연 구 논 문

시뮬레이션 기법에 기초한 근골격계 질환 감소를 위한 용접자세 분석

박주용* · 김동준** · 장성록*** · 송창섭*

*한국해양대학교 조선해양시스템공학부
**부경대학교 조선해양시스템공학과
***부경대학교 안전공학부

Analysis of Welding Positions for Reduction of Musculoskeletal Disorders Based on Simulation Technique

Ju Yong Park*, Dong Joon Kim**, Seong Rok Chang*** and Chang Sub Song*

*Div. of Naval Architecture and Ocean Systems Eng., Korea Maritime Univ., Busan 606-791, Korea
**Dept. of Naval Architecture and Marine Systems Eng., Pukyung Univ., Busan 608-737, Korea
***School of Safety Eng., Pukyung Univ., Busan 608-739, Korea

Abstract

The industrial disaster caused by a work-related disease like a Musculoskeletal Disorders(MSDs) becomes a big social problem and increases rapidly. This leads to the degradation of the labor desire and the productivity. Welding work belongs to the work with a high intensity. This paper aims to analyze the welding work in the various positions from a view-point of the burden of the human musculoskeletal system and to propose the desired position with lower burden. For this purpose the real welding work was observed in the shipyard and analyzed using the RULA method, a powerful ergonomics tool. The 3-dimensional simulation model for this work was also developed. In this model, ergonomics human model and welding work environment were built. This model was verified through the comparison to the real work. This paper showed that the improvement of welding position by changing the location of a stool and using some auxiliary tool can reduce the work intensity remarkably and lead to the decrease of MSDs.

*Corresponding author : djkim@pknu.ac.kr

(Received June 28, 2007)

Key Words : Welding position, Musculoskeletal Disorders, Simulation, RULA

1. 서 론

노동부의 보고에 의하면 최근의 산업재해 증가는 근골격계 질환(Musculoskeletal Disorders 이하 MSDs)과 같은 작업관련성 질환이 차지하는 비중이 증가하고 있다. 근골격계 질환은 매년 급증하는 추세에 있고, 향후에도 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있다[1]. 특히 작업관련성 근골격계 질환의 증가로 인하여 생산성 저하, 근로의욕저하, 품질저하 등의 경영손실은 물론 직접 의료비의 부담과 직원들의 보상 및 작업조건 개선에 대한 요구는 점차 증가하고 있으며, 노·사간의 쟁점사항으로도 부각되고 있는 상황이다. 또한 근골격계 질환이 작업관련성이라고 의심될 경우에는 의학적 치료를 통해 발병원인을 제거하지 못하는 경우도 있어, 작업장에서 질환이 재발되는 경우가 비일비재하므로 예방이 가장 중요하다 할 수 있겠다.

이를 위해, 본 연구에서는 조선 산업의 많은 공정 중 근골격계에 가장 많은 부담을 주는 공정으로 용접을 선택했다. 용접은 선박 생산의 거의 모든 공정에서 이루어지고 있으며 블록이 생산되고 조립되어 짐에 따라 좁은 공간에서 불편한 자세로 용접해야하는 경우가 빈번

하다. 그렇기 때문에 용접 자세의 근골격계 질환 발생 위험정도 및 원인을 분석하는 것과 작업자에게 부담이 적도록 작업 환경 개선방안을 제시해 보였다.

2. 근골격계 질환의 정의

근골격계 질환이란 근골격계 부위에 생기는 질환을 의미하며 주로 부자연스러운 자세, 반복성 작업, 작업의 지속 시간, 작업물 중량, 요구되는 힘, 진동, 개인적인 요인 등에 의하여 근육, 신경, 혈관, 관절, 인대 등의 조직이 손상되어 나타나는 기능적 장애로서 허리, 목, 어깨, 팔, 손목 등의 부위에 주로 발생하는 질환이다.[2] 근골격계 질환의 대부분이 누적외상성 질환이며, 이것은 근조직과 같은 부드러운 신체조직(Soft tissue)에 발생하는 미세균열(Micro fracture)이 누적되어 신체조직 기능에 손상(Impairment)을 일으키는 경우를 말한다.

근골격계 질환의 증상들은 보통 통증이 발생되면 1주일 이상 지속되거나 과거 1년간 적어도 1달에 1번 이상 통증이 반복되는 경우에 해당된다[3].

3. 인간공학적 분석

인간공학적 분석은 여러 가지가 있으나 본 연구에서 채택한 RULA(Rapid Upper Limb Assessment)분석기법은 McAtamney & Corlett[4]에 의해 제안된 기법으로 어깨, 팔, 손목, 목 등 상지부위에 초점을 맞추어, 자세로 인한 작업 부하를 평가하기 위한 방법이다. 평가대상이 되는 주요 작업요소로는 작업 자세 뿐 아니라 반복수, 정적인 작업, 힘, 작업 자세, 연속작업시간 등이 고려된다[5]. 따라서 비록 RULA 분석 방법이 주로 상지 평가에 편중되어 있으나 전체적인 작업자세 평가도구이며 작업물, 공구 무게까지 고려되어 분석된다.

Fig. 1은 RULA 분석 방법에 의한 점수 산출과정을 나타낸 것이다. Table 1의 최종점수(Final score)는 팔과 손목 분석인 A점수와 목, 허리와 다리 분석인 B점수에 각각 근육부하와 무게/힘 부하를 고려한 C점수와 D점수의 합으로 산출되며[5] 최종점수에 대한 평가내

Table 1 Final score of RULA and its evaluation

D점수 \ C점수	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	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

Final Score	Contents
1~2	Posture is Acceptable
3~4	Further investigation is needed and change may be required
5~6	Investigation further and changes are required
7점	Investigation and changes are required immediately

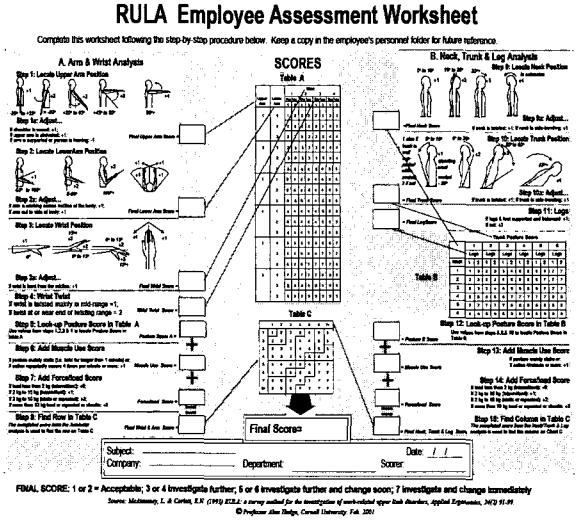


Fig. 1 RULA worksheet

용은 Table 1에 나타난 바와 같다.

4. 모델링

인체의 수학적 모델을 제시하고 이를 통해 인간의 작업을 위한 동작을 나타내기 위해 컴퓨터를 이용한 것이 인간공학적 인간모델(Ergonomics human model)이다. 이러한 인간공학적 인간모델은 공학적 작업분석 및 평가를 위해 필요한 기초자료를 얻기 위하여 만들어진 전산화된 인체 모형으로 경비와 인력, 시간을 절약할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 인간모델을 위한 범용 도구로 Delmia V5 Human을 사용하였다.

4.1 작업 자세 선정

선박블록 용접시 블록형상의 복잡성과 작업공간의 협소성으로 인해 다양한 용접자세가 나온다. 위보기 용접자세는 그 중 대표적인 불편한 자세로 작업점이 머리 위에 위치하고 작업 시 양팔을 모두 위로 들고 작업을 해야 한다. 따라서 손목, 팔, 어깨, 허리, 목 등에 부담을 주게 된다. 또 다른 용접자세로서 아래 보기 용접자세는 상체와 하체를 밀착시켜 몸을 전체적으로 밑으로 숙여야 하므로 허리에 많은 부담을 주는 자세이다. 본 연구에서는 Fig. 2의 위보기 용접자세와 아래보기 용접자세, 이 2가지 용접자세를 분석 대상으로 하였다.

4.2 인간 모델링

가상공간에 실제 용접사와 동일한 속성을 가진 마네킹

(a) Overhead position (b) Flat position

Fig. 2 Welding work in various positions in the block

을 만들기 위해 Delmia V5의 'Human Measurement Editor'를 사용하여 실제 용접사와 동일한 신체 치수를 가진 마네킹을 'Human Builder'에서 생성하였다. 이 과정을 통해 만들어진 인간모델은 마네킹으로 부른다. 마네킹은 'Forward/Inverse Kinematics'에 의한 운용이 가능하며 RULA, Lift & Lower, Push & Carry 분석과 같은 인간공학적 분석이 가능한 장점을 가지고 있다.

아래 신체 치수 Table 2는 본 연구 대상 블록에서 작업하는 용접사의 신체치수를 측정한 값으로 작성한 표이다. Table 2에 나타나지 않은 신체 치수는 한국 표준 남자 체형에 근거하였다.

5. 용접작업 모델링 및 검증

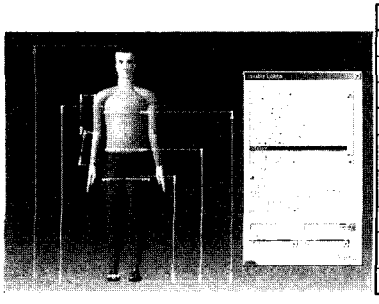
5.1 인간 작업 모델링

실제 작업환경인 블록과 각종 설비 및 도구를 3차원 가상공간에 구축한 뒤 인체모델인 마네킹이 실제 공정에 따라 작업하는 방법으로 모델링하였다. Fig. 3은 Fig. 2의 위보기 및 아래보기 용접작업을 가상공간에서 마네킹을 활용하여 모델링한 예를 보여주고 있다.

5.2 인간 활동 분석

Delmia V5의 'Human Active Analysis'를 이용하여 시뮬레이션상의 용접사의 자세를 분석하였다. 분석방법은 인간공학 분석방법 중 가장 널리 사용되는 RULA 방법을 사용하였다. 용접토치의 무게는 일반적으로 약 1.5kg이었으며, 용접기와 와이어 송급기 사이의 케이블은 통상 걸개에 걸거나 바닥에 늘어뜨린 상태에서 작업을 하므로 용접사에게 직접 부담을 주지 않는 것으로 판단하여 케이블 무게는 제외하였다. 따라서 토치 무게는 1.5kg으로 간주하였다.

Table 2 Body measures of a worker



Body Parts	㎝
Stature	162
Span	156
Bideltoid Breadth	42
Chest Breadth	32
Wrist-Wall Length, Extended	75
Radiale-Stylion Length	23
Hand Length	19
Waist Height, Omphalion	90
Knee Height	44

파라메타 값으로 대상 용접사는 모두 오른손잡이이며 용접진행방향은 오른쪽으로 설정하였다. 그리고 자세에 따라서 팔에 대한 지탱 여부는 상황에 맞게 조건을 주어 분석하였다.

각 신체 부위별 분석 결과는 Table 3에 보는 바와 같이 RULA 점수 산정에 따라 색깔을 주어 그 위험정도를 한 눈에 알아보도록 되어 있다.

5.3 모델링 검증

인간 모델링과 작업 모델링의 정확성과 적용가능성을 검증하기 위해 Fig. 4와 같이 실제 위보기 용접 작업자와 아래보기 용접 작업자의 작업 자세를 인간공학의 전통적인 기법인 유해요인조사표[6] 및 RULA 조사표에 의한 분석결과와 가상공간에서 모델링된 마네킹의 작업자세를 분석한 결과를 비교, 분석하였다.

Table 3 Color associated to the score

Segment	Score Range	Color associated to the score					
		1	2	3	4	5	6
Upper arm	1 to 6						
Forearm	1 to 3						
Wrist	1 to 4						
Wrist twist	1 to 2						
Neck	1 to 6						
Trunk	1 to 6						

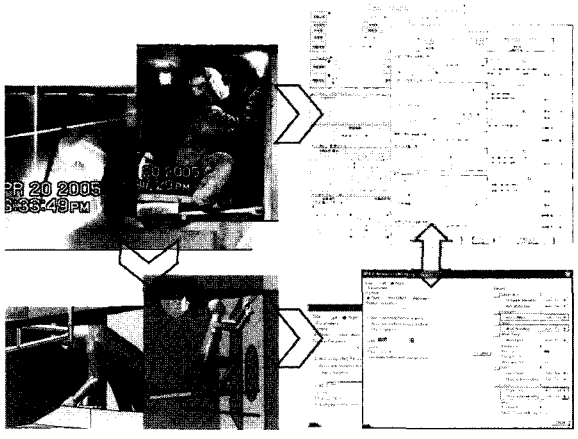


Fig. 4 Comparison of RULA results of the model with the conventional analysis

먼저 현장의 용접작업을 촬영하면서 유해요인조사표와 RULA 조사표를 작성하였다. Fig. 2의 (a) 자세의 경우 유해요인 원인은 양팔을 모두 위로 들고 작업해야 하는 것과 목을 뒤로 젖힌 자세를 지속적으로 유지해야 하는 점, 반복적으로 움직이는 손목이 해당되었다. 이 자세의 RULA 조사표에 의한 결과는 오른쪽 상단에서 보는 바와 같이 조만간 개선을 필요로 하는 최종 점수 6점으로 판명되었다. 또한 Fig. 2의 (b) 자세의 경우 목과 허리를 일정 시간동안 굽혀야 하는 점이 유해 요인으로 지적되었다. RULA 조사표에 의한 결과는 6점으로 판명되었다.

모델링에 의한 RULA 분석 결과도 주요 신체 점수 및 최종 점수가 전통적인 인간공학 분석결과와 모두 동일하게 6점이었다. 이를 자세히 검토해보면 Fig. 2 (a) 자세의 경우, 유해요인조사표에서 지적된 목의 젖힘과 반복적인 손목의 움직임이 마네킹에 그대로 반영되었음을 알 수 있었다. 단지, 실제 작업자의 손목 요골편향에 대한 미세한 차이가 마네킹에 반영되지 못했고, 실제 작업자와 마네킹의 다리 각도에 차이가 있음이 드러났지만 이 부분은 RULA 결과에 별로 영향을 주지는 못했다. RULA 기법은 신체 상부 평가에 초점을 두기 때문에 미세한 손목 비틀림에 대한 각도와 다리부분에서 보인 차이보다는 용접점 위치에 따른 허리가 포함된 상부 자세가 더 중요시되어 작업강도는 인간공학적 분석 결과와 동일하게 나온 것이다. Fig. 2 (b) 자세는 모델링된 자세가 실제 작업자의 자세형상과 거의 일치하여 유해요인조사표의 점검항목이 모델링에 그대로 반영되어 작업부하 최종 결과는 양쪽이 동일하게 나왔다.

이상의 검토결과는 본 연구를 통해서 개발된 모델이 실제의 작업 자세를 구현하며 작업강도를 전통적인 인간공학 기법에서 평가하는 것과 동일하게 반영하고 있어 모델이 충분한 신뢰성이 있음을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 개발된 모델을 활용하여 다양한 작업환경 및 작업자세의 변경에 대해 작업 시뮬레이션을 수행하여 작업부하 분석을 실시하고 적용 가능한 개선사례를 도출하였다.

6. 용접자세의 작업부하 분석과 개선 사례

6.1 위보기 용접자세

Fig. 5에서 보는 바와 같이 위보기 용접 자세는 비좁은 공간에서 작업이 이루어져 손목과 상완이 3점으로 약간의 무리가 있고 목과 몸통에 꺾임이 있어 상당히 부담되는 자세임을 알 수 있다. 정지자세의 경우는 6점

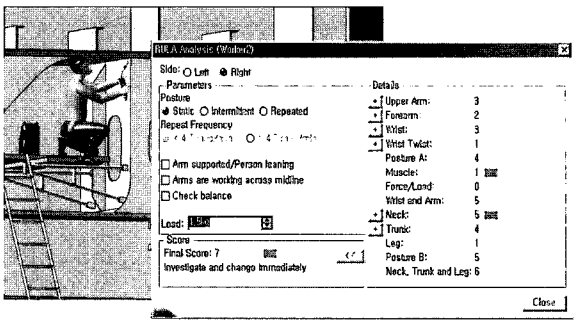


Fig. 5 RULA results of welding workload in the overhead position

이었으나 블록 안쪽으로 작업이 진행됨에 따라 꺾임현상이 좀 더 심해져 최종 점수는 7점으로 판명되었다. 이는 즉시 작업 자세 변환이 필요한 자세에 해당된다.

Fig. 6은 위보기 용접자세 작업 중의 목 움직임을 그래프로 나타낸 것으로 목을 뒤로 젖히는 경우는 전체 작업시간 동안 4회 나타나며 옆으로 굽히는 경우는 작업시간 동안 계속 -8도로써, 이는 작업이 끝날 때까지 지속적으로 옆으로 굽혀 작업한다는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 7은 허리 움직임을 그래프로 나타낸 것으로 허리의 경우 비틀림은 없으나 앞뒤, 좌우로 구부린 채 작업이 이루어진다는 것을 알 수 있다.

이 경우는 블록 내 용접을 위해 설치된 발판이 높게 설치되어 용접 공간이 좁아지고 따라서 구부린 자세로

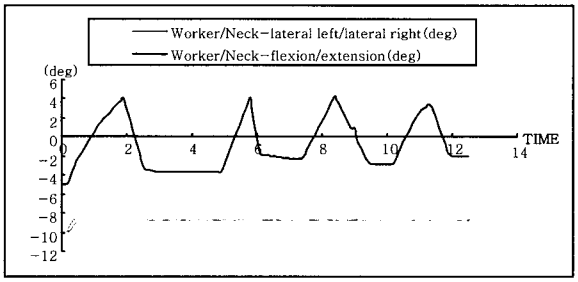


Fig. 6 Moving angle of neck before improving the overhead welding position

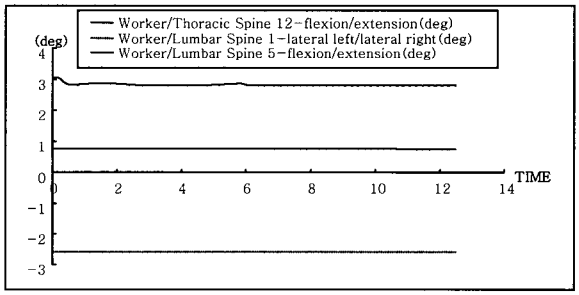


Fig. 7 Moving angle of waist before improving the overhead welding position

작업을 할 수 밖에 없었다. 이 지지대를 현 위치보다 600mm 아래로 설치하면 Fig. 8과 같이 선 자세에서 위보기 자세 용접이 가능하게 되고 목과 허리를 펴는 효과를 얻을 수 있다. 이렇게 개선된 자세의 작업부하 분석을 살펴보면 전체적으로 손목 비틀림이 줄어들어 팔과 손목부분에서 5점, 허리에서 부담이 크게 줄어 목과 허리, 다리부분에서 3점을 받아 최종 점수는 4점으로 추가적인 관찰을 필요로 하는 자세로 개선되었다.

부담이 크게 줄어든 목과 허리부분의 움직임을 자세히 살펴보면 Fig. 9에서 목을 젖히는 각도가 항상 0도 이상이고 옆으로 굽히는 각도는 작업시간 동안 0도로 유지함을 알 수 있다. 이것은 목이 뒤로 젖혀지거나 옆으로 굽혀지지 않음을 뜻한다. 그리고 Fig. 10에서 허리 움직임에 따른 각도는 앞뒤, 좌우, 비틀림 모두 0도로 일정하므로 허리가 굽혀지거나 비틀어지지 않은 자세로 작업하고 있음을 나타낸다.

6.2 아래보기 용접자세

Fig. 11은 아래보기 자세로 좁은 공간에서 몸을 웅크리고 쪼그려 앉아 용접하는 자세이다. 이 자세는 팔과 손목의 분석에서 5점, 그리고 목과 허리 및 다리 분석에서 5점으로 최종 6점을 받았다. 이는 쪼그려 앉은

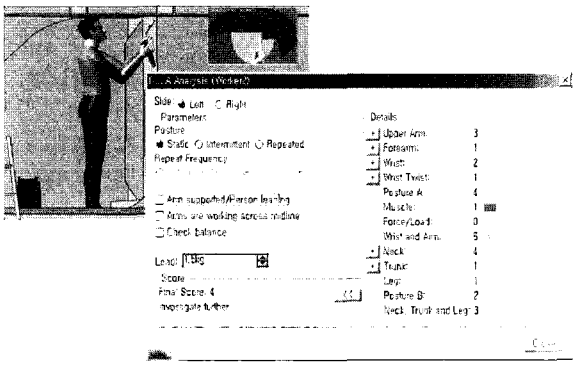


Fig. 8 RULA results of welding workload in the improved overhead position

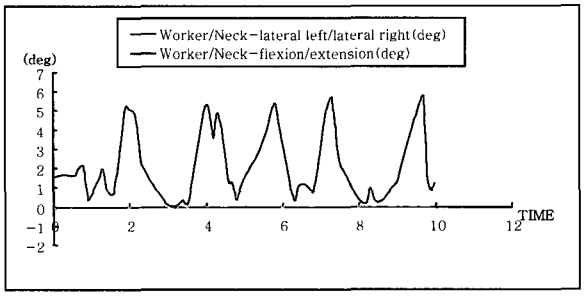


Fig. 9 Moving angle of neck after improving the overhead welding position

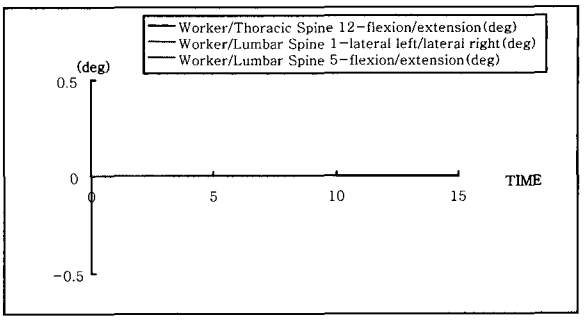


Fig. 10 Moving angle of waist after improving the overhead welding position

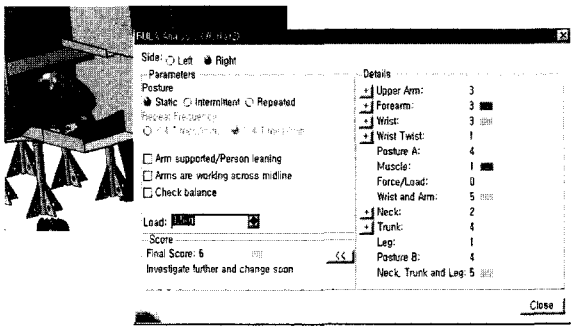


Fig. 11 RULA results of the flat welding position before improvement

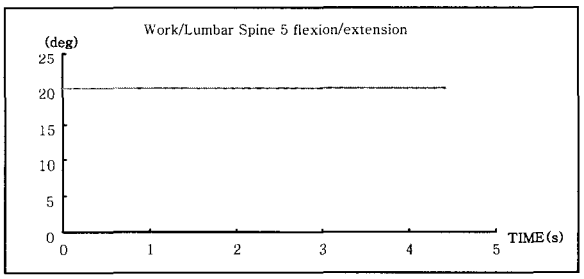


Fig. 12 Moving angle of waist before improving the flat welding position

용접자세가 팔과 손목, 허리에 부담을 많이 주기 때문이다. 최종 점수 6점은 가급적 빨리 작업 자세의 변경이 요구되는 점수이다.

Fig. 12는 용접작업 중의 허리 각도의 변화를 나타낸 것으로 작업 진행 동안 항상 20도로 굽혀져 있음을 보여주고 있다. 따라서 이 자세는 허리에 많은 부담을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

이 자세의 경우 작업공간을 보다 충분히 확보하기 위해 머리 위의 발판을 절단하고 블록 밖에서 작업이 가능하도록 Fig. 13과 같이 바닥에 가로, 세로 각 1000 mm, 높이 130mm의 발판을 추가로 놓아 용접사가 서서 용접할 수 있도록 자세를 변경한 다음 작업부하 분석을 해 본 결과 다음과 같이 개선된 결과를 얻었다.

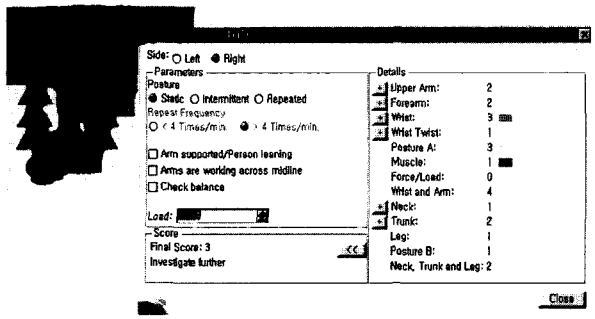


Fig. 13 RULA results of welding workload in the improved flat welding position

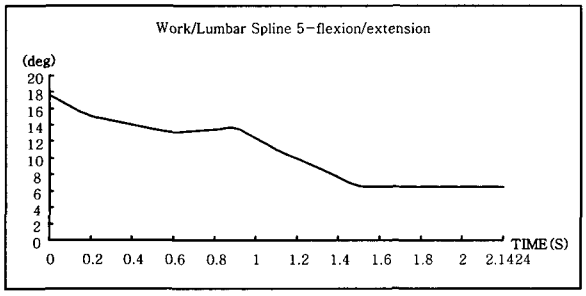


Fig. 14 Moving angle of waist after improving the overhead welding position

발판 위에 서서 작업하기 때문에 다리는 펴고 허리는 약간만 굽힌 자세로 용접이 가능하였다. 팔과 손목 부분은 4점, 목과 허리 및 다리부분은 2점을 얻어 최종 점수가 3점이 되었고 이는 좀 더 관찰을 필요로 하는 자세로 근골격계 부담이 현저히 줄었음을 알 수 있었다.

Fig. 14에 나타나 있는 허리의 움직임을 살펴보면 개선 전에는 허리를 약 20도로 계속 굽힌 채 작업했던 것에 비해 개선 후에는, 작업시점에서는 약 17.5도로 굽힌 자세였으나 작업이 진행되면서 용접부가 용접사와 가까워짐에 따라 허리가 서서히 펴지는 자세로 작업이 이루어져 허리에 가해지는 부담이 줄어드는 것을 알 수 있었다.

7. 결과 고찰

1) 위보기 용접자세의 개선

Table 4를 보면 위보기 용접자세의 개선 전은 목에서 5점, 허리에서 4점이 부여되어 총점이 7점이었다. 이것은 좁은 공간에서 목과 허리를 뒤 혹은 옆으로 젖히거나 구부려 용접함으로써 목과 허리에 큰 부담이 되는 자세로 인한 결과였다. 이 때 작업 발판을 아래로 이동시키면 목과 허리의 구부림을 완화시킬 수 있는 점에 착안하여 블록 모델링을 수정하고 시뮬레이션을 실

Table 4 Change of overhead welding position of score

Overhead welding	Before		After	
Upper Arm	3		3	
Forearm	2		1	
Wrist	3		2	
Wrist Twist	1		1	
Posture A	4		4	
Muscle	1		1	
Force/Load	0		0	
Wrist and Arm	5		5	
Neck	5		4	
Trunk	4		1	
Leg	1		1	
Posture B	5		2	
Neck, Trunk and Leg	6		3	
Final Score	7		4	

Table 5 Change of flat welding position of score

Flat welding	Before		After	
Upper Arm	4		2	
Forearm	2		2	
Wrist	2		3	
Wrist Twist	1		1	
Posture A	4		3	
Muscle	1		1	
Force/Load	0		0	
Wrist and Arm	5		4	
Neck	1		1	
Trunk	5		2	
Leg	1		1	
Posture B	4		1	
Neck, Trunk and Leg	5		2	
Final Score	6		3	

시한 결과 발판을 600mm 아래로 이동시킬 경우 선 자세로 용접이 가능하여 목과 허리의 부담을 크게 줄일 수 있었다. 이 경우 RULA 분석 결과는 목과 허리 점수가 각각 4점, 1점으로 낮아져 최종 점수는 7점에서 4점으로 줄어 근골격계 부담이 뚜렷이 개선된 것을 알 수 있었다.

2) 아래보기 용접 자세의 개선

Fig. 3의 (b)에 나타나 있는 아래보기 용접자세는 블록 내의 공간이 협소한 곳에서 용접하는 자세로서 허

리를 심하게 구부리는 자세였다. 이에 대한 분석결과인 Table 5를 보면 허리에서 5점, 팔과 손목에서 5점 등 최종 6점으로 분석되었다. 이 경우는 바닥에 일정높이의 발판을 추가 설치하여 그 위에서 서서 용접하는 것으로 변경하여 모델링과 시뮬레이션을 해 본 결과 용접선에 접근이 충분히 가능하면서도 허리의 구부림이 완화될 수 있었다. 이렇게 개선된 경우에 대한 RULA 분석 결과는 허리의 점수가 2점, 목, 허리 및 다리부분의 점수가 2점으로 최종 점수는 3점으로 낮아져 근골격계의 부담이 훨씬 경감되었음을 확인하였다.

8. 결 론

1) 작업자세가 근골격계에 미치는 영향에 대한 조사는 통상 설문조사나 문서로 이루어졌기 때문에, 작업자의 심리적, 정서적 판단으로 인해 객관성을 입증하기 어려웠다. 하지만, 본 연구에서는 용접사의 자세변화에 따른 작업강도를 인간공학적 분석기법과 시뮬레이션을 이용하여 수치적으로 표현함으로써 정확하고 객관적인 결과를 얻을 수 있었다.

2) 작업자세의 전환 평가를 받은 용접자세는 작업자가 포함된 작업공정의 모델링과 시뮬레이션을 이용하여 가능한 작업환경의 변경 및 보조물 활용 등을 통해 근골격계 질환을 유발하는 작업강도를 줄일 수 있었다.

3) 추후 연구에서는 시뮬레이션의 장점을 적극 활용하여 단순히 작업 환경만을 개선하는데 그치지 않고 작업 순서의 변경 등을 포함한 공정변경까지 고려함으로써 용접사의 근골격계 질환 감소를 위한 다양한 방법에 대해 연구를 지속할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10113-0)의 지원으로 수행되었으며 도움을 주신 한진중공업 관계자들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kyong Cheol Min et al. : A Feasibility Study of Work Posture Analysis using Human Modeling & Simulation in the Shipbuilding Industry, The Annual Autumn Meeting The Society of Naval Architects of Korea, 2005 (in Korean)
2. Kroemer, K.H.E. : "Cumulative trauma disorders: Their recognition and ergonomics measures to avoid them", Applied Ergonomics, **Vol. 20** Issue 4, 274 ~ 280, 1989
3. Hales, T.R., Sauter, S.L., Peterson, M.R., Fine L.J. : Putz-Anderson, V., Schlefier, L.R., Ochs, T.T., Bernard, B.P., "Musculoskeletal disorders among visual terminal users in a telecommunication company", Ergonomics, **37-10**, 1603~1621, 1994
4. McAtamney L., Corlett E.N. : "RULA:a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders", Applied Ergonomics, **Vol. 24** Issue 2, 91~99, 1993
5. Jung Yong Kim : Ergonomics for Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders (Work Hazards Assessment Techniques), Minyoungsa, 2004 (in Korean)
6. 한국산업안전공단 근골격계질환예방팀 : 근골격계부담작업 유해요인조사 시행지침 및 작성방법, 한국산업안전공단, 보건분야-기술자료 근예 2004-1-31, 2004 (in Korean)