

Literature Review on Job Rotation

Sang-Young Yoon, Myung-Chul Jung

Department of Industrial Engineering, Ajou University, Suwon, 443-749

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to review the studies on job rotation with various points of view and to classify the studies considering the approach methods. **Background:** Various work interventions were carried in order to prevent the work-related musculoskeletal disorders(WMSDs) and job rotation was considered as one of the simple and effective methods. **Method:** Previous studies were systematically collected with the combination of keywords such as job, task, rotation, allocation, line balancing, etc. Collected studies were classified into three categories: field study, laboratory study and optimization approach study. **Results:** Field studies showed that most studies focused on the evaluation of the factors causing the musculoskeletal disorder. Moreover, the effect of job rotation could be hard to identify because it required a long-period close observation. Laboratory studies covered only simple aspects of tasks or movements. Optimization approach studies showed the systematic approach to establish the job rotation scheme though many limitation and assumptions were adopted. **Conclusion:** This study collected and classified the previous studies on job rotation and presented the different approaches across various research areas. **Application:** The results of this study could help the practitioner and ergonomist how to establish the job rotation scheme.

Keywords: Job rotation, Musculoskeletal disorder, Field study, Laboratory study, Optimization approach study

1. Introduction

산업 현장에서 발생하는 근골격계 질환 발생 건수는 2005년도에 일시적으로 감소하였으나, 2007년 까지 증가하는 추세를 나타내었다. 2008년 이후 근골격계 질환 발생 건수는 감소하는 추세이나 업무상 질병자 중 근골격계 질환자가 차지하는 비율은 꾸준히 증가하고 있는 추세이다(Kim et al., 2010). 또한 근골격계 질환은 작업자의 작업 능력을 저하시키며, 결근 등을 야기할 수 있기 때문에, 산업 현장에서는 직접적으로 노동력 손실로 이어질 수 있다. 따라서 많은 사업장에서는 근골격계 질환을 야기할 수 있는 유해요인을 찾아내어 개선활동을 실시하는 등 근골격계 질환을 예방하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

근골격계 질환 예방을 위해 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 인간공학 프로그램 실시를 권장하고 있으며(NIOSH, 1997), 자동차(Butler, 2003)나 조선업(Pyo and Jeong, 2007) 등에서 인간공학 프로그램을 운영하여 근골격계 질환으로 지출되는 비용을 절감하였다는 사례가 보고되었다. 인간공학 프로그램은 근골격계를 예방하기 위한 조치를 공학적 개선과 관리적 개선으로 구분하고 있다. 산업현장의 많은 부분에서 공학적 개선이 이루어질 수 있지만, 즉각적으로 적용하는 것이 어렵거나 적절한 공학적 개선이 불가능한 경우에는 근골격계 질환을 예방하기 위해 관리적 개선을 실시하고 있다. 관리적 개선의 대표적인 방법으로는 신체적 부담이 존재하는 작업을 실시하는 작업자의 누적되는 작업부하를 해소할 수 있도록 다양한 작업을 순환하며

Corresponding Author: Myung-Chul Jung, Department of Industrial Engineering, Ajou University, Suwon, 443-749.

Phone: +82-31-219-2981, E-mail: mcjung@ajou.ac.kr

Copyright©2013 by Ergonomics Society of Korea(pISSN:1229-1684 eISSN:2093-8462). All right reserved.

©This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. <http://www.esk.or.kr>

작업하도록 하는 작업순환이 대표적이다.

작업순환은 근골격계 유해요인을 완벽하게 제거하지는 못하지만, 서로 다른 근육군을 사용하게 하여 작업자가 근골격계 질환으로부터 안전하도록 하는 것이다. Mathiassen (2006)은 작업순환 시 담당하는 작업이 변화성(variation)과 다양성(diversity)을 가질 때 효과적으로 근골격계 질환을 예방할 수 있으며, 근골격계 질환 유해요인이 특정 작업자에게 집중되는 것을 예방하도록 작업순환 계획을 수립하는 것을 제안하였다. 그러나, 작업순환에 대한 연구는 주로 단일 사업장에 특화된 작업순환을 실시한 후 효과를 평가하거나, 작업순환 계획을 단순히 다음 공정으로 작업순환을 하거나 임의로 작업순환 계획을 수립하여 특정 신체 부위에 누적되는 작업부하를 예방하는 것에 큰 효과를 보지 못하는 경우가 많이 발생하고 있다. 최근에 와서야 Cannahan(2001)의 연구를 시작으로 최적화 기법이나 발견적 방법을 활용하여 작업자 요소를 추가한 라인밸런싱을 통해 작업자 배치나 작업순환 계획을 수립하는 연구들이 진행되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 인간공학 분야와 생산계획 분야에서 분리되어 진행되고 있는 작업순환 연구를 하나로 정리하고, 향후 근골격계 질환 예방을 위한 효과적인 작업순환 계획을 수립할 수 있는 연구 방향을 제시하는 것이다.

2. Method

본 연구에서는 사업장에서 작업순환 계획을 수립할 때 고려해야 하는 요인을 찾고 효과적인 작업순환 계획을 수립하는 방법론에 대한 조사를 실시하였다. 기존 연구는 논문 데이터베이스인 ScienceDirect, Scopus, Pubmed를 중심으로 검색하였으며, Google과 Google Scholar를 추가적으로 활용하여 1990년도 이후 연구를 중심으로 검색하였다.

검색에 사용된 키워드는 작업을 의미하는 "job", "task"와 순환 또는 할당을 의미하는 "rotation", "allocation" 등을 조합하여 주로 사용되었다. 또한 최근에 많은 연구가 이루어지는 라인밸런싱을 이용한 작업순환 계획을 포함하기 위해 "line balancing"과 "ergonomic", "worker", "human"을 함께 사용(AND)하여 작업자의 능력이나 인간공학적 부하의 밸런싱을 대상으로 한 연구를 포함하였다.

검색 결과, 총 260여 편이 검색되었으며, 2000년 이전에는 많지 않았으나 2004년 이후 매년 13~26편이 발표되는 것으로 나타났다. 검색된 연구 중 인적 자원 관리와 같은 인문학적 접근이 아닌 공학적인 측면에서 작업순환을 대상으로 하는 연구는 약 20%로 나타났으며, 본 연구에서는 총 32편을 선정하여 사업장에서의 현장 연구가 14편, 실험실

연구가 5편, 최적화 기법 연구는 13편이 선정되었다.

3. Results

3.1 Field study

작업순환에 관한 현장 연구는 작업순환 계획을 수립하기 위한 신체적 작업부하를 평가하거나 실제 사업장에 작업순환을 적용하여 나타나는 작업순환 효과를 평가하는 연구가 많이 이루어졌다. Jorgensen et al.(2005)은 미국의 중서부에 있는 제조업체를 대상으로 작업순환의 특징을 조사하였으며, 이 중 42.7%의 사업장에서 작업순환을 실시하는 것을 확인하였다. 작업순환은 회사의 규모가 클수록 작업관련 상해의 처리비용과 상해 발생 빈도를 줄이기 위해 작업순환을 실시하고 있으며, 신체의 다양한 부위에 작업부하가 분산될 수 있도록 작업시간분석을 실시하여 작업순환 계획을 수립하는 것으로 나타났다. 그러나 작업순환 계획이 신체적 부담 부위에 대한 의학적 평가나 인간공학적 관점에서 계획되는 것이 아니며, 품질 저하를 발생시키는 원인으로 지적되었다. 특히, Aptel et al.(2008)은 효과적으로 근골격계 질환 예방을 위한 작업순환 계획을 실시하기 위해서는 작업자가 작업계획 수립에 참여하는 것이 중요하다고 하였다. 작업자들은 작업순환이 작업의 다양화 측면에서는 긍정적으로 평가하지만, 누적되는 신체적 부담보다는 작업순환을 실시할 때 다양한 작업을 수행해야 하는 것에 부정적인 것으로 나타났다. Sato and Coury(2009)는 주관적 전신 불편도(whole-body rating of perceived exertion), 인간공학적 작업장 분석, 질환 발생, 병가(sick leave)의 관련성을 조사하는 과정에서 인간공학 평가자는 부자연스러운 자세와 반복작업을 근골격계 질환 유해요인으로 평가하는 반면, 작업자는 인력운반작업을 유해요인으로 평가하여 평가자와 작업자 사이에 다른 평가 경향이 존재하는 것을 확인하였다. 또한 작업자들이 작업에서 느끼는 주관적인 불편도가 서로 다른 작업부하를 구분할 수 있으므로, 다양한 단위작업을 포함하는 작업의 신체적 작업부하를 평가하는 것에는 작업자의 주관적 불편도를 통해 평가하는 것이 적합하다고 하였다.

일반적으로 작업순환은 대량 생산체계를 가진 조립라인에서 많이 실시되는 것으로 나타났다(Freiboth et al., 1997; Frazer et al., 2003; Möller et al., 2004; Weichel et al., 2010; Rodrigo et al., 2012; Jeon and Jeong, 2010). Freiboth et al.(1997)은 10개의 자동차 조립공장에 대해 작업순환과 작업주기에 대해 설문과 인터뷰를 실시하였으며, 조립 작업자들의 신체적 불편함에 대해 조사하였다. 작업순환은 모든 작업자들이 하나 이상의 작업을 익숙하게 수행해

야 하므로 공정의 지속적 향상이 이루어질 수 있는 장점이 있지만, 담당하는 작업 수와 작업주기는 작업의 특성을 고려하여 결정하여야 하며, 유사한 작업에 대해 작업순환을 실시하는 것을 권장하였다.

Frazer et al.(2003)은 자동차 조립라인 작업자의 요통(low back pain) 발생 위험을 생체역학적 모델을 이용하여 예측하였으며, 작업순환을 통해 요통의 위험요인을 작업자들이 나누어 부담하는 방법으로 요통 발생 위험성을 줄이고자 하였다. 그러나 신체 모델링을 통한 작업순환의 효과와 실제 작업장에서 작업순환이 이루어졌을 때의 근골격계 유해 정도 및 근골격계 질환 발병과의 연관성을 확인하지 못하였으며, 힘을 크게 발생시키는 것을 줄이는 것은 요통의 위험성을 줄이는데 도움을 줄 수 있으나, 잦은 반복이나 위험요인의 누적으로 인한 위험성도 함께 고려해야 한다고 주장하였다.

Möller et al.(2004)은 자동차 전자부품 조립라인의 작업자를 대상으로 작업의 신체적 부하 노출유사도를 정량적으로 평가하기 위해 어깨의 등세모근(trapezius)과 앞팔 펴 근육의 근전도 활성도를 1kg의 기준 무게(reference load)를 사용하여 표준화하였으며, 머리와 팔의 자세를 3축 가속도센서를 이용하여 각도를 측정하였다. 연구 결과, 작업주기가 달라짐에 따라 앞팔 펴 근육(forearm extensor)보다 어깨의 등세모근에서 나타나는 근전도의 변동계수(coefficients of variation, CV)값이 크게 나타나므로, 어깨보다는 앞팔의 다양한 근육을 사용할 수 있도록 작업순환 계획을 수립하는 것이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 작업순환을 실시할 경우, 신체적 부하의 변이도는 최대 6배까지 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 작업순환 계획을 수립할 때, 이전 작업에서의 앞팔 자세와 사용 근육을 고려하여 다양한 작업자세에서 다양한 근육을 사용할 수 있도록 작업순환 계획을 수립하여야 한다고 하였다.

Weichel et al.(2010)은 자동차 조립작업에 종사하는 고령의 작업자와 신체적으로 장애가 있는 작업자들을 대상으로 작업순환 특성을 조사하였다. 일반 작업자와의 작업순환 특성 차이를 비교하기 위해 주관적 평가를 통해 상황 대처 능력, 작업 능력, 불평 정도, 근골격계 관련 불편사항에 대해 조사를 실시하였으며, 객관적 자료로는 걸근, 신체적 장애, 작업순환에 대한 것을 조사하였다. 조사 결과 고령자와 장애가 있는 작업자는 일반 작업자에 비해 적은 수의 공정을 대상으로 작업순환이 이루어지고 있었으며, 이로 인해 상황 대처 능력과 작업 능력에 있어서 낮은 평가를 받는 것으로 나타났다. 작업순환에 있어서 대부분의 작업자는 이론적으로 작업순환이 가능한 공정 수보다 적은 공정을 대상으로 작업순환을 실시하는 것을 선호하는 것으로 나타났다.

Rodrigo et al.(2012)은 조립작업라인의 작업자가 작업순

환 계획에 따라 근육에 축적되는 젖산(lactic acid)의 양을 측정하여 작업순환의 영향을 평가한 결과, 힘든 작업에서 쉬운 작업으로 작업순환을 실시하는 경우에는 젖산의 축적이 감소하는 것을 확인하였으며, 3시간 이상 작업을 실시한 후에 작업순환을 실시하는 경우에 젖산 축적이 크게 증가하는 것을 발견하였다. 따라서 생리학적 지표인 젖산의 축적 정도를 기준으로 작업순환의 효과를 정량적으로 평가하여 작업순환 주기는 3시간 이하로 실시할 것을 권장하였다.

국내의 Jeon and Jeong(2010)은 자동차회사의 조립라인 작업자를 대상으로 연령별 작업순환 범위에 대한 연구를 실시하였으며, 45세 이상 작업자들은 40세 이하의 작업자의 비해 작업순환의 범위가 작은 것을 선호한다는 결과를 고려하여 작업자 연령에 맞게 작업순환의 범위를 결정하는 것이 효과적이라고 하였다.

자동차 조립라인 작업 이외에도 다양한 산업 분야에서 작업순환을 실시하여 근골격계 질환 발생을 예방하고자 하는 노력을 찾아볼 수 있었다. Kuijer et al.(1999)은 거리환경미화원을 대상으로 작업순환을 실시하는 그룹과 실시하지 않는 그룹으로 나누어 비교를 실시하였으며, 작업순환을 실시한 그룹에서는 실시하지 않은 그룹에 비해 다양한 신체 부위에 신체적 부하가 부과되는 것 확인하였지만, 작업자에게 부과되는 신체적 작업 강도를 줄이지는 못하는 것으로 나타났다.

Rissén et al.(2002)는 여성 현금계산원을 대상으로 작업순환 도입 전 후의 심물리학적 스트레스(psychophysiological stress), 목과 어깨의 통증, 어깨 근육 활성도에 대한 조사를 약 4년에 걸쳐 추적조사를 실시하였다. 장기적 추적조사 결과, 작업순환 실시 이전에 비해 다양한 작업자세가 관찰되었으며, 목과 어깨의 통증이 감소하고, 확장기 혈압이 낮아지는 것을 발견하여 작업순환의 효과를 확인하였지만, 작업순환을 실시하지 않은 기준 그룹이 없이 진행되었다는 한계점을 가지고 있다.

Kuijer et al.(2005)은 환경미화원을 대상으로 근골격계 통증으로 인한 병가(sick leave)를 줄이고 효과적으로 근골격계 통증으로부터 회복할 수 있는 방법으로 작업순환을 제안하였다. 작업순환을 실시한 결과, 작업순환을 실시하지 않을 때에 비해 근골격계 통증의 회복기간이 10.8% 정도 줄어드는 것을 확인하였지만, 근골격계 통증 호소 정도는 작업순환을 실시한 그룹에서 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 작업순환이 누적되는 신체적 부하를 해소하는 것에는 효과적이지만, 최대 부하(peak mechanical load)로 인하여 발생하는 작업부하는 해소하지는 못하는 것으로 나타났다.

Gallis(2006)는 그리스의 산림 작업자를 대상으로 작업관련 근골격계 질환 증상을 조사한 결과, 작업자들의 87%가 허리 통증을 호소하고 있으며, 약 50%는 목과 어깨의 통증

Table 1. Summary of field studies

Authors	Measure		
	Worker-subjective	Observer-subjective	Objective
Freiboth et al.(1997)	Task Analysis Inventory(observation and interview guideline)		-
Kuijjer et al.(1999)	Perceived load	Posture	-
Rissén et al.(2002)	CR 10	-	Blood pressure, Heart rate, EMG
Frazer et al.(2003)	-	Posture	Biomechanical model
Möller et al.(2004)	-	-	EMG, Joint angle
Jorgensen et al.(2005)	Questionnaire	Survey	-
Kuijjer et al.(2005)	Questionnaire	-	Recovery time
Gallis(2006)	Nordic questionnaire, Interview	-	-
Aptel et al.(2008)	INRS's questionnaire, Health problem	OREGE(Force, Posture, Movement repetitiveness)	-
Bao et al.(2009)	-	Strain Index	-
Sato and Coury(2009)	RPE, Whole-body discomfort	Ergonomic Workplace Analysis	-
Weichel et al.(2010)	Coping styles, Work ability, Musculoskeletal complaints, Irritation	Observation of the practiced job rotation for representative sample	Absenteeism, Job rotation, Physical impairments
Jeon and Jeong(2010)	Questionnaire	-	-
Rodrigo et al.(2012)	-	-	Lactic acid test

을 호소하는 것으로 나타났다. 따라서, 목, 어깨, 허리 부위에서 발생하는 근골격계 통증을 완화하기 위해서는 작업순환을 실시하는 것이 필요하다고 제안하였으며, 작업순환을 통해 특정 근육군의 부담을 덜어주는 것이 필요하다고 하였다.

작업순환의 효과 및 계획 수립을 위해 현장을 대상으로 실시한 연구에 대해 Table 1에 정리하였다. 작업순환 계획 수립을 위해 기존 연구에서 고려한 요소를 작업자가 직접 주관적으로 작업부하를 평가하는 것, 평가자가 작업자의 작업부하를 평가하는 것, 생리적 지표 또는 모델을 활용한 작업부하를 평가하는 것으로 구분하였다.

3.2 Laboratory study

작업순환의 효과를 현장에서 측정할 경우, 장기간에 걸쳐 연구가 수행되어야 하며 많은 비용이 소요되므로, 연구실에서 간단한 실험을 통해 작업순환의 효과를 평가하고자 하였다.

Escorpizo and Moore(2007)는 작업주기와 반복적인 집에서 놓기 작업간의 관계를 연구하였으며, 작업주기가 짧아질수록 집는 힘은 증가하지만, 작업시간과 휴식시간이 줄어드는 것을 발견하였다. 또한 주관적 불편도와 작업의 어려움

은 작업주기가 5초 이상인 경우에는 차이가 발생하지 않았으며, 작업주기가 손목의 동작범위에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Bosch et al.(2009)은 낮은 작업부하의 반복 조립작업에서 근육 피로 수준을 측정하여 반복 조립작업에서의 작업순환 계획 수립에 기초 자료를 제공하였다. 3시간 동안 낮은 수준의 반복 조립작업을 실시한 후, 근육의 활동량을 나타내는 진폭(amplitude)은 거의 변화가 없는 것으로 나타났지만, 주파수 분석을 통해 피로가 누적되는 것을 확인하였다. 특히, 작업물의 위치가 팔꿈치보다 높은 경우에는 피로의 누적이 비선형적으로 증가하는 경향을 나타내므로, 작업순환 계획을 수립할 때에는 작업의 난이도를 고려하여 작업순환 계획을 수립하는 것이 필요하다고 하였다.

Raina and Dickerson(2009)은 삼각근(deltoid)을 중심으로 작업순서가 근육의 피로에 미치는 영향을 연구하였으며, 팔을 앞과 옆으로 벌리는 두 가지 동작을 1초에 2번 반복적으로 움직이는 작업을 수행하도록 한 결과, 한 가지 동작만 하는 경우보다 두 가지 동작을 번갈아 가면서 할 때 삼각근의 근피로도와 주관적 근수축 정도가 낮게 나타났다.

Wells et al.(2010)은 작업 중 발생할 수 있는 쥐기 동작 감싸쥐기(power grip), 집기(pinch), 측면집기(lateral pinch)로 구분하고, 근전도를 이용하여 최대근수축(maximal

Table 2. Summary of laboratory studies

Authors	Body part	Measure		
		Worker-subjective	Observer-subjective	Objective
Escorpizo and Moore(2007)	Upper extremity	Discomfort, Difficulty	-	Force
Bosch et al.(2009)	Shoulder	-	-	EMG
Raina and Dickerson(2009)	Shoulder	Rating of perceived exertion	-	EMG
Wells et al.(2010)	Hand	-	-	EMG
Keir et al.(2011)	Upper extremity, Back	Subjective workload	-	EMG

voluntary contraction, MVC)의 변화를 측정하고 작업순환의 효과를 평가하고자 하였다. 연구 결과, 동일작업을 연속으로 실시할 때 최대근수축의 감소가 통계적으로 유의하게 나타났으며, 2번째 작업에서의 최대근수축은 작업순환 조건에서 더 높게 나타났다.

Keir et al.(2011)은 들기작업과 쥐기작업을 번갈아가면서 하는 작업순환을 실시하여 하부 척추세움근(lower erector spinae), 삼각근, 등세모근의 부하를 줄이는데 효과를 보았지만, 앞팔(forearm)과 상부 척추세움근(upper erector spinae)의 부하를 감소시키지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 작업순환 계획을 수립할 때에는 작업 시 사용하는 근육과 작업의 특성을 함께 고려하는 것이 필요하다는 것을 밝혔다.

실험을 통해 작업순환의 효과를 작업순환 계획 수립의 기초 자료를 제공하는 연구를 Table 2에 정리하였다.

3.3 Optimization approach study

생산계획 분야에서는 라인밸런싱을 수행하면서 현실에 가깝도록 인간공학적 요소를 포함한 연구들이 진행되고 있다. 특히, Becker and Scholl(2006)는 전통적인 단순 조립라인 밸런싱 문제(Simple assembly line balancing problem)를 다루는 문제의 성격에 따라 구분하고, 현실적인 제약 요소를 포함하는 일반 조립라인밸런싱 문제(General assembly line balancing problem)를 다루는 것이 필요하다고 주장하였다.

특히, Lodree Jr et al.(2009)은 인간공학적 요소를 고려하기 위해 작업순환 스케줄링, 작업-휴식 스케줄링, 교대작업 스케줄링 등으로 구분하여, 순환작업 중 발생하는 인적 오류의 수를 줄이고, 작업 중 누적되는 신체적 부하를 최소화 할 수 있는 연구가 필요하다고 하였다.

Xu et al.(2012)은 조립라인을 대상으로 혼합 정수계획법(Mixed interger programming)을 이용하여 생산성과 상지 근골격계 부하를 동시에 고려하여 근골격계 질환을 예방할 수 있는 조립라인 설계를 실시하였다. 작업자의 근골격계 부

하를 함께 고려하였을 때, 기존의 라인밸런싱 결과만큼 효과적인 라인밸런싱 결과를 나타내었으며, 라인밸런싱을 실시할 때, 작업자 요소를 고려하지 않는다면 특정 작업자에게 작업 부하가 집중될 수 있으며, 근골격계 질환을 유발할 수 있음을 보였다.

Mutlu and Özgörmüş (2012)는 공정수를 최소화하는 문제에 신체적 작업부하를 제약조건에 포함시켜 혼합 정수계획법을 활용하여 라인밸런싱을 실시하였다. 각 공정에서 근골격계 질환의 위험을 줄일 수 있는 적정 수준의 신체적 작업 부하를 넘지 않도록 설정했을 때, 필요 공정수와 계산시간이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 문제가 커짐에 따라 신체적 작업부하를 고려했을 때, 계산시간이 많이 증가하기 때문에 유전자 알고리즘, 타부서치(tabu search), 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing, SA) 등의 메타휴리스틱(meta-heuristic) 방법을 사용하는 것이 합리적이라고 제안하였다.

따라서, NP-complete 문제인 작업순환 계획을 최적화 기법으로 구현했을 때에는 많은 계산시간이 필요하게 되므로, 많은 연구자들이 발견적 해법을 이용한 접근을 시도하였다. Seckiner and Kurt(2007)는 각 작업자의 작업부하를 최소화할 수 있는 작업순환 방법을 찾기 위해 정수계획법(Integer programing)과 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 비교하여 정수계획법의 경우 최적 작업순환 방법을 찾을 수 있었으나, 작업순환 방법을 찾기가까지의 수행시간이 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘에 비해 최소 180에서 5,000배의 시간이 필요함을 보였다. 그러나 수행시간이 짧음에도 불구하고 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘으로 나타난 결과의 품질은 최적 작업순환 방법에 비해 92% 정도의 품질을 나타내어 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하여 작업자 부하를 최소화 할 수 있는 작업순환 방법을 찾는 것이 효율적임을 보였다.

Seckiner and Kurt(2008)는 개미 집단 최적화(ant colony optimization, ACO)을 이용하여 정수계획법과 시뮬레이티드 어닐링을 통해 얻은 작업순환 계획을 포함하여 비

교분석을 실시하였다. 연구 결과, 전체적으로 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘이 개미 집단 최적화 알고리즘보다 최적해 (optimum solution)에 가까운 작업순환 계획을 제시하지만, 짧은 계산시간이 소요되는 개미 집단 최적화 알고리즘을 활용한 작업순환 계획 수립도 의미가 있다고 하였다

Carnahan et al.(2001)은 순위 발견적 해법(multiple ranking heuristic), 복합 유전자 알고리즘(combinatorial genetic algorithm), 문제영역 유전자 알고리즘(problem space genetic algorithm)을 활용하여 라인밸런싱에서 작업자의 신체적 요구 정도를 포함한 최대 쥐기 동작과 사이클타임을 최소화 하기 위한 시도를 하였으며, Chang and Chen (2006)은 작업의 생산성을 향상하기 위해 작업의 상대적 작업부하 수준을 구분하여 작업자들에게 평균화된 작업부하가 부과되도록 작업을 재배치하고 NASA-TLX를 이용한 주관적 작업부하 평가를 실시하였다. 자료포괄분석(data envelopment analysis) 방법을 이용하여 작업자의 생산성과 상대적 작업부하의 연관성을 확인할 수 있었으며, 일부 작업자는 상대적 작업부하가 낮음에도 생산성이 높지 않은 것을 발견할 수 있었다.

Choi(2009)는 작업시간과 작업자의 작업부하를 고려한 혼합모델 라인밸런싱(mixed-model line balancing)을 실시한 결과, 작업시간만을 고려한 라인밸런싱에서는 작업부하의 편차가 크게 나타났으나, 작업시간과 작업부하를 고려하였을 때에는 작업시간만 고려한 모델보다 1% 정도 작업시간이 증가하였지만, 작업부하는 3~26%까지 감소하는 것으로 나타났다.

Diego-Mas et al.(2009)은 자동차 부품 공장에서 유전자 이론을 이용한 작업순환 스케줄링 문제를 연구하였다. 대상작업을 작업 동작, 작업활동, 정신적 능력과 의사표현 능력 범주로 구분하여 총 45개의 요소를 고려하였지만, 각 고려 요소의 작은 변화에 민감하게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 유전자 이론을 적용할 때 부적절하게 변이확률(mutation probability)과 교배(crossover)가 설정되었을 때에는 잘못된 결과로 이어질 수 있는 위험성을 경고하였다.

또한, 인간공학 분야의 근골격계 유해요인을 평가하기 위한 평가 기법을 활용한 연구도 진행되었다. Otto and Scholl (2011)은 조립라인의 라인밸런싱에 인간공학적인 측면을 고려하기 위해 SALOME(Simple Assembly Line balancing Optimization MEthod)와 시뮬레이티드 어닐링을 이용한 접근을 시도하는 과정에서 인력반작용에 대해서는 NIOSH(National Institute of Occupational Safety & Health) 들기 공식을 이용하였으며, 상지쪽 부하는 OCRA(Occupational Repetitive Actions)를 활용한 빈도부하와 JSI(Job Strain Index)를 이용하였으며, 전신부하는 EAWS(European Assembly Worksheet)를 이용하였다. 모델링 결과 공정 수

를 변화하지 않고 작업자 부하 감소를 목적식으로 설정하는 경우에는 신체적 부담이 없는 공정 수를 50% 수준으로 감소시킬 수 있었으며, 모델에 최대 작업부하를 추가한 경우에는 5% 정도의 추가 공정 수가 필요한 것으로 나타났다.

Asensio-Cuesta et al.(2012)은 자동차 조립라인에서 발생할 수 있는 작업관련 근골격계 질환 예방을 위해 multi-task OCRA index와 유전자 이론을 이용하여 작업순환 계획을 수립하였다. 작업순환을 실시하지 않았을 때에 비해 모든 작업자가 균일하며 적정한 반복작업 위험도에 노출되도록 작업순환 계획을 수립할 수 있었지만, 유전자 이론이 변이확률이나 교배확률과 같은 실행 변수에 민감하게 반응하므로 적절한 실행변수의 선택이 필요하다고 하였다.

Cheshmehgaz et al.(2012)은 조립라인밸런싱에서 작업자세를 OWAS(Ovako Working Posture Analysing System)를 이용하여 평가하고, 작업자에게 발생할 수 있는 누적된 위험성을 포함하여 퍼지-유전자 알고리즘(fuzzy-genetic algorithm)을 이용하여 라인밸런싱을 실시하였다.

인간공학적인 요소를 고려하고 최적화 기법을 활용한 작업순환 계획 수립 연구를 Table 3에 정리하였다.

4. Discussion and Conclusion

본 연구에서는 기존 연구를 통해 근골격계 질환을 효과적으로 예방할 수 있는 작업순환 계획을 수립하기 위한 연구를 조사하였다. 많은 연구자들이 작업순환을 현장에 적용한 후 작업순환의 효과를 평가하거나, 작업순환 계획을 수립하기 위해 실험실 환경에서 작업을 실시하여 적정 작업부하 수준을 결정하거나 수리적 모델을 이용하여 작업순환 계획을 수립하는 것으로 나타났다.

다양한 산업 분야에서 이루어지는 작업순환을 대상으로 실시된 현장 연구는 작업순환의 효과를 평가하는 것에 초점을 맞추고 있는 것으로 나타났다. 산업 현장에서 공학적 조치를 통해 근골격계 질환 유해요인을 제거하지 못하는 경우, 작업순환을 실시하여 근골격계 질환 유해요인이 특정 작업자에게 집중되지 못하도록 하는 것이 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 불편한 자세, 과도한 힘, 반복작업으로 발생하는 허리, 목, 어깨를 포함한 상지에 집중되는 신체적 작업부하를 작업순환을 통해 완화할 수 있었다.

그러나, 일부 연구를 제외하고는 작업자나 평가자의 주관적인 평가를 기반으로 작업순환의 효과를 평가하였다. Frazer et al.(2003)의 연구에서 나타난 바와 같이 신체적 작업부하 또는 작업순환의 효과를 주관적으로 평가하는 경우, 평가자와 작업자의 주관에 따라서 특정 작업 요소를 과

Table 3. Summary of optimization approach studies

Authors	Optimization methods	Measure		
		Worker-subjective	Observer-subjective	Objective
Carnahan et al.(2001)	Ranking heuristic, Combinatorial GA, Problem space GA	-	-	Grip strength capacity
Chang and Chen(2006)	Data envelopment analysis	NASA-TLX	-	-
Seçkiner and Kurt(2007)	IP model, Simulated annealing	-	Labor requirements	-
Seçkiner and Kurt(2008)	IP model, Ant Colony Optimization	-	Labor requirements	-
Choi(2009)	Goal programming	-	Physical workload	Processing time
Diego-Mas et al.(2009)	Genetic algorithm	General activity, Mental and Communication ability	-	EMG
Otto and Scholl(2011)	SALOME, Simulated annealing	-	Revised NIOSH equation, Siemens method, OCRA, JSI, EAWS	-
Asensio-Cuesta et al.(2012)	Genetic algorithm	-	Multitask OCRA index	-
Cheshmehgaz et al.(2012)	Fuzzy-Genetic algorithm	-	OWAS	-
Mutlu and Özgörmüş(2012)	Fuzzy theory	Subjective score(0~9)	-	-
Xu et al.(2012)	Mixed-integer linear program	-	ACGIH	-

도하게 평가하는 경향이 나타났다. 이를 방지하기 위해서는 인간공학 전문가를 포함하는 평가자와 작업자가 모두 평가에 참여하는 것이 필요하다고 하겠다. 또한 작업자의 혈압, 심박수, 근전도, 젓산 축적도 등의 생리적 지표를 이용하여 객관적으로 평가하는 것이 필요하다. 그러나 현재까지 생리적 지표와 같은 객관적 평가는 현장에서 실시하는 것에 많은 제약이 따르며, 이로 인해 활발한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 작업순환 관련 현장 연구는 작업순환의 효과를 가장 직접적으로 확인할 수 있다는 장점을 가지는 반면, 객관적인 평가에 어려움이 있으며, 비록 작업순환이 근골격계 질환 예방 조치로는 쉽고 빠르게 적용할 수 있지만, 그 효과를 객관적으로 평가하는 것이 어렵고, 평가가 이루어진 다 하더라도 많은 시간이 소요되는 것이 단점이라 하겠다.

현장 연구의 주관적 평가를 보완하고 근골격계 질환 유해 요인의 영향을 정확하게 찾기 위해 실험실 상황에서 생리학적 지표를 측정하고, 단일 작업의 유해요인을 객관적으로 평가하는 연구가 이루어졌다. 실험을 통해 작업 요소를 정의하고 이에 대한 평가를 주관적/객관적 지표를 이용하여 현장 연구에 비해 객관적인 평가를 실시하였다. 그러나 대부분의 연구가 실제 작업이 아닌 두 세 가지의 신체 동작만을 대상으로 작업순환을 실시하여 작업순환의 필요성을 확인하였지만, 실제 현장에서 나타나는 작업을 반영하지 못했다. 또한, 현장의 조립라인에서는 한 작업자가 단순한 신체 움직임보

다는 복잡한 작업을 수행하기 때문에 연구 결과를 바탕으로 현장의 작업순환 계획을 수립하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다.

최적화 기법 연구는 생산계획 분야에서 시작된 라인밸런싱에 작업자의 작업부하와 같은 인간공학적 요소를 도입하는 것이 근래 들어 활발히 이루어지고 있다. 기존 연구에서 나타난 바와 같이 주관적인 지표를 함께 사용한 작업순환 모델을 구현하여 각 공간 작업부하의 편차를 줄이기 위해 라인밸런싱 기법을 활용하였다. 활용된 라인밸런싱 기법은 정수계획법을 이용한 최적화 기법부터 메타휴리스틱을 이용한 최적근사해(near-optimum solution)를 구하는 방법까지 다양한 방법론을 이용하여 작업순환 계획을 수립하고자 하였다. 최적화 기법 연구는 크게 두 가지로 구분할 수 있었으며, 작업자간의 작업부하 편차를 줄이기 위해 작업을 각 공정에 배분하는 것과 각 공정에 작업이 정해진 상태에서 작업순환 순서를 결정하는 것으로 구분할 수 있었다. 작업을 공정에 배분하는 것은 모든 공정이 비슷한 수준의 작업부하를 가지도록 하여 작업순환을 실시할 때 작업부하가 일정하도록 하여 근골격계 질환을 예방하는 것을 기본으로 하고 있다. 그러나 실제 조립작업에서는 작업부하가 일정하도록 작업을 배분하는 것은 작업순서가 바뀌게 되어 실제 현장 적용에는 한계가 존재한다. 따라서, 각 공정 별로 작업이 정해져 있으며 작업자가 순환하는 순서를 결정하는 것이 필요하

며, 작업자에게 누적되는 신체적 작업부하를 평가하기 위해 선행작업의 신체적 작업부하 수준을 고려할 수 있는 작업순환 계획이 필요하다.

작업순환 모델을 수립하고 각 공정 간 작업부하의 편차를 줄이는 것은 NP-complete 문제이므로, 정수계획법을 통한 최적해를 구하는 것은 적은 수의 작업과 공정을 대상으로 실시하는 것은 가능하지만, 실제 현장의 문제를 해결하기에는 계산시간을 고려할 때 불가능하다고 할 수 있다. 따라서, 많은 연구자들이 메타휴리스틱 기법을 이용하였으며, 주로 유전자 기법, 시뮬레이티드 어닐링, 개미 집단 최적화 기법들을 활용하는 것으로 나타났다.

근골격계 질환을 예방 가능한 작업순환 계획을 효과적으로 수립하기 위해 기존의 현장 연구, 실험실 연구, 최적화 기법 연구로 구분하여 조사하였다. 각 연구 방법을 정리해보면, 현장 연구는 작업순환 계획이 임의의 방법으로 수립되거나, 작업순환의 효과를 파악하는데 까지 많은 시간이 소요되며, 많은 연구들이 근골격계 질환 유해요인의 평가에 중점을 두고 있었다. 반대로 최적화 기법 연구는 작업순환 계획 수립은 체계적으로 이루어지지만, 일부 연구를 제외하고는 현장 환경을 고려한 근골격계 질환 유해요인의 평가에 취약한 부분을 가지고 있었다.

따라서 향후 근골격계 질환 예방을 위한 작업순환 연구는 작업의 특성과 환경을 고려하여 근골격계 질환 유해요인을 정확하게 분석하고 평가할 수 있는 방법을 선택하고, 필요에 따라 복수의 접근방법을 함께 사용하여 작업순환 계획을 수립하는 것이 필요하다고 하겠다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. 2012R1A2A2A01005574).

References

- Aptel, M., Cail, F., Gerling, A. and Louis, O., Proposal of parameters to implement a workstation rotation system to protect against MSDs, *International Journal of Industrial ergonomics*, 38(11-12), 900-909, 2008.
- Asensio-Cuesta, S., Diego-Mas, J.A., Cremades-Oliver, L.V. and González-Cruz, A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work, *International Journal of Production Research*, 50(24), 7467-7478, 2012.
- Bao, S., Spielholz, P., Howard, N. and Silverstein, B., Application of the Strain Index in multiple task jobs, *Applied Ergonomics*, 40(1), 56-68, 2009.
- Becker, C. and Scholl, A., A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715, 2006.
- Bosch, T., de Looze, M.P., Kingma, I., Visser, B. and van Dieën, Electromyographical manifestations of muscle fatigue during different levels of simulated light manual assembly work, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(4), e246-e256, 2009.
- Butler, M.P., Corporate ergonomics programme at Scottish & Newcastle. *Applied Ergonomics*, 34(1), 35-38, 2003.
- Carnahan, B.J., Norman, B. and Redfern, M., Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing, *IIE Transactions*, 33(10), 875-887, 2001.
- Chang, S.Y. and Chen, T.H., Discriminating relative workload level by data envelopment analysis, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(9), 773-778, 2006.
- Cheshmehgaz, H.R., Haron, H., Kazemipour, F. and Desa, M.I., Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 503-512, 2012.
- Choi, G., A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload, *Computer & Industrial Engineering*, 57(1), 395-400, 2009.
- Diego-Mas, J.A., Asensio-Cuesta, S., Sanchez-Romero, M.A. and Artacho-Ramirez, M.A., A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1), 23-33, 2009.
- Escorpizo, R. and Moore, A., The effects of cycle time on the physical demands of a repetitive pick-and-place task, *Applied Ergonomics*, 38(5), 609-615, 2007.
- Frazer, M., Norman, R., Wells, R. and Neumann, P., The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain, *Ergonomics*, 46(9), 904-919, 2003.
- Freiboth, M., Frieling, E., Henningses, D. and Saager, C., Comparison of different organisations of assembly work in the European automotive industry, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(5), 357-370, 1997.
- Gallis, C., Work-related prevalence of musculoskeletal symptoms among Greek forest workers, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(8), 731-736, 2006.
- Jeon, I.K. and Jeong, B.Y., A Study on the job rotation types of assembly workers in a motor company, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(6), 951-957, 2010.
- Jorgensen, M., Davis, K., Kotowski, S., Aedla, P. and Dunning, K., Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector, *Ergonomics*, 48(15), 1721-1733, 2005.
- Keir, P.J., Sanei, K. and Holmes, M.W.R., Task rotation effects on upper extremity and back muscle activity, *Applied Ergonomics*, 42(6), 814-819, 2011.

- Kim, K.S., Park, J.K. and Kim D.S., Status and Characteristics of Occurrence of Work-related Musculoskeletal Disorders, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 29(4), 405-422, 2010.
- Kuijjer, P.P.F.M., Visser, B. and Kemper, H.C.G., Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department, *Ergonomics*, 42(9), 1167-1178, 1999.
- Kuijjer, P.P.F.M., Beek A.J., Dieën, J.H., Visser, B. and Frings-Dresen, M.H.W., Effect of job rotation on need for recovery, musculoskeletal complaints, and sick leave due to musculoskeletal complaints: A prospective study among refuse collectors, *American Journal of Industrial Medicine*, 47(5), 394-402, 2005.
- Lodree Jr, E.J., Geiger, C.D. and Jiang, X., Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1), 39-51, 2009.
- Mathiassen, S.E., Diversity and variation in biomechanical exposure: What is it, and why would we like to know?, *Applied Ergonomics*, 37(4), 419-427, 2006.
- Möller, T., Mathiassen, S.E., Franzon, H. and Kihlberg, S., Job enlargement and mechanical exposure variability in cyclic assembly work, *Ergonomics*, 47(1), 19-40, 2004.
- Mutlu, Ö. and Özgörmüş, A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints, *International Journal of Production Research*, 50(18), 5281-5291, 2012.
- NIOSH, *Elements of ergonomics programs*, NIOSH, 1997.
- Otto, A. and Scholl, A., Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 212(2), 277-286, 2011.
- Pyo, Y. and Jeong, B.Y., An implementation case of ergonomics program at a shipbuilding company, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 26(3), 45-52, 2007.
- Raina, S.M. and Dickerson, C.R., The influence of job rotation and task order on muscle fatigue: A deltoid example, *Work*, 34(2), 205-213, 2009.
- Rissén, D., Melin, B., Sandsjö, L., Dohns, I. and Lundberg, U., Psycho-physiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation, *Work & Stress*, 16(2), 127-137, 2002.
- Rodrigo, F., Okimorto, and Lucia, M., The effect of job rotation intervals on muscle fatigue-lactic acid, *Work*, 41(Suppl 1), 1572-1581, 2012.
- Sato, T.D.O. and Coury, H.J.C.G., Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs, *Applied Ergonomics*, 40(4), 707-712, 2009.
- Seçkiner, S.U. and Kurt, M., A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems, *Applied Mathematics and Computation*, 188(1), 31-45, 2007.
- Seçkiner, S.U. and Kurt, M., Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem, *Applied Mathematics and Computation*, 201(1-2), 149-160, 2008.
- Weichel, J., Stanic, S., Diaz, J.A.E. and Frieling, E., Job rotation-Implications for old and impaired assembly line workers, *Occupational Ergonomics*, 9(2), 67-74, 2010.
- Wells, R., McFall, K. and Dickerson, C.R., Task selection for increased mechanical exposure variation: Relevance to job rotation, *Ergonomics*, 53(3), 314-323, 2010.
- Xu, Z., Ko, J., Cochran, D.J. and Jung, M.C., Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models, *Computer & Industrial Engineering*, 62(2), 431-441, 2012.

Author listings

Sang-Young Yoon: syyoon@ajou.ac.kr

Highest degree: MS, Department of Industrial Engineering, Hanyang University

Position title: PhD candidate, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Areas of interest: Work design, Biomechanics, WMSDs, Ergonomics, Product development

Myung-Chul Jung: mcjung@ajou.ac.kr

Highest degree: PhD, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Areas of interest: Work design, Ergonomics, Product development, Biomechanics

Date Received : 2013-05-22

Date Revised : 2013-08-09

Date Accepted : 2013-08-21