

## 비대칭 들기작업의 3차원 시뮬레이션

### - Simulation of Whole Body Posture during Asymmetric Lifting -

최 경 임\*

Choi Kyung Im

#### Abstract

In this study, an asymmetric lifting posture prediction model was developed, which was a three-dimensional model with 12 links and 23 degrees of freedom open kinematic chains. Although previous researchers have proposed biomechanical, psychophysical, or physiological measures as cost functions, for solving redundancy, they lack in accuracy in predicting actual lifting postures and most of them are confined to the two-dimensional model. To develop an asymmetric lifting posture prediction model, we used the resolved motion method for accurately simulating the lifting motion in a reasonable time. Furthermore, in solving the redundant problem of the human posture prediction, a moment weighted Joint Range Availability (JRA) was used as a cost function in order to consider dynamic lifting. However, it is known that the moment weighted JRA as a cost function predicted the lower extremity and L5/S1 joint motions better than the upper extremities, while the constant weighted JRA as a cost function predicted the latter better than the former. To compensate for this, we proposed a hybrid moment weighted JRA as a new cost function with moment weighted for only the lower extremity.

---

\* 포항공과대학교 기계산업공학부

In order to validate the proposed cost function, the predicted and real lifting postures for various lifting conditions were compared by using the root mean square(RMS) error. This hybrid JRA reduced RMS more than the previous cost functions. Therefore, it is concluded that the cost function of a hybrid moment weighted JRA can be used to predict three-dimensional lifting postures. To compare with the predicted trajectories and the real lifting movements, graphical validations were performed. The results also showed that the hybrid moment weighted cost function model was found to have generated the postures more similar to the real movements.

## 1. 서론

인간공학분야에 있어서 인체의 동작예측모델은 Reach나 Vision, gait, 혹은 Lifting연구에 적용되어왔다. 그러나 이전의 연구는 2차원 평면상의 동작을 예측하는데 그쳤으며, 3차원으로 개발된 인체의 경우는 인체의 일부분에 국한되어 개발되어왔다. 인체의 동작은 매우 복잡하고 어려운 제어과정을 통해 정의된다[4]. 인체는 많은 여유자유도를 갖는 시스템으로 인체동작을 예측하기 위하여 최적화방법이 사용되어 왔다. 들기작업에 관한 연구의 경우, 들기작업 전 구간동안의 작업조건이나 작업자의 신체조건에 맞는 최적해를 찾는 방법인 Global Optimization Method가 주로 사용되어왔다[1,2,3,6,8]. 그러나 이러한 방법은 많은 computation Time을 요구하며, Whole Body를 대상으로 하는 경우는 그 계산량은 가히 천문학적인 시간을 요한다. 따라서 근래에는 인간공학분야 뿐만 아니라 애니메이션 분야에서도 실시간에 인체동작을 예측할 수 있는 Inverse Kinematics 방법이 자주 사용되어 왔다.

Reach Posture Prediction의 경우는 3차원 시뮬레이션을 이용하여 한 손 혹은 양 손의 궤적을 예측하는 연구가 시도 되어왔다[5,9,10,11]. Zhang과 Chaffin의 연구에서는 몸통과 한 쪽의 팔을 7 자유도를 갖는 4개의 링크로 가정하였으며[10], Weighted 자코비안을 사용한 Inverse Kinematics방법을 이용하여 관절의 궤적을 예측하였다. Shin의 연구도 Inverse Kinematics방법을 사용하였으며, 모델을 몸통과 양손으로 확장하였으며, 두 가지 작업을 동시에 수행할 수 있도록 하였다[9]. 그러나 Reach Posture Prediction의 경우는 대부분의 모델이 몸통과 한 팔 혹은 양팔로 되어 있어 들기작업과 같은 Whole Body Motion에 대해서는 응용이 불가능하다.

들기작업은 신체의 모든 관절의 움직임의 조합으로 자세를 예측해야 하기 때문에 Whole Body Model이 요구된다. 특히 실제 작업현장에서 빈번히 일어

나는 비대칭 들기작업의 경우는 허리의 측면굴곡이나 회전을 요하며, 이러한 작업은 요통재해에 주요한 원인으로 작용하고 있으나, 아직도 들기작업에 관한 자세예측 연구들이 2차원 시뮬레이션에 국한된 실정이어서 이러한 영향을 동작 예측 시뮬레이션에는 반영하지 못하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 비대칭 들기 작업을 하는 동안에 인체의 움직임을 잘 표현할 수 있는 3차원 Whole Body Lifting Posture Prediction Model을 개발하고, 개발된 모델을 통하여 신체의 각 관절의 궤적을 예측할 수 있는 비용 함수를 선정하는데 있다. 또한 모델의 신뢰성과 타당성을 검증하기 위하여 모델을 통해서 얻어진 각 관절의 궤적과 실제 들기작업으로 부터 얻어진 각 관절의 궤적을 비교하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 3차원 Whole Body Lifting Posture Prediction Model

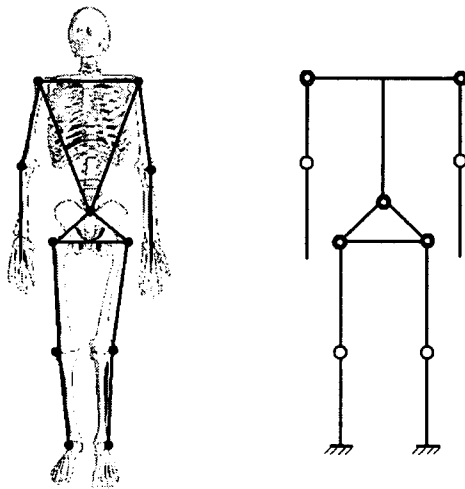
본 연구에서는 3차원 들기작업을 표현할 수 있도록 12 링크와 23자유도를 갖는 Whole Body Lifting Posture Prediction Model 을 사용하였다. 좌우 어깨 관절과, 좌우 고관절, 그리고 L5/S1 관절은 3개의 자유도를 갖는 Spherical Joint, 좌우 팔꿈치관절과 무릎관절은 1개의 자유도를 갖는 Hinge Joint, 그리고 발목관절은 2개의 자유도를 갖는 Universal Joint로 가정 하였다(그림 1). < 표 1>은 각 관절에서의 Movement를 나타낸 것이다. 또한 <그림 2>와 같이 모델은 Hands Constraint Condition에 의하여 크게 3개의 Modules(Legs, Trunk, Arms)로 된 Hybrid manipulator로 가정하였다. 즉, 이 모델에서는 손목 관절에서는 어떠한 축으로도 회전이 일어나지 않는 다고 가정하였으며, 양손 사이의 거리는 들기작업이 일어나는 동안에 항상 일정하게 유지된다고 가정하였다. 또한 들기작업 중의 어떠한 동작도 23개의 관절의 각도만 주어지면 나타낼 수 있다고 가정 하였다.

Whole Body Lifting Posture Prediction Model 의 원점은 양쪽 Ankle joint 의 중점으로 정하였다. X축은 오른쪽 발목관절에서 왼쪽 발목관절 방향으로, Z축은 중력과 반대되는 방향을 양의 방향으로 설정하였으며, Y축은 오른손 법칙에 따라 결정하였다.

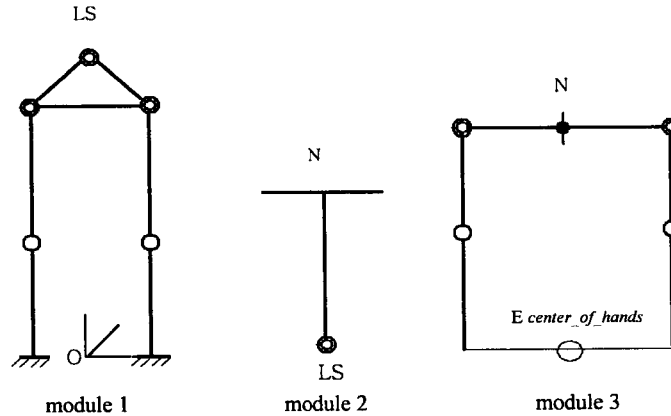
&lt; 표 1 &gt; Degrees of freedom of the model.

Joint	Degrees of freedom
R/L Ankle	Dorsal/Plantar Flexion, Inversion/Eversion
R/L Knee	Flexion/Extension
R/L Hip	Flexion/Extension, Abduction/Adduction, Internal/External Rotation
L5/S1	Flexion/Extension, Lateral Bending, CCW/CW Rotation
R/L Shoulder	Flexion/Extension, Abduction/Adduction, Internal/External Rotation
R/L Elbow	Flexion/Extension
12-link model with 23 degrees of freedom	

R/L represents right and left



&lt;그림 1&gt; Whole Body Lifting Posture Prediction Model



<그림 2> 3개의 모듈로 이뤄진 Whole Body Lifting Posture Prediction Model

각각의 모듈은 독립적인 매니플레이터로 생각할 수 있으므로, 첫번째 모듈에서 양다리의 자코비안

$$J_{leg}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{12}) = \frac{1}{2} [J_{r\_leg}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) | J_{l\_leg}(\theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{12})] \quad (1)$$

과 같이 표현된다. 또한, 두 번째와 세 번째 모듈에서 몸통과 양손의 자코비안은

$$J_{trunk}(\theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}) \quad (2)$$

과

$$J_{arm}(\theta_{16}, \theta_{17}, \dots, \theta_{23}) = \frac{1}{2} [J_{r\_hand}(\theta_{16}, \theta_{17}, \theta_{18}, \theta_{19}) | J_{l\_hand}(\theta_{20}, \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23})] \quad (3)$$

으로 나타내어진다. 따라서 3개의 모듈을 갖는 인체모델의 End-effector를 양손의 중심으로 보았을 때, End-effector의 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_e = \begin{bmatrix} T_{leg} J_{leg} & T_{trunk} J_{trunk} & T_{r\_hand} J_{r\_hand} & T_{l\_hand} J_{l\_hand} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{leg} \\ \dot{\theta}_{trunk} \\ \dot{\theta}_{r\_hand} \\ \dot{\theta}_{l\_hand} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$T_{leg} = \begin{bmatrix} I_3 & -[R_{O\_LS}(P_{LS\_N} + R_{LS\_N} P_{N\_Ec\_hands}) \times] \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} [I] \quad (5)$$

$$T_{trunk} = \begin{bmatrix} I_3 & -[R_{O\_LS}R_{LS\_N}P_{N\_Fc\_hand} \times] \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{O\_LS} & 0 \\ 0 & R_{O\_LS} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$T_{c\_hand} = [I] \begin{bmatrix} R_{O\_LS}R_{LS\_N} & 0 \\ 0 & R_{O\_LS}R_{LS\_N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

을 나타낸다.

또한,  $R_{ij}$  와  $p_{ij}$  는  $i$ 에서  $j$ 까지의 방향행렬과 위치벡터를 나타낸다. 위의 식을 이용하면 여러 개의 직렬모듈과 병렬모듈을 갖는 Hybrid Manipulator의 속도의 관계식을 쉽게 구할 수 있다.

## 2.2 Resolved Motion Method

여유자유도를 갖는 시스템에 대해서 관절의 회전 각  $\theta_i$ 의 set은 Unique한 값을 갖지 못하며 다중해를 갖는다. 이러한 여러가지 해집합 중에서 시스템의 주어진 조건에 맞는 최적의 해를 구하기 위하여, Liegeois의 Resolved Motion Method를 이용하여 Pseudo Inverse Solutions의 Set을 다음과 같은 식으로 구하도록 제안하였다[7].

$$\dot{\theta} = J^+ \{ \dot{x} + Kp(x_d - x) \} \pm \kappa (I - J^+ J) \nabla H(\theta) \quad (8)$$

여기서  $J^+$ 는 Moore-Penrose Pseudoinverse 자코비안을 나타내며,  $K$ 는  $m \times n$  positive diagonal matrix를,  $I$ 는  $n \times n$  identity matrix를 나타낸다. Coefficient  $\kappa$ 는 positive scalar value를 나타낸다.

$$\nabla H(\theta) = \left[ \frac{\partial H}{\partial \theta_1}, \frac{\partial H}{\partial \theta_2}, \frac{\partial H}{\partial \theta_3}, \dots, \frac{\partial H}{\partial \theta_n} \right]^T$$

는 performance function,  $H(\theta)$ 의 gradient로 나타내어진다. Resolved motion method 는 joint velocity 수준에서 여유 자유도를 갖는 Inverse Kinematics 문제를 푸는데 사용된다.

본 연구에서는 먼저 Performance Function으로 들기작업이 일어나는 동안에 자세의 변화를 반영시키기 위하여 시간의 함수인 모멘트를 가중치로 갖는 JRA를 선정하였고, 또한 Constant Weighted JRA와 비교하였다. 또한 하지에만 모멘트를 가중치로 주는 Hybrid Moment Weighted JRA를 새로운 Performance Function으로 하여 들기작업에 대한 동작예측 자세를 비교하였다.

### 2.3 들기작업 동작

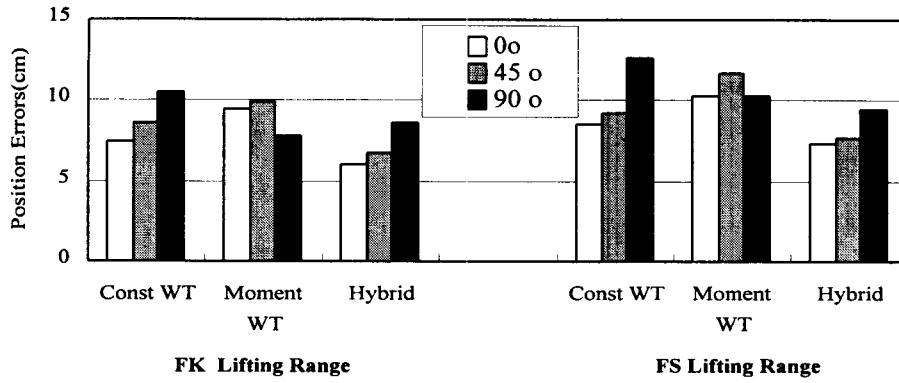
제안한 모델을 검증하기 위하여 5Kg의 물체를 2가지 들기구간(Floor to Knuckle, Floor to Shoulder)에서, 0°, 45°, 90°의 비대칭 각도를 갖는 들기작업을 실험하였다. 비대칭 각도의 정의는 그림 3과 같다. 실험은 8명의 남자 대학원생을 대상으로 양쪽 발끝(Toe)과 발목관절, 무릎관절, 고관절, 요추, 어깨관절, 팔꿈치관절과 양손의 중심에 총 15개의 마커를 부착하여 ProReflex(Qualy-sis Inc, USA)를 사용하여 들기작업 시의 각 관절의 궤적의 측정하였으며, 들기작업 시의 지면반발력(Bertec Corporation, USA)을 측정하여, 각 관절의 모멘트를 예측하는데 사용하였다. 실험에 참여한 피실험자들의 신체적 특성은 <표 2> 와 같다.

<표 2> 피실험자들의 신체적 특성

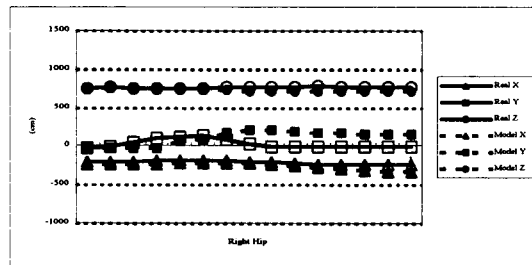
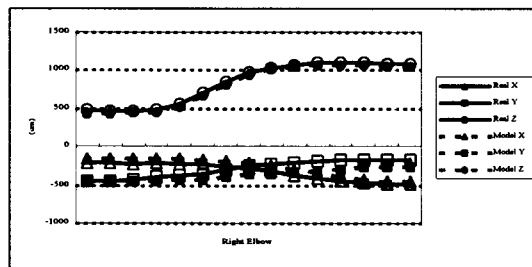
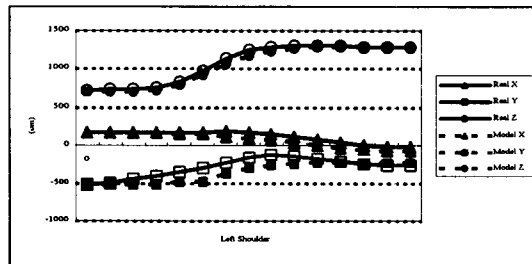
Subject	Age(yrs)	Height(cm)	Weight(kg)	MVIS(N)	
				H=30cm	H=98cm
Mean	25.50	173.3	64.8	76.91	43.03
S.D.	1.16	4.0	7.5	10.52	9.63

### 3. 모델의 검증

모델의 검증 방법으로 Position에 대한 Root Mean Square(RMS)을 통계적인 measure로 하였고, Graphical Comparison 을 통하여 자연스런 들기동작이 이루어지는가를 검증하였다. 그 결과, 이전의 Reach Posture Prediction[9]의 RMS값이 5cm 전후의값을 나타내는 것과 비교해볼 때 비교적 RMS값은 크게 나타났지만, Whole Body Motion인 점을 감안할 때, 비대칭성 들기작업을 비교적 잘 예측한다고 볼 수 있다. 특히 Hybrid Moment Weighted JRA가 Asymmetry가 0°와 45°에서 작은 RMS의 평균값을 갖는 것으로 나타났다(그림 3).



<그림 3> RMS값으로 나타낸 모델과 실제 작업간의 위치에러(단위:cm)

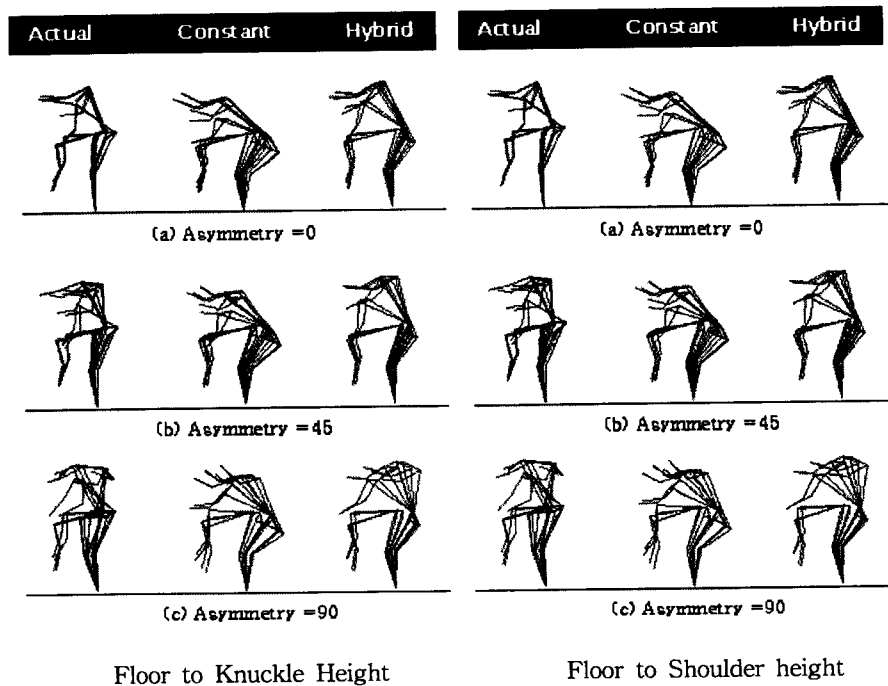


<그림 4> 피실험자 1의 실제 궤적과 모델을 통해 얻어진 궤적 간의 비교(예)  
(Range= Floor to Knuckle, Load=5Kg, Asymmetry=45°)



<그림 4>는 Floor to Knuckle의 들기구간에서 5kg의 물체를, Asymmetry가 45°인 지점에 들어올릴 때 피실험자 1의 왼쪽 어깨관절과 오른쪽 팔꿈치관절, 그리고 오른쪽 고관절에서의 궤적을 예로 나타낸 것이다. 실선은 들기작업 실험을 통해서 얻어진 실제 궤적을, 점선은 모델을 통해 얻어진 궤적을 나타낸 것이다. 피실험자들간의 차이는 조금 있으나 대부분의 경우 Asymmetry가 0°와 45°인 경우는 모델을 통해 얻어진 궤적은 실제 궤적과 매우 유사한 것으로 나타났다.

Whole Body Posture Prediction model을 이용한 비대칭 들기작업 동작의 예측 결과는 그림 5와 같다.



<그림 5> 모델을 통해 얻어진 예측 자세

전반적으로 Moment Weighted JRA를 비용함수로 하는 경우는 예측된 관절의 궤적은 무릎관절과 고관절, 요추에서 실제 측정된 값과 매우 유사하였으나 어깨관절과 팔꿈치관절에서는 실제 값과 매우 다른 형태를 나타내었고, 반면에 Constant Weight JRA을 사용하는 경우, 예측된 관절의 궤적은 어깨관절과 팔꿈치관절에서 실제 측정된 값과 매우 유사하였으나 무릎관절과 고관절, 그리고 요추에서는 실제 값과 매우 다른 형태를 나타내었다. 즉, Constant

Weight JRA를 비용함수로 하는 경우, 상지에서의 궤적을 잘 예측하지만 하지나 L5/S1 디스크에서의 궤적은 제대로 예측하지 못한 반면, Moment Weighted JRA를 비용함수로 하는 경우는 하지나 L5/S1에서의 비교적 잘 예측하나 상지에서의 궤적에 대한 예측은 이전의 것보다 못한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 새롭게 하지에만 모멘트를 가중치로 주는 Hybrid Moment Weighted JRA를 새로운 비용함수로 제안하였다. 그 결과 먼저 제안한 Moment Weighted JRA보다 좀 더 실제의 들기 작업을 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 비대칭 들기 작업에 대한 예측력이 좋은 것으로 나타났다.

#### 4. 결론 및 토의

비대칭 들기 작업은 산업현장에서 빈번히 일어나는 작업 중의 하나로 요통을 일으키는 주요원인이 되는 작업이나 이전의 인체역학 모델들은 모두 2차원으로 모델링 되었기 때문에 실제로 현장에서 일어나는 작업에 대한 평가를 제대로 할 수 없었으며, 인체의 각 관절에 걸리는 스트레스를 정확히 예측할 수 없었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 비대칭 들기 작업을 하는 동안에 인체의 움직임을 잘 표현할 수 있도록 인체 모델을 3차원으로 확장하였고, Resolved Motion Method를 이용하여 신체의 각 관절의 궤적을 예측할 수 있도록 하였다. 그 결과, 하지에만 모멘트를 가중치로 주는 Hybrid Moment Weighted JRA를 Performance Function으로 하는 경우  $0^\circ$ 와  $45^\circ$ 의 경우 FK와 FS구간에서 예측력이 뛰어난 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 모델은 비대칭성 들기 작업의 경우 비대칭 각도에 따라 다소의 예측치 오차가 존재하나 들기 작업의 난이도를 정량적으로 평가하는데 유용하게 사용되리라고 생각된다. 또한 모델이 3차원 Whole Body Model로 개발되었기 때문에 실제 현장에서 이루어지는 다양한 작업에 대한 인체의 움직임을 예측하는 모델로 사용할 수 있으며, 다양한 스포츠 종목에 대한 시뮬레이션 연구의 기초가 될 수 있으리라고 생각된다. 그러나 Predicted Error를 좀더 줄일 수 있는 인체 모델과 새로운 목적함수의 개발, 작업에 따른 제약조건에 대한 고려가 이루어져야 할 것이다.

## 5. 참고문헌

- [1] Ayoub, M. M., "Biomechanical of manual material handling through simulation", Proceedings of The 3rd Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics, pp.376-380, 1994.
- [2] Chang, C., Brown, D. R., Bloswick, D. S. and Hsiang, S. M., "Biomechanical simulation of manual lifting using spacetime optimization", J. Biomechanics, 34, pp. 527-532, 2001.
- [3] Hsiang, M. S., "Simulation of manual materials handling", Ph.D. Dissertation, Texas Tech. University, 1992.
- [4] Hsiang, S. M. and Mcgorry, R. W., "3 different lifting strategies for controlling the motion patterns of the external load", Ergonomics, 40, 9, pp. 928-939, 1997.
- [5] Kee, D.H., Development of an ergonomic evaluation model for improved visibility and reach. Ph.D. Dissertation, POSTECH, 1993.
- [6] Lee, Y. H. T., An optimization approach to determine manual lifting motion. Ph.D. Dissertation, Texas Tech. University, 1988.
- [7] Liegeois, A., "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-7,12, pp.868-871, 1977.
- [8] Lin, C. J., Ayoub, M. M. and Bernard, T. M., "Computer motion simulation for sagittal plane lifting activities", Int. J. of Industrial Ergonomics, 24, pp. 141-155, 1999.
- [9] Shin, Y., A two-handed reach prediction model with visual and postural constraints. Ph.D. Dissertation, POSTECH, 2000.
- [10]Zhang, X. and Chaffin, D. B., "An optimization-based differential inverse kinematics approach for modeling three-dimensional dynamic postures during seated reaching movements", Dept. of IOE, U. of Michigan, Ann Arbor, Technical Report, TR96-15, 1996.
- [11]Zhang, X. and Chaffin, D. B., "An optimization-based differential inverse kinematics approach for modeling three-dimensional dynamic seated reaching postures", 21th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, Clemson University, South Carolina, September, pp. 24-27, 1997.

## 저 자 소 개

최경임 : 이화여자대학교 물리학과 졸업하고, 포항공과대학교에서 기계공학과와 산업공학과에서 석사와 박사학위를 취득하였으며, 현재 포항공과대학교 기계산업공학부에서 박사 후 연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 인간공학, Simulation of human motion, 제품디자인 등이다.