



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

인간공학적 평가도구를 이용한
시설원예용 작업기계 개발 및 검증

Development and Evaluation of a Greenhouse Harvesting Equipment
using Ergonomic Methods and Bio-signal Analysis

2018년 2월

서울대학교 대학원

바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공

정은성

공학석사 학위논문

인간공학적 평가도구를 이용한
시설원예용 작업기계 개발 및 검증

Development and Evaluation of a Greenhouse Harvesting Equipment
using Ergonomic Methods and Bio-signal Analysis

2018년 2월

서울대학교 대학원

바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공

정은성

인간공학적 평가도구를 이용한
시설원예용 작업기계 개발 및 검증

지도 교수 조 성 인

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 2월

서울대학교 대학원

바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공

정 은 성

정은성의 공학석사 학위 논문을 승인함.

2018년 2월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

인간공학적 평가도구를 이용한 시설원예용 작업기계 개발 및 검증

국문 초록

인간공학적 작업 평가는 산업 현장에서 수행되는 작업 동작이나 절차를 산업 안전·보건 측면에서 분석하고 평가하여 안전 사고와 근골격계 질환 발생 가능성을 줄이고 작업 효율을 향상할 수 있도록 작업 절차를 개선하는 목적으로 사용된다. 작업 자세 분류에 따라 위험도를 평가하는 체크리스트형 평가 도구(OWAS, RULA, REBA 등)는 관리자가 관찰을 통해 쉽게 위험 동작이나 자세를 분류할 수 있도록 고안되었다. 생리적 생체신호인 근전도, 분당심박수는 신체 활동이 활발해질수록 증가하는 특성이 있어 작업 부담 평가에 적합한 지표라고 할 수 있다.

토마토, 파프리카 온실 내 충격원에 대한 조사 결과, 일련의 수확 작업 중 무거운 상자를 드는 동작이 포함된 교대 작업은 과실에 4 ~ 6 g 에 해당하는 충격을 주어 신선도를 하락시킬 뿐 만 아니라 OWAS 위험 수준 4 에 해당하여 작업자의 신체에 과중한 부하를 가해 근골격계 질환을 유발할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH)과 국제노동기구(ILO)가 발행한 농업에 대한 인간공학적 지침에 따라 허리를

구부리는 작업을 제거하고 사용자 신체에 맞는 작업 높이를 설정할 수 있으며 무거운 물건을 드는 절차를 개선할 수 있는 자동 교대장치를 포함한 새로운 시설원예용 작업편이장비를 개발하였다.

실제 시설원에 농업 현장에서 개발된 장비를 사용하였을 때 의도된 효과를 기대할 수 있는지 검증하기 위하여 실험실 내 모의수확환경을 구성하였다. 기존 장비와 개발된 장비에 대해 각각 모의 수확 동작을 실시하였고, 근전도, 분당심박수, 주관적 작업강도를 측정하였다. 모의 동작에 대한 영상을 촬영하여 체크리스트형 작업 자세 평가에 이용하였다. 모의 동작이 종료된 후, 피실험자의 심박수와 신체 출력에 대한 관계 모델을 얻기 위해 싸이클 에르고미터를 이용한 운동 평가가 실시되었다.

생리적 생체신호에 해당하는 분당심박수의 평균 및 최대치는 기존 장비를 이용한 작업에 비해 개발된 장비를 이용한 작업에서 유의미한 수준($p < 0.05$)으로 낮아졌다. 근전도 평균값 및 IEMG 수치의 경우에는 상부 승모근을 제외한 모든 근육에서 개발된 장비를 이용한 작업이 유의미한 수준($p < 0.05$)으로 근육 부담이 줄어든 것을 나타냈다. 주관적 작업강도의 경우, 기존에 비해 개발된 장비를 통한 작업의 주관적 강도가 36.92 % 감소하였다.

운동 평가를 통해 얻은 심박수와 신체출력 데이터를 회귀분석하여 모델식을 구하고, 각 작업의 평균 심박수를 이용하여 추정 일률(W)을 산출하였다. 각 작업 방식 간 추정 일률이 유의한 차이($p < 0.05$)를 보였고, 기존 방식에 비해

개발된 장비를 이용한 방식의 경우 일률이 2.57% 감소한 것으로 나타났다. 피실험자의 심박수-신체 출력 회귀모델을 이용하면 작업에 대한 추정 일률을 산출하여 에너지 효율 측면에서 작업을 평가할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

촬영된 작업 방식 별 영상을 1 초 간격으로 샘플링하고 체크리스트형 평가를 수행한 결과, 기존방식의 작업은 OWAS, RULA, REBA 에서 모두 위험 수준의 작업이 포함된 것으로 나타났다. 마찬가지로 평가한 개발된 장비를 이용한 방식의 작업에서는 OWAS, RULA, REBA 에서 모두 위험 수준의 작업이 제거된 것으로 나타났다. 영상을 바탕으로 작업의 소요시간을 측정하여 분석한 결과, 기존 방법에 비해 개발된 장비를 이용한 작업의 소요시간이 23.3 % 단축된 것으로 나타났다.

본 연구의 결과를 종합하여 판단하였을 때, 개발된 온실용 작업편이장비는 작업자의 신체 부담을 저감하고 수확 작업 효율을 향상하는 것으로 볼 수 있으며, 근골격계 질환 예방과 과실의 신선도 보존의 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

주요어: 인간공학적 평가, 온실, 레일 작업차, 근전도, 싸이클 에르고미터

Keywords: Ergonomic evaluation, Greenhouse, Rail trolley, Electromyogram, Cycling ergometer

학번: 2014-20060

국문 초록	I
List of Figures	IV
List of Tables	VI
1 서론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구의 목적	5
2 연구사	6
3 이론적 배경	9
3.1 체크리스트형 인간공학적 평가도구	9
3.1.1 OWAS	9
3.1.2 RULA	14
3.1.3 REBA	16
3.1.4 작업 샘플링	16
3.2 근전도 분석	18
3.3 운동 평가	23
4 시설원예용 작업기계 설계	25
4.1 재료 및 방법	25
4.2 결과 및 고찰	26
4.3 작업기계 설계	28
5 재료 및 방법	35
5.1 피실험자 및 실험장비	35

5.2	작업동작 교육	38
5.3	실험실 내 모의 수확환경 구성	39
5.4	생리학적 데이터 취득	41
5.4.1	분당심박수 측정	41
5.4.2	근전도 측정	41
5.4.3	근전도 결측치 처리	42
5.4.4	주관적 작업강도 측정	42
5.5	물리적 데이터 취득	46
5.6	인간공학적 작업평가	47
6	결과 및 고찰	48
6.1	생리학적 데이터	48
6.1.1	분당심박수 분석	48
6.1.2	주관적 작업강도 분석	49
6.1.3	근전도 분석	50
6.2	물리적 데이터	55
6.2.1	일률-분당심박수 회귀분석	55
6.2.2	물리적 작업 강도 평가	56
6.3	인간공학적 작업평가 결과	57
6.3.1	OWAS	57
6.3.2	RULA	58
6.3.3	REBA	60
6.4	작업 효율	62

7	요약 및 결론	63
8	참고 문헌	66
	Abstract	72

List of Figures

Figure 1. OWAS 작업자세 분류체계	11
Figure 2. RULA SYSTEM	14
Figure 3. RULA의 최종 점수에 따른 조치단계	15
Figure 4. REBA 평가 절차	17
Figure 5. 근전도 (EMG) 신호	19
Figure 6. 근육 세포의 탈분극과 재분극 사이클	19
Figure 7. Bipolar electrode	20
Figure 8. Normalized EMG 신호 세기와 힘의 관계	21
Figure 9. 정적 근수축 실험의 근피로도	22
Figure 10. 심박수(bpm)와 신체 출력(W)의 관계 도표	23
Figure 11. 실시간 충격원 모니터링 시스템	26
Figure 12. 가속도계를 통해 취득한 충격 데이터	27
Figure 13. 기존 온실 내 수확용 작업차	28
Figure 14. 온실 내 작업편이장비의 1차 3D 모델링	31
Figure 15. 자동교대장치의 상세도면	32
Figure 16. 수확하는 모습과 상자를 하역하는 모습	33
Figure 17. 피험자 촬영 및 생체신호 수집 시스템 구성	37
Figure 18. 운동평가용 싸이클 에르고미터 구성	38
Figure 19. 모의환경 구성 모식도	40

Figure 20. 모형 과실과 장비 목업으로 이루어진 모의환경 구성	40
Figure 21. 표면 근전도 전극 부착 위치.....	43
Figure 22. 개발된 장비 모형을 이용한 수확작업 세션	44
Figure 23. 기존 방식의 수확작업 세션	45
Figure 24. 싸이클 에르고미터를 이용한 심박수-일률 측정	47
Figure 25. 세션 별 평균심박수, 최대심박수, 심박증가율	49
Figure 26. 근육 별 평균 근전도 신호.....	51
Figure 27. 근육 별 IEMG	53
Figure 28. GoldenCheetah를 이용하여 얻은 Hr-Pw 선형회귀식	55
Figure 29. 작업 방법 별 OWAS 위험수준	58
Figure 30. 작업 방법 별 RULA 점수.....	59
Figure 31. 작업 방법 별 REBA 점수	61

List of Tables

Table 1. 근골격계에 미치는 영향에 따른 작업자세 수준.....	12
Table 2. OWAS 코드에 대한 작업자세 수준.....	13
Table 3. RULA의 점수표	15
Table 4. 작업 동작 별 OWAS 위험 수준 비율	27
Table 5. 각 작업 방법 별 분당심박수 분석 결과	48
Table 6. 분당심박수 대응표본 검정 결과	49
Table 7. 각 작업 방법 별 주관적 작업강도 분석 결과	50
Table 8. 주관적 작업강도 대응표본 검정 결과	50
Table 9. 근육 별 평균 근전도신호 분석 결과	52
Table 10. 평균 근전도신호 대응표본 검정 결과	52
Table 11. 근육 별 IEMG 분석 결과	54
Table 12. 근육 별 IEMG의 대응표본 검정 결과	54
Table 13. Hr-Pw 선형회귀식을 이용한 추정 일률의 분석	56
Table 14. OWAS 체크리스트 평가 위험수준 비율.....	58
Table 15. RULA 체크리스트 평가 위험수준 비율	59
Table 16. REBA 체크리스트 평가 위험수준 비율	61
Table 17. 작업 소요시간 분석 결과	62

1 서론

1.1 연구의 필요성

산업이 고도화되고 산업 전반의 기계화, 자동화가 이루어졌지만 모든 인력이 기계로 대체된 것은 아니다. 대량 생산 품목의 경우, 생산 절차를 정형화하여 자동화 기계 및 로봇으로 생산하는 반면, 작업 절차의 비정형성, 비연속성 등으로 인해 자동화 기계의 도입이 어려운 소량 품목, 소규모 산업의 경우에는 여전히 많은 인력이 투입되고 있다. 인력이 투입되는 현장에서는 비효율적이거나 신체의 손상을 초래하는 작업 동작 등으로 크고 작은 산업재해가 발생할 수 있고, 이로 인해 개인과 기업의 생산성이 감소하고 생산비가 증가하게 된다. 산업재해에 대한 인식이 증대되고 작업환경의 개선이 요구되면서 작업자의 안전과 건강, 작업편의성, 작업효율에 대한 인간공학적 연구가 활발히 이루어지게 되었다 (van Wely, P., 1970, 김흥기, 1997).

작업자가 산업 현장에서 과도한 동작을 취하거나 적절치 못한 디자인의 장비를 사용할 때, 근골격계 질환 (Musculoskeletal Disorders, MSDs) 의 발병 가능성이 높다 (van Wely, P., 1970). MSDs 발병 사례 보고가 증가하면서 작업자가 취하는 작업 동작이 신체에 과도한 부담을 주어 근골격계 질환의 유발 가능성이 있는지를 평가하기 위해 인간공학적 평가 도구가 개발되었다. RULA, REBA 등의 checklist 형태의 도구를 이용하여 사업장 내

작업 동작을 간편하게 평가하고 신체 부담 정도를 추정하여 개선하거나 훈련을 통해 질병을 예방할 수 있다 (McAtamney, L. & Corlett, E.N., 1993, Hignett, S. & McAtamney, L., 2000). 국내에서도 한국산업안전보건공단에서 발행한 “근골격계부담작업 유해요인조사 지침” 등 인간공학적 평가 지침이 있다 (한국산업안전보건공단, 2016).

국제노동기구 (International Labour Office, ILO) (2013) 에 따르면 농업 인구가 세계 인력의 절반을 차지하고 가장 위험한 직업군 중 하나에 해당하는 것으로 나타나 농업 부문의 재해 방지에 대한 논의가 절실하다. 트랙터나 수확기 등의 농업기계, 농약이나 비료 등의 화학물 등으로 인해 매해 17만 명이 사망하며, 이는 다른 산업부문의 두 배에 이르는 수치이다. 또한 높은 노동 강도에 의해 신체에 과도한 부하가 반복적으로 발생할 때 신체조직이 손상되어 나타나는 근골격계 질환 (MSDs) 의 발생이 상당히 높은 수치로 나타났는데, MSDs는 작업자의 신체적 능력 손실이나 작업 시간 손실, 생산비용의 증가 등을 야기하기 때문에 농작업자의 MSDs 발생을 완화하기 위한 인간공학적 접근이 요구되고 있다 (Hagberg, M., 1995, McCurdy, S.A., 2003, Meyers, J.M., 1997, Kirkhorn, S.R., 2010). 국내의 경우에도 마찬가지로, 통계조사 결과에 의하면 농업 분야 (농업, 임업, 어업) 의 재해율이 광업을 제외한 산업 분야에서 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만 5인 미만의 소규모 영세 농가 비율이 높고 농촌지역의 고령화 등으로 인해 인간공학적 평가 및 사업장 개선의 인식의 어려운 측면이 있다고 볼

수 있다 (고용노동부, 2016). Fathallah (2010) 는 근골격계 질환이 자주 보고되는 농업 업종으로 곡물류, 채소류, 과채류, 시설원예, 신선편이농산물 등이 있으며, 주로 무거운 것을 들거나 내려놓는 동작, 허리를 구부리는 동작, 반복적인 동작이 근골격계 질환의 유발 가능성이 높은 동작으로 나타났다 고 하였다. 농작업의 경우, 여러 동작이 복합된 작업 절차로 인해 기존의 checklist 형태의 평가 도구를 적용하기 어렵고 농업 관련 증후군에 해당하는 질병의 기준이 확립되지 않아 세부 작업 별 평가를 위한 인간공학적 도구 개발과 명확한 직업 관련 질환의 정의가 필요하다 (이경숙, 2010).

이러한 필요성에 의해 생리 신호 측정을 통해 신체 부담을 정량적으로 측정하기 위한 다양한 연구가 이루어졌다. Jorna (1992) 는 스펙트럼 분석을 통해 심박수와 작업 부하 인지 간의 관계를 구명하였고, Hankins 등 (1998) 은 심박과 안구 운동, 뇌파의 측정을 통해 조종사의 작업 부하 인지의 정량화에 대한 연구를 수행하였다. Rissen 등 (2000) 은 표면 근전도 (surface trapezius electromyography, sEMG), 심박수, 혈압 등의 생체 신호 수집을 통해 여성 근로자가 반복 작업을 할 때 발생하는 신체적·정신적 스트레스와 근골격계 질환 유발 가능성의 관계를 조사하였다. 표면 근전도 (sEMG) 검사를 통해 근육에서 발생하는 미세전류를 측정하여 근활성도, 근피로도 등을 추정할 수 있고, 특정 동작을 취할 때 사용하는 근육의 정량적 정보를 해석함으로써 해당 동작의 위험성을 판단하는 도구로 활용할 수 있다.

한편, 국내 토마토, 파프리카 등의 시설 재배는 신선편이농산물의 수요가 늘어남에 따라 꾸준히 증가하는 추세이며, 시설과 작물을 체계적으로 관리할 수 있는 자동 제어 시스템이 보급되고, 늘어나는 수확량을 효과적으로 처리할 수 있도록 레일 시설과 전동 작업 차량 등이 동원되고 있다 (통계청, 2016). 하지만 이러한 재배 시설의 장비 도입은 생산량을 늘리기 위한 작업 절차의 측면에 치우쳐진 경우가 많고, 과실이 가득 담긴 상자 등 중량물을 드는 동작이나 수확 작업 등의 반복 동작이 주된 작업 내용임에도 불구하고 재배 시설 작업자의 작업 부하 평가 연구나 인간공학적 설계가 반영된 재배 시설 농기계 개발 연구는 매우 부족하다. 토마토 시설 재배의 경우 과실의 무게가 무겁고 노동 집약적인 특징이 있는 만큼 농작업 부담 평가 및 인간공학적 작업 기계 설계의 필요성이 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 토마토, 파프리카 온실 내 과실 수확으로부터 선별장으로 운반하는 과정의 농작업 절차를 대상으로, checklist 기반 인간공학적 평가를 통해 1차적 평가를 실시하였다. 평가 결과를 바탕으로 근골격계 질환 유발 가능성이 높은 작업 절차를 선정하여 실험실 환경에서 피실험자를 통해 해당 동작을 모사하였다. 작업할 때 주로 사용되는 주동근의 표면근전도 (sEMG) 측정을 통해 신체부하를 평가한다. 인간공학적 평가 결과를 바탕으로 온실 내 작업 중 무거운 중량을 다루는 절차를 제거할 수 있는 새로운 작업차를 설계하여, 작업자의 신체부하 저감을 통한 근골격계 질환 예방 효과와 작업 효율의 향상을 모색하였다. 개발된 작업차의 모형을 이

용한 농작업 모사의 생체신호 측정 및 분석을 통해 실제로 신체부하의 감소와 작업효율 증가 효과가 있는지 검증하였다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 온실 내 농작업의 신체부담을 정량적으로 측정하기 위한 생체신호 수집 시스템을 구성하고, 토마토, 파프리카 시설 재배 환경에서 발생하는 근골격계 질환을 예방하기 위해 과실 수확에서부터 선별장 운반까지의 범위에 해당하는 작업 절차를 분석하여 신체 부담이 위험한 수준에 해당하는 동작을 선정한 후, 해당 동작을 제거하기 위한 새로운 온실 내 작업차를 설계하고 그 효과를 검증하는 데 있다. 개발된 작업차를 이용한 작업 동작의 신체 부담을 checklist 평가도구, 분당심박수, 표면근전도(sEMG) 측정, 에르고미터(Ergometer)를 통해 평가하여 작업 부담 감소 효과를 검증한다. 작업 시간 측정을 통해 작업효율 향상효과를 검증한다. 본 연구의 구체적인 목적은 아래와 같다.

- 1) 작업자 신체 부하의 정량적 측정을 위한 생체 신호 수집 시스템 개발
- 2) 인간공학적 평가 도구를 통한 시설 재배 현장의 작업 절차 평가
- 3) 문제가 되는 작업 절차를 제거하기 위한 작업편이장비 설계
- 4) 생리학적 데이터 분석과 인간공학적 평가를 이용하여 설계된 작업편이 장비의 효과 검증

2 연구사

Karhu 등 (1977) 은 작업장의 하룻동안의 작업 절차를 관찰 및 평가한 후 인간공학적 측면에서 작업환경을 개선할 수 있도록 OWAS (Ovako Working Posture Analyzing System) 를 개발하였다. McAtamney 와 Corlett (1993) 은 작업자의 목과 상지의 근골격계 부담 정도를 관찰을 통해 간단히 평가할 수 있는 RULA (Rapid Upper Limb Assessment) 를 개발하였다. Hignett 과 McAtamney (1995) 는 전신의 자세를 평가하여 헬스케어 등의 서비스 직종의 다양한 작업 동작 평가를 위한 REBA (Rapid Entire Body Assessment) 를 개발하였다. RULA 와 REBA 는 체크리스트 형태의 평가 도구로, 사진이나 비디오를 통해 작업 자세를 관찰하고 평가가 필요한 동작을 선정한 후, 특정 기준에 해당하는 점수를 부여하여 개선이 필요한 작업 절차를 간편히 특정할 수 있다. OWAS, RULA, REBA 는 한국산업안전보건공단에서 발행한 근골격계부담작업 유해요인조사 지침에서 사업장 작업 평가 도구로 제안하고 있는데, 기도형 등 (2005) 은 제시된 세 가지의 작업 부하 평가 기법을 업종별, 작업 내용별, 하지 자세 별로 나누어 분석하였고, 모든 경우에 OWAS, REBA 에 비해 RULA가 보다 정확한 평가 도구라고 주장하였다. 작업 부하 평가 시 동적 작업에는 산소소비량, 심박수 등을 측정하고 정적 작업에는 근전도 (EMG) 를 측정하여 작업 부담에 대한 정밀한 평가가 가능하지만, 측정 장비 구성이 복잡하고 상

당한 비용이 드는 데 반해, 교육을 받은 관리자가 관찰을 통해 사업장 작업동작에 대한 간편한 평가가 가능하기 때문에 이와 같은 평가방법들이 널리 이용되고 있다 (김유창, 2011).

김관우 등 (2009) 은 포도순치기 작업을 개선하기 위해 개발된 장비를 근전도, 심박수 측정, RULA 와 REBA 를 이용한 작업자세 평가를 통해 작업 부하 경감 효과를 검증하였다. 이규웅 등 (2009) 은 REBA 를 이용하여 상추 수확 및 포장작업 시 발생하는 작업 부담을 평가하고 작업 부하 수준을 경감하기 위한 편이장비 개발에 이용하였다. 이창민 등 (2009) 은 OWAS, RULA, REBA 를 통해 기존 편이장비를 사용할 때의 작업 부담을 평가하였고, 이를 바탕으로 장비를 개량하는 데 이용하였다. 이경숙 등 (2010) 은 작업 부담 경감을 위해 개발된 포도 선별 및 포장작업용 장비의 효과를 OWAS, RULA, REBA, LMM 등의 평가 도구를 이용하여 검증하였다. 구혜란 등 (2012) 은 소규모 농산물 가공공장에 해당하는 한과작업장을 대상으로 RULA, REBA 를 통한 인간공학적 평가를 실시하고, 특정 동작에 대한 근전도 검사를 통해 근골격계 질환 위험도가 높은 자세를 구명하였다. 김인수 등 (2016) 은 축산 작업환경 개선을 위해 축산농가 현장 방문 실태조사를 기반으로 작업복을 개발하였고, 이에 대한 착의 관능 평가와 의복 내 온습도, 심박수, 산소섭취량 분석을 통해 기존의 작업복에 비해 향상이 있음을 보인 바 있다.

해외에서 개발된 기존 체크리스트 기반 작업 부담 평가 도구의 경우, 국내의 농작업 평가에 적용 시 다소간 오차가 있는 것으로 보고되었다. 공용구 등 (2010) 은 기존의 체크리스트 평가 도구를 이용하여 농작업 자세를 평가하는 데 한계가 있음을 지적하고, 농작업에서 발생하는 하지자세를 13 가지 분류로 나눈 후, 주관적 불편도와 심박수, 근전도 측정을 통해 새로운 하지 자세 부담 평가도구 (Agricultural Lower-Limb Assessment, ALLA) 를 개발하였다. 또한, 공용구 등 (2011) 은 농작업에서 발생하는 상지 자세를 등과 어깨, 팔꿈치 부위의 각도에 따라 14가지 자세로 분류하고 주관적 불편도, 심박수, 근전도 측정을 통해 새로운 상지 자세 부담 평가도구 (Agricultural Upper-Limb Assessment, AULA) 를 개발하였다.

3 이론적 배경

3.1 체크리스트형 인간공학적 평가도구

3.1.1 OWAS

핀란드의 철강회사 Ovako Oy 와 FIOH (Finnish Institute of Occupational Health) 는 작업 효율을 저하시키는 동작이 포함된 작업 절차를 개선하기 위해 OWAS(Ovako Working Posture Analysis System) 라는 작업 자세 분류 방법을 개발하였다 (Karhu, O., 1977). OWAS 는 교육을 받은 관찰자가 작업 현장에서 발생하는 허리와 팔, 다리의 작업 자세를 관찰하고 다루는 물체의 무게를 고려하여 비효율적이고 위험한 작업 자세를 간단히 분류할 수 있도록 개발되었다. 동작의 관찰을 통해 간편하게 부적합한 작업 자세를 분류할 수 있지만, 보다 정밀한 분석이 요구되는 작업 자세 분석에는 적합하지 않다고 볼 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 비디오 촬영을 통해 하나의 작업 동작에 대한 연속적으로 평가한 후 평균치를 이용하는 기법을 사용한다 (김유창, 2011).

한국산업안전보건공단에서는 OWAS 를 이용하여 평가하기 위한 과정으로 다음을 제시하고 있다(한국산업안전보건공단, 2017). 평가 대상의 작업을 관찰하거나 촬영한다. 촬영된 작업 자세를 관찰하여 적절한 측정 간격마다 허리, 팔, 다리 각각의 자세와 취급 하중에 대해 4가지 코드를 부여한

다. 각 코드 별 작업 부하 수준이 4가지로 제시되고 있으며, 신체 부위별 자세 비율을 조사하여 작업 부담이 큰 신체 부위를 판단한다. 작업에서 나타나는 코드의 분포를 4가지 부하 수준의 분포로 바꾸어 작업의 전반적인 수준을 판단할 수 있다.

1) 자세 분류 체계

OWAS 는 허리, 팔, 다리, 하중의 순서로 구분하여 4자리 코드를 부여하게 된다 (Figure 1). 허리는 4 단계로 동작을 구분하고 있으며, (1) 곧바로 편 자세, (2) 상체를 앞으로 굽힌 자세, (3) 바로 서서 허리를 옆으로 비튼 자세, (4) 상체를 앞으로 굽힌 채 옆으로 비튼 자세가 이에 해당한다. 팔은 높이에 따라 (1) 양손을 어깨 아래로 내린 자세, (2) 한 손만 어깨 위로 올린 자세, (3) 양손 모두 어깨 위로 올린 자세로 구분할 수 있다. 다리의 경우 7가지로 구분하고 있는데, (1) 의자에 앉은 자세, (2) 두 다리를 펴고 선 자세, (3) 한 다리로 선 자세, (4) 두 다리를 구부린 자세, (5) 한 다리로 서서 구부린 자세, (6) 무릎을 꿇은 자세, (7) 걷기로 나눌 수 있다. 코드의 숫자가 커질수록 난이도가 높은 동작임을 알 수 있다. 취급하는 물체의 무게는 (1) 10 kg 이하, (2) 10~20 kg, (3) 20 kg 이상의 3 단계로 구분한다. 허리, 팔, 다리, 하중의 각 범주 별 코드의 경우의 수는 252가지로 나타날 수 있다. 따라서 평가 결과에 따라 252가지의 4자리 코드가 발생할 수 있다.

신체부위	작업자세 (괄호안은 자세코드)			
	(1) 바로 섬	(2) 굽힘	(3) 비틀	(4) 굽히고 비틀
허리				
팔	(1) 양팔 어깨 아래	(2) 한팔 어깨 아래	(3) 양팔 어깨 위	
				
다리	(1) 앉음	(2) 두다리로 섬	(3) 한다리로 섬	(4) 두 다리 구부림
				
	(5) 한다리 구부림	(6) 무릎꿇음	(7) 걷기	
				
하중	(1) 10 Kg 이하	(2) 10 ~ 20 Kg	(3) 20 Kg 이상	

Figure 1. OWAS 작업자세 분류체계 (한국산업안전보건공단, 2017)

2) 작업 자세 기록 및 OWAS 코드 부여

산업 현장에서 OWAS를 활용할 때 비디오 촬영을 통해 작업 자세를 기록한 후, 일정 간격 (interval)마다 자세를 평가한 자료를 분석한다. 이를

작업 샘플링 (work sampling) 이라고 하며, 작업 특성에 따라 간격을 달리 하여 분석할 수 있다. 각 간격의 자세에 OWAS 가 제시하는 코드를 부여한 후 코드별, 부하 수준 별 분포를 획득할 수 있다.

3) 작업 부하 수준

OWAS 는 작업 자세가 근골격계에 미치는 영향에 따라 4 가지 수준으로 분류하고 있다(Table 1). 수준 3과 4는 근골격계에 부정적 영향을 미치는 평가 결과로, 개선이 시급하다고 판단할 수 있다. 또한, OWAS 는 각 코드에 대응하는 작업 부하 수준을 제시하고 있는데, 이를 통해 작업 자세를 쉽게 평가할 수 있다(Table 2).

Table 1. 근골격계에 미치는 영향에 따른 작업자세 수준 (한국산업안전보건공단, 2017)

작업자세 수준	평 가 내 용
수준1	근골격계에 특별한 해를 끼치지 않음 작업자세에 아무런 조치도 필요치 않음
수준2	근골격계에 약간의 해를 끼침 가까운 시일 내에 작업자세의 교정이 필요함
수준3	근골격계에 직접적인 해를 끼침 가능한 빨리 작업자세를 교정해야 함
수준4	근골격계에 매우 심각한 해를 끼침 즉각적인 작업자세의 교정이 필요함

Table 2. OWAS 코드에 대한 작업자세 수준 (한국산업안전보건공단, 2017)

ACZ†	(1)			(2)			(3)			(4)			(5)			(6)			(7)			
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
(1)	(1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	(2)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	(3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
(2)	(1)	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3
	(2)	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4
	(3)	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4
(3)	(1)	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1
	(2)	2	2	3	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1
	(3)	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
(4)	(1)	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4
	(2)	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4
	(3)	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4

3.1.2 RULA

McAtamney 와 Corlett (1993) 은 다양한 제조 산업의 작업자를 대상으로 근골격계 질환과 관련있는 위험 인자에 노출된 정도를 평가하기 위해, 어깨, 팔목, 손목, 목, 몸통 등 상지 (Upper Limb) 에 초점을 맞추어 작업 부하를 평가하는 RULA(Rapid Upper Limb Assessment) 를 개발하였다. 작업 자세, 정적 또는 반복적 작업 여부, 작업에 필요한 힘의 크기 등을 고려한 체크리스트 형태의 평가도구이다. 한국산업안전보건공단에서는 RULA를 이용한 작업 자세 평가를 위해 아래와 같은 평가 절차를 제시하고 있다 (한국산업안전보건공단, 2017).

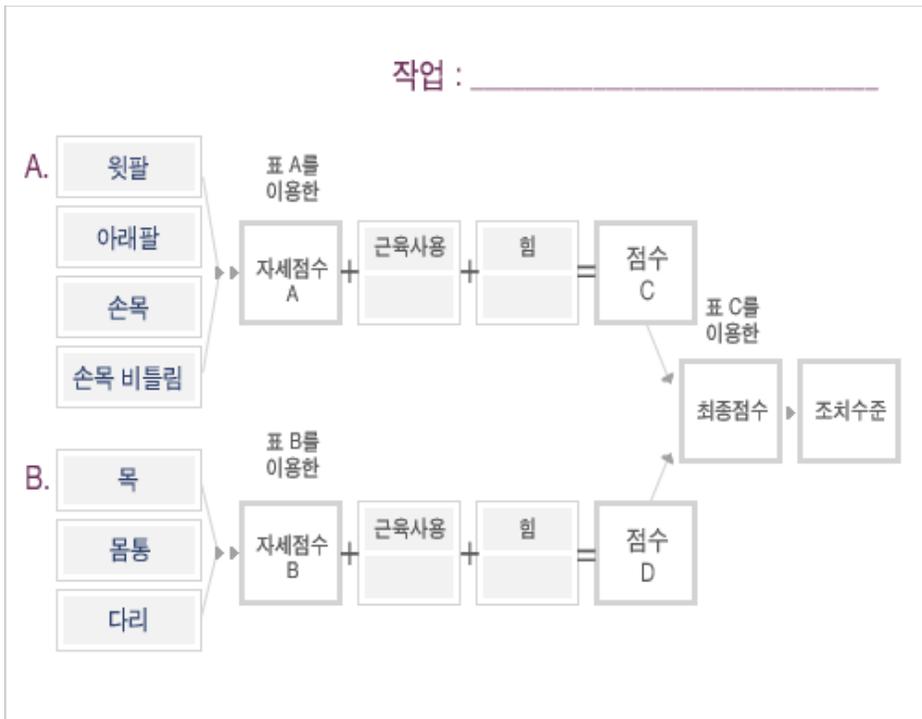


Figure 2. RULA SYSTEM (한국산업안전보건공단, 2017)

Table 3. RULA의 점수표 (한국산업안전보건공단, 2017)

		점수 D						
		1	2	3	4	5	6	+7
점수 C	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	3	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	3	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	5	6	6	7	7
	7	5	5	6	6	7	7	7
	8	5	5	6	7	7	7	7

조치단계 1 : - 최종점수가 1-2점(수용 가능한 작업)

조치단계 2 : - 최종점수가 3-4점(계속 추적 관찰 요함)

조치단계 3 : - 최종점수가 5-6점(계속적 관찰과 빠른 작업개선 요함)

조치단계 4 : - 최종점수가 7점 이상(정밀조사와 즉각적인 개선이 요구됨)

Figure 3. RULA의 최종 점수에 따른 조치단계
(한국산업안전보건공단, 2017)

3.1.3 REBA

Hignett 과 McAtamney (1998) 는 상지 중심의 평가도구인 RULA 와 달리, 간호사 등 다양한 자세에서 업무가 이루어지는 서비스 산업을 대상으로 전신의 작업 부담 정도와 근골격계 유해요소의 평가를 위해 REBA(Rapid Entire Body Assessment) 를 개발하였다. 평가가 이루어지는 작업 요소로 반복 및 정적 작업, 작업에 필요한 힘, 작업 자세, 작업 시간 등을 고려하고 있으며, 신체 부위 별로 그룹을 나누어 평가한 후 행동 점수와 합산하여 REBA 점수를 도출하도록 하였다(Figure 3) (한국산업안전보건공단, 2017). RULA 를 개발한 연구팀에서 개발되었고 그 절차가 서로 비슷한 특징이 있다. OWAS 는 중공업, 철도산업 등 중량물 취급 산업에 적합하고, RULA 는 조립이나 가공, 정비 등의 작업, REBA 는 간호사 등의 비정형적인 작업의 분석에 적합하다고 알려져 있다 (기도형, 2004).

3.1.4 작업 샘플링(Work sampling)

Corlett 등(1979)에 의하면, 작업 장면을 연속으로 비디오 촬영하여 작업의 내용을 영상으로 기록한 후, 일정한 간격으로 장면을 추출하는 샘플링을 통해 작업 자세 평가를 실시하는 것이 바람직하다고 하였다. 농작업의 자세 평가를 정확히 실시하기 위해서는 각 동작을 임의로 평가하기보다는, 작업의 반복성을 고려하여 작업의 단위에 대한 촬영 영상을 획득하고 샘플링 과정을 거치는 과정이 필요한 것으로 판단된다.

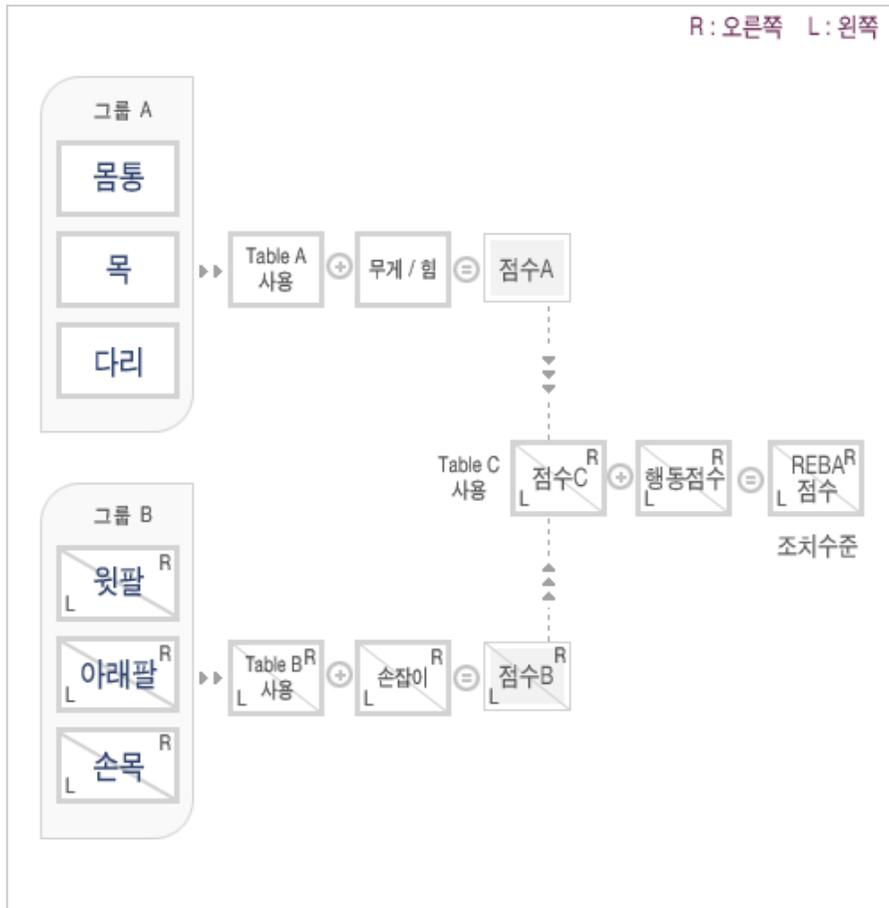


Figure 4. REBA 평가 절차 (한국산업안전보건공단, 2017)

3.2 근전도 분석

근전도(Electromyography, EMG) 는 신체 동작 시 근육에서 발생하는 미세한 전기 신호를 측정, 기록, 분석하는 데 이용할 수 있다 (Figure 4). 뇌에서 발생한 신호가 근육을 움직이는 과정의 단위는 Motor unit 으로 나타낼 수 있다. 근섬유를 구성하는 세포는 반투과성 막을 가지고 있으며 세포막 내부와 외부는 이온의 불균형한 분포차이로 인해 -80mV 정도의 전위차를 띠게 되는데, 이를 휴지 전위 (resting potential) 라 한다. 이러한 이온의 불균형한 분포는 세포막의 ion pump 를 통해 세포 내부의 음이온 농도가 높은 상태로 유지된다. 운동 신경 (motor nerve) 을 통해 자극이 근육세포로 전달되면 세포막 내부와 외부의 이온이 빠르게 교환되면서 전위차가 -80mV 에서 $+30\text{mV}$ 로 급속히 변화하는 탈분극 (depolarization) 이 일어나게 된다. 이후, ion pump 가 작동함에 따라 휴지기의 전위차를 회복하는 재분극 (repolarization) 이 일어난다 (Figure 5). 이러한 전위차의 급속한 변화는 활동 전위 (Action potential) 라 하는데, 근육 활동에 따른 활동 전위의 중첩된 신호를 근전도 (EMG) 라고 한다 (Konrad, P., 2005).

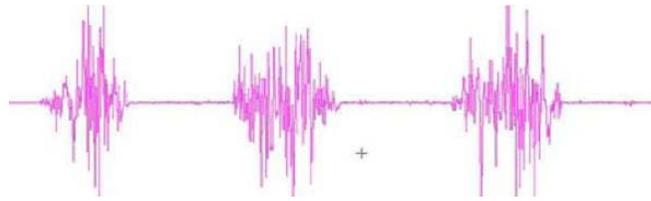


Figure 5. 근전도 (EMG) 신호 (P. Konrad, 2005)

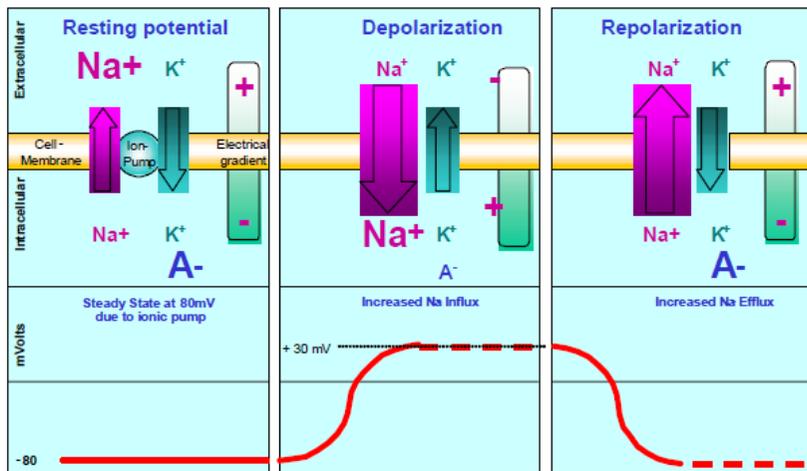


Figure 6. 근육 세포의 탈분극과 재분극 사이클 (P. Konrad, 2005)

근육세포의 탈분극과 재분극 사이클에 의해 근섬유의 표면을 따라 전기 쌍극자 (electric dipole) 상태가 이동하며 발생하게 된다. 이 때, 서로 다른 지점에 부착된 서로 다른 두 전극으로부터의 거리에 따라 전위차가 측정되는데, 이를 bipolar electrode 라 한다 (Figure 6). 피부에 전극을 부착하여 비침습적으로 활동전위를 측정하는 근전도를 표면 근전도 (surface EMG, sEMG) 라고 하는데, 전극 간의 미세한 전위차를 500배에서 1000배까지 증폭하여 사용한다. 대상의 피하구조, 근육구조 등이 다양하고 측정 기기마다 잡음

(noise) 이 발생할 수 있기 때문에 이를 필터 (filter) 를 통해 정제하여 이용할 수 있다 (Konrad, P., 2005; 이영진, 2012).

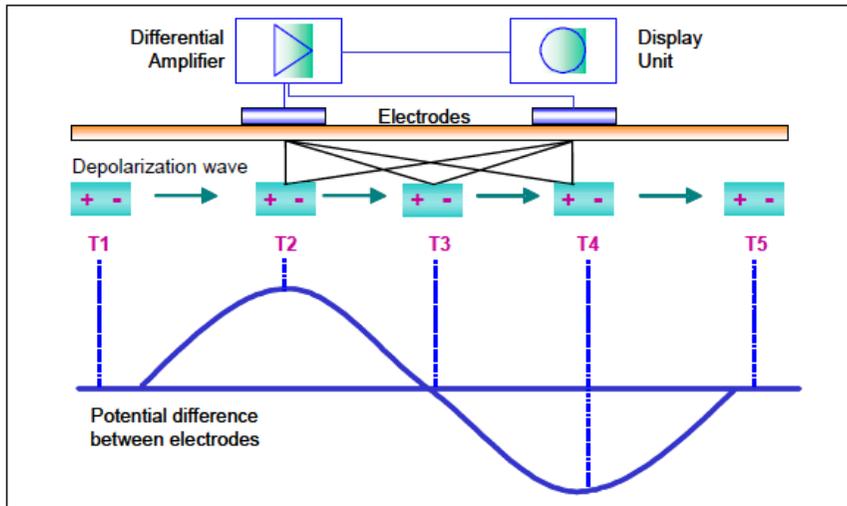


Figure 7. Bipolar electrode 를 통해 근섬유 표면에서 측정되는 EMG 신호의 측정 원리 (P. Konrad, 2005)

근섬유에서 발생하는 근전도 (EMG) 신호의 세기는 근육이 내는 힘의 크기와 비례하는 양상을 보이는데, 힘의 크기는 동작에 관여하는 근섬유의 수와 비례하기 때문에 활동 전위가 중첩되어 나타나는 것으로 알려져 있다 (Figure 7) (Lawrence, H., 1983). 또한 Luca (1997) 에 따르면, 근육의 수축을 지속하였을 때, 피로도가 증가함에 따라 근전도 (EMG) 신호의 주파수 분포의 중앙값이 감소하는 것으로 나타났다(Figure 8). 근전도 (EMG) 검사는 근육세포의 활동을 직접적, 정량적으로 측정할 수 있기 때문에, 신경외과, 재활의학과 등의 의학뿐 만 아니라 작업 부담 평가, 생산성 향상을

위한 설계 등의 인간공학이나 운동 기량 향상을 위한 훈련 또는 장비 개발 등의 스포츠 과학에서 널리 응용되고 있다. 이러한 근전도 신호의 특성을 이용하여 본 연구에 필요한 작업 부하 평가에 이용할 수 있다.

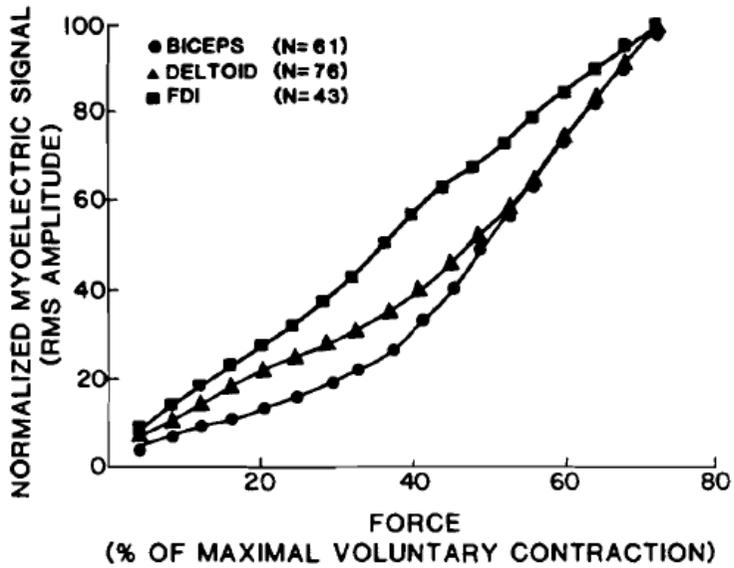


Figure 8. Normalized EMG 신호 세기와 힘의 관계 (H. Lawrence, 1983)

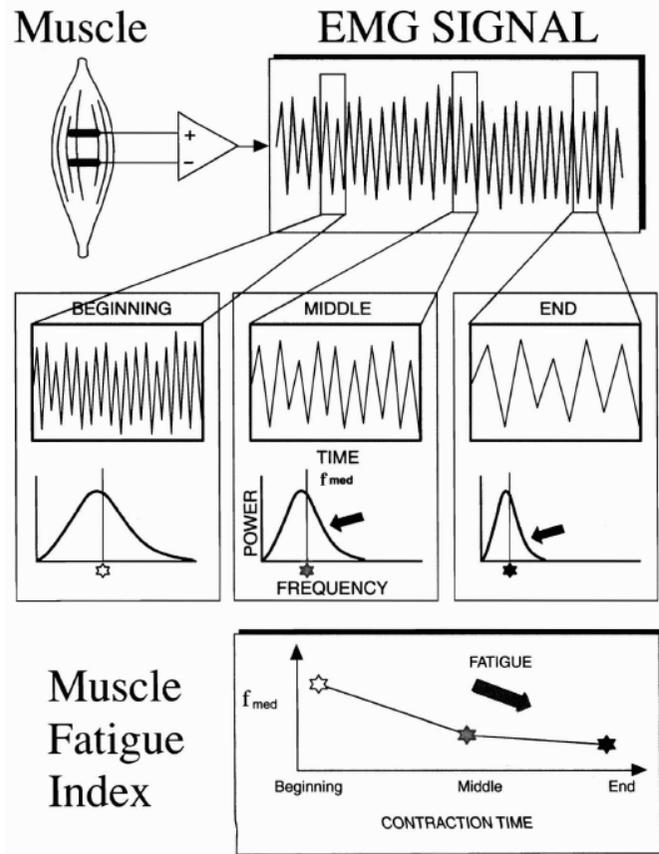


Figure 9. 정적 근수축 실험에서 근피로도가 증가함에 따른
EMG 신호 주파수 변화 (C.J.D. Luca, 1997)

3.3 운동 평가

많은 운동 선수들이 신체 출력을 간접적으로 추정하기 위하여 분당심박수를 지표로써 사용한다. 싸이클의 경우, 속도와 심박수, 물리적 출력과 심박수의 관계에 대해 활발한 연구가 이뤄진 바 있다(F.J.P. Arts, 1994; G. Grazi, 1999). Arts (1994) 에 따르면 분당심박수와 물리적 출력 간의 관계는 신체의 유산소 역치 (Aerobic threshold) 미만의 영역에서 선형관계를 따르며, 아래의 모델식으로 표현할 수 있다.

$$\text{heartrate} = (\text{slope} \times \text{power output}) + \text{intercept}$$

심박수와 신체 출력의 관계식을 살펴보면, 인간 활동 범위 내의 최저 심박이 intercept 에 해당하고 power output 변화에 따른 심박의 변화율이 slope 에 해당하는 선형 관계식임을 알 수 있다.

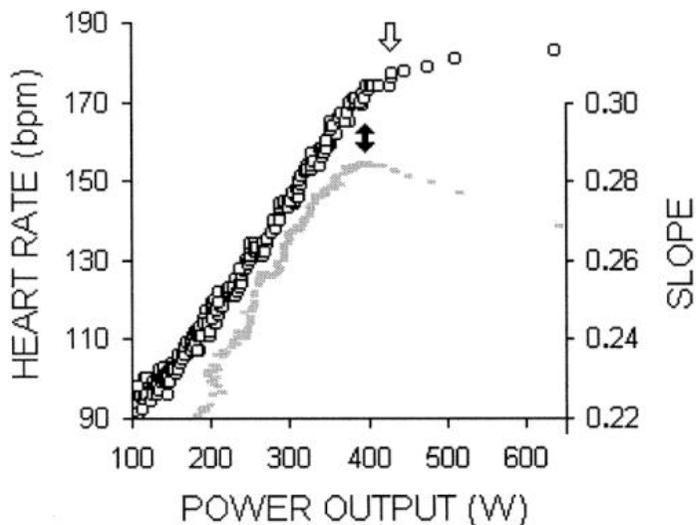


Figure 10. 심박수(bpm)와 신체 출력(W)의 관계 도표 (G. Grazi, 1999)

싸이클의 경우 신체 동작의 범위가 장비에 의해 제한된 고립운동에 해당하고, 출력을 측정하기 위한 동작이 원 운동에 해당하므로 에르고미터에 의한 출력 측정이 용이한 운동 평가 방법이라고 할 수 있다. 싸이클 에르고미터와 심박측정장치를 통해 신체 출력과 심박수의 관계를 분석하고, 농작업에 대한 심박수를 측정하면 해당 작업에 대한 추정 일률을 도출할 수 있다.

4 시설원예용 작업기계 설계

4.1 재료 및 방법

본 연구에 앞서 수행한 ‘파프리카, 토마토 온실 내 신선도유지를 위한 이송기 개발(농림수산식품기술기획평가원, 과제번호: 500-20160140)’의 연구과제를 통해 충격 요인이 과실의 신선도에 유의한 영향을 미친다는 결과를 얻었다. 수확지로부터 선별장까지의 작업 절차 중, 충격이 발생하는 절차를 추적하기 위하여 3축 무선 가속도계(SmartSensor AX-3DX, BeanAir, Germany)와 무선 데이터로거(BeansGateway, BeanAir, Germany)를 이용하여 충격원 추적 시스템을 구성하였다(Figure 11). 가속도 센서를 실제 수확에 사용하는 상자에 부착하였고, 동시에 작업에 대한 영상을 촬영하였다. 구성된 시스템을 가동한 후 작업을 진행함으로써 time-series 데이터를 취득하였다. 촬영된 작업 영상과 가속도계 데이터의 시간축을 동기화하여 충격이 발생하는 작업 동작을 특정하였다.



Figure 11. 실시간 충격원 모니터링 시스템

촬영된 작업 영상에 대해 1차적으로 OWAS 체크리스트 평가를 진행하였다. 1초 간격으로 영상을 샘플링하였고, 먼 거리, 중간 거리, 가까운 거리의 과실 수확작업과 상자 간 교대작업에 대해 각각 평가를 수행하였다.

4.2 결과 및 고찰

가속도계를 통해 취득한 데이터와 작업영상을 시간축 기준으로 동기화하여 분석한 결과, 상자 교대작업이 주요 충격원에 해당하는 작업으로 나타났다. 발생한 최대 충격은 약 4 에서 6 g로, 과실의 신선도에 상당한 영향을 주는 수준의 충격에 해당한다(Figure 12).

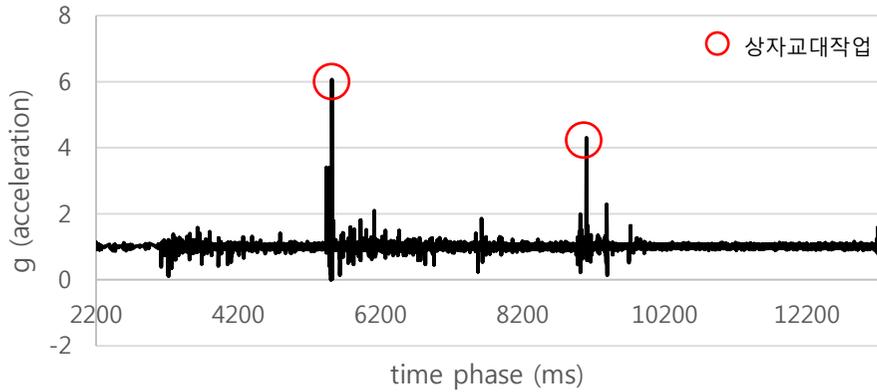


Figure 12. 가속도계를 통해 취득한 충격 데이터

Table 4. 작업 동작 별 OWAS 위험 수준 비율

위험 수준	먼 거리 수확작업	중간 거리 수확작업	가까운 거리 수확작업	상자 간 교대작업
1	21.1 %	29.3 %	75.7 %	8.9 %
2	44.7 %	43.1 %	24.3 %	48.6 %
3	34.2 %	27.6 %	0 %	33.2 %
4	0 %	0 %	0 %	9.3 %

촬영된 농작업을 OWAS를 이용하여 분석한 결과, 몸으로부터 먼 거리의 과실을 수확하는 작업과 상자 간 교대 작업이 신체 부하가 높은 것으로 나타났다. 특히 상자 간 교대 작업의 경우, 즉시 교정이 요구되는 수준의 위험 동작 비율이 높은 것으로 나타났으므로 해당 절차를 작업 과정에서 제

거하여야 할 것으로 보인다.

충격 모니터링 시스템을 구성하고, 작업을 촬영 및 분석함으로써 상자 간 교대 작업이 충격을 유발하여 과실의 신선도를 저해할 뿐 만 아니라, 작업자의 근골격계 질환을 유발할 수 있는 것을 확인하였다.

4.3 작업기계 설계

기존의 온실용 수확 작업차의 경우, 승하강 장치를 이용하여 높게 자라는 토마토나 파프리카의 과실을 수확할 수 있는 고소 작업 장비이다(Figure 13). 부품의 유격이나 재료의 변화율로 인해 고소작업 시 다소 불안정하며, 작업자의 신체 동작이 클수록 추락 등 부상의 위험이 있다. 상자 간 교대 작업은 무거운 상자를 다루는 동작으로, 신체의 무게중심이 급변하고 상당한 근력을 요하는 작업에 해당한다.



Figure 13. 기존 온실 내 수확용 작업차

미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH)의 농업종사자를 위한 인간공학적 표준지침에 따르면, 무거운 물건을 다룰 때의 작업대 높이를 남성 기준 약 90 ~ 100 cm 로 권장하고 있으며 물건을 들 때에는 어깨와 허리 높이 범위 내에 이루어지도록 요구하고 있다. 또한, 허리를 구부리는 작업을 제거하기 위해 선반이나 스탠드를 사용하도록 되어있다.

국제노동기구(ILO)와 국제인간공학협회(IEA)의 농업에 대한 인간공학적 지침에 따르면, 무거운 물건을 드는 것을 제한하고 물건 이동 시 고저차를 제거하거나 최소화하도록 요구하고 있다. 또한, 작업 높이를 팔꿈치 근처로 조정하는 것을 권장하고 있다. 높은 곳에서의 작업을 제한하거나, 충분히 안전한 플랫폼 위에서 작업하는 것을 요구하고 있다. 장비의 경우, 위험을 유발하는 움직이는 부품에 대한 조치를 취하도록 하고 있다.

본 연구에서 개발된 작업편이장비의 설계는 다음의 인간공학적 표준과 지침을 따르고 있다.

- 허리를 구부리는 작업의 제거 (Eliminate stooped work postures)
- 사용자 신체에 맞는 작업 높이 설정 (Handwork height adjust to worker)
- 무거운 물건을 드는 절차 개선 (Eliminate or minimize lifting heavy materials)
- 물건을 이동시키는 고저차 제거 (Eliminate or minimize height differences when moving materials manually)
- 위험을 유발하는 장비 부분에 대한 조치 (Attach proper guards to the dangerous moving parts of machines)

이러한 표준과 지침을 따름으로써 작업 중 상자교대 절차를 제거하였고, 풋 스위치를 이용하여 작업자 스스로 적절한 작업 높이를 설정할 수 있다. 따라서, 허리를 구부리고 무거운 물건을 드는 작업 특성이 개선되었고 과실을 수확하여 상자에 담을 때 발생하는 고저차를 효과적으로 제거하였다. 무거운 상자가 적재되는 트레이의 경우, 돌출된 핀이 일정한 경로의 홈통가이드를 따르게 하여 움직이거나 흔들리는 것을 방지하였다.

하지만 고소작업이 필수불가결한 토마토, 파프리카 온실 수확작업 특성상 플랫폼이 높은 고도에서 견고히 작동할 수 있도록 별도의 기계 하부 승하강 장치의 연구가 필요하다고 할 수 있으나, 본 연구에서는 하부 장치와 기계공학적인 요소는 다루지 않고 있다.

온실 내 농작업에서 과실의 신선도와 작업자의 신체에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 상자 간 교대작업을 제거하기 위하여 온실 내 작업편이장비를 다음과 같이 설계하였고(Figure 14), 이는 농업의 인간공학적 지침 기준에 부합하는 것을 알 수 있다.

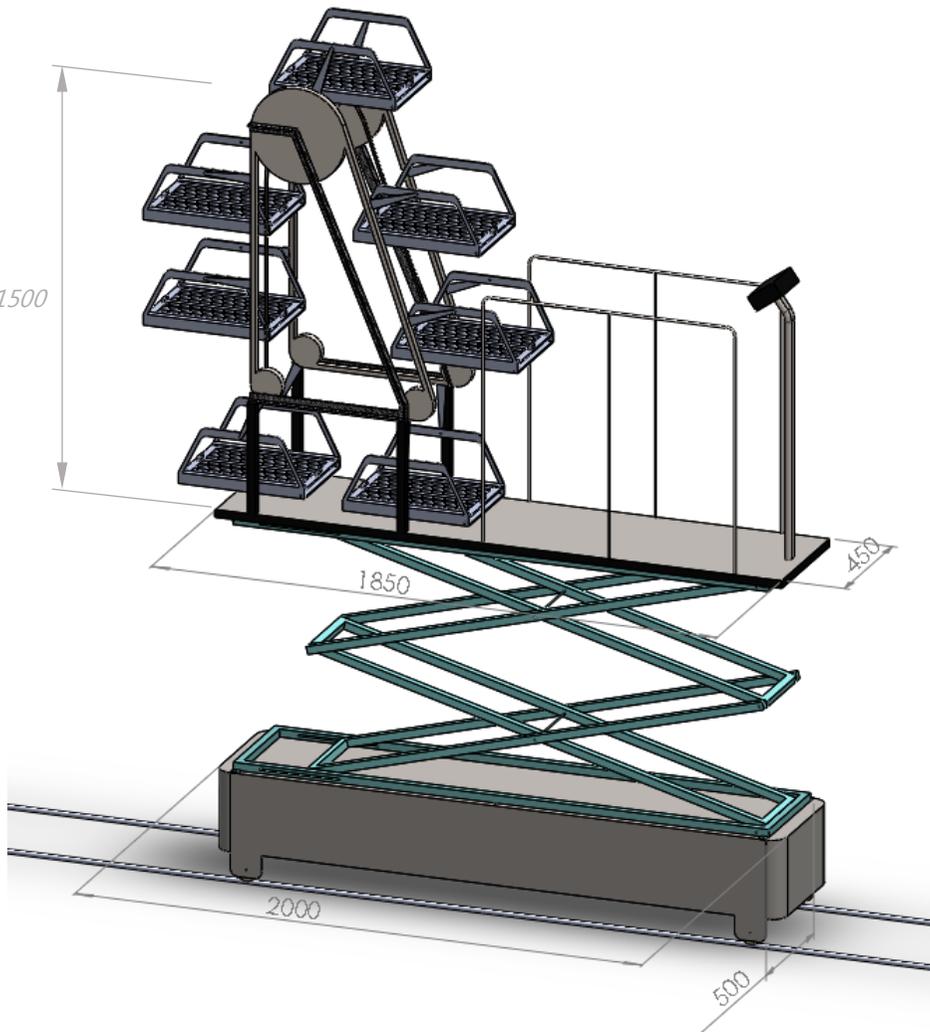


Figure 14. 온실 내 작업편이장비의 1차 3D 모델링

상자를 적재할 수 있는 다수의 트레이가 정해진 궤도를 따라 전동으로 움직일 수 있는 장치로, 작업자가 탑승 후 플랫폼에 부착된 풋스위치(foot switch)를 조작하여 기계가 자동으로 과실 수확용 상자를 교대하도록 고안된 장치이다.

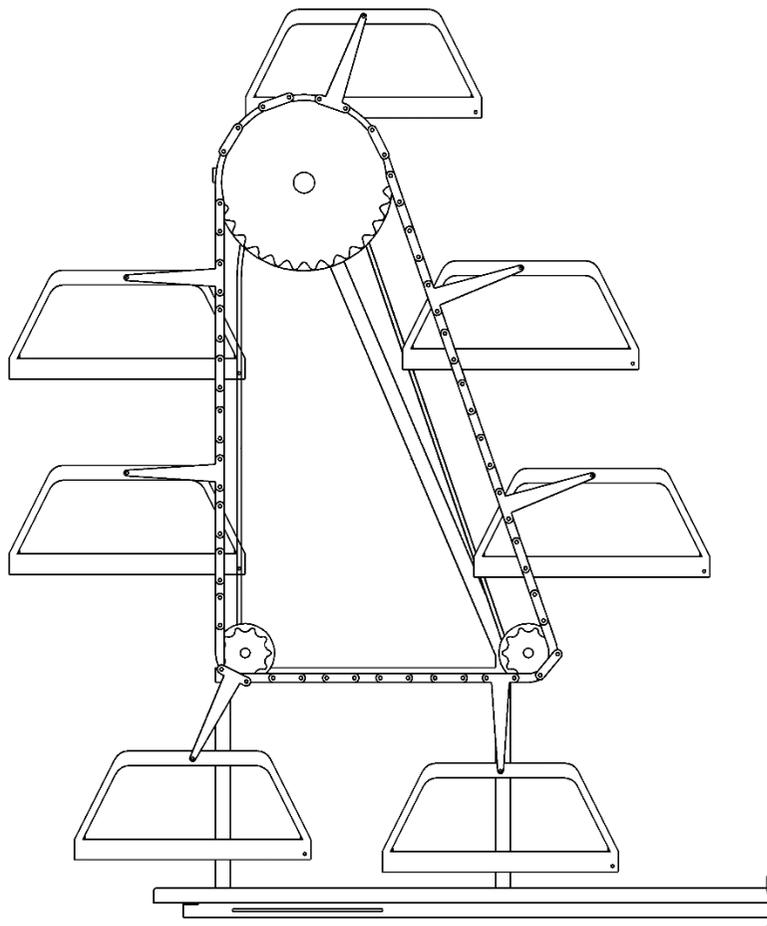


Figure 15. 자동교대장치의 상세도면

어태치먼트 로드(attachment rod)가 부착된 링크와 직결 링크가 궤도를 따라 연결되어있으며, 하부의 아이들러(idler) 기어가 궤도를 보조한다. 상부의 메인 기어를 구동하여 순방향 및 역방향 회전을 통해 상자 간 교대가 이루어진다. 트레이가 작동 중 흔들리는 것을 방지하기 위해 트레이 양쪽 모서리에 핀을 돌출시켜 일정 경로의 홈통 가이드를 따르게 하였다.

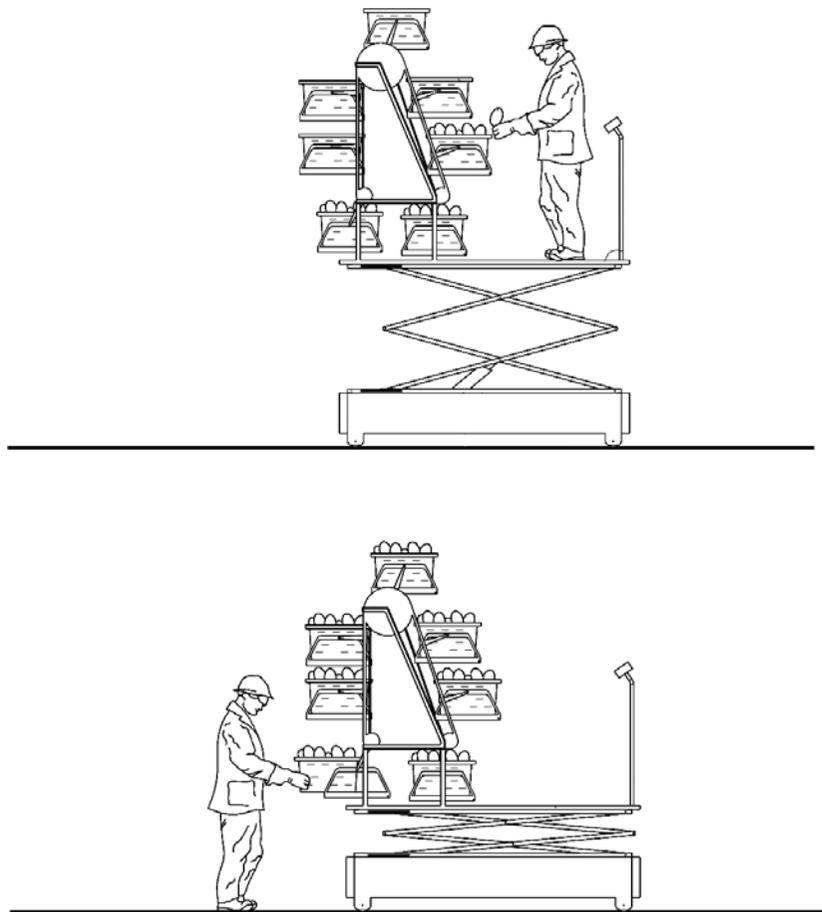


Figure 16. (위) 개발된 장비에 탑승하여 수확하는 모습
(아래) 수확 상자를 하역하는 모습

설계된 상자자동교대 수확장비는 수확 시 상자를 자동으로 교대하여 기존의 불량한 작업 절차를 제거할 뿐 만 아니라, 수확을 마친 후 가득 찬 수확상자를 하역할 때에도 인간공학적으로 매우 안전한 범위 내에서 하역이 가능한 것을 알 수 있다.

5 재료 및 방법

5.1 피실험자 및 실험장비

실험에 참가한 연구대상은 과거에 근골격계 질환을 경험한 적이 없는 건강한 성인 남성 13명이며, 피실험자의 평균(\pm SD) 연령, 신장, 체중은 각각 26.9 (\pm 2.29) 세, 173 (\pm 5.34) cm, 70 (\pm 11.45) kg로 조사되었다. 본 연구는 서울대학교 생명윤리심의위원회(IRB)의 심의를 거쳤으며, 피실험자에게 실험에 대해 충분히 설명하고 동의를 얻어 실험을 진행하였다.

생리적 인체신호 측정을 위하여 휴대용 심박수 측정장치(Heartrate monitor, GARMIN, USA)를 이용하여 분당심박수를 측정하였다. 생체역학적 인체신호인 근전도 측정을 위하여 6채널 근전도 센서(TeleMyo 2400GT, NORAXON, USA)를 사용하였다. 분당심박수, 근전도 데이터를 실제 작업과 동기화하고 인체공학적 평가를 수행하기 위해 웹캠(LG-15Z95, LG, 대한민국)을 이용하여 피험자를 촬영하였다. 운동 평가를 통해 피험자의 분당 심박수와 신체의 물리적 출력을 동기화하기 위하여 실내용 싸이클 에르고미터(Flux, TACX, Netherland)를 사용하였다. 분당심박수와 신체 출력을 기록하기 위해 휴대용 데이터로거(Edge 1000, GARMIN, USA)를 사용하였다. 근전도 데이터 분석을 위해 데이터 처리 도구인 MR3(NORAXON, USA)를, 심박수와 신체출력의 회귀분석을 위해 오픈소스 소프트웨어인 GoldenCheetah V3.4 를 이용하였다. 실험 종료 후, 피험자의 주관적 작업

강도 평가를 위해 Borg Scale (15 단계 RPE) 이 사용되었다. 데이터 분석
용 통계 프로그램으로 IBM SPSS Statistics V23을 사용하였다.

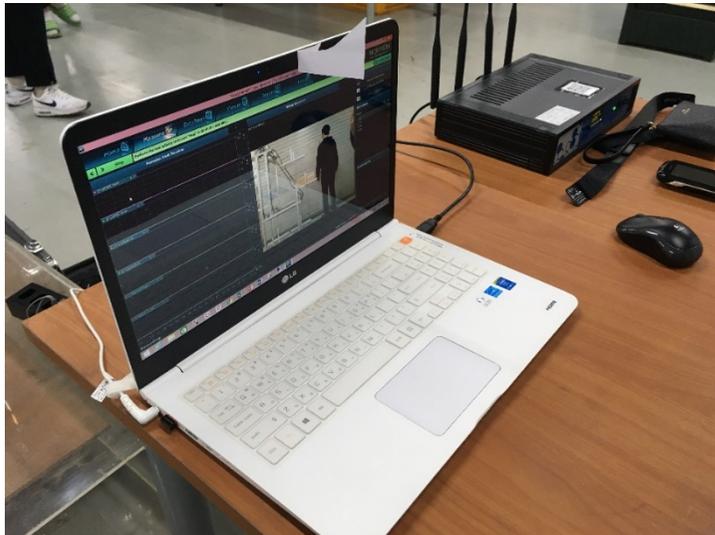


Figure 17. 피험자 촬영 및 생체신호 수집 시스템 구성



Figure 18. 운동평가용 싸이클 에르고미터 구성

5.2 작업동작 교육

실험 데이터의 오차를 줄이고 균일한 시행을 유도하기 위하여 피실험자의 사전 교육을 진행하였다. 국내 최대 생산규모의 파프리카 농장인 충남 부여 소재의 농업회사법인 우듬지팜을 방문하여 직원교육 담당자의 교육을 직접 수료하였고, 이를 바탕으로 피실험자를 교육하였다. 기존 장비를 이용하여 수확하는 동작, 기존 장비 위에서 상자 간 교대하는 동작, 개발된 장비를 통해 수확하는 동작을 실제 온실 내 교육내용에 따라 지도하였다. 실제 수확환경이 아닌, 실험실 내 모의환경에 맞추어 동작을 최대한 구현하도록 교육 및 지시하였다.

본 연구에서는 새로 개발된 장비의 평가를 위한 실험 진행을 위해, 연구 대상 동작을 작업편이장비의 플랫폼 위에서 행해지는 작업에 제한하였다. 작물에서 과실을 분리하여 상자에 담은 후, 가득 찬 과실 상자와 빈 상자를 교대하는 동작을 ‘기존 작업’, 기존 작업에서 상자 교대 절차를 제거하고 모의 장비를 이용한 수확 동작을 ‘개선된 작업’이라고 정의하였다.

모의 수확 환경에서는 실제 수확 동작을 최대한 구현하기 위해 두 손을 모형 과실에 접촉하는 것을 과실을 베는 동작으로 규정하였고, 상자와 가까운 쪽의 손을 상자 내부 바닥에 접촉하는 동작을 과실을 상자에 담는 행위로 규정하였다. 가득 찬 상자를 교대하는 작업을 재현하기 위해 실제 과실 상자 무게인 10 kg의 하중을 박스에 가하여 교대 동작을 실시하였다.

5.3 실험실 내 모의 수확환경 구성

실험 환경과 상황을 정확히 통제하고 피실험자 관찰과 데이터 측정을 용이하도록 하기 위해 실제 온실 내에서 수행되는 작업을 바탕으로 실험실 내 모의환경을 구성하였다. 기존의 작업 환경을 모사하기 위하여 평평한 바닥에 상자를 2층으로 쌓아 구성하였고, 새로 개발된 장비를 이용한 작업 환경을 모사하기 위해 설계를 바탕으로 목업(Mock-up)을 제작하여 구성하였다(Figure 19).

과실 수확 동작을 모사하기 위하여 모형 과실을 플랫폼으로부터 약 30cm 떨어진 벽면에 부착하였다. 한 상자에 담을 수 있는 과실의 수를 고

려하여 20개를 부착하였다. 과실의 좌, 우 배치는 적절히 분산하였고, 위, 아래 배치는 성인 남성의 어깨 위로부터 허리 아래까지의 범위 내에 부착하였다.

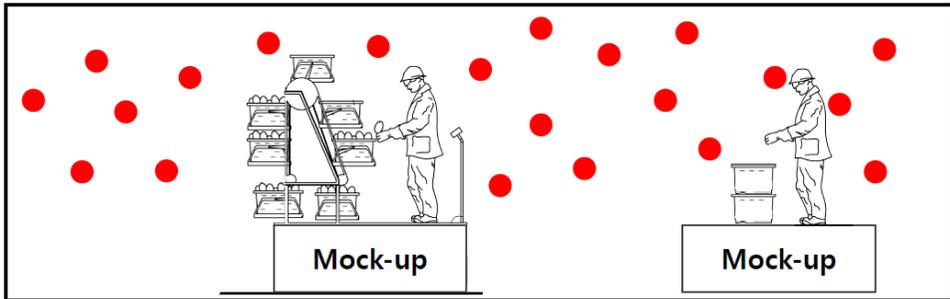


Figure 19. 모의환경 구성 모식도 (좌) 개발된 장비, (우) 기존 작업대



Figure 20. 모형 과실과 장비 목업으로 이루어진 모의환경 구성 (좌) 개발된 장비, (우) 기존 작업대

5.4 생리학적 데이터 취득

5.4.1 분당심박수 측정

피실험자의 분당심박수 측정을 위해 스트랩(strap) 형태의 무선 심박센서를 가슴 부위에 부착하였다. 휴대용 데이터 모니터링 기기를 통해 실험 전 기간에 대해 데이터를 기록하였다. 기존 방식의 작업, 개발된 장비를 이용한 작업, 운동 평가의 세 세션에 대해 데이터를 취득하였고, 각 세션 사이에 피험자의 충분한 휴식을 유도하여 휴식기 심박을 회복한 뒤에 다음 세션을 진행하였다.

5.4.2 근전도 측정

대상 작업 시 피실험자의 근전도 데이터 측정을 위해 주동근(agonist muscle)이 위치하는 피부 표면에 전극을 부착하였다. 주동근이란 해당 작업이 이루어질 때 주로 사용되는 근육으로서, 팔을 들어올리는 동작, 허리를 구부렸다 펴는 동작, 무거운 중량을 드는 동작에 주로 사용되는 근육인 좌/우 상부승모근(Upper trapezius, TR), 좌/우 척추기립근(Lumbar erector spinae, LE), 좌/우 대퇴직근(Rectus femoris, RF)이 이에 해당한다. 피실험자의 주동근에 무선 6채널 근전도 센서를 부착하고, 각 실험 세션에 대한 근전도를 수집하였다(Figure 21).

수집된 근전도 raw 데이터는 정류(Rectification) 과정을 거쳤고, 제공평

균(Root mean square, RMS) 평활화 과정을 거쳐 진동 형태의 근전도 신호를 선형적 곡선으로 처리하였다(linear enveloped). 각 작업 구간 별 Enveloped graph의 면적을 구하여 Integrated EMG(IEMG, 단위: $\mu V \cdot s$)를 계산하였다.

5.4.3 근전도 결측치 처리

근전도를 부착한 피실험자를 통해 각 모의 동작을 수행하였으나, 센서 중 일부가 작동하지 않아 6개의 근육에 대한 완전한 데이터를 수집하지 못한 경우는 해당 피실험자의 모든 데이터를 결측치로 처리하였다. 전체가 아닌 일부 근육에 대한 근전도 데이터를 결측치로 처리하지 않고 분석에 추가하여 이용하면 해당 근육에 대한 통계에만 가중치 등의 영향을 미치게 되므로 균일한 결과를 획득할 수 없기 때문이다. 본 모의작업 실험에서는 서로 다른 날에 걸쳐 한 피실험자당 두 번의 실험을 통해 총 네 번의 모의 작업을 했으나, 센서 오작동으로 인해 결측치를 제외한 1반복에 해당하는 데이터만 이용하여 분석하였다.

5.4.4 주관적 작업강도 측정

실험을 종료한 피실험자를 대상으로 6 ~ 20 의 Index 범위의 Borg scale 을 조사하였다. 해당 작업을 반복적으로 수행하였을 경우를 가정하고 신체의 힘듦 정도를 숫자 형태로 각 작업 별 수집하였다.

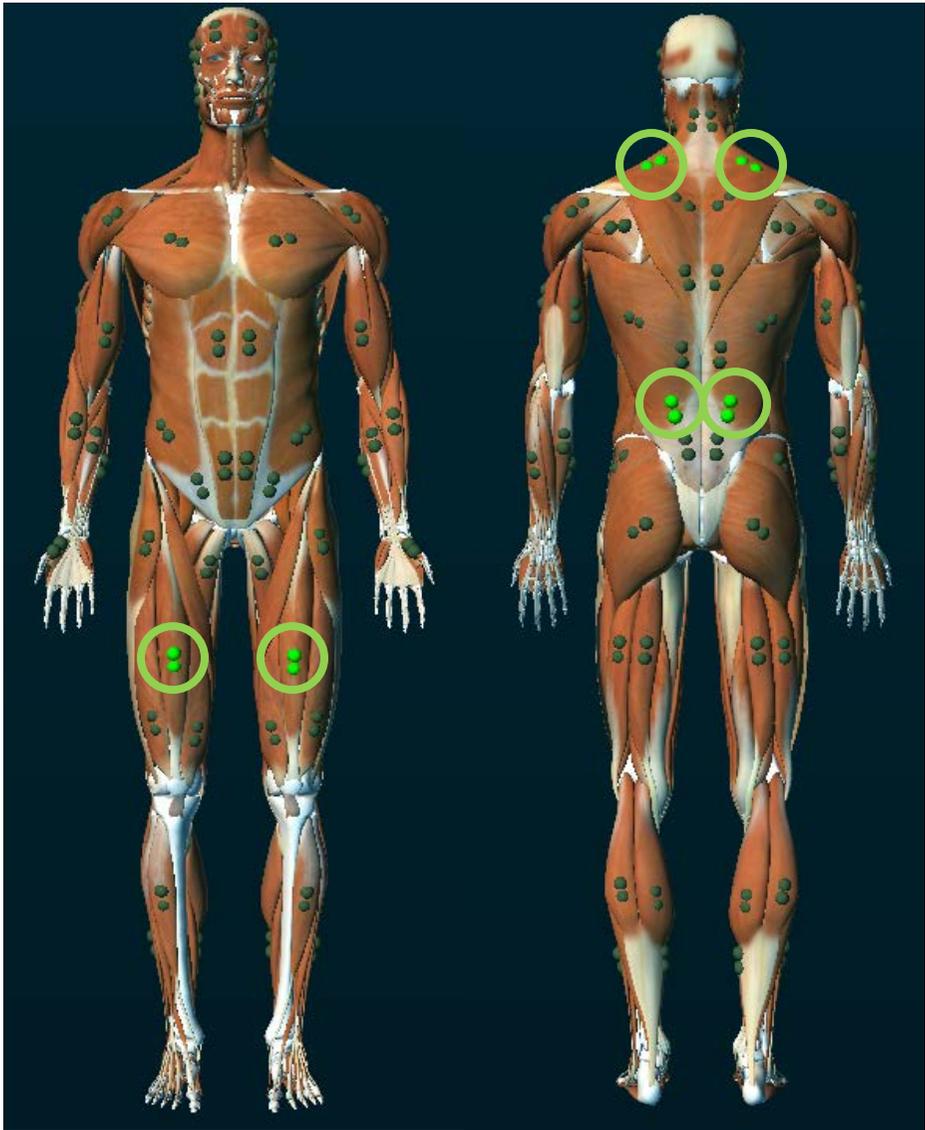


Figure 21. 표면 근전도 전극 부착 위치; 상부 승모근, 척추기립근, 대퇴직근
 (그림: 근전도 분석 프로그램 Noraxon MR3)



Figure 22. 개발된 장비 모형을 이용한 수확작업 세션

첫 번째 세션으로, 개발된 장비 모형을 이용한 수확작업 모사동작을 진행하였다. 실제 수확과 유사한 환경으로, 과일 투입구의 위치를 작업자의 신장에 맞추어 조절할 수 있도록 구성되어있다. 작업대로부터 약 30 cm 거리

의 벽면에 부착된 모형 과실을 양손으로 접촉한 후, 과실 상자 바닥에 부착된 지점에 왼손을 접촉하는 동작으로 이루어진다. 한 상자에 약 40개의 과실이 적재되고, 자동으로 상자가 교대되는 것을 고려하여 총 40번 반복한 후 해당 세션을 종료하였다.



Figure 23. 기존 방식의 수확작업 세션

두 번째로, 기존 방식의 작업동작 모사에 해당하는 세션을 진행하였다. 실제 작업차 위에 상자를 2층으로 쌓아 작업하는 것과 유사한 환경으로 구성하였고, 모형 과실의 배치는 모든 세션에서 동일하다. 벽면에 부착된 모형 과실을 양손으로 접촉한 후, 과실 상자 바닥에 왼손을 접촉하는 동작을 40회 반복한 후, 이어서 약 15 kg이 가중된 상층부 상자와 하층부 빈 상자를 교대하는 동작을 수행하여 해당 세션을 마무리하였다.

5.5 물리적 데이터 취득

작업자의 신체 조건이나 상태에 따라 작업 시 측정된 생리적 데이터 측정값이 상이하기 때문에 신체 출력을 물리적으로 측정하여 그에 따른 생리적 신호를 표준화(Normalization)하였다. 신체의 물리적 출력을 측정하기 위해 사용되는 실내용 싸이클 에르고미터(Ergometer)를 이용한 운동 평가를 통해 피실험자의 일률(W)을 측정하였다(Figure 24).

피실험자가 휴식기 심박으로부터 출력을 가함으로써 증가하는 심박 데이터를 1초 간격으로 수집하고, 이를 통해 심박에 대한 일률의 관계를 회귀 분석하여 얻을 수 있다. 피실험자 별 심박-일률 회귀분석 결과를 바탕으로 각 세션의 노동 강도를 물리적 수치인 일률로 비교할 수 있다. 피실험자가 휴식기 심박일 때 신체출력 50 W 에서 시작하여, 30초 간격 마다 25 W씩 출력을 높여가며, 피실험자가 지시를 원활히 따르기 불가능한 지점까지 진행한다.

5.6 인간공학적 작업평가

각 세션의 시작과 종료까지의 범위에 대해 취득한 영상을 1초 간격으로 샘플링하였다. 샘플링에 대해 각각 OWAS, RULA, REBA의 체크리스트형 인간공학적 평가도구를 통해 작업 동작을 평가하였다.



Figure 24. 싸이클 에르고미터를 이용한 심박수-일률 측정

6 결과 및 고찰

6.1 생리학적 데이터

6.1.1 분당심박수 분석

각 작업 세션 별 심박 데이터로부터 작업 시작부터 종료까지의 평균 분당심박수와 최고 분당심박수를 구하였다. 작업 전, 후의 최저 분당심박수를 검출하여 휴식기 심박으로 설정하였다. 세션 동안 측정된 평균 분당심박수는 작업의 전반적인 강도를 대표하며, 최대 분당심박수는 작업 중 순간적인 신체 부하를 반영한다. 기존 방식의 작업과 개발된 장비를 이용한 작업으로 구분하여 평균 분당심박수, 최대 분당심박수, 그리고 휴식기 심박으로부터 평균심박까지의 증가율을 대상으로 비모수 대응표본 검정을 실시하였다 (Table 6). 분석 결과, 각 세션 별 평균 분당심박수와 최대 분당심박수, 심박증가율 모두 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$).

Table 5. 각 작업 방법 별 분당심박수 분석 결과

변수		평균
평균 분당심박수 (bpm)	기존 방법	105.31
	도입 방법	96.77
최대 분당심박수 (bpm)	기존 방법	115.00
	도입 방법	102.69
심박증가율 (%)	기존 방법	36.44
	도입 방법	25.22

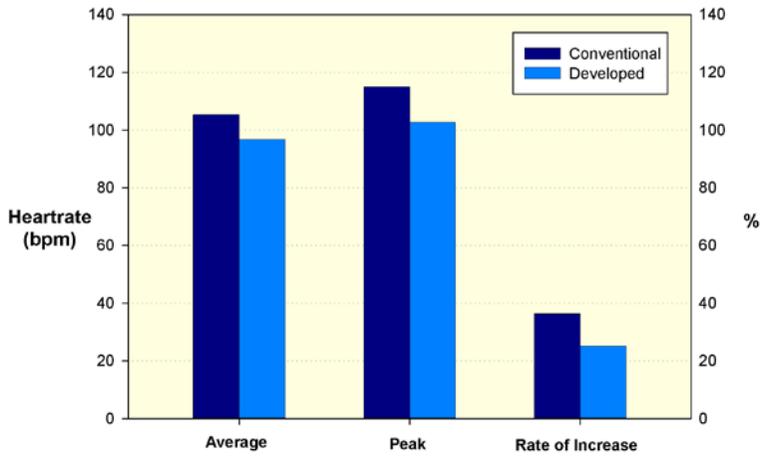


Figure 25. 세션 별 평균심박수, 최대심박수, 심박증가율

Table 6. 분당심박수 대응표본 검정 결과 (도입 방법 - 기존 방법)

		평균순위	Z	p
평균 분당심박수	음의순위	7.73	-2.763	* 0.004
	양의순위	3.00		
최대 분당심박수	음의순위	7.82	-2.832	* 0.002
	양의순위	2.50		
심박증가율	음의순위	7.73	-2.760	* 0.003
	양의순위	3.00		

(Wilcoxon 부호-순위 검정, p는 양측 유의확률)

6.1.2 주관적 작업강도 분석

피실험자의 주관적인 작업의 강도를 분석하기 위하여 각 작업 별 Borg scale을 조사한 결과, 기존 작업과 새로운 장비를 이용한 작업 간 주관적 작업 강도에 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ($p < 0.05$) (Table 8).

Table 7. 각 작업 방법 별 주관적 작업강도 분석 결과

변수		평균
주관적 작업강도	기존 방법	16.54
	도입 방법	12.08

Table 8. 주관적 작업강도 대응표본 검정 결과(도입-기존)

		평균순위	Z	p
주관적 작업강도	음의순위	7.00	-3.211	* 0.000
	양의순위	0.00		

(Wilcoxon 부호-순위 검정, p는 양측 유의확률)

6.1.3 근전도 분석

각 작업 세션 별로 획득한 피실험자의 근전도 데이터를 가공하여 얻은 근전도 신호의 평균값과 IEMG(Integrated EMG)값을 분석하였다. 좌, 우 상부승모근을 제외한 모든 근육에서 개발된 장비를 이용한 작업이 기존 작업에 비해 근전도 신호의 평균값이 작은 것으로 나타났다(Figure 26). IEMG값에서도 마찬가지로, 좌측 상부승모근을 제외한 모든 근육에서 기존 작업보다 도입된 작업의 데이터가 더 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다(Figure 27).

도입 방법 세션에서 상부승모근의 평균 근전도신호의 크기가 기존 방법에 비해 크게 나타난 것은, 과실 수확 상자가 허리보다 위에 위치하기 때문

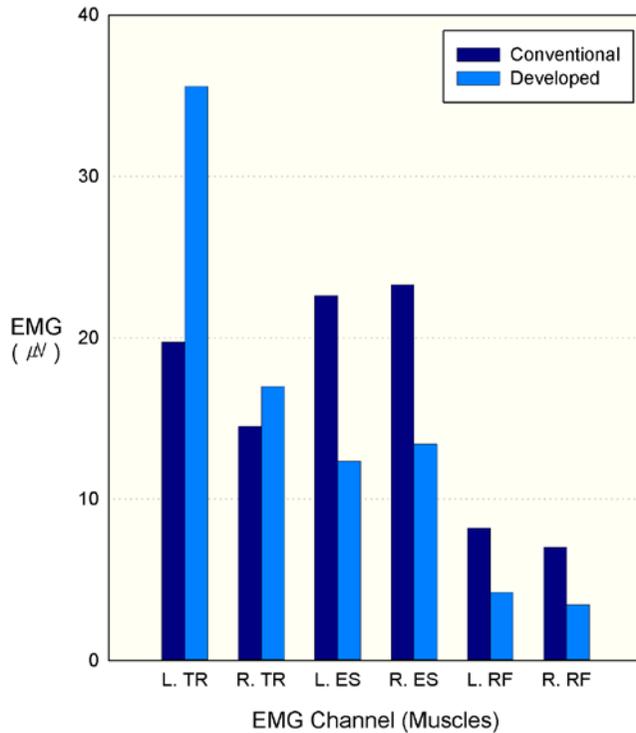


Figure 26. 근육 별 평균 근전도 신호.

(TR: upper trapezius, ES: lumbar erector spinae, RF: rectus femoris)

에 손을 항상 들고 있어야 하는 것과 관계가 있는 것으로 보인다. 따라서 수확상자를 향해 뻗는 좌측의 상부승모근 근전도 데이터가 평균값, IEMG 모두 크게 나타난 것을 알 수 있다. 우측 상부승모근의 경우, 평균 근전도 신호가 기존 작업보다 도입 작업에서 더욱 높게 나왔으나 IEMG값은 더 적은 것으로 나타났다. 이는 기존 작업이 도입 작업에 비해 소요시간이 긴 점이 Integrated EMG 값에 영향을 미친 것으로 볼 수 있다.

근육 별, 작업 별 평균 근전도신호를 검정한 결과, 우측 상부승모근을 제외한 모든 근육의 근전도가 기존 작업 방법과 도입 작업 방법 간 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$) (Table 10).

Table 9. 근육 별 평균 근전도신호 분석 결과 (단위 : μV)

	변수	평균
L. TR	기존 방법	19.75
	도입 방법	35.57
R. TR	기존 방법	14.51
	도입 방법	17.00
L. ES	기존 방법	22.61
	도입 방법	12.32
R. ES	기존 방법	23.30
	도입 방법	13.40
L. RF	기존 방법	8.21
	도입 방법	4.20
R. RF	기존 방법	7.02
	도입 방법	3.45

Table 10. 평균 근전도신호 대응표본 검정 결과(도입-기존)

		평균순위	Z	p
L. TR	음의순위	1.00	-3.110	* 0.000
	양의순위	7.50		
R. TR	음의순위	5.50	-0.489	0.625
	양의순위	8.75		
L. ES	음의순위	7.42	-3.040	* 0.001
	양의순위	2.00		
R. ES	음의순위	7.42	-3.040	* 0.001
	양의순위	2.00		
L. RF	음의순위	7.82	-2.830	* 0.002
	양의순위	2.52		
R. RF	음의순위	7.46	-3.076	* 0.001
	양의순위	1.50		

(Wilcoxon 부호-순위 검정, p는 양측 유의확률)

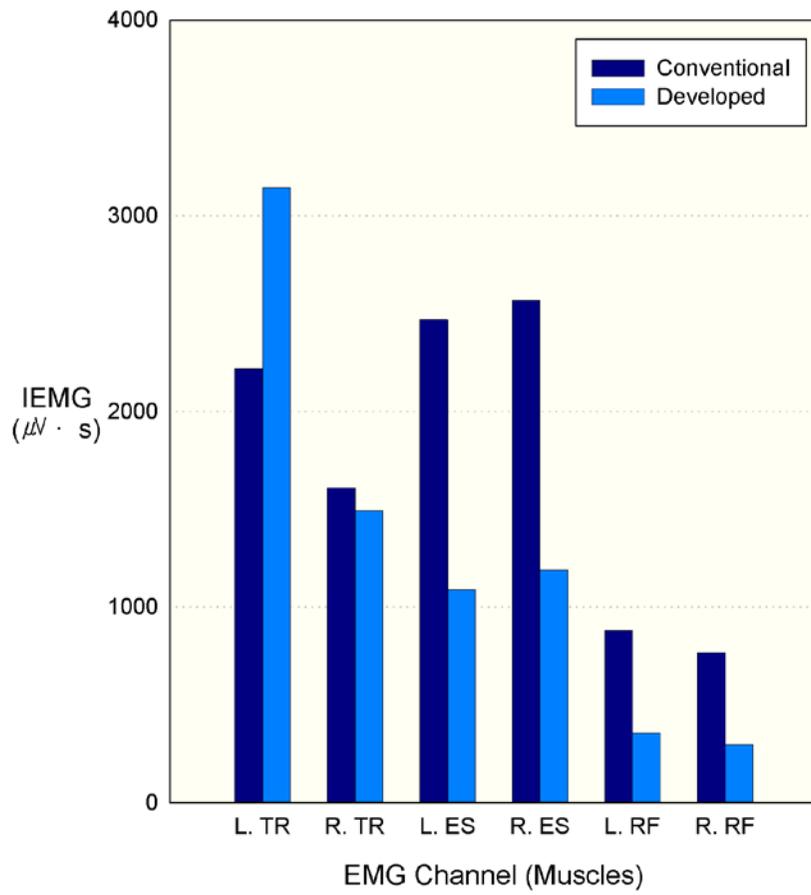


Figure 27. 근육 별 IEMG
 (TR: upper trapezius, ES: lumbar erector spinae, RF: rectus femoris)

Table 11. 근육 별 IEMG 분석 결과

(단위 : $\mu V \cdot s$)

변수		평균
L. TR	기존 방법	2218.77
	도입 방법	3143.69
R. TR	기존 방법	1608.77
	도입 방법	1493.69
L. ES	기존 방법	2468.85
	도입 방법	1087.23
R. ES	기존 방법	2567.31
	도입 방법	1188.46
L. RF	기존 방법	879.38
	도입 방법	356.42
R. RF	기존 방법	767.69
	도입 방법	298.21

Table 12. 근육 별 IEMG의 대응표본 검정 결과(도입-기존)

		평균순위	Z	p
L. TR	음의순위	5.50	-2.411	* 0.013
	양의순위	7.27		
R. TR	음의순위	7.30	-1.922	0.057
	양의순위	6.00		
L. ES	음의순위	7.00	-3.180	* 0.000
	양의순위	0.00		
R. ES	음의순위	7.00	-3.180	* 0.000
	양의순위	0.00		
L. RF	음의순위	7.00	-3.180	* 0.000
	양의순위	0.00		
R. RF	음의순위	7.00	-3.180	* 0.000
	양의순위	0.00		

(Wilcoxon 부호-순위 검정, p는 양측 유의확률)

근육 별, 작업 별 IEMG 값의 비모수 검정 결과를 살펴보면, 우측 상부승모근을 제외한 모든 근육의 IEMG 값이 작업 방식 간 유의한 차이를 보이는 것을 알 수 있다($p < 0.05$) (Table 12).

6.2 물리적 데이터

6.2.1 일률-분당심박수 회귀분석

운동 평가를 통해 얻어진 동일 시간축의 일률(Watt) 값과 분당심박수 (bpm) 값의 데이터를 분석하기 위해 생체신호 분석 프로그램 GoldenCheetah를 사용하였다. 분당심박수의 경우, 신체의 운행뿐 만 아니라 심리적인 요인에도 쉽게 반응하므로 매우 잘 통제된 환경에서 실시한

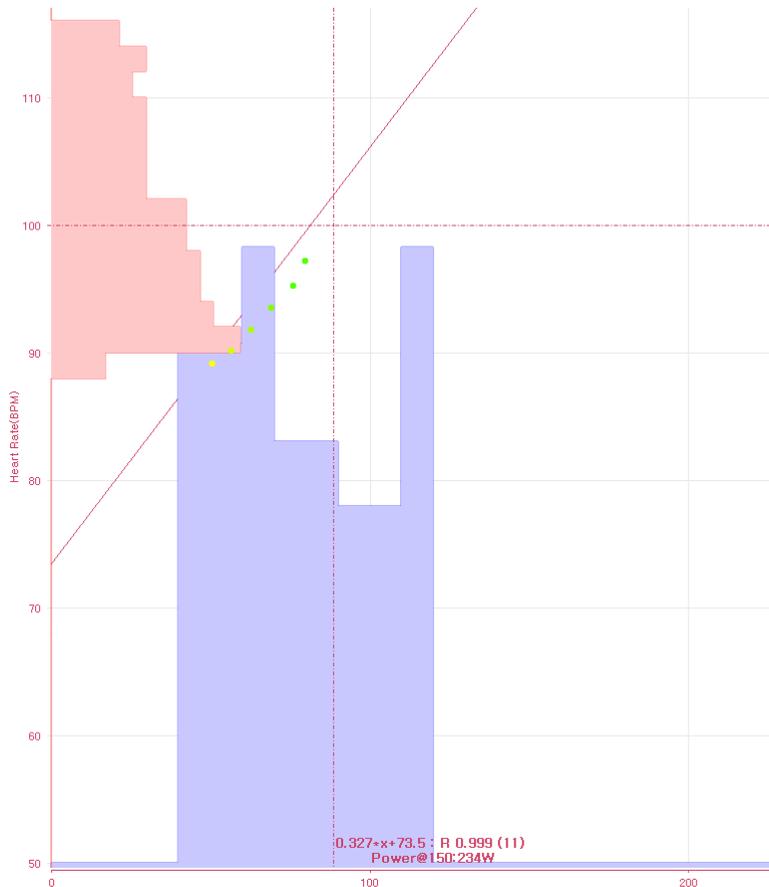


Figure 28. GoldenCheetah를 이용하여 얻은 Hr-Pw 선형회귀식

운동 평가 결과를 이용하여야 유의한 관계를 가지는 데이터를 얻을 수 있다. GoldenCheetah의 Hr-Pw 회귀분석 기능을 이용하여 결정계수 R^2 가 0.9 이상인 회귀식을 샘플 별로 구하였다.

6.2.2 작업 강도 평가

샘플 별 Hr-Pw 선형회귀식을 바탕으로 기존 방식 작업과 개발된 장비를 이용한 작업에서 나타난 평균심박수를 대입하여 해당 작업에 대한 추정 일률(W)을 도출하였다. 이를 비모수 대응표본 검정을 통해 분석한 결과, t 값이 유의한 수준에 해당하는 것으로 나타났으며 작업 방식 간에 유의한 추정 일률의 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$) (Table 13).

Table 13. Hr-Pw 선형회귀식을 이용한 추정 일률의 분석 (단위 : W)

변수	평균	표준편차	Z	p
추정 일률 (W)	기존 방법	121.35	-2.824	* 0.002
	도입 방법	118.23		

(Wilcoxon 부호-순위 검정, p 는 양측 유의확률)

생리적 생체신호인 분당심박수는 샘플 간의 차이가 심할 뿐 만 아니라 한 샘플의 데이터도 통제되지 않은 상황에서 매우 다양한 양상으로 나타나기 때문에, 이를 물리적 신호인 일률로 환산하는 표준화 작업이 필요하다. 작업의 일률(Watt)을 알 수 있다면, 해당 작업을 수행하는 데 필요한 에너지의 양(J)을 구할 수 있기 때문에 작업의 동선이나 기구, 장비 등을 설계

할 때 에너지 소비량을 지표로 삼을 수 있다.

본 연구에서 수행한 표준화 결과, 기존 작업 방식과 개발된 장비를 이용한 작업 방식 간 추정 일률의 차이가 유의한 것으로 나타나, 잘 통제된 상황에서 운동 평가를 통해 얻은 Hr-Pw 선형회귀식을 통해 특정 농작업의 작업 강도를 일률로 나타내어 비교 분석할 수 있을 것으로 보인다.

6.3 인간공학적 작업평가 결과

6.3.1 OWAS

모든 피실험자에 대해 기존 방식의 작업과 개발된 장비를 이용한 작업의 샘플링을 OWAS로 분석한 결과, 기존 방식의 작업에서 위험한 수준의 동작이 관찰되었다. 장비를 도입한 작업의 경우, 모든 작업 동작이 안전한 범위에 해당하였다(Table 14).

도입 작업을 통해 위험한 수준의 OWAS 등급 비율을 제거하였으나, OWAS가 평가한 기존 방식 작업을 살펴보면 즉시 교정이 필요한 4단계의 위험 수준은 없는 것으로 나타났다(Figure 29). 매우 단순하고 상, 하 지의 세부 동작을 고려하지 않으며 반복동작 특성이 반영되지 않는 OWAS 평가 방법은 작업의 위험도를 과소평가하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.

Table 14. OWAS 체크리스트 평가 위험수준 비율

위험 수준	기존 방법	도입 방법
1	26 %	59 %
2	65 %	34 %
3	9 %	0 %
4	0 %	0 %

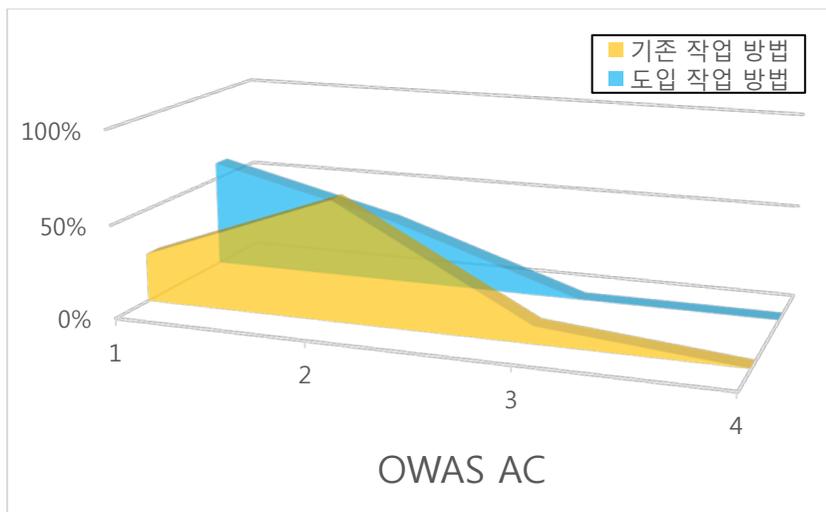


Figure 29. 작업 방법 별 OWAS 위험수준

6.3.2 RULA

피실험자 별, 작업 방법 별 샘플링을 대상으로 RULA 체크리스트 평가를 수행하였다. 평가 결과를 분석한 내용은 아래와 같다(Table 15).

Table 15. RULA 체크리스트 평가 위험수준 비율

위험 수준	기존 방법	도입 방법
1	1 %	1 %
2	0 %	0 %
3	47 %	69 %
4	9 %	30 %
5	3 %	0 %
6	34 %	0 %
7	5 %	0 %

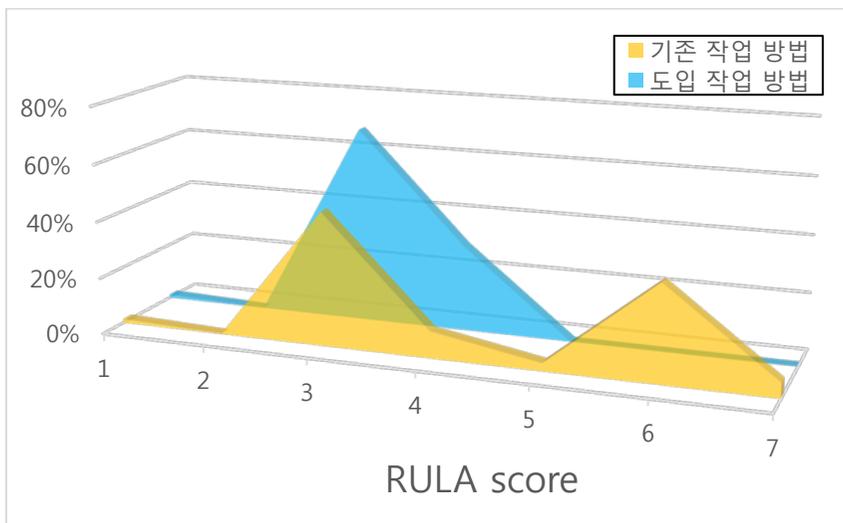


Figure 30. 작업 방법 별 RULA 점수

RULA 체크리스트 평가는 OWAS와 달리, 팔이나 다리뿐만 아니라 손목, 목, 작업 반복성을 반영하기 때문에 보다 정확한 작업 평가가 가능하다. RULA를 통해 평가한 기존 방법 작업의 경우, 빠른 개선이 필요한 5, 6 수준의 점수, 즉각적인 개선이 시급한 7 수준의 점수가 포함되어 있다. 주로 허리를 굽히며 몸통과 허리를 비트는 동작과 상자를 드는 동작, 상자를 내려놓는 동작에서 높은 수준의 RULA 점수를 획득하는 것으로 나타났다. 새로 도입된 장비를 이용한 작업의 경우, 위험한 수준에 해당하는 동작이 완전히 제거된 것으로 나타났다.

6.3.3 REBA

다른 체크리스트 평가와 동일한 샘플링을 대상으로 REBA 체크리스트 평가를 수행하였다. 평가 결과, 조치가 필요한 ‘보통’ 수준인 4 - 7 에 해당하는 비율이 기존 방법에 비해 도입 방법에서 줄어들었을 뿐 만 아니라, 5 - 7 에 해당하는 작업 동작이 제거된 것을 알 수 있다(Table 16).

REBA 체크리스트 평가에서 높은 위험 수준으로 평가된 동작으로는, 허리와 목을 구부리며 비트는 동작, 상자를 드는 동작, 상자를 내려놓는 동작이 해당하는 것으로 나타났다.

Table 16. REBA 체크리스트 평가 위험수준 비율

위험 수준	기존 방법	도입 방법
1	1 %	1 %
2	48 %	67 %
3	5 %	8 %
4	8 %	24 %
5	0 %	0 %
6	3 %	0 %
7	35 %	0 %

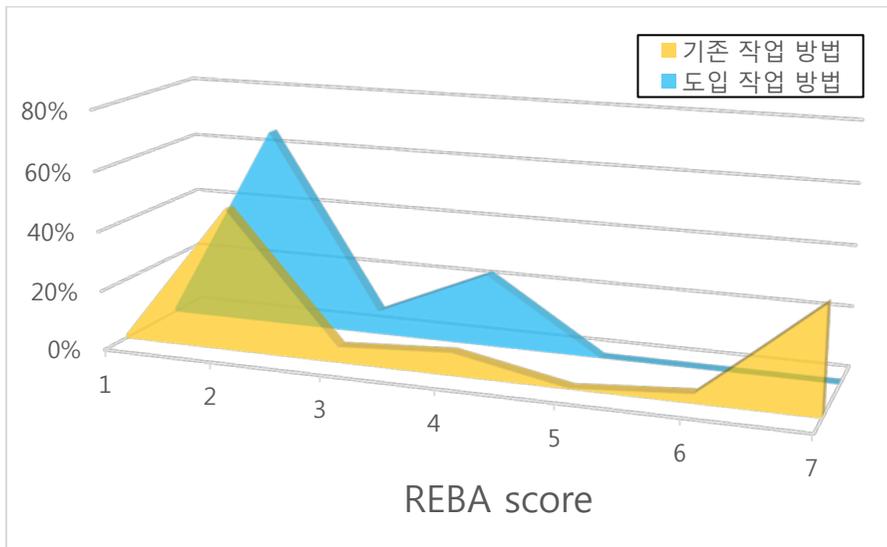


Figure 31. 작업 방법 별 REBA 점수

6.4 소요 시간

각 작업 방식 별 소요 시간을 측정한 결과, 기존 방식과 개발된 장비를 이용한 작업 방식 간 소요시간 평균에 유의한 차이($p < 0.05$)가 있으며, 기존 방식에 비해 도입 방식의 소요시간 평균이 23.3 % 단축된 것으로 나타났다(Table 17). 상자 교대작업 절차를 제거함으로써 작업자의 신체부담이 줄어들었을 뿐 만 아니라, 불필요한 동작이 제거되어 수확 작업 효율 역시 증가한 것으로 볼 수 있다.

Table 17. 작업 소요시간 분석 결과 (단위: 초)

변수	평균	표준편차	Z	p
소요 시간	110.59	15.58	-3.180	* 0.000
	89.68	13.09		

(Wilcoxon 부호-순위 검정, p 는 양측 유의확률)

7 요약 및 결론

충격이 과실의 신선도에 미치는 영향을 제거하기 위하여 토마토, 파프리카 온실 내 수확장으로부터 선별장까지 이르는 모든 작업 절차에 대해 무선 가속도계와 데이터 수집장치를 구성하고, 체크리스트형 인간공학적 평가 도구를 이용하여 충격원을 조사하였다. 작업자가 무거운 상자를 다루는 상자 교대작업이 과실에 최대 6 g 에 해당하는 충격을 가하여 신선도를 저해할 뿐 만 아니라, 작업자에게 근골격계 질환을 유발할 수 있는 수준인 OWAS AC 4 에 해당하는 것으로 나타났다. 해당 작업 절차를 제거하기 위하여 자동 교대장치를 포함한 새로운 시설원예용 작업기계를 설계하였다.

설계된 장비의 효과를 검증하기 위하여 실험실 내에 모의 수확환경을 구성하였고, 설계를 바탕으로 모형 장비를 제작하였다. 피실험자에게 실제 수확을 바탕으로 모의 동작을 교육하였으며, 피실험자의 분당심박수와 6 가지 주동근에 대한 근전도를 수집하기 위한 센서를 부착하였다. 기존 수확차를 이용한 작업의 모사와 개발된 장비를 이용한 작업의 모사로 두 번의 실험 세션을 진행하였다. 모의 동작을 진행하는 동안, 분당심박수 측정, 근전도 측정, 작업자 촬영이 이루어졌다. 세션이 끝난 후, 주관적 작업강도를 조사하였으며 물리적 데이터 취득을 위한 운동 평가를 수행하였다. 싸이클에르고미터를 이용하여 피험자의 분당심박수와 일률을 동시에 측정하였다.

생리학적 데이터인 분당심박수의 경우, 평균치 및 최대치 모두 세션 별

유의한 차이($p < 0.05$)가 있는 것으로 나타났다. 주관적 작업강도를 분석한 결과, 기존 방법에 비해 도입 방법의 주관적 작업강도가 36.92 % 감소하였다. 근전도 분석에서는 우측 상부승모근을 제외한 모든 근육의 근전도 평균과 IEMG값 모두 세션 별 유의한 차이($p < 0.05$)를 보였다. 근전도 평균의 경우, 좌측 상부승모근이 도입된 방법의 작업에서 높게 나타났는데, 작업자의 상반신에 수확 상자가 위치해 있기 때문에 좌측 상지를 빈번히 사용한 결과로 보인다. 상부 승모근을 제외한 모든 근육에서 도입 방법 세션의 근전도평균, IEMG값이 낮았다.

운동평가 결과로 얻은 동일 시간축의 분당심박수와 일률 데이터를 생체 신호분석 프로그램인 GoldenCheetah 를 이용하여 회귀분석하였다. 피험자의 세션 별 평균 분당심박수를 모델식에 대입하여 피험자 별 세션 별 추정 일률(Watt)을 도출하였다. 각 세션 간 추정 일률이 유의한 차이 ($p < 0.05$)를 보였다. 운동 평가를 통해 구할 수 있는 심박-일률 회귀모델을 이용하여 여러 농작업을 물리적 지표(W)로 표현할 수 있을 것으로 보인다.

피험자의 세션 별 작업 촬영 샘플링에 대해 각각 OWAS, RULA, REBA 로 평가하여 위험도를 측정하였다. 기존 작업의 경우, 높은 위험 수준의 점수를 획득하였다. 도입 작업 세션의 경우 OWAS, RULA, REBA에서 모두 위험수준의 작업이 제거된 것으로 나타났다. 피험자 별 각 세션의 작업 소요시간을 측정한 결과, 기존 방법에 비해 도입 방법의 소요시간이 23.3 %

단축된 것으로 나타나 작업자의 신체부담이 감소하였을 뿐 만 아니라, 수확
작업 효율 역시 증가한 것으로 볼 수 있다.

본 연구를 통해 온실 내 작업을 개선할 수 있는 작업편이장비를 설계하
였고, 그 효과를 인간공학적 측면에서 검증하였다. 문제가 되는 작업 절차
를 효과적으로 제거하여 근골격계 질환 예방 효과 및 과실의 신선도 보존
효과를 예상할 수 있다. 또한, 본 연구에서 수행된 운동 평가를 통해 농작
업 절차를 에너지 효율 측면에서 분석할 수 있을 것으로 보인다.

8 참고문헌

- 1 고용노동부, “산업재해분석”, 2016.
- 2 공용구, 이수진, 이경숙, 한준구, 김대민, “Development of an Ergonomic Checklist for the Investigation of Work-related Upper Limb Disorders in Farming – AULA: Agricultural Upper-Limb Assessment”, 대한인간공학회지, 30(4), 2011, pp. 481-489.
- 3 공용구, 한준구, 김대민, “농작업에서 발생하는 하지자세의 근골격계 질환 위험도 평가를 위한 인간공학적 평가도구 개발”, 대한인간공학회지, 29(6), 2010, pp. 933-941.
- 4 구혜란, 김효철, 신용석, 이경숙, “소규모 작업장 작업자들의 인간공학적 평가 및 정량적 부하 평가: 한과작업장을 중심으로”, 농촌지도와 개발, 19(4), 2012, pp. 1021-1039.
- 5 기도형, 박기현, “작업 자세 평가 기법 OWAS, RULA, REBA 비교”, 한국안전학회지, 20(2), 2005, pp. 127-132.
- 6 김관우, 채혜선, 이경숙, “레일이동형 작업의자를 통한 포도 순치기작업 개선에 관한 연구”, 대한인간공학회 학술대회논문집, 2009, pp. 145-148.

- 7 김유창, "A Survey on Ergonomic Evaluation Methods of Agricultural Work for Preventing WMSDs", 대한인간공학회지, 30(4), 2011, pp. 465-472.
- 8 김유창, "A Survey on Ergonomic Evaluation Methods of Agricultural Work for Preventing WMSDs", 대한인간공학회지, 30(4), 2011, pp. 465-472.
- 9 김인수, "The Development and Ergonomic Evaluation of Work Clothes for Stock Farming Worker." 대한인간공학회 학술대회논문집 (2016): 562-565.
- 10 김흥기, "인력물자취급의 권장안전하중에 대한 생리학적 고찰", 대한인간공학회지, 16(3), 1997, pp. 23-36.
- 11 신충규, "샘플링 장면과 극단치 작업장면의 선택에 따른 작업평가 비교." 대한인간공학회 학술대회논문집 (2007): 509-512.
- 12 이경숙, 김관우, 채혜선, 김창한, 남서영, 이경미, 최연우, 박근상, "농작업자의 근골격계질환 예방과 작업 효율성 향상을 위한 농작업 편이장비의 평가", 대한인간공학회지, 29(4), 2010, pp. 495-503.
- 13 이경숙, 김효철, 채혜선, 김경란, 이수진, 임대섭, "인간공학적 작업개선을 위한 농업인 안전 기술 동향 연구", 대한인간공학회지, 29(2), 2010, pp. 225-239.
- 14 이규웅, 박성하, 유윤희, "상추 수확 및 포장작업을 위한 인간공학적 편이장

- 비 개발”, 한국산업경영시스템학회 추계학술대회 2009년 논문집, 2009, pp. 183-186.
- 15 이영진, “sEMG 분석을 이용한 신체적 작업부하의 정량적 평가”, 울산대학교 석사학위논문, 2012.
 - 16 이창민, 오연주, 유중현, 신광현, 유병철, “과수 및 밭작물의 작업형태를 고려한 편이장비의 인간공학적 개선”, 대한인간공학회 학술대회논문집, 2009, pp. 190-194.
 - 17 통계청, 농작물생산조사:채소생산량(과채류), 2016.
 - 18 한국산업안전보건공단, “근골격계질환 유해요인조사”, 2017.
 - 19 한국산업안전보건공단, “근골격계부담작업 유해요인조사 지침”, 2016.
 - 20 Arts, F. J. P., and H. Kuipers. "The relation between power output, oxygen uptake and heart rate in male athletes." *International journal of sports medicine* 15.05 (1994): 228-231.
 - 21 BORG, G.; LINDERHOLM, H. Exercise performance and perceived exertion in patients with coronary insufficiency, arterial hypertension and vasoregulatory asthenia. *Journal of Internal Medicine*, 1970, 187.1-6: 17-26.
 - 22 C.J.D. Luca, “The Use of Surface Electromyography in Biomechanics”,

- Journal of applied biomechanics, 13, 1997, pp. 135–163.
- 23 D. Rissén, B. Melin, L. Sandsjö, I. Dohns, U. Lundberg, “Surface EMG and psycho–physiological stress reactions in women during repetitive work”, *European Journal of Applied Physiology*, 83(2), 2000, pp. 215–222.
 - 24 F.A. Fathallah, “Musculoskeletal disorders in labor–intensive agriculture”, *Applied Ergonomics*, 41(6), 2010, pp. 738–743.
 - 25 Grazi, Giovanni, et al. "The power output/heart rate relationship in cycling: test standardization and repeatability." *Medicine and science in sports and exercise* 31.10 (1999): 1478–1483.
 - 26 International Labour Office (ILO), “Facts on Agriculture”, 2003.
 - 27 International Labour Office (ILO), “Ergonomic checkpoints in agriculture(2nd edition)”, 2014
 - 28 Inoue, Hidehiko. "Effect of tractor cultivation on heart rate and electrocardiogram RR intervals." 2017 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.
 - 29 J.H. Lawrence, C.J.D. Luca, “Myoelectric signal versus force relationship in different human muscles”, *Journal of Applied Physiology*, 54(6), 1983, pp. 1653–1659.

- 30 J.M. Meyers, J.A. Miles, J. Faucett, I. Janowitz, D.G. Tejada, J.N. Kabashima, "Ergonomics in Agriculture: Workplace Priority Setting in the Nursery Industry", *AIHA*, 58(2), 1997, pp. 121–126.
- 31 Karhu, P. Kansi, I. Kuorinka, "Correcting working postures in industry: A practical method for analysis", *Applied Ergonomics*, 8(3), 1977, pp. 199–201.
- 32 Karhu, P. Kansi, I. Kuorinka, "Correcting working postures in industry: A practical method for analysis", *Applied Ergonomics*, 8(3), 1977, pp. 199–201.
- 33 L. McAtamney, E.N. Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders", *Applied Ergonomics*, 24(2), 1993, pp. 91–99.
- 34 M. Hagberg, B. Silverstein, R. Wells, M.J. Smith, H.W. Hendrick, P. Carayon, M. Perusse, "Work related musculoskeletal disorders (WMSDs)", Taylor & Francis, 1995.
- 35 NIOSH, "SIMPLE SOLUTIONS: ERGONOMICS FOR FARM WORKERS", U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2001.
- 36 P. Konrad, "The ABC of EMG: a practical introduction to kinesiological

- electromyography," Scottsdale AZ Noraxon USA, 2005, pp.31-32.
- 37 P. van Wely, "Design and disease", *Applied Ergonomics*, 1(5), 1970, pp.262-269.
- 38 P.G.A.M. Jorna, "Spectral analysis of heart rate and psychological state: A review of its validity as a workload index", *Biological Psychology*, 34, 1992, pp. 237-257.
- 39 S. Hignett, L. McAtamney, "Rapid Entire Body Assessment (REBA)", *Applied Ergonomics*, 31, 2000, pp. 201-205.
- 40 S.A. McCurdy, S.J. Samuels, D.J. Carroll, J.J. Beaumont, L.A. Morrin, "Agricultural Injury in California Migrant Hispanic Farm Workers", *Am. J. Ind. Med.*, 44, 2003, pp. 225-235.
- 41 S.R. Kirkhorn, G. Earle-Richardson, R.J. Banks, "Ergonomic Risks and Musculoskeletal Disorders in Production Agriculture: Recommendations for Effective Research to Practice", *Journal of Agromedicine*, 15(3), 2010, pp. 281-299.
- 42 T.C. Hankins, G.F. Wilson, "A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measures of pilot mental workload during flight", *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(4), 1998, pp. 360-367.

Abstract

Ergonomic work evaluation, in terms of industrial safety and health, is conducted to improving work procedures to reduce the possibility of safety accidents and musculoskeletal disorders as well as to improve work efficiency by analyzing and evaluating work operations and procedures performed in industrial sites. A checklist-type tool that evaluates the risk according to the task posture classification is designed to allow the administrator to easily classify risk behaviors or postures through observation. Physiological signals such as EMG and heartrate increase as physical activities become more active, therefore it is an appropriate indicator used in the evaluation of work burden.

The results of the preliminary study on the source of impact in the greenhouse revealed that manual work, including lifting heavy boxes during harvesting operations, not only affects fruit freshness but also increases the possibility of developing musculoskeletal diseases as heavy loads are frequently applied to the worker's body. Using the NIOSH's and ILO's ergonomic checklists for agriculture, a newly developed greenhouse trolley that includes an automatic rotating device was developed (developed equipment). This developed equipment eliminates the need to stoop or bend low.

A simulation of the actual harvesting environment was constructed to verify the intended effects that could be expected when using the developed equipment in the field. A simulated harvesting task was performed using both the existing equipment and developed equipment, and the EMG, heartrate, and perceived work intensity were measured concurrently. The video of the simulated task was evaluated using the work posture checklist evaluation tools (OWAS, RULA and REBA). After the simulated task was completed, a cycle ergometer test was performed to obtain a model of the subject's heartrate and power output.

The mean and maximum heartrate corresponding to the physiological signals were lowered to a meaningful level ($p < 0.05$) in the simulation using the developed equipment as compared to the simulation using the existing equipment. The EMG and IEMG values in all the muscles except the upper trapezius decreased significantly ($p < 0.05$) when using the developed equipment, thereby meaning that the muscle burden was reduced. The level of perceived exertion of the work using the developed equipment also decreased by 36.92%.

The model equation was obtained by a regression analysis of the heartrate and power output data obtained from the cycling ergometer, and the estimated watt of each task was calculated using the average heartrate. There was a significant difference ($p < 0.05$) between the estimates of each method, and the

estimate using the developed equipment as compared to the existing equipment showed a decrease of 2.57%. The heartrate–power output regression model using the cycling ergometer can be used to estimate the burden of the task and evaluate the work in terms of energy efficiency.

As a result of the evaluation of the sampling based on the checklist evaluation tools, it was found that simulated tasks performed using the existing equipment included high risk level postures as depicted in the checklists. On the other hand, simulated tasks conducted using the developed equipment did not include any high risk level postures. Using the videos of the simulations, the time taken to complete the task was measured and analyzed accordingly, and it was revealed that time taken to complete the task when using the developed equipment was reduced by 23.3% as compared to when using the existing equipment.

Summarizing the results of this study, it can be seen that the developed greenhouse working equipment can reduce the physical burden of the worker and improve the efficiency of the harvesting work, and can be expected to prevent musculoskeletal diseases in addition to preserving the freshness of fruits.