

# 디지털 휴먼 모델링 도구를 이용한 작업 개선에 관한 연구

김동준 · 박주용\* · 김현우\*\* · 장성록†\*\*\*

부경대학교 조선해양시스템공학과 · \*한국해양대학교 조선해양시스템공학부

\*\*부경대학교 안전공학과 · \*\*\*부경대학교 안전공학부

(2008. 2. 4. 접수 / 2008. 4. 4. 채택)

## A Study for Improvement of Work using Digital Human Modeling

Dong Joon Kim · Ju Yong Park\* · Hyun Woo Kim\*\* · Seong Rok Chang†\*\*\*

Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University

\*Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University

\*\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

\*\*\*Division of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received February 4, 2008 / Accepted April 4, 2008)

**Abstract :** In these days, work-related musculoskeletal disorders(WMSDs) is one of the issues in the shipbuilding industry. As the number of injured workers and demands for worker's compensation have rapidly increased, improvement of work conditions and environments to prevent WMSDs has been more demanded. To reduce WMSDs' hazards in the shipbuilding industry, simulation technique which showed it's ability of increasing the manufacturing productivity was applied, because simulation technique has the evaluation ability for a worker's danger level of production process by RULA(Rapid Upper Limb Assessment). In this research, worker's attitude had modeled and worker's action has simulated. After the caution level was evaluated, we pointed out clues which had high workload. To reduce workload, we applied ergonomic principles for improving working conditions and environments. Improved working conditions and environments were simulated using human modelling and simulation and their workload were evaluated again.

**Key Words :** WMSDs, RULA, digital human, human modeling & simulation

### 1. 서 론

최근 작업관련 근골격계질환은 사업장의 집단적인 발병, 산업재해자수의 급격한 증가 등으로 인하여 중요한 이슈로 대두되고 있다<sup>1)</sup>. 근골격계질환이란 특정 신체 부위 및 근육의 과도한 사용으로 인해 근육, 관절, 혈관, 신경 등에 발생된 미세한 손상이 누적되어 손, 손목, 팔목, 어깨, 목, 견갑골, 허리 등의 상지에 주로 나타나는 만성적인 건강장해를 말한다<sup>2)</sup>. 이것은 특히 산업현장에서 직업과 관련하여 작업자들이 잘못된 작업 자세 또는 반복적인 작업이나 중량물의 취급 등 불편한 작업요인들이 복합적으로 작용하여 장기간에 걸쳐 신체의 특정 부위에 영향을 미치게 된다<sup>3,4)</sup>.

산업재해 통계분석에 따르면 우리나라 근골격계

질환자수는 2000년 1,009명, 2001년 1,634명, 2002년 1,827명, 2003년 4,532명, 2004년 4,112명, 2005년 2,901명, 2006년 6,223명으로 집계되었다. 2004년과 2005년에 지속적인 감소 경향을 나타내었으나, 2006년 1월부터는 사고성 요통을 업무상 질병으로 분류하여 다시 큰 폭으로 증가하였다<sup>5)</sup>. 이러한 근골격계질환의 급증은 외환위기 이후 노동 강도의 강화 등 근로환경의 변화와 관련이 있다<sup>6)</sup>. 또한 조선업 분야도 근골격계질환이 지속적인 증가 추세를 보이고 있다<sup>5)</sup>.

정부에서도 근골격계질환에 효과적으로 대응하고자 관련 법률을 제정하였다<sup>7)</sup>. 사업주는 근골격계질환 예방 의무로써 중량물을 들어 올리는 작업 등 11개 작업에 대해서 매 3년마다 작업량, 작업 자세 등 유해요인 조사를 실시하고, 근골격계질환 발생 우려가 있는 경우 인간공학적으로 설계된 인력작업 보조설비 및 편의설비 등을 설치하여야 하는 등 법적 의무를 다하여야 한다. 이러한 근골격계질환 예

† To whom correspondence should be addressed.  
srchang@pknu.ac.kr

방과 관련하여 작업자의 작업환경, 작업 방법 및 작업 자세 등을 분석하는 인간공학적인 평가기법들이 많이 나와 있지만, 평가기법을 숙지한 인간공학 전문가에 의해 수작업으로 행해지는 방식으로 일부 대기업을 제외한 중소기업에서는 전문 인력이 부족한 실정이다. 인간공학적인 평가기법을 이용하여 작업 방법 및 작업 자세에 대한 개선안들이 개발되었다 하더라도 실제로 비용을 들여 새로운 설비를 투자하고 시제품 등을 만들어 보기 전에는 개선안 대비 작업 효율성 면에서 어떤 개선안이 가장 효과적인지 파악하기가 쉽지 않다. 이를 보완하기 위하여 최근 조립 공정이나 생산 공정에 Modeling & Simulation 기술을 적용시켜 작업효율성을 최적화시키는 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>8-12)</sup>.

조선 산업과 같은 중공업분야는 단순반복 작업은 물론 중량물 취급, 부적절한 자세, 진동 등의 요인으로 인해 다른 산업에 비해 더욱 복잡하고 다양한 근골격계질환 유해요인에 노출되고 있다. 작업 대상물을 작업자에게 맞추기가 현실적으로 어렵기 때문에 작업자가 쪼그려 앉거나, 팔을 높이 들거나, 허리와 목을 굽히고 옆으로 비틀어야 하는 등의 부적절한 작업 자세를 취한 채 용접, 사상, 도장 등의 작업을 하게 된다. 이러한 작업이 수십 분 동안 지속적으로 이루어짐으로 인해 작업자의 근골격계 계통에 나쁜 영향을 미치게 되는 것이다<sup>13)</sup>. 조선업의 경우 대부분의 작업이 특성상 완전 자동화를 통해 수작업을 배제하기에는 다소 무리가 있는 실정이다. 특히 2002년부터 선박 생산 및 수주량에 있어서 세계 1위를 유지하면서 조선업 종사자 수가 10만 명에 이르고 있으며 이들 대부분이 근골격계질환 유해요인에 노출되어 있다. 따라서 조선업종의 근골격계질환 예방뿐만 아니라 생산성 향상에도 기여할 수 있는 효과적인 개선방안을 제시하는 것이야말로 무엇보다 중요하다 하겠다.

조선업종의 대표적인 작업을 대상으로 디지털 휴먼 모델링 도구를 이용하여 근골격계질환을 야기할 수 있는 유해요인을 도출하고, 작업부하를 경감시킬 수 있는 최적의 개선 방안을 모색하는 데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 연구 방법

본 연구는 조선 산업의 작업을 가상공간에서 구현하여 근골격계 부담 작업을 인간공학적 방법론을 이용하여 개선하고, 가상공간에서의 적용성을 검토

한 후 작업 부하 경감 및 효율적인 작업환경 개선방안을 모색하고자 하였다.

디지털 휴먼 모델링 기술을 이용하여 가상공간을 구축하기 위하여 작업자의 작업 자세, 작업에 필요한 공구, 운용 장비 및 작업이 이루어지는 블록을 디지털데이터로 구축하였다. 작업의 가상환경 구축을 위하여 DELMIA V5를 이용하여 Process - Product - Resource(P.P.R.) Tree를 구축하기 위한 생산품인 블록(Product)과 생산을 위한 공구 및 작업 환경(Resources)을 3차원 형상으로 모델링하였다. 또한, 작업자의 작업 부하 평가의 신뢰성을 높이기 위해서 인체측정표준용어집을 참고하여 digital human manikin에 반영하였다<sup>14)</sup>. P.P.R. Tree 구축을 위하여 작업을 catalog로 만들어 데이터베이스화 하고 실제 작업자의 측정된 수치를 manikin에 적용하였다. 또한 각각의 단위작업별로 작업 자세를 분류하여 catalog화 하였다.

Modeling된 작업의 simulation을 수행하고, 각 작업의 근골격계질환 유해성을 평가하였다. 유해성은 작업자의 자세를 평가하는 RULA를 이용하여 상완, 전완, 손목, 목, 허리 등의 평가 부위의 굴절, 신전, 비틀림, 편향의 수치와 위험도를 도출하였다. RULA의 최종점수에 따라 I, II, III, IV단계의 action level로 분류하여 작업부하 수준을 평가하였다. 평가 결과를 바탕으로 작업부하 수준이 높게 나타난 작업 자세에 대하여 인간공학적 개선원리를 적용하였다. 작업 방법, 수공구, 작업 자세, 작업 환경 등을 중점적으로 고려하여 평가점수를 효과적으로 낮출 수 있도록 개선안을 도출하였다. 도출된 개선안의 작업 방법, 수공구, 작업 자세, 작업 환경 등에 대한 P.P.R. Tree를 재작성한 후 개선된 작업의 modeling과 simulation을 수행하여 근골격계질환 유해성을 다시 평가하였다. 이를 통하여 근골격계질환 유해성에 대한 개선 전·후의 결과를 비교하고 시각적으로 확인하는 것이 가능하였다.

## 3. 연구 결과

본 연구에서는 디지털 휴먼 모델링 도구의 조선 산업 적용에 대한 검증을 위하여 수행된 선행연구에서 도출한 10개 작업을 대상으로 수행하였다<sup>8)</sup>. 이들 10개 작업은 앉아서 위보기 용접, 서서 위보기 용접, 러그 브래킷 용접, 핀지그 설치 및 해체, 쇼트 와이어 패일팩 운반, 소부재 배열, 른지 용접, 선체 외판 도장, 에어리스 펌프 정비, 페인트 믹싱 등이

다. 이들 작업을 대상으로 휴먼 모델링 시뮬레이션 기술을 이용하여 작업자의 작업 부하 감각 및 효율적인 작업환경 개선을 위하여 다음과 같은 연구가 이루어졌다.

### 3.1. 가상 환경의 구축

#### Product & Resources

작업의 가상환경 구축을 위하여 Product가 될 블록과 다른 공구 및 작업환경을 Resources로 구축하였으며, DELMIA V5를 이용하여 P.P.R. Tree를 구축하기 위한 Product 및 Resources를 3차원 형상으로 모델링한 예를 Fig. 1에 나타내었다.

#### Digital Human Manikin

작업자의 작업 부하 평가에 대한 신뢰성을 높이

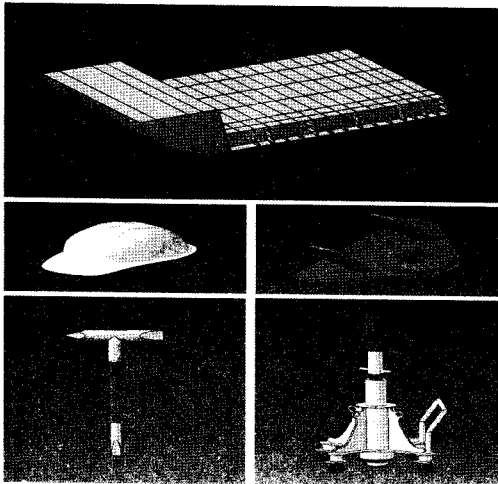


Fig. 1. Example of Product & Resources.

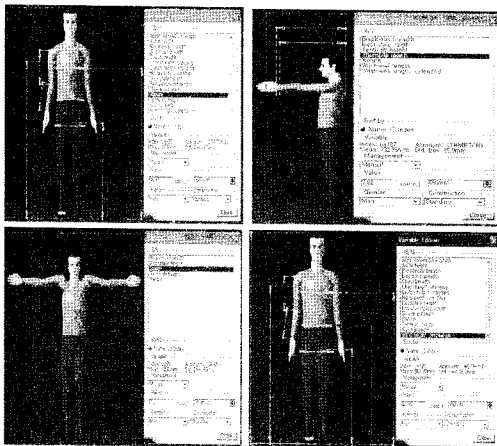


Fig. 2. Example of Digital Human Manikin.

기 위하여 몸무게, 키, 배꼽수준 허리높이, 양손끝점 너비, 벽면 앞으로 뻗은 엄지끝점 수평 길이, 팔 길이, 허리 높이 등의 7가지 신체치수를 대상으로 실측하였으며, 이들 자료를 digital human manikin에 적용하였다. Fig. 2는 실제로 측정된 신체치수가 반영된 digital human manikin의 예이다.

#### Product, Resources & Manikin Catalog

P.P.R. Tree 구축을 위해 작업을 catalog화하여 데이터베이스를 구축하였다. 또한 실제 작업자의 측정된 수치를 manikin에 적용시킨 후 각각의 단위 작업별로 작업 자세를 분류하였으며 이를 catalog화하여 데이터베이스를 구축하였다. Fig. 3은 실제 catalog data의 예를 나타내었다.

#### Layout

Product와 Resources의 데이터베이스와 단위 작업별 작업 자세 데이터베이스를 이용하여 각 작업이 이루어지는 작업환경을 가상공간에 구현하였다.

P.P.R. Tree가 구축된 layout의 예를 Fig. 4에 나타내었다.



Fig. 3. Catalog of Product, Resources and Posture.

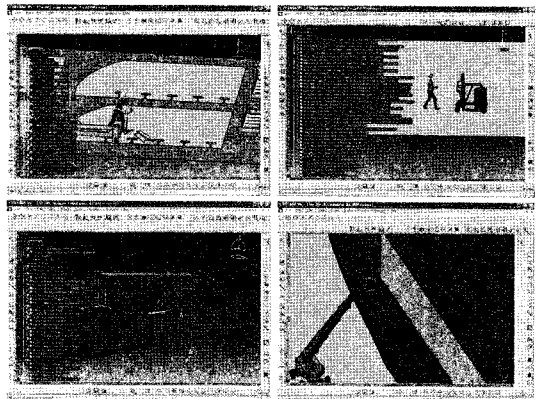


Fig. 4. Example of Workplace Layout.

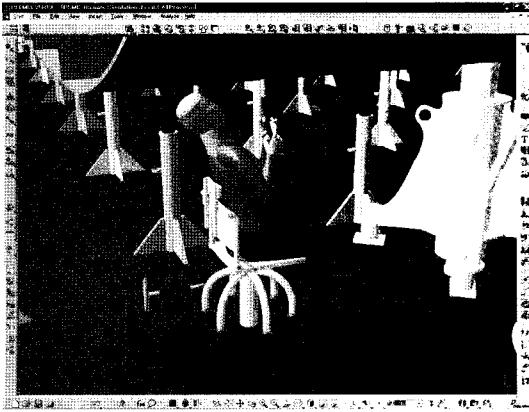


Fig. 5. Model of Upward Welding in a Sitting Position.

### 3.2. 작업 개선

앉아서 위보기 용접 작업을 사례로 모델링 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 앉아서 위보기 용접 작업의 모델링을 위해서는 Product인 대블록과 Resources인 용접건, 일반 핀지그, 대형 핀지그, 작업 의자가 필요하며 실제 작업자의 신체 측정 수치가 적용된 manikin으로 P.P.R.이 구성되었다.

작업자의 위보기 용접 작업 자세를 RULA로 평가한 결과 작업자가 작업의자에 앉아서 대 블록 아랫부분을 용접하는 전형적인 overhead 작업으로 뒤로 목 젖힘이 발생하는 것이 가장 큰 작업부담요인으로 평가되었다. 또한 용접건과 용접호스를 같이 들게 되어 3kg 중량의 물건을 들고 작업하는 것과 동일한 부하를 받게 되고, 작업형태가 큰 변화가 없는 정적인 작업이므로 힘/하중 항목 역시 2점의 점수가 추가되어 손목/손 항목의 평가점수가 7점으로 평가되었다. 결국 목, 몸통, 다리 항목의 평가점수 5점을 고려하였을 때 최종점수는 Fig. 6과 같이 7점으로 평가되었으며 이는 즉각적인 조치가 필요한 매우 유해한 작업으로 평가되었다.

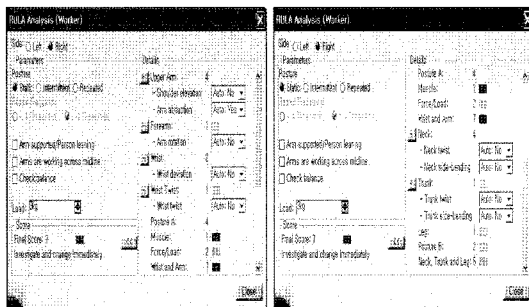


Fig. 6. RULA Score of Upward Welding in a Sitting Position.

RULA 분석 결과 근골격계질환의 위험성이 높은 작업을 저 위험성 작업으로 개선하기 위하여 RULA 평가의 세부 항목에서 위험도가 높은 항목을 우선적으로 고려하여 개선안을 제시하였다. 먼저 작업자의 목이 뒤쪽으로 젖혀지는 신전을 방지하기 위하여 작업의자의 등받이 각도를 조절할 수 있도록 하고 상체를 작업 점 뒤쪽으로 위치하도록 개선하여 목 항목의 부분 평가점수가 1점으로 저감되도록 하였다. 또한 상체의 각도 변화에 따라 위팔의 각도 감소 및 상완의 외전(abduction)이 감소하였다. 이는 상완의 평가 점수가 2점으로 감소한 것으로 개선 전 4점에 비해 부담이 크게 경감되는 효과가 나타났다. 마그네트 호스걸이를 사용하여 용접호스의 무게를 경감시켜 작업 시 1.5kg 중량의 물건을 들고 있는 것과 동일한 부하로 개선하였다. 도출된 개선안의 작업 방법, 수공구, 작업 자세, 작업 환경 등에 대한 P.P.R. Tree를 재 작성하였다.

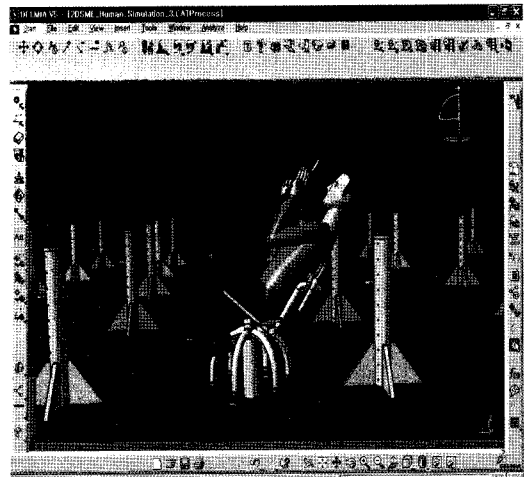


Fig. 7. Model of Upward Welding in a Sitting Position(Improved).

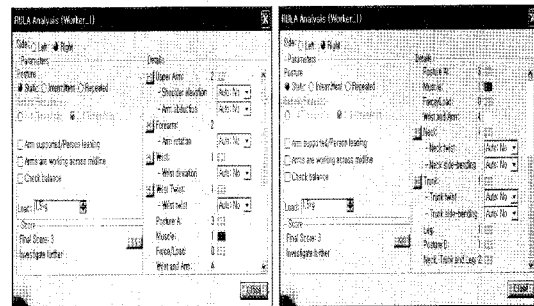


Fig. 8. RULA Score of Upward Welding in a Sitting Position (Improved).

Fig. 7은 개선된 앉아서 위보기 용접작업의 modeling 결과이다. 개선된 작업에 대한 simulation을 수행하여 근골격계질환 유해성을 다시 평가하였다. 재평가 결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 최종 평가 점수가 3점으로 추후 관찰을 통하여 작업을 개선할 필요가 있는 저 위험성 작업으로 평가되었다. 이와 같이 위보기 용접 작업에 대한 개선이 이루어질 수 있고, 개선 후의 근골격계질환의 위험성에 대한 평가를 시각적으로 확인할 수 있었다.

### 3.3. 개선 효과 분석

3.2의 앉아서 위보기 용접 작업 외에 서서 위보기 용접, 러그 브래킷 용접, 핀지그 설치 및 해체, 소부재 배열, 선체 외판 도장, 에어리스 펌프 정비, 페인트 믹싱 작업 등에 대하여 동일한 방법으로 modeling하고 simulation을 수행하였다. 선정된 10개 작업에 대한 RULA 평가 결과는 Table 1과 같다.

개선 결과 앉아서 위보기 용접, 서서 위보기 용접, 핀지그 설치 및 해체, 쇼트와이어 패일팩 운반, 소부재 배열, 론지 용접, 선체 외판 도장, 에어리스 펌프 정비, 페인트 믹싱 작업 등 근골격계질환 유해성이 높은 것으로 평가된 작업들이 RULA 최종 평가점수가 3점 이하인 저 위험성 작업으로 개선되었다. 러그 브래킷 용접, 쇼트와이어 패일팩 운반, 소형 론지 용접 작업 등 위험성이 낮은 작업은 보다 안전한 작업으로 개선 가능한 것으로 나타났다.

Table 1. RULA Score of Works

Processes	Before Improved		After Improved	
	RULA Final Score	RULA Action Level	RULA Final Score	RULA Action Level
Upward Welding in a Sitting Position	7		3	2
Upward Welding in a Standing Position	7		3	2
Lug Bracket Welding	4	2	3	2
Pin Jig Installment & Dismantlement	7		3	2
Short Wire Pail Pack Moving	3	2	1	
Small Material Arrangement	7		3	2
Small Longi Attachment	4	2	3	2
Outer Plate Spray	6		2	
Airless Pump Maintenance	7		2	
Paint Mixing	6		3	2

## 4. 결론

본 연구에서는 조선업 현업 종사자 및 전문가의 조언을 바탕으로 앉아서 위보기 용접, 서서 위보기 용접, 러그 브래킷 용접, 핀지그 설치 및 해체, 쇼트와이어 패일팩 운반, 소부재 배열, 론지 용접, 선체 외판 도장, 에어리스 펌프 정비, 페인트 믹싱 등 총 10개의 조선업중 주요 공정을 선정하여 디지털 휴먼 모델링을 통한 작업 개선을 진행하였다. 이를 통해 작업자의 작업 부하 경감 및 효율적인 작업환경 개선 방안을 모색하였다. 또한, 휴먼 모델링 시뮬레이션 기술을 이용하여 작업자의 작업 자세, 작업에 필요한 공구, 운용 장비 및 작업이 이루어지는 블록을 디지털데이터로 구축하고 프로세스 화하여 각각의 Product, Resources 및 Process를 모두 catalog화하여 데이터의 사용성을 향상시키고자 하였다. 연구 결과를 통해 도출된 종합적인 결론은 다음과 같다.

- 1) 실제 개선 적용 이전에 작업 부담 평가가 가능하므로 시간, 비용적인 측면에서 효과적인 작업 부하 경감방안이 될 것으로 사료된다.
  - 2) 공정수정이나 새로운 공정도입으로 인한 효율적인 작업환경구축이 가능한 것으로 평가되었다.
  - 3) 10개의 주요공정에 대한 개선결과가 기존의 작업에 대한 작업부담 평가 점수보다 개선효과 측면에서 보다 유용한 것으로 평가되었다.
  - 4) 유해요인 항목에 따른 분석을 통해 작업의 개선이 가능한 것으로 사료된다.
  - 5) 모델링 된 작업환경과 수공구 및 인체치수가 적용된 manikin을 catalog형식으로 데이터베이스화하여 modeling 및 simulation 시 소요되는 시간 절감 및 작업간의 연계성을 높일 수 있을 것으로 평가되었다.
- 현재까지의 디지털 휴먼 모델링 툴을 사용한 연구는 인간공학적 분석과 작업 개선을 위한 모델링에 많은 시간을 할애하여야 한다. 이는 작업분석을 위한 Product, Resources 및 Process에 대한 catalog가 만들어져 있는 상황이 아니기 때문이다. 이러한 연구는 조선 설계 및 생산관리시스템의 지원이 요구되며, 이러한 catalog가 완성되면 데이터의 사용성을 향상하여 추후 연구에서는 단일 작업에 국한된 개선보다는 전체 생산 공정에서 작업의 전·후 공정까지 고려하여 효과적이고 지속적으로 사용가능한 개선안 적용이 필요할 것으로 사료된다. 또한 개선 전·후 비교를 simulation을 이용하여 실시하

면서 시각적인 효과와 작업공정 전체를 볼 수 있는 교육 자료로도 충분히 활용할 가치가 있을 것으로 사료된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01- 2004-000-10113-0)지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

- 1) 전국금속산업노동조합연맹, 전국금속산업 노동조합연맹 산하 53개 사업장 근골격계질환 실태조사, 2002.
- 2) 대한산업안전협회, 근골격계질환 예방을 위한 인간공학과정(전문과정), pp. 5~35, 2004.
- 3) 장성록, 산업인간공학, 다솜출판사, pp. 306~316, 2004.
- 4) Hagberg M., Silverstein B., Wells R., Smith M.J., Hendrick H.W., Carayon P. and Perusse M., Work related musculoskeletal disorders(WMSDs), Taylor & Francis, London, 1995.
- 5) 김철홍, “국내 자동차 산업의 근골격계질환 실태에 관한 연구”, 산업경영시스템 학회지, Vol 24, No. 67, pp. 1~10, 2001.
- 6) 노동부, 산업재해통계분석, 2001-2006.
- 7) 노동부, 산업안전보건법 제24조, 2003.
- 8) 장성록, “Digital Human Simulation을 이용한 근골격계질환 예방에 관한 연구”, 한국안전학회, Vol. 22, No. 3, pp. 81~87, 2007.
- 9) 이창민, 이장현, 김용균, 김원돈, 신종계, “3차원 디지털 목업 및 시뮬레이션 기반의 합정 설계 검증”, 대한조선학회 논문집, Vol. 40, No. 1, pp. 66~68, 2003.
- 10) 우종훈, 이광국, 정호림, 이장현, 황규옥, 신종계, “디지털 조선소 구축을 위한 물류 모델 프레임워크”, 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 133~142, 2004.
- 11) 우종훈, 오대균, 이광국, 이춘재, 신종계, 권영대, “디지털 조선소 구축을 위한 프레임워크 그리고 활용 방안에 대한 사례 및 제언”, 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 25~35, 2005.
- 12) 신종계, 이장현, 박철성, 이종갑, 김형만, “3차원 제품 모델 기반의 선박 PDM 구축 연구”, 대한조선학회 논문집, Vol. 40, No. 1, pp. 63~68, 2003.
- 13) 정민근, 이인석, “작업관련성 근골격계질환 예방을 위한 인간공학적 접근”, 산업안전기술지, 제 3권, 제1호, pp. 11~17, 2003.
- 14) 산업자원부 기술표준원, 인체측정 표준용어집, 2004.