

들기/내리기 빈도와 회복시간 변화에 따른 몸통근육의 피로도 분석

대한산업안전협회 안전지회 신현주팀장

1. 서론

산업현장에서 근골격계 질환을 예방하기 위하여 운반용 기계 설비가 증가함에도 불구하고, 아직도 많은 작업공정에서 수작업으로 인한 중량물 취급이 반복적으로 행하여지고 있다. 또한 과도한 중량물의 취급이나, 반복적으로 발생하는 몸통의 굽힘(flexion)과 펴(extension) 동작은 요통(low back pain)과 같은 근골격계 질환을 일으키는 주요 원인이 되고 있다. 허리를 이용하여 중량물을 취급하는 들기(lifting), 내리기(lowering) 작업으로 인해 발생하는 요통 및 기타 상해들은 작업자의 건강 및 안전에 관한 중요한 사항으로 다루어지고 있으며, 이러한 인력물자 취급(manual materials handling: MMH)으로 인한 상해는 작업관련 재해 중 큰 비율을 차지하고 있다. 또한 중량물 취급으로 인한 요통 등의 근골격계질환은 매년 증가하는 추세이고, 이로 인한 경제적 손실도 매년 늘어나고 있는 실정이다.

중량물 취급 작업으로 인한 몸통 부위 근육에 대한 연구들은 여러 가지 방법으로 연구가 되고 있으나, 대부분 생체역학적인 척추의 부하나, 일시적인 작업의 부하, 정적인 근력 발휘 상태의 근육 피로에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 몸통 근육에 대한 생체역학적인 연구로는 주로 몸통 동작과 관련된 굽힘각도, 비틀림 속도 등으로 인한 디스크의 압축력(compressive force)과 전단응력(shear force)의 증가로 인해 몸통 주위 근육의 부하량이 늘어나고, 또한 복부 내의 압력, 근육의 활동도나 몸통의 모멘트가 증가하여 요통과 같은 상해의 위험을 증가시키는 것으로 알려졌다.

본 연구에서는 동적 들기, 내리기 작업 시 몸통 부위의 주요 근육에 대한 피로도 분석을 통해, 중량물 취급 작업 시 작업빈도와 회복시간에 따른 몸통 근육의 피로와 회복시간의 상관관계를 EMG를 통하여 정량적으로 연구하였다.

2. 연구방법

2.1 실험참가자

본 연구에서는 허리나 다리와 관련된 근골격계 질환의 병력이 없고, 현재 건강상태가 양호한 남자 대학원생 8명이 자발적으로

실험에 참여하였다. 실험참가자의 나이는 26.6 ± 0.7 세, 키는 172.8 ± 4.32 cm이며, 몸무게는 69.6 ± 6.8 kg으로 나타났다.

2.2 근육선정

반복적인 중량물의 들기, 내리기 작업 시 굽힘(flexion)과 펴(extension) 동작이 발생하므로 이러한 동작 시 동원되는 근육은 왼쪽과 오른쪽 척추세움근(left/right erector spinae: LES, RES), 왼쪽과 오른쪽 넓은등근(left/right latissimus dorsi: LLD, RLD), 왼쪽과 오른쪽 배곧근(left/right rectus abdominis: LRA, RRA)으로 총 6개의 근육을 실험 대상으로 하였다.

2.3 실험장비

본 실험을 수행하기 위하여 필요한 장비는 중량물을 들고, 내리기 위한 너비 30cm, 깊이 30cm, 높이 25cm 인 나무상자를 이용하였고, 몸통 근육의 MVC를 측정하기 위하여 Lafayette Instrument 사의 Strength Evaluation System(SES)을 사용하였다. 일정한 수준의 % MVC를 유지하기 위하여 500kgf 용량의 Bongshin Loadcell 500DBBP를 SES에 연결하여 근육의 힘을 육안으로 확인할 수 있도록 loadcell과 digital indicator BS-300A를 연결하였다. 그리고 선정된 근육의 신호를 추출하기 위하여 Coulbom Instruments 사의 EMG(Electromyography) system을 PC와 연결하여 사용하였다.

2.4 실험설계

반복적인 중량물의 대칭형(symmetry) 들기, 내리기 작업 시 작업의 빈도와 회복시간이 몸통근육의 피로에 미치는 영향을 연구하기 위하여 2인자 2×4 Within-Subjects Design을 계획하였다. 독립변수로는 실제 작업 현장에서 빈번하게 관찰되는 평균적인 작업빈도(4회/분, 6회/분)와, 작업 간 회복시간(2분, 3분, 4분, 5분)으로 선정하였다. 실험 참가자는 두 가지 조건이 조합된 총 8가지의 대칭형 작업 상태에서 중량물의 들기, 내리기 실험을 반복하여 실시하였다. 종속변수는 작업빈도와 작업 간 회



복시각의 변화에 따른 근육의 피로도를 분석하기 위하여 EMG 신호의 MPF를 사용하였다. 본 실험에서 고려하려 했던 8회/분의 작업은 예비실험(pre-test)결과 작업부하가 너무 커 정상 작업이 불가능하여 실험의 변수에서 제외 하였다. 실험설계는 [표 1]에 정리 하였다.

표 1. 실험설계 (4×2 Within-Subjects Design)

		회복시간			
		2분	3분	4분	5분
작업 빈도	4회/분	S1~S8	S1~S8	S1~S8	S1~S8
	6회/분	S1~S8	S1~S8	S1~S8	S1~S8

2.5 실험절차

시상면(sagittal plan)을 중심으로 한 대칭형 작업 자세로 실험 참가자의 MVC를 측정하여, 15%의 sub-maximal 작업무게로 실험을 실시하였다. 그리고 작업 시 몸통의 굽힘(flexion)과, 폼(extension)동작을 반복적으로 실시하는 들기, 내리기 작업(작업 빈도 4회/분, 6회/분)과 회복시간(2분, 3분, 4분, 5분)의 변화에 따른 EMG 신호를 수집하였다.

2.5.1 MVC 측정

실험을 시작하기 전에 실험참가자에게 실험의 목적과 주의 사항을 숙지시켰다. 실험에 선정된 각 근육부위를 알고음료 닦아 낸 후, 6개 채널(channel)의 표면전극(surface electrode)을 부착 하였다. 표면전극 부착 위치로는 왼쪽과 오른쪽 척추세움근(LES, RES)은 L3(3rd lumbar vertebrae)의 중심선으로부터 4cm 떨어진 부분, 왼쪽과 오른쪽 넓은등근(LLD, RLD)는 T9(9th thoracic vertebrae)의 바깥 부분에, 왼쪽과 오른쪽 배곧은근(LRA, RRA)은 복부 중심선으로부터 3cm 떨어진 부분에 부착 하였다. MVC 측정마다 loadcell 과 연결된 Digital Indicator 의 최대치를 관찰하여 기록하였고, 이중 가장 근접한 두 개의 값을 평균하여 각 실험참가자의 MVC로 사용하였다. MVC 측정 후, 각각의 실험으로부터 수집된 측정값을 normalize 하기 위하여 75% MVC를 산정하고, MVC와 동일한 방법으로 측정하였다.

2.5.2 작업별 근육의 피로도 측정

4회/분과, 6회/분의 작업 빈도로 지면으로부터 75cm 높이의 테이블 위로 들고, 내리는 반복 작업을 실시하였다. 작업 자세는 시상면을 중심으로, 작업물이 정면에 위치한 대칭형 작업으로

실시하였고, 중량물의 무게는 예비실험 결과, 분당 6회의 작업 시 실험 참가자에게 신체적 무리가 가지 않는 15% MVC 무게로 설정하였다. 실험은 3분간 들고, 내리기 작업 후, 주어진 회복시간에 따라 휴식하는 방법으로 3회 반복하여 실시하였으며, 실험 참가자들의 학습효과를 줄이기 위해 counterbalancing 을 실시 하였다. 실험참가자들의 회복시간은 2분, 3분, 4분, 5분으로 설정하여, 각 실험 사이에 피로를 회복할 수 있는 시간을 주었고, 이때 실험 참가자로 하여금 EMG 신호가 나타나는 모니터를 주시하게 하여 6개 채널의 표면전극으로부터 힘의 사용을 최대한 줄여 피로를 제거할 수 있도록 유도하였다. 주어진 회복시간이 종료되면 실험참가자의 75% MVC를 각 근육별로 측정하였다. 측정 시 실험참가자가 75% MVC의 힘을 유지할 수 있는 상태가 되었을 때를 시작으로 7초간 EMG 신호를 수집 하였다. 또한 75% MVC 측정 후, 근육의 피로누적을 방지하기 위하여 10분간의 휴식을 취하게 하였으며, 4회/분과, 6회/분 작업 간에는 1주일간의 휴식시간을 주어 누적피로에 의한 실험 오차를 최소화 하였다. 전반적인 실험의 절차는 [그림 1]에 나타내었고, 회복시간의 사용 순서와 예를 [표 2]와 [그림 2]에 나타내었다.

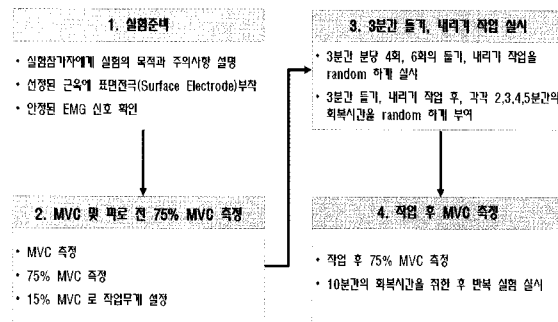


그림 1. 실험절차

표 2. 회복시간 사용 순서

Subjects	회복시간 사용 순서			
S 1	5분	2분	3분	4분
S 2	2분	3분	4분	5분
S 3	4분	5분	2분	3분
S 4	3분	4분	5분	2분
S 5	5분	2분	3분	4분
S 6	2분	3분	4분	5분
S 7	4분	5분	2분	3분
S 8	3분	4분	5분	2분

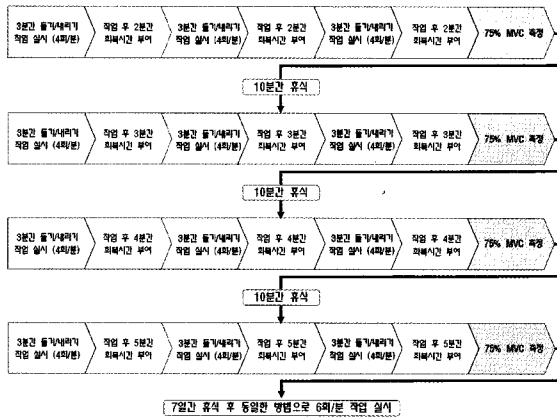


그림 2. subject 2의 들기, 내리기 작업순서의 예

2.6 데이터 분석

EMG system에 수집된 데이터를 분석하기 위하여 Windaq 소프트웨어를 사용하였다. 들기, 내리기 작업의 근육 피로도를 분석하기 위하여 75% MVC로 7초 동안 수집된 데이터 중, 비교적 일정한 힘을 유지한 3초 동안을 사용하였고, normalized MPF 값을 분석하기 위해 1024-point FFT(Fast Fourier Transform)를 실시하였다. 작업빈도와 회복시간에 따른 각 작업별 MPF 값을 분석하기 위하여 초기의 MPF 값으로 정규화(normalization)하였고, normalized MPF 값들을 비교하기 위해 SAS 통계 패키지를 사용하여 작업 빈도와 회복시간에 따른 분산분석을 실시하였다. Normalized MPF값을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Normalized MPF} = \frac{\text{매회 측정된 MPF 평균}}{\text{초기 실행 시 얻어진 MPF 평균}} \quad (1)$$

3. 연구결과

3.1 분산분석 결과

작업 빈도와, 회복시간의 변화에 따른 근육별 normalized MPF 값의 분산분석 결과는 [표 2]에 나타내었다. 분산분석 결과, 작업 빈도와 회복시간에서 근육에 따른 normalized MPF 값이 유의한 차이를 보였다. 따라서 작업빈도와, 회복시간의 차이에 의한 근육의 피로회복 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 각 요인별 분산분석 결과 유의한 차이를 나타낸 작업빈도의 차이에 의한 사후 분석 결과 4회/분의 작업과, 6회/분의 작업 간에 normalized MPF 값이 차이를 보였다. 이는 각각의 작업빈도에 의한 근육의 피로가 차이를 보이는 것을 의미하며, 6회/분의 작업이 더 낮은 normalized MPF 값을 나타내어, 근육의 피로가 4회/분 작업보다 더 큰 것을 나타내었다[표 3][그림 3]. 또한 회복시간의 차이에 의한 normalized MPF 값에 대한 사후분석 결과

는 회복시간의 차이에 의해 유의한 차이를 보였다. 따라서, 회복시간에 의한 근육의 피로 회복의 차이가 나타나는 것을 알 수 있었고, 회복시간이 늘어날수록 근육의 피로회복 효과가 큰 것을 알 수 있었다[표 4][그림 4].

표 3. 각 근육의 MPF 값에 대한 요인별 분산분석 결과

Source	DF	SS	MS	F	Pr>F
작업빈도	1	0.3991	0.3991	13.36	0.0081**
회복시간	3	0.1012	0.0337	40.73	0.0001**
근육	5	0.0700	0.0140	1.50	0.2158
작업빈도×회복시간	3	0.0030	0.0010	1.34	0.2897
작업빈도×근육	5	0.0424	0.0084	0.91	0.4843
회복시간×근육	15	0.0043	0.0002	0.51	0.9300
작업빈도×회복시간×근육	15	0.0016	0.0001	0.20	0.9994

** $\alpha=0.01$ 수준에서 유의함

표 4. 작업빈도 차이에 의한 사후분석 결과(Duncan Test)

Duncan Grouping	Mean	N	작업빈도
A	1.0327	192	4회/분
B	0.9682	192	6회/분

(서로 다른 영문 문자를 갖는 작업빈도 간에 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의한 차이가 있음을 의미함)

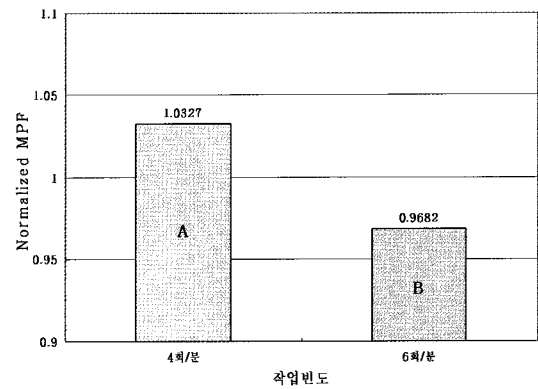


그림 3. 작업빈도 차이에 의한 사후분석 결과

표 5. 회복시간 차이에 의한 사후분석 결과(Duncan Test)

Duncan Grouping	Mean	N	회복시간
A	0.9773	96	2분
B	0.9956	96	3분
C	1.0072	96	4분
D	1.0217	96	5분

(서로 다른 영문 문자를 갖는 회복시간 간에 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의한 차이가 있음을 의미함)

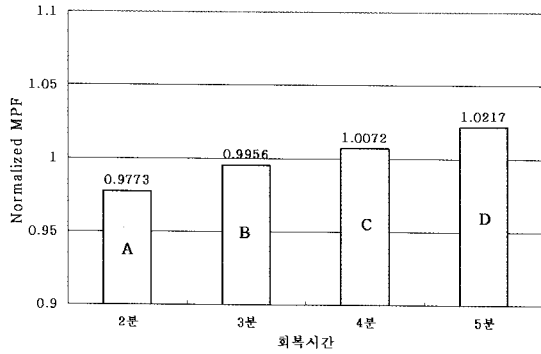


그림 4. 회복시간 차이에 의한 사후분석 결과

작업빈도와 회복시간에 따른 각 근육별 normalized MPF 값의 변화는 4회/분의 작업에서 RES를 제외한 나머지 5개의 근육 (LES, RLD, LLD, RRA, LRA)에서 3분의 회복시간이 주어진 경우 근육의 피로가 초기상태로 회복되는 것을 알 수 있었다(그림 5)~(그림 7). 그리고 RES와 RLD가, LES와 LLD보다 더 낮은 normalized MPF 값을 나타내어 근육의 누적 피로의 영향이 몸통의 오른쪽 근육에서 더 큰 것을 보였으나, RRA과, LRA에서는 거의 비슷한 수준의 normalized MPF 값을 나타냈다.

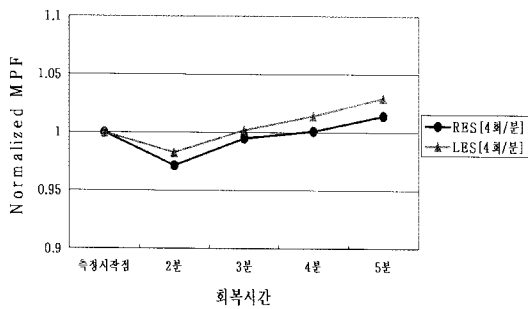


그림 5. RES와 LES의 normalized MPF의 변화 (4회/분)

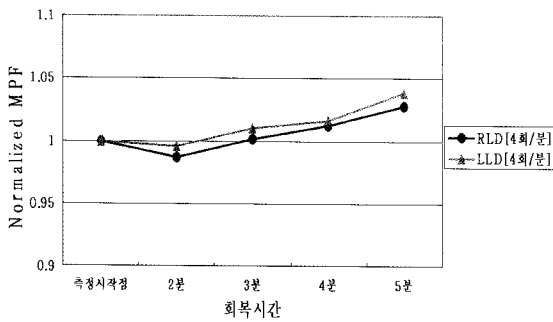


그림 6. RLD과 LLD의 normalized MPF의 변화 (4회/분)

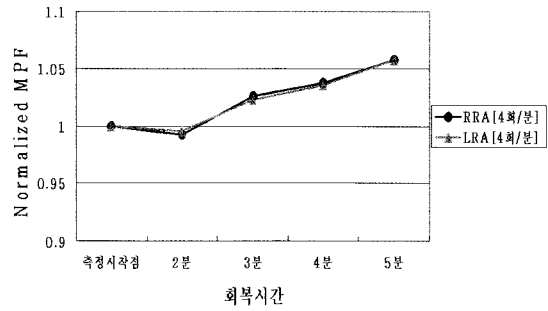


그림 7. RRA와 LRA의 normalized MPF의 변화 (4회/분)

6회/분의 작업에서는 4회/분의 작업보다 모든 근육에서 더 낮은 normalized MPF 값을 보였고, 이는 작업빈도의 증가로 인한 근육의 피로누적 효과가 더 커진 것을 보여주었다. RES와 LES, RRA와 LRA는 5분의 회복시간이 주어진 경우에도, 근육의 피로가 초기상태로 회복되지 못하였으나, RLD와 LLD는 회복시간 5분에서 근육의 피로가 초기 상태로 회복되는 것을 보여주었다. 6회/분의 작업에서도, 4회/분의 작업과 유사하게, 오른쪽의 근육들이 왼쪽의 근육들 보다 normalized MPF 값이 더 낮은 경향을 보여 근육의 누적 피로가 더 큰 것을 알 수 있었다(그림 8)~(그림 10).

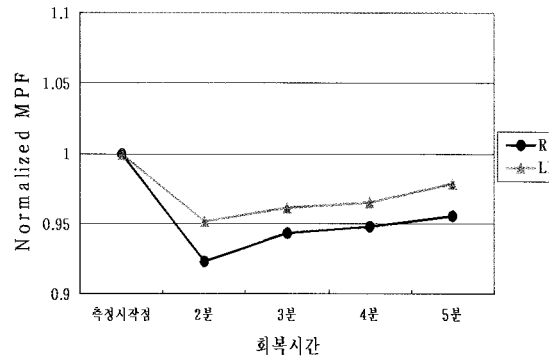


그림 8. RES와 LES의 normalized MPF의 변화 (6회/분)

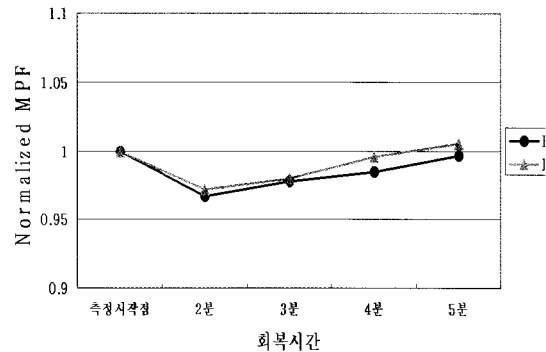


그림 9. RLD와 LLD의 normalized MPF의 변화 (6회/분)

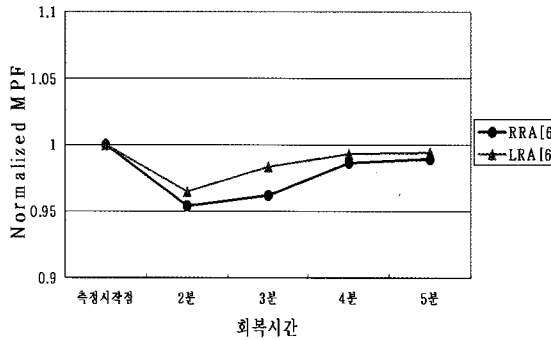


그림 10. RRA와 LRA의 normalized MPF의 변화 (6회/분)

RES와 LES의 작업빈도와 회복시간에 대한 normalized MPF 값의 변화는 [그림 11]에 나타내었다. 4회/분의 작업에서는 RES와 LES가 3분의 회복시간 이후에 초기 상태로 회복되는 것을 보여주고 있으나, 6회/분의 작업에서는 5분의 회복시간이 주어질 경우에도, 근육의 피로가 초기상태로 회복되지 않는 것을 그래프를 통해 알 수 있었다. 따라서 RES와 LES의 경우는 6회/분 작업의 시, 근육의 피로가 초기상태로 회복되기 위해서는 5분 이상의 회복시간이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 작업빈도에 따른 normalized MPF의 차이는 RLD, LLD, RRA, LRA와 비교했을 때 가장 크게 나타나 몸통 주변의 다른 근육들보다 더 많이 활성화 되어 더 큰 근육의 누적피로가 나타나는 것을 알 수 있었다.

RLD와 LLD는 4회/분의 작업에서는 3분의 회복시간이 주어질 경우 근육의 피로가 초기 상태로 회복되는 것을 알 수 있었고, 6회/분의 작업에서는 5분의 회복시간이 주어졌을 때 근육의 피로가 초기상태로 회복되는 것을 나타내었다. 작업빈도의 변화에 의한 normalized MPF값의 차이는 뚜렷하게 나타나지는 않았지만, 작업빈도가 높은 6회/분의 작업이 더 낮게 나타나, 작업빈도의 증가에 의한 근육의 피로가 더 큰 것을 알 수 있었다(그림 12).

RRA과, LRA은 4회/분의 작업에서는 3분의 회복시간이 주어질 경우 근육의 피로가 초기 상태로 회복되는 것을 알 수 있었고, 6회/분의 작업은 5분의 회복시간이 주어질 경우 근육의 피로가 초기 상태로 회복되는 것을 알 수 있었다. RRA와, LRA 역시 다른 근육들과 동일하게 작업 빈도의 증가로 인해, 4회/분의 작업보다 6회/분의 작업 시 normalized MPF값이 더 낮게 나타났다.

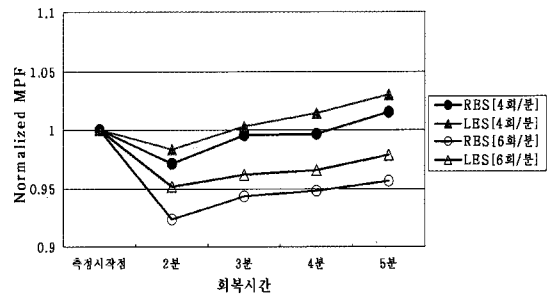


그림 11. RES과 LES의 normalized MPF 변화(4회/분, 6회/분)

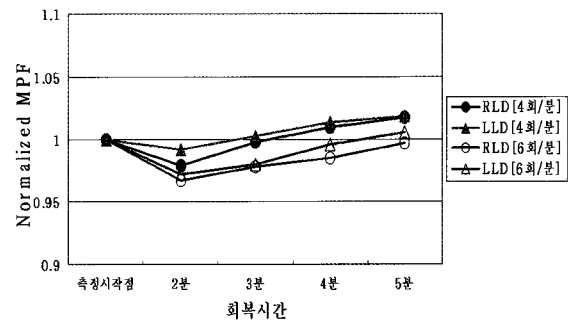


그림 12. RLD과 LLD의 normalized MPF 변화 (4회/분, 6회/분)

4. 결론

본 연구에서는 동적 들기, 내리기 작업 시 작업 빈도에 따른 몸통 근육의 피로와 회복시간에 대한 상관관계를 정량적으로 평가 하였다. 연구 결과 동적인 들기, 내리기 작업과 관련된 몸통 근육의 피로회복에 대하여 들기 빈도와 회복시간의 차이에 따른 적정 피로회복시간을 제시하였다. 또한 구체적인 들기 빈도에 따른 피로회복시간을 평가 하여, 중량물 취급 작업 시 몸통 부위 근육의 피로누적에 의한 요통 등 근골격계 질환을 예방하기 위한 적정 회복 시간을 제시 하는데 필요한 기초자료를 제시하였다.

본 연구에서 보여준 4회/분과, 6회/분의 작업빈도에 따른 피로 회복 차이를 관찰 할 때, 실제적인 작업 현장의 다양한 빈도의 작업이나, 15% MVC 이내의 가벼운 무게를 사용한 높은 빈도의 들기 작업에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 본 연구의 결과는 실제 작업 상황의 중량물 취급 작업 시 작업과 회복 시간 cycle 설계 시 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. ☺

