

공학석사 학위논문

3차원 시뮬레이션을 활용한 중조 블록에서의 용접사  
근골격계질환 위험 감소 방안 연구

A Study of Musculoskeletal Disorders Risk Reduction Scheme  
in Semi-block using 3D Simulation

지도교수 박 주 용

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

송 창 섭

本 論 文 을 송 창 섭 의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 : 공학박사 남 종 호 (인)

위 원 : 공학박사 조 효 제 (인)

위 원 : 공학박사 박 주 용 (인)

2007년 12월 20일

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

# 목 차

List of Tables .....	III
List of Figures .....	IV
Abstract .....	VIII
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 기존의 연구 .....	3
1.3 연구내용 및 목표 .....	4
제 2 장 조선 산업에서의 근골격계질환 관리실태 .....	6
2.1 근골격계 질환의 정의 .....	6
2.2 현재 근골격계질환 예방 및 관리 .....	6
2.3 인간공학적 작업자세 분석 방법의 선정 .....	7
제 3 장 용접작업 자세의 모델링 및 정확성 검증 .....	12
3.1 부적절한 용접자세 선별 .....	12
3.2 기존의 인간공학적 분석 .....	13
3.3 3차원 시뮬레이션을 이용한 용접자세 평가 .....	15
3.4 3차원 시뮬레이션의 적용 가능성 평가 .....	18
제 4 장 Manufacturing Hub를 이용한 블록 생산 공정 .....	20
4.1 Manufacturing Hub 구조 .....	20
4.2 대상 블록과 용접사의 용접자세 선정 .....	26
4.3 Product와 Resource 모델링 .....	26

제 5 장 시뮬레이션으로 분석한 용접사의 용접자세 .....	32
5.1 현행 공정상의 용접자세 분석 .....	32
5.2 용접자세 개선을 위한 대안 제시 .....	37
5.3 공정 개선 후의 용접자세 분석 .....	40
5.4 공정 개선 전과 후의 자세 분석 결과 비교 .....	48
제 6 장 공정 개선에 의한 생산비용 증감 .....	51
제 7 장 결 론 .....	53
참고문헌 .....	55

## List of tables

Table 1. Final Score of RULA(McAtamney and Corlett, 1992) .....	11
Table 2. Evaluation of each score(McAtamney and Corlett, 1992) .....	11
Table 3. Worker's Anthropometric Data .....	16
Table 4. Relation between process and product .....	23
Table 5. Relation between process and resource .....	24
Table 6. Product models of block .....	27
Table 7. Resource models of work .....	27
Table 8. Change of overhead welding posture of score .....	48
Table 9. Change of flat welding position I of score .....	49
Table 10. Change of flat welding position II of score .....	50
Table 11. Production cost of each standard calculation .....	51

## List of figures

Fig. 1 The distribution of patient classified by cause of disease .....	1
Fig. 2 Change of MSDs Occurrence .....	2
Fig. 3 Rate of Shipbuilding's MSDs in all industry .....	2
Fig. 4 Digital HUMAN in virtual space (Tae-In Cha, 2004, 2005) .....	4
Fig. 5 RULA Scoring Sheet .....	10
Fig. 6 RULA Employee Assessment Worksheet(DELMIA Doc. V5R15) .....	10
Fig. 7 Welding work in various postures in the block .....	12
Fig. 8 Checklist of Real Workers .....	13
Fig. 9 RULA Sheets of Real Workers .....	14
Fig. 10 Product of Block in Virtual Space .....	15
Fig. 11 Generation of Digital Human Using Human Builder and Measurement Editor .....	16
Fig. 12 RULA results of welding workload in the overhead welding position .....	17
Fig. 13 RULA results of welding workload in the flat welding position .....	17
Fig. 14 Comparison of RULA Analysis in the overhead welding position .....	19
Fig. 15 Comparison of RULA Analysis in the flat welding position .....	19
Fig. 16 A function of Manufacturing Hub in the DPMA .....	21
Fig. 17 Standard structure of process .....	21

Fig. 18 Standard structure of product .....	22
Fig. 19 Standard structure of resource .....	23
Fig. 20 Structured example of Manufacturing Hub .....	25
Fig. 21 Loading example from Manufacturing Hub to DELMIA V5 .....	25
Fig. 22 Selected awkward welding postures .....	26
Fig. 23 Structure of E-BOM in the block .....	28
Fig. 24 Diagram of real production planning .....	29
Fig. 25 Structured of product and resource in the Manufacturing Hub .....	29
Fig. 26 Activity diagram for block assembly process .....	30
Fig. 27 Process graph in the Manufacturing Hub .....	31
Fig. 28 PERT Chart in the DELMIA V5 Human .....	31
Fig. 29 RULA results of the overhead welding position before improvement .....	32
Fig. 30 Moving angle of neck before improving overhead welding position .....	33
Fig. 31 Moving angle of waist before improving overhead welding position .....	33
Fig. 32 RULA results of the flat welding position I before improvement .....	34
Fig. 33 Moving angle of waist before improving flat welding position I .....	34
Fig. 34 RULA results of the flat welding position II before improvement .....	35
Fig. 35 Moving angles of thoracic and lumbar before improving flat welding position II .....	36

Fig. 36 Moving angles of legs before improving flat welding position II .....	36
Fig. 37 Moving angles of right arm before improving flat welding position II .....	36
Fig. 38 Work space in the modeled block .....	37
Fig. 39 A space under the foot support in the real block .....	37
Fig. 40 Problems of welding posture II .....	38
Fig. 41 Problems in the block .....	39
Fig. 42 A current posture of worker in the block .....	39
Fig. 43 Block Assembly Simulation of Present Process .....	39
Fig. 44 RULA results of welding workload in the improved overhead position .....	40
Fig. 45 Moving angle of neck after improving overhead welding position .....	41
Fig. 46 Moving angle of waist after improving overhead welding position .....	41
Fig. 47 RULA results of welding workload in the improved flat welding position I .....	42
Fig. 48 Moving angle of lumbar after improving flat welding position .....	42
Fig. 49 Changing product tree in Manufacturing Hub .....	43
Fig. 50 Process graph after changing process .....	44
Fig. 51 Registration of production and new resource on Semi_Auto process .....	44
Fig. 52 Change of simulation in 60DK .....	45
Fig. 53 Stiffener Welding Process Using Auto Welding Machine .....	45



Fig. 54 RULA results of welding workload in the improved flat welding position II .....	45
Fig. 55 Posture of digital human on right and up direction .....	46
Fig. 56 Moving angles of thoracic and lumbar after improving flat welding position II .....	47
Fig. 57 Moving angles of legs after improving flat welding position II .....	47
Fig. 58 Moving angles of right arm before improving flat welding position II .....	47

# **A Study of Musculoskeletal Disorders Risk Reduction Scheme in Semi-block using 3D Simulation**

**Chang Sub, Song**

**Division of Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University**

## **Abstract**

*Welders in shipbuilding yards often do their job with squatting postures owing to the complexity and limited space of ship block. Especially, welding conducted in the head of the ship block, semi-block, and block assembly depends on welders due to low rate of automatic welding. Because of this, welders are always exposed to the risk of musculoskeletal disorders.*

*Simulation can minimize waste of time and money according to improved working environment and changed progress of work. Therefore, to prevent these diseases, the author evaluated welders' postures with digital simulation. And the author not only improve welders' working environment in the virtual space but also assessed the result with simulation. RULA assessment technique was utilized to analyze welders' postures.*

*This study has modeled modeling of simulation using the concept of PPR which is composed Product, Process and Resource. And the researcher compared existing assessment techniques with current assessment techniques of human engineering to examine accuracy of digital simulation. Because PPR was saved and managed by the manufacturing hub, Product and Process were modified easily besides various data were easy to manage.*

*Additionally, graphs showing major physical movement of welders were presented in this study; these graphs allow us to objectively comprehend the effect of welders' posture improvement.*

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

기술집약적 산업인 동시에 노동집약적 산업이기도한 조선 산업은 선주로부터 주문을 받은 선박을 납기일내로 납품하는 것이 가장 중요한 일이며, 일정 기간 내 건조 가능한 많은 선박을 주문 받고 지어야 이윤을 많이 낼 수 있는 산업이다. 따라서 우리나라의 크고 작은 조선소는 저마다 생산성 향상에 노력을 아끼지 않고 있다. 하지만, 근래 생산성 향상과 더불어 대두되고 있는 현안이 업무상질병으로 분류되는 근골격계질환(Musculoskeletal Disorders, MSDs)이다. 조선 산업의 특성상 자동화가 이루어지지 않은 부분이 많고 작업 환경에 의해 부득이 부적절한 자세와 과도한 힘을 요구하는 작업이 많다. 이 때문에 한국산업안전공단에서는 2000년부터 조선 산업에 종사하는 작업자 중에서 근골격계 질환자가 다수 발생하였다고 밝힌 바 있다.

산업안전보건연구원이 2005년도에 발생한 산업재해 중 산업재해보상보험법에 의해 2006년 3월 31일까지 보상 받은 업무상질병 근골격계 질환자 2,068명을 조사하여 분석한 결과에 따르면 제조업에서 근골격계질환 발생 비율이 73.9%에 이른다. 이에 따른 주요 원인별 현황은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 부자연스러운 자세 48%, 과도한 힘·동작 34%, 반복적인 동작 13%, 압박·진동 1% 등으로 나타났다.

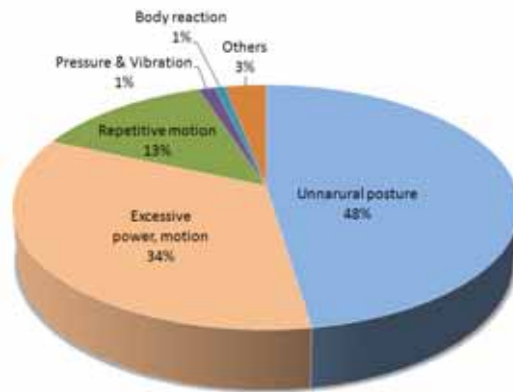


Fig. 1 The distribution of patient classified by cause of disease

우리나라 전체 산업에서 조선 산업의 근골격계 질환자가 차지하는 수는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 2002년 이후 500명 수준으로 꾸준히 발생하고 있다. 이는 결코 작은 수가 아니다. 2003년 근골격계 질환자가 급등한 이후, 정부와 사업체의 노력으로 전체 산

업에서 근골격계 질환자 수는 감소 추세에 있으나 조선 산업의 근골격계 질환자 수는 Fig. 3의 그래프에서 볼 수 있듯이 전체 산업의 15%정도를 지속적으로 차지하고 있음을 알 수 있다. 이외 산재를 기록하지 않은 경우, 개별적으로 치료를 받은 경우 등을 고려한다면 통계자료보다 질환자 수는 더 많을 것으로 판단된다.

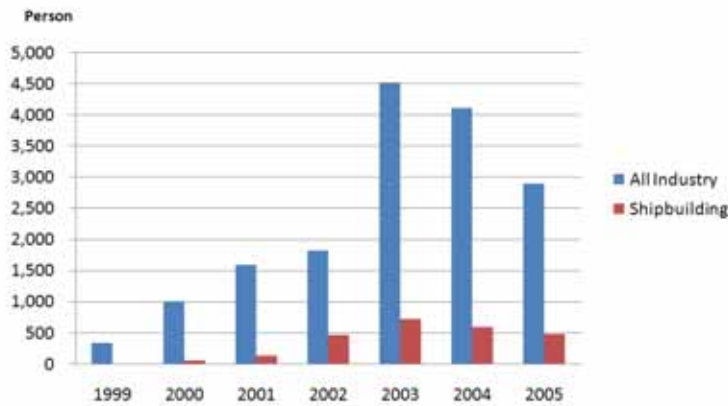


Fig. 2 Change of MSDs Occurrence

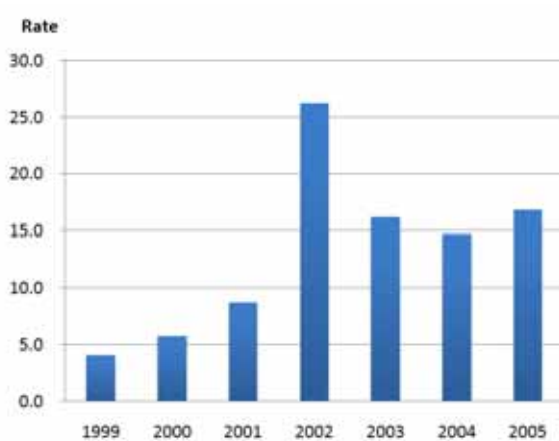


Fig. 3 Rate of Shipbuilding's MSDs in all industry

근골격계 부담작업자의 경우 비부담작업자에 비해 '육체적 직무요구도'는 물론 '직무 자율성', '직무 불안정성', '심리적 직무요구도'와 같은 사회심리적 직무스트레스 요인도 함께 악화되는 경향을 나타낸다. 결국, 근골격계 부담작업과 같이 육체적 직무요구도가 높은 작업이 사회심리적 직무스트레스 요인의 수준을 상승시킨다고 할 수 있다(박석호, 2006). 따라서 근골격계질환은 근로자의 직접 의료비 부담뿐만 아니라 근로의욕저하와 각종 스트레스로 인한 생산성 저하, 품질저하 등의 경영손실까지 야기한다.

근로자의 작업환경개선 요구가 점차 증가하고 질환자의 보상 문제도 사회적 논의로 부각되고 있는 만큼 근골격계질환은 사후관리보다는 사전관리 차원의 예방이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 이 때문에 정부는 근골격계질환 예방을 위하여 2003년부터 각종 법제와 지침을 마련하여 사업자와 근로자로 하여금 이를 준수하도록 하고 있으며, 이를 위반 시 징역이나 벌금을 부과하도록 하고 있다. 그리고 기업과 학계에서는 근골격계질환 위험 요인을 감소시키는 연구에 관심이 집중되고 있다.

## 1.2 기존의 연구

국내에서 조선 산업에 대한 인간공학 관련 연구, 특히 근골격계질환 계통의 연구와 실태조사는 미미한 실정이다. 지금까지의 연구방법은 주로 현장의 작업자들을 대상으로 한 실태조사와 설문지 분석과 재해사례 통계에 대한 연구였다.

박동현 등(1998)은 조선소에서 성형작업의 경우 분당 손목을 반복하는 회수가 25회 미만, 그라인딩 작업은 50회 이상, 도장작업과 용접작업은 25~50회 정도 반복적으로 손목이 움직이는 특성이 있다고 하였다. 작업 자세에 있어서는 주로 손바닥에 힘을 주는 동작과 팔꿈치, 어깨, 목, 손목 등의 동작에 위험요인이 있는 것으로 나타났으며, 연마작업의 위험성이 가장 높고 다음으로 도장작업, 용접작업이 상대적으로 위험성이 큰 것으로 나타났다. 조선소에서 총 100명에 대한 근골격계질환을 검진한 결과 총 29명이 유소견자로 나타났고, 이들 중 대부분은 근막통증후군과 수근과증후군이었다고 보고하였다(송동빈 등, 1997).

조선소 도장작업에서 신체부위에 따른 근골격계질환의 원인을 조사하기 위해 도장작업자들의 건강관리실이나 물리치료실에 방문한 대상자를 바탕으로 한 데이터를 분석한 바 있다(김유창 등, 2005).

오순영 등(2005)은 작업자의 통증호소와 작업에 관한 불편사항 및 개선과 관련된 설문조사와 워크 샘플링 방법에 근거한 작업의 내용 및 위험 요인 평가 등의 작업 분석 기법을 이용하여 종합적인 평가를 하였다. 또한, 유해요인조사에 의하여 측정된 내용을 분석하여 인간공학적 개선안을 제시하였다.

최근 제조업에서는 생산성 향상을 위해 도입하여 적용하고자 3차원 시뮬레이션 기법의 디지털 생산기술을 연구를 많이 하고 있다. 항공, 자동차 산업에서는 상당부분 진척을 이루고 있는 시뮬레이션 분야는 반복적인 작업 공정과 동종의 제품은 같은 생산 라인을 가지고 있기 때문에 시뮬레이션으로 구현하기 쉬운 장점이 있었다. 이에 반해 일품(一品) 생산 방식이라는 특수성으로 인해 조선 산업에서는 도입시기가 다소 늦었지만, 제품 생산 시뮬레이션뿐만 아니라 작업환경 및 작업 자세 개선을 위한 시뮬레이션도 함께 시작되고 있다.

손유식과 김유창(2005)은 미시간 대학교의 3D SSPP 프로그램과 DELMIA의 HUMAN을 이용하여 조선업에서의 위보기 용접작업에 대해서 인간공학적 평가를 하였다. 3D SSPP는 주로 들기 작업에서 많이 사용되는 것으로써, 정적이고 반복적인 작업인 위보기 용접 작업을 평가하기에는 한계가 있다고 판단되며, HUMAN을 이용한 시뮬레이션은 여러 가지 기법들로 평가할 수 있으며 작업 상황을 컴퓨터상에서 나타낼 수 있고 생산시스템과 연계가 가능하여 설계부서 등에서 효과적으로 사용할 수 있다고 판단했다.

차태인 등(2005)은 조선소에서 이루어지는 Airless Pump 정비 작업을 유해요인조사를 통해 현행체계의 문제점을 분석하고, Fig. 4와 같이 DELMIA의 HUMAN을 사용하여 평가하였다. 이 과정에서 기존의 RULA 평가와 시뮬레이션을 이용한 RULA 평가를 비교하여 타당성을 검토하였으며, 시뮬레이션을 이용하여 제안된 개선안에 대한 평가를 수행하여 개선안이 작업자의 작업부담을 경감시킴을 확인하였다.



Fig. 4 Digital HUMAN in virtual space (Tae-In Cha, 2004, 2005)

### 1.3 연구내용 및 목표

작업 시에 발생할 수 있는 작업공간, 작업자세 등 다양한 형태의 근골격계질환 유해요인은 이미 설계 시에 형성되어 있기 때문에 근골격계 질환 유해요인을 설계단계에서부터 제거하려는 노력 없이 생산현장에서의 작업장 환경 개선, 작업방법 재설계, 작업대 제공, 작업자 교육 등의 대책만으로는 근골격계질환 예방에는 한계가 있다(장성록 등, 2005). 따라서 3차원 시뮬레이션을 활용함으로써 실제 설계 변경과 작업 없이 가상 환경에서 먼저 시뮬레이션을 할 수 있다. 그러므로 비용과 시간의 낭비를 최소화할 수 있으며, 생산 공정 변화나 작업환경 개선이 과연 기대만큼의 결과를 가져올 수 있는가를 판단할 수 있는 근거를 얻을 수 있다.

조선소에서 선박블록 용접시 블록형상의 복잡성과 작업공간의 협소성으로 인해 다양

한 용접자세가 요구될 수밖에 없다. 특히, 블록의 선수미 부분, 소조립 부분보다는 중조립이나 대조립에서 이루어지는 용접은 용접의 자동화율도 낮아 작업자의 용접에 의존하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 용접자세 중 대표적인 자세로 위보기 용접자세와 아래보기 용접자세를 선택하고 용접이 이루어지는 장소는 중조립 과정의 블록을 선택하였다. 그리고 작업자의 3차원 시뮬레이션을 구현하기 위한 소프트웨어는 DELMIA HUMAN과 Manufacturing Hub로는 DELMIA의 Process Engineering, 그리고 3차원 형상 모델링은 CATIA를 사용하였다.

먼저, 가상공간에서 만들어진 블록에서의 Digital Human의 용접자세 분석 결과와 기존의 인간공학적 분석 방법에 의한 결과를 비교하여 3차원 시뮬레이션의 정확성을 검증하였다. 그리고 블록 생산 공정 및 리소스의 효과적인 변경과 가상공간으로의 적용을 위해 해당 용접이 이루어지는 블록의 생산 공정을 분석하여 프로세스, 프로덕트, 리소스(Process, Product, Resource, PPR)로 나누어 모델링하고 Manufacturing Hub에 저장하였다.

모든 모델링이 완료된 다음, 현행 공정에서의 용접자세를 시뮬레이션하여 작업자의 근골격계질환 위험도와 그에 따른 문제점을 파악하고 개선안을 마련한 다음 필요에 따라 Manufacturing Hub의 프로세스나 리소스를 변경하거나 추가하였다. 그리고 개선안에 따라 시뮬레이션을 다시 수행하여 제안된 개선안에 따른 공정변화로 인해 작업자의 근골격계질환 위험도가 얼마나 감소되는지 확인하였다.

## 제 2 장 조선 산업에서의 근골격계질환 관리실태

### 2.1 근골격계 질환의 정의

근골격계질환이란 근골격계 부위에 생기는 질환을 의미하며, 주로 작업자세, 작업 반복횟수, 작업물 중량, 요구되는 힘, 진동, 작업속도, 공구설계, 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. 단, 발생원인 중에서 갑작스러운 사고나 미끄러짐, 추락이나 충돌에 의한 상해는 제외된다(NSC, 2002). 특히 이런 근골격계 질환의 발생 위험이 높은 작업은 단순 반복 작업, 중량물 취급작업, 수공구 및 각종 기계류를 취급하는 작업, VDT작업, 각종 조립작업, 포장작업, 육가공업 등이 있다. 근골격계 질환의 대부분이 누적외상성 질환이며, 이는 근조직과 같은 부드러운 신체조직(soft tissue)에 발생하는 미세균열(micro fracture)이 누적되어 신체조직 기능에 손상(impairment)을 일으키는 경우를 말한다(김정룡, 2004).

누적외상성 질환의 증세는 매우 다양하며 구분하기가 어려운 경우가 많으나, 특히 통증, 민감함, 쇠약함, 부어오름, 무감각함 등의 증세를 보이며, 어떤 경우에는 운동 장애를 수반하는 경우도 있다. 주로 근골격계 질환이 발생하는 부위를 미국산업안전보건연구원(NIOSH, 1989)에서는 목, 어깨, 팔꿈치, 손목 및 손가락 등 4가지 신체부위에서 문제되는 뼈, 근육, 신경, 혈관 등의 장애로 정의하고 있으며, 지금은 허리, 하지(무릎, 발목, 발가락 등)부위까지 포함한 폭넓은 의미로 사용되고 있다.

근골격계질환의 증상들은 보통 한번 통증이 발생되면 1주일 이상 지속되거나 과거 1년간 적어도 1달에 1번 이상 통증이 반복되는 경우에 해당되며, 동일한 신체 부위에 유사질환(류마티스 관절염, 당뇨병, 통풍, 루프스병, 갑상선질환, 악성종양 등)과 사고 병력이 없어야 하고, 현재의 작업이 시작 된 이후에 발생한 증상을 직업병으로 정의하고 있다(NIOSH, 1997).

근골격계질환은 직업과 무관하게 발생할 수 있고, 나이가 많은 근로자의 경우 노화의 과정으로 근골격계의 이상이 생길 수 있어, 질환의 원인을 쉽게 파악할 수 없는 경우도 많이 있다. 근골격계질환의 업무관련성 여부를 파악하기 위해서는 근골격계 질환에 대한 지식과 임상 경험 이외에도 근로자들이 현장에서 하고 있는 각종 작업공정들에 대한 이해와 현장 경험이 필요하다(김정룡, 2004).



## 2.2 현재 근골격계질환 예방 및 관리

근골격계질환을 비수술적으로 치료하기 위한 방법은 운동, 소염제, 부목, 스테로이드 국소 주사, 정기적인 검진 등이 있다. 운동은 근육을 과도하게 사용하여 문제가 있는 경우 근육이완 운동(스트레칭) 혹은 직장체조를 권하고 평소에 근육의 힘을 강화하기 위한 운동을 교육한다. 소염제는 염증을 완화하고 통증을 감소시키기 위하여 비스테로이드 소염제를 처방한다. 부목은 관절의 과도한 움직임을 억제하고 지지하기 위해 사용한다. 그리고 스테로이드 국소 주사는 통증이 일부에 국한되어 있는 경우 해당 부위의 염증을 완화하고 통증을 감소시킬 목적으로 주사요법을 시행한다. 또한 정기적으로 환자의 상태변화를 관찰하기 위해 정기검진을 실시토록 하고 있다.

한국산업안전공단에서는 근골격계질환 예방을 위하여 예방관리프로그램을 두고 있다. 프로그램의 기본원칙은 노·사·정이 근골격계질환 문제가 존재할 수밖에 없다는 현실을 인정하고 예방과 관리를 위해 공동참여와 운영이 필요하다는 것을 강조하고 있다.

구체적인 사항으로 근골격계 부담작업, 질환의 증상과 식별방법 등과 관련한 교육과 사업주에게는 유해요인조사와 작업환경개선을 지속적으로 실시토록하고 있다.

이처럼, 현재 시행되고 있는 근골격계질환 예방과 관리는 보다 근본적인 해결책을 제시해주지 못하고 있다. 예방에 대한 구체적인 방법으로는 대체로 스트레칭이나 체조를 제시하고 있으며 근골격계질환 조사방법과 사후관리 방법 및 평가에 대해 비중을 두고 있다는 것을 알 수 있다.

## 2.3 인간공학적 작업자세 분석 방법의 선정

노동부의 부담작업 판정기준은 인체부위별 작업자세, 작업시간, 빈도 그리고 작업물의 무게에 근거한 11개 항목으로 대상 작업들을 평가한다. 노동부 부담작업 판정기준은 미국 Washington State Caution Zone에서 규정한 11개 조항을 기반으로 제안된 것으로 알려져 있다. 박국무 등(2006)은 노동부 부담작업 판정기준이 미국의 법안을 기준으로 제시되었을 뿐 판정기준의 검증절차가 없어, 기준의 정확성 및 평가특성에 대한 정량적 평가를 실시하였다. 박국무 등은 노동부 판정기준은 평가대상 작업을 비부담작업으로 판정할 가능성이 높은 부수적인 평가기법으로 판단한 반면, 인간공학적 평가기법들은 작업자세, 중량물의 무게, 사용빈도 그리고 노출 시간을 세밀한 기준으로 평가한 후 각 요인의 복합적 영향을 정량화하여 종합적으로 작업부담을 평가한다고 하였다.

이번 절에서는 대표적인 인간공학적 평가기법들의 특성을 간단히 소개하고 본 연구에서 사용할 평가기법을 제시하였다.

### 2.3.1 NIOSH

1991년에 개정된 미국산업안전보건연구원 들기작업 지침으로 지금까지 여러 작업장에서 들기작업에 관련된 참고사항으로 사용되고 있다. 들기작업에 대한 권장무게한계(Recommended Weight Limit : RWL)를 쉽게 사출하도록 하여 작업의 위험성을 예측하고 인간공학적인 작업방법의 개선을 통해 작업자의 직업성 요통을 사전에 예방하기 위해 개발되었다.

### 2.3.2 OWAS(Ovako Working posture Analysis System)

1977년 핀란드의 철강회사인 Ovako사와 FIOH(Finnish Institute of Occupational Health)에서 근력을 발휘하기에 부적절한 작업자세를 구별해낼 목적으로 공동 개발하였다. 이 기법은 작업자세에 의한 작업 부하에 초점을 맞추었고, 현장 작업장에서 특별한 기구 없이 관찰에 의해서만 작업자세를 평가할 수 있도록 하였다.

### 2.3.3 REBA(Rapid Entire Body Assessment)

작업자세와 관련되어 나타나는 근골격계 질환의 위험성 평가를 위해 Hignett과 McAtamne에 의하여 제안된 것으로 의료 관련 직종이나 여타 산업에서 예기치 못한 자세들이 발생하는 경우를 대비해서 만들어졌다.

### 2.3.4 RULA(Rapid Upper Limb Assessment)

1993년 영국에서 McAtamney와 Corlett에 의해 어깨, 팔목, 손목, 목 등 상지(Upper Limb)에 초점을 맞추어 작업자세로 인한 작업부하를 평가하기 위한 기법이다. 근골격계질환과 관련된 위험인자에 대한 개인작업자의 노출정도를 평가하기 위한 목적으로 개발된 RULA는 개발과정에서 의류산업체의 재단, 재봉, 검사, 포장작업 그리고 VDU(Video Display Unit) 작업자 등을 포함하는 다양한 제조업의 작업을 그 분석연구 대상으로 하고 있다. 이 도구는 EU의 VDU 작업장의 최소안전 및 건강에 관한 요구 기준과 영국의 직업성 상지질환의 예방지침의 기준을 만족하는 보조도로 사용되고 있다. 또한 나쁜 작업자세로 인한 상지의 장애(Disorders)를 안고 있는 작업자의 비율이 어느 정도인지를 쉽고 빠르게 파악하는 방법을 제시하며 근육 피로에 관한 부하도 평가한다.

본 연구에서 NIOSH는 들기 작업에 국한되어 밀기, 당기기에 대한 평가가 미흡하며, OWAS는 배우기 쉽고, 현장에 적용하기 쉬운 장점 때문에 많이 이용되고 있지만 작업 자세를 너무 단순화했기 때문에 세밀한 분석에 어려움이 있으며, 분석결과가 구체적이지 못한 단점이 있다. REBA는 RULA의 단점을 보완하였으나 평가결과에 대한 추가 검증이 필요하다. 마지막으로 RULA 평가기법은 주로 상지의 평가에 편중되어 있으나 전체적인 작업자세 평가도구이며 공구 무게까지 고려되어 분석되므로 다른 평가기법과 비교해 보았을 때, 본 연구에 가장 알맞은 평가도구라 판단되었다. 그러므로 이후 대상 작업자세의 근골격계질환 위험요인 분석을 RULA 평가기법으로 택하였다.

### 2.3.5 RULA 평가 절차

RULA에서는 단위 시간당 동작 횟수가 많아지거나 근력이 필요한 정적인 작업이 많아질수록, 또 보다 큰 힘이 요구되거나 나쁜 작업자세가 많을수록 작업 부하가 증가하는 것으로 가정하고 있다. 따라서 자세분류별 부하 수준을 평가할 때 작업 부하에 영향을 주는 인자들은 많지만, RULA 평가에서 다루는 주요 작업 부하 인자를 다음 네 가지로 분류하였다.

- 동작의 횟수 (Number of Movement)
- 정적인 근육작업 (Static Muscle Work)
- 힘 (Force)
- 작업 자세 (Work Posture)

RULA 평가에 있어서 각 작업자세는 신체부위별로 A와 B그룹으로 나누어지며, 각 그룹별 작업자세와 근육의 사용정도 그리고 힘에 대한 평가로 구성된다. 또한, 작업에 대한 평가는 1~7점 사이의 총점으로 나타내며, 점수에 따라 4단계의 조치단계(Action level)로 나누어진다. 평가절차는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 이루어지며 총 15단계로 구성되어 있다. 신체부위별 작업자세를 나타내는 그림과 3개의 배점표로 구성되어 있다. (Fig. 6참조)

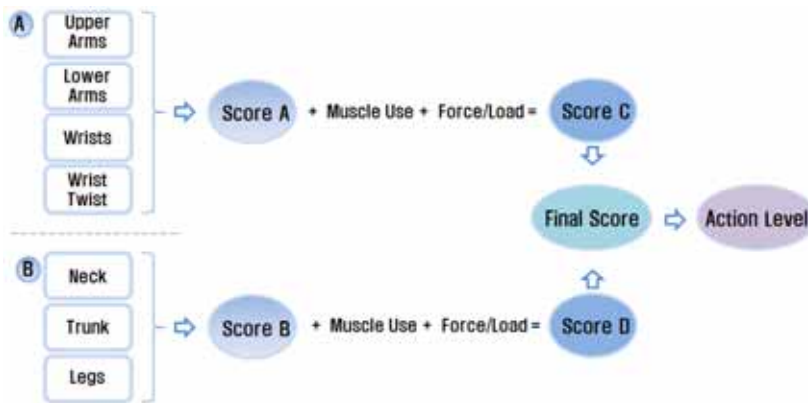


Fig. 5 RULA Scoring Sheet

## RULA Employee Assessment Worksheet

Complete this worksheet following the step-by-step procedure below. Keep a copy in the employee's personnel folder for future reference.

### A. Arm & Wrist Analysis

**Step 1: Locate Upper Arm Position**  
0° to 20° = +1, 20° to 30° = +2, 30° to 45° = +3, 45° to 90° = +4, 90° = 0

**Step 2: Locate Lower Arm Position**  
0° to 100° = +1, 100° to 120° = +2, 120° to 160° = +3, 160° to 180° = +4

**Step 3: Locate Wrist Position**  
0° to 15° = +1, 15° to 30° = +2, 30° to 45° = +3, 45° to 60° = +4, 60° to 75° = +5

**Step 4: Wrist Twist**  
if twisted in flexion/extension in mid-range = +1, if twisted at or near end of twisting range = +2

**Step 5: Look-up Posture Score in Table A**  
Use values from steps 1, 2, 3, 4 to locate Posture Score in Table A.

**Step 6: Add Muscle Use Score**  
If posture mainly static (i.e. held for longer than 1 minute) or: if action repeatedly occurs 4 times per minute or more: +1

**Step 7: Add Force/load Score**  
If load less than 2 kg (intermittent): +0  
 If 2 kg to 10 kg (intermittent): +1  
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +2  
 If more than 10 kg (static or repeated) or shocks: +3

**Step 8: Find Row in Table C**  
The completed score from the Arm/Wrist analysis is used to find the row on Table C.

### SCORES

**Table A**

Wrist Twist	Wrist	Lower Arm	Upper Arm	Posture
1	1	1	1	1
1	1	2	1	2
1	1	3	1	3
1	1	4	1	4
1	2	1	1	2
1	2	2	1	3
1	2	3	1	4
1	2	4	1	5
1	3	1	1	3
1	3	2	1	4
1	3	3	1	5
1	3	4	1	6
1	4	1	1	4
1	4	2	1	5
1	4	3	1	6
1	4	4	1	7
2	1	1	1	2
2	1	2	1	3
2	1	3	1	4
2	1	4	1	5
2	2	1	1	3
2	2	2	1	4
2	2	3	1	5
2	2	4	1	6
2	3	1	1	4
2	3	2	1	5
2	3	3	1	6
2	3	4	1	7
2	4	1	1	5
2	4	2	1	6
2	4	3	1	7
2	4	4	1	8
3	1	1	1	3
3	1	2	1	4
3	1	3	1	5
3	1	4	1	6
3	2	1	1	4
3	2	2	1	5
3	2	3	1	6
3	2	4	1	7
3	3	1	1	5
3	3	2	1	6
3	3	3	1	7
3	3	4	1	8
3	4	1	1	6
3	4	2	1	7
3	4	3	1	8
3	4	4	1	9

**Table B**

Trunk Posture Score	Legs					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	3	4	5	6	7
3	3	4	5	6	7	8
4	4	5	6	7	8	9
5	5	6	7	8	9	10
6	6	7	8	9	10	11
7	7	8	9	10	11	12
8	8	9	10	11	12	13
9	9	10	11	12	13	14
10	10	11	12	13	14	15
11	11	12	13	14	15	16
12	12	13	14	15	16	17
13	13	14	15	16	17	18
14	14	15	16	17	18	19
15	15	16	17	18	19	20

**Table C**

Final Score	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
9	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

### B. Neck, Trunk & Leg Analysis

**Step 9: Locate Neck Position**  
0° to 10° = +1, 10° to 20° = +2, 20° to 30° = +3, 30° to 45° = +4, 45° to 60° = +5

**Step 10: Locate Trunk Position**  
0° to 20° = +1, 20° to 30° = +2, 30° to 45° = +3, 45° to 60° = +4, 60° to 75° = +5

**Step 11: Legs**  
If legs & feet supported and balanced: +1  
 If not: +2

**Step 12: Look-up Posture Score in Table B**  
Use values from steps 9 & 10 to locate Posture Score in Table B.

**Step 13: Add Muscle Use Score**  
If posture mainly static or: if action repetitive or more: +1

**Step 14: Add Force/load Score**  
If load less than 2 kg (intermittent): +0  
 If 2 kg to 10 kg (intermittent): +1  
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +2  
 If more than 10 kg (static or repeated) or shocks: +3

**Step 15: Find Column in Table C**  
The completed score from the Neck/Trunk & Leg analysis is used to find the column on Chart C.

**Final Score =**

Subject: \_\_\_\_\_

Date: / /

Company: \_\_\_\_\_

Department: \_\_\_\_\_

Scorer: \_\_\_\_\_

Fig. 6 RULA Employee Assessment Worksheet(DELMI Doc. V5R15)

그룹 A에서 상완(Upper Arm), 전완(Lower Arm), 손목(Wrist) 그리고 손목의 비틀림(Wrist Twist)을 평가하고(1~4 단계), 5단계에서 Table A를 이용하여 A그룹의 점수(Score A)를 찾는다. 그리고 6~7단계에서 추가 근육사용과 힘이나 하중에 대한 점수를

A그룹 점수에 더하여 8단계에서 해당하는 점수(Score C)를 Table C에서 찾는다. 그런 다음, 9~11단계에서 목, 몸통과 다리를 평가하여, 12단계, Table B에서 B그룹의 점수(Score B)를 찾는다. 13~14단계에서는 마찬가지로 추가 근육사용과 힘이나 하중에 대한 점수를 B그룹의 점수와 더한 점수(Score D)를 Table C에서 찾는다. 마지막 15단계에서는 각각 산출된 그룹의 점수로 Table C에서 최종 점수(Final Score)를 찾아 자세평가에 대한 조치단계를 적용하게 된다. Table C에 해당하는 평가내용은 별도로 Table 2.에 나타내었다.

Table 1. Final Score of RULA(McAtamney and Corlett, 1992)

Score D \ Score C	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

Table 2. Evaluation of each score(McAtamney and Corlett, 1992)

Final Score	Evaluation of level
1 ~ 2	Acceptable
3 ~ 4	Investigate further
5 ~ 6	Investigate further and change soon
7	Investigate and change immediately

즉, 작업 부하수준이 높을수록 해당 작업자세의 근골격계질환 위험도가 높아진다는 것을 의미한다. 비록, 인간의 몸이 복잡하고 주위 환경적인 요소에 적응력이 빠르면서도 영향을 많이 받기 때문에 이같이 단순한 계산에 의해 작업자세의 작업 부하수준을 나타낸다는 것이 다소 부적절하지만, RULA의 평가가 작업 부하수준을 필요로 하는 이 예제는 하나의 지침(Guideline)이 될 수 있다(McAtamney and Corlett, 1992).

### 제 3 장 용접작업 자세의 모델링 및 정확성 검증

3차원 시뮬레이션에서의 작업자 모델링과 작업 모델링의 적용 가능성 및 정확성을 검증하기 위해 위보기 용접자세와 아래보기 용접자세를 대상으로 기존의 인간공학적 분석기법인 유해요인조사표 및 RULA 조사표를 이용하여 자세를 분석하였다. 그리고 3차원 시뮬레이션을 이용하여 작업자의 자세를 RULA 분석기법으로 분석한 결과를 위 인간공학적 분석기법과 비교, 분석하였다. 이 검증방법은 본 연구의 선행과제로 이미 민경철 등(2005)이 조선산업에서 Human & Simulation을 이용한 작업자세분석 적용가능성 연구에서 위보기 용접자세를 대상으로 사용한 바 있다.

#### 3.1 부적절한 용접자세 선별

본 연구에서 3차원 시뮬레이션의 검증을 위해 선택한 부적절한 용접자세로 위보기 용접자세 1건과 아래보기 용접자세 1건을 선택하였다. Fig. 7(a)는 블록 내부에서 위보기자세로 용접작업을 하는 자세이고, (b)는 아래보기자세로 용접작업을 하는 모습이다. 위보기 용접자세는 작업점이 머리 위에 위치하고 있기 때문에 작업 시 용접토치를 쥐고 양팔을 위로 들어 작업해야한다. 또한, 용접을 하는 동안 용접점을 주시하기 위해 목을 젖혀야 한다. 따라서 손목, 팔, 어깨, 허리, 목 등에 부담을 준다. 아래보기 용접자세의 경우, 쪼그리고 앉아 허리를 굽혀 상체와 하체를 밀착시켜 작업을 해야 하므로 허리와 다리에 근골격계부담을 주는 자세이다.



(a) Overhead welding posture

(b) Flat welding posture

Fig. 7 Welding work in various postures in the block

먼저, 위 두 가지 용접작업 자세를 대상으로 작업환경을 기존의 인간공학적 분석기법인 유해요인조사표와 유해요인조사지침에서 정하는 작업분석 평가도구 중에서 RULA



Fig. 8은 현장에서 용접작업을 촬영 및 분석을 통해 작성된 유해요인조사표이다. 위 보기 용접자세와 아래보기 용접자세 모두 높은 작업부하를 가지고 있으며 8시간 이상 작업으로 작업빈도 또한 높은 수준으로 나타났다. 유해요인으로 위보기 용접자세는 머리 위의 용접점으로 인해 목의 젓힘과 팔을 들고 작업해야하는 부담을 가지고 있었으며, 아래보기 용접자세는 좁은 작업공간으로 인해 목과 허리를 굽혀 작업해야 했으며, 쪼그려 앉은 자세로 인해 다리에 부담이 가해지는 것으로 나타났다.

### 3.2.2 RULA 분석

현장에서 이루어진 조사와 분석으로 RULA 분석표를 각각 작성하였다. 위보기 용접 자세의 최종점수는 7점, 아래보기 용접자세는 6점으로 평가되었다. 최종점수가 7점은 즉시 자세를 개선해함을 뜻하고, 6점은 작업 자세를 가능한 한 빨리 바꾸어야 함을 뜻한다. 위보기 용접자세는 목 부분에서 높은 점수를 얻었고, 아래보기 용접자세에서는 허리부분에서 높은 점수를 받은 것으로 나타났다. Fig. 9는 각 자세를 평가한 RULA 조사표를 보여준다.

위보기 (Top View)				아래보기 (Bottom View)			
조사 일자	조사자	JOB/작업	조사지	조사 일자	조사자	JOB/작업	조사지
2023.08.15	김민준	용접	충청남도 천안시 동남구	2023.08.15	김민준	용접	충청남도 천안시 동남구
<b>목부위 (Neck)</b> 목의 굽힘 각도 (0-180도)에 따라 점수 부여. 위보기 자세는 목을 위로 젓는 자세로 점수 3.				<b>목부위 (Neck)</b> 목의 굽힘 각도 (0-180도)에 따라 점수 부여. 아래보기 자세는 목을 앞으로 굽는 자세로 점수 3.			
<b>손목 (Wrist)</b> 손목의 굽힘 각도 (0-90도)에 따라 점수 부여. 위보기 자세는 손목을 들어 올린 자세로 점수 3.				<b>손목 (Wrist)</b> 손목의 굽힘 각도 (0-90도)에 따라 점수 부여. 아래보기 자세는 손목을 굽힌 자세로 점수 3.			
<b>허리 (Lower Back)</b> 허리의 굽힘 각도 (0-90도)에 따라 점수 부여. 위보기 자세는 허리를 굽힌 자세로 점수 1.				<b>허리 (Lower Back)</b> 허리의 굽힘 각도 (0-90도)에 따라 점수 부여. 아래보기 자세는 허리를 굽힌 자세로 점수 1.			
<b>다리 (Legs)</b> 다리의 굽힘 각도 (0-90도)에 따라 점수 부여. 위보기 자세는 다리를 굽힌 자세로 점수 1.				<b>다리 (Legs)</b> 다리의 굽힘 각도 (0-90도)에 따라 점수 부여. 아래보기 자세는 다리를 굽힌 자세로 점수 1.			
<b>총점 (Total Score): 7</b> Action Level: 4 (개선 필요)				<b>총점 (Total Score): 6</b> Action Level: 3 (개선 필요)			

Fig. 9 RULA Sheets of Real Workers



### 3.3 3차원 시뮬레이션을 이용한 용접자세 평가

3차원 시뮬레이션을 위하여 용접이 이루어지는 작업환경을 모델링하였다. 작업환경은 Product에 해당하는 블록과 Resource에 해당하는 용접사와 각종 용접도구로 분류하였다. Resource로 분류된 용접사는 Digital Human이라고 지칭하였다.

#### 3.3.1 가상환경 모델링

용접작업을 수행하는 공간이자 본 연구에서 최종 생산물이 되는 블록을 Fig. 10과 같이 모델링하여 가상공간에 구축하였다. 블록은 Digital Human이 용접작업 자세를 취하게 될 공간이 되므로 실제 생산치수 그대로 모델링되어야 한다는 점이 중요하다.

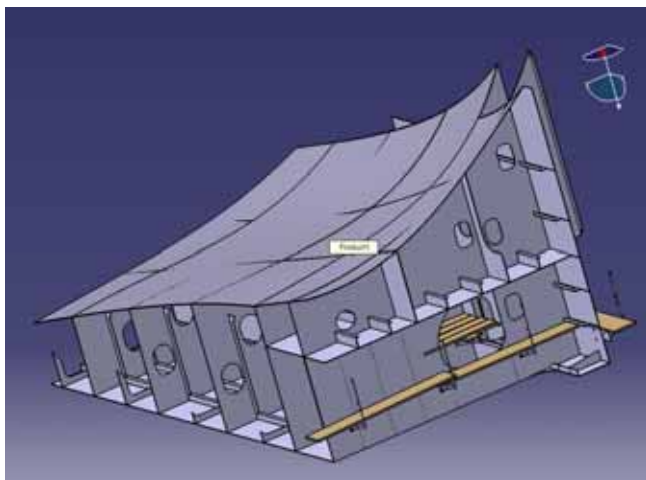


Fig. 10 Product of Block in Virtual Space

#### 3.3.2 디지털 휴먼 모델링

실제 용접사와 같은 신체치수로 Digital Human을 모델링하기 위해 현장에서 대상 용접사의 신체치수를 취득하였다. 위보기 용접작업을 수행하는 용접사에게서 취득한 신체치수는 Table 3.과 같다. Digital Human을 Human Builder 모듈로 생성하고 나서, Fig. 11처럼 Human Measurement Editor 모듈을 사용하여, 실측한 신체치수를 Digital Human에 입력하였다. 취득하지 못한 그 외 신체치수는 한국표준과학연구원에서 수행한 국민 인체측정조사 연구에서 밝힌 표준 한국남자 체형을 따랐다. 아래보기 용접작업을 수행하는 용접사에게도 같은 방법을 적용하였다.

Table 3. Worker's Anthropometric Data

Body parts	Measurements(cm)	
	A	B
Stature	162	170
Span	156	168
Bideltoid Breadth	42	45
Chest Breadth	32	28.6
Wrist-Wall Length, Extended	75	60.3
Radiale-Styilion Length	23	24
Hand Length	19	20
Waist Height, Omphalion	90	97
Knee Height	44	46

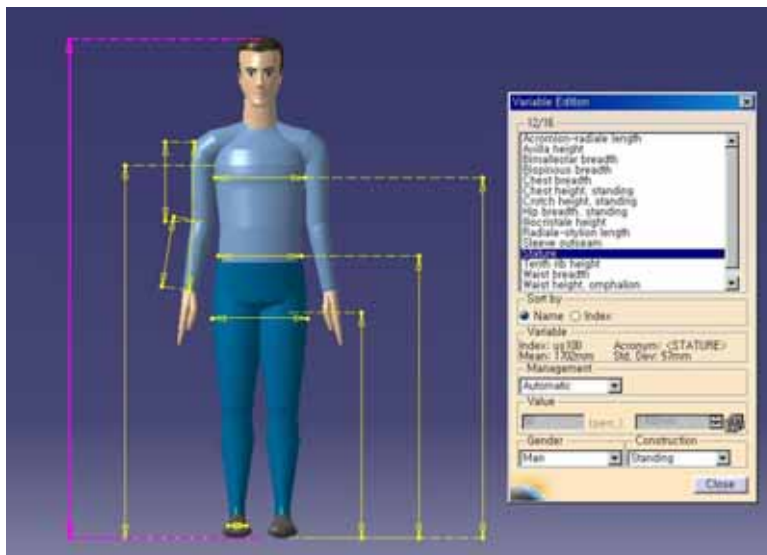


Fig. 11 Generation of Digital Human Using Human Builder and Measurement Editor

### 3.3.3 3차원 시뮬레이션을 활용한 RULA 분석

Human Activity Analysis 모듈을 사용하여 Digital Human의 용접자세를 시뮬레이션하고 RULA 평가기법으로 Digital Human의 자세를 분석하였다. Fig. 12는 Digital

Human의 위보기 용접자세를 시뮬레이션하고 결과를 보여주는 그림이며, Fig. 13은 아래보기 용접자세를 시뮬레이션하고 결과를 나타낸 그림이다.

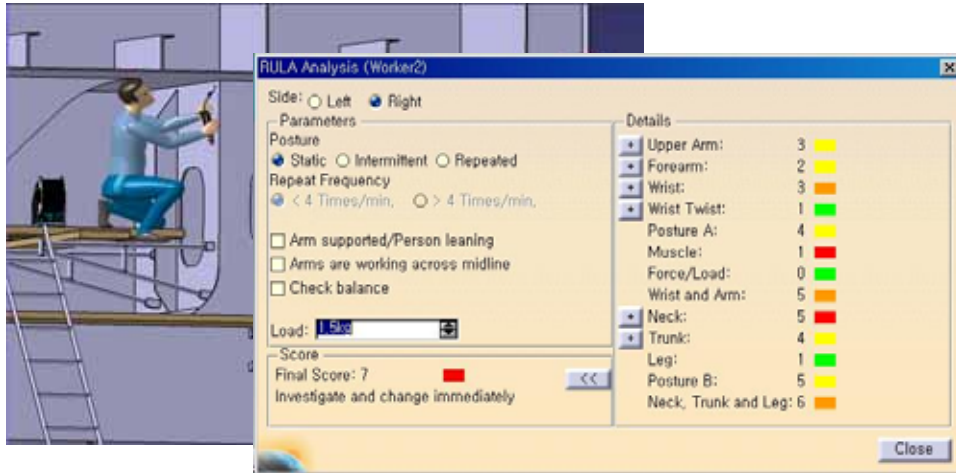


Fig. 12 RULA results of welding workload in the overhead welding position

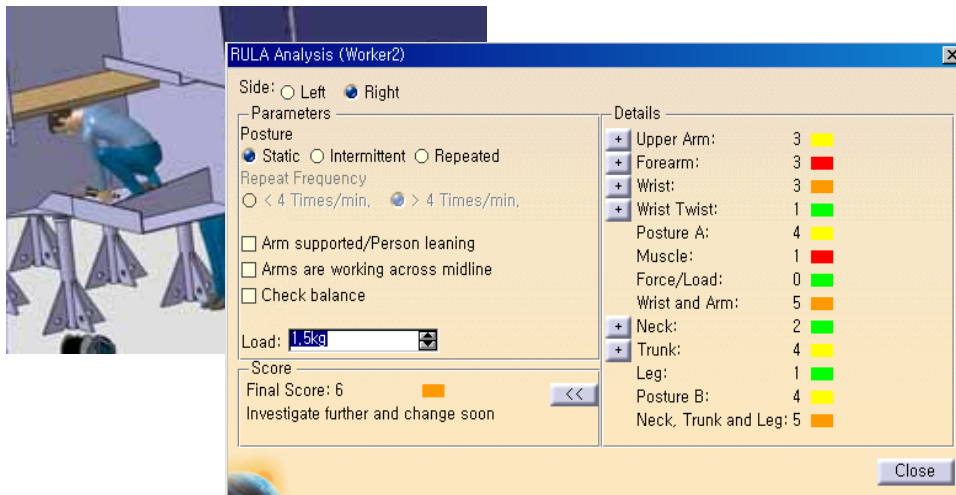


Fig. 13 RULA results of welding workload in the flat welding position

위보기 용접자세는 최종점수가 7점으로 즉시 자세를 변경할 것을 요구하고 있다. 이는 팔과 손목, 그리고 목에서 비교적 높은 점수를 받았기 때문이다. 아래보기 용접자세는 최종점수가 6점으로 가능한 빨리 자세를 변경해줄 것을 요구하고 있다. 팔과 허리, 몸통에서 비교적 높은 점수를 받은 것을 알 수 있다.

### 3.4 3차원 시뮬레이션의 적용 가능성 평가

선별된 위보기 용접자세와 아래보기 용접자세에 대해서 기존의 인간공학적 분석기법인 유해요인조사결과, RULA 분석 결과와 Digital Human을 이용한 3차원 시뮬레이션에 의한 결과를 비교하였다.

두 가지 자세 모두 유해요인조사결과에 나타난 용접자세의 근골격계부담요인이 Digital Human의 RULA 분석결과에 반영되어 나타났으며, 현장에서의 RULA 최종평가와 Digital Human의 RULA 최종평가가 각각 7점과 6점으로 일치한 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 신체부위별 RULA 분석결과는 약간의 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

위보기 용접자세의 경우, 실제 용접사와 Digital Human의 상완과 전완의 높이차가 약간 발생하였고, 동시에 실제 용접사에게서는 볼 수 없었던 손목의 미세한 회전이 Digital Human에게서 발생하였기 때문에 Digital Human의 상지부 점수가 실제 용접사의 점수와 차이를 보였다. 또한 실제 용접사는 몸통을 약간 돌려 용접을 하였지만, Digital Human에는 몸통회전을 적용하지 못하고 굽힘 정도만 주었기 때문에 Score D에 해당하는 허리부분에서도 약간의 점수 차이를 볼 수 있었다(Fig. 14참조).

아래보기 용접자세의 경우, 상지부 평가는 실제 용접사와 Digital Human의 평가는 차이를 보이지 않았다. 다만, 실제 용접사가 구부린 등과 허리의 정도를 정확히 파악하지 못해 Digital Human에게 제대로 적용되지 않아 하지부 평가 Score B에서 점수가 약간 차이나는 것을 확인하였다(Fig. 15참조). 또한 점수에는 반영되지 않았지만, 팔을 구부린 정도가 약간 차이 났음을 확인할 수 있었다.

하지만, 전체적으로 Digital Human 시뮬레이션의 검증은 만족할 만한 수준이라고 자체적으로 평가하였다. 실제 용접사의 작업복으로 인해 정확히 관찰 할 수 없었던 몸통의 회전이나 손목의 회전이 Digital Human과 차이를 보이고 있을 뿐, 전체적인 신체적 특징이 모두 Digital Human에 그대로 적용이 됨으로써 RULA에 의한 최종 평가는 동일하다고 결론 내릴 수 있었다.

A. Arm & Wrist Analysis		B. Neck, Trunk & Leg Analysis	
Component	Score	Component	Score
Upper Arm Position	3	Neck Position	5
Lower Arm Position	3	Trunk Position	3
Wrist Position	3	Legs	1
Wrist Twist	1	Score B	7
Score A	4	Score D	7
Score C	5		
<b>Final Score: 7</b>			
Action Level: Investigation and changes are required immediately			

A. Arm & Wrist Analysis		B. Neck, Trunk & Leg Analysis	
Component	Score	Component	Score
Upper Arm Position	3	Neck Position	2
Lower Arm Position	3	Trunk Position	4
Wrist Position	3	Legs	1
Wrist Twist	1	Score B	4
Score A	4	Score D	6
Score C	1		
<b>Final Score: 6</b>			
Action Level: Investigation and changes are required immediately			



Fig. 14 Comparison of RULA Analysis in the overhead welding position



Fig. 15 Comparison of RULA Analysis in the flat welding position

## 제 4 장 Manufacturing Hub를 이용한 블록 생산 공정 및 환경의 디지털화

근골격계질환 위험요인이 높은 용접자세를 가상환경에서 시뮬레이션하기 위해 3장에서 Process, Product와 Resource를 모델링하여 시뮬레이션하고 얻은 RULA 평가결과를 검증하는 작업을 마쳤다. 본 장에서는 다음 단계로, Digital Human의 부적절한 자세를 개선하기 위해 용접작업환경 개선이나 생산 공정 개선을 제시하고자 한다. 이를 위해 블록 생산 공정 및 환경의 디지털화가 아래와 같은 순서로 진행되었다.

- (1) 시뮬레이션이 필요한 부적절한 용접작업 선정
- (2) 용접작업을 포함한 대상 공정(Process) 분석
- (3) 대상 공정의 Product와 Resource 모델링
- (4) Manufacturing Hub를 Process, Product, Resource(PPR)로 구축

### 4.1 Manufacturing Hub 구조

본 연구에서 사용한 Manufacturing Hub는 DELMIA Co.의 Process Engineering이다. Manufacturing Hub는 생산에 관한 모든 데이터 및 흐름을 관리하는 것이 목적이다. 따라서 디지털공정계획(Digital Process Planning)을 세우고 검토 및 평가하기 유용하게끔 되어있으며 DELMIA Human 시뮬레이션 및 DPMA와의 연동을 통한 생산 공정 평가와 검증이 가능하다. 또한 Customizing을 위한 내부 구조를 가지고 있어 생산 데이터를 시뮬레이션에 적용하기 편리하다. 또한, Manufacturing Hub를 사용함으로써 Digital Human의 용접자세와 블록 생산 공정 시뮬레이션을 수행할 Process, Product와 Resource를 효율적으로 관리할 수 있다(Fig. 16참조). 따라서 용접환경 및 생산 공정 변경이 보다 쉽게 이루어질 것으로 판단된다.

Manufacturing Hub에 Process, Product, Resource 구축 방법은 Hub 설계자의 계획 및 판단에 의해 구축이 되지만, 아래 4.1.1절부터 4.1.3절까지 일반적으로 PPR이 구축되는 표준 구조에 대해 설명하였다.

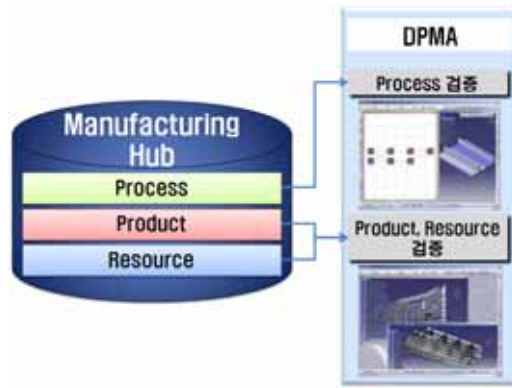


Fig. 16 A function of Manufacturing Hub in the DPMA

#### 4.1.1 Process Planning

Process의 경우, 작업 내용에 관한 구조와 Process를 작업 부하로 배분되는 Cycle로 보는 구조로 나눌 수 있다(Fig. 17참조). (Plan의 이름도 역시 설계자에 의한 임의의 이름이 주어진다.) Cycle Time에 의해 구축되는 Process는 각 공정별 시간 관리가 편리하다는 장점이 있다.

- (1) Process Plan : 작업 내용에 따른 구조 (Operation 구성)
- (2) Production Plan : 작업 부하에 따른 Cycle (Time 기준 구성)

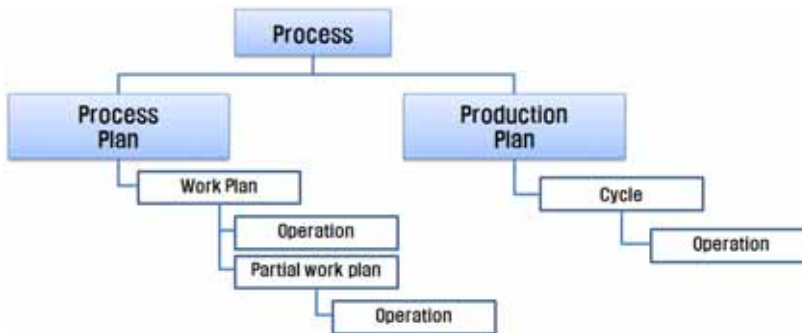


Fig. 17 Standard structure of process

Process는 제품의 완성을 위해 부품이나 부재들의 반조립이나 조립을 통하여 생산하는 일련의 과정을 말한다. Process의 디지털화는 Process Graph를 이용하여 전, 후 또는 동시 수행 관계를 설정하고 Product와 Resource와의 관계(Relation) 설정을 통하여 이들과의 상호관계를 정의할 수 있다.

### 4.1.2 Product planning

Manufacturing Hub에 Product를 구축하는 방법으로는 크게 다음과 같은 두 가지 방법이 있다.

- (1) Engineering BOM : 제품 설계(기능) 중심으로 구성된 구조
- (2) Manufacturing BOM : 제품 생산 순서(조립 순서) 중심으로 구성된 구조

Engineering BOM은 설계부서에서 단순히 해당 Product에 소요되는 각각의 부품이나 부재를 설계하여 구축한 것이고, Manufacturing BOM(M-BOM)은 Product가 생산되거나 조립되는 순서를 고려하여 각각의 부품이나 부재를 분류시켜 구축한 것이다(Fig. 18참조).

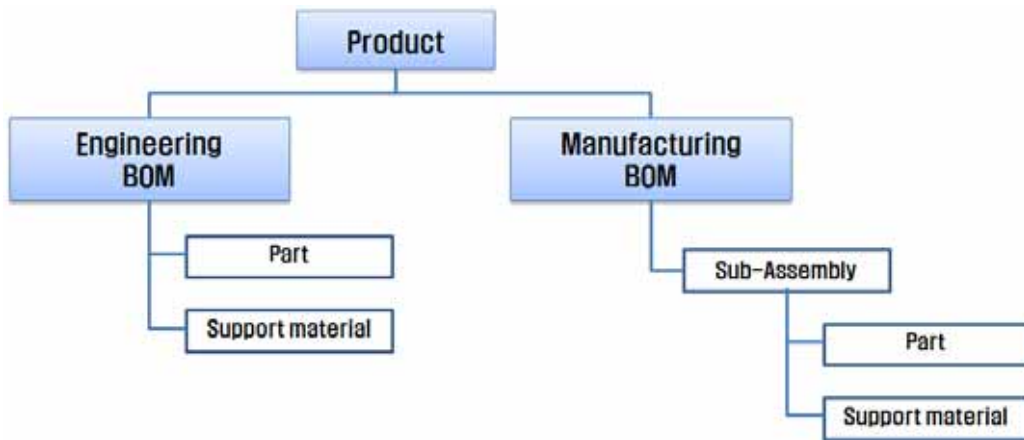


Fig. 18 Standard structure of product

### 4.1.3 Resource planning

Resource는 제품을 생산하기 위해 필요한 모든 기계류(Machines)와 도구(Tools), 생산 라인(Production Lines)과 작업셀(Workcells)을 이른다. Hub에 구축되는 표준 구조로는 아래 두 가지가 있으며 그 구조는 Fig. 19에 나타내었다.

- (1) Resource Plan : 사용 형식에 따른 구조
- (2) Site Plan : Process가 수행되는 장소에 따른 구조 (공장-샷-라인-스테이션-설비, 사람)



Resource Plan은 사용 형식, 용도, 방법에 따라 구축되는 구조를 말하고, Site Plan은 해당되는 Process가 수행되는 장소에 따라 분류되어 구축되는 구조를 말한다. 예를 들어, 조선소의 경우, 강제 적재장, 절단, 조립이 되는 샷, 대조립, 진수되는 도크 등이 이에 해당될 수 있다. Resource Plan도 마찬가지로 Hub를 구축하는 설계자의 계획과 판단에 의해 만들어진다.

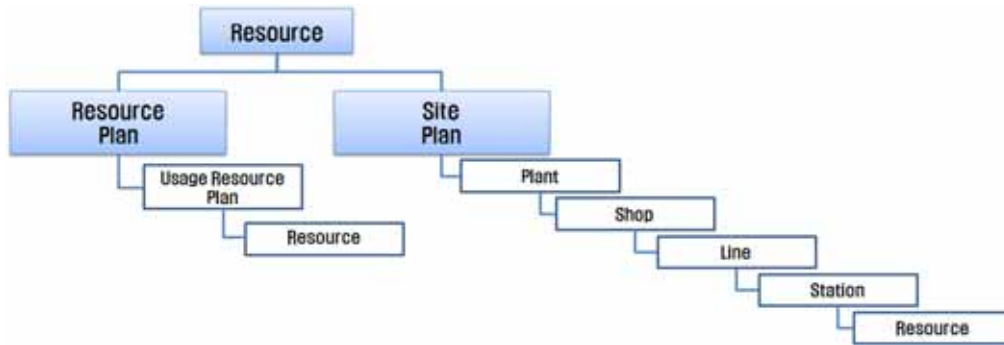


Fig. 19 Standard structure of resource

#### 4.1.4 PPR Relation

PPR을 구축한 다음에는 앞에서 잠깐 언급하였지만, 서로간의 관계(Relation)를 설정해 줄 수 있다. Product, Resource 모두 Process를 통해서 관계를 맺어지는데, 그 의미는 “하나의 Process가 수행되어짐에 따라 만들어지는 Product는 무엇이며, 필요한 Resource는 어떠한 것들이 있다.”이다. 이들 관계는 아래 표에 정리된 것처럼 다양하게 나누어져 있으며 각각의 의미를 내포하고 있다. 물론, Hub를 구축하는 설계자의 설계 의도와 판단에 따라 의미부여는 달라질 수 있으나, 본 절에서는 연구 목적에 맞게끔 재 해석하여 Table 4.와 Table 5.로 나타내었다.

Table 4. Relation between process and product

Process와 Product간의 Relation	설명
Product is created by Process	최초 부재 혹은 부품이 현재 Process상에서 공급
Product is firstProcessed by Process	Product가 현재 Process에서 최초 조립됨
Product is processed by Process	Product가 현재 Process에서 중간 조립됨
Product is removed by Process	Product가 현재 Process에서 완성되어 나가거나 Buffer 혹은 Rack으로 이동

Table 5. Relation between process and resource

Process와 Resource간의 Relation	설명
Process attaches Resource	현재 Process에 해당 Resource가 사용되기 시작함
Process detached Resource	현재 Process에서 해당 Resource가 더 이상 필요하지 않음
Process running on Resource	현재 Process에서 Resource가 작동되고 있음
Process uses resource	현재 Process에서 소모성 Resource가 사용됨

#### 4.1.5 Manufacturing Hub와 DELMIA V5 Human과의 연동

Manufacturing Hub는 앞서 설명한대로 PPR 관리가 주요 목적인 Hub이다. Product 생산을 위해 다수의 설계자가 하나의 Hub를 이용하여 생산관리를 통합적으로 하는데 그 목적이 있다고 할 수 있겠다. 따라서 용접자세 분석을 위한 Human 시뮬레이션을 위해서는 DELMIA V5 Human과 연동이 필수적이다. 본 연구에서 사용한 Manufacturing Hub인 Process Engineer는 PPR 정보를 V5 Human으로 보내주는 기능을 하며, Hub에서 수정, 보완된 정보는 V5 Human에서 업데이트되는 장점을 가지고 있다. 마찬가지로 V5에서 수정, 보완된 정보는 Hub로 전달되어 Hub의 정보 역시 수정될 수 있어, 데이터의 종속성을 가지고 있다.

Fig. 20은 Manufacturing Hub에 구축된 Plate와 Stiff의 PPR 용접 정보이다. 이를 DELMIA V5로 Load시킨 간단한 예를 Fig. 21에 보였다. 용접 Process가 그대로 V5로 Loading되었으며, 각 Process에 등록된 부재와 Resource의 정보도 마찬가지로 Loading

되었다. 앞서 언급한대로 V5에서는 DPMA(Digital Process Manufacturing Assembly)기능으로 Plate와 Stiff.의 조립과정을 시뮬레이션함으로써 조립과정을 검증할 수 있다.

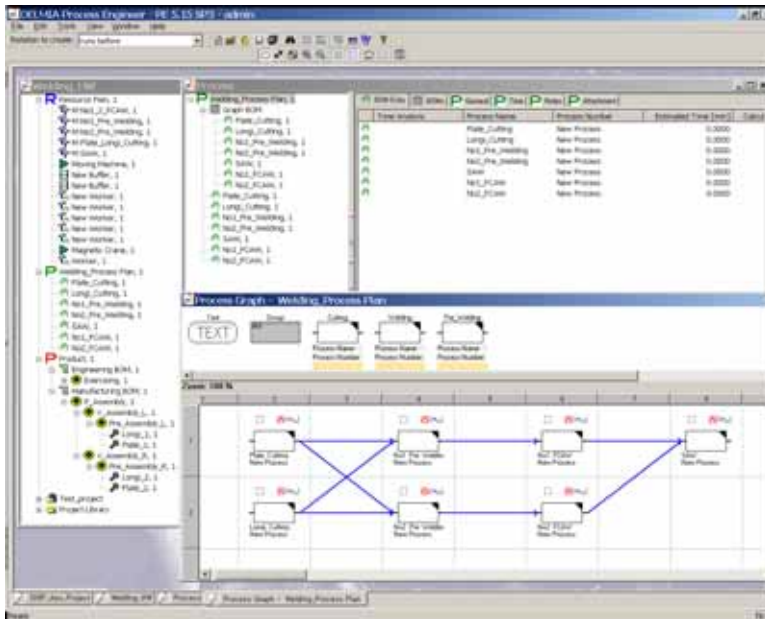


Fig. 20 Structured example of Manufacturing Hub

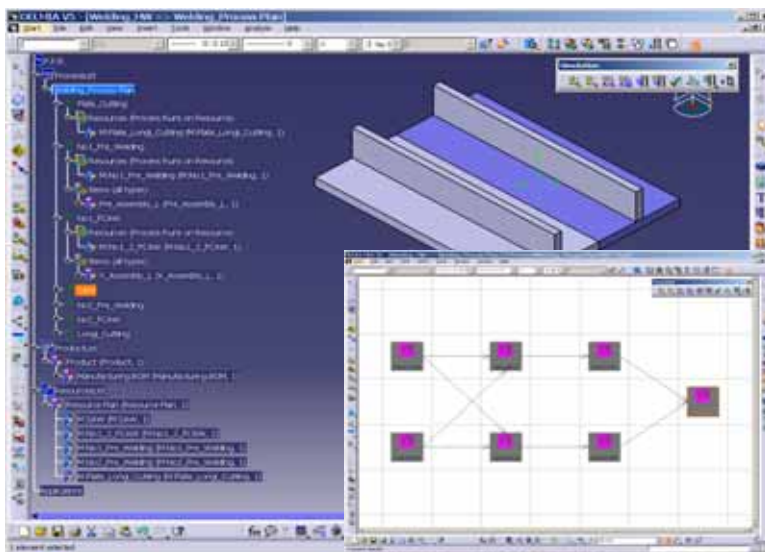


Fig. 21 Loading example from Manufacturing Hub to DELMIA V5

## 4.2 대상 블록과 용접사의 용접자세 선정

용접작업 자세 개선을 위한 부적절한 자세로 3장에서 시뮬레이션 검증을 위한 용접 자세 2가지 외에 아래보기 용접자세 1가지를 더 선정하였다. 따라서 본 연구에서 선정된 부적절한 자세는 Fig. 22에서 보는 바와 같이 위보기 용접자세 1가지와 아래보기 용접자세 2가지이다.



(a) Overhead welding posture (b) Flat welding posture I (c) Flat welding posture II

Fig. 22 Selected awkward welding postures

Fig. 22(a)와 (b) 그림의 부적절한 자세요인은 앞서 설명한 바와 같으며, 블록은 중조립 과정에 있는 컨테이너선 선미 부분의 3671블록이다. (c) 그림은 블록의 Shell과 Plate 연결부분을 용접하기 위해 Bracket과 Longi. 사이에 용접사가 몸을 최대한 굽혀 들어가서 용접을 하고 있는 장면이다. 이로 인해, 용접사의 목과 어깨 그리고 허리, 다리에 근골격계부담이 많이 가는 작업자세로 판단된다. 블록은 컨테이너선 선미 부분의 3401블록이다.

## 4.3 Product와 Resource 모델링

### 4.3.1 모델링

각 대상 공정 별 Product와 Resource를 CATIA로 모델링하여 각각 Table 6.과 Table 7.로 나타내었다. Product에 해당하는 블록은 Girder, Frame, Longi., Stiffener, Bracket, Plate 등으로 구성하였다. 그리고 Resource는 용접자세 시뮬레이션에 꼭 필요하다고 판단되는 것들을 나타내었다. Digital Human은 3.3.2절에서 설명한 바와 같이 현장의 용접사들의 도움을 받아 신체치수를 조사하고 나머지 신체치수는 표준 한국남자 체형을 따랐다.

Table 6. Product models of block


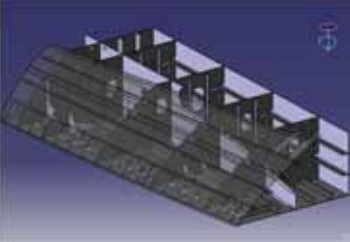



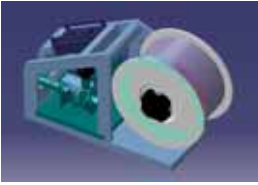

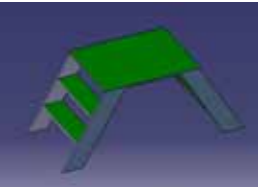
Model	Product name
	#3671 블록
	#3401 블록

Table 7. Resource models of work

Model	Resource	Model	Resource
	Welding Torch		Welding Mask
	Human		Feeder Machine
	Semi-Auto Welding Machine		Ladder

### 4.3.2 Manufacturing Hub 구축

#### (1) Product & Resource planning

본 연구에서는 부적절한 용접자세 개선을 위하여 블록의 조립 순서를 수정할 것이므로 Product 구축 방법 중 조립 순서의 의미를 포함하는 M-BOM의 방법을 선택하였다. 아래보기 용접자세 II의 블록을 대상으로 Fig. 23에서 보는 바와 같이 M-BOM의 구조로 Product를 Manufacturing Hub에 구축하였다. 최종 Product는 완성된 선박으로 하였으며, 바로 아래 하위 구조로 블록의 번호를 두었기 때문에, 본 연구에서 대상으로 한 블록이 아닌 다른 블록으로 확장될 수 있는 개념으로 구축하였다. 그리고 블록은 크게 대조, 중조, 소조로 나누었으며, Plate, Longi., Stiff., Bracket 등 절단공정에서 절단되어, 조립장으로 들어와서 소요되는 모든 부재를 Piece라는 최하위 개념을 두어 이에 해당하도록 만들었다. Fig. 25는 아래보기 용접자세 II의 블록의 Product와 Resource가 Manufacturing Hub에 구축된 모습이다. 구축되는 부재와 형상 정보는 현장에서 사용하는 생산 도면의 정보를 참조하였으며 Girder와 Frame이상 크기의 부재들이 조립되는 정보를 Fig. 24에 나타내었다.

Resource로 사용되는 용접 토치, 용접 마스크, 피더기, 반자동 용접기 등은 Resource 항목에 구축하였으며 필요에 따라 Process와 관계 설정을 하였다.

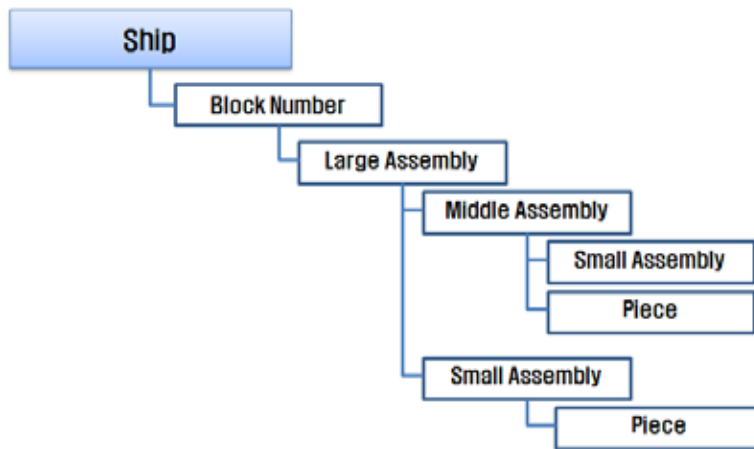


Fig. 23 Structure of E-BOM in the block

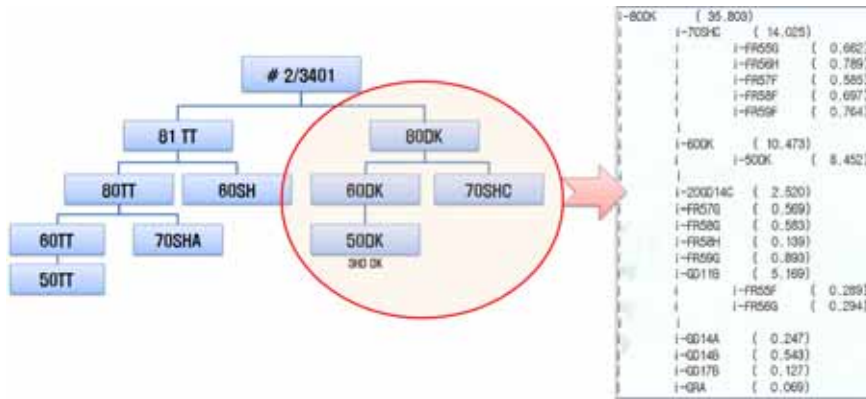


Fig. 24 Diagram of real production planning

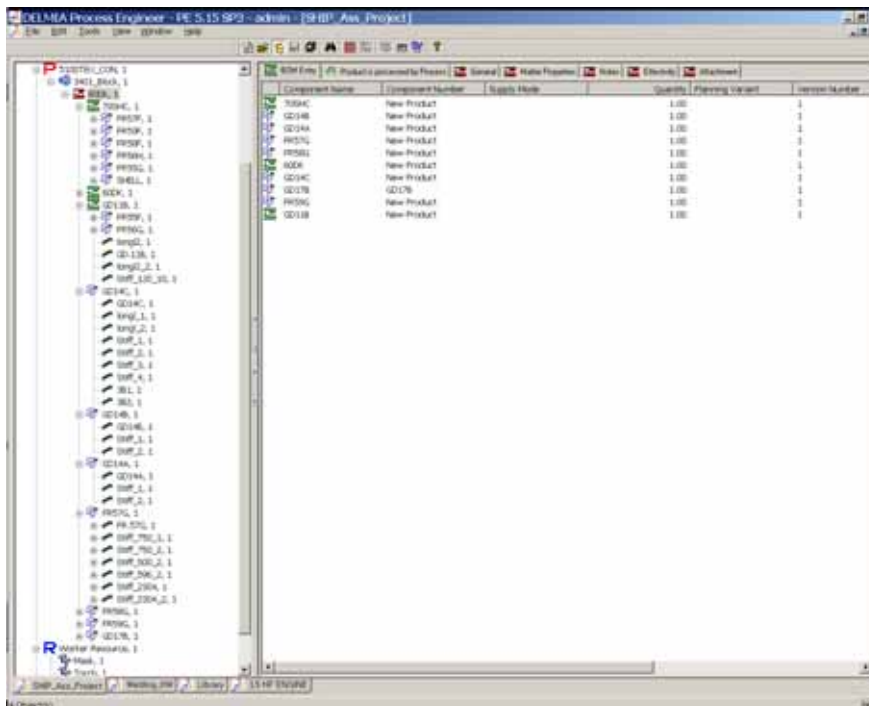


Fig. 25 Structured of product and resource in the Manufacturing Hub

## (2) Process planning

블록 조립 과정의 수정이 필요하다고 판단된 Fig. 22(c)의 블록의 조립 과정을 분석하였다. 분석 방법은 IDEF $\phi$  방법론을 사용하였다. 현장에서의 조립 과정 관찰과 현장에서 사용되는 생산 도면을 바탕으로 IDEF $\phi$  기능 모델을 Fig. 26과 같이 만들었다.

IDEF 방법은 기업이나 조직의 실체를 추상화하여 모델화하고(AS-IS), 작성된 모델의 체계적인 분석을 통하여 문제점을 추출하여 개선된 기업의 모델(TO-BE)을 설계할 수 있도록 개발된 시스템 분석, 설계 방법이다. 또한, 시스템의 개발과 관련된 사람들과의 의사소통을 촉진하기 위한 언어로 개발되었으며, 현재는 다음과 같은 목적으로 사용되고 있다.

- ① 시스템 분석, 설계, 교육, 문서화 통합
- ② 합의를 도출하기 위한 의사소통 수단 지원
- ③ 기업의 정보 시스템 구축을 위한 업무 활동의 분석과 문제점 포착
- ④ 기업의 활동에 관한 업무 흐름의 명확한 표현

IDEF 방법에 속한 여러 방법들 중 IDEF $\phi$  방법은 시스템 개발에 앞서 우선적으로 요구사항 및 기능을 정의하고 이러한 요구사항과 기능을 수행하는데 적절한 구현설계를 위해서 주로 사용된다.

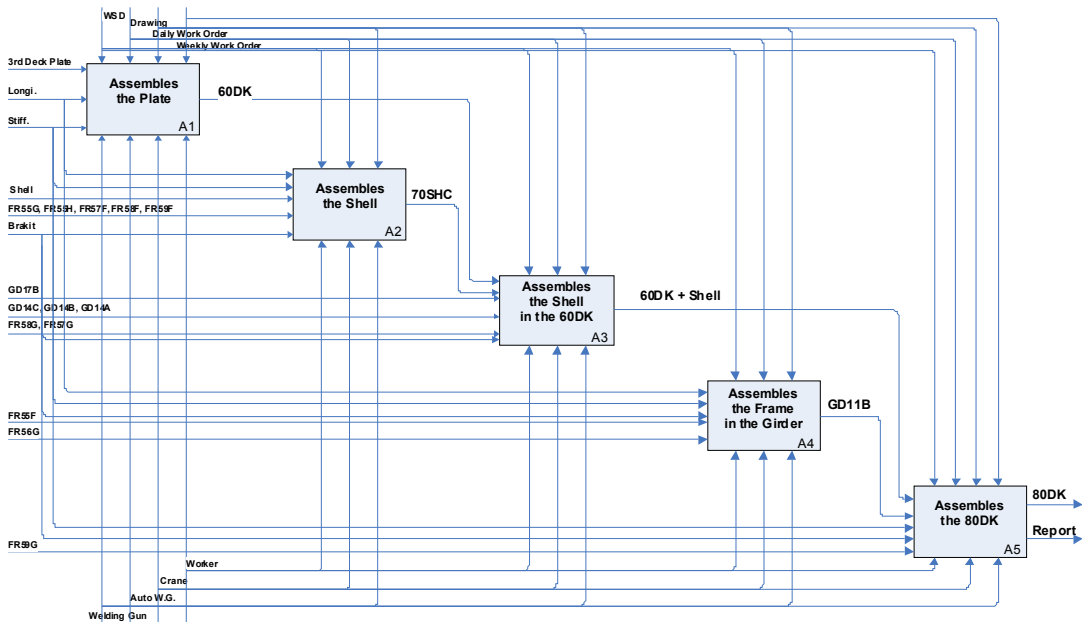


Fig. 26 Activity diagram for block assembly process

IDEF $\phi$  방법에 의해 작성된 다이어그램을 토대로 Fig. 27과 같이 Manufacturing Hub에서 Process를 Process graph를 사용하여 작성하여 시뮬레이션을 구현하기 위해 Fig. 28과 같이 DELMIA V5 Human에서 PERT Chart로 나타냈다.



PERT(Program Evaluation & Review Technique) Chart는 프로젝트 완성을 위해 필요한 모든 작업을 작업관련 내용과 순서를 기초로 하여 네트워크상에서 파악할 수 있게 할 수 있다. 프로젝트를 구성하는 작업내용을 Activity라 하여 소요시간과 함께 화살표로 표시한다(본 연구에서는 소요시간을 Hub 자체에서 관리하므로 표기하지 않았다). 따라서 시뮬레이션 구현을 위한 Process 정리를 위해서 반드시 수행해야하는 과정이다.

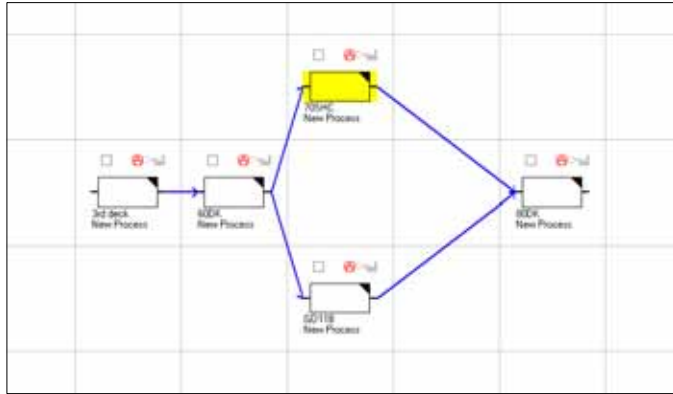


Fig. 27 Process graph in the Manufacturing Hub

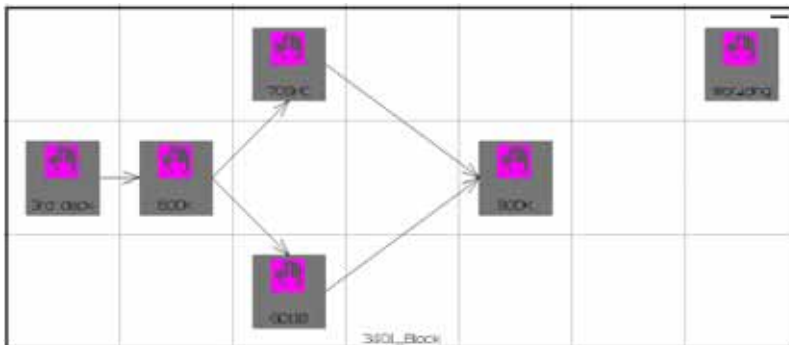


Fig. 28 PERT Chart in the DELMIA V5 Human

## 제 5 장 시뮬레이션으로 분석한 용접사의 용접자세

이번 장에서는 Digital Human의 부적절한 용접자세를 시뮬레이션을 이용한 RULA 분석을 거치고, 자세 개선을 위하여 가상환경에서 작업환경을 개선하는 방법과 생산 공정을 개선하는 방법으로 현행 용접자세가 용접사의 주요 근골격계 부분에 어떻게, 얼마나 부담이 감소되는지 정량적인 방법으로 평가하였다.

### 5.1 현행 공정상의 용접자세 분석

#### (1) 위보기 용접자세

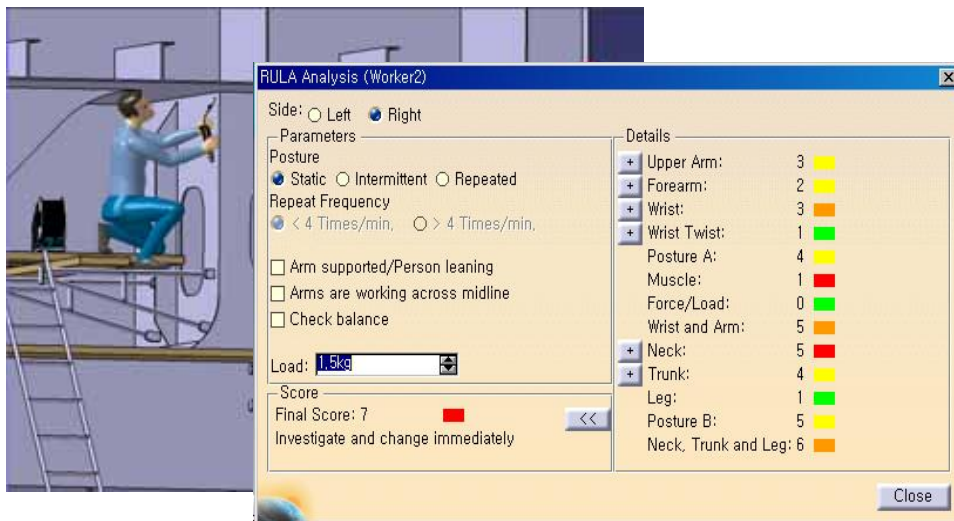


Fig. 29 RULA results of the overhead welding position before improvement

위보기 용접자세는 3장에서 시뮬레이션 검증을 하기 위해 Digital Human의 용접자세의 RULA 분석을 보였다. 본 절에서는 Digital Human의 신체부분 중 근골격계부담이 가장 크다고 판단되는 부분을 선택하여 해당 관절의 움직임은 그래프로 나타내어 조금 더 세부적으로 분석하였다.

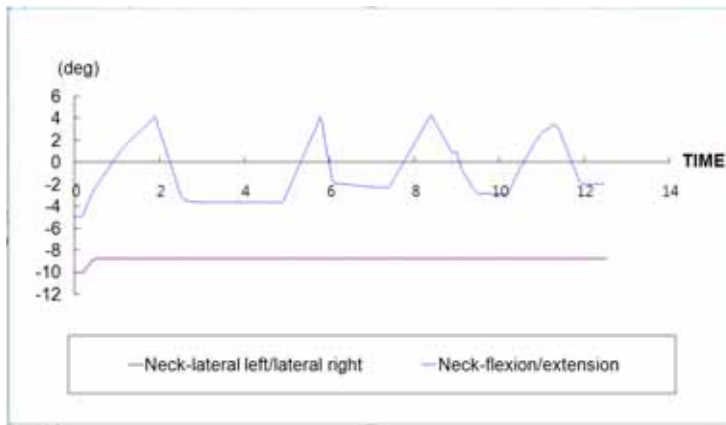


Fig. 30 Moving angle of neck before improving overhead welding position

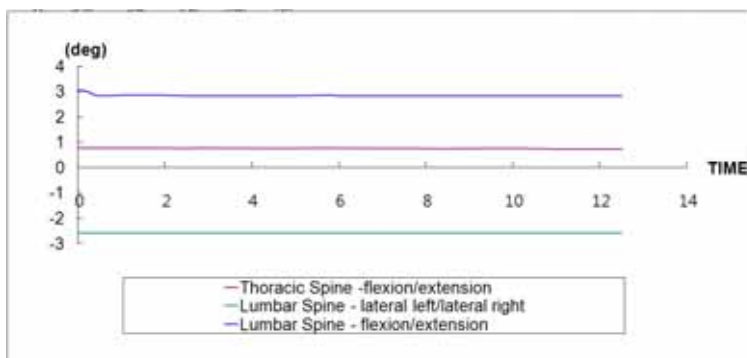


Fig. 31 Moving angle of waist before improving overhead welding position

용접사가 손목을 비틀어서 작업을 하기 때문에 손목에서 3점, 작업을 하는 동안 지속적으로 상완을 든 자세를 유지하므로 상완에서 3점을 받았다. 팔과 손목 평가에서는 5점을 받았다. 그리고 목을 젖히고 몸통을 약간 굽힌 자세를 유지하고 있어, 각각 5점과 4점을 받아서 목, 몸통과 다리를 평가하는 Score B에서는 5점을 받았다. 그리고 근육사용과 힘에 대한 점수를 평가하여 최종 점수는 7점을 받은 용접작업이 되었다. 이는 즉시 자세를 개선해야 하는 단계를 의미한다.

Fig. 30은 용접사의 목 움직임은 그래프로 나타낸 것으로 목을 뒤로 젖히는 경우는 전체 작업시간 동안 4회로 나타나며 옆으로 굽히는 경우는 작업시간 동안 지속적으로 -8도를 유지하고 있음을 나타낸다(그래프에서 +, -값은 좌, 우, 앞, 뒤를 구부림이나 비틀림을 의미한다). Fig. 31은 허리의 움직임을 그래프로 나타낸 것으로 허리의 경우, 앞뒤, 좌우로 구부린 채 작업을 하고 있음을 알 수 있다.

(2) 아래보기 용접자세 I

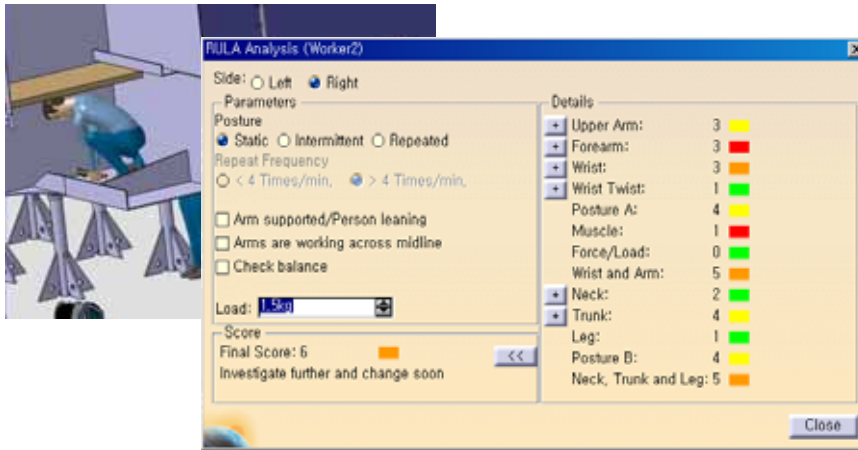


Fig. 32 RULA results of the flat welding position I before improvement

좁은 공간에서 몸을 웅크려 쪼그리고 앉아 용접하는 자세이다. 용접사의 팔과 손목 분석에서 5점, 목과 허리 및 다리 분석에서 5점을 받아 최종 점수로 6점을 받았다. 마찬가지로 가급적 빨리 작업 자세의 변경이 요구되는 평가이다.

Fig. 33은 용접사의 허리 각도의 변화를 나타낸 것으로 작업 진행 동안 지속적으로 20도로 굽혀져 있음을 보여주고 있다. 따라서 이 용접자세는 허리에 근골격계부담을 많이 가지고 있음을 알 수 있다.

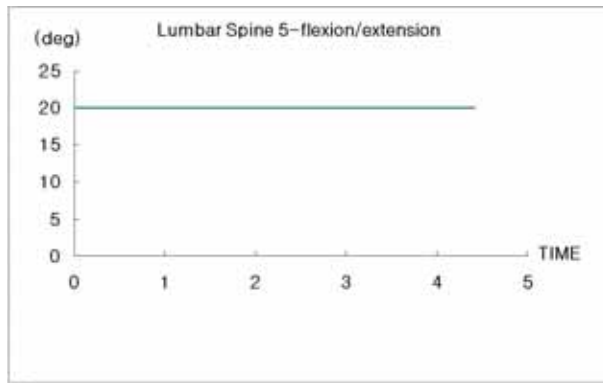


Fig. 33 Moving angle of waist before improving flat welding position I

(3) 아래보기 용접자세 II

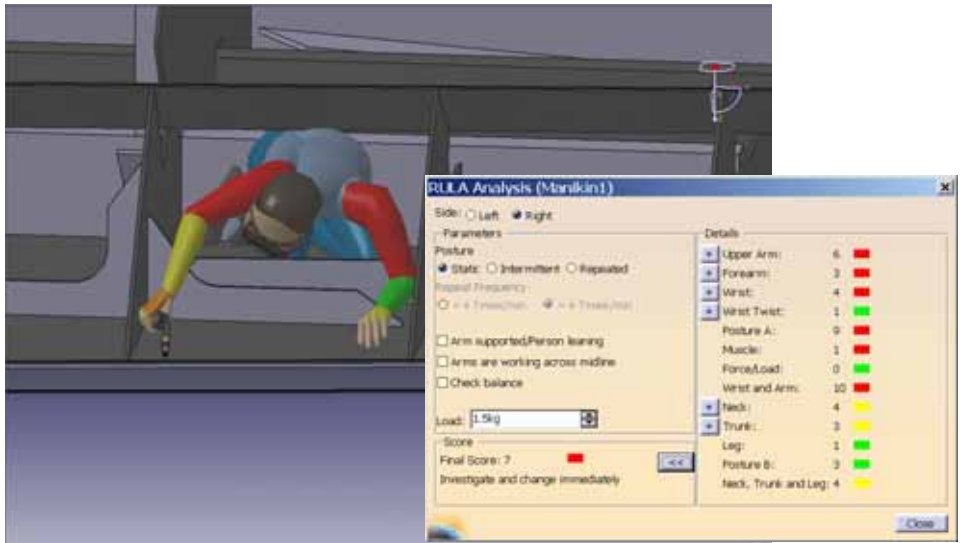


Fig. 34 RULA results of the flat welding position II before improvement

아래보기 용접자세 II는 Fig. 34에서 보는 바와 같이 상체 밑에 있는 Bracket과 Stiff.로 인해 팔로 상체를 지지하면서 용접을 같이 하고 있기 때문에 팔에 근골격계부담이 많이 가중되고 있었다. 상완에서 6점, 전완 3점, 손목 4점을 받아 손목과 팔의 Score A 점수는 10점으로 매우 높은 점수를 받았으며, 용접사 뒤에 위치한 Longi.와 등 위로 지나가는 Longi.로 인해 목을 뒤로 약간 젖히는 자세가 되어 목 부분의 점수가 4점으로 평가되어 목에도 부담을 받고 있음을 알 수 있었다. 그리고 다리와 허리 구부렸기 때문에 목, 허리, 다리의 Score B 점수도 4점을 받았다. 그래서 아래보기 용접자세 II의 최종 점수는 7점으로 즉시 자세를 개선해야하는 자세로 평가를 받았다.

용접사의 주요 신체부위의 움직임 각도를 살펴보았다. Fig. 35는 가슴과 허리 움직임의 각도 변화를 나타내었고, Fig. 36은 용접사의 다리, 마지막으로 Fig. 37은 용접사의 오른팔 움직임의 각도 변화를 나타낸 그림이다.

가슴을 앞으로 숙인 각도가 약 3도 정도를 유지하고 있으며 용접을 하는 동안 우에서 좌로 약 -4도에서 2도사이로 가슴을 움직이는 것을 알 수 있다. 허리는 12도에서 11도사이로 굽혀서 작업한다는 것을 알 수 있다. 그리고 양다리 모두 용접작업 시간동안 지속적으로 크게 구부려서 작업하고 있음을 쉽게 알 수 있다. 용접사의 대퇴부 관절은 약 110도 정도, 무릎 관절은 약 150도 정도로 굽혀서 작업하였다. 용접사는 오른손으로 상체 아래에 위치한 Bracket과 Stiff.를 피하며 용접토치를 가지고 용접을 하였다. 따라

서 오른손의 회전과 내전의 경우, 약 50도 내외에서 서서히 줄어드는 움직임을 보였으나, 굽힘의 경우, 약 110도에서 160도 미만으로 움직임이 커졌다는 것을 알 수 있었다.

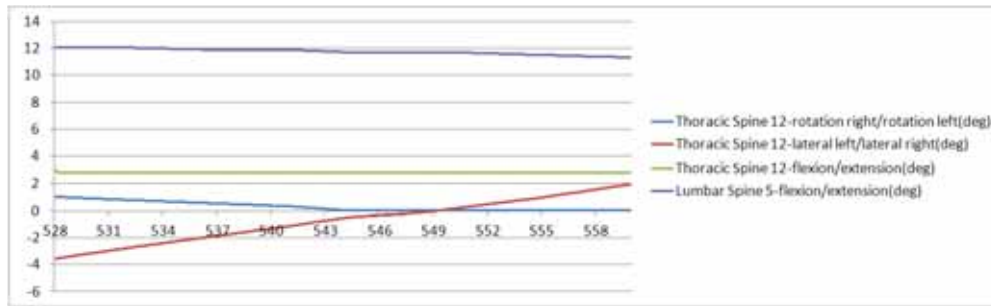


Fig. 35 Moving angles of thoracic and lumbar before improving flat welding position II

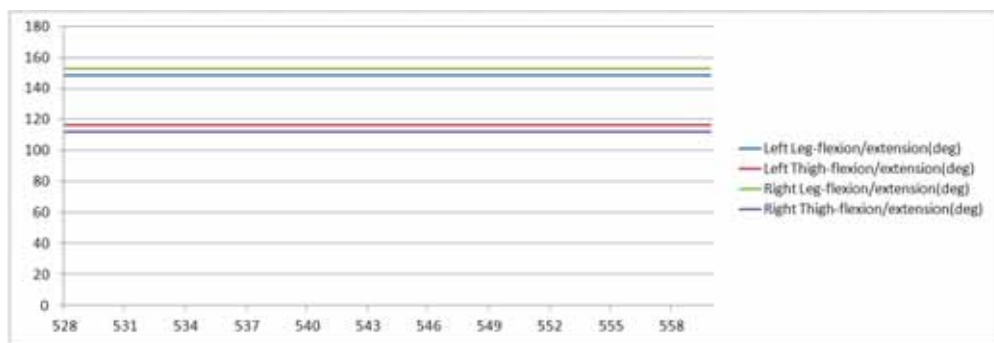


Fig. 36 Moving angles of legs before improving flat welding position II

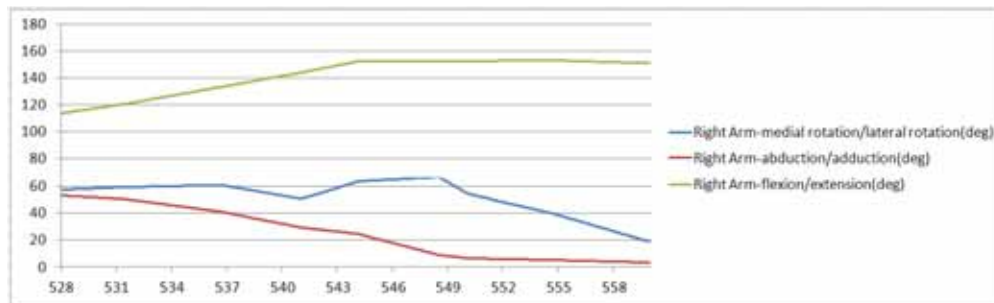


Fig. 37 Moving angles of right arm before improving flat welding position II

## 5.2 용접자세 개선을 위한 대안 제시

### (1) 위보기 용접자세

5.1절에서 평가한 위보기 용접자세의 문제점은 위보기 자세를 취해야만 했지만, 용접사의 작업공간이 충분히 확보되지 못했기 때문에 용접사의 목과 허리를 비롯한 하지 부분에 근골격계 부담이 컸다고 판단했다. 모델링된 블록을 살펴보면 Fig. 38에서 보듯이 족장 위로 1m 남짓한 높이의 작업공간이 원인으로 판단되었다. 하지만, 족장 아래로는 1.4m의 여유 공간이 있었으며, 실제로 현장의 족장 밑을 살펴본 바, Fig. 39와 같이 족장 아래로 공간이 있음을 확인하였다. 따라서 족장을 현재 위치에서 600mm 더 아래로 낮추어 설치하는 방안을 제시하였다.

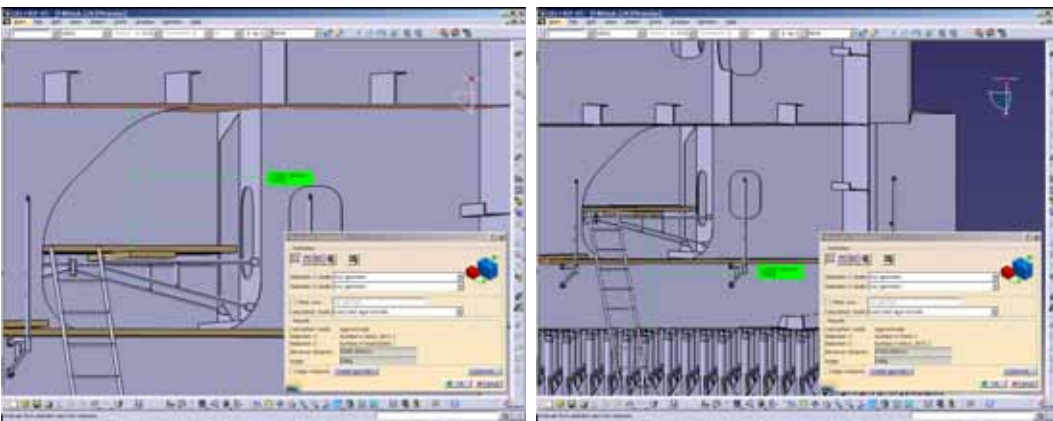


Fig. 38 Work space in the modeled block



Fig. 39 A space under the foot support in the real block

(2) 아래보기 용접자세 I

아래보기 용접자세 I은 Fig. 22(b), Fig. 40과 같은 협소한 공간에 용접사가 있으며, 용접사의 머리 위로는 족장이 지나가고 있었다. 이 같은 공간적 제약으로 인해, 부적절한 용접자세가 유발된 것으로 판단하였다. 또한, 해당 작업공간에서의 실질적인 용접장의 길이는 비교적 짧으나 이와 유사한 블록의 경우, 모두 현재와 같은 방법으로 용접사가 용접을 하게 되고, 용접장과 바닥과의 높이는 980mm이기 때문에, 아래보기 용접자세 I의 경우, 용접사가 블록 위에 올라 앉아 용접하는 방법보다는 블록 밖에서 서서 용접하는 방안을 제시하였다.

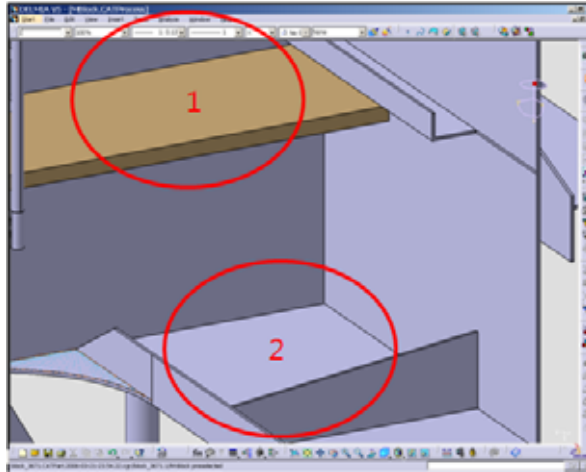


Fig. 40 Problems of welding posture II

(3) 아래보기 용접자세 II

Fig. 22(c)의 그림처럼 용접사는 Shell과 Plate의 용접(Fig. 29에서 Welded joint 부분)을 위해 매우 좁은 공간에 들어가게 된다. 이 경우, Fig. 41과 Fig. 42(시각성을 위해 Shell부분은 Hidden 시켰음)에서 보는 바와 같이 Bracket, Stiffener와 Longi.로 인해 용접사는 몸을 가능한 한 웅크린 채 블록 안으로 들어가서 용접을 하고 있는 모습이다. 따라서 이 자세를 개선하기 위해서는 용접사의 작업에 방해가 되는 Bracket, Stiff.와 Longi.를 Shell과 Plate 용접이 끝난 이후로 미루는, 블록 공정을 수정하는 방안을 고려하였다.

현재의 블록 공정 순서는 4.3.2절 Process planning에서 소개하였으며, 이를 PERT Chart로 모델링하였다. 그리고 시뮬레이션으로 구현한 모습은 Fig. 43에 나타냈다.



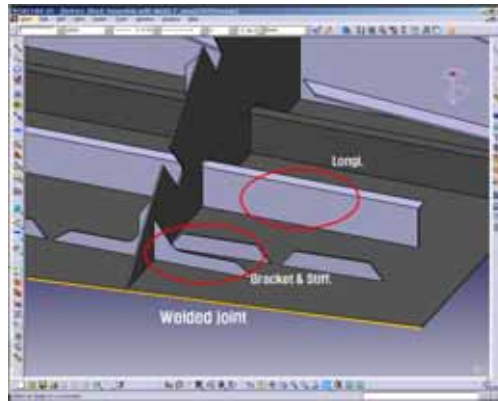


Fig. 41 Problems in the block

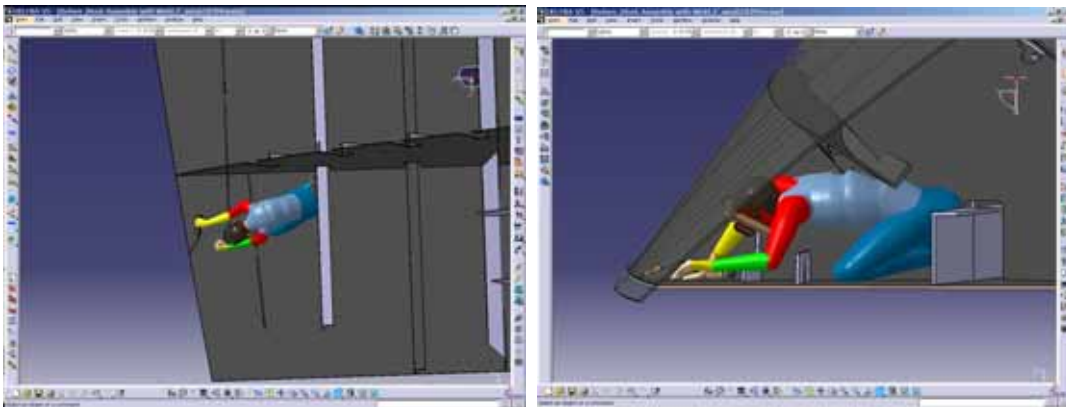


Fig. 42 A current posture of worker in the block

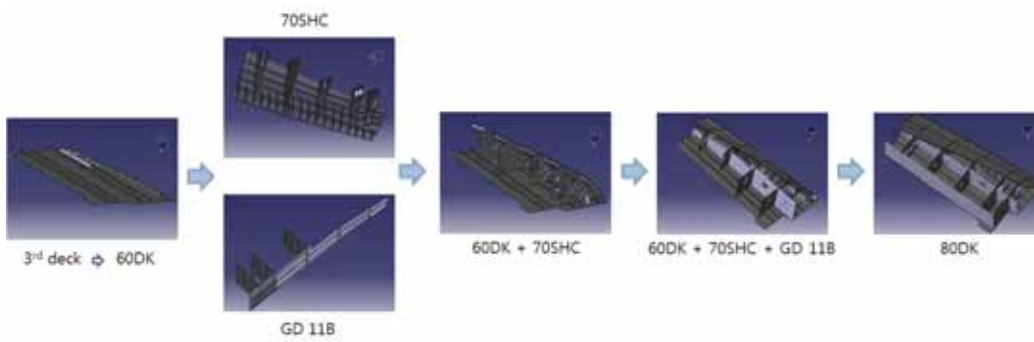


Fig. 43 Block Assembly Simulation of Present Process

### 5.3 공정 개선 후의 용접자세 분석

#### (1) 위보기 용접자세

5.2절에서 제안한 방법으로 용접환경을 가상환경에서 재구성하였다. Fig. 44에서 보는 바와 같이 족장을 현재의 높이에서 600mm 아래로 설치하여 Digital Human의 용접자세를 시뮬레이션으로 구현하였다. 그리고 Digital Human의 자세를 RULA 기법으로 분석하였다.

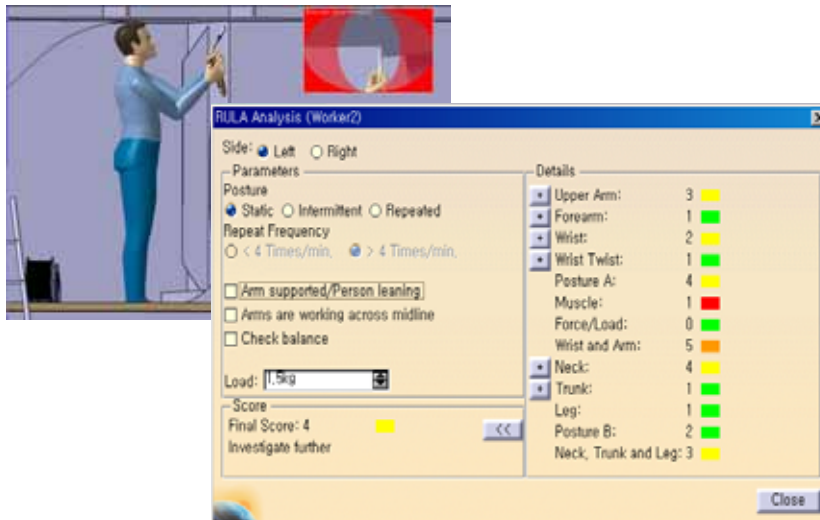


Fig. 44 RULA results of welding workload in the improved overhead position

족장위로 서서 작업할 수 있는 공간이 확보됨으로서 Digital Human은 선 자세에서 위보기 용접이 가능하게 되어, 목과 허리를 펴는 효과를 얻을 수 있었다. 따라서 목 부분의 점수는 4점으로 낮아지고, 허리의 점수는 1점으로 낮아지게 되어, 최종 점수는 4점으로 추가적인 관찰을 필요로 하는 자세로 개선되었다.

Digital Human의 목과 허리 움직임의 각도 변화를 그래프로 Fig. 45와 Fig. 46으로 나타내었다. 목은 더 이상 좌, 우로 굽히지 않으며, 뒤로 5도 정도 젖히는 경우가 5회 나타나는 것을 알 수 있었다. 허리 경우, 앞, 뒤 굽힘이나 젖힘과 좌, 우 굽힘이나 젖힘, 그리고 좌, 우 회전이 모두 0도를 유지하는 것으로 나타나는 것으로 보아 허리는 용접 작업 중 움직임이 없는 것을 알 수 있었다.

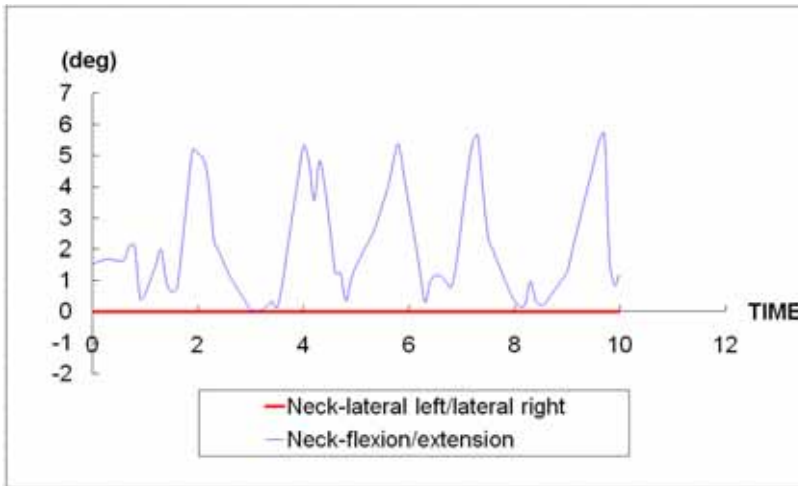


Fig. 45 Moving angle of neck after improving overhead welding position

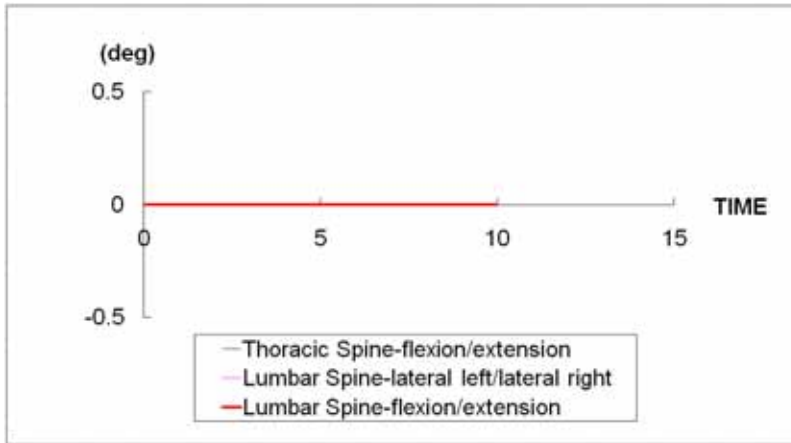


Fig. 46 Moving angle of waist after improving overhead welding position

(2) 아래보기 용접자세 I

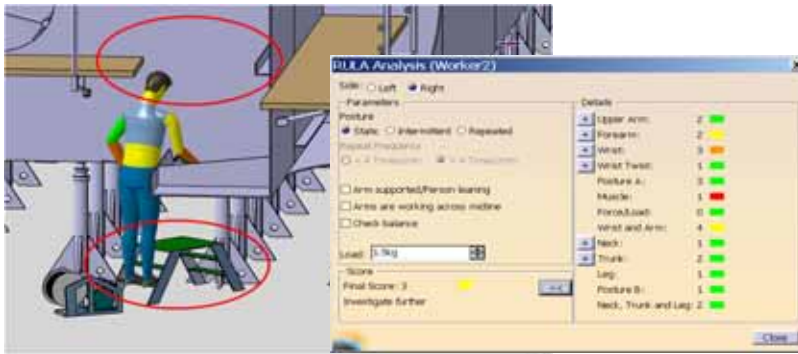


Fig. 47 RULA results of welding workload in the improved flat welding position I

Fig. 47처럼 용접사가 블록 외부에서 작업을 하기 위해 현장에서 흔히 사용하는 작은 사다리를 이용하였다. 이 사다리는 알루미늄 재질로서 가벼운 편이며 안정된 구조였다. 그리고 용접사가 서서 용접하는 중에 머리를 다칠 위험이 있는 머리 위 족장을 미리 제거하였다.

사다리에 올라서서 작업하기 때문에 다리는 펴고 허리만 약간 굽힌 자세로 용접이 가능하기 때문에 팔과 손목 부분은 4점, 목과 허리 및 다리부분은 2점을 얻어 최종 점수는 3점을 평가받았다. 이는 좀 더 관찰을 필요로 하는 자세로 기존 용접자세보다 근 골격계부담이 현저히 줄었음을 알 수 있었다.

Fig. 48은 용접사의 허리 움직임を示한 그림이다. 최초 용접점이 용접사와 떨어져 있음으로 허리를 18도 정도로 구부렸다가 용접점이 용접사와 가까워짐에 따라 허리를 서서히 펼 수 있는 자세임을 확인 할 수 있었다. 이는 허리에 가해지는 부담이 줄어들음을 의미한다.

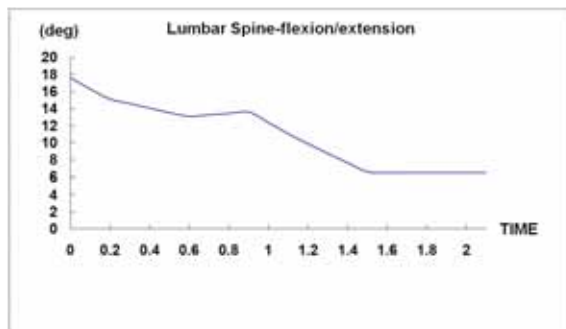


Fig. 48 Moving angle of lumbar after improving flat welding position

(3) 아래보기 용접자세 II

용접사가 Shell과 Plate접합 부분을 용접하는데 방해가 되는 Longi.와 Bracket, Stiff. 를 용접사의 용접작업 후에 Plate에 용접하는 공정으로 순서를 바꾸었다. 3rd deck에 Longi.와 Stiff. 등을 모두 용접하지 않고, 용접사가 수동용접을 하는 부분에 위치한 60DK의 7번 Longi.와 2번, 3번 Stiffener, 55번 Frame의 Bracket을 후행공정으로 남겨두고 60DK를 조립한 뒤, 70SHC와 GD 11B를 60DK에 조립하도록 하였다. 그 다음, 용접사에 의한 용접이 이루어지고, 남은 Longi.와 Stiff., Bracket이 반자동 용접되도록 공정 순서를 변경하였다.

가상 환경에서의 공정 순서 변경은 Manufacturing Hub의 Product와 Process를 Fig. 49와 Fig. 50과 같이 변경해 주면, DELMIA V5 Human에서는 변경된 Process가 반영되어 시물레이션 구현이 된다. Process는 기존의 Process에서 용접사의 수동용접 후 반자동 용접머신에 의한 Longi.와 Stiff., Bracket의 용접을 추가하였다. 그리고 Fig. 51은 추가된 반자동머신 용접 Process에 해당하는 Product와 Resource로 반자동 용접머신을 등록한 모습의 그림이다.

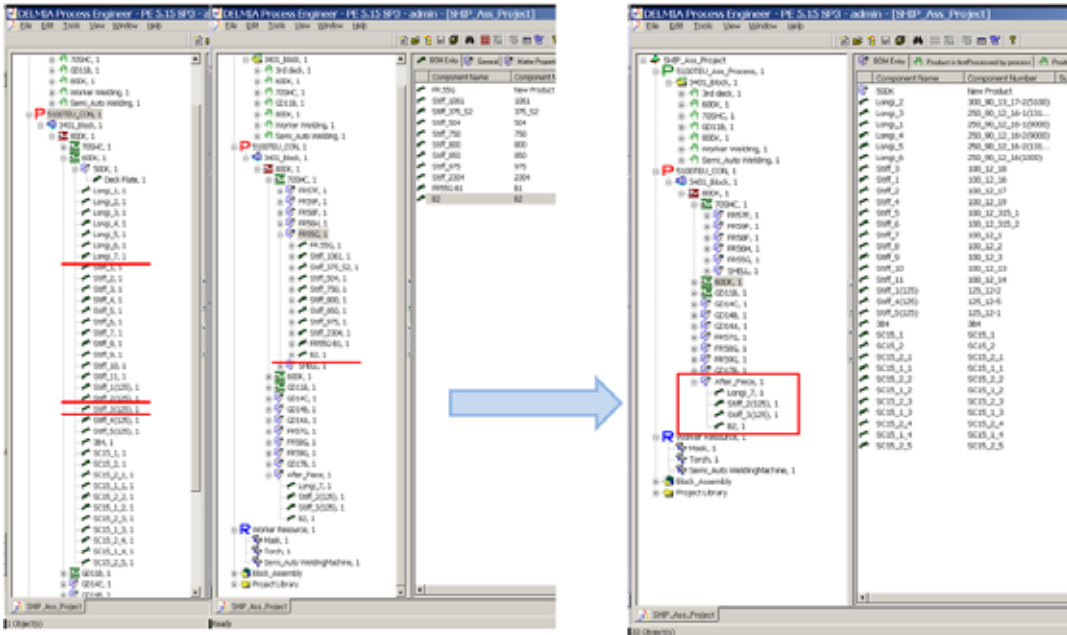


Fig. 49 Changing product tree in Manufacturing Hub

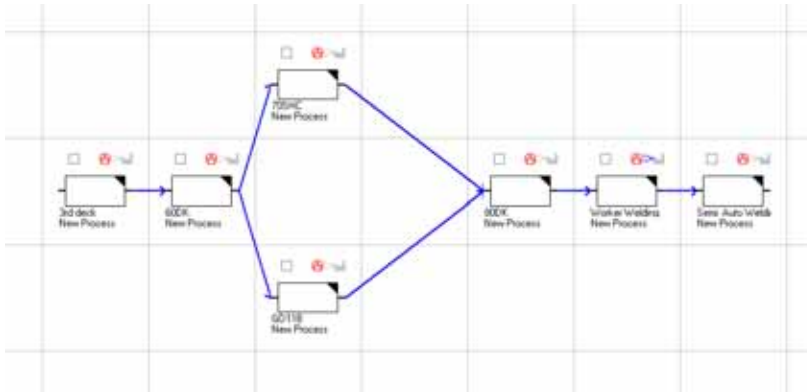


Fig. 50 Process graph after changing process

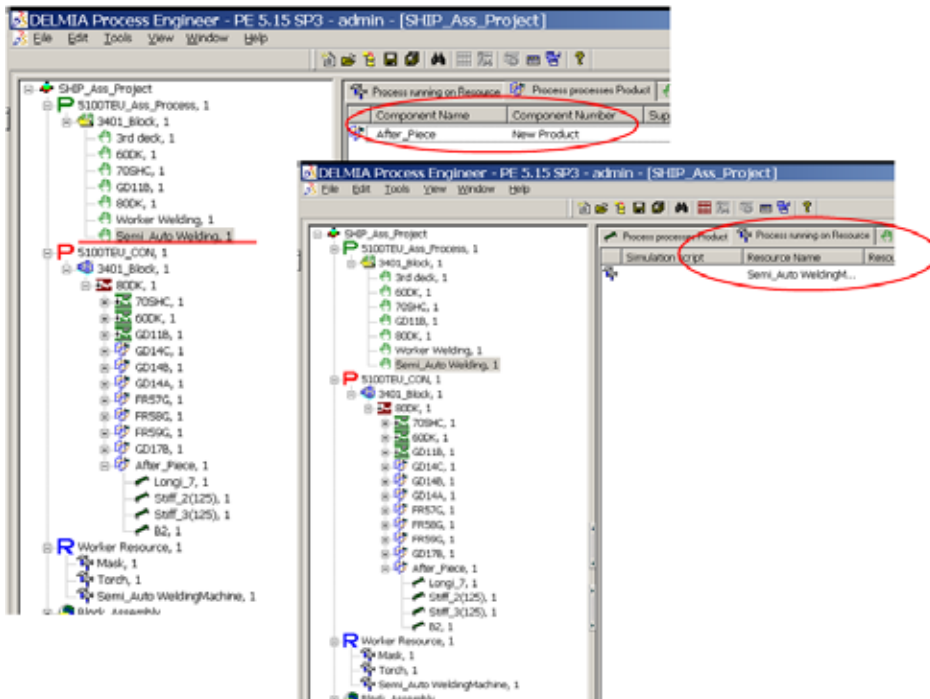


Fig. 51 Registration of production and new resource on Semi\_Auto process

Manufacturing Hub에서의 수정이 모두 끝난 후, DELMIA Human과 연동시켜 다시 시뮬레이션을 구현하였다. Fig. 52는 60DK 조립과정에서 변경된 시뮬레이션을 보여주고 있다. Fig. 53은 60DK 조립과정에서 후행 공정으로 바뀐 Bracket, Stiff., Longi.를 반자동 용접기로 용접하는 시뮬레이션을 보여주는 그림이고, Fig. 54는 변경된 시뮬레이션에서 Digital Human의 개선된 자세를 분석한 그림이다.

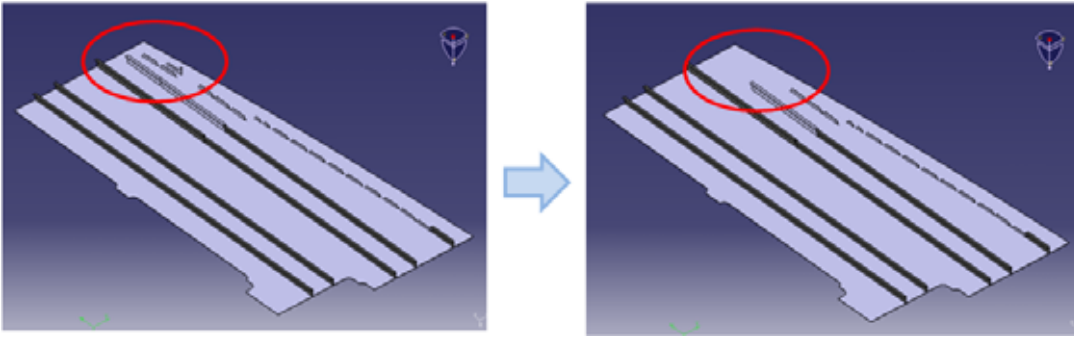


Fig. 52 Change of simulation in 60DK

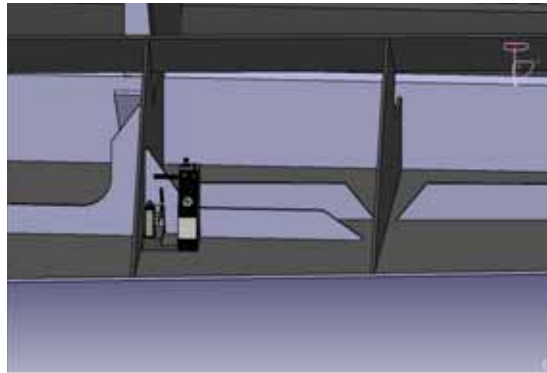


Fig. 53 Stiffener Welding Process Using Auto Welding Machine

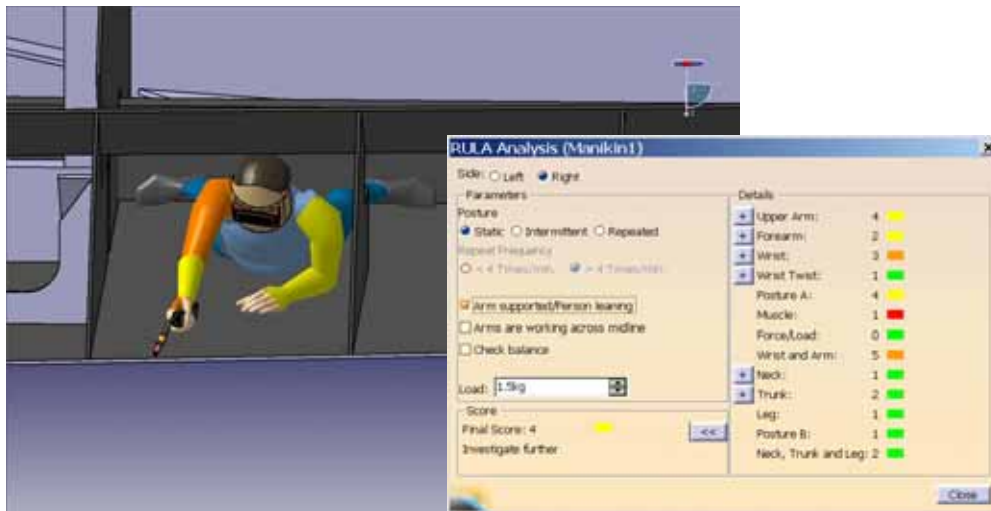


Fig. 54 RULA results of welding workload in the improved flat welding position II

용접사의 가슴 아래에 있던 Bracket과 Stiffener가 없으므로 용접사는 보다 자유롭게 왼팔로 몸을 지탱할 수 있으며, 오른팔 역시 공정 개선전보다 자유롭게 용접을 할 수 있게 되었다. RULA 평가 결과에 이 같은 자세가 그대로 반영되었다. 상완과 전완의 평가가 각각 4점과 2점, 손목이 3점으로 평가되어 손목과 팔의 평가에서 5점을 받았다. 다리의 경우, 용접사 뒤에 있던 Longi가 없기 때문에 다리를 펼 수 있었다. 따라서 목, 허리와 다리의 점수는 2점을 받아 최종 점수는 4점을 받아, 좀 더 관찰을 필요로 하는 단계로 평가 받았다.

Fig. 55는 공정 개선 후의 Digital Human의 자세를 위와 오른쪽에서 보여주는 그림이다. 시각화를 위해 Digital Human의 왼쪽에 있는 Bracket과 Shell은 Hide시켰다.

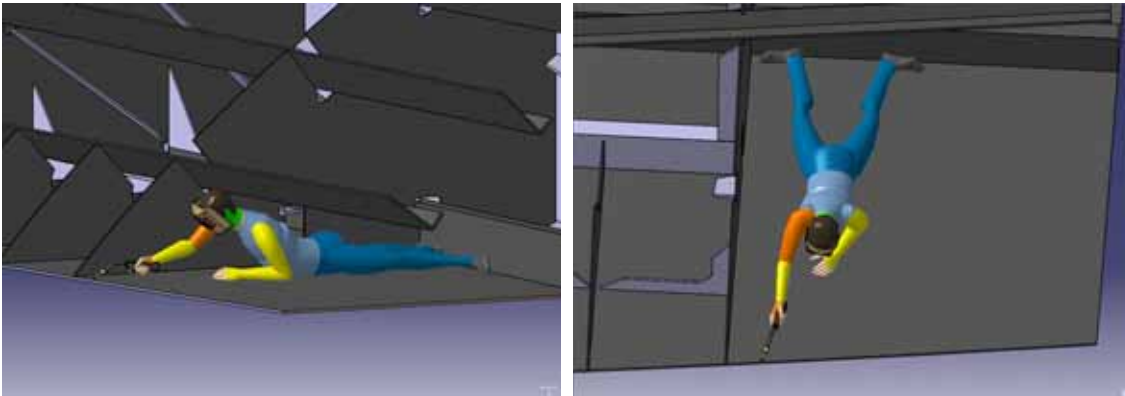


Fig. 55 Posture of digital human on right and up direction

Digital Human의 주요 신체 부분의 움직임 각도를 그래프로 나타내어 분석하였다. Fig. 56은 가슴과 허리 움직임을 나타냈다. 가슴의 회전은 Digital Human이 오른쪽에서 왼쪽으로 용접을 하기 때문에 0.7도에서 -0.7도로 변하는 양상을 보이고 있으며, 좌, 우 굽힘은 0도로 굽힘은 없다. 그리고 엎드린 자세에서 가슴을 왼팔로 지지하여 뒤로 젖혀 용접을 하기 때문에 가슴의 젖힘이 뒤로 약 -1.4도로 나타났다. 허리 역시 엎드린 자세이므로 뒤로 3도 정도로 젖힌 상태를 나타내고 있다. 다리의 경우, Fig. 57에서 보는바와 같이, 왼쪽, 오른쪽 무릎 모두 4도 정도로 구부렸으며, 왼쪽 대퇴부 관절은 0도, 오른쪽 대퇴부 관절은 -4도 정도로 굽힌 자세임을 보이고 있다. 오른팔의 경우, Fig. 58에서 나타내는 것처럼, 회전은 80도 정도를 유지하며, 내, 외전과 굽힘과 젖힘은 10도에서 -10도 사이에서 움직이고 있음을 볼 수 있다.



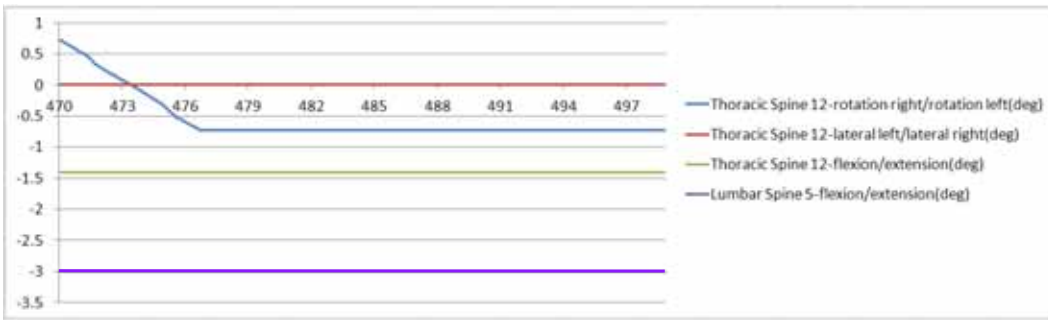


Fig. 56 Moving angles of thoracic and lumbar after improving flat welding position II

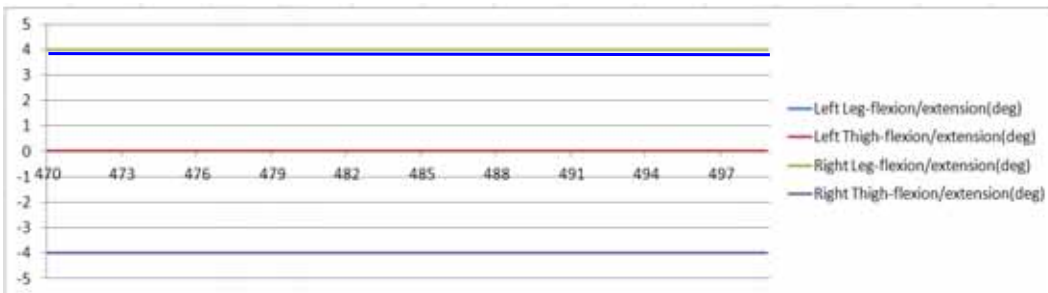


Fig. 57 Moving angles of legs after improving flat welding position II

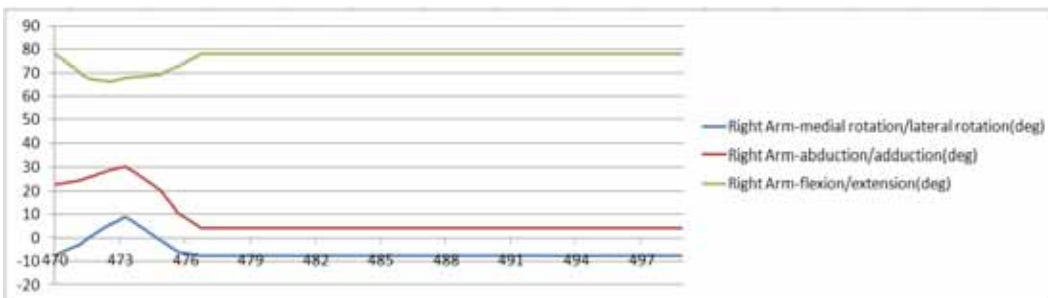


Fig. 58 Moving angles of right arm before improving flat welding position II

## 5.4 공정 개선 전과 후의 자세 분석 결과 비교

본 절에서는 5.2절과 5.3절에서 보인 공정 개선 전과 후의 자세 분석 결과를 비교, 정리하였다.

### (1) 위보기 용접자세

Table 8.을 보면 Fig. 22 (a) 위보기 용접자세의 개선 전은 손목에서 4점, 목, 허리와 다리에서 4점을 얻어 최종 점수가 6점이었다. 이와 같은 점수가 나온 이유는 좁은 공간에서 위보기 용접을 하기 위해 손목은 부자연스럽게 비틀고 허리는 옆으로 구부러 작업을 했기 때문에 근골격계부담이 가중된 까닭이다. 이러한 작업환경에서 족장의 위치를 아래로 이동시켜 부자연스럽게 앉은 자세를 피하고, 선 자세로 위보기 용접자세를 유도하면 불필요한 손목 비틀림과 허리 굽힘을 피할 수 있으리라 판단하였다.

현장과 생산도면에 의한 블록 모델링을 검토하여 족장을 600mm 아래로 이동시킨 결과, Digital Human은 선 자세로 용접이 가능하였다. 이 경우, RULA 결과는 손목에서 2점으로 낮아져 손목과 팔의 점수가 5점으로 낮아졌고, 목, 허리와 다리의 점수는 3점으로 낮아져 최종 점수는 3점으로 근골격계부담이 개선된 것을 확인 할 수 있었다.

Table 8. Change of overhead welding posture 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

(2) 아래보기 용접자세 I

Fig. 22 (b)의 아래보기 용접자세 I은 협소한 장소에서 용접하는 아래보기 용접자세로서 용접사 머리위의 족장으로 인해 몸을 웅크려 작업하는 자세였다. 이 자세의 RULA 분석결과인 Table 9를 보면 손목과 팔에서 5점을 얻었고, 허리에서 5점을 얻어 최종 점수로 6점을 받아 추가적인 관찰과 함께 곧 바뀌어야하는 자세로 평가받았다. 이에 대한 환경 개선 방법으로 블록 외부에 현장에서 사용하는 작은 사다리를 놓아, 이 사다리 위에 올라 용접사가 서서 용접이 가능하도록 했으며, 머리를 부딪칠 위험이 있는 족장은 제거하는 방안으로 시뮬레이션을 구현하였다. 이렇게 개선된 경우 Digital Human의 RULA 분석 결과로 손목과 팔에서 4점을 받았고, 목, 허리와 다리에서 2점으로 낮아져 최종 점수는 3점을 받아 근골격계부담이 크게 경감되었음을 확인하였다.

Table 9. Change of flat welding position I of score

Flat welding I	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

(3) 아래보기 용접자세 II

Fig. 22 (c) 아래보기 용접자세 II의 개선 전 자세는 Plate와 Shell과의 용접을 위해 좁고 복잡한 공간 안에서 몸을 최대한 작게 움츠려 용접하는 자세였다. 원인은 Plate에 선행공정에서 용접된 Bracket과 Stiff가 용접사의 가슴 아래에 위치하고, Longi는 용접사의 뒤에 위치하고 있어 용접사가 이를 피해 용접을 할 수밖에 없는 상황이었다. 이로

인해, 용접사가 받은 개선 전의 RULA 점수는 상완에서 6점, 손목에서 4점을 받아 손목과 팔 부분의 점수는 10점을 받았다. 그리고 목, 허리 그리고 다리 부분의 점수는 4점을 받아 최종 점수는 7점으로 즉시 개선을 필요로 하는 자세로 평가받았다.

이 자세를 개선하기 위해 제시한 방법은 블록의 조립 순서를 변경하는 것이었다. 용접사의 용접에 방해가 되는 부재들을 모두 용접사에 의한 수동용접 이후 공정으로 변경하였다. 따라서 용접사는 Plate에 몸을 엮드려 조금 더 편하게 왼팔로 상체를 지탱하며 용접할 수 있는 자세가 가능하였다.

개선 후 Digital Human의 RULA 점수는 상완, 전완, 손목에서 각각 점수가 낮아져 손목과 팔 부분의 점수는 5점으로 크게 낮아졌으며, 목, 허리와 다리 부분의 점수도 2점으로 낮아져 최종 점수는 4점으로 조금 더 관찰을 필요로 하는 자세로 개선되었을 확인할 수 있었다.

Table 10. Change of flat welding position II of score

Flat welding II	Before	After
Upper Arm	6	4
Forearm	3	2
Wrist	4	3
Wrist Twist	1	1
Posture A	9	4
Muscle	1	1
Force/Load	0	0
Wrist and Arm	10	5
Neck	4	1
Trunk	3	2
Leg	1	1
Posture B	3	1
Neck, Trunk and Leg	4	2
Final Score	7	4

## 제 6 장 공정 개선에 의한 생산비용 증감

작업 자세 개선을 위해 생산 공정을 변경함에 따라 여기에 따르는 생산비의 증감이 있을 수 있다. 그러므로 위 세 가지 공정 변경을 대상으로 현재 조선소에서 사용하고 있는 생산비 산정 방법인, Ton base와 Joint length, 그리고 M/H에 대해 알아보고 Table 11.로 나타내었다. 단, 생산비는 조선소마다 차이가 있으므로 구체적인 금액 제시 는 무의미하다고 판단하여 여기서 산출한 비용은 생산비 증감 여부에만 중점을 둔 것 에 의의를 두었다. Ton base는 블록 당 무게에 따라 생산비를 책정한 것이고, Joint length는 하나의 블록을 조립하는데 있어서 용접장의 총 길이에 따라 생산비를 책정한 것이다. 마지막으로 M/H는 하나의 블록을 조립하는데 몇 명의 인력이, 시간이 얼마나 소요되는가에 따라 생산비가 책정되는 경우를 말한다.

Table 11. Production cost of each standard calculation

	Ton base	Joint length	M/H
Overhead welding posture	증감 없음	증감 없음	증감 없음
Flat welding posture I	증감 없음	증감 없음	증감 없음
Flat welding posture II	증감 없음	860mm 증가	Longi. 절단 및 용접 비용 증가 Stiff. 반자동 용접 비용 증가 Bracket 반자동 용접 비용 증가 * 수 만원으로 추정

위보기 용접자세의 경우, 족장의 위치를 변경한 것이므로 블록의 전체 무게 변동이 없으며, 전체 용접장의 길이도 변동이 없다. 그리고 M/H 변동에도 영향을 주지 못하므로 Ton base, Joint length, M/H 기준의 생산비 증감은 없다.

아래보기 용접자세 I의 경우, 현장에서 사용되는 사다리를 사용하고 머리 위의 족장은 작업시 제거하는 방법은 제안했으므로, Ton base, Joint length 기준의 생산비 증감은 없다. 단지, 용접사 위에 위치하는 족장을 제거해야 하므로 이에 대한 시간이 조금 더 필요하다. 하지만, M/H에 중대한 영향을 주는 변수라고는 판단되지 않으므로 M/H 생산비 역시 증감이 없다고 판단하였다.

아래보기 용접자세 II의 경우, 용접사의 자세 개선을 위하여 생산 공정에 변화를 주었다. 블록 조립에 있어서 새로운 부재를 추가하거나 제거하는 경우는 아니므로 Ton base 생산비 증감은 없다. 하지만, Plate 길이에 해당하는 14100mm의 Longi.를 용접사가 블록 안에서 용접하는데 방해가 된다고 판단, 이를 절단하여 Longi.의 1570mm 만 큼의 길이는 용접사의 용접이 끝난 이후의 후행 공정에서 용접하는 방안을 제시하였다. 따라서 L형 300×130×13/17 형태의 Longi.를 절단하고, 이후에 다시 용접을 하게 된다. Joint length 기준으로 보면, 860mm 용접장이 증가한다. M/H 기준으로 보면, Longi. 절단비용, Longi. 용접비용, 그리고 이 Longi.와 후행 공정으로 변경한 Stiff.와 Bracket 의 반자동 용접 비용이 증가한다. 이를 현장 관리자의 도움을 받아 원단위로 환산하였 더니, 대략 수 만원에 해당하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안한 방법을 모든 블록 공정에 적용하는 것은 무리가 있다. 하지만, 이러한 방법론을 적용하여 블록의 공정을 변경한다면, 실질적인 블록 생산비의 과도한 증가로는 이어지지 않는다고 결론지을 수 있다.

## 제 7 장 결 론

디지털생산기술은 실제 작업 전에 생산 공정을 미리 시뮬레이션으로 구현해 볼 수 있기 때문에 실제 작업에서 발생할 수 있는 현상을 예측하고 미리 분석할 수 있는 특징을 가지고 있다(신중계 등, 2001). 본 연구에서는 이와 같은 디지털생산기술을 적용하여 조선소 내 용접사들의 근골격계질환 위험요인에 대하여 평가하였고, 이에 대한 개선책을 제시하여 개선책이 어느 정도 효과를 거두는지를 재평가하였다. 따라서 기존의 근골격계질환 위험요인을 평가하던 인간공학적 조사만큼의 신뢰성을 갖추면서, 용접사에게 근골격계부담이 가장 크다고 판단되는 신체부분의 관절 움직임을 그래프로 나타냄으로서 객관적이고 정량적인 분석을 하여 설득력을 높이도록 하였다. 그리고 해당 작업에 대하여 근골격계질환 예방을 위한 개선책을 시뮬레이션 구현함으로써 그 개선 효과를 미리 확인해 볼 수 있었다. 동시에 해당 작업 관리자에게는 개선책을 현장 적용 가능성 여부 및 효율성에 대한 판단에 도움을 주도록 하여 비용과 시간의 낭비를 최소화하는 효과를 얻을 수 있었다.

### (1) 생산 공정 변경에 Manufacturing Hub 활용의 장점

본 연구에서 시뮬레이션 대상으로 선정한 위험요인 대상은 중조립 단계의 블록에서 이루어지는 용접작업으로 하였다. 중조립 이후의 조립단계에서는 작업환경 개선으로 작업자의 부적절한 자세를 개선하기란 사실상 어려운 일이다. 이미 설계에서부터 작업자를 고려하지 못한 생산 공정이 만들어지기 때문이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Manufacturing Hub를 시뮬레이션에 사용하였다. Manufacturing Hub는 현장의 생산 시스템을 PPR(Product, Process, Resource)개념으로 나누어 디지털화 하고, 관리자는 이것을 이용해서 생산 시스템 관리를 효율적으로 할 수 있다.

그러므로, 작업자의 부적절한 자세 개선을 위해 생산 공정의 무슨 부분을 수정해야 하는가, 어떻게 수정해야 하는가에 대해 Manufacturing Hub가 효과적으로 사용될 수 있었다. 그리고 관리자는 수정된 공정이 어떻게 진행될 것인가를 예측해야 하는데, Manufacturing Hub는 수정된 생산 공정이 시뮬레이션에 직접적으로 반영될 수 있었기 때문에, 이를 위한 시간과 노력을 절감할 수 있었다.

### (2) 시뮬레이션을 이용한 근골격계질환 예방으로 기대되는 효과

일단, 근골격계질환이 발병한 작업자가 산업재해로 인정이 되면 산재보험급여, 산재근로자 재활사업에 따른 후유증상 진료비용, 직장복귀지원금이 지출된다. 또한 산재근

로자의 복지사업으로 산재장학사업, 산재정착사업, 산재근로자가족 복지사업이 따른다. 이외에도 회사마다 산업재해로 인정받은 작업자에게 보상하는 내용에 따라 지출되는 추가적인 금전적 손실이 있겠지만, 가장 큰 손실은 당사자와 당사자 가족들이 겪는 고통일 것이다. 이는 금전적 손실로는 계산할 수 없는 문제라고 여겨진다. 이와 같은 일을 방지하기 위해 근골격계질환을 유발하는 위험요인들을 사전에 제거하여 예방을 하기 위해 생산 공정 변경 시뮬레이션 방법론을 제안하였다.

인간공학 조사자나 피조사자의 주관적인 의견이 개입될 수 있기 때문에 논란의 소지가 있는 기존의 인간공학적 근골격계질환 조사를 시뮬레이션으로 대체함으로써 누구나 납득할 수 있는 객관적 지표를 제시할 수 있게 된다. 또한, 기존의 연구는 작업환경 개선에만 주력하였다. 따라서 복잡하고 다양한 블록이 생산되고 조립되는 조선소에서는 한계가 있는 예방법일 수밖에 없었다. 하지만, 생산 공정을 변경하는 방법을 시도함으로써 생산설계 단계에서부터 작업자의 자세를 고려할 수 있게 되었다. 이로써 작업자의 신체에 큰 부담을 주는 작업 개선 영역을 선박 건조 시스템 전반에 걸쳐 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 더구나, 시뮬레이션으로 공정 개선 효과를 미리 예측함으로써, 기업에 있어서 가장 중요한 생산비 증감을 예상할 수 있었다.

향후 연구는 설계나 생산 기술에 작업자를 고려한 선박 건조 시스템 개선에 대한 연구가 필요하다. 작업자의 작업 자세 개선을 위해서 수행한 블록 하나에 국한된 공정 변경 역시, 본 연구를 통해서 많은 제약이 있을 수 있으며, 선박의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수 있음을 알게 되었다. 본 연구에서는 단일 블록에 국한된 생산공정이 이루어졌지만, Manufacturing Hub를 이용한 시뮬레이션을 하나 이상의 블록에 확대 적용할 수 있는 가능성을 보였다고 생각한다. 그러므로 조선의 전반적인 공정을 대상으로 Manufacturing Hub를 이용한 시뮬레이션을 함으로서 전, 후 공정이 고려되는 생산공정을 개선함으로써 보다 효과적이며 경제성 있는 현실적인 제안을 할 수 있을 것이라 판단된다.



## 참고문헌

- [1] 김유창, 홍창우, “도장작업에서 신체부위에 따른 근골격계질환의 원인분석에 대한 연구”, 정보통신연구지, 6권 2호, pp.13-19, 2005
- [2] 김정룡, “작업관련성 근골격계질환 예방을 위한 인간공학(유해요인조사방법론 중심으로)”, 민영사, 2004
- [3] 김철중, 박수찬, 김진호, “국민 인체측정조사 연구”, 대한인간공학회 학술대회논문집, 1권, pp.155-162, 1993
- [4] 민경철 등, “조선산업에서 Human Modeling & Simulation을 이용한 작업자세분석 적용가능성 연구”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.256-261, 2005
- [5] 박국무 등, “인간공학적 작업부하 평가방법을 이용한 근골격계 부담작업 판정기준의 정확성 평가”, 인간공학회지, 25권 2호, pp.119-123, 2006
- [6] 박동현, 한상환, “범용 위험도 평가서를 이용한 조선업체 작업에서의 누적외상성질환에 대한 인공학적 분석”, 한국산업위생학회지, 8권 1호, pp.67-75, 1998
- [7] 박석호, “근골격계 작업부담과 직무스트레스의 연관성 분석”, 대한인간공학회 춘계학술대회논문집, pp.130-133, 2006
- [8] 손유식, 김유창, “Simulation을 이용한 조선 작업의 인간공학적 분석”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 239-244, 2005
- [9] 송동빈 등, “누적외상성질환의 발생특성 파악과 의학적 평가방법 개발 : 1997년 직업병 예방을 위한 연구용역보고서”, 한국산업안전공단, 1997
- [10] 신종계, 이장현, 우종훈, “디지털 선박생산(Digital Shipbuilding) 개념”, 대한조선학회 논문집, 제38권 1호, pp. 54-62, 2001
- [11] 오순영, 정병용, “조선업종의 유해요인조사 및 인간공학적 개선”, 대한인간공학회지, 24권 1호, 27-35, 2005.2

- [12] 차태인 등, "Digital Human 모델링을 이용한 조선산업에서의 작업자세 개선 방안", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 422-429, 2004
- [13] 차태인 등, "Ergonomic 시뮬레이션 방법론을 이용한 조선 작업개선 사례", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 252-255, 2005
- [14] McAtamney & Corlett, "RULA-A Rapid Upper Limb Assessment Tool", COPE Occupational Health and Ergonomic Services Ltd., Nottingham, U.K., 1992
- [15] National Safety Council, "Management of Work-Related Musculoskeletal Disorders Accredited Standards Committee Z365 Working Draft", The National Safety Council(NSC), Washington, 2002
- [16] NIOSH, "Current Intelligence Bulletin 53: Toluene Diisocyanate(TDI) and Toluenediamine(TDA)", Publication No.90-101, 1989
- [17] NIOSH, "Elements of Ergonomics Programs: A Primer based on Workplace Evaluation of Musculoskeletal Disorders", National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio., 1997