

Digital Human Simulation을 이용한 근골격계질환 예방에 관한 연구 - 조선업을 대상으로 -

장 성 록

부경대학교 안전공학과
(2007. 3. 7. 접수 / 2007. 6. 7. 채택)

A Study for Prevention of Musculoskeletal Disorders Using Digital Human Simulation in the Shipbuilding Industry

Chang, Seong Rok

Division of Safety Engineering, Pukyong National University
(Received March 7, 2007 / Accepted June 7, 2007)

Abstract : In this study digital human models of ship construction tasks using modeling & simulation were constructed and human models' activities through human activity analysis were evaluated. Human Factors experts analyzed the actual workers' tasks using the same technique used in human activity analysis at the same time. The main objective of this study is to check a possibility of applying digital human modeling technique to ship construction tasks that are mostly non-standardized(not uniformed) whereas most applications of digital human modeling technique have been applied to standardized tasks. We evaluated postures of both real workers and digital humans by RULA. It turned out that the final scores of RULA evaluation on real workers are the same as the RULA scores for digital humans. However, there were differences of RULA detail scores between real workers and digital humans in the several processes related with the wrist twist and deviations. Those differences are considered to be resulted from the error in the on-site measuring worker's body dimension which could be reduced by accurate tools to correct data for body dimension and digital real drawings for facilities. The results showed possibility of application of digital human modeling and ergonomic analysis on informal work operations as well as formal operations in the shipbuilding industry.
Key Words : musculoskeletal disorders, digital human simulation, RULA, shipbuilding industry, non-standardized task

1. 서 론

근골격계질환(Musculoskeletal Disorders)이란 특정 신체부위 및 근육의 과도한 사용으로 인해 근육, 관절, 혈관, 신경 등에 미세한 손상이 발생하여 손, 손목, 팔꿈치, 어깨, 목, 견갑골, 허리 등의 상지에 주로 나타나는 만성적인 건강장해를 말한다¹⁾. 노동부의 산업재해 통계분석에 따르면 우리나라 근골격계 질환자의 수는 Fig. 1과 같이 2001년 1,634명, 2002년 1,827명, 2003년 4,532명, 2004년 4,112명, 2005년 2,901명, 2006년 6,233명으로 2004년과 2005년에는 잠시 감소를 보였지만 다시 증가 추세를 보이고 있다. 또한 조선업 분야도 근골격계질환이 급격하게 증가하는 추세이다²⁾. 근골격계질환의 급증은 의

환위기 이후 노동 강도의 강화 등 근로환경의 변화와 관련이 있다³⁾. 이로 인해 생산성 저하, 근로의욕 저하, 품질 저하 등의 경영손실은 물론 직접 의료

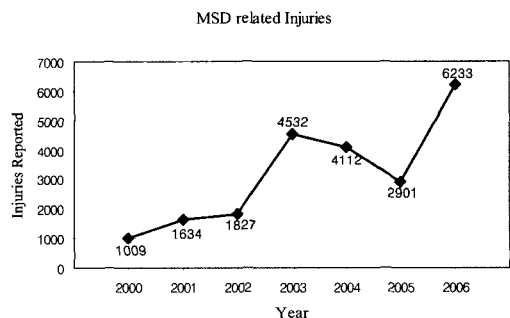


Fig. 1. Trend of musculoskeletal injuries occurred from 2000 to 2006.

비의 부담 등이 증가 추세에 있다. 그리고 근골격계 질환에 대한 직원들의 보상과 작업 개선에 대한 요구가 점차 증가하고 있고 노·시간의 중요한 쟁점사항으로 부각되고 있다⁴⁾.

또한, 정부에서는 2002년 12월 산업안전보건법 제 24조(보건상의 조치) 제1항 제5호를 신설하여 사업주에게 근골격계질환 예방의무를 부과하였다⁵⁾. 그리하여 근골격계질환에 대해 체계적인 작업 환경 분석 및 작업 방법, 작업 자세에 대한 인간공학적인 평가를 통해 작업 환경 개선에 의한 사전 관리 필요성이 증대되고 있다.

이러한 근골격계질환 예방과 관련하여 작업자의 작업 환경 분석 및 작업 방법, 작업 자세 등을 분석하는 인간공학적인 평가기법들이 있으며, 이것들은 평가기법을 숙지한 인간공학전문가가 체크리스트 등을 이용하여 수작업으로 행하는 방식이다⁶⁾. 그러나 이러한 전문가들도 일부 대기업들을 제외한 중·소기업에서는 부족한 실정이다.

인간공학적인 평가기법을 이용하여 작업 및 작업 자세에 대한 개선안이 나왔을 경우에도 실제로 비용을 들여 새로운 설비를 투자하기 전에는 개선안 대비 작업 효율성과 어떤 개선안이 가장 효과적인지를 알 수가 없다. 따라서 최근 조립 공정이나 생산 공정에 Modeling & Simulation 기술을 적용시켜 생산성을 최대화시키고자 하는 연구가 진행 중에 있다⁷⁻¹²⁾. Modeling & Simulation 기술을 이용하면 인간공학적 개념을 설계 초기에 적용시킬 수 있어서 적지 않은 시간과 비용을 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 작업자의 작업 수행 능력을 예측할 수 있어 작업자의 안전과 근골격계질환에 대한 위험요소를 최소화시킬 수 있다¹³⁾.

본 연구에서는 Modeling & Simulation 기술을 이용하여 조선업의 작업을 Digital Human Modeling으로 구축하고 작업자의 작업을 Human Activity Analysis(인간공학적 평가 프로그램)을 이용하여 평가한다. 이와 함께, Human Activity Analysis에 사용된 평가기법과 동일한 기법으로 인간공학 전문가가 실제 작업자의 자세를 평가한다. 이를 바탕으로 정형화된 조립 공정이나 생산 공정에 많이 적용되고 있는 Digital Human Modeling 방법이 비정형 작업이 많은 조선업 분야에도 적용이 가능한지 평가하고, Digital Human Modeling & Simulation을 이용한 조선업 작업환경 개선 연구의 기초를 마련하는데 목적이 있다.

2. 연구의 배경

2.1. Modeling & Simulation(M&S)

Simulation이란 어느 시스템이나 공정기능을 다른 수단을 활용하여 모의 구현함을 의미한다. 시스템이나 공정기능을 표현하기 위하여 모델을 사용하게 되는데, 모델이란 모델의 대상을 직접 접촉하지 않고도 이와 관련한 정보를 교환할 수 있도록 하는 상징화된 언어의 집합이다. ‘상징’이라는 단어가 내포하듯이 모델링은 그 대상의 모든 측면을 표현할 수 없으며, 함축화하는 절차를 반드시 수반한다. Modeling & Simulation 기술은 현대의 다양한 산업과 기술 분야에서 매우 중요한 역할을 담당하여 왔다. M&S는 기술개발의 시험단계에서 알고리즘과 매개변수를 체계적으로 변화시키기 위한 연구개발용 도구로서, 그리고 새로운 프로그램의 초창기에 개발될 시스템을 비교 평가하는 도구로서 일반적으로 활용되어 왔다¹⁴⁾.

2.2. Digital Human Modeling

Digital Human Modeling은 기존의 M&S 기술로 구축된 가상의 작업환경에 실제 작업자의 작업과 동일하게 행하는 가상의 마네킹을 만들어서 작업자 및 작업동작을 가상공간에서 유사하게 구현하는 것을 말한다. Digital Human Modeling을 통해 작업자의 작업수행 능력을 예측할 수 있으며 모든 작업 자세 요소의 정량 및 정성적 분석을 수행함으로써 Human Activity Analysis 및 근골격계질환 예방을 위한 개선안, 신진 대사량, 작업 포락면 등의 요소를 극대화할 수 있다.

Digital Human에서는 독립적인 인체모형(Modularized Man-Model)을 모델링함으로써 CATIA(Computer-graphic Aided Three-dimensional Interactive Application) 등의 기존 CAD(Computer-Aided Design) 소프트웨어와 함께 사용될 수 있으며, 이는 기존의 CAD 시스템에 즉시 이용 가능한(Built-in) 인체 모형을 첨가하는 효과가 있게 되며 사용자가 원하는 체형의 Operator(가상 작업자)를 즉시 불러 동작거리, 시야, 작업 공간 등에 관한 분석을 함으로써 주변 환경을 설계하거나 시뮬레이션을 수행할 수 있게 한다^{15,16)}.

2.3. Modeling 프로그램

DELMIA(Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application)는 3차원 디지털 매뉴팩처링 솔루션

루션(Digital Manufacturing Solution)을 제공하는 프로그램이다. 자동차, 항공, 조선, 전기전자, 소비재, 기계조립 등 모든 제조 산업을 대상으로 공정계획에서부터 일반 조립 프로세스와 공장 시뮬레이션에 이르는 디지털 매뉴팩처링 솔루션을 제공한다. 이러한 DELMIA 솔루션은 디지털 목업(Digital Mock-up)을 통해 매뉴팩처링 프로세스의 설계나 검증을 수행한다¹⁷⁾.

DELMIA 솔루션에서 지원하는 기능 중에 하나인 Human 솔루션은 가상의 작업환경에 Digital Human을 생성하여 실제 작업과 유사하게 구현할 수 있다. 그리고 인체변수 편집을 통해 실제 작업자와 유사한 체격 및 신체 특징을 가진 Digital Human을 생성할 수 있으며, Task Simulation을 통해 작업자와 만들어지는 제품, 설비 간에 관계를 미리 파악하는 것이 가능하다. 또한 작업으로 인해 발생할 수 있는 작업자의 불편함이나 근골격계질환의 발생을 예방하기 위해 인간공학적 분석 기법인 RULA¹⁸⁾, NLE^{19,20)}, Pushing-Pulling-Carrying²¹⁾을 Human Posture Analysis에서 제공하고 있다. 그러므로 작업장 설계나 설비 등의 문제로 발생할 수 있는 근골격계질환을 설계 초기에 예방할 수 있고, 작업자를 고려한 작업장 환경을 구현할 수 있다.

3. 연구 내용

3.1. 연구 대상

본 연구에서는 조선업에서 행해지는 여러 공정 중에 대표적인 10개 공정을 선정하였다. 10개의 공정은 조선산업의 현장 관리자가 위험성이 높은 것으로 추천한 6개 공정과 높지 않은 것으로 추천한 4개 공정으로 이루어져 있다. 근골격계질환의 위험성이 높지 않은 4개 공정을 연구 대상에 포함한 이유는 위험성이 높은 공정 및 높지 않은 공정에서도 Digital Human Modeling이 적용 가능함을 알아보기 위함이다.

10개 공정의 선정은 산업안전보건법 제4장 24조 5항과 산업보건기준에 관한 규칙 제9장, 한국산업안전공단의 KOSHA CODE에 기준하여 작성되어진 A조선소의 근골격계질환 예방을 위한 유효요인 조사를 참고하였다²²⁾.

아래의 Table 1은 10개 공정의 목록을 나타낸 것이다.

Table 1. List of research objects

Processes	
1	Upward welding in a sitting position
2	Upward welding in a standing position
3	Lug bracket welding
4	Pin jig installment and dismantlement
5	Short wire pail pack moving
6	Small material arrangement
7	Small longi attachment
8	Outer plate spray
9	Airless pump maintenance
10	Paint mixing

3.2. 인간공학적 분석

작업의 근골격계질환 위험성을 평가하기 위해 현장 유효요인 조사 및 작업자 인터뷰를 실시하였고, 작업에 대한 동영상 촬영 및 현장에서 필요한 여러 가지 수치들을 측정하였다. 2대의 디지털 카메라를 이용하여 촬영을 수행하였으며, 작업자가 촬영에 대한 인식으로 인해 평소와 다르게 작업을 행할 수 있으므로 3사이클 이상을 촬영하였다. 그리고 인간공학적 분석 및 Digital Human의 자세 Modeling의 정확도를 높이기 위해 작업자의 좌, 우, 정면을 기본으로 하여 촬영하였다. 현장 측정 시에 Digital Human Modeling을 위한 수치들도 함께 측정하였다. 그리고 촬영된 동상을 바탕으로 해당 작업의 작업 자세를 분석하였고, 가장 빈도가 높게 발생하는 동작이나 작업자에게 가장 많은 부하를 줄 수 있는 자세를 선정하여 RULA로 평가하였다.

Fig. 2는 인간공학적 분석 방법의 절차를 도식화한 것이다.

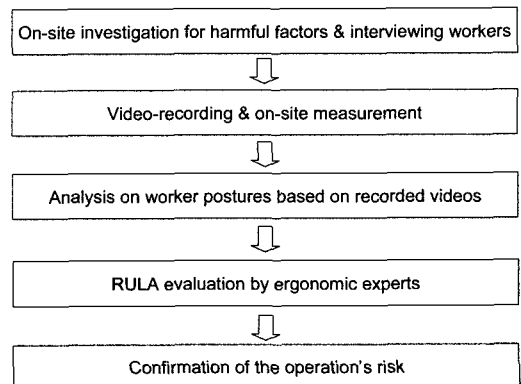


Fig. 2. Procedure of ergonomic analysis.

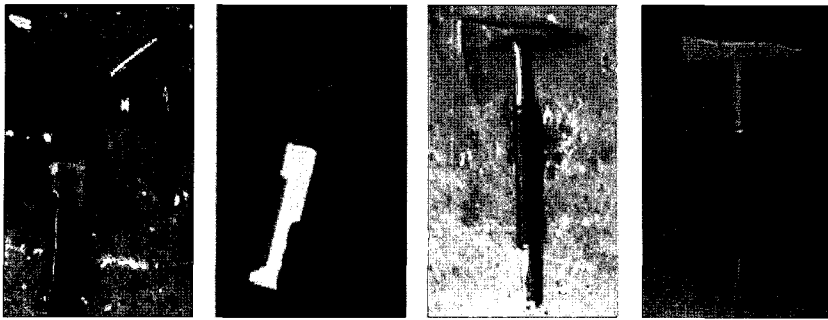


Fig. 3. Images of real tools and tool models.



Fig. 4. Example of real equipment and their models.

3.3. Digital Human Modeling 분석

실제 작업자와 동일한 자세를 구현하기 위해 동영상 촬영은 좌, 우, 정면 등 최소 3방향 이상에서 촬영하였다. 그리고 현장 측정 시에 사용하는 수공구 및 주변 작업환경, 작업자의 인체치수 등을 측정하였다. 현장에서 측정된 자료들을 바탕으로 DELMIA를 이용하여 Fig. 3과 같이 수공구들을 모델링하였다.

또한, 현장에서 측정된 작업자가 작업을 행하는 작업점, 작업자의 높이 등을 고려하여 주변 설비 및 환경 등을 구축하였다. 실제 작업자가 작업을 수행하는 환경과 동일한 환경을 구축하기 위하여 주변 설

비 및 환경 등을 Fig. 4와 같이 모델링하였다.

Table 2. Measurement items for worker body dimension

	Measurement Items
1	Weight
2	Stature
3	Waist height(Omphalion)
4	Span
5	Thumbtip reach
6	Arm length
7	Upper arm length

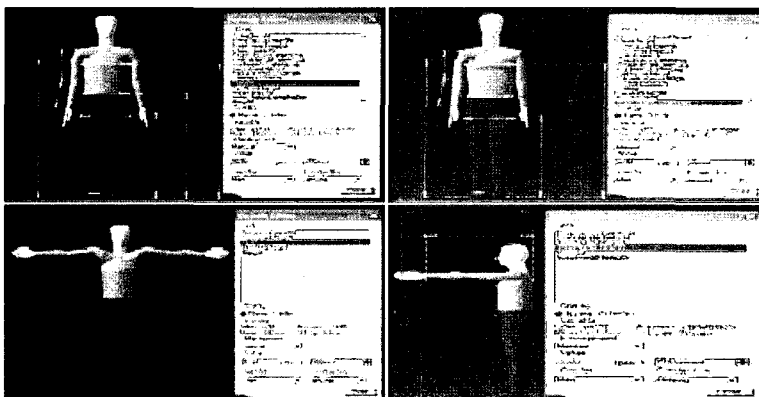


Fig. 5. Example of digital human building and human measurement edition.

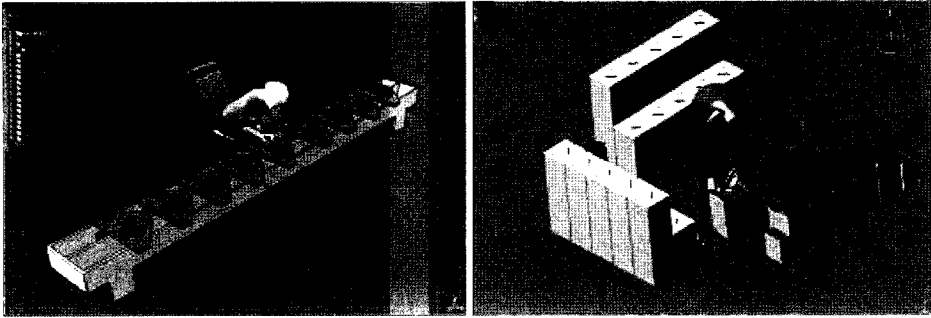


Fig. 6. Example of working posture models.

그리고 10개 공정의 작업자를 Digital Human으로 모델링하여 RULA로 평가할 때, 신체치수 차이로 인한 오차를 줄이기 위해 현장 측정 시에 실제 작업자의 인체치수를 측정하였다. 측정된 치수는 Table 2에서 보는 바와 같이 몸무게, 키, 바닥에서 배꼽까지의 배꼽수준허리높이, 양손끝점 너비 등을 측정하였다²³⁾. 측정된 데이터를 바탕으로 Fig. 5와 같이 DELMIA Human 솔루션을 이용하여 Digital Human 생성 및 인체변수를 조절하였다.

이렇게 생성된 Digital Human을 P.P.R.(Product, Process, Resource)로 구축된 가상의 작업환경 속에 투입했다. 그리고 실제 작업자를 RULA로 평가한 자세의 시점과 동일한 위치에서 실제 작업 자세와 유사하게 모델링하였다. Fig. 6은 모델링된 작업 자세의 예를 보여주고 있다.

3.4. Simulation 결과 분석

10개 공정에 대한 실제 작업자와 Digital Human의 RULA 평가 점수는 Table 3과 같다. Table 3에서

모두이 Digital Human의 RULA 평가 점수 결과와 실제 작업자의 RULA 평가 점수 결과는 모두 같다는 것을 알 수 있다. 그리고 러그 브래킷 용접과 소형 론지 취부, 에어리스 펌프 정비 등에서 발생한 세부 항목의 점수 차이는 모두 손목과 관련된 부위에서 발생하였다. 러그 브래킷 용접에서는 손목의 회전 상태, 소형 론지 취부는 손목의 척골 편향, 에어리스 펌프 정비는 손목의 요골 편향에서 점수가 1점씩 부가된 결과를 보였다. 이것은 각도에 민감한 손목이 작업점 측정과 작업자 인체 치수, 설비 모델링 시 발생한 미세한 오차로 인해 차이가 발생한 것으로 생각된다. 이런 오차들을 줄이기 위해서는 작업점 측정 시 정밀한 측정 도구의 사용이 필요하고, 작업자의 인체계측을 통한 정확한 인체 치수 데이터 및 설비의 설계도 확보가 필요하다. 그러나 손목 부위의 모델링 차이로 인해 발생한 점수 차는 1점으로 차이가 크지 않았고, RULA 평가 점수에 변화가 없었으며, 위험성의 범주를 구분하는 데에는 영향을 미치지 않았다.

Table 3. Comparison of RULA scores for ten processes between real workers and digital human models

	Processes	RULA score for real workers	RULA score for digital humans	Differences
1	Upward welding in a sitting position	7	7	
2	Upward welding in a standing position	7	7	
3	Lug bracket welding	4	4	Wrist twist
4	Pin jig installment and dismantlement	7	7	
5	Short wire pail pack moving	3	3	
6	Small material arrangement	7	7	
7	Small longi attachment	5	5	Wrist ulna deviation
8	Outer plate spray	6	6	
9	Airless pump maintenance	7	7	Wrist radius deviation
10	Paint mixing	7	7	

4. 결론 및 토의

본 연구는 비정형적으로 이루어지는 조선업의 대표 공정 10개를 선정하여 현장 조사를 수행하였으며, 각각의 공정을 기존의 M&S 기술을 이용하여 Digital Human Modeling으로 구축하였다. 그리고 실제 작업자와 Digital Human의 작업 자세를 RULA를 사용하여 평가한 결과 Digital Human의 RULA 평가 점수 결과와 실제 작업자의 RULA 평가 점수 결과는 모두 같다는 것을 알 수 있었다. 그러나 일부 작업에서는 세부 항목의 점수 차이가 모두 손목과 관련된 부위에서 발생하였다. 이것은 손목의 미세한 각도 변화를 반영하지 못하여 발생한 것으로 생각된다. 그러나 손목 부위의 Modeling 차이로 인해 발생한 점수 차는 1점으로 차이가 크지 않았고, RULA 평가 점수에 변화도 없었으며, 위험성의 범주를 구분하는 데에는 영향을 미치지 않았다.

이 결과들을 토대로 조립 작업 등의 정형적인 작업뿐만 아니라 비정형적인 조선업 작업에도 Digital Human Modeling을 적용하여 인간공학적 분석이 가능할 것으로 생각된다. 그리고 인간공학적인 개선에서 큰 영향을 미치는 설비 및 수공구 등의 설계에 적용할 경우, Digital Human Modeling의 적용으로 설비 투자 이전에 설계의 단계에서 작업자의 작업부담 평가가 가능하므로 인간공학적인 개선이 가능할 것으로 생각된다.

따라서 인간공학적으로 잘못 설계된 설비 등의 투자로 발생하는 비용과 근골격계질환으로 인한 손실 비용을 절감할 수 있는 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한 새로운 공정이나 공정의 변화로 인해 발생할 수 있는 부적절한 자세 등을 미리 평가 하고 확인 할 수 있어, 효율적인 공정 개선이 이루어 질수 있을 것으로 생각된다.

이 외에도 Digital Human Modeling & Simulation이 구축되면, 작업 방법론, 평가, 작업 분석을 데이터베이스화 할 수 있어 기존 인간공학 프로그램을 활성화 시킬 수 있으며, 작업에 국한된 개선보다 설계 및 전체 생산 공정을 고려한 개선을 도출하는데 활용이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글 : 이 논문은 2005년도 부경대학교 연구년 교수지원(PS-2005-020)에 의하여 연구되었음

참고문헌

1) 장성록, 산업인간공학, 다솜출판사, pp. 306~316,

2004.
 2) 노동부, 산업재해통계분석, 2001~2006.
 3) 김철홍, “국내 자동차 산업의 근골격계질환 실태에 관한 연구”, 산업경영시스템 학회지, 제24권, 제67호, pp. 1~10, 2001.
 4) 김홍태, “조선업 근골격계질환에 대한 공학적 접근 방안”, 대한조선학회지, 제40권, 제3호, pp. 36~46, 2003.
 5) 노동부, 산업안전보건법, 2003.
 6) 한국산업안전공단, 근골격계부담작업 유해요인 조사 지침 (H-30-2003), 2003.
 7) 이창민, 이장현, 김용근, 김원돈, 신종계, “3차원 디지털 목업 및 시뮬레이션 기반의 합정 설계 검증”, 대한조선학회 논문집, 제40권, 제1호, pp. 63~68, 2003.
 8) 우중훈, 이광국, 정호림, 이장현, 황규옥, 신종계, “디지털 조선소 구축을 위한 물류 모델 프레임 워크”, 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 133~142, 2004.
 9) 우중훈, 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.
 10) 신종계, 이장현, 박철성, 이종갑, 김형만, “3차원 제품 모델 기반의 선박 PDM 구축 연구”, 대한조선학회 논문집, 제40권, 제1호, pp. 63~68, 2003.
 11) 우중훈, 이광국, 정호림, 이장현, 황규옥, 신종계, “디지털 조선소 구축을 위한 물류 모델 프레임워크”, 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 133~142, 2004.
 12) 주무현, 윤진호, “토요타 생산시스템의 진화와 노동의 인간화”, 산업노동연구, 제7권, 제1호, 2001.
 13) 차태인, 정성원, 최양렬, 이장현, 신종계, 박주용, “Digital Human 모델링을 이용한 조선산업에서의 작업자세 개선방안”, 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 422~429, 2004.
 14) 윤석준, 시뮬레이션과 시뮬레이터, 선학사, pp. 27~31, 2003.
 15) 이석순, 황영진, 김효진, CATIA V5 기초 Ver. 5.11, 과학기술, 2004.
 16) 이석순, 황영진, 김효진, CATIA V5 응용 Ver. 5.11, 과학기술, 2004.
 17) www.delmia.com.
 18) McAtamney, L., E. N. Corlett, “RULA: A rapid upper limb assessment tool”, Ergonomics for all,

- pp. 286~291, 1994.
- 19) Waters, T. R., V. Putz-Anderson, A. Garg, "Applications Manual for the Revised NIOSH lifting equation, Cincinnati, OH: DHHS(NIOSH)", pp. 4~35, 1994.
 - 20) Chaffin, D. B., G. Andersson, B. Martin, Occupational Biomechanics, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 292~297, 1999.
 - 21) Snook, S. H., V. M. Ciriello, "Design of Manual Handling Tasks: Revised tables of Maximum Acceptable Weights and Forces", Ergonomics, 1991.
 - 22) 대한인간공학회, A조선소 인간공학프로그램 보고서, 2002.
 - 23) 산업자원부 기술표준원, 인체측정 표준용어집, 2004.