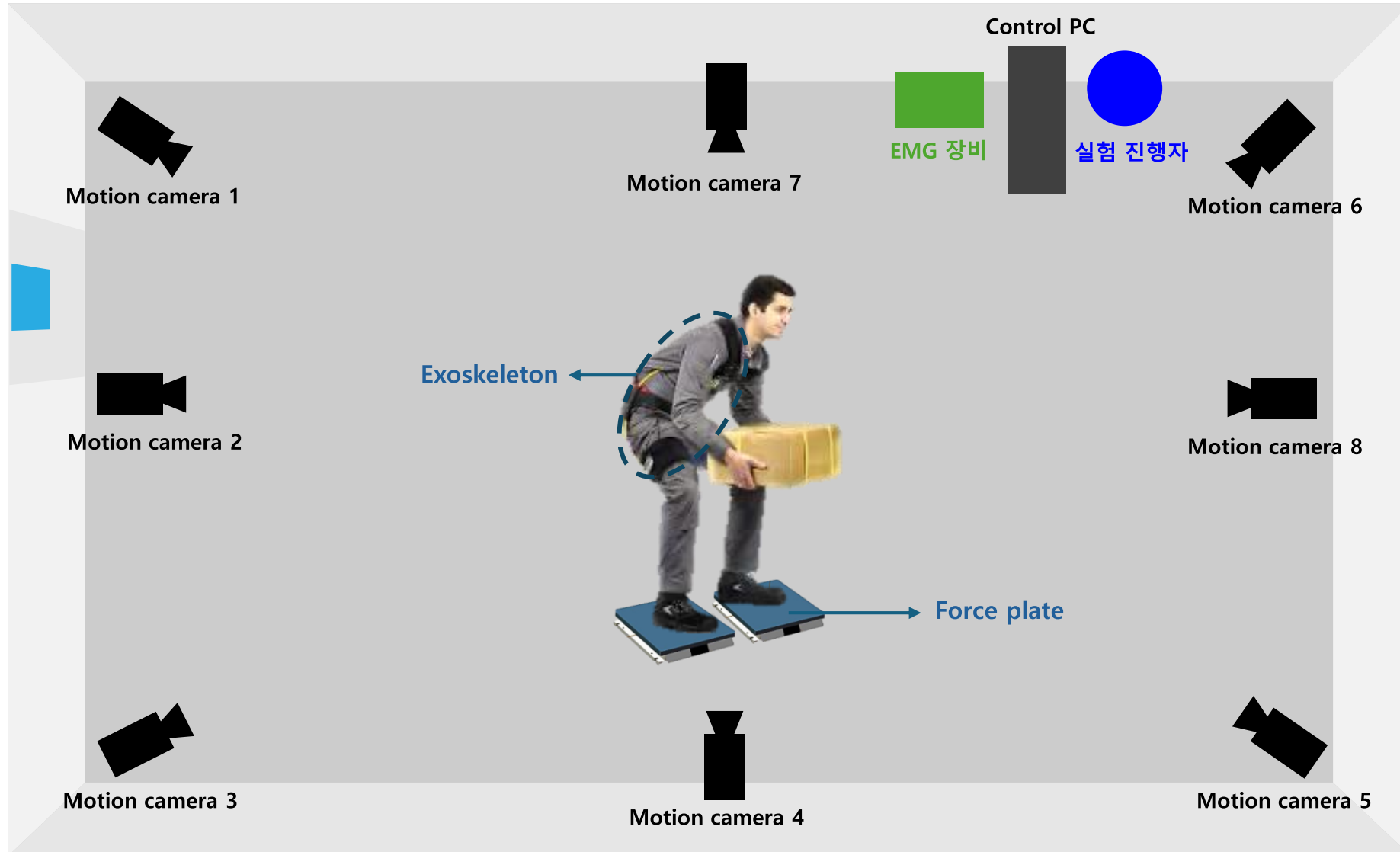
유용성 (Perceived usefulness)		전혀 동의하지 않음	대체로 동의하지 않음	약간 동의하지 않음	중립	약간 동의함	대체로 동의함	전적으로 동의함
1	나는 외골격 장치가 유용하다고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
2	나는 외골격 장치의 사용이 작업 수행도를 향상시켰다고 생각한다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
3	나는 외골격 장치를 사용하여 작업을 신속하게 완료할 수 있었다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
4	나는 외골격 장치를 사용하여 작업을 적은 힘을 사용하여 수행할 수 있었다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
5	나는 외골격 장치를 사용하여 작업을 정확하게 수행할 수 있었다.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

실험 Protocol

총 실험 시간: 120 min.



실험 환경



실험 결과



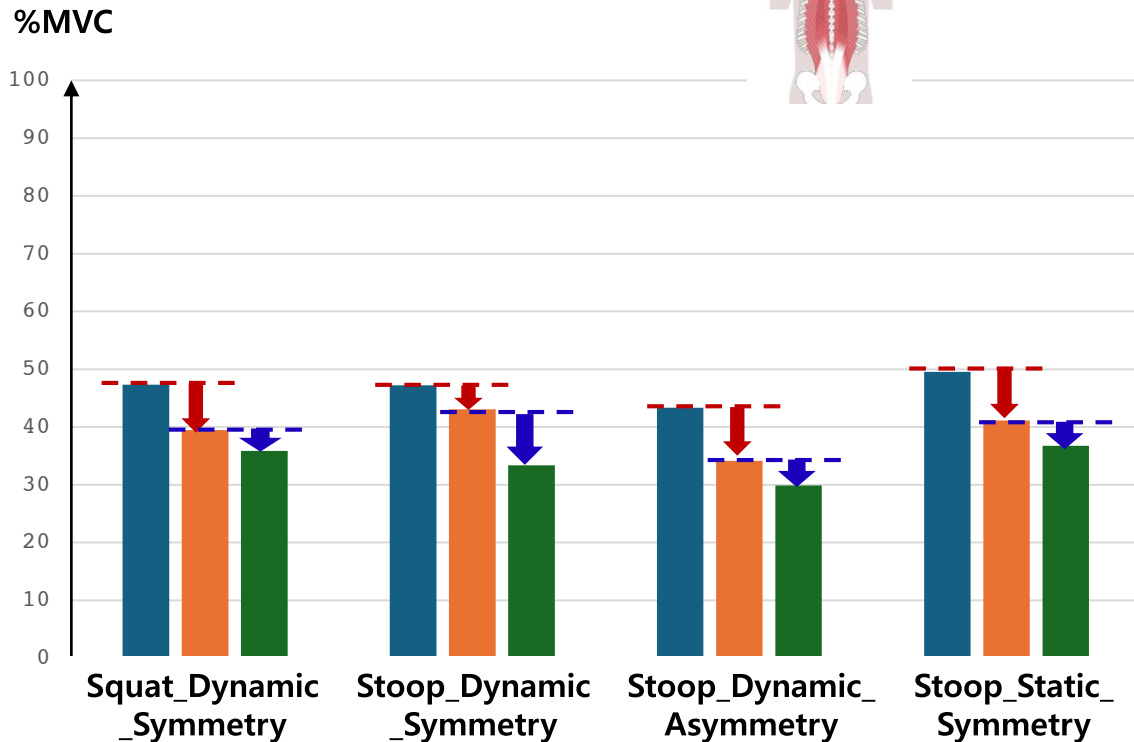
실험 결과: EMG (%MVC)

□ 외골격 착용 유무에 따른 **%MVC** 감소 측면에서 외골격의 유효성 분석

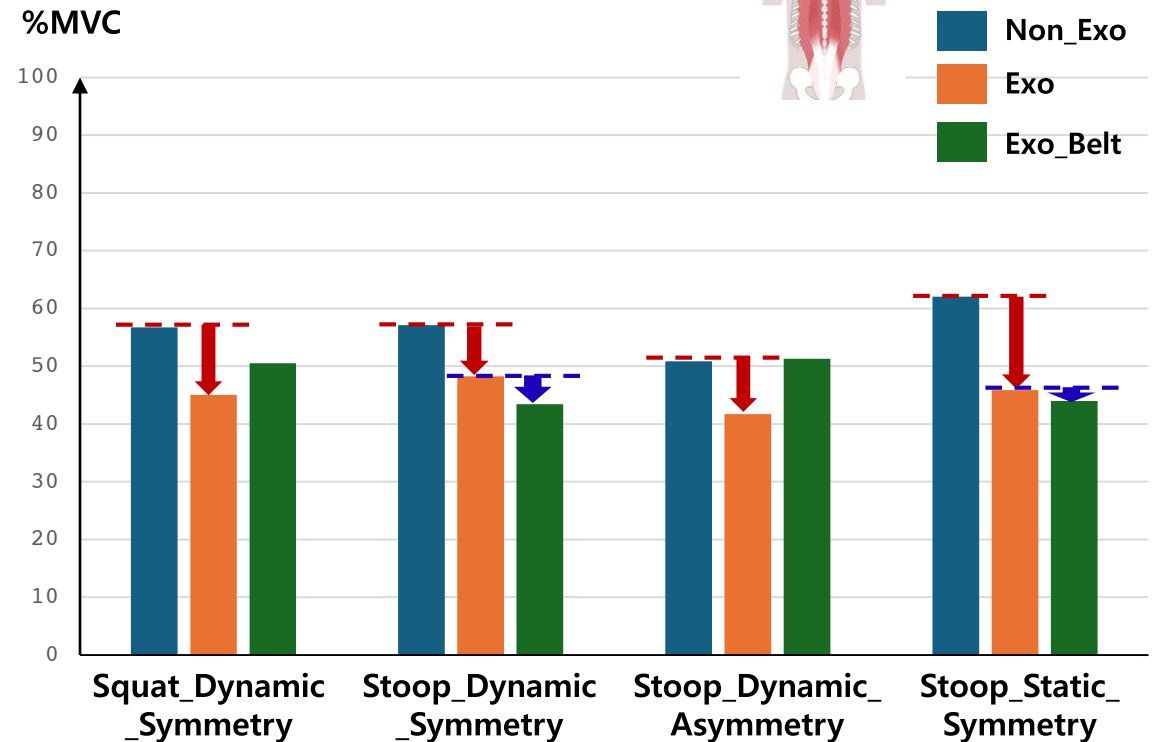
⇒ **외골격을 착용**하여 작업 수행 시, 외골격 미착용에 비해 **허리 근육의 근부하도 평균 18% ↓**

⇒ **외골격 벨트를 추가로 착용**하여 작업 수행 시, 외골격 벨트 미착용에 비해 **허리 근육의 근부하도 평균 4% ↓**

RT_Lumbar ES



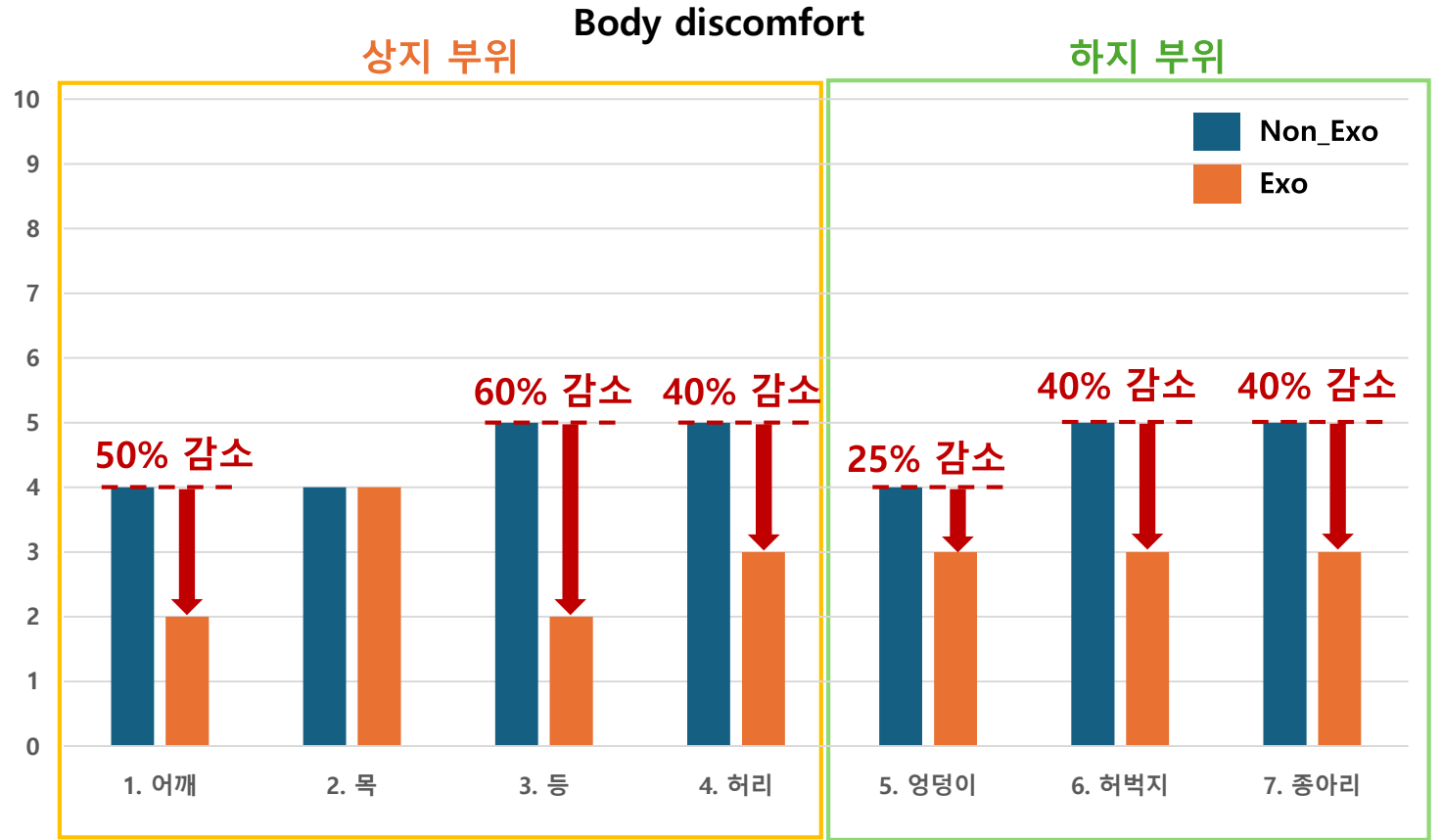
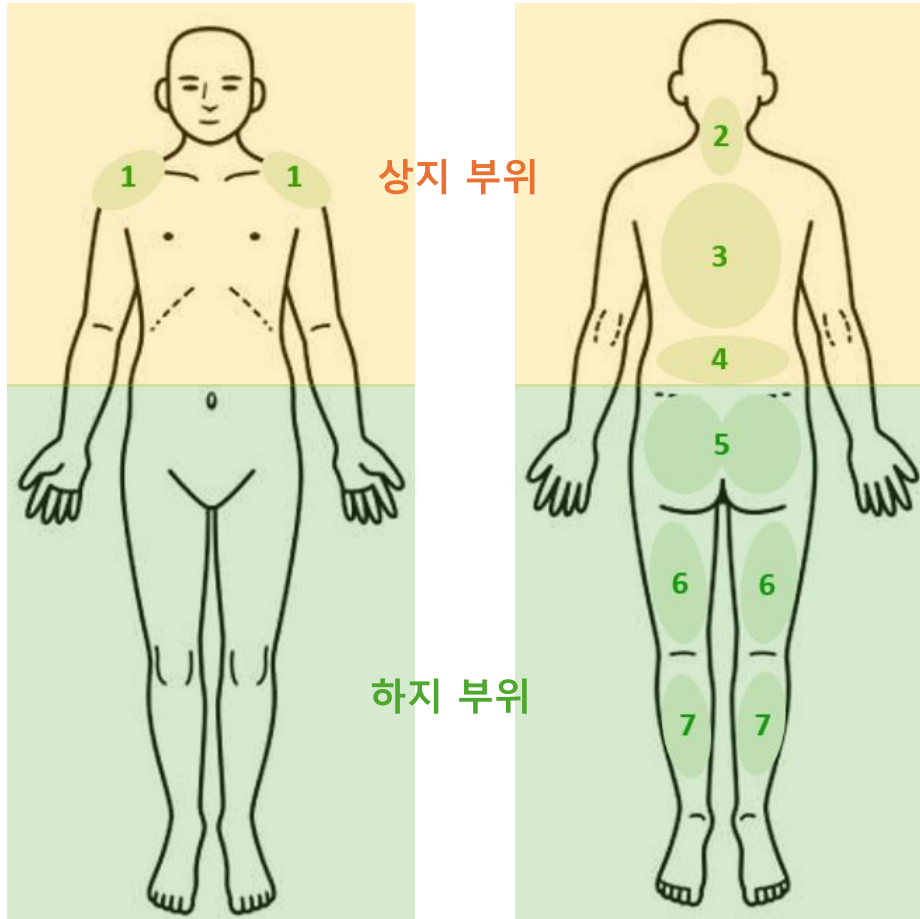
LT_Lumbar ES



실험 결과: 신체적 불편도

□ 외골격 착용 전/후 경험한 **각 부위**에 대한 **신체적 불편도**를 평가(0: 극도로 낮음, 10: 극도로 높음)

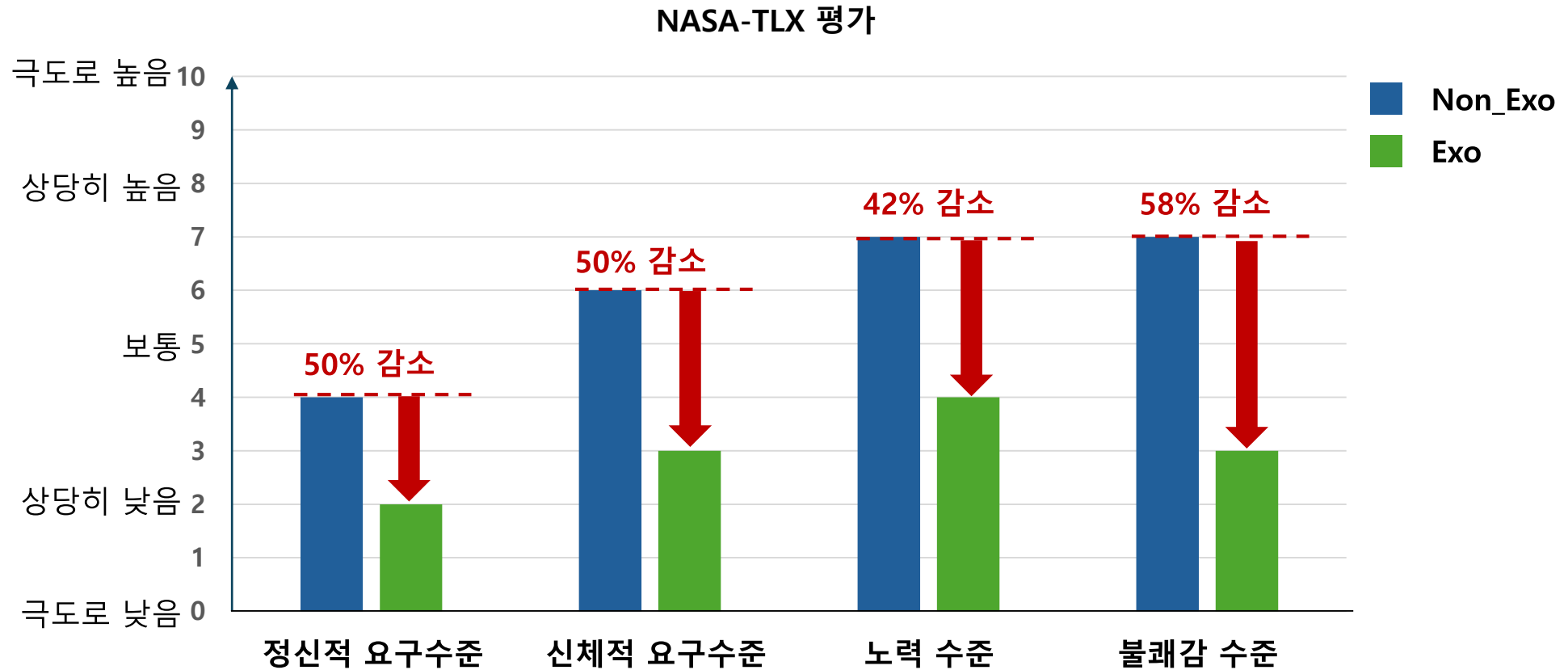
⇒ 외골격 착용 시 **상지 부위 신체적 불편도 50%**, **하지 부위 신체적 불편도 35%** ↓



실험 결과: 작업 부하

□ NASA-TLX를 활용하여 **정신적 및 신체적 요구 수준, 노력 및 불쾌감 수준**을 평가(0:극도로 낮음, 10: 극도로 높음)

⇒ 외골격 착용 시 **작업 부하** 평균 **50% ↓**



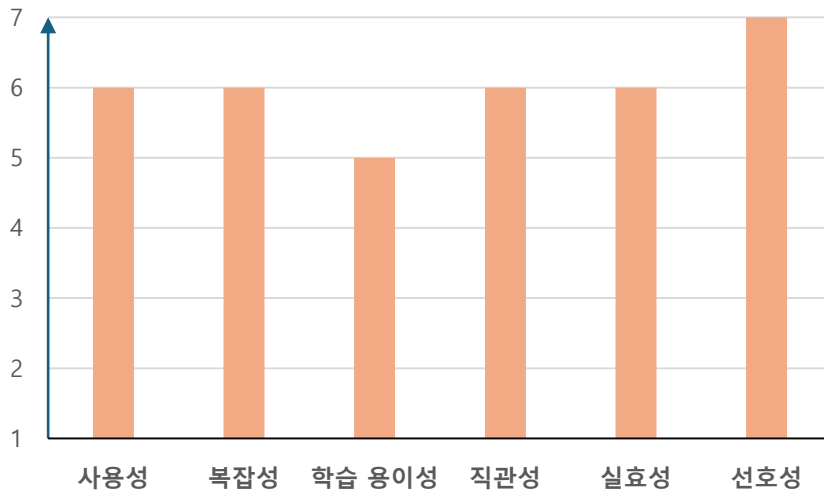
실험 결과: 외골격 사용성

□ 외골격 장치를 **사용용이성, 유용성, 편의성** 측면에서 **7점** 척도(1: 완전 반대, 4: 중립, 7: 완전 동의)로 평가

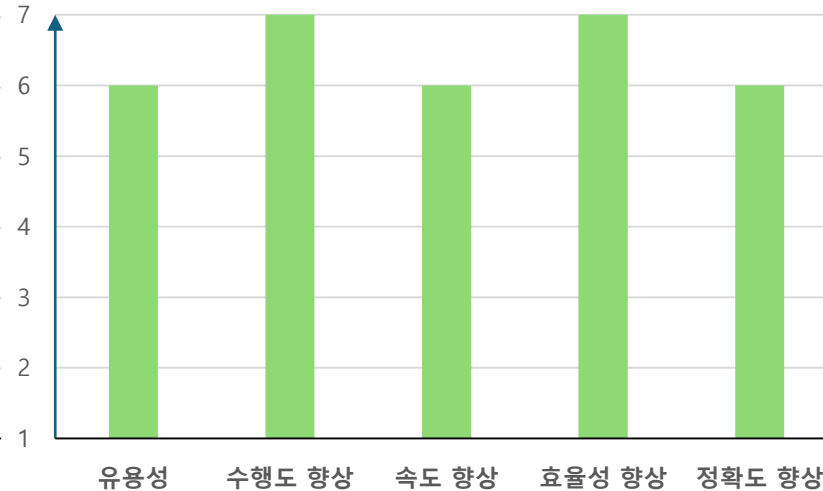
⇒ 외골격 장치는 **쉽게 사용할 수 있으며, 효율적인 작업 수행을 지원**

⇒ 외골격 착용이 긴장감 및 통증을 유발하지는 않지만, **착용 시 신체에 약간의 불편함을 유발**

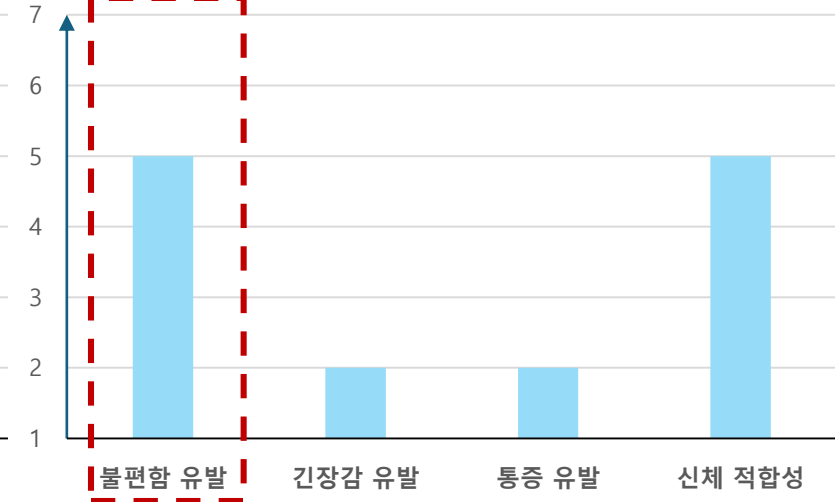
사용용이성



유용성



편의성

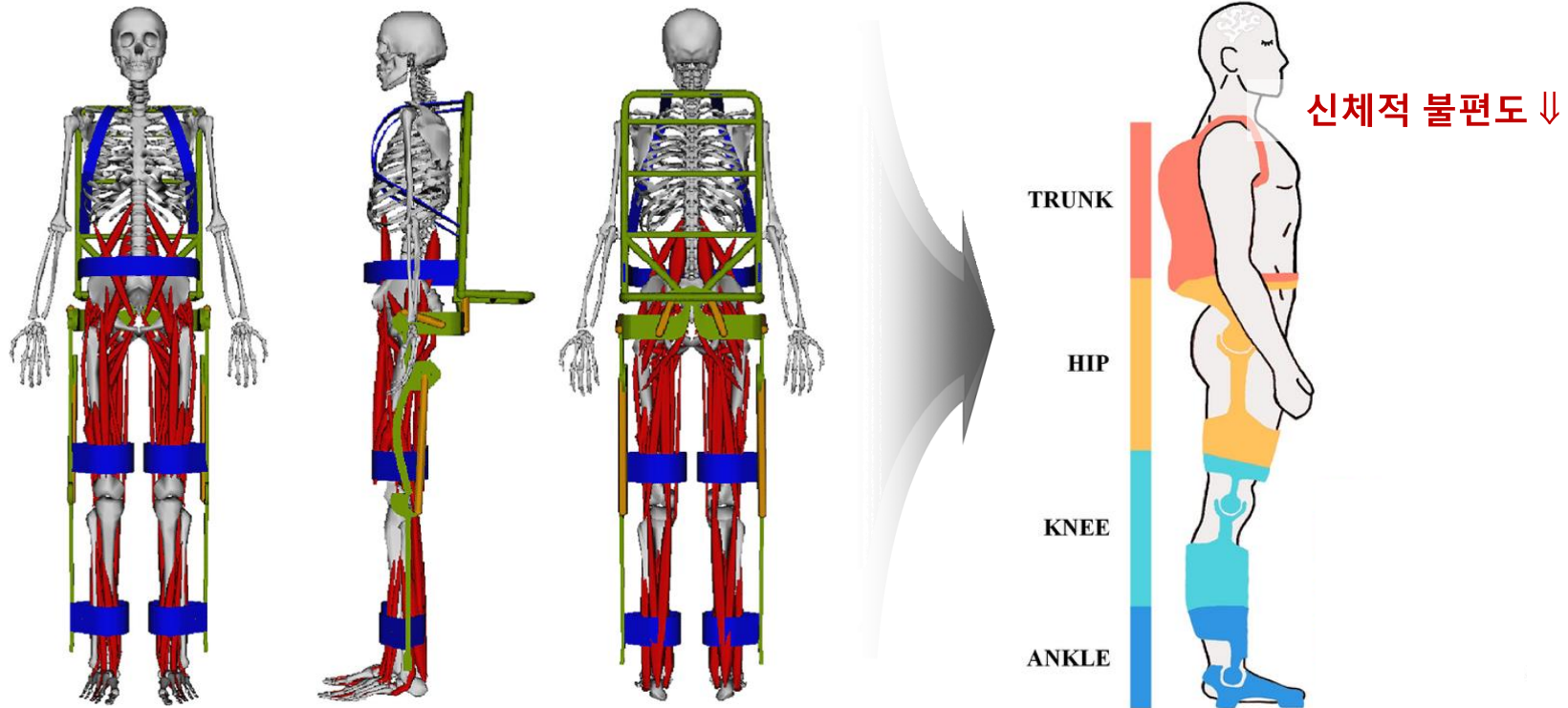


토의



연구 의의

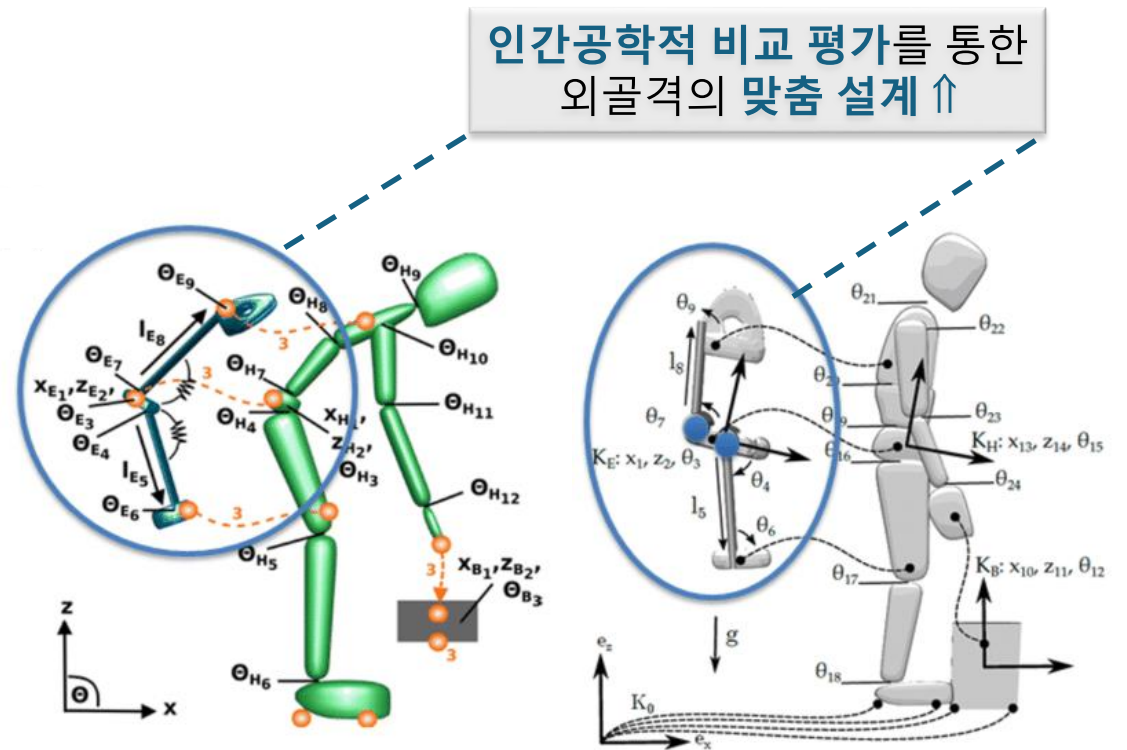
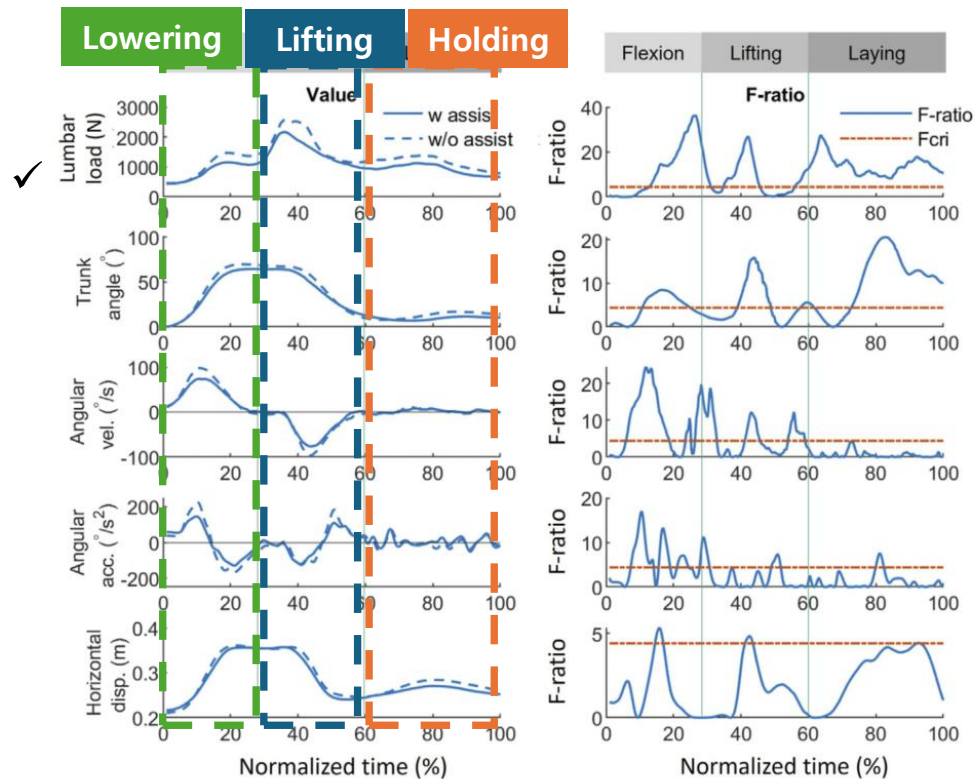
- 문헌조사 기반 **BSE 착용 효과**를 **인간공학적으로 평가**하는 **실험 프로토콜 정립**
 - **외골격을 착용**하여 **작업을 수행**하였을 때 **허리 근육의 평균 근부하도 ↓**
 - **주관적 작업 부하 정도 ↓, 작업 편의성 ↑**
- ⇒ 외골격 장치의 **유효성 확인** 및 착용시 장치가 **신체에 불편함 유발 파악**



(Zhou et al., 2020)

향후 연구 (1/2)

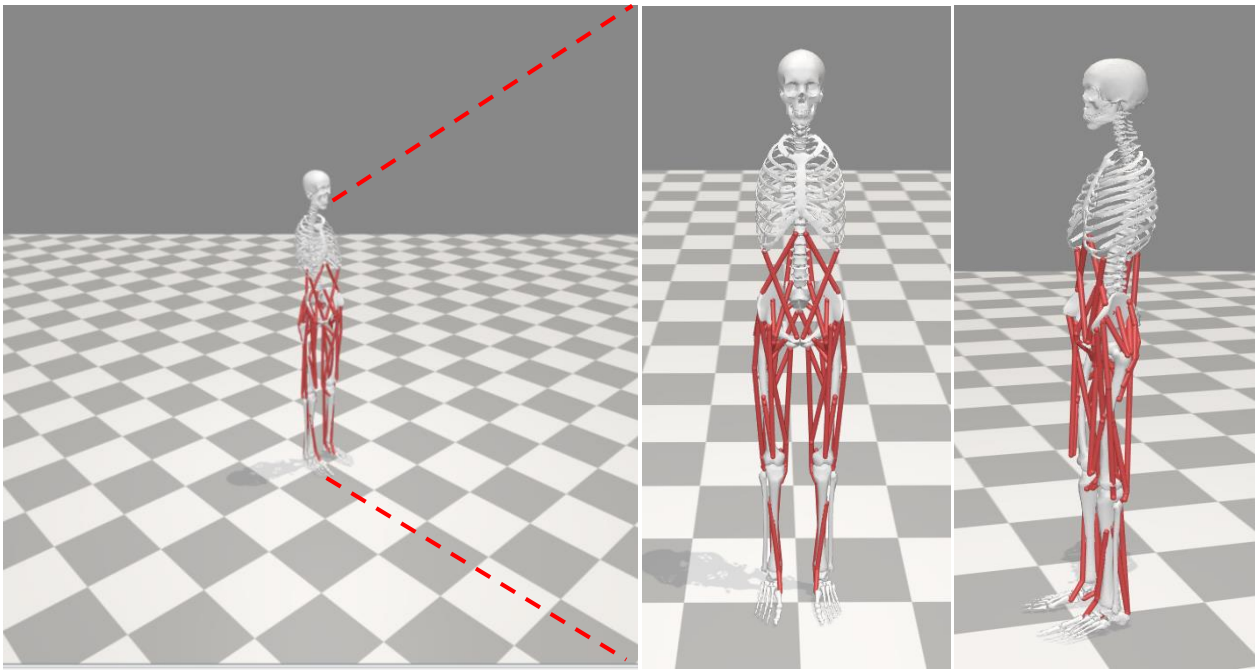
- Pilot test ($n=1$) 결과를 기반으로 **실험 프로토콜 수정 및 보완** \Rightarrow 이후 n 을 늘려 **통계적 유의성 확보**
- **Cycle** 및 **task**(lowering, lifting, holding 등)에 따른 **근부하도를 분석** \Rightarrow **BSE의 지지효과를 심층적으로 분석**
- 기존 연구는 **단일 외골격의 평가에 초점**을 맞추기 때문에 **다양한 외골격 간 체계적인 비교 부족**
- \Rightarrow **수동형 및 능동형 외골격의 기능 및 설계특성의 차이**에 따른 **인간공학적 비교 평가 및 설계 개선방향 제안**



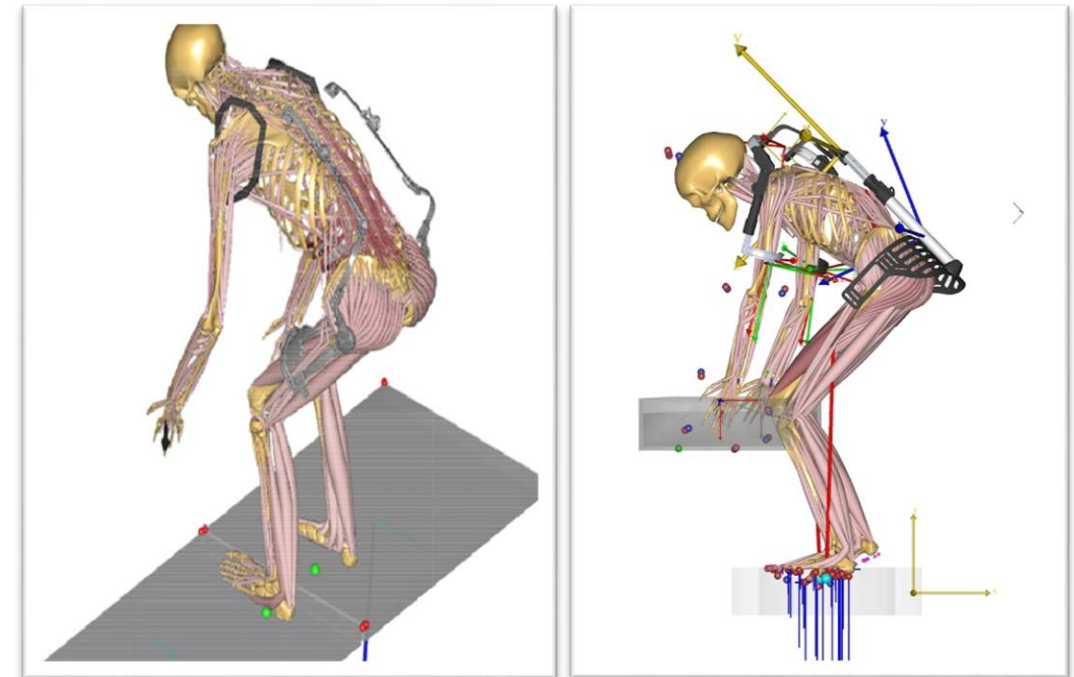
향후 연구 (2/2)

- ❑ **OpenSim** 기반 동적 시뮬레이션을 통해 외골격의 설계 유효성 추정 및 실험 결과 검증
- ❑ 근육, 관절, 뼈의 상호작용을 시뮬레이션을 통해 외골격과 근골격계 모델 간 상호작용 개발 및 분석
- ❑ 개인 생체역학적 특성 분석을 통한 맞춤형 외골격 설계 방향 제안

OpenSim software



Lifting 자세에 대한 OpenSim simulation 예시



**Thank you
for paying your attention!**

